

جدایش زود هنگام پوشش پلی اتیلن سه لایه از سطح لوله و بررسی کارایی پوشش های جایگزین

تاریخ دریافت مقاله: ۸۹/۱۲/۱۸ ؛ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۰/۹/۳۰

پژوهش نفت

سال بیست و دوم
شماره ۶۹
صفحه ۱۲۰-۱۱۰ ۱۳۹۱

احمد نعلبندی* و جواد حیدریان

پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده علوم و تکنولوژی پلیمر

babanalbandia@ripi.ir

چکیده

در این مقاله، جهت غلبه بر مشکل جدایش زود هنگام پوشش پلی اتیلن سه لایه از سطح، جایگزینی پوشش پلی اتیلن سه لایه با سایر پوشش ها مورد مطالعه قرار گرفته است. بر این اساس کارایی و کیفیت دو نمونه پوشش پلی یورتان و یک نمونه پوشش پلی اوره با اجرای آزمون های استاندارد چسبندگی، گسیختگی کاتدی، ضربه، خمش، جذب آب، سختی و استحکام دی الکتریک مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند. نتایج آزمون گسیختگی کاتدی این سه نمونه با پوشش پلی اتیلن سه لایه مقایسه گردید. نتایج این بررسی نشان می دهد که مقاومت پوشش پلی یورتان به گسیختگی کاتدی نسبت به پلی اتیلن سه لایه بهتر است. پوشش های پلی یورتان اساساً سابقه گسیخته شدن (disbondment) از سطح، طی سرویس دهی را ندارند و با ضخامت هایی در حد یک سوم پلی اتیلن سه لایه قابل اعمال در سایت می باشند بنابراین، این مواد به عنوان یک جایگزین مناسب و مطلوب برای پلی اتیلن سه لایه توصیه می شوند. همچنین مشخص گردید که مقاومت به گسیختگی کاتدی پوشش پلی اوره با پلی اتیلن سه لایه قابل رقابت می باشد و بنا به همان دلایلی که برای پلی یورتان ذکر شد این پوشش نیز می تواند به عنوان جایگزین مناسب برای پلی اتیلن سه لایه مورد توجه قرار گیرد.

واژه های کلیدی: پوشش پلی اتیلن سه لایه، پلی یورتان، پلی اوره، جدایش از سطح، گسیختگی زود هنگام

مقدمه

شناخت مکانیزم جدایش زود هنگام پوشش پلی اتیلن سه لایه از سطح و مقابله با آن موضوع تحقیقات گوناگونی بوده است [۱-۳] که هم اکنون نیز ادامه دارد. پلی اتیلن سه لایه پر مصرف ترین سامانه پوششی است که برای حفاظت خطوط لوله مدفون در صنایع نفت و گاز کشور به کار می رود. این سامانه از سه لایه متشکل از پرایمر اپوکسی، لایه میانی چسب پلی اتیلن مالئینه و لایه رویه پلی اتیلن سنگین، (HDPE) تشکیل شده است. طبق گزارشاتی که در داخل و خارج کشور انتشار یافته، مشخص شده که این پوشش اغلب طی مدت زمان نسبتاً کوتاهی (کمتر از پنج سال) پس از نصب و قرار گرفتن در سرویس از سطح لوله جدا می شود [۴-۷] و بدین خاطر نگرانی هایی در خصوص وقوع زود هنگام پدیده خوردگی فلز لوله به وجود آورده است. حفاظت از خوردگی خطوط لوله مدفون، معمولاً توسط پوشش محافظ خوردگی و سیستم حفاظت کاتدی به صورت توأم صورت می گیرد [۸]. پوشش با فراهم

لایه از سطح لوله هنوز برطرف نشده و صنایع نفت و گاز کشور از وقوع آن نگران می‌باشند [۱۲ و ۱۳]، لازم است تا در خصوص پوشش‌های محافظ خطوط لوله جدید بررسی و مطالعه‌ای صورت گیرد تا چنانچه مزیت و برتری‌هایی در آنها نسبت به پوشش پلی اتیلن سه لایه ملاحظه شد، به‌عنوان جایگزین به صنایع معرفی و توصیه گردند. از آنجایی که هدف ما ابتدا شناخت پوشش‌هایی است که مشکل گسیختگی از سطح در حین سرویس دهی نداشته باشند، به منابعی دست یافتیم که نشان می‌دهد تاکنون هیچ گزارشی در خصوص گسیختگی ناخواسته پوشش‌های پلی یورتان [۱۴ و ۱۵] و پلی اوره [۱۶] در حین سرویس‌دهی انتشار نیافته است. بدین منظور تحقیق حاضر با هدف بررسی کارایی پوشش‌های دو جزئی مایع بر پایه ایزوسیانات جهت جایگزینی با پلی اتیلن سه لایه تعریف و اجرا گردید. در این پژوهش، سه نمونه پوشش محافظ خوردگی صنعتی شامل دو نمونه پوشش پلی یورتان و یک نمونه پوشش پلی اوره از شرکت‌های تولید کننده تهیه گردید. مجموعه‌ای از آزمون‌های استاندارد پوشش‌های لوله بر روی آنان اجرا شد. در ادامه نتایج آزمایشات نمونه‌های پوشش فوق با خصوصیات و ویژگی‌های پوشش پلی اتیلن سه لایه که از منابع استخراج شده بود، مورد مقایسه قرار گرفت.

هنگام مقایسه نتایج آزمون کارایی پوشش‌های پلی یورتان و پلی اوره با ویژگی‌های پوشش پلی اتیلن سه لایه محدودیت‌هایی وجود داشت [۱۷] که به دو مورد از این محدودیت‌ها در زیر اشاره شده است.

الف- متفاوت بودن روش آزمون: روش انجام بعضی از آزمون‌ها برای پلی اتیلن سه لایه با روش انجام آن برای پوشش‌های پلی یورتان و پلی اوره متفاوت است. برای مثال تست چسبندگی برای پلی اتیلن سه لایه معمولاً به روش peel انجام می‌شود، در حالی که در پوشش‌های پلی یورتان و پلی اوره برای انجام تست چسبندگی از pull off و یا v-cut استفاده می‌گردد. از آنجایی که مقایسه نتایج آزمون چسبندگی حاصل از روش‌های

آوردن یک لایه پیوسته، یکنواخت، عایق الکتریسیته و ترجیحاً غیر تراوا به آب، روی سطح حفاظت غیر فعال^۱ انجام می‌دهد. این لایه در حین انبار داری، حمل و نقل، خواباندن لوله در خاک و سرویس‌دهی، حفاظت فلز را بر عهده دارد. چنانچه پوشش دچار عارضه و یا نقصی مانند به وجود آمدن منفذ یا جدا شدن موضعی پوشش از سطح شود، به‌طوری که دسترسی عوامل خوردنده نظیر آب و اکسیژن به سطح فراهم گردد، دیگر پوشش به تنهایی قادر به حفاظت از خط لوله نخواهد بود. در این شرایط سیستم حفاظت کاتدی که حفاظت فعال^۲ سطح را برعهده دارد و برای حداقل کردن موارد خوردگی در هنگام بروز نقص در پوشش طراحی شده، با در اختیار قرار دادن جریان حفاظت کاتدی^۳ به سطح، واکنش‌های خوردگی در نواحی آندی را مختل نموده و مانع از خوردگی فلز لوله می‌شود [۸]. سیستم حفاظت کاتدی در شرایطی قادر به ایفای نقش خود خواهد بود که پوشش در مواقع بروز نقص، اثر shielding در هدایت جریان حفاظت کاتدی نداشته باشد [۹].

اخیراً در مقالات مشابهی که در مجلات علمی انتشار یافته، عملکرد پوشش پلی اتیلن سه لایه در خطوط لوله انتقال گاز کشور با بررسی‌های میدانی مورد مطالعه و تحقیق قرار گرفته است [۱۰ و ۱۱]. در این بررسی به جدایش وسیع پوشش پلی اتیلن سه لایه از سطح لوله‌های مدفون اشاره شده است. در مقالات مذکور یکی از دلایل جدایش پوشش پلی اتیلن سه لایه از سطح، به تنش‌های وارده شده به لوله که از نوع تنش‌های خاک، تنش‌های ناشی از انبساط و انقباض‌های حاصل از تغییرات دما و فشار خط و نیز تنش‌های درونی پوشش به جا مانده از مرحله اعمال هستند، نسبت داده شده و چنین استدلال گردیده که به دلیل سختی بالای پلی اتیلن لایه خارجی، تمامی تنش‌های وارده به سامانه پوششی مستقیماً به فصل مشترک لایه اپوکسی و سطح فلز منتقل می‌شود. چنانچه مقدار این تنش‌ها بیشتر از حد چسبندگی اپوکسی به فلز باشد، منجر به جدایش پوشش پلی اتیلن سه لایه از سطح لوله می‌گردد. در این حالت پیشنهاد می‌شود برای رفع این مشکل از پوشش fusion bonded epoxy (FBE) استفاده شود.

با توجه به اینکه مشکل جدایش پوشش پلی اتیلن سه

1. Passive Protection

2. Active Protection

3. Cathodic Protection Current

باعث می‌شود تنش‌های فرآیند اکستروژن در پلی اتیلن محبوس شده و باقی بمانند. در این شرایط چنانچه به هنگام راه اندازی و یا سرویس‌دهی، دمای خط لوله بالا رود، فرصتی برای آزاد شدن این تنش‌ها فراهم می‌گردد. با توجه به اینکه پلی اتیلن عملاً به لایه چسب و لایه اپوکسی چسبیده است، لذا برای آزاد سازی این تنش‌ها به ناچار فشارهایی به لایه اپوکسی وارد می‌شود. در این صورت اگر میزان تنش وارد شده به لایه اپوکسی از قدرت چسبندگی اپوکسی به فلز بیشتر باشد، باعث جدا شدن لایه اپوکسی از سطح لوله می‌گردد. این مکانیزم گسیختگی یا دیسباند شدن ناخواسته پوشش پلی اتیلن سه لایه از سطح لوله در حد فرضیه بوده و هنوز اثبات نشده است.

روش کار

مواد پوشش

مواد اولیه پوشش‌های پلی یورتان و پلی اوره که دو جزیی و مایع هستند از سه شرکت عرضه کننده محصولات پوشش شرکت‌های خارجی تهیه گردید. با توجه به اینکه اعمال پوشش‌های پلی یورتان و پلی اوره نیاز به دستگاه پاشش دو جزیی^۱ مخصوصی دارد که تیم پژوهشی به هنگام انجام پروژه در اختیار نداشت، لذا کلیه نمونه‌های پوشش استفاده شده در این تحقیق تحت نظارت محققین پروژه و توسط شرکتی که دستگاه پاشش دو جزیی مذکور را در اختیار داشت، تهیه گردید.

صفحات زیرآیند

به منظور تهیه نمونه‌های آزمون پوشش‌های پلی یورتان و پلی اوره، ابتدا زیرآیندهایی از جنس کربن استیل با ضخامت $0.7-0.8$ mm و ابعاد $10\text{ cm} \times 7\text{ cm}$ جهت اجرای آزمون‌های ضربه و خمش و زیر آیندهایی با ضخامت 2 mm و ابعاد $15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ جهت سایر آزمون‌ها بریده شد. پس از آماده‌سازی کلیه سطوح زیر آیندها طبق روش زیر، عملیات اعمال پوشش توسط دستگاه پاشش دو جزیی برای رسیدن به ضخامت‌های پوشش $1-1.5$ mm انجام گرفت. این صفحات حداقل به مدت یک هفته در شرایط

متفاوت منطقی نیست، لذا این مسئله از محدودیت‌های تحقیق حاضر محسوب می‌شود.

ب- تفاوت در ضخامت لایه پوشش:

در صنعت خط لوله معمولاً از ضخامت‌های پوشش پلی اتیلن سه لایه در محدوده $3-4$ mm استفاده می‌شود [۱۸]، در حالی که صنایع پوشش‌های محافظ خوردگی از کیفیت حفاظت‌کنندگی ضخامت‌های پوشش پلی یورتان و پلی اوره در محدوده $1-1.5$ mm راضی بوده و عمدتاً از این ضخامت‌ها استفاده می‌نمایند. افزایش ضخامت فیلم پوشش، خواص محافظتی آن را تقویت می‌نماید، لذا انتظار می‌رود در نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی تأثیرگذار باشد. بنابراین، یکسان نبودن ضخامت فیلم پوشش‌های پلی یورتان و پلی اوره در مقایسه با پلی اتیلن سه لایه، محدودیت دیگر این تحقیق محسوب می‌شود.

به منظور روشن شدن وضعیت پوشش پلی اتیلن سه لایه اعمال شده بر روی خطوط لوله انتقال گاز کشور، شرکت ملی گاز در سال ۱۳۸۴ بررسی میدانی در این خصوص انجام داد. این شرکت پس از نمونه برداری از ۱۳۵ نقطه پوشش پلی اتیلن سه لایه مربوط به لوله‌های انتقال گاز کشور و بررسی و آزمایش آنها، تأیید نمود که جدایش پوشش از سطح به طور گسترده به وجود آمده است، اما خوردگی در سطح لوله‌ها مشاهده نمی‌شود. به نظر می‌آید آنچه تاکنون سطوح فلزی لوله‌ها را علی‌رغم جدایش پوشش از خوردگی بازداشته، سیستم حفاظت کاتدی می‌باشد که به خاطر طراحی صحیح و دقیق توانسته پدیده خوردگی را در آنان به تعویق بیندازد.

بعضی از محققین معتقدند جدا شدن زود هنگام پوشش پلی اتیلن سه لایه از سطح، معلول اشکالات ذاتی است که در فرآیند اعمال این پوشش از طریق اکستروژن جانبی وجود دارد. پلی اتیلن پس از اعمال روی لوله، نیازمند مدت زمانی است تا تنش‌های وارده به خود در اکسترودر و به هنگام اکستروژن را قبل از سرد و جامد شدن آزاد نماید. لیکن در فرآیند اعمال این پوشش، این امکان به دلایل اقتصادی و تولیدی عملاً وجود ندارد. زیرا پلی اتیلن به محض اعمال روی لوله‌های در حال دوران، توسط دوش‌های متعدد آب در طول لوله سرد می‌شود. این کار

1. Dual Component Spray Mmachine

گردیدند و مشخص شد ترتیب کارایی این پوشش‌ها از قوی به ضعیف به صورت پلی یورتان ۱، پلی اوره و پلی یورتان ۲ می‌باشد. حداقل الزامات پوشش‌های تحت بررسی در این پژوهش بر اساس استانداردهای TG281 و EN10290 بوده است.

انجمن جهانی خوردگی^۱ در سال ۲۰۰۳ پس از نشست‌های متعدد گروه پوشش، استاندارد با نام TG281 برای پوشش‌های پلی یورتان محافظ خوردگی پیشنهاد نمود [۱۹]. در این استاندارد، حداقل الزامات پوشش‌های محافظ خوردگی پلی یورتان سخت بر اساس نتایج آزمایشات گوناگون و تجربیات اعضای کمیته پوشش، گردآوری شده است. جدول ۱ این الزامات را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه پوشش‌های پلی اوره استاندارد مشخصی نداشته و از سوی دیگر شباهت ساختاری زیادی با پلی یورتان دارند، در این تحقیق از استاندارد TG281 برای بررسی کارایی پوشش پلی اوره استفاده گردید.

نظر به اهمیت نتایج دو آزمون چسبندگی به سطح و مقاومت به گسیختگی کاتدی و تاثیر مستقیم آنها در خواص حفاظت خوردگی پوشش‌ها، این دو آزمون با تفضیل بیشتری ارائه گردید. نتایج آزمون چسبندگی در جدول ۲ آمده است.

محیط نگهداشته شد و سپس آزمون‌های برنامه‌ریزی شده بر روی آنان انجام گرفت.

آماده‌سازی سطح

قبل از اعمال پوشش، مراحل آماده سازی زیر بر روی صفحات صورت گرفت.

۱- کلیه صفحات جهت تمیزکاری در حد Sa 2,1/2 سند بلاست شدند و میزان پروفایل سطح آنان به میزان 70 ± 5 میکرون اندازه‌گیری و ثبت گردید.

۲- نمونه‌ها پس از سند بلاست در حلال MEK نگهداشته شده و نیم ساعت قبل از اعمال پوشش از حلال خارج گشته و در شرایط آزمایشگاه قرارداد شده تا خشک شوند.

آزمون‌ها

آزمون‌های چسبندگی، گسیختگی کاتدی، ضربه، خمش، جذب آب، سختی و استحکام دی الکتریک بر روی نمونه‌های پوشش پلی یورتان و پلی اوره بر طبق استانداردهای ارائه شده در جدول ۱، انجام شد.

بحث و نتایج

نتایج به دست آمده از آزمون‌های مربوط به دو نمونه پوشش پلی یورتان و یک نمونه پلی اوره ابتدا با یکدیگر مقایسه

جدول ۱- الزامات پوشش‌های پلی یورتان طبق استاندارد پیشنهادی NACE/TG 281

| خواص | استاندارد | الزامات |
|--------------------|-------------|---------------------------|
| چسبندگی | ASTM D 4541 | 10300 kPa (1500 psi), min |
| گسیختگی کاتدی | ASTM G 8 | ≤ 10 mm |
| استحکام دی الکتریک | ASTM D 149 | ≥ 8 kV/mm |
| سختی | ASTM D 2240 | Shore D 75 \pm 10 |
| مقاومت ضربه | ASTM G 14 | 25 in.lbs |
| انعطاف پذیری | ASTM D 1737 | $> 180^\circ$ |
| کشش | ASTM D 412 | 10% maximum, |
| جذب آب | ASTM D 570 | 2% |

جدول ۲- نتایج آزمون چسبندگی طبق استاندارد (ASTM D4541)

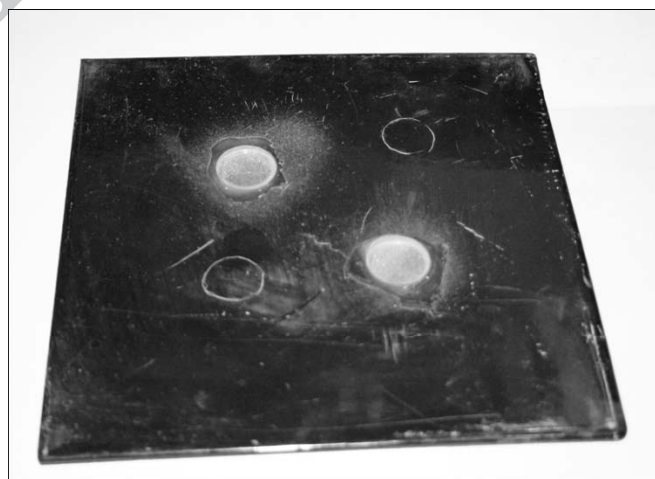
| مشخصات نمونه | ضخامت متوسط پوشش (mm) | استحکام چسبندگی (MPa) | توضیحات |
|--------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| پلی اوره | ۰/۹۲۵ | $> 7/75$ | دالی از محل چسب جدا شد |
| پلی یورتان ۲ | ۱/۲۵ | ۹ | جدایش پوشش از سطح |
| پلی یورتان ۱ | ۱/۰۰۵ | > 10 | دالی از محل چسب جدا شد |

بوده است. جدا شدن زود هنگام دالی (دیسک فلزی) از سطح پوشش در آزمایش چسبندگی بر روی پوشش پلی یورتان ۱ و در میزان تنش ۱۰ MPa نیز اتفاق افتاد که نشان می دهد میزان چسبندگی پوشش مذکور به سطح فلز از مقدار ۱۰ MPa بیشتر می باشد. با توجه به اینکه حداقل مقدار مجاز چسبندگی طبق استاندارد TG281 (جدول ۱) ۱۰/۳ MPa است، می توان نتیجه گیری نمود که پوشش پلی یورتان ۱ نه تنها الزامات چسبندگی استاندارد TG281 را تأمین می نماید، بلکه مقدار استحکام چسبندگی آن در مقایسه با آنچه که در EN10290 مشخص شده حداقل یک و نیم برابر می باشد. شکل های ۱ و ۲ تصاویری از نمونه های پوشش های پلی یورتان که تحت آزمون چسبندگی قرار گرفته اند را نشان می دهند.

این نتایج نشان می دهد که پوشش پلی یورتان ۲ استحکام چسبندگی در حد ۹ MPa دارد که به دلیل کمتر بودن از حد استاندارد ۱۰/۳ MPa ارائه شده در جدول ۱، از نظر چسبندگی قدری ضعیف است. لازم به ذکر است که میزان استحکام چسبندگی این پوشش در انطباق با الزامات استاندارد BS EN10290 که حداقل استحکام چسبندگی پوشش های پلی یورتان را ۷ MPa اعلام نموده، مشکلی ندارد و مورد تأیید است. در آزمایش چسبندگی دیگری که بر روی پوشش پلی اوره انجام گرفت، به دلیل خواص ویژه سطح این نوع پوشش و علی رغم استفاده از چسب های گوناگون امکان اندازه گیری حد چسبندگی این پوشش به سطح فلز فراهم نشد. علت این امر جدا شدن زود هنگام چسب قبل از پوشش در مقدار تنش ۷/۷۵ MPa



شکل ۱- نمونه های پوشش پلی یورتان ۱ پس از آزمون چسبندگی (رنگ سفید داخل حفره ها نشانه باقی ماندن پوشش روی سطح است)



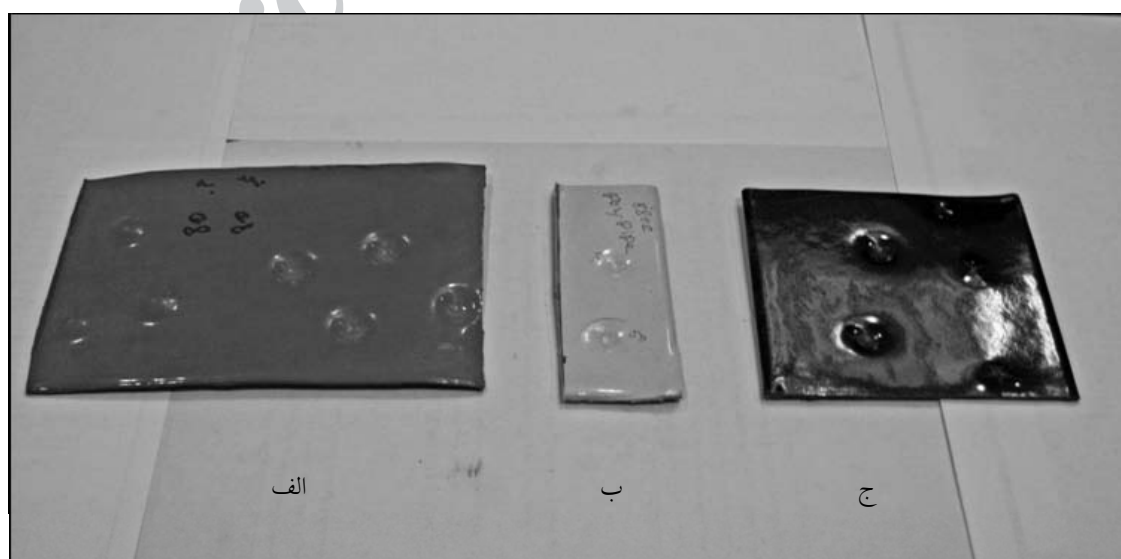
شکل ۲- نمونه ای از پوشش پلی یورتان ۲ پس از آزمون چسبندگی (رنگ سفید متالیک داخل حفره ها نشانه کنده شدن کامل پوشش از سطح می باشد)

هنگام خم شدن، اندازه‌گیری می‌شود. بر این اساس ابتدا نمونه‌ها تحت شرایط سخت خمش حول محوری با قطر ۱۲ mm آزمایش شدند و سپس در آزمون دیگری، حداقل قطر محور قابل خم شدن آنان تعیین گردید. نتایج قسمت اول آزمون خمش در جدول ۳ نشان می‌دهد که پوشش پلی اوره به دلیل انعطاف پذیری بیشتر نسبت به نمونه‌های دیگر قادر است آزمون خمش حول محوری با قطر ۱۲ mm را بدون ترک خوردگی پشت سر گذارد. لیکن پلی یورتان‌ها در این آزمون ترک برداشته و از محل خمش پاره می‌شوند. در قسمت دوم آزمون خمش که حداقل قطر قابل تحمل برای خمش پوشش‌ها تعیین می‌شود، مشخص گردید که حداقل قطر محور خمش قابل تحمل برای پلی اوره ۱۲ mm است، هرچه قطر قابل خم شدن پوشش کمتر باشد، پوشش منعطف‌تر است.

آزمون‌های ضربه مستقیم و غیرمستقیم و نیز مقاومت به خمش بر روی صفحات فلزی پوشش شده با پلی یورتان ۱، پلی اوره و پلی یورتان ۲ انجام گرفت که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است. تصاویری از نمونه‌های پوشش تحت بررسی پس از آزمون‌های خمش و ضربه در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده‌اند. طبق استاندارد TG 281 لازم است آزمون مقاومت خمشی پوشش‌های پلی یورتان بر اساس روش ASTM D1737 صورت گیرد که به دلیل عدم دسترسی به دستگاه آزمون مورد نظر، این کار امکان‌پذیر نشد. لذا از روش ASTM D522 برای اجرای این آزمون استفاده گردید. در این روش ورقه‌های فلزی نازک به ضخامت (۰/۸-۰/۶ mm) حاوی پوشش، به دور یک محور فلزی^۱ خم می‌شوند و بدین ترتیب مقاومت خمشی آنان بسته به ترک خوردن یا نخوردن پوشش به

جدول ۳- نتایج آزمون‌های ضربه و خمش (انعطاف‌پذیری)

| مشخصات نمونه | ضخامت متوسط پوشش (mm) | مقاومت در برابر ضربه مستقیم ASTM D 2794 (lb/in) | مقاومت در برابر ضربه غیر مستقیم ASTM D 2794 (lb/in) | مقاومت در برابر خمش حول محوری به قطر ۱۲ میلی متر | حداقل قطر محور قابل خمش پوشش (mm) |
|--------------|-----------------------|---|---|--|-----------------------------------|
| پلی اوره | ۱ | ۸۰ | ۸۰ | Pass | ۱۲ |
| پلی یورتان ۲ | ۱/۲۵ | ۸۰ | ۱۰ | Fail | ۲۵ |
| پلی یورتان ۱ | ۱/۲ | ۴۰ | - | Fail | ۳۰ |



شکل ۳- نمونه‌هایی از پوشش‌های تحت بررسی پس از آزمون ضربه:

الف- پلی اوره، ب- پلی یورتان ۱ و ج- پلی یورتان ۲



شکل ۴- نمونه‌هایی از پوشش‌های تحت بررسی پس از آزمون مقاومت خمشی:
الف- پلی اوره ب- پلی یورتان ۲ و ج- پلی یورتان ۱

در دمای $23 \pm 2^\circ\text{C}$ بر روی لوله‌های پوشش شده با پلی اوره، پلی یورتان ۱ و پلی یورتان ۲ صورت گرفت. شرایط این آزمون در جدول ۴ و نتایج حاصل از آن در جدول ۵ ارائه شده است.

با دقت در ستون شعاع گسیختگی (جدول ۵) مشخص می‌شود که شعاع گسیختگی مربوط به پوشش‌های پلی یورتان ۱ و پلی اوره به ترتیب $1/5$ و 5 mm است که به دلیل کمتر بودن از حد استاندارد 10 mm توصیه شده در جدول ۱، مورد تایید هستند. ولی پوشش پلی یورتان ۲ با داشتن شعاع گسیختگی 15 mm ، الزامات مشخص شده در استانداردهای TG281 و EN10290 را رعایت نمی‌کند.

انجمن آبرسانی آمریکا AWWA برای پوشش‌های پلی یورتان محافظ خوردگی به کار رفته بر روی لوله‌های مدفون، استاندارد به نام AWWA-C222 تدوین نموده که طبق آن، حداقل مقاومت خمشی لازم برای پوشش‌های پلی یورتان، به صورت توانایی و امکان خم شدن بدون نقص به دور محوری با قطر 102 mm اعلام شده است. با توجه به اینکه نتایج حداقل قطر محور خمش قابل تحمل پوشش‌های پلی یورتان در این تحقیق کمتر از 102 mm می‌باشد، لذا نمونه‌های مذکور طبق استاندارد AWWA-C222 از مقاومت خمشی لازم و کافی برخوردار هستند. آزمون گسیختگی کاتدی طبق استاندارد ASTM G8

جدول ۴- شرایط آزمون گسیختگی کاتدی پوشش‌ها

| مشخصات نمونه | ضخامت متوسط پوشش (mm) | قطر منفذ (mm) | سطح غوطه وری (mm^2) | آند مصرفی |
|--------------|-----------------------|---------------|--------------------------------|-----------|
| پلی اوره | ۱ | ۶ | ۴۶۲۰۰ | منیزیم |
| پلی یورتان ۲ | ۱/۵ | ۶ | ۴۴۰۰۰ | منیزیم |
| پلی یورتان ۱ | ۲ | ۶ | - | منیزیم |

جدول ۵- نتایج آزمون گسیختگی کاتدی پوشش‌ها

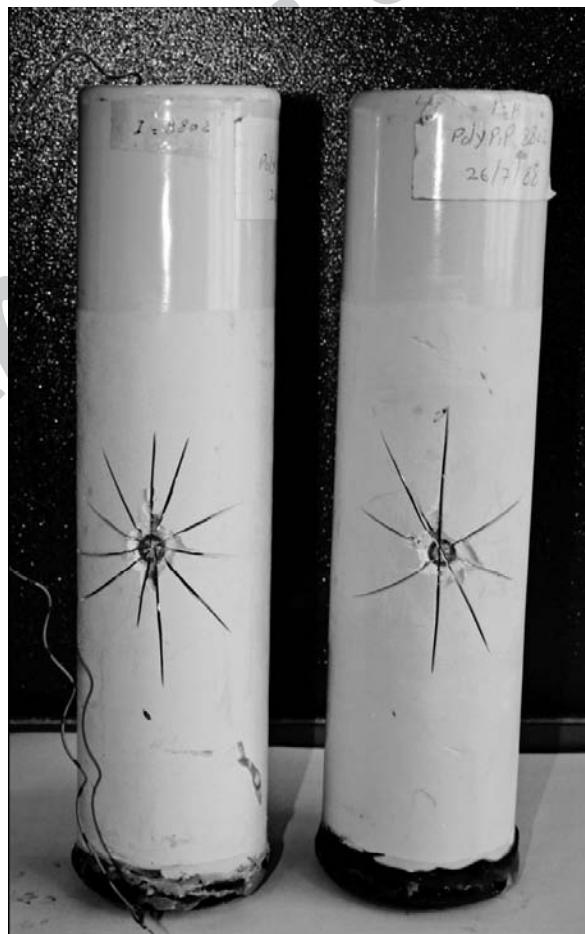
| مشخصات نمونه | مساحت ناحیه گسیخته شده (mm ²) | میانگین شعاع گسیختگی از لبه منفذ (mm) |
|--------------|---|---------------------------------------|
| پلی اوره | ۳۳۸/۴۷ | ۵ |
| پلی یورتان ۲ | ۱۰۶۱/۰۷ | ۱۵ |
| پلی یورتان ۱ | ۳۱/۵۳۲ | ۱/۵ |

جدول ۶- نتایج آزمون‌های کشش (افزایش طول)، جذب آب، سختی و استحکام دی الکتریک

| مشخصات نمونه | سختی سطح Shore D | درصد جذب آب % | درصد افزایش طول % | استحکام دی الکتریک kV/mm |
|--------------|------------------|---------------|-------------------|--------------------------|
| پلی اوره | ۵۷ | ۱/۸۴ | ۲۵۵ | ۲۹/۲ |
| پلی یورتان ۲ | ۸۰ | ۰/۲۵ | ۱۸ | ۱۸ |
| پلی یورتان ۱ | ۸۲ | ۰/۳۹ | ۶/۵ | ۱۳/۳ |

نمونه پس از آزمون نشان داده‌اند که شعاع گسیختگی این پوشش ۳ mm می‌باشد. تصاویری از نمونه‌های پوشش تحت بررسی پس از آزمون گسیختگی کاتدی در شکل‌های ۶ و ۵ نشان داده شده است.

آزمون گسیختگی کاتدی در دمای $60 \pm 3^\circ\text{C}$ طبق استاندارد EN10290 به مدت ۴۸ ساعت بر روی نمونه‌های لوله‌ای شکل حاوی پوشش پلی یورتان ۱ صورت گرفت. بررسی



شکل ۵- نمونه‌هایی از پوشش پلی یورتان ۱ پس از آزمون گسیختگی کاتدی



شکل ۶- نمونه‌های پوشش پس از آزمون گسیختگی کاتدی: (پلی‌یورتان ۲ مشکی، پایین صفحه)، پلی‌اوره (طوسی، وسط) و پلی‌یورتان ۱ (سفید، بالای تصویر)

جذب آب، درصد افزایش طول، و استحکام دی الکتریک را به طور کامل رعایت می‌نماید. لیکن پوشش پلی‌یورتان ۲ با دارا بودن ۱۸٪ افزایش طول در آزمون کشش، نشان داد که با استاندارد TG 281 که بیشترین درصد افزایش طول مجاز را ۱۰٪ اعلام کرده، همخوانی و مطابقت ندارد. لازم به ذکر است که استاندارد EN 10290 حداقل درصد افزایش طول را ۱۰٪ مشخص کرده است، لذا پوشش پلی‌یورتان ۲ از این نظر مشکلی با نتایج آزمون کشش که در جدول ۶ ارائه شده، ندارد.

از جمع‌بندی نتایج به‌دست آمده نتیجه‌گیری می‌شود که پوشش پلی‌یورتان ۱ تمامی الزامات استاندارد TG 281 و EN10290 را تأمین می‌نماید. تنها عدم انطباق مهم پوشش پلی‌یورتان ۲ با دو استاندارد فوق، مربوط به نتیجه آزمون مقاومت به گسیختگی کاتدی می‌باشد که مقدار آن برای پوشش مذکور ۱۵ mm اندازه‌گیری شده در حالی که حداکثر مجاز آن مطابق استانداردهای TG 281 و EN 10290 مقدار ۱۰ mm می‌باشد. پوشش پلی‌اوره تمامی الزامات استاندارد EN 10290 را رعایت می‌کند، ولی با دو مورد از الزامات TG 281 یعنی درصد افزایش طول و سختی مشکل دارد. به نظر می‌آید علت تناقض در خصوص مقادیر مجاز درصد

لازم به ذکر است که شعاع گسیختگی کاتدی پوشش پلی‌اتیلن سه لایه حدود ۵ mm است که در محدوده مجاز قرار دارد. بنابراین چنانچه مقاومت گسیختگی کاتدی پوشش‌های تحت بررسی، کمتر از ۵ mm باشد، بهتر از پلی‌اتیلن سه لایه خواهند بود. بر این اساس پوشش پلی‌یورتان ۱ با ضخامتی در حد یک سوم پلی‌اتیلن سه لایه مقاومت به گسیختگی کاتدی در حد ۱/۵ mm دارد که بهتر و مقاوم‌تر از پلی‌اتیلن سه لایه می‌باشد.

آزمون‌های سختی، جذب آب، درصد افزایش طول و استحکام دی الکتریک بر روی نمونه‌هایی از پوشش‌های پلی‌اوره، پلی‌یورتان ۱ و پلی‌یورتان ۲ صورت گرفت که نتایج آن در جدول ۶ ارائه شده است. پوشش پلی‌اوره الزامات استاندارد TG 281 در زمینه سختی سطح و درصد افزایش طول را رعایت نمی‌کند. میزان سختی پوشش پلی‌اوره در مقیاس Shore D برابر ۵۷ اندازه‌گیری شد، در حالی که استاندارد TG 281 حداقل سختی پوشش‌ها را ۶۵ مشخص کرده است. همچنین درصد افزایش طول این پوشش ۲۵۵٪ مشخص گردید، در صورتی که استاندارد مذکور حداکثر مقدار ۱۰٪ را مجاز می‌داند. پوشش یورتان ۱ الزامات استاندارد TG 281 مربوط به آزمون‌های سختی،

جدول ۷- مقادیر مجاز استحکام چسبندگی پوشش پلی اتیلن سه لایه در دماهای مختلف

| مقدار چسبندگی Peel (kg/25mm strip) | سرعت کشش (mm/min) | دما (°C) |
|------------------------------------|-------------------|----------|
| ۱۵ | ۱۰ | ۲۳ |
| ۱۰ | ۱۰ | ۴۰ |
| ۷ | ۱۰ | ۶۰ |
| ۴ | ۱۰ | ۸۰ |

جدول ۸- مقادیر مجاز استحکام چسبندگی پوشش پلی اتیلن سه لایه پس از غوطه وری در آب جوش

| مقدار Peel (kg/25mm strip) | زمان غوطه وری در آب گرم (روز) |
|----------------------------|-------------------------------|
| ۱۰ | ۱ |
| ۸ | ۷ |
| ۶ | ۱۴ |
| ۵ | ۳۰ |

افزایش طول و سختی در این دو استاندارد به این خاطر باشد که استاندارد EN10290 به طور کلی برای پوشش‌های پلی یورتان، بدون توجه به گریدهای آن (سخت و الاستومری) تدوین شده است. در حالی که TG281 صرفاً برای پوشش‌های سخت پلی یورتان می‌باشد.

ضعف‌های پوشش پلی یورتان ۲ می‌تواند از چند عامل ناشی شود. دلیل اول نحوه اعمال پوشش است و امکان دارد دستورالعمل‌های اعمال خوب رعایت نشده باشد. علت دوم، موضوع مواد اولیه است که احتمال می‌رود نامناسب انتخاب شده باشند. عامل سوم بحث فرمولاسیون است و احتمال دارد که طراحی فرمولاسیون به خوبی انجام نگرفته باشد. در هر حال با توجه به کارایی و کیفیت پوشش پلی یورتان ۱ انتظار می‌رود که ضعف پوشش پلی یورتان ۲ ذاتی نبوده و قابل تعمیم به تمامی فرمولاسیون‌های پوشش‌های پلی یورتان نباشد. لذا می‌توان کارایی و کیفیت مطلوب پوشش پلی یورتان ۱ در این تحقیق را اساساً برای پلی یورتان منظور نمود.

خواص پوشش پلی اتیلن سه لایه

پوشش پلی اتیلن سه لایه در آزمون‌های آزمایشگاهی، کارایی و کیفیت بسیار مطلوبی از خود نشان می‌دهد. برای مثال مقاومت به گسیختگی کاتدی آن کمتر و یا مساوی ۵ mm است. میزان چسبندگی پوشش پلی اتیلن سه لایه به سطح (peel) در دماهای مختلف و نیز متعاقب غوطه وری در آب داغ در فاصله‌های زمانی مختلف در جداول ۷ و ۸ آمده است. این نتایج نشان می‌دهد که پوشش پلی اتیلن سه لایه در آزمون‌های آزمایشگاهی از کیفیت و کارایی کم نظیری در مقایسه با سایر پوشش‌ها برخوردار می‌باشد. علی‌رغم کارایی آزمایشگاهی مطلوب، مشخص شده که این پوشش پس از قرار گرفتن در سرویس در مدت زمان نسبتاً کوتاهی (کمتر از ۵ سال) از سطح لوله جدا می‌شود. مطالعه و بررسی‌هایی که در این تحقیق در خصوص فرآیند اعمال پوشش پلی اتیلن سه لایه انجام شده، این احتمال را قوت می‌دهد که باقی ماندن تنش‌های ناشی از مرحله اعمال پوشش و آزاد شدن تدریجی این تنش‌ها طی سرویس دهی، عامل اصلی جدایش پوشش مذکور از سطح می‌باشد.

نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت نتایج آزمون‌های گسیختگی کاتدی و چسبندگی، در ارزیابی پوشش‌های خطوط لوله زیر سطحی و اینکه مقادیر این دو آزمون برای پلی یورتان ۱ و پلی اوره الزامات استاندارد را به خوبی تأمین می‌نماید، نتیجه‌گیری می‌شود که پوشش‌های پلی یورتان و پلی اوره را می‌توان به عنوان جایگزینی مناسب برای پوشش پلی اتیلن سه لایه به کار گرفت. پوشش‌های پلی یورتان و پلی اوره با ضخامت‌هایی در حد یک سوم پلی اتیلن سه لایه از نظر کارایی و کیفیت حفاظت خوردگی با پلی اتیلن سه لایه، قابل رقابت هستند، ضمن اینکه قابل اعمال در سایت نیز می‌باشند و تا کنون هیچ گزارشی از جدایش زود هنگام آنان از سطح لوله گزارش نشده است. توصیه می‌گردد به دلیل انعطاف‌پذیری بیشتر، پلی اوره را در نواحی سرد به کار برد و از پلی یورتان در نواحی معتدل و گرم استفاده نمود.

مراجع

- [1] Norman D., *Pipeline Coatings-The Good, the Bad and the Ugly*, presented at Australian Corrosion Conference, Adelaide, Australia, 2002.
- [2] Argent C. and Norman D., *Fitness For Purpose Issues Relating To FBE and Three Layer PE Coatings*, <http://www.davidnormancontrol.com/html/papers/PDF/DavidNorman>, 2002.
- [3] Argent C. and Norman D., *Three Layer Polyolefin Coatings, Fulfilling Their Potential*, <http://www.davidnorman-control.com/html/papers/PDF/DavidNorman>, 2003.
- [4] Lagos F.F., Maga C.S. and Lopez M.A., *Study Of A Delamination Failure in A Three Layer Coating Of A Gas Pipeline in Veracruz South East Mexico*, Corrosion 2010, San Antonio/ TX, March 14-18, 2010.
- [5] Moosavi A.N., Chang B.T.A. and Morsi K., *Failure Analysis Of Three Layer Pipeline Coatings*, Corrosion 2010, San Antonio/ TX, March 14-18, 2010.
- [6] Melot D. and Millier P.J., *Studies on The Bond Durability Between The Steel And 3 Layers PE Coatings in Hot/ Wet Environment*, Corrosion 2010, San Antonio/ TX, March 14-18, 2010.
- [7] Moosavi A.N., Al-Mutawwa S.O. and Balboul S.M.A., *Hidden Problems with Three Layer Pipeline Coatings*, Corrosion 2006, San Diego/ Ca, March 12-16, 2006.
- [8] Perret P., *Comparison of the Multilayer Polyolefin Based Systems For External Protection of Pipelines*, in: Wilson A., Pipeline Protection, 1995.
- [9] Norsworthy R., *Addressing Soil Stress and CP Shielding*, presented in Corrosion/2000 Conference, paper No.769, 2000.
- [10] Nazarbeigi A. and Moeini A., "Three-Layer Polyethylene Coating Performance in Iran, *Journal of Coatings & Linings (Materials Performance)*", Vol. 48, No. 11, pp 32-34, 2009.
- [11] Nazarbeigi A. and Moeini A., *A Field Investigation on 3LPE Coating Performance*, *Journal of Farayandho, Shahrivar*, 1388.
- [12] Alexander M., *Success and Failure of Multi-Layer Epoxy/Polyethylene Coating For Pipe*, in: Wilson A., Pipeline Protection, 1995.
- [13] Roche M. and Samaran J.P., *Pipeline Coating Performance*, presented in Corrosion/87 Conference, paper No.28, 1987.
- [14] Guan S.W., *Advanced 100% Solids Rigid Polyurethane Coating Technology for Pipeline Field Joints and Rehabilitation*, Corrosion NACE Expo Conference, Paper No. 03043, 2003.
- [15] Norman D. and Swinburne R., *Polyurethane and Epoxy Coatings for the Rehabilitation and Repair of Pipelines*, in: Duncan J., Pipeline Protection, 1999.
- [16] Nukote web site, http://www.nukote-asia.com/site/pdf/pipeline_coating_comparison.pdf. 2009.
- [17] Norsworthy R., *Rating Underground Pipeline Tape & Coating Systems*, Materials Performance, 1999.
- [18] Jotun web site: <http://www.jotun.com/www/com/20020113.nsf>, 2009.
- [19] NACE International Corrosion Society, *Field-Applied Polyurethane Coatings for Field Repair, Rehabilitation, Girth Weld Joints on Pipeline*, NACE Publication, 2002.