

طراحی و ساخت پوشش مقاوم به خوردگی در سازه های هواپیما

حمیدرضا زارعی*

۱-دانشیار، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری

(دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۲۳)

چکیده

خوردگی پدیده‌ای زیان‌بار برای فلزات است که به صنایع مختلف همچون هوافضا خسارت زیادی وارد می‌کند. تقریباً حدود هشت الی بیست درصد هزینه مربوط به تعمیر و نگهداری هواپیما به علت خوردگی‌هایی هم‌چون خوردگی سطحی، خوردگی شیبی، خوردگی تنشی، خوردگی مرزانه‌ای، خوردگی گالوانیکی و خوردگی از نوع حفره‌دار شدن است. از طرفی شرایط محیطی یک هواپیما از لحظه شروع پرواز تا اتمام آن بسیار متغیر است که عاملی برای بسیاری از مشکلات رایج در هواپیماها است. روش‌های مختلفی برای حفاظت از فلزات در برابر خوردگی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به استفاده از پوشش‌های محافظ اشاره کرد. در این راستا در این مقاله بر روی دو زیرآیند آلومینیومی و فولادی از جنس مورد استفاده در بخش‌های مختلف سازه های هواپیما، پوشش محافظ سه‌لایه شامل اپوکسی‌های بیلد به‌عنوان لایه میانی و پلی‌یورتان به‌عنوان لایه رویه در دو سیستم پیشنهاد و اعمال شده است. در سازه های آهنی، اپوکسی غنی از روی و در سازه های آلومینیوم، اپوکسی به‌عنوان پرایمر استفاده شده است. روش اعمال هر کدام از لایه‌ها به‌وسیله اسپری پاشش رنگ صورت گرفته است. فاصله زمانی بین اعمال یک‌لایه از پوشش با لایه بعدی، وابسته به دما و رطوبت محیط اعمال داشته و بین ۶ تا ۲۴ ساعت متغیر بود. با طراحی این سامانه‌های پوششی، مقاومت هر دو سازه آهنی و آلومینیومی در برابر شرایط خوردنده بسیار بالا رفت. نتایج آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی نشان داد که پوشش اعمالی بر روی زیرآیند آلومینیومی بعد از گذشت هزار ساعت از غوطه‌وری در محلول خوردنده تنها یک ثابت زمانی از خود نشان داد و مقدار امپدانس در فرکانس‌های پایین، حفاظت شونده‌گی بسیار خوب زیرآیند آلومینیومی را تأیید کرد. هم‌چنین آزمون چسبندگی پول‌آف نشان از چسبندگی قابل توجه پوشش محافظ بر روی زیرآیند آلومینیومی داد.

واژه‌های کلیدی: اپوکسی، پلی‌یورتان، محافظ خوردگی، سازه های هوایی^۱

Designing and fabrication a corrosion protective coating for the aircraft structures

Hamidreza Zarei*

Associated prof, Shahid Sattari Aeronautical University of Science and Technology

Abstract

Corrosion is a harmful phenomenon for metals have been utilized in various industries like aerospace. Uniform, galvanic, pitting, intergranular, and crevice corrosions are types of corrosion causing approximately 20% of the whole repairing costs of aircraft. The flying condition alters during the flight results in enormous problems for an aircraft. Several methods have been reported to diminish the corrosion rate in which the protective coatings have been exploited in this assessment. To this end, three-layer coating employed to apply on the steel and aluminum substrates. Middle layer and top coat were similar relating to high-build epoxy and polyurethane, respectively. However, zinc-rich epoxy was applied on the steel substrate and neat epoxy was employed for aluminum for the primer layer. The airless spray was used to fabricate different coating determining 6-24 h for curing of each layer. EIS results illustrated that this coating protective system showed just one-time frequency response after 1000 h

immersion in 3.5% NaCl exhibiting the fact that water molecules could not penetrate through the coating and access the substrate after 1000 h. Additionally, the low-frequency response of EIS plots confirmed the excellent anti-corrosive performance of coating system applied on the aluminum. Moreover, the pull-off test clarified the reasonable adhesion strength of the coating system on both aluminum and steel substrates.

Key words: Epoxy, Polyurethane, Corrosion protection, Aircrafts

۱. مقدمه

فلزات به طور گسترده در صنایع مختلف هم چون پالایشگاه ها، تجهیزات برقی و هوافضا کاربرد دارند. از طرفی پدیده خوردگی آسیب و خسارات سنگینی را وارد می کند. فلزات به کاررفته شده در بدنه هواپیما از لحظه شروع ساخت بدنه باید موردحفاظت قرار بگیرند. چراکه فضای جوی اطراف باعث اکسید شدن سریع فلز شده و حضور اندکی بخار آب کافی است تا واکنش های خوردگی به پیش رود. نتایج تحقیقات نشان می دهد که ۲۰-۸ درصد هزینه های مربوط به نگهداری هواپیما مربوط به پدیده خوردگی در هواپیماست. اکسید شدن در دمای بالا و یا خوردگی در دمای بالا در بعضی از قسمت های هواپیما مثل موتور هواپیما پدیده ای است که باعث افت خواص فیزیکی و شیمیایی فلز می گردد. به منظور اتصال، از پرچ ها و بست ها استفاده می شود که معمولاً از جنس آلیاژهای آلومینیومی (۲۰۲۴ و ۷۰۷۵) هستند، می توانند تحت کشش، برش، خستگی و خوردگی باشند [۱-۳].

محیط اطراف هواپیما بر روی رفتار حفاظتی و طول عمر مفید هواپیماها اثر به سزایی دارد. رطوبت موجود در محیط می تواند به عنوان نقطه شروع خوردگی در هواپیماها باشد. هم چنین انجماد بخار آب در لبه بال ها و دماغه هواپیما که به واسطه برخورد شدید هوا و میعان شدن آن در نواحی ذکر شده دارد، باعث می شود که سازه هوایی تحت تنش زیادی قرار بگیرد. تغییرات دمایی به وجود آمده در پرواز به خاطر ارتفاع های متغیر پرواز باعث می شود که نقاط مختلف هواپیما تحت تنش قرار بگیرد و شرایط را برای خوردگی

تنشی مهیا سازد [۴]. به منظور آشنایی با اثرات مخرب خوردگی در وسایل پرنده ابتدا به ذکر انواع خوردگی رایج در این گونه سازه ها پرداخته خواهد شد..

خوردگی یکنواخت^۲ به خاطر توزیع یکنواخت سایت های آندی و کاتدی در سطح فلز ایجاد می شود و کاهش ضخامت فلز به طور یکسان بر روی فلز رخ می دهد. این نوع از خوردگی یا به واسطه هجوم شیمیایی هم به صورت یکسان بر روی زیرآیند رخ می دهد. تشکیل رسوبات در سطح زیر پوشش هواپیما باعث ایجاد ناهمواری هایی یکنواخت بر روی پوشش می گردد. گاهی ممکن است که در نقاطی به صورت موضعی جداشدن پوشش از سطح دیده شود که ناشی از تجمع محصولات خوردگی در زیر پوشش دارد [۵].

خوردگی گالوانیکی^۳ هنگامی ایجاد می شود که دو فلز غیرهمجنس در داخل یک الکترولیت خورنده قرار بگیرند، یک اختلاف پتانسیل بین آن ها به وجود می آید. در صورتی که این فلزات در شرایط کاری با یکدیگر در تماس باشند، به علت این اختلاف پتانسیل، الکترون ها بین آن ها جریان پیدا می کنند (واکنش گالوانیکی). در این حالت مطابق با پتانسیل سری الکتروشیمیایی، فلز با پتانسیل منفی تر خورده می شود و فلز با پتانسیل نجیب تر مورد حفاظت قرار می گیرد. این نکته قابل به ذکر است که هرچه اختلاف پتانسیل بیشتر باشد، شدت خوردگی بیشتر است [۶].

خوردگی مرزدانه ای^۴ هم پدیده ای محتمل در هواپیماهاست که در این مواقع مرزدانه ها که از لحاظ ترمودینامیکی انرژی بالاتری دارند، به عنوان آند و خود دانه کاتد می شود. این نوع خوردگی در پلی کریستال ها که

۲-۲. پوشش دهی نمونه های فولادی و آلومینیومی

آماده سازی شده

پوشش سه لایه محافظ از سه قسمت تشکیل شده است که به ترتیب شامل لایه آستری، لایه میانی و لایه رویه است. برای زیرآیند آهنی و آلومینیومی لایه های میانی و رویه یکسان و به ترتیب اپوکسی های بیلد و پلی یورتان است لایه پرایمر برای دو زیرلایه تفاوت دارد. به نحوی که برای زیرلایه آهنی، لایه پرایمر از جنس اپوکسی غنی از روی است که بتواند با توجه به سری پتانسیل الکتروشیمیایی، به نحوی برای زیرلایه آهنی حفاظت کاتدی را به ارمغان آورد؛ اما این لایه پرایمر برای زیرلایه آلومینیومی تفاوت دارد؛ زیرا پتانسیل آلومینیوم از پتانسیل روی منفی تر است و با اعمال لایه اپوکسی غنی از روی، بستر آلومینیومی به مرور زمان تخریب می گردد. بدین منظور لایه پرایمر برای زیرآیند آلومینیومی از جنس اپوکسی است که بتواند چسبندگی لایه های بعدین را به آلومینیومی فراهم آورد. پوشش های پیشنهادی به وسیله پیس توله ایرلس^{۱۱} بر روی زیرآیندها اعمال گردید.

لایه پرایمر^{۱۲} برای فولاد نرم یک پوشش دوجزئی از جنس اپوکسی غنی از روی ۱۵۳۶۰ و سخت کننده پلی آمید ۹۵۳۶۰ است. این لایه تا دمای ۱۰ درجه سانتی گراد خشک شده تا لایه ای مستحکم به همراه چسبندگی بالا را ایجاد کند. لایه پرایمر برای زیرآیند آلومینیومی نرم یک پوشش دوجزئی از جنس اپوکسی ۱۵۵۵۰ و سخت کننده پلی آمید ۹۵۷۴۰ است. شکل ۱، اعمال لایه آستری را بر روی زیرآیند آلومینیومی را نشان می دهد.

مرزخانه ها به صورت ترجیحی مورد حمله قرار می گیرند مانند آلیاژهای آلومینیومی رایج است [۷].

خوردگی تنشی^۵ و خوردگی حفره ای^۶ هم از انواع خوردگی است که در هواپیماها دیده می شود. در خوردگی تنشی، عامل مکانیکی (تنش) هم علاوه بر عوامل الکتروشیمیایی باعث تشدید خوردگی می شود. خوردگی حفره ای، بدترین و خطرناک ترین نوع خوردگی است که در آن فلز به صورت موضعی تخریب می شود. این نوع از خوردگی معمولاً در مواقعی که فیلمی بر روی فلز وجود دارد مثل لایه پسیو و با حضور یون کلر محتمل است که در آن فلز با چند درصد کاهش جزئی وزن نسبت به وزن واقعی اش شکسته می شود [۸-۲-۱].

راه های مختلفی برای حفاظت فلزات از خوردگی وجود دارد که می توان به بازدارنده های خوردگی، حفاظت کاتدی و آندی و استفاده از پوشش های محافظ اشاره کرد [۹]. این مقاله در راستای استفاده از پوشش محافظ برای کاهش خوردگی، پوشش سه لایه محافظ شامل اپوکسی غنی از روی^۷ (بر روی زیرآیند فولاد) و اپوکسی (بر روی زیرآیند آلومینیومی) به عنوان لایه آستری، اپوکسی های بیلد^۸ به عنوان لایه میانی و پوشش پلی یورتان^۹ به عنوان لایه رویه بر روی زیرآیندهای آلیاژ آلومینیوم و فولاد اعمال شده و خواص خوردگی و چسبندگی این پوشش ها توسط آزمون هایی هم چون آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی^{۱۰}، چسبندگی و پاشش مه نمکی بررسی شده است.

۲. موارد آزمایشگاهی

۲-۱. آماده سازی سطح نمونه ها جهت اعمال پوشش

ورقه های فولاد ST37 و آلومینیوم 7075 T6 تهیه و به ابعاد ۱۰×۲۰ سانتی متر برش داده شدند. ابتدا نمونه ها با ورقه های کاربید سیلیکون به ترتیب با شماره های ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ سنباده زده و در نهایت به منظور حذف چربی های موجود روی سطح با استون چربی گیری شدند.

اندازه‌گیری شد. شکل ۳ اعمال لایه پلی‌یورتانی را بروی لایه میانی نشان می‌دهد.



شکل ۳- الف) اعمال پوشش پلی‌یورتان توسط پیس توله ایرلس،

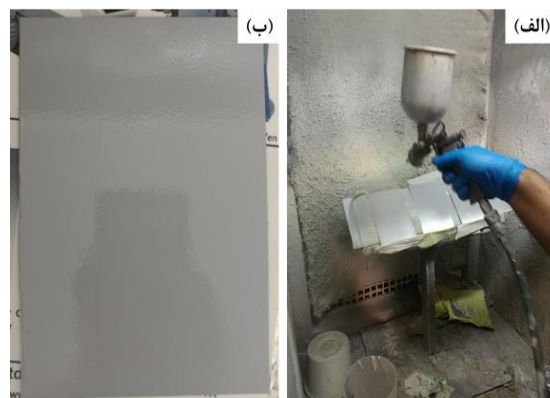
ب) نمونه‌های اعمال شده لایه سوم پوشش محافظ

ضمناً باید خاطر نشان کرد، بین لایه‌های اعمالی ۲۴ ساعت زمان در دمای اتاق در نظر گرفته شد تا پوشش تا حد قابل قبولی خشک شود. رنگ‌های اشاره شده از شرکت رنگ‌سازی باژاک تهیه شده است.

۲-۳. آزمون‌ها

۱-۳-۲. آنالیز طیف‌سنجی امیدانس الکتروشیمیایی

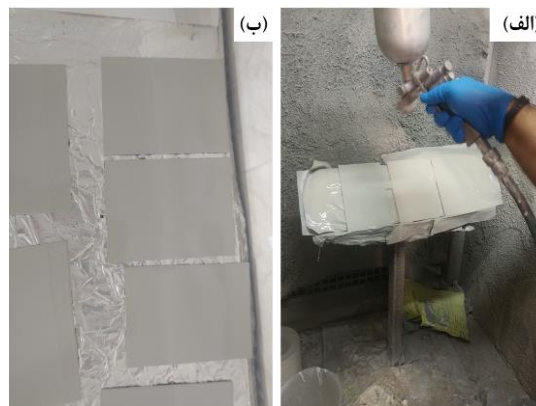
برای این منظور از یک سیستم سه الکترودی متداول شامل الکترود مرجع کالومل، الکترود کمکی پلاتین و همچنین الکترود کاری که همان نمونه‌های آماده‌سازی شده دارای پوشش هستند، استفاده شد. این سیستم به دستگاه ACM Gill متصل و آزمون در محدوده‌ی فرکانسی KHz ۱۰ تا ۱۰ mHz با اعمال موج سینوسی با دامنه‌ی ولتاژ ۱۰ mV در پتانسیل مدار باز (OCP) انجام شد. نمونه‌های پوشش داده شده توسط مخلوطی از بی‌زوکس-کولوفونی^{۱۴} پوشش داده می‌شود به طوری که فقط ۱ cm² در معرض محیط خورنده قرار بگیرد. آزمون EIS پس از گذشت هزار ساعت غوطه‌وری در محلول سدیم کلرید صورت گرفت. نمودارهای حاصل توسط نرم‌افزار Zview3.1c تحلیل و پردازش شدند.



شکل ۱- الف) اعمال پوشش پرایمر توسط پیس توله،

ب) نمونه‌ی اعمال شده پوشش پرایمر

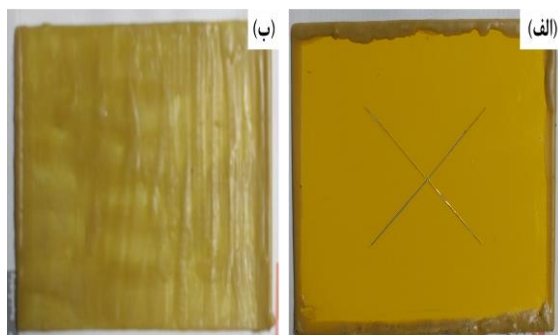
لایه میانی یک پوشش دوجزئی از جنس اپوکسی های بیلد ۴۵۲۰۰ و سخت کننده ۹۵۰۴۰ است. لایه‌ی ایجاد شده چقرمگی بالایی داشته و مقاومت قابل قبولی در برابر آب دریا و برخی محصولات نفتی را از خود نشان می‌دهد. استفاده این لایه در محلول‌های اسیدی، قلیایی و اکسیدکننده توصیه نگردیده است. شکل ۲ در حین اعمال لایه میانی بر روی لایه آستری گرفته شده است.



شکل ۲- الف) اعمال پوشش اپوکسی های بیلد توسط پیس توله ایرلس،

ب) نمونه‌های اعمال شده لایه میانی پوشش محافظ

لایه دوجزئی رویه از جنس آکرلیک آلیفاتیک پلی‌یورتان^{۱۳} ۵۵۲۱۰ و سخت کننده ۹۵۳۷۰ است که براقیت و زیبایی را به این سیستم پوششی سه لایه می‌دهد. در این راستا، براقیت پوشش‌های اعمالی که از مشخصات ظاهری به شمار می‌رود، توسط آزمون براقیت در ۶۰ درجه



شکل ۴- نمای جلو (الف) و پشت (ب) نمونه بیزوکس-کولوفونی اعمال شده برای قرارگیری در محفظه پاشش مه نمکی

۲-۳-۴. آزمون براقیت در ۶۰ درجه

به منظور بررسی خواص ظاهری پوشش اعمال شده، آزمون براقیت در ۶۰ درجه با استفاده از دستگاه مورد استفاده BYK Gardner انجام شد (شکل ۵). براقیت سنج دقیق سه زاویه ۲۰ و ۶۰ و ۸۵ درجه لمسی، مطابق با استاندارد ISO ۲۸۱۳ و GB / T ۹۷۵۴ ساخته شده است. هم‌چنین با استانداردهای بین‌المللی ASTM D ۵۲۳، ASTM D ۲۴۵۷ سازگار است. از این براقیت سنج به صورت گسترده‌ای برای آزمون براق بودن در این صنایع از جمله خودرو، رنگ، جوهر، لاک، پوشش، محصولات چوبی سنگ مرمر، گرانیت، کاشی‌های جلا داده شده، آجر سفال و صنایع کاغذ و غیره استفاده می‌شود. این آزمون در زاویه ۶۰ درجه انجام شد و نتایج آن گزارش داده شده است.

۲-۳-۲. آزمون چسبندگی پول-آف ۱۵

به منظور ارزیابی چسبندگی پوشش‌های سه لایه به زیرآیندهای فولادی و آلومینیومی، آزمون پول-آف در دو حالت قبل و بعد از ۱۰۰۰ ساعت در معرض محیط خورنده قرار گرفتن (خشک و تر) طبق استاندارد ASTM D4541 Posi test-pull off در این راستا از دستگاه adhesion tester, DEFELSKO استفاده گردید. در این آزمون دالی‌های ارزیاب چسبندگی توسط چسب مخصوصی بر روی پوشش‌ها چسبانیده گردید سپس بعد از ۷۲ ساعت خشک شدن چسب‌ها، اطراف آن‌ها با خراش‌هایی که ایجاد می‌شود تا اتصال دالی‌ها فقط با لایه زیر آن باشد سپس این دالی‌ها توسط دستگاه به صورت خودکار جدا شده و قدرت چسبندگی را نمایش داد. این نکته قابل به ذکر است که برای تقلیل خطاهای اندازه‌گیری، ابتدا ضخامت پوشش را با پروب آلتراسونیک اندازه گرفته سپس دالی‌ها در نقاطی که ضخامت یکسانی دارند، چسبانیده می‌شود.

۲-۳-۳. آزمون پاشش مه نمکی

به منظور بررسی رفتار خوردگی پوشش‌های اعمالی بر روی زیرآیندهای فولادی و آلومینیومی، آزمون پاشش مه نمکی طبق استاندارد ASTM B117 انجام گرفت. این آزمون در شرایط $pH = 7$ ، محیط ۵٪ کلرید سدیم و دمای ۴۰ درجه سلسیوس صورت پذیرفت. بر روی پوشش‌های اعمال شده، خراش ضربدری به ابعاد 8 cm (طول) ایجاد شد. سپس قسمت‌هایی از این نمونه‌ها توسط مخلوط بیزوکس-کولوفونی پوشانیده گردید تا محصولات خوردگی مجاور وارد ناحیه مورد بررسی نشود و ارزیابی خوردگی فقط از ناحیه در معرض محیط خورنده باشد. نمای جلو و پشت برای نمونه پوشش داده شده با مخلوط بیزوکس-کولوفونی در شکل ۴ نمایش داده شده است.

۳. نتایج و بحث

۳-۱. آزمون طیفسنجی امپدانس الکتروشیمیایی

به منظور بررسی رفتار الکتروشیمیایی دستگاه‌های پوششی اعمالی، آزمون طیفسنجی امپدانس الکتروشیمیایی بعد از ۱۰۰۰ ساعت غوطه‌وری در محلول سدیم کلرید انجام داده شد. نتایج آزمون EIS در شکل ۶ نمایش گذاشته شده است. به منظور دستیابی به پارامترهای الکتروشیمیایی درگیر در واکنش‌های الکتروشیمیایی، نتایج EIS توسط مدارهای معادل در شکل ۷ توسط نرم‌افزار زد ویو^{۱۷} فیت شده‌اند که نتایج آن در جدول ۱ آورده شده است. در نمودارهای EIS داده‌های آزمایشگاهی با نقاط مشخص شده‌اند و داده‌های فیت شده توسط خطوط ممتد در نمودارها، نشان داده شده است. در نمودارهای نایکوئیست^{۱۸} نمایش داده شده در شکل ۶، نیم‌دایره‌ها نشان از مقاومت انتقال بار^{۱۹} و مقاومت پوشش دارند^{۲۰}. نمودارهای EIS مربوط به سیستم پوششی بر روی زیرآیند آلومینیومی نشان می‌دهد که این سیستم حفاظتی یک ثابت زمانی فرکانسی^{۲۱} از خود نشان می‌دهد. این رفتار بدان معنا است که الکترولیت و یون‌های خورنده به زیرآیند دسترسی پیدا نکرده است که حکایت از رفتار سد کنندگی و حفاظتی بسیار خوب پوشش اعمالی بر روی زیرآیند آلومینیومی دارد. در این سیستم پوششی، واکنش‌های الکتروشیمیایی تحت کنترل مقاومت پوششی است. پوشش اعمالی، مشخصات و خصوصیات حفاظتی خوبی از خود نشان می‌دهد که به اجزای خورنده اجازه‌ی نفوذ را به داخل زمینه پوششی نمی‌دهد. همچنین نتایج آزمون EIS برای سیستم حفاظتی پوششی اعمالی بر روی زیرآیند فولادی در شکل ۶ به تصویر آمده است. نتایج نشان از نفوذ عوامل خورنده به داخل پوشش دارد. این مفهوم، از دو قله‌ای شدن نمودارهای الکتروشیمیایی در نمودارهای باد و فاز^{۲۲} برداشت می‌گردد. در سیستم پوششی اعمالی بر روی زیرآیند فولادی، این سیستم حفاظت فعال را از خود با حفاظت کاتدی و فدا شدن کاتیون‌های روی، نشان می‌دهد [۱۰-۱۱].



شکل ۵- تصویر دستگاه به منظور انجام آزمون براقیت در ۶۰ درجه

۵-۳-۲. طیف‌نگاری فلورسانس اشعه ایکس (XRF)

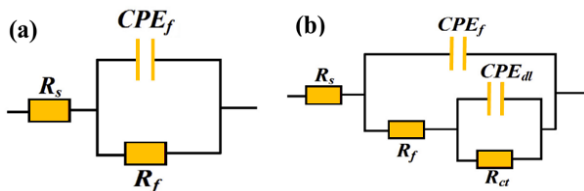
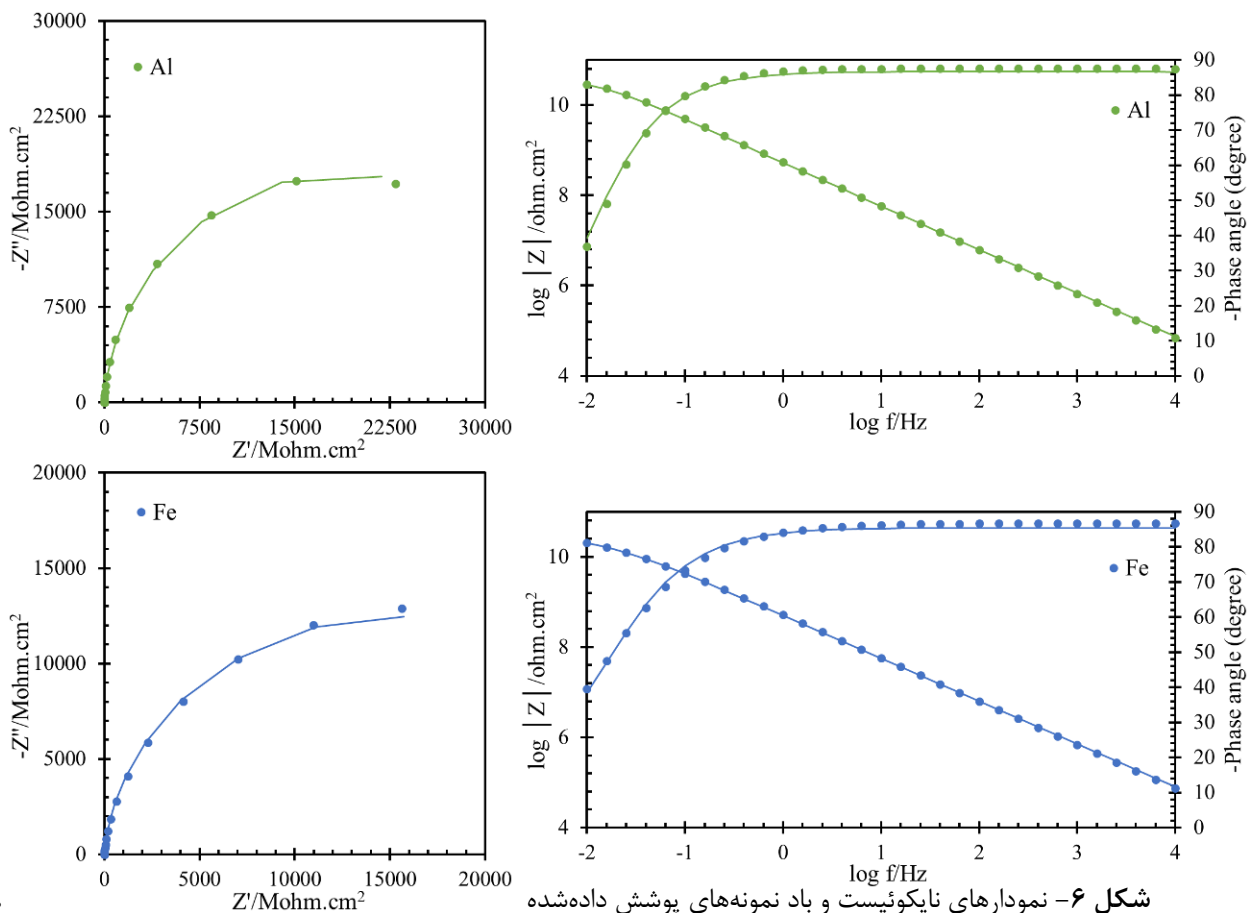
در طیف‌نگاری فلورسانس اشعه ایکس، از روش طیف نشری اشعه ایکس برای تجزیه لایه‌های سطحی استفاده می‌شود. این فن توانایی انجام آنالیز عنصری به صورت کیفی و نیمه کمی نمونه‌ها به خصوص نمونه‌های معدنی را دارا است. در اثر تابش اشعه ایکس و برانگیختگی نمونه، انتقال الکترونی در لایه‌های مختلف اتم انجام می‌شود که هر انتقال الکترونی همراه با نشر یک خط طیفی اشعه ایکس است. طول موج خطوط طیفی نشر شده مبنای تجزیه کیفی عناصر و شدت پرتوها، متناسب با فراوانی یا کمیت عناصر موجود در نمونه است. از این آزمون برای تعیین مقدار کمی بازدارنده روی در لایه آستری اپوکسی غنی از روی استفاده می‌شود تا از روی آن، مقدار بازدارندگی پوشش مشخص شود.

همچون کلرید) دارد. با اعمال خراش بر روی رنگ ایجاد شده، واکنش های کاتدی و آندی در محل به صورت موضعی ایجاد می شود. یون هیدروکسید ایجاد شده به واسطه واکنش کاتدی سبب بالا رفتن pH در زیر پوشش می شود که می تواند پیوندهای شیمیایی بین پوشش و زیرآیند را تخریب کند [۱۴-۱۳]. در این شرایط، هرچه پیوندهای پوشش با زیرآیند قوی تر باشد، عملکرد عوامل بیگانه برای جدایش پوشش سخت تر می گردد [۱۵]. اعمال هوشمندانه پوشش اپوکسی در لایه آستری به دلیل چسبندگی بالایی که به زیرآیند دارد، سبب شده که این سیستم پوشش سه لایه مقاومت بالایی از خود نشان دهد. خود بستر آلومینیومی در محیط خورنده طبق استاندارد ASM، رسوبات Al_2O_3 لایه سفیدرنگی ایجاد می کند که به آن لایه پسیو می گویند. این لایه به دلیل خصوصیتی همچون یکنواخت و متراکم بودن، خواص حفاظتی خوبی دارد که می تواند سایت های فعال کاتدی و آندی را از فعالیت بازدارد.

ظرفیت خازنی لایه دوگانه الکتریکی و پوششی با استفاده از روابط (۱) و (۲) زیر محاسبه شد. با توجه به این موضوع که بانفوذ آب و اجزای خورنده به داخل پوشش، تراوایی پوشش افزایش می یابد. پس با محاسبه ظرفیت های خازنی لایه دوگانه الکتریکی و پوششی می توان رفتار ضد خوردگی و حفاظتی پوشش را تخمین زد [۱۲].

۲-۳. آزمون پاشش مه نمکی بعد از ۱۰۰۰ ساعت

آزمون پاشش مه نمکی طبق استاندارد ASTM B117 بعد از ۱۰۰۰ ساعت در معرض محیط خورنده قرار گرفتن در داخل محفظه دستگاه پاشش مه نمکی در شکل ۸ نشان داده شده است. همان طور که نشان داده شده است، بعد از ۱۰۰۰ ساعت، هیچ گونه علائمی از جدا شدن و تاول زدن پوشش رؤیت نگردید که نشان از چسبندگی و مقاومت بالای پوشش سه لایه اعمال شده در برابر تهاجم عوامل خورنده (مولکول های آب، اکسیژن و یون های خورنده



شکل ۷- مدارهای معادل مورد استفاده برای برازش نمونه‌های

آزمایشگاهی با (a) یک ثابت و (b) دو ثابت زمانی

$$C_{dl} = Y_{0, dl}^{1/n} \left(\frac{R_e \times R_{ct}}{R_e + R_{ct}} \right)^{(1-n)/n} \quad (1)$$

$$C_f = Y_{0, f}^{1/n} R_f^{(1-n)/n} \quad (2)$$

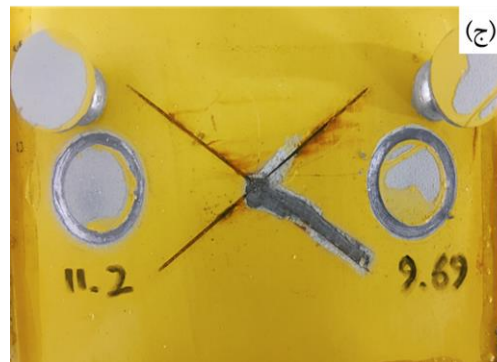
جدول ۱- پارامترهای استخراج شده از آزمون EIS برای نمونه‌های پوشش داده شده بر روی زیرآیندهای آلومینیومی و فولادی

Sample	Immers ion time (h)	R_{ct} ($M\Omega \text{ cm}^2$)	CPE_{dl}		$C_{dl}(nF.c m^{-2})$	R_f ($M\Omega \text{ cm}^2$)	CPE_f	
			Y_0 ($\mu\Omega^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^n$)	n			Y_0 ($n\Omega^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^n$)	n
Fe	1000	47080	0.038	0.556	0.002	16850	0.352	0.948
Al	1000	-	-	-	-	68720	0.289	0.974

۳-۳. آزمون چسبندگی در دو حالت خشک و تر

آزمون چسبندگی پول آف در دو حالت خشک و تر طبق استاندارد ASTM D4541 انجام گردید که نتایج آن در شکل ۹ مصور شده است. نتایج آزمون پول آف بعد از در معرض محیط خورنده قرار گرفتن نسبت به قبل قرار گرفتن در محیط خورنده کاهش یافته است. علت این موضوع در این است که آب و یون های خورنده از طریق عیوب میکروسکوپی و ماکروسکوپی که شامل حفره، ترک و نقص های پوشش می شود، به سمت زیرآیند حرکت می کند و واکنش های کاتدی و آنودی به پیش می رود. با پیشرفت واکنش های الکتروشیمیایی و افزایش pH در فصل مشترک پوشش/زیرآیند، پوشش کم کم از سطح فلز جدا خواهد شد. بدین دلیل است که نتایج آزمون پول آف در حالت تر نسبت به حالت خشک کم تر است [۱۶].

از طرفی با توجه به نتایج آزمون چسبندگی، مقاومت چسبندگی $xxiii$ نسبتاً بالایی برای نمونه ها مشاهده می گردد که نشان از عملکرد و کارآمدی این سیستم پوششی سه لایه دارد. در دو حالت زیرآیند فولادی و آلومینیومی در حالت خشک جدایش بین لایه های پلی یورتان و در حالت بعد از آزمون مه نمکی جدایش بین لایه های میانی مشاهده گردید.



شکل ۸- الف) تصویر قرار گرفتن نمونه اعمال شده در داخل محفظه پاشش مه نمکی، ب) نمونه آلومینیومی بعد از ۱۰۰۰ ساعت در معرض قرار گرفتن در محیط خورنده و ج) نمونه فولادی بعد از ۱۰۰۰ ساعت در معرض قرار گرفتن در محیط خورنده


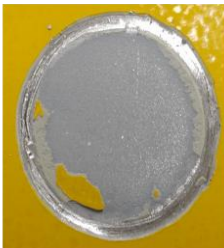
مرحله دوم عملکرد آن‌ها پیشنهاد شده است که از جمله می‌توان به بسته شدن منافذ پوشش در اثر تشکیل اکسید روی، جلوگیری از انجام واکنش‌های کاتدی از طریق تشکیل محصولات خوردگی بازی و تشکیل نواحی با pH بالا و جذب اکسیژن توسط روی و جلوگیری از احیای آن در آند اشاره کرد [۱۷-۱۹]. نتایج آزمون XRF، نشان داد که پوشش اپوکسی غنی از روی حاوی ۷۹/۱۲٪ روی است. قابل به ذکر است این آزمون سه بار تکرار شد و نتیجه نهایی میانگین داده‌های قبلی را نشان می‌دهد.


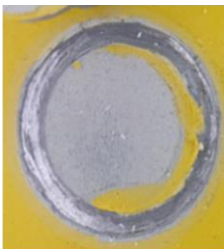
۳-۵. آزمون براقیت در ۶۰ درجه

آزمون براقیت در ۶۰ درجه برای نمونه‌های پوشش داده‌شده انجام شد تا از لحاظ ظاهری نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM D523 مورد بررسی قرار بگیرند. این آزمون بعد از ۳ بار تکرار نشان داد که براقیت نمونه‌های پوشش داده شده در ۶۰ درجه در حدود ۳۶/۴۶ درجه است.



شکل ۱۰- تصویر انجام آزمون براقیت در ۶۰ درجه بر روی زیرآیندهای آلومینیومی و فولادی

زیرآیند آلومینیومی	
محیط خشک	محیط تر
	
۹.۷۶ MPa	۸.۴۹ MPa

زیرآیند فولادی	
محیط خشک	محیط تر
	
۱۰.۴۴ MPa	۹.۰۱ MPa

شکل ۹- تصاویر مربوط به آزمون چسبندگی برای پوشش‌های محافظ سه‌لایه اعمالی بر روی زیرآیندهای آلومینیومی و فولادی بعد از هزار ساعت قرار گرفتن در محفظه پاشش مه نمکی

۳-۴. نتایج آزمون XRF

به‌منظور بررسی مقدار روی در پوشش اپوکسی غنی از روی، این آزمون انجام گردید تا از روی مقدار آن حفاظت فعال پوشش مشخص شود. در زمان‌های اولیه غوطه‌وری، مکانیسم عملکرد این پوشش‌ها به روش حفاظت کاتدی است [۱۷-۱۸]. به‌عبارت‌دیگر، در مراحل اولیه غوطه‌وری این پوشش‌ها، با توجه به عملکرد گالوانیک روی در تماس با فولاد، پودر روی سریعاً خورده شده و از خوردن شدن فولاد جلوگیری می‌کند. بعد از خورده شدن روی، هدایت الکتریکی فیلم به اندازه‌ای کاهش می‌یابد که جریان الکتریکی بین فولاد و روی متوقف می‌شود و عملکرد کاتدی پوشش نیز محدود می‌شود. مکانیسم‌های مختلفی برای توجیه حفاظت‌کنندگی پوشش‌های غنی از روی در

۴. نتیجه گیری

رنگ سه لایه که بر روی زیرآیند آهن و آلومینیوم طراحی شد، در لایه میانی و رویه مشترک استند و در لایه پرایمر باهم تفاوت دارند. اپوکسی های-بیلد به عنوان لایه میانی و پلی یورتان به عنوان لایه رویه در دو سیستم پیشنهادی است. در آهن، اپوکسی غنی از روی و در آلومینیوم، اپوکسی به عنوان پرایمر استند. روش اعمال هر کدام از لایه ها به وسیله اسپری پاشش رنگ صورت گرفت. فاصله زمانی بین اعمال یک لایه از پوشش با لایه بعدی طبق استاندارد، بستگی به دما و رطوبت محیط اعمال داشته و بین ۶ تا ۲۴ ساعت متغیر است.

رنگ سه لایه با کیفیت و محافظ خوردگی بر روی آهن و آلومینیوم با انجام آزمون هایی نظیر آزمون پاشش نمکی، آزمون چسبندگی و ... مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج EIS نشان داد که پوشش محافظ سه لایه اعمالی بر روی آلومینیوم، زیرآیند را از خوردگی محافظت می کند و بعد از هزار ساعت غوطه وری در محیط خورنده کلریدی، یک ثابت زمانی مربوط به پوشش دیده شد که نشان داد الکتروولیت به سطح زیرآیند نفوذ پیدا نکرده است. آزمون چسبندگی هم نشان از مقاومت بالای چسبندگی پوشش سه لایه اعمالی به زیرآیندهای آلومینیومی و فولادی را گزارش کرد.

این طرح با توجه به این که یکی از زیرآیندهای فلزی، آلومینیوم است، به طور مستقیم در هر ارگان از نیروهای مسلح که با صنعت هوافضا سروکار دارد، کاربرد خواهد داشت. با اعمال و ارزیابی کنترل کیفی، عمر بدنه هواپیماها افزایش یافته، نیاز به واردات نمونه خارجی نیست و هم چنین هزینه های غیرمستقیم که صرف از کارافتادن و تعمیر هواپیما می شود، به حداقل خواهد رسید. هم چنین چون بر زیرآیند آهن هم اعمال می شود، در هر موقعیت و سازمانی که

تخریب قطعه و افت خواص فیزیکی و مکانیکی آن به واسطه خوردگی ایجاد می شود، کاربرد دارد.

پی نوشت ها

-
- ² Uniform corrosion
 - ³ Galvanic Corrosion
 - ⁴ Intergranular Corrosion
 - ⁵ Stress Corrosion Cracking (SCC)
 - ⁶ Pitting Corrosion
 - ⁷ Zinc rich epoxy
 - ⁸ High-Build epoxy
 - ⁹ Polyurethane
 - ¹⁰ Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)
 - ¹¹ Airless
 - ¹² Primer layer
 - ¹³ Semi-gloss aliphatic acrylic polyurethane
 - ¹⁴ Beeswax-Colophony
 - ¹⁵ Pull-Off adhesion test
 - ¹⁶ XRF=X-ray Fluorescence Spectroscopy
 - ¹⁷ Zview software
 - ¹⁸ Nyquist diagram
 - ¹⁹ Charge transfer resistance
 - ²⁰ Coating resistance
 - ²¹ Time constant frequency response
 - ²² Bode and phase diagram

منابع و مراجع:

- [12] B. Hirschorn, M.E. Orazem, B. Tribollet, V. Vivier, I. Frateur, M. Musiani, Determination of effective capacitance and film thickness from constant-phase-element parameters, *Electrochim. Acta*. 55 (2010) 6218–6227.
- [13] F.H. Scholes, C. Soste, A.E. Hughes, S.G. Hardin, P.R. Curtis, The role of hydrogen peroxide in the deposition of cerium-based conversion coatings, *Appl. Surf. Sci.* 253 (2006) 1770–1780.
- [14] S. Zhang, G. Kong, J. Lu, C. Che, L. Liu, Growth behavior of lanthanum conversion coating on hot-dip galvanized steel, *Surf. Coatings Technol.* 259 (2014) 654–659.
- [15] B. Ramezanzadeh, M.M. Attar, Cathodic Delamination and Anticorrosion Performance of an Epoxy Coating Containing Nano/Micro-Sized ZnO Particles on Cr(III)-Co(II)/Cr(III)-Ni(II) Posttreated Steel Samples, *CORROSION*. 69 (2013) 793–803.
- [16] E. Alibakhshi, M. Akbarian, M. Ramezanzadeh, B. Ramezanzadeh, M. Mahdavian, Evaluation of the corrosion protection performance of mild steel coated with hybrid sol-gel silane coating in 3.5 wt.% NaCl solution, *Prog. Org. Coatings*. 123 (2018) 190–200.
- [17] HARE, C. H., Zinc Loadings, Cathodic Protection, and Post-Cathodic Protective Mechanisms in Organic Zinc-Rich Metal Primers, *JPCL*. 18 (2001) 54.
- [18] Corrosion and Electrochemistry of Zinc - Xiaoge Gregory Zhang - Google Books, (n.d.).
- [19] A. Meroufel, S. Touzain, EIS characterisation of new zinc-rich powder coatings, *Prog. Org. Coatings*. 59 (2007) 197–205.
- [1] M.G. Fontana, *Corrosion engineering*, Nace, 1986.
- [2] R.W. Revie, *Uhlig's Corrosion Handbook*. 2000, 2000.
- [3] P.D.L.H. Madkour, *CORROSION AND CORROSION CONTROL An Introduction to Corrosion Science and Engineering*, (n.d.).
- [4] J.R. (Joseph R.) Davis, *Corrosion of aluminum and aluminum alloys*, ASM International, 1999.
- [5] A. Groysman, *Corrosion Monitoring*, in: *Corros. Everybody*, Springer Netherlands, Dordrecht, 2010: pp. 189–230.
- [6] M. Pourbaix, Applications of electrochemistry in corrosion science and in practice, *Corros. Sci.* 14 (1974) 25–82.
- [7] R.E. Melchers, Effect of small compositional changes on marine immersion corrosion of low alloy steels, *Corros. Sci.* 46 (2004) 1669–1691.
- [8] L.R. Vehicle, S. Shuttle, S. Rocket, E. Tank, M.E. Assembly, U. Stage, H. Energy, A. Observatory, C.S. Corrosion, *Controlling Stress Corrosion Cracking* in, (n.d.) 1–5.
- [9] V. Dalmoro, C. Santos, J.H.Z. Dos Santos, Smart coatings for corrosion protection, in: *Ind. Appl. Intell. Polym. Coatings*, Springer International Publishing, 2016: pp. 417–435.
- [10] K. Schaefer, A. Miszczyk, Improvement of electrochemical action of zinc-rich paints by addition of nanoparticulate zinc, *Corros. Sci.* 66 (2013) 380–391.
- [11] O.Ø. Knudsen, U. Steinsmo, M. Bjordal, Zinc-rich primers - Test performance and electrochemical properties, *Prog. Org. Coatings*. 54 (2005) 224–229.