ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2021;21(9):601-613

Investigation of Stress Distribution in Corrosion Pits on the Compressor Blade Using Boundary Element Method

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Mollapour Y.[1]
Poursaeidi E.[1*]

How to cite this article
Mollapour Y, Poursaeidi E, Investigation of Stress Distribution in Corrosion Pits on the Compressor Blade Using Boundary Element Method. Modares Mechanical Engineering. 2021;21(9):601-613.

[1]Department of Mechanical Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

Correspondence
Address: Department of Mechanical Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran.
Phone: -
epsaeidi@znu.ac.ir

Article History
Received: November 02, 2020
Accepted: May 29, 2021
ePublished: July 28, 2021

ABSTRACT

The aim of this paper is to investigate the growth of pitting corrosion in CUSTOM 450 stainless steel and to obtain strain values in growing pits at the maximum bending region. In this regard, a two-point bending specimen was made and subjected to a potentiostatic test under the potential of 350 mV_{SCE} in the 3.5 wt% sodium chloride solution. Then, the depth of the grown pits was calculated using Eddy Current device. By simulating a sample under the pitting corrosion in COMSOL Multiphysics software and matching its results with the results of the Eddy Current device, it was found that the simulation could largely replace the laboratory test. To calculate the tensile stress distribution in the cross section of the sample under pitting corrosion, the Laplace equation governing the sample was discretized. The same results were obtained by solving the discrete equations and comparing them with the results of COMSOL Multiphysics software. According to the results, the pit tends to grow superficially. This means that the surface growth of the pit is greater than its growth in the direction of depth. This is because near the sample surface, tensile stress and electrical potential are high, as well as chemical reactions and corrosion in areas near to the pit surface.

Keywords Pitting Corrosion, CUSTOM 450 Alloy, Stress Distribution, Boundary Element Method, Compressor Blade.

CITATION LINKS

[1] Numerical Investigation of the Effects of Minor Geometric... [2] Investigation of corrosion parameters... [3] Influence of effective chloride corrosion parameters variations on corrosion initiation... [4] Experimental investigation on erosion performance and wear factors of custom 450... [5] Experimental studies of erosion and corrosion interaction... [6] Determination of corrosion rates... [7] The physical meaning of noise resistance... [8] Electrochemical techniques in corrosion... [9] Microstructural characteristics and corrosion behavior of a super duplex stainless steel casting... [10] EIS evaluation of steady-state characteristic of 316... [11] Corrosion behaviour of Duplex stainless steels... [12] A finite-element computational model of chloride... [13] In situ SECM mapping of pitting corrosion... [14] Study of the effect of tempering on the susceptibility to environment-assisted cracking... [15] A study on the influence of double ellipsoidal pitting corrosion on the collapsing strength... [16] Quantitative evaluation of pit sizes... [17] Determination of pitting corrosion stage of stainless steel... [18] Electrochemical and pitting corrosion resistance of AISI 4145... [19] Experimental analysis of residual ultimate strength of stiffened panels... [20] Electrochemical corrosion, hydrogen permeation and stress corrosion cracking... [21] Clustering of corrosion pit depths... [22] Modelling Pitting Corrosion in Carbon Steel Materials... [23] Finite element based physical chemical modeling of corrosion... [24] Estimation of Critical Dimensions for the Crack... [25] Total life estimation of a compressor blade... [26] Pitting corrosion as the main cause of crack initiation... [27] An outrun competition of corrosion fatigue and stress corrosion cracking... [28] Numerical Investigation of Pitting Corrosion of CUSTOM 450 Alloy in Acetic Acid and Sodium Acetate... [29] Pitting Corrosion Behavior of CUSTOM 450... [30] Effect of coating surface finishing on fatigue behavior of C450 steel... [31] Technical datasheet... [32] Formulation and Mathematical Model in Cathodic Protection... [33] Simulation and Numerical Results for Cathodic Protection... [34] The Finite Element Method in Structural... [35] Effects of stress on pitting corrosion...

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

بررسی توزیع تنش در حفره‌های خوردگی روی پره‌ی کمپرسور به روش المان مرزی

یوسف ملاپور
گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان
اسماعیل پورسعیدی*
گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

چکیده

در این پژوهش به بررسی توزیع تنش در حفره‌های خوردگی روی پره‌ی کمپرسور توربین گازی به روش المان مرزی پرداخته می‌شود. در این راستا ابتدا نمونه‌ی خمش دو نقطه‌ای از جنس پره‌ی کمپرسور توربین گازی ساخته شده و به کمک آزمون پتانسیو استاتیک تحت پتانسیل ۳۵۰ mV_{SCE} در محلول ۳/۵ درصد وزنی سدیم کلرید قرار می‌گیرد تا نمونه در محل خمش بیشینه دچار خوردگی حفره‌ای شود. سپس عمق حفره‌های رشد یافته با استفاده از دستگاه ادی‌کارنت محاسبه می‌شود. با شبیه‌سازی نمونه‌ی تحت خوردگی حفره‌ای در نرم‌افزار کامسول و تطابق نتایج آن با نتایج دستگاه ادی‌کارنت مشخص شد که شبیه‌سازی تا حد زیادی می‌تواند جایگزین تست آزمایشگاهی شود. برای محاسبه‌ی توزیع تنش کششی در مقطع عرضی نمونه‌ی تحت خوردگی حفره‌ای، گسسته‌سازی معادله‌ی لاپلاس حاکم بر نمونه انجام شد. با حل معادلات گسسته‌سازی شده و مقایسه‌ی آن‌ها با نتایج نرم‌افزار کامسول نتایج یکسانی بدست آمد. با توجه به نتایج، حفره تمایل دارد به صورت سطحی رشد کند. این یعنی رشد سطحی حفره از رشد آن در جهت عمق بیشتر است. دلیل این امر این است که در نزدیکی سطح نمونه، تنش کششی و پتانسیل الکتریکی زیاد است و همچنین واکنش‌های شیمیایی و خوردگی در نواحی نزدیک به سطح حفره بیشتر است.

کلیدواژه‌ها: خوردگی حفره‌ای، آلیاژ CUSTOM 450، توزیع تنش، روش المان مرزی، پره کمپرسور

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۱۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۰۸
*نویسنده مسئول: epsaeidi@znu.ac.ir

۱- مقدمه

خوردگی حفره‌ای از مهم‌ترین انواع خوردگی موضعی می‌باشد که سبب سوراخ شدن و در نتیجه زوال قطعه‌ی فلزی می‌گردد و این مسئله می‌تواند تبعات بسیار خطرناکی را در قطعات به همراه داشته باشد[1-3]. حفره‌دار شدن را به سختی می‌توان به صورت کمی مورد ارزیابی و مقایسه قرار داد زیرا تعداد و عمق نفوذ حفرات به‌وجود آمده روی سطح فلزی یکسان نیست. گاهی اوقات، زمان زیادی برای به وجود آمدن حفره (شش ماه یا بیشتر) مورد نیاز است ولی پس از تشکیل حفره مرحله‌ی‌رشد حفره با سرعت زیادی پیش می‌رود و خسارات بزرگی را به بار می‌آورد[4,5].

بسیار مهم است که از واماندگی‌های غیر منتظره ناشی از خوردگی حفره‌ای و ترک خوردگی تنشی جلوگیری کرد. در این میان با توجه به نبود روش‌های تحلیلی عمومی برای پیش‌بینی ترکیب محیط و ماده در شرایط وقوع خوردگی حفره‌ای و ترک خوردگی تنشی، آزمایشگاه نقش مهمی ایفا می‌کند. به‌منظور صحه‌گذاری شرایط آزمایشگاهی و یا شبیه‌سازی تقریبی حوادث واقعی نیز می‌توان با بهره‌گیری از مدل‌سازی‌های عددی، اتفاقات را ارزیابی کرد و با تئوری‌های موجود مقایسه کرد. بدین منظور بخشی از کارهای مهم گذشته مرور می‌شود.

در زمینه‌ی اندازه‌گیری‌های الکتروشیمیایی ماکروسکوپی و تحقیقات مکانیسم خوردگی فلز پیشرفت‌های زیادی در چند دهه‌ی گذشته صورت گرفته است[6-8]. روش‌های اندازه‌گیری الکتروشیمیایی سنتی، از جمله اندازه‌گیری منحنی‌های قطبش پتانسیو دینامیک، منحنی طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی و نویز الکتروشیمیایی محدود به تشخیص میانگین اطلاعات الکتروشیمیایی در سطح الکترود است[9-11]. این فنون در فرایند خوردگی به صورت موضعی، قادر به توصیف دقیق اطلاعات میکروسکوپی نیستند.

در سال‌های اخیر شبیه‌سازی فرایندهای خوردگی و ترک‌دار شدن قطعات در فرایندهای صنعتی به منظور تخمین و پیش‌بینی حوادث قبل از وقوع کارایی بسیاری یافته است. ونمن[12]، با استفاده از نرم‌افزار آباکوس (ABAQUS)، ترک خوردگی تنشی (SCC) مرزدانه‌ای را مدل‌سازی کرد و بیشتر جنبه‌های مکانیکی نسبت به شیمیایی مورد بحث قرار گرفت. مدل بر اساس ایجاد حفره‌ی سطحی و شروع ترک از حفره تحت شرایط مکانیکی پایه‌گذاری شد و هماهنگی خوبی با ترک خوردگی تنشی مرزدانه‌ای در محیط $MgCl_2$، بر اساس مشاهدات تجربی داشت. مدل توانست پیش‌بینی رشد ترک و نحوه توزیع مجدد تنش و تأثیر آن روی رشد در مرحله‌ی بعدی را انجام دهد.

یی و همکاران[13] برای تصویربرداری از خوردگی حفره‌ای فولاد ضد زنگ 316 L، یک میکرو الکترود بسیار ریز پلاتینی به شعاع ۰/۷ میکرومتر را از فاصله‌ی یک میکرومتری در محلول سدیم کلرید خنثی قرار دادند. وضوح فضایی میکروسکوپ الکتروشیمیایی روبشی به شدت به اندازه‌ی نوک و فاصله‌ی نوک از بستر مرتبط است. در این تحقیق مدل‌های سه بعدی نرم‌افزار کامسول برای حفره با ابعاد مشخص ساخته شد. نتایج آزمایش به وضوح حفره‌های فعال در حال رشد را در ابعاد میکرونی نشان می‌دهد.

آنانتها و همکاران[14] مقاومت به ترک‌دار شدن محیط فولاد زنگ نزن مارتنزیتی ۴۲۰ در محلول ۰/۳ مولار NaCl در دمای اتاق در بارگذاری ثابت برای سی روز بررسی کردند. فولاد از ۲۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد تا ۵۰۰ درجه‌ی سانتیگراد تمپر شد که حفره‌های خوردگی متمایل به ترک‌دار شدن را نمایان ساخت. سطح شکسته، دانه‌های برش خورده، شکاف‌دار و ترک‌های بین و مردانه‌ای را نشان داد که مکانیسم ترکیبی ترک خوردگی تنشی و تردی هیدروژنی را تداعی می‌کنند. تحلیل المان محدود با نرم‌افزار آباکوس تنش و کرنش موضعی در دهانه و عمق حفره را محل‌های مناسب، برای انتقال حفره به ترک مشخص کرد.

یان و همکاران[15] تأثیر دو خوردگی حفره‌ای نیمه کروی برای افت استحکام یک پوشش را بررسی کردند. از نرم‌افزار انسیس به روش المان محدود برای تحلیل تنش استفاده شد و پارامترهای تأثیرگذار مثل فاصله بین دو حفره به صورت محوری و محیطی مطالعه گردید.

وانگ و چنگ[16]، عمق، قطر و مکان حفره‌ها در فولاد X۸۰ استحکام بالا را به‌صورت کمی به‌روش اندازه‌گیری نویز جریان الکتروشیمیایی و میکروسکوپ لیزر روبشی در محلول هوادهی شده‌ی سدیم کلرید مورد بررسی قرار دادند. ارلیکوسکی و همکاران[17]، روشی برای تفکیک مراحل مختلف فرایند خوردگی حفره‌ای فولاد زنگ نزن ۳۰۴ در محیط $FeCl_3$ ارائه کردند. اندازه‌گیری‌ها با استفاده از طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی گالوانودینامیک انجام شد.

لو و همکاران[18]، تأثیر عملیات ایجاد تنش پسماند در لایه‌های مختلف توسط لیزر، مورفولوژی حفره‌ها در محلول خوردگی استاندارد و مقاومت خوردگی الکتروشیمیایی آلیاژ AISI ۴۱۴۵ را با آزمایش خوردگی حفره‌ای، قطبش پتانسیودینامیک و مشاهدات میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد عملیات لیزر زنی موجب تقویت مقاومت خوردگی حفره‌ای می‌شود.

ژانگ و همکاران[19]، مکانیک فروپاشی و استحکام نهایی یک صفحه به‌صورت آزمایشگاهی با نمونه‌هایی که سوراخ‌های دایره‌ای شکل به‌عنوان حفره داشت، بررسی کردند. مجموعه‌ای از آزمایش‌های فشرده به‌منظور مشاهده‌ی تأثیر خوردگی حفره‌ای انجام شد. محل، قطر و عمق حفره برای محاسبه‌ی تأثیر حفره بر استحکام نهایی بررسی شد. نتایج آزمایش‌ها بارگذاری ثابت، پاسخ کرنش و استحکام نهایی تحلیل شد. مشخص شد حجم حفره‌دار شدن و حجم از دست رفته موجب کاهش استحکام نهایی می‌شود.

تیان و همکاران[20] خوردگی الکتروشیمیایی و رفتار ترک خوردگی تنشی فولاد E۶۹۰ را در آب دریا به‌صورت مصنوعی حاوی تیوسولفات بررسی کردند. اسیدی بودن آب دریا و تیوسولفات موجب افزایش جریان کاتدی می‌شود. تردی هیدروژنی در مقادیر کم و خوردگی حفره‌ای در مقادیر زیاد تیوسولفات موجب ترک در فولاد می‌گردد. برای حفره‌دار شدن از آزمون‌های الکتروشیمیایی پتانسیل مدار باز و پتانسیو دینامیک استفاده شد. برای تشخیص ترکیبات شیمیایی و محصولات خوردگی از پراش اشعه‌ی ایکس و طیف‌سنجی اشعه‌ی ایکس و برای مورفولوژی سطح از میکروسکوپ روبش لیزری کانفوکال برای نمونه‌ی کششی نرخ کرنش آرام بهره گرفتند.

سلطانی و ملچرز[21] بر روی سطوح خارجی لوله‌های چدنی که بیش از ۱۲۹ سال در خاک رس دفن شد، مجموعه‌ای از حفره‌ها با عمق مشابه مشاهده کردند. بر اساس تجربه برای هر نوع خاک رشد حفره‌ها در عمق دارای مقدار مشخصی است که با کاهش pH افزایش می‌یابد. این یافته‌ها با پتانسیل الکتروشیمیایی حفره‌دار شدن تفسیر می‌شود و با حفره‌ها روی فولاد در شرایط خوردگی دریایی مقایسه می‌شود. بر این اساس مدلی برای عمق بیشینه‌ی حفره در نظر گرفته شد.

در سال‌های اخیر شبیه‌سازی فرایندهای خوردگی در قطعات در فرایندهای صنعتی به منظور تخمین و پیش‌بینی حوادث قبل از وقوع، کارایی زیادی داشته است. سوهایلا صالح[22]، به بررسی انتشار یک حفره در فولاد کربنی در اثر فعل و انفعالات شیمیایی و الکتروشیمیایی با ارائه‌ی یک مدل دوبعدی برای پیش‌بینی تکامل حفره پرداخت. یازده ذره در محیط آبی محلول سدیم کلرید و دو ذره در مدل منظور و با استفاده از نرم‌افزار کامسول معادلات برای نرنست-پلانک برای انتقال جرم و تغییرات پتانسیل حل شدند. هم‌چنین از مدل‌های چندگانه فیزیکی که شامل حرکت مرزدانه‌ها بود، برای پیش‌بینی شکل حفره استفاده شد. نتایج مطالعه نشان داد مدل توانایی شناسایی مهاجرت ذرات یونی، گذار فعال و غیرفعال، شناسایی ذرات رسوبی، حرکت مرزدانه‌ها و در نهایت شکل حفره در زمان مشخص را دارد. ویجایاراقاوان و همکاران[23]، مکانیسم خوردگی آلیاژ منیزیم (AZ۳۱) را بر پایه‌ی مدل‌سازی فیزیکی- شیمیایی بررسی کردند. از داده‌های فیزیکی و شیمیایی آزمایشگاهی مثل استحکام، خستگی، زمان واماندگی، نرخ خوردگی، قطبیت، pH الکترولیت به عنوان ورودی برای نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده شد. برای شبیه‌سازی نیز از مدل خرابی مواد ترکیبی تغییر یافته استفاده شد . داده‌های خروجی نرم‌افزار، ورودی الگوریتم ژنتیک در استخراج یک فرمول محاسباتی بهینه برای یافتن بهترین شرایط کارکرد آلیاژ می‌باشد.

امیدی بیدگلی و همکاران[24] به تخمین ابعاد بحرانی ترک و حفره در مخزن ذخیره سوخت با استفاده از روش اجزا محدود و تاگوچی پرداختند. در پژوهش آن ها، نظریه های اساسی مربوط به نقص ترک مورد بحث قرار گرفت. سپس، با در نظر گرفتن انواع نقص‌ها با استفاده از شبیه سازی المان محدود، مخزن ذخیره سوخت در یکی از جزایر کشور مدل‌سازی و تحلیل شد. ابعاد بحرانی ترک‌ها و حفره‌های خوردگی در برخی از موارد مشخص شد. در نهایت، از روش تاگوچی برای بررسی تأثیر پارامترهای مختلف مربوط به نقص‌های مختلف، از جمله طول، عمق و قطر، در حداکثر تنش استفاده شد. نتایج نشان داد که اثر ترک و عمق حفره-های خوردگی نسبت به اثر طول و قطر به ترتیب برای نقص ترک و خوردگی حفره‌ای بالاتر است.

پدرام و پورسعیدی[25] به تخمین عمر پره‌ی کمپرسور با در نظر گرفتن زمان ایجاد و رشد حفره‌ی خوردگی و تبدیل به ترک خوردگی تنشی و نرک خستگی و در نهایت واماندگی، پرداختند. پورسعیدی و پدرام[26,27] ایجاد ترک خوردگی تنشی و ترک خستگی از حفره‌ی خوردگی را در پره‌ی کمپرسور با جنس CUSTOM ۴۵۰، با استفاده از تصاویر SEM و محاسبه‌ی فاکتور شدت تنش بررسی کردند.

شبیه‌سازی پره‌ی کمپرسور با وجود حفره‌ی خوردگی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس برای مطالعه‌ی مقدار توزیع تنش در حفره‌ی خوردگی در شرایط کارکرد پره نیز انجام شد. ملاپور و همکاران[28] با استفاده از نرم‌افزار کامسول، فرایند خوردگی حفره‌ای آلیاژ ۴۵۰ CUSTOM را در محلول استیک اسید و استات سدیم شبیه‌سازی کردند و تغییرات غلظت یون‌ها، پتانسیل و چگالی جریان را بر حسب عمق حفره‌ی خوردگی بدست آوردند. پدرام و همکاران[29] رفتار حفره‌دار شدن آلیاژ ۴۵۰ CUSTOM را با استفاده از آزمایش‌های الکتروشیمیایی و ادی کارنت (Eddy Current)، بررسی کردند. همچنین به محاسبه‌ی زمان و پتانسیل حفره‌دار شدن و اندازه‌گیری عمق حفره پرداختند. بنابراین مطالعات زیادی برای بررسی رفتار حفره‌دار شدن به روش‌های تجربی و عددی شده است. در کارهای پیشین به پیش‌بینی تنش موضعی در حفره‌ی خوردگی اشاره نشده است. محاسبه-ی کرنش و تنش در حفره‌ها و اطلاع از زمان بیشینه‌ی مقدار آن نقش بسیار مهمی در تبدیل حفره به ترک دارد.

هدف اصلی این پژوهش بررسی توزیع تنش کششی در نمونه‌ی تحت خوردگی حفره‌ای به روش المان مرزی (BEM) می‌باشد. در این راستا ابتدا نمونه‌ی خمش دو نقطه‌ای ساخته شده و به کمک آزمون پتانسیو استاتیک تحت پتانسیل ۳۵۰ mV_{SCE} در محلول ۳/۵ درصد وزنی سدیم کلرید قرار می‌گیرد تا نمونه در محل خمش بیشینه دچار خوردگی حفره‌ای شود. سپس عمق حفره‌های رشد یافته با استفاده از دستگاه ادی‌کارنت محاسبه می‌شود. با شبیه‌سازی نمونه‌ی تحت خوردگی حفره‌ای در نرم‌افزار کامسول و تطابق نتایج آن با نتایج دستگاه ادی‌کارنت مشخص شد که شبیه‌سازی تا حد زیادی می‌تواند جایگزین تست آزمایشگاهی شود. برای محاسبه‌ی توزیع تنش کششی در مقطع عرضی نمونه‌ی تحت خوردگی حفره‌ای، گسسته‌سازی معادله‌ی لاپلاس حاکم بر نمونه انجام شد. با حل معادلات گسسته‌سازی شده و مقایسه‌ی آن‌ها با نتایج نرم‌افزار کامسول نتایج یکسانی بدست آمد.

۲- عیوب موجود در پره‌ی کمپرسور

واحد نیروگاه مجتمع گاز پارس جنوبی در مجاورت دریا قرار دارد. این واحد نیروگاهی دارای یک توربین با سیکل بخار و چهار عدد توربین گازی ۶ GE-Frame در واحدهای ۲ و ۳ مجتمع گاز پارس، با کارکردی کمتر از یك دهه می‌باشد (توربین‌های گازی در اواسط سال ۱۳۸۲ شمسی راه‌اندازی شدند). توربین گازی GTG D این نیروگاه از اواسط اسفند ماه ۱۳۸۶، به دلیل واماندگی ناگهانی و تخریبِ کامل کمپرسور از مدار خارج شد. روتور این نوع توربین به وزن ۱۱۳۶۳ کیلوگرم از نوع تک‌محوری بوده و متشکل از ۱۷ ردیف پره‌ی کمپرسور و سه ردیف پره‌ی توربین در دو طرف روتور می‌باشد که توسط یک عضو میانی به‌نام ترک‌تیوب به یکدیگر وصل شده‌اند.

توربین گاز GTG D پس از ۳۰۸۹۵ ساعت کارکرد در تاریخ ۸۶/۱۲/۱۱ به‌دلیل ارتعاشات زیاد دچار تریپ گردید.

هنگامی که هوا در ورودی کمپرسور شتاب می‌گیرد، دچار یک افت دمای استاتیکی می‌شود. اگر این افت دما برای ایجاد هوای اشباع شده‌ی مرطوب کافی باشد آنگاه میعان رخ می‌دهد؛ به‌عبارتی دیگر اگر دما در ورودی کمپرسور از دمای نقطه‌ی شبنم کمتر باشد میعان اتفاق افتاده و رطوبت شکل می‌گیرد. فاکتورهایی که خوردگی یک محل را تعیین می‌کند عبارت است از میزان رطوبت، غلظت گازهای اسیدی و ترکیب ذرات ریز (مانند دوده و روغن). یک شرط لازم برای خوردگی وجود رطوبت می‌باشد. اسیدیته یک محیط مرطوب از برهم کنش رطوبت با گازها و ذرات ریز محیط ناشی می‌شود. در مجاورت دریا قرار داشتنِ این واحد نیروگاهی باعث شده که پره‌های کمپرسور در معرض خوردگی قرار گیرند.

۳- تعریف مسئله

در این پژوهش به بررسی توزیع تنش کششی در نمونه‌ی تحت خوردگی حفره‌ای به روش المان مرزی پرداخته می‌شود. پره از جنس ۴۵۰ CUSTOM و نمونه‌ی برش داده شده از آن در شکل‌های (۱- الف) و (۱- ب) نمایش داده شده است. نمونه به ابعاد ۵×۷۴×۰/۵ میلی متر با دستگاه برش سیم (Wire cut) از پره برش یافت و به‌ترتیب با سنباده‌ی سیلیسیوم کاربیدی با شماره‌ی ۱۰۰، ۲۴۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۲۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ صیقل داده تا به سطحی همچون آیینه مشابه شود و سپس با الکل شسته شد. به علت وجود سدیم و کلر در تحلیل طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDX) پره‌ی شکسته[27] از محلول سدیم کلرید ۳/۵ درصد وزنی مطابق با استاندارد ASTM G۴۴ به‌عنوان الکترولیت استفاده شده است.

برای شرایط تنش‌دار، نمونه تحت خمش دو نقطه‌ای (Two point bending) طبق استاندارد ASTM G۳۹ با فاصله تکیه‌گاهی ۶۸ سانتی‌متر قرار گرفت (شکل ۱- ج). برای محاسبه‌ی توزیع تنش کششی در محل خمش بیشینه، یک مدل خمش دو نقطه‌ای با ابعاد ذکر شده در نرم افزار المان محدود آباکوس شبیه‌سازی شد. هدف از این شبیه‌سازی اثبات این است که نمونه در حالت خمش دو نقطه‌ای در حالت الاستیک باقی می‌ماند و وارد منطقه‌ی پلاستیک نمی‌شود؛ زیرا شرایط کارکرد پره در محدوده‌ی الاستیک است[27]. بدین منظور، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مورد نیاز در جدول ۱ به قطعه در نرم افزار اعمال شده و شرایط مرزی برای خم شدن دو نقطه‌ای اعمال می‌شود. در این شبیه‌سازی از ۱۱۱۵۳ گره و ۱۴۸۰ المان ۲۰ گره‌ای شش وجهی مرتبه دو (C3D20R) استفاده شده است.

شکل ۱) (الف) پره‌ی شکسته شده، (ب) برشی از پره، (ج) نمونه‌ی تنش‌دار و بدون تنش.

جدول ۱) خواص فیزیکی و مکانیکی آلیاژ CUSTOM 450[30,31].

نام	چگالی [kg/m³]	مدول الاستیسیته [GPa]	نسبت پواسون	تنش تسلیم [MPa]
CUSTOM ۴۵۰	۷۸۰۰	۲۰۰	۰/۲۹	۱۰۶۰

شکل ۲ میزان توزیع تنش کششی در محل خمش بیشینه در شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. مقدار تنش کششی در این منطقه حدود ۸۲۰ مگاپاسکال است که کمتر از تنش تسلیم برای ۴۵۰ CUSTOM می‌باشد؛ بنابراین نمونه در این شرایط رفتاری الاستیک دارد. این مقدار تنش نزدیک به مقدار تنش قابل محاسبه از فرمول پیشنهاد شده در استاندارد ASTM G۳۹، بر اساس مدول الاستیسیته، ابعاد هندسی نمونه و شرایط تکیه‌گاهی می‌باشد.

۴- تحلیل آزمایشگاهی

۴-۱- روند انجام آزمون‌های الکتروشیمیایی

آزمایش‌های الکتروشیمیایی مطابق با استاندارد ASTM G5 با استفاده از دستگاه اوریگافلکس ۵۰۰ در آزمایشگاه شیمی دانشگاه زنجان در دمای اتاق انجام شد.

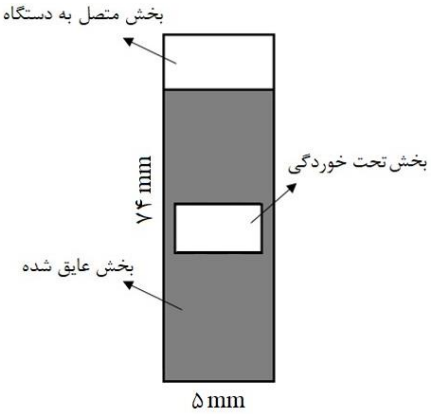
این دستگاه قابلیت‌های بالایی برای انجام انواع آزمایش‌های خوردگی از جمله خوردگی حفره‌ای دارد.

شکل ۲) توزیع تنش کششی در خمش دو نقطه‌ای.

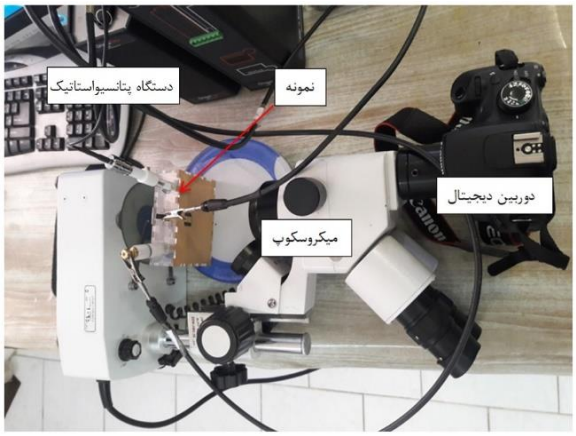
اندازه‌گیری‌ها با استفاده از روش معمول سه الکترودی انجام شده‌اند. کالومل تجاری به‌عنوان الکترود مرجع، پلاتین به‌عنوان الکترود کمکی و نمونه نوار CUSTOM ٤٥٠ با سطح مقطع ٤ میلی‌متر مربع تحت خوردگی در محل خمش بیشینه به‌عنوان الکترود کار می‌باشند (شکل ۳). به‌جز بخش تحت خوردگی در محل خمش بیشینه و محل اتصال به دستگاه، قسمت‌های دیگر نمونه با چسب برق عایق شده است. بخش متصل به دستگاه کاملاً باید از محلول بیرون باشد. بنابراین نمونه را به‌هنگام آزمایش نمی‌توان به‌صورت افقی داخل محلول در زیر میکروسکوپ قرار داد. پس برای اینکه بتوان نمونه را عمودی داخل محلول حین روند آزمایش مشاهده کرد، میکروسکوپ به‌صورت افقی مطابق شکل ٤ بر روی میز قرار داده شد. با این ایده در چیدمان، می‌توان سطح در حال خوردگی در محل بیشینه خمش را به کمک میکروسکوپ فیلم‌برداری کرد. در ادامه آزمون‌ها تشریح می‌شوند. هر آزمون حداقل پنج مرتبه تکرار شده و نتایج مشابه حاصل گشته است.

۴-۲- مشاهده‌ی رشد حفره

برای بدست آوردن محدوده پتانسیل مورد نیاز برای روبش در آزمون پتانسیو دینامیک، باید پتانسیل مدار باز بدست آید. در آزمون پتانسیل مدار باز به ترتیب برای نمونه‌های بدون تنش و تنش‌دار،



شکل ۳) شماتیک نمونه‌ی تحت آزمایش پتانسیو استاتیک.



شکل ۴) چیدمان آزمایش مشاهده‌ی لحظه‌ای حفره‌دار شدن و ترک خوردگی تنشی.

پتانسیل بعد از چهار دقیقه در پتانسیل mV_{SCE} ۵۰۰- و mV_{SCE} ۴۲۰- به حالت ثابت رسید (زیر شکل‌های ۵ و ۶). بنابراین به ترتیب محدوده‌های mV_{SCE} ۲۵۰ تا mV_{SCE} ۵۰۰ و mV_{SCE} ۵۰۰- تا mV_{SCE} ۵۰۰ برای نمونه‌های بدون تنش و تنش‌دار به‌عنوان بازه هایی احتمالی پتانسیل حفره‌دار شدن مورد آزمون پتانسیو دینامیک قرار گرفت. شکل‌های ۵ و ۶ رفتار پتانسیل- چگالی جریان نمونه بدون تنش و تنش‌دار در آزمون پتانسیو دینامیک در محلول ۳/۵ درصد وزنی سدیم کلرید را با نرخ روبش ۱ mV/sec (میلی‌ولت بر واحد زمان) نشان می‌دهد (برای نمایش بهتر، در شکل بازه‌های کوچک‌تر انتخاب شده است). افزایش ناگهانی چگالی جریان از پتانسیل mV_{SCE} ۳۷۵ برای نمونه‌ی بدون تنش و mV_{SCE} ۱۷۰ برای نمونه‌ی تنش‌دار مشهود است که به عنوان پتانسیل حفره‌دار شدن شناخته می‌شود.

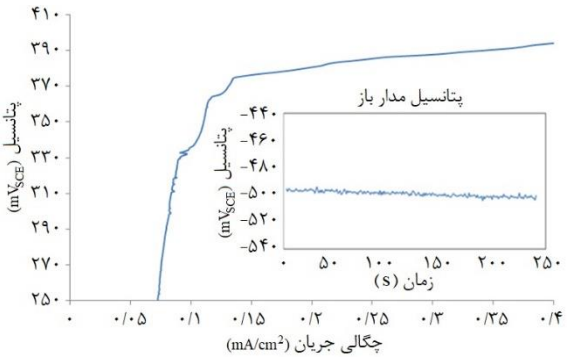
پتانسیل حفره‌دار شدن برای نمونه‌ی بدون تنش mV_{SCE} ۳۷۵ و برای نمونه‌ی تنش‌دار mV_{SCE} ۱۷۰ بدست آمد.

بنابراین برای دستیابی به تعدادی حفره با ابعاد قابل قبول در زمان محدود آزمایشگاهی، پتانسیل mVSCE ۳۵۰ به‌عنوان پتانسیل ثابت اعمالی در آزمون‌های بعدی در نظر گرفته شد تا با گذشت اندکی از زمان اعمال پتانسیل (نه در ابتدا)، نمونه شروع به حفره‌دار شدن نماید. بنابراین نمونه‌ی تنش‌دار در آزمون پتانسیو استاتیک تحت پتانسیل mV_{SCE} ۳۵۰ قرار گرفته و از سطح آن فیلم‌برداری شد. شکل ۷ حفره‌ی رشد یافته پس از ۱۵ دقیقه تحت پتانسیل mV_{SCE} ۳۵۰ را نمایش می‌دهد.

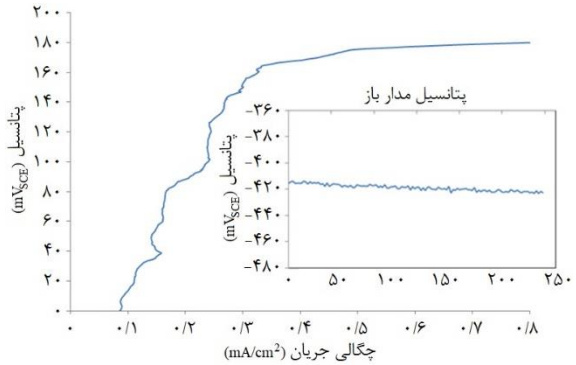
۴-۳- روند انجام تست ادی‌کارنت

برای ایجاد جریان گردابی بر روی مواد تحت آزمایش از کویل‌های الکترومغناطیسی استفاده می‌گردد. با اندازه‌گیری امپدانس الکتریکی این کویل‌ها ارتباط بین جریان گردابی و تغییرات مواد را می‌توان بدست آورد. حفره یا ترک باعث تغییر هدایت الکتریکی می‌گردد که با اندازه‌گیری این امپدانس می‌توان تغییرات عمق حفره یا ترک را بدست آورد. بنابراین جریان‌های گردابی با استفاده از روش الکترو مغناطیس ایجاد می‌شوند. تمام اندازه گیری‌های ادی‌کارنت با استفاده از سیستم بلوک تست ترک ترکیبی انجام شد. طرح کلی مجموعه ادی‌کارنت و صفحه‌ی کالیبراسیون عمق حفره و ترک سطحی در شکل ۸ نشان داده شده است.

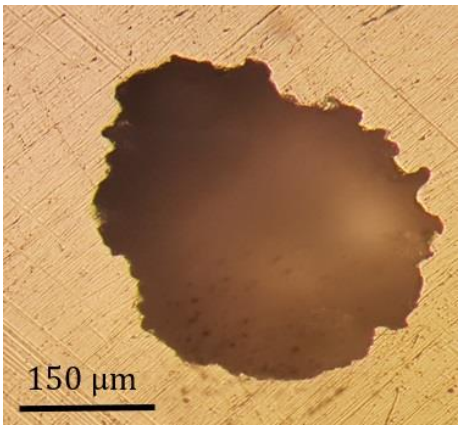
صفحه‌ی کالیبراسیون شامل ۳ ترک مشخص با عمق‌های ۰/۲، ۰/۵ و ۱ میلی‌متر برای اعتبارسنجی می‌باشد. دو متغیر مهم ادی-کارنت مقاومت (RX) و راکتانس القایی (XL) می‌باشد که با حرکت دادن پراب روی صفحه‌ی کالیبراسیون و رسیدن به ترک، مقدار آن‌ها تغییر می‌کند. پراب مورد استفاده در این آزمایش که از نوع PN-03-103-S می‌باشد در شکل ۵ نمایش داده شده است. طول پراب و قطر حسگر آن به ترتیب ۱۰۳ و ۳ میلی‌متر می‌باشد. این تست در فرکانس ۵۰ kHz و حد تفکیک سیگنال ۳۵ dB انجام شد.



شکل ۵) آزمون پتانسیودینامیک اعمالی بر نمونه¬ی بدون تنش در محلول ۳/۵ درصد وزنی سدیم کلرید (زیر تصویر پتانسیل مدار باز).



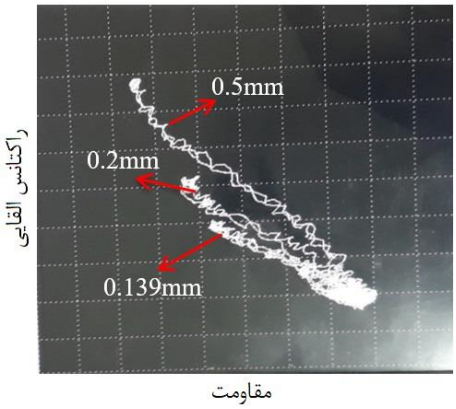
شکل ۶) آزمون پتانسیودینامیک اعمالی بر نمونه‌ی تنش‌دار در محلول ۳/۵ درصد وزنی سدیم کلرید (زیر تصویر پتانسیل مدار باز).



شکل ۷) حفره‌ی رشد یافته پس از ۱۵ دقیقه تحت پتانسیل mVSCE350.

با حرکت دادن پراب روی سطح از قسمت بدون ترک به سمت ترک دارای عمق ۰/۲ میلی‌متر مقدار XL از ۵۱۲ به ۵۸۰ تغییر می‌کند که بیانگر این است که پراب یک ترک را اسکن کرده است. در حین حرکت و رسیدن به ترک در نمودار مقاومت بر حسب راکتانس القایی یک جهش ایجاد می‌شود (شکل ۹). پس هر ترک یا حفره با عمق مشخص، یک مقدار XL ثابت دارد. بنابراین با حرکت دادن پراب روی یک حفره با عمق نامشخص، می‌توان عمق آن را با استفاده از XL نمایش داده شده روی صفحه‌ی دستگاه ادی‌کارنت بدست آورد.

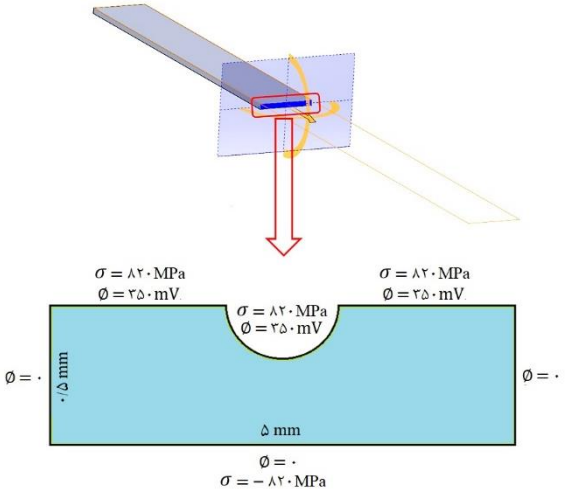
شکل ۸) شماتیک دستگاه ادی‌کارنت و صفحه‌ی کالیبراسیون.



شکل ۹) تغییرات راکتانس القایی بر حسب مقاومت برای ترک‌های با عمق ۰/۲ و ۰/۵ میلی‌متر و حفره با عمق ۰/۱۳۹ میلی‌متر..

۵- تحلیل تئوری

توزیع تنش در یک صفحه مستطیل شکل (مقطع عرضی نمونه‌ی تحت خوردگی حفره‌ای) با استفاده از معادله‌ی لاپلاس دو بعدی محاسبه می‌شود. پتانسیل وجوه چپ، راست و پایین به علت وجود چسب عایق صفر و پتانسیل سطوح بالا به علت اعمال پتانسیل در سطح ۳۵۰ mV می‌باشد. همچنین در وجه‌های عمودی مرزی سمت چپ و راست تنش کششی از پایین به بالا از ۸۵۰- تا ۸۵۰ مگاپاسگال تغییر می‌کند (شکل ۱۰).



شکل ۱۰) شرایط مرزی نمونه‌ی تحت خوردگی حفره‌ای در حضور تنش.

۵-۱- معادلات حاکم

مجموعه فلزات تحت حفاظت و آندهای حفاظتی آنها به همراه محیط الکترولیت آن را می توان به عنوان یک حجم کنترلی فرض کرد. در چنین حجم کنترلی می‌توان قانون پیوستگی را برای جریان الکتریکی به شکل ساده زیر نوشت:

$$\frac{\partial i_x}{\partial x}+\frac{\partial i_y}{\partial y}+\frac{\partial i_z}{\partial z}=0 \qquad (۱)$$

دراین معادله ix ,iy و iz شدت جریان در جهات مختلف دستگاه دکارتی‌اند[32].

از طرفی براساس قوانین ساده، جریان الکتریکی با مشتق اول پتانسیل الکتریکی رابطه مستقیم دارد. اگر این پتانسیل الکتریکی با Ø نمایش داده شود، می‌توان نوشت:

$$i=-E\left(\frac{\partial \emptyset}{\partial x}+\frac{\partial \emptyset}{\partial y}+\frac{\partial \emptyset}{\partial z}\right) \qquad (۲)$$

که در این معادله Ø همان پتانسیل الکتریکی، E هدایت الکتریکی و i شدت جریان الکتریکی است.

با ترکیب معادلات (۱) و (۲) معادله زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(E\frac{\partial \emptyset}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(E\frac{\partial \emptyset}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(E\frac{\partial \emptyset}{\partial x}\right)=0 \qquad (۳)$$

با فرض ثابت بودن E می‌توان نوشت:

$$\frac{\partial^2 \emptyset}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 \emptyset}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 \emptyset}{\partial z^2}=0 \qquad (۴)$$

معادله (۴) یک معادله لاپلاس ساده است. در نهایت برای تعیین پتانسیل در حجم کنترلی مورد نظر، این معادله باشرایط مرزی مناسب آن باید حل شود[23-25].

۵-۲- گسسته‌سازی معادله و روش حل

برای محاسبه تقریب تفاضل محدود مشتق مرتبه دوم ابتدا تعریف مشتق برای آن‌ها نوشته می‌شود و رابطه نهایی آن محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}(\mathbf{x}) &= \lim_{\Delta x\to 0}\frac{\frac{\partial U}{\partial x}\left(x+\frac{\Delta x}{2}\right)-\frac{\partial U}{\partial x}\left(x-\frac{\Delta x}{2}\right)}{\Delta x}\\ &= \lim_{\Delta x\to 0}\frac{1}{\Delta x}\left[\frac{U(x+\Delta x)-U(x)}{\Delta x}\right.\\ &\left.-\frac{U(x)-U(x-\Delta x)}{\Delta x}\right]\\ &= \lim_{\Delta x\to 0}\frac{1}{\Delta x^2}[U(x+\Delta x)-2U(x)\\ &+U(x-\Delta x)]\end{aligned} \qquad (۵)$$

در ادامه برای محاسبه تقریب تفاضل محدود مشتق دوم، علامت حد حذف می‌شود.

$$U_{xxi} \approx \delta_x^2 U_i \equiv \frac{1}{\Delta x^2}(U_{i+1} - 2U_i + U_{i-1}) \quad (۶)$$

در حالت کلی، تقریب مرتبه دوم مرکزی برای مشتق دوم تابع در نقطه i و j به صورت زیر است:

$$f_{xx}(i.j) = \frac{f_{i+1j} - 2f_{ij} + f_{i-1j}}{\Delta x^2} \quad (۷)$$

برای مشتق مرتبه دوم در جهت y هم می‌توان نوشت:

$$f_{yy}(i.j) = \frac{f_{ij+1} - 2f_{ij} + f_{ij-1}}{\Delta y^2} \quad (۸)$$

معادله لاپلاس دو بعدی به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$f_{xx} + f_{yy} = 0 \quad (۹)$$

مقادیر محاسبه شده از تقریب تفاضل محدود برای هر یک از جمله‌ها در معادله جایگزین می‌شود:

$$\frac{f_{i+1j} - 2f_{ij} + f_{i-1j}}{\Delta x^2} + \frac{f_{ij+1} - 2f_{ij} + f_{ij-1}}{\Delta y^2} = 0 \quad (۱۰\text{- الف})$$

$$f_{i+1j} + \beta^2 f_{ij+1} + f_{i-1j} + \beta^2 f_{ij-1} - 2(1+\beta^2) f_{ij} = 0 \quad (۱۰\text{- ب})$$

در صورتی که معادلات بر حسب مقدار تابع در نقطه i و j مرتب شوند داریم:

$$f_{ij} = \frac{f_{i+1j} + \beta^2 f_{ij+1} + f_{i-1j} + \beta^2 f_{ij-1}}{2(1+\beta^2)} \quad (۱۱)$$

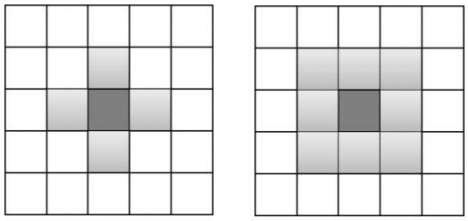
$$\beta = \frac{\Delta x}{\Delta y}$$

در حالت خاصی که اندازه شبکه محاسباتی در دو جهت با هم برابر است ($\Delta x=\Delta y$) معادلات به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$f_{ij} = \frac{1}{4}(f_{i+1j} + f_{ij+1} + f_{i-1j} + f_{ij-1}) \quad (۱۲)$$

همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است رایج ترین طرح های سلول همسایه مورد استفاده مور و نویمن است. در این پژوهش از طرح نویمن برای حل معادله‌ی لاپلاس استفاده شده است. قوانین انتقال می‌تواند اشکال مختلفی داشته باشد. ویژگی اساسی تغییر وضعیت سلول ها بر اساس حالت خود و سلول همسایه است.

شرایط مرزی این مسئله به دو نوع شرایط مرزی مربوط به پتانسیل الکتریکی و تنش کششی تقسیم می‌شود و تاثیر هر یک از شرایط مرزی بر روی گره‌های داخلی به صورت جداگانه محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از اصل جمع آثار (Superposition Principle) اثرات آن‌ها با هم جمع می‌شود. اصل جمع آثار برای مسائلی که شرایط مرزی آن‌ها یک دیمانسیون دارد استفاده می‌شود ولی در این پژوهش، پتانسیل الکتریکی و تنش هم دیمانسیون نیستند. برای حل این مشکل با توجه به آزمایش‌های انجام شده و شبیه‌سازی در نرم‌افزار کامسول، می‌توان بین توزیع پتانسیل الکتریکی و توزیع تنش در نمونه‌ی تحت خوردگی در زمان‌های مختلف ارتباطی ایجاد کرد. این ارتباط برای حل معادله لاپلاس و محاسبه توزیع تنش کششی و پتانسیل الکتریکی در نواحی داخلی نیاز می‌باشد. در این پژوهش، نمونه در ناحیه الاستیک می‌باشد و تنش و کرنش موضعی رابطه‌ی خطی دارند بنابراین اگر نسبت



شکل ۱۱) نمونه هایی از محل‌های مورد استفاده در گسسته‌سازی، (الف) مور، (ب) نویمن.

جدول ۲) نسبت ماکزیمم کرنش موضعی در نمونه تحت تنش و نمونه بدون تنش

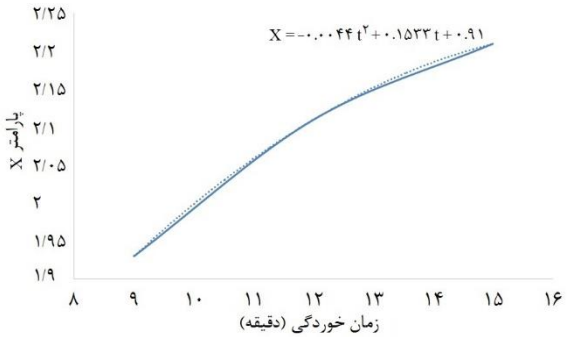
زمان خوردگی (دقیقه)	وضعیت	کرنش	X
۹	با تنش	۰/۶	۱/۹۳
	بدون تنش	۰/۳۱	
۱۲	با تنش	۰/۹۵	۲/۱۱
	بدون تنش	۰/۴۵	
۱۵	با تنش	۱/۳۵	۲/۲۱
	بدون تنش	۰/۶۱	

ماکزیمم کرنش موضعی در نمونه تحت تنش و نمونه بدون تنش به عنوان X در نظر گرفته شود، می‌توان مقدار X را در زمان‌های مختلف طبق جدول ۲ محاسبه کرد. پس از آن می‌توان تغییرات X بر حسب زمان خوردگی را رسم کرد (شکل ۱۲).

پس طبق شکل ۱۲ در هر زمان می‌توان پارامتر X را محاسبه کرد (رابطه ۱۳).

$$X = -0.0044\,t^2 + 0.1533\,t + 0.91 \quad (۱۳)$$

پس از اینکه ارتباط بین توزیع پتانسیل و توزیع تنش در نواحی داخلی نمونه در زمان‌های مختلف مشخص شد می‌توان معادله‌ی لاپلاس نوشته شده برای پتانسیل الکتریکی و تنش کششی را حل کرد و به جای شرایط مرزی مربوط به تنش، معادل آن‌ها یعنی شرایط مرزی مربوط به پتانسیل را جایگزین کرد. در پایان به تعداد گره‌های مجهول، معادله استخراج می‌شود و با کدنویسی نرم‌افزار متلب (MATLAB) تنش تک تک نقاط داخلی محاسبه می‌شود. ورودی کد متلب شامل پتانسیل الکتریکی و تنش کششی مرزهای دور تا دور، طول و عرض مستطیل (سطح مقطع عرضی)، شعاع اولیه‌ی حفره، تعداد تکرار حل مسئله (زمان خوردگی) و رابطه‌ی X بر حسب زمان خوردگی می‌باشد.



شکل ۱۲) تغییرات X بر حسب زمان خوردگی.

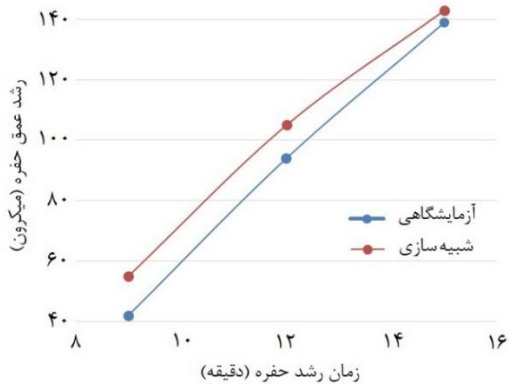
۶- نتایج و بحث

۶-۱- مقایسه نتایج تست ادی‌کارنت و نرم‌افزار کامسول

ابتدا پتانسیل ۳۵۰ mV_{SCE} در محلول ۳/۵ درصد وزنی سدیم کلرید به ترتیب به مدت ۹، ۱۲ و ۱۵ دقیقه به نمونه اعمال شد. در مرحله بعد، نمونه براساس روشی که در ASTM G1 شرح داده شد تمیز شد تا محصولات خوردگی از سطح خارج شود. سپس نمونه توسط ادی‌کارنت مورد آزمایش قرار گرفت.

جدول ۳، XL را برای کلیه ترک‌های مشخص به دست آمده توسط روش توضیح داده شده در قسمت ٤-۳ نشان می‌دهد. میانگین عمق حفره با درونیابی از داده‌های بدست آمده از ترک‌های روی صفحه‌ی کالیبراسیون با استفاده از تابع FORECAST نرم‌افزار Excel بدست آمد (جدول ٤). حداقل پنج آزمایش برای بدست آوردن هر داده انجام شد و در نهایت میانگین این داده‌ها ثبت شد.

رابطه‌ی بین عمق حفره و زمان رشد آن از تست‌های آزمایشگاهی بدست آمد و با نتایج شبیه‌سازی نرم‌افزار کامسول مقایسه شد. شکل ۱۳ این مقایسه را به صورت نمودار ارائه می‌دهد. با مقایسه این دو نمودار مشخص می‌شود که مدل‌سازی خوردگی حفره‌ای در پژوهش حاضر موفقیت آمیز است و می‌توان از آن به عنوان جایگزین آزمون تجربی استفاده کرد.



شکل ۱۳) مقایسه‌ی تجربی و عددی رشد حفره تحت پتانسیل ۳۵۰ mV_{SCE}.

جدول ۳) داده‌های کالیبراسیون بدست آمده از پراب PN-03-103-S در محدوده فرکانس ۲۰۰ kHz-۵۰.

عمق ترک/حفره	تعداد ترک/حفره	۰/۲ mm	۰/۵ mm	۱ mm
XL	۵۱۲	۵۸۰	۶۵۰	۸۰۵

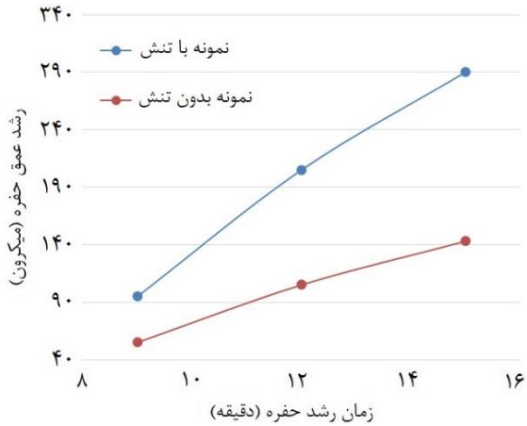
جدول ۴) میانیابی میانگین عمق حفره در پتانسیل ۳۵۰ mV_{SCE} با استفاده از تابع FORECAST نرم‌افزار Excel.

شماره تست	زمان خوردگی (دقیقه)	۹	۱۲	۱۵	۰ (بدون خوردگی)
۱	XL_1	۵۲۳	۵۴۴	۵۵۴	۵۱۲
۲	XL_2	۵۲۷	۵۴۳	۵۵۶	۵۱۲
۳	XL_3	۵۲۵	۵۴۳	۵۵۳	۵۱۲
۴	XL_4	۵۲۷	۵۴۴	۵۵۳	۵۱۲
۵	XL_5	۵۲۸	۵۴۱	۵۵۴	۵۱۲
میانگین	XL_{ave}	۵۲۶	۵۴۳	۵۵۴	۵۱۲
انحراف استاندارد		۲	۱/۲۲	۱/۲۲	۱
عمق حفره (میکرون)		۴۲	۹۴	۱۳۹	۰

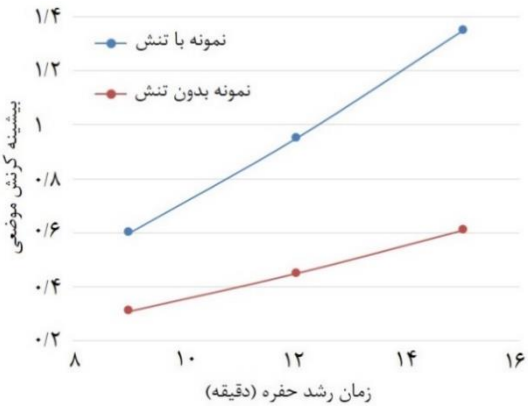
شکل‌های ۱۵-۱٤ نشان‌دهنده توزیع کرنش موضعی و رشد عمق حفره در نمونه های تحت تنش و بدون تنش تحت پتانسیل ۳۵۰ mV_{SCE} است. در مطالعه‌ی حاضر، از دو پارامتر (عمق حفره و کرنش موضعی حفره) برای بررسی تاثیر تنش در خوردگی حفره‌ای استفاده شد. تجزیه و تحلیل این پارامترها در نمونه های تحت تنش و بدون تنش فولاد ضد زنگ ٤٥٠ CUSTOM انجام شد. مقدار این پارامترها در نمونه های تحت تنش بیشتر از نمونه های بدون تنش می‌باشد. بر اساس نتایج، وجود تنش در نمونه ها باعث افزایش سرعت خوردگی حفره‌ای در فولاد ضد زنگ ٤٥٠CUSTOM شد. در صورت وجود تنش، مکانیزم خوردگی حفره ای از مرز دانه‌ها شروع شده و سپس دانه ها یا جدا شده و یا در محلول حل می‌شوند. به عبارت دیگر، انرژی شبکه با افزایش فاصله بین دانه های مواد فلزی در مکانیزم خوردگی حفره‌ای، کاهش می‌یابد. این امر در درجه اول منجر به خوردگی مرز دانه‌ای شده و در نهایت منجر به خوردگی سریع در فولاد ضد زنگ ٤٥٠ CUSTOM می‌شود. نتایج تجزیه و تحلیل SEM و EDS تشکیل شبکه‌های سفید در امتداد مرز دانه در خوردگی را نشان می‌دهد، که نشان دهنده خوردگی مرز دانه‌ای قبل از خوردگی دانه است[35].

۶-۲- مقایسه توزیع تنش کششی در نرم‌افزار کامسول و متلب

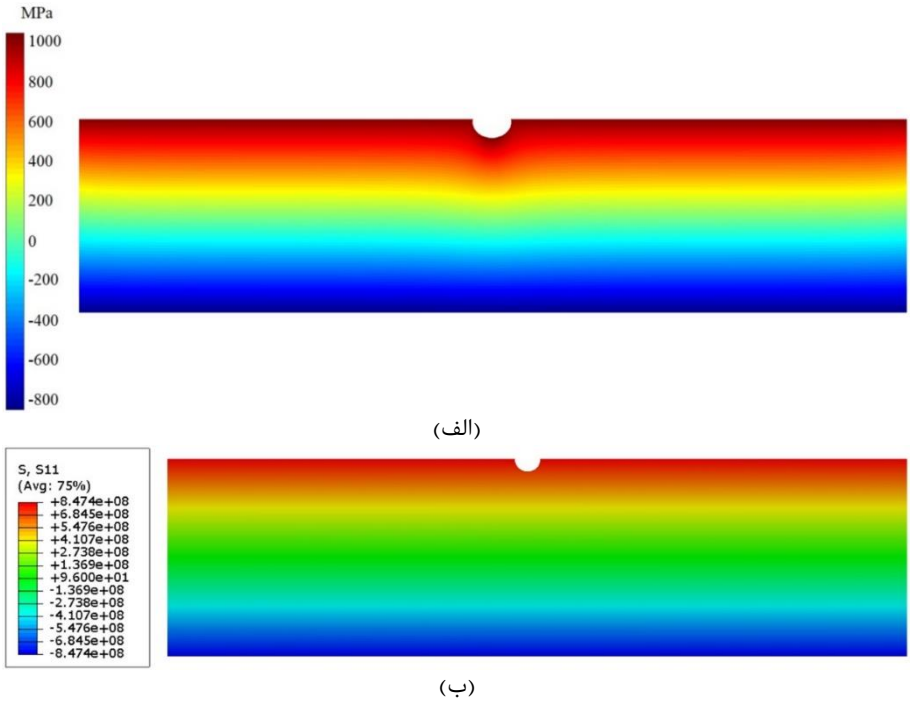
در شکل ١٦ توزیع تنش کششی در سطح مقطع عرضی نمونه



شکل ۱۴) مقایسه رشد عمق حفره برای نمونه تحت تنش و بدون تنش تحت پتانسیل ۳۵۰ mV_{SCE}.



شکل ۱۵) مقایسه ماکزیمم کرنش موضعی برای نمونه تحت تنش و بدون تنش تحت پتانسیل ۳۵۰ mV_{SCE}.



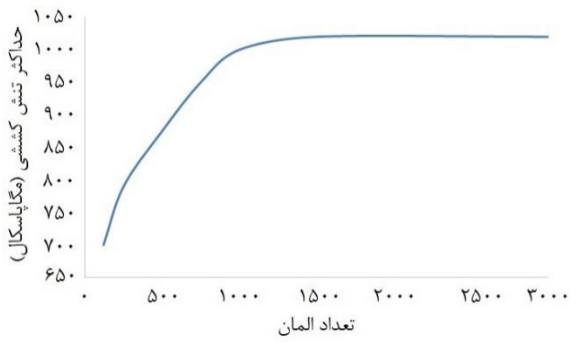
شکل ۱۶) توزیع تنش در سطح مقطع عرضی نمونه تنش‌دار تحت خوردگی حفره‌ای الف) با اعمال پتانسیل ۳۵۰ میلی‌ولت پس از ۵ دقیقه (متلب) ب) بدون در نظر گرفتن شرایط الکتروشیمی (آباکوس).

تنش‌دار تحت خوردگی حفره‌ای برای دو حالت بدون پتانسیل و با پتانسیل نمایش داده شده است. از این شکل تاثیر اعمال پتانسیل روی نمونه مشخص می‌شود. با اعمال پتانسیل، تنش افزایش می‌یابد و رشد حفره بیشتر می‌شود.

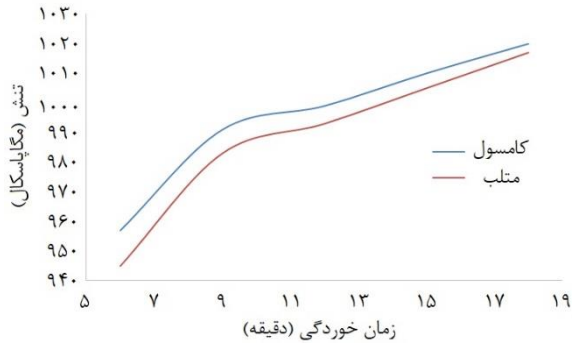
به‌منظور بررسی تعداد المان مورد نیاز در تحلیل، آزمون استقلال از شبکه برای نمونه‌ی حفره‌دار انجام می‌شود. تحلیل تنش برای تعداد شبکه مختلف انجام شده است.

همان گونه که از نمودار در شکل ۱۷ مشخص است از تعداد المان ۱۵۰۰ عدد به بعد مقدار تنش فون مایزز به یک مقدار ثابت میل می‌کند. بنابراین در تحلیل‌ها، سطح مقطع عرضی نمونه به ۱۵۰۰ المان تقسیم‌بندی شده است. در این شبیه‌سازی برای نمونه‌ی مورد تحلیل از المان نوع CPS4R (المان‌هایی از نوع تنش صفحه‌ای درجه اول با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته) استفاده شده است. این تعداد المان به دلیل بهینه بودن پس از چندین مرتبه اجرای شبیه‌سازی و سعی و خطا انتخاب شد.

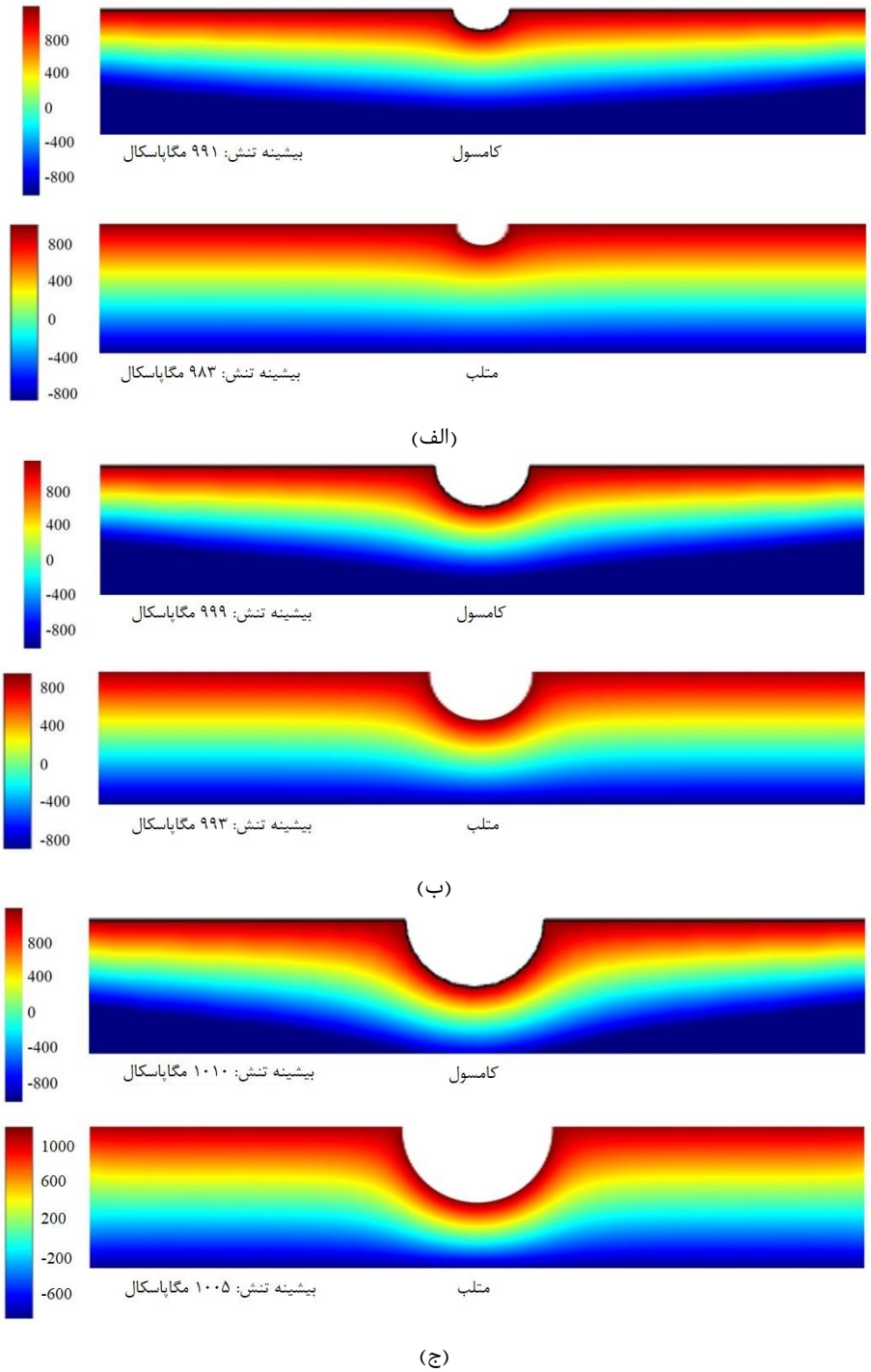
در شکل ۱۸ توزیع تنش کششی نمونه تنش‌دار (تنش اعمالی در تست خمش دو نقطه‌ای) تحت خوردگی حفره‌ای با اعمال پتانسیل ۳۵۰ میلی‌ولت نمایش داده شده است. با توجه به شکل، حفره تمایل دارد به صورت سطحی رشد کند (حفره اولیه به صورت نیم-دایره است ولی با گذشت زمان به نیم‌بیضی تبدیل می‌شود). این یعنی رشد سطحی حفره از رشد آن در جهت عمق بیشتر است. دلیل این امر این است که در نزدیکی سطح نمونه، تنش و پتانسیل زیاد است و همچنین واکنش‌های شیمیایی و خوردگی در نواحی نزدیک به سطح حفره بیشتر است. در شکل ۱۹ ماکزیمم تنش کششی در نمونه تنش‌دار تحت خوردگی حفره‌ای با اعمال پتانسیل ۳۵۰ میلی‌ولت است. این مقایسه نشان می‌دهد که گسسته‌سازی معادله‌ی لاپلاس به‌درستی انجام شده است.



شکل ۱۷) آزمون استقلال از شبکه.



شکل ۱۹) مقایسه‌ی ماکزیمم تنش کششی در نمونه تنش‌دار تحت خوردگی حفره‌ای با اعمال پتانسیل ۳۵۰ میلی‌ولت.



شکل ۱۸) توزیع تنش کششی نمونه تنش‌دار تحت خوردگی حفره‌ای با اعمال پتانسیل ۳۵۰ میلی‌ولت (مگاپاسکال). الف) پس از گذشت ۹ دقیقه ب) پس از گذشت ۱۲ دقیقه ج) پس از گذشت ۱۵ دقیقه

۷- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این پژوهش به بررسی توزیع تنش کششی در نمونه‌ی تحت خوردگی حفره‌ای به روش المان مرزی پرداخته شد. در این راستا ابتدا نمونه‌ی خمش دو نقطه‌ای ساخته شد و به کمک آزمون پتانسیو استاتیک تحت پتانسیل mV_{SCE} ۳۵۰ در محلول ۳/۵ درصد وزنی سدیم کلرید قرار گرفت تا نمونه در محل خمش بیشینه دچار خوردگی حفره‌ای شود. سپس عمق حفره‌های رشد یافته با استفاده از دستگاه ادی‌کارنت محاسبه شد. با شبیه‌سازی نمونه‌ی تحت خوردگی حفره‌ای در نرم‌افزار کامسول و تطابق نتایج آن با نتایج دستگاه ادی‌کارنت مشخص شد که شبیه‌سازی تا حد زیادی می‌تواند جایگزین تست آزمایشگاهی شود. خلاصه‌ی نتایج به شرح ذیل می‌باشد:

۱- رابطه‌ی بین عمق حفره و زمان رشد آن از تست‌های آزمایشگاهی بدست آمد و با نتایج شبیه‌سازی نرم‌افزار کامسول مقایسه شد. مشخص شد که مدل‌سازی خوردگی حفره‌ای در

پژوهش حاضر موفقیت آمیز است و می‌توان از آن به عنوان جایگزین آزمون تجربی استفاده کرد.

۲- در مطالعه‌ی حاضر، از دو پارامتر (عمق حفره و کرنش موضعی حفره) برای بررسی تاثیر تنش در خوردگی حفره‌ای استفاده شد. تجزیه و تحلیل این پارامترها در نمونه های تحت تنش و بدون تنش فولاد ضد زنگ ٤٥٠ CUSTOM انجام شد. مقدار این پارامترها در نمونه های تحت تنش بیشتر از نمونه های بدون تنش می‌باشد. بر اساس نتایج، وجود تنش در نمونه ها باعث افزایش سرعت خوردگی حفره‌ای در فولاد ضد زنگ ٤٥٠ CUSTOM شد.

۳- توزیع تنش کششی در سطح مقطع عرضی نمونه تنش‌دار تحت خوردگی حفره‌ای برای دو حالت بدون پتانسیل و با پتانسیل بررسی شد. مشخص شد با اعمال پتانسیل، تنش افزایش می‌یابد و رشد حفره بیشتر می‌شود.

۴- برای محاسبه‌ی توزیع تنش کششی در مقطع عرضی نمونه‌ی تحت خوردگی حفره‌ای، گسسته‌سازی معادله‌ی لاپلاس حاکم بر نمونه انجام شد. با حل معادلات گسسته‌سازی شده و مقایسه‌ی آن‌ها با نتایج نرم‌افزار کامسول نتایج یکسانی بدست آمد.

۵- با توجه به نتایج، حفره تمایل دارد به صورت سطحی رشد کند (حفره اولیه به صورت نیم‌دایره است ولی با گذشت زمان به نیم‌بیضی تبدیل می‌شود). این یعنی رشد سطحی حفره از رشد آن در جهت عمق بیشتر است. دلیل این امر این است که در نزدیکی سطح نمونه، تنش کششی و پتانسیل الکتریکی زیاد است و همچنین واکنش‌های شیمیایی و خوردگی در نواحی نزدیک به سطح حفره بیشتر است.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

تاییدیه اخلاقی: محتویات علمی مقاله حاصل پژوهش نویسندگان و صحت نتایج آن نیز بر عهده آن‌ها است.

تعارض منافع: این مقاله هیچ‌گونه تعارض منافعی با سازمان‌ها و اشخاص ندارد.

سهم نویسندگان: یوسف ملاپور (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی/ نگارنده مقاله و تحلیل نتایج (۵۰٪)؛ اسماعیل پورسعیدی (نویسنده دوم و نویسنده مسئول)، پژوهشگر اصلی/ کمک در روند شناسی و تحلیل نتایج.

منابع مالی: کلیه هزینه‌ها توسط نویسندگان تامین شده است.

فهرست علایم و نشانه‌ها

E	هدایت الکتریکی (mho)
i	شدت جریان الکتریکی (A)
SCE	Saturated Calomel Electrode
RX	مقاومت (μΩ.mm)
t	زمان خوردگی (minute)
XL	راکتانس القایی (IACS %)
ø	پتانسیل الکتریکی (mV)
σ	تنش کششی در محل خمش بیشینه (MPa)

منابع

1- Babaei AH, Aghaei Togh R, Nobakhti MH, Montazeri MJ. Numerical Investigation of the Effects of Minor Geometric Changes of the Stator Blade Profiles on the Steady Performance of a High-pressure Gas-turbine. Modares Mechanical Engineering. 2019; 19(5):1209-20.

2- Ashegh H, Shirzadi Javid AA, Ghoddousi P, Habibnejad Korayem A, Oraie MA. Investigation of corrosion parameters relationship of reinforcement by vapor permeability in the surface protected concretes. Modares Civil Engineering journal. 2018;18(2):202-194.

3- Ghanooni Bagha M. Influence of effective chloride corrosion parameters variations on corrosion initiation. Modares Civil Engineering journal. 2017;17(3):69-77.

4- Poursaeidi E, Niaei AM, Arablu M, Salarvand A. Experimental investigation on erosion performance and wear factors of custom 450 steel as the first row blade material of an axial compressor. International Journal of Surface Science and Engineering. 2017;11(2):85-99.

5- Poursaeidi E, Niaei AM, Lashgari M, Torkashvand K. Experimental studies of erosion and corrosion interaction in an axial compressor first stage rotating blade material. Applied Physics A. 2018;124(9):1-5.

6- Lorenz WJ, Mansfeld F. Determination of corrosion rates by electrochemical DC and AC methods. Corrosion Science. 1981 Jan 1;21(9-10):647-72.

7- Chen JF, Bogaerts WF. The physical meaning of noise resistance. Corrosion Science. 1995; 37(11):1839-42.

8- Frankel GS. Electrochemical techniques in corrosion: status, limitations, and needs. Journal of Testing and Evaluation. 2014;42(3):517-38.

9- Martins M, Casteletti LC. Microstructural characteristics and corrosion behavior of a super duplex stainless steel casting. Materials Characterization. 2009;60(2):150-5.

10- Boissy C, Alemany-Dumont C, Normand B. EIS evaluation of steady-state characteristic of 316L stainless steel passive film grown in acidic solution. Electrochemistry Communications. 2013;26:10-2.

11- Invernizzi AJ, Sivieri E, Trasatti SP. Corrosion behaviour of Duplex stainless steels in organic acid aqueous solutions. Materials Science and Engineering: A. 2008;485(1-2):234-42.

12- Wenman MR, Trethewey KR, Jarman SE, Chard-Tuckey PR. A finite-element computational model of chloride-induced transgranular stress-corrosion cracking of austenitic stainless steel. Acta materialia. 2008;56(16):4125-36.

13- Ye Z, Zhu Z, Zhang Q, Liu X, Zhang J, Cao F. In situ SECM mapping of pitting corrosion in stainless steel using submicron Pt ultramicroelectrode and quantitative spatial resolution analysis. Corrosion Science. 2018;143:221-8.

14- Anantha KH, Örnek C, Ejnermark S, Thuvander A, Medvedeva A, Sjöström J, Pan J. Experimental and modelling study of the effect of tempering on the susceptibility to environment-assisted cracking of AISI

blade. 3rd International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering, Tehran, Imam Khomeini International University - Iranian Association of Thermal and Refrigeration Engineering. 2018.
27- Pedram O, Poursaeidi E. An outrun competition of corrosion fatigue and stress corrosion cracking on crack initiation in a compressor blade. International Journal of Engineering. 2014;27(5):785-92.
28- Mollapour Y, Pedram O, Poursaeidi E, Khamedi R. Numerical Investigation of Pitting Corrosion of CUSTOM 450 Alloy in Acetic Acid and Sodium Acetate. 27th Annual International Conference of Iranian Society of Mechanical Engineering and 7th Conference on Thermal Power Plants (ISME 2019). Tarbiat Modares University - University of Tehran, Tehran; 2019.
29- Pedram O, Mollapour Y, Shayani-jam H, Poursaeidi E, Khamedi R. Pitting Corrosion Behavior of CUSTOM 450 Stainless Steel Using Electrochemical Characterization.
30- Poursaiedi E, Salarvand A. Effect of coating surface finishing on fatigue behavior of C450 steel CAPVD coated with (Ti, Cr) N. Journal of Materials Engineering and Performance. 2016; 25(8):3448-55.
31- Technical datasheet. CUSTOM 450 Stainless, CARPENTER; 2009:1-12.
32- Ruiz A, Manzano C, Alonso B, Formulation and Mathematical Model in Cathodic Protection. Private Communication with the Author at the Department of Mathematics. Polytechnic University of Madrid, Spain.
33- Ruiz A, Gavete L, Alonso B, Camara A. Simulation and Numerical Results for Cathodic Protection Using Infinite Elements. Private Communication with the Author at the Department of Mathematics, Polytechnic University of Madrid. Spain.
34- Zienkiewicz OC. A Discussion on natural strain and geological structure-The finite element method and the solution of some geophysical problems. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. 1976;283(1312):139-51.
35- Ma K, Zhang Y, Zhang L, Guan K. Behavior of flange joints under combined internal pressure and thermal loading: The case of using metal-to-metal contact type gaskets. InPressure Vessels and Piping Conference 2013 (Vol. 55669, p. V002T02A024). American Society of Mechanical Engineers.
420 martensitic stainless steel. Corrosion Science. 2019;148:83-93.
15- Yan Y, Shao B, Zhou X, Song S, Zhou X, Yan X. A study on the influence of double ellipsoidal pitting corrosion on the collapsing strength of the casing. Engineering Failure Analysis. 2019;100:11-24.
16- Wang Y, Cheng G. Quantitative evaluation of pit sizes for high strength steel: Electrochemical noise, 3-D measurement, and image-recognition-based statistical analysis. Materials & Design. 2016;94:176-85.
17- Orlikowski J, Jazdzewska A, Mazur R, Darowicki K. Determination of pitting corrosion stage of stainless steel by galvanodynamic impedance spectroscopy. Electrochimica Acta. 2017;253:403-12.
18- Lu JZ, Han B, Cui CY, Li CJ, Luo KY. Electrochemical and pitting corrosion resistance of AISI 4145 steel subjected to massive laser shock peening treatment with different coverage layers. Optics & Laser Technology. 2017;88:250-62.
19- Zhang J, Shi XH, Soares CG. Experimental analysis of residual ultimate strength of stiffened panels with pitting corrosion under compression. Engineering Structures. 2017;152:70-86.
20- Tian H, Wang X, Cui Z, Lu Q, Wang L, Lei L, Li Y, Zhang D. Electrochemical corrosion, hydrogen permeation and stress corrosion cracking behavior of E690 steel in thiosulfate-containing artificial seawater. Corrosion Science. 2018;144:145-62.
21- Asadi ZS, Melchers RE. Clustering of corrosion pit depths for buried cast iron pipes. Corrosion Science. 2018;140:92-8.
22- Salleh S. Modelling pitting corrosion in carbon steel materials. The University of Manchester (United Kingdom); 2013.
23- Vijayaraghavan V, Garg A, Gao L, Vijayaraghavan R. Finite element based physical chemical modeling of corrosion in magnesium alloys. Metals. 2017;7(3):83.
24- Omidi Bidgoli M, Reza Kashyzadeh K, Rahimian Koloor SS, Petru M. Estimation of Critical Dimensions for the Crack and Pitting Corrosion Defects in the Oil Storage Tank Using Finite Element Method and Taguchi Approach. Metals. 2020;10(10):1372.
25- Pedram O, Poursaeidi E. Total life estimation of a compressor blade with corrosion pitting, SCC and fatigue cracking. Journal of Failure Analysis and Prevention. 2018;18(2):423-34.
26- Pedram O, Poursaeidi E. Pitting corrosion as the main cause of crack initiation in a compressor