

بررسی خوردگی فولاد ASTM A283 Grade C جوشکاری شده با الکتروود E7018 در آب دریای خلیج فارس

محمد حسن زاده^۱، خسرو رحمانی^۲

^۱ کارشناسی ارشد مهندسی بازرسی فنی، دانشگاه شهید بهشتی
^۲ استادیار دانشکده مکانیک دانشگاه شهید بهشتی

* نویسنده مسئول: moh.hasanzade@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۱/۳۱

چکیده

بررسی اثر خوردگی آب دریای خلیج فارس بر روی فولادهای کربنی و قطعات جوشکاری شده مورد استفاده برای ساخت مخازن فلزی از آن جهت اهمیت دارد که می تواند به امکان سنجی استفاده از آب دریا برای هیدروتست این مخازن منجر شود که در صورت مثبت بودن نتایج ارزیابی، سبب صرفه جویی های اقتصادی و زیست محیطی فراوانی می شود. برای نیل به این هدف در این پژوهش، ابتدا فولاد کربنی کم کربن ASTM A283 Grade C با الکتروود E7018 جوش داده شده و آزمون رادیوگرافی برای کنترل کیفیت جوش و همچنین تست های سختی سنجی، میکرواچ و ماکرواچ برای بررسی ریزساختاری انجام شد. سپس ترکیب شیمیایی، pH، هدایت الکتریکی و میزان SRB موجود در آب دریای مورد مطالعه اندازه گیری گردید. در ادامه نرخ خوردگی فولاد و الکتروود جوشکاری مورد استفاده در آب دریای خلیج فارس به وسیله روش الکتروشیمیایی پلاریزاسیون مقاومت خطی و همین طور آزمون غوطه وری، محاسبه گردید. سپس محصولات خوردگی تشکیل شده و سطح خورده شده نیز به وسیله روش های EDS و SEM آنالیز شدند. نتایج حاصل از آزمون های پلاریزاسیون و غوطه وری مشخص نمود که فلز جوش الکتروود E7018 نسبت به فولاد ASTM A283 Grade C آند است که این نتیجه توسط تصاویر SEM تأیید شد.

کلمات کلیدی: خوردگی، آب دریا، فولاد کربنی، جوش، مخازن ذخیره، هیدروتست، خلیج فارس؛

Investigating Corrosion of ASTM A283 Grade C Carbon Steel and E7018 Welding Electrode in Persian Gulf Seawater

M. Hassanzadeh^{1*}, K. Rahmani²

^{1,2} Energy and Mechanical Engineering Department, Abbaspour-power and water- College of Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran.

* Corresponding Author: moh.hasanzade@gmail.com

Submission: 2016, 01, 10 Acceptance: 2016, 04, 19

Abstract

Investigation of Persian Gulf seawater corrosion effect on the carbon steels and welded pieces used in construction of metallic storage tanks is important from this point of view that this investigation may result in using this seawater to do hydro test of these tanks. If the results of this evaluation be positive, it will have lots of economic and environmental advantages. In order to achieve this target in this study, at first a 15 mm thickness plate of ASTM A283 Grade C low carbon steel was welded by E7018 electrode then quality controlled by radiography test and its microstructure evaluated by macro and micro etch tests and also hardness test was done for it. Furthermore chemical composition, pH, conductivity and SRB amount within the water has been measured too. Then corrosion rates for each one of these mentioned steel and electrode in Persian Gulf seawater were measured by electrochemical method of linear polarization resistance and also immersion test. Then corrosion product and corroded surface were analyzed by EDS and SEM methods. Results of polarization and immersion tests proved that E7018 electrode is anode compared to ASTM A283 Grade C steel and this result was confirmed by SEM images.

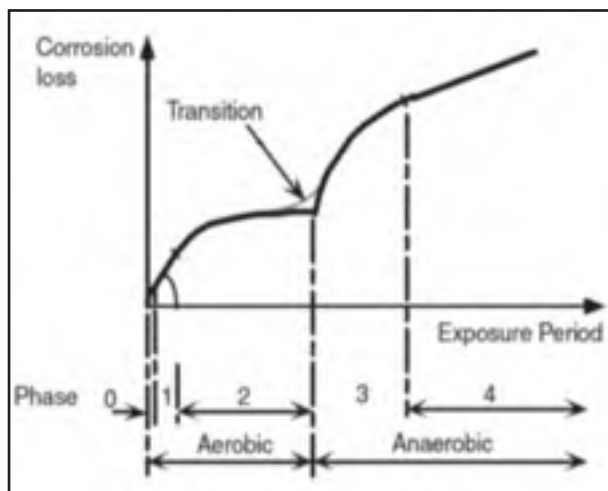
Keywords: Corrosion- Seawater- Carbon Steel- Weldment- Storage Tank- Hydrotest, Persian Gulf;

۱- مقدمه

مخازن فلزی که در صنعت مورد استفاده قرار می گیرند بر سه نوع اتمسفری، کم فشار و تحت فشار می باشند. استانداردهای بین المللی که برای ساخت این مخازن بخصوص در صنایع نفت و گاز استفاده می شوند، عبارتند از: استاندارد شماره ۶۵۰ موسسه نفت آمریکا برای طراحی و ساخت مخازن اتمسفری با فشار کاری کمتر از $2/5 \text{ (lb/in}^2\text{)}$ ، استاندارد شماره ۶۲۰ موسسه نفت آمریکا برای طراحی و ساخت مخازن کم فشار با فشار کاری بیشتر از $2/5 \text{ (lb/in}^2\text{)}$ و کمتر از $15 \text{ (lb/in}^2\text{)}$ و استاندارد بخش ۸ انجمن مهندسی مکانیک آمریکا برای طراحی و ساخت مخازن تحت فشار با فشار کاری بیش از $15 \text{ (lb/in}^2\text{)}$. مخازن ذخیره که در صنایع نفت و گاز برای ذخیره و نگهداری مواد ورودی و یا محصولات تولیدی مانند: نفت خام، میعانات گازی، آب آتش نشانی، آب بویلرها و... استفاده می شود اغلب از گروه مخازن اتمسفری و کمتر از نوع مخازن کم فشار هستند. مواد و آلیاژهای مورد استفاده برای ساخت مخازن ذخیره در اکثر موارد فولاد کربنی است که با مراجعه به استاندارد API 650 ویرایش سال ۲۰۱۰ و بندهای ۴,۲,۲ تا ۴,۲,۵ از آن [۱]، می توان جنس ورق های مجاز برای استفاده در ساخت مخازن ذخیره اتمسفری را مشخص نمود. از جمله این ورق ها که در صنایع نفت و گاز ایران نیز کاربرد زیادی دارد ورق ASTM-A283 Grade C است. باتوجه به کاربرد گسترده ای که این فولاد کربنی در ساخت مخازن ذخیره در صنایع نفت و گاز دارد، این پژوهش نیز بر بررسی اثر خوردگی آب دریای خلیج فارس بر روی این فولاد، متمرکز شده است. همچنین باتوجه به اینکه در ساخت مخازن و برای اتصال ورق های فولادی، از عملیات جوشکاری بر اساس یک دستورالعمل تأیید شده استفاده می شود، لذا بررسی اثر خوردگی آب دریا بر روی فلز جوش بعنوان بخشی از سطح در تماس با محیط ضروری است. پس از ساخت مخازن ذخیره، کیفیت ساخت و جوش آنها طی مراحل متعدد و بوسیله روش های مختلفی آزموده می شود که از جمله این روش ها آزمون هیدرواستاتیک مخازن به وسیله آب است. در بند ۷,۳,۳ از استاندارد API 650 ویرایش سال ۲۰۱۰ [۱] درمورد کیفیت آب مورد استفاده برای هیدروتست مخازن اشاره کلی شده است و در آن پیشنهاد شده است که بهتر است از آب آشامیدنی جهت هیدروتست استفاده شود. اما استفاده از سایر انواع آب از جمله آب چاه، رودخانه و حتی دریا را نیز منع نمی کند و مسئولیت عواقب ناشی از استفاده از این نوع آبها، از جمله احتمال خوردگی، را بر عهده کارفرمای ساخت مخزن می داند. همچنین پیشنهاد می کند که در صورت طولانی شدن زمان هیدروتست تا

بیش از ۱۴ روز که شامل زمان آنگیری و تخلیه نیز می شود، اقدامات اصلاحی بر روی آب صورت گیرد که این اقدامات می تواند شامل اضافه کردن بازدارنده ها، زیست کش ها و... باشد. اما در مقام عمل و در پروژه های عظیمی مانند ساخت پالایشگاه های نفت و گاز که در آنها مخازن بسیار بزرگ با قطر چند ده متری و با ظرفیت چند ده هزار متر مکعبی ساخته می شود، استفاده از آب آشامیدنی جهت هیدروتست این مخازن از لحاظ اقتصادی و زیست محیطی هزینه های سنگینی در پی دارد و با توجه به بحران کمبود آب، حساسیت موضوع افزایش می یابد. از سوی دیگر باتوجه به گنجایش بالای مخازن عظیم و مشکلات اجرایی حین کار، امکان رعایت بازه زمانی ۱۴ روزه نیز در بسیاری از موارد غیرممکن است. لذا در این پژوهش سعی شده است اثر خوردگی آب دریای خلیج فارس بر روی فولاد کربنی بررسی شود تا خطرپذیری استفاده از آب دریا به عنوان منبعی کم هزینه از لحاظ اقتصادی و زیست محیطی برای هیدروتست امکان سنجی شود. همچنین هدف ضمنی از آزمون های انجام شده در این پژوهش بررسی صحت انتخاب الکتروود مورد استفاده برای جوشکاری این فولاد است.

در بسیاری از مطالعات از جمله پژوهش های صورت گرفته توسط جفری، تونی ولز و روبرت ای ملچرز [۲,۳,۴] اشاره شده است که خوردگی فولاد کربنی در آب دریا شامل دو مرحله خوردگی کوتاه مدت و خوردگی بلند مدت می باشد که در چهار فاز روی می دهد (شکل ۱). خوردگی کوتاه مدت متناسب با میزان اکسیژن حل شده در آب است و خوردگی بلند مدت هم تابع فعالیت باکتری های احیاء کننده سولفات (SRB) و تحت تأثیر غلظت مواد مغذی موجود در آب است.



شکل ۱- مدل ایده آل برای تخریب خوردگی یکپوخت بعنوان تابعی از زمان در معرض بودن، که نشان دهنده فازهای کنترل کننده خوردگی در شرایط غوطه وری در آب دریا است [۵].

برای فعالیت باکتری های SRB محیا می شود که فازهای ۳ و ۴، این مرحله را نشان می دهند.

در رابطه با خوردگی فولادهای کربنی در آب دریا و همچنین در رابطه با بررسی تطابق الکتروود به کار برده شده برای جوشکاری این فولادها از لحاظ خوردگی در محیط آب دریا، تحقیقات مختلفی صورت گرفته است. از آن جمله بررسی ساعتچی و همکاران [۹] بر روی خوردگی فولاد ساده کربنی در آب دریاچه ارومیه و دریای خزر و همین طور پژوهش سی.ای. آرنولد که نشان داد الکتروود جوشکاری E6013 نسبت به فولاد کربنی A285 در محیط آب دریا بسیار آندی است [۱۰]، اما بنا بر دانش نویسنده در رابطه با موضوع این پژوهش تاکنون بررسی صورت نگرفته است.

۲- روش تحقیق

برای بررسی رفتار خوردگی فولاد کربنی و الکتروود جوشکاری مورد استفاده در ساخت مخازن در هنگام قرارگیری در معرض آب دریا در حین هیدروتست، ابتدا ورق ASTM-A283 Grade C با ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی که در (جدول ۱) نشان داده شده است به وسیله الکتروود E7018 از سازنده AMA با ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی مطابق (جدول ۲) و براساس دستورالعمل جوشکاری مورد تأیید (WPS) جوشکاری شد و سپس با استفاده از روش غیرمخرب بازرسی چشمی و همچنین رادیوگرافی جهت اطمینان از عدم وجود عیب در جوش، مورد بازرسی قرار گرفت (شکل ۲). در مرحله بعد پس از ماکرواچ کردن نمونه بریده شده از عرض ورق و مشخص شدن نواحی سه گانه فلز پایه، HAZ و جوش، سختی هر سه ناحیه اندازه گیری شد (شکل ۳).

در فاز صفر مدل، بر روی سطح فولاد بایوفیلم تشکیل می شود. در فاز اول این مدل، لایه محصولات خوردگی هنوز خیلی نازک است و سرعت خوردگی به وسیله سرعتی که اکسیژن می تواند آب را ترک کرده و به سطح فلز برسد و در واقع توسط غلظت اکسیژن کنترل می شود. اکسیژن محلول بر روی فاز دوم هم تأثیرگذار است و در این فاز خوردگی بوسیله نرخ نفوذ اکسیژن از میان لایه محصولات خوردگی کنترل می شود که آن هم به طور مستقیم متناسب با غلظت اکسیژن محلول در آب است و بر اساس قانون فیک تعریف می شود [۵]. در واقع در این دو فاز، خوردگی توسط واکنش کاتدی (احیای اکسیژن) کنترل می شود که باعث شده است ترکیب شیمیایی دقیق فولاد تأثیر چندانی بر روی نرخ و میزان خوردگی نداشته باشد.

عوامل بیولوژیکی مانند فعالیت باکتری ها و سایر ارگانیسم ها به شدت تحت تأثیر شرایط محیطی هستند و به نوبه ی خود بر روی فاز اول خوردگی نیز تأثیر می گذارند. برای مثال کوریاکوا و همکارانش [۶] نشان دادند که بین نرخ خوردگی فولاد در ۶۰ روز و وزن خشک زیست توده تشکیل شده روی سطح کوپن در شرایط هوازی یک ارتباط واضح وجود دارد و از آنجا که رشد ارگانیسم ها هم تابعی از مواد مغذی موجود در آب است، در نتیجه میان میزان مواد مغذی موجود در آب دریا و نرخ خوردگی ارتباط وجود دارد [۷ و ۸]. اما مشکل شدن نفوذ اکسیژن از میان لایه های محصولات خوردگی ضخیم شده پس از مرحله ۱ و ۲، سرانجام سبب ایجاد شرایط بی هوازی در سطح خوردگی می شود و در نتیجه آن باکتری های هوازی که نمی توانند نبود اکسیژن را تحمل کنند، می میرند و در لایه محصولات خوردگی انباشته شده و منبع انرژی مناسبی را برای متابولیسم باکتری های SRB فراهم می کنند و به این شکل شرایط

جدول ۱- خواص مکانیکی و ترکیب شیمیایی فولاد ASTM A283-Grade C [۱۱]

Mechanical Properties											
Yield Stress [Mpa]				Tensile Stress [MPa]				Elongation [%]			
Plate		Plate, with W>600 mm		Plate		Plate, with W>600 mm		Plate		Plate, with W>600 mm	
Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
205	-	205	-	380	515	380	515	25.0	-	23.0	-
Chemical Composition [%]											
C		Si		Mn		P		S		Cu	
Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
-	0.2400	-	0.4000	-	0.9000	-	0.0350	-	0.0400	0.2000	-

جدول ۲- ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی الکتروود (AMA E7018(1230F) [۱۲]

ترکیب شیمیایی فلز جوش خالص (%)				
C	Mn	Si	S	P
0.07	1.2	0.55	<0.02	<0.02
خواص مکانیکی فلز جوش خالص				
استحکام کشی (N/mm ²)	استحکام تسلیم (N/mm ²)	ازدیاد طول (%)	مقاومت به ضربه (J)	
			+20 °C	-20 °C
500-640	> 420	> 22	140	90



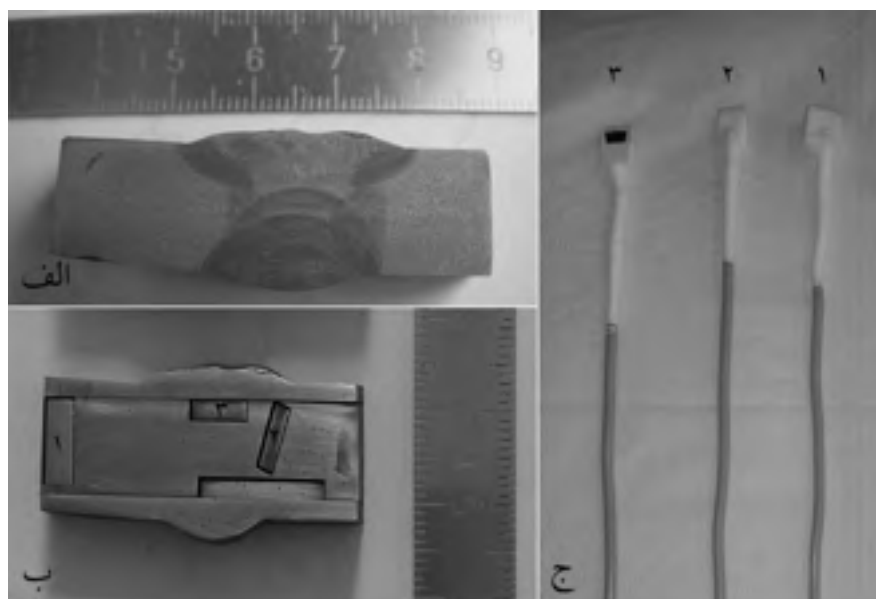
شکل ۴- تصویر فیلم رادیوگرافی اتصال جوش ورق A283-Grade C.

دستگاه پتانسیواستات مدل EG&G-Model 263A که به رایانه وصل بوده و با نرم افزار SoftCorr III 352 کنترل می‌شد، استفاده گردید. همچنین از یک الکتروود پلاتینی به عنوان الکتروود کمکی، از الکتروود استاندارد کالومل به عنوان الکتروود مرجع و از الکترودهایی از جنس فولاد و فلز جوش مورد بحث (شکل ۴) به عنوان الکتروود کاری استفاده شد.



شکل ۳- ۵۰ نقطه سختی سنجی شده بر روی قطعه جوشکاری شده A283-Grade C.

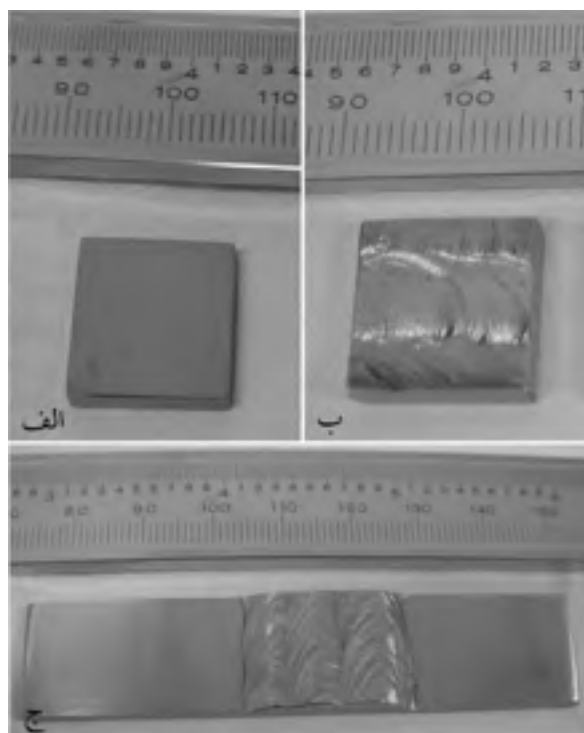
سپس نمونه‌های مناسب از هر کدام از نواحی سه گانه فلز پایه، HAZ و جوش برای استفاده در آزمون‌های الکتروشیمیایی پتانسیل مدار باز (OCP) و مقاومت پلاریزاسیون خطی (LPR) به روش Wire-Cut بریده شد و سطح آن با چهار شماره سمباده ۸۰، ۳۲۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ سمباده گردید و تمامی سطوح به غیر از سطح در تماس با الکتروولیت آن به وسیله اعمال رنگ، پوشیده شد (شکل ۳). سپس مساحت سطح مؤثر در تماس با الکتروولیت که باید به عنوان داده به نرم افزار دستگاه پتانسیواستات وارد شود محاسبه گردید و سطح آن با آب و سپس اتانول شستشو داده شده و بلافاصله خشک گردید و در سلول آزمون الکتروشیمیایی حاوی ۴۰۰ (ml) آب دریای خلیج فارس قرار داده شد. در این آزمون‌ها ابتدا اختلاف پتانسیل مدار باز بین الکتروود کاری و الکتروود مرجع استاندارد کالومل، هر ۲۰ ثانیه برای مدت حداکثر ۶۰ دقیقه یادداشت گردید و پس از ثابت شدن عدد به مدت ۵ دقیقه، آزمون پلاریزاسیون اجرا گردید و مقادیر R_p ، I_{corr} ، E_{ocp} و $C.R$ به دست آمد. برای آزمون پلاریزاسیون



شکل ۴- مراحل استخراج نمونه‌های آزمون OCP و LPR (الف) قطعه جوشکاری شده پس از ماکرواچ و مشخص شدن مرز نواحی جوش، HAZ و فلز پایه. (ب) استخراج نمونه‌ها بوسیله روش Wire-Cut. (ج) نمونه‌های آماده شده برای انجام تست شامل: ۱- فلز پایه ۲- ناحیه HAZ ۳- جوش.

شدند و قبل و پس از زدودن محصولات خوردگی وزن شدند و در نهایت هم نرخ خوردگی آنها بر اساس (فرمول ۱) محاسبه گردید.

$$C.R.(mpy) = \frac{534 \Delta W}{D.A.t} \quad (1)$$



شکل ۵- تعدادی از نمونه‌های مورد استفاده در آزمون‌های الکتروشیمیایی. (الف) فلز پایه (ب) فلز جوش (ج) نواحی سه گانه.

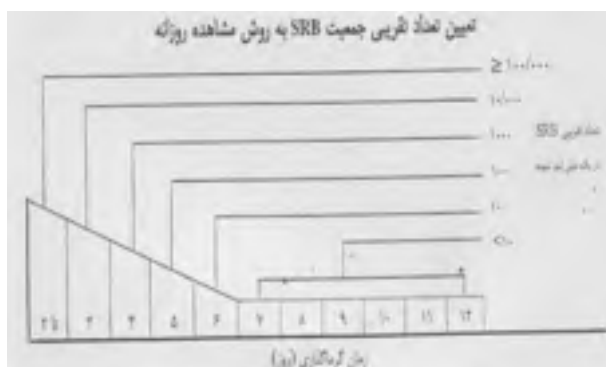
علاوه بر آزمون‌های الکتروشیمیایی، از آزمون غوطه‌وری نیز برای محاسبه نرخ خوردگی نمونه فولاد و فلز جوش استفاده شد. برای انجام آزمون غوطه‌وری، از دو جنس فولاد و الکتروود مورد بررسی در مجموع ۱۲ نمونه تهیه شد که شامل سه گروه: چهار نمونه از فلز جوش، چهار نمونه از سطح فلز پایه فولاد ASTM-A283 Gr.C و چهار نمونه هم از سطح نواحی سه گانه فلز پایه - HAZ - جوش فولاد ASTM-A283 Gr.C می‌باشد. این نمونه‌ها در شکل ۵ نشان داده شده‌اند.

پس از طراحی و برش نمونه‌ها بوسیله Wire-Cut، تمامی وجوه و سطوح ۱۲ نمونه‌ی بریده شده در چهار مرحله با سمباده‌های شماره ۸۰، ۳۲۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ سمباده زده شد و ابعاد و وزن نمونه‌ها بوسیله کولیس و ترازوی مدل LECO-250 اندازه‌گیری شد. پیش از قرار گرفتن در آب دریا با اتانول شستشو داده شد تا چربی و آلودگی‌های سطح آن زدوده شود و سپس با دمیدن هوای گرم، خشک شد. در نهایت هریک از گروه‌های سه گانه نمونه‌ها به دسته‌های دوتایی تقسیم گردید و هر دسته در داخل یک بشر جداگانه قرار داده شد. سپس بشرهایی که نمونه‌های نواحی سه گانه در آن قرار داده شده بود با ۴۰۰ میلی لیتر آب دریای پنج روز مانده و بشرهایی که نمونه‌های فلز پایه و جوش در آنها قرار داده شده بود به دلیل ابعاد کوچکتر نمونه‌ها و رعایت نسبت حجم الکتروولیت به سطح نمونه، با ۱۰۰ میلی لیتر آب دریای پنج روز مانده پر شد. پس از ۱۸ روز، ۶ نمونه شامل نمونه‌های شماره‌های ۳ و ۴ از فلز پایه و ناحیه سه گانه فولاد ASTM-A283 Grade C و فلز جوش که در آب دریا غوطه‌ور بودند، بیرون آورده

بعد و ویال دوم آن ۳ روز بعد تغییر رنگ دادند و رسوب سیاه در کف آنها مشاهده گردید (شکل ۷). نتایج به دست آمده نشان دهنده وجود باکتری های SRB در آب دریای خلیج فارس است که بر اساس (شکل ۸) و با توجه به نتایج آزمون بدست آمده تعداد این باکتری ها حداقل ۱۰۰۰۰ باکتری در هر میلی لیتر از آب است که می تواند تا بیش از ۱۰۰۰۰۰ باکتری در هر میلی لیتر آب نیز برسد.



شکل ۷- تصویر کیت های آزمون SRB پس از انجام آزمون.



شکل ۸- جدول تعیین تعداد تقریبی باکتری های SRB [۱۷].

جدول ۳- نتایج آنالیز آب دریای خلیج فارس در منطقه بندر کنگان

مقدار بدست آمده	استاندارد مرجع تست	واحد اندازه گیری	آیتم مورد بررسی
۳۱۰۶	ASTM D516-90	ppm	سولفات (SO_4)
۲۱۷۶۰	ASTM D1253	ppm	کلراید (Cl)
۴۴۵۲۰	BS 3148/5328	ppm	ذرات جامد معلق
۸/۴	ASTM D 1293	-	pH
۹۲۳۰	BS 3148/5328	($\mu S/cm$)	هدایت الکتریکی

که در آن، ΔW : کاهش وزن بر حسب $D \times mg$: چگالی بر حسب $A \times (gr/cm^3)$: سطح بر حسب $t \times in^2$: زمان بر حسب (h) است. برای تمیز کاری نمونه ها از محصولات خوردگی پس از انجام آزمون غوطه وری، روش های مختلف مکانیکی، الکترولیتی و شیمیایی وجود دارد و باید این تمیز کاری بلافاصله پس از پایان آزمون انجام شود [۱۳]. در این پژوهش نیز پس از زدودن محصولات خوردگی (شکل ۶) که چسبندگی اندکی داشتند برای زدودن باقی رسوبات چسبنده از روش شیمیایی استفاده شد. به این شرح که هریک از نمونه ها به مدت ۳ دقیقه در محلول ۵٪ اسید استیک بعلاوه ۰/۱٪ آرمو هب ۱۸ [۱۴] فروبرده شد و سپس با آب مقطر شسته و خشک گردید. در مرحله دوم نیز، ۱۶ روز بعد (در کل ۳۴ روز پس از شروع آزمون) سایر ۶ نمونه باقیمانده نیز از بشرها خارج و طبق روال شرح داده شده در بالا وزن و نرخ خوردگی آنها محاسبه گردید.



شکل ۹- محصولات خوردگی تشکیل شده بر روی یکی از نمونه های نواحی سه گانه فولاد ASTM A283-Grade C پس از ۱۸ روز.

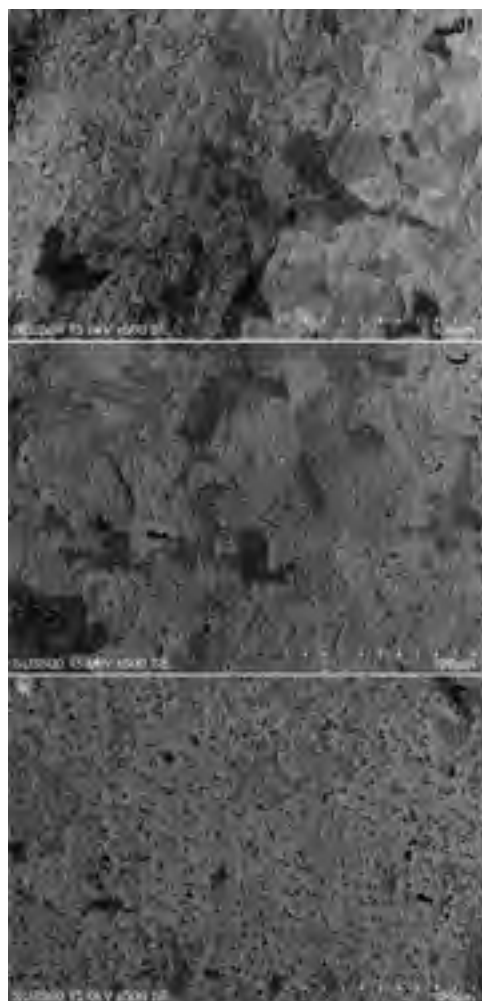
از آنجایی که هدف این پژوهش بررسی خوردگی در آب دریای خلیج فارس است، به منظور کنترل شرایط محیط خورنده، آب دریای مورد استفاده در این پژوهش که از بندر کنگان واقع در سواحل شمالی خلیج فارس نمونه برداری شده بود، تحت آزمون های SRB و آنالیز شیمیایی قرار گرفت تا ترکیبات موجود در آن و همچنین میزان pH و هدایت الکتریکی آن مشخص گردد که نتایج مربوط به آنالیز آب در (جدول ۳) آمده است. در رابطه با SRB هم به وسیله کیت های مخصوص، آب دریای خلیج فارس مورد بررسی قرار گرفت. بدین شرح که ابتدا آزمون بر روی آب دریای یک سال مانده انجام شد که نه تنها تا ۱۲ روز بعد بلکه حتی تا یک ماه بعد هم سیاه شدن در آن مشاهده نشد که تأیید کننده این حقیقت است که بالانس بین ارگانیسم های زنده موجود در آب دریا از جمله باکتری ها با مواد مغذی که از آن تغذیه می کنند پس از ایزوله کردن آب دریا در ظرف نمونه برداری به هم می خورد و هرچه زمان بیشتری می گذرد شدیدتر می شود و باکتری ها پس از ایزوله شدن آب دریا از بین می روند [۱۵ و ۱۶]. سپس آزمون بر روی آبی که بلافاصله از دریا گرفته شده بود انجام شد و مشاهده شد که ویال اول آن ۲ روز

۳- نتایج و بحث

براساس نتایج سختی سنجی بدست آمده (جدول ۴)، مشاهده می شود که سختی فلز جوش و HAZ از فلز پایه بیشتر است. این نتایج مطابق با انتظارات است چرا که در نتیجه متفاوت بودن پیک های دمایی، ترکیب شیمیایی و آخال های جوش (اکسیدها و سولفیدها)، ریزساختارهای فلز جوش و HAZ نسبت به فلز پایه معمولاً بطور قابل توجهی متفاوت و ریزدانه تر هستند. همچنین عامل دیگری که سبب تفاوت میزان سختی در این سه ناحیه می شود ایجاد فازهای سخت مانند کاربید، باینیت و مارتنزیت در نواحی فلز جوش و HAZ در استحاله حین سرد شدن است [۱۰] که در تصاویر SEM به دست آمده از ریزساختار نواحی فلز پایه، HAZ و جوش، این تفاوت در ریزساختار و فازهای تشکیل شده قابل مشاهده است (شکل ۹).

همان طور که در شکل ۹ مشاهده می شود، در قسمت (الف) که ریزساختار فلز پایه را نشان می دهد، فازهای فریت-پرلیت وجود دارد، در قسمت (ب) که ریزساختار ناحیه HAZ را نشان می دهد فاز باینیت درشت تشکیل شده است و در قسمت (ج) که نشان دهنده ریزساختار فلز جوش است نیز فاز باینیت ریزتر وجود دارد. این تفاوت در فازهای شکل گرفته به دلیل تفاوت در ترکیب شیمیایی و همچنین تفاوت در پیک های دمایی وارده به هر ناحیه و سرعت های سرد شدن مختلفی است که هریک از این سه ناحیه تجربه می کنند و در نهایت همین فازهای سخت تر باینیت و تفاوت در اندازه ساختار آن که در ناحیه HAZ و جوش تشکیل شده اند باعث سخت تر شدن این نواحی نسبت به فلز پایه می شود.

در جداول ۵، ۶ و ۷ به ترتیب نتایج آزمون پلاریزاسیون فلز جوش ASTM A283 Grade C، ناحیه HAZ و فلز پایه E7018، نشان داده شده است و در شکل ۱۰ نیز نمودار پلاریزاسیون سه نمونه با هم مقایسه شده است.



شکل ۹- تصاویر SEM با بزرگنمایی ۵۰۰X از ریزساختار نواحی الف) فلز پایه، ب) HAZ و ج) جوش در فولاد ASTM A283-Grade C.

جدول ۴- میانگین نتایج تست سختی سنجی، برحسب واحد سختی برینل

Base	HAZ	Weld
۹۵/۴۳	۹۷/۵۰	۱۱۰/۹۲

جدول ۵- نتایج آزمون OCP و LPR برای فلز جوش E7018 به فولاد A283-Grade C

شماره آزمون	محیط آزمون	pH	E_{OCP} (mV)	E_{LPR} (mV)	I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	R_p (KOhms)	C.R. (mpy)
۱	آب دریای یکسال مانده	۷/۸۰	-۶۷۵	-۶۹۳/۵	۳/۱۲۱	۶/۹۵۰	۸/۹۰۹
۲	آب دریای یکسال مانده	۷/۹۰	-۶۹۹	-۷۱۸/۸	۲/۱۳۳	۵/۲۵۳	۱۲/۲۱۰
۳	آب دریای ۵ روز مانده	۷/۸۵	-۶۹۶	-۷۱۰/۰	۲/۷۰۲	۳/۲۴۰	۱۷/۲۰۰
۴	آب دریای ۱۰ روز مانده	۶/۳۶	-۷۴۷	-۷۶۱/۶	۳/۷۰۳	۵/۸۶۳	۲/۵۰۳
میانگین در آب دریا بدون بازمانده			-۷۰۴/۳	-۷۲۱/۰	۲/۴۱۶	۵/۳۲۷	۱۰/۷۱۳

جدول ۶- نتایج آزمون OCP و LPR برای ناحیه HAZ فولاد A283-Grade C جوشکاری شده با الکتروود E7018

شماره آزمون	محیط آزمون	pH	E_{OCP} (mV)	E_{corr} (mV)	I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	R_p (KOhms)	C.R. (mpy)
۱	آب دریای یکسال مانده	۷/۸۰	-۵۲۶	-۵۰۵/۸	۰/۶۳۳	۳۱/۳۱۰	۱/۷۷۷
۲	آب دریای یکسال مانده	۷/۹۰	-۵۳۸	-۵۵۶/۵	۰/۵۵۹	۳۸/۸۵۰	۲/۸۰۶
۳	آب دریای ۵ روز مانده	۷/۸۵	-۶۷۲	-۶۸۰/۷	۲/۹۹۱	۷/۲۶۰	۱۳/۲۸۰
۴	آب دریای ۱۰ روز مانده	۶/۳۶	-۶۹۸	-۷۰۴/۰	۱/۲۱۵	۱۷/۴۵۰	۷/۸۷۶
میانگین در آب دریا بدون بازدارنده			-۶۰۸/۵	-۶۱۱/۸	۱/۳۵۷	۲۱/۴۶۸	۷/۱۸۵

جدول ۷- نتایج آزمون OCP و LPR برای فلز پایه فولاد A283-Grade C

شماره آزمون	محیط آزمون	pH	E_{OCP} (mV)	E_{corr} (mV)	I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	R_p (KOhms)	C.R. (mpy)
۱	آب دریای یکسال مانده	۷/۸۰	-۵۲۹	-۵۳۰/۱	۱/۰۳۸	۲۰/۹۲۰	۲/۷۱۳
۲	آب دریای یکسال مانده	۷/۹۰	-۷۱۵	-۷۳۳/۹	۳/۱۷۸	۶/۸۳۲	۷/۰۵۹
۳	آب دریای ۵ روز مانده	۷/۸۵	-۶۷۵	-۶۹۱/۶	۱۱/۱۱۰	۱/۹۵۵	۲۱/۳۸۰
۴	آب دریای ۱۰ روز مانده	۶/۳۶	-۶۹۵	-۷۱۰/۱	۳/۰۶۲	۷/۰۹۱	۵/۶۵۸
میانگین در آب دریا بدون بازدارنده			-۶۵۳/۵	-۶۹۱/۵	۱/۵۹۷	۹/۲۰۰	۹/۲۱۰

که به دلیل اختلاف زیاد در نسبت سطح کاتد به آنود سبب می شود تا یک کاتد بزرگ (ورق فولادی) داشته باشیم که الکترون زیادی را از آنود کوچک (خط جوش) می گیرد و سبب خوردگی موضعی در آن می شود. در همین راستا مقادیر بدست آمده برای نرخ خوردگی نمونه های فولاد A283 Grade C نیز نتیجه بالا را تأیید می کنند بطوریکه همان گونه که در زیر آمده است، الگوی متناسب با الگوی بدست آمده برای پتانسیل خوردگی ارائه می دهد.

$$C.R.(weld) > C.R.(base) > C.R.(HAZ) \\ 10/3 \text{ (mpy)} > 7/185 \text{ (mpy)} > 9/210 \text{ (mpy)}$$

همان طور که در این الگوی بدست آمده مشاهده می شود، خوردگی در فلز جوش که پتانسیل منفی تر (آندی تری) دارد شدیدتر از فلز پایه و در آن هم شدیدتر از ناحیه HAZ است.

آنچه از مقایسه جداول ۵، ۶ و ۷ برای نمونه های فولاد ASTM-A283 Grade C و الکتروود E7018 حاصل می شود این است که با مقایسه E_{corr} برای فلز جوش، فلز پایه و فلز ناحیه HAZ، الگوی زیر بدست می آید:

$$E_{corr}(weld) > E_{corr}(base) > E_{corr}(HAZ) \\ -721/0 \text{ (mV)} > -691/5 \text{ (mV)} > -611/8 \text{ (mV)}$$

یعنی فلز جوش فعال ترین (منفی ترین) پتانسیل را دارد و آندتر است و بعد از آن به ترتیب فلز پایه و ناحیه HAZ قرار دارند که پتانسیل نجیب تر (مثبت تر) دارند و کاتدتر هستند. از همین رو در پیل گالوانی تشکیل شده بین فلز جوش و فلز پایه، فلز جوش آنود خواهد بود و فلز پایه کاتد است. این مورد یک خطا در طراحی است چرا

تأثیر آن اندک باشد [۱۰].

نتایج اندازه گیری های پیش و پس از انجام آزمون غوطه وری نیز در جداول ۸ و ۹ نشان داده شده است.

نتایج آزمون غوطه وری، نتایج بدست آمده توسط آزمون پلاریزاسیون را تأیید می کند و ثابت می کند که الکتروود E7018 نسبت به فولاد ASTM-A283 Grade C آند است، چرا که نرخ خوردگی نمونه های فلز جوش از نرخ خوردگی نمونه های فلز پایه بیشتر است.

نرخ خوردگی به دست آمده از آزمون پلاریزاسیون است. دلیل این امر آن است که در آزمون پلاریزاسیون به دلیل مدت زمان بسیار کوتاه آزمون، لایه محصولات خوردگی که مانند یک مانع در برابر حمله محلول خورنده به سطح فلز عمل می کند، فرصت شکل گرفتن پیدا نکرده است و لذا نرخ خوردگی چند برابر بیشتر از آنچه در آزمون غوطه وری بدست می آید، نشان داده می شود.

نتایج آزمون غوطه وری نشان می دهد که سرعت خوردگی در ۱۸ روز ابتدایی بیش از سرعت خوردگی طی ۳۴ روز است. دلیل این امر آن است که هرچه بیشتر از زمان غوطه وری می گذرد لایه محصولات خوردگی تشکیل شده بر روی سطح کامل تر شده و چسبندگی بیشتری به سطح پیدا می کند و بعنوان یک مانع بین سطح فلز و محلول خورنده عمل می کند و نرخ خوردگی را کاهش می دهد.

نرخ های خوردگی بدست آمده از آزمون غوطه وری همگی کمتر از ۳ (mpy) می باشد که براساس محدوده هایی که در کتاب فونتانا ذکر شده است [۱۸] و در (جدول ۱۰) قابل مشاهده است در محدوده عالی قرار می گیرند. لذا به نظر می رسد استفاده از آب دریا، حتی

چنین خطایی در طراحی ناشی از عدم دقت در انتخاب الکتروودها و پرکننده های جوشکاری و همچنین فرایندهای جوشکاری است که سبب ایجاد تفاوت در ریزساختار و ترکیب شیمیایی فلز پایه و فلز جوش و در نتیجه ایجاد پیل گالوانی می شود. البته در چنین شرایطی هم باید انتخاب الکتروود و فرایند جوشکاری بگونه ای صورت پذیرد که جوش کاتد و فلز پایه آند باشد تا با توجه به نسبت سطح آند به کاتد از متمرکز شدن خوردگی در جوش جلوگیری شود که در رابطه با این نمونه مورد بررسی، این مهم در نظر گرفته نشده است.

واضح است که یک وابستگی به ریزساختار وجود دارد و مطالعات روی HAZها نشان می دهد که وقتی ترکیب شیمیایی ماده و پارامترهای جوشکاری بصورتی است که ساختارهای سخت شده تشکیل می شوند، خوردگی بطور قابل توجهی شدیدتر است. ریزکاتدهای روی سطح سخت شده (محصولات حاصل از استحاله هنگام سرد شدن مانند: ریزساختار فریت-کاربید، مارتنزیت، بینیت پایینی و یا آستنیت باقی مانده) واکنش تکاملی هیدروژن کاتدی را شبیه سازی می کنند و در غیاب سایر عوامل محدود کننده، نرخ خوردگی معمولاً توسط نرخ همین فرایند کاتدی (احیا شدن) کنترل می شود. اما باید به این نکته نیز توجه کرد که حتی تا pHهای تا حدود ۸ هم احیای یون هیدروژن (H^+) می تواند عاملی برای تقریباً ۲۰٪ از جریان کلی خوردگی باشد. بنابراین حتی در شرایط آب دریا با pH زیر ۸ هم سختی بر روی خوردگی ترجیحی ناحیه HAZ می تواند تأثیر بگذارد، هرچند که

جدول ۸- مشخصات وزن، ابعاد و نرخ خوردگی نمونه های فلز پایه ASTM A283-Grade C در آزمون غوطه وری

ردیف	مساحت مؤثر (in ²)	ابعاد اولیه (mm)	نرخ خوردگی (mpy)		وزن (gr)		
			پس از ۳۴ روز	پس از ۱۸ روز	پس از ۳۴ روز بدون رسوب	پس از ۱۸ روز بدون رسوب	قبل از آزمون
۱	۰/۹۷۲۸	۱۵/۱×۱۵×۲/۹	۱/۵۱۹	—	۴/۷۸۶۲	—	۱/۸۰۳۹
۲	۰/۹۷۲۸	۱۵/۱×۱۵×۲/۹	۱/۴۳۳	—	۱/۸۱۸۶	—	۱/۸۳۵۳
۳	۰/۹۷۲۸	۱۵/۱×۱۵×۲/۹	—	۲/۰۶۵	—	۱/۸۳۴۳	۱/۸۴۷۰
۴	۰/۹۸۲۱	۱۵/۱×۱۵×۳	—	۲/۰۳۰	—	۱/۸۷۲۹	۱/۸۸۵۵
میانگین نرخ خوردگی پس از ۱۸ روز			—	۲/۰۴۸			
میانگین نرخ خوردگی پس از ۳۴ روز			۱/۴۷۶	—			

خوردگی در طی کیفیت سنجی آن (PQR) باشد. نتایج بدست آمده از آزمون‌های پلاریزاسیون و غوطه وری، توسط تصاویر میکروسکوپ SEM که در (شکل ۱۱) قابل مشاهده است، تأیید می‌شود چرا که تعداد حفرات و شدت خوردگی بیشتری در ناحیه جوش نسبت به فلز پایه مجاور دیده می‌شود. آنالیز عنصری رسوبات باقیمانده بر روی سطح نمونه‌ها و همین‌طور رسوب داخل حفرات به روش EDS نیز نتایج قابل توجهی ارائه داد. در اشکال ۱۲ و ۱۳ به ترتیب تصویر SEM و نمودار آنالیز عنصری رسوبات باقیمانده بر روی سطح نمونه‌ها قابل مشاهده است.

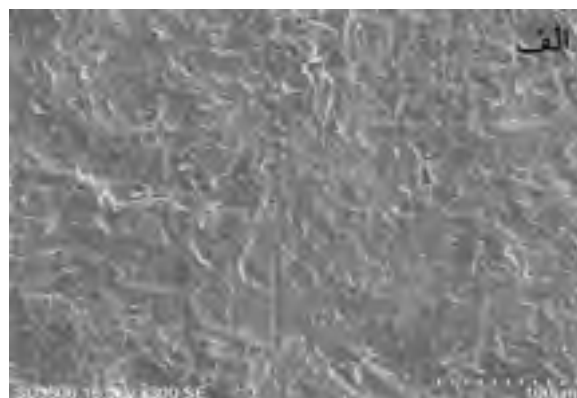
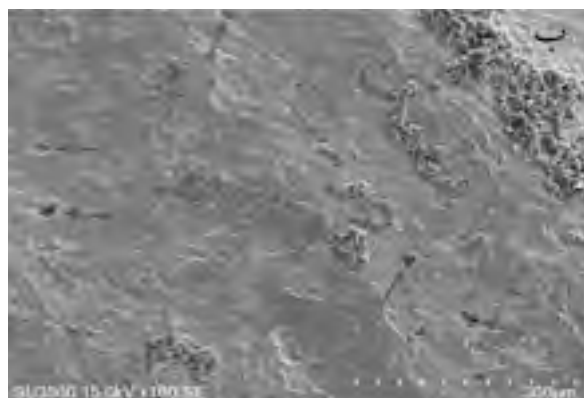
بدون اضافه نمودن بازدارنده، برای هیدروتست مخازن اتمسفری فلزی ساخته شده از جنس فولاد و الکتروود به کار برده شده در این پژوهش مشکل خوردگی قابل ملاحظه‌ای ایجاد نکرد. البته بدون شک استفاده از الکتروود E7018 برای جوشکاری فولادهای ASTM-A283 Grade C به دلیل آند شدن جوش به هیچ وجه از نقطه نظر مهندسی خوردگی صحیح نمی‌باشد و باید اصلاح گردد. شاید یکی از دلایل بوجود آمدن این خطا در طراحی، عدم در نظر گرفتن حساسیت‌های مهندسی خوردگی در هنگام طراحی دستورالعمل جوشکاری (WPS) و عدم وجود آزمون‌های

جدول ۹- مشخصات وزن، ابعاد و نرخ خوردگی نمونه‌های فلز جوش AMA-E7018 در آزمون غوطه‌وری

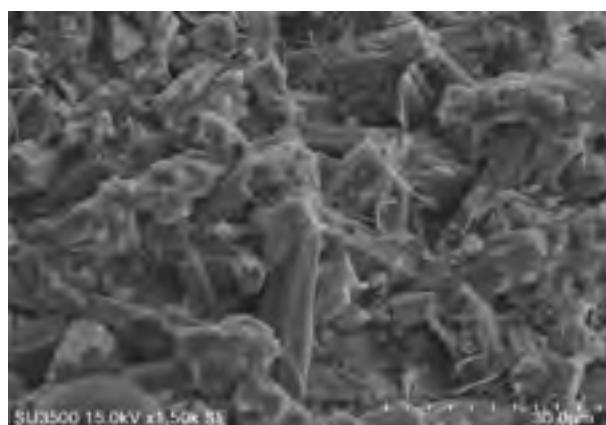
ردیف نمونه	وزن (gr)			نرخ خوردگی (mpy)		ابعاد اولیه (mm)	مساحت مؤثر (in ²)
	قبل از آزمون	پس از ۱۸ روز بدون رسوب	پس از ۳۱ روز بدون رسوب	پس از ۱۸ روز	پس از ۳۱ روز		
۱	۷/۱۵۰۲	—	۷/۱۲۱۸	—	۲/۱۴۴	۱۵/۱×۱۵×۱/۱	۱/۱۰۸۱
۲	۶/۹۳۲۳	—	۶/۹۰۴۸	—	۲/۱۰۳	۱۵/۱×۱۵×۱/۲	۱/۰۹۱۱
۳	۷/۴۰۱۳	۷/۳۸۱۴	—	۲/۸۱۹	—	۱۵/۱×۱۵×۱/۵	۱/۱۲۲۰
۴	۷/۱۹۳۷	۷/۱۷۴۸	—	۲/۷۲۲	—	۱۵/۱×۱۵×۱/۳	۱/۱۰۳۱
میانگین نرخ خوردگی پس از ۱۸ روز				۲/۷۷۱	—		
میانگین نرخ خوردگی پس از ۳۱ روز				—	۲/۱۲۴		

جدول ۱۰- محدوده مقاومت به خوردگی نسبی با توجه به میزان نرخ خوردگی [۱۸]

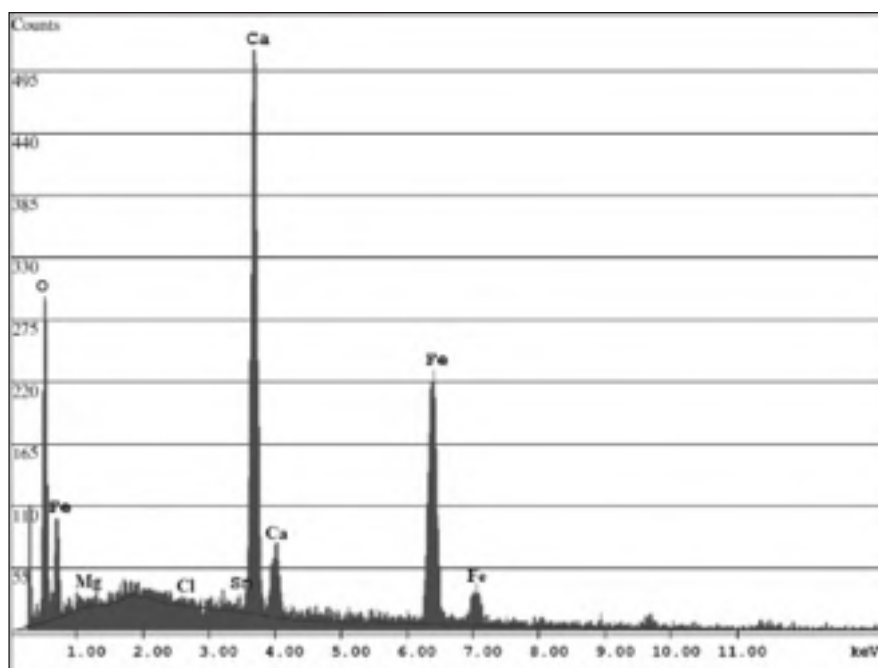
مقاومت به خوردگی نسبی	mpy	برحسب واحدهای متریک			
		$\frac{\text{mm}}{\text{yr}}$	$\frac{\mu\text{m}}{\text{yr}}$	$\frac{\text{nm}}{\text{hr}}$	$\frac{\text{pm}}{\text{sec}}$
بسیار عالی	<۱	<۰/۰۲	<۲۵	<۲	<۱
عالی	۱-۵	۰/۰۲-۰/۱	۲۵-۱۰۰	۲-۱۰	۱-۵
خوب	۵-۲۰	۰/۱-۰/۵	۱۰۰-۵۰۰	۱۰-۵۰	۵-۲۰
متوسط	۲۰-۵۰	۰/۵-۱	۵۰۰-۱۰۰۰	۵۰-۱۵۰	۲۰-۵۰
ضعیف	۵۰-۲۰۰	۱-۵	۱۰۰۰-۵۰۰۰	۱۵۰-۵۰۰	۵۰-۲۰۰
غیرقابل قبول	>۲۰۰	>۵	>۵۰۰۰	>۵۰۰	>۲۰۰



شکل ۱۱- تصویر SEM از فلز پایه و ناحیه جوش مجاور هم در نمونه فولاد A283-Grade C شامل نواحی سه گانه که ۳۴ روز در آب دریای خلیج فارس قرار داشته است. الف) فلز پایه که در بزرگنمایی ۳۰۰X حفره ای در آن دیده نمی شود. ب) ناحیه جوش که در بزرگنمایی ۱۶۰X تعداد زیادی حفره که با فلش مشخص شده است در آن دیده می شود.



شکل ۱۲- تصویر SEM رسوبات تشکیل شده بر روی سطح نمونه ها با بزرگنمایی ۱۵۰۰X.

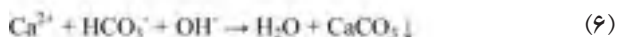
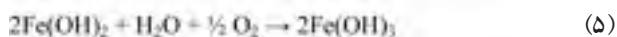
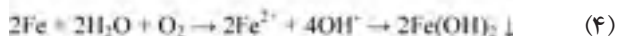


شکل ۱۳- نمودار نتیجه آنالیز عنصری به روش EDS رسوبات تشکیل شده بر روی سطح نمونه ها.

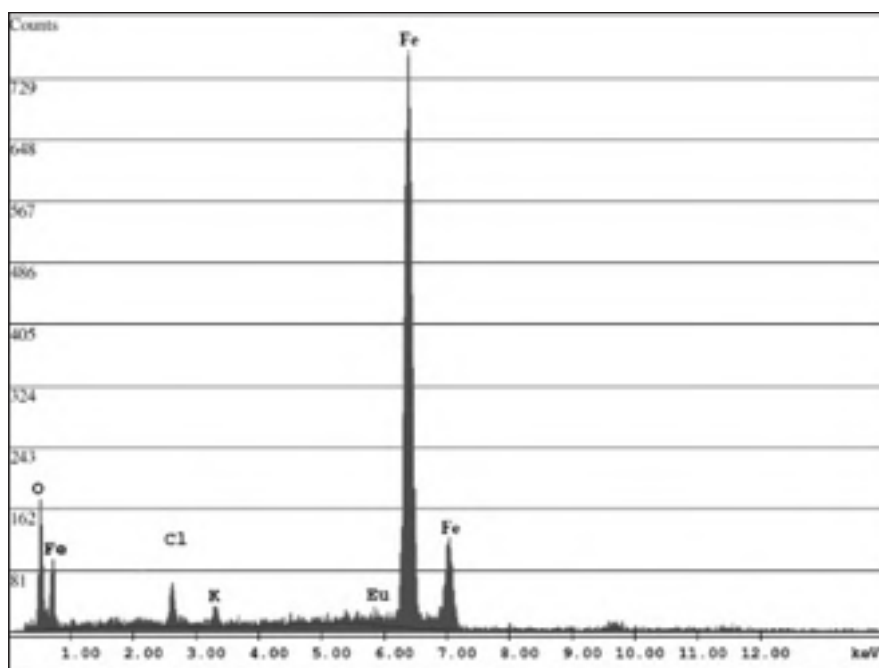
ایجاد حفره در لایه زیر آیند که همان سطح فلز است، می‌باشند و لذا در این حفرات تنها اکسی هیدروکسیدهای آهن که اولین لایه محصولات خوردگی را تشکیل می‌دهند و همچنین کلراید وجود دارد. نکته مهم دیگر این است که نه در نتیجه آنالیز EDS محصولات خوردگی روی سطح نمونه‌ها در شکل ۱۳ و نه در نتیجه آنالیز EDS محصولات خوردگی داخل حفرات در شکل ۱۴، اثری از عنصر سولفور (S) نیست و این نشان دهنده این موضوع است که خوردگی بی‌هوازی که سبب تولید سولفید آهن (FeS) بشود، رخ نداده است یا درواقع به دلیل ناکافی بودن مدت زمان تست فرصت اثرگذاری نداشته است.

نتایج به دست آمده از آزمون‌های مختلفی که در این پژوهش انجام شده است همگی دلالت بر آند بودن الکتروود E7018 نسبت به فولاد ASTM-A283 Grade C می‌کند که یک خطا در طراحی است و سبب متمرکز شدن خوردگی در جوش می‌شود. این مسئله در بازدهایی که از شرایط واقعی وضعیت یک مخزن اتمسفری ذخیره میعانات گازی، پس از اینکه در حدود چهار ماه تحت هیدروتست قرار داشت نیز مشاهده شد. چنانکه از شکل ۱۵ نیز قابل مشاهده است نواحی از سطح ورق‌های فولادی که به دلیل بریدن اتصالات موقت با جوشکاری پر شده بود (قسمت الف) دچار خوردگی شدیدی نسبت به فلز پایه اطراف شده است و یا حتی در خط جوش‌ها (قسمت ب)، حفره‌دار شدن نیز مشاهده می‌شود.

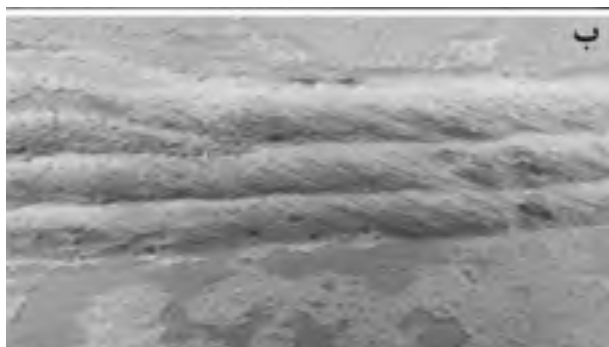
همان‌طور که از نتیجه آنالیز عنصری قابل مشاهده است، در رسوبات تشکیل شده بر روی سطح نمونه‌ها عناصری همچون Fe, Mg, Ca و O موجود است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این رسوبات شامل ترکیباتی از جمله CaCO_3 ، Fe(OH)_3 و Mg(OH)_2 می‌باشد که در طی واکنش‌های زیر تشکیل می‌شوند:



همچنین در شکل ۱۴ آنالیز عنصری رسوبات موجود در حفرات قابل مشاهده است. آنچه از آنالیز عنصری رسوبات داخل حفرات مشخص می‌شود این است که در این رسوبات، دیگر اثری از عناصر Ca و Mg دیده نمی‌شود. این مورد نشان دهنده این است که این حفرات ناشی از نفوذ یون‌های مهاجم کلراید (Cl^-) در داخل لایه محصولات خوردگی متخلخل و شل و تخریب آن و



شکل ۱۴- نمودار نتیجه آنالیز عنصری به روش EDS رسوبات تشکیل شده در داخل حفره‌ها.



شکل ۱۵ - خوردگی در ناحیه جوش بدنه مخزن اتمسفری ذخیره میعانات گازی فاز ۱۴ پارس جنوبی. الف) خوردگی جوش ترمیمی بدنه ب) حفره دار شدن در خط جوش.

نتیجه گیری

- الکتروود E7018 نسبت به فولاد ASTM-A283 Grade C آند است که این یک خطا در طراحی می باشد و بکارگیری آن برای جوشکاری این فولادها به دلیل نسبت کم سطح آند (جوش) به کاتد (فلز پایه) که به وجود می آید می تواند در محیط های خورنده سبب تمرکز خوردگی در ناحیه جوش شود.
- تمامی نرخ های خوردگی به دست آمده از آزمون غوطه وری انجام شده در این پژوهش کمتر از ۳ (mpy) برابر با ۰/۰۷۵ (mm/year) می باشد. این میزان نرخ خوردگی نشان دهنده مقاومت به خوردگی مناسبی برای فولادها و الکتروود مورد بحث در این پژوهش، در آب دریای خلیج فارس است. لذا استفاده از این آب برای عملیات هیدروتست مخازن ساخته شده با این فولادها و الکتروود به شرط محدود بودن زمان انجام تست بلامانع است. این مورد سبب صرفه جویی های اقتصادی قابل توجه و همین طور کمک به حفظ محیط زیست می گردد چرا که دیگر نیاز به استفاده از آب تصفیه شده و قابل شرب برای انجام هیدروتست نخواهد بود و بازگرداندن آب دریا که در هیدروتست استفاده شده است به منبع اولیه خود تولید آلودگی خطرناک نخواهد کرد.
- رسوبات تشکیل شده بر روی سطح نمونه ها پس از ۳۴ روز غوطه وری در آب دریای خلیج فارس، حاوی عناصر کلسیم، منیزیم، آهن و کلراید است و اثری از سولفور دیده نشد.
- در شرایط مورد بررسی این پژوهش، خوردگی بی هوازی رخ نداده است چرا که اثری از سولفید آهن در محصولات خوردگی دیده نشد که می تواند به دلیل مدت زمان ناکافی آزمون برای وقوع خوردگی بی هوازی باشد.
- نرخ خوردگی به دست آمده از آزمون غوطه وری کمتر از نرخ خوردگی بدست آمده از آزمون پلاریزاسیون است که دلیل آن عدم تشکیل لایه محافظ محصولات خوردگی بر روی سطح نمونه ها به دلیل زمان کوتاه آزمون پلاریزاسیون است.
- آسیب پذیرتر بودن فاز باینیت نسبت به فازهای فریت و پرلیت در برابر خوردگی، مشاهده گردید. همین موضوع خوردگی بیشتر نواحی جوش و HAZ نسبت به فلز پایه به دلیل چگالی بیشتر فاز باینیت در آنها را توجیه می کند.

مراجع

- [1] API-650 Standard, Edition 2010.
- [2] Robert E. Melchers, Tony Wells, "Models for the Anaerobic Phases of Marine Immersion Corrosion", Corrosion Science, Vol. 48, 2006, Pp. 1791-1811.
- [3] R.E. Melchers, "The Effects of Water Pollution on The Immersion Corrosion of Mild and Low Alloy Steels", Corrosion Science, Vol. 49, 2007, Pp. 3149-3167.
- [4] R. Jeffrey, R.E. Melchers, "The Critical Involvement of Anaerobic Bacterial Activity in Modeling the Corrosion Behavior of Mild Steel in Marine Environments", Electrochimica Acta, Vol. 54, 2008, Pp. 80-85.

- [5] R.E. Melchers, "Effect of Immersion Depth on Marine Corrosion of Mild Steel", Corrosion (NACE), Vol. 61, 2005, Pp. 895-906.
- [6] M.D. Koryakova, E.G. Chebotkevich, Y.M. Kaplin, "Effect of Biological Factor on The Corrosion of Metals in Seawater", Protection of Metals, Vol. 26, 1988, Pp 652-656.
- [7] A.F. Carlucci, "Nutrient and Microbial Response to Nutrients in Seawater", Effect of Ocean Environments on Microbial Activities, Uni. Park Press, Baltimore, 1974.
- [8] A.K. Tiller, "Aspects of Microbial Corrosion", Corrosion Processes, Applied Science publishers, London, 1982, P. 144.
- [9] ساعتچی احمد، گلزار محمدعلی، ریاحی احمدرضا، "بررسی خوردگی چند آلیاژ مهم صنعتی در آبهای خلیج فارس، دریاچه های خزر و ارومیه"، اولین سمپوزیوم سراسری خوردگی در صنایع ایران، ۱۳۷۱.
- [10] Joseph R. Davis, "Corrosion of Weldments", ASM International, 2006. (ترجمه دهکردی و همکاران)
- [11] ASTM A283-Gr.C Standard— Low and Intermediate Tensile Strength Carbon Steel Plate.
- [12] AMA Electrodes Handbook.
- [13] ASTM G1- Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens.
- [14] رحمانی، خسرو و همکاران، "بررسی جایگزینی ترکیب شیمیایی جدید در سیکل آب گردشی به منظور کنترل خوردگی و رسوبگذاری و کاهش مصرف آب گردشی با تأکید بر جنبه های زیست محیطی و اقتصادی"، گزارش تحقیقاتی برق منطقه ای خوزستان، اردیبهشت ۱۳۹۳.
- [15] H. Möller, E.T. Boshoff, H. Froneman, "The Corrosion Behavior of a Low Carbon Steel in Natural and Synthetic Seawaters", the Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 106, August 2006.
- [16] S.C. Dexter, "Seawater", ASM Metal Handbook, Vol. 13, 9th Edition, 1987.
- [17] روش اجرایی آزمون سنجش SRB در آب - پژوهشگاه صنعت نفت.

