

بررسی اثر زبری سطح بر جدایش کاتدی لایه‌های کامپوزیتی اعمالی بر خطوط لوله‌های گاز به عنوان یک سیستم تعمیراتی

هانیه بازیار^{۱*}، سعید کریمی^۲، سیروس جوادپور^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد، دانشگاه شیراز، بخش مهندسی مواد، شیراز، ایران

۲- دانشجوی دکتری مهندسی مواد، دانشگاه شیراز، بخش مهندسی مواد، شیراز، ایران

۳- دانشیار، بخش مهندسی مواد، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

* Hanie_baziar@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۱/۲۵، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۴/۰۱)

چکیده

تعمیر و تقویت خطوط لوله انتقال گاز با روش‌های سنتی مانند برش، جوشکاری و استفاده از غلاف‌های فلزی، مستلزم مشکلات بسیار و توقف خط لوله انتقال گاز است، لذا استفاده از روش‌های نوین تعمیر و تقویت خطوط لوله انتقال گاز با استفاده از لایه‌های کامپوزیتی، امری ضروری است. در این تحقیق، زبری بهینه برای آماده‌سازی سطوح لوله‌های فولادی پیش از اعمال لایه‌های کامپوزیتی با استفاده از آزمایش‌های Lap-shear و Pull-off تعیین شد و به منظور حصول اطمینان از عدم جدایش این لایه‌های محافظ در زمان حفاظت کاتدی، مقاومت آن‌ها در برابر جدایش کاتدی نیز مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج آزمایشات مربوطه، زبری بهینه ۶۰ میکرومتر بدست آمد و هیچ‌گونه جدایش کاتدی نیز برای لایه‌های محافظ مشاهده نشد.

واژه‌های کلیدی:

جدایش کاتدی، آزمایش کشش محوری، آزمایش Lap-shear، آزمایش Pull-off

۱- مقدمه

در نظر گرفتن رابطه میان پوشش و حفاظت کاتدی، فرض می‌کنند که حفاظت کاتدی مشکل خوردگی خارجی را حل می‌کند، اما جریان حفاظت کاتدی تنها هنگامی به صورت مؤثر می‌تواند عمل کند که مسیری به سمت لوله فلزی داشته باشد [۲]. در ساده‌ترین حالت می‌توان فرض کرد که فرایند جدایش در نتیجه قلیایی شدن در کاتد رخ می‌دهد و باعث تخریب موضعی (هیدرولیز) پیوندهای شیمیایی بین پوشش و اکسید یا

ابتدایی‌ترین روش برای کاهش میزان خوردگی خارجی لوله‌های انتقال گاز با فشار بالا، استفاده از پوشش‌های محافظ به همراه حفاظت کاتدی است، اما چسبندگی پوشش و مقاومت آن در برابر جدایش کاتدی نیز از اهمیت بسیاری برخوردار است [۱]. هنگام استفاده از حفاظت کاتدی بر روی لوله‌های پوشش‌دار، باید مشکلاتی که در هنگام جدایش این پوشش‌ها رخ می‌دهد نیز در نظر گرفته شود. متأسفانه افرادی در صنایع خط لوله، بدون

تحقیقات بسیاری که در رابطه با تأثیر توپوگرافی سطح بر روی چسبندگی انجام شده، فهم این مکانیزم از چسبندگی را آسان تر کرده است [۱۳-۱۷]. استفاده از آزمایش Pull-Off یکی از راه‌های ارزیابی استحکام چسبندگی پوشش اعمالی بر روی زمینه فلزی است و در بسیاری از تحقیقات به منظور تعیین خواص پیوند ایجاد شده بین پوشش و زمینه از این آزمایش استفاده می‌شود. برای نمونه در بتون‌های تقویت شده با کامپوزیت، از این آزمایش برای تعیین ویژگی‌های باند اتصال‌دهنده استفاده شده است و هم‌چنین برای تعیین استحکام چسبندگی کاشی‌های سرامیکی نیز این آزمایش کاربرد دارد [۱۸-۱۹]، به هر حال از این آزمایش کمتر برای ارزیابی میزان چسبندگی لایه‌های کامپوزیتی به سطوح فلزی استفاده شده است.

در این تحقیق، تأثیر آماده‌سازی سطح لوله فولادی بر روی چسبندگی پوشش و جدایش کاتدی بررسی شده و همچنین به منظور تعیین زبری بهینه، پیش از اعمال لایه‌های کامپوزیتی تعمیری و یا تقویتی، از آزمایش Pull-Off استفاده شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- تعیین مناسب‌ترین روش آماده‌سازی سطح

با توجه به استانداردهای مختلف آماده‌سازی سطح از جمله SSPC، ISO 8501، ISO 8502، ISO 8503 و ISO 8504، روش‌های متفاوتی برای آماده‌سازی سطوح فلزی وجود دارد. در این تحقیق سه روش سنگ‌زنی، استفاده از برس سیمی گرد و سندبلاست مورد بررسی قرار گرفت. قبل از انجام هرگونه عملیات آماده‌سازی بر روی سطح مدنظر، این سطح باید با یک حلال مناسب بر اساس استاندارد SSPC-SP-1 شستشو داده شود تا آلودگی‌های موجود روی آن شامل انواع نمک‌های قابل حل، روغن، گریس و ... پاک شوند.

در این تحقیق از حلالی شامل آب و انواع گوناگون مواد معدنی الکلی، اکسیلین $C_6H_4(CH_3)_2$ (Xylol)، تولوئن و ... استفاده شد. این روش به طور معمول همراه با روش‌های آماده‌سازی سطح به کار برده می‌شود. در این تحقیق با توجه به یکسان بودن عملیات

هیدروکسید فلزی ایجاد شده در فصل مشترک می‌شود. ممانعت‌کننده‌های خوردگی که به پوشش اضافه می‌شوند، عمدتاً می‌توانند تا حدی سرعت واکنش‌های خوردگی را محدود و عمر پوشش را طولانی‌تر کنند، بنابراین ارتباط بین چسبندگی و جدایش کاتدی پوشش آلی و زمینه فلزی، یک رابطه مستقیم نیست و اغلب فرایندهای جدایش کاتدی از تخریب این ناحیه، حمله شیمیایی یا مکانیزم‌های دیگر بوجود می‌آیند [۳].

بسیاری از محققان بر این باورند که میزان جدایش، تابعی از فاکتورهای مختلف از جمله دمای کاری، ضخامت پوشش و پتانسیل الکتریکی اعمالی می‌باشد، اما در صورت مشخص شدن این پارامترها نیز همچنان مکانیزم جدایش کاتدی ناشناخته باقی مانده است [۴]. تحقیقات بسیاری در ارتباط با جدایش کاتدی پوشش‌های پلیمری، به ویژه پلی‌اتیلن، اتیلن و مخلوط ترکیبات گوناگون آن‌ها به عنوان مقاوم‌ترین ماده در برابر خوردگی لوله‌های فولادی انجام شده است [۴-۶]، اما کمتر به جدایش کاتدی لایه‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف پرداخته شده است.

باید به خاطر داشت که بک پوشش تنها در صورتی می‌تواند بیشترین حفاظت را از خوردگی نشان دهد که چسبندگی مناسبی با زمینه فولادی داشته باشد [۷]. چسبندگی پوشش به زمینه فلزی به پیوندهای گوناگونی که بین پوشش و فلز ایجاد می‌شود، بستگی دارد. در برخی از موارد خاص، پیوند کووالانسی ایجاد می‌شود که در صورت مقاوم بودن در برابر هیدرولیز، می‌تواند مقاومت خوبی را در حضور آب از خود نشان دهد و چسبندگی مرطوب مناسبی را برای پوشش فراهم کند، اما لازم به ذکر است که تنها در صورت انجام عملیات شیمیایی بر روی فولاد، پیوند کووالانسی بین پوشش و زمینه ایجاد می‌شود [۸-۹]. با در نظر گرفتن زبری سطح، اتصالات مکانیکی بین پوشش و زمینه نیز می‌تواند با قفل کردن مکانیکی پوشش به ناهمواری‌های موجود در سطح زمینه، نقش مهمی را در چسبندگی نهایی ایفا کند [۸، ۱۰-۱۲].

مناسب‌ترین روش آماده‌سازی سطح، هر کدام از سطوح آماده شده به روش‌های مختلف، به طور یکسان لایه‌زنی شد و سپس تحت آزمایش کشش محوری قرار گرفت. برای انجام لایه‌زنی از رزین وینیل استر، نم‌د شیشه‌ای سوزنی و حصیری نوع E، چسب اپوکسی و بتونه^۳ استفاده شد که به طور دستی بر روی سطح مورد نظر اعمال شد. بعد از تعیین مناسب‌ترین روش آماده‌سازی سطح با استفاده از این آزمایش، در ادامه برای تعیین زبری بهینه در نمونه‌های سندبلاست شده، از دو آزمایش Pull-Off و Lap-Shear استفاده شد.

۲-۲- تعیین زبری بهینه

۲-۲-۱- آزمایش Lap-shear

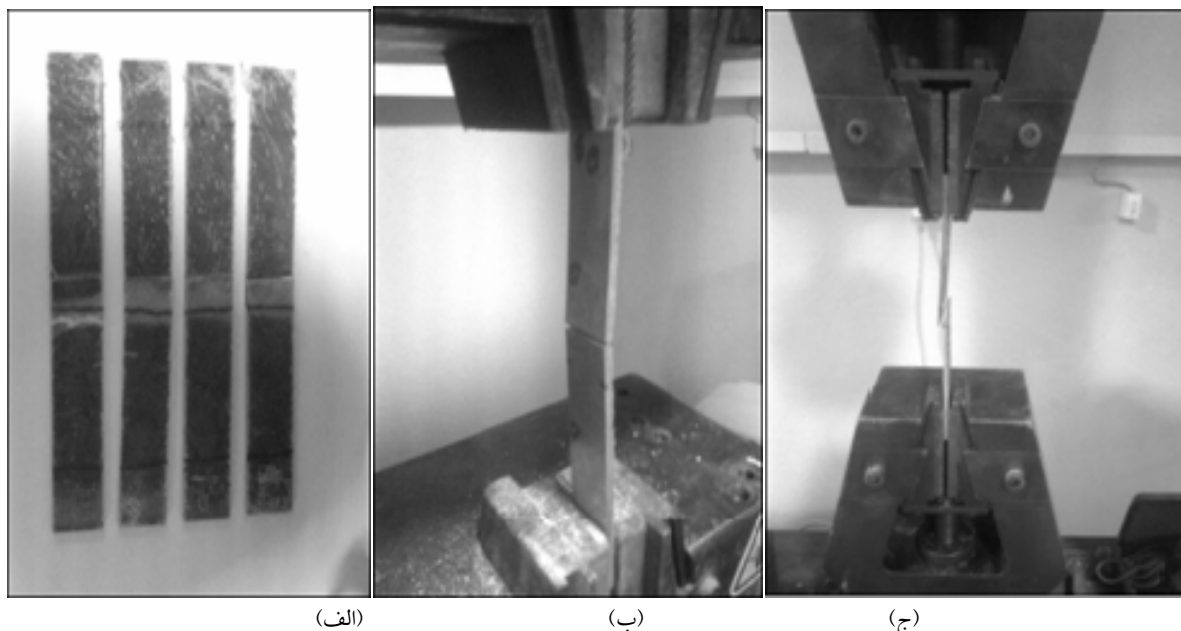
این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM D3165-2000 انجام می‌شود. در این تحقیق برای تعیین قدرت چسبندگی لایه‌های تعمیر و یا تقویتی به سطح لوله نیز از این آزمایش استفاده شد. برای این منظور، ورق‌های فولادی با زبری ۳۰، ۶۰ و ۱۰۰ میکرومتر با استفاده از روش سندبلاست تهیه و سپس لایه‌های کامپوزیتی با روش لایه‌زنی دستی بر روی آن‌ها اعمال شد. این ورق‌های فولادی دارای درجه زنگار C بودند (سطحی که دارای درجه زنگار C است بطور کامل با زنگار پوشیده شده و با چشم غیر مسلح مقادیر بسیار کمی از حفرات روی آن قابل رؤیت است) و قبل از سندبلاست با حلال مناسب، بر اساس استاندارد SSPC-SP1، تحت عملیات شیمیایی قرار گرفتند.

با توجه به یکسان بودن قطر نازل (۸ میلی‌متر) و هم‌چنین نوع و اندازه ذرات ساینده مورد استفاده برای سندبلاست (سرباره مس با اندازه بین ۰/۵-۱/۶۸ میلی‌متر) برای به دست آوردن زبری‌های مذکور، مدت زمان انجام عملیات سندبلاست و زاویه برخورد ذرات با سطح، متفاوت در نظر گرفته شد به گونه‌ای که درجه آماده‌سازی سطح برای هر کدام از این زبری‌ها به ترتیب 2 Sa، ۱/۲ Sa2 و 3 Sa به دست آمد (بر اساس استاندارد سوئدی آماده‌سازی سطح، Sa2 و Sa3 به ترتیب مربوط به تمیزکاری دمشی تجاری^۴ و تمیزکاری دمشی فلز سفید^۵ است).

شیمیایی انجام شده بر روی سطوح مورد آزمایش، می‌تواند روش‌های گوناگون آماده‌سازی سطح را با یکدیگر مقایسه کرد. پیش از آماده‌سازی سطح با یک روش مشخص، درجه زنگار^۱ موجود روی آن بر اساس استاندارد ISO 8501-1 مشخص شد. درجه زنگار سطوح فولادی اولیه، D بود (هنگامی که سطح دارای درجه زنگار D است، روی آن بطور کامل با زنگار پوشیده شده و حفرات سراسری با چشم غیر مسلح قابل رؤیت است). پس از سنگ‌زنی بر اساس استاندارد SSPC-SP-2، تمیزی سطح به St2 رسید (مطابق با استاندارد سوئدی آماده‌سازی سطح، هنگامی که تمیزکاری با ابزار دستی انجام می‌شود درجه تمیزی سطح به St2 می‌رسد که ظاهر سطح بدست آمده بستگی به شرایط اولیه آن دارد). با استفاده از برس سیمی گرد بر اساس استاندارد SSPC-SP-3، تمیزی سطح به St3 رسید (بر اساس استاندارد سوئدی آماده‌سازی سطح، هنگامی که آماده‌سازی با ابزار قدرتی انجام شود، درجه تمیزی سطح به St3 می‌رسد که در اینجا هم ظاهر سطح بدست آمده بستگی به شرایط اولیه آن دارد)، اما همان‌طور که در استاندارد ISO 8504-3 بیان شده است، پروفیل سطح که در واقع همان زبری سطح تمیز شده با استفاده از تمیزکاری دمشی است و درجه آماده‌سازی سطح به دست آمده به نوع، سایز و سختی ساینده مورد استفاده، سرعت ذرات و زاویه برخورد آن‌ها و سختی سطح بستگی دارد. در این تحقیق ساینده بکار رفته در روش سندبلاست، سرباره مس با اندازه ذرات بین ۰/۵-۱/۶۸ میلی‌متر و قطر نازل مورد استفاده ۸ میلی‌متر بود. بر اساس استاندارد ISO 8504-2، سرباره کوره مس دارای شکل زاویه‌ای و نامنظم است و چنانچه اندازه ذرات آن بین ۱/۵-۲ میلی‌متر باشد، ارتفاع پروفیل به دست آمده بر روی سطح در محدوده بین ۷۵-۱۰۰ میکرومتر خواهد بود. بعد از انجام سندبلاست، با توجه به درجه زنگار سطح اولیه فولاد (D)، درجه آماده‌سازی سطح به میزان ۱/۲ Sa2 رسید (بر اساس استاندارد سوئدی آماده‌سازی سطح، هنگامی که از تمیزکاری دمشی شبه فلز سفید^۲ استفاده می‌شود درجه آماده‌سازی به ۱/۲ Sa2 می‌رسد). برای تعیین

هر کدام از ورق‌های فولادی با زبری مشخص، ۴ بار انجام شد که به این منظور ۴ نمونه با ابعاد و شرایط یکسان تهیه شد. برای انجام این آزمایش از دستگاه کشش استفاده شد و کشش با نرخ ۱/۲۷ میلی‌متر در دقیقه و تا زمان رخ دادن واماندگی^۶ ادامه یافت. شکل (۱) مراحل انجام این آزمایش را نشان می‌دهد

در این تحقیق ورق‌های فولادی به طول ۱۷۷/۸ میلی‌متر، عرض ۲۵/۴ میلی‌متر و ضخامت ۱/۶ میلی‌متر برش داده شدند. سپس برای انجام لایه‌زنی از سه لایه هر یک با ضخامت ۰/۸ میلی‌متر استفاده شد که این لایه‌ها از نم‌شیشه‌ای نوع E، رزین وینیل استر، چسب اپوکسی و بتونه تهیه شدند. این آزمایش برای



شکل (۱): (الف) نمونه‌های آماده شده برای آزمایش Lap-Shear، (ب) نحوه قرارگیری نمونه‌ها در دستگاه کشش و (ج) نمونه‌ها پس از انجام آزمایش

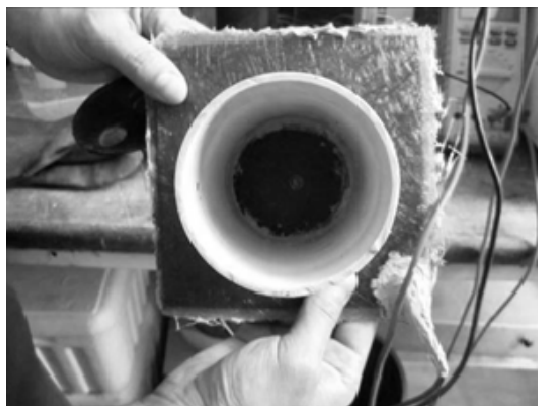
آزمایش Lap-Shear بر روی ورق‌های فولادی با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر و با ضخامت ۲ میلی‌متر با روش دستی انجام شد.

لازم به ذکر است که در این آزمایش، همه مراحل آماده‌سازی سطح (شامل عملیات شیمیایی و سندبلاست) مشابه با آزمایش Lap-shear انجام شد. سپس ابزار اعمال نیرو (شکل ۳) با قطر ۲۰ میلی‌متر با چسب اپوکسی بر روی نمونه‌ها چسبانده و با استفاده از آزمایش‌گر میزان چسبندگی (شکل ۲)، نیرو به صورت کاملاً محوری و یکنواخت با نرخ ۱ MPa/Sec اعمال شد تا زمانی که جدایش در لایه‌ها اتفاق افتاد. این آزمایش ۴ بار بر روی نمونه با زبری ۶۰ میکرومتر و ۳ بار بر روی نمونه با زبری ۱۰۰ میکرومتر انجام شد و هر بار استحکام چسبندگی و طبیعت

۲-۲-۲- آزمایش pull-off

این آزمایش برای بررسی استحکام pull-off لایه کامپوزیت تعمیری بر روی نمونه‌هایی با زبری ۶۰ و ۱۰۰ میکرومتر و بر اساس استاندارد ASTM D4541-Method E انجام شد (از این مرحله به بعد، دیگر آزمایشی بر روی نمونه‌هایی با زبری ۳۰ میکرومتر انجام نشد که دلیل حذف آن نیز در بخش نتیجه‌گیری تشریح شده است). این آزمایش در واقع بیشترین نیروی عمودی را که یک سطح می‌تواند پیش از جدا شدن قسمتی از آن تحمل کند، نشان می‌دهد و معرف حداکثر تنش کششی است. در این آزمایش نیرو باید کاملاً محوری اعمال شود نه پیچشی، بنابراین از ابزارهای ویژه‌ای استفاده شد که تصویر آن‌ها در شکل‌های (۲) و (۳) آمده است. برای انجام این آزمایش، لایه‌زنی مشابه با

جدایش کاتدی لایه‌های کامپوزیتی اعمالی بر روی خطوط لوله، با استفاده از آزمایش جدایش کاتدی و بر اساس استاندارد BS EN 1029 (ANNEX E) مورد بررسی قرار گرفت. این آزمایش بر روی نمونه‌های مشابه با آزمایش Pull-Off انجام شد، اما پیش از انجام آن برای حصول اطمینان از عدم وجود هرگونه عیب در پوشش، holiday test نیز انجام شد. برای انجام آزمایش جدایش کاتدی، پتانسیل پلاریزاسیون کاتدی در حدود ۱٫۵ ولت توسط الکتروود مرجع کالومل اشباع اعمال و سپس سلول الکتروشیمیایی مشابه با شکل (۴) و بر اساس استاندارد آماده شد (قطر حفره ایجاد شده ۶ میلی‌متر است). این آزمایش یا به صورت دو روزه در دمای 23 ± 2 °C و یا به صورت ۲۸ روزه در دمای 23 ± 2 °C قابل انجام است که در این تحقیق از آزمایش دو روزه استفاده و برای ایجاد و حفظ دمای مورد نظر، از یک گرمکن استفاده شد شکل (۵). لازم به ذکر است که در حین انجام آزمایش، دمای محیط 23 ± 2 °C و رطوبت نسبی 35 ± 5 % بود. پس از اتمام آزمایش و جدا کردن لوله پلاستیکی از نمونه، با استفاده از یک چاقوی تیز، ۱۲ برش شعاعی با طول ۴۰ میلی‌متر و زاویه ۳۰ درجه از یکدیگر درست از مکانی که حفره وجود داشت ایجاد شد (شکل (۶)). سپس نوک چاقو در مرکز حفره وارد و آهسته پوشش از برش‌های شعاعی جدا شد و تا رسیدن به چسبندگی زیاد بین پوشش و زمینه ادامه یافت، این فرایند برای همه برش‌ها تکرار شد.

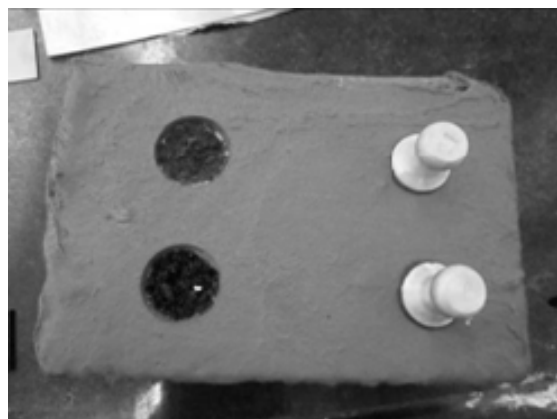


شکل (۴): نحوه آماده‌سازی نمونه و سلول الکتروشیمیایی برای آزمایش جدایش کاتدی

واماندگی گزارش شد. طبیعت واماندگی می‌تواند هم‌بسته^۷ و یا چسبنده^۸ باشد که در نوع هم‌بسته، جدایش در هر یک از لایه‌ها رخ می‌دهد، اما در نوع چسبنده، جدایش در فصل مشترک مشاهده می‌شود.



شکل (۲): آزمایش گر میزان چسبندگی نوع V که به طور خودکار تراز می‌شود.



شکل (۳): ابزار مورد استفاده برای اعمال نیرو که به شکل dolly است.

۲-۳- آزمایش جدایش کاتدی

آزمایش جدایش کاتدی معمولاً به عنوان آزمایش کلیدی برای بررسی عملکرد چسبندگی پوشش به کار می‌رود، زیرا با این آزمایش می‌توان شرایط مربوط به جدایش پوشش از خط لوله را به طور کامل و دقیق شبیه‌سازی کرد. برخی از استانداردهای انجام این آزمایش عبارتند از: ASTM G80، ASTM G8، ASTM G95 و ASTM G42. در این تحقیق مقاومت در برابر

۳- نتایج و بحث

بر اساس نتایج آزمایش کشش محوری، نیروی لازم برای جدایش لایه‌های کامپوزیتی از سطح لوله فولادی سندبلاست شده حدوداً ۴۵۰ Mpa، سطح سنگ‌زنی شده ۳۵۰ Mpa و سطح برس سیمی شده حدوداً ۲۸۰ Mpa بدست آمد که نشان‌دهنده بهتر بودن روش سندبلاست نسبت به دو روش دیگر است.

بعد از تعیین مناسب‌ترین روش آماده‌سازی سطح، با توجه به نتایج آزمایش Lap-shear جداول (۱، ۲، ۳)، مقدار متوسط استحکام کششی برای نمونه با زبری ۳۰، ۶۰ و ۱۰۰ میکرومتر به ترتیب برابر با ۱۱ MPa، ۱۱٫۶ MPa و ۱۲٫۸ MPa به دست آمد که نشان‌دهنده چسبندگی بهتر در نمونه با زبری ۱۰۰ میکرومتر است. باید توجه داشت که این آزمایش به تنهایی نمی‌تواند برای تعیین زبری بهینه به کار رود و نتایج آزمایش pull-off جداول (۴ و ۵) بر خلاف انتظار حاکی از عملکرد بهتر زبری ۶۰ میکرومتر است.

بر اساس استاندارد ISO 8504-3، پروفیل سطحی یک فاکتور مستقل از استاندارد مورد استفاده برای تمیزکاری است، به گونه‌ای که در صورت کوتاه بودن پروفیل، شرایط مناسب برای پوشش‌دهی فراهم نمی‌شود. در حالی که اگر زبری بیش از حد زیاد باشد، ممکن است باعث مملو شدن سطح از برآمدگی‌های نوک تیز شود که این موضوع سبب از بین رفتن زود هنگام کارایی پوشش خواهد شد. در این تحقیق، این عامل خود را در استحکام کششی پایین‌تر (نمونه‌هایی با زبری ۳۰ میکرومتر) نشان داد و در نتیجه این زبری برای اعمال لایه‌های کامپوزیتی تعمیری و یا تقویتی بر روی سطوح فلزی چندان مناسب نیست و به همین دلیل نیز دو آزمایش pull-off و جدایش کاتدی بر روی نمونه با زبری ۳۰ میکرومتر انجام نشد.

بر اساس رابطه زیر می‌توان میزان تنش نسبی اعمالی به هر یک از لایه‌های تعمیری را در حین انجام آزمایش pull-off محاسبه کرد:



شکل (۵): نحوه انجام آزمایش جدایش کاتدی ۲ روزه در دمای $20 \pm 60^\circ\text{C}$



شکل (۶): چگونگی ایجاد برش‌های شعاعی بر روی نمونه پس از انجام آزمایش جدایش کاتدی

$$x = \frac{4F}{\pi d^2} \quad (1)$$

در این رابطه:

x: بیشترین تنش متوسط pull-off در حین آزمایش و یا استحکام pull-off به دست آمده در حین واماندگی سیستم با واحد Mpa
 F: نیروی واقعی اعمالی به سطح آزمایش با واحد N
 d: قطر ناحیه اصلی تحت آزمایش با واحد mm
 این تنش برای نمونه‌هایی با زبری ۶۰ و ۱۰۰ میکرومتر به ترتیب برابر با ۰/۰۱۹MPa و ۰/۰۱۵MPa محاسبه شد. با توجه به مقادیر استحکام کششی برای زبری‌های ۶۰ و ۱۰۰ میکرومتر و تنش نسبی محاسبه شده برای این دو زبری،

می‌توان چنین گفت که با وجود کمتر بودن ۱۰/۳ درصدی استحکام کششی، زبری ۶۰ میکرومتر نسبت به زبری ۱۰۰ میکرومتر، تنش نسبی محاسبه شده مربوط به آزمایش Pull-off در حدود ۲۶/۷ درصد برای زبری ۶۰ میکرومتر بیشتر از زبری ۱۰۰ میکرومتر است که این موضوع حاکی از چسبندگی بهتر لایه‌های کامپوزیتی به سطوح با زبری ۶۰ میکرومتر است. از آن جا که در این نوع از تعمیرات اهمیت چسبندگی بیشتر از استحکام کششی است، می‌توان زبری بهینه را پیش از اعمال لایه‌های کامپوزیتی تعمیراتی و یا تقویتی، ۶۰ میکرومتر در نظر گرفت.

جدول (۱): نتایج مربوط به آزمایش Lap shear بر روی نمونه با زبری ۳۰ میکرومتر

شماره نمونه	۱	۲	۳	۴	میانگین
عرض (mm)	۲۸،۳۶	۲۴،۹۰	۲۴،۴۸	۲۶،۳۲	۲۶،۰۲
ضخامت (mm)	۱۲،۵۰	۱۱،۴۰	۱۱،۸۵	۱۳،۵۰	۱۲،۳۱
طول ناحیه متصل در دستگاه کشش (mm)	۱۴۰،۰	۱۴۰،۰	۱۴۰،۰	۱۴۰،۰	۱۴۰،۰
حداکثر نیرو (N)	۴۴۶۹	۲۹۸۰	۳۴۷۹	۳۱۶۷	۳۵۲۴
استحکام کششی طولی (N/mm)	۱۵۸	۱۲۰	۱۴۲	۱۲۰	۱۳۵
استحکام کششی (MPa)	۱۳	۱۰	۱۲	۹	۱۱،۰
نیروی شکست (N)	۴۳۹۲	۲۸۹۶	۳۴۰۹	۳۰۵۹	۳۴۳۹/۱
حداکثر ازدیاد طول %	۲،۳۶	۰،۷۹	۱،۲۶	۱،۸۴	۱،۵۶
ازدیاد طول در شکست %	۲،۴۸	۰،۷۹	۱،۲۷	۱،۸۷	۱،۶۰

جدول (۲): نتایج مربوط به آزمایش Lap shear بر روی نمونه با زبری ۶۰ میکرومتر

شماره نمونه	۱	۲	۳	۴	میانگین
عرض (mm)	۲۵،۰۵	۲۴،۶۴	۲۴،۳۵	۲۴،۶۸	۲۴،۶۸
ضخامت (mm)	۱۲،۹۰	۱۲،۴۰	۱۲،۵۰	۱۱،۲۰	۱۲،۲۵
طول ناحیه متصل در دستگاه کشش (mm)	۱۴۰،۰	۱۴۰،۰	۱۴۰،۰	۱۴۰،۰	۱۴۰،۰
حداکثر نیرو (N)	۴۰۰۲	۳۱۱۳	۳۱۲۰	۳۷۶۰	۳۴۸۵
استحکام کششی طولی (N/mm)	۱۶۰	۱۲۶	۱۲۸	۱۵۰	۱۴۱
استحکام کششی (MPa)	۱۲	۱۰	۱۰	۱۳	۱۱،۶
نیروی شکست (N)	۳۹۵۴	۲۹۶۷	۳۰۱۳	۳۷۰۶	۳۴۰۹،۹
حداکثر ازدیاد طول %	۱،۳۳	۱،۰۸	۱،۰۶	۱،۹۰	۱،۳۴
ازدیاد طول در شکست %	۱،۳۴	۱،۱۰	۱،۰۶	۱،۹۰	۱،۳۵

باشد، میانگین فاصله‌ای که در پوشش شکستگی ایجاد می‌شود، بیان‌گر میزان جدایش است. نتایج آزمایش جدایش کاتدی در واقع میانگین حسابی از ۱۲ داده به دست آمده است، اما در آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، هیچ‌گونه جدایشی مشاهده نشد که این امر حاکی از مقاومت مطلوب لایه‌های کامپوزیتی تعمیری و یا تقویتی در برابر جدایش کاتدی است.

با توجه به نتایج آزمایش جدایش کاتدی برای نمونه‌هایی با زبری ۶۰ و ۱۰۰ میکرومتر جداول (۶ و ۷)، می‌توان چنین نتیجه گرفت که جدایش کاتدی برای لوله‌های تعمیر شده با لایه‌های کامپوزیتی رخ نمی‌دهد و از این بابت کاملاً ایمن هستند، زیرا معیار جدایش بر اساس استاندارد BS EN 10290 (ANNEX E) در واقع میانگینی از فاصله بین لبه سوراخ تا ناحیه چسبندگی زیاد است. چنانچه اتصال قوی بین پوشش و زمینه وجود داشته

جدول (۳): نتایج مربوط به آزمایش Lap shear بر روی نمونه با زبری ۱۰۰ میکرومتر

شماره نمونه	۱	۲	۳	۴	میانگین
عرض (mm)	۲۶٫۶۵	۲۶٫۲۰	۲۵٫۰۰	۲۴٫۹۰	۲۵٫۶۹
ضخامت (mm)	۱۰٫۱۵	۱۱٫۰۵	۸٫۹۰	۹٫۴۰	۹٫۸۸
طول ناحیه متصل در دستگاه کشش (mm)	۱۳۰٫۰	۱۳۰٫۰	۱۳۰٫۰	۱۳۰٫۰	۱۳۰٫۰
حداکثر نیرو (N)	۳۴۳۸	۳۴۶۹	۲۶۹۲	۳۴۱۴	۳۲۵۳
استحکام کششی طولی (N/mm)	۱۲۹	۱۳۲	۱۰۸	۱۳۷	۱۲۷
استحکام کششی (MPa)	۱۳	۱۲	۱۲	۱۵	۱۲٫۸
نیروی شکست (N)	۳۴۳۵	۳۴۶۲	۲۲۳۵	۳۳۸۹	۳۱۳۰٫۵
حداکثر ازدیاد طول %	۱٫۲۲	۱٫۴۷	۲٫۵۳	۲٫۱۲	۱٫۸۳
ازدیاد طول در شکست %	۱٫۲۲	۱٫۴۷	۲٫۹۵	۲٫۱۲	۱٫۹۴

جدول (۴): نتایج مربوط به آزمایش pull-off بر روی نمونه با زبری ۶۰ میکرومتر

شماره نمونه	استحکام چسبندگی (MPa)	طبیعت و مکان و اماندگی
۱	۶٫۴۷	۱۰۰٪ هم‌بسته از پوشش
۲	۶٫۲۶	۱۰۰٪ هم‌بسته از پوشش
۳	۶٫۲۱	۱۰۰٪ هم‌بسته از پوشش
۴	۵٫۴۶	۱۰۰٪ هم‌بسته از پوشش

جدول (۵): نتایج مربوط به آزمایش pull-off بر روی نمونه با زبری ۱۰۰ میکرومتر

شماره نمونه	استحکام چسبندگی (MPa)	طبیعت و مکان و اماندگی
۱	۴٫۵۸	۱۰۰٪ چسبیده بین dolly و چسب
۲	۴٫۵۸	۱۰۰٪ چسبیده بین dolly و چسب
۳	۵٫۲۶	۱۰۰٪ هم‌بسته از پوشش

لوله‌های فولادی، ۶۰ میکرومتر به دست آمد و در حالت کلی چنین توصیه می‌شود که در صورت استفاده از هر نوع ساینده و یا نازل، سرانجام درجه تمیزی سطح به $Sa2\ 1/2$ و پروفیل زبری سطح به ۶۰ میکرومتر برسد. این شرایط با تعیین زمان مناسب برای سندبلاست و زاویه مناسب برخورد ساینده به سطح قابل دست‌یابی است. چنانچه لوله‌های تعمیر و یا تقویت شده با لایه‌های کامپوزیتی تحت حفاظت کاتدی قرار گیرند، جدایش کاتدی برای آنها اتفاق نمی‌افتد و از این لحاظ ایمن هستند.

۵- مراجع

- [1] Peter Kentish, "Stress Corrosion Cracking of Gas Pipelines – Effect of Surface Roughness, Orientations and Flattening", Corrosion Science, Elsevier, Vol. 49, pp. 2521-2533, 2007.
- [2] Richard Norsworthy, "Coatings Used in Conjunction with Cathodic Protection-Shielding vs. Non-Shielding Pipeline Coatings", 17th international corrosion congress, Las Vegas, Nevada, paper No 4017, 2008.
- [3] M.K. Harun, J. Marsh, S.B. Lyon, "The Effect of Surface Modification on the Cathodic Disbondment Rate of Epoxy and Alkyd Coatings", Progress in Organic Coatings, Elsevier, Vol. 54, pp. 317-321, 2005.
- [4] Corey T. Love, Guijun Xian, Vistasp M. Karbhari, "Cathodic Disbondment Resistance with Reactive Ethylene Terpolymer Blends", Progress in Organic Coatings, Elsevier, Vol. 60, pp. 287-296, 2007.
- [5] D. Roya, G.P. Simona, M. Forsytha, J. Mardel, "Modification of Thermoplastic Coatings for Improved Cathodic Disbondment Performance on a Steel Substrate: a Study on Failure Mechanisms", International Journal of Adhesion & Adhesives, Elsevier, Vol. 22, pp. 395-403, 2002.
- [6] M. Selvaraj, S. Palraj, P. Jayakrishnan, "Performance of Polymer Blends on Phosphated Steel Substrate", Progress in Organic Coatings, Elsevier, Vol. 54, pp. 1-4, 2005.
- [7] Elise Legghe, Emmanuel Aragon, Lénaïk Bélec, André Margaillan, Denis Melot, "Correlation between Water Diffusion and Adhesion Loss: Study of an Epoxy Primer On Steel", Progress in Organic Coatings, Elsevier, Vol. 66, pp. 276-280, 2009.
- [8] K.W. Allen, "A Review of Contemporary Views of Adhesion" The Journal of Adhesion, Vol. 21, pp. 261-277, 1987.
- [9] R.G. Schmidt, J.P. Bell, "Investigation of Steel/Epoxy Adhesion Durability Using Polymeric Coupling Agents. II. Factors Affecting Adhesion Durability", the Journal of Adhesion, Vol. 25, pp. 85-107, 1988.

جدول (۶): نتایج مربوط به آزمایش جدایش کاتدی بر روی نمونه با زبری ۶۰ میکرومتر

مقدار	نتایج آزمایش
۳	کل شعاع حفره اولیه (mm)
۴۰	شعاع برش‌های ایجاد شده بر روی نمونه (mm)
۰	شعاع پوشش جدا شده از حفره مرکزی تا رسیدن به چسبندگی زیاد (mm)
۰	کل شعاع پوشش جدا شده (mm)
۰	قطر دایره معادل ECD (mm)
۰	شعاع تغییر رنگ یافته پوشش جدا شده از حفره مرکزی (mm)

جدول (۷): نتایج مربوط به آزمایش جدایش کاتدی بر روی نمونه با زبری ۱۰۰ میکرومتر

مقدار	نتایج آزمایش
۳	کل شعاع حفره اولیه (mm)
۴۰	شعاع برش‌های ایجاد شده بر روی نمونه (mm)
۰	شعاع پوشش جدا شده از حفره مرکزی تا رسیدن به چسبندگی زیاد (mm)
۰	کل شعاع پوشش جدا شده (mm)
۰	قطر دایره معادل ECD (mm)
۰	شعاع تغییر رنگ یافته پوشش جدا شده از حفره مرکزی (mm)

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور تعیین مناسب‌ترین روش برای آماده‌سازی سطوح فولادی پیش از اعمال لایه‌های کامپوزیتی تعمیر و یا تقویتی و هم‌چنین تعیین زبری بهینه، آزمایش‌هایی مانند کشش محوری، Pull-off و جدایش کاتدی بر روی نمونه‌های فولادی لایه‌زنی شده به روش دستی انجام شد. با توجه به نتایج به دست آمده، از بین روش‌های گوناگون آماده‌سازی سطح مانند سنگ‌زنی، استفاده از برس سیمی گرد و سندبلاست، مناسب‌ترین روش برای آماده‌سازی سطح لوله‌ها و مقاطع فولادی پیش از اعمال لایه‌های کامپوزیتی تعمیر و یا تقویتی، روش سندبلاست است. زبری بهینه پیش از تعمیر و یا تقویت

- Mechanical Properties of Adhesive Joints Loaded at High Strain Rates", *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 9, pp. 395-411, 1995.
- [18] N.M.M. Ramos, M.L. Simés, J.M.P.Q. Delgado, V.P. de Freitas, "Reliability of the Pull-Off Test for in Situ Evaluation of Adhesion Strength", *Construction and Building Materials*, Elsevier, Vol. 31, pp. 86-93, 2012.
- [19] Everaldo Bonaldo, A.O. Joaquim Barros, B. Paulo Lourenco, "Bond Characterization between Concrete Substrate and Repairing SFRC using Pull-Off Testing", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Elsevier, Vol. 25, pp. 463-474, 2005.
- [10] Enrique Vaca-Cortés, Miguel A. Lorenzo, James O. Jirsa, Harowel G. Wheat, Ramón L. Carrasquillo, "Adhesion Testing of Epoxy Coating" Center for transportation Research, Research Report No. 1265-6, University of Texas, Austin, pp. 1-129, 1998.
- [11] D.E. Packham, "The Mechanical Theory of Adhesion—Changing Perceptions 1925-1991", *the Journal of Adhesion*, Vol. 39, pp. 137-144, 1992.
- [12] A.J. Kinloch, "The Science of Adhesion", *Journal of Materials Science*, Vol. 15, pp. 2141-2166, 1980.
- [13] D.J. Arrowsmith, "Adhesion of Electroformed Copper and Nickel to Plastic Laminates", *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, Vol. 48, pp. 88, 1970.
- [14] S. Zhang, R. Panat, K.J. Hsia, "Influence of Surface Morphology on the Adhesion Strength of Epoxy-Aluminum Interfaces", *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 17, pp. 1685-1711, 2003.
- [15] E. Sancaktar, R. Gomatam, "A Study on the Effects of Surface Roughness on the Strength of Single Lap Joints", *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 15, pp. 97-117, 2001.
- [16] K. Meine, K. Klob, T. Schneider, D. Spaltmann, "The Influence of Surface Roughness on the Adhesion Force", *Surface and Interface Analysis*, Vol. 36, pp. 694-697, 2004.
- [17] C. Keisler, J.L. Lataillade, "The Effect of Substrate roughness Characteristics on Wettability and on the

۶- پی نوشت

- 1- Rust grade
- 2- Near white metal blast cleaning
- 3- Primer
- 4- Commercial blast cleaning
- 5- White metal blast cleaning
- 6- Failure
- 7- Cohesive
- 8- Adhesive