

بررسی غلظت محلول خورنده بر ترک خوردگی تنشی آلیاژ AA7075-T6 با بهره‌گیری از روش‌های کمی و تبدیل موجک سیگنال‌های آکوستیک امیشن

سعید حاجی قاسمی^۱، جعفر اسکندری جم^۲، حمید فاضلی^{۳*}، حسین حیدری^۴، مهدی احمدی نجف‌آبادی^۵

^۱ دانشجوی دکتری، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران

^۲ استاد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران

^{۳*} دانشیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران

^۴ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش

^۵ استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران

* نویسنده مسئول: Fazeli@mut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰

چکیده

ارزیابی و پایش ترک خوردگی تنشی (SCC) در فلزات به‌ویژه آلیاژهای آلومینیومی با سختی بالا، به دلیل گسترش کاربرد این آلیاژها و خطرات جدی این نوع خوردگی، جایگاه ویژه‌ای در صنایع مختلف پیدا کرده است. در این تحقیق، به منظور پایش سیگنال‌های آکوستیک امیشن، از تکنیک تبدیل موجک بسته‌ای (WPT) و روش‌های کمی و پارامتری به منظور بررسی اثر غلظت محلول خورنده بر SCC آلیاژ AA7075-T6 استفاده شد. بر اساس تحلیل زمانی سیگنال‌ها و کمی‌سازی داده‌ها، مشخص شد که ارتباط خطی قابل توجهی میان نرخ رشد ترک، انرژی و شمارش تجمعی وجود دارد. این وابستگی در محلول ۳۳٪ HCl نسبت به محلول ۹٪ HCl به صورت واضح‌تری مشاهده شده و تفاوت در مقدار پارامترهای مذکور به خوبی نشان داده شده است. علاوه بر این، با استفاده از روش WPT و بر اساس درصد انرژی به دست آمده برای هر عنصر، فرکانس‌های غالب مرتبط با منابع صوتی مربوطه، شامل گسیختگی پیوندهای فلزی باقی‌مانده، جوانه‌زنی و ایجاد ریز ترک‌ها و رشد ترک شناسایی شدند که در محیط با غلظت بالاتر، افزایش درصد انرژی در المان ابتدایی مشاهده گردید.

کلیدواژه: ترک خوردگی تنش، آلیاژ آلومینیومی، آکوستیک امیشن، محلول خورنده، تبدیل موجک بسته‌ای.

Investigation of Corrosive Solution Concentration on SCC of AA7075-T6 Alloy Using Quantitative Methods and Wavelet Transform of Acoustic Emission Signals

S. Hajighasemi ¹, J. Eskandari Jam ², H. Fazeli ^{3*}, H. Heidary ⁴, M. Ahmadi Najafabadi⁵

¹ PhD student, Faculty of Material & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology.

² Professor, Faculty of Material & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology.

^{3*} Associate Professor, Faculty of Material & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology.

⁴ Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Tafresh University.

⁵ Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Amirkabir University of technology.

* Corresponding Author: Fazeli@mut.ac.ir

Submission: 2025, 10, 11 Acceptance: 2025, 12, 20

Abstract

The evaluation and monitoring of stress corrosion cracking (SCC) in metals, particularly in high-strength aluminum alloys, have become increasingly important across various industries due to the growing use of these materials and the severe consequences of SCC failures. In this study, Acoustic Emission (AE) signals were analyzed using the wavelet packet transform (WPT) technique in combination with quantitative and parametric methods to investigate the influence of corrosive solution concentration on the SCC behavior of AA7075-T6 alloy. Time-domain analysis of AE signals revealed a distinct linear relationship between crack growth rate, signal energy, and cumulative counts. This relationship was more pronounced in a HCl33% solution compared to a HCl9% solution, demonstrating clear variations in the corresponding parameters. Furthermore, WPT-based frequency analysis enabled the identification of dominant frequency bands associated with specific AE sources, including bond rupture, microcrack nucleation, and crack propagation. In higher-concentration environments, a greater proportion of signal energy was concentrated in the lower-frequency components. These findings highlight the capability of AE combined with WPT analysis as an effective tool for real-time monitoring and characterization of SCC processes in high-strength aluminum alloys.

Keywords: Stress corrosion cracking, Aluminum alloy, Acoustic emission, Corrosive solution, Wavelet packet transform.

۱- مقدمه

ارزیابی ترک خوردگی تنش (SCC)^۱ نمونه‌های آلومینیومی آلیاژی حاوی عناصر روی، منیزیم و مس در محیط‌های مختلف خورنده در سال‌های اخیر مورد مطالعه قرار گرفته است. در این میان، آلیاژ AA7075-T6 با میزان روی حدود ۵/۵٪ و منیزیم حدود ۳٪ با توجه به مشخصات فیزیکی و خصوصیات مکانیکی خاص خود از جمله استحکام ویژه زیاد مورد توجه تولیدکنندگان و بخش‌های مختلف صنعتی گردیده است [۱ و ۲]. این نوع آلیاژ که با عملیات حرارتی پیرسازی مصنوعی همراه است در برخی محیط‌های خورنده از جمله محیط‌های محلول حاوی کلر، نسبت به پدیده ترک خوردگی تنش حساسیت بیشتری از خود نشان می‌دهد. همچنین علاوه بر محیط خورنده، پارامترهای بارگذاری کششی و شرایط سطحی از قبیل زبری سطح و تنش پسماند نیز می‌تواند بر این نوع خوردگی تاثیرگذار باشد [۳-۵].

ارزیابی و شناخت ماهیت و فرآیند پیچیده ایجاد، پیشروی و رشد خوردگی تنش که به مرور زمان شکل می‌گیرد، اهمیت بالایی یافته است؛ چراکه می‌تواند منجر به بروز آسیب‌های جدی در صنایع مختلف شود. به عنوان نمونه، نشتی ایجاد شده در برخی از درایرهای پتروشیمی شهید تندگویان طبق پژوهش حقیری و همکاران [۶] و یا مشکلات مرتبط با خطوط لوله که در مطالعات صادقی و همکاران [۷] به آن اشاره شده، از جمله پیامدهای این پدیده هستند. بنابراین، برای بررسی دقیق‌تر و مقابله با این مشکل، نیاز به توسعه و استفاده از روش‌ها و مکانیسم‌های نوین تحقیقاتی و مطالعاتی وجود دارد. در این میان، بهره‌گیری از روش آکوستیک امیشن^۲ برای پایش این فرآیند در دهه‌های اخیر توسط محققین مورد توجه قرار گرفته و نتایج رضایت‌بخشی را به همراه داشته است [۸-۱۲].

این تکنیک غیرتهاجمی، غیرمخرب و آنالین، امکان ارزیابی و نظارت مداوم در محل تجهیزات و سازه‌ها را فراهم می‌کند و می‌تواند برای پایش و کنترل سلامت سازه مورد استفاده قرار گیرد [۱۳]. مطابق شکل ۱، اساس این روش بر مبنای تجزیه و تحلیل امواج الاستیکی دریافت شده از منابع و عیوب موج

ود در سیستم می‌باشد که طرح شماتیکی از منابع ناشی از ترک خوردگی تنش در شکل ۲ قابل مشاهده می‌باشد. این امواج منتشر شده در ماده خاصیتی گذرا و غیرپایدار دارند که جهت تحلیل این امواج (سیگنال آکوستیک امیشن) نیازمند بهره‌گیری از روش‌ها و مکانیزم‌های مناسب پردازش سیگنال و متعاقباً استخراج و تحلیل ویژگی‌هایی از سیگنال می‌باشد. آنالیزهای طیفی در حوزه فرکانس و آنالیزهای آماری در حوزه زمان عمدتاً برای بررسی سیگنال‌های پایدار مطلوب هستند ولیکن جهت سیگنال‌های گذاری مربوط به آکوستیک امیشن، این دو نوع آنالیز کفایت نمی‌کند و همچنین انتقال داده‌ها در این حوزه‌های ذکر شده، منجر به از دست رفتن یک سری اطلاعات و داده‌ها خواهد شد [۱۴].

برای حل مشکل اشاره شده، تبدیل فوریه زمان کوتاه مطرح گردید که این روش هم به دلیل نواقص مربوطه موفقیت و گسترش چندانی پیدا نکرد. با توسعه آنالیزهای در حوزه زمان-فرکانس، این نقصان تا حد زیادی برطرف گردید و در میان روش‌های مربوط به این حوزه، تبدیل موجک جزو روش‌های پیشرو و در حال گسترش می‌باشد.

برخی کارهای قبلی نشان دادند که تبدیل موجک پیوسته (CWT)^۳ به عنوان ابزاری برای ارزیابی سیگنال‌های آکوستیک امیشن روی مواد مختلف و تحت شرایط بارگذاری مختلف قابل کاربرد است [۱۵].

سوزوکی و همکاران [۱۶]، از روش تبدیل موجک جهت بررسی و مطالعه برخی مودهای شکست و سینتیک در مواد به ویژه برای کامپوزیت‌های GFRP استفاده نمودند و از این روش تبدیلی به عنوان یک ابزار تحلیلی برای ارزیابی سیگنال‌های آکوستیک امیشن بهره بردند. در خصوص کامپوزیت‌ها بالاخص GFRP پژوهش‌های دیگری توسط محققین [۱۷-۱۹] انجام گردید و با استفاده از جمع‌آوری داده‌های AE در تست کشش و بر اساس برنامه‌های توسعه یافته تبدیل موجک (از طریق موجک مادر دیچز^۴) رفتارهای شکست ارزیابی گردید و در مقایسه با روش مکانیک شکست و آنالیز معمولی آکوستیک

¹ Stress Corrosion Cracking (SCC)

² Acoustic Emission (AE)

³ Continuous Wavelet Transform (CWT)

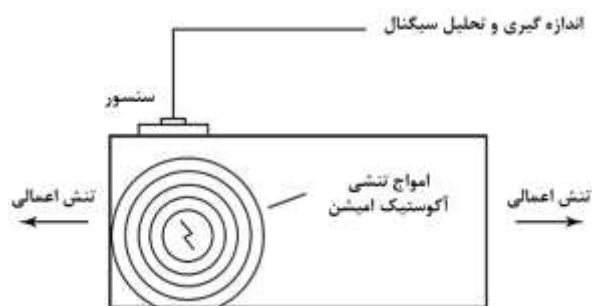
⁴ Daubechies mother wavelet

موجک در پردازش سیگنال‌های حاصله از مواد و تجهیزات مختلف، نظر بسیاری از پژوهشگران [۲۲-۲۷] را به خود جلب نموده است. در این راستا می‌توان به آنالیز حوزه زمان-فرکانس سیگنال‌های آکوستیک امیشن جمع آوری شده از کف مخزن ذخیره روی زمین با روش بسته موجک توسط بای و همکاران [۲۸] اشاره نموده که ارتباط مطلوبی بین رفتار خوردگی تنش و فعالیت آکوستیک امیشن مربوطه پدیدار گشت.

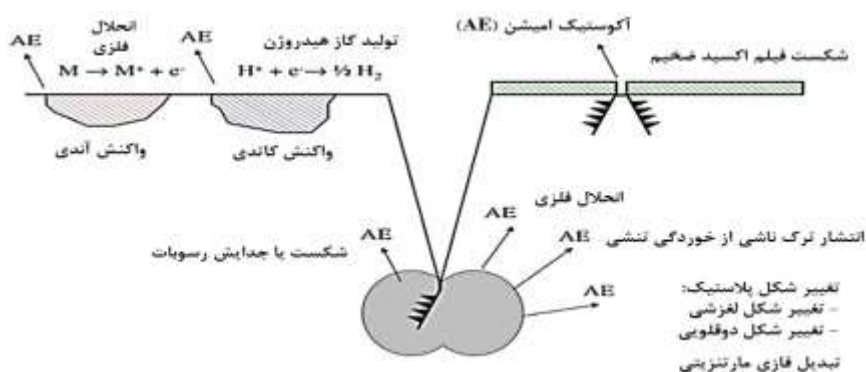
مطابق ارزیابی‌های صورت گرفته تاکنون روی اثر محلول خورنده در ترک خوردگی تنش آلیاژ AA7075-T6 با استفاده از آنالیز موجک بسته‌ای، مطالعه جامعی صورت نگرفته است که در این تحقیق در نظر است با بهره‌گیری از این روش، بررسی پارامتر محلول خورنده و تحلیل سیگنال‌های آکوستیک امیشن مربوط به فرآیند SCC انجام پذیرد.

امیشن، این نوع روش مبتنی بر موجک، تقریب‌های بهتری ارائه داد. در تحقیقات وانگ و همکاران [۲۰] براساس تبدیل موجک بسته‌ای و استفاده از شاخص جدید ECD (مقاومت انحنای انرژی) آسیب در سازه‌ها (برای نمونه، کاهش سفتی) را شناسایی و تحلیل نمودند.

در مطالعه دیگری، هان و همکاران [۲۱]، شاخص نرخ انرژی بر اساس تبدیل موجک بسته‌ای^۱ برای تشخیص آسیب در سازه‌های تیرمانند را پیشنهاد دادند که در آن سیگنال‌های اندازه‌گیری شده به مولفه‌های بسته موجک تجزیه شده و بر این اساس شاخص نرخ انرژی وابسته به موجک، آسیب سازه‌ای مربوطه را نمایان می‌سازد. در این زمینه، شبیه‌سازی‌هایی نیز برای ارزیابی کامل‌تر صورت گرفته که نتایج مطلوبی را به دنبال داشته است. علاوه بر نمونه مطالعات ذکر شده، استفاده از آنالیز بسته‌ای



شکل ۱. اصول پایه تکنیک آکوستیک امیشن بر مبنای انتشار امواج [۱۳].



شکل ۲. طرح شماتیکی از منابع مختلف آکوستیک امیشن در پدیده ترک خوردگی تنش [۱۴].

¹ Wavelet Packet Transform (WPT)

۲-۱- تبدیل موجک

در ابتدای دهه ۱۹۸۰، تبدیل موجک توسط مورلت و همکارانش جهت تحلیل داده‌های زلزله معرفی شد. از آن زمان تا به امروز، انواع گوناگونی از تبدیل‌های موجک توسعه پیدا کرده‌اند و کاربردهای متنوعی را به خود اختصاص داده‌اند. این نوع تبدیل دارای مزایای متعددی نسبت به سایر روش‌های زمان-فرکانس مانند تبدیل فوریه زمان کوتاه و تبدیل ویگنر-ویل است که یکی از مهم‌ترین این مزایا تفکیک پذیری بالا محسوب می‌شود [۲۹].

در تبدیل‌های فرکانسی نظیر FFT و تحلیل‌های زمان-فرکانسی، بخشی از سیگنال در حوزه زمان، که به آن پنجره زمانی گفته می‌شود، انتخاب شده و طیف فرکانسی آن با استفاده از الگوریتم مربوط به تبدیل مورد استفاده محاسبه می‌گردد. در روش STFT، طول پنجره‌های زمانی انتخاب شده ثابت است، در حالی که تحلیل موجک امکان پنجره‌بندی با اندازه‌های متغیر را به شیوه‌ای منطقی فراهم می‌کند. تبدیل موجک قابلیت ارائه رزولوشن متفاوتی از سیگنال اولیه را دارد، با تنظیم پنجره‌هایی با اندازه بزرگ برای اطلاعات فرکانس پایین و بازه‌های زمانی کوچک برای فرکانس‌های بالا، به طوری که طیف وسیعی از جزئیات فرکانسی به طور مؤثر پوشش داده شود [۳۰].

درواقع در تبدیل موجک به جای تجزیه سیگنال به هارمونیک‌ها، به توابع اصلی موضعی به نام موجک‌ها تفکیک می‌شود. هر موجک دارای انرژی محدودی است و در موقعیت متفاوتی نسبت به موجک‌های دیگر در روی محور زمان قرار می‌گیرد. تابع موجک ψ در هر دو حوزه زمان و فرکانس محدود شده و قابلیت اعمال انتقال به میزان b در حوزه زمان و مقیاس کردن (کشیدن و یا فشردن سیگنال) به میزان a در حوزه فرکانس را داراست. به این ترتیب به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود [۳۱]:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a > b \in \mathbb{R} \quad (1)$$

رزولوشن زمانی و فرکانسی تبدیل موجک، به مقدار مقیاس a بستگی دارد. همانند تبدیل فوریه، تحلیل موجک نیز در دو حالت تبدیل موجک پیوسته (CWT) و تبدیل موجک گسسته (DWT) بیان می‌شود. CWT اغلب در آنالیز داده‌ها و DWT نیز تقریباً در همه زمینه‌های تکنیکی شامل فشرده‌سازی تصویر،

بی‌نویز کردن و شناسایی الگو به کار می‌رود [۳۲]. تبدیل موجک پیوسته $f(t)$ (هر تابع مربعی انتگرال پذیر) بر اساس موجک ψ مطابق معادله (۲) و تبدیل موجک معکوس آن نیز بر اساس رابطه‌های (۳) و (۴) ارائه می‌شود [۳۱]:

$$CWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2)$$

$$f(t) = \frac{1}{C} \int_{a=-\infty}^{+\infty} \int_{b=-\infty}^{+\infty} \frac{1}{|a|^2} CWT(a, b) \psi(t) da db \quad (3)$$

$$C = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega \quad (4)$$

تابع موجک در حالت گسسته به صورت رابطه (۵) بیان می‌شود:

$$\psi_{j,k}(n) = 2^{-\frac{j}{2}} \psi(2^{-j}n - k), \quad (j, k) \in \mathbb{Z}^2 \quad (5)$$

و ضرایب DWT سیگنال زمان گسسته $x(n)$ از طریق روابط (۶) و (۷) محاسبه می‌گردند [۲۹]:

$$C(j, k) = \sum_{n \in \mathbb{N}} x(n) \cdot \psi_{j,k}^*(n) \quad (6)$$

$$D_j(n) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} C(j, k) \psi_{j,k}(n) \quad (7)$$

در فرآیند جداسازی موجک گسسته، یک سیگنال به دو بخش تقسیم می‌شود: بخش تقریب و بخش جزئیات. بخش تقریب نشان‌دهنده فرکانس‌های پایین سیگنال است، در حالی که بخش جزئیات شامل فرکانس‌های بالا می‌باشد. در مرحله بعد، بخش تقریب تولید شده دوباره به یک تقریب و یک جزئیات دیگر تفکیک می‌شود. این روند تا زمانی که به سطح مورد نظر برسد ادامه خواهد یافت. اطلاعات ازدست رفته بین دو تقریب متوالی در جزء موجود هست. برخلاف موجک گسسته که در آن جزئیات متوالی دوباره تحلیل نمی‌شوند، در موجک بسته، بخش جزئیات نیز مانند شکل ۳ به دو قسمت دیگر تجزیه می‌گردد. از اینرو، موجک بسته تحلیل دقیق‌تری ارائه می‌دهد [۳۳]. برای اساس، جزء در یک نود خاص مطابق رابطه (۸) قابل محاسبه می‌باشد [۳۴ و ۳۵].

$$f_j^i(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} c_{j,k}^i \psi_{j,k}^i(t) \Delta t \quad (8)$$

در رابطه فوق، $\psi_{j,k}^i$ تابع بسته موجک (i پارامتر مدولاسیون، j پارامتر مقیاس و k پارامتر انتقال) می‌باشد و ضرایب موجک بسته‌ای متناظر با سیگنال $f(t)$ مطابق رابطه (۹) تعیین می‌گردد.

همچنین می‌توان انرژی المان i در تراز j ام ($E_j^1 \dots E_j^i$) و انرژی کل سیگنال (برابر مجموع انرژی‌های تمام المان‌ها) را به ترتیب بر اساس روابط ۱۳ و ۱۴ محاسبه نمود.

$$E_j^i(t) = \sum_{\tau=t_0}^t (f_j^i(\tau))^2 \quad (13)$$

$$E_{Total}(t) = \sum_j E_j^i(t) \quad (14)$$

در ادامه، می‌توان نسبت انرژی در المان‌های مختلف به انرژی کل را تعیین کرد تا بر اساس رابطه ۱۵، درصد انرژی برای هر المان محاسبه شود. در این رابطه، $P_j^i(t)$ نشان‌دهنده نسبت توزیع انرژی در هر سطح است.

$$P_j^i(t) = \frac{E_j^i(t)}{E_{Total}(t)}, i = 1 \dots 2^j \quad (15)$$

$$c_{j,k}^i = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{j,k}^i(t) dt \quad (9)$$

بعد از تجزیه موجک بسته‌ای به تراز j ام، سیگنال اصلی می‌تواند به صورت مجموعی از تمام اجزای موجک بسته‌ای طبق معادله (۱۰) نشان داده شود.

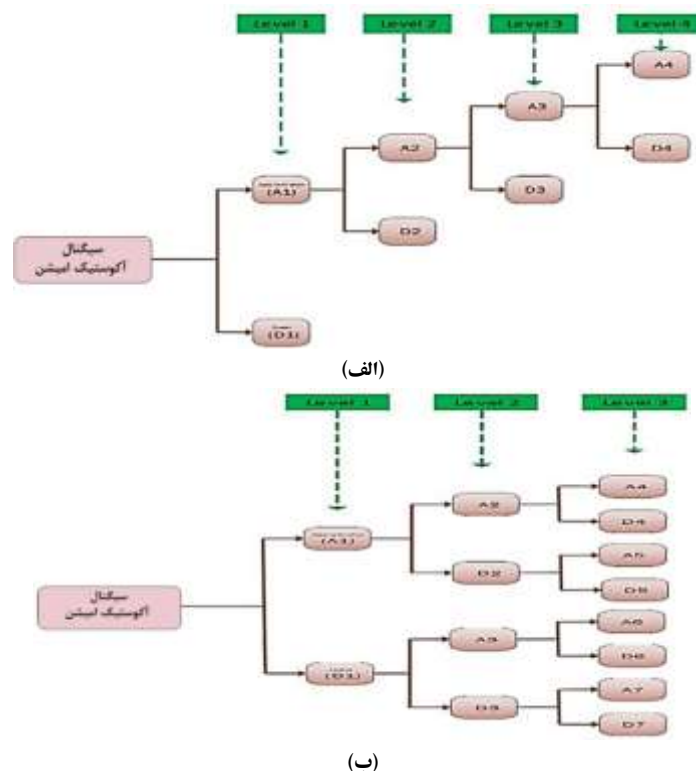
$$f(t) = \sum_{i=1}^{2^j} f_j^i(t) \quad (10)$$

مطابق رابطه فرکانس تجزیه موجک بسته‌ای، محدوده فرکانس تقریب و جزء تراز j ام به ترتیب مطابق روابط (۱۱) و (۱۲) تعریف می‌گردند.

$$\left[0, \frac{1}{2} f_s 2^{-j}\right] \quad (11)$$

$$\left[\frac{1}{2} f_s 2^{-j}, \frac{1}{2} f_s 2^{-(j-1)}\right] \quad (12)$$

که f_s نرخ نمونه‌برداری می‌باشد.



شکل ۳. ساختار درختی تبدیل موجک‌ها، (الف) دیاگرام تجزیه تبدیل موجک گسسته (DWT)، (ب) دیاگرام تجزیه تبدیل موجک بسته‌ای (WPT).

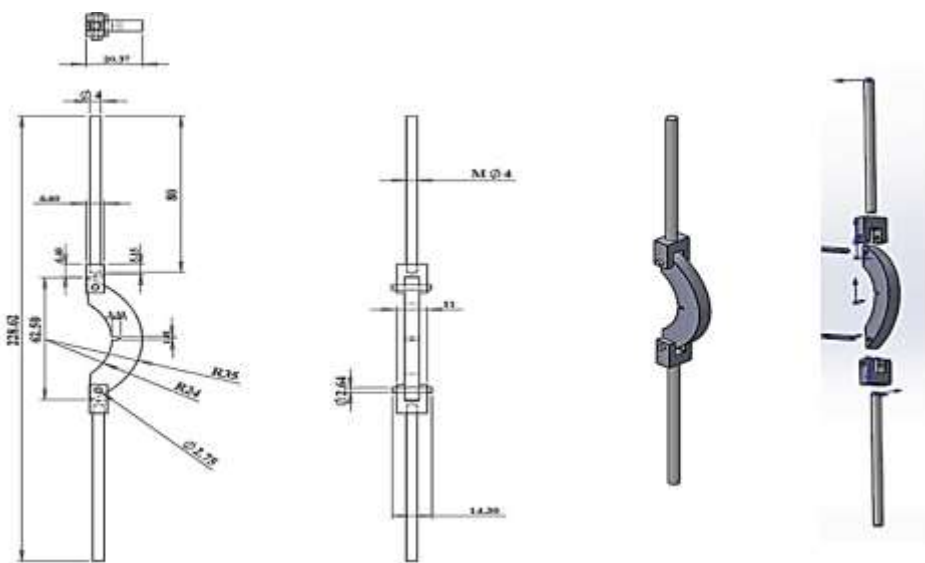
۲- مواد و روش تحقیق

در پژوهش حاضر از لوله آلومینیومی T6-AA7075 که تحت عملیات حرارتی استاندارد T6 (شامل محلول‌سازی و سپس پیرسازی مصنوعی) قرار گرفته است، استفاده گردید. مشخصات و ترکیب شیمیایی این آلیاژ در جدول ۱ ارائه شده است. نمونه‌های آزمون کششی قوسی شکل دارای پیش‌ترک خستگی، مطابق شکل ۴ براساس استاندارد ASTM E399 طراحی و ساخته شدند. غلظت‌های مختلف محلول خورنده HCl (۹٪ و ۳۳٪) به منظور ایجاد کنتراست مناسب در شدت حمله خورنده و بررسی سیستماتیک اثر این پارامتر، مبتنی بر روش‌های متداول در مطالعات خوردگی آلیاژهای آلومینیوم [۵]، انتخاب گردیدند. آزمون‌های کشش با نرخ کرنش آهسته (SSRT) با سرعت کشش ۵۰ mm/s و با استفاده از یک دستگاه یونیورسال آزمون کشش (ساخت شرکت Dartec و با قابلیت اعمال نیرو تا ۵۰ kN) مطابق شکل ۵ انجام پذیرفت. انتخاب این نرخ کرنش

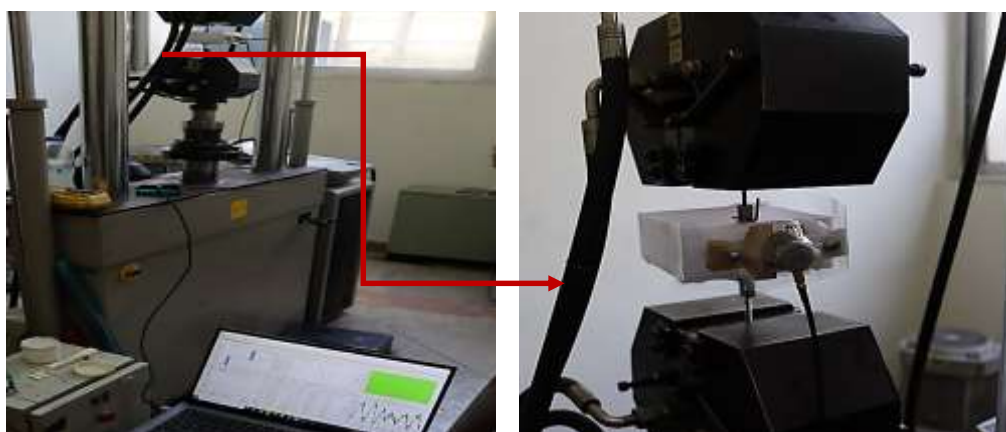
ثابت، بر اساس پیشینه تحقیقاتی و استانداردهای مرجع برای مطالعه پدیده SCC در این آلیاژ بوده است [۳ و ۴]. همزمان با آغاز عملیات کشش، داده‌های اکوستیک امیشن توسط سیستم شرکت Vallen به همراه نرم‌افزار مربوطه (Vallen AE Suite) ثبت گردید. در این آزمایش از سنسور پیزوالکتریک مدل Vallen-VS150-MS با پهنای باند زیاد استفاده شد و برای اطمینان از انتقال حداکثری امواج، از گریس سیلیکون به عنوان ماده حد واسط بین نمونه و سنسور بهره گرفته شد. برای حذف نویزهای پیش‌زمینه، سنسور را بر روی ویوگاید متصل به نمونه نصب کرده و سرعت دستگاه کشش را بر روی سرعت آزمون تنظیم کرده و حد آستانه سیستم AE را آن‌قدر بالا برده می‌شود تا هنگام دریافت سیگنال‌های مفید، هیچ سیگنال نامطلوبی دریافت نگردد که در این آزمایش حدود ۴۰ دسی‌بل معین گردید. بدین ترتیب نویزهای پیش‌زمینه ناشی از محیط اطراف و نیز دستگاه کشش حذف خواهند شد.

جدول ۱. مشخصات و ترکیب شیمیایی آلیاژ AA7075-T6

آلیاژ	(%) Al	(%) Cr	(%) Cu	(%) Fe	(%) Mg	(%) Mn	(%) Si	(%) Ti	(%) Zn	سایر عناصر	چگالی (gr/cm3)
AA7075-T6	۸۹	۰/۲۸	۱/۶	۰/۴	۲/۸	۰/۳	۰/۴	۰/۲	۵/۵	باقیمانده	۲/۷۱



شکل ۴. تجهیزات نگهدارنده و نحوه بستن نمونه آزمون کششی قوسی شکل مطابق استاندارد.



شکل ۵. نحوه تنظیمات و نصب ویوگاید متصل به نمونه آزمون و سنسور آکوستیک امیشن در محفظه خورنده.

۳- نتایج و بحث

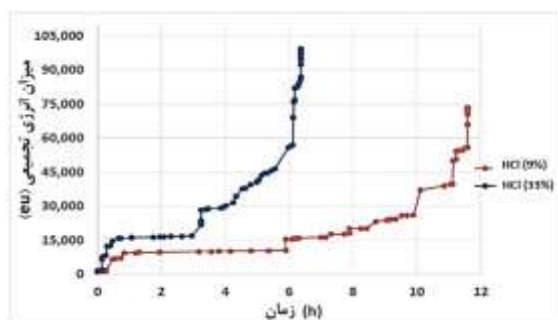
۳-۱- بررسی پارامتری و کمی سیگنال‌های آکوستیک امیشن

نمودار مقایسه‌ای میزان شمارش تجمعی ضرب‌آهنگ‌های تجمعی و انرژی تجمعی ثبت شده از سیستم آکوستیک امیشن را در حین فرآیند ترک خوردگی تنش نمونه آلومینیوم 7075-T6 در دو محیط خورنده $HCl(9\%)$ و $HCl(33\%)$ در شکل ۶ نمایش داده شده است.

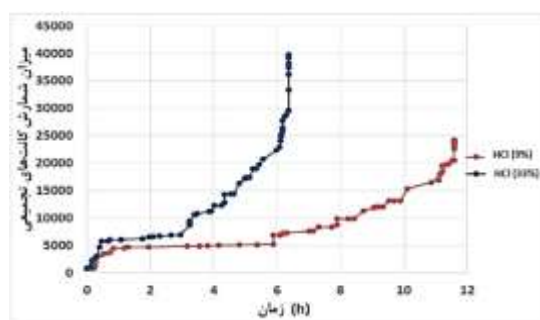
همانطور که ملاحظه می‌گردد با افزایش میزان غلظت HCl ، ترک خوردگی تنش در فاصله زمانی کوتاه‌تر و با نرخ نسبتاً بالاتری ایجاد و پیشروی نموده است. به عبارتی شروع (جوانه‌زنی) ترک و ایجاد میکروترک در محلول با غلظت بیشتر در فاصله زمانی کوتاه‌تر از شروع آزمایش رخ داده است. با توجه به اینکه ترک خوردگی تنش یک فرآیند تخریبی

تأخیری می‌باشد، در مرحله شروع و ایجاد ترک در ماده، تنش مکانیکی و محیط خورنده در تعامل با یکدیگر هستند تا زمانی که شرایط موضعی در ناحیه نوک ترک به حالت بحرانی رسیده و منجر به گسترش ترک شود. قابل توجه است که این مرحله با افزایش غلظت محلول خورنده، در بازه زمانی کوتاه‌تری رخ می‌دهد.

در این راستا، میزان شمارش ضرب‌آهنگ‌های تجمعی و میزان انرژی سیگنال افزایش یافته که نشان از افزایش فعالیت و شدت سیگنال‌های دریافتی در این آزمایش می‌باشد. این موضوع به این دلیل می‌تواند باشد که افزایش غلظت یون‌های H^+ و Cl^- می‌تواند باعث تخریب بیشتر اکسید فیلم روی آلیاژ شده و از شکل‌گیری فیلم غیرفعال جدید جلوگیری کرده که منجر به افزایش چگالی جریان خوردگی و واکنش‌های آندی فعال‌تر در حضور غلظت بالاتر یون‌های H^+ و Cl^- می‌گردد.



(ب)



(الف)

شکل ۶. نمودار مقایسه‌ای میزان تجمعی پارامترهای آکوستیک امیشن برای نمونه آزمون با شرایط آزمایش مشخص شامل دو محیط خورنده $HCl(9\%)$ و $HCl(33\%)$ شامل الف) شمارش ضرب‌آهنگ‌ها بر حسب زمان، ب) انرژی بر حسب زمان.

$$y = 0.00035x - 0.28167 \quad (۱۶)$$

$$y = 0.00020x - 0.3714 \quad (۱۷)$$

مطابق نمودار و روابط اشاره شده، مشخص گردید که هر چند شیب خط نمودار نرخ رشد ترک و نرخ Count تجمیعی در محیط خورنده HCl33% کمتر (حدود ۴۲٪) از محیط خورنده HCl9% می‌باشد ولیکن طبق نمودار، میزان نرخ رشد ترک و نرخ Count تجمیعی در محیط خورنده HCl33% نسبت به محیط HCl9% به مراتب بیشتر (حدود دو الی سه برابر) می‌باشد و در یک زمان مشخص، میزان نرخ رشد ترک خوردگی تنش با افزایش میزان غلظت، ازدیاد قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت.

همچنین مطابق فرمول‌های تجربی فوق، در حین کاربردهای واقعی و یا عملیاتی می‌توان سیگنال‌های آکوستیک امیشن را در یک دوره مشخص پایش نمود و متعاقباً نرخ تجمیعی شمارش ضرب آهنگ‌ها را بدست آورد. سپس نرخ رشد ترک بر اساس معادله اشاره شده قابل پیش‌بینی می‌باشد.

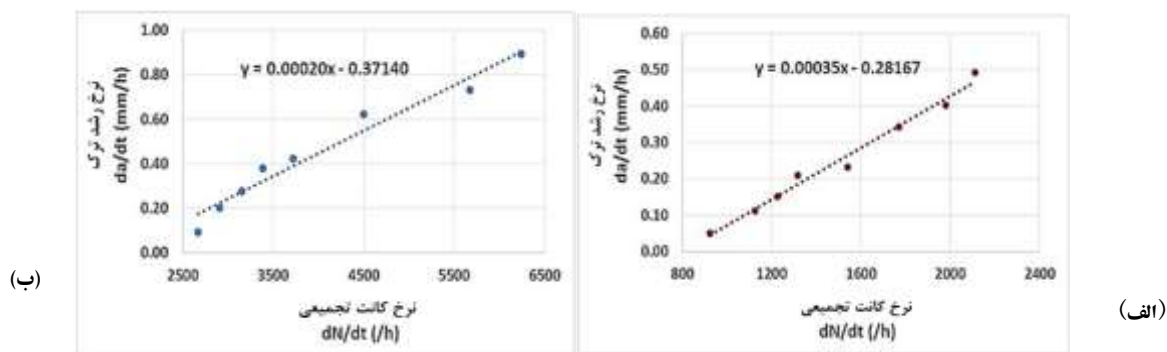
لازم به ذکر است که در این روابط، مقدار عرض از مبدا منفی است.

این بدان معناست که وقتی نرخ رشد ترک صفر است، هنوز می‌توان برخی از سیگنال‌های آکوستیک امیشن را تشخیص داد که با مفهوم ضریب شدت تنش بحرانی (K_{ISCC}) سازگار است. به عبارت دیگر، وقتی ضریب شدت تنش (K) از K_{SCC} بیشتر شود، ترک شروع به رشد می‌کند. اگر K کمتر از مقدار بحرانی باشد، می‌توان گفت که تغییر شکل پلاستیک رخ داده است و بر این اساس، سیگنال‌های AE قابل شناسایی نیز تولید می‌شوند. بنابراین، این عرض از مبدا می‌تواند به K_{SCC} مربوط باشد.

همچنین رسوبات ریزی از جمله $MgZn_2$ منتسب به فاز η در آلیاژ 7075-T6 وجود دارد که نسبت به فاز زمینه به عنوان آند عمل نموده و به‌طور پیوسته در راستای مرزخانه‌ها توسعه پیدا کرده‌اند [۳۶].

با توجه به این نمودارها می‌توان استنباط نمود که با افزایش غلظت محیط خورنده، جوانه‌زنی ترک و انحلال این رسوبات با نرخ بیشتری انجام می‌گیرد و در محیط خورنده HCl33% انحلال این رسوبات، رشد ترک را تحت تنش کششی تسریع بخشیده و مدت زمان شکست نهایی ناشی از SCC را تقریباً به نصف مدت زمان مربوط به محیط خورنده HCl9% افزایش می‌دهد.

برای کمی کردن ارتباط و تاثیر میزان غلظت بر سیگنال‌های آکوستیک امیشن دریافتی در فرآیند ترک خوردگی تنش، وابستگی بین نرخ رشد ترک (da/dt) و نرخ تجمیعی شمارش ضرب آهنگ‌ها^۱ یا dN/dt ، برای محلول‌های خورنده HCl9% و HCl33% در شکل ۷ مطابق شرایط آزمایش ذکر شده نمایش داده شده است. در این راستا، شروع و رشد ترک از ابتدا تا انتهای آزمایش توسط دوربین دیجیتال ثبت شده و برای پردازش فیلم و بدست آوردن طول ترک در زمان مشخص از نرم‌افزار دیجیتال‌ایزر نیز استفاده شده است. مطابق نمودار، یک ارتباط و وابستگی خطی مناسبی بین نرخ رشد ترک (da/dt) و نرخ Count تجمیعی سیگنال‌های دریافتی آکوستیک امیشن در حین انجام آزمون برای محلول‌های خورنده وجود دارد که مطابق رابطه خطی (۱۶) برای محیط HCl9% و رابطه خطی (۱۷) برای محیط HCl33% قابل ارائه می‌باشد.



¹Cumulative Counts Rate

در شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب ضرایب تجزیه بسته موجک سه سطحی سیگنال انفجاری آکوستیک امیشن در سطح آخر (L3) برای آزمون کشش نمونه آلومینیومی در محیط خورنده HCl9% و محیط خورنده HCl33% ارائه شده است. در شکل ۱۱، به عنوان نمونه، نمودار درختی مربوط به تجزیه سیگنال نمونه آلومینیوم AA7075-T6 در محیط خورنده HCl9% بر مبنای تبدیل موجک نمایش داده شده است.

در این تحقیق، از معیار انرژی برای تحلیل سیگنال‌های آکوستیک امیشن مطابق با روابط ۱۳ الی ۱۵ استفاده شده است. دلیل انتخاب این روش آن است که تفاوت در توزیع انرژی هر المان می‌تواند نشان‌دهنده مکانیزم خاصی از آسیب باشد.

بر همین اساس، نسبت انرژی موجود در المان‌های مختلف به کل انرژی محاسبه می‌شود تا درصد انرژی مرتبط با هر المان تعیین گردد [۳۵].

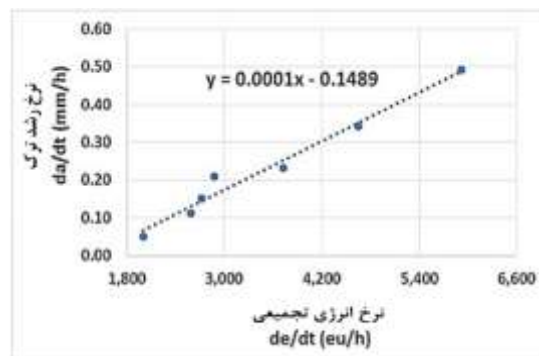
در ادامه کمی کردن ارتباط سیگنال‌های AE با فرآیند SCC، وابستگی بین نرخ رشد ترک (da/dt) و نرخ تجمعی انرژی (dN/dt) در شکل ۸ نمایش داده شده است.

مطابق نمودار نشان داده شده (از شش ساعت بعد از انجام آزمایش)، در این حالت نیز یک ارتباط خطی مطلوبی بین نرخ رشد ترک (da/dt) و نرخ تجمعی انرژی سیگنال‌های دریافتی آکوستیک امیشن در حین انجام آزمون مشاهده گردید که معادله خطی ذیل نمایانگر این موضوع است.

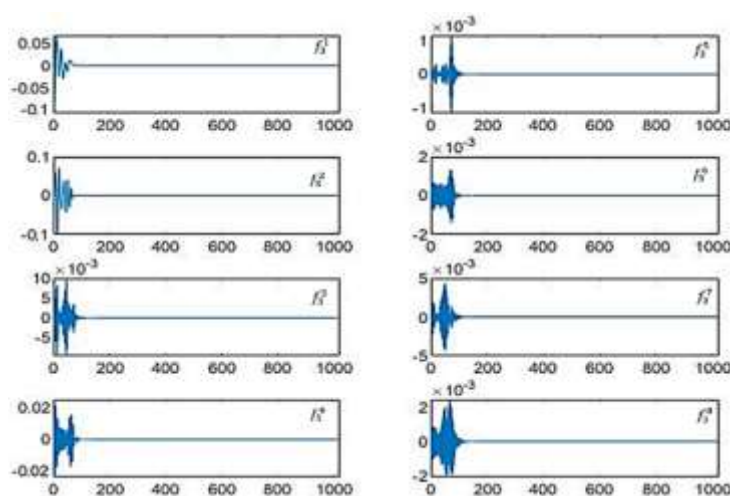
$$y = 0.0001x - 0.1489 \quad (18)$$

۳-۲- آنالیز داده‌های AE بر اساس تبدیل موجک

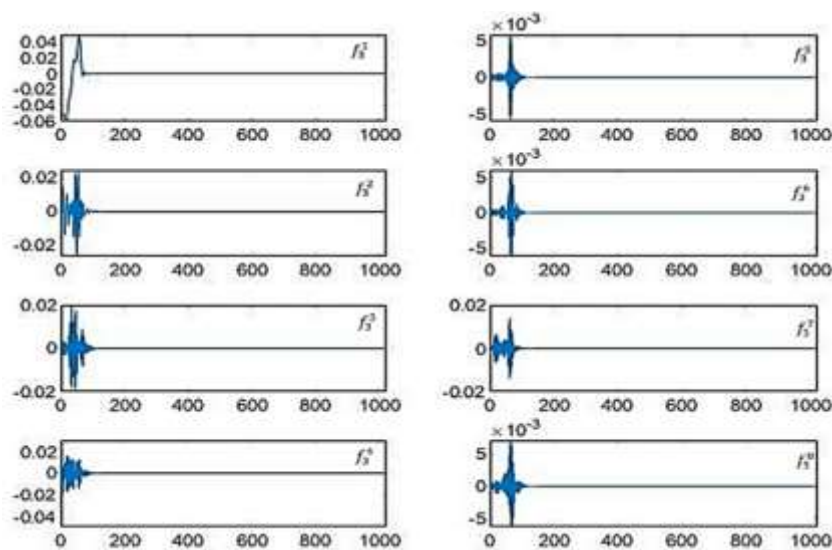
مطابق تئوری تبدیل موجک تشریح شده، در این بخش با بهره‌گیری از تبدیل موجک بسته‌ای، سیگنال به مجموعه‌ای از المان‌ها تجزیه می‌شود و هر المان محدوده فرکانسی معینی دارد.



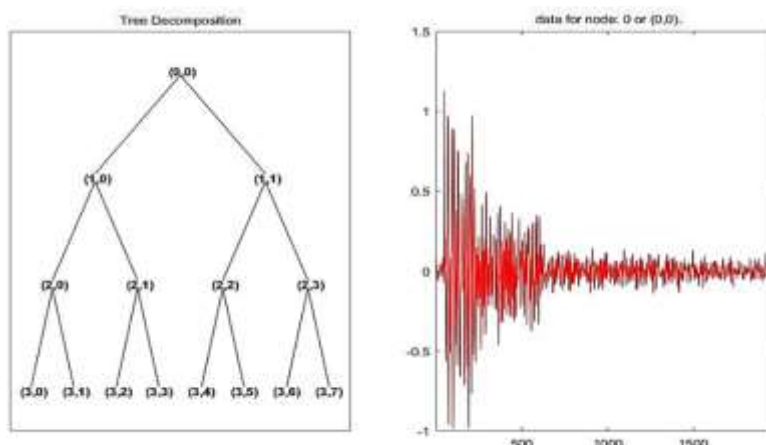
شکل ۸. ارتباط بین رشد نرخ ترک SCC با نرخ تجمعی انرژی دریافتی آکوستیک امیشن در حین انجام آزمون.



شکل ۹. تجزیه بسته موجک سه سطحی در تراز T3 (هشت ضریب) برای سیگنال AE کشش نمونه آلومینیومی در محیط خورنده HCl9%.



شکل ۱۰. تجزیه بسته موجک سه سطحی در تراز T3 برای سیگنال AE نمونه آلومینیومی در محیط خورنده HCl33%.



شکل ۱۱. نمودار درختی برای تجزیه سیگنال نمونه آلومینیوم AA7075-T6 در محیط خورنده HCl9% بر اساس تبدیل موجک.

استفاده شده است. پس از این بررسی، موجک مادر db20 از خانواده موجک‌های دیبچز^۱ که شباهت قابل توجهی به خصوصیات سیگنال ثبت شده داشت، انتخاب گردید. برخی از ویژگی‌های خانواده موجک دیبچز شامل یوارتوگونال، منظم، غیر متقارن و مناسب برای آنالیز داده‌های گذار از جمله برای سیگنال‌های آکوستیک امیشن است که در این خصوص می‌توان به مراجعی از قبیل [۲۹] اشاره کرد. طبق نظریه نمونه‌برداری نایکوئیست-شانون، نرخ نمونه‌برداری باید حداقل دو برابر بالاترین فرکانس موجود در سیگنال یا حداقل دو برابر پهنای باند سیگنال باشد.

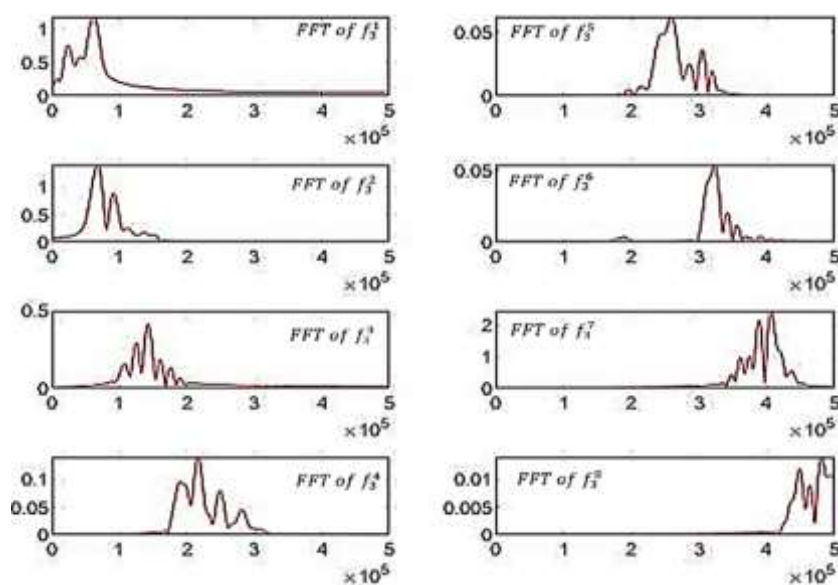
برای آنالیز موجک بسته‌ای از نرم‌افزار Matlab R2021b بهره گرفته شده است. در این فرآیند، دو پارامتر اصلی یعنی تعداد ترازها و انتخاب موجک مادر مناسب، اهمیت ویژه‌ای دارند. جهت تعیین تعداد ترازهای بهینه، از روش سعی و خطای سیستماتیک بهره گرفته شد و تعداد ترازها برابر با سه ($j=3$) مشخص گردید. این انتخاب به صورتی انجام شد که افزایش تعداد ترازها اطلاعات جدیدی فراهم نکند و کاهش آن نیز منجر به ناکافی بودن تحلیل نشود. برای انتخاب موجک مادر که بهترین انطباق را با خصوصیات سیگنال داشته باشد، از روش مقایسه چشمی در بین موجک‌های استاندارد مادر موجود،

¹ Daubechies Wavelet

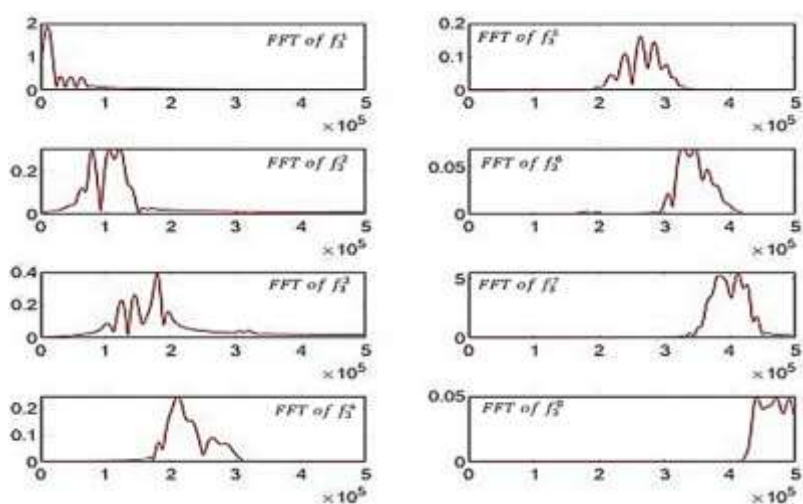
برابراست با: (۵-۶۲/۰)، (۵-۱۲۵/۵)، (۵-۱۸۷/۱۲۵)،
 (۵-۳۱۲/۲۵۰)، (۵-۳۷۵/۳۱۲)،
 (۵-۴۳۷/۳۷۵)، (۵-۵۰۰/۴۳۷) کیلوهرتز. در ادامه روش FFT برای به دست آوردن فرکانس هر سیگنال تجزیه شده استفاده گردید. فرکانس هر المان از سیگنال‌های تجزیه شده برای نمونه آلومینیومی در محیط HCl9% و HCl33% به ترتیب در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. همچنین شکل‌های ۱۴ و ۱۵ درصد انرژی هر المان از سیگنال آکوستیک امپشن را بر اساس رابطه [۳۵] برای نمونه آلومینیومی موردنظر در محیط‌های خورنده HCl9% و HCl33% در حین آزمایش کشش، با استفاده از کدنویسی در نرم‌افزار متلب به نمایش می‌گذارند. در این شکل‌ها محور عمودی درصد انرژی سیگنال و محور افقی تعداد سیگنال‌ها می‌باشد.

این تئوری، پایه روش‌های پردازش سیگنال می‌باشد. به عبارتی به منظور بازیابی و بازسازی کامل یک سیگنال آنالوگ که به فرکانس بالایی F_m محدود است، سرعت نمونه‌برداری از آن باید برابر یا بزرگتر از دو برابر فرکانس حداکثر مورد نظر باشد ($F_s \geq 2F_m$).

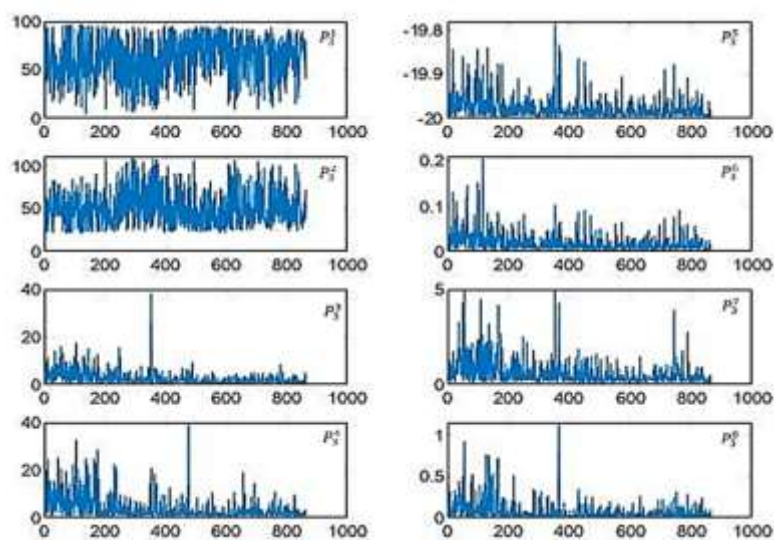
در این پژوهش، فرکانس نمونه‌برداری برابر با یک مگاهرتز تنظیم گردید؛ به همین دلیل، حداکثر فرکانس سیگنال‌های تبدیل شده برابر با ۵۰۰ کیلوهرتز است. با توجه به تعداد ترازهای در نظر گرفته شده، تعداد المان‌ها برابر با هشت خواهد شد ($i = 2^3$). همانطور که اشاره شده، هر المان در تراز سوم، محدوده فرکانسی خاصی را نشان داده و محدوده فرکانسی با افزایش ترازها یا سطوح موجک افزایش می‌یابد. محدوده فرکانسی برای این هشت المان مطابق روابط ۱۳ الی ۱۵ تجزیه موجک بسته‌ای



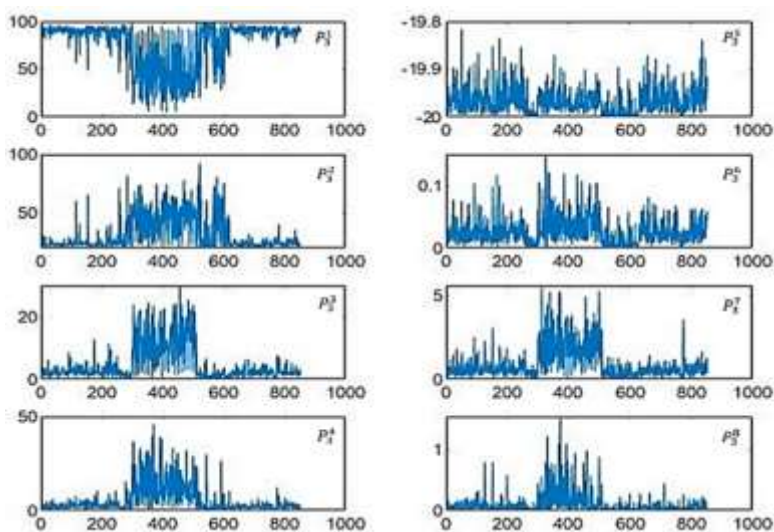
شکل ۱۲. فرکانس هر المان از سیگنال‌های تجزیه شده برای نمونه آلومینیومی در محیط HCl9%.



شکل ۱۳. فرکانس هر امان از سیگنال‌های تجزیه شده برای نمونه آلومینیومی در محیط ۳۳٪ HCl



شکل ۱۴. درصد انرژی امان سیگنال آکوستیک امیشن برای نمونه آلومینیومی در محیط ۹٪ HCl



شکل ۱۵. درصد انرژی امان سیگنال آکوستیک امیشن برای نمونه آلومینیومی در محیط ۳۳٪ HCl

همانطور که در شکل‌ها مشاهده می‌گردد درصد توزیع انرژی از یک المان به المان دیگر متغیر می‌باشد.

بالاترین درصد انرژی در بین ۸ المان تراز سوم در دو محیط خورنده HCl9% و HCl33%، سه المان f_3^1 ، f_3^2 و f_3^4 می‌باشد که این المان‌ها حدود ۹۵٪ انرژی کل سیگنال را در بردارند و دارای محدوده فرکانسی مختلفی هستند که به مکانیزم‌ها یا منابع مختلف خوردگی تنش در حین آزمون کشش مربوط می‌شوند. نکته قابل توجه، عدم وجود اختلاف در مکانیزم‌های غالب برای نمونه‌ها در دو محیط خورنده می‌باشد که بدین علت می‌باشد که مکانیزم‌ها و منابع آکوستیکی تولید شده در تست کشش و پدیده خوردگی تنش تقریباً ثابت بوده و با توجه به غالب بودن محدوده فرکانسی پایین در پدیده خوردگی تنش، در این دو محیط خورنده منابع یا محدوده فرکانسی تغییر چندانی نکرده است، هرچند در محیط خورنده HCl33% با توجه به افزایش غلظت یون‌های کلرید و تشدید گسیختگی پیوندهای باقیمانده فلزی، میزان درصد انرژی در المان ابتدایی تا حدودی افزایش یافته است. این نتایج در جدول ۲ نشان داده شده است.

از منابع اصلی آکوتیک امین در فرآیند ترک خوردگی تنش می‌توان به گسیختگی پیوندهای فلزی باقیمانده، جواهر زنی و ایجاد میکروترک‌ها و رد ترک اشاره کرد.

نسبت دادن محدوده‌های فرکانسی غالب، به منابع یا

مکانیزم‌های مختلف ترک خوردگی تنش می‌تواند بوسیله ارتباط بین فرکانس اصلی و سرعت آکوستیکی تعیین شود. از طرفی سرعت آکوستیکی به چگالی و مدول الاستیسیته بر اساس رابطه ۱۹ وابسته است:

$$f \propto C \propto \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (19)$$

که f فرکانس، C سرعت آکوستیکی الاستیک، ρ چگالی و E مدول الاستیسیته می‌باشد.

گسیختگی پیوندهای فلزی باقیمانده جزو اولین منابع یا مکانیزم‌های پدیده SCC مشاهده شده و سیگنالی با محدوده فرکانسی پایین ایجاد می‌کند. بنابراین المان f_3^1 با فرکانس ۵-۶۲/۰ کیلوهرتز می‌تواند به این نوع منبع یا مکانیزم خوردگی تنش نسبت داده شود.

رشد ترک از آخرین مکانیزم‌های این پدیده شناخته شده که می‌تواند سیگنال‌های بیشتری را در بین دیگر مودهای آسیب در پدیده خوردگی تنش ایجاد کند.

بنابراین المان سیگنال آکوستیک امیشن با بالاترین محدوده فرکانسی (f_3^4) با فرکانس ۵/۱۸۷-۲۵۰ کیلوهرتز می‌تواند به مکانیزم رشد ترک ارتباط داده شود. المان f_3^2 با محدوده فرکانسی ۵/۶۲-۱۲۵ کیلوهرتز که یکی از فرکانس‌های غالب می‌باشد و میانگین درصد انرژی نسبتاً بالایی دارد را می‌توان به مکانیزم جواهر زنی و ایجاد میکروترک‌ها نسبت داد.

جدول ۲. درصد انرژی غالب در المان تراز سوم مبتنی بر آنالیز تبدیل موجک بسته‌ای در دو محیط خورنده HCl9% و HCl33%

نمونه	شماره المان‌های غالب	درصد انرژی (%)	محدوده فرکانسی (kHz)
AA7075-T6 در محیط خورنده HCl9%	f_3^1	۶۱/۲	۵-۶۲/۰
	f_3^2	۳۰/۷	۵/۱۲۵-۶۲
	f_3^4	۳/۸	۵/۱۸۷-۲۵۰
AA7075-T6 در محیط خورنده HCl33%	f_3^1	۷۶/۶	۵-۶۲/۰
	f_3^2	۱۲/۱	۵/۱۲۵-۶۲
	f_3^4	۵/۵	۵/۱۸۷-۲۵۰

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، بر اساس طراحی آزمایشی که برای بررسی فرآیند ترک خوردگی تنش نمونه‌های آلومینیومی AA7075-T6 انجام شده است و با استفاده از تحلیل‌های زمان-فرکانس (تبدیل موجک بسته‌ای - WPT) و تحلیل حوزه زمان بر روی سیگنال‌های آکوستیک امیشن، ویژگی‌هایی استخراج و گردآوری شده است. با بهره‌گیری از این ویژگی‌ها، تأثیر غلظت محلول خورنده بر پدیده SCC در آلیاژ آلومینیوم مورد پایش و ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل به صورت خلاصه ارائه شده‌اند.

- با افزایش غلظت محلول خورنده، میزان کانت (شمارش ضرب آهنگ‌ها) تجمیعی و انرژی سیگنال تجمیعی رشد می‌کند که حاکی از افزایش فعالیت و شدت سیگنال‌های ثبت شده در آزمایش است. به بیان دیگر، افزایش غلظت یون‌ها که منجر به بالا رفتن چگالی جریان خوردگی و فعال تر شدن واکنش‌های آندی می‌شود، موجب افزایش قابل توجه فعالیت سیگنال‌های آکوستیک امیشن می‌گردد.
- طبق بررسی‌های انجام شده و با توجه به نمودارهای به دست آمده، رابطه و وابستگی خطی مناسبی بین نرخ رشد ترک (da/dt) و نرخ کانت تجمیعی و همچنین نرخ انرژی تجمیعی سیگنال‌های انتشار صوتی دریافتی در طول آزمایش برای محلول‌های خورنده وجود داشت. متعاقباً مشاهده شد که نرخ رشد ترک، انرژی تجمیعی و نرخ شمارش تجمیعی، در محیط $HCl33\%$ بسیار بیشتر از محیط $HCl9\%$ است. در یک زمان مشخص، نرخ رشد ترک خوردگی تنش با افزایش غلظت به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.
- در کاربردهای واقعی یا عملیاتی، می‌توان سیگنال‌های انتشار صوتی را در یک دوره زمانی خاص استخراج و پایش کرد. به دنبال آن می‌توان نرخ کانت تجمیعی یا نرخ انرژی تجمیعی را محاسبه کرد. سپس با استفاده از روابط ارائه شده در این تحقیق، نرخ رشد ترک پیش‌بینی می‌شود و از طریق پایش میزان پیشرفت ترک ناشی از خوردگی، می‌توان از بروز خسارت در تجهیزات و دستگاه‌ها در صنایع مختلف پیشگیری کرد.
- برای تحلیل داده‌های AE در محیط خورنده با غلظت‌های مختلف، از تبدیل بسته موجک (WPT) استفاده شد. در این راستا، نسبت انرژی عناصر مختلف به کل انرژی محاسبه و متعاقباً درصد انرژی هر عنصر برای شناسایی فرکانس‌های غالب در طول آزمایش به دست آمد. مطابق ارزیابی‌ها و نتایج بدست آمده، بالاترین درصد انرژی در بین ۸ المان تراز سوم در دو محیط خورنده $HCl9\%$ و $HCl33\%$ ، سه المان f_3^1 ، f_3^2 و f_3^4 می‌باشد. این المان‌ها با محدوده فرکانسی غالب $(۰-۶۲/۵)$ ، $(۶۲/۵-۱۲۵)$ و $(۱۲۵-۲۵۰)$ و $(۱۸۷/۵-۲۵۰)$ را می‌توان به ترتیب به مکانیزم‌ها یا منابع آکوستیکی تولید شده از گسیختگی پیوندهای فلزی باقیمانده، جوانه زنی و ایجاد میکروترک‌ها و رشد ترک ارتباط داد.
- با توجه به ثابت بودن نسبی مکانیزم‌ها و منابع آکوستیکی تولید شده در تست کشش و پدیده خوردگی همچنین غالب بودن محدوده فرکانسی پایین در خوردگی تنش، در دو محیط خورنده مربوطه، محدوده فرکانسی تغییر چندانی نداشته است، هرچند در محیط خورنده $HCl33\%$ با توجه به افزایش غلظت یون‌های کلرید و تشدید گسیختگی پیوندهای باقیمانده فلزی، میزان درصد انرژی در المان ابتدایی تا حدودی افزایش داشته است.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از دانشگاه صنعتی امیرکبیر و شرکت دانش بنیان تتا بابت فراهم آوردن تجهیزات آزمایشگاهی و انجام آزمایشات مربوطه صمیمانه قدردانی می‌گردد.

مراجع

- [1] E. Altas, S. Bati, S. Rajendrachari, Ö. Erkan, I. E. Dag, and B. Avar, Comprehensive analysis of mechanical properties, wear, and corrosion behavior of AA7075-T6 alloy subjected to cryogenic treatment for aviation and defense applications, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 490, 2024, pp. 131101.
- [2] N. Reed, *Development of Multi-Scale Characterization Techniques for Stress Corrosion Cracking of Aerospace Alloys*, 2021.
- [3] R. E. Ricker, E. U. Lee, R. Taylor, C. Lei, B. Pregger, and E. Lipnickas, Chloride ion activity and susceptibility of Al alloys 7075-T6 and 5083-H131 to stress corrosion cracking, *Metall. Mater. Trans. A*, Vol. 44, 2013, pp. 1353–1364.
- [4] J. T. Al-Haidary, J. S. Haddad, F. A. Alfaqs, and F. F. Zayadin, Susceptibility of Aluminum Alloy 7075 T6 to Stress Corrosion Cracking, *SAE Int. J. Mater. Manuf.*, Vol. 14, No. 2, 2021, pp. 195–202.
- [5] L. Bao, K. Li, J. Zheng, Y. Zhang, K. Zhan, Z. Yang, and V. Ji, Surface characteristics and stress corrosion behavior of AA 7075-T6 aluminum alloys after different shot peening processes, *Surf. Coatings Technol.*, Vol. 440, 2022, pp. 128481.
- [6] A. Haghir, M. Heidarnajad, The Investigation of leakage on the shell of Dryers Shahid Tondguyan Petrochemical Company (STPC), *Corrosion Sciences and Engineering*, Vol. 11, 2021, pp. 45–52.
- [7] R. Sadeghi, A. Ashrafi, A. Eslami, H. Gorji, An Investigation on stress corrosion cracking behavior of API-X70 pipeline steel weldment in a simulated soil solution, *Corrosion Sciences and Engineering*, Vol. 7, 2017, pp. 91–106.
- [8] L. Calabrese, and E. Proverbio, A review on the applications of acoustic emission technique in the study of stress corrosion cracking, *Corros. Mater. Degrad.*, Vol. 2, No. 1, 2020, pp. 1–30.
- [9] V. Soltangharai, J.W. Hill, Li Ai, R. Anay, B. Greer, M. Bayat, and P. Ziehl, Acoustic emission technique to identify stress corrosion cracking damage, *Struct. Eng. Mech.*, Vol. 75, No. 6, 2020, pp. 723–736.
- [10] L. Calabrese, L. Bonaccorsi, E. Proverbio, D. Di Pietro, and F. Cappuccini, SCC damage evolution on martensitic stainless steel by using acoustic emission technique, *Corros. Eng. Sci. Technol.*, Vol. 50, No. 5, 2015, pp. 364–371.
- [11] S. Hajighasemi, H. Fazeli, J. Eskandari Jam, M. Ahmadi Najafabadi, and H. Heidary, Evaluation of Acoustic Emission Signals to Detect Stress Corrosion Cracking Mechanisms of AA7075-T6 Aluminum Pipe by Fuzzy Clustering Method (FCM), *Nondestructive Testing Technology*, Vol. 3, 2023, pp. 38–46.
- [12] H. Yang, Improvement of acoustic emission technology for stress corrosion cracking. Brunel University London, 2023, pp. 95–150.
- [13] M. Wevers and K. Lambrechts, Applications of acoustic emission for SHM, A review, *Encycl. Struct. Heal. Monit.*, 2009, pp. 1–25.
- [14] G. Van Dijk, M. Wevers, and M. Van Hulle, M., Wavelet packet decomposition for the identification of corrosion type from acoustic emission signals. *International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing*, Vol. 7, 2009, pp. 513–534.
- [15] A. Graps, An introduction to wavelets, *IEEE Comput. Sci. Eng.*, Vol. 2, No. 2, 1995, pp. 50–61.
- [16] H. Suzuki, T. Kinjo, Y. Hayashi, M. Takemoto, K. Ono, and Y. Hayashi, Wavelet transform of acoustic emission signals, *J. Acoust. Emiss.*, Vol. 14, 1996, pp. 69–84.
- [17] A. Marec, J. H. Thomas, and R. El Guerjouma, Damage characterization of polymer-based composite materials: Multivariable analysis and wavelet transform for clustering acoustic emission data, *Mech. Syst. Signal Process.*, Vol. 22, No. 6, 2008, pp. 1441–1464.
- [18] R. Khamedi, S. Abdi, A. Ghorbani, A. Ghiami, and S. Erden, Damage characterization of carbon/epoxy composites using acoustic emission signals wavelet analysis, *Compos. Interfaces*, 2019, pp. 1–14.
- [19] H. Heidary, N. Z. Karimi, M. A. Najafabadi, G. Minak, and A. Zucchelli, Time-Frequency analyzing of acoustic emission signals in drilling of glass/epoxy composites, *Engineering Systems Design and Analysis*, American Society of Mechanical Engineers, 2012, pp. 69–74.
- [20] P. Wang and Q. Shi, Damage identification in structures based on energy curvature difference of wavelet packet transform, *Shock and Vibration*, Vol. 2018, 2018, pp. 1–13.
- [21] J.-G. Han, W.-X. Ren, and Z.-S. Sun, Wavelet packet-based damage identification of beam structures, *Int. J. Solids Struct.*, Vol. 42, No. 26, 2005, pp. 6610–6627.
- [22] B. Asgarian, V. Aghaeidoost, and H. R. Shokrgozar, Damage detection of jacket type offshore platforms using rate of signal energy using wavelet packet transform, *Mar. Struct.*, Vol. 45, 2016, pp. 1–21.
- [23] F. He and Q. Ye, A bearing fault diagnosis method based on wavelet packet transform and convolutional neural network optimized by simulated annealing algorithm, *Sensors*, Vol. 22, No. 4, 2022, pp. 1410.
- [24] H. Heidary, A. Refahi Oskoei, M. Hajikhani, B. Moosaloo, and M. Ahmadi Najafabadi, Acoustic emission signal analysis by wavelet method to investigate damage mechanisms during drilling of composite materials, in *Engineering Systems Design and Analysis*, 2010, pp. 409–416.

- [25] Z. Wang, K. Ding, H. Ren, and J. Ning, Quantitative acoustic emission investigation on the crack evolution in concrete prisms by frequency analysis based on wavelet packet transform, *Struct. Heal. Monit.*, Vol. 21, No. 3, 2022, pp. 1046–1060.
- [26] E. G. Plaza and P. J. N. López, Application of the wavelet packet transform to vibration signals for surface roughness monitoring in CNC turning operations, *Mech. Syst. Signal Process.*, Vol. 98, 2018, pp. 902–919.
- [27] R. Pahuja and M. Ramulu, Surface quality monitoring in abrasive water jet machining of Ti6Al4V–CFRP stacks through wavelet packet analysis of acoustic emission signals, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 104, 2019, pp. 4091–4104.
- [28] H. Bi, H. Li, W. Zhang, L. Wang, Q. Zhang, S. Cao, and I. Toku-Gyamerah, Evaluation of the acoustic emission monitoring method for stress corrosion cracking on aboveground storage tank floor steel, *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, Vol. 179, 2020, pp. 104035.
- [29] C. K. Chui, An introduction to wavelets, Academic press, Vol. 1, 1992, pp. 170–256.
- [30] T. H. Loutas, V. Kostopoulos, C. Ramirez-Jimenez, and M. Pharaoh, Damage evolution in center-holed glass/polyester composites under quasi-static loading using time/frequency analysis of acoustic emission monitored waveforms, *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 66, No. 10, 2006, pp. 1366–1375.
- [31] L. Debnath, and F. A. Shah, Wavelet transforms and their applications, Vol. 434. New York: Birkhäuser, 2015, pp. 465–550.
- [32] B. Ergen, Signal and image denoising using wavelet transform. InTech London, UK, 2012, pp. 95–120.
- [33] E. Reyes-Archundia, E. L. Moreno-Goytia, J. A. Gutiérrez-Gnecchi, and F. Rivas-Dávalos, Discrete Wavelet Transform Application to the Protection of Electrical Power System: A Solution Approach for Detecting and Locating Faults in FACTS Environment, *Phys. Technol.*, 2012, pp. 245-270.
- [34] K. P. Soman, Insight into wavelets: from theory to practice. PHI Learning Pvt. Ltd., 2010, pp. 282–320.
- [35] R. M. Rao, and A. S. Bopardikar, Wavelet Transforms: Introduction to Theory and Applications. Addison-Wesley, 1998, pp. 264–300.
- [36] Y. Reda, R. Abdel-Karim, and I. Elmahallawi, Improvements in mechanical and stress corrosion cracking properties in Al-alloy 7075 via retrogression and reaging. *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 485, No. 1-2, 2008, pp. 468–475.

