



ارزیابی خواص خوردگی پوشش‌های اعمالی بر تجهیزات فرایندی مورد استفاده در کارخانه تولید کیک زرد

ندا رویایی^۱، مصطفی آقازاده^۲، مریم توسلی^۲، محمد افخمی اردکانی^۳، حمزه فراتی‌راد^{۲*}

۱. مرکز مهندسی مواد، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۳۶-۱۴۳۹۵، تهران-ایران
۲. پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۳۶-۱۴۳۹۵، تهران-ایران
۳. شرکت امکا، مجتمع شهید رضایی‌نژاد اردکان، صندوق پستی: ۸۹۵۱۵۱۴۴، اردکان-ایران

*Email: hforatirad@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱/۲۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۵/۳

چکیده

فولادهای زنگ نزن آستنیتی مقاومت نسبتاً خوبی در محیط‌های اسیدی دارند. اما با توجه به غلظت میانی اسیدسولفوریک مورد استفاده در خطوط فرایندی و دمای نسبتاً بالای سیال فرایندی اسیدسولفوریک (۱۸۸wt% / (60°C)، خوردگی‌های عمومی و موضعی حفره‌ای در سیستم وجود دارد و به‌مرور زمان با گسترش حفره‌ها می‌تواند منجر به کاهش استحکام مکانیکی و تخریب ناگهانی مخزن گردد. با توجه به هزینه‌های بالای تأمین مواد و ساخت مخازن جدید ضروری است راه‌کارهای مناسب به‌منظور کاهش نرخ خوردگی و کنترل کاهش ضخامت مخازن اتخاذ شود که با توجه به وضعیت جاری تجهیزات بهترین رویکرد انتخاب سیستم‌های پوششی مناسب است. برای این منظور نمونه‌های فولاد زنگ نزن تحت اعمال پوشش‌های پلیمری تقویت‌شده سرامیک- پلیمر، پوشش آستری گرافیتی، پوشش آستری شیشه، اتیلن کلروتری فلوروواتیلن و وینیل استر تقویت شده با الیاف قرار گرفتند. آزمون‌های ارزیابی عدم تخلخل (هالیدی)، سختی‌سنجی، استحکام چسبندگی، پاشش مه نمکی و طیف‌سنجی امیدانس الکتروشیمیایی به‌منظور ارزیابی و مشخصه‌یابی پوشش‌های اعمال‌شده استفاده شد و در این میان نمونه‌های پوشش داده شده توسط پوشش آستری شیشه مطابق نتایج آزمون‌های غوطه‌وری و مه نمکی، دارای مقاومت به خوردگی عالی در تمامی غلظت‌های اسیدسولفوریک و هم‌چنین محیط‌های حاوی یون کلر بوده و چسبندگی بسیار مناسبی به زیرلایه داشته است.

کلیدواژه‌ها: فولاد زنگ نزن، اسیدسولفوریک، پوشش، خوردگی، طیف‌سنجی امیدانس الکتروشیمیایی

Evaluation of corrosion resistance of coatings applied to Process equipment used in yellowcake production plant

N. Royaei¹, M. Aghazade², M. Tavassoli², M. Afkhami Ardakani³, H. Forati Rad^{2*}

1. Leading Materials Organization, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14395-836, Tehran-Iran
2. Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14395-836, Tehran-Iran
3. Emka Company, Shahid Rezaejad's Complex of Ardakan, P.O.Box: 89515144, Ardakan – Iran

Research Article

Received 17.4.2022, Accepted 25.7.2022

Abstract

Austenitic stainless steels can withstand acidic environments relatively well. The sulfuric acid used in the process lines and the relatively high temperatures of the liquid (60oC) can cause general corrosion and pitting of the tank, which may eventually cause sudden failure. In order to reduce corrosion rates and prevent tank thickness from decreasing, it is imperative that appropriate coating systems be employed, since materials and the construction of new tanks are extremely expensive. In this study, stainless steel samples were coated with ceramic polymer-reinforced polymer coatings, graphite primers, glass liners, fluoroethylene chlorinated ethylene chloride, and fiber-reinforced vinyl esters. In order to evaluate and analyze the applied coatings, test methods such as holiday detection, hardness, adhesion strength, salt spraying, and electrochemical impedance spectroscopy were used. As a result of excellent adhesion to substrates regardless of sulfuric acid or chlorine exposure, glass linings are not just anticorrosive but also highly durable.

Keywords: Stainless steel, Sulfuric acid, Coating, Corrosion, Electrochemical impedance spectroscopy



۱. مقدمه

فرایند فروشویی اورانیم به‌وسیله شستشو به‌منظور استخراج اورانیم از سنگ معدن، اولین مرحله از فرایندهای شیمیایی است که با محلول اسیدسولفوریک انجام می‌شود. یکی از چالش‌های استفاده از محلول‌های اسیدی نرخ خوردگی بالای این محلول‌ها است. این رفتار خوردگی شیمیایی محلول‌های اسیدی زمانی که ذرات ساینده (مانند کانسارهای اورانیم) نیز در سیال وجود داشته باشند، تسریع شده و منجر به فرایند مخرب خوردگی فرسایشی^۱ می‌شود [۱، ۲]. نرخ فرسایش در جریان سیال به فاکتورهای متعددی مانند میدان جریان، ویسکوزیته سیال، اندازه و توزیع ذرات دانه (میانگین اندازه ذرات ساینده درون سیال) بستگی دارد [۳، ۴]. به دلیل شیوع خوردگی سایشی در بسیاری از صنایع، در این تأسیسات جهت ساخت مخازن، پمپ‌ها و خطوط لوله فرایندی از آلیاژهای مقاوم در برابر خوردگی نظیر فولادهای زنگ نزن سری ۳۰۰ (فولادهای زنگ نزن ۳۱۶ و ۳۲۱) استفاده می‌شود. مطالعات اخیر برهم‌کنش قابل توجهی از فرسایش مکانیکی ناشی از حضور ذرات جامد و خوردگی الکتروشیمیایی ناشی از حضور محلول‌های خوردنده را گزارش کرده‌اند. شدت این نوع خوردگی به‌شدت وابسته به نوع ماده جامد و محلول خوردنده است. لوتو^۲ و همکاران ویژگی‌های خوردگی الکتروشیمیایی تعدادی از فولادهای زنگ نزن سری ۳۰۰ را مورد بررسی قرار دادند و غلظت یون کلرید را به‌عنوان یک عامل بسیار تأثیرگذار شناسایی کردند [۵]. لی و همکاران نیز گزارش کرده‌اند که تراکم و مقاومت فیلم روئین تشکیل شده در روی سطح فولاد زنگ نزن ۳۱۶ با کاهش مقدار اکسیژن افزایش می‌یابد [۶].

از آنجایی‌که این نوع آلیاژها در شرایط مختلفی یک لایه‌ی پسیو و روئین^۳ عمدتاً اکسیدی و سرامیکی بر روی سطوحشان تشکیل می‌شود، ممکن است تغییر در نرخ خوردگی از یک حالت (خوردگی یکنواخت) به حالت دیگر (خوردگی موضعی و حفره‌ای) بسیار چشمگیر باشد [۷]. بنابراین نیاز است تا از پوشش‌های مقاوم در برابر خوردگی برای حفاظت از این آلیاژ استفاده شود. پوشش‌های مختلفی برای حفاظت در برابر حملات الکتروشیمیایی برای فولادهای زنگ نزن سری ۳۰۰ مورد استفاده قرار می‌گیرند که هرکدام از آن‌ها دارای مزایا و معایبی هستند [۳، ۸، ۹]. پوشش‌های کامپوزیتی سرامیکی- پلیمر گزینده‌های امیدوارکننده‌ای برای استفاده به‌عنوان پوشش‌های

سدکننده برای محافظت در برابر خوردگی و اکسیداسیون فلزات هستند. یک رویکرد جدید مبتنی بر توسعه سیستم‌های پوشش پلیمری مقاوم در برابر خوردگی و حملات از طریق کامپوزیت‌سازی و تقویت آنان با تقویت‌کننده‌های مناسب سرامیکی است، که می‌تواند به‌عنوان یک مانع نفوذ در برابر یون‌های خوردنده عمل کند. اختلاط ذرات سرامیکی و زمینه‌ی پلیمری روش نسبتاً کم‌هزینه و آسان برای تولید پوشش‌های پلیمری و سرامیکی را تسهیل می‌کند که به‌نوبه خود محافظت عالی در برابر اکسیداسیون و خوردگی زیرلایه‌های فلزی زنگ نزن را فراهم می‌کند. بزرگ‌ترین نقطه‌ضعف عملکرد این پوشش‌ها انقباض پلیمر در طی پخت است که می‌تواند بیش از ۵۰ درصد حجمی باشد [۸]. این پوشش‌های سرامیک- پلیمر قابلیت مقاومت در برابر خوردگی بالایی دارند که به همین علت از این پوشش‌ها در قسمت داخلی لوله‌های حاوی ذرات خوردنده- ساینده، خطوط لوله انتقال سیال‌های اسیدی، جداره داخلی مخازن تحت فشار، پوشش بیرونی قاب‌های تندرو و جداره خارجی تانکرهای ذخیره‌کننده مواد سوختی استفاده می‌شود. این پوشش‌ها به علت درصد جامد بالا و سنگینی بیش‌تر نسبت به دیگر پوشش‌های اعمال‌شده در سطح هزینه اقتصادی نسبتاً کم‌تری (۱۴ دلار به ازای یک مترمربع) دارند [۴]. پوشش‌های آستری تقویت‌شده با گرافیت میزان مقاومت بالایی در برابر خوردگی دارند و در برابر حملات یون‌های خوردنده و به‌خصوص نفوذ هیدروژن در ساختار پوشش بسیار مقاوم هستند اما این پوشش‌ها به علت رسانایی نسبی که دارند می‌توانند مسیر حرکت الکترون‌ها تسهیل کنند و خوردگی در زیرلایه فولاد زنگ نزن رخ دهد. همچنین این پوشش با توجه به هزینه بالای تهیه گرافیت، هزینه‌ی عملکردی بالایی دارند و برای هر مترمربع اعمال این پوشش‌ها روی سطح زیرلایه بایستی هزینه‌ی ۵۰ دلاری را در نظر گرفت که در مقایسه با دیگر پوشش‌ها هزینه بسیار بالایی است [۱۰، ۱۱]. از این دست پوشش‌ها در مناطقی که مقاومت در برابر خوردگی نسبتاً خوب و ضریب اصطکاک پایین و خاصیت خود روان‌کنندگی بالایی نیاز داریم مانند خطوط لوله، پوشش‌های ساینده درون محل اتصال یاتاقان به شفت و جداره زیرین پوشش‌های سه لایه اپوکسی ذوبی^۴ می‌توان استفاده نمود [۵، ۹]. پوشش‌های وینیل استر تقویت‌شده با الیاف حداکثر مقاومت شیمیایی و حلال را دارند. این پوشش‌ها در برابر طیف وسیعی از مواد شیمیایی از جمله اسیدها و قلیاها مقاوم هستند. بنابراین، آن‌ها برای کاربردهای

1. Erosion Corrosion
2. Loto
3. Passivation Behavior

4. Fusion Bonded Epoxy



گرافیتی، پوشش اتیلن کلروتری فلئورواتیلن و پوشش وینیل استر تقویت شده با الیاف بر روی زیرلایه فولاد زنگ نزن ۳۱۶L اعمال شده و خواص مکانیکی و خوردگی این پوشش‌ها مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت.

۲. مواد و روش انجام آزمایش

در این قسمت از پژوهش، فولاد ۳۱۶L به عنوان زیرلایه انتخاب شد. نتایج آنالیز کوانتومتری ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول ۱ مطابق با استاندارد ASTM ۲۴۰ [۱۳] گزارش شده است. برای اعمال پوشش‌ها باید سطح موردنظر آماده سازی شود. بهترین روش آماده سازی سطح، ماسه پاشی است. آماده سازی صحیح و مناسب سطوح به روش ماسه پاشی، آلودگی‌های سطحی مانند نمک‌ها و لایه‌های تخریب شده سطح مانند زنگ و چربی را برطرف نموده و باعث چسبندگی مستقیم پوشش‌ها به سطح می‌شود و هم‌چنین با ایجاد زبری سطحی، چسبندگی لایه آستری به سطح را افزایش می‌دهد.

ماسه پاشی عمدتاً جهت نیل به دو هدف انجام می‌شود: هدف اول زدودن و برطرف نمودن جرم‌های خارجی و زنگ زدگی، آلودگی و رسیدن به سطح فلز بوده و هدف دوم ایجاد زبری مناسب در سطح فلز جهت چسبندگی بهتر فیلم پوشش به سطح فلز است. در این مرحله از مواد ساینده (ماسه سیلیسی) در ابعاد بسیار کوچک با سختی بالا در سرعت بسیار زیاد جهت تمیزکاری سطوح استفاده شد که یکی از مؤثرترین شیوه‌ها برای زدودن آلاینده‌ها از سطح و آماده کردن آن برای اعمال پوشش است [۱۴].

نمونه‌های فولاد زنگ نزن آماده سازی شده و ماسه پاشی شده تحت اعمال پوشش‌های پلیمری تقویت شده، پوشش آستری گرافیتی، پوشش آستری شیشه، اتیلن کلروتری فلئورواتیلن^۱ و وینیل استر تقویت شده با الیاف قرار گرفتند. پارامترهای پوشش‌دهی آستری مختلف روی سطح فولاد زنگ نزن در جدول ۲ بیان شده است.

سپس نمونه‌های پوشش داده شده تحت آزمون‌های ارزیابی عدم تخلخل (هالیدی، سختی سنجی، استحکام چسبندگی، پاشش مه نمکی و طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی به منظور ارزیابی و مشخصه یابی پوشش‌های اعمال شده قرار گرفتند [۱۵-۱۸]. آزمون‌های ارزیابی پوشش‌های آستری فوق بر اساس استانداردهای بین‌المللی انجام گرفته است که در جدول ۳ مختصراً نمایش داده شده است.

کنترل خوردگی و مهار حملات الکتروشیمیایی ایدئال هستند [۸، ۹]. این پوشش‌های وینیل استرهای تقویت شده با الیاف را می‌توان برای پوشش مخازن بتنی و فولادی و یا به عنوان پوشش بتنی کف استفاده کرد و البته لازم به ذکر است که این پوشش‌ها هزینه اقتصادی بالایی ۲۷ دلاری برای هر مترمربع دارند. پوشش‌های اتیلن کلروتری فلئورواتیلن در برابر اسیدها در غلظت‌ها و دماهای بالا، محیط‌های سوزاننده، عوامل اکسیدکننده و بسیاری از حلال‌ها مقاوم است. گفته می‌شود که مقاومت شیمیایی مشابهی با پلی تترافلئورواتیلن دارد اما از نظر هزینه‌ای، هزینه اقتصادی این پوشش‌ها روی زیرلایه بسیار کم‌تر از پوشش‌های تفلونی است (حدوداً یک چهارم پلی تترافلئورواتیلن است و هزینه پوشش‌دهی آن به ازای هر مترمربع ۱۵ دلار است) [۸، ۹].

رایج‌ترین کاربرد اتیلن کلروتری فلئورواتیلن در زمینه‌ی حفاظت در برابر خوردگی است پوشش‌های اتیلن کلروتری فلئورواتیلن برای حفاظت در برابر خوردگی در صنایع مختلفی از جمله برج‌های سفیدکننده کاغذ در خمیر و کاغذ، مخازن تولید و ذخیره سازی اسیدسولفوریک، جلوگیری از خوردگی دما بالای در حین تصفیه گاز دودکش، الکترودهای الکترولیز یا برج‌های خشک‌کن در صنعت کلر، پوشش داخلی مخازن کشتی‌های حمل و نقل برای کالاهای خطرناک خورنده، صنایع مرتبط با گازهای خورنده هالوژن (برم، کلر، فلئور) و مخازن جابه‌جایی اسید (اسیدسولفوریک، اسید نیتریک، اسید فسفریک، هالیدهای هیدروژن، سولفید هیدروژن و غیره) مورد استفاده قرار می‌گیرند. پوشش‌های آستری شیشه‌ای میزان مقاومت بسیار بالایی در برابر خوردگی دارند اما به علت تردی و شکنندگی کم مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند. با وجودی که این پوشش‌ها خواص ضد خوردگی مطلوبی از خود نمایش می‌دهند و میزان هزینه اقتصادی اعمال این پوشش‌ها روی سطح زیرلایه بسیار اندک است میزان استحکام مکانیکی آنان در برابر تنش‌های خارجی نظیر ضربه، کشش و خمش بسیار اندک است با این حال این پوشش‌ها برای حفاظت در برابر خوردگی بسیاری از زیرلایه‌های فلزی از جمله فولادهای کربنی ساده و فولادهای زنگ نزن مورد استفاده قرار می‌گیرند این پوشش‌ها هزینه‌ی اعمال بسیار بالای بر روی سطح زیرلایه داشته و به ازای هر مترمربع پوشش میزان ۷۵ دلار هزینه ایجاد خواهد کرد [۸، ۱۱، ۱۲].

در این مقاله، پوشش‌های پلیمری تقویت شده با سرامیک (سرامیک- پلیمر)، پوشش آستری شیشه‌ای، پوشش آستری



جدول ۱. آنالیز کوانتومتری فولاد ۳۱۶L

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co
۰.۰۱۶	۰.۳۴	۱.۵۵	۰.۰۲۹	۰.۰۰۲	۱۷.۰۷	۲.۰۷	۱۰.۵۶	<۰.۰۱	۰.۱۰
Cu	Nb	Ti	V	W	N	Fe			
۰.۴۱	Trace	۰.۰۰۶	۰.۰۵۹	۰.۰۶	۰.۰۶	Base			

جدول ۲. پارامترهای پوشش‌دهی پوشش‌های آستری بر روی زیرلایه ۳۱۶L

ردیف	جنس پوشش	روش پوشش‌دهی	دمای پوشش‌دهی (°C)	زمان تشکیل فیلم سخت	ضخامت پوشش (mm)
۱	آستری گرافیتی	لایه‌گذاری دستی	دمای محیط	۲۴ ساعت	< ۵
۲	آستری شیشه	اعمال دستی در دمای محیط و پخت در کوره	۱۱۰۰	۶ ساعت	< ۵
۳	آستری اتیلن کلرو تری فلئورواتیلن	لایه‌گذاری به روش غوطه‌وری	دمای محیط	۱۲ ساعت	< ۵
۴	آستری وینیل استر تقویت‌شده با الیاف	لایه‌گذاری دستی	دمای محیط	۲۴ ساعت	< ۵

جدول ۳. استانداردهای مورد استفاده در آزمون‌های ارزیابی پوشش عملی

ردیف	آزمون ارزیابی	استاندارد انجام آزمون
۱	عدم تخلخل (هالیدی)	ASTM D۵۱۶۲-۲۱ / ASTM G ۶۲
۲	سختی سنجی	ASTM D۲۲۴۰
۳	استحکام چسبندگی	ASTM D۴۵۴۱
۴	پاشش مه نمکی	ASTM B۱۱۷

فتر اعمال می‌شود و عمق فرورفتگی به‌عنوان معیاری برای سنجش سختی مطابق با رابطه زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$D = 1.00 - h / 0.25$$

که در این رابطه h عمق فرورفتگی در زمان اعمال کل نیرو است و واحد آن mm است. Shore A برای تعیین سختی لاستیک‌های نرم و پلاستیک‌های خیلی نرم، مانند PVC به کار می‌رود و Shore D در مورد لاستیک‌های سخت و ترموپلاستیک‌هایی مانند PTFE کاربرد دارد.

چسبندگی پوشش‌های اعمال‌شده روی زیرلایه توسط چسب اپوکسی با قدرت چسبندگی بالا به زیرلایه با استفاده از دستگاه چسبندگی Pull off مطابق ASTM D۴۵۴۱ [۱۹] انجام گرفت. حلقه آلومینیومی^۱ بر روی سطح پوشش‌های اعمال‌شده روی زیرلایه فولاد زنگ نزن ۳۱۶L با استفاده از چسب دوبخشی آرالدیت^۲ چسبانده شدند. سپس به‌منظور اطمینان از گیرش کامل چسب، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط نگهداری شدند. سپس یک شکاف در اطراف دالی‌ها (گیره‌ها) ایجاد شده و دالی‌ها (گیره‌ها) با سرعت ۱۰ mm/min از سطح پوشش کشیده می‌شوند تا پوشش از سطح فولاد زنگ نزن جدا شود. نرخ اعمال نیرو ۱ MPa/s بوده است. تمام آزمایش‌ها برای اطمینان از تکرارپذیری چهار مرتبه با توجه به ضخامت پوشش‌ها، در اطراف نگاه‌دارنده آزمون و در نهایت امتیازدهی نهایی (درصدبندی سطح مقطع جداشده از سطح) ایجاد گردید. آزمون مه نمکی به‌منظور بررسی ویژگی‌های حفاظت از خوردگی پوشش‌های پیشنهادی بر روی زیرلایه‌های فولاد زنگ

آزمون منغذیابی یکی از بهترین آزمون‌ها که می‌توان پس‌از آن انسجام پوشش را تأیید کرد و از عدم وجود منفذ در پوشش اطمینان حاصل نمود آزمون منغذیابی یا آزمون هالیدی است. این آزمون در صنعت به آزمون جرعه مشهور است و مطابق استاندارد ASTM G۶۲ [۱۵] انجام می‌گردد. بر اساس استانداردهای موجود به ازای هر میلی‌متر ضخامت پوشش ولتاژ ۴ کیلوولت اعمال می‌گردد. دستگاه منغذیاب یا آزمون هالیدی دارای دو خروجی مثبت و منفی است. در زمان انجام آزمون یکسر خروجی (عموماً منفی) را به بدنه فلزی تجهیز موردنظر پوشش‌دار متصل کرده تا اتصال برقرار گردد. طرف دیگر اتصال یعنی قطب مثبت به‌صورت جارویی با الیاف فلزی روی سطح را روبش می‌کند و در صورتی در روی سطح تخلخل یا ناپیوستگی وجود داشته باشد در اثر اتصال الکتریکی جرعه مشاهده می‌شود [۱۵].

لازم به ذکر است رایج‌ترین روش سختی‌سنجی مواد غیرفلزی و پلیمری روش Shore است که خود دارای دو نوع است. در Shore A از یک سوزن به شکل مخروط ناقص استفاده می‌شود و در Shore D سوزن به شکل یک مخروط با نوک کروی شکل است. در هر دو روش نیرو توسط وزنه و یک

1. Aluminum Dollies
2. Two-Part Araldite Adhesive



تحلیل قرار گرفتند. لازم به ذکر است با توجه به ماهیت پوشش‌های انتخابی و ضخامت آن‌ها، انجام آزمون EIS در ساعت‌های اولیه غوطه‌وری امکان‌پذیر نبوده و این آزمون پس از ۳۰ روز انجام شده است. همه آزمایش‌ها برای تکرارپذیری و اطمینان از نتیجه آزمایش با سه بار تکرار انجام شده است.

۳. نتایج و بحث

در این پژوهش آزمون‌های عدم تخلخل (هالیدی)، سختی‌سنجی، چسبندگی، پاشش مه نمکی (Salt Spray) و غوطه‌وری به‌منظور ارزیابی و مشخصه‌یابی پوشش‌های اعمال شده استفاده شد.

۱.۳ آزمون منفذیابی (هالیدی)

نتایج به‌دست‌آمده از این آزمون برای پوشش‌های پیشنهادی انتخاب‌شده در جدول ۴ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود هیچ نوع ناپیوستگی در سطح مشاهده نشده است که نشان می‌دهد تمامی پوشش‌ها با قابلیت اطمینان خوبی روی سطح قابل پوشش هستند. در بین این پوشش‌ها، پوشش‌های آستری گرافیتی و وینیل استر تقویت‌شده با الیاف میزان ولتاژ اعمالی بالایی دارند و این نشان می‌دهد که میزان منفذ موجود در این پوشش‌ها بسیار کم است که این به علت اصلاح این پوشش‌ها با مواد تقویت‌کننده گرافیتی و الیافی است. در حقیقت گرافیت به علت ساختار ورقه‌ای و صفحه‌ای که دارد به‌محض قرارگیری در پوشش منافذ موجود در پوشش را سد کرده و میزان منفذ موجود در پوشش را به حداقل می‌رساند. پوشش‌های آستری شیشه‌ای دارای کم‌ترین میزان ولتاژ جرقه است که این نشان‌دهنده‌ی آن است که این پوشش میزان منفذ و حفره در فرایند پوشش‌دهی دارد [۱۵].

جدول ۴. نتایج به‌دست‌آمده از آزمون منفذیابی (هالیدی) برای پوشش‌های پیشنهادی انتخاب‌شده

ولتاژ اعمالی (ولت)	نمونه
۸۵۰۰	پوشش آستری شیشه
۱۳۴۰۰	وینیل استر تقویت‌شده با الیاف
۱۶۵۰۰	پوشش آستری گرافیتی
۱۲۸۰۰	پوشش آستری سرامیک - پلیمر
۸۶۰۰	اتیلن کلروتری فلئورواتیلن

وزن استفاده شد. آزمون مه نمکی در اتاقک پاشش نمک مطابق ASTM B117 [۱۶] انجام شد. برای انجام این آزمون نمونه‌ها تحت زاویه ۱۵ الی ۳۰ درجه نسبت به راستای قائم در محفظه آزمون مه نمکی با رطوبت نسبی ۳۰٪ قرار گرفتند. سپس محلول wt. NaCl ۵٪ با pH در محدوده ۶٫۵ تا ۷٫۲ و با فشار پاشش محلول نمک ۰٫۸۳ الی ۱٫۲۴ بار در دمای حدود ۴۰ °C به‌طور پیوسته بر روی نمونه‌ها به مدت ۶۰۰ ساعت اسپری شد.

هم‌چنین جهت مطالعه رفتار نمونه‌ها در محیط فرایندی (اسیدسولفوریک ۱۸ wt٪ همراه با یون‌های آهن و اورانیم با میزان پی‌اچ ۰٫۷۴) آزمون غوطه‌وری پوشش‌ها به مدت ۶ ماه روی تمامی پوشش‌ها در محلول فرایندی و در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و در بازه‌های زمانی مختلف انجام شد. این آزمون براساس استاندارد بین‌المللی ASTM G1-90 [۱۷] انجام شده است که براساس این استاندارد، نمونه‌های پوشش‌دهی شده در مدت زمان ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ روز از محلول فرایندی خارج شده و پس از شست‌وشو با آب مقطر دوبار تقطیر و خشک کردن سطحی با کمک پمپ باد با ترازوی دقیق چهار رقم اعشار مورد توزین قرار گرفتند و تغییرات وزنی پوشش‌ها بر اساس رابطه‌ی $\Delta m/m = 100 * (M_t - M_0) / M_0$ در رابطه‌ی فوق‌الذکر نمادهای $\Delta m/m$ ، M_t و M_0 به ترتیب درصد تغییرات وزنی در زمان‌های غوطه‌وری مختلف، وزن نمونه در لحظه‌ی غوطه‌وری t و وزن نمونه در لحظه‌ی غوطه‌وری صفر (لحظه‌ی آغازین) است.

لازم به ذکر است که جهت مطالعه و بررسی خوردگی نمونه‌های پوشش داده‌شده آزمون امپدانس الکتروشیمیایی روی آن‌ها انجام گرفت. برای بررسی عملکرد خوردگی نمونه‌های پوشش داده‌شده و غوطه‌ور شده در محلول فرایندی از طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) با استفاده از دستگاه پتانسیواستات/ گالوانواستات اتو لب ۱ مدل ۳۰۲N استفاده شد. آزمون EIS در محدوده فرکانسی ۱۰ mHz تا ۱۰۰ kHz در پتانسیل مدارباز (OCP) با دامنه‌ی ولتاژ ۱۰ mV و با استفاده از یک سامانه‌ی سه الکترودی شامل الکتروود کاری، نمونه‌های پوشش داده‌شده با مساحت سطحی مشخص، الکتروود کمکی پلاتین با مساحت سطح ۱ cm² و الکتروود مرجع کالومل اشباع برای کنترل پتانسیل اعمالی و در محلول فرایندی، پس از ۳۰ روز غوطه‌وری روی نمونه‌ها با سوراخ‌های ریز سطحی به‌منظور شبیه‌سازی با شرایط واقعی انجام شد. داده‌های حاصل از EIS با استفاده از نرم‌افزار Nova و Z-View مورد بررسی و



که میزان سختی نسبتاً بالاتری نسبت به سایر پوشش‌ها دارند. البته پوشش‌های آستری گرافیتی تقویت‌شده و پوشش اتیلن کلروتری فلورواتیلن تقریباً میزان سختی مشابهی داشته و ارجحیت بالاتری نسبت به دیگر پوشش‌ها ندارد. درحالی‌که این موضوع در پوشش‌های تقویت‌شده با ذرات سرامیکی و پوشش‌های وینیل استر تقویت‌شده با الیاف مطرح نیست و این پوشش‌ها به ترتیب دارای ۱۴٫۷٪ و ۶٫۵٪ هستند [۴-۸].

۳.۳ ارزیابی استحکام چسبندگی پوشش‌ها (Pull off)

جدول ۶ نتایج آزمون استحکام چسبندگی پوشش‌های اعمال‌شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد از جهت استحکام چسبندگی پوشش‌های پوشش آستری شیشه با اختلاف قابل توجهی نسبت به سایر پوشش‌ها در مرتبه اول قرار دارند و پس‌از آن به ترتیب پوشش آستری سرامیک پلیمر، وینیل استر تقویت‌شده با الیاف، پوشش آستری گرافیتی و اتیلن کلروتری فلورواتیلن قرار دارند. چسبندگی بالای پوشش آستری شیشه به ماهیت پوشش بازمی‌گردد که طی آن لایه پوشش با زیرلایه در دمای پخت بالای ۱۰۰۰°C واکنش شیمیایی می‌دهند و منجر به چسبندگی بالای پوشش روی زیرلایه می‌شود درحالی‌که در سایر پوشش‌ها این اتصال به‌صورت فیزیکی با زیرلایه ایجاد می‌شود که در نتیجه استحکام کششی پایین‌تری انتظار می‌رود.

۳.۴ آزمون سختی‌سنجی پوشش‌ها

در این پژوهش از سختی‌سنجی به روش Shore D بر اساس استاندارد ASTM D۲۲۴۰ برای تعیین سختی پوشش‌ها استفاده شد. جدول ۵ میزان سختی نمونه پوشش‌های پیشنهادی انتخاب‌شده را نشان می‌دهد. به علت شکننده بودن پوشش آستری شیشه اندازه‌گیری سختی این پوشش مقدور نبود. در مدارک شرکت‌های تولیدکننده این پوشش محدوده ۲۰-۱۸ راکول سی گزارش شده است [۱۱]. پایین بودن مقدار سختی طبیعی است زیرا این پوشش‌ها ماهیت شیشه‌ای دارند و به‌شدت شکننده هستند. همان‌طوری که نتایج نشان می‌دهد به‌جز پوشش آستری شیشه، پوشش‌های آستری گرافیتی تقویت‌شده و پوشش اتیلن کلروتری فلورواتیلن عدد سختی تقریباً مشابهی را نشان می‌دهند و از این منظر هیچ‌کدام دارای اولویت ویژه‌ای نسبت به سایر پوشش‌ها نیستند. اما در برخی پوشش‌های تقویت‌شده با نانو ذرات عدد سختی تفاوت چشمگیری دارد که البته این موضوع نشان‌دهنده‌ی این است حضور نانو ذرات تقویت‌کننده در زمینه‌ی پلیمری موجب افزایش سختی این پوشش‌ها می‌شود. برای مثال پوشش آستری سرامیک-پلیمر به علت حضور ذرات سرامیکی بسیار سخت، میزان سختی بسیار بالاتری نسبت به سایر پوشش‌های آستری از خود نمایش می‌دهند که این علت فصل مشترک غیرهمدوس بین نانو ذرات تقویت‌کننده سرامیکی با زمینه پلیمر است. این موضوع در پوشش‌های تقویت‌شده با الیاف هم مشاهده می‌شود

جدول ۵. میزان سختی Shore D نمونه پوشش‌های پیشنهادی انتخاب‌شده

میانگین	نتایج حاصله در نقاط مختلف					نمونه
	۵	۴	۳	۲	۱	
۸۴	۸۴	۸۴	۸۴	۸۴	۸۴	پوشش آستری سرامیک - پلیمر
۷۸	۸۲	۸۰	۷۹	۷۳	۷۶	وینیل استر تقویت‌شده با الیاف
۷۳٫۲	۷۴	۷۳	۷۳	۷۳	۷۳	پوشش آستری گرافیتی تقویت‌شده
۷۲٫۲	۷۳	۷۲	۷۲	۷۲	۷۲	اتیلن کلروتری فلورواتیلن

جدول ۶. نتایج آزمون استحکام چسبندگی پوشش‌های پیشنهادی انتخاب‌شده

وضعیت جدایش پوشش	استحکام (Mpa)	ردیف	نمونه			
				۱	۲	
در سطح تحت آزمون، بیش از ۹۵٪ گسیختگی در فصل مشترک نگه‌دارنده و پوشش بوده است.	۱۳ <	۱	پوشش آستری سرامیک - پلیمر	۱۳ <	۲	
	۱۳ <	۳		۱۳ <	۳	
	۱۳ <	۴		۱۳ <	۴	
	۸٫۵	۱		۹	۲	
در سطح تحت آزمون، بیش از ۹۵٪ گسیختگی در ضخامت پوشش بوده است.	۹	۳	وینیل استر تقویت‌شده با الیاف	۹	۳	
	۱۰	۴		۱۰	۴	
	۶	۱		۶	۱	
	۵	۲		۵	۲	
در سطح تحت آزمون، حدود ۲۰٪ گسیختگی در ضخامت پوشش و حدود ۸۰٪ در فصل مشترک نگه‌دارنده و پوشش بوده. در سطح تحت آزمون، حدود ۲۰٪ گسیختگی در ضخامت پوشش و حدود ۸۰٪ در فصل مشترک نگه‌دارنده و پوشش بوده. در سطح تحت آزمون، حدود ۳۰٪ گسیختگی در ضخامت پوشش و حدود ۷۰٪ در فصل مشترک نگه‌دارنده و پوشش بوده.	۵	۳	پوشش آستری گرافیتی تقویت‌شده	۵	۳	
	۵	۴		۵	۴	
	۵ <	۱		۵ <	۱	
	۵ <	۲		۵ <	۲	
در سطح تحت آزمون، بیش از ۹۵٪ گسیختگی در فصل مشترک نگه‌دارنده و پوشش بوده است.	۵ <	۳	اتیلن کلروتری فلورواتیلن	۵ <	۳	
	۵ <	۴		۵ <	۴	
	۷۰	۱		پوشش آستری شیشه	۷۰	۱
	۷۰	۱			۷۰	۱



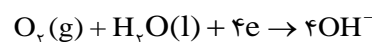
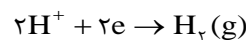
پوشش آستری گرافیتی تقویت شده وینیل استر تقویت شده با الیاف



شکل ۱. تصاویر دیجیتال از منطقه جدایش پوشش‌های مختلف اعمال شده روی سطح زیرلایه.

این دست پوشش‌ها با توجه به میزان چسبندگی بالایی که بین اجزای پوشش آن‌ها وجود دارد نشان می‌دهد که میزان هم‌چسبی بالایی دارند و استحکام هم‌چسبی آن‌ها از استحکام چسبندگی آن‌ها بالاتر است که این موضوع نشان‌دهنده توزیع خوب نانوذرات پراکنده‌شده‌ی سرامیکی در زمینه‌ی پلیمر و نانوذرات جامد موجود در پوشش‌های اتیلن کلروتری فلئورواتیلن و پوشش آستری شیشه است. هم‌چنین پوشش‌های آستری گرافیتی تقویت‌شده، میزان استحکام هم‌چسبی بالاتری نسبت به چسبندگی به زیرلایه دارند که این به علت توزیع متناسب و یکنواخت نانوذرات تقویت‌کننده‌ی گرافیتی در پوشش است اما کاهش استحکام چسبندگی و جدایش بیشتر پوشش از فصل مشترک نگه‌دارنده و پوشش به علت آن است که با حضور این نانو ذرات احتمال ایجاد مکان‌های تخلخل و میکرو حفره در پوشش‌های پلیمری بیشتر شده و مکان‌های نفوذ یون‌های خورنده و اتم هیدروژن به داخل پوشش بیشتر شده و در نهایت چسبندگی با انجام واکنش‌های کاتدی احیا اکسیژن و احیا هیدروژن به شدت تضعیف می‌شود. هم‌چنین پوشش وینیل استر تقویت‌شده با الیاف میزان مقاومت بالایی برای جدایش از سطح زیرلایه از خود نمایش می‌دهند و میزان چسبندگی بین اجزای الیاف و زمینه پلیمری (خواص هم‌چسبی) کم است که این چسبندگی بالا به زیرلایه (چسبندگی و جدایش از فصل مشترک نگه‌دارنده و پوشش) به علت مقاومت در برابر نفوذ یون‌های خورنده و اتم هیدروژن به داخل پوشش و به دنبال آن محدود کردن و جلوگیری از انجام واکنش‌های کاتدی احیا هیدروژن و اکسیژن است و هم‌چسبی ضعیف این پوشش‌ها یا جدایش بالایی پوشش در ضخامت پوشش به علت عدم توزیع متفاوت و یکنواخت این نانو الیاف‌ها در ساختار و زمینه‌ی پلیمری است [۷-۵].

تصاویر دیجیتالی از سطح جدایش و منطقه ارزیابی استحکام چسبندگی پوشش‌های اعمال‌شده روی سطح زیرلایه در شکل ۱ نمایش داده‌شده است. در حقیقت منظور از گسیختگی در ضخامت پوشش منظور همان خاصیت هم‌چسبی^۱ است که در هنگام جدایش نگاه‌دارنده از سطح پوشش رخ می‌دهد. به بیان دقیق‌تر این درصد بیانگر میزان جدایش پوشش از خود پوشش است که در هنگام جدا کردن پوشش از سطح زیرلایه رخ می‌دهد که در حقیقت روی سطح خارجی پوشش رخ می‌دهد و جدایش از پوشش رخ می‌دهد نه از زیرلایه، یعنی خاصیت هم‌چسبی بین اجزای پوشش و ذرات تقویت‌کننده بیشتر بوده و جدایش دوفازی (جدایش پیگمنت یا تقویت‌کننده از فیلم سخت (پوشش) تشکیل‌شده روی سطح زیرلایه) کم‌تری خواهیم داشت و بالعکس. این درصد جدایش در فصل مشترک فیکسچر و پوشش میزان استحکام چسبندگی^۲ بین پوشش تقویت‌شده و زیرلایه را نشان می‌دهد و هرچقدر این درصد جدایش کم‌تر باشد [۶-۸]. یعنی خاصیت چسبندگی بین پوشش و زیرلایه فلزی فولادی زنگ نزن بیشتر بوده و جدایش پوشش از زیرلایه کم‌تری خواهیم داشت و بالعکس. با توجه به توجهات فوق، پوشش‌های آستری سرامیک-پلیمر و پوشش‌های اتیلن کلروتری فلئورواتیلن و پوشش آستری شیشه میزان استحکام چسبندگی کم‌تری نسبت به سایر پوشش‌ها از خود نمایش دادند و این به معنای آن است که این پوشش‌ها باگذشت زمان در مقابل یون‌های خورنده و اتم هیدروژن نفوذکننده در زیرلایه پوشش نفوذپذیرتر هستند و به محض رسیدن این یون‌ها به فصل مشترک زیرلایه و پوشش واکنش‌های احیا اکسیژن و احیا هیدروژن انجام می‌شود که در اثر واکنش‌های احیا اکسیژن منجر به قلیایی شدن مناطق اطراف عیب در پوشش شده و این آنیون‌های هیدروکسید به پیوند شیمیایی و کووالانسی و مکانیکی برقرار شده بین پوشش و زیرلایه فلزی حمله کرده و موجب تضعیف پیوند آن‌ها و حتی موجب جدایش و بلند شدن این پوشش‌ها از فصل مشترک پوشش و زیرلایه می‌گردد. مشابه همین حالت برای واکنش‌های احیا هیدروژن اتفاق می‌افتد با این تفاوت که مکانیزم جدایش پوشش از طریق افزایش فشار جزئی گاز هیدروژن در فصل مشترک پوشش و زیرلایه فلزی است. این فشار جزئی بالای گاز هیدروژن در اثر واکنش کاتدی احیا هیدروژن در مناطق عیوب پوشش رخ می‌دهد که در نهایت این فشار جزئی بالا از استحکام چسبندگی بین پوشش و زیرلایه فلزی بیشتر تر شده و این پوشش‌ها را از سطح زیرلایه جدا می‌کند. معادله‌ی واکنش احیا هیدروژن و احیا اکسیژن به شرح ذیل است:



1. Cohesion
2. Adhesion



۴.۳ آزمون پاشش مه نمکی (Salt Spray)

مه نمکی نشان می‌دهد. همان‌طور که نتایج آزمون‌های سالت اسپری نشان می‌دهد تمامی پوشش‌ها مقاومت به خوردگی بسیار بالایی را در این آزمون نشان می‌دهند.

جدول ۷ نتایج مشاهدات بازرسی‌های انجام‌شده در طول مدت آزمون پاشش مه نمکی روی پوشش‌های پیشنه‌های و شکل ۲ تصاویر نمونه پوشش‌های مذکور را قبل و بعد از آزمون پاشش

جدول ۷. نتایج مشاهدات بازرسی‌های انجام‌شده در طول مدت آزمون پاشش مه نمکی

مشاهدات	زمان بازرسی پس از شروع آزمون (ساعت)	نوع پوشش
قطعه کاملاً سالم بود.	۲۴	پوشش آستری گرافیتی
تغییر چندانی نسبت به بازرسی قبلی مشاهده نشد.	۴۸	
تغییر چندانی نسبت به بازرسی قبلی مشاهده نشد.	۴۰۸	
زنگ‌زدگی (خوردگی قرمز) در حدود ۱-۲ نقطه سطح نمونه مشاهده شد.	۴۳۲	
تغییر چندانی نسبت به بازرسی قبلی مشاهده نشد.	۴۵۶	
تغییر چندانی نسبت به بازرسی قبلی مشاهده نشد.	۶۰۰	
قطعه کاملاً سالم بود.	۲۴	پوشش آستری شیشه
تغییر چندانی نسبت به بازرسی قبلی مشاهده نشد.	۴۸	
تغییر چندانی نسبت به بازرسی قبلی مشاهده نشد.	۶۰۰	
قطعه کاملاً سالم بود.	۲۴	پوشش آستری سرامیک- پلیمر
تغییر چندانی نسبت به بازرسی قبلی مشاهده نشد.	۴۸	
تغییر چندانی نسبت به بازرسی قبلی مشاهده نشد.	۶۰۰	
قطعه کاملاً سالم بود.	۲۴	پوشش اتیلن کلروتری فلوروواتیلن
تغییر چندانی نسبت به بازرسی قبلی مشاهده نشد.	۴۸	
تغییر چندانی نسبت به بازرسی قبلی مشاهده نشد.	۶۰۰	
قطعه کاملاً سالم بود.	۲۴	پوشش وینیل استر تقویت‌شده با الیاف
تغییر چندانی نسبت به بازرسی قبلی مشاهده نشد.	۴۸	
تغییر چندانی نسبت به بازرسی قبلی مشاهده نشد.	۶۰۰	



شکل ۲. تصویر قبل و بعد از آزمون پاشش مه نمکی نمونه‌های (الف) پوشش آستری گرافیت، (ب) پوشش آستری شیشه، (ج) پوشش آستری سرامیک-پلیمر و (د) پوشش اتیلن کلروتری فلوروواتیلن.



استفاده قرار گرفت. جدول ۷ داده‌های EIS استخراج شده پوشش‌های اعمال شده بر روی فولاد زنگ نزن ۳۱۶ غوطه‌ور شده در محلول فرایندی را نشان می‌دهد. حداکثر مقدار مقاومت کل ($R_t = R_{ct} + R_c$) یک معیار مناسب برای مقاومت در برابر خوردگی فلزات است که با توجه به ضخامت بالا و بازدارندگی سطحی قابل توجهی که پوشش‌های اعمال شده داشته‌اند، می‌تواند با صرف نظر از مقاومت انتقال بار، مقاومت کل را مقاومت پوشش یعنی R_c در نظر گرفت. مطابق شکل ۳ و جدول ۹، بیشترین مقدار امپدانس در فرکانس کمینه که معیار معتبری برای قدرت بازدارندگی محسوب می‌شود، برای نمونه پوشش آستری شیشه مقدار قابل توجه $\text{og}|Z|_{1.0\text{mHz}} = 10^2 \text{ L}\Omega$ را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده قدرت سدکنندگی و بازدارندگی بالا در برابر نفوذ الکترولیت آن دارد. نمونه پوشش آستری شیشه با توجه به نمودار بد- فاز دارای بیشترین زاویه فاز در فرکانس بیشینه است که به مقاومت انتقال بار، R_{ct} مرتبط است و بیانگر این است که پوشش که قادر به مسدود کردن انتقال بار الکترون بوده و تأییدی بر رفتار ضدخوردگی این نمونه در محلول فرایندی دارد [۷]. همچنین با توجه به شکل ۳ بیشترین مقادیر مقاومت در برابر نفوذ الکترولیت بعد از ۳۰ روز غوطه‌وری بعد از نمونه پوشش آستری شیشه به ترتیب مربوط به پوشش‌های اتیلن کلروتری فلئورواتیلن، وینیل استر تقویت شده با الیاف، پوشش آستری گرافیتی و پوشش آستری پلیمر-سرامیک است. کاهش مقاومت در برابر خوردگی نمونه‌ی با پوشش آستری پلیمر-سرامیک پس از ۳۰ روز غوطه‌وری نیز مربوط به رفتار حفاظتی نامناسب این پوشش نسبت به پوشش‌های انتخابی دیگر است. همچنین روند کاهش در مقادیر n نمونه‌های پوشش داده شده می‌تواند مربوط به سطح زبر و ناهموار محصولات خوردگی باشد که تشکیل شده است و طی زمان افزایش یافته‌اند. بسیاری از مناطق آندی و کاتدی روی سطح فولاد وجود دارند که در فرایند خوردگی شرکت می‌کنند و با پیشرفت فرایند خوردگی، سطح ناهمگن و زبرتری روی نمونه‌های فولادی ایجاد می‌شود [۱۱].

۵.۳ مطالعات خوردگی نمونه‌ها به روش غوطه‌وری

جهت مطالعه رفتار نمونه‌ها در محیط فرایندی (اسیدسولفوریک ۱۸٪) آزمون غوطه‌وری پوشش‌ها به مدت ۶ ماه روی تمامی پوشش‌ها در محلول فرایندی و در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد انجام گرفت. در نهایت در بازه‌های زمانی مختلف تغییرات وزنی پوشش‌ها اندازه‌گیری شد. همان‌طوری که نتایج نشان می‌دهد نمونه پوشش آستری شیشه تقریباً هیچ‌گونه تغییر وزنی نداشته است. جدول ۸ نتایج اندازه‌گیری‌ها وزن در بازه‌های زمانی مختلف و تغییرات جرمی نمونه‌های مختلف پوشش را نشان می‌دهد. همان‌طوری که مشاهده می‌شود کم‌ترین تغییرات وزنی مربوط به ترتیب مربوط به نمونه‌های پوشش آستری شیشه، اتیلن کلروتری فلئورواتیلن، وینیل استر تقویت شده با الیاف، پوشش آستری پلیمر تقویت شده با سرامیک (سرامیک-پلیمر) و پوشش آستری گرافیتی است [۱۷].

۶.۳ مطالعه خوردگی نمونه‌های پوشش داده شده با طیف‌سنجی

امپدانس الکتروشیمیایی

جهت مطالعه و بررسی خوردگی نمونه‌های پوشش داده شده آزمون امپدانس الکتروشیمیایی روی آن‌ها انجام گرفت. لازم به ذکر است با توجه به ماهیت پوشش‌های انتخابی و ضخامت آن‌ها، انجام آزمون EIS در ساعت‌های اولیه غوطه‌وری امکان‌پذیر نبوده و این آزمون پس از ۳۰ روز انجام شده است. همه آزمایش‌ها برای تکرارپذیری و اطمینان از نتیجه آزمایش با سه بار تکرار انجام شده است.

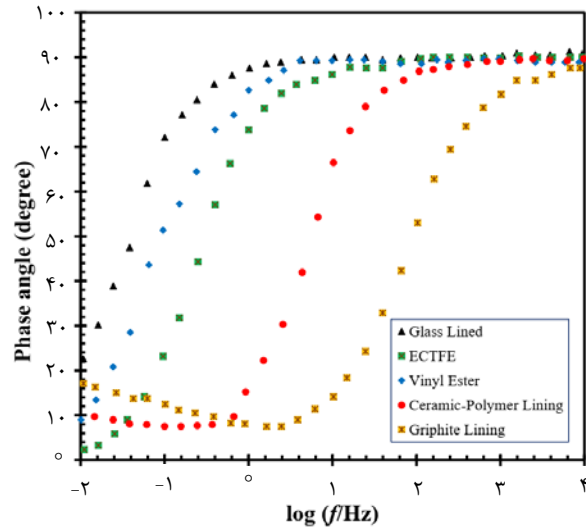
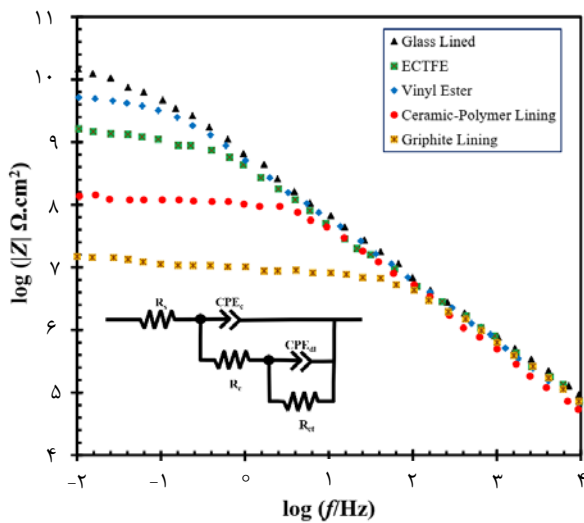
نمودارهای بد^۱ پس از ۳۰ روز غوطه‌وری و داده‌های EIS به دست آمده به ترتیب در شکل ۳ و جدول ۹ ارائه شده‌اند. براساس بررسی‌های الکتروشیمیایی به عمل آمده، نمونه‌ی پوشش آستری شیشه به عنوان کارآمدترین سامانه پوششی می‌تواند انتخاب شود. همچنین تمامی نمودارها مطابق مدارهای الکتریکی ($\chi^2 < 0.005$) و خطای کم‌تر از ۵ درصد که در شکل ۳ نشان داده شده است، پردازش شدند. در مدار معادل انتخابی، R_s مقاومت الکترولیت، متغیرهای مقاومت و خازن پوشش و لایه‌ی دوگانه الکتریکی به ترتیب R_{ct} ، R_c ، CPE_{dl} و CPE_c نام‌گذاری شده‌اند. عنصر فاز ثابت (CPE) به دلیل رفتار خازنی غیر ایدئال سطح نمونه به جای خازن مورد

1. Bode Plots



جدول ۸. تغییر وزن نمونه‌ها در بازه‌های مختلف زمانی برحسب گرم و محاسبه تغییرات وزنی

نمونه‌روز	۰	۱۵	۳۰	۴۵	۶۰	۷۵	۹۰	۱۲۰	۱۵۰
پوشش آستری شیشه	۲۲۸,۸۹۶۷	۲۲۸,۸۹۷۵	۲۲۸,۸۹۸۰	۲۲۸,۸۹۸۲	۲۲۸,۸۹۸۲	۲۲۸,۸۹۸۲	۲۲۸,۸۹۸۲	۲۲۸,۸۹۸۲	۲۲۸,۸۹۸۲
% $\Delta m/m$	-	۰۰۰۳۵,۰	۰۰۰۵۶۸,۰	۰۰۰۶۵۵,۰	۰۰۰۶۵۵,۰	۰۰۰۶۵۵,۰	۰۰۰۶۵۵,۰	۰۰۰۶۵۵,۰	۰۰۰۶۵۵,۰
اتیلن کلروتری فلئورواتیلن	۵۷,۰۰۰۰	۵۷,۰۰۲۵	۵۷,۰۰۲۵	۵۷,۰۰۳۳	۵۷,۰۰۳۴	۵۷,۰۰۳۴	۵۷,۰۰۳۴	۵۷,۰۰۳۵	۵۷,۰۰۳۵
% $\Delta m/m$	-	۰۰۴۳۸,۰	۰۰۴۳۸,۰	۰۰۵۷۸,۰	۰۰۵۷۸,۰	۰۰۵۷۸,۰	۰۰۵۷۸,۰	۰۰۵۹۶,۰	۰۰۶۱۴,۰
پوشش آستری سرامیک-پلیمر	۱۲,۶۸۳۴	۱۲,۸۶۶۷	۱۲,۸۸۸۵	۱۲,۹۴۱۳	۱۲,۹۵۵۰	۱۳,۰۱۳۰	۱۳,۱۱۳۰	۱۳,۱۲۱۰	۱۳,۱۲۱۳
% $\Delta m/m$	-	۴۴۵۱۹,۱	۵۸۹۴۷,۱	۸۱۰۲۴,۱	۱۴۱۳۸,۲	۵۹۸۶۷,۲	۳۸۷۱۰,۳	۴۵۰۱۷,۳	۴۵۲۵۴,۳
وینیل استر تقویت‌شده با الیاف	۱۱,۲۹۰۳	۱۱,۲۹۱۳	۱۱,۲۹۲۰	۱۱,۲۹۲۴	۱۱,۲۹۲۸	۱۱,۲۹۲۹	۱۱,۲۹۳۱	۱۱,۲۹۳۴	۱۱,۲۹۴۱
% $\Delta m/m$	-	۰۰۸۸۵,۰	۰۱۵۰۵,۰	۰۱۸۶۰,۰	۰۲۲۱۴,۰	۰۲۳۰۲,۰	۰۲۴۸۰,۰	۰۲۷۴۵,۰	۰۳۳۶۵,۰
پوشش آستری گرافیتی	۱۱,۴۲۷۴	۱۱,۶۸۰۰	۱۱,۷۴۱۵	۱۱,۸۱۵۰	۱۱,۸۲۹۰	۱۱,۸۷۵۷	۱۱,۸۷۶۱	۱۱,۸۷۹۵	۱۱,۸۸۰۱
% $\Delta m/m$	-	۲۱۰۴۷,۲	۷۴۸۶۵,۲	۳۹۱۸۴,۳	۵۱۴۳۶,۳	۹۲۳۰۲,۳	۹۲۶۵۲,۳	۹۵۶۲۸,۳	۹۶۱۵۳,۳



شکل ۳. منحنی‌های بد و طرح‌واره‌ی مدار معادل برای نمونه‌های پوشش داده‌شده بر روی فولاد زنگ نزن ۳۱۶ غوطه‌ور شده در محلول فرایندی.

جدول ۹. داده‌های EIS نمونه پوشش‌های انتخابی اعمال شده روی فولاد زنگ نزن ۳۱۶ غوطه‌ور شده در محلول فرایندی

Log $ Z _{10mHz}$ ($\Omega.cm^2$)	n_c	CPE_C Y_0 ($\mu Sn.\Omega^{-1}.cm^2$)	R_C ($\Omega.cm^2$)	n	CPE_{dl} Y_0 ($\mu Sn.\Omega^{-1}.cm^2$)	R_{CT} ($\Omega.cm^2$)	نمونه
۱۰,۲۰	۰,۹۹	$۲,۱۱ \times 10^{-۴}$	$۱,۷۱ \times 10^{۱۰}$	-	-	-	پوشش آستری شیشه
۹,۷۰	۰,۹۵	$۳,۵۶ \times 10^{-۴}$	$۵,۵۱ \times 10^۹$	-	-	-	اتیلن کلروتری فلئورواتیلن
۹,۲۰	۰,۹۲	$۴,۰۳ \times 10^{-۴}$	$۱,۶۳ \times 10^۹$	-	-	-	وینیل استر تقویت‌شده با الیاف
۸,۱۴	۰,۹۰	$۴,۴۶ \times 10^{-۴}$	$۹,۴۳ \times 10^۷$	۰,۶۰	$۷,۶۳ \times 10^{-۳}$	$۲,۵۲ \times 10^۷$	پوشش آستری گرافیتی
۷,۲۰	۰,۸۸	$۵,۳۸ \times 10^{-۴}$	$۷,۳۶ \times 10^۶$	۰,۵۱	$۲,۲۱ \times 10^{-۳}$	$۸,۹۵ \times 10^۶$	پوشش آستری سرامیک-پلیمر

۴. نتیجه‌گیری

بدون ایجاد خوردگی تا دماهای زیر $۲۰۰^\circ C$ قابل‌استفاده است. با بررسی نتایج سختی‌سنجی و بررسی استحکام این پوشش‌ها در پژوهش حاضر می‌توان بیان نمود که یکی از محدودیت‌های استفاده از این مخازن همراه با پوشش‌های آستری شیشه‌ای شکننده بودن این پوشش‌ها است و هر نوع تنش خارجی و مکانیکی محیطی می‌تواند منجر به شکسته شدن و ترک برداشتن پوشش گردد.

نمونه‌های پوشش داده‌شده توسط پوشش آستری شیشه مطابق نتایج آزمون‌های غوطه‌وری و مه نمکی، دارای مقاومت به خوردگی عالی در تمامی غلظت‌های اسیدسولفوریک و هم‌چنین محیط‌های حاوی یون کلر بوده و چسبندگی بسیار مناسبی به زیرلایه دارد. این پوشش‌ها در ضخامت‌های زیر سه میلی‌متر به‌راحتی روی سطح قابل‌اعمال بوده و در مدت‌زمان طولانی



الیاف موجود در پوشش، مقاومت به خوردگی بالایی نیز از خود نشان دادند.

۳. پوشش اتیلن کلروتری فلئورواتیلن اعمالی روی زیرلایه فولادی زنگ نزن ۳۱۶L با داشتن مقاومت به خوردگی بالا و امیدانس الکتروشیمیایی بالا که در نتایج آزمون طیفسنجی امیدانس الکتروشیمیایی مشاهده شد، پوشش‌هایی با قدرت چسبندگی پایین و استحکام پایین در مقایسه با سایر پوشش‌های آستری اعمال شده روی زیرلایه هستند.

۴. پوشش وینیل استر تقویت شده با الیاف علاوه بر داشتن الیاف برای جلوگیری از نفوذ مواد و یون‌های خورنده به داخل پوشش، میزان افت امیدانس الکتروشیمیایی بالایی پس از ۳۰ روز غوطه‌وری در محلول فرایندی داشتند و همچنین حتی با حضور الیاف تقویت کننده میزان استحکام و چسبندگی بالایی نیز از خود به نمایش گذاشتند.

۵. پوشش آستری تقویت شده با گرافیت در هیچ یک از زمینه‌های مقاومت در برابر خوردگی و استحکام مکانیکی نتایج مطلوبی نداشت و علاوه بر مقاومت تقویت کننده گرافیت در برابر خوردگی و حملات الکتروشیمیایی، این تقویت کننده‌ها نتایج مطلوبی در برابر نفوذ آب و چسبندگی پایینی داشتند.

مراجع

1. E.C. Hoxie, *Some Corrosion Considerations in the Selection of Stainless Steels for Pressure Vessels and Piping*, Int. Nickel Co., Inc., One New York Plaza, New York, N. Y. 10004. 1975, 44 (1975).
2. P. Fauvet, et al, *Corrosion mechanisms of austenitic stainless steels in nitric media used in reprocessing plants*, J. Nucl. Mater., 375, 52-64 (2008).
3. M. Fajobi, R.T. Loto, *Adsorption and Inhibition Performance of Arachis hypogaea Extracts on 316L Steel in H2SO4 Solution*, in: Mater. Sci. Forum, Trans Tech Publ, 41-45 (2022).
4. P. Gong, Y. Li, G. Zhang, *Enhancing anti-corrosion property of novolac vinyl ester coatings on mild steel through introduction of fluorine acrylic monomer and β -Si3N4 nanoparticles*, Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp., 635, 128075 (2022).
5. R.T. Loto, *Assessment of the corrosion susceptibility of 434 ferritic stainless steel in chloride-sulphate solution*, In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1186(1), 012005, IOP Publishing, September (2021).

پوشش پلیمر تقویت شده با سرامیک (سرامیک-پلیمر) دارای سختی و استحکام چسبندگی مناسب بوده و بعد از پوشش آستری شیشه قرار دارد. مقاومت به خوردگی این پوشش در حد مطلوبی قرار دارد و با توجه به سختی بالا و مکانیزم تقویت کنندگی آن با کمک الیاف می‌تواند انتخاب مناسبی برای پوشش‌های مقاوم در برابر خوردگی با استحکام مکانیکی بالایی پمپ‌های فرایندی نیز باشد. پوشش اتیلن کلروتری فلئورواتیلن از منظر مقاومت به خوردگی، مقاومت نسبتاً خوبی در محیط‌های محلول‌های فرایندی دارد ولی علی‌رغم روش اعمال ساده نسبت به سایر پوشش‌ها، سختی و استحکام چسبندگی چندان بالایی ندارد.

همچنین پوشش وینیل استر تقویت شده با الیاف از منظر مقاومت در برابر خوردگی در محدوده متوسطی قرار دارد و استحکام چسبندگی و سختی متوسطی دارد و بنابراین انتخاب مناسبی برای پمپ‌ها نیست. در نهایت لازم به ذکر است پوشش آستری تقویت شده با گرافیت از جهت استحکام چسبندگی و سختی مطلوب نبوده و با توجه به جذب بالای آب در آزمایش‌های خوردگی غوطه‌وری، استفاده از آن در بلندمدت می‌تواند خطراتی را به همراه داشته باشد.

در پژوهش حاضر، پوشش‌های آستری شیشه‌ای، پوشش پلیمر تقویت شده با سرامیک (سرامیک-پلیمر)، پوشش اتیلن کلروتری فلئورواتیلن، پوشش وینیل استر تقویت شده با الیاف و پوشش آستری تقویت شده با گرافیت بر روی زیرلایه فولاد ۳۱۶L اعمال شده‌اند و مورد مطالعه و بررسی قرار گرفتند و نتایج کلیدی و مهم به دست آمده از مطالعه حاضر به شرح ذیل است:

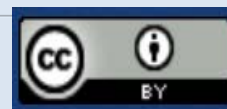
۱. پوشش‌های آستری شیشه‌ای در برابر آزمون‌های الکتروشیمیایی و پاشش مه نمکی مقاومت به خوردگی عالی داشتند اما با محدودیت تردی و شکنندگی بالا و کاهش چقرمگی روبه‌رو هستند این ویژگی پوشش در مقاومت در برابر نفوذ یون‌های خورنده به داخل پوشش در محیط‌های اسیدسولفوریک بسیار مطلوب است اما برای بهبود خواص مکانیکی و چسبندگی این پوشش‌ها باید توسعه و پژوهش‌های درخوری صورت گیرد.
۲. پوشش پلیمر تقویت شده (سرامیک-پلیمر) با سرامیک میزان چسبندگی بالایی به زیرلایه داشتند که نتایج حاصل در آزمون جدایش پوشش از سطح زیرلایه مشاهده شد و همچنین با داشتن چقرمگی مناسب و تردی پایین به علت



6. D.G. Li, D.R. Chen, P. Liang, *Influence of oxygen content on the corrosion behaviour of 316 L stainless steel in the simulated cathodic environment of proton exchange membrane fuel cell*, *Journal of Alloys and Compounds*, **873**, 159695 (2021).
7. E.C. Hoxie, *Some Corrosion Considerations in the Selection of Stainless Steel for Pressure Vessels and Piping*, *Press. Vessel. Pip. Decad. Prog.*, 3 (1976).
8. H. Asadi, *Development and Electrochemical characterization of multifunctional polymeric coatings for corrosion mitigation in metallic biomedical implants*, (n.d.).
9. D.S. Nakonieczny, et al, *Alkali-Treated Alumina and Zirconia Powders Decorated with Hydroxyapatite for Prospective Biomedical Applications*, *Materials (Basel)*, **15**, 1390 (2022).
10. M. Nodehi, *Epoxy, polyester and vinyl ester based polymer concrete: a review*, *Innov. Infrastruct. Solut.*, **7**, 1–24 (2022).
11. S. Barbhuiya, M.I. Choudhury, *Nanoscale characterization of glass flake filled vinyl ester anti-corrosion coatings*, *Coatings*, **7**, 116 (2017).
12. A. Ghadami, M. Ehsani, H.A. Khonakdar, *Vinyl ester/glass flake nanocomposites: an overview of chemical and physical properties*, *J. Compos. Mater.*, **48**, 1585–1593 (2014).
13. ASTM A240, ASTM A 240/A 240M – 04. *Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications*, *ASTM Int. I*, 12 (2004), http://www.ussa.su/gosts2/ASTM_A240.PDF.
14. ISO 8501-4, *Preparation of steel substrates before application of paints and related products — Visual assessment of surface cleanliness — Part 4: Initial surface conditions, preparation grades and flash rust grades in connection with water jetting*, *Int. Organ. Stand.* (2022).
15. ASTM G62-14, *Standard Test Methods for Holiday Detection in Pipeline Coatings*, *Astm Int.* (2014).
16. ASTM B117-19, *Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus*, *Astm Int.* (2017).
17. A. G1-90, *Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens*, *Astm Int.* (1999).
18. ASTM D2240-15, *Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness*, *Astm Int.* (2015).
19. ASTM D4541-17, *ASTM D4541-17/ Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers*, *Astm Int.* (2017).

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

ندا رویایی، مصطفی آقازاده، مریم توسلی، محمد افخمی اردکانی، حمزه فراتی‌راد (۱۴۰۲)، ارزیابی خواص خوردگی پوشش‌های عملی بر تجهیزات فرایندی مورد استفاده در کارخانه تولید کیک زرد، ۱۰۵، ۹۷-۱۰۸

DOI: [10.24200/nst.2022.1108.1735](https://doi.org/10.24200/nst.2022.1108.1735)

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1473.html

