



مطالعه‌ای بر تاثیرات توپوگرافی سطحی بر روی استحکام چسبندگی کامپوزیت پایه اپوکسی بر روی فولاد سازه

کریم اصولی بستان‌آباد^۱، ابوالفضل توتونچی^۲

^۱ شرکت دانش‌بنیان فناوران کامپوزیت آذربایجان، مرکز رشد واحدهای فناور دانشگاه تبریز (مربی)

^۲ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارمیه (استادیار)

چکیده

بروز ترکیدگی و نشی در لوله‌های انتقال سیال در کشور امری رایج است. در پژوهش حاضر با رویکرد بازسازی خطوط لوله انتقال آب با استفاده از وصله‌های کامپوزیتی پایه اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه، بهینه‌سازی چسبندگی وصله‌های کامپوزیتی بر سطح فولاد مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور ابتدا چسب پایه متاکریلات بدلیل استحکام چسبندگی بالای این چسب، به عنوان پلیمر واسط انتخاب شد. تئوری‌های چسبندگی بیان می‌کنند که اتصالات قوی بوسیله ایجاد دوقطبی‌هایی در سطح که نیروهای واندروالسی را افزایش می‌دهند، با برطرف شدن لایه‌های مرزی سست و اصلاح توپوگرافی سطوح بدست خواهد آمد. لذا آماده‌سازی سطحی با زبری و تمیزی بهینه، عاری از انواع آلودگی‌ها هم در سطح فولاد و هم سطح کامپوزیت یک امر کلیدی در دستیابی به اتصالات پر استحکام کامپوزیت - فولاد سازه است. بدین منظور با استفاده از سه سمباده مش ۱۰۰، ۲۲۰، ۵۰۰ و پولیش، سطح فولاد پایه، آماده‌سازی شده و سپس توسط محلول‌های استون و Finish روی این سطوح عملیات تمیزکاری انجام گردیده و تست چسبندگی اتصالات کامپوزیت - فولاد سازه در حالت بارگذاری برشی انجام شد. بیشترین استحکام چسبندگی در سطح پولیش خورده و چربی‌زدایی شده با محلول Finish حاصل گردید.

واژه‌های کلیدی: اتصالات چسبی؛ توپوگرافی؛ کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه؛ استحکام چسبندگی؛ آماده‌سازی سطحی؛ چسب متاکریلات؛ لوله‌های انتقال سیال.

¹ Karimosouli@gmail.com

مقدمه

بروز ترکیدگی و نشتی در لوله‌های انتقال سیال در کشور امری رایج است. ترکیدگی در لوله‌ها بسته به جنس لوله و شرایط محیطی ممکن است ناشی از یک شکست ترد یا جوانه‌زنی ترک‌ها و رشد بعدی آنها بوده و یا بعثت خوردگی و تنش‌های اعمالی و همچنین صدمات مکانیکی باشد. آسیب پذیری این مواضع با اعمال بارهای دینامیکی خارجی از قبیل بارهای اعمال شده توسط ماشین‌های حفاری و عبور و مرور وسایل نقلیه سنگین و غیره شدت می‌یابد. پس از شناسایی مواضع نشت، چندین روش برای بازسازی و راه اندازی مجدد خط وجود دارد که اهم آنها عبارتند از: (۱) جایگزینی کل لوله فرسوده با یک لوله سالم مشابه، (۲) در صورت امکان جوشکاری لوله و وصله زدن قسمت معیوب و (۳) پیچیدن نوارهای کامپوزیتی دور قسمت آسیب دیده لوله.

در میان گزینه‌های ارائه شده، تنها روش کم هزینه، معتبر و قابل اعمال روی لوله‌های با جنس‌های مختلف و با کمترین وقفه در کار انتقال، استفاده از نوارهای کامپوزیتی می‌باشد [۱]. این روش عدم پیشروی ترک و خوردگی و تداوم کار بلند مدت قسمت آسیب دیده را تا حد زیادی تضمین می‌کند.

تجربه‌های صنعتی در اروپا و آمریکا نشان داده‌اند که استفاده از کامپوزیت‌ها، ۲۴٪ نسبت به نوارهای فلزی و ۷۳٪ نسبت به روش جایگزینی لوله‌ها ارزان‌تر تمام می‌شود [۲]. استفاده از کامپوزیت‌ها، علاوه بر جنبه اقتصادی دارای مزایای دیگری نیز است که از آن جمله می‌توان به (۱) عدم نیاز به نقل و انتقال تجهیزات نصب سنگین، (۲) عدم نیاز به استفاده از دماهای بالای مورد نیاز در جوشکاری، (۳) کوتاه بودن مدت زمان اجرای فرآیند، (۴) جلوگیری از خوردگی‌های بعدی در محل تعمیرات و (۵) پایین‌تر بودن میزان آلودگی محیط زیست نسبت به روش‌های مرسوم دیگر [۳ و ۴]، اشاره کرد.

چسبندگی را می‌توان به پنج مکانیسم (پیوند یا جذب فیزیکی، پیوند شیمیایی، تئوری نفوذ، تئوری لایه مرزی ضعیف و پیوند مکانیکی یا تئوری درگیری مکانیکی) مربوط دانست که می‌توانند در فصل مشترک هم بصورت مجزا و هم با تشکیل پیوند اتفاق بیفتند. چسبندگی از (الف) پیوند مکانیکی بین چسب و زیرلایه و (ب) نیروهای شیمیایی شامل پیوندهای کووالانسی اولیه یا نیروهای قطبی ثانویه بین دو جز، ناشی می‌شود. به نظر می‌رسد مورد دوم مهم‌تر باشد و توجیهی است بر اینکه چرا ایجاد چسبندگی بر روی زیرلایه‌های خنثی و غیرقطبی نظیر پلی‌اتیلن و پلی‌تترافلورواتیلن به سختی صورت می‌گیرد؛ این سطوح باید در ابتدا بصورت شیمیایی پیش عملیات شوند تا گروه‌های قطبی در سطح تشکیل شود. اغلب برای تقویت پیوند مکانیکی در سطوحی که چسب روی آن اعمال خواهد شد، عملیاتی برای افزایش زبری سطوح انجام می‌شود؛ اما زبرسازی سطح همیشه مطلوب نیست چراکه در برخی موارد این امر موجب محسوس شدن حباب‌های هوا در ته شیارهای سطحی شده و موجب ایجاد مکان‌های تمرکز تنش و شکست در چسب‌های صلب می‌شود [۵-۷].

عموماً یک پلیمر مایع تماس مناسبی با یک سطح صاف و بدون آلودگی برقرار می‌نماید. نفوذ پلیمر به داخل حفرات یک سطح خشن به زاویه تماس پلیمر با سطح و شکل حفرات سطحی بستگی دارد. اگر این موارد بصورت مطلوبی برآورده شوند، پلیمر در حالت تعادل، نفوذ خوبی در حفرات خواهد داشت. نرخ نفوذ توسط

رابطه واشبورن^۱ بیان می‌شود. اندازه زاویه تماس بین مایع و یک سطح خشن وابسته به مشخصات توپوگرافی سطح است. معمولاً با فرض ویژگی‌های ایده‌آل سطحی، نفوذ مایع به داخل یک حفره استوانه‌ای شکل تاجایی ادامه می‌یابد که فشار ناشی از هوای محبوس در حفره برابر با فشار ناشی از نیروهای موئینگی شود. مسافتی که مایع داخل حفره به طول L و شعاع r نفوذ می‌کند توسط رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$X = L \left(1 - \frac{P_a r}{\gamma_{LV} \cos \theta + P_a r} \right) \quad (1)$$

در جاییکه؛ P_a فشار اتمسفر، γ_{LV} و θ به ترتیب انرژی سطحی و زاویه تماس مایع (چسب) هستند. بوضوح مشاهده می‌گردد که هرچه قطر حفره کوچکتر باشد، نسبتی از آن که توسط مایع تا حصول تعادل پر می‌شود، افزایش می‌یابد. بسته به ساختار شیمیایی اجزا، هندسه سطح و فاصله لایه‌ها در اتصالات، اندرکنش‌های مولکولی ممکن در جدول (۱) نشان داده شده است [۸ و ۹].

فلزات، اکسیدهای فلزی و سرامیک‌ها عموماً دارای انرژی آزاد سطح بیشتر از حدود 2500 mJ/m بوده و بنابراین سطوح جامد انرژی بالا نامیده می‌شوند. چنین سطوحی به راحتی توسط چسب‌های آلی با مقادیر انرژی آزاد سطح کمتر از حدود 2500 mJ/m خیس می‌شوند و منجر به تماس بین سطحی گسترده‌ای می‌گردند. بعلاوه مقدار بالای انرژی آزاد سطح مورد تماس، منجر به تشکیل نیروهای ثانویه بین سطحی نسبتاً قوی می‌گردد [۱۰]. جهت اطلاع از چگونگی حصول استحکام پیوندی خوب مباحث فوق مفیدند، ولی بسته به شرایط عملیات، چند عامل اتصال چسبی را پیچیده می‌سازد. این عوامل ممکن است منجر به افزایش یک لایه مرزی ضعیف روی سطح شده و مانع حصول اتصال قوی پیش‌بینی شده در مباحث فوق گردد. این پارامترها عبارتند از: (الف) اغلب ممکن است سطح با یک لایه از انواع روغن‌ها، گریس یا واکس حافظت شده باشد، در این صورت اگر چنین لایه‌هایی قبل از عمل پیوند چسب از بین نرود، در فرآیند اتصال به عنوان لایه مرزی ضعیف عمل می‌نماید. (ب) چون سطوح با انرژی بالا و تمیز به سرعت ناخالصی‌های محیط اطراف را جذب می‌نمایند اگر برای از بین بردن آن اقدام نشود، مانند یک لایه مرزی ضعیف عمل می‌کنند. استنباط فنی از نکات فوق اساساً این است که در بسیاری از موارد جهت حصول مقاومت‌های اتصال چسبی خوب لازم است لایه‌های محافظ گریس، رسوبات و غیره توسط یک مرحله چربی‌زدایی پاک گردیده و سطوح فعال توسط سایش مکانیکی احیا گردند [۱۱-۱۳].

بهبود چسبندگی سطوح فولاد و کامپوزیت در پیشبرد موفقیت‌آمیز این پژوهش و در نهایت ارائه بهترین روش بمنظور بازسازی خطوط لوله انتقال آب نقش کلیدی را دارد. هدف از پژوهش حاضر بالابردن استحکام اتصالات فولاد - کامپوزیت پایه اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه است. اصلی‌ترین ضعف اتصالات کامپوزیت‌های پایه پلیمری - فولاد از استحکام ضعیف فصل مشترک کامپوزیت با فولاد نشأت می‌گیرد، لذا

¹ - Washburn

ایجاد یک تطابق متناسب بین دو جزء اتصال در بهبود استحکام، اصلی‌ترین نقش را ایفا می‌کند. همانطوریکه پیشتر بیان گشت، بمنظور حصول استحکام مکانیکی مناسب در اتصالات چسبی آماده‌سازی سطح امری مهم است که بدین منظور سطوح با انواع توپوگرافی‌ها و پیش عملیات چربی‌زدایی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

مواد و روش تحقیق

در طرح پژوهشی حاضر، با توجه به ویژگی‌های مطلوب مکانیکی پلیمر اپوکسی، مانند ضریب سخت پایی بالا، چسبندگی سطحی عالی، زمان مناسب اتمام چرخه‌های پخت و ویسکوزیته مطلوب پلیمر پایه اپوکسی، این پلیمر جهت ساخت کامپوزیت (وصله) استفاده شد. بدین منظور از رزین اپوکسی (۲۰۱۵) و هاردنر آمینی (۲۰۱۳) از سری محصولات اپولام^۱ ساخت شرکت اکسون^۲ کشور فرانسه استفاده شده و در مورد فاز تقویت کننده نیز با در نظر گرفتن اثر مطلوب ناهمسانگردی خواص مکانیکی از فاز تقویت کننده‌ی رشته‌ای استفاده شد. علاوه بر آن نظر به خواص سطحی مناسب فصل مشترک الیاف شیشه و رزین‌های پایه اپوکسی و همچنین صرفه اقتصادی بالای الیاف شیشه نوع S، این الیاف بعنوان فاز تقویت کننده مورد استفاده قرار گرفت. بمنظور ساخت کامپوزیت، از روش لایه‌گذاری دستی الیاف شیشه در قالب باز از جنس پلی اتیلن PE استفاده شد. در این روش ابتدا هاردنر و رزین به نسبت وزنی ۱ به ۳ توزین شدند. سپس الیاف شیشه تک جهت نیز به نسبت وزنی ۱ به ۳ نسبت به زمینه پلیمری توزین شد. پس از اختلاط همگن رزین و هاردنر، الیاف تقویت کننده به دقت توسط مخلوط رزین و هاردنر خیس شده و در قالب روباز قرار گرفت. شکل (۱) نحوه لایه‌گذاری کامپوزیت در قالب را با استفاده از الیاف شیشه تک جهت نشان می‌دهد.

برای اتصال کامپوزیت پایه اپوکسی به سطح فولادی چسب متاکریلات ۳۲۹۵ محصول شرکت Holdtite، بدلیل خواص مکانیکی مطلوب و زمان گیرش (سفت شدن) پائین مورد استفاده قرار گرفت.

برخی از محدودیت‌های اعمال تست هیدرواستاتیک بر روی لوله‌های بازسازی شده انتقال سیال، عبارتند از: ناهمگونی و زمان‌بر بودن انجام تست، قابلیت تکرار پذیری کم، محدودیت‌های آنالیز نتایج، محدودیت نمونه برداری از سطوح شکست، دقت کم، هزینه بالای مواد مصرفی و غیره. لذا طراحی آزمایش‌هایی که بتوان نتایج آنها را با خطای ناچیزی جایگزین تست فوق‌الذکر کرد، ضروری به نظر می‌رسد، لذا از نمونه‌های تست

استحکام چسبندگی برشی تحت عنوان SLS^۳ طبق استاندارد ASTM-D 1002-10 با نرخ اعمال بار $1/3 \text{ mm/min}$ بمنظور برآورد استحکام چسبندگی کامپوزیت پایه اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه بر روی سطح فولاد استفاده شد. پروفیل‌های فولادی استفاده شده از جنس فولاد کربنی ساده سازه‌ای St-37 بود. هندسه و ابعاد نمونه‌های تهیه شده مطابق استاندارد ذکر شده در تصاویر شکل (۲) نشان داده شده است.

1 - Epolam

2 - Axson Technologies

3 - Single Lap Shear

شانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح

برای رسوب زدایی سطح فولاد، قبل از اعمال پلیمر واسط (چسب)، سطح نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM 90 - D2651 و با استفاده از سنباده‌های کاربید سیلیسیومی تا مش ۱۰۰۰ و خمیر حاوی ذرات ساینده Al_2O_3 بصورت مکانیکی سنباده‌زنی سپس توسط فرز میناتور پولیش کاری شد. سپس نمونه‌ها با آب مقطر به دقت شسته شد. برای بررسی اثر مواد چربی‌زدا از دو محلول، با نام‌های اختصاری finish (با ترکیبات سدیم تری‌پلی‌فسفات، سدیم سیلیکات، سدیم کربنات، سدیم پرکربنات) و استون ($(CH_3)_2CO$)، جهت چربی‌زدایی سطح نمونه‌ها استفاده شد. پس از عملیات چربی‌زدایی نمونه‌ها برای عملیات اعمال پلیمر واسط بکار گرفته شدند. با انجام این عملیات سطح نمونه‌ها فعال شده و خصوصیات ترشوندگی سطوح و استحکام چسبندگی پلیمر واسط مورد ارزیابی قرار گرفتند.

برای آماده سازی سطح کامپوزیت پایه اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه، سطح مذبور طبق استاندارد ASTM- 97 - D 2093 با محلول استون شستشو داده شد.

در پژوهش حاضر برای بررسی بیشتر سطوح شکست از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی دانشگاه تبریز مارک MIRA 3 FEG-SEM ساخت کمپانی Tescan کشور چک استفاده گردید که این دستگاه دارای فیلمان انتشار میدانی^۱ بوده و در دو حالت خلا بالا و خلا پایین (مناسب برای نمونه‌های نارسانا) کار می‌کند. وضوح این دستگاه تا ۱ nm بوده و قدرت بزرگمایی آن تا ۱ میلیون برابر با اعمال ولتاژ ۳۰ kV می‌باشد. همچنین برای مشاهده توپوگرافی سطح نمونه‌ها از یک میکروسکوپ نیروی اتمی AFM مدل Nanosurf-Mobile S ساخت کشور سوئیس موجود در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه تبریز استفاده شد. برای سنجش استحکام نمونه‌های چسبندگی و بمنظور برآورد استحکام چسبندگی مکانیکی کامپوزیت پایه اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه بر سطح فولاد سازه، از یک دستگاه تست سنجش چسبندگی هیدرولیک با قابلیت ثبت و پردازش داده‌ها بصورت دیجیتال استفاده شد.

نتایج و بحث

برای انتخاب یک چسب جهت کاربردی مشخص چندین عامل بایستی در نظر گرفته شود. این عوامل عبارتند از: تعیین دامنه استحکام، نوع تنش وارده بر اتصال چسبی، محدوده درجه حرارت، نوع زیر لایه، ابعاد و شکل قطعاتی که بایستی به همدیگر متصل شوند و همچنین شرایط فرایند اتصال. فلذا شناسایی و انتخاب یک چسب با استحکام چسبندگی مناسب، هم در سطح فولاد و هم در سطح کامپوزیت پایه اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه (اختصاراً کامپوزیت) یک امر مهم در دستیابی به اتصالات کامپوزیت - فولاد سازه با استحکام بالا است. بدین منظور با استفاده از چسب با پایه متاکریلات (به علت چسبندگی مناسب همزمان آنها به سطوح آلی و غیرآلی) تست چسبندگی اتصالات کامپوزیت - فولاد سازه با سطح سنگ خورده و تمیزکاری شده توسط

¹ - Field Emission

استون، در حالت بارگذاری برشی (SLS¹) انجام شد. شرایط سطح فولاد و کامپوزیت برای این آزمون‌ها یکسان بوده و همچنین پخت چسب بمدت ۶۰ دقیقه در دمای محیط انتخاب شده است. بمنظور سنجش استحکام چسبندگی، نرخ کرنش (سرعت حرکت فک‌ها) در عدد ۰/۲ mm/min تنظیم و تثبیت شد. در شکل (۳) منحنی‌های آزمون استحکام چسبندگی نمونه‌های برشی برای چسب متاکریلات نشان داده شده‌اند. استحکام چسبندگی چسب پایه متاکریلاتی به سطوح کامپوزیت و فولاد برابر با ۱۱/۲۳ MPa (معادل ۳۶۵۰ نیوتن در ۳۲۵mm²) در حالت بارگذاری برشی تعیین گردید و جابجایی نمونه‌ها در آزمون‌های فوق برابر با ۱/۳۵ mm اندازه گیری شده است.

تئوری‌های چسبندگی بیان می‌کنند که اتصالات قوی بوسیله ایجاد دوقطبی‌هایی در سطح که نیروهای واندروالسی را افزایش می‌دهند، با برطرف شدن لایه‌های مرزی سست و افزایش زبری سطوح بدست خواهد آمد. لذا آماده‌سازی سطحی با زبری و تمیزی بهینه، عاری از انواع آلودگی‌ها هم در سطح فولاد و هم سطح کامپوزیت پایه اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه یک امر کلیدی در دستیابی به اتصالات پر استحکام کامپوزیت - فولاد سازه است. بدین منظور با استفاده از سه سمباده مش ۱۰۰، ۲۲۰، ۵۰۰ و پولیش، سطح فولاد پایه، آماده سازی شده و سپس توسط محلول‌های استون و Finish روی این سطوح عملیات تمیزکاری انجام گردیده و تست چسبندگی اتصالات کامپوزیت - فولاد سازه در حالت بارگذاری برشی (SLS) انجام شد. شرایط پخت چسب بمدت ۶۰ دقیقه در دمای محیط انتخاب شده و بمنظور سنجش استحکام چسبندگی، نرخ کرنش (سرعت حرکت فک‌ها) در عدد ۱/۳ mm/min تنظیم و تثبیت شد. منحنی‌های آزمون استحکام چسبندگی کامپوزیت به سطح فولاد حاصل از آماده سازی سطح توسط سمباده کاری با مش‌های متفاوت و پولیش و همچنین چربی زدایی توسط استون در شکل (۴-الف) و منحنی‌های مربوط به نمونه چربی‌زدایی شده با محلول Finish در شکل (۴-ب) نشان داده شده است.

با توجه به شکل (۴-الف) مشاهده می‌شود که استحکام نهایی چسبندگی چسب متاکریلات به سطوح کامپوزیت و فولاد به ترتیب برابر با ۹/۵۳ MPa (معادل ۳۱۰۰ نیوتن در ۳۲۵mm²)، ۱۰/۳۱ MPa (معادل ۳۳۵۲ نیوتن در ۳۲۵mm²)، ۱۰/۸۶ MPa (معادل ۳۵۳۰ نیوتن در ۳۲۵mm²) و ۱۱/۵۵ MPa (معادل ۳۷۵۵ نیوتن در ۳۲۵mm²) در سمباده‌های با مش ۱۰۰، ۲۲۰، ۵۰۰ و پولیش بوده و جابجایی معادل نمونه‌ها به ترتیب برابر ۱/۱ mm، ۱/۲۱ mm، ۱/۳۷ mm و ۱/۵ mm اندازه گیری شده است. نتایج حاصله بیان‌کننده این مطلب است که با افزایش مش سمباده تا حد پولیش استحکام نهایی چسبندگی و جابجایی معادل پلیمر واسط (چسب) به سطح کامپوزیت و فولاد افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به شکل (۴-ب) مشاهده می‌شود که استحکام نهایی چسبندگی چسب متاکریلات به سطوح کامپوزیت و فولاد در نمونه‌های چربی‌زدایی شده با محلول Finish به ترتیب برابر با ۱۰/۱۸ MPa (معادل ۳۳۱۰ نیوتن در ۳۲۵mm²)، ۱۱/۱۳ MPa (معادل ۳۶۱۸ نیوتن در ۳۲۵mm²)، ۱۱/۹۴ MPa

¹ - single lap shear

شانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح

(معادل ۳۸۸۰ نیوتن در 325 mm^2) و 12.63 MPa (معادل ۴۱۰۵ نیوتن در 325 mm^2) در سمباده‌های با مش ۱۰۰، ۲۲۰، ۵۰۰ و پولیش بوده و جابجایی نمونه‌ها به ترتیب برابر $1/25 \text{ mm}$ ، $1/4 \text{ mm}$ ، $1/57 \text{ mm}$ و $1/72 \text{ mm}$ اندازه گیری شده است. نتایج حاصله بیان کننده این مطلب است که با بالا رفتن عدد مش سمباده و در نتیجه ایجاد سطحی نرم‌تر، استحکام چسبندگی افزایش می‌یابد.

از مقایسه نمودارهای شکل (۴-الف) و (۴-ب) مشاهده می‌شود نمونه‌هایی که با محلول Finish چربی‌زدایی شده‌اند در تمامی شرایط نسبت به نمونه‌های چربی‌زدایی شده با استون از استحکام چسبندگی بالاتری برخوردارند. دلیل افزایش مقدار جابجایی پلیمر واسط با افزایش استحکام چسبندگی به علت انعطاف پذیر بودن چسب متاکریلات است به بیان دیگر نظر به اینکه چسب یک ماده پلیمری است هر مقدار که استحکام چسبندگی یا عبارتی درگیری چسب با سطح افزایش می‌یابد مقدار استحکام نهایی افزایش یافته و متعاقباً به علت انعطاف‌پذیری بودن پلیمر واسط جابجایی معادل نیز بیشتر می‌شود.

تصاویر AFM^۱ از سطح فولاد سمباده زده شده در مش‌های ۱۰۰، ۲۲۰، ۵۰۰ و پولیش پس از چربی‌زدایی سطح فولاد توسط استون و عملیات التراسونیک در شکل (۵) نشان داده شده است.

اشکال (۵-الف-د) نشان دهنده توپوگرافی سطح نمونه‌های آزمون چسبندگی هستند. با مقایسه تصاویر فوق مشاهده می‌شود که با بالا رفتن عدد مش سمباده مورد استفاده، سطحی با زبری همگن و پستی و بلندی‌های منظم بدست می‌آید که مناسب برای درگیری مکانیکی و فعال برای اتصال است. همانطوری که در تصاویر مشاهده می‌شود با افزایش عدد مش سمباده مورد استفاده یک توپوگرافی با توزیع همگن‌تری حاصل می‌شود که در واقع این امر موجب ایجاد مکان‌های مرجح بسیاری شده و در نتیجه پلیمر واسط اعمال شده بر روی سطح در مکان‌های بیشتری با سطح اتصال برقرار می‌کند و به تبع آن موجب افزایش استحکام چسبندگی می‌شود که در نمودارهای شکل (۴-الف) و (۴-ب) مشاهده گردید.

نمودارهای شکل (۶) نشان دهنده پروفیل زبری سطوح مورد مطالعه در شکل (۵) هستند. اعداد مربوط به زبری متوسط سطوح در جدول (۲) آورده شده است.

با توجه به جدول (۲) کاهش زبری متوسط سطح تا $2/97 \text{ nm}$ در سطح پولیش شده علاوه بر ایجاد سطحی یکنواخت منجر به فعال شدن مکانیزم‌های دیگر درگیر در چسبندگی می‌شود که این مکانیزم‌ها در واقع از اندرکنش اتم‌های سطحی ناشی می‌شوند و عبارتی وقتی دو سطح در تماس تا حد زیادی بهم نزدیک می‌شوند نیروهای واندوالس و نیروهای دوقطبی حاصل از اتم‌های دو سطح می‌توانند برهم اثرگذار باشند در نتیجه در این حالت افزایش استحکام چسبندگی مشاهده شده در واقع تلفیقی از مکانیزم قفل شدن مکانیکی و نیروهای اتمی است. نتایج مشاهده شده در توافق با مطالعات بیسجوف و همکارانش می‌باشد [۸].

تصاویر میکروسکوپی سطح کامپوزیت پس از گسیختگی از روی فولاد، مربوط به آماده‌سازی سطح توسط سمباده با مش‌های ۱۰۰، ۲۲۰ و پولیش پس از چربی زدایی سطح فولاد توسط استون در شکل (۷) نشان داده شده است.

با توجه به شکل (۷ الف) مشاهده می‌شود که نوع شکست غالب ایجاد شده در فصل مشترک کامپوزیت- فولاد از نوع چسبندگی است. شیارهای مشاهده شده بر روی سطح چسب که مربوط به شیارهای ناشی از سطح سمباده زده شده فولاد است، نیز نشانگر این مطلب است. از مقایسه تصاویر (۷ الف تا ج) و نتایج نمودارهای شکل (۴- الف) و تصاویر توپوگرافی می‌توان دلیل افزایش استحکام چسبندگی با کاهش زبری سطح را بوضوح مشاهده نمود. همانگونه که در شکل (۷ الف) مشاهده می‌شود شکست ایجاد شده در فصل مشترک کاملاً بصورت صاف و از نوع چسبندگی است در حالی که در تصویر (۷ ج)، نوع شکست هم چسبندگی و هم از نوع پیوستگی است بدلیل اینکه پلیمر واسط از مکان‌های درگیری بیشتری برخوردار بوده است (تصاویر توپوگرافی شکل ۵)، زبری‌های موجود در سطح شکست گواه این مطلب هستند. به بیان دیگر در عین حالی که شکست چسبندگی در فصل مشترک ایجاد می‌شده، مکان‌هایی وجود داشته‌اند که در آنها استحکام چسبندگی بدلیل تأثیر توام مکانیزم‌های چسبندگی بالاتر بوده و در نتیجه یک جابجایی کششی در پلیمر واسط ایجاد شده است.

تصاویر میکروسکوپی سطح کامپوزیت پس از گسیختگی از روی فولاد، مربوط به آماده‌سازی سطح توسط سمباده با مش‌های ۱۰۰، ۲۲۰ و پولیش پس از چربی زدایی سطح فولاد توسط محلول Finish در شکل (۸) نشان داده شده است.

با توجه به تصویر شکل (۸ الف) مشاهده می‌شود که نوع شکست ایجاد شده در فصل مشترک کامپوزیت- فولاد از نوع چسبندگی است. شیارهای مشاهده شده بر روی سطح چسب که مربوط به شیارهای ناشی از سطح سمباده زده شده فولاد بوده نیز تصدیق کننده این مطلب است. از مقایسه تصاویر (۸ الف تا ج) و نمودارهای شکل (۴- ب) و تصاویر توپوگرافی می‌توان دلیل افزایش استحکام چسبندگی را با کاهش زبری سطح، مشاهده نمود. همانطوری که در تصویر (۸ ج)، مشاهده می‌شود نوع شکست در این مقطع هم چسبندگی و هم از نوع پیوستگی است بدلیل اینکه پلیمر واسط از مکان‌های درگیری بیشتری برخوردار بوده (تصاویر توپوگرافی شکل ۵)، زبری‌های موجود در سطح شکست گواه این مطلب هستند. به بیان دیگر در عین حالی که شکست چسبندگی در فصل مشترک ایجاد می‌شده، مکان‌هایی وجود داشته‌اند که در آنها استحکام چسبندگی بدلیل تأثیر توام مکانیزم‌های چسبندگی بالاتر بوده و در نتیجه یک جابجایی کششی در پلیمر واسط ایجاد شده است.

از مقایسه نمودار شکل (۴- الف و ب)، همچنین تصاویر (۷ و ۸ ج) مشاهده می‌گردد که استحکام چسبندگی نمونه‌هایی که توسط محلول Finish آماده سازی شده‌اند نسبت به نمونه‌های آماده سازی شده توسط استون بیشتر است که دلیل این امر قدرت تمیزکنندگی قوی‌تر ترکیبات بازی نسبت به استون است، محلول Finish ترکیبی است از بازهای مختلف که بیشتر در بخش مواد و روش‌ها بیان شده است. از آنجائیکه که محلول‌های

بازی از قدرت انحلال چربی بالاتری برخوردارند در نتیجه نسبت به استون سطحی تمیزتر و همچنین لایه‌های مرزی ضعیف کمتری ایجاد می‌کنند که باعث افزایش قدرت چسبندگی پلیمر واسط به سطح فلز پایه می‌شود.

نتیجه‌گیری

(۱) نتایج حاصله بیان‌کننده این مطلب است که با افزایش مش سمباده تا حد پولیش استحکام نهایی چسبندگی پلیمر واسط (چسب) به سطح کامپوزیت و فولاد افزایش می‌یابد. بعبارت دیگر با بالا رفتن عدد مش سمباده استحکام چسبندگی از ۱۰,۸۸ به ۱۲,۶۳ Mpa می‌رسد.

(۲) نتایج حاصله بیان‌کننده این مطلب است که با افزایش مش سمباده تا حد پولیش جابجایی معادل پلیمر واسط (چسب) به سطح کامپوزیت و فولاد افزایش می‌یابد. بعبارت دیگر با بالا رفتن عدد مش سمباده جابجایی معادل از ۱,۲۵ به ۱,۷۲ mm می‌رسد.

(۳) نمونه‌هایی که با محلول Finish چربی‌زدایی شده‌اند در تمامی شرایط نسبت به نمونه‌های چربی‌زدایی شده با استون از استحکام چسبندگی بالاتری برخوردارند. که دلیل این امر قدرت تمیزکنندگی قوی‌تر ترکیبات بازی نسبت به استون است. از آنجائیکه که محلول‌های بازی از قدرت انحلال چربی بالاتری برخوردارند در نتیجه نسبت به استون سطحی تمیزتر و همچنین لایه‌های مرزی ضعیف کمتری ایجاد می‌کنند که باعث افزایش قدرت چسبندگی پلیمر واسط به سطح فلز پایه می‌شود.

(۴) با مقایسه تصاویر توپوگرافی مشاهده می‌شود که با بالا رفتن عدد مش سمباده مورد استفاده، سطحی با زبری همگن و پستی و بلندی‌های منظم بدست می‌آید که مناسب برای درگیری مکانیکی و فعال برای اتصال است.

(۵) کاهش زبری متوسط سطح تا ۲/۹۷ nm در سطح پولیش شده علاوه بر ایجاد سطحی یکنواخت منجر به فعال شدن مکانیزم‌های دیگر درگیر در چسبندگی می‌شود که این مکانیزم‌ها در واقع از اندرکنش اتم‌های سطحی ناشی می‌شوند و بعبارتی وقتی دو سطح در تماس تا حد زیادی بهم نزدیک می‌شوند نیروهای واندوالس و نیروهای دوقطبی حاصل از اتم‌های دو سطح می‌توانند برهم اثرگذار باشند در نتیجه در این حالت افزایش استحکام چسبندگی مشاهده شده در واقع تلفیقی از مکانیزم قفل شدن مکانیکی و نیروهای اتمی است.

مراجع

1. M. Mohitpour, H. Golshan, A. Murray. Pipeline design and construction: a practical approach. 2nd ed. New York, ASME Press; 2003. p. 499-518.
2. C. Alexander, O. Ozden Ochoa. Extending onshore pipeline repair to offshore steel risers with carbon-fiber reinforced composites. Stress engineering services, Inc., Houston, TX, United States; 2010.
3. J. M. Duell, J. M. Wilson, M. R. Kessler. Analysis of a carbon composite overwrap pipeline repair system. Department of Mechanical Engineering, University of Tulsa, Tulsa, USA; 2008.

4. G. H. Koch, M. P. Brongers, N. G. Thompson, Y. P. Virmani, J. H. Payer. Corrosion cost a Preventative strategy in the United States. Federal Highway Administration Office of Infrastructure Research and Development; 2001. p. 260–311.
5. Rosen, S.L., Fundamental principles of polymeric materials. 1982: Wiley.
6. Mark, H.F. and J.I. Kroschwitz, Encyclopedia of polymer science and engineering. 1989: Wiley.
7. Balden, A., Review: adhesively bonded joints and repairs in metallic alloy, polymers and composite materials: adhesives, adhesion theories and surface pretreatment. J Mater Sci, 2004. 39: p. 1.
8. Bischof, C., et al., The effect of pretreatment of the metal surface on the bonding strength of a composite of strip steel, primer and PVC. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1985. 5(2): p. 97-102.
9. Tutunchi, A., et al., Adhesive strength of steel–epoxy composite joints bonded with structural acrylic adhesives filled with silica nanoparticles. Journal of Adhesion Science and Technology, 2015. 29(3): p. 195-206.
۱۰. دکتر روح ا... باقری، اعظم خوش منش، "چسب‌ها؛ آشنایی و کاربرد"، جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، چاپ اول ۱۳۷۵.
11. Tutunchi, A., et al., Effect of Al₂O₃ Nanoparticles on the Steel-Glass/Epoxy Composite Joint Bonded by a Two-Component Structural Acrylic Adhesive. Soft Materials, 2015. 10.1080/1539445X.2014.1003269.
12. Tutunchi, A., Steel-Epoxy Composite Joints Bonded with Nano-TiO₂ Reinforced Structural Acrylic Adhesive. The Journal of Adhesion, 2015. 10.1080/00218464.2014.961187.
13. Ariaee, S., et al., Modeling and optimization of mechanical behavior of bonded composite–steel single lap joints by response surface methodology. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2014. 54: p. 30-39.

جدول ۱: اندرکنش‌های مولکولی که ممکن است در فرایند چسبندگی مشارکت داشته باشند [۸].

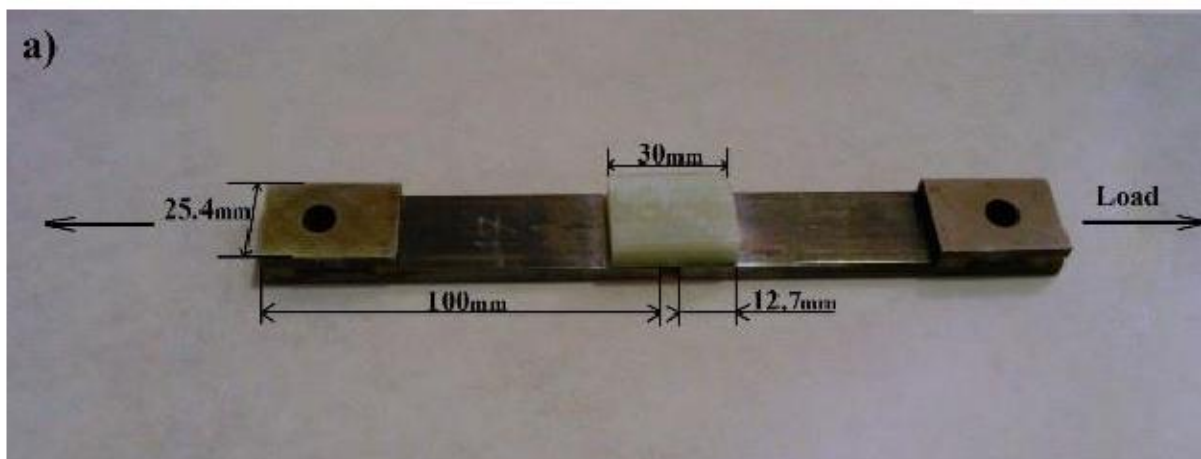
	Auxiliary valence bonding forces			H-bridge linkages	Principal valence bonding forces	
	Permanent dipoles	Induced dipoles	Dispersion forces		Covalent	Ionic
Distance (nm)	← 0.3-0.5 →			0.3-0.5	← 0.1-0.2 →	
Linkage energy (kJ mol ⁻¹)	≤ 20 (Keesom energy)	≤ 2 (Debye energy)	0.1-40 (London energy)	≤ 50	60-700	600-1000
Theoretical adhesion force (MPa)	200-1750	35-300	60-360	500	17 500	5000
Experimental bonding strength (MPa)	← 15-25 →					

جدول ۲: زبری متوسط سطح نمونه‌های مورد بررسی.

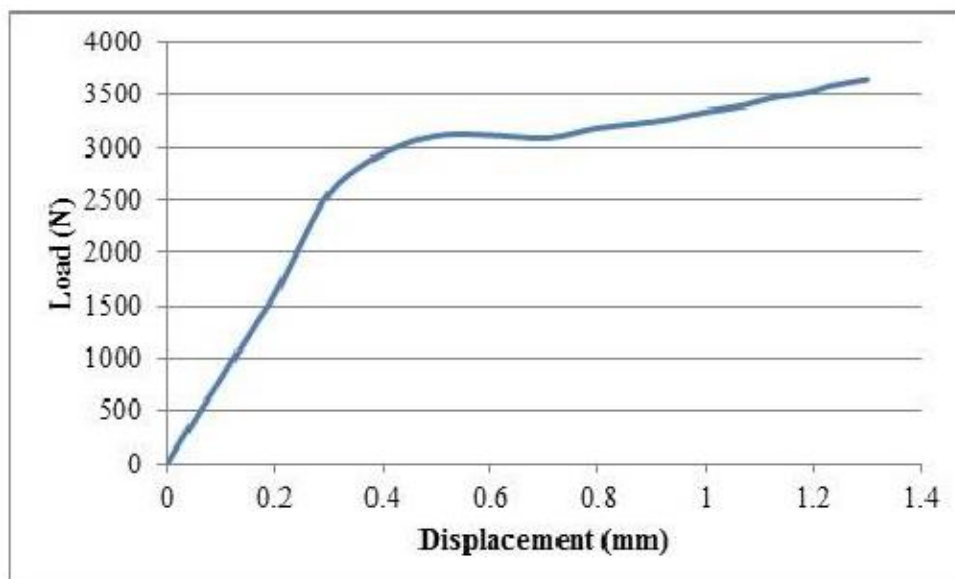
پولیش	۵۰۰	۲۲۰	۱۰۰	مش
۲/۹۷	۱۰/۷۹۳	۴۰/۶۹۶	۹۰/۷۷۷	Ra (nm)



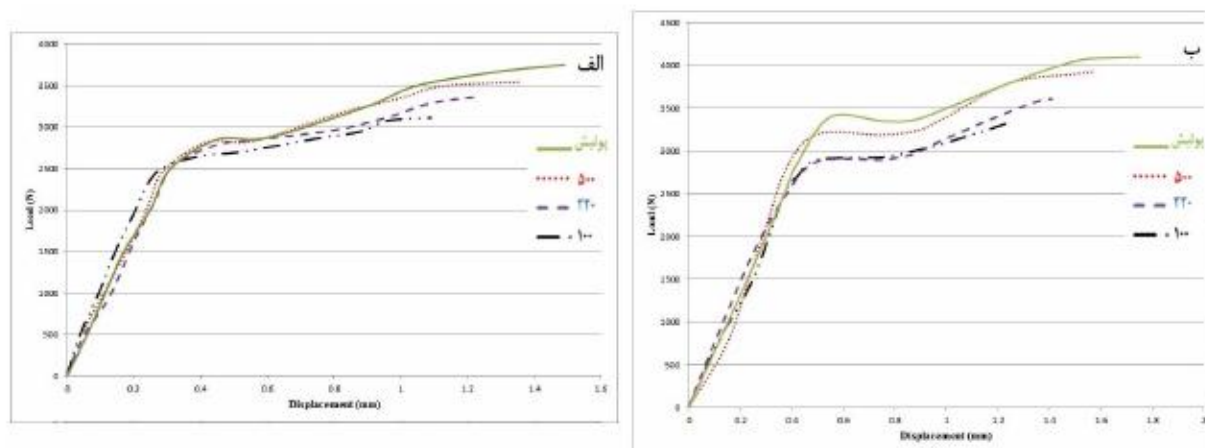
شکل ۱: نحوه لایه گذاری کامپوزیت پایه اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه.



شکل ۲: تصویر نمونه‌ی مورد استفاده در آزمون برش، مطابق با استانداردهای ASTM



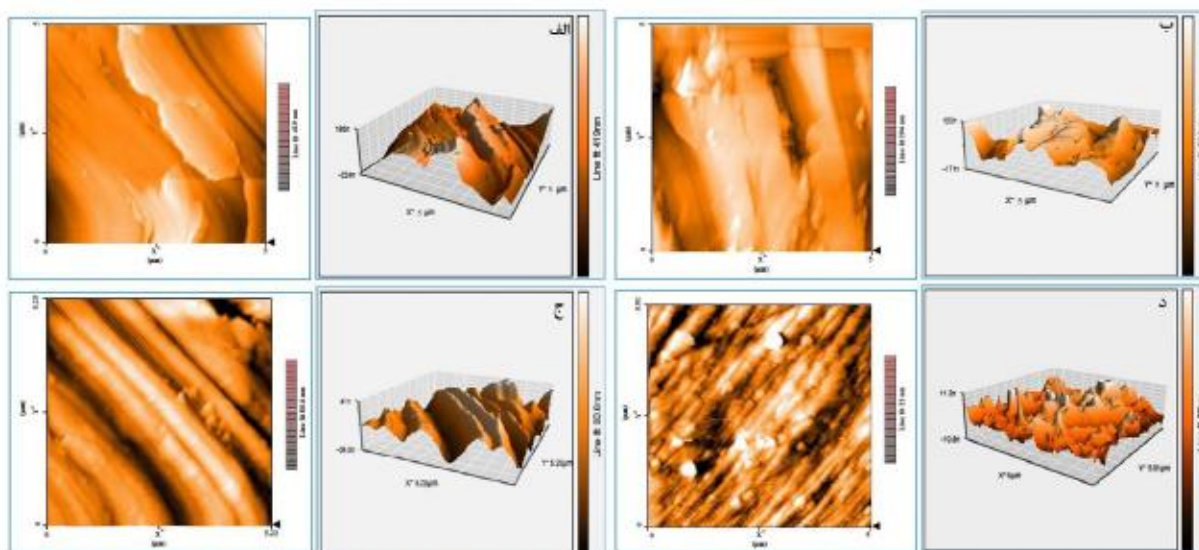
شکل ۳: نمودار نیرو-جابجایی نمونه برشی چسب متاکریلات.



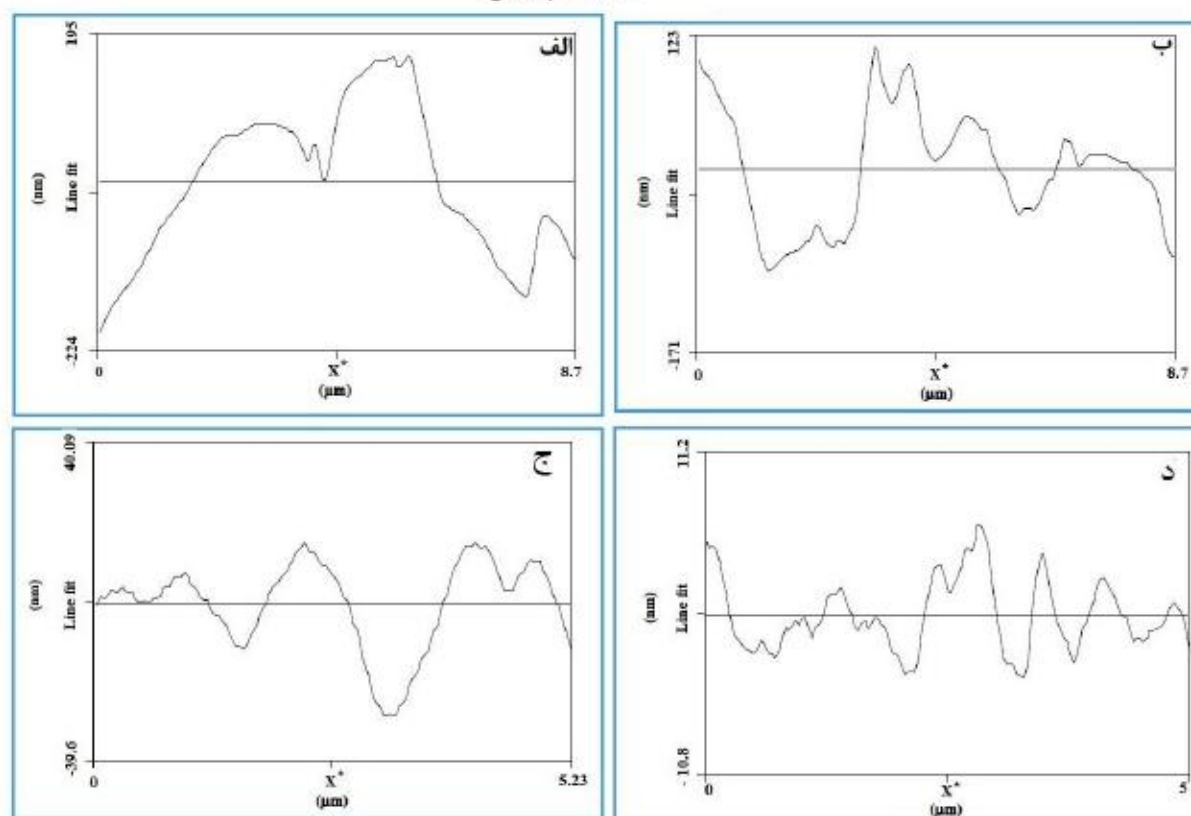
شکل ۴: منحنی‌های آزمون برش نمونه‌های آماده سازی شده با محلول (الف) استون و (ب) Finish در سمباده‌های

۱۰۰، ۲۲۰، ۵۰۰ و پولیش.

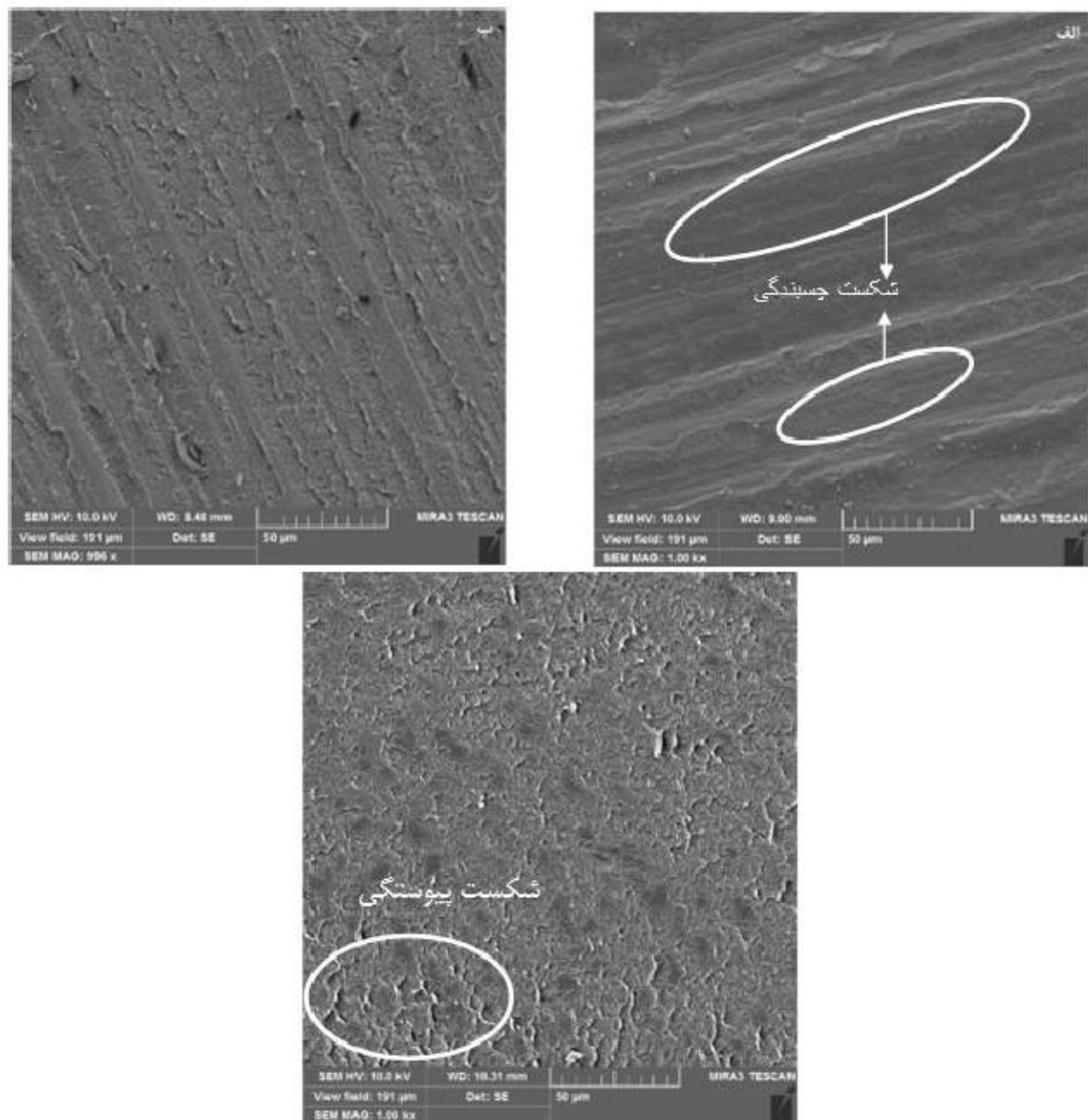
شانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح



شکل ۵: تصاویر AFM از سطوح آماده سازی شده (الف) سمباده مش ۱۰۰، (ب) سمباده مش ۲۲۰، (ج) سمباده مش ۵۰۰ و (د) پولیش.

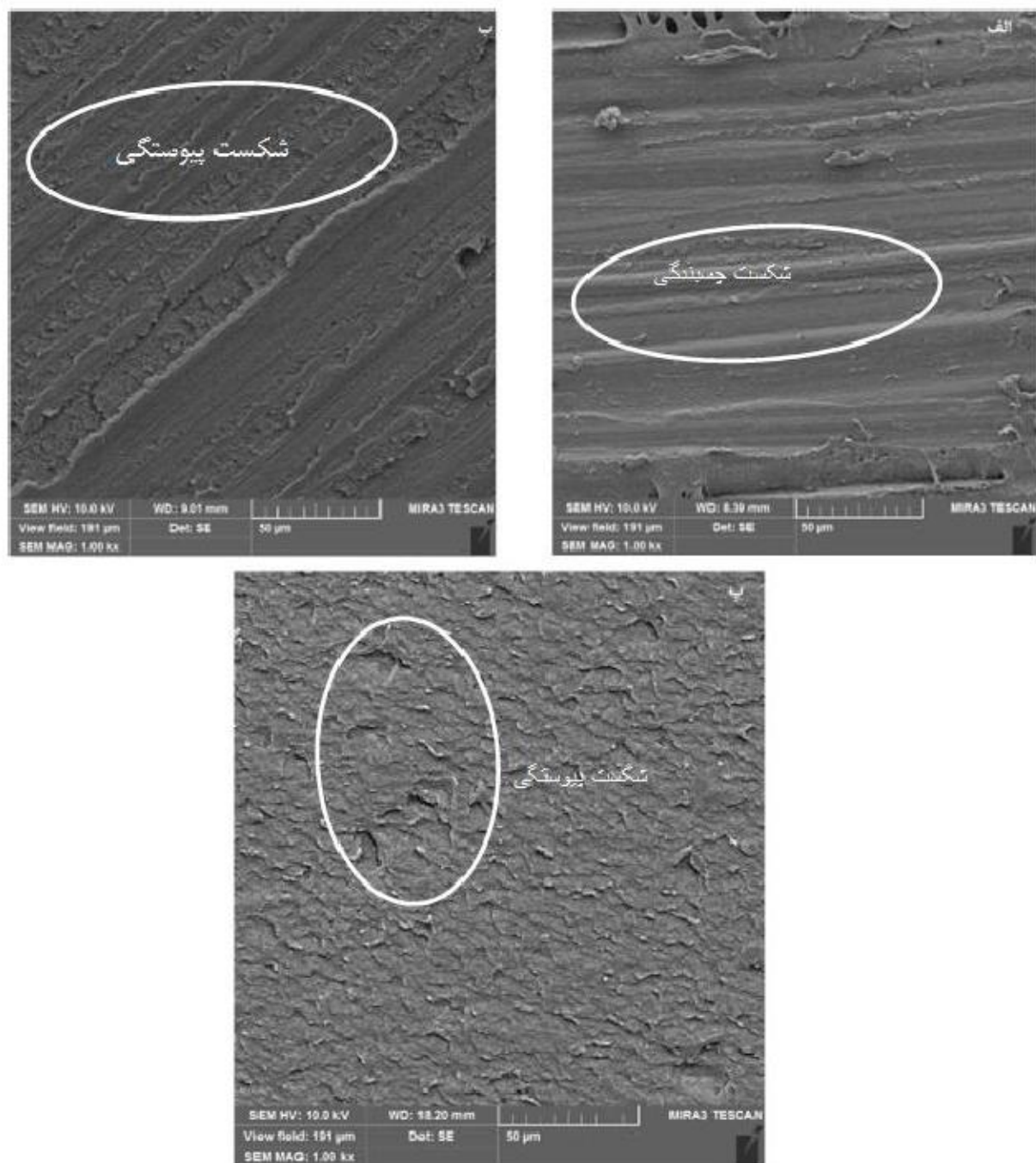


شکل ۶: پروفیل زبری سطوح آماده سازی شده (الف) سمباده مش ۱۰۰، (ب) سمباده مش ۲۲۰، (ج) سمباده مش ۵۰۰ و (د) پولیش.



شکل ۷: تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطوح آماده سازی شده با استون (الف) سمباده مش ۱۰۰، (ب) سمباده مش ۲۲۰ و (ج) پولیش.

شانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح



شکل ۸: تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطوح آماده سازی شده با محلول Finish (الف) سمباده مش ۱۰۰، (ب) سمباده مش ۲۲۰ و (ج) پولیش.