



Numerical and Experimental Investigation on Bonding Strength Optimization of Glass Fibers-Reinforced Epoxy Composites on a Structural Steel Substrate

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Osouli-Bostanabad K.¹ MSc,
Tutunchi A.^{*2} PhD,
Eskandarzade M.³ PhD,
Kianvash A.² PhD

How to cite this article

Osouli-Bostanabad K, Tutunchi A, Eskandarzade M, Kianvash A. Numerical and Experimental Investigation on Bonding Strength Optimization of Glass Fibers-Reinforced Epoxy Composites on a Structural Steel Substrate. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(2):387-396.

ABSTRACT

Incidence of breaks and leakages in fluid transportation pipes is a common issue in Iran. Depending on the type of pipes and environmental conditions, the breaks in the pipes may be caused by different factors, including mechanical damages, internal or external corrosions, failures, or applied stresses. In the repair of damaged pipes, there are several strategies for rebuilding and implementing the pipeline, most of which are replacing the entire exhausted pipe, using weld clamps and using composite patches. In recent years, the use of composite patches has been accepted as a low-cost, permanent, and standard method for different pipe sections with the least interruption in transportation. In the present study, the bonding strength of glass fibers-reinforced epoxy composite patches on a structural steel substrate were investigated and optimal conditions of achieving enhanced adhesion strength of composite patches on the steel substrate were determined, using the Taguchi method at various curing temperatures and times. In this regard, the tensile and shear strength of epoxy, cyanoacrylate, and methacrylate-based glues as three kinds of appropriate polymers for bonding the epoxy composite on the steel substrates were tested. The mechanical strength measurements and fractured interfaces evaluations using a scanning electron microscopy (SEM) revealed that the methacrylate-based glue has the better adhesion strength to the steel substrate.

Keywords Repair of damaged water pipelines; Fiber-reinforced epoxy composite patches; Optimization of adhesion; Methacrylate-based glues; Mechanical strength

¹Research Center for Pharmaceutical Nanotechnology, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran
²Materials Engineering Department, Mechanical Engineering Faculty, University of Tabriz, Tabriz, Iran
³Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

*Correspondence

Address: Materials Engineering Department, Mechanical Engineering Faculty, University of Tabriz, Tabriz, Iran. Postal code: 5166614766
Phone: +98 (41) 33392498
Fax: +98 (41) 33392490
ab.tutunchi51@tabrizu.ac.ir

Article History

Received: April 15, 2018
Accepted: November 3, 2018
ePublished: February 01, 2019

CITATION LINKS

[1] Pipeline design and construction: A practical approach [2] Rehabilitation of corroded steel pipelines with epoxy repair systems [3] The selection and performance of adhesives for a steel-glass connection [4] Prediction of crack initiation and propagation of adhesive lap joints using an energy failure criterion [5] Stress modeling of pipelines strengthened with advanced composite materials [6] Extending onshore pipeline repair to offshore steel risers with carbon-fiber reinforced composites [7] Analysis of a carbon composite overwrap pipeline repair system [8] Corrosion cost a preventative strategy in the United States [9] Materials Science of Pressure-Sensitive Adhesives [10] Fundamental principles of polymeric materials [11] Encyclopedia of polymer science and engineering [12] Adhesively bonded joints and repairs in metallic alloy, polymers and composite materials: Adhesives, adhesion theories and surface pretreatment [13] Physical chemistry of surfaces [14] Principles of colloid and surface chemistry [15] Surface preparation techniques for adhesive bonding [16] Steel-epoxy composite joints bonded with nano-TiO₂ reinforced structural acrylic adhesive [17] SEffect of Al₂O₃ nanoparticles on the steel-glass/epoxy composite joint bonded by a two-component structural acrylic adhesive [18] The influence of pre-bond surface treatment over the reliability of steel epoxy/glass composites bonded joints [19] Effect of silicon carbide nanoparticles on the adhesion strength of steel-epoxy composite joints bonded with acrylic adhesives [20] Adhesive failure and deformation behaviour of polymers [21] Apparent interfacial failure in mixed-mode adhesive fracture

بهینه‌سازی عددی- تجربی استحکام اتصالات کامپوزیت پایه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف شیشه- فولاد سازه

کریم اصولی بستان‌آباد MSc

مرکز ریزفناوری دارویی، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران

ابوالفضل توتونچی* PhD

گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

مهدی اسکندرزاده PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

عباس کیانوش PhD

گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

بروز خرابی و نشستی در لوله‌های انتقال سیال در ایران امری گریزناپذیر است. خرابی منجر به نشستی در خطوط انتقال، بسته به شرایط طراحی و عملیاتی دلایل متفاوتی می‌تواند داشته باشد. از جمله این دلایل می‌توان به آسیب‌های مکانیکی، خوردگی داخلی یا خارجی، خستگی و فشار داخلی بیش‌ازحد مجاز اشاره کرد. در بحث تعمیرات خطوط آسیب‌دیده استراتژی‌های مختلفی برای بازسازی و راه‌اندازی مجدد خط وجود دارد که اهم آنها جایگزینی کل لوله فرسوده، استفاده از کلمپ‌های جوشی و استفاده از وصله‌های کامپوزیتی هستند. در سال‌های اخیر استفاده از وصله‌های کامپوزیتی به‌عنوان روشی کم‌هزینه، دایمی و استاندارد روی جنس‌های مختلف لوله و با کمترین وقفه در کار انتقال مورد پذیرش قرار گرفته است. در پژوهش حاضر با رویکرد بازسازی خطوط فولادی انتقال آب، وصله‌های کامپوزیتی پایه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف شیشه به کار گرفته شدند. بهینه‌سازی استحکام چسبندگی وصله‌های کامپوزیتی بر سطح فولاد با بهره‌گیری از روش تاگوجی و آزمون‌های سنجش استحکام چسبندگی کامپوزیت بر سطح فولاد در دو حالت بارگذاری کششی/برشی با سه نوع چسب سیانواکریلات، متاکریلات و اپوکسی در شرایط دمایی و زمانی مختلف پخت چسب صورت پذیرفت. نتایج مطالعات آزمون‌های مکانیکی و تصاویر سطوح شکست حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بیانگر عملکرد بهتر چسب پایه متاکریلاتی با استحکام چسبندگی مناسب بود. **کلیدواژه‌ها:** بازسازی لوله‌های انتقال سیال، وصله‌های کامپوزیتی پایه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف شیشه، بهینه‌سازی چسبندگی، چسب متیل‌متاکریلات، استحکام مکانیکی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۱/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۱۲

*نویسنده مسئول: ab.tutunchi51@tabrizu.ac.ir

۱- مقدمه

بروز ترکیب‌دگی و نشستی در لوله‌های انتقال سیال در ایران امری رایج است. ترکیب‌دگی در لوله‌ها بسته به جنس لوله و شرایط محیطی ممکن است ناشی از یک شکست ترد یا جوانه‌زنی ترک‌ها و رشد بعدی آنها بوده یا به علت خوردگی و تنش‌های اعمالی و همچنین صدمات مکانیکی باشد. آسیب‌پذیری این مواضع با اعمال بارهای دینامیکی خارجی از قبیل بارهای اعمال‌شده توسط ماشین‌های حفاری، عبور و مرور وسایل نقلیه سنگین و غیره شدت می‌یابد. پس از شناسایی مواضع نشست، چندین روش برای بازسازی و راه‌اندازی مجدد خط وجود دارد که اهم آنها جایگزینی کل لوله فرسوده با یک لوله سالم مشابه، در صورت امکان جوشکاری لوله و وصله‌زدن قسمت معیوب و همچنین پیچیدن نوارهای کامپوزیت دور قسمت آسیب‌دیده لوله هستند.

بین گزینه‌های ارائه‌شده، تنها روش کم‌هزینه، معتبر و قابل اعمال روی لوله‌های با جنس‌های مختلف و با کمترین وقفه در کار انتقال، استفاده از نوارهای کامپوزیت است [1]. این روش عدم پیشروی ترک، خوردگی و تداوم کار بلندمدت قسمت آسیب‌دیده را

تا حد زیادی تضمین می‌کند. برای این منظور پژوهش‌های مختلفی صورت گرفته که از آن جمله در سال ۲۰۰۷ طی مطالعه‌ای امکان‌سنجی اعمال بازسازی به روش وصله‌گذاری روی مقاطع لوله‌های خورد شده با هندسه‌های مختلف عیوب بررسی شده است و اندازه بحرانی ترک ناشی از خوردگی قابل تعمیر توسط این روش، با فرض یک شکل بیضوی در موضع خوردگی پیشنهاد شد. این مطالعه نشان داد که امکان تعمیر مقاطع معیوب توسط وصله‌گذاری وجود دارد [2]. مطالعات دیگری به تحلیل رفتار مکانیکی وصله پلیمری در اتصال و تعمیر خطوط لوله پرداخته [3, 4] و همچنین کامپوزیت‌های پایه پلیمری تقویت‌شده با الیاف آرامید، کربن و شیشه به‌منظور تعمیر عیوب خطوط انتقال سیال مورد بررسی واقع شده‌اند که نتایج بیانگر عملکرد بهتر کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن و شیشه در تعمیر لوله‌های انتقال سیال است [5].

تجربه‌های صنعتی در اروپا و ایالات متحده نشان داده است که استفاده از کامپوزیت‌ها، ۲۴٪ نسبت به نوارهای فلزی و ۷۳٪ نسبت به روش جایگزینی لوله‌ها ارزان‌تر تمام می‌شود [6]. استفاده از کامپوزیت‌ها علاوه بر جنبه اقتصادی دارای مزایای دیگری نیز است که از آن جمله می‌توان به عدم نیاز به نقل و انتقال تجهیزات نصب سنگین، عدم نیاز به استفاده از دماهای بالای مورد نیاز در جوشکاری، کوتاه‌بودن مدت‌زمان اجرای فرآیند، جلوگیری از خوردگی‌های بعدی در محل تعمیرات و پایین‌تر بودن میزان آلودگی محیط زیست نسبت به روش‌های مرسوم دیگر اشاره کرد [7, 8].

در یک سیستم ساده، پیوند در فصل مشترک از چسبندگی بین چسب و سطحی که چسب روی آن اعمال شده است (زیرلایه)، ناشی می‌شود. چسبندگی به حالتی اطلاق می‌شود که برای جدا کردن دو سطح با ترکیب شیمیایی یا شکل متفاوت، مقدار قابل توجهی کار مکانیکی لازم باشد [9]. چسبندگی را می‌توان به پنج مکانیزم (پیوند یا جذب فیزیکی، پیوند شیمیایی، تئوری نفوذ، تئوری لایه مرزی ضعیف، پیوند مکانیکی یا تئوری درگیری مکانیکی) مربوط دانست که می‌توانند در فصل مشترک هم‌به‌صورت مجزا و هم با تشکیل پیوند اتفاق بیفتند. چسبندگی از پیوند مکانیکی بین چسب و زیرلایه و نیروهای شیمیایی شامل پیوندهای کووالانسی اولیه یا نیروهای قطبی ثانویه بین دو جزء ناشی می‌شود [10-12]. با اتصال خوب بین چسب و زیرلایه، شکست در اتصال از نوع پیوستگی اتفاق می‌افتد (زنجیره پلیمری خود چسب یا زیرلایه می‌شکند) و در صورتی که این اتصال به‌خوبی صورت نگیرد، شکست از نوع چسبندگی اتفاق خواهد افتاد (دو سطح در محل اتصال بدون آسیب به زنجیره پلیمری یا زیرلایه از هم جدا می‌شوند) [10]. وقتی چسب ضعیف‌تر از زیرلایه است، استحکام و خواص اتصال بین دو سطح توسط خواص چسب پلیمری تعیین می‌شود، به طوری که اتصال نمی‌تواند قوی‌تر از خط چسب باشد. در نتیجه پلیمرهای شکننده، اتصالات شکننده، پلیمرهای با قدرت برشی بالا، پیوندهایی با قدرت برشی بالا و پلیمرهای با مقاومت گرمایی بالا پیوندهای مقاوم در برابر گرما تولید می‌کنند. برای تشکیل اتصال موفق، بایستی چسب و زیرلایه در تماس کامل با یکدیگر باشند که لازمه‌اش این است که چسب سطح را ترکند [13, 14]. برای تضمین ترکندگی مناسب و پیوند بین سطحی، موارد زیر ضروری است [13]:

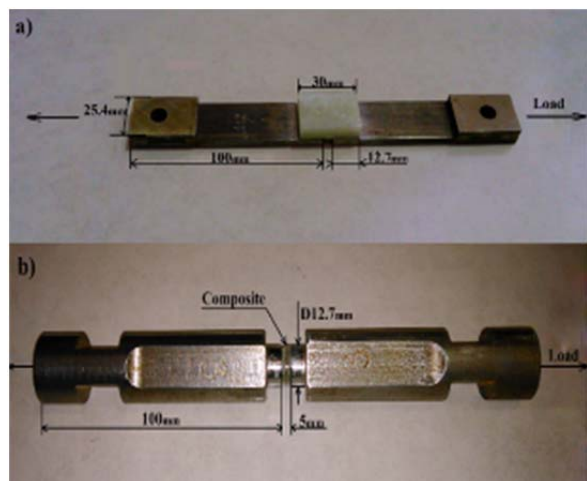
الف- در حالت کلی ضروری است که سطح پیش‌عملیات شود و سطوح اتصالی قبل از اتصال به‌دقت تمیز شوند.

شیشه نوع S، این الیاف به‌عنوان فاز تقویت‌کننده مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور ساخت کامپوزیت، از روش لایه‌گذاری دستی الیاف شیشه در قالب باز از جنس پلی‌اتیلن (PE) استفاده شد. در این روش ابتدا هاردنر و رزین به نسبت وزنی ۱ به ۳ توزین و سپس الیاف شیشه تک‌جهته نیز به نسبت وزنی ۱ به ۳ نسبت به زمینه پلیمری توزین شد. پس از اختلاط همگن رزین و هاردنر، الیاف تقویت‌کننده به‌دقت توسط مخلوط رزین و هاردنر خیس شد و در قالب روباز قرار گرفت. کامپوزیت لایه‌گذاری شده بعد از پخت رزین در دمای ۲۳°C از قالب خارج و به داخل کوره خشک‌کن با دمای ۸۰°C برای تکمیل فرآیند پخت منتقل شد.

برای اتصال کامپوزیت پایه اپوکسی به سطح فولادی سه سیستم چسبی شامل چسب متاکریلات ۳۲۹۵ از چسب‌های متاکریلاتی هولتایت سری ۳۰۰۰ ماکروپلکس به‌دلیل خواص مکانیکی مطلوب و زمان گیرش (سفت‌شدن) پایین، چسب سیانوآکریلات ۴۵۴ و چسب اپوکسی ۳۴۳۰ از محصولات شرکت لوکتایت به‌علت استحکام بالا به‌عنوان پلیمر واسط انتخاب شدند و مورد مقایسه قرار گرفتند.

۲-۲- تجهیزات و روش آزمون

نمونه‌های تست استحکام چسبندگی برشی تحت عنوان SLS طبق استاندارد ASTM-D 1002-10 با نرخ اعمال بار ۱/۳ mm/min و نمونه‌های تست استحکام چسبندگی کششی طبق استاندارد ASTM-D 2095-96 با نرخ اعمال بار ۱ mm/min به‌منظور برآورد استحکام چسبندگی کامپوزیت پایه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف شیشه روی سطح فولاد استفاده شد. پروفیل‌های فولادی استفاده‌شده از جنس فولاد کربنی ساده سازه‌ای (St-37) بود. هندسه و ابعاد نمونه‌های تهیه‌شده مطابق با استانداردهای ذکرشده در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱) تصاویر نمونه‌های مورد استفاده در آزمون‌های برش و کشش مطابق با استانداردهای ASTM: (a) آزمون برش، (b) آزمون کشش

برای رسوب‌زدایی سطح فولاد قبل از اعمال پلیمر واسط (چسب)، سطح نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM D2651-90 و با استفاده از سنباده‌های کاربرد سیلیسیومی تا مش ۱۰۰۰ و خمیر حاوی ذرات ساینده آلومینا به‌صورت مکانیکی، سنباده‌زنی و سپس توسط فرز میناتور پولیش‌کاری شد. سپس نمونه‌ها با آب مقطر به‌دقت شسته و سطح نمونه‌ها توسط استون، چربی‌زدایی شد. پس از عملیات چربی‌زدایی نمونه‌ها برای عملیات اعمال پلیمر واسط به کار گرفته شدند. با انجام این عملیات سطح نمونه‌ها فعال شد و

ب- یک اتصال خوب، نیازمند چسبی با یک ویسکوزیته مناسب است تا چسب اجازه پخش شدن روی پستی و بلندی‌های سطحی و نیز داخل شکاف‌ها را داشته باشد. به‌محض برقراری اتصال، چسب باید سفت شود تا قدرت چسبندگی لازم ایجاد شود [15].

خواص فیزیکی و مکانیکی موادی که قرار است به یکدیگر چسبانده شوند و چگونگی آماده‌سازی سطوح آنها از عوامل مهم در انتخاب چسب، قبل از چسباندن سطوح به یکدیگر هستند. اگر چه چندین چسب با خواص مکانیکی مختلف می‌توانند به یک سطح بچسبند، ولی دامنه انتخاب مواد اتصال‌یابنده به‌علت ضرورت بررسی موارد ذکرشده زیاد نیست.

در این پژوهش به‌منظور ارایه روشی نوین در تعمیر خطوط انتقال سیال، برای اولین بار به‌جای استفاده از وصله‌گذاری به روش نواریچپی حول لوله‌های آسیب‌دیده، از وصله‌گذاری موضعی متناسب با طول عیب بهره گرفته شد که برای این کار پس از ساخت وصله‌های کامپوزیت سه نوع پلیمر اپوکسی، متاکریلاتی و سیانوآکریلاتی به‌عنوان چسب برای چسباندن وصله کامپوزیت به زیرلایه فولادی مورد استفاده قرار گرفتند. مطابق با مطالعات انجام شده، بررسی رفتار پلیمرهای بکاررفته در پژوهش حاضر در شرایط اتصالات چسبی به‌منظور تعمیر لوله‌های انتقال سیال آسیب‌دیده، قبلاً توسط محققین دیگر انجام نشده و مقایسه‌ای بین رفتار چسبندگی این پلیمرها و اتصالات چسبی حاصل از آنها گزارش نگردیده است. در این پژوهش بهبود چسبندگی سطوح فولاد و کامپوزیت در پیشبرد موفقیت‌آمیز کار حاضر و در نهایت ارایه بهترین روش به‌منظور بازسازی خطوط لوله انتقال آب نقش کلیدی دارد. هدف از پژوهش حاضر بالابردن استحکام اتصالات فولاد-کامپوزیت اپوکسی تقویت‌شده با الیاف شیشه است. اصلی‌ترین ضعف اتصالات کامپوزیت‌های پایه پلیمری- فولاد از استحکام ضعیف فصل مشترک کامپوزیت با فولاد نشات می‌گیرد، لذا ایجاد یک تطابق متناسب بین دو جزء اتصال در بهبود استحکام، اصلی‌ترین نقش را ایفا می‌کند که برای این منظور در پژوهش حاضر، با توجه به استحکام مکانیکی و ویسکوزیته مطلوب پلیمر پایه اپوکسی، این پلیمر برای ساخت کامپوزیت (وصله) استفاده شد. از الیاف شیشه تک‌جهته به‌عنوان تقویت‌کننده کامپوزیت استفاده شد. تاثیر دما و زمان پخت پلیمر واسط (چسب) توسط طراحی آزمایش با استفاده از روش تاگوچی مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

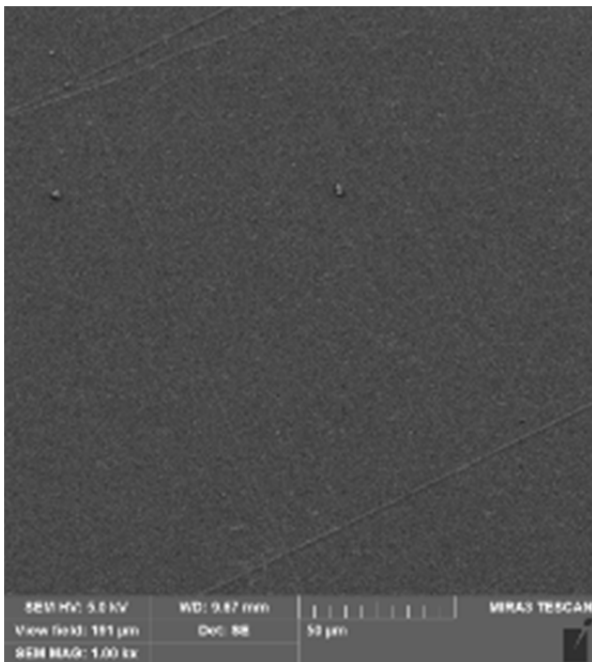
۲-۱- انتخاب مواد و شناسایی پلیمرهای کاربردی

در انتخاب مواد و شناسایی رزین و تقویت‌کننده در کامپوزیت طراحی‌شده برای بازسازی، با توجه به کثرت مواد پلیمری مورد بحث و خواص متفاوت آنها، رزین پایه اپوکسی به‌عنوان زمینه پلیمری در فرآیند طراحی و ساخت وصله‌های کامپوزیتی انتخاب شد و مورد استفاده قرار گرفت. علت انتخاب این رزین به‌دلیل ویژگی‌های مطلوب مکانیکی آن مانند ضریب سخت‌پایی بالا، چسبندگی سطحی عالی و زمان مناسب اتمام چرخه‌های پخت آن است. بدین منظور از رزین اپوکسی (۲۰۱۵) و هاردنر آمینی (۲۰۱۳) از سری محصولات اپولام (شرکت اکسون؛ فرانسه) استفاده شد. در مورد فاز تقویت‌کننده نیز با در نظر گرفتن اثر مطلوب ناهمسان‌گردی خواص مکانیکی از فاز تقویت‌کننده 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

غیرآلی) تست چسبندگی اتصالات کامپوزیت- فولاد سازه با سطح سمباده خورده و تمیزکاری شده توسط استون، در دو حالت بارگذاری کششی و برشی انجام شد. شرایط سطح فولاد و کامپوزیت برای هر سه نوع چسب در این آزمون یکسان بوده و همچنین پخت چسب به مدت ۶۰ دقیقه در دمای محیط انتخاب شده است. در نمودار ۱، منحنی‌های آزمون استحکام چسبندگی نمونه‌های کششی و برشی برای چسب سیانوآکریلات نشان داده شده است.

استحکام چسبندگی چسب سیانوآکریلات به سطوح کامپوزیت و فولاد به ترتیب برابر با $7/6 \text{MPa}$ (معادل 962 نیوتن در $126/61 \text{mm}^2$) در حالت بارگذاری کششی و $6/8 \text{MPa}$ (معادل 2210 نیوتن در 325mm^2) در حالت بارگذاری برشی اندازه‌گیری شدند و جابه‌جایی نمونه‌ها در این آزمون‌ها به ترتیب برابر با $0/06 \text{mm}$ و $0/35 \text{mm}$ به دست آمد.

برای بررسی نوع شکست از تصویر میکروسکوپ الکترونی سطوح شکست نمونه‌ها استفاده شد. تصویر میکروسکوپی سطح کامپوزیت پس از گسیختگی از سطح فولاد در شکل ۲ نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، سطح شکست کاملاً صاف و یکنواخت بدون هیچگونه ترک یا شکستگی در سطح چسب بوده که این بیانگر شکست از نوع شکست چسبندگی بوده و در مقطع اتصال کامپوزیت به سطح فولاد به وقوع پیوسته است. شیارهای مشاهده شده روی سطح چسب که مربوط به شیارهای ناشی از سطح سمباده خورده فولاد بوده، نیز تصدیق‌کننده این مطلب است [12-15].



شکل ۲) تصویر میکروسکوپ الکترونی از مقطع شکست کامپوزیت- فولاد با چسب سیانوآکریلات

نمودار ۲ نشان‌دهنده منحنی‌های آزمون استحکام چسبندگی نمونه‌های کششی و برشی چسب با پایه متاکریلات است. استحکام چسبندگی چسب پایه متاکریلاتی به سطوح کامپوزیت و فولاد به ترتیب 14MPa (معادل 1780 نیوتن در $126/61 \text{mm}^2$) در حالت بارگذاری کششی و $11/23 \text{MPa}$ (معادل 3650 نیوتن در 325mm^2) در حالت بارگذاری برشی تعیین شد و جابه‌جایی نمونه‌ها در آزمون‌های فوق به ترتیب برابر با $0/12 \text{mm}$ و $1/35 \text{mm}$

خصوصیات ترشوندگی سطوح و استحکام چسبندگی پلیمر واسط مورد ارزیابی قرار گرفت. برای آماده‌سازی سطح کامپوزیت پایه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف شیشه، سطح مذبور طبق استاندارد ASTM-D 2093-97 با محلول استون شست‌و شو داده شد.

برای بررسی بیشتر سطوح شکست از میکروسکوپ الکترونی روبشی مارک MIRA3 FEG-SEM (شرکت تی‌اسکن؛ چک) استفاده شد. به منظور انجام آزمون‌های گرماسنجی تفاضلی (DTA) و توزین حرارتی یا تجزیه گرماورزی (TGA) از یک دستگاه DTG مدل 60AH Netzach استفاده شد. بازه دمایی از 20°C تا 250°C بود که با نرخ 20°C درجه بر دقیقه افزوده و وزن نمونه 5 میلی‌گرم انتخاب شد. نرخ کاهش دما نیز با همان نرخ مذکور بود و برای به دست آوردن دمای انتقال شیشه‌ای از شیب نمودار موقع کاهش دما استفاده شد. در مرحله اول (بازه افزایش دما) حذف حافظه حرارتی، متصاعد شدن مونومرهای احتمالی باقیمانده و انجام کلیه مراحل پخت صورت می‌گیرد. برای بررسی اثر مولفه‌های پخت پلیمر از یک کوره خشک‌کن سالویس مدل TSW-120E مجهز به ترمومتر دیجیتال آلتون (کشور آلمان) استفاده شد.

پارامترهای موثر در هر کدام از مراحل پژوهش با جست‌وجوی منابع مرتبط استخراج و با استفاده از طراحی یک سری از آزمایش‌های آماری به روش تاگوچی از آزمون‌های مورد نیاز شبیه‌سازی به عمل آمد. سپس در هر مرحله با استفاده از تغییرات داده‌های تاگوچی، مقادیر بهینه هر متغیر تعیین شد. با توجه به دامنه مطلوب تغییرات منتج از آزمون‌های حرارتی، متغیرهای ورودی کران‌بندی شدند. در ادامه در هر گام با بهره‌گیری از طراحی آزمایش متناسب با الگوی تغییر پارامتر، مدل تغییرات رفتاری متغیر خروجی طبق متغیرهای ورودی، ارایه و با استفاده از نمودار تاگوچی مربوطه، شرایط بهینه هر کدام از پارامترها تعیین شد. برای بررسی تاثیر پارامترهای پخت پلیمر بر چسبندگی سطحی، شست‌و شو و فعال‌سازی فیزیکی سطح نمونه‌های فولادی و قطعات کامپوزیت، انجام و سپس پلیمر واسط پس از اختلاط همگن رزین و هاردنر به هر دو سطح کامپوزیت و فولادی نمونه‌های سنجش استحکام چسبندگی اعمال و به خشک‌کن منتقل شدند. پس از قرارگیری نمونه‌ها در خشک‌کن (در دماها و مدت‌زمان‌های معین طبق طرح آزمایش)، آزمون استحکام چسبندگی روی نمونه‌ها صورت پذیرفت. طبق طرح آزمایش، تاثیر مستقل و ترکیبی زمان و دمای پخت پلیمر روی استحکام چسبندگی و مقدار جابه‌جایی متناظر برای نمونه‌ها بررسی و بهینه‌سازی شد.

۳- نتایج

۳-۱- آزمون چسب‌ها

برای انتخاب یک چسب برای کاربردی مشخص بایستی چندین عامل در نظر گرفته شود. این عوامل عبارت از تعیین دامنه استحکام، نوع تنش وارده بر اتصال چسبی، محدوده درجه حرارت، نوع زیرلایه، ابعاد و شکل قطعاتی که بایستی به همدیگر متصل شوند و همچنین شرایط فرآیند اتصال هستند. لذا شناسایی و انتخاب یک چسب با استحکام چسبندگی مناسب، هم در سطح فولاد و هم در سطح کامپوزیت پایه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف شیشه (اختصاراً کامپوزیت) یک امر مهم در دستیابی به اتصالات کامپوزیت- فولاد سازه با استحکام بالا است. بدین منظور با استفاده از سه نوع چسب با پایه‌های سیانوآکریلات، متاکریلات و اپوکسی (به‌علت چسبندگی مناسب هم‌زمان آنها به سطوح آلی و

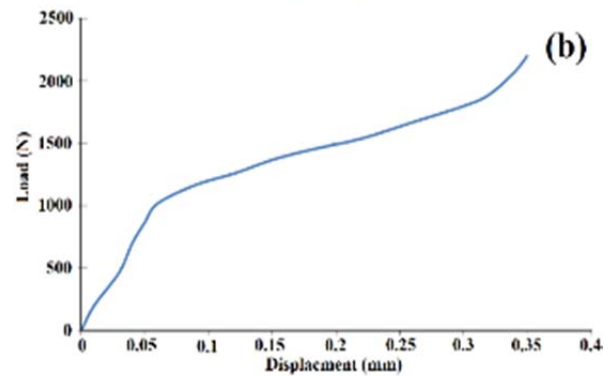
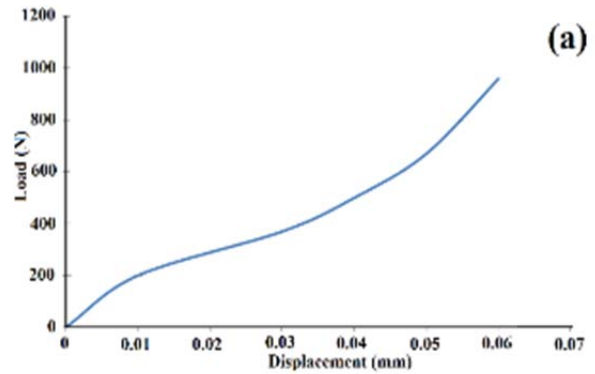
شده است. با توجه به شکل ۳ مشاهده می شود که نوع شکست در این اتصال از نوع پیوستگی در چسب متاکریلات و همچنین شکست از نوع چسبندگی در فصل مشترک چسب- فولاد است [16]. [19]. شکست غالب از نوع چسبندگی است، اما سطح شکست ایجاد شده در این اتصال در مقایسه با سطح شکست حاصل در اتصال چسب سیانواکریلات (شکل ۲) با این که روی یک نوع سطح فولادی اعمال شده اند، دارای سطح زبرتری بوده که این امر بیان کننده چسبندگی بهتر این چسب به سطح فولاد بوده و شکست در تنش بالاتری به وقوع پیوسته است. شکست از نوع پیوستگی بیانگر این مطلب بوده که استحکام چسبندگی متاکریلات به سطح کامپوزیت و فولاد نسبت به استحکام ذاتی آن بیشتر است [16-19].



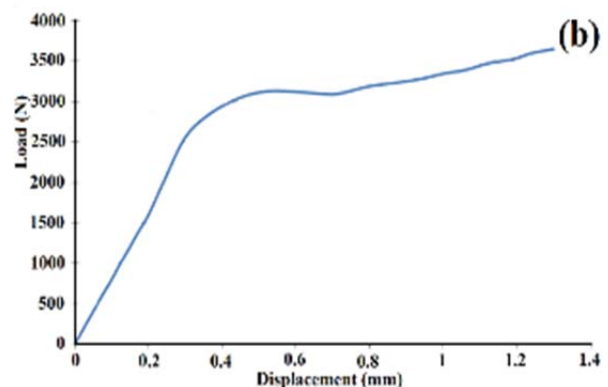
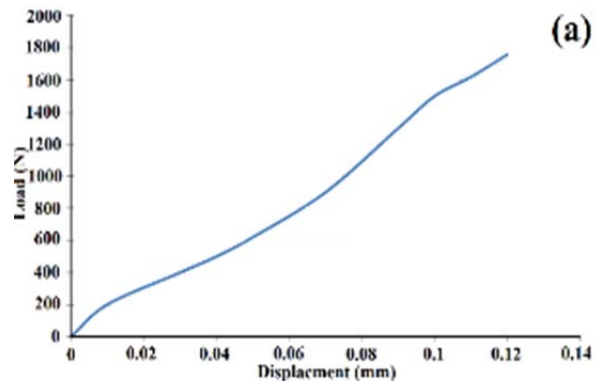
شکل ۳) تصویر میکروسکوپ الکترونی از مقطع شکست کامپوزیت- فولاد با چسب متاکریلات (مناطق نشان داده شده: نواحی شکست پیوستگی)

با مقایسه نمودارهای ۱ و ۲ مشاهده می شود که شکست ایجاد شده در چسب متاکریلات نسبت به چسب سیانواکریلات در تنش های بالاتری اتفاق افتاده است. یعنی چسب متاکریلات نسبت به چسب سیانواکریلات از استحکام پیوستگی و چسبندگی بالاتری برخوردار است. منحنی های آزمون استحکام چسبندگی کامپوزیت به سطح فولاد با استفاده از چسب پایه اپوکسی در نمودار ۳ نمایش داده شده است. استحکام چسبندگی چسب اپوکسی به سطوح کامپوزیت و فولاد به ترتیب برابر با $11/69 \text{ MPa}$ (معادل 1480 نیوتن در $126/61 \text{ mm}^2$) در حالت بارگذاری کششی و 10 MPa (معادل 3250 نیوتن در 325 mm^2) در حالت بارگذاری برشی و جابه جایی نمونه ها به ترتیب برابر با $0/8 \text{ mm}$ و $0/8 \text{ mm}$ اندازه گیری شده است. تصویر میکروسکوپی سطح کامپوزیت پس از گسیختگی از روی فولاد در شکل ۴ نشان داده شده است.

شکل ۵ نشان دهنده تصویر ماکروسکوپی از دو سطح شکست نمونه های تست برش است. از مشاهده شکل ۵، مناطق مختلف شکست اتصال چسبی در سطح مقطع فولاد و کامپوزیت به وضوح مشخص است. مناطق مختلف مربوط به شکست پیوستگی و چسبندگی در این تصویر مشخص شده اند. برای هر کدام از نمونه ها پس آزمون سطوح مختلف نشان داده شده در شکل ۵ برای تهیه



نمودار ۱) نمودار نیرو- جابه جایی نمونه کششی و نمونه برشی چسب سیانواکریلات: (a) نمونه کششی، (b) نمونه برشی



نمودار ۱) نمودار نیرو- جابه جایی نمونه کششی و نمونه برشی چسب متاکریلات: (a) نمونه کششی، (b) نمونه برشی

برای بررسی نوع شکست از تصاویر میکروسکوپ الکترونی سطح شکست نمونه ها استفاده شده که تصویر میکروسکوپی سطح کامپوزیت پس از گسیختگی از روی فولاد در شکل ۳ نشان داده



شکل ۵) تصاویر ماکروسکوپی از مقطع شکست کامپوزیت- فولاد

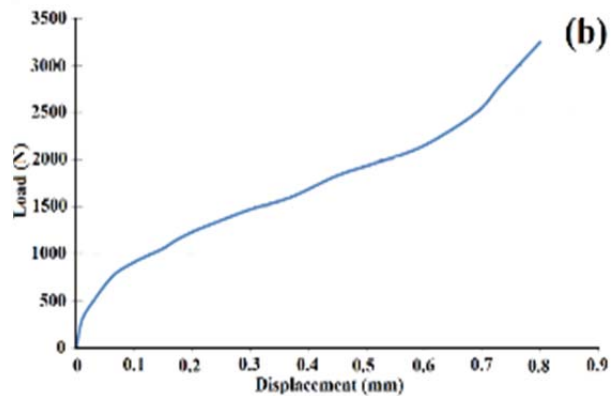
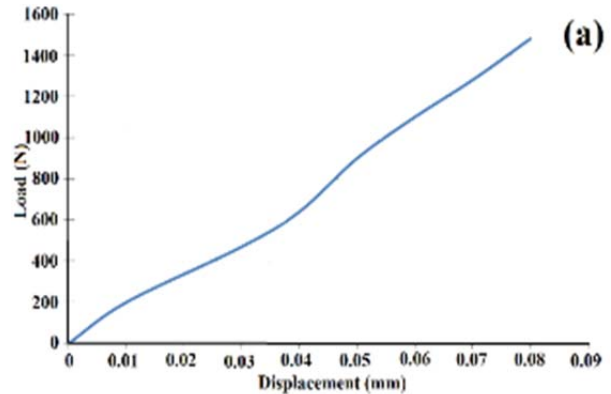
همچنین از مقایسه نمودارهای ۲ و ۳ مشاهده می‌شود که میزان استحکام چسب اپوکسی نیز در مقایسه با چسب متاکریلات پایین‌تر است و در نتیجه چسب اپوکسی از نظر استحکام پیوستگی و چسبندگی نسبت به چسب متاکریلات ضعیف‌تر ارزیابی می‌شود. از مقایسه سه نوع چسب مورد استفاده مشاهده می‌شود که چسب‌های با پایه متاکریلات دارای استحکام چسبندگی بالایی است و در هر دو حالت بارگذاری، چسب پایه متاکریلاتی جابه‌جایی بیشتری نسبت به هر دو چسب دیگر دارد، لذا چسب متاکریلاتی دارای انعطاف‌پذیری بیشتر در شرایط بارگذاری است. همچنین به دلیل این که سرعت واکنش (پخت) چسب دوجزبی متاکریلاتی مابین چسب اپوکسی (دیرپخت) و چسب سیانوآکریلاتی (زودپخت) قرار دارد، این چسب به‌عنوان پلیمر واسط میان سطح کامپوزیت و فولاد در این پژوهش انتخاب شد.

۳-۲- بررسی تأثیر فرآیندهای پخت پلیمر واسط بر استحکام چسبندگی

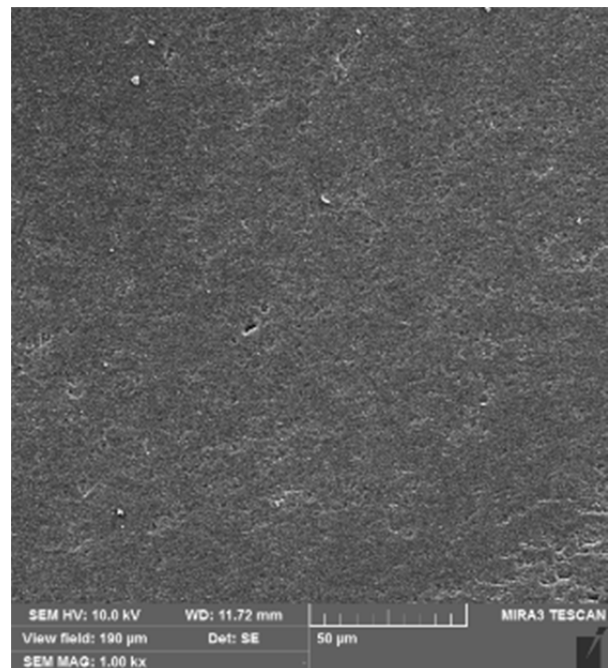
برای بررسی اثر پخت پلیمر واسط بر میزان چسبندگی کامپوزیت به سطح فولاد، از طراحی آزمایش‌های تجربی اولیه، زمان و دمای پخت پلیمر واسط متاکریلاتی به‌عنوان متغیرهای ورودی سیستم انتخاب شدند. به‌منظور کران‌بندی مناسب زمان و دمای پخت، آزمون‌های آنالیز حرارتی از پلیمر واسط به عمل آمد. تغییرات استحکام نهایی چسبندگی و میزان جابه‌جایی نمونه‌ها در نقطه شکست به‌عنوان توابع هدف انتخاب شده‌اند. مقادیر بهینه متغیرهای پخت پلیمر برای دستیابی به حداکثر استحکام چسبندگی به‌همراه جابه‌جایی (کرنش) معقول، تعیین و در نهایت تغییرات رفتار استحکام نمونه‌ها با بهره‌گیری از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی تجزیه و تحلیل شد.

نمودار ۴ نشان‌دهنده نتایج مربوط به آزمون‌های آنالیز حرارتی است که برای بررسی نحوه پخت پلیمر و انتخاب کران تغییرات زمان و دمای پخت پلیمر از آنها استفاده شد. با توجه به نتایج آنالیز حرارتی DTA (نمودار ۴- الف)، تا قبل از 400°C تغییرات قابل توجهی در نمودار قابل مشاهده نیست و پلیمر پایداری خود را حفظ کرده است. وجود پیک تغییرات شدید در محدوده دمایی 400°C حاکی از این امر بوده که کرپوریزه‌شدن پلیمر در این محدوده دمایی اتفاق افتاده است. با توجه به نتایج آزمون TGA (نمودار ۴- ب) شیب کاهش وزن از دمای 120°C به‌علت شروع تبخیر حلال‌های

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با توجه به شکل ۴ مشاهده می‌شود که نوع شکست غالب این اتصال از نوع چسبندگی در چسب اپوکسی و در فصل مشترک چسب- فولاد است. از مقایسه این شکل با شکل ۳ مشاهده می‌شود که میزان سطح شکست از نوع پیوستگی در این مقطع کمتر از اتصال چسب متاکریلاتی است.



نمودار ۳) نمودار نیرو- جابه‌جایی نمونه کششی و نمونه برشی چسب اپوکسی (a) نمونه کششی، (b) نمونه برشی



شکل ۴) تصویر میکروسکوپ الکترونی از مقطع شکست کامپوزیت- فولاد با چسب اپوکسی

می‌نمایند. تحلیل مانده‌ای و بررسی کفایت مدل نیز از تکنیک‌های مهم تحلیل هستند. تحلیل‌های آماری مربوط به روش تاگوچی را می‌توان به وسیله نرم‌افزارهای تحلیل آماری مختلف انجام داد. در این مطالعه از نرم‌افزار Design-Expert 9.0.3 استفاده شده است. برای دو آنالیز انجام شده مقادیر P-Value کمتر از ۰/۰۵ بوده که مطلوب است. یعنی می‌توان استنباط نمود که دما و زمان تأثیرات معنی‌داری را روی متغیرهای پاسخ استحکام نهایی و جابه‌جایی معادل دارند.

جدول ۱) عوامل موثر بر میزان استحکام و جابه‌جایی معادل و همچنین مقادیر بالا و پایین پارامترهای موثر پخت پلیمر واسط

فاکتور	نام	واحد	نوع (گروه)	زیرگروه	حداقل	حداکثر
A	دما	سانتی‌گراد	Categoric	عددی	۲۰	۱۱۰
B	زمان	دقیقه	Categoric	عددی	۲۰	۲۲۰

جدول ۲) کران‌بندی متغیرهای ورودی پخت پلیمر واسط و سطوح استفاده شده

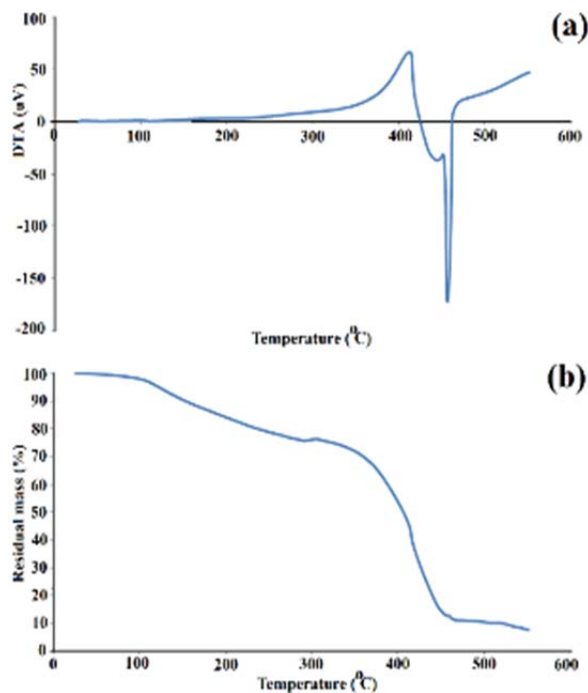
کران‌بندی	زمان (دقیقه)	دما (سانتی‌گراد)
Level 1	۲۰	۲۰
Level 2	۶۵	۴۵
Level 3	۱۱۰	۶۰
Level 4	۱۵۵	۸۵
Level 5	۲۰۰	۱۱۰

جدول ۳) ماتریس طراحی آزمایش پارامترها و سطوح استفاده شده موثر در پخت پلیمر واسط و پاسخ‌های بار و جابه‌جایی معادل در آزمون برش

فاکتور ۱	فاکتور ۲	پاسخ ۱	پاسخ ۲	Run	Std
دما (°C)	زمان (min)	بار (Kg)	جابه‌جایی معادل (mm)		
۴۵	۲۰	۷۴۸	۱/۳۸	۱	۱۰
۶۰	۲۰	۴۷۰	۱/۶۰	۲	۱۱
۴۵	۲۰	۴۰۵	۱/۷۵	۳	۶
۱۱۰	۲۰	۵۷۲	۱/۲۶	۴	۲۱
۶۰	۱۱۰	۶۶۸	۱/۳۹	۵	۱۳
۱۱۰	۲۰۰	۷۵۱	۰/۴۷	۶	۲۵
۲۰	۱۱۰	۴۸۰	۱/۶۶	۷	۳
۴۵	۶۵	۵۳۲	۱/۶۳	۸	۷
۲۰	۶۵	۴۱۰	۱/۷۵	۹	۲
۶۰	۶۵	۵۸۱	۱/۵۱	۱۰	۱۲
۲۰	۲۰۰	۵۸۴	۱/۵۸	۱۱	۵
۱۱۰	۱۵۵	۷۶۸	۰/۶۳	۱۲	۲۴
۶۰	۱۵۵	۷۳۰	۱/۲۰	۱۳	۱۴
۸۵	۱۵۵	۷۵۱	۰/۹۲	۱۴	۱۹
۱۱۰	۱۱۰	۷۴۲	۰/۸۵	۱۵	۲۳
۸۵	۲۰۰	۷۸۴	۰/۸۰	۱۶	۲۰
۸۵	۱۱۰	۶۸۰	۱/۰۳	۱۷	۱۸
۴۵	۱۱۰	۶۲۱	۱/۵۳	۱۸	۸
۲۰	۱۵۵	۵۴۳	۱/۶۰	۱۹	۴
۱۱۰	۶۵	۶۷۷	۱/۰۳	۲۰	۲۲
۲۰	۲۰	۳۴۰	۱/۸۵	۲۱	۱
۶۰	۲۰۰	۷۷۰	۱/۰۵	۲۲	۱۵
۸۵	۶۵	۶۱۴	۱/۲۰	۲۳	۱۷
۸۵	۲۰	۵۰۳	۱/۴۳	۲۴	۱۶
۴۵	۱۵۵	۶۹۵	۱/۴۵	۲۵	۹

در تجزیه و تحلیل واریانس فرض می‌شود که مشاهدات دارای توزیع نرمال مستقل با واریانس یکسان برای هر سطح عامل مورد مطالعه هستند. این مفروضات با بررسی باقیمانده‌ها مورد ارزیابی

افزوده شده به سیستم (که به منظور کنترل ویسکوزیته و ترکندگی به آن افزوده می‌شوند) افزایش می‌یابد. افت شدید در کاهش وزن در محدوده ۴۰۰°C نیز مربوط به کربوریزه شدن چسب پلیمری است. با توجه به نتایج آزمون‌های آنالیز حرارتی پلیمر در این فرآیند، حد پایین و بالای پارامترهای مورد مطالعه مطابق با جدول ۱ انتخاب شده و به علت حساسیت بالای موجود در لایه‌های میانی، تعداد ۵ سطح برای هر پارامتر در نظر گرفته شد.



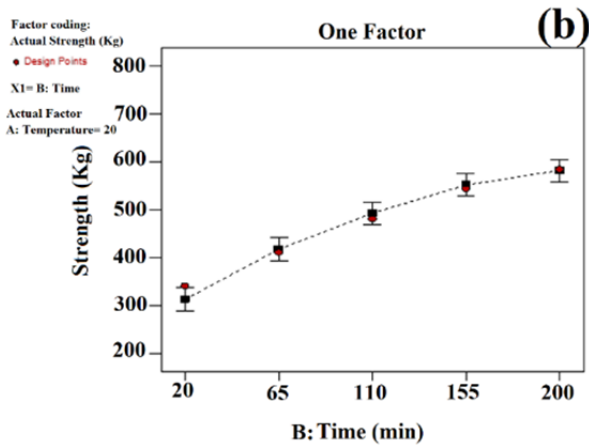
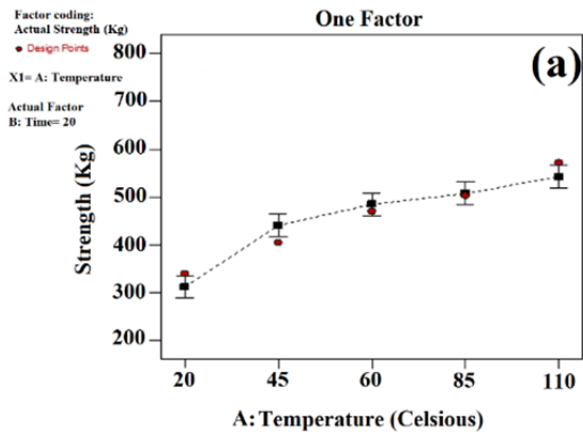
نمودار ۴) نتایج آزمون آنالیز حرارتی چسب متاکریلات آزمون DTA و آزمون TGA (a) آزمون DTA، (b) آزمون TGA

جدول ۲ کران‌بندی متغیرهای ورودی پخت پلیمر واسط و سطوح استفاده شده را نشان می‌دهد. با توجه به این که در این آزمایش دو عامل ۵ سطحی استفاده شده، طرح عاملی کامل این آزمایش ۵^۲ بوده که نیاز به ۲۵ آزمایش دارد. در صورت استفاده از روش تاگوچی با توجه به تعداد پارامترها و تعداد سطوح آنها این روش در این مورد خاص مزیت نسبی به فاکتوریل کامل ندارد و در اینجا نیز بایستی از آرایه L25 استفاده کرد که دوباره نیاز به ۲۵ آزمایش مستقل دارد.

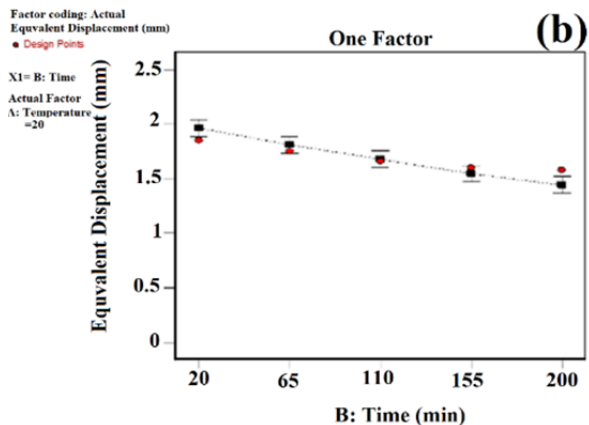
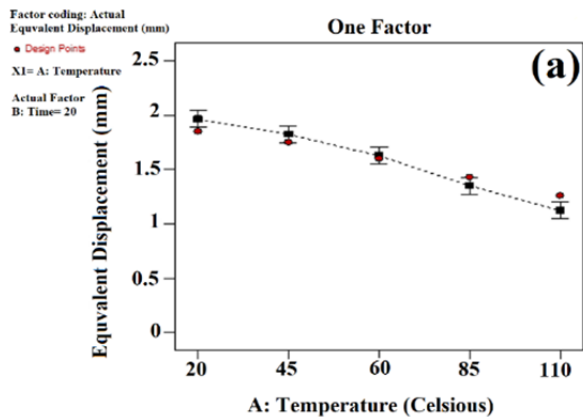
در جدول ۳ ماتریس طراحی آزمایش و مقادیر تجربی به دست آمده ارائه شده است. براساس جدول ۳ آزمایشات در شرایط کاملاً کنترل شده انجام پذیرفت. در مورد متغیر پاسخ، در اکثر موارد متوسط و انحراف معیار (یا هر دو) مشخصه اندازه‌گیری شده، متغیر پاسخ‌اند. ممکن است متغیر پاسخ بیشتر از یکی باشد. خطای اندازه‌گیری نیز عاملی مهم بوده که اگر مقدار آن زیاد باشد ممکن است تکرارهای اضافی لازم شوند. در این مطالعه متغیرهای پاسخ بار نهایی چسب و جابه‌جایی معادل انتخاب شدند. در تحلیل داده‌ها باید از روش‌های آماری استفاده کرد تا نتایج و استنباط‌ها به جای ماهیت نظری، ماهیت عینی داشته باشد. اگر آزمایش درست مطابق با فرآیند طرح‌ریزی شده توسط تاگوچی انجام شود، نیازی به روش‌های آماری پیچیده نیست. بسته‌های نرم‌افزاری مفید زیادی وجود دارد که به تحلیل داده‌ها کمک می‌کنند و روش‌های نموداری ساده نقشی عمده در تحلیل داده‌ها ایفا

قرار می‌گیرد. برای این منظور ابتدا به بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها پرداخته می‌شود. چنان که در نمودار ۵ مشاهده می‌شود قرارگرفتن نقاط در امتداد یک خط مستقیم به خوبی نرمال بودن داده‌ها را تایید می‌نماید.

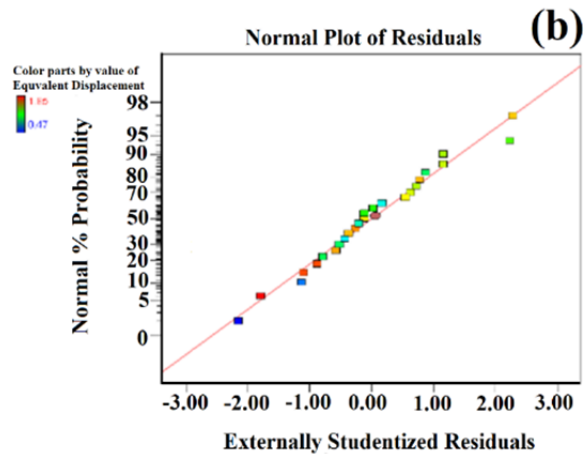
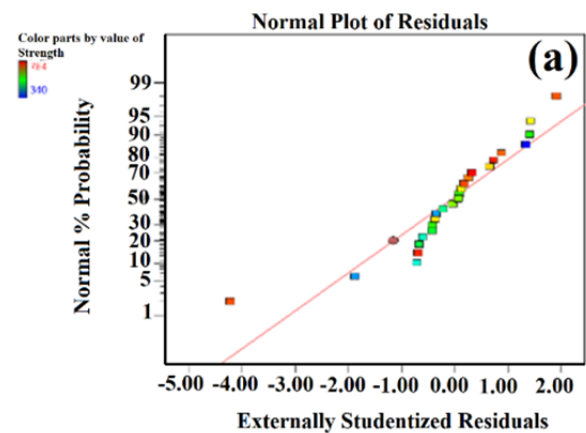
اکنون پس از اعتبارسنجی مدل‌های ارایه شده می‌توان به تجزیه و تحلیل تغییرات رفتار چسبندگی نمونه‌ها طبق مدل ارایه شده پرداخت. به منظور بررسی نحوه تاثیر مستقل دما و زمان پخت پلیمر بر استحکام چسبندگی از نمودارهای دوتبعدی استفاده شده است. در نمودار ۶ چگونگی تغییرات استحکام چسبندگی نمونه‌ها بر حسب تغییر هر کدام از پارامترهای دما و زمان پخت به صورت مستقل ارایه شده است. در نمودار ۷ چگونگی تغییرات مقدار جابه‌جایی معادل نمونه‌ها بر حسب تغییر هر کدام از پارامترهای دما و زمان پخت به صورت مستقل برای جابه‌جایی ارایه شده است. همان طور که از نمودارهای ۶ و ۷ مشاهده می‌شود، دما و زمان پخت منجر به افزایش استحکام چسبندگی می‌شود، ولی در عین حال بالابردن دما و زمان پخت باعث کاهش جابه‌جایی معادل می‌شود. به عبارت دیگر با افزایش دما و زمان پخت به دلیل تشکیل پیوندهای عرضی بیشتر، پلیمر واسط (چسب) مورد استفاده تردتر می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که تاثیر زمان در استحکام بیشتر بوده، در حالی که در مورد جابه‌جایی معادل، این دما است که اثر نسبتاً بیشتری دارد و این موضوع با در نظر گرفتن مجموع مربعات (SS) این پارامترها مشهود است. همان طور که ملاحظه شد، SS استحکام مربوط به زمان $(236600/6)$ بیشتر از دما $(159324/6)$ بوده و همچنین SS جابه‌جایی معادل مربوط به دما $(2/34)$ بیشتر از زمان $(0/86)$ است.



نمودار ۶ اثر مستقل پارامترهای دما و زمان پخت روی استحکام برشی: (a) دما، (b) زمان پخت

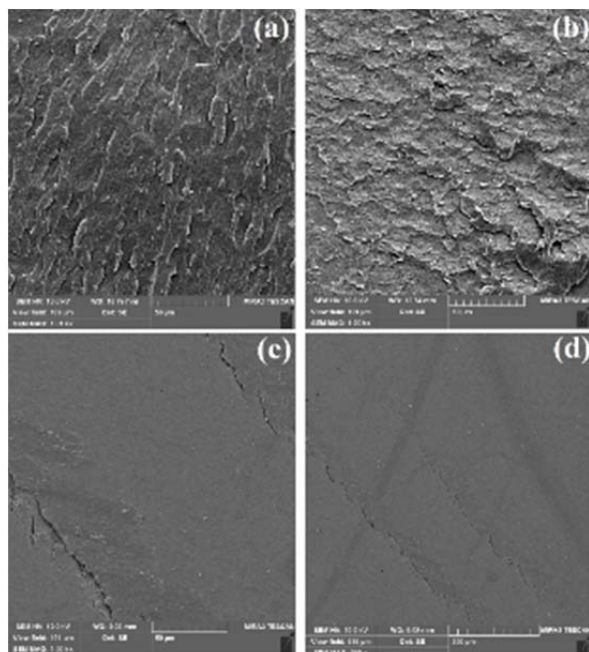


نمودار ۷ اثر مستقل پارامترهای دما و زمان پخت روی میزان جابه‌جایی نمونه‌ها: (a) دما، (b) زمان پخت



نمودار ۸ بررسی توزیع داده‌های آزمون برای استحکام (بار) و جابه‌جایی معادل: (a) استحکام (بار)، (b) جابه‌جایی معادل

شکل ۶- a هنوز پیوندهای عرضی در داخل خود پلیمر به صورت کامل تشکیل نشده و در نتیجه در مقابل اعمال تنش استحکام ضعیفی داشته و میزان جابه‌جایی معادل نیز بیشتر است (نمودارهای ۶ و ۷). در حالی که در سطح شکست نمونه شکل ۶- b شاخه‌ای شدن ترک (که از مکانیزم‌های افزایش استحکام ماده است) [20, 21] قابل مشاهده است که منجر به افزایش میزان استحکام چسبندگی و جابه‌جایی معادل پلیمر واسط می‌شود. از مقایسه شکل‌های ۶- c و d مشاهده می‌شود که در دما و زمان‌های پخت بالا شکست از نوع چسبندگی بوده که در فصل مشترک فولاد و پلیمر واسط به وقوع پیوسته است. ترک‌های مشاهده‌شده در سطح شکست نیز به دلیل ترد شدن پلیمر واسط (نمودارهای ۶ و ۷) و عدم تحمل جابه‌جایی در اثر اعمال تنش ایجاد شده است. با توجه به نتایج جدول ۴، نمودارهای ۶ و ۷ و همچنین شکل ۶، دمای پخت ۴۵°C و مدت زمان پخت ۱۵۵ دقیقه به عنوان بهینه‌ترین شرایط پخت چسب متاکریلاتی مورد استفاده در این مطالعه انتخاب شد.



شکل ۶ تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطوح شکست نمونه‌ها: (a) پخت شده در دمای ۲۰°C به مدت ۶۵ دقیقه، (b) پخت شده در دمای ۴۵°C به مدت ۱۵۵ دقیقه، (c) پخت شده در دمای ۸۵°C به مدت ۱۵۵ دقیقه و (d) پخت شده در دمای ۱۱۰°C به مدت ۲۰ دقیقه

۴- نتیجه‌گیری

هدف از پژوهش حاضر بالابردن استحکام اتصالات فولاد- کامپوزیت با رویکرد بازسازی خطوط لوله انتقال آب با استفاده از وصله‌های کامپوزیتی پایه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف شیشه بود که برای این منظور ابتدا سه نوع پلیمر اپوکسی، متاکریلات و سیانواکریلات به عنوان چسب برای چسباندن وصله کامپوزیتی به زیرپایه فولادی مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج آزمون‌های سنجش چسبندگی کامپوزیت بر سطح فولاد در دو حالت بارگذاری کششی و برشی با سه نوع چسب پایه سیانواکریلات، متاکریلات و اپوکسی نشان داد که چسب متاکریلات با استحکام نهایی چسبندگی ۱۴MPa در حالت بارگذاری کششی و ۱۱/۲۳MPa در حالت بارگذاری برشی و جابه‌جایی‌های متناظر به ترتیب ۰/۱۲mm و

تاگوچی با استفاده از تابع هزینه قابلیت بهینه‌سازی پاسخ‌های چندمتغیره را دارد. در این مطالعه چون هدف بهینه‌سازی همزمان دو متغیر پاسخ استحکام و جابه‌جایی معادل است، از این تابع بهینه‌سازی استفاده شد. در این روش در نهایت برای هر ترکیب آزمایش یک مقدار مطلوبیت تخصیص می‌یابد و بالاترین مقدار مطلوبیت که در ردیف اول جدول ۴ مشاهده می‌شود، به عنوان بهینه‌ترین ترکیب پارامترهای ورودی هستند.

جدول ۴) مطلوبیت مورد قبول پارامترهای دما و زمان پخت پلیمر واسط

شماره دما	(°C) زمان	بار (min)	جابه‌جایی معادل (Kg)	مطلوبیت
۱	۴۵	۱۵۵	۶۸۰/۸۴	۰/۷۲۱۵۷۶
۲	۴۵	۲۰	۷۱۰/۸۴	۰/۷۰۹۶۱۷
۳	۴۵	۱۱۰	۶۲۱/۶۴	۰/۷۰۰۶۵۱
۴	۶۰	۱۱۵	۷۲۴/۴۴	۰/۶۸۰۴۷۴
۵	۶۰	۱۱۰	۶۶۵/۲۴	۰/۶۷۹۵۶۴
۶	۶۰	۲۰	۷۵۴/۴۴	۰/۶۵۴۸۵۴
۷	۶۰	۶۵	۵۸۹/۸۴	۰/۶۳۹۱۹۶
۸	۴۵	۶۵	۵۴۶/۲۴	۰/۶۳۵۵۴۵
۹	۲۰	۲۰	۵۸۲/۰۴	۰/۶۱۹۶۴۹
۱۰	۲۰	۱۵۵	۵۵۲/۰۴	۰/۶۱۰۲۰۷
۱۱	۸۵	۱۱۰	۶۸۷/۸۴	۰/۵۸۱۶۷۷
۱۲	۸۵	۶۵	۶۱۲/۴۴	۰/۵۶۸۹۴۵
۱۳	۸۵	۱۵۵	۷۴۷/۰۴	۰/۵۵۵۱۹۶
۱۴	۲۰	۱۱۰	۴۹۲/۸۴	۰/۵۴۸۹۳۵
۱۵	۶۰	۲۰	۴۸۵/۰۴	۰/۵۲۳۱۰۹
۱۶	۸۵	۲۰	۷۷۷/۰۴	۰/۵۰۶۷۳۵
۱۷	۱۱۰	۶۵	۶۴۸/۰۴	۰/۵۰۱۳۹۶
۱۸	۸۵	۲۰	۵۰۷/۶۴	۰/۴۹۱۲۳۸
۱۹	۱۱۰	۱۱۰	۷۲۳/۴۴	۰/۴۷۹۸۹۰
۲۰	۴۵	۲۰	۴۴۱/۴۴	۰/۴۷۳۴۶۰
۲۱	۱۱۰	۲۰	۵۴۳/۲۴	۰/۴۶۵۷۶۰
۲۲	۱۱۰	۱۵۵	۷۸۲/۶۴	۰/۴۱۲۹۰۵
۲۳	۲۰	۶۵	۴۱۷/۴۴	۰/۴۱۱۵۳۲
۲۴	۱۱۰	۲۰	۸۱۲/۶۴	۰/۳۰۹۲۷۷

در این مطالعه چون هم استحکام و هم جابه‌جایی نسبی بایستی بیشترین مقدار را داشته باشند، لذا هنگام شروع بهینه‌سازی هر دو از نوع "بیشتر- بهتر" انتخاب شده و همچنین میزان اهمیت هر دو پارامتر برابر در نظر گرفته شده است.

در ادامه مباحث بهینه‌سازی پارامترهای دما و زمان پخت پلیمر واسط و بررسی اثرات این پارامترها بر چسبندگی توسط تصاویر میکروسکوپ الکترونی از مقاطع شکست در شکل ۶ ارائه شده است. با توجه به این تصاویر مشخص می‌شود که با افزایش میزان دما و زمان به عنوان پارامترهای پخت پلیمر به ترتیب از قسمت a تا d مربوط به شکل ۶، امکان واکنش پلیمر واسط با سطح فولاد به علت تسریع عمل پیوندهای عرضی در داخل آن و کمبود المان‌های رادیکال آزاد در سطح پلیمر (به خصوص در دماهای بالا و زمان‌های طولانی) ضعیف است.

از مقایسه تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطوح شکست نمونه‌های SLS که به ترتیب مربوط به پخت شده در دمای ۲۰°C به مدت ۶۵ دقیقه، پخت شده در دمای ۴۵°C به مدت ۱۵۵ دقیقه، پخت شده در دمای ۸۵°C به مدت ۱۵۵ دقیقه و پخت شده در دمای ۱۱۰°C به مدت ۲۰ دقیقه هستند، مشخص می‌شود که نوع شکست در نمونه با بالاترین استحکام (شکل ۶- b) بیشتر از نوع پیوستگی بوده و زبری سطح شکست نمونه نیز بیشتر است. تفاوت شکست پیوستگی ایجاد شده در شکل‌های ۶- a و b در این است که در

6- Alexander C, Ozden Ochoa O. Extending onshore pipeline repair to offshore steel risers with carbon-fiber reinforced composites. *Composite Structures*. 2010;92(2):499-507.

7- Duell JM, Wilson JM, Kessler MR. Analysis of a carbon composite overwrap pipeline repair system. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2008;85(11):782-788.

8- Revie RW, Uhlig HH. Corrosion and corrosion control, an introduction to corrosion science and engineering. 4th Edition. Hoboken: John Wiley & Sons; 2008.

9- Creton C. Materials science of pressure-sensitive adhesives. In: Cahn RW, Haasen P, Kramer EJ, editors. *Materials science and technology*. Hoboken: John Wiley & Sons; 2006. pp. 708-739.

10- Baldan A. Adhesion phenomena in bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2012;38:95-116.

11- Razavi SMJ, Ayatollahi MR, Nemati Giv A, Khoramshad H. Single lap joints bonded with structural adhesives reinforced with a mixture of silica nanoparticles and multi walled carbon nanotubes. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2018;80:76-86.

12- Baldan A. Adhesively bonded joints and repairs in metallic alloy, polymers and composite materials: Adhesives, adhesion theories and surface pretreatment. *Journal of Materials Science*. 2004;39(1):1-49.

13- André NM, Goushegir SM, Scharnagl N, dos Santos JF, Canto LB, Amancio-Filho ST. Composite surface pretreatments: Improvement on adhesion mechanisms and mechanical performance of metal-composite friction spot joints with additional film interlayer. *The Journal of Adhesion*. 2018;94(9):723-742.

14- Budhe S, Banea MD, de Barros S, da Silva LFM. An updated review of adhesively bonded joints in composite materials. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2017;72:30-42.

15- Wegman RF, Van Twisk J. Surface preparation techniques for adhesive bonding. 2nd Edition. Amsterdam: Elsevier; 2013. pp. 90-98.

16- Tutunchi A, Kamali R, Kianvash A. Steel-epoxy composite joints bonded with nano-TiO₂ reinforced structural acrylic adhesive. *The Journal of Adhesion*. 2015;91(9):663-676.

17- Tutunchi A, Kamali R, Kianvash A. Effect of Al₂O₃ nanoparticles on the steel-glass/epoxy composite joint bonded by a two-component structural acrylic adhesive. *Soft Materials*. 2016;14(1):1-8.

18- Osouli-Bostanabad K, Tutunchi A, Eskandarzade M. The influence of pre-bond surface treatment over the reliability of steel epoxy/glass composites bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2017;75:145-154.

19- Chavooshian M, Kamali R, Tutunchi A, Kianvash A. Effect of silicon carbide nanoparticles on the adhesion strength of steel-epoxy composite joints bonded with acrylic adhesives. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2017;31(4):345-357.

20- Zosel A. Adhesive failure and deformation behaviour of polymers. *The Journal of Adhesion*. 1989;30(1-4):135-149.

21- Bascom WD, Timmons CO, Jones RL. Apparent interfacial failure in mixed-mode adhesive fracture. *Journal of Materials Science*. 1975;10(6):1037-1048.

۱/۳۵mm مناسب‌ترین پلیمر واسط در پژوهش حاضر است. با بهره‌گیری از روش طراحی آزمایش تاگوچی متغیرهای ورودی برای نحوه پخت بهینه پلیمر واسط انتخاب و استحکام چسبندگی و جابه‌جایی متناظر نمونه‌های SLS به‌عنوان توابع هدف در هر مرحله با ضریب اطمینان ۹۵٪ مدل‌سازی شدند. با بهینه‌سازی نحوه پخت پلیمر واسط، دمای ۴۵°C در مدت‌زمان ۱۵۵ دقیقه انتخاب شد که استحکام چسبندگی و جابه‌جایی متناظر به‌ترتیب به ۲۱/۶۵MPa و ۱/۴mm افزایش یافت. نظر به هدف این مطالعه که ارزیابی رویکردی نوین برای بازسازی خطوط لوله انتقال آب با استفاده از وصله‌های کامپوزیتی بود، نتایج این مطالعه به‌عنوان مبنا قرار گرفت تا امکان اعمال این وصله‌ها در مقیاس صنعتی روی لوله‌های حاوی عیب ترک بررسی شود. نتایج حاکی از آن بود که بایستی بهینه‌سازی‌های دیگری در ساختار چسب و سطوح کامپوزیت و فولاد انجام شود تا کاربرد صنعتی این مطالعه اثبات شود [12-15].

تشکر و قدردانی: نویسندگان از معاونت پژوهشی دانشگاه تبریز و کارکنان آزمایشگاه مواد مغناطیسی و کامپوزیت‌های پیشرفته دانشگاه تبریز تشکر و قدردانی می‌نمایند.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله بصورت کامل یا جزئی و به زبان دیگری تاکنون در هیچ نشریه‌ای به چاپ نرسیده و یا برای چاپ به نشریه دیگری ارسال نگردیده است. ضمناً محتویات علمی مقاله حاضر، حاصل کار پژوهشی نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج بر عهده نویسندگان می‌باشد.

تعارض منافع: مقاله حاضر هیچ گونه تعارض منافی با سازمان‌ها یا اشخاص دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: کریم اصولی بستان‌آباد (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۲۵٪)؛ ابوالفضل توتونچی (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۳۵٪)؛ مهدی اسکندرزاده (نویسنده سوم)، تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۱۵٪)؛ عباس کیان‌وش (نویسنده چهارم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی (۲۵٪)

منابع مالی: منابع مالی لازم برای انجام پژوهش حاضر توسط نویسندگان تأمین شده است.

منابع

1- Mohitpour M, Golshan H, Murray A. Pipeline design and construction: A practical approach. 3rd Edition. NewYork: American Society of Mechanical Engineering; 2007.

2- Mattos HC, Sampaio RF, Reis JM, Perrut VA. Rehabilitation of corroded steel pipelines with epoxy repair systems. *The Journal of Pipeline Engineering*. 2008;7(4):295-303.

3- Overend M, Jin Q, Watson J. The selection and performance of adhesives for a steel-glass connection. *International Journal of Adhesion & Adhesives*. 2011;31(7):587-596.

4- Chen Z, Adams RD, Lucas AB, da Silva FM. Prediction of crack initiation and propagation of adhesive lap joints using an energy failure criterion. *Engineering Fracture Mechanics*. 2011;78(6):990-1007.

5- Toutanji H, Dempsey S. Stress modeling of pipelines strengthened with advanced composite materials. *Thin-Walled Structures*. 2001;39(2):153-165.