



بررسی مقاومت به جدایش پوشش‌های قیری

سید سینا جمالی^۱، محمدرضا محمدزاده عطار^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده پلیمر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵

۲- دانشیار، دانشکده پلیمر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵

تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۳/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۷/۶/۱۷ در دسترس به صورت الکترونیکی از: ۱۳۸۷/۶/۲۸

چکیده

در این تحقیق، بررسی مقاومت به جدایش از روی سطح فولاد نرم برای دو سیستم پوششی قیری بر پایه قیر زغال سنگی و قیر نفتی از طریق تعیین مقاومت در برابر جدایش کاتدی و چسبندگی تر و خشک انجام گرفته است. برای این منظور، پوشش‌های قیری با ضخامت $100 \mu\text{m}$ بر روی سطح فولاد نرم شات بلاست شده اعمال شدند. آزمون جدایش کاتدی با اعمال پتانسیل $1/5 \text{ V}$ - و اندازه‌گیری چسبندگی در حالت تر، در شرایط غوطه‌وری در محلول ۳٫۵٪ کلرید سدیم انجام گرفت. نتایج اندازه‌گیری چسبندگی در حالت خشک حاکی از عدم ارتباط این پارامتر با مقاومت در برابر جدایش کاتدی بوده است. در حالی که پارامتر چسبندگی تر، ارتباط مستقیمی با مقاومت در برابر جدایش کاتدی دارد. این امر نشان‌دهنده یکسان بودن مکانیسم نفوذ کاتیون‌ها به فصل مشترک، در حضور پتانسیل خارجی (در طی آزمون جدایش کاتدی) و در طی غوطه‌وری در غیاب پتانسیل خارجی (در طی آزمون چسبندگی تر) می‌باشد. در عین حال با تعیین مکانیسم نفوذ کاتیون‌ها طی آزمون جدایش کاتدی، مکانیسم نفوذ برای پوشش بر پایه قیر نفتی از طریق پوشش و برای قیر زغال سنگی از طریق حفره تعیین گردید. با توجه به نتایج این تحقیق، می‌توان آزمون جدایش کاتدی را به عنوان معیاری مناسب برای تخمین و مقایسه چسبندگی تر پوشش‌های قیری مورد استفاده قرار داد.

واژه‌های کلیدی: پوشش‌های قیری، جدایش کاتدی، چسبندگی، خوردگی، عبورپذیری یونی.

Investigation on the De-adhesion Resistance of Bituminous Coatings

S. S. Jamali, M. M. Attar*

Polymer Engineering Department, Amirkabir University of Technology, P. O. Box: 15875-413, Tehran, Iran

Abstract

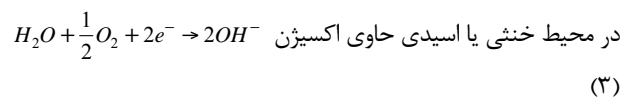
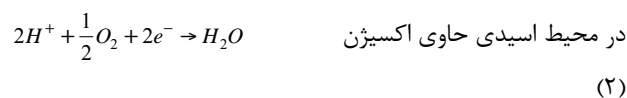
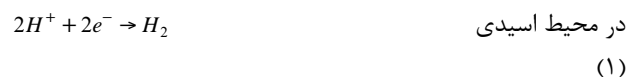
Two types of bituminous coating, bitumen and coal tar pitch, were investigated using cathodic delamination and adhesion measurements. The bituminous coatings were applied on shot blasted steel with $100 \mu\text{m}$ thickness and then were subjected to cathodic delamination and wet adhesion tests during immersion in 3.5% NaCl w/w solution. The wet adhesion test results showed good agreement with cathodic delamination resistance. It could be indicate that the mechanism of cation diffusion to the interface in cathodic delamination process is similar to immersion condition without applied voltage. The mechanism of cation diffusion for bitumen based coating was through the intact coating and for coal tar pitch based coating was through defects in coating. The results showed that the cathodic delamination process is a criterion for estimating of the wet adhesion failure during immersion time. J. Color Sci. Tech. 2(2008), 115-122. © Institute for Colorants, Paint and Coatings.

Keyword: Bituminous coatings, Cathodic delamination, Adhesion, Corrosion, Ionic permeability.

۱- مقدمه

پوشش‌های پایه قیری به عنوان قدیمی‌ترین پوشش‌های محافظتی، همواره برای محافظت سازه‌های فلزی از خوردگی مورد استفاده بوده‌اند. با وجود محدودیت‌هایی که فام آنها و مسائل زیست‌محیطی به وجود آورده است، امروزه به عنوان یکی از پرکاربردترین پوشش‌های حفاظتی برای جلوگیری از خوردگی سازه‌های فلزی مدفون در خاک و سازه‌های فلزی غوطه‌ور مورد توجه هستند. خطوط لوله انتقال نفت و گاز یکی از عمده مصارف سیستم‌های حفاظتی پایه قیری جهت جلوگیری از خوردگی می‌باشند و با توجه به اینکه سیستم حفاظت کاتدی به عنوان یک روش مکمل جهت اطمینان از عدم خوردگی این سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، مقاومت به جدایش کاتدی یکی از مهمترین عوامل در تعیین کارایی سیستم‌های مورد مصرف برای حفاظت این سازه‌ها است [۱-۳].

سازه‌های فلزی پوشش داده شده با سیستم‌های حفاظتی آلی برای حمل و کارگذاری در محل کاربری نیاز به طی مراحل همچون حمل و نقل و تحمل تنش‌های ناشی از مراحل کارگذاری و تنش‌های وارده از خاک، دارند. در کلیه این مراحل امکان ایجاد نقص در ساختار پوشش وجود دارد. به منظور اطمینان از حفاظت کامل سازه فلزی از خوردگی، حفاظت کاتدی به عنوان یک روش مکمل به همراه پوشش آلی بر روی سازه فلزی اعمال می‌گردد. زمانی که حفاظت کاتدی بر روی یک فلز پوشش داده شده اعمال می‌گردد، می‌تواند به واسطه شرایط و واکنش‌هایی که ایجاد می‌کند، منجر به جدایش پوشش از روی سطح فلز گردد. به چنین پدیده‌ای جدایش کاتدی گفته می‌شود و به طور معمول از محل نقص‌های موجود در پوشش شروع شده و به صورت شعاعی در اطراف محل نقص گسترش می‌یابد. علت اصلی این امر افزایش pH الکترولیت حاضر در فصل مشترک پوشش - فلز است که در اثر واکنش‌های زیر رخ می‌دهد. میزان این افزایش pH در فصل مشترک پوشش - فلز و در قسمت‌های انتهایی ناحیه جداشده بسیار بالاست و به عواملی مانند سرعت واکنش‌های کاتدی، هندسه ناحیه جداشده، سرعت نفوذ کاتیون‌ها و واکنش‌های بافر بستگی دارد [۴، ۵].



کلیه این واکنش‌ها، منجر به افزایش pH و تجمع یون‌های هیدروکسید در زیر پوشش می‌گردند. در صورتی که این تجمع بار خنثی نگردد، موجب ایجاد مقاومت و کاهش روند تولید یون

هیدروکسید و به دنبال آن کاهش روند جدایش می‌گردد. خنثی‌سازی این یون‌های منفی توسط کاتیون‌های موجود در الکترولیت انجام می‌گیرد. با توجه به موارد بالا، مقاومت قلیایی پوشش و پیوندهای آن با سطح فلز و همچنین نحوه و میزان نفوذ کاتیون‌ها به سمت فصل مشترک پوشش - فلز مهمترین عوامل تعیین کننده در وسعت جدایش کاتدی می‌باشند [۶-۸].

به طور کلی دو مسیر برای دستیابی کاتیون‌ها به ناحیه مرزی جدایش در فصل مشترک و محل تولید یون هیدروکسید وجود دارد:

- ۱) از طریق ساختار پوشش و کانال‌های مؤین موجود در آن
 - ۲) از طریق فاز آبی و فصل مشترک پوشش - فلز (از طریق حفره).
- با آگاهی از مسیر عبور کاتیون‌ها می‌توان روش‌هایی برای اصلاح خواص پوشش و کاهش میزان جدایش کاتدی طراحی نمود. به عنوان مثال در صورتی که مسیر عبور کاتیون‌ها از طریق ساختار پوشش باشد با وارد کردن عوامل حاوی شارژ مثبت به ساختار پوشش می‌توان به نحو مؤثری سرعت نفوذ کاتیون‌ها و سرعت جدایش را کاهش داد. [۹، ۱۰].

محققین ارتباط نتایج چسبندگی پوشش‌ها و مقاومت آنها را در برابر جدایش کاتدی مورد بررسی قرار دادند و مقاومت به جدایش کاتدی پوشش‌ها را در ارتباط با چسبندگی تر آنها معرفی کرده‌اند. تحقیقات انجام شده بر روی پوشش‌های اپوکسی نشان‌دهنده تأثیر مشابه افزایش یون کلرید بر روند جدایش پوشش از سطح، در آزمون‌های جدایش کاتدی و چسبندگی تر بوده است [۱۱]. همچنین نتایج تحقیقات دیگری که بر روی پوشش‌های پلی‌اتیلنی صورت گرفته است، آزمون جدایش کاتدی را به عنوان معیار مناسبی جهت تخمین و مقایسه چسبندگی تر پوشش‌ها معرفی می‌کند. تأثیر افزایش عوامل قطبی به پلی‌اتیلن بر روی نتایج آزمون جدایش کاتدی و چسبندگی تر، مشابه ارزیابی کرده‌اند [۱۲]. علت سازگاری‌های مشاهده شده در نتایج دو آزمون را می‌توان حضور آب و شرایط قلیایی ایجاد شده در فصل مشترک پوشش - فلز، در هر دو آزمون و تأثیر آن به عنوان یکی از عوامل اصلی در جدایش پوشش دانست. شرایط قلیایی ایجاد شده در فصل مشترک می‌تواند از طریق سه روش مهم حل شدن لایه اکسیدی فلز، حمله به پیوندهای پوشش - فلز و تضعیف آن و هیدرولیز قلیایی پلیمر منجر به جدایش پوشش از سطح گردد. در عین حال با توجه به سرعت بسیار بالاتر تولید یون هیدروکسید در حضور حفاظت کاتدی، pH بالاتر و شرایط قلیایی مخرب‌تر منجر به تسریع روند جدایش در مقایسه با وضعیت عدم اعمال پتانسیل خارجی می‌گردد [۱۳]. تحقیقات قبلی خواص نفوذپذیری و ضدخوردگی پوشش‌های محافظتی بر پایه قیر نفتی و قیر زغال سنگی را با یکدیگر مورد مقایسه قرار دادند. نتایج تحقیقات نشان‌دهنده مقاومت بالاتر پوشش‌های بر پایه قیر زغال سنگی در برابر عبور یون‌ها و خواص ضدخوردگی بهتر آنها در مقایسه با پوشش‌های بر پایه قیر نفتی بوده

جدول ۱: درصد عناصر موجود در فولاد نرم ST37.4.

Element	Weight percentages
Fe	۹۹,۰۳
C	۰,۱۷
Si	۰,۳۵
Mn	۰,۳۵
P	۰,۰۴۰
S	۰,۰۴۰
Al	۰,۰۲

است [۱۴]. همچنین نتیجه تحقیقات بر روی اثر افزایش عوامل قطبی و بازدارنده‌های خوردگی در سیستم‌های پوششی پایه قیری نشان‌دهنده افزایش چسبندگی و خواص ضد خوردگی پوشش‌های پایه قیری در اثر افزایش رزین‌های سینتیک به پوشش‌های قیری بوده است [۱۵].
در این تحقیق خواص محافظتی دو سیستم پوششی بر پایه قیر نفتی و زغال سنگی از طریق تعیین مقاومت در برابر جدایش کاتدی و چسبندگی پوشش‌ها، با یکدیگر مقایسه شده است. همچنین با تعیین مکانیسم نفوذ کاتیون‌ها به فصل مشترک پوشش - فلز، ارتباط این مکانیسم با چسبندگی پوشش‌های قیری بر روی فولاد نرم بررسی شده است.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد شیمیایی و وسایل

قیر پایه زغال سنگی از شرکت پالایش قطران زغال سنگ اصفهان با نقطه نرمی 80°C و چگالی $1,264 \text{ g/cm}^3$ تهیه شد و حلال‌های زایلن، تولوئن و اتیل متیل کتون با نسبت‌های اختلاط به ترتیب $20/40/40$ جهت حل کردن قیر زغال سنگی و حصول یک محلول یکنواخت استفاده شد. همچنین قیر پایه نفتی از شرکت پالایش نفت جی اصفهان با نقطه نرمی 80°C و چگالی $1,066 \text{ g/cm}^3$ تهیه شد و حلال وایت اسپریت^۱ جهت حل کردن قیر مورد نظر و دستیابی به گرانیوی قابل اعمال استفاده شد. قابل ذکر است که با توجه به اینکه قیرهای نفتی و زغال سنگی مخلوط پیچیده‌ای از تعداد بسیار زیادی ترکیبات شیمیایی هستند، بررسی و بیان دقیق ساختار شیمیایی آنها امکان‌پذیر نمی‌باشد. به طور کلی قیرها از لحاظ ساختاری به دو بخش آسفالتن و مالتن تقسیم می‌شوند که آسفالتن بخش سخت و قیر قابل حل است و مالتن مایعی گرانیرو و محمل پخش ذرات آسفالتن است. نقطه نرمی 80°C که نقطه نرمی نسبتاً بالایی در درجه‌بندی قیرها محسوب می‌گردد، می‌تواند نشان‌دهنده درصد بالای آسفالتن و درصد نسبتاً پایین روغن‌ها در ساختار قیر باشد. حلال وایت اسپریت مخلوطی از حلال‌های نفتی با درصد آروماتیک پایین (حد اکثر ۲۰٪) و نقطه جوش 162°C می‌باشد.
زیرآیند مورد استفاده در این تحقیق فولاد نرم ST37.4 است که بر اساس استاندارد DIN 1630 برای ساخت لوله‌ها پیشنهاد می‌شود. درصد عناصر موجود در این فولاد نرم در جدول ۱ ارائه شده است:
ورق فولاد نرم فوق به ابعاد $9 \times 7 \text{ cm}^2$ برش شده و با استفاده از Shot Blast آماده‌سازی شد. ناهمواری‌های سطحی، سطح آماده‌سازی شده با استفاده از زبری سنج شرکت میتوتویو^۲ مدل SJ-201 اندازه‌گیری شد. مقادیر ضرایب مربوط به طرح ناهمواری‌های سطح به شرح زیر است:

$$Rz = 29 \mu\text{m} \quad Ra = 4,4 \mu\text{m}$$

که RZ نشان‌دهنده میانگین فواصل بلندترین قله‌ها تا عمیق‌ترین دره‌ها در پروفایل سطح می‌باشد و Ra یا زبری سطح، بیانگر نصف میانگین فاصله ارتفاع همه قله‌ها تا همه دره‌هاست.

سیستم‌های پوششی بر پایه قیر نفتی و قیر زغال سنگی توسط فیلم کش با ضخامت تر $300 \mu\text{m}$ بر روی سطح فولاد نرم شات بلاست و چربی‌گیری شده، اعمال شد و پس از خشک شدن، ضخامت فیلم خشک با استفاده از ضخامت‌سنج دیجیتالی مدل الکومتر 3345 اندازه‌گیری شد. ضخامت‌های حاصله در حدود $100 \pm 5 \mu\text{m}$ تعیین شد.

از مخلوط بی‌زواکس^۴ و رزین با نسبت به ترتیب ۳ به ۱،۲ جهت آب‌بندی مناطق غیرآزمون سطح استفاده شد.

کلرید سدیم آزمایشگاهی با درجه خلوص ۹۹,۹٪ جهت تهیه محلول ۳,۵٪ کلرید سدیم به عنوان الکترولیت مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۲- روش کار

آزمون جدایش کاتدی بر اساس استاندارد ASTM G8، با استفاده از آند منیزیم و الکترود مرجع Ag/AgCl انجام گرفت. جهت آماده‌سازی نمونه‌ها برای آزمون، پس از اتصال سیم مسی و در نظر گرفتن مساحت $3 \times 3 \text{ cm}^2$ از سطح پوشش، بقیه سطوح آب‌بندی شده و سوراخی به قطر ۱ mm در وسط ناحیه آزمون ایجاد شد. پتانسیل اعمال شده به نمونه‌ها مطابق با استاندارد فوق $V(\text{vs. Cu/CuSO}_4)$ $1,50 \pm 0,05$ بوده است.

برای تعیین مکانیسم نفوذ کاتیون‌ها در آزمون جدایش کاتدی، آزمون جدایش کاتدی یکبار با ضخامت یکسان و در زمان‌های ۷، ۱۲، ۱۷، ۲۲ و ۳۲ ساعت برای قیر نفتی و زمان‌های ۷، ۱۷، ۴۴، ۷۵ و ۱۵۱ ساعت برای قیر زغال سنگی و یک بار در زمان ثابت و

3- Elcometer 345

4- Beeswax

1- White spirit

2- Mitutoyo

۳- نتایج و بحث

۳-۱- جدایش کاتدی

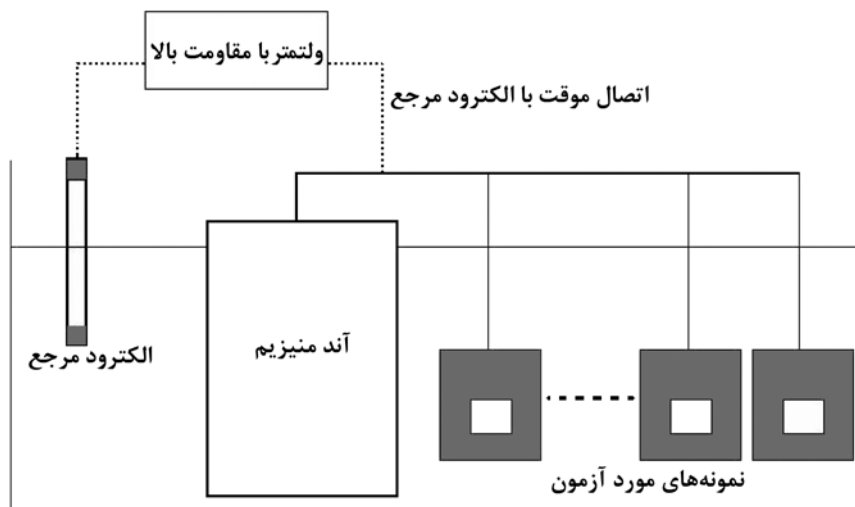
یکی از روش‌های بررسی مکانیسم نفوذ کاتیون‌ها تعیین سرعت گسترش مساحت جدایش در طول زمان می‌باشد. افزایش یا کاهش شدید در سرعت گسترش مساحت جدایش نشان‌دهنده تغییر مکانیسم غالب در فرآیند نفوذ کاتیون‌هاست. اگر سرعت گسترش مساحت جدایش به مرور زمان زیاد شود بیانگر این است که کاتیون‌ها از طریق پوشش به محل جدایش هدایت می‌شوند و در صورتی سرعت گسترش مساحت جدایش به مرور زمان کاهش یابد نفوذ از طریق حفره مکانیسم غالب خواهد بود [۱۱]. به بیان دیگر زمانی که مکانیسم نفوذ از طریق پوشش باشد، کاتیون‌ها برای رسیدن به ناحیه مرزی جدایش اجباری در گذشتن از مسیر حفره و فصل مشترک پوشش - فلز ندارند و با گذشتن از فیلم پوشش با سرعت بیشتری عوامل هیدروکسید را خنثی کرده و موجب پیشرفت جدایش می‌شوند. با گذشت زمان به علت جذب آب توسط ساختار پوشش و افت بیشتر مقاومت یونی پوشش، روند نفوذ کاتیون‌ها از طریق پوشش تسریع می‌شود و سرعت گسترش مساحت جدایش افزایش می‌یابد. در حالی که وقتی مکانیسم نفوذ از طریق حفره باشد، به مرور زمان، با گسترش شعاع ناحیه جدایش، مسیر دستیابی کاتیون‌ها به مرز ناحیه جدایش طولانی‌تر می‌شود و روند گسترش مساحت جدایش کندتر می‌گردد.

1 - Erichsen

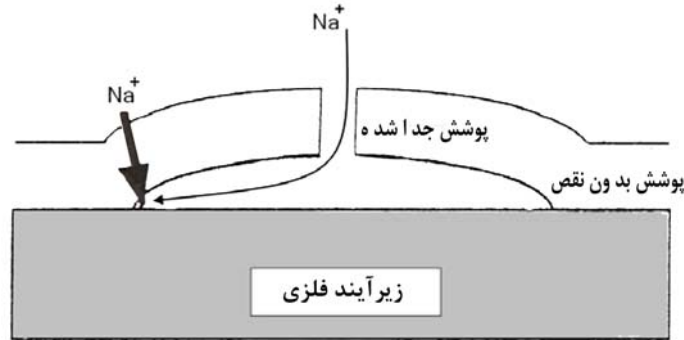
ضخامت‌های ۸۰، ۱۰۰ و $160 \mu\text{m}$ برای قیر نفتی و ضخامت‌های ۸۰، ۱۲۰ و $160 \mu\text{m}$ برای قیر زغال سنگی صورت پذیرفت. علت انتخاب زمان‌های بالاتر برای پوشش بر پایه قیر زغال سنگی نسبت به قیر نفتی مقاومت بسیار بالاتر آن در برابر جدایش کاتدی بوده است.

بررسی نتایج آزمون از طریق تعیین مساحت جدایش صورت پذیرفت. برای تعیین مساحت جدایش، برش‌های هم‌مرکز در اطراف محل حفره با استفاده از تیغه فولادی ایجاد گردید و پس از برداشتن پوشش‌های جدا شده، مساحت از طریق قرار دادن یک صفحه شفاف شطرنجی بر روی نمونه و شمردن خانه‌ها، تعیین شد. تعداد ۳ نمونه برای اطمینان از تکرارپذیری برای هر یک از سطوح مورد آزمون در نظر گرفته شد.

مطالعه چسبندگی پوشش‌ها بر روی زیرآیند در دو حالت خشک و تر به روش Pull off انجام گرفت. برای انجام آزمون چسبندگی تر، مساحت $7 \times 3.5 \text{ cm}^2$ از سطح پوشش، در محلول ۳،۵٪ کلرید سدیم غوطه‌ور شد. در زمان‌های ۱۲، ۲۱ و ۵۷ روز پس از غوطه‌وری آزمون چسبندگی تر بر روی نمونه‌ها انجام شد. برای انجام آزمون به روش Pull off، پس از خارج کردن نمونه‌ها از محلول و خشک کردن سطح نمونه‌ها، دالی‌های فلزی توسط چسب سیانواکریلاتی بر روی سطح پوشش‌ها چسبانده شدند. یک ساعت پس از چسباندن دالی‌ها بر روی سطح پوشش، آزمون چسبندگی به روش Pull off انجام گرفت. در این روش از دستگاه Tensile Adhesion tester 525 (شرکت اریکسن)^۱ بر اساس استاندارد ASTM D 4541 برای انجام آزمون استفاده شد.



شکل ۱: شمایی از طرح انجام آزمون جدایش کاتدی.



شکل ۲: مسیره‌های ممکن برای نفوذ کاتیون‌ها در فرآیند جدایش کاتدی.

حاکي از تخریب تدریجی پوشش و دسترسی بالای کاتیون‌ها به مرز ناحیه جدایش از طریق پوشش باشد. با توجه به فرآیند تولید قیر و اینکه امکان وجود ترکیبات معدنی در قیر می‌باشد، این تخریب می‌تواند حاصل از انحلال نمک‌های معدنی موجود در قیر در آب باشد. به این ترتیب، مکانیسم غالب نفوذ در فرآیند جدایش کاتدی قیر پایه نفتی از سطح فولاد نرم، نفوذ از طریق پوشش است.

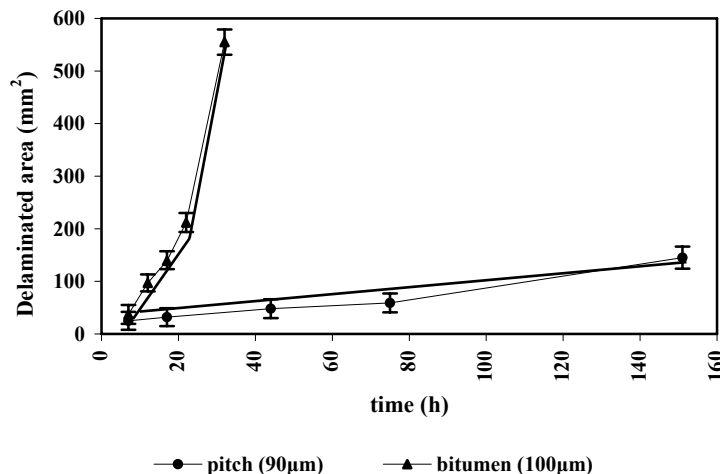
در مورد پوشش‌های بر پایه قیر زغال سنگی سرعت گسترش مساحت جدایش در طی زمان آزمون تغییر چندانی نشان نمی‌دهد و تقریباً ثابت است. وقتی که در یک زمان ثابت، ضخامت‌های متفاوتی از یک پوشش مورد آزمون جدایش کاتدی قرار می‌گیرند، در صورتی که با افزایش ضخامت پوشش مساحت جدایش کاهش یابد، نشان‌دهنده نقش مؤثر پوشش در عبوردهی کاتیون‌ها به سمت فصل مشترک است و بنابراین مکانیسم نفوذ از طریق پوشش خواهد بود، اما چنانچه با تغییر ضخامت پوشش مساحت جدایش تغییری پیدا نکند، نشان‌دهنده مقاومت بالای پوشش در برابر عبور کاتیون‌ها و عدم تأثیر ضخامت پوشش در سرعت نفوذ کاتیون‌ها می‌باشد. بنابراین، مکانیسم نفوذ از طریق حفره خواهد بود. شکل ۴ نشان‌دهنده روند تغییرات مساحت جدایش با افزایش ضخامت پوشش است.

شکل ۲ شمایی از مقایسه مسیر حفره و مسیر پوشش برای نفوذ کاتیون‌ها، زمانی که قسمتی از پوشش دچار جدایش شده است را نشان می‌دهد.

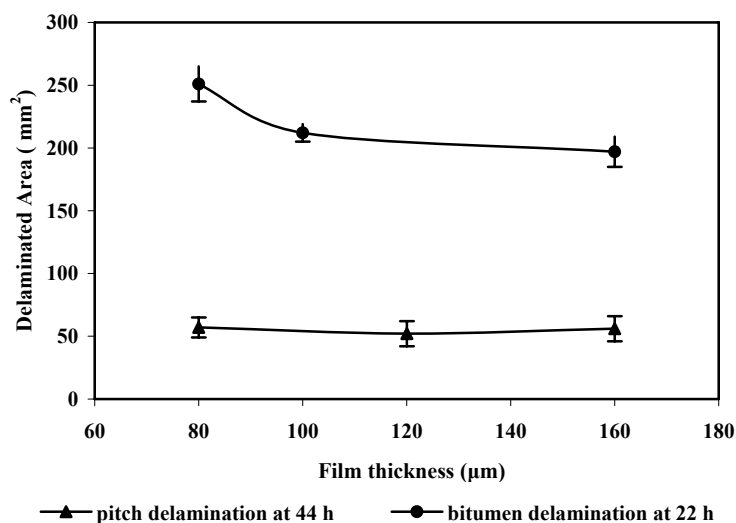
با توجه به مشاهده سرعت قابل توجه تولید هیدروژن پس از اتصال نمونه‌ها و اعمال پتانسیل $1.5 \text{ V (vs. Cu/CuSO}_4)$ - نسبت به الکترود مرجع (Cu/CuSO_4) ، عمده واکنش کاتدی برای تولید یون هیدروکسید واکنش $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$ می‌باشد.

شکل ۳ روند گسترش مساحت جدایش را طی زمان برای ضخامت‌های ثابتی از پوشش‌ها نشان می‌دهد. همچنین pH الکترولیت تجمع یافته در زیر پوشش پس از گذشت ۱۷ ساعت از غوطه‌وری با استفاده از کاغذ pH اندازه‌گیری شد و مقدار ۱۲ به دست آمد.

همان طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود میزان جدایش برای هر دو سیستم پوششی در زمان ۷ ساعت پس از غوطه‌وری یکسان است. در ادامه زمان غوطه‌وری روند جدایش قیر پایه نفتی بسیار سریع‌تر از قیر زغال سنگی پیشرفت کرده است. این امر می‌تواند ناشی از نفوذ کاتیون‌ها به فصل مشترک و مرز ناحیه جدایش از طریق سیستم پوششی قیر نفتی باشد. پس از ۲۲ ساعت غوطه‌وری سرعت گسترش مساحت جدایش قیر پایه نفتی به شدت افزایش می‌یابد که می‌تواند



شکل ۳: روند تغییرات مساحت جدایش برای دو سیستم پوششی با ضخامت‌های ثابت.



شکل ۴: تغییرات مساحت جدایش با افزایش ضخامت پوشش در ضخامت‌های ۸۰، ۱۰۰ و ۱۶۰ µm برای قیر نفتی و ضخامت‌های ۸۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ µm برای قیر زغال سنگی.

شکل ۴ نشان‌دهنده عدم تأثیر ضخامت بر مساحت جدایش قیر زغال سنگی است. به بیان دیگر مقاومت بالای قیر زغال سنگی در برابر عبور یون‌ها، منجر به اجبار کاتیون‌ها در گذر از مسیر حفره، برای دسترسی به مرز ناحیه جدایش می‌گردد. با توجه به این که ضخامت پوشش تأثیری بر طول این مسیر ندارد می‌توان یکسان بودن مساحت جدایش قیر زغال سنگی در ضخامت‌های مختلف را به غالب بودن مکانیسم نفوذ کاتیون‌ها از طریق حفره نسبت داد. در مقابل نتایج تغییرات مساحت جدایش با ضخامت قیر نفتی نشان‌دهنده کاهش قابل توجه مساحت جدایش با افزایش ضخامت پوشش است که بیانگر اهمیت نقش پوشش در عبور کاتیون‌ها است. در واقع نتایج فوق فرض مکانیسم نفوذ از طریق پوشش در فرآیند جدایش قیر پایه نفتی از سطح در زمان ۲۲ ساعت غوطه‌وری (شکل ۳) را تأیید می‌کند.

نتایج آزمون چسبندگی در دو حالت خشک و تر برای سیستم‌های پوششی بر پایه قیر زغال سنگی و قیر پایه نفتی در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است. با توجه به اینکه نحوه جدایش هم از نوع چسبندگی و هم از نوع پیوستگی بوده است، درصد جدایش از نوع چسبندگی با استفاده از صفحه شفاف شطرنجی محاسبه شد و این عامل به عنوان یک خاصیت برای بررسی میزان نفوذ الکترولیت و تأثیر آن در جدایش پوشش از زیرآیند ذکر شده است.

با توجه به نوع جدایش ایجاد شده در اثر اندازه‌گیری چسبندگی خشک که برای قیر زغال سنگی ۱۰۰٪ از نوع پیوستگی و برای قیر پایه نفتی ۲۸٪ از نوع پیوستگی بوده است، و اینکه اصولاً جدایش ایجاد شده در اثر انجام واکنش‌های خوردگی و شرایط قلیایی موجود در فرآیند جدایش کاتدی از نوع چسبندگی است، خاصیت چسبندگی خشک عامل مناسبی جهت تخمین مقاومت به جدایش در این پوشش‌ها نخواهد بود.

۳-۲- چسبندگی

عدم حضور پتانسیل خارجی و نقش آن در جذب کاتیون‌ها به سمت سطح فولاد نرم (به عنوان منبع الکترون) در آزمون چسبندگی تر، منجر به کند شدن زیاد روند جدایش در مقایسه با شرایط موجود در

جدول ۲: نتایج آزمون چسبندگی خشک به روش Pull off برای سیستم‌های پوششی بر پایه قیر زغال سنگی و قیر پایه نفتی.

استحکام چسبندگی lb/in ² × 100	نوع جدایش	درصد جدایش از نوع چسبندگی	
۱,۹	پیوستگی	۰	قیر زغال سنگی
۱,۱	چسبندگی - پیوستگی	۰,۷۲	قیر نفتی

جدول ۳: نتایج آزمون چسبندگی تر به روش Pull off برای سیستم‌های پوششی بر پایه قیر زغال سنگی و قیر پایه نفتی.

درصد جدایش از نوع چسبندگی	نوع جدایش	استحکام چسبندگی lb/in ² × 100	زمان (روز)	
.	پیوستگی	۱,۱	۱۲	
۰,۱۱	چسبندگی - پیوستگی	۰,۸۸	۲۱	قیر زغال سنگی
۰,۹۲	چسبندگی - پیوستگی	۰,۲۵	۵۷	
۱	چسبندگی	۰,۲	۱۲	قیر نفتی
۱	چسبندگی	.	۲۱	

۴- نتیجه‌گیری

نتایج آزمون جدایش کاتدی نشان‌دهنده حساسیت بالاتر پوشش قیر پایه نفتی بر روی فولاد نرم به دلیل تولید یون هیدروکسید و گاز هیدروژن، در مقایسه با قیر زغال سنگی است. همچنین مشخص شد که مکانیسم غالب نفوذ کاتیون‌ها در آزمون جدایش کاتدی برای سیستم پوششی بر پایه قیر نفتی از طریق پوشش و برای سیستم پوششی بر پایه قیر زغال سنگی از طریق حفره می‌باشد. سازگاری میان نتایج حاصل از آزمون چسبندگی تر و نتایج مقاومت به جدایش کاتدی، نشان‌دهنده یکسان بودن مکانیسم جدایش در هر دو روش است. در آزمون جدایش کاتدی به علت وجود جریان خارجی و تسریع فرآیند تولید یون‌های هیدروکسید، فرآیند جدایش با سرعت بیشتری پیشرفت می‌کند. به این ترتیب می‌توان از آزمون جدایش کاتدی به عنوان معیاری جهت مقایسه چسبندگی پوشش‌ها در حالت تر استفاده نمود.

نتایج حاصل از اندازه‌گیری چسبندگی تر نشان‌دهنده مقاومت بالاتر قیر زغال سنگی به جدایش در شرایط غوطه‌وری در غیاب جریان اعمال شونده خارجی می‌باشد که با نتایج حاصل از اندازه‌گیری مقاومت در برابر جدایش کاتدی سازگاری دارد. با توجه به نتایج حاصل از آزمون جدایش کاتدی که مکانیسم نفوذ کاتیون‌ها را برای قیر نفتی از طریق پوشش و برای قیر زغال سنگی از طریق حفره نشان داد، می‌توان علت اصلی جدایش کامل قیر نفتی پس از ۲۱ روز غوطه‌وری را عبور کاتیون‌ها از ساختار پوشش و دستیابی به فصل مشترک پوشش - فلز دانست. بدین ترتیب با خنثی شدن عوامل هیدروکسید حاصل از واکنش‌های خوردگی و رفع تجمع یونی واکنش‌های خوردگی با سرعت بسیار بیشتری انجام می‌شوند و pH بالای ایجاد شده در فصل مشترک، منجر به جدایش پوشش از سطح فلز شده است. در حالی که قیر زغال سنگی با جلوگیری از عبور یون‌ها از طریق پوشش موجب ایجاد تجمع یونی در زیر پوشش و کند شدن فرآیندهای خوردگی شده است. به همین دلیل با وجود گذشت ۵۷ روز از غوطه‌وری همچنان ۸٪ جدایش از نوع پیوستگی بوده است.

۵- مراجع

1. E. A. Mulder, M. Soerensen, Development of modified bitumen enamel pipe coating systems. *Journal of Protective Coatings & Linings*. (2001), 50-54.
2. D. Fairhurst, The future of pipeline coatings. *Journal of Protective Coatings & Linings*. (2000), 33-38.
3. V. Hadadi, A. A. Yousefi, R. Moeini, M. T. Ganji, M. Khosravi, bituminous blends for different coating applications. *J. Color. Sci. Tech.* 1(2007), 7-18.
4. J. M. Atkinson, R. D. Granata, H. Leidheiser, Jr., D. G. McBride, Cathodic delamination of methyl methacrylate based dry film polymers on copper. *IBM J. RES. DEVELOP.* 29(1985), 27-36.
5. H. Leidheiser, JR, W. Wang, L. Igetoft, The mechanism for the cathodic delamination of organic coatings from a metal surface. *Prog. Org. Coat.* 11(1983), 19-40.
6. S. Khafanj, Investigation of corrosion and cathodic delamination of P.U. coatings via AC method. M.Sc Thesis, Amirkabir University of Technology, (2006).
7. H. Leidheiser Jr. W. Wang, Rate controlling steps in the cathodic delamination of 10 to 40 μm thick polybutadiene and epoxy-polyamide coatings from metallic substrates. corrosion control by organic coating, NACE. (1981), 70-77.
8. N. Kamalanand, G. Gopalakrishnan, S. G. Ponnambalam, J. Mathiyarasu, R. N. Natarajan, P. Subramaniam, N.

- Palaniswamy, N. S. Rengaswamy, Role of hydrogen and hydroxyl ion in cathodic disbondment. *Anti-corros. Method M.* 45(1998), 243-247.
9. F. Deflorian and S. Rossi, An EIS study of ion diffusion through organic coatings. *Electrochimica Acta.* 51(2006), 1736-1744.
10. F. Deflorian, S. Rossi, The role of ions diffusion in the cathodic delamination rate of polyester coated phosphatized steel. *J. Adhesion Sci. Technol.* 17(2003), 291-306.
11. J. D. Scantlebury, A. B. Darwin, Cathodic disbonding of an epoxy coating on mild steel under alkaline condition, *Advances in Corrosion Protection by Organic Coatings II*, Cambridge, UK, (1995), 219-228.
12. D. Roy, G. P. Simon, M. Forsyth, Blend of maleic-anhydride-grafted polyethylene for improved cathodic disbondment performance. *Polymer Int.* 50(2001), 1115-1123.
13. H. Leidheiser, Mechanism of deadhesion of organic coatings from metal surfaces, *Polymeric materials for corrosion control*, ACS Symposium, Series 322, (1986), 124-138.
14. Y. A. Serednitskii, O. M. Dzikovskii, E. A. Roter, V. V. Suprun, L. V. Stekhnovich, V. S. Bodak, Certain aspects of the protective effect of modified bituminous and coal coatings. *Fiziko-Khimicheskaya Mekhanika Materialov.* 3(1988), 97-100.
15. Y. A. Serednitskii, A. K. Mindyuk, O. I. Tselyukh, V. V. Suprun, O. M. Dzikovskii, B. O. Dombrovskii, Increasing the protective characteristics of bituminous coatings by modification with corrosion inhibitors. *Fiziko-Khimicheskaya Mekhanika Materialov.* 22(1986), 88-91.