

Evaluation of Acoustic Emission Signals to Detect Stress Corrosion Cracking Mechanisms of AA7075-T6 Aluminum Pipe by Fuzzy Clustering Method (FCM)

Saeed Hajighasemi¹  | Hamid Fazeli¹  | Jafar Eskandari Jam¹  | Mehdi Ahmadi Najafabadi² 
| Hossein Heidary³ 

1. Faculty of Material & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
Email: S.Hajighasemi@mut.ac.ir
2. Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of technology, Tehran, Iran, Email:
Ahmadin@aut.ac.ir
3. Department of Mechanical Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran, Email: Heidary@tafreshu.ac.ir

ABSTRACT

Article Information:

Research Article

Received 23 Sep. 2023

Revised 01 Nov. 2023

Accepted 01 Feb. 2024

Keywords:

Stress Corrosion Cracking,
Acoustic Emission,
Fuzzy Clustering,
Aluminum pipe.

High-strength aluminum alloy pipes (AA7075-T6) have been widely used in various industries due to their favorable properties, Such as high strength-to-weight ratio, excellent machinability, and proper forming. On the other hand, according to the susceptibility to the phenomenon of stress corrosion cracking, the evaluation and monitoring of mechanisms related to this issue is of considerable importance in the industry. In this research, the Fuzzy clustering method (FCM) has been used to detect acoustic emission signals related to stress corrosion cracking mechanisms of aluminum pipe. Using this method, while revealing the clusters in an unsupervised method, leads to more appropriate classification and separation of data. In this regard, a laboratory system including a waveguide, corrosive solution chamber, and arc-shaped aluminum samples according to ASTM-E399 standards along with acoustic emission equipment was designed and prepared. Then, using the slow strain rate test (SSRT) and receiving AE signals simultaneously, the AA7075-T6 aluminum sample was placed in two corrosive environments (HCL9% and HCL33%) to identify the two main mechanisms of stress corrosion cracking, including anodic dissolution and hydrogen embrittlement (cathodic). Five descriptive acoustic parameters including rise time, count, energy, amplitude, and duration were used to analyze the obtained signals. To select the most effective acoustic characteristics and reduce the amount of information, principal component analysis was used. Subsequently, with the fuzzy method (FCM clustering) based on the optimized data from the analysis of the main components, it was possible to distinguish and separate these two types of corrosion mechanisms. According to the obtained results, it was found that the dominant mechanism in the phenomenon of stress corrosion cracking in HCL corrosive solution is the anodic dissolution mechanism, which in addition to increasing the corrosion current density, increases the dependence of stress corrosion on this mechanism by increasing the concentration of H⁺ and C⁻ ions.

Cite this article: Hajighasemi, S., Fazeli, H., Eskandari Jam, J., Ahmadi Najafabadi, M., & Heidary, H. (2023). Evaluation of Acoustic Emission Signals to Detect Stress Corrosion Cracking Mechanisms of AA7075-T6 Aluminum Pipe by Fuzzy Clustering Method (FCM). *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 3 (3), 38-46. <http://doi.org/10.30494/JNDT.2024.417641.1130>

ارزیابی سیگنال‌های آکوستیک امیشن جهت تشخیص مکانیزم‌های ترک خوردگی تنش‌ی لوله آلومینیومی AA7075-T6 با استفاده از روش خوشه‌بندی فازی (FCM)

سعید حاجی قاسمی^۱ | حمید فاضلی^۱ | جعفر اسکندری جم^۱ | مهدی احمدی نجف‌آبادی^۲ | حسین حیدری^۳ ✉

۱. مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، S.Hajighasemi@mut.ac.ir

۲. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، Ahmadin@aut.ac.ir

۳. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران، Heidary@tafreshu.ac.ir

چکیده:

کاربرد لوله‌های آلومینیومی آلیاژی دارای عملیات حرارتی با سختی بالا (AA7075-T6) در صنایع مختلف به دلیل خواص مطلوب آن‌ها از قبیل نسبت استحکام به وزن بالا، ماشین پذیری عالی و شکل‌دهی مناسب در حال گسترش روزافزون می‌باشد و از طرفی با توجه به حساس بودن این نوع لوله‌ها به پدیده ترک خوردگی تنش‌ی، ارزیابی و پایش مکانیزم‌های مرتبط با این موضوع اهمیت قابل توجهی در صنعت پیدا کرده است. در این پژوهش، از روش خوشه بندی فازی (FCM) جهت تشخیص سیگنال‌های آکوستیک امیشن مرتبط با مکانیزم‌های ترک خوردگی تنش‌ی لوله آلومینیومی بهره گرفته شده است. استفاده از این روش، ضمن آشکار نمودن خوشه‌ها به روش بدون ناظر منجر به کلاسه‌بندی و تفکیک مناسب‌تر داده‌ها می‌گردد. در این راستا یک سیستم آزمایشگاهی شامل ویو گاید، محفظه محلول خورنده، نمونه‌های آلومینیومی قوسی‌شکل مطابق استاندارد ASTM-E399 به همراه تجهیزات آکوستیک امیشن طراحی و آماده گردید. سپس با استفاده از آزمون نرخ کرنش آهسته (SSRT) و دریافت سیگنال‌های AE به صورت همزمان، نمونه آلومینیومی AA7075-T6 در دو محیط خورنده (HCL9% و HCL33%) برای شناسایی دو نوع مکانیزم اصلی ترک خوردگی تنش‌ی شامل حل شدن آندی و تردی هیدروژن (کاتدی) قرار گرفت. برای آنالیز سیگنال‌های بدست آمده، پنج پارامتر توصیفی آکوستیکی شامل زمان اوج، ضرب‌آهنگ، انرژی، دامنه و مدت زمان استمرار مورد استفاده قرار گرفت. جهت انتخاب مؤثرترین مشخصه‌های آکوستیکی و کاهش حجم اطلاعات از روش آنالیز اجزای اصلی استفاده شد. در ادامه با روش فازی (خوشه‌بندی FCM) پیرو داده‌های بهینه‌شده از آنالیز اجزاء اصلی، تشخیص و تفکیک این دو نوع مکانیزم خوردگی میسر گردید. مطابق نتایج بدست آمده، مشخص گردید که مکانیزم غالب در پدیده ترک خوردگی تنش‌ی در محلول خورنده HCL، مکانیزم حل شدن آندی می‌باشد که با افزایش غلظت یون های H^+ و C^- ، ضمن افزایش چگالی جریان خوردگی، میزان وابستگی خوردگی تنش‌ی به این مکانیزم افزوده می‌شود.

اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۰۷/۰۱

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۲/۰۸/۱۰

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۱۱/۱۲

کلیدواژگان:

ترک خوردگی تنش‌ی، آکوستیک امیشن، خوشه بندی فازی، لوله آلومینیومی.

استناد: حاجی قاسمی، سعید؛ فاضلی، حمید؛ اسکندری جم، جعفر؛ احمدی نجف‌آبادی، مهدی؛ و حیدری، حسین. (۱۴۰۲). ارزیابی سیگنال‌های آکوستیک امیشن جهت تشخیص مکانیزم‌های ترک خوردگی تنش‌ی لوله آلومینیومی AA7075-T6 با استفاده از روش خوشه‌بندی فازی (FCM). مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب، ۳ (۳)، ۴۶-۳۸. <http://doi.org/10.30494/JNDT.2024.417641.1130>

۱- مقدمه

استفاده از لوله‌های آلومینیومی آلیاژی دارای عملیات حرارتی با سختی بالا (AA7075-T6) در صنایع مختلف از جمله صنایع هوافضا، دریایی، نفت و گاز، هسته‌ای، برودتی و حرارتی، نظامی و ساختمان جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده است و کاربرد آن‌ها به دلیل خواص مطلوب از قبیل استحکام بالا، چگالی پایین، چقرمگی و خواص خستگی مناسب در حال گسترش روزافزون می‌باشد [۱-۳]. از طرفی این نوع لوله‌ها نسبت به پدیده ترک‌خوردگی تنش‌ی^۱ حساس می‌باشند و بر همین اساس، ارزیابی و پایش دقیق و سریع این موضوع اهمیت قابل توجهی در صنعت پیدا کرده است [۵ و ۴].

روش آکوستیک امیشن^۲ (AE) می‌تواند به‌عنوان یک تکنیک نوین، استاندارد و مطمئن آزمون غیر مخرب، جهت بررسی و تحلیل مکانیزم‌های خوردگی این نوع لوله‌ها مورد استفاده قرار گیرد. این روش بر اساس آزادسازی سریع انرژی داخل ماده با تولید موج الاستیک گذرا می‌باشد که می‌تواند عیوب خیلی ریز را در سازه‌ها بدون توقف عملیات، تمیز کردن یا تخلیه مواد (محصول) به‌صورت پویا و آنی در مقایسه با سایر روش‌ها شناسایی کند. به عبارتی امواج منتشرشده از عیوب سازه به محض تولید دریافت شده و بر این اساس، سازه در حال بارگذاری و هنگام کار مورد پایش قرار می‌گیرد.

در راستای ارزیابی‌های صورت گرفته روی روش آکوستیک امیشن برای تشخیص و پایش انواع آسیب‌ها، برخی از محققان، کاربرد AE را برای بررسی ترک‌خوردگی تنش‌ی و خوردگی حفره‌ای با استفاده از آزمون نرخ کرنش آهسته^۳ یا نمونه‌های کششی فشرده^۴ مورد پژوهش قرار داده‌اند [۶-۹]. مطابق این مطالعات مشخص گردید که ترک‌خوردگی تنش‌ی با ترکیب سه شرط لازم اتفاق می‌افتد که شامل تنش یا کرنش کششی لازم، یک الکترولیت تهاجمی و یک ماده مستعد می‌باشد.

بسیاری از محققان، دو مکانیزم اصلی برای خوردگی تنش‌ی در آلومینیوم سری 7XXX گزارش کرده‌اند که شامل حل شدن آندی و تردی هیدروژنی (مکانیزم کاتدی)

می‌باشد. خوردگی تحت تنش آندی زمانی رخ می‌دهد که ماده شرایط غیرفعال دارد یعنی هنگامی که سطح فلز به‌وسیله یک لایه غیرفعال و محافظ پوشیده شده باشد. اغلب مدل‌ها فرض می‌کنند انحلال (واکنش) آندی تسریع شده فلز در نوک ترک رخ می‌دهد که به‌واسطه اثرات شیمیایی و مکانیکی عاری از لایه محافظ است [۱۰]. به عبارتی در نوک ترک به دلیل شکستن و گسیختگی مداوم لایه‌های غیرفعال عمل انحلال شتاب گرفته و ترک‌خوردن در اثر خوردگی تنش‌ی سریعتر پیشروی می‌کند. مطابق با این تئوری لبه ترک تازه به وجود آمده باید به‌وسیله شکل‌گیری لایه‌های پوششی یا غیرفعال به‌سرعت محافظت شوند و گرنه خوردگی رخ می‌دهد. در این حالت خوردگی تحت تنش در میان ماده همانند یک چاقوی الکتروشیمیایی گسترش می‌یابد.

تردی هیدروژنی در فرآیند SCC حالتی بین تردی هیدروژن کلاسیک و خوردگی تحت تنش می‌باشد. هنگامی که اجزا سیستم در خوردگی ایجادشده به‌وسیله نفوذ هیدروژن مدنظر باشد، هیدروژن ایزوله شده کاتدی به ماده نفوذ کرده و باعث تردی موضعی می‌شود.

ژن ژانگ^۵ و همکاران [۱۱ و ۱۲] شرایط SCC را با تغییر نوع بارگذاری و غلظت اکسیژن حل‌شده در لوله‌های فولادی ضدزنگ ۳۰۴ مورد استفاده در صنعت هسته‌ای در آب دما بالا بررسی کردند و در این مطالعات مشخص گردید که استفاده از نسبت تعداد سیگنال‌های پیوسته و انفجاری، شکل موج AE و روش‌های تجزیه و تحلیل کمی برای ارزیابی SCC در آب دما بالا اطمینان‌بخش است. وونگی هوانگ^۶ و همکاران [۱۳] نیز مشخصات آکوستیک امیشن ترک‌های خوردگی تنش‌ی برای این نوع فولاد در شرایط محیطی خورنده هیدروکسید سدیم و سولفید سدیم ارزیابی و تحلیل کردند و در نهایت ارتباط بین فعالیت AE و رشد ترک را مورد بررسی قرار دادند. در برخی پژوهش‌ها از قبیل مطالعات انجام‌شده توسط بولی^۷ و جاکا کواچ^۸ [۱۴ و ۱۵]، با استفاده از روش‌های هم‌زمان آکوستیک امیشن و نویز الکتروشیمیایی، ترک‌خوردگی تنش‌ی فولاد ضدزنگ ۳۰۴ بررسی و شناسایی

⁵ Zhen Zhang

⁶ Woongi Hwang

⁷ Bo Li

⁸ Jaka Kovac

¹ Stress Corrosion Cracking (SCC)

² Acoustic Emission (AE)

³ Slow Strain Rate Testing (SSRT)

⁴ Compact tension (CT)

گردد. $U = u_{i,j} \in [0,1]$ و علامت $\| \cdot \|$ نشانگر میزان فاصله (تشابه) داده با مرکز خوشه می‌باشد. همچنین m درجه فازی (عدد بزرگتر از ۱) را نشان می‌دهد که این پارامتر ضمن مشخص نمودن سطح فازی خوشه، هرچقدر به یک نزدیک‌تر باشد به الگوریتم K-Means شبیه می‌شود و u_{ik} میزان تعلق نمونه am به خوشه k است که روابط ذیل برای آن برقرار می‌باشد.

$$\sum_{k=1}^c u_{ik} = 1 \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$0 < u_{ik} < 1 \quad \forall k = 1, 2, \dots, c$$

$$u_{ik} = \frac{1}{\sum_{k=1}^c (\|x_k - v_i\| - \|x_k - v_j\|)^{\frac{2}{m-1}}} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، v_i مرکز خوشه am می‌باشد که با صفر قرار دادن گرادیان J_m نسبت به U ، مراکز هر یک از خوشه‌ها مطابق رابطه (۴) بدست می‌آید.

$$v_i = \frac{\sum_{k=1}^n u_{ik}^m x_k}{\sum_{k=1}^n u_{ik}^m} \quad (4)$$

۲- مواد و روش انجام پژوهش

۳-۱- طراحی و آماده سازی نمونه آزمایش
در پژوهش حاضر از لوله آلومینیومی AA7075-T6 تهیه شده از شرکت آلومینات اراک مطابق ترکیب شیمیایی و مشخصات مندرج در جدول ۱ استفاده گردید که در آن به ترتیب روی (با ۵/۵٪) و منیزیم (با ۲/۸٪) بیشترین عنصر آلیاژی محسوب می‌شوند.

جدول ۱) ترکیب شیمیایی و مشخصات فیزیکی لوله آلومینیومی آلیاژی عملیات حرارتی شده AA7075-T6

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

مطابق خلاصه ارزیابی‌های اشاره شده، اهم مطالعات و پژوهش‌های صورت گرفته روی ترک خوردگی تنشی با استفاده از روش آکوستیک امیشن به ترتیب روی فولادهای ضدزنگ نوع ۳۰۴ و ۳۱۶ انجام شده ولی تاکنون بر اساس بررسی‌های صورت گرفته در خصوص شناسایی مکانیزم‌های ترک خوردگی لوله‌های آلومینیومی از قبیل AA7075-T6 توسط روش AE مطالعه کاملی صورت نگرفته است که در این تحقیق مدنظر است با تکیه بر روش خوشه‌بندی فازی، تفکیک و شناسایی سیگنال‌های آکوستیک امیشن پدیده SCC انجام گیرد.

۱- روش خوشه‌بندی فازی

روش خوشه‌بندی فازی (FCM^1)، یکی از الگوریتم‌های پرکاربرد در حوزه دسته‌بندی داده‌ها می‌باشد. این تکنیک در سال ۱۹۸۱ توسط جیم بزدک^۲ اصلاح و توسعه یافت. الگوریتم FCM تلاش می‌کند تا داده‌های جمع‌آوری شده را به مجموعه‌ای از c خوشه فازی با توجه به برخی معیارها دسته‌بندی نماید. به این معنی که هر داده با یک درجه تعلق به هر خوشه متعلق است. هدف این الگوریتم، به حداقل رساندن تابع هدف است که به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۶]:

$$J_m(U, V; X) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c u_{ik}^m \|x_k - v_i\|_A^2 \quad (1)$$

$$= (x_k - v_i)^T A (x_k - v_i) \|x_k - v_i\|_A^2$$

در رابطه (۱) که طبقه‌بندی مجموعه‌ای از n داده $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ به c دسته یا خوشه $V = \{v_1, v_2, \dots, v_c\}$ را محاسبه می‌کند، x_k بیانگر داده

² Jim Bezdek

¹ Fuzzy C-Means

ضخامت ۱۱mm) و متناسب با ابعاد قابل قبول برای دستگاه‌های خستگی و کشش براساس شکل ۱ طراحی و آماده گردید.

نمونه، a اندازه ترک و W عرض نمونه می‌باشد.

$$K_I = \frac{Y P}{B \sqrt{W}} \quad (۶)$$

$$Y = \left[18.23 \sqrt{\frac{a}{W}} - 106.2 \sqrt{\frac{a^3}{W}} + \right. \quad (۷)$$

$$397.7 \sqrt{\frac{a^5}{W}} - 582.0 \sqrt{\frac{a^7}{W}} -$$

$$369.1 \sqrt{\frac{a^9}{W}} \times \left(1 + 1.54 \frac{X}{W} + \right.$$

$$0.5 \frac{a}{W} \times \left[1 + 0.22 \left(1 - \right. \right.$$

$$\left. \left. \sqrt{\frac{a}{W}} \left(1 - \frac{r_1}{r_2} \right) \right] \right]$$

با قرار دادن $X=5.5\text{mm}$, $r_2=35\text{mm}$, $r_1=24\text{mm}$ در روابط (۶) و (۷)، حداکثر نیرو با لحاظ نمودن ضریب اطمینان ۰/۶۰، ۸۵۵N محاسبه می‌شود و با در نظر گرفتن نسبت تنش ۰/۱ حداقل نیرو حدود ۸۶N خواهد بود.

مطابق استاندارد برای برقراری شرایط کرنش صفحه‌ای باید الزامات رابطه‌های (۸) الی (۱۰) برقرار باشد. در این حالت اندازه ناحیه پلاستیک در نوک ترک نسبت به ضخامت نمونه بسیار کوچک بوده و قابل صرف نظر می‌باشد.

$$B \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_Y} \right)^2 \quad (۸)$$

$$a \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_Y} \right)^2 \quad (۹)$$

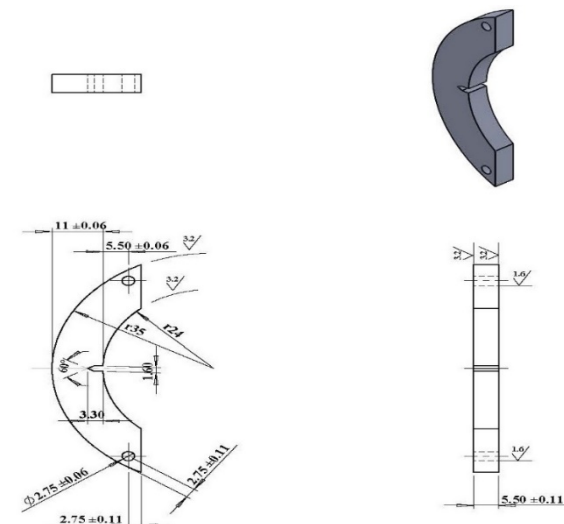
$$W \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_Y} \right)^2 \quad (۱۰)$$

با توجه به ابعاد و مقادیر بالا، شرایط کرنش صفحه‌ای برای انجام این آزمون برقرار است.

۲-۳- طراحی و آماده‌سازی سیستم آزمایشگاهی

پس از آماده‌سازی، نمونه‌ها توسط مایعات نافذ مورد بازرسی قرار گرفتند که ترکی مشاهده نگردید. محفظه خوردگی و ویوگاید مطابق هندسه و ابعاد مندرج در شکل ۲

نمونه‌های قوسی شکل^۱ آلومینیومی مطابق استاندارد ISO7539-6 یا ASTM E399-12 با توجه به لوله آلومینیومی (قطر خارجی ۷۰mm، قطر داخلی ۴۸mm و



شکل ۱) ابعاد نمونه آزمون AA7075-T6 ساخته شده به صورت قوسی شکل مطابق استاندارد ASTM E399-12

نمونه‌های آلومینیومی AA7075-T6 با ورق سنباده کاربرد سیلیکون با درجه ۲۰۰۰ گریت^۲ سنگ زده شده و دو سطح آن‌ها با خمیر پولیش الماسه^۳ میکرون پرداخت گردید. سپس پیش‌ترک خستگی به طول متوسط ۱/۳mm با استفاده از دستگاه خستگی و با موج سینوسی (فرکانس ۱۰Hz) و حداکثر نیرو ۸۵۵N در حین فرآیند پیش‌ترک خستگی و بر اساس محاسبات ذیل ایجاد گردید.

فاکتور شدت تنش (K_I) در نوک ترک تحت مود بازشدگی (۱) مطابق تئوری الاستیسیته در رابطه (۵) تابع تنش اعمالی (σ)، طول ترک (a) و هندسه نمونه (با ثابت Q) می‌باشد.

$$K_I = Q \times \sigma \times \sqrt{a} \quad (۵)$$

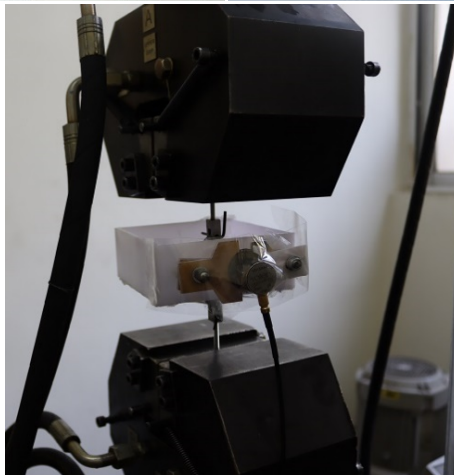
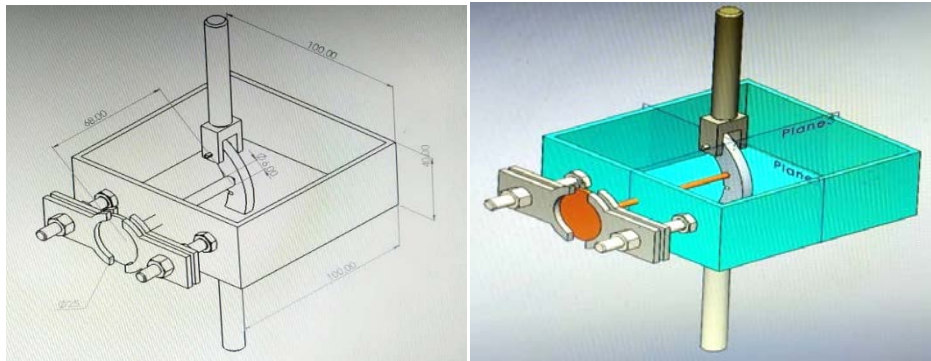
مطابق استاندارد ISO7539-6 یا ASTM E399 [۱۷] فاکتور شدت تنش برای نمونه‌های آزمون با استفاده از ضریب شدت تنش بی‌بعد (Y) برحسب نسبت (a/W) بر اساس رابطه‌های (۲-۳) و (۳-۳) قابل تعریف است که مطابق تلورانس‌ها و نسبت‌های تعریف‌شده، B ضخامت

^۳ Diamond polishing paste

^۱ Arc-shaped Specimens

^۲ Grit

طراحی و آماده گردید.



شکل ۲) محفظه خوردگی، ویو گاید و محل نصب سنسور آکوستیک امیشن

جهت تست کارایی حسگر و سیستم AE، ابتدا حسگر بر روی نمونه نصب شده و سپس سیستم در حالت سیگنال‌گیری قرار می‌گیرد. در ادامه نوک مداد بر روی سطح نمونه قرار گرفته و با وارد آوردن فشار شکسته می‌شود. در این حالت سیستم بایستی سیگنال‌های دریافتی را نشان دهد. در این آزمایش پس از انجام تست‌های مقدماتی پارامترهای سیستم به قرار زیر تنظیم شدند:

- ضریب پیش تقویت کننده: 40 dB
- حد آستانه: 40 dB
- ضریب تقویت کننده: 60 dB
- فیلتر پایین گذر: 20 kHz
- فیلتر بالاگذر: 500 kHz
- نرخ نمونه برداری: 1 MHz

۳- نتایج

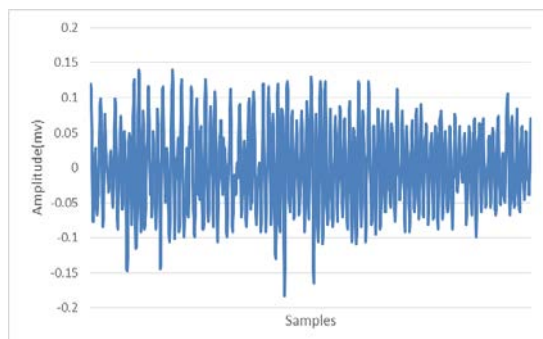
شکل ۳ داده‌های آکوستیک امیشن (میزان شمارش

مطابق شکل ۲ نمونه‌ها با سرعت کشش $5 \times 10^{-5} \text{ mm/s}$ (بر اساس آزمون نرخ کرنش آهسته^۱ و با دستگاه کشش ساخت شرکت Dartec و با قابلیت اعمال نیرو تا ۵۰ kN) در دو محیط خورنده HCL(9%) و HCL(33%) تا زمان شکست کشیده می‌شوند. همزمان با شروع کشش، سیستم آکوستیک امیشن شرکت Vallen به همراه نرم افزار سیستم Vallen AE Suite نیز راه اندازی می‌شود. سنسور یا حسگر مورد استفاده از نوع پهنای باند زیاد^۲ و از جنس پیزوالکتریک و مدل Vallen-VS150-MS می‌باشد که با یک کابل به واحد پیش تقویت کننده متصل شده است. همچنین برای دریافت سیگنال‌های مطلوب و اتصال مناسب بین نمونه و سنسور از گریس سیلیکون خلا شده استفاده شده است.

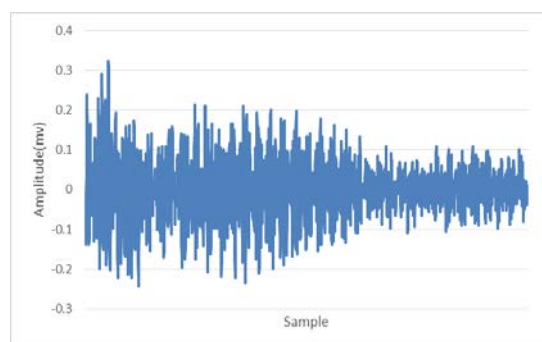
² Broad Band

¹ SSRT (Slow Strain Rate Test)

این بدین معنی می‌باشد که با افزایش غلظت یون‌های H^+ و Cl^- ، تشدید جریان خوردگی در حضور غلظت بالاتر این یون‌ها اتفاق می‌افتد.



(الف)

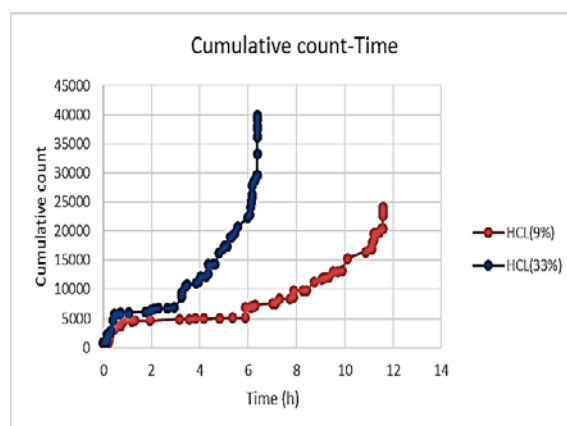


(ب)

شکل ۴) مقایسه شکل موج خوردگی تنش‌ی نمونه آلومینیوم 7075-T6 در زمان مشخص برای دو حالت محیط خوردنده HCL9% (الف) و HCL33% (ب)

البته مقایسه دو شکل موج بالا صرفاً در یک زمان مشخص بوده و قابل تعمیم به کل مجموعه منطقی نیست و از طرفی عملی نمی‌باشد که کل سیگنال‌ها را به صورت جداگانه مقایسه نمود. لذا می‌توان از روش کلاستر کردن (خوشه‌بندی) فازی برای تفکیک بهتر سیگنال‌ها بهره برد. برای تحلیل سیگنال‌های بدست آمده با روش خوشه‌بندی فازی، پنج مشخصه زمان اوج، ضرب‌آهنگ، انرژی، دامنه و مدت زمان استمرار مورد استفاده قرار گرفت. داده‌های مربوطه ابتدا نرمال گردید. سپس به منظور انتخاب مؤثرترین مشخصه‌های آکوستیکی و کاهش حجم اطلاعات از روش آنالیز اجزای اصلی استفاده شد. در این روش علاوه بر نمایش

ضرب‌آهنگ‌های تجمیعی^۱ ثبت شده از سیستم را در حین فرآیند ترک‌خوردگی تنش‌ی نمونه آلومینیوم 7075-T6 در دو محیط خوردنده HCL(9%) و HCL(33%) را نشان می‌دهد.



شکل ۳) نمودار میزان تجمیعی شمارش ضرب‌آهنگ‌ها برحسب زمان برای نمونه آزمون با شرایط آزمایش مشخص شامل دو محیط خوردنده HCL9% و HCL33%

لازم به ذکر است با توجه به شرایط و ویژگی‌های آزمون، در این پژوهش برای هر آزمایش از دو آزمون و دو نمونه آزمایشگاهی بهره گرفته شد و میانگین آنها بر اساس انحراف معیار (SD) ۵ ملاک عمل قرار گرفت. همانطور که ملاحظه می‌گردد با افزایش میزان غلظت HCL، ترک‌خوردگی تنش‌ی در زمان کوتاه‌تر و با نرخ نسبتاً بالاتری اتفاق افتاده است و همچنین میزان شمارش ضرب‌آهنگ‌های تجمیعی 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 همچنین واکنش‌های آندی فعال‌تر در حضور غلظت بالاتر یون‌های H^+ و Cl^- می‌گردد. شکل موج دریافت شده از خوردگی تنش‌ی نمونه آلومینیومی را مطابق شکل ۴ در دو حالت محیط خوردنده الف) HCL9% و ب) HCL33% در زمان یکسان نشان می‌دهد که مطابق شکل ملاحظه می‌گردد که دامنه و انرژی شکل موج به طور نسبی در HCL33% بالاتر از HCL9% می‌باشد.

¹ Cumulative Counts

جدول ۳) میزان تعلق سیگنال‌های مربوط به آزمایش‌های انجام شده در دو محیط HCL9% و HCL33%

شرایط آزمایش	میزان تعلق به کلاس اول	میزان تعلق به کلاس دوم
در AA7075-T6 محیط خورنده HCL9%	۷۴٪/۱۸	۲۵٪/۱۲
در محیط خورنده HCL33%	۸۶٪/۱۳	۱۳٪/۷

۴- نتیجه‌گیری

این مقاله با هدف پایش سیگنال‌های آکوستیک امیشن برای تشخیص نوع مکانیزم ترک‌خوردگی تنش‌ی (SCC) لوله آلومینیومی با روش خوشه‌بندی فازی FCM انجام گردید. مطابق نتایج بدست آمده، می‌توان استنتاج نمود که مکانیزم غالب در پدیده ترک‌خوردگی تنش‌ی در محلول خورنده HCL، مکانیزم آندی می‌باشد که هرچقدر غلظت این محلول (غلظت یون های H^+ و C^-) افزایش یابد بر میزان وابستگی خوردگی تنش‌ی به این مکانیزم افزوده می‌شود. این وابستگی در این دو محلول حدود ۷۵ الی ۸۶ درصد می‌باشد و مابقی (حدود ۱۴ الی ۲۵ درصد) باقیمانده سیگنال‌ها خصوصیات هیدروژن تردی یا مکانیزم کاتدی دارند. دقت شود که هر چند مکانیزم غالب، آندی می‌باشد ولیکن اساساً مکانیزم‌های کاتدی نیز موجود می‌باشند، چرا که در فرآیند خوردگی هر دو واکنش کلندی و آندی همواره به صورت همزمان موجود می‌باشند. همچنین پیشنهاد می‌شود جهت ارزیابی و صحت‌سنجی بیشتر نتایج موضوع مقاله از الگوریتم‌های دسته‌بندی دیگر از قبیل روش ترکیبی بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO^1) با روش FCM نیز استفاده کرد.

۵- تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۶- منابع

[1] Suckow T., Schroeder J., & Groche P. (2021). Roll Forming of a High Strength AA7075 Aluminum

بهترین داده‌های آکوستیکی، حجم اطلاعات کاهش می‌یابد و تاثیرگذارترین مشخصه‌ها انتخاب می‌شوند.

در ادامه با روش فازی (خوشه‌بندی FCM) پیرو داده‌های بهینه و نرمال شده از آنالیز اجزاء اصلی، دسته‌بندی انجام می‌گیرد. با توجه به تحقیقات انجام شده مبنی بر وجود دو مکانیزم اصلی برای خوردگی تنش‌ی در این سری از آلومینیوم‌ها شامل حل شدن آندی و تردی هیدروژن (مکانیزم کاتدی)، در این پژوهش نیز در نظر است داده‌ها به این دو کلاس طبقه‌بندی گردد. پس از کدنویسی و آنالیز داده‌ها در نرم افزار Matlab2021b دو کلاس با خصوصیات مرکزی نشان داده شده در جدول ۲ بدست آمد.

جدول ۲) مشخصه‌های مرکز دو کلاس حاصل از خوشه بندی فازی (FCM)

پارامترهای سیگنال	زمان اوج	شمارش ضرب آهنگ‌ها	انرژی	دامنه	مدت زمان استمرار
مرکز کلاس اول	۰/۵۲	۰/۱۹	۰/۰۱	۰/۴۶	۶/۵۰
مرکز کلاس دوم	۰/۹۱	۲/۰۸	۱/۵۲	۲/۲۸	۸/۴۰

بر اساس داده‌های نرمال بدست آمده در جدول بالا دو پارامتر شمارش ضرب آهنگ (Count) و انرژی به دلیل وجود اختلاف معنادار جهت کلاستر و آنالیز دو مکانیزم خوردگی یادشده استفاده گردید که مطابق تحقیقات انجام شده توسط محققین، مکانیزم آندی انرژی و شمارش ضرب آهنگ بالاتری نسبت به هیدروژن تردی دارد، بنابراین در این شرایط آزمایش، مکانیزم آندی به کلاس دوم و هیدروژن تردی به کلاس اول مرتبط می‌باشد.

پس از تشکیل مرکز سیگنال‌ها و خوشه‌بندی آنها، یکی از پارامترهای مهم درصد وابستگی هر سیگنال به یک کلاس می‌باشد. این خروجی از طریق کد متلب و میانگین‌گیری میزان تعلق هر سیگنال نمونه به دو کلاس مختلف طبق جدول ۳ تعیین می‌شود.

¹ Particle Swarm Optimization

- 157 (January), 79-86.
- [12] Zhang Z., Wu X., & Tan J. (2019). In-Situ Monitoring of Stress Corrosion Cracking of 304 Stainless Steel in High-Temperature Water by Analyzing Acoustic Emission Waveform, *Corrosion Science Journal*, 146(July), 90-98.
- [13] Hwang W., Bae S., Kim J., Kang S., Kwag N., & Lee B. (2015). Acoustic Emission Characteristics of Stress Corrosion Cracks in a Type 304 Stainless Steel Tube. *Nuclear and Engineering Technology Journal*, 47(4), 454-460.
- [14] Li B. & Yue X. (2016). Characterization of Intergranular Stress Corrosion Cracking of 304 Stainless Steel by Electrochemical Noise and Acoustic Emission Techniques. *International Journal of Electrochemical Science*, 11(1), 1-13.
- [15] Kovač J., Legat A., Zajec B., Kosec T., & Govekar E. (2015). Detection and Characterization of Stainless Steel SCC by the Analysis of Crack Related Acoustic Emission. *Ultrasonics Journal*, 62(1), 312-322.
- [16] Ruspini E. H., Bezdek J. C., & Keller J. M. (2019) Fuzzy Clustering : A Historical Perspective, *IEEE Computinal Intelligence Magazing*, 14(February), 45-55.
- [17] ASTM E399-12 (2012). Standard Test Method for Linear-Elastic Elane-Strain Fracture Foughness KIC of Metallic Materials. *ASTM International Standard*.
- Tube. *Production Engineering Journal*, 15(3), 573-586.
- [2] Zhang W., Li H., Hu Z., & Hua L. (2020). Investigation on the Deformation Behavior and Post-Formed Microstructure/Properties of AA7075-T6 Alloy under Pre-Hardened Hot Forming Process, *Material Science Engineering A Journal*, 792(January), 139749.
- [3] Dhanaraj P. S. & Rathinasuriyan C. (2022). Optimization of Fiber Laser Welding Parameters for High Strength Aluminium Alloy AA7075-T6. *Materials Today : Proceedings Journal*, 52(3),283-289.
- [4] Henry Holroyd N.J. & Scamans G.M. (2013), Stress Corrosion Cracking in Al-Zn-Mg-Cu Aluminum Alloys in Saline Environments. *Metallurgical And Materials Transactions A*, 44a(March),1231.
- [5] Euesden R.T., Aboura Y., Garner A.J., Jailin T., Grant C., Barrett Z., Engel C., Shanthraj P. , Holroyd N.J.H., Prangnell P.B., & Burnett T.L. (2023). In-Situ Observation of Environmentally Assisted Crack Initiation and Short Crack Growth Behavior of New-Generation 7xxx Series Alloys in Humid Air. *Corrosin Science Journal*, 216(2023), 11123.
- [6] Prabhuraj P., Rajakumar S., Lakshminarayanan A. K., & Balasubramanian V. (2017), Evaluating Stress Corrosion Cracking Behaviour of High Strength AA7075-T651 Aluminium Alloy. *Mechanical Behavior Material Journal*, 26(3-4), 105-112.
- [7] Leinonen H., Schildt T., & Hänninen H. (2011). Stress Corrosion Cracking-Crevice Interaction in Austenitic Stainless Steels Characterized by Acoustic Emission. *Metallurgical and Materials Transactions A Journal*. 42(2), 424-433.
- [8] Lim J.K., Chung D.S., & Chung S.H. (1993). Evaluation of SCC Susceptibility of Weld HAZ in Structural Steel (I) - Material Properties and Strain Rate. *Journal of korean Welding Society*, 11(3), 48-60.
- [9] Mazille H., Rothea R., & Tronel C. (1995). An Acoustic Emission Technique for Monitoring Pitting Corrosion of Austenitic Stainless Steels. *Corrosin Science Journal*, 37(9), 1365-1375.
- [10] Umamaheshwer Rao A. C., Vasu V., Govindaraju M., & Sai Srinadh K. V. (2016). Stress Corrosion Cracking Behaviour of 7xxx Aluminum Alloys : A Literature Review. *Transactions Nonferrous Metals Society of China Journal*, 26(6), 1447-1471.
- [11] Zhang Z., Zhang Z., Tan J., Wu X. (2019). Quantitatively Related Acoustic Emission Signal With Stress Corrosion Crack Growth Rate of Sensitized 304 Stainless Steel in High-Temperature Water. *Corrosion Science Journal*,