



بررسی اثر نانوذرات اکسیدی روی و نانوتیتانیا بر خواص حفاظتی پوشش‌های پلی‌یورتانی آب‌پایه در محیط شتابیده محفظه نور فرابنفش

معصومه رشوند^۱، زهرا رنجبر^{۲،*}

۱- دانشجوی دکترا، گروه پژوهشی پوشش‌های سطح و خوردگی، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵

۲- دانشیار، گروه پژوهشی پوشش‌های سطح و خوردگی، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵

۳- قطب علمی رنگ، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵

تاریخ دریافت: ۹۰/۱۲/۲۰ تاریخ پذیرش: ۹۱/۷/۹ در دسترس به صورت الکترونیکی از: ۱۳۹۲/۳/۲۰

چکیده

با وجود اینکه اخیراً صنعت خودرو پیشرفت قابل توجهی در تولید پوشش‌های خودروبی با کارایی بسیار خوب داشته است، در حال حاضر تقاضاهای مردمی برای پوشش‌هایی با پایداری نوری خوب و ظاهری بهتر بیشتر شده است. از این رو در تحقیق حاضر برای افزایش پایداری نوری سیستم پوششی، از دو ماده پایدارکننده نوری UV با نام‌های نانو اکسید روی و نانو تیتانیا استفاده شد و این مواد به لایه آستر ضدخوردگی یک سامانه پوشش خودروبی افزوده شدند. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها اثر این مواد جاذب بر روی مقاومت به خوردگی پوشش تحت شرایط جوی شتابیده از قبیل آزمون‌های محفظه UV، غوطه‌وری در محلول ۳،۵ درصد کلرید سدیم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که حضور بسیار اندک این جاذب‌های نور UV باعث بهبود پایداری جوی و خواص ضدخوردگی پوشش تا ۱۰ برابر بیشتر نسبت به پوشش بدون پایدارکننده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: پایدارکننده‌های نوری، نانو اکسید روی، نانو تیتانیا، فیلم پوششی، پلی‌یورتان.

Study of the Effect of Nano Zinc Oxide and Nano Titania Particles as UV Stabilizer in the Waterborne Polyurethane Coatings in Accelerated Weathering Conditions

M. Rashvand¹, Z. Ranjbar^{1,2}

¹ Department of Surface Coatings and Corrosion, Institute for Color Science and Technology, P.O.Box: 16765-654, Tehran, Iran

² Center of Excellence for Color Science and Technology, P.O.Box: 16765-654, Tehran, Iran

Received: 11-03-2012

Accepted: 30-09-2012

Available online: 10-06-2013

Abstract

Recently, demands for the automotive coatings with good protective resistance and better appearance are grown up. So that in this research two kinds of UV stabilizer, nano Zinc Oxide and nano Titania were used in an automotive corrosion resistant primer to improve the light resistance of coatings. After that the corrosion resistance of the nano composite coatings, under some accelerated weathering condition like dry UV cabin and immersion in 3.5 wt% NaCl solutions were studied. The results show that presence of these additives even in a small amount could improve about 10 times the UV stability and corrosion resistance of coatings. *J. Color Sci. Tech.* 7(2013), 69-74 © Institute for Color Science and Technology.

Keywords: Light stabilizer, Nano zinc oxide, Nano titania, Coating film, Polyurethane.

۱- مقدمه

تخریب پوشش‌ها به دلیل حملات فیزیکی و شیمیایی واسطه‌های مخرب ظاهر می‌شود که معمولاً چندین فرآیند مختلف شیمیایی و فیزیکی را شامل می‌شود. اکثر پوشش‌ها زمانی که در محیط جوی قرار می‌گیرند مستعد تخریب می‌باشند، خصوصاً محیط‌های جوی که در آنها احتمال واکنش‌های فتوشیمیایی ناشی از نور خورشید زیاد باشد، انرژی نور خورشید همراه با اکسیژن جو باعث پاره‌شدن زنجیره‌های پلیمری و وقوع تخریب فتوشیمیایی شده که با افزایش دما فرآیند تخریب پوشش تشدید می‌گردد و یا حتی حضور تنش‌ها، که می‌تواند ناشی از اثرات گرادیان دمایی، تفاوت موجود در ضریب انبساط گرمایی بین سامانه پوششی و زیرآیند و غیره باعث افزایش سرعت تخریب می‌شود [۴-۱]. یکی از رایج‌ترین انواع تخریب در پوشش‌ها تخریب نوری حاصل از پرتو فرابنفش خورشید می‌باشد، که برای جلوگیری از این امر برای تهیه فرمولاسیون پوشش‌هایی که در معرض پرتو خورشید قرار می‌گیرند از پلیمرهای مقاوم در برابر پرتو فرابنفش می‌توان از پلی‌یورتان‌های آلیفاتیک و آکرلیک‌ها در فرمولاسیون فیلم پوششی نام برد؛ یا در مواردی از افزودنی‌هایی که پایداری فیلم پوششی را در مقابل نور خورشید افزایش می‌دهند، مثل پایدارکننده‌های نوری در فرمولاسیون فیلم پوششی استفاده می‌شود تا از پوشش در مقابل تخریب نوری حفاظت کنند [۷-۵].

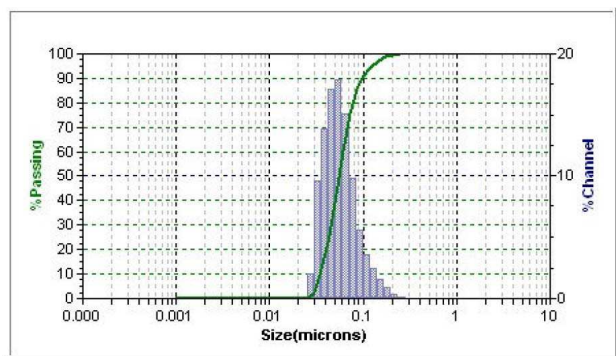
سیستم‌های پوشش خودرویی اغلب از چهار لایه تشکیل می‌شوند به این صورت که آستری‌ها برای افزایش خواص حفاظتی، بن پوشه جهت ایجاد پوششی صاف و هموار و بهبود خواص مکانیکی و تعیین رنگ پوشش و در نهایت شفاف پوشه به عنوان پوششی مقاوم در برابر مواد شیمیایی و شرایط جوی می‌باشد. شفاف پوشه‌ها نقش بسیار مهمی بر روی ظاهر پوشش‌های خودرویی دارند به گونه‌ای که حفظ براقت پوشش هنگام مواجهه با شرایط آب و هوایی نامناسب و طول موج‌های مضر و عدم تغییر رنگ از ویژگی‌های بسیار مهم این لایه می‌باشد [۷]. تا به حال تحقیقات زیادی بر روی اثر برخی جاذب‌های نور فرابنفش جهت افزایش پایداری نوری پوشش‌های خودرویی در لایه‌های مختلف سیستم پوششی انجام شده است. البته تحقیقات بسیار نادری در زمینه حضور این دسته از مواد پایدارکننده در لایه آستری یا همان الکتروپوشش شده است، مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که در برخی موارد تعداد لایه‌های اعمالی به ۲ یا ۳ لایه محدود می‌شود که این امر باعث عبور پرتو فرابنفش از شفاف پوشه و مجاورت آن با الکتروپوشش می‌شود. در برخی دیگر بعد از اعمال الکتروپوشش، خودروها در مکانی باز انبار می‌شوند و پس از مدتی برای اعمال لایه‌های بعدی پوشش ارسال می‌شوند. از آنجا که الکتروپوشش بر پایه پلی‌یورتان آروماتیک است، حساسیت شدیدی به پرتو فرابنفش دارند و به سرعت تخریب می‌شوند. اکسیداسیون الکتروپوشش و نتیجتاً پوسته‌پوسته‌شدن و ترک خوردن باعث عبور آسان‌تر رطوبت و آلاینده محیطی به سطح فلز شده [۶] و

حضور رطوبت بر روی سطح فلز باعث افت پایداری جوی یک سیستم پوشش خودرویی نیز می‌شود و در نتیجه پایداری پوشش در برابر شرایط آب و هوایی مختلف افت خواهد کرد. لذا به نظر می‌رسد یک روش پایداری نوری برای این لایه نیاز است. سازوکار عملکرد پایدارکننده‌های نوری به گونه‌ای است که با قرار گرفتن در الکتروپوشش و جذب پرتو فرابنفش مانع از تخریب این لایه می‌شوند و در نتیجه مقاومت به خوردگی آنها با گذر زمان کمتر افت می‌کند.

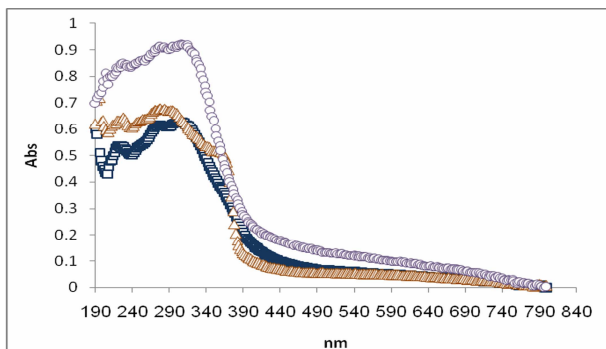
به طور معمول پایدارکننده‌های نوری در غلظت‌هایی کمتر از ۵٪ در فرمولاسیون پوشش‌ها استفاده می‌شوند. بنزوفنون‌ها، بنزوتری-آزول‌ها، تری‌آزین‌ها از انواع دسته‌های شیمیایی مختلف پایدارکننده‌های نوری هستند. اگر چه به خاطر جرم مولکولی نسبتاً پایین این مواد، این گونه از مواد افزودنی می‌توانند به سطح فیلم پوششی و یا زیرآیند مهاجرت کنند. و از آنجایی که اینها ترکیبات شیمیایی هستند در بسیاری از سازوکارهای تخریب دخیل هستند [۹-۸]. تعداد زیادی از اکسیدهای فلزی هم قادر به جذب پرتوهای فرابنفش می‌باشند که رایج‌ترین آنها اکسیدروی (ZnO)، دی‌اکسید تیتانیم (TiO₂) البته از نوع روتایل، اکسید سربیم و غیره می‌باشد [۱۰]. این نوع پایدارکننده‌های نوری یا همان جاذب‌های معدنی ترکیباتی نیمه رسانا هستند که در ابعاد نانو یا میکرو در پوشش‌ها کاربرد دارند، این دسته از جاذب‌های نوری در واقع نیمه‌هادی‌هایی هستند که به دلیل ساختار الکترونی خود به عنوان محرک فرآیندهای القا شده با نور عمل می‌کنند که توسط نوار ظرفیت پر و نوار هدایت خالی مشخص می‌شوند. وقتی فوتونی با انرژی برابر یا بیشتر از گاف انرژی نیمه هادی به آنها بتابد یک الکترون از نوار ظرفیت به نوار هدایت منتقل شده و یک حفره در نوار ظرفیت به جا می‌گذارد. الکترون‌های نوار هدایت و حفره‌های نوار ظرفیت می‌توانند دوباره با هم ترکیب شده و انرژی آزاد نمایند که بدین ترتیب باعث کاهش شدت انرژی پرتو فرابنفش تابیده شده و تبدیل آن به فرم دیگر انرژی مثل گرما می‌شود که بدین ترتیب اثرات مخرب پرتو فرابنفش کاهش می‌یابد [۱۰].

اکسیدهای فلزی در مقایسه با جاذب‌های آلی از زمان پایداری طولانی‌تری برخوردارند. جاذب‌های معدنی مهاجرت کمتری دارند و در بین اکسیدهای فلزی، اکسیدسربیم شفافیت بهتری دارد و در مقایسه با دی اکسید تیتانیم، فعالیت نوری کمتری دارد [۹، ۵]. اولین گزارشات مطرح شده در رابطه با استفاده از این دسته پایدارکننده‌های نوری به دهه ۶۰ برمی‌گردد [۱۱].

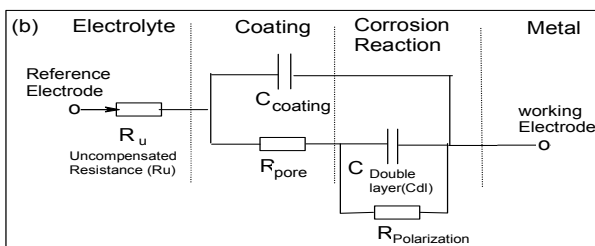
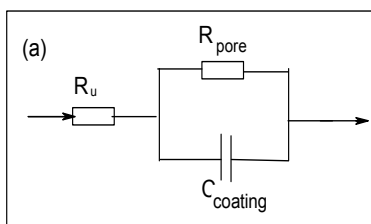
با توسعه صنعت نانو و تولید اکسیدهای فلزی در ابعاد نانو، این افزودنی‌ها قادر به جذب پرتو فرابنفش بوده در حالی که در منطقه مرئی طیف طول موج به صورت شفاف هستند و باعث تغییر رنگ فیلم پوششی نمی‌شوند. ذرات با اندازه کمتر از ۱۰۰ نانومتر را می‌توان به فیلم پوششی افزود در حالی که رنگ فیلم پوششی ثابت می‌ماند. با توجه به این توصیفات نانو ذرات ZnO و TiO₂ به عنوان گزینه اصلی



شکل ۱: توزیع اندازه ذرات نانو اکسید روی.



شکل ۲: طیف جذبی فرابنفش-مرئی فیلم پوششی بدون رنگدانه □: پوشش مرجع، Δ: پوشش حاوی نانو اکسید روی، ○: پوشش حاوی نانو تیتانیا.



شکل ۳: مدار معادل الکتریکی (a): پوشش اولیه، (b): پوشش تخریب شده.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی

تجزیه و تحلیل پاسخ‌های بسامد نمونه‌ها به کمک نرم‌افزار Ivium Equivalent Circuit Evaluator و با برازش نقاط توسط مدار معادل الکتریکی که در شکل ۳ نشان داده شده است انجام گرفت. R_u مقاومت محلول، R_{por} مقاومت حفره، C_{coat} ظرفیت پوشش، C_{dl} ظرفیت لایه دوگانه الکتریکی و R_p مقاومت پلاریزاسیون می‌باشد.

در انتخاب پایدارکننده نوری در این تحقیق قرار گرفتند که علاوه بر خصوصیات مطرح شده، این مواد بواسطه اینکه به صورت ذرات غیرآلی هستند به صورت ثابت در بستر پلیمری قرار می‌گیرند و مهاجرت نمی‌کنند [۱۲].

در این تحقیق حضور نانو ذرات اکسید روی و نانو تیتانیا به عنوان پایدارکننده نوری در الکتروپوشش کاتدی برای اولین بار استفاده شده و مقاومت جوی و خوردگی این پوشش و تاثیر حضور این نانو ذرات در این پوشش بررسی می‌شود.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد

نانو اکسید روی با اندازه ذراتی کمتر از ۵۰ nm، به صورت یک محلول پراکنه ۴۰٪ درصد وزنی در آب با چگالی ۱.۴-۱.۵ g/ml (Oxylink) 3102 که دارای توزیع اندازه ذراتی مطابق شکل ۱ است از شرکت بوهر آلمان، و نانو تیتانیا با نام تجاری P25 به صورت پودری با اندازه ذراتی کمتر از ۵۰ nm از شرکت دگوسا تهیه شد. پایدارکننده‌های نوری استفاده شده به ترتیب دارای آستانه جذب ۳۷۰ و ۳۷۵ nm برای نانو اکسیدروی و نانو تیتانیا می‌باشد و اثر حضور این نانو ذرات در فیلم پوششی بدون رنگدانه که توسط آزمون اسپکتروسکوپی مرئی-فرابنفش انجام شده است در شکل ۲ آورده شده است.

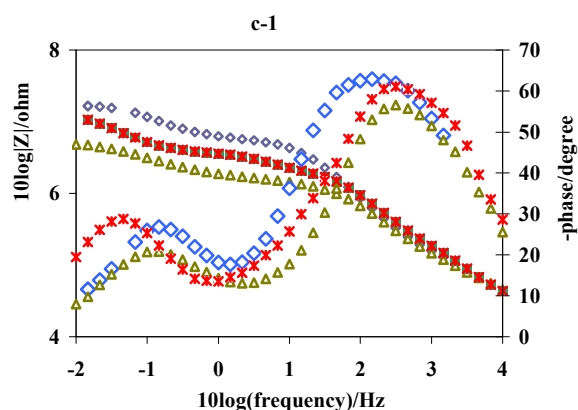
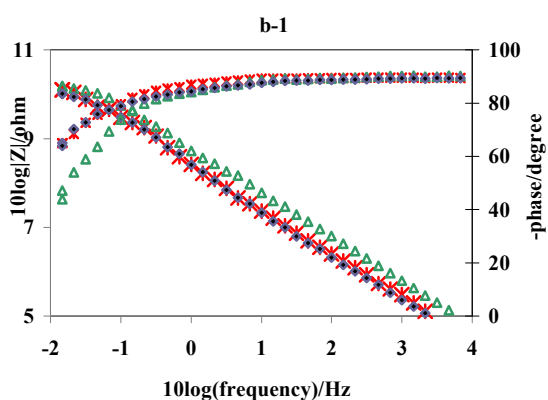
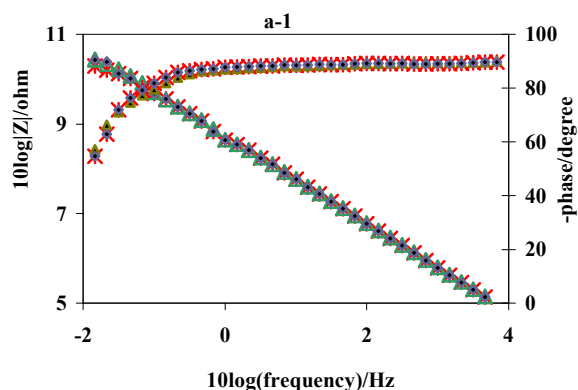
۲-۲- روش کار

پوشش قابل اعمال به روش الکتروپوشانسی شامل پراکنه رزینی و خمیر رنگدانه از شرکت BASF آلمان، که با نسبت ۱ به ۶ به ترتیب با هم مخلوط می‌شوند و بر روی صفحات فسفات شده به عنوان زیرآیند که به صورت آماده از شرکت ایران خودرو تهیه شدند تحت شرایط ۱۹۰ ولت به مدت ۳ دقیقه جهت رسیدن به ضخامت حدود ۲۰ μm اعمال شدند. برای افزودن نانو ذرات به رنگ ابتدا دیسپرسیونی یکنواخت از نانو ذرات حدود ۳٪ وزنی بر پایه جامد رزین با استفاده از روش فراصوت تهیه شد و سپس سخت‌کننده به آن اضافه شد. بعد از بررسی نمودارهای DSC و رفتار حرارتی پوشش‌ها پخت آنها در آن در دمای ۱۶۰ °C برای ۲۰ دقیقه انجام شد. جزئیات الکتروپوشانش نانوذرات بر طبق گزارشات قبلی انجام شد [۱۳، ۱۴].

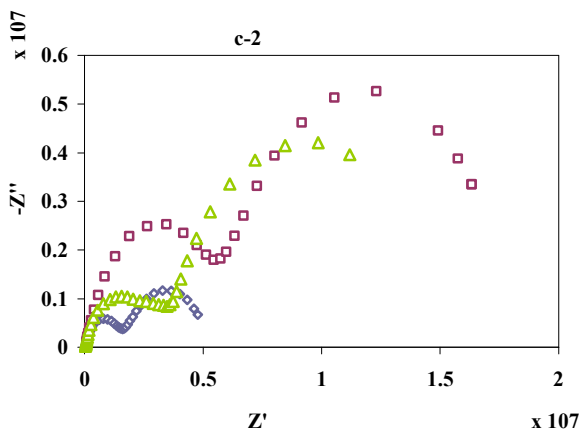
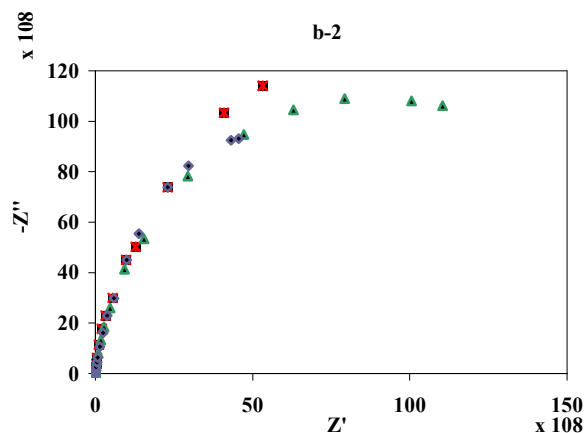
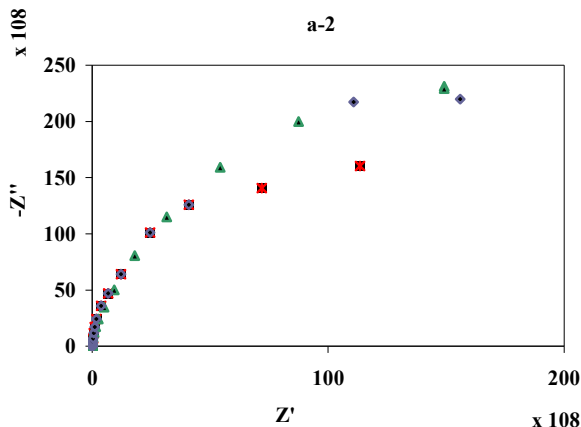
برای بررسی مقاومت جوی نمونه‌های مختلف از آزمون‌های محفظه فرابنفش (تابش پیوسته پرتو UVA با توان ۳۰۰ وات در دمای ۴۰±۲ °C) و سپس غوطه‌وری در محلول ۳،۵ درصد کلرید سدیم استفاده شد. همچنین پس از قرارگیری نمونه‌ها در شرایط تسریع شده جوی نمونه‌ها توسط آزمون‌های میکروسکوپ روبشی الکترونی و اسپکتروسکوپی امپدانس الکتروشیمیایی مورد بررسی قرار گرفت.

1- Dispersed

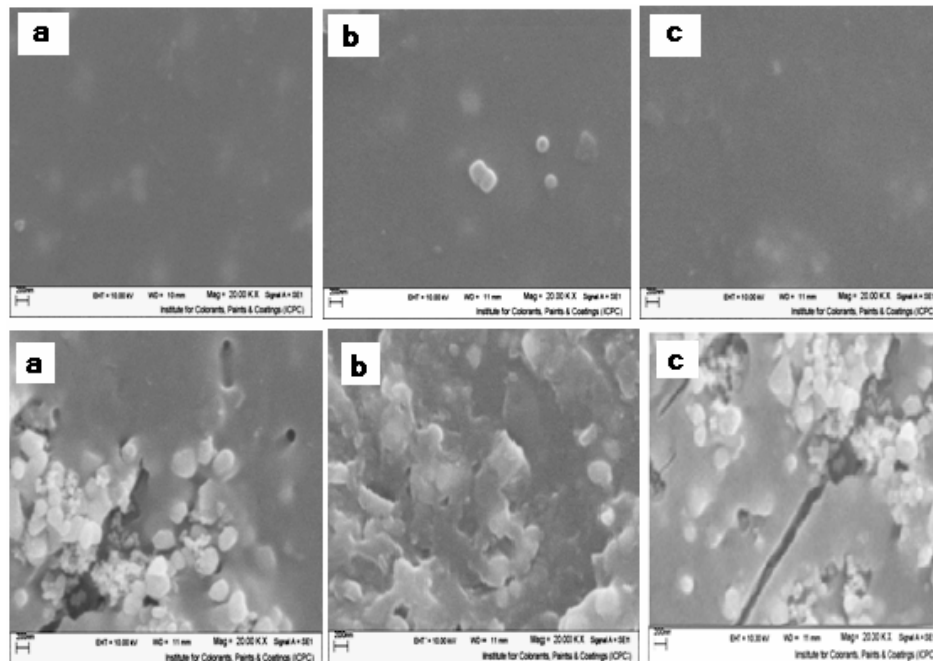
منحنی نایکوئیست آنها بصورت خطی تقریباً صاف، عمود و نزدیک به محور موهومی است که می‌توان آنها را با مدار معادل مطابق شکل ۳ (مدل a) شبیه‌سازی کرد. همان‌طور که در شکل ۴ مشخص است با گذشت زمان تابش فرابنفش، میزان مقاومت پوشش‌ها تغییر چندانی نمی‌کنند، اما با افزایش زمان غوطه‌وری کاهش مقاومت پوشش‌ها بسیار چشمگیر است (شکل ۴-c)، برای شبیه‌سازی این سری از منحنی‌های EIS باید از مدار معادل شکل ۳ (مدل b) آن استفاده کرد.



نمودارهای نایکوئیست و باد به دست آمده از آزمون تیفسنجی امپدانس الکتروشیمیایی بر روی نمونه‌های مختلف در شکل ۴، آورده شده است. در مراحل اولیه قرارگیری نمونه‌ها در شرایط جوی شتابیده فیلم پوششی به عنوان یک سد عالی در مقابل الکترولیت و محیط خورنده عمل می‌کند در واقع فیلم پوشش با رفتار خازنی خود همانند دی‌الکتریک عمل می‌کند. منحنی فازی آنها در اکثر محدوده بسامدی دارای مقدار -90° ، منحنی باد آنها خطی مستقیم با شیب -1 و



شکل ۴: نمودار باد (۱) و نایکوئیست (۲) پوشش مرجع (Δ)، حاوی نانو اکسید روی (\diamond)، نانو تیتانیوم (\ast)، (a) بعد از ۱۵ روز قرارگیری در محفظه فرابنفش و یک ساعت غوطه‌وری در محلول ۳٫۵ درصد کلرید سدیم، (b) بعد از ۴۵ روز قرارگیری در محفظه فرابنفش و یک ساعت غوطه‌وری در محلول ۳٫۵ درصد کلرید سدیم، (c) بعد از ۴۵ روز قرارگیری در محفظه UV و ۳۶۰ ساعت غوطه‌وری در محلول ۳٫۵ درصد کلرید سدیم.



شکل ۵: تصاویر SEM پوشش a: مرجع، b: حاوی اکسید روی، c: حاوی نانوتیتانیا، ردیف بالا تصاویر پوشش قبل از تخریب و ردیف پایین بعد از ۴۵ روز در معرض پرتو فرابنفش، با بزرگنمایی 20 kx.

اکسید علاوه بر افزایش مقاومت نوری فیلم پوششی باعث افزایش مقاومت به خوردگی پوشش می‌شود. افزایش نانو ذرات اکسید روی باعث می‌شود که مقاومت پوشش‌ها در آزمون EIS تقریباً ۱۰ برابر بیشتر از پوشش بدون نانو ذرات باشد. تصاویر SEM نشان دادند که پوشش‌هایی که در معرض نور فرابنفش قرار گرفته‌اند دچار پدیده گچی شده‌اند و حضور نانوذرات روی باعث افزایش مقاومت پوشش شده بطوریکه ترک‌های ایجاد شده در پوشش بدون نانو ذرات روی بیشتر و عمیق‌تر بوده و همین امر باعث کاهش مقاومت پوشش در آزمون EIS می‌شود. حضور پایدارکننده‌های نوری باعث جذب نور فرابنفش و عدم تامین انرژی لازم برای شکستن پیوندها و ایجاد ترک را می‌شود. همچنین با توجه به نوع نانو تیتان استفاده شده و ساختار صفحه‌ای بلورهای روتایل باعث افزایش مقاومت پوشش تا تقریباً ۵ برابر نسبت به پوشش مرجع می‌شود. از آنجایی که این نوع نانو ذرات پایدارکننده نوری جزء نیمه رساناها محسوب می‌شوند گاف انرژی کمتری نسبت به نارساناها دارند. این امر باعث می‌شود که الکترون‌های لایه ظرفیت^۱ در نیمه‌رساناها به سادگی با اعمال میدان‌های الکتریکی، گرما و یا تابش نور به نوار رسانش^۲ بروند (شکل ۶). این خصوصیت باعث می‌شود که کاربردهای متعددی برای نیمه‌رساناها قابل پیش‌بینی باشد.

- 1- Valence band
- 2- Conduction band

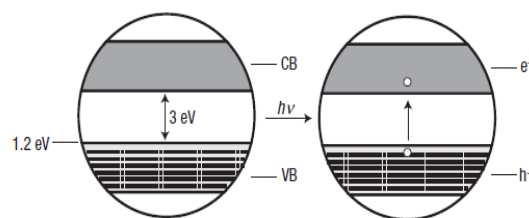
این نتایج تاییدکننده تصاویر SEM (شکل ۵) می‌باشد، همان‌طور که در قسمت‌های قبل توضیح داده شد پوشش‌های پلی‌یورتانی آروماتیک به شدت به نور فرابنفش حساس هستند و به سرعت تخریب می‌شوند، با توجه به تصاویر SEM، ریزترک‌های ایجاد شده در پوشش مرجع بیشتر و عمیق‌تر از دو نوع دیگر می‌باشد در نتیجه الکترولیت براحتی توسط ریزترک‌ها به داخل سطح نفوذ کرده و باعث کاهش مقاومت پوشش می‌شود. با افزایش نفوذ آب ظرفیت فیلم پوششی افزایش و مقاومت آن کاهش می‌یابد، کاهش مقاومت پوشش تا جایی ادامه پیدا می‌کند که آب به سطح زیرآیند رسیده و در این مرحله مقاومت لایه دوگانه الکتریکی ظاهر می‌شود. در این مرحله منحنی نایکوئیست به صورت دو نیم دایره ظاهر می‌شود (شکل ۴ قسمت 2-C). تصاویر SEM (شکل ۵) تاییدکننده این مطلب می‌باشد که حضور نانو ذرات منجر به کاهش میزان و سرعت تخریب می‌شود. با توجه به تصاویر SEM، بر روی سطح نمونه مرجع و نمونه حاوی نانو تیتانیا و که در محفظه فرابنفش قرار گرفته‌اند ترک‌هایی مشاهده می‌شود که مقدار و عمق ترک‌های ایجاد شده در پوشش‌های مرجع بیشتر است. نقاط روشن حاصل تخریب، گچی شدن و خروج ذرات از پوشش طی زمان است که نشان می‌دهد میزان گچی شدن در پوشش حاوی نانو تیتانیا بیشتر از پوشش حاوی نانو اکسید روی است. تصاویر SEM نمونه‌های قرار گرفته در محیط فرابنفش خشک حاکی از میزان گچی شدن کمتر نمونه‌ها در این شرایط شتابیده است. آزمایشات انجام شده نشان می‌دهد که فیلم‌های پوششی حاوی نانو

۴- نتیجه‌گیری

این تحقیق به بررسی عوامل موثر بر تخریب الکتروپوشش‌های کاتدی پرداخته و بهبود مقاومت جوی با استفاده از نانوذرات اکسید روی و نانو تیتانیا مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به ساختار پلی‌یورتانی الکتروپوشش‌های کاتدی نتایج حاصل از EIS، بعد از تخریب تحت تابش پرتو فرابنفش مشخص کرد که پرتو فرابنفش جدا از اینکه عاملی اساسی در تخریب زنجیره‌های پلیمری فیلم پوششی می‌باشد اما به تنهایی باعث کاهش مقاومت خوردگی فیلم پوششی نمی‌شود بلکه حضور رطوبت باعث تشدید فرآیند تخریب می‌شود، در واقع نور فرابنفش باعث شکست زنجیره‌های پلیمری می‌شود. با شکست زنجیره‌ها ممکن است اتصال بین زنجیره‌های پلیمری و رنگدانه‌ها هم از بین برود و آب به راحتی درون فیلم نفوذ کند.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از حمایت‌های مالی ستاد ملی ویژه توسعه فناوری نانو تقدیر و تشکر می‌شود. سپاس فراوان از مدیریت و مهندسی محترم شرکت ساپکو (آقایان: مهندس فرشیدفر، دکتر اکبری، مهندس سلطانی و مهندس بیرامی)، و با تشکر فراوان از مهندسی و مسئولین آزمایشگاه ساپکو (خانم‌ها مهندس حسینی، مهندس شجاعی، مهندس جمالی و آقای مهندس یارمحمدی) که با همکاری و مساعدت خود شرایط اجرای این تحقیق را فراهم نمودند.



شکل ۶: تشکیل حفره مثبت در نوار ظرفیت و الکترون در نوار رسانش با برخورد پرتو فرابنفش به نیمه رسانا.

از آنجایی که این اکسیدهای فلزی دارای گاف انرژی تقریباً مطابق با انرژی پرتوهای فرابنفش هستند، وقتی فوتونی با انرژی برابر یا بیشتر از گاف انرژی نیمه رسانا به آن بتابد یک الکترون از نوار ظرفیت به نوار رسانش منتقل شده و یک حفره در نوار ظرفیت به جا می‌گذارد و این عمل جذب پرتو فرابنفش و تبدیل آن به فرم دیگر انرژی مثل گرما در حین عمل و جذب باعث کاهش انرژی پرتو فرابنفش تابیده شده می‌شود و در نتیجه باعث کاهش آثار تخریبی آن خواهد شد.

۵- مراجع

1. A. Skaja, S. Croll, D. Fernando, Mechanical property changes and degradation during accelerated weathering of polyester-urethane coatings. *J. Coat. Technol. Res.* 3(2006), 41-51.
2. J. Van den Bulcke, J. Van Acker, M. Stevens, Experimental and theoretical behavior of exterior wood coatings subjected to artificial weathering. *J. Coat. Technol. Res.* 5(2008), 221-231.
3. D. Rosu, L. Rosu, N. Cascaval, IR-change and yellowing of polyurethane as a result of UV irradiation. *Polym. Degrad. Stab.* 94(2009), 591-596.
4. F. Deflorian, S. Rossi, M. Fedel, Organic coatings degradation: Comparison between natural and artificial Weathering. *Corros. Sci.* 50(2008), 2360-2366.
5. N. S. Allen, M. Edge, A. Ortega, G. Sandoval, C. M. Liauw, J. Verran, J. Stratton, R. B. McIntyre, Degradation and stabilisation of polymers and coatings: nano versus pigmentary titania particles. *Polym. Degrad. Stab.* 85(2004), 927-946.
6. X. F. Yang, C. Vang, D. E. Tallman, G. P. Bierwagen, S. G. Croll, S. Rohlik, Weathering degradation of a polyurethane coating. *Polym. Degrad. Stab.* 74(2001), 341-351.
7. L. W. Hill, Overview of mechanical property changes during coating degradation. ACS Symposium Series, 722(1999), 312-322.
8. M. F. Cova, P. Simon, P. Schwarzer, H. W. Wilde, Residual stability of polyurethane automotive coatings measured by chemiluminescence and equivalence of Xenotest and Solisi ageing tests. *Polym. Degrad. Stab.* 91(2006), 94-100.
9. Z. Ranjbar, Sh. Ashhari, The effect of UV absorber and hindered amine light stabilizer on durability and conservation of protective and appearance aspects of automotive coatings. *J. Color. Sci. Tech.* 6(2012), 171-176.
10. K. Adamsons, Chemical depth profiling of automotive coating systems using slab microtome sectioning with IR/UV-VIS spectroscopy and optical microscopy. *J. Coat. Technol. Res.* 74(2002), 47-54.
11. G. P. Bierwagen, The science of durability of organic coating. *Prog. Org. Coat.* 15(1987) 179-195.
12. C. R. Hegedus, F. R. Pepe, D. L. Lindenmuth, D. Burgard, Zinc oxide nanoparticle dispersions as unique additives for coatings. *J. Coat. Technol. Res.* 4(2007), 1-11.
13. M. Rashvand, Z. Ranjbar, S. Rastegar, Nano zinc oxide as a UV-stabilizer for aromatic polyurethane coatings. *Prog. Org. Coat.* 71(2011), 362-368.
14. M. Rashvand, Z. Ranjbar, S. Rastegar, Preserving anticorrosion properties of epoxy based coatings simultaneously exposed to humidity and UV-radiation using nano zinc oxide. *J. Electrochem. Soci.* 159(2012), 129-132.