

بررسی اثر اکستندرهاى مختلف بر رفتار خوردگی پوشش اپوکسى روی سطح کربن استیل با استفاده از روش EIS در محلول اسید سولفوریک یک مولار

الهام عصمت پناه^۱، رضا عارفی نیا^{۲*}، فاطمه ضیایی مقدم^۳
^۱ کارشناسی ارشد، ^۲ دانشیار، ^۳ دکتری، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
* نویسنده مسئول: arefinia@um.ac.ir

تاریخ ارسال: ۱۴۰۰/۱۲/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۰

چکیده

پوشش‌های ضد خوردگی بر پایه رزین اپوکسی حاوی اکستندرهاى مختلف تالک، دی اکسید سیلیسیم و باریم سولفات تهیه و بر روی سطح کربن استیل اعمال شد. رفتار خوردگی این سیستم‌های پوششی، در محلول اسید سولفوریک یک مولار با استفاده از روش طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی^۲ (EIS) با زمان مورد بررسی قرار گرفت. رفتار ضد خوردگی پوشش‌ها با استفاده از داده‌های EIS و مدل‌های مدار معادل شبیه‌سازی شد. تغییرات پارامترهای پوشش و لایه دوگانه نشان داد که توانایی حفاظت پوشش اپوکسی دارای اکستندرهاى مختلف در برابر خوردگی به ترتیب زیر است: تالک < دی اکسید سیلیسیم < بدون اکستندر < سولفات باریم

کلیدواژه: اپوکسی، تالک، سولفات باریم، دی اکسید سیلیسیم، طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی

1- extenders

2- electrochemical impedance spectroscopy

Investigation the Effect of Different Extenders on the Anticorrosion Behavior of Epoxy Coating on the Surface of Carbon Steel by EIS Method in 1 M Sulfuric Acid

E. Esmatpanah¹, R. Arefinia^{2*}, F. ZiaeiMoghaddam³

¹ MSc, ² Associate Professor, ³ PhD, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

* **Corresponding Author:** arefinia@um.ac.ir

Submission: 2022, 03, 11 **Acceptance:** 2022, 06, 10

Abstract

Anti-corrosion coatings based on the epoxy resin blending with different extenders including talc, silicon dioxide and barium sulfate were prepared and applied on the carbon steel surface. The corrosion behavior of these coating systems versus the immersion time in 1M sulfuric acid was investigated by using electrochemical impedance spectroscopy (EIS) method. The anti-corrosion behavior of the coatings was simulated using EIS data and the appropriate equivalent circuit models. Variation of the coating and double layer parameters showed that the protective strength of the epoxy coating blending with different extenders against corrosion is as the following sequence: Talc > Silicon dioxide > without extender > Barium sulfate

Keywords: Epoxy, Talc, Barium sulfate, Silicon dioxide, Electrochemical impedance spectroscopy

۱- مقدمه

خوردگی یک مشکل بسیار جدی است که اثرات آن را می توان به محض قرار گرفتن یک فلز در محیط مرطوب و یا اسیدی مشاهده کرد. برای جلوگیری از تخریب زود هنگام فلزات در اثر خوردگی، محققان زیادی در حال یافتن راه های جدیدی برای مقابله با این مشکل هستند [۱]. با پیشرفت قابل توجه در فناوری های حفاظت از خوردگی، بسیاری از تکنیک های جدید برای افزایش طول عمر فلزات در حال توسعه است. برخی از روش های بهبود یافته که امروزه برای محافظت از فلزات در برابر خوردگی استفاده می شوند. استفاده از پوشش های پلیمری یک راهکار اقتصادی و پرکاربرد جهت محافظت از فلز در برابر عوامل خوردنده است و می تواند موجب حفاظت فلزات در برابر خوردگی شود [۲]. این پوشش ها معمولاً با ایجاد یک مانع فیزیکی بین فلز و محیط خوردنده از فلز محافظت می کنند. بنابراین، افزایش مقاومت این پوشش ها منجر به کاهش نفوذ یون های خوردنده به سمت زیر لایه فلزی می شود [۳ و ۴]. پوشش اپوکسی به دلیل چسبندگی قوی به سطح و دوام عالی برای کاربردهای صنعتی در سطح وسیعی مورد استفاده قرار می گیرد [۵]. مهم ترین کاربرد پوشش های اپوکسی برای جلوگیری از خوردگی فلزات می باشد. پوشش اپوکسی از فلزات در برابر خوردگی، تخریب ناشی از رطوبت، یا قرار گرفتن در معرض مواد شیمیایی صنعتی محافظت و به عنوان یک مانع از تماس ترکیبات شیمیایی و عوامل خوردنده با زیر لایه عمل می کند [۶ و ۷].

عملکرد اصلی اکستندرها (به عنوان مواد ارزان قیمت) در پوشش های آلی، افزایش ویسکوزیته پوشش است. اگرچه، افزودن اکستندر مناسب به پوشش های آلی یک راهکار مفید و رایج برای افزایش خواص سدکنندگی پوشش است. این مواد سبب کاهش نفوذپذیری در برابر آب و اکسیژن در پوشش خشک می شوند. علاوه بر این، مقاومت در برابر ضربه و مقاومت در برابر سایش را نیز بهبود می دهند [۸ - ۱۰].

دی اکسید سیلیسیم طبیعی یا سنتز شده به عنوان اکستندر در ساخت پوشش های صنعتی کاربرد دارد [۱۱]. آصف^۱ و همکاران [۱۲] گزارش کردند که افزودن ۵ درصد وزنی از اکستندر دی اکسید سیلیسیم مقاومت به خوردگی پوشش اپوکسی را تا حد زیادی بهبود می بخشد. عمار^۲ و همکاران [۱۳] اثر افزودن دی اکسید سیلیسیم را بر خواص ضد خوردگی بررسی کردند و براساس آزمون های EIS نتیجه گرفتند که مقاومت به خوردگی پوشش افزایش می یابد. علاوه بر این، افزودن دی اکسید سیلیسیم موجب بهبود چسبندگی و افزایش خواص آبگریزی پوشش اپوکسی می شود [۱۴ و ۱۵].

از اکستندر باریم سولفات برای افزایش خواص ضد ته نشینی و سنباده خوری پوشش های صنعتی استفاده می شود [۱۱]. لورستیا^۳ و همکاران [۱۶ و ۱۷]. گزارش کردند که افزودن باریم سولفات به پوشش اپوکسی موجب افزایش محافظت زیر لایه در برابر اشعه ایکس می شود.

تالک یک ماده معدنی آبگریز است که خواص سنباده زنی و چسبندگی پوشش ها را افزایش می دهد [۱۱ و ۱۸]. اکستندر تالک دارای ویژگی های منحصر به فردی مانند پایداری حرارتی بالا، مقاومت شیمیایی مناسب، استحکام بالا، مقاومت خوب در برابر خوردگی و دمای بالا می باشد. همچنین، تالک می تواند نفوذپذیری فیلم را کاهش دهد و آب و اکسیژن را وادار کند تا برای رسیدن به سطح فلز، مسیر طولانی تری را طی کنند و یکی از اکستندرهاى بسیار پرکاربرد در تولید پوشش های صنعتی است [۱۹-۲۱]. لیو^۴ و همکاران [۲۲]، اثر اکستندر تالک را بر خواص ضد خوردگی پوشش اپوکسی مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند که مقاومت خوردگی پوشش افزایش می یابد. حبیب^۵ و همکاران [۲۳] خواص ضد خوردگی ذرات تالک اصلاح شده با نیترات سدیم در پوشش اپوکسی را مورد بررسی قرار دادند، و گزارش کردند که افزودن ۳ درصد وزنی از تالک باعث بهبود مقاومت به خوردگی و بهبود خواص خود ترمیم شوندگی می شود.

شرکت Autolab مدل PGSTAT-302N و سل الکتروشیمیایی شیشه‌ای محتوی حدود ۶۰ میلی‌لیتر اسید سولفوریک یک مولار انجام شد. در این آزمون‌ها از الکتروود کالومل اشباع^۱ (SCE) و الکتروود گرافیت به ترتیب به عنوان الکتروود مرجع و الکتروود کمکی استفاده شد و فلز کربن استیل به عنوان الکتروود کار در نظر گرفته شد. پس از ثابت شدن پتانسیل مدار باز^۲ (OCP) آزمون EIS با دامنه تغییرات پتانسیل برابر ۱۰ میلی ولت نسبت به OCP از فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز تا ۰/۰۱ هرترتز برای مدت ۱۰ روز غوطه‌وری انجام شد.

۳- نتایج و بحث

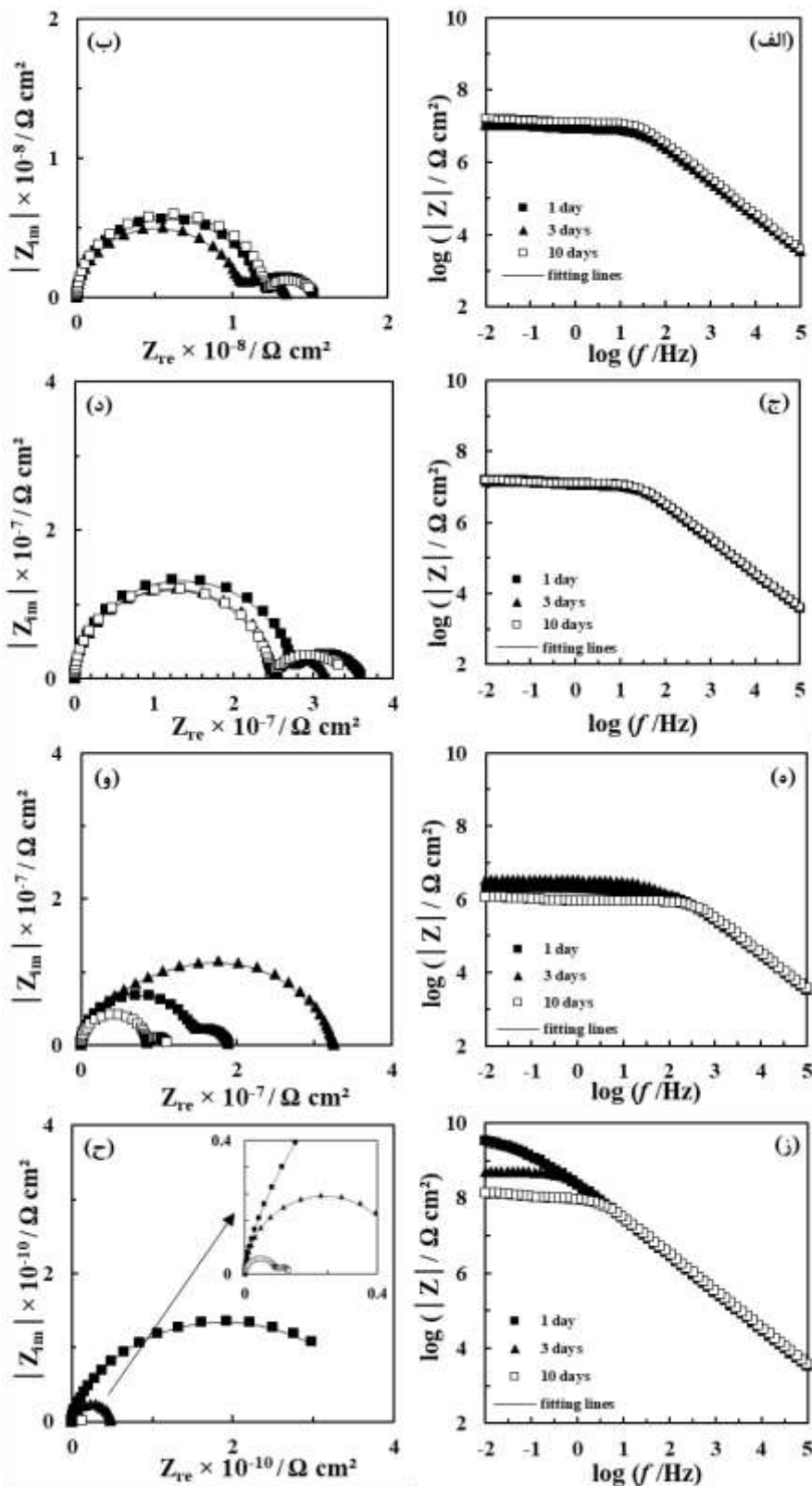
بررسی اثر اکستندره‌های مختلف بر خواص ضد خوردگی پوشش اپوکسی با استفاده از آزمون EIS انجام شد. نتایج حاصل از این آزمون بصورت نمودارهای نایکوئیست و بد، برای پوشش اپوکسی بدون اکستندر و پوشش‌های اپوکسی دارای اکستندره‌های تالک، دی اکسید سیلیسیم و باریم سولفات در محلول اسید سولفوریک یک مولار در زمان‌های مختلف (۱، ۳ و ۱۰ روز) در شکل ۱ نشان داده شده است. نمودار نایکوئیست برای پوشش‌های بدون اکستندر، دی اکسید سیلیسیم و سولفات باریم از روز اول تا روز دهم غوطه‌وری بصورت دو نیم دایره و یا یک نیم دایره بزرگتر که در واقع از دو نیم دایره کوچکتر تشکیل شده است، می‌باشد اما نمودار نایکوئیست برای پوشش تالک در روز اول و سوم غوطه‌وری بصورت یک نیم دایره مشاهده می‌شود. نمودارهای تک حلقه نشان می‌دهند که اجزای خورنده محلول نتوانسته‌اند خود را به سطح فلز برسانند. در حالی که در نمودارهای دو حلقه، اجزای خورنده به سطح مشترک بین فلز و پوشش رسیده‌اند و خوردگی فلز شروع می‌شود. بنابراین، نمودارهای نایکوئیست در شکل ۱ نشان می‌دهد که بصورت کیفی پوشش اپوکسی اصلاح‌شده با اکستندر تالک دارای بهترین مقاومت به خوردگی هست.

تا به امروز محققان زیادی پوشش اپوکسی دارای اکستندره‌های مختلف را در محلول سدیم کلرید بررسی کرده‌اند. اما بررسی منابع علمی نشان می‌دهد که اثر اکستندرها بر مقاومت به خوردگی پوشش اپوکسی در محیط اسیدی با آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) تاکنون با دقت بررسی نشده است. در این پژوهش، پوشش‌های اپوکسی با اکستندره‌های مختلف شامل تالک، سولفات باریم و دی اکسید سیلیسیم ترکیب و روی سطح فلز کربن استیل اعمال شد. سپس عملکرد ضد خوردگی آن‌ها با استفاده از آزمون EIS به مدت ۱۰ روز غوطه‌وری در اسید سولفوریک یک مولار بررسی شد.

۲- مواد و روش تحقیق

برای ساخت پوشش‌ها از رزین اپوکسی ایران ۰۱ تهیه شده از شرکت پتروشیمی خوزستان با نام تجاری E01X75 و خلوص ۷۵ درصد وزنی استفاده شد. اکستندره‌های مختلف شامل: دی اکسید سیلیسیم، تالک و باریم سولفات از شرکت‌های محلی با گرید صنعتی تهیه و هر کدام جداگانه به مقدار ۵ درصد وزنی به رزین افزوده و با همزن مکانیکی مخلوط شد. هاردنر آمیدی با نام تجاری کرای آمید (CRAYAMID 115) ساخت شرکت آرکما فرانسه به عنوان عامل سخت‌کننده با نسبت گروه‌های ایزوسیانات به هیدروکسیل ۱/۱ استفاده شد. ورقه‌های کربن استیل st37 به ابعاد ۷×۷ سانتی‌متر و با ضخامت ۲ میلی‌متر با استفاده از سنباده با شماره ۱۲۰ تا ۲۰۰۰ پولیش و سپس با آب مقطر شست و شو داده شدند. پوشش‌ها روی ورقه‌های فولادی به روش پاششی به وسیله پیستوله بادی اعمال شد. نمونه‌های پوشش داده شده برای پخت به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط قرار گرفتند و سپس به منظور پخت کامل به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. بعد از ضخامت‌سنجی، نمونه‌های با ضخامت تقریبی 70 ± 5 میکرون برای انجام آزمون‌های EIS انتخاب شدند. آزمون EIS با استفاده از دستگاه پتانسیواستات - گالوانواستات

1- saturated calomel electrode
 2- open circuit potential



شکل ۱ - نمودارهای نایکوئیست و بد پوشش اپوکسی ساخته شده با اکستندرهاى مختلف: (الف، ب) بدون اکستندر، (ج، د) دی اکسید سیلیسیم (و، ه) باریم سولفات (ز، ح) تالک غوطه‌ور شده در محلول اسید سولفوریک یک مولار در زمان‌های مختلف.

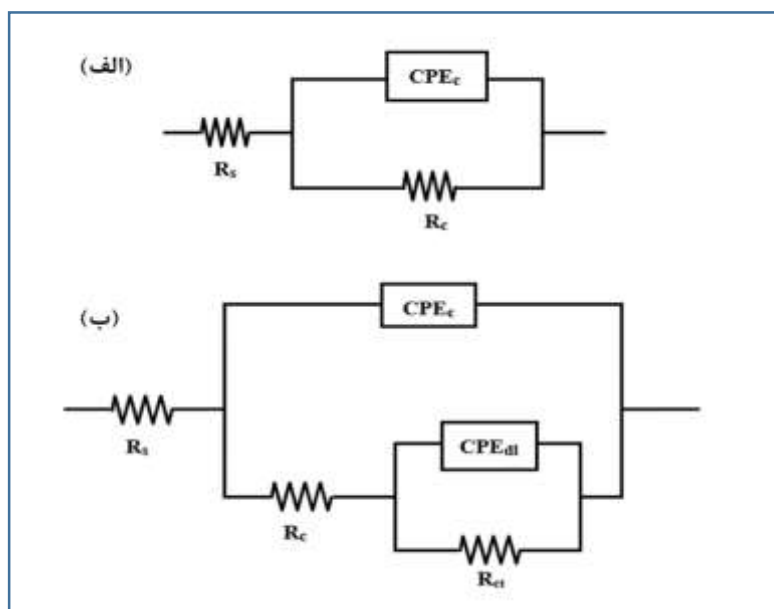
$$Z_{CPE} = (Y(j\omega)^n)^{-1} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه Y ضریب ادمیتانس (معادل هدایت الکتریکی)، ω فرکانس زاویه‌ای، n ثابت توانی و پارامتر ناهمواری سطح می‌باشد. Z عدد مبهم و برابر با $\sqrt{-1}$ است. با توجه به این رابطه مقدار خالص ظرفیت خازنی، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$C = (Y/R^{n-1})^{1/n} \quad \text{رابطه (۲)}$$

نتایج حاصل از شبیه‌سازی داده‌های آزمون EIS با استفاده از مدل‌های مدار معادل و تعیین پارامترهای امپدانس پوشش شامل R_c ، C_c و n_c و پارامترهای مربوط به لایه دوگانه شامل R_{ct} ، C_{dl} و n_{dl} در جدول‌های ۱ تا ۴ ارائه شده است.

برای بررسی رفتار ضد خوردگی پوشش‌های اپوکسی دارای اکستندرهاى مختلف، سیستم با استفاده از مدل‌های مدار معادل^۱ (ECM) شبیه‌سازی شد. نتایج به‌دست‌آمده از آزمون‌های EIS توسط ECM‌های نشان داده شده در شکل ۲ در نرم‌افزار Zview مورد بررسی قرار گرفت. مدار معادل الکتریکی تک حلقه که دارای یک ثابت زمانی است (شکل ۲الف) برای شبیه‌سازی رفتار ضد خوردگی پوشش سالم استفاده شد. مدار معادل الکتریکی دو حلقه که دارای دو ثابت زمانی است (شکل ۲ب) برای پوشش‌های آسیب دیده که نمودار نایکوئیست آن‌ها دارای دو نیم دایره است، مورد استفاده قرار گرفت. در این مدل‌ها، پارامترهای R_c ، R_{ct} و C_{dl} به ترتیب بیانگر مقاومت محلول، مقاومت پوشش و مقاومت انتقال بار می‌باشند. دو پارامتر CPE_c و CPE_{dl} به ترتیب بیانگر عنصر فاز ثابت^۲ برای پوشش و برای لایه دوگانه است. رابطه امپدانس برای CPE به صورت زیر است:



شکل ۲ - مدل‌های مدار معادل مورد استفاده در شبیه‌سازی نتایج آزمون‌های EIS. (الف) مدار تک حلقه و (ب) مدار دو حلقه

1- equivalent circuit model
2- constant phase element

جدول ۱ - مقدار پارامترهای امیدانس برای پوشش اپوکسی بدون اکستندر غوطه ور شده در محلول اسید سولفوریک یک مولار.

C_{dl} ($F.cm^{-2}$)	CPE_{dl}		R_{ct} ($\Omega.cm^2$)	C_c ($F.cm^{-2}$)	CPE_c		R_c ($\Omega.cm^2$)	مدت زمان غوطه‌وری (روز)
	n_{dl}	Y_{dl}			n_c	Y_c		
$1/5 \times 10^8$	۰/۸۲	$2/0 \times 10^7$	$8/3 \times 10^6$	$4/9 \times 10^{-11}$	۰/۹۹	$4/3 \times 10^{10}$	$2/3 \times 10^7$	۱
$7/9 \times 10^8$	۰/۸۲	$8/0 \times 10^7$	$7/1 \times 10^6$	$5/0 \times 10^{-11}$	۰/۹۹	$4/6 \times 10^{10}$	$2/8 \times 10^7$	۳
$4/67 \times 10^7$	۰/۸۰	$3/22 \times 10^6$	$8/48 \times 10^6$	$5/10 \times 10^{-11}$	۰/۹۸	$4/99 \times 10^{10}$	$2/31 \times 10^7$	۱۰

جدول ۲ - مقدار پارامترهای امیدانس برای پوشش اپوکسی دارای ۵ درصد وزنی دی اکسید سیلیسیم در محلول اسید سولفوریک یک مولار.

C_{dl} ($F.cm^{-2}$)	CPE_{dl}		R_{ct} ($\Omega.cm^2$)	C_c ($F.cm^{-2}$)	CPE_c		R_c ($\Omega.cm^2$)	مدت زمان غوطه‌وری (روز)
	n_{dl}	Y_{dl}			n_c	Y_c		
$8/6 \times 10^9$	۰/۸۰	$1/0 \times 10^7$	$3/4 \times 10^7$	$5/5 \times 10^{-11}$	۰/۹۸	$5/5 \times 10^{10}$	$1/1 \times 10^8$	۱
$3/6 \times 10^8$	۰/۸۰	$3/2 \times 10^7$	$3/0 \times 10^7$	$5/7 \times 10^{-11}$	۰/۹۸	$5/7 \times 10^{10}$	$1/0 \times 10^8$	۳
$1/2 \times 10^7$	۰/۸۰	$8/7 \times 10^7$	$3/0 \times 10^7$	$5/7 \times 10^{-11}$	۰/۹۸	$5/7 \times 10^{10}$	$1/1 \times 10^8$	۱۰

جدول ۳ - مقادیر عددی پارامترهای امیدانس برای پوشش اپوکسی دارای ۵ درصد وزنی باریم سولفات در محلول اسید سولفوریک یک مولار.

C_{dl} ($F.cm^{-2}$)	CPE_{dl}		R_{ct} ($\Omega.cm^2$)	C_c ($F.cm^{-2}$)	CPE_c		R_c ($\Omega.cm^2$)	مدت زمان غوطه‌وری (روز)
	n_{dl}	Y_{dl}			n_c	Y_c		
$9/7 \times 10^9$	۰/۷۸	$1/8 \times 10^7$	$3/9 \times 10^6$	$5/4 \times 10^{-11}$	۰/۹۷	$5/9 \times 10^{10}$	$1/3 \times 10^7$	۱
$5/4 \times 10^8$	۰/۷۵	$8/0 \times 10^7$	$2/7 \times 10^6$	$6/3 \times 10^{-11}$	۰/۹۷	$7/0 \times 10^{10}$	$9/9 \times 10^6$	۳
$7/1 \times 10^7$	۰/۷۵	$5/4 \times 10^6$	$2/7 \times 10^6$	$7/3 \times 10^{-11}$	۰/۹۷	$8/3 \times 10^{10}$	$7/9 \times 10^6$	۱۰

جدول ۴ - مقادیر عددی پارامترهای امیدانس برای پوشش اپوکسی دارای ۵ درصد وزنی تالک در محلول اسید سولفوریک یک مولار.

C_{dl} ($F.cm^{-2}$)	CPE_{dl}		R_{ct} ($\Omega.cm^2$)	C_c ($F.cm^{-2}$)	CPE_c		R_c ($\Omega.cm^2$)	مدت زمان غوطه‌وری (روز)
	n_{dl}	Y_{dl}			n_c	Y_c		
-	-	-	-	$5/5 \times 10^{-11}$	۰/۹۸	$5/0 \times 10^{10}$	$3/2 \times 10^{10}$	۱
-	-	-	-	$6/1 \times 10^{-11}$	۰/۹۷	$5/7 \times 10^{10}$	$3/8 \times 10^9$	۳
$7/0 \times 10^8$	۰/۸۵	$8/7 \times 10^7$	$3/8 \times 10^8$	$6/1 \times 10^{-11}$	۰/۹۷	$6/0 \times 10^{10}$	$8/9 \times 10^8$	۱۰

گرفت که میزان یکنواختی پوشش اپوکسی با افزودن اکستندر کاهش می‌یابد. کمترین مقدار n_c مربوط به پوشش تهیه شده با سولفات باریم است که با نتایج حاصل از پارامترهای R_c و C_c برای این اکستندر مطابقت دارد. احتمالاً افزودن سولفات باریم به مقدار ۵ درصد وزنی موجب افزایش غیریکنواختی و تخلخل در پوشش اپوکسی و در نتیجه افزایش نفوذ عوامل خوردنده (C_c) و کاهش مقاومت (R_c) شده است.

مقدار مقاومت لایه دوگانه R_{ct} برای همه پوشش‌ها با گذشت زمان کاهش یافته است و نشان می‌دهد که الکترولیت به درون پوشش نفوذ کرده و به سطح فلز رسید و خوردگی فلز اتفاق افتاده است. روند تغییرات R_{ct} مشابه روند تغییرات R_c می‌باشد و بیشترین مقدار R_c و بیشترین مقدار R_{ct} مربوط به پوشش اپوکسی دارای تالک است.

روند تغییرات ظرفیت خازنی لایه دوگانه نشان می‌دهد، با گذشت زمان مقدار C_{dl} که در واقع معیاری از میزان نفوذ عوامل خوردنده در زیرلایه می‌باشد، افزایش یافته است. با مقایسه نتایج موجود در جدول‌های ۱ تا ۴ می‌توان فهمید: مقدار C_{dl} برای پوشش اپوکسی تهیه شده با تالک کمترین است که با نتایج R_{ct} مطابقت دارد و نشان می‌دهد بیشترین مقدار R_{ct} مربوط به پوشش دارای تالک است که کمترین مقدار نفوذ آب (C_{dl}) را نیز دارد. به عبارت دیگر نفوذ یون‌های خوردنده سبب افزایش سرعت خوردگی و تجمع محصولات خوردگی و در نتیجه افزایش مقدار C_{dl} بواسطه افزایش ثابت دی‌الکتریک شده است.

برای پوشش‌های مختلف، مقدار n_{dl} با گذشت زمان غوطه‌وری کاهش می‌یابد. این پارامتر نشان دهنده تجمع محصولات خوردگی می‌باشد و نتایج حاصل از پارامتر n_{dl} روند تغییرات R_{ct} و C_{dl} را تأیید می‌کند. زیرا پوشش با کمترین مقدار مقاومت لایه دوگانه (R_{ct}) و بیشترین مقدار ظرفیت خازنی (C_{dl}) دارای بیشترین مقدار تجمع محصولات خوردگی (کمترین مقدار n_{dl}) است. بررسی‌های انجام شده نشان داد که بیشترین مقاومت پوششی و مقاومت لایه دوگانه مربوط به پوشش اپوکسی تهیه شده از تالک است که کمترین مقدار جذب آب یعنی کمترین مقدار C_c را دارد.

بر اساس جدول‌های ۱ تا ۴ بالا مشاهده می‌شود، مقدار R_c برای پوشش‌های تهیه شده با گذشت زمان کاهش یافته است. مقدار R_c با گذشت زمان برای پوشش اپوکسی دارای اکستندر تالک در ابتدای غوطه‌وری زیاد است اما پس از آن کاهش می‌یابد و مقدار مقاومت این پوشش در تمام روزهای غوطه‌وری همواره بیشتر از مقاومت سایر پوشش‌ها است. پوشش اپوکسی تهیه شده با دی‌اکسید سیلیسیم بعد از تالک بهترین عملکرد در افزایش مقاومت به خوردگی پوشش را دارد و مقاومت با گذشت زمان تغییر چشمگیری نداشته است. همانطور که جدول ۳ مشاهده می‌شود مقاومت پوشش اپوکسی دارای اکستندر سولفات باریم در تمام روزهای غوطه‌وری همواره کمتر از سایر پوشش‌های دارای اکستندر و حتی پوشش بدون اکستندر می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد که احتمالاً چسبندگی بین ذرات تالک و پوشش اپوکسی بیشتر از سایر ذرات است و این سبب می‌شود مقاومت سدکنندگی پوشش نسبت به سایر پوشش‌های بیشتر باشد.

تغییرات پارامتر C_c پوشش‌های ساخته شده با زمان نشان می‌دهد، که برای همه پوشش‌ها، روند تغییرات با زمان بصورت افزایشی است. در واقع با گذشت زمان میزان نفوذ آب در پوشش افزایش می‌یابد و منجر به افزایش ثابت دی‌الکتریک و در نتیجه افزایش ظرفیت خازنی پوشش می‌شود. علاوه بر این، مقدار C_c برای پوشش بدون اکستندر همواره کمتر از پوشش‌های دارای اکستندر است و می‌توان نتیجه گرفت که احتمالاً افزودن اکستندر به پوشش اپوکسی موجب افزایش ثابت دی‌الکتریک و ظرفیت خازنی پوشش می‌شود. مقدار C_c برای پوشش اپوکسی تهیه شده از سولفات باریم بیشتر از سایر پوشش‌ها می‌باشد و در روز دهم غوطه‌وری بیشترین مقدار C_c را دارد. از نتایج بدست آمده دریافت می‌شود که روند تغییرات ظرفیت خازنی کاملاً با روند تغییرات مقاومت پوشش منطبق است و پوشش با کمترین مقدار R_c ، دارای بیشترین مقدار C_{dl} است زیرا مقدار آب بیشتری نسبت به سایر پوشش‌ها در آن نفوذ کرده است. تغییرات پارامتر n_c که معیاری از یکنواختی پوشش است با گذشت زمان کاهش یافته است و افزودن اکستندر به پوشش موجب کاهش مقدار n_c شده است. بنابراین، می‌توان نتیجه

نتیجه گیری

در این پژوهش اثر اکستندرهاى مختلف بر رفتار ضد خوردگی پوشش اپوکسى اعمال شده بر روى سطح استیل کربنى در طول ۱۰ روز غوطه وری در محلول اسید سولفوریک یک مولار بررسی شد. نتایج حاصل از آزمون‌های EIS و شبیه سازی توسط مدل‌های مدار معادل نشان داد:

- پوشش اپوکسى ترکیب شده با سولفات باریم نسبت به نمونه بدون اکستندر مقاومت کمتری نشان داد. می‌توان گفت احتمالاً مقدار ۵ درصد وزنى از سولفات باریم موجب افزایش غیر یکنواختی و تخلخل در پوشش می‌شود که می‌تواند موجب افزایش نفوذ آب و سرعت خوردگی شود.
- مقاومت به خوردگی پوشش اپوکسى دارای اکستندر تالک نسبت به مقاومت پوشش‌های دارای اکستندرهاى دیگر بیشتر است. دلیل آن را می‌توان به چسبندگی بیستر بین ذرات تالک با پوشش اپوکسى مرتبط دانست. علاوه بر این، مورفولوژی صفحه ای ذرات تالک بگونه ای است که سبب کاهش نفوذ مولکول‌های الکترولیت درون پوشش می‌شود. بنابراین، سرعت خوردگی فلز نیز کاهش می‌یابد.
- بررسی پارامترهای بدست آمده از شبیه سازی نتایج EIS نشان داد که با افزایش زمان غوطه وری، الکترولیت و عوامل خوردنده داخل پوشش‌ها نفوذ کرده و با تجمع محصولات خوردنده در زیر لایه باعث ایجاد خوردگی در پوشش‌ها می‌شود. با بررسی‌های انجام شده می‌توان، نتیجه گرفت که بیشترین مقاومت پوششی و مقاومت لایه دوگانه و کمترین مقدار ظرفیت خازنی پوشش و لایه دوگانه مربوط به پوشش اپوکسى تهیه شده از تالک است. بعد از آن پوشش اپوکسى تهیه شده از دی اکسید سیلیسیم، پوشش بدون اکستندر و در آخر پوشش تهیه شده از باریم سولفات است.

تشکر و قدردانی:

از شرکت برق منطقه‌ای خراسان رضوی برای حمایت مالی در تهیه مواد آزمایشگاهی و شرکت گاز استان خراسان رضوی برای ایجاد زمینه مناسب برای انجام آزمون‌های الکتروشیمیایی سپاسگزاری می‌شود.

مراجع

- [1] A.K, Hussain., A review on graphene-based polymer composite coatings for the corrosion protection of metals. *Corrosion Reviews*, Vol. 37, No. 4, 2019, Pp. 343-363.
- [2] C, Peng., Z. Chen, and M.K. Tiwari, All-organic superhydrophobic coatings with mechanochemical robustness and liquid impalement resistance. *Nature materials*, Vol. 17, No. 4, 2018, Pp. 355-360
- [3] U, Rammelt., and G. Reinhard, Application of electrochemical impedance spectroscopy (EIS) for characterizing the corrosion-protective performance of organic coatings on metals. *Progress in Organic Coatings*, Vol. 21, No. 2, 1992, Pp. 205-226.
- [4] D, Chattopadhyay., and R.V. Kothapalli, Structural engineering of polyurethane coatings for high performance applications. *Progress in Polymer Science*, Vol. 32, 2007, Pp. 418-352.
- [5] E, Thostenson., and T.-W. Chou, Microwave processing: fundamentals and applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 30, No. 9, 1999, Pp. 1055-1071.
- [6] H.Q, Pham., and M.J. Marks, Epoxy resins. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 2000
- [7] A, Mahmoodi., M. Ebrahimi, and A. Khosravi, Epoxy/nanopigment coatings: preparation and evaluation of physical-mechanical properties. *Progress in Organic Coatings*, Vol. 119, 2018, Pp. 164-170.
- [8] Mazandarani, M., *Technology of paint and resin*. 2013: Pioneer.
- [9] B, Müller., and U. Poth, *Coatings formulation*. 2011: Vincentz Network Hanover.

-
- [10] Talbert, R., Paint technology handbook. 2007: CRC press .
- [11] V, Mannari, and C.J. Patel, Understanding Coatings Raw Materials. 2015: Vincentz Network.
- [12] M.A, Alam., Influence of SiO₂ content and exposure periods on the anticorrosion behavior of epoxy nanocomposite coatings. Coatings, Vol. 10, No. 2, 2020, Pp. 118.
- [13] S, Ammar., Studies on SiO₂-hybrid polymeric nanocomposite coatings with superior corrosion protection and hydrophobicity. Surface and Coatings Technology, Vol. 324, 2017, Pp. 536-545.
- [14] M, Puig., Adhesion enhancement of powder coatings on galvanised steel by addition of organo-modified silica particles. Progress in Organic Coatings, Vol. 77, No. 8, 2014, Pp. 1309-1315.
- [15] S, Ammar., A novel coating material that uses nano-sized SiO₂ particles to intensify hydrophobicity and corrosion protection properties. Electrochimica Acta, Vol. 220, 2016, Pp. 417-426.
- [16] M, Lopresti., Light Weight, Easy Formable and Non-Toxic Polymer-Based Composites for Hard X-ray Shielding: A Theoretical and Experimental Study. International Jou