

تحلیل مقاومت به خوردگی آرماتورهای فولادی پوشش دهی شده با رنگ‌های صنعتی پایه آلی توسط روش طیف‌سنجی امیدانس الکتروشیمیایی

یدالله یعقوبی نژاد^{۱*}، عبدالله افشار^۲، ابوالقاسم دولتی^۲

۱- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و مواد، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، خراسان جنوبی، ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

*عهده دار مکاتبات: Yaghoubinezhad@birjandut.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۱۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۱۶)

چکیده: در این پژوهش از سامانه‌های پوششی آستر پایه آلکیدی، آستر اپوکسی غنی از روی، آستر پلی‌آمید، رویه پلی‌یورتان، رویه اپوکسی، رویه آلکیدی، آستر آلکیدی-رویه آلکیدی و آستر اپوکسی پلی‌آمید-رویه آلکیدی جهت بررسی تأثیر پوشش دهی سطح آرماتور، در مقایسه با سایر روش‌های حفاظت از بتن مسلح استفاده گردید. جهت ارزیابی خواص بتن و لایه‌های ایجادشده از آزمون‌های استحکام فشاری و طیف‌سنجی امیدانس الکتروشیمیایی در کنار آزمون pull off استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد روش طیف‌سنجی امیدانس الکتروشیمیایی به‌عنوان روشی غیر مخرب و دقیق می‌تواند نقش بسزایی در تحلیل تعداد لایه‌ها و پیش‌بینی مقاومت به خوردگی بتن مسلح ایفا نماید. همچنین در محیط‌های خورنده، سامانه‌ی پوشش دهی دو جزئی ایزوسیانات-آکلیریک تحت عنوان پلی‌یورتان با مقاومت کل $7/3 \text{ G}\Omega.\text{cm}^2$ ، به‌عنوان بهینه‌ترین سامانه‌ی پوششی جهت حفاظت از آرماتور قرار گرفته در بتن عمل می‌نماید.

واژه‌های کلیدی:

خوردگی، رنگ، بتن، آرماتور، طیف‌سنجی امیدانس الکتروشیمیایی.

۱- مقدمه

فرآیندی است که در آن طی واکنش آندی، آهن موجود در آرماتور فولادی به یون‌های فرو تبدیل شده و محصول این واکنش وارد محلول آبی موجود در منافذ بتن می‌گردد. در ادامه‌ی فرآیند انحلال آهن، یون‌های فرو به یون فریک تبدیل شده و با رسوب هیدراته فریک در فضای محدود بتن، باعث ایجاد تنش در بتن می‌گردد، در این حالت ورود عوامل مهاجم، اکسیژن و رطوبت از طریق ترک‌های ایجادشده سریع‌تر رخ داده و منجر به تخریب نهایی سازه می‌گردد [۵]. جهت افزایش مقاومت به خوردگی و دوام سازه‌های بتنی روش‌های متفاوتی از جمله افزودن مواد-پوزولانی به بتن، استفاده از انواع ممانعت کننده‌های آندی و

بتن با وجود توانایی تحمل تنش‌های فشاری بالا، در کشش عملکرد ضعیفی از خود نشان می‌دهد. ضعف این ماده‌ی مهم و پرمصرف ساختمانی در مقابل کشش با قرار دادن آرماتور تا حد زیادی جبران شده است. در سال‌های اخیر و با بررسی دوام سازه‌های بتنی مسلح به‌ویژه در مناطق خورنده، نظر اکثر کارشناسان به این مسئله جلب شده است که مقاومت به تنهایی نمی‌تواند جوابگوی کلیه خواص مربوط به بتن بخصوص دوام آن باشد و لازم است در طراحی بتن برای مناطق مختلف علاوه بر مسئله تحمل بارها در طول مدت بهره‌دهی، مقاومت به خوردگی و دوام آن نیز مدنظر قرار گیرد [۴-۱]. خوردگی فولاد در بتن

پلی آمید، پلی آمین، پلی آمینوآمید و کتیمین اشاره نمود [۱۲]. پوشش اپوکسی با استاندارد ASTM A۷۵ انجام می‌شود [۱۳]. پوشش پایه پلی‌یورتان: پوشش‌های پلی‌یورتان تا ضخامت ۴۰۰ میکرون قابل اعتماد هستند [۱۴]. بزرگ‌ترین و مهم‌ترین عیب پوشش‌های پلی‌یورتان سمیت آن‌ها است. خواص فیزیکی و شیمیایی آن‌ها مطلوب است و در برابر ضربه، سایش، خراش و شرایط خوردنده و محیط‌های دریایی مقاومت طولانی مدت دارند. پوشش پلی‌یورتان متشکل از ایزوسیانات‌ها، ترکیبات دارای گروه‌های OH، حلال، رنگ‌دانه، پرکننده و مواد افزودنی می‌باشد [۱۰].

در میان روش‌های ارزیابی میزان خوردگی آرماتور فولادی در بتن، به دلیل مقاومت‌های بالای لایه‌های تشکیل دهنده، اعم از بتن و انواع پوشش‌ها، طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. تاریخچه استفاده از طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی به‌عنوان روشی غیر مخرب در بررسی خواص بتن به دو دهه پیش بازمی‌گردد [۱۵]. معمولاً روش‌های الکتروشیمیایی برای مواد رسانا استفاده می‌شوند درحالی‌که از آزمون الکتروشیمیایی برای بررسی پوشش‌های غیر رسانا نیز می‌توان بهره جست. اصول الکتروشیمیایی موجود بر اساس اعمال موج پتانسیل متناوب با دامنه ثابت در گستره‌ی ۵-۲۰ mV و دریافت پاسخ جریان متناوب در فرکانس متغیر بین ۰/۱ Hz تا ۱۰ MHz انجام می‌گیرد. تغییرات بالای فرکانس اطلاعات مفیدی راجع به خواص مرتبط با تخلخل از جمله تغییر در دی‌الکتریک بتن بر اثر افزودنی‌ها، ویژگی‌های مکانیکی (استحکام)، نفوذ یون کلر و فرایند سخت شدن بتن ارائه می‌دهد [۱۶]. علاوه بر این، طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی یک روش بسیار مناسب در تحلیل میزان حفاظت پوشش‌های آلی به شمار می‌آید [۱۷]. لازم به ذکر است، اگرچه غالباً بررسی عملکرد میزان حفاظت پوشش‌های آلی در بازه‌های زمانی بلند مدت (۳۰ روز تا چندین سال) گزارش شده است [۱۸]، ولی مقالاتی نیز عملکرد انواع پوشش‌های محافظ را تا چندین ساعت پس از قرارگیری در محیط خوردنده و ایجاد شرایط پایا بررسی نموده اند [۱۹]. با این روش می‌توان تغییرات

کاتدی، حفاظت کاتدی، تغییر جنس آرماتور در بتن و انواع سامانه‌های پوشش‌دهی استفاده می‌گردد [۶]. در این بین، یکی از روش‌های متداول و مؤثر کاهش خوردگی آرماتورهای فولادی در بتن، استفاده از انواع پوشش‌های مختلف بر روی سطح آرماتور است. پوشش‌دهی آرماتور را می‌توان در گروه‌های استفاده از پوشش گالوانیزه گرم با مکانیزم حفاظت کاتدی با آندهای موضعی فداشونده، بهره‌گیری از رنگ‌های مقاوم در برابر خوردگی مانند اپوکسی پلی‌آمید، غنی‌ازروی و انواع پوشش‌های تبدیلی مانند پوشش‌های فسفات‌ه و کرومات‌ه تقسیم‌بندی نمود [۷]. در میان روش‌های مختلف حفاظت از سطح، استفاده از پوشش‌های آلی در جهان برای محافظت بیش از ۸۵٪ از سطوح به کار می‌رود [۸]، به‌طوری‌که امروزه با پیشرفت علم پلیمر، رنگ‌های آلی پیشرفت قابل توجهی داشته‌اند به‌گونه‌ای که اغلب موارد در صنعت از رنگ‌های آلی استفاده می‌شود [۸-۹]. در ادامه به پرکاربردترین پوشش‌های بر روی آرماتور قرار گرفته در بستر بتنی اشاره می‌شود. پوشش پایه آلکیدی: این پوشش‌ها از مقاومت نسبتاً خوبی در مقابل آب برخوردارند، رزین این رنگ‌ها با اکسیژن خشک می‌شود و به‌عنوان آستری در سطوح زیر آب و به‌عنوان آستری و لایه میانی برای پوشش‌های فوقانی نیز استفاده می‌شود. رنگ پایه آلکیدی آستری، بانام آلکیدی درجه سه یا ضدزنگ بارنگ معمولاً قرمز، رنگ آلکیدی میانه با عنوان آلکیدی درجه دو با فام طوسی و رنگ رویه معمولاً براق و با فام روشن شناخته می‌شود [۹]. از استاندارد EN ISO ۱۲۹۴۴-۵ جهت پوشش‌های آستری استفاده می‌شود.

پوشش اپوکسی پایه آمید: رزین‌های اپوکسی در مقابل مواد شیمیایی نسبتاً مقاوم هستند. پوشش‌های اپوکسی برای سطوح در مجاورت محلول‌های نمکی با غلظت‌های زیاد و در دماهای بالا و آب دریا قابل استفاده هستند. اپوکسی کول‌تار و پلی‌آمید در گستره‌ی ۱۵ تا ۳۸ درجه سانتی‌گراد بازدهی خوبی دارند [۱۰-۱۱]. از انواع رزین اپوکسی می‌توان به رزین اپوکسی پایه فنول A، B، نووالاک، آلیفاتیک، سیکلوآلیفاتیک، هتروسیکلیک، فنوکسی،

عملیات چربی‌گیری قرار گرفته و خشک شدند. در آماده‌سازی بتن از دو نوع قالب برای آماده‌سازی نمونه‌های بتنی استفاده شد. قالب‌های فلزی مکعبی با ابعاد $100 \times 100 \times 100$ mm جهت انجام آزمون استحکام فشاری طرح اختلاطها استفاده شد و قالب‌های استوانه‌ای شکل از جنس لوله پلیکا به قطر 86mm و ارتفاع 120mm جهت آزمون‌های الکتروشیمیایی تهیه شدند. جهت بررسی رفتار خوردگی سطح $37/7 \text{ cm}^2$ انتخاب گردید و مابقی آرماتور توسط رنگ اپوکسی آستری و بر روی آن نوار تفلون برای جلوگیری از نفوذ یون کلر و تخریب آرماتور آبدی گردید.

۲-۲- سامانه‌های پوششی بر روی سطح آرماتور

سامانه‌های پوشش دهی به سه بخش کلی تقسیم گردید. در بخش اول از رنگ‌های زیر لایه آلکیدی (آستری) استفاده شد. در بخش دوم رنگ‌های رویه متداول استفاده شد؛ که در گروه اپوکسی از رنگ رویه اپوکسی پلی آمید با فام سبز، رنگ رویه آکلریک-ایزوسانات (پلی یورتان) با فام سفید و رنگ رویه آلکیدی براق (درجه ۱ از نظر کیفیت) استفاده شد. سامانه حفاظتی در بخش سوم از ترکیب دو سامانه اول طراحی شد. بدین معنا که از یک لایه آستری و بر روی آن یک لایه رنگ رویه استفاده شد. در این بخش از دو سامانه استفاده شد که در سامانه اول از رنگ آستری آلکیدی با فام طوسی (درجه ۲ از نظر کیفیت) به عنوان زیر لایه و از رنگ آلکیدی رویه براق (درجه ۱ از نظر کیفیت) به عنوان لایه بیرونی استفاده شد. در سیستم حفاظتی دوم از رنگ آستری اپوکسی پلی آمید با فام قهوه‌ای سوخته به عنوان زیر لایه و از رنگ آلکیدی رویه براق (درجه ۱ از نظر کیفیت) به عنوان لایه بیرونی استفاده شد.

جهت تهیه پوشش‌های آلکیدی، 5cc رنگ با چند قطره حلال T-200 برای رسیدن به رقت مطلوب آماده شد. این لایه توسط قلم مو طی چهار مرحله با فاصله زمانی 24 ساعت بر روی آرماتور اعمال گردید. در آستر و رویه رنگ‌های غیر آلکیدی، رنگ با نسبت ۱ به ۳ نسبت به سخت‌کننده استفاده شد و جهت خشک شدن عمیق،

کمی رفتار رنگ، پوشش بتن و لایه محافظ در محیط بتنی و تغییرات مقاومت پوشش بر روی فلز را مورد بررسی قرارداد. مقادیر ظرفیت و مقاومت به دست آمده از هر فرکانس می‌تواند اطلاعات مفیدی راجع به نرخ خوردگی، نفوذ و ویژگی‌های پوشش، مقاومت الکتریکی بتن، مقاومت الکتریکی محلول، مقاومت انتقال بار RCT و ظرفیت دوگانه الکتریکی C_{dl} ارائه نماید.

در این پژوهش جهت افزایش مقاومت به خوردگی بتن مسلح از ۸ سامانه‌ی پوششی، بر روی سطح آرماتور استفاده شد که عبارت‌اند از سامانه‌های پوششی آستر پایه آلکیدی، آستر اپوکسی غنی از روی، آستر اپوکسی پلی آمید، رویه پایه آلکیدی، رویه اپوکسی پلی آمید، رویه پلی یورتان، آستر آلکیدی-رویه آلکیدی، آستر اپوکسی پلی آمید-رویه آلکیدی و از آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی جهت ارزیابی مقاومت به خوردگی هر سامانه و مقایسه کمی هر یک از روش‌های حفاظت، استفاده شده است.

۲- مواد و روش انجام تحقیق

۲-۱- ترکیب شیمیایی و آماده‌سازی بتن مسلح

از آرماتور فولادی ساده کربنی با درصد کربن کمتر از ۰/۳٪ در بتن با طرح اختلاط متشکل از شن گرانیتی دو بار شسته شده (823 Kg) با اندازه دانه بین ۴/۵ تا ۹ میلی‌متر، ماسه تهران (400 Kg) و سیمان نوع ۲ (سیمان 400 Kg و نسبت آب به سیمان ۰/۴) در کنار ۱ کیلوگرم فوق روان‌ساز استفاده شد. آرماتور فولادی با قطر 10mm به طول 120mm بریده شد. سپس جهت از بین بردن زنگ آهن (آرماتورهای فولاد ساده کربنی 37 st) در محلول 15٪ HCl همراه با 0/05٪ اورتروپین (به عنوان ممانعت کننده) به مدت 20 دقیقه تحت امواج مافوق صوت توسط دستگاه Sonica-1200M قرار گرفتند. پس از اسید شویی با آب شهری شسته شده و با سنباده‌های 60 تا 600 برای رسیدن به کیفیت سطحی مناسب جهت اعمال رنگ آماده‌سازی شدند، سپس نمونه‌ها مجدداً در دستگاه مافوق صوت در محلول حاوی استن به مدت 3 دقیقه جهت

استفاده شد. همچنین، ارزیابی چسبندگی سامانه‌های پوششی با استاندارد ASTM D-۴۵۴۱ انجام گرفت [۱۸].

۳- نتایج و بحث

۳-۱- استحکام فشاری بتن، چسبندگی و ضخامت پوشش
استحکام فشاری بتن پس از گذشت ۱۴ روز از تکمیل فرآیند هیدراسیون ۵۷/۱۴MPa اندازه‌گیری شد [۲۱]. این استحکام بالا در اثر اختلاط صحیح و هوازداپی مناسب بتن با میز ارتعاش دهنده امکان‌پذیر گردید. جهت تضمین کیفیت پوشش اعمال‌شده در محیط‌های خورنده، ضخامت رنگ بر روی آرماتور در هر سامانه با توجه به پیشنهاد شرکت سازنده رنگ و تحقیقات مشابه انجام‌شده لحاظ شد که مقادیر آن در جدول ۲ ذکر شده است. جهت تفسیر صحیح‌تر عملکرد هر سامانه از نقطه‌نظر چسبندگی به زیر لایه، هر سامانه پوششی بر روی ورقه‌های فولادی به ضخامت پوشش آرماتور اعمال گردید. این آزمون تفسیر صحیح‌تر از کاهش اتصال میان رنگ و آرماتور ناشی از فرایند خوردگی را نشان می‌دهد. نتایج آزمون چسبندگی رنگ در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول (۲): نیروی چسبندگی، ضخامت و درصد کنده شدن رنگ‌های اپوکسی، آلکیدی و آکلریک-ایزوسیانات

علامت اختصاری	نیروی چسبندگی (MPa)	جدا شدن رنگ (%)	ضخامت میانگین (μm)
AC	۳/۲	۹۵٪-۹۰٪	10 ± 70
ZR	۳/۷	۸۵٪-۹۰٪	20 ± 110
P	4	۱۰٪-۵٪	10 ± 110
Al	۲/۹	۹۵٪ <	10 ± 30
EP	۳/۸	۹۵٪-۹۰٪	20 ± 230
PU	۴/۷	<۵٪	10 ± 220

با توجه به جدول ۲، سامانه پلی یورتان دارای بیشترین چسبندگی به زیر لایه و سامانه آلکیدی رویه دارای کمترین چسبندگی به زیر لایه است. با توجه به این نتایج می‌توان پیش‌بینی نمود که سامانه

زمان ۲۴ ساعت بین مراحل پوشش دهی در نظر گرفته شد. علائم اختصاری استفاده‌شده در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول (۱): علائم اختصاری استفاده‌شده در پژوهش

عنوان اصلی	علامت اختصاری
طرح اختلاط	A
آرماتور بدون پوشش	B
پوشش آستر آلکیدی (ضدزنگ)	AC
پوشش رویه آلکیدی	Al
پوشش آستر اپوکسی غنی از روی	ZR
پوشش آستر اپوکسی پلی آمید	P
پوشش رویه اپوکسی پلی آمید	EP
پوشش رویه پلی یورتان	PU
پوشش پرایمر آلکیدی و رویه آلکیدی	AC-Al
پوشش پرایمر اپوکسی و رویه آلکیدی	P-Al

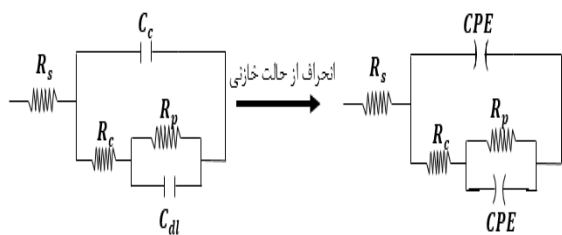
۳-۲- آزمون‌های ارزیابی بتن مسلح

آزمون استحکام فشاری مطابق با استاندارد ASTM C ۳۹-۹۶ توسط دستگاه ELE با سرعت بارگذاری ۵ kN/s انجام گرفت. در این پژوهش استحکام فشاری بعد از ۱۴ روز اندازه‌گیری شد. جهت انجام آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی از دستگاه Potentiostat-Galvanostat Model ۲۳۷A تحت کنترل رایانه و از دستگاه Analyzer HF Frequency Response ۱۲۵۵ SI برای دریافت پاسخ فرکانس استفاده گردید. در این آزمون از سیستم سه الکترودی استفاده شده است به گونه‌ای که الکترود کاری، آرماتور فولادی قرار گرفته در بستر بتن، الکترود کمکی، فولاد مقاوم در برابر خوردگی ۳۱۶ و الکترود مرجع کالومل اشباع SCE است. ۳۰ دقیقه برای هر نمونه جهت رسیدن به حالت پایا زمان داده شد. برای بررسی خواص بتن و آرماتور به‌طور هم‌زمان، گستره‌ی کامل فرکانس (بالا، متوسط و پایین) در محدوده‌ی ۱۰ MHz-۱۰ mHz با دامنه ولتاژ ۱۰ mV تحلیل گردید [۱۷]. از الکترولیت محلول شبیه‌سازی‌شده آب دریا (۳/۵NaCl درصد)

خازنی مطلق و در صورت انحراف از رفتار خازنی شیب تغییر می‌کند. برای افزایش دقت انطباق منحنی‌های به دست آمده از عنصر فاز ثابت CPE استفاده می‌شود.

$$C = \frac{\omega^{-n}}{|CPE|} \quad (۳)$$

اگر در رابطه $n=1$ باشد رفتار خازنی (ω سرعت زاویه‌ای) مطلق انتظار می‌رود [۲۲]. برای بررسی صحیح رفتار الکتروشیمیایی نمونه، طراحی یک مدار معادل مناسب ضروری است. مدار معادل آرماتور قرار گرفته در بتن برای اولین بار توسط رندلز پیشنهاد شد. پس از بررسی‌های متفاوت مدار شکل ۱ جهت شبیه‌سازی امپدانس الکتروشیمیایی سامانه‌های پوششی پیشنهاد گردید.



شکل (۱): مدار معادل آرماتور فولادی در بتن با مقاومت بالا

در شکل R_s مقاومت جبران نشده، مقاومت الکتریکی بین الکتروود کاری و الکتروود مرجع است. در مطالعات انجام گرفته بر روی بتن به علت نسبت بالای مقاومت بتن به مقاومت محلول می‌توان از آن صرفه نظر نمود. R_p مقاومت پلاریزاسیون، ناشی از لایه رویین اکسیدی تشکیل شده بر روی سطح آرماتور است که با افزایش مقاومت پلاریزاسیون نرخ خوردگی بر روی فلز پایه کاهش می‌یابد، بنابراین مقاومت پلاریزاسیون با نرخ خوردگی رابطه معکوس دارد. R_{con} مقاومت بتن، R_{Coat} مقاومت پوشش، CPE_{dl} عنصر فاز ثابت جایگزین لایه دوگانه و CPE_{Coat} عنصر فاز ثابت پوشش می‌باشد (مدار معادل مناسب توسط نرم‌افزار Z view انتخاب گردید). ظرفیت خازنی لایه دوگانه، تفسیری است از انباشت الکترواستاتیک بارهای غیر

پلی یورتان دارای بیشترین اتصال به زمینه و آخرین سامانه‌ای خواهد بود که اتصال خود را با زمینه از دست می‌دهد. همچنین نتایج آزمون‌های الکتروشیمیایی مؤید چنین رفتاری در بتن است.

۲-۳- طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی

ترسیم قسمت مجازی امپدانس برحسب قسمت حقیقی آن را با منحنی نایکوئیست نمایش می‌دهند. قطر این نیم‌دایره بستگی به مقاومت به خوردگی پوشش داشته و چنانچه فرکانس نوک این نیم‌دایره اندازه‌گیری گردد، با استفاده از فرمول (۱)، مقدار ظرفیت خازنی خوردگی یا پوشش محاسبه می‌گردد [۲۲-۲۳]. بنابراین به‌طور کلی در منحنی نایکوئیست:

$$\left[\bar{Z} - \left(R_s + \frac{R_p}{2} \right) \right]^2 + (Z'')^2 = \left(\frac{R_p}{2} \right)^2 \quad (۱)$$

معادله (۱) دایره‌ای است به مرکز $\bar{Z} = \left(R_s + \frac{R_p}{2} \right)$ که روی محور \bar{Z} قرار دارد و شعاع آن برابر با $\frac{R_p}{2}$ است. در قله دایره (ماکزیمم مقدار $|-Z''|$) می‌توان نشان داد که با دیفرانسیل‌گیری از $-Z''$ نسبت به \bar{Z} و صفر قرار دادن آن داریم:

$$C = \frac{1}{\omega \cdot j \cdot Z} \quad \left| -Z'' \right|_{\max} \quad (۲)$$

در تمامی اشکال R_s مقاومت محلول و R_p مقاومت انتقال بار است که گاهی با مقاومت پلاریزاسیون برابر می‌شود [۲۲].

نمودار بُد، صورت ترسیم مقدار امپدانس $|Z|$ برحسب فرکانس و نمودار بد-فاز، ترسیم زاویه امپدانس برحسب فرکانس است. مزیت اصلی این منحنی نمایش فرکانس است که در مقادیر بسیار بالای فرکانس، قدر مطلق امپدانس به سمت مقاومت اهمی و در فرکانس‌های بسیار پایین امپدانس به سمت مقاومت کل سیستم میل می‌کند [۲۵]. در شرایطی که زاویه در منحنی بد-فاز برابر صفر باشد، رفتار مقاومتی خالص و زمانی که از صفر منحرف می‌شود، رفتار خازنی نمود پیدا می‌کند و در زاویه 90° درجه، سیستم رفتار خازنی مطلق خواهد داشت. در منحنی بُد نیز شیب -1 مؤید رفتار

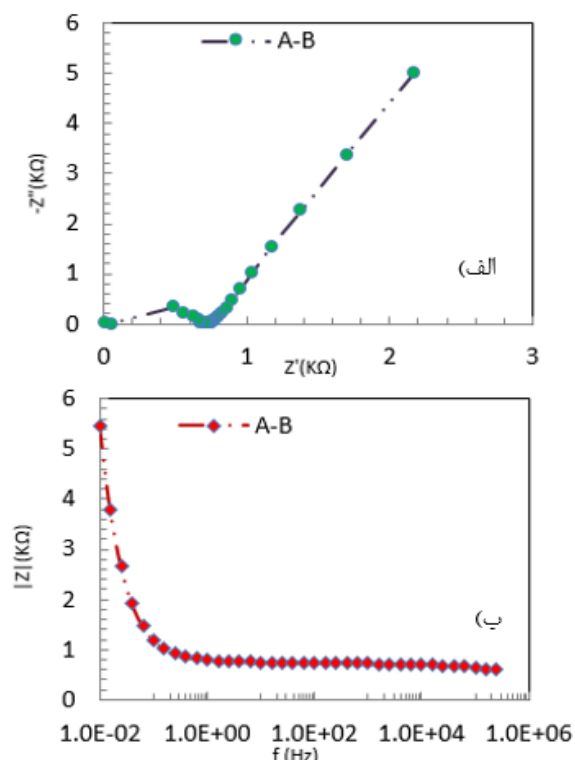
منحنی شکل ۲ ب (منحنی بد)، نیز برای مقایسه مقاومت کل (تقاطع منحنی با محور عمودی) که در طرح اختلاط اول و آرماتور بدون پوشش، مجموع مقاومت‌های انتقال بار و بتن ($R_p + R_s$) و در حالت اعمال پوشش مجموع سه مقاومت انتقال بار، مقاومت بتن و مقاومت پوشش ($R_p + R_{con} + R_{coat}$) است، استفاده شد.

در تمامی موارد، انحراف از حالت خازنی مطلق (شیب منفی یک منحنی بد) مشاهده شد. مقدار مقاومت پلاریزاسیون به دست آمده منطبق بر مطالعات مشابه در گستره‌ی کیلو اهم و ظرفیت خازنی لایه اکسیدی متخلخل محافظ و بتن به ترتیب گستره‌ی میکرو و میلی فاراد بر سانتی‌متر مربع گزارش شده است [۲۳]. نتایج نشان می‌دهد بتن استفاده شده با توجه به جدول ۳ و منحنی نایکوئیست شکل ۲ دارای مقاومت پایین و ظرفیت خازنی بالایی می‌باشد. لذا در گروه بتن‌های با مقاومت پایین قرار می‌گیرد (با توجه به رابطه‌ی عکس مقاومت موهومی با ظرفیت خازنی از یک طرف و اندازه مقاومت حقیقی پایین در منحنی نایکوئیست می‌توان چنین مقاومت پایینی را از منحنی نایکوئیست قبل از محاسبات نرم‌افزار پیش‌بینی نمود). تحقیقات مشابه نیز مقاومت بتن بدون افزودنی را در گستره‌ی $200-800 \Omega \text{ cm}^2$ گزارش نموده‌اند [۲۷]. لذا استفاده از این نوع طرح اختلاط در محیط‌های خورنده پیشنهاد نمی‌شود. اکنون با طرح اختلاط موجود اثر سامانه‌های پوششی را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۳-۲-۱- سامانه پوشش‌های آستری

در شکل ۳ منحنی نایکوئیست مربوط به سه سامانه پوششی آستری نشان داده شده است. منحنی نایکوئیست آسترهای رنگ استفاده شده بر روی آرماتور فولادی نشان می‌دهد که آستر اپوکسی پلی-آمید دارای بیشترین مقاومت [۲] (به علت استفاده از رنگ‌دانه و افزودنی‌های آلی غیر هادی در تولید رنگ) و آستری اپوکسی غنی از روی و آستری آلکیدی دارای مقاومت پایین‌تری هستند.

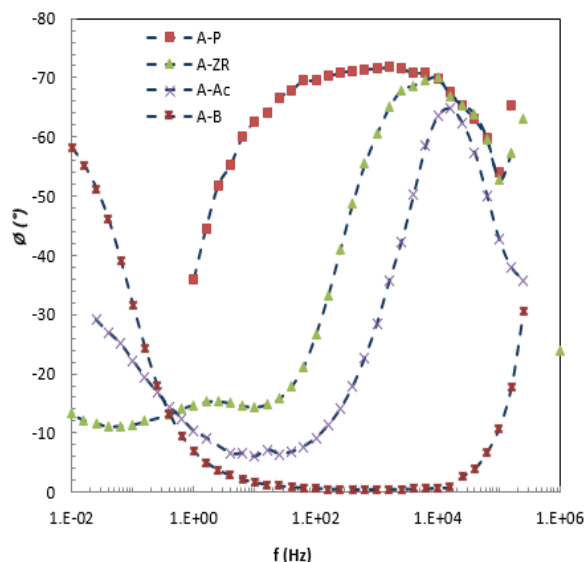
همان‌طور که در نزدیکی سطح فلز به گونه‌ای که این مقدار تابعی از ساختار و مشخصات ماده می‌باشد. ظرفیت خازنی لایه دوگانه در بتن معمولاً در محدوده‌ی $40-100 \frac{\mu\text{F}}{\text{cm}^2}$ تغییر می‌کند [۲۳]. در کلیه مدارهای ارائه شده انحراف از حالت خازنی به دو دلیل: ۱- عدم یکنواختی توزیع ضخامت لایه اکسیدی محافظ بر روی سطح آرماتور و ۲- توزیع نایکنواخت عیوب در لایه به وجود می‌آید [۱۵]. شکل ۲ منحنی‌های نایکوئیست و بُد مربوط به آرماتور فولادی بدون پوشش را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۲ الف، (منحنی نایکوئیست) تشخیص داده شد که در تحلیل مدار، دو ثابت زمانی (به علت وجود دو نیم‌دایره) و به ازای هر ثابت زمانی یک مقاومت در مدار معادل وجود دارد؛ که صحت این ادعا را می‌توان به علت وجود دو تقعر در منحنی بد- فاز تأیید نمود. در این پژوهش ایجاد تقعر در فرکانس بالا، مربوط به پارامترهای متغیر بتن (مقاومت و ظرفیت خازنی) و در فرکانس‌های کمتر مربوط به لایه اکسیدی رویین و در فرکانس‌های زیر ۱ Hz وجود تقعر مربوط به پوشش اعمال شده بر روی سطح آرماتور می‌باشد.



شکل (۲): منحنی: (الف): نایکوئیست و (ب): بُد آرماتور بدون پوشش

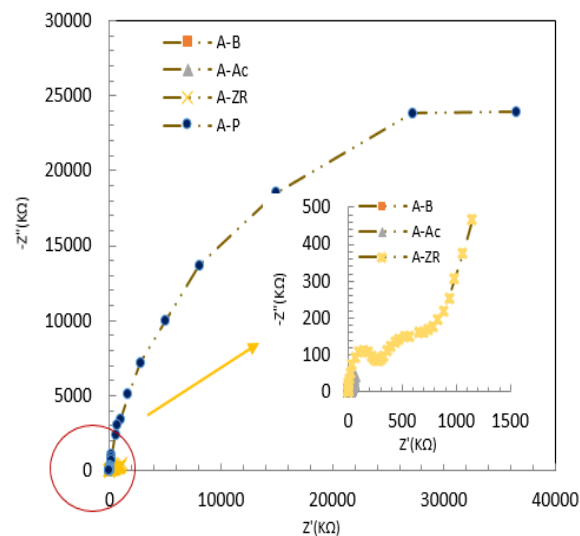
پلی آمید و ذرات روی (۶۵٪ وزنی کل رنگ در زمینه اپوکسی، با ذراتی به خلوص ۹۹٪) است، این ذرات باعث کاهش مقاومت (افزایش هدایت) رنگ می‌گردند؛ اما این کاهش مقاومت به منزله کاهش مقاومت به خوردگی نیست [۲۱]، چراکه ماهیت رنگ‌های استفاده شده از حیث رنگ‌دانه متفاوت می‌باشند.

لذا زمانی می‌توان تفسیر جامع و صحیحی ارائه داد که پوشش‌ها همگی غیر هادی بوده و بتوان آن‌ها را از این دیدگاه مطالعه نمود، چنانچه چنین افت مقاومتی در نمونه‌ی گالوانیزه نیز مشاهده خواهد شد. مقاومت پوشش آستر آلکیدی $297 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ محاسبه گردید. مطابق با شکل ۵ پوشش اپوکسی پلی آمید یک ثابت زمانی (تقعر) را از خود نشان می‌دهد. این پدیده در تمام پوشش‌های با مقاومت بالا (نسبت به بتن) مشاهده می‌شود که دلیل آن ادغام دو ثابت زمانی، یا چند ثابت زمانی در یک ثابت است. بدین معنا که به علت اختلاف زیاد مقاومت چند جزء، ثابت زمانی اجزاء با مقاومت کمتر (مقاومت بتن) حذف می‌گردد.

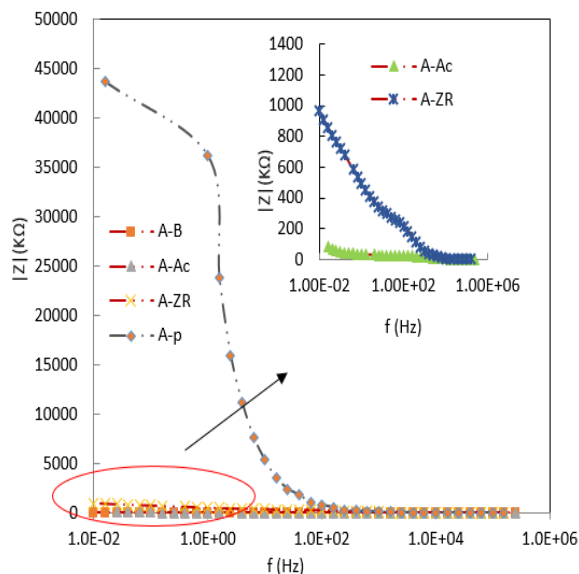


شکل (۵): منحنی بُد-فاز سامانه‌های A-P و A-ZR, A-AC

لذا در تمامی جداول گزارش شده بعدی فقط مقاومت و ظرفیت خازنی پوشش ارائه شده است. وجود ثابت زمانی سوم که فقط در پوشش غنی از روی مشاهده شد با پدیده امیدانس واربرگ توجیه می‌گردد (کنترل سیستم



شکل (۳): منحنی نایکوئیست سامانه A-P و A-ZR, A-AC در مقایسه با A-B



شکل (۴): منحنی بُد سامانه‌های A-P و A-ZR, A-AC در مقایسه با A-B

در هنگام انتخاب هر سامانه حفاظتی باید به مجموع عوامل تأثیرگذار در کاهش یا افزایش مقاومت یا به عبارتی مجموع مقاومت‌های موجود در سیستم توجه خاص نمود، در این راستا جهت مقایسه مطلوب تر منحنی بُد در شکل ۴ نشان داده شده است. شکل ۴ نشان می‌دهد آستری اپوکسی پلی آمید دارای بیشترین مقاومت و اختلاف زیادی با سامانه اپوکسی غنی از روی داراست. سامانه پوششی اپوکسی غنی از روی، متشکل از دو جزء اپوکسی

پوششی تحت دیفوزیون واکنش‌های کاتدی و به وجود آمدن خطی با زاویه ۴۵ درجه در منحنی نایکوئیست و معمولاً $n=0.5$). در جدول ۳ مقادیر کمی هر متغیر نشان داده شده است. با توجه به مقادیر منحنی شکل ۴ پوشش اپوکسی پلی آمید با مقاومت حدود

مقاومت در رده‌های بعدی آستری اپوکسی غنی از روی و سپس آسترهای آلکیدی قرار می‌گیرند.

جدول (۳): مقادیر اجزاء مدار در سامانه A-P و A-ZR، A-AC

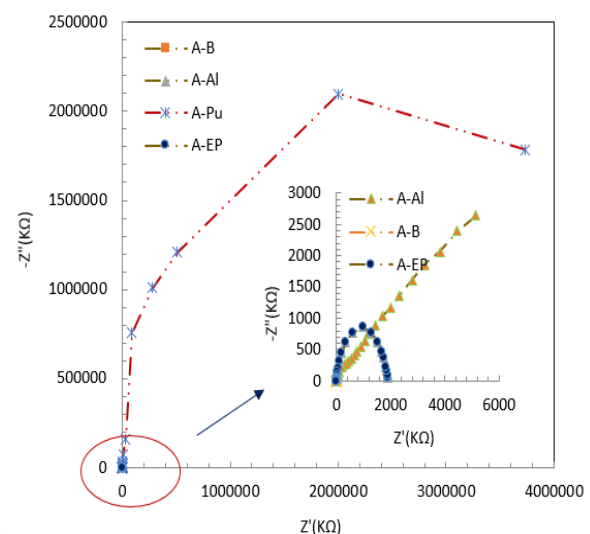
Parametre	R(k Ω)		CPE(μ F/cm 2)	n
A-B	Concrete	۱/۲۳	۱۲۷/۴۳	۰/۸۴
	Plarization	۴/۳۳	۱/۲۷	۰/۹۷
	coat	-	-	-
A-AC	Concrete	۱/۷۳	۱۱۲/۱۱	۰/۷۲
	Plarization	۲۷/۳	۱/۱۲	۰/۸۸
	coat	۲۹۷/۳	۰/۳۴	۰/۸۳
A-ZR	Concrete	-	-	-
	Plarization	۳۴۹	۰/۵۳	۰/۸۲
	coat	۱۳۲۴	۰/۰۳۲	۰/۸۹
A-P	Concrete	-	-	-
	Plarization	-	-	-
	coat	۸۰۰۰۰	۰/۰۰۳۲	۰/۹۴

مقاومت بسیار بالای پلی یورتان در منحنی نایکوئیست به خوبی مشاهده می‌گردد. در بین پوشش‌های استفاده شده در این قسمت سامانه پوششی پلی یورتان دارای بیشترین مقاومت و مشابه با سامانه اپوکسی پلی آمید اختلاف زیادی با سامانه‌های دیگر از خود نشان می‌دهد. اپوکسی پلی یورتان در خانواده رنگ‌های دوجزئی ایزوسیانات-آکریلیک قرار می‌گیرد.

مطابق با تحقیقات مشابه نتایج نشان می‌دهد این پوشش‌ها دارای نفوذی بسیار پایین و چسبندگی بسیار بالا (مطابق با آزمون چسبندگی رنگ) می‌باشند [۱۲]. برای مقایسه مقاومت مجموع (مقاومت‌های پوشش و بتن) از منحنی بُد استفاده شد. منحنی بُد مربوط به رنگ‌های رویه اپوکسی پلی آمید، پلی یورتان و آلکیدی در شکل ۷ نشان داده شده است. در بین رنگ‌های رویه اپوکسی، پلی یورتان دارای بیشترین مقاومت می‌باشد. در مرحله بعد سامانه پوششی آلکیدی و بعد از آن اپوکسی پلی آمید قرار می‌گیرد. در پوشش‌های رویه پوشش آلکیدی دارای مقاومت

۳-۲-۲- سامانه پوششی رویه

منحنی‌های نایکوئیست مربوط به رنگ‌های رویه اپوکسی پلی آمید، پلی یورتان و آلکیدی در شکل ۶ نشان داده شده است.

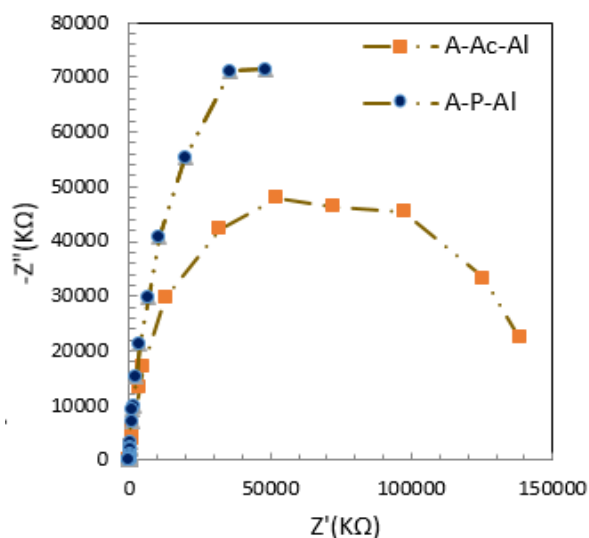


شکل (۶): منحنی نایکوئیست رنگ‌های رویه اپوکسی پلی آمید، آلکیدی و پلی یورتان

دارای ظرفیت خازنی بسیار پایین (در گستره‌ی پیکو فاراد) است. جدول ۴ پارامترهای موجود در هر سامانه‌های پوششی رنگ رویه اپوکسی پلی آمید، پلی یورتان و آلکیدی را نشان می‌دهد.

۳-۲-۳- سامانه پوششی رنگ‌های دولایه (آستر- رویه)

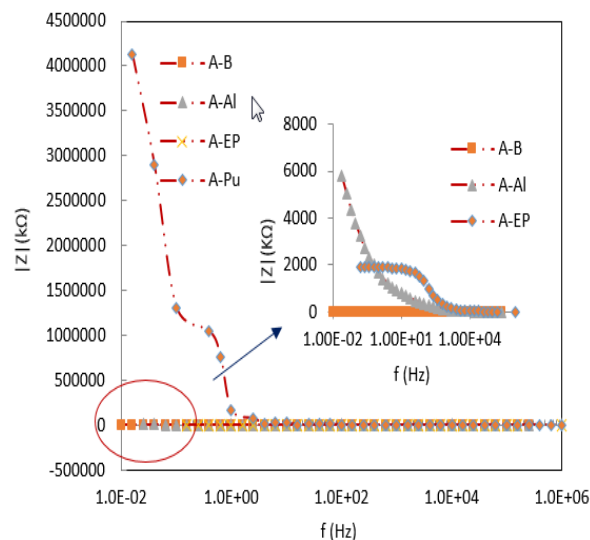
در شکل ۸ منحنی نایکوئیست فولاد با پوشش آستر اپوکسی پلی آمید و آستر آلکیدی با رنگ رویه آلکیدی نشان داده شده است. دو حالت انتخاب شده‌ی دو آستری با بیشترین و کمترین مقاومت و رنگ رویه با کمترین مقاومت به خوردگی (پارامترهای اقتصادی لحاظ شده) است. دلیل استفاده از رنگ رویه با مقاومت به خوردگی کم این است که با استفاده از دو پوشش (آستری و رویه) با مقاومت کم تا چه میزان می‌توان باعث بهبود مقاومت به خوردگی شد و متقابلاً استفاده از یک پوشش رویه ضعیف چه تأثیری بر یک زیر لایه مقاوم در برابر خوردگی می‌گذارد.



شکل (۸): منحنی نایکوئیست سامانه پوششی رنگ‌های آستر آلکیدی و اپوکسی پلی آمید با رنگ رویه آلکیدی

نتایج شکل ۸ به وضوح نشان می‌دهد استفاده از رنگ رویه آلکیدی بر روی آستر آلکیدی باعث افزایش مقاومت لایه نسبت به سامانه پوششی آستر اپوکسی پلی آمید با رویه آلکیدی شده است. به عبارتی پوشش آستری آلکیدی که در قسمت آستری

بالتری از پوشش اپوکسی پلی آمید می‌باشند. این در حالی است که استفاده از پوشش‌های آلکیدی رویه به‌عنوان جایگزین پوشش‌های اپوکسی پلی آمید در صنعت به‌هیچ‌وجه توصیه نمی‌شود.

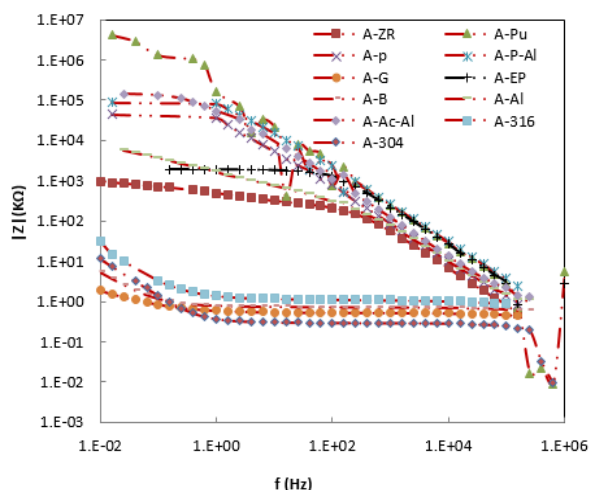


شکل (۷): منحنی بُد رنگ‌های رویه اپوکسی پلی آمید، پلی یورتان و آلکیدی

جدول (۴): سامانه‌های پوششی رویه اپوکسی پلی آمید، پلی یورتان و آلکیدی

Parameter	R(kΩ)	CPE(μF/cm ²)	n
A-Al	Concrete	-	-
	Plarization	۱۲۳	۳/۷۲۱
	coat	۶۰۱۴	۱/۳۳
A-EP	Concrete	-	-
	Plarization	-	-
	coat	۲۰۱۰	/۰۰۱۸
A-PU	Concrete	-	-
	Plarization	-	-
	coat	۷۳۱۰۰۰۰	۰/۰۰۰۴۵

مطابق با جدول ۴ پوشش پلی یورتان دارای $۷/۳G\Omega.cm^2$ ، مقاوم‌ترین پوششی است که مورد استفاده قرار گرفت. این پوشش



شکل (۹): منحنی‌های بُد فولاد با سامانه پوششی آستری، رویه، آستری- رویه

اختلاف بسیار زیاد اپوکسی پلی یورتان در نمودار شکل ۱۰ به خوبی مشاهده می‌شود. مقاومت هر سامانه در سمت راست نمودار بزرگ‌نمایی شده است.

جدول (۶): مقایسه مقاومت معادل برای هر یک از سامانه‌های پوششی استفاده‌شده جهت حفاظت از آرماتور در بتن

روش حفاظت	مقاومت ($k\Omega.cm^2$)	روش حفاظت	مقاومت ($k\Omega.cm^2$)
A-B	۵/۰۱۶	A-P	۷۹۸۶۹
A-G	۲/۶۹	A-EP	۲۰۳۵
A-304	۱۰/۳۸	A-PU	۷۲۹۹۳۴۱
A-316	۳۲/۴۱	A-Al	۵۰۶۷
A-AC	۲۹۸/۲۲	A-AC-Al	۱۳۳۰۹۸
A-ZR	۱۲۸۹	A-P-Al	۸۲۰۱۹

مقایسه نسبت افزایش مقاومت کل نسبت با آرماتور فولادی بدون پوشش بر اساس داده‌های آزمون امپدانس الکتروشیمیایی در جدول ۷ نشان داده شده است.

مورد بررسی قرار گرفت با مقاومت $297 k\Omega.cm^2$ پایین‌ترین و آستر اپوکسی پلی آمید با $80 M\Omega.cm^2$ دارای بیشترین مقاومت گزارش شدند، در صورتی که در مرحله اعمال رنگ رویه آستر آلکیدی با پوشش رویه آلکیدی به مقاومت بیشتر (حدود $140 M\Omega.cm^2$ نسبت به $82 M\Omega.cm^2$ آستر اپوکسی پلی آمید) رسیده است. این موضوع را می‌توان به چسبندگی بهتر آلکیدی رویه به آلکیدی آستر نسبت به اپوکسی پلی آمید نسبت داد. در جدول ۵ مقدار متغیرهای مدار معادل، آستر اپوکسی پلی آمید با رویه آلکیدی و آستر آلکیدی با رویه آلکیدی نشان داده شده است.

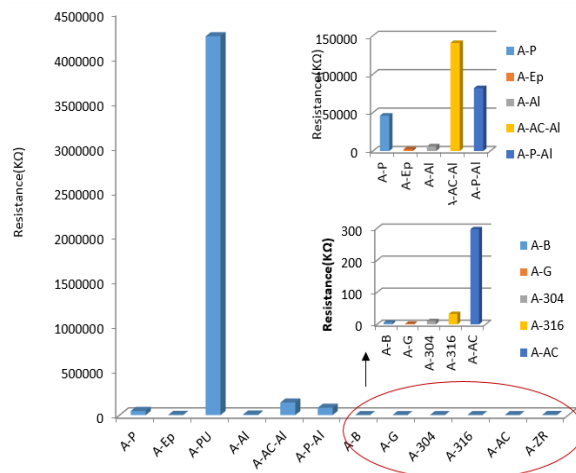
بنابراین در بین سامانه‌های به کار برده شده، سامانه پوششی پلی یورتان با $7/3 G\Omega.cm^2$ دارای بیشترین مقاومت و آستر آلکیدی با $297 k\Omega.cm^2$ کمترین مقاومت را دارا بودند.

جدول (۵): پارامتر سامانه‌های پوششی آستر آلکیدی با رنگ رویه آلکیدی اپوکسی پلی آمید با رنگ رویه آلکیدی

Parameter	R(kΩ)	CPE($\mu F/cm^2$)	n
A-AC-Al	Concrete	-	-
	Plarization	-	-
	coat	۱۳۹۰۶۷	۰/۰۰۲۸۴
A-P-Al	Concrete	-	-
	Plarization	-	-
	coat	۸۲۳۵۷	۰/۰۰۳۱۹

بر اساس شکل ۹ فولاد با سامانه اپوکسی پلی یورتان دارای بالاترین مقاومت و فولاد با پوشش آلکیدی دارای کمترین مقاومت در بتن می‌باشند (جهت مقایسه فولاد با پوشش گالوانیزه و تغییر جنس آرماتور با فولادهای زنگ نزن 304 و 316 نیز در پایان مقایسه وارد گردید). پس از آن به ترتیب فولاد با سامانه آستر آلکیدی- رویه آلکیدی قرار می‌گیرد. میزان دقیق هر مقاومت در جدول ۶ و جهت مقایسه بهتر در نمودار شکل ۱۰ نشان داده شده است.

آمید-آلکیدی در رده‌ی بعدی قرار می‌گیرند. سامانه آلکیدی-آلکیدی به علت چسبندگی خوب دو لایه به هم و اپوکسی-آلکیدی نیز به علت چسبندگی بسیار بالای پوشش آستری به سطح (به استناد به داده‌های آزمون چسبندگی رنگ) دارای مقاومت بالایی هستند. سپس سامانه‌های پوششی آستر اپوکسی پلی آمید، رویه آلکیدی، رویه اپوکسی پلی آمید، آستر آلکیدی، فولاد مقاوم در برابر خوردگی ۳۱۶، ۳۰۴ و فولاد ساده کربنی قرار می‌گیرد.



شکل (۱۰): نمودار مقایسه‌ی مقاومت معادل مدار سامانه‌های پوشش حفاظتی از خوردگی فولاد در بتن

جدول (۷): ضریب افزایش مقاومت در هریک از سامانه‌های حفاظتی نسبت به آرماتور بدون پوشش

نسبت افزایش مقاومت	روش حفاظت	نسبت افزایش مقاومت	روش حفاظت
۱۵۹۲۲/۸۴	A-P	۱	A-B
۴۰۵/۷۰	A-Ep	۰/۵۳	A-G
۱۴۵۵۱۹۱	A-PU	۲/۰۶	A-304
۱۰۱۰/۱۶	A-Al	۶/۴۶	A-316
۲۶۵۳۴/۶۸	A-AC-Al	۴۵۵۹/	A-AC
۱۶۳۵۱/۴۷	A-P-Al	۲۵۶/۹۸	A-ZR

در پایان لازم به ذکر است، استفاده از نتایج آزمون تسریع شده خوردگی در کنار روش قدرتمند طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی تحلیل جامع‌تری را ارائه خواهد داد.

۴- نتیجه‌گیری

بر اساس تحلیل‌های انجام شده یکی از بهترین معیارهای مقایسه در آزمون امپدانس الکتروشیمیایی بررسی مقاومت کل معادل مدار (با توجه به منحنی‌های بُد) می‌باشد که برآیند کل روش‌های اعمالی در جهت افزایش مقاومت به خوردگی را نشان می‌دهد. لذا آرماتور با پوشش پلی یورتان دارای بیشترین مقاومت و به ترتیب، سامانه پوششی آستر-رویه، آلکیدی-آلکیدی و اپوکسی پلی

۵- مراجع

- [1] El-Reedy, "Steel reinforced concrete structures assessment and repair of corrosion", CRC Press, pp. 7-12, 2007.
- [2] L. Kepler, D. Darwin & C. E. Locke, "Evaluation corrosion protection methods for reinforced concrete highway structures", University of Kansas Center for Research, Inc., 2000.
- [۳] ح. ناظمی، م. درخشش و ح. ابراهیم خانی، "بررسی مقاومت به خوردگی آرماتورهای فولادی در بتن و نقش افزودنی‌های الیاف پلی‌استر و نانوسیلیس در آن"، فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، دوره هشتم، شماره چهارم، صفحه ۱۱۵-۱۲۳، ۱۳۹۳.
- [۴] م. آقابابایی بنی و م. پاکشیر، "بررسی اثر دما و غلظت اسید سولفوریک بر خوردگی تاج لوله‌های بتن"، فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، دوره دهم، شماره چهارم، صفحه ۲۵-۳۱، ۱۳۹۵.
- [5] P. Refait, M. Abdelmoula, J. Marie, R. Genin & Rene Sabot, "Green rusts in electrochemical and microbially influenced corrosion of steel", Geoscience, Vol. 338, pp. 476-487, 2006.
- [6] Sh. Ahmad, "Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction a-review", Cement and Concrete Composites, Vol. 25, pp. 447-459, 2003.
- [7] J. K. Buffenbarger, M. A. Miltenberger, B. D. Miller & H. L. Casal, "Long-term performance of organic inhibitors", Int. Congress on Advanced

- [18] K. Saravanan, S. Sathiyarayanan, S. Muralidharan, S. Syed Azim & G. Venkatachari, "Performance evaluation of polyaniline pigmented epoxy coating for corrosion protection of steel in concrete environment", *Progress in Organic Coatings*, Vol. 59, pp. 160-167, 2007.
- [19] F. Mansfeld, M. W. Kendig & S. Tsai, "Evaluation of corrosion behavior of coated metals with AC impedance measurement", *Corrosion NACE*, Vol. 38, No. 9, pp. 478-485, 1982.
- [20] ASTM D45-41, "Standard specification for pull off test", American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, Vol. 4, No. 2, 1998.
- [21] W. Chalee, et al. "Predicting the chloride of fly ash concrete in sea water", *Marine Structures*, Vol. 22, No. 3, pp. 341-353, 2009.
- [22] ASTM C595, "Standard specification for blended hydraulic cements", American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2002.
- [23] J. Lich, "Coating thickness", *Materials Performance*, Vol. 45, pp. 3212-3222, 2001.
- [24] R. Soleymani & M. E. Ismail, "Comparing corrosion measurement methods to assess the corrosion activity of laboratory OPC and HPC concrete specimens", *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, pp. 2037-2044, 2004.
- [25] J. R. Scully, "Electrochemical impedance analysis and interpretation", ASTM, 1993.
- [26] G. Qiao & J. Qua, "Corrosion monitoring of reinforcing steel in cement mortar by EIS and ENA", *Electrochimica Acta*, Vol. 52, No. 28, pp. 8008-8019, 2007.
- [27] Husain, et al. "Accelerated AC impedance testing for prequalification of marine construction materials", *Desalination*, Vol. 165, pp. 377-384, 2004.
- Materials, Their Processes and Applications, Munich, Germany, 2000.
- [8] K. Barton, "Protection against atmospheric corrosion", Wiley, New York, pp. 64-110, 1976.
- [9] G. Tansug, et al., "Mild steel protection with epoxy top coated polypyrrole and polyaniline in 3.5% NaCl", PPT Lecture at University of Ukurova, 2006.
- [10] P. A. Schweitzer, "Paint and coatings: applications and corrosion resistance", Taylor and Francis, pp. 120-160, 2006.
- [11] P. A. Schweitzer, "Corrosion resistance tables", Fifth Edition Report, Vol. 4, pp. 2793-2796, 2004.
- [12] R. Selvaraj, et al., "Studies on the evaluation of the performance of organic coatings used for the prevention of corrosion of steel rebars in concrete structures", *Progress in Organic Coatings*, Vol. 64, No. 4, pp. 134-141, 2009.
- [13] Y. P. Virmani, "Multiple corrosion protection systems for reinforced concrete bridge components", Federal Highway Administration, 2007.
- [14] D. Loveday, P. Peterson & D. Rodgers, "Evaluation of organic coatings with electrochemical impedance spectroscopy", *JCT Coating Technology*, Vol. 8, pp. 46-52, 2004.
- [15] M. S. Anchez & J. Gregori, "Anodic growth of passive layers on steel rebars in an alkaline medium simulating the concrete pores", *Electrochimica Acta*, Vol. 52, No. 1, pp. 47-53, 2006.
- [16] J. M. Loche & A. Ammar, "Influence of the migration of chloride ions on the electrochemical impedance spectroscopy of mortar paste", *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, No. 1, pp. 1797-1803, 2005.
- [17] Z. Q. Tan, "Effect of surface condition on the initial corrosion of galvanized reinforcing steel embedded in concrete", *Corrosion Science*, Vol. 50, No. 9, pp. 2512-2522, 2008.

Corrosion behavior of industrial inorganic coating upon the reinforcement through electrochemical impedance spectroscopy

Yadollah Yaghoubinezhad¹ *, Abdollah Afshar², Abolghasem Dolati²

1- Assistant professor, Department of mechanical and materials engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Khorasan Jonoubi, Iran

2- Professor, Department of materials science and engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

*Corresponding author: Yaghoubinezhad@birjandut.ac.ir

Abstract

In this study, the effect of several industrial protective coatings such as alkyd base primer, zinc rich primer and polyamide primer coatings in comparison with the surface paints comprising alkyd, polyamide and polyamine were carefully investigated. For evaluating corrosion and durability of concrete properties, strength of the mixture, the Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) and pull off tests was accomplished. The results were significantly demonstrated that the EIS technique could be performed as a nondestructive and accurate procedure for corrosion evaluating in rebar coating. Moreover, the correlative coating of isocyanide-acrylic with an impedance of $7.3 \text{ G}\Omega \cdot \text{cm}^2$ depicted the best response to corrosion in corrosive environments.

Keywords: Corrosion, Paint, Concrete, Rebar, Electrochemical Impedance Spectroscopy.

Journal homepage: ma.iaumajlesi.ac.ir

Please cite this article using:

Yadollah Yaghoubinezhad, Abdollah Afshar, Abolghasem Dolati, Corrosion behavior of industrial inorganic coating upon the reinforcement through electrochemical impedance spectroscopy, in Persian, *New Process in Material Engineering*, 2018, 12(3), 1-13.