نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال چهارم، شماره 1، بهار و تابستان1397، صفحه 126-113

بررسی رفتار خوردگی و شبیه سازی خوردگی گالوانیکی منطقه جوش فولاد زنگ نزن سوپردوفازی UNS S32750

محمد اهل سرمدی*، مرتضی شمعانیان، مسعود عطاپور، امیر بهجت، حسین ادریس، میلاد وهمن

دانشگاه صنعتی اصفهان، شرکت فرسان صنعت پارسیان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۲۱ ؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۰۳)

چکیده

خوردگی گالوانیکی از جمله پدیده های بسیار با اهمیت در صنایع نفت بویژه مقاطع جوش لوله های انتقال سیال می باشد. ازآن جا که خوردگی گالوانیکی وابستگی شدیدی به هندسه قطعه و نسبت سطوح کاتد و آند دارد، از این رو پیش بینی رفتار خوردگی گالوانیکی در تجهیزات صنعتی با اکتفا به داده های آزمایشگاهی قابل اطمینان نمی باشد. درنتیجه نیاز به شبیه سازی این پدیده امری ضروری است.هدف از این پژوهش توسعه یک مدل عددی مبتنی بر المان محدود با استفاده از معادله ثانویه توزیع جریان به منظور پیش‌بینی رفتار خوردگی گالوانیکی منطقه جوش فولاد زنگ نزن دوفازیUNS S32750 می‌باشد. در این تحقیق، از دو روش جوشکاری قوسی تنگستن- گاز (GTAW) و اصطکاکی اغتشاشی (FSW) به منظور جوشکاری نمونه ها استفاده شد. ارزیابی رفتار خوردگی با آزمون پلاریزاسیون سیکلی در محلول ۰/۵ مولار H_2SO_4 طبق استاندارد ASTM G8 صورت گرفت و اطلاعات مورد نیاز جهت ساخت و اعتبارسنجی مدل تهیه شد. مدل المان محدود با استفاده از نرم افزار کامسول و حل معادلات دیفرانسیل ترمودینامیک خوردگی و سینتیک الکتروشیمیایی ساخته شد. نتایج نشان داد که کاهش حرارت ورودی موجب بهبود رفتار خوردگی گالوانیکی در منطقه اتصال می گردد. نتایج حاصل از شبیه سازی دانسیته جریان خوردگی گالوانیکی نشان داد منطقه جوش نمونه های جوشکاری شده به روش الکترود تنگستنی در مقایسه با نمونه های جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی دانسیته جریان خوردگی گالوانیکی بالاتری دارند.

کلمات کلیدی: فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی، شبیه سازی خوردگی گالوانیکی، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، جوشکاری قوسی تنگستن گاز.

Investigation of Corrosion Behavior and Galvanic Corrosion Simulation of Super Duplex Stainless Steel UNS S32750 Weld Zone

M. Ahl Sarmadi*, M. Shamanian, M. Atapour, A. Behjat, H. Edriss, M. Vahman

Isfahan University of Technology, Farsan Sanat Parsian Company

(Received 13 October 2017 ; Accepted 24 December 2017)

Abstract

Galvanic corrosion is an ever-present problem in all different environments, particularly in tanks. The goal of this project is to develop a finite element model that can be used with experimental data to characterize the

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: sarmadimohamad@yahoo.com

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-06]

corrosion of a galvanic weldments couple in an electrolyte. In this study sample are welded by gas tungsten arc welding and friction stir welding. According to ASTM G8, Evaluation of corrosion properties examined with cyclic polarization test in 0.5 molar H_2SO_4 andthe information required to validate the model was prepared. The finite element model is developed using COMSOL and Math Module through derivation of equations describing corrosion thermodynamics and electrochemical kinetics. The results showed that reducing in heat input to improve galvanic corrosion behavior in the weld sample.In addition to result of simulation reveal sample that welded by gas tungsten arc method had higher current density galvanic corrosion in comparison with friction stir sample.

Keywords: Super Duplex Stainless Steel**,** Galvanic Corrosion Simulation, Friction Stir Welding, Gas Tungsten Arc Welding

1- مقدمه

فولادهای زنگ نزن از جمله مهم‌ترین فلزات مهندسی هستند که به طور ویژه در صنایع مختلف شیمیایی، دریایی و بیومواد استفاده می‌شوند. فولادهای زنگ نزن دوفازی یکی از انواع متداول فولادهای زنگ نزن می‌باشند. ساختار این فولادها از دو فاز اصلی آستنیت و فریت تشکیل شده است، وجود فاز فریت در ساختار این فولادها باعث افزایش مقاومت در برابر ترک خوردن تنشی می‌شود؛ اگر چه اثرات نامطلوبی مانند کاهش چقرمگی در دمای پایین را نیز به همراه دارد. ساختار این فولادها عمدتاً دارای ۱۹ تا ۲۶ در صد وزنی کروم، ۴ تا ۸ درصد نیکل و ۱/۵ تا ۴ درصد مولیبیدن است. همچنین وجود نیتروژن به عنوان یک عامل آستنیت زا نقش مهمی را در ریزساختار این فولادها ایفا می‌کند[۱و۲]. فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی به گروهی از فولادهای زنگ نزن دو فازی گفته می‌شود که عدد PREN[1] آن بالاتر از ۴۰ باشد. فولاد UNS S32750 یکی از معروف‌ترین فولادهای زنگ نزن سوپردوفازی می‌باشد، که به علت خواص مطلوب استحکام و خوردگی در صنایع پالایشگاهی(نفت و گاز) کاربرد عمده‌ای پیدا کرده است. ترکیب این فولاد دارای حداقل ۲۵ درصد کروم، ۳/۵ درصد مولیبیدن و بیش از ۰/۲ درصد نیتروژن(عامل آستنیت زا) است[۳].

یکی از مهـم‌ترین روش‌های ساخت قطعات فولادی استـفاده از روش جوشکاری است. با وجود این، تغییرات ریزساختاری ایجاد شده ناشی از ذوب و انجماد حین جوشکاری خواص خوردگی منطقه جوش را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد. خوردگی بین‌دانه‌ای در منطقه جوش فولادهای زنگ نزن یک مشکل مرسوم به شمار می‌رود. علت اصلی این پدیده حساس‌شدن است که طی آن کروم بصورت کاربید کروم در مرزدانه تخلیه می شود. روش های معمول برای جلوگیری از این مشکل در فولادهای زنگ نزن شامل استفاده از فولادهای با کربن کم، تثبیت کربن با عناصر کاربید زای قوی به غیر از کروم مثل تیتانیوم، نیوبیوم و زیرکونیم و همچنین استفاده از عملیات حرارتی است. با وجود این، مشخص شده است که در فولادهای زنگ نزن نه حساسیت به رسوب کاربید وجود دارد و نه خوردگی زیرا ساختار اتمی آن ها منظم و کوهیرنت است.

فولادهای سوپر دوفازی به خاطر وجود مقادیر بالای عناصر آلیاژی از جمله کروم، مولیبدن، تنگستن و نیتروژن در برابر خوردگی یکنواخت و حفره‌دار شدن[2] در محیط‌های حاوی اسیدهای آلی از جمله اسید فورمیک و استیک اسید و هم چنین در محیط‌های حاوی اسید سولفوریک غلیظ به خاطر داشتن لایه رویین قوی مقاومت بالایی دارد. محققین در مورد میزان اثرگذاری عناصر کروم و مولیبدن که پایدار کننده فریت بوده و نیتروژن و نیکل که پایدار کننده آستنیت است، پیشنهاد کردند

1 -Pitting Resistance Equivalent Number

2 - Pitting

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-06]

که حضور نیتروژن در فاز آستنیت منجر به بهبود رفتار خوردگی آن نسبت به فریت شده و فاز فریت حساسیت بیشتری نسبت به آستنیت در برابر خوردگی دارد و در پتانسیل‌های پایین، فازی که بیشتر خورده می‌شود، فریت است. اما در مقابل فاز فریت به خاطر داشتن شبکه بازتر و نفوذ راحت‌تر عناصر آلیاژی، در پتانسیل‌های بالا این رفتار برعکس شده و فاز حساس آستنیت است. در فولادهای دوفازی زمانی بهترین مقاومت به خوردگی بدست می‌آید که عدد PREN در هر دو فاز تقریبا نزدیک به هم باشد. ایجاد سیکل حرارتی در فولادهای دوفازی منجر به تغییر توزیع عناصر آلیاژی و پیرو آن تغییر در عدد PREN می‌شود[۴].

خوردگی گالوانیکی از مخرب‌ترین انواع خوردگی در طبیعت می‌باشد. خوردگی گالوانیکی به خوردگی در اثر وجود اختلاف پتانسیل الکتریکی بین فلزات در ارتباط با یکدیگر گفته می‌شود. اختلاف پتانسیل باعث شارش الکترون‌ها بین این دو فلز می‌شود. در این حالت فلز دارای پتانسیل تعادلی کمتر، آند پیل الکتروشیمیایی را تشکیل داده و خورده می‌شود. فلز کاتد خورده نمی‌شود و یا خوردگی آن بسیار کم می‌شود. این درحالی است که فلز آند با نرخ بیشتری خورده می‌گردد. نکته مهم در خوردگی گالوانیکی آند این است که هرچه سطح کاتد به آند افزایش یابد، نرخ خوردگی آند افزایش می‌یابد. این پدیده به شدت در مواردی که دو فلز مختلف باهم اتصال دارند و یا در منطقه جوش یک فلز جوشکاری شده که آند محسوب می شود، مشاهده می‌شود[۵].

خطرناک ترین نوع خوردگی که در فولادها مشاهده شده و موضوع بسیاری از مقالات قرار گرفته خوردگی بین دانه ای است. حمله بین دانه‌ای و پدیده مرتبط به آن یعنی ترک خوردن خوردگی تنشی بین دانه‌ای موضوعی بسیار مهم مرتبط با فولادهای زنگ نزن از جمله فولادهایی که تحت جوشکاری قرار می گیرند می باشد.در حالت عادی میزان کروم فولاد ۳۲۷۵۰ در حدود ۲۵ درصد می‌باشد. حال اگر بدلیلی (مانند جوشکاری یا عملیات حرارتی بین ۴۵۰ تا ۸۲۵ درجه سانتی‌گراد که باعث ایجاد رسوب کاربید کروم و فازهای ترد سیگما در مرزدانه می‌شود) مقدار کروم در یک خط نواری کنار مرزدانه کمتر از ۱۲٪ شود یا به اصطلاح آن ناحیه فقیر از کروم شود، فولاد روییننگی‌اش را از دست می‌دهد و خوردگی می‌تواند در باریکه حاشیه مرزدانه‌های آن ایجاد و گسترش ترک (حالت شکری مانند) رخ دهد. به چنین فولادی فولاد زنگ‌نزن حساس‌شده گفته می‌شود. با توجه به اینکه رایج‌ترین نوع جوشکاری مخازن فولادزنگ نزن جوشکاری الکترود تنگستن می‌باشد. این جوشکاری به دلیل حرارت ورودی نسبتا بالایی که ایجاد می‌کند موجب ایجاد خوردگی بین دانه‌ای در منطقه تحت تاثیر حرارت فولاد زنگ نزن می‌گردد[۶].

مهمترین مسئله در کنترل خوردگی یک محیط و تجهیز در معرض الکترولیت‌های خورنده، بحث شناخت کامل محیط و مکانیزم خوردگی حاکم بر محیط می باشد. از همه مهم‌تر مسئله پیش بینی نرخ خوردگی در محیط و نیز توزیع پتانسیل خوردگی به ترتیب در پیش بینی عمر تجهیز و نیز برنامه ریزی برای تمهیدات حفاظت کاتدی موثر می باشد. در خوردگی گالوانیکی به دلیل اینکه علاوه بر جنس قطعات در تماس با یکدیگر و نیز محیط خورنده، مسئله هندسه تجهیز و نسبت سطح کاتد به آند بسیار موثر است، پیش بینی عمر قطعه و نیز طراحی سیستم مطمئن حفاظت کاتدی بسیار سخت و پیچیده می گردد. از این رو استفاده از محاسبات عددی و روش المان محدود بسیار می تواند در پیش بینی نرخ خوردگی و طراحی سیستم حفاظت کاتدی موثر باشد. در این روش ها با مش بندی هندسه تجهیز مورد نظر در کامپیوتر و حل معادلات دیفرانسیل، تحلیل خوردگی در محیط دقیق تر و ساده تر می گردد.

روش اجزاء محدود یا روش المان محدود[1] روشی است عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل جزئی و نیز حل معادله‌های انتگرالی. اساس کار این روش یا حذف کامل معادلات دیفرانسیل یا ساده سازی آنها به معادلات دیفرانسیل معمولی، که با روشهای عددی مثل اویلر حل می‌شوند، می‌باشد. در حل معادلات دیفرانسیل جزئی مسئله مهم این است که به معادله ساده‌ای که از نظر عددی پایداراست به این معنا که خطا

1 -Finite Element method, FEM

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-06]

در داده‌های اولیه و در حین حل آنقدر نباشد که به نتایج نامفهوم منتهی شود برسیم. روشهایی با مزایا و معایب مختلف برای این امر وجود دارد، که روش اجزاء محدود یکی از بهترین آنهاست. این روش درحل معادلات دیفرانسیل جزئی روی دامنه‌های پیچیده (مانند وسائل نقلیه و لوله‌های انتقال نفت)، یا هنگامی که دامنه متغیر است، یا وقتی که دقت بالا در همه جای دامنه الزامی نیست و یا اگر نتایج همبستگی و یکنواختی کافی را ندارند، بسیار مفید می‌باشد.

در این پژوهش هدف، بررسی شبیه سازی خوردگی گالوانیکی منطقه جوش فولاد زنگ نزن UNS S32750 می‌باشد. با توجه به این موضوع که خوردگی گالوانیکی به شدت به هندسه محیط وابسته است، در این تحقیق به طور ویژه به تاثیر پارامترهای جوشکاری بر خوردگی و شبیه سازی خوردگی گالوانیکی، در یک لوله انتقال سیال با قطر بیست سانتی متر حاوی محلول نیم مولار سولفوریک اسید پرداخته شده است. به منظور پیش‌بینی رفتار خوردگی گالوانیکی در منطقه جوش فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی ۳۲۷۵۰ از روش المان محدود کمک گرفته شد. از آنجا که خوردگی گالوانیکی در شرایط ترکیبی پیچیده از شرایط مختلف از جمله واکنش‌های الکتروشیمیایی، مهاجرت الکترونی، انتشار یونی شکل گیری و انحلال لایه اکسید رخ می‌دهد اما در این پژوهش به‌منظور ساده‌تر شدن محاسبات فقط اثر واکنش‌های الکتروشیمیایی درنظر گرفته شد[۷]. گفتنی است معادلات دیفرانسیل استفاده شده به‌منظور حل عددی این پژوهش در مباحث بعدی مقاله بحث خواهد شد.

در مورد بررسی رفتار خوردگی منطقه جوش فولاد ها پیش از این به وفور بحث صورت گرفته است. رفتار خوردگی حفره‌ای در فولادهای زنگ نزن توسط محاسبه کردن عدد معادل مقاومت به حفره دار شدن توسط رابطه (۱) تعیین می‌شود که وابستگی شدیدی به مقدار و توزیع عناصر آلیاژی در فازهای موجود در ریزساختار دارد. عدد PREN از رابطه زیر بدست می‌آید :

$$PREN=\%Cr + 3.3(\%Mo+0.5\%W) + 16\%N \qquad (۱)$$

این عدد برای فولادهای سوپر دوفازی عددی بالای ۴۰ می‌باشد که نشان دهنده مقاومت بالای آن در برابر خوردگی حفره‌ای است.

ایجاد سیکل حرارتی ناشی از جوشکاری یا عملیات حرارتی نیز منجر به تغییر توزیع عناصر آلیاژی و پیرو آن تغییر در عدد PREN فولادهای دوفازی از جمله فولاد سوپردوفازی UNSS32750 می‌شود به طوریکه بر اساس بررسی انجام شده توسط دبالا و همکاران، افزایش دمای آنیل در فولاد دوفازی منجر به بزرگتر شدن و افزایش کسر حجمی فریت شده و کروم و مولیبدن در کل ریز ساختار فریت حل شده که منجر به کاهش عدد PREN فریت می‌شود.در حالی در دمای بالا کسر حجمی آستنیت کاهش یافته و دارای غلظت بیشتری از نیتروژن است که منجر به افزایش عدد PREN می‌شود. اما در مقابل نیز گزارش شده که در دمای بالا امکان نفوذ نیکل به درون فاز فریت بیشتر می شود که این منجر به افزایش عددPREN فریت و بهبود رفتار خوردگی آن شده است[۸].

کنترل حرارت ورودی[1] در جوشکاری این نوع فولادها برای دستیابی به ساختار مطلوب ضروری است. حرارت ورودی بالا باعث درشت شدن ساختار و همچنین تشکیل فازهای مضری نظیر سیگما[2] و چی[3] می‌گردد. همچنین حرارت ورودی بسیار پایین نیز موجب افزایش درصد فریت و ایجاد فازهای نامطلوبی نظیر نیترید کروم(Cr_2N) می‌گردد[۴و۹].

بنابراین در مورد جوشکاری فولادهای دو فازی (درترکیب شیمیایی ثابت)، یکی از مؤثرترین متغیرهای کنترل کننده‌ی خواص اتصال حاصل، حرارت ورودی می‌باشد[۲].در بررسی انجام شده توسط هونگ و همکاران، گزارش شده که افزایش مقادیر آستنیت جوش منجر به کاهش اندازه دانه فریت و توزیع رسوبات نیتریدی در منطقه جوش شده و همچنین بین سرعت سرد شدن و مقدار رسوبات نیتریدی در منطقه متاثر از حرارت رابطه مستقیمی برقراراست.

1-Heat Input
2 -Sigma
3 -Chi

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-06]

در مورد بررسی خواص خوردگی فولادهای دوفازی می توان به تحقیق امینی و همکاران اشاره کرد. در این تحقیق ریزساختار و رفتار خوردگی مقاطع جوش غیر مشابه فولاد زنگ‌نزن سوپردوفازی UNS S32750 به فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 316L بررسی گردید. برای یافتن تأثیر حرارت ورودی بر ریز ساختار حاصل، جوشکاری در چندین حرارت ورودی مختلف انجام گردید. نتایج نشان داد که افزایش حرارت ورودی از موجب افزایش درصد آستنیت فلز جوش حاصل می‌شود[۱۰].

پیرامون رفتار خوردگی منطقه جوش ذوبی مطابق با پژوهش انجام شده توسط تاوارز و همکاران، مشخص شده که پاس ریشه جوش به خاطر حضور فازهای بین فلزی و نیترید کروم مقاومت به خوردگی کمتری نسبت به پاس پرکننده و فلز پایه در محیط خورنده حاوی یون کلر دارد[۱۱]. تان و همکاران گزارش کرده‌اند که افرایش پاس‌های جوشکاری منجر به کاهش مقدار فریت و بهبود رفتار خوردگی در منطقه جوش شده است[۱۲].

لازم به ذکر است که نرخ خوردگی توسط فازی که حساسیت بیشتری به واکنش‌های شیمیایی دارد کنترل می‌شود. معمولا منطقه جوش به خاطر استفاده از گاز محافظ حاوی نیتروژن و فلز پرکننده نیکل دار، حساسیت کمتری به خوردگی دارد اما منطقه متاثر از حرارت به دلیل بزرگ شدن دانه‌های فریتی، تغییر در بالانس فازها، ایجاد رسوبات نیتریدی در مرزدانه دانه های فریتی و فصل مشترک آستنیت و فریت و هم چنین احتمال تشکیل آستنیت ثانویه در این منطقه، مقاومت به خوردگی کمتری نسبت به سایر مناطق ایجاد شده در جوشکاری ذوبی دارد[۱۳]. پیرامون رفتار خوردگی منطقه جوش حالت جامد فولاد سوپر دوفازی، تحقیقات کمی صورت گرفته است. در بررسی انجام شده توسط سانتوز و همکاران گزارش شده که منطقه اغتشاش یافته ناشی از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فولاد S32750 در محلول۳/۵٪ آب نمک رفتار خوردگی تقریبا شبیه به فلز پایه دارد که به خاطر عدم تشکیل فازهای بین فلزی و توزیع متناسب فازهای آستنیت و فریت در منطقه جوش است[۱۴].همچنین عطاپور و همکارن گزارش داده‌اند که تغییر پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فولاد دوفازی منجر بهبود در رفتار خوردگی منطقه جوش نسبت به فلز پایه در محلول ۰/۱ مولار سولفوریک اسید شده است[۱۵]. در تمامی تحقیقات فوق مشاهده شده است که منطقه جوش فولاد زنگ‌نزن و نیز منطقه تحت تاثیر حرارت، نسبت به فلز پایه فعال‌تر بوده و درنتیجه آند محسوب می‌گردد.

در زمینه شبیه سازی خوردگی گالوانیکی مقالات محدودی موجود است. اولین بار، آدی و نیکو به استفاده از محاسبات عددی در پیش‌بینی رفتار خوردگی گالوانیکی روی آوردند[۱۶]. آن‌ها از روش المان مرزی[1] برای این محاسبات استفاده نمودند. بعدها جیا و همکاران با روش المان مرزی کوپل منیزیم- فولاد را مورد مطالعه قرار دادند[۱۷]. ابوطالبی و همکارانش نیز از این روش در پیش‌بینی خوردگی گالوانیکی کوپل فولاد- روی استفاده نمودند[۱۸].

در سال‌های اخیر مدلسازی خوردگی بیشتر به روش المان محدود صورت گرفته است. آترنس و همکاران به بررسی آلیاژهای منیزیم پرداختند[۱۹]. پس از آن‌ها مندل اتصال پلاستیک- آلومینیوم را بررسی نمود[۲۰]. در تحقیقات اخیر، کراس و همکارانش شبیه‌سازی خوردگی گالوانیکی روکش‌های روی و آلومینیوم را ارائه کرده‌اند[۲۱]. در تحقیقی دیگر صادقیان و همکارانش شبیه سازی خوردگی گالوانیکی مقاطع جوش فولاد زنگ نزن ۳۰۴ را بررسی کردند. دراین تحقیق مشاهده شد افزایش تعداد پاس به دلایل متالورژیکی و انحلال کاربیدها بهبود رفتار خوردگی و نیز خوردگی گالوانیکی را به همراه دارد. همچنین افزایش عرض منطقه جوش موجب کاهش نسبت سطح کاتد به آند شده و این مسئله بهبود رفتار خوردگی گالوانیکی را موجب می‌گردد[۲۱].

از مقایسه مقالات اخیر با مقالات قدیمی‌تر این مسئله برداشت شد که روش المان محدود برای مدل‌سازی این پدیده مناسب‌تر می‌باشد. از طرفی تاکنون شبیه سازی خوردگی فولاد ۳۲۷۵۰ در مقالات مشاهده نشده است. از طرفی به علت کاربرد این فولاد

1- Boundary Element Method, BEM

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-06]

در صنایع پالایشگاهی شبیه سازی خوردگی این فولاد حائز اهمیت می باشد. بنابراین هدف از انجام این پژوهش شبیه‌سازی خوردگی اتصالات جوشکاری شده فولاد سوپر دوفازی ۳۲۷۵۰ به روش های اصطکاکی اغتشاشی و الکترود تنگستنی و مقایسه با داده‌های عملی بدست آمده از آزمون خوردگی پتانسیودینامیک می‌باشد.

2- مواد و روش تحقیق

الف) روش انجام جوشکاری

در این تحقیق از فولاد زنگ نزن UNS S32750 به ضخامت ۳ میلیمتر استفاده گردید. ترکیب شیمیایی فلز مورد استفاده به روش کوانتومتری تعیین و در جدول(۱) آورده شده است. لازم به‌ذکر است که ماده اولیه به صورت لوله با قطر ۲۰سانتی‌متر بود که برای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به صورت ورق‌های مسطحی با ابعاد ۱۵ در ۶ سانتی متر تبدیل شد جوشکاری با پارامترهای مختلف مختلف مطابق با جدول(۲) انجام شد. برای جوشکاری ذوبی از روش الکترود تنگستنی استفاده شد. در این روش به عنوان الکترود مصرف نشدنی از الکترود تنگستنی حاوی ۲٪ توریوم به قطر ۲/۴میلی‌متر استفاده شد(الکترود تنگستنی سر سبز). برای انجام جوشکاری از فلز پرکننده دو فازی AWS ER۲۵۹۴ با قطر۲/۴میلی‌متر با ترکیب شیمیایی ارائه شده در جدول(۳) استفاده شد. سپس قطعات در حالت جوشکارش 1G و با آمپراژ و سرعت‌های گوناگون همان‌طور که در جدول(۴) مشاهده می‌شود به یکدیگر اتصال یافتند.

برای ارزیابی مقاومت خوردگی از آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در محلول ۰/۵ مولار H_2SO_4 استفاده شد. برای این منظور نمونه‌های مکعب مستطیلی شکل با مساحت یک سانتی‌متر مربع آماده شده و پس از لحیم شدن به یک سیم مسی روکش‌دار در رزین اپوکسی مانت سرد شدند. نمونه‌ها قبل از آزمون‌های خوردگی تحت عملیات سنباده زنی قرار گرفته وسپس توسط نمونه ها پولیش نهایی شدند. این نمونه‌ها پس از شستشو با آب مقطر، چربی‌زدایی با الکل و خشک شدن با جریانی از هوای گرم مورد ارزیابی قرار گرفتند. آزمون های خوردگی، مطابق با استاندارد ASTM G8 توسط سل ۳ الکترودی که شامل پلاتین به عنوان الکترود شمارنده و الکترود Ag/AgCl به عنوان الکترود مرجع و فلز پایه به عنوان الکترود کار توسط دستگاه IVIUMSTAT.XRe انجام پذیرفت[۲۲]. ابتدا جهت رسیدن به حالت تعادل بین محلول خورنده و نمونه‌ها، به مدت زمان حدود یک ساعت درون محلول خورنده قرار گرفتند و آزمون مدار باز برای رسیدن به یک پتانسیل ثابت انجام شد. پس از آن آزمون پلاریزاسون سیکلی با سرعت روبشی ۱ mv/s از۲۵۰ mV- نسبت به پتانسیل مدار باز شروع شد وتا پتانسیل ۱/۲ mV نسبت به پتانسیل مدار باز ادامه یافت. لازم به ذکر است که این آزمون‌ها حداقل سه بار تکرار شده است.

ب) مدل سازی به روش المان محدود

روش المان محدود روشی برای حل معادلات دیفرانسیل جزئی و انتگرالی می‌باشد. اساس کار این روش ساده سازی معادلات به معادلات دیفرانسیل معمولی با روش‌های عددی مثل اویلر یا گالرکین می‌باشد. در این پژوهش، هدف توسعه یک مدل المان محدود در در ارتباط با داده‌های بدست آمده از آزمایش‌های خوردگی به منظور پیش‌بینی رفتار خوردگی گالوانیکی منطقه جوش فولاد زنگ نزن UNS S32750 در یک مخزن نگهداری سولفوریک اسید می‌باشد. در این پژوهش به منظور ساده سازی و کاهش حجم محاسبات، ابعاد مخزن تا ارتفاع ۱۰ cm در نظر گرفته شده است (شکل۱) بعلاوه به دلیل متقارن بودن مسئله فقط یک قسمتی از مخزن مدل شده با توجه به استفاده از مختصات دو بعدی کارتزین، برای بقیه قسمت‌ها تعمیم داده شد. همچنین شعاع لوله ۱۰سانتی متر درنظر گرفته شد.

برای اعمال شرایط مرزی بر روی قطعه، مطابق شکل(۱)، ضلع سمت راست متشکل از آند و کاتد می‌باشد. ضلع سمت چپ محور تقارن و نیز دو ضلع دیگر ایزوله درنظر گرفته شدند.

توزیع پتانسیل در محیط الکترولیت یک سیستم گالوانیکی مطابق رابطه‌ی (۲) می‌باشد. و نیز در یک سیستم حالت پایدار

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-06]

جدول1- مقادیر عناصر موجود در فولاد **S32750** مورد استفاده در این پژوهش

عناصر	MO	Ni	Cr	Mn	Si	C	N	Cu	W	Fe
درصد	۴/۷۶	۶/۹۸	۲۶/۸۵	۰/۵۶	۰/۴۲	۰/۰۲۸	۰/۳	۰/۹۷	۰/۶۳	مابقی

جدول2- متغیرهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

شماره نمونه	سرعت چرخش (rpm)	سرعت پیشروی (mm/sec)	زاویه ابزار نسبت به قطعه کار(°)
۱	۷۰۰	۴۰	۳
۲	۱۰۰۰	۸۰	۳
۳	۱۰۰۰	۶۰	۳

جدول3-ترکیب شیمیایی فلز پرکننده(**AWS ER2594**)

عنصر	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
درصد	<۰/۰۲	۰/۳	۰/۴	<۰/۰۲	<۰/۰۱۵	۲۵	۹/۴	۴	۰/۲۵

جدول4- متغیرهای جوشکاری قوسی الکترود تنگستنی با گاز محافظ

شماره نمونه	آمپراژ(A)	ولتاژ(V)	زمان(S)	حرارت ورودی(kj/mm)
۱	۱۱۰	۱۱/۵	۱۹۴	۱/۳
۲	۱۲۰	۱۰/۶	۱۵۵	۱/۱
۳	۱۲۰	۱۱/۶	۱۶۰	۱/۰

مطابق رابطه (۳) می‌باشد[۲۳].

$$-\nabla i = \frac{\partial q}{\partial t} \quad (۲)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = 0 \quad \&\nabla i = 0 \quad (۳)$$

رابطه بین میدان الکتریکی و پتانسیل الکتریکی مطابق رابطه (۴) می‌باشد. بعلاوه قانون اهم در معادله (۵) آمده است که σ در آن ضریب هدایت الکتریکی الکترولیت می‌باشد.

$$-\nabla i = \frac{\partial q}{\partial t} \quad (۴)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = 0 \quad \&\nabla i = 0 \quad (۵)$$

در نتیجه از معادلات آمده، معادله (۶) حاصل می‌گردد. بعلاوه، معادله لاپلاس توزیع پتانسیل در طول الکترولیت مطابق معادله (۷) می‌باشد[۶].

$$-\nabla i = \frac{\partial q}{\partial t} \quad (۶)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = 0 \quad \&\nabla i = 0 \quad (۷)$$

رابطه باتلر- والمر[1] برای دانسیته‌های جریان بر پایه واکنش‌های آندی و کاتدی رخ داده در هر الکترولیت استفاده می‌گردد. یک قطعه جوشکاری شده در هر محیط هم دچار واکنش آندی و هم دچار واکنش کاتدی می‌گردد. این ویژگی نیازمند محاسبه دانسیته جریان مجموع است. بدون درنظر گرفتن این مسئله که یک قسمت آند هست یا کاتد می‌باشد. در نتیجه، برای یک الکترود دانسیته جریان آندی و کاتدی مطابق معادله (۸)، (۹) و (۱۰) می‌باشد[۲۳].

$$i_{anodic} = i_0 \exp\left(a_{anodic} \frac{ZF(\emptyset - \emptyset_0)}{RT}\right) \quad (۸)$$

$$i_{cathodic} = i_0 \exp\left(a_{cathodic} \frac{ZF(\emptyset - \emptyset_0)}{RT}\right) \quad (۹)$$

$$i_{net} = i_{anodic} + i_{cathodic} \quad (۱۰)$$

1 -Botler- Volmer

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-06]

هرچند در پتانسیل‌های پایین و زیر 0.01V رابطه فوق به رابطه‌ای خطی تبدیل می‌گردد. اما در پتانسیل‌های اضافی بالاتر این رابطه به رابطه اکسپنانسیلی تبدیل می‌گردد که به آن رابطه تافل[1] می‌گویند. روابط ذکر شده در معادلات (۱۱) و (۱۲) آمده است[۲۳و۲۴].

$$i_{net} = i_0 \exp\left(a_{anodic}\frac{ZF(\emptyset - \emptyset_0)}{RT}\right) \quad (۱۱)$$

$$(\emptyset - \emptyset_0) = \propto ln\frac{i_{net}}{i_0} \quad (۱۲)$$

همچنین گفتنی است که دانسیته جریان محاسبه شده از شبیه‌سازی مطابق رابطه (۱۳) بدست می‌آید.

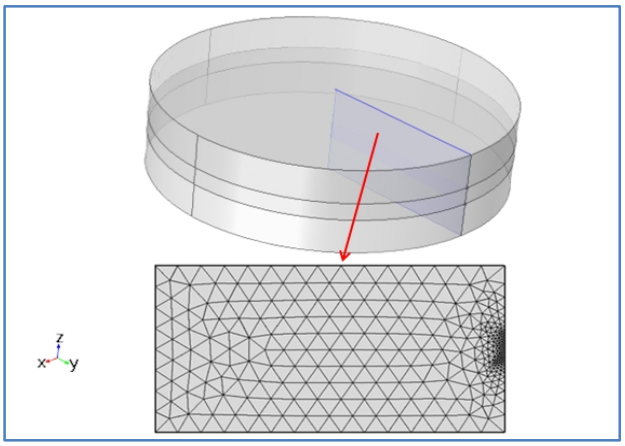
$$\frac{\partial \emptyset}{\partial n} = i \quad (۱۳)$$

در این پژوهش از نرم افزار کامسول برای حل عددی استفاده گردید. در این نرم افزار از تحلیل دوبعدی در مختصات کارتزین استفاده گردید. مش بندی مقطع مورد بررسی در شکل(۱) آمده است. در این مسئله از المان‌های مثلثی استفاده گردید که در اطراف منطقه مورد بررسی ریزتر و با حرکت به سمت مرکز مخزن المان‌ها بزرگ‌تر می شوند..

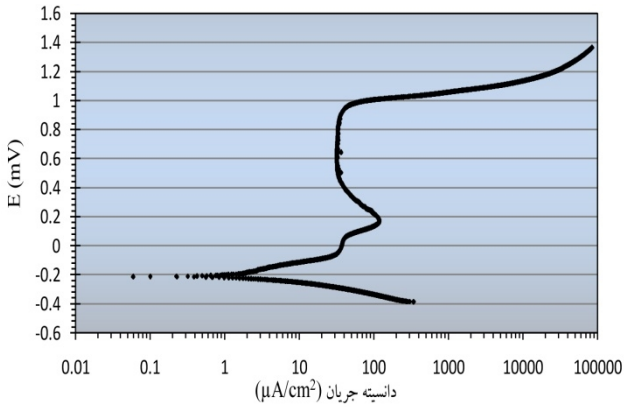
3- نتایج و بحث

رفتار خوردگی فلز پایه فولاد دوفازی UNS S32750 که به صورت پلاریزاسیون سیکلی در محلول $0.5M\ H_2SO_4$ و در دمای محیط انجام شده است، مطابق باشکل(۲) می‌باشد. با بررسی این نمودار مشخص گردید که این فولاد رفتار فعال-رویین داشته و مقاومت به خوردگی بسیار بالایی دارد، به طوری که پتانسیل خوردگی آن mV ۰/۲۱- بوده و دانسیته جریان خوردگی آن در حدود $6\ \mu A/cm^2$ است.

این مقاومت به خوردگی بالا به علت تأثیر حضور عناصر آلیاژی با درصد حجمی بالا در این فولاد خصوصا کروم، مولیبدن و نیتروژن بوده که منجر به ایجاد لایه رویین قوی بر روی سطح فولاد شده است، که بعد از تخریب شدن سریع قابلیت رویین‌شدن مجدد را دارد. ایجاد نوسانات جریانی در محدوده پتانسیل‌های بالا در نمودار پلاریزاسیون نشان دهنده جوانه زنی حفره و رویین شدن مجدد آن است اما با افزایش پتانسیل اعمالی به نمونه، نیروی محرکه جهت نفوذ و حرکت آنیون‌ها و کاتیون‌های ایجاد شده در محیط خورنده از لایه رویین راحت‌ترشده که موجب زیاد شدن جریان رویین شدن و در ادامه منجر به شکست لایه رویین می‌شود[۲۵و۲۶].



شکل1- شماتیک دوبعدی مش بندی شده مقطع لوله جوش خورده مورد بررسی.



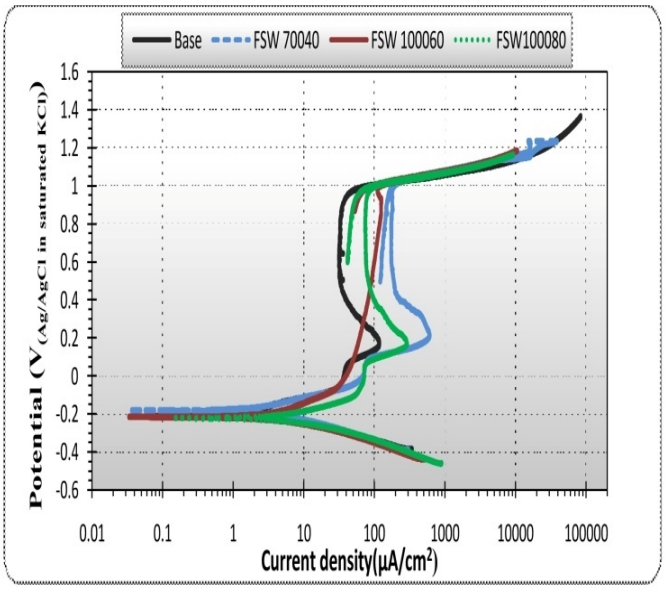
شکل2- منحنی آزمون خوردگی پلاریزاسیون سیکلی فلز پایه در محلول $0.5M\ H_2SO_4$

هم چنین ساختار دو فازی فولاد موجب رخ دادن فعالیت گالوانیکی بین دو فاز فریت و آستنیت شده به گونه‌ای که بخشی از پراکندگی در دانسیته جریان در منطقه رویین می‌تواند به خاطر اثر متقابل و فعل و انفعالات پیچیده گالوانیکی بین فاز آستنیت و فریت باشد[۱۴]. این موضوع در نتایج کار اقلیمی و همکاران و تاوارس و همکاران نیز مشاهده شد[۲۶و۲۹]. پس از شکست لایه رویین، وجود عناصر آلیاژی در ریزساختار

1 -Tafel

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-06]

فولاد دوفازی UNS S32750 مخصوصاً نیتروژن و کروم موجب عدم رشد و پایدار شدن حفره‌ی ایجاد شده و تقویت سینتیک رویین شدن می‌شوند و فقط حفرات کوچک و شبه‌پایدار در ریز ساختار پس از آزمون خوردگی قابل مشاهده است.



شکل3- منحنی ازمون خوردگی پلاریزاسیون سیکلی نمونه‌های اتصال یافته به روش اصطکاکی اغتشاشی در محلول0.5 M H2SO4 .

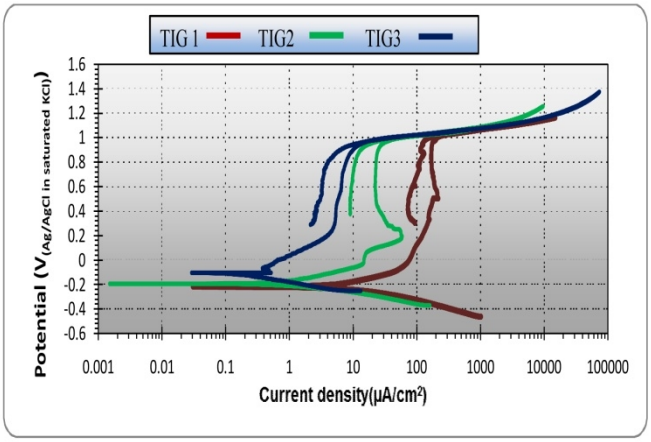
در بررسی رفتار خوردگی مقطع جوشکاری و محل اتصال فولاد دوفازی UNS S32750 توسط روش حالت جامد جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به خاطر جوشکاری در زیر دمای ذوب، گرمای ورودی کم و سریع سرد شدن مقطع جوش، باعث عدم ایجاد فازهای مضر و ترکیبات بین فلزی در مرزدانه‌های فریت و آستنیت شده که در پی آن منجر به رفتار مقاومت به خوردگی تقریبا شبیه فلز پایه شده است به طوری که پتانسیل خوردگی و نرخ دانسیته جریان خوردگی برای فلز پایه و منطقه جوش اغتشاشی تقریبا یکی بوده و به ترتیب حدود ۰/۲۲ mV- و ۶-۱۲ $\mu A/cm^2$ است(شکل ۳). تغییر در پارامترهای جوشکاری اگرچه منجر به تغییر در ریزساختار منطقه جوش و گرمای ورودی شده است اما تأثیر زیادی بر روی پتانسیل خوردگی و دانسیته جریان خوردگی نداشته و برای نمونه‌ای که کمترین گرمای ورودی را داشته است، کمترین مقدار خود را داشته است. با بررسی ریزساختار پس از آزمون خوردگی و مقایسه آن با فلز پایه مشخص شد که وجود ریزساختار ریزدانه‌تر در محل اتصال ناشی از روش جوشکاری حالت جامد منجر به کوچک‌تر شدن اندازه حفرات و پخش شدن حفرات در کل سطح محل اتصال شده است.

اطلاعات بیشتری نیز می‌توان از نمودار پلاریزلاسیون سیکلی در محدوده آندی بدست آورد که تا پتانسیل ۱/۲ mV بیش‌تر از پتانسیل مدار باز و یا تا دانسیته جریان ۱۰ mA/cm^2 ادامه یافته است و بعد از آن به سمت پتانسیل اولیه برگشت می‌کند. این اطلاعات پتانسیل حفره‌دار شدن، پتانسیل رویین شدن مجدد، نوع حلقه هیسترسیز است. برای نمونه‌های جوشکاری شده و نمونه پایه پتانسیل حفره‌دار شدن تقریبا یکسان است و در محدوده ۱ mV- ۰/۹۵ قرار گرفت. حلقه هسترسیز در نمودار سیکلی پلاریزاسیون خوردگی معمولاً به دو صورت مثبت و منفی است به نحوی که در یک پتانسیل ثابت، اگر جریان رفت از جریان برگشتی کمتر باشد، حلقه مثبت است که نشان دهنده عدم ترمیم و بازسازی لایه رویین و شروع حفره‌دار شدن و رشد حفرات جوانه زده در سطح نمونه است. در مقابل زمانی که حلقه منفی باشد نشان دهنده ترمیم لایه رویین در محل ایجاد جوانه‌های حفرات ایجاد شده است و تنها حفرات شبه پایدار باقی می‌مانند. با توجه به نمودار (شکل ۳) آزمون پلاریزاسیون سیکلی فلز پایه و مقطع جوشکاری شده مشخص‌شده برای تمامی نمونه‌ها حلقه هیسترسیز منفی بوده و حفرات شبه پایدار فقط بر روی سطح ایجاد شده‌اند[۲۶-۲۸].

در بررسی رفتار مقاومت به خوردگی مقطع جوش نمونه‌های اتصال یافته به روش الکترود تنگستنی با گاز محافظ ایجاد سیکل حرارتی و دمای بالا در منطقه جوش و اطراف آن موجب از بین رفتن تعادل بین دو فاز فریت و آستنیت و تغییر در مورفولوژی و اندازه دانه‌ی فازهای فریت و آستنیت شده است. هم چنین به خاطر دمای بالا و سرعت سرد شدن کم فرصت کافی جهت ایجاد فازهای ناخواسته و ترکیبات بین فلزی در منطقه جوش و اطراف آن در مرزدانه‌های فریت و آستنیت بوده است. تمامی این موارد می‌تواند منجر به تغییر در رفتار مقاومت

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-06]

به خوردگی در منطقه جوش نسبت به فلز پایه گردد(شکل ۴).



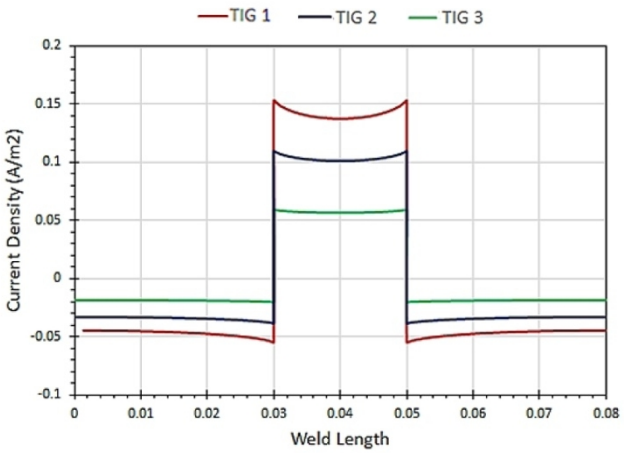
شکل4-منحنی آزمون پلاریزاسیون سیکلی نمونه های جوشکاری شده به روش الکترود تنگستنی در محلول 0.5M H2SO4.

همان‌طور که در نمودارهای پلاریزاسیون سیکلی نمونه‌های جوشکاری مشاهده می‌شود، اگرچه پتانسیل و دانسیته جریان خوردگی نسبت به فلز پایه تغییر چندانی نکرده است، اما زیادبودن گرمای ورودی در حین جوشکاری منجر به تغییر شکل نمودار و کاهش پتانسیل حفره‌دار شدن شده است. برای نمونه‌ای که کمترین گرمای ورودی را در حین جوشکاری دارد، رفتار مقاومت به خوردگی تقریبا شبیه فلز پایه است(شکل۴).

در منطقه جوش و ناحیه متأثر از حرارت ناشی از جوشکاری، در اثر بزرگ‌تر شدن دانه‌های فریت و ایجاد رسوبات درون مرزدانه‌ای و فقیر شدن مناطق اطراف مرزدانه فریت از عناصر آلیاژی و همچنین ایجاد فاز آستنیت ثانویه که معمولاً نیتروژن و کروم کمتری نسبت به آستنیت اولیه دارد، منجر به تغییر در رفتار مقاومت به خوردگی منطقه جوش ذوبی شده است. در واقع مقاومت به خوردگی معمولاً توسط فازی که کمترین مقاومت را نسبت به حمله شیمیایی دارد، تعیین می‌شود[۱۱ و۲۹].

مطابق شکل(۵) نتایج حاصل از شبیه سازی خوردگی گالوانیکی برای نمونه‌های جوشکاری شده به روش الکترود تنگستنی می‌باشد که محور افقی طول نمونه های تحت آزمون خوردگی و محور عمودی دانسیته جریان خوردگی در نواحی مختلف نشان می‌دهد. این نمودار نشان داد که در مقطع جوش لوله دانسیته جریان خوردگی در مرز آند/کاتد بیشـترین مقدار را دارا می‌باشد.

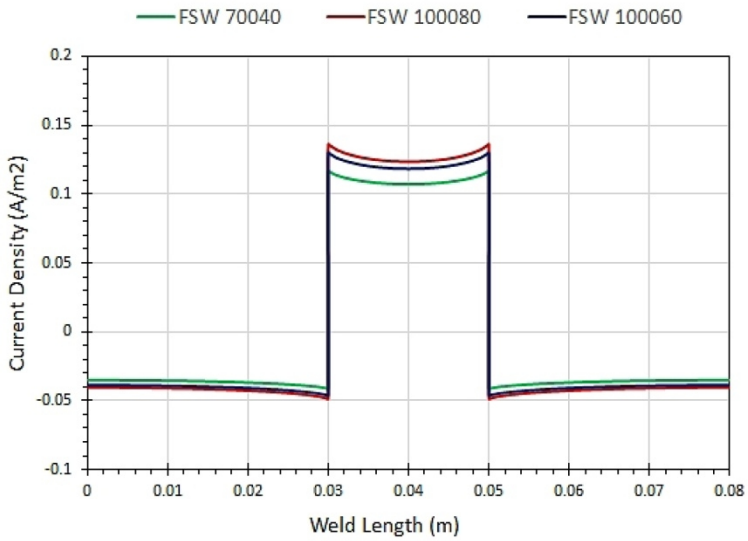
علاوه براین دانسیته جریان در مقطع جوش در کلیه نمونه‌ها نسبت به مقدار دانسیته جریان خوردگی فلز پایه بیش‌تر است. همانطور که در شکل(۵) قابل مشاهده است دانسیته جریان در نمونه شماره ۱ بیشتر از سایر نمونه‌ها می‌باشد که دلیل این موضوع در قسمت قبل عنوان شده است. همچنین مشاهده می‌شود هر چه میزان دانسیته جریان درآند(منطقه جوش) بیشتر باشد، دانسیته جریان در فلز پایه کمتر شده است که نشان می‌دهد هر چه منطقه جوش بیشتر خورده شود فلز پایه بیش‌تر حفاظت می‌گردد. شکل(۶) نتایج حاصل از شبیه سازی خوردگی گالوانیکی برای نمونه‌های جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل(۶) و دقت در نتایج پیشین(شکل ۳) تفاوت قابل توجهی در رفتار خوردگی گالوانیکی مشاهده نمی‌شود. علت این موضوع را می‌توان پایین بودن میزان حرارت ورودی در این روش جوشکاری عنوان کرد.



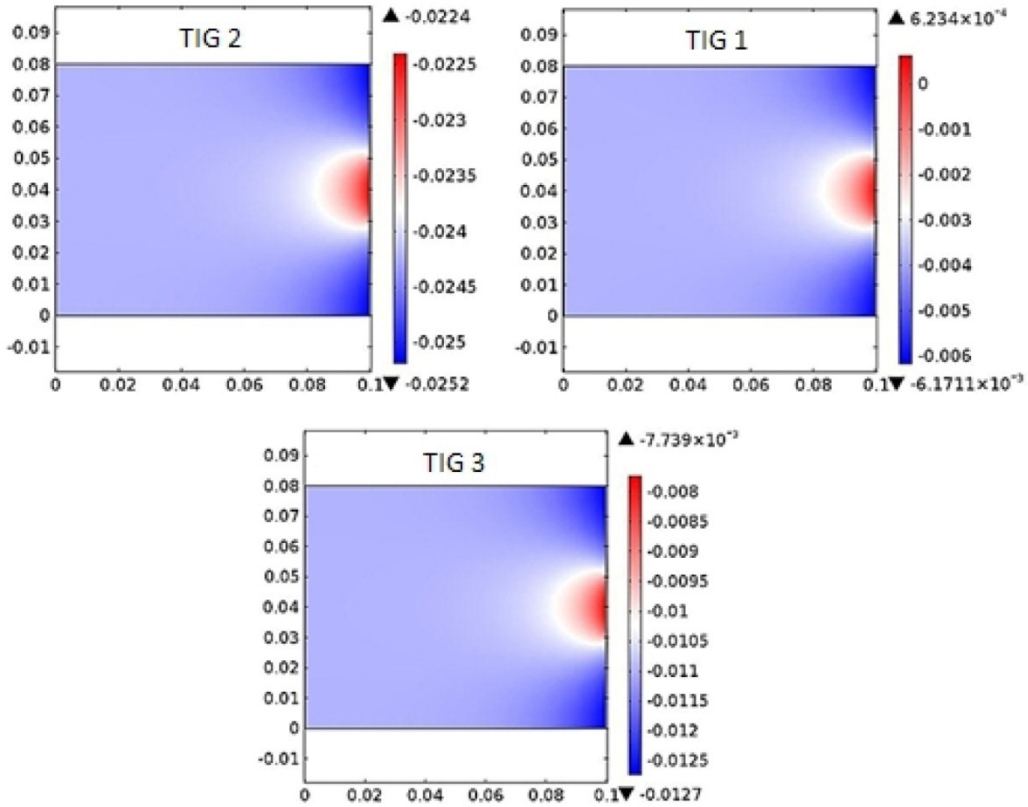
شکل 5- نتایج حاصل از شبیه سازی توزیع جریان خوردگی گالوانیکی در عرض مقطع جوش لوله برای نمونه های جوشکاری شده به روش الکترود تنگستنی.

توزیع پتانسیل الکترولیت بدست آمده از شبیه‌سازی مطابق شکل(۷و۸) می‌باشد. در شکل(۷) (نمونه‌های جوشکاری شده به روش الکترود تنگستنی) دیده می‌شود که پتانسیل الکترولیت در اطراف منطقه جوش بالاتر از پتانسیل در اطراف فلز پایه قرار گرفته است.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-06]



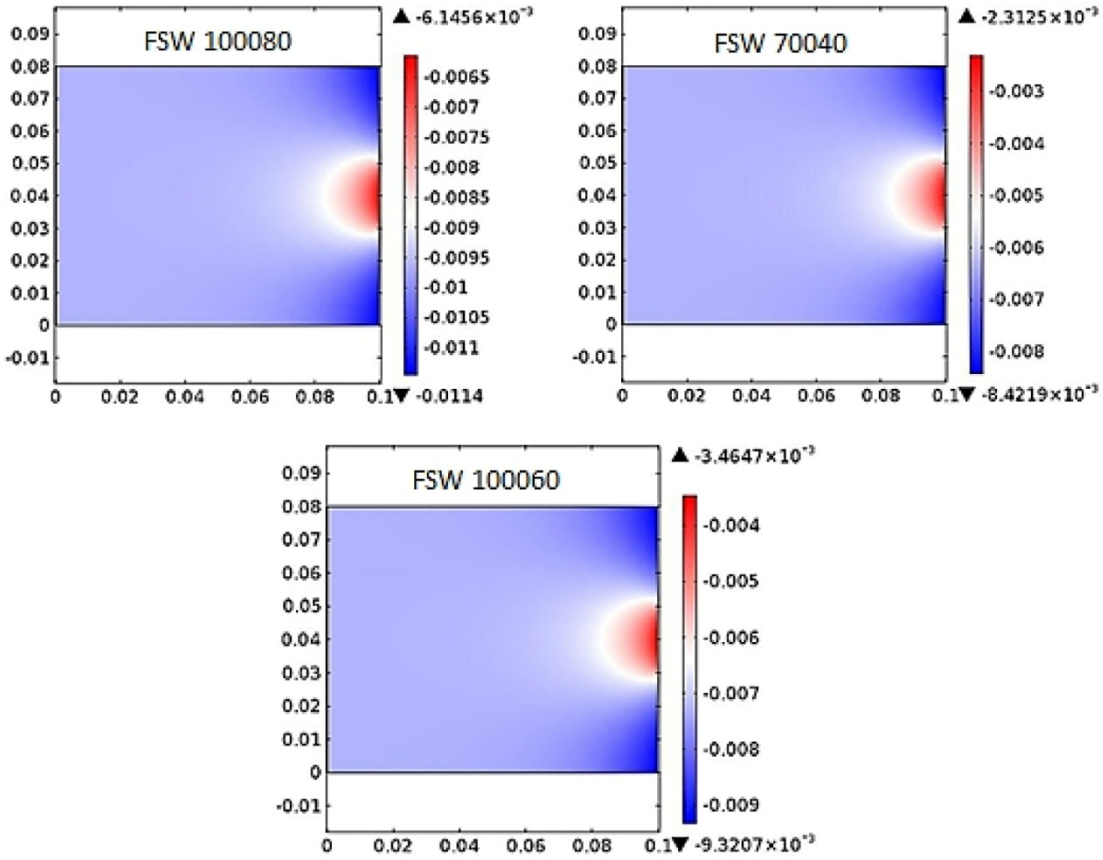
شکل6- نتایج حاصل از شبیه سازی توزیع جریان خوردگی گالوانیکی در عرض مقطع جوش لوله برای نمونه های جوشکاری شده به روش الکترود تنگستنی.



شکل7- توزیع پتانسیل خوردگی درالکترولیت درمقطع جوش نمونه های جوشکاری شده به روش الکترود تنگستنی.

علت این موضوع اختلاف پتانسیل تعادلی خوردگی منطقه جوش و فلز پایه می‌باشد. با مقایسه نمودارهای شکل(۷) مشـــاهده می‌شود که در نمونه‌ای که بیش‌ترین میـزان حرارت ورودی را دارا می‌باشد (نمونه شماره ۱)، پتانسیل الکترولیت افزایش محسوسی داشته است. بنابراین با توجه به این که علت این موضوع اختلاف پتانسـیل تعادلی خـوردگی منطقه جوش و

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-06]



شکل8- توزیع پتانسیل خوردگی درالکترولیت درمقطع جوش نمونه های جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی.

فلز پایه می‌باشد. با مقایسه نمودارهای شکل(۷) مشاهده می‌شود که در نمونه‌ای که بیش‌ترین میزان حرارت ورودی را دارا می‌باشد (نمونه شماره ۱)، پتانسیل الکترولیت افزایش محسوسی داشته است. بنابراین با توجه به این که پتانسیل روی قطعه منفی پتانسیل الکترولیت است می‌توان نتیجه گرفت که این نمونه منطقه جوش فعال تری دارد. این مسئله در نمودارهای شکل(۴) نیز تایید می‌گردد. در مورد نمونه‌های جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی(شکل۸) تحلیل‌ها مطابق با مطالب ذکر شده برای شکل(۷) می‌باشد با این تفاوت که تغییر محسوسی با تغییر پارامترهای جوشکاری حاصل نشده است، که علت آن را می‌توان پایین بودن میزان حرارت وردی در این روش جوشکاری دانست.

4- نتیجه‌گیری

با توجه به آنچه که ذکر شد، اهم نتایج عبارتند از:

- با توجه به نمودار آزمون پلاریزاسیون سیکلی فلز پایه و مقاطع جوشکاری شده مشخص شده برای تمامی نمونه‌ها حلقه هیسترسیز منفی بوده وحفرات شبه پایدار فقط بر روی سطح ایجاد شده اند.

- در منطقه جوش فولاد زنگ نزن علی رغم نزدیک بودن جنس فلز پایه و فلز جوش، باز هم شاهد خوردگی گالوانیکی می‌باشیم. دلیل این مسئله فعل و انفعلات متالورژیکی است که در حین جوشکاری افتاده و منطقه جوش را حساس‌تر(منطقه جوش دارای تنش باقی مانده می‌باشد) از فلز پایه نموده است.

- نرخ خوردگی ناشی از اثر گالوانیکی در منطقه جوش به شدت زیاد می‌باشد، دلیل این مسئله این است که در کاربردهای صنعتی عمدتا مساحت فلز پایه نسبت به منطقه جوش به مراتب بیشتر است.

– در نمونه‌های جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی تفاوت چندانی بین دانسیته جریان گالوانیکی نمونه های مختلف وجود ندارد، که علت آن را می‌توان حرارت ورودی کمتر در این روش نسبت به روش ذوبی عنوان کرد.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-06]

- در نمونه‌های جوشکاری شده به روش الکترود تنگستنی با افزایش حرارت ورودی به علت درشت شدن دانه‌ها دانسیته جریان خوردگی(به طور میانگین۰/۲ آمپر بر متر مربع) افزایش می‌یابد.

منابع

1- Lippold, J.C., Kotecki, D.J., Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels, Vol. 13, 1999.

2- Petterson, C.O., Fager, S.A., "Welding practice for the Sandvik duplex stainless steels SAF 2304, SAF 2205 and SAF 2507", *AB Sandvik steel Sweden*, 1995.

3- Fager, S.A., Odegard, L., "Welding of the Super Duplex Stainless Steel Sandvik SAF2507 (UNS S32750)", *Proceedings of the Third International Offshore and Polar Engineering Conference*, 1993.

4- Cervo, R., "Annealing temperature effect on super duplex stainless steel UNS S32750 welded joint", *Material science and engineering*, Vol. 45, pp. 4369-4377, 2010.

5-Davis, J.R.. "Corrosion of Weldments", ISBN-13: 978-0871708410, illustrated edition,2006.

6- Shimada, M., Kokawa, H., Wang, Z.J., Sato, Y.S., Karibe, I. ,"Optimization of grain boundary character distribution for intergranular corrosion resistant 304 stainless steel by twininduced grain boundary engineering", *Acta Materialia*, Vol. 50, pp. 2331–2341,2002.

7- Thamia, S., " Modeling and simulation of galvanic corrosion pit as a moving boundary problem", *Computational Materials Science*, Vol. 65, pp. 269-275,2012.

۸- اهل سرمدی،م." جوشکاری فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی UNS S32750 با روش‌های اصطکاکی اغتشاشی و قوسی الکترود تنگستن گاز و ارزیابی خواص مکانیکی و ریزساختاری " پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۹۴.

9-Muthupandi , V., Bala Srinivasan, P., Seshadri, S.K ., Sundaresan S., "Effect of weld metal chemistry and heat input on the structure and properties of duplex stainless steel welds", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 358, pp. 9–16, 2003.

۱۰-امینی، م.،" جوشکاری غیر مشابه فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی UNS S32750 به فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 316L و ارزیابی ریز ساختار و رفتار خوردگی" دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، پایان نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۹۱.

11- Tavares, S., Pardal, J., Lima, L., Bastos, N., Nascimento, A., Souza, L., "Characterization of microstructure, chemical composition, corrosion resistance and toughness of a multipass weld joint of super duplex stainless steel UNS S32750", *Materials Characterization*, Vol.58, pp. 610–616, 2007.

12-Tan, H., Wang, Z., Jiang, Y., Yang, Y., Deng, B., Song, H. and Li, J., "Influence of welding thermal cycles on microstructure and pitting corrosion resistance of 2304 duplex stainless steels", *Corrosion Science*, Vol. 55, pp.368-377, 2012.

13- Davis, J.R., ed. ,"Corrosion of duplex stainless steel weldments",In: Corrosion of weldments, Ohio: ASM International, 225p,2006.

14- Santos, T. and Queiroz, R. and Ramirez, A., "Correlating Microstructure and Performance of UNS S32750 and S32760 Super duplex Stainless Steels Friction Stir Welds", *Proceedings of the Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference*, pp. 535-540, 2011.

15-Atapour. M, Sarlak. H, Esmailzadeh. M, "Pitting corrosion susceptibility of friction stir welded lean duplex stainless steel joints" *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol 66, pp. 209-216. 2015.

16- Nikou, S., Adey, S., Galvanic Corrosion", ASTM Spec, Tech. Publ. 987, pp. 97,1988.

17- Jia, J. X., Atrens, A., Song, G., Muster, T. H. "Simulation of galvanic corrosion of magnesium coupled to a steel fastener in NaCl solution", *Materials and Corrosion*, Vol. 56, pp. 468-475,2005.

۱۸-ابوطالبی، ا.، کرمانپور، ا.، شیشه ساز،م.، گلعذار، م.، ۱۳۸۸، بررسی اثر شرایط مرزی در شبیه سازی خوردگی گالوانیکی به روش المان مرزی، یازدهمین کنگره ملی خوردگی ایران، کرمان، انجمن خوردگی ایران، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

19- Atrenes, A., Shi, Z. , " Numerical modelling of galvanic corrosion of magnesium (Mg) alloys", Corrosion of Magnesium Alloys, pp. 455-483,2011.

20-Mandel, M., Kruger, L. , " Determination of pitting sensitivity of the aluminium alloy EN AW-6060-T6 in a carbon-fibre reinforced plastic/aluminium rivet joint by finite element simulation of the galvanic corrosion process", *Corrosion Science*, Vol. 73, pp. 172-180,2013.

21- Cross, S., Gollapudi, L., Schuh C. , " Validated numerical modeling of galvanic corrosion of zinc and aluminum coatings", *Corrosion Science*, Vol. 88, pp. 226-233,2014.

22- ASM International. Handbook Committee*: Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection. Vol. 13A*, ASM International, 2003.

23- Turner, M., "Finite Element Modeling of Galvanic Corrosion of Metals", Rensselaer Polytechnic Institute, M.Sc. Thesis,2012.

24- Hermas, A.A., Morad, M.S.). "A comparative study on the corrosion behaviour of 304austenitic stainless steel in sulfamic and sulfuric acid solutions", *Corrosion Science*, Vol. 50, pp.2710–2717.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-06]

25- Bettini, E., Kivisäkk, U., Leygraf1, C., Pan, J., "Study of Corrosion Behavior of a 2507 Super Duplex Stainless Steel: Influence of Quenched in an Isothermal Nitrides", *International Journal of Electrochemical Science*, Vol. 9, pp 61 – 80, 2014.

26- Tiago, F., "Microstructure evaluation of UNS S32205 duplex stainless steel friction stir welds", *10th Brazilian Stainless Steel Conference*.,Vol. 66, pp. 187-191, 2013.

27- Migiakis, K., Papadimitriou, D., "Effect of nitrogen and nickel on the microstructure and mechanical properties of plasma welded UNSS32760 super-duplex stainless steels", *Journal of Material Science*, Vol. 44, pp. 6372– 6383, 2007.

28- Eghlimi, A., Shamanian, M., Raeissi, K., "Effect of current type on microstructure and corrosion resistance of super duplex stainless steel claddings produced by the gas tungsten arc welding process", *Surface & Coatings Technology*., Vol. 244, pp. 45-51, 2014.

29- Tavares, S., Loureiro, A., Pardal, J., Montenegro, T., Costa, V., "Influence of heat treatments at 475 and 400 °C on the pitting corrosion resistance and sensitization of UNS S32750 and UNS S32760 super duplex stainless steels", *Materials and Corrosion*, Vol. 66, No. 999,2011.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-06]