

اثر مقدار میکروکپسول‌های اتیل سلولز بر مقاومت به خوردگی پوشش خودترمیم‌شونده پایه پلی‌اورتان

سوگند عباسپور، علی اشرفی*، مهدی صالحی

اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مواد

راضیه سهیلی

تهران، شرکت ملی پخش فرآورده‌های نفتی ایران

چکیده: در این پژوهش، میکروکپسول‌های اتیل سلولز دارای روغن بزرک به روش امولسیون‌سازی - تبخیر حلال تهیه شدند. میکروکپسول‌های تهیه شده با هدف ایجاد پوشش خودترمیم‌شونده درون زمینه پلی‌اورتان قرار گرفته و بر روی فولاد پوشش داده شدند. به منظور بررسی اثر مقدار میکروکپسول‌های اتیل سلولز دارای روغن بزرک بر رفتار خودترمیم‌شوندگی پوشش تولید شده، پوشش پلی‌اورتان دارای مقدارهای گوناگون از میکروکپسول‌های تهیه شده، به روش پاشش بر زیرلایه فولاد ساده کربنی اعمال شد. مشخصه یابی هسته میکروکپسول‌های تهیه شده توسط آزمون FT-IR انجام شد و اندازه‌ها و شکل میکروکپسول‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد بررسی قرار گرفت. اندازه‌های میانگین کپسول‌های تهیه شده در حدود ۳۰۰ میکرون تعیین شد. عملکرد خودترمیم‌شوندگی و مقاومت به خوردگی پوشش‌ها، توسط آزمون‌های پلاریزاسیون خطی (LP) و امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) بر روی نمونه‌های با خراش اولیه، انجام شد. نتیجه‌های بررسی‌ها نشان داد که در کلیه مقدارهای میکروکپسول، عملکرد خودترمیم‌شوندگی پوشش ایجاد شده است. افزون بر این، با افزایش مقدار میکروکپسول‌های اتیل سلولز دارای روغن بزرک در زمینه پلی‌اورتان، مقاومت به خوردگی پوشش تولید شده افزایش و خاصیت خودترمیم‌شوندگی نیز بهبود یافته است.

واژه‌های کلیدی: پوشش خودترمیم‌شونده؛ میکروکپسول اتیل سلولز؛ روغن بزرک؛ مقاومت به خوردگی.

KEYWORDS: Self-healing coating; Ethyl cellulose microcapsule; Linseed oil; Corrosion resistance.

مقدمه

پوشش‌ها ممکن است منجر به از دست رفتن حفاظت خوردگی یا حتی ایجاد شرایط حادثه‌تری نسبت به حالت بدون پوشش شود. استفاده از پوشش‌های هوشمند، با قابلیت پاسخگویی مناسب در برابر آسیب‌های مکانیکی / شیمیایی یا حتی تغییرهای محیطی، می‌تواند یک راه حل نوین برای بسیاری از این مشکل‌ها باشد.

خوردگی همواره مشکلی بزرگ برای بسیاری از صنایع به شمار رفته و منجر به تخریب تجهیزات و خسارت‌های زیادی می‌شود. در بسیاری از موردها، اعمال پوشش، به ویژه پوشش آلی، بهترین و ارزان‌ترین روش برای مقابله با خوردگی می‌باشد. با این وجود، سایش، وقوع خراش و سایر آسیب‌ها و عیب‌های

*عهده دار مکاتبات

+E-mail: ashrafi@cc.iut.ac.ir

ایجاد قابلیت خودترمیم‌شوندگی در پوشش، روشی برای هوشمند ساختن آن و افزایش عمر مواد به شمار می‌رود [۱]. مواد خودترمیم‌شونده می‌توانند مانع پیشروی عیوب پوشش شده و از این‌رو دوام و عمر پوشش را بهبود داده و هزینه تعمیر و نگهداری را کاهش دهند. تاکنون روش‌های بسیاری برای طراحی مواد با ویژگی‌های خودترمیم‌شوندگی در شرایط بارگذاری دینامیک و استاتیک ارائه شده است [۲،۳].

متداول‌ترین استراتژی برای ایجاد خاصیت خودترمیم‌شوندگی، به کارگیری میکروکپسول‌ها است. این کپسول‌ها به طور یکنواخت در زمینه پلیمری توزیع شده و در موقعیت‌های مناسب، مانند ایجاد خراش بر روی پوشش، عامل درون میکروکپسول‌ها خارج شده و با واکنش با محیط و یا مواد فعال درون پوشش، باعث ترمیم قسمت‌های آسیب دیده پوشش می‌شود [۴]. در به کارگیری فناوری میکروکپسوله کردن از مواد گوناگون مانند: اوره‌فرمالدئید [۵،۶،۷]، پلی‌اوره‌فرمالدئید [۸،۹] و پلی‌اورتان [۱۰]، ملامین (اوره‌فرمالدئید) [۱۱] و اپوکسی [۱۲،۱۳] به عنوان پوسته میکروکپسول‌ها استفاده می‌شود.

در این پژوهش، ابتدا تولید پوشش خودترمیم‌شونده پایه پلی‌اورتان دارای میکروکپسول‌های اتیل سلولز با هسته روغن بزرک مورد پژوهش قرار گرفته است. پس از آن، اثر مقدار این میکروکپسول‌ها بر عملکرد خوردگی و خودترمیم‌شوندگی پوشش تولید شده مورد بررسی قرار گرفته است.

بخش تجربی

مواد

برای ساخت میکروکپسول‌های اتیل سلولز دارای روغن بزرک از اتیل سلولز ویسکوزیته بالا (ساخت هند)، بنزن، اتانول، نیتریک اسید ۶۵ درصد، پلی اتیلن گلیکول گرید ۴۰۰۰ (ساخت شرکت مرک)، روغن بزرک (ساخت شرکت سیگما آلدریج) و سدیم دودسیل سولفات (ساخت شرکت سیناژن ایران) استفاده شد.

تهیه میکروکپسول‌های اتیل سلولز دارای روغن بزرک و تولید پوشش خودترمیم‌شونده

میکروکپسول‌های اتیل سلولز دارای روغن بزرک، با روش دو مرحله ای امولسیون - تبخیر حلال تولید شدند در مرحله اول، محلول پلیمری با استفاده از ۴/۸۵ گرم اتیل سلولز و ۲۲/۵ گرم بنزن و ۴ گرم اتانول به عنوان حلال و ۱۰ گرم روغن بزرک به عنوان ماده هسته کپسول ها تهیه شد. در مرحله بعد، محلول آبی شامل محلول یک هزارم نرمال نیتریک اسید به منظور تنظیم pH و ۰/۱۸ گرم پلی اتیلن گلیکول و ۰/۱۲ گرم سدیم دودسیل سولفات به عنوان عامل سطحی ساز تهیه شده به محلول پلیمری افزوده شده

در سال‌های اخیر، استفاده از پلیمرهای طبیعی از نظر خاصیت سازگاری با محیط توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. اتیل سلولز به‌طور عمده به عنوان ماده پلیمری آب‌گریز برای کاربردهای رهایش دارو و سایر سامانه‌های رسانش تقویت شده، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این پلیمر زیست‌سازگار به تازگی برای کپسوله کردن سایر مواد با کاربردهای گوناگون و با روش‌های فیزیکی و شیمیایی بسیاری استفاده شده است [۱۴]. از جمله پژوهش‌های انجام شده در زمینه میکروکپسوله کردن اتیل سلولز، تولید میکروکپسول‌های اتیل سلولز : دارای آلزینات و کلسیم کربنات به روش خشک کردن در حالت اسپری^(۱) [۱۵]، دارای دارو به روش توده‌ای شدن با تغییر دما^(۲) [۱۶، ۱۵، ۲]، دارای زرماری به روش جدایش فاز^(۳) [۱۷، ۱۸]، تولید میکروکپسول‌های اتیل سلولز سه لایه دارای هسته آبی با روش امولسیون چندگانه^(۴) [۱۶]، در زمینه روش امولسیون‌سازی - تبخیر حلال^(۵)، تولید میکروکپسول‌های اتیل سلولز حامل داروهای گوناگون [۱۶، ۱۹، ۲۰]، روغن بزرک [۲، ۳] و روغن کلزا [۲] می‌باشند.

اغلب پژوهش‌های انجام شده در زمینه میکروکپسول‌های

اغلب پژوهش‌های انجام شده در زمینه میکروکپسول‌های

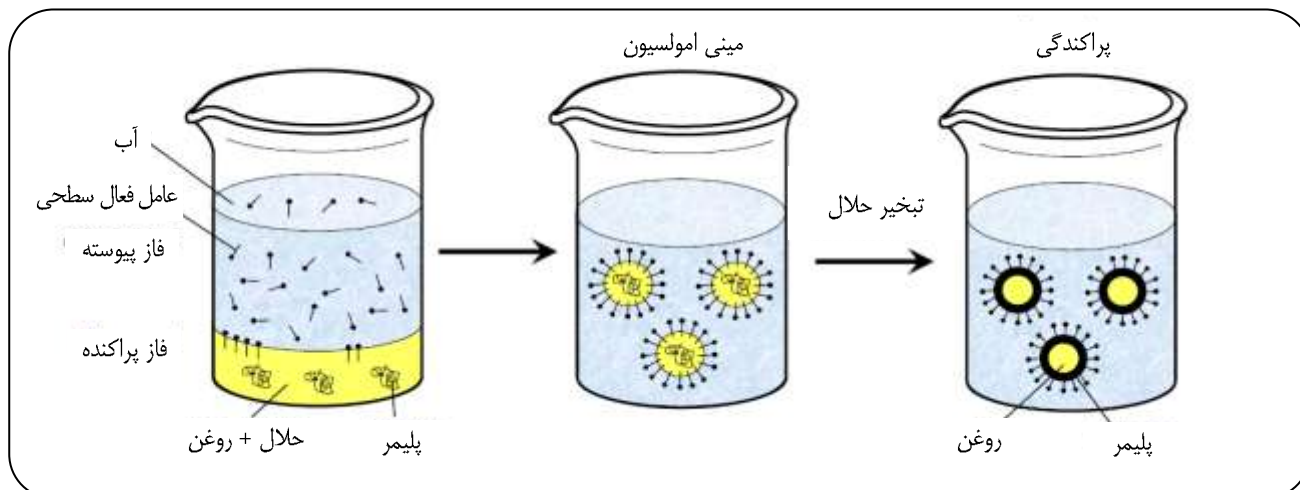
(۱) Spray-drying

(۲) Coacervation induced thermally

(۳) Phase separation

(۴) Multiple emulsification

(۵) Emulsification-solvent evaporation



شکل ۱- شمایی از تشکیل میکروکپسول‌های پلیمری با استفاده از روش امولسیون - تبخیر حلال [۲۱].

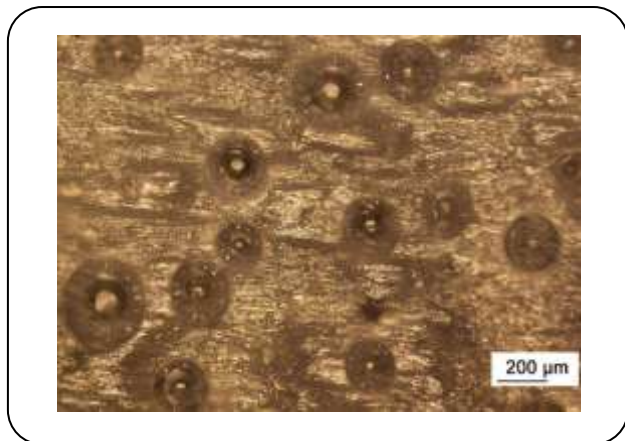
فیلم پلیمری به دست آمده از آن مانع از تماس هوا با سطح نمونه دارای خراش می‌شود، در نتیجه نمونه‌های خراش داده شده به مدت ۲۴ ساعت در معرض هوا قرار داده شده و سپس به منظور انجام آزمون‌های خوردگی، در تماس با محلول ۳/۵٪ وزنی NaCl قرار گرفته و بررسی وقوع پدیده خوردگی در آن‌ها به مدت ۵ روز با فاصله‌های زمانی مشخص مورد ارزیابی قرار گرفت. نمونه‌های تهیه شده شامل نمونه پوشش بدون میکروکپسول (A)، نمونه پوشش حاوی مقدار ۱۰٪ وزنی میکروکپسول (B) و پوشش دارای مقدار ۲۰٪ وزنی میکروکپسول (C) می‌باشد.

آزمون‌های انجام شده

ریخت شناسی و توزیع اندازه میکروکپسول‌های تهیه شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل Philips XL30 مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین، تصویر میکروسکوپ نوری برای دیدن میکروکپسول‌های اتیل سلولز دارای روغن بزرگ، در زمینه پوشش تهیه شد. به منظور تشخیص ماده کپسوله شده، از آزمون پرتوسنجی فروسرخ (FT-IR) و بررسی پرتوهای به‌دست آمده برای روغن بزرگ و ماده درون کپسول‌ها استفاده شد. آزمون امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) به منظور ارزیابی رفتار نمونه‌های پوشش داده شده در محلول ۳/۵٪ NaCl و در دمای محیط، به مدت ۵ روز در بازه زمانی‌های مشخص انجام شد. این آزمون توسط دستگاه پتانسیواستات PARstat و با استفاده از سامانه سه الکترودی شامل الکتروود کاری (متصل به نمونه)، الکتروود کالومل اشباع (SCE) به عنوان الکتروود مرجع و پلاتین

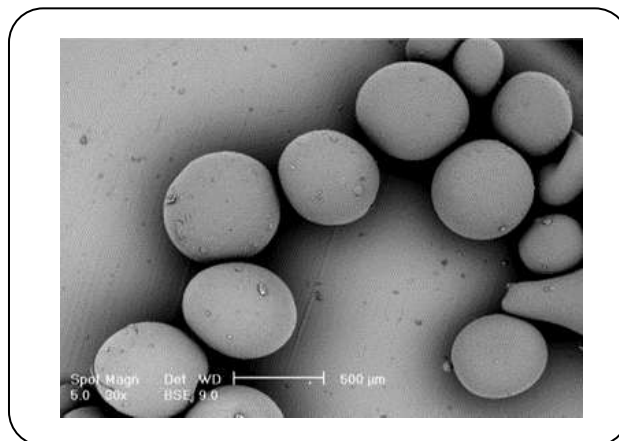
و هم‌زدن دو محلول به مدت ۴ ساعت در دمای ۷۰ درجه سلسیوس ادامه یافت. سرانجام با استفاده از سانتریفیوژ و آب یون‌زدایی شده جداسازی میکروکپسول‌های تولید شده انجام شد. فرایند پلیمریزاسیون به صورت شمایی در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌گونه که گفته شد، فاز پلیمری (زرد رنگ) شامل پلیمر استفاده شده (اتیل سلولز)، حلال و روغن و فاز آبی مخلوط شده و پس از تشکیل امولسیون هم‌زدن تا تبخیر حلال موجود ادامه می‌یابد. سرانجام، پلیمر در اطراف قطره‌های روغن تشکیل پوسته داده و کپسول‌ها تشکیل می‌شوند [۲۱].

به منظور تهیه زیرلایه برای اعمال پوشش، نمونه‌های فولاد ساده کربنی به اندازه‌های ۵×۵ cm تهیه و سطح آن‌ها توسط عملیات سندبلاست آماده‌سازی شد. نمونه‌های تهیه شده پس از شستشو با استون و آب دیونیزه، خشک شدند. در مرحله تولید پوشش خودترمیم‌شونده، میکروکپسول‌های تهیه شده، در دو مقدار ۱۰٪ و ۲۰٪ وزنی، با رزین رنگ پلی‌اورتان پایه استری (با زمان Pot life ۱۵ دقیقه) و هاردنر به نسبت ۲:۱ و بدون استفاده از حلال، ترکیب شدند. سپس، به صورت جداگانه بر روی دو نمونه فولادی آماده شده، به روش پاشش اعمال شدند. یک نمونه فولادی با پوشش پلی‌اورتان بدون میکروکپسول نیز به عنوان نمونه مرجع تهیه شد. پس از خشک نمودن پوشش‌ها در دمای ۴۰ درجه سلسیوس به مدت ۲ ساعت، خراش‌های ضربدری شکل بر روی نمونه‌ها ایجاد شد، به طوری که سطح فلز در منطقه خراش بتواند در تماس مستقیم با محلول خورنده قرار گیرد. از آنجایی که روغن بزرگ دارای خاصیت سخت‌شوندگی در هوا می‌باشد و



شکل ۳- تصویر میکروسکوپی نوری میکروکپسول‌ها در زمینه پلی اورتان.

شکل ۲- تصویر SEM میکروکپسول‌های اتیل سلولز دارای روغن بزرگ.



شکل ۳- تصویر میکروسکوپی نوری میکروکپسول‌ها در زمینه پلی اورتان.

آزمون امپدانس الکتروشیمیایی

به منظور ارزیابی کمی رفتار خوردگی نمونه‌های آماده شده، آزمون EIS برای هر سه نمونه خراش داده شده، در بازه‌های زمانی مشخص: بی‌درنگ پس از ایجاد خراش، پس از ۱، ۳ و ۵ روز تماس با محلول خورنده، انجام شد. نتیجه‌های به دست آمده از این آزمون به صورت نمودارهای باد در شکل ۵ (الف-د) دیده می‌شود.

با توجه به نمودارهای باد، به طور کلی مقادیر امپدانس برای نمونه‌ها با گذر زمان کاهش یافته است، اما این کاهش در مورد نمونه‌های B (پوشش حاوی مقدار ۱۰٪ وزنی میکروکپسول) و C (پوشش حاوی مقدار ۲۰٪ وزنی میکروکپسول)، با شیب ملایم‌تری بوده که بیانگر پایداری بیش‌تر امپدانس در این نمونه‌ها می‌باشد. همچنین، حضور میکروکپسول‌ها در پوشش‌های B و C منجر به افزایش امپدانس نسبت به نمونه A (نمونه مرجع، بدون میکروکپسول) شده است که این افزایش در مورد نمونه C با درصد بیشتر میکروکپسول، بیش‌تر بوده و در تمام محدوده فرکانس اعمالی، مقاومت به خوردگی بالاتری نسبت به دو نمونه دیگر نشان داده است.

برای مقایسه بهتر، مقادیر امپدانس‌های به دست آمده در فرکانس ۰/۰۵ Hz در جدول ۱ آورده شده است. با توجه به

به عنوان الکتروود مقابل انجام شد. محدود فرکانس اعمالی و دامنه ولتاژ ۱۰ mV در نظر گرفته شد. مساحت ناحیه مورد آزمون ۸ cm² بوده است. آزمون پلاریزاسیون خطی (LP) برای نمونه‌های در تماس با محلول ۳/۵٪ NaCl، توسط دستگاه نام برده در طی ۵ روز انجام شد. نرخ اسکن در آزمون ۰/۵ mV/s و بازه‌ی پتانسیل اعمالی ۵۰ mV ± نسبت به پتانسیل مدار باز (OCP) اعمال شد.

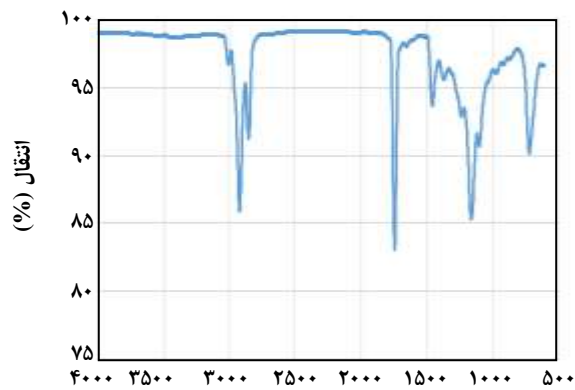
نتیجه‌ها و بحث

مشخصه یابی میکروکپسول‌ها

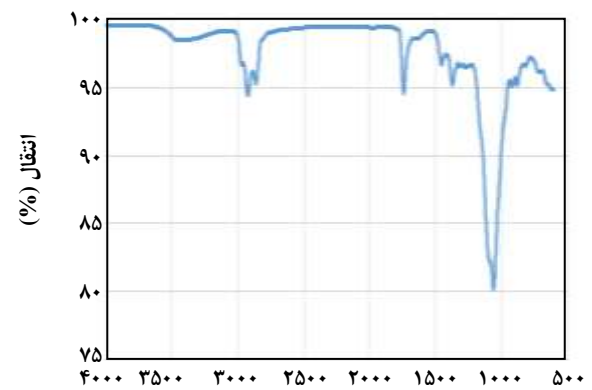
ریخت شناسی میکروکپسول‌های سنتز شده توسط تصویر SEM دیده شد. با توجه به شکل ۲، قطر میانگین میکروکپسول‌های تهیه شده در حدود ۳۰۰ μm تخمین زده شد. همچنین، سطح خارجی میکروکپسول‌ها صاف بوده و شکل کره‌ای آن‌ها برای ذخیره‌سازی ماده و نیز پراکندگی در زمینه پوشش، مناسب می‌باشد.

شکل ۳ تصویر میکروسکوپی نوری میکروکپسول‌های اتیل سلولز را در زمینه پوشش پلی اورتان نشان می‌دهد. پوسته صاف پلیمری و هسته دارای روغن بزرگ، به روشنی دیده می‌شوند. همچنین، با توجه به شکل مشخص است که میکروکپسول‌ها استحکام کافی برای تحمل نیروهای ناشی از ترکیب شدن با رنگ و نیز اعمال پوشش بر روی زیرلایه را داشته‌اند.

شکل ۴ نتیجه‌های به دست آمده از این آنالیز FT-IR را برای میکروکپسول‌های تهیه شده دارای روغن بزرگ (الف) و روغن بزرگ (ب) را در بازه‌ی عدد موج ۴۰۰۰-۶۰۰ cm⁻¹ نشان می‌دهد. پرتوهای الف و ب در پیک‌های مشخصه ارتعاشی کششی C-H،

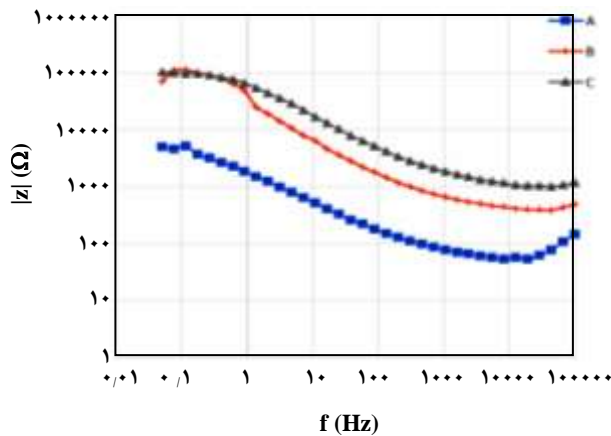


عدد موجی (cm^{-1})

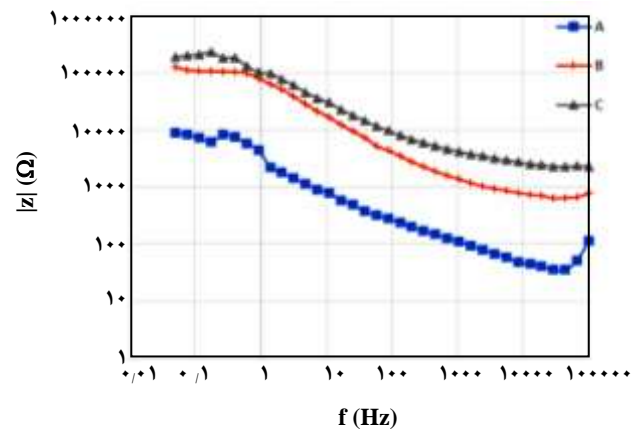


عدد موجی (cm^{-1})

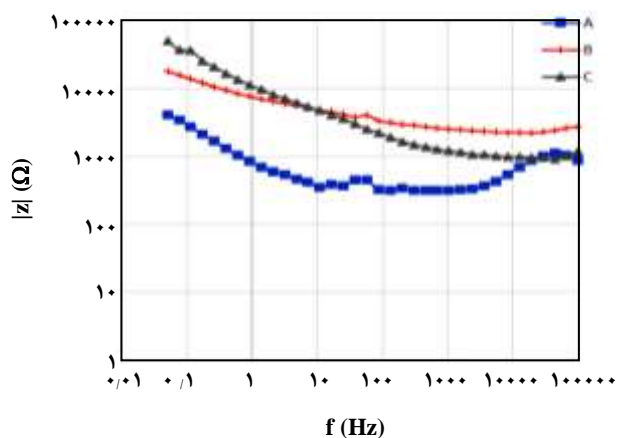
شکل ۴- پرتو فرو سرخ (الف) میکروکپسول‌های حاوی روغن بزرک (ب) روغن بزرک.



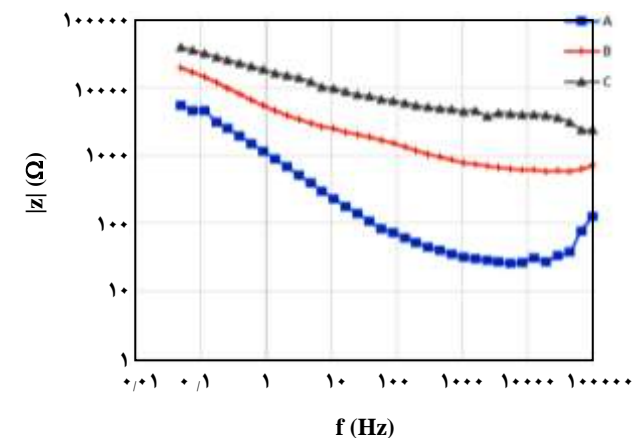
f (Hz)



f (Hz)



f (Hz)

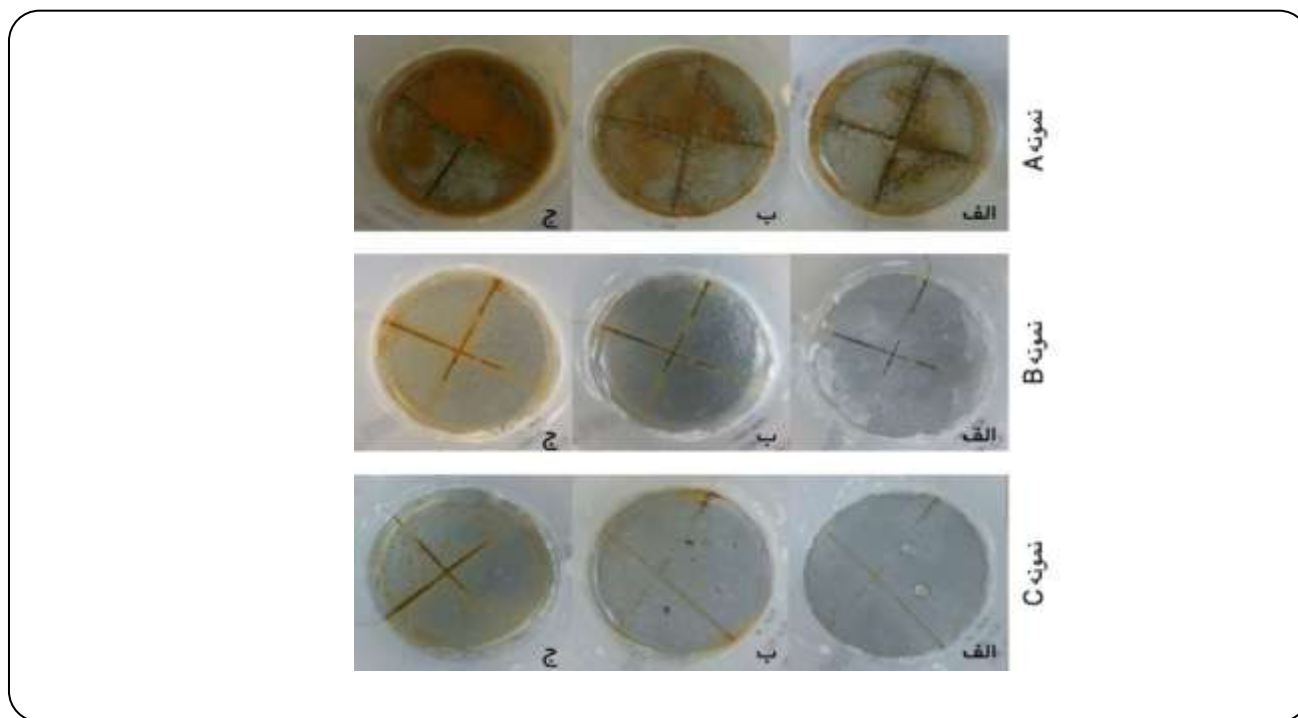


f (Hz)

شکل ۵- نمودارهای باد به دست آمده از آزمون EIS برای نمونه‌های A: مرجع، پوشش بدون میکروکپسول، B: پوشش دارای ۱۰ wt % میکروکپسول و C: پوشش دارای ۲۰ wt % میکروکپسول در (الف) زمان اولیه و پس از گذشت: (ب) ۱ روز (ج) ۳ روز و (د) ۵ روز از تماس با محلول NaCl ۳/۵ %

جدول ۱- مقدارهای مقاومت پوشش ($\Omega.cm^2$) به دست آمده از آزمون EIS در زمان‌های گوناگون.

نمونه	زمان اولیه	پس از ۱ روز	پس از ۳ روز	پس از ۵ روز
A	$10^4 \times 1/73$	$10^4 \times 1/07$	$10^3 \times 9/60$	$10^3 \times 4/09$
B	$10^4 \times 3/10$	$10^4 \times 2/15$	$10^4 \times 1/15$	$10^4 \times 1/73$
C	$10^5 \times 1/49$	$10^5 \times 1/43$	$10^4 \times 7/66$	$10^5 \times 1/08$



شکل ۶ - نمونه‌های پوشش داده شده پس از گذشت: (الف) ۱ روز (ب) ۲ روز (ج) ۳ روز از تماس با محلول NaCl ۳٪.

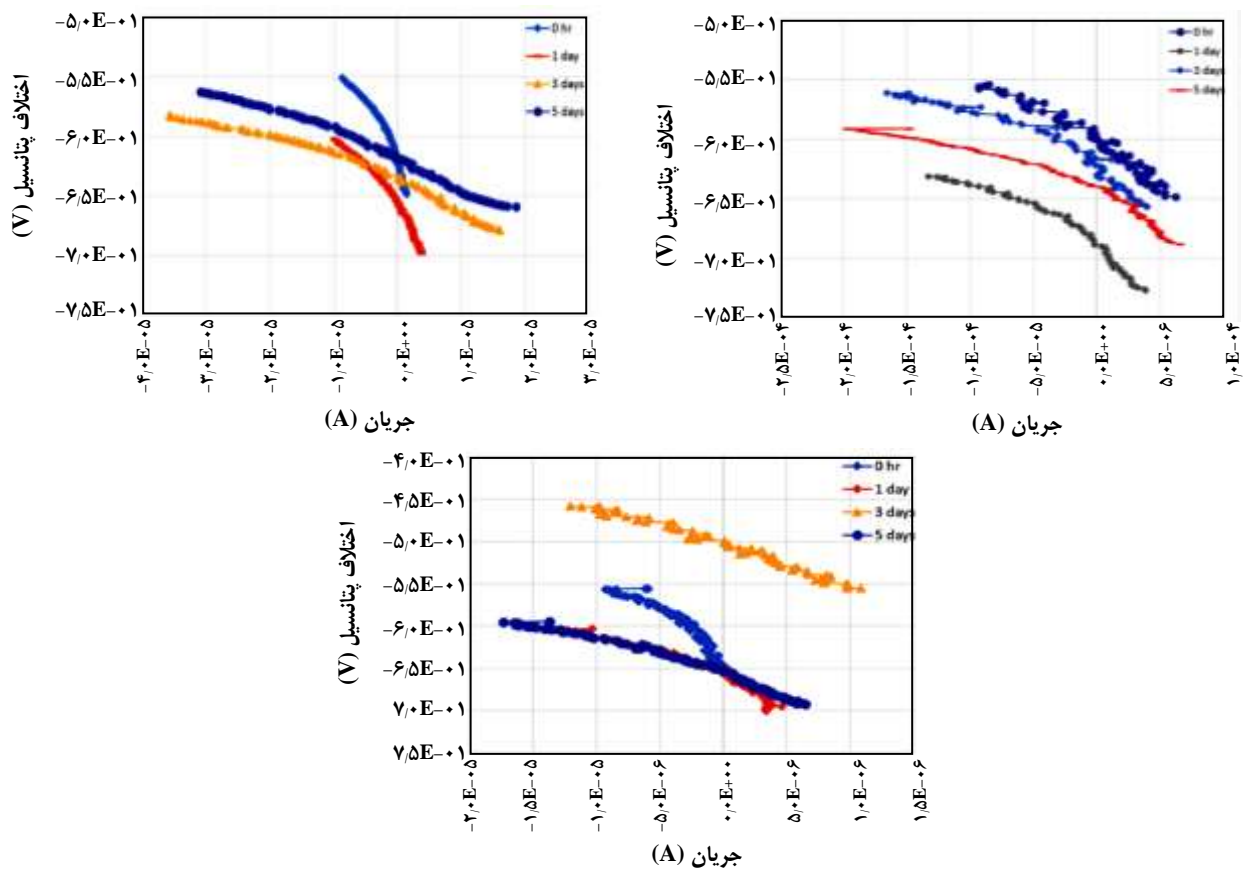
پیشروی خوردگی شده است. همچنین، مقدار امپدانس برای نمونه با مقدار ۲۰٪ میکروکپسول در تمامی بازه‌های زمانی و نیز مقدار افزایش مقاومت ناشی از خاصیت خودترمیم‌شوندگی، بیش‌تر بوده است. بدین معنا که برای ایجاد این خاصیت مقدار کافی از میکروکپسول‌ها درون رنگ پوشش مورد نیاز است.

تصویرهای ماکروسکوپی تهیه شده از نمونه‌ها پس از آزمون EIS بعد از گذشت ۱، ۳ و ۵ روز تماس با محلول خورنده در شکل ۶ دیده می‌شود. با توجه به شکل ۶ نمونه A پس از گذشت دو روز غوطه‌وری در محلول خورنده به شدت خورده شده است. زنگ قرمز رنگ و تاول بر روی پوشش، پس از ۱ روز دیده شد. درحالی که در مورد نمونه‌های B و C آثار فرآورده‌های خوردگی کمتر دیده شد که این مشاهده‌ها نتیجه‌های به‌دست آمده از آزمون EIS را تأیید می‌کند.

داده‌های به‌دست آمده، مقدارهای امپدانس برای نمونه A با گذشت زمان کاهش یافته و پس از ۵ روز به مقدار بسیار کمی رسیده است. این کاهش امپدانس به دلیل وقوع خوردگی در مناطق معیوب می‌باشد که با گذشت زمان میزان پیشروی خوردگی افزایش یافته است. در مورد نمونه B و C تا روز سوم کاهش مقدار امپدانس با شیب ملایم‌تر و پس از آن افزایش مقدار امپدانس در روز پنجم دیده شد. بازگشت مقدار امپدانس در منطقه خراش داده شده بیانگر عملکرد خودترمیمی پوشش دارای میکروکپسول می‌باشد. به بیان دیگر، در اثر شکافته شدن میکروکپسول‌ها توسط خراش، روغن بزرک رها شده و در اثر تماس با هوا (اکسیژن) فیلم پلیمری تشکیل داده است. در نتیجه با این روش سطح خراش ایجاد شده را پوشانده و مانع از تماس بیش‌تر سطح فلز با محلول خورنده و در نتیجه جلوگیری از



شکل ۷- تصویر میکروسکوپی نوری پوشش خودترمیم شونده (الف) پس از ایجاد خراش اولیه (ب) پس از گذشت ۳ روز از تماس با محلول.



شکل ۸ - منحنی‌های پلاریزاسیون خطی برای نمونه‌های (الف) A، (ب) B، (ج) C در زمان‌های گوناگون.

مبنی بر داشتن خاصیت خودترمیم شونده پوشش توسط میکروکپسول‌های تهیه شده را تأیید می نماید.

آزمون پلاریزاسیون خطی

پس از انجام آزمون EIS آزمون پلاریزاسیون خطی برای نمونه‌های مورد آزمایش در این بازه زمانی انجام شد. منحنی‌های پلاریزاسیون خطی و نتیجه‌های محاسبه مقاومت پلاریزاسیون (Rp) پوشش‌ها، به ترتیب در شکل ۸ و ۹ دیده می‌شود.

همچنین تصویرهای میکروسکوپی نوری از منطقه خراش داده شده، برای پوشش حاوی میکروکپسول (الف) بی‌درنگ پس از ایجاد خراش و (ب) پس از گذشت ۳ روز از ایجاد خراش و تماس با محلول خورنده، در شکل ۷ دیده می‌شوند. همان‌گونه که دیده می‌شود، پس از گذشت مدت زمان کافی برای ایجاد خودترمیم شونده در پوشش، خراش ایجاد شده توسط ماده ترمیمی به تقریب بلوکه شده است و در نتیجه مشاهده‌های چشمی، نتیجه‌های به دست آمده از آزمون امپدانس الکتروشیمیایی را

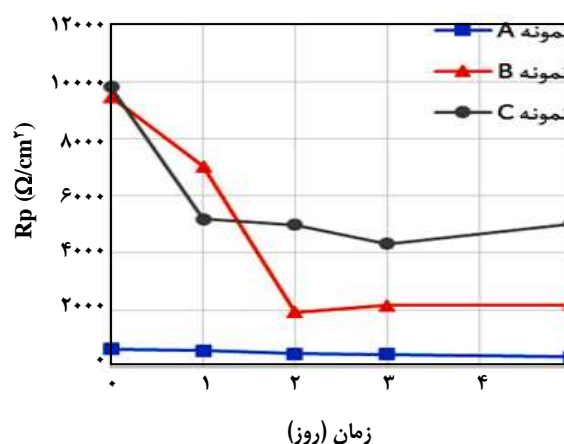
می‌توان نتیجه گرفت که میزان میکروکپسول‌های استفاده شده در پوشش و در نتیجه میزان ماده ترمیمی رها شده کافی نبوده است. نتیجه‌های به دست آمده از این آزمون، با نتیجه‌های به دست آمده در بخش‌های پیشین مطابقت داشته است.

نتیجه گیری

در این پژوهش، میکروکپسول‌های اتیل سلولز دارای روغن بزرک به وسیله روش تخییر حلال تهیه شده و درون رزین پلی‌اورتان قرار داده شدند. نتیجه‌های آزمون‌های خوردگی نشان داد که میکروکپسول‌های موجود در رنگ، پس از ایجاد ترک با رهایش روغن بزرک، موجب ترمیم ترک و احراز ویژگی‌های مقاومت به خوردگی و خودترمیم‌شوندگی شده اند. همچنین، پوشش دارای ۲۰ درصد وزنی از میکروکپسول‌ها، مقاومت به خوردگی بالاتری را نشان داده و خاصیت خودترمیم‌شوندگی چشمگیری را نسبت به سایر نمونه‌ها ایجاد کرده است.

قدردانی

بدین وسیله از شرکت ملی پخش فرآورده‌های نفتی ایران به دلیل حمایت از پژوهش انجام شده تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از زحمات جناب آقای مهندس رضا ابوالفارسی کمال تشکر را داشته باشند.



شکل ۹- تغییرهای مقاومت پلاریزاسیون (Rp) پوشش‌ها بر حسب زمان.

با توجه به نتیجه‌های به دست آمده پتانسیل خوردگی برای نمونه C از سایر نمونه‌ها نجیب‌تر بوده است. با توجه به شکل ۹، مقدار Rp به دست آمده برای نمونه A به طور پیوسته کاهش یافته و برای نمونه B و C پس از گذشت ۳ روز از تماس با محلول خورنده، با مقداری افزایش مواجه بوده است. در نتیجه پوشش بدون کپسول (نمونه A) دارای کمترین مقاومت به خوردگی و نمونه دارای مقدار ۲۰٪ وزنی میکروکپسول دارای بیش‌ترین مقدار مقاومت به خوردگی دیده شد. در مورد نمونه با مقدار ۱۰٪ میکروکپسول،

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۸/۶ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۲/۱۰

مراجع

- [1] Hatami Boura S., Peikari M., Ashrafi A., Samazadeh M., [Self-healing Ability and Adhesion Strength of Capsule Embedded Coatings-Micro and Nano Sized Capsules Containing Linseed Oil](#), *Progress in Organic Coatings*, **75**: 292-300 (2012).
- [2] Mirabedini S.M., Dutil I., Farnood R.R., [Preparation and Characterization of Ethyl Cellulose-Based Core-Shell Microcapsules Containing Plant Oils](#), *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **394**: 74-84 (2012).
- [3] Eshaghi H., Mirabedini S. M., Imani M., Farnood R., [Preparation and characterization of Pre-Silane Modified Ethylcellulose-Based Microcapsules Containing Linseed Oil](#), *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **447**: 71-80 (2014).
- [4] Samadzadeh M., Hatami Boura S., Peikari M., Kasiriha S., Ashrafi A., [A Review on Self-Healing Coatings Based on Micro/Nanocapsules](#), *Progress in Organic Coatings*, **68**: 159-164 (2010).

- [5] Blaiszik B., Caruso M., Mcllroy D., Moore J., White S., Sottos N., [Microcapsules Filled with Reactive Solutions for Self-Healing Materials](#), *Polymer*, **50**: 990-997 (2009).
- [6] Leping L., Wei Z., Hongmei W., Yang Z., Wunjun L., [Preparation and Characterization of Microcapsule Containing Epoxy Resin and Its Self-Healing Performance of Anticorrosion Covering Material](#), *Chinese Science Bulletin*, **56**: 439-443 (2011).
- [7] Kouhi M., Mohammadi M., Saffari A., [Fabrication of Smart Micro/Nano Self-healing Coatings on the Basis of Urea-formaldehyde Capsules Containing Tong Oil and Optimizing Them for Corrosion Inhabitation](#), *Petroleum Research*, **23**: 37-47 (2014).
- [8] Nesterova T., Johnsen K., Pendersen L., Kiil S., [Microcapsule-based Self-Healing Anticorrosive Coatings: Capsule Size, Coating Formulation, and Exposure Testing](#), *Progress in Organic Coatings*, **75**: 309-318 (2012).
- [9] Rui W., Mao Q., Liu Q., Ma X., Cui S., Wang Y., [The Preparation and Research of Microcapsules in Self-healing Coatings](#), *Advanced Materials Research*, **800**: 471-475 (2013).
- [10] Noh H., Lee J., [Microencapsulation of Self-Healing Agents Containing a Fluorescent Dye](#), *Express Polymer Letters*, **7**: 88-94 (2013).
- [11] Sondari D., Septevani A., Randy A., Triwulandari E., [Polyurethane Microcapsule with Glycerol as the Polyol Component for Encapsulated Self-Healing Agent](#), *International Journal of Engineering and Technology*, **2**: 466-471 (2010).
- [12] Liu X., Zhang H., Wang J., Wang Z., Wang S., [Preparation of Epoxy Microcapsule Based Self-Healing Coatings and Their Behavior](#), *Surface & Coatings Technology*, **206**: 4976-4980 (2012).
- [13] Mcllroy D., Blaiszik B., Caruso M., White S., Moore N., Scottos N., [Microencapsulation of a Reactive Liquid-Phase Amine for Self-Healing Epoxy Composites](#), *Macromolecules*, **43**: 1855-1859, (2010).
- [14] Feczko T., Varga O., Kovacs M., Vidoczy T., Voncina B., [Preparation and Characterization of Photochromic Poly\(Methyl Methacrylate\) and Ethyl Cellulose Nanocapsules Containing a Spirooxazine Dye](#), *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, **222**: 293-298 (2011).
- [15] Murtaza Gh., [Ethylcellulose Microparticles: A Review](#), *Acta Poloniae Pharmaceutica-Drug Research*, **69**: 11-22 (2012).
- [16] Sheorey D., Sessa Sai M., Dorle K., [A New Technique for the Encapsulation of Water Insoluble Drugs Using EthylCellulose](#), *Journal Of Microencapsulation*, **8**: 359-368 (1991).
- [17] Badulescu R., Vivod V., Jausovec D., Voncina B., [Treatment of Cotton Fabrics with Ethyl Cellulose Microcapsules](#), *Woodhead*, **75**: 226-235 (2010).
- [18] Voncina B., Kreft O., Koko V., Chen W. T., [Encapsulation of Rosemary Oil in Ethyl Cellulose Microcapsules](#), *Textile and Polymer Journal*, **1**: 13-19 (2009).

- [19] Sappidi S., Thadkala K., Kota J., Aukunuru J., [Preparation and Characterization of Ethyl Cellulose Microspheres Encapsulating Metformin Hydrochloride and Glipizide](#), *Der Pharmacia Letter*, **6**: 213-226 (2014).
- [20] Sudhamani T., Noveenkumar K., [Preparation and Evaluation of Ethyl Cellulose Microspheres of Ibuprofen for Sustained Drug Delivery](#), *International Journal of Pharma Research and Development*, **2**: 119-125 (2010).
- [21] Johannes Fickert., [“Nanocapsules for Self-healing Material”](#), Max-Planck-Institut für Polymerforschung Mainz, Germany, (2013).