

تحلیل حساسیت در لوله‌های کامپوزیتی - فلزی با اتصالات چسبی تحت بارگذاری کششی

چکیده: در این مقاله اثر نرخ جابجایی در بارگذاری کششی بر استحکام (نیروی بیشینه و تغییر طول) اتصال چسبی در لوله‌های ساخته شده از فلز و مواد کامپوزیتی شیشه- اپوکسی و کربن- اپوکسی بررسی شده است. بدین منظور نمونه‌های مختلف از لوله‌های متصل به هم با ضخامت و طول ناحیه چسب‌خور مختلف (طول ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر و ضخامت ۰/۲۵، ۰/۱۰ و ۰/۴۰ میلی‌متر)، ساخته شد. سپس نمونه‌ها تحت بارگذاری کششی با نرخ‌های مختلف جابجایی (۵، ۵۰ و ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه) قرار گرفته و در ادامه، میزان تحمل بار و نوع خرابی آن‌ها مشخص گردید. بر اساس نتایج، با افزایش مقدار نرخ جابجایی در بارگذاری کششی در هر یک از نمونه‌های کربن- اپوکسی، نیروی بیشینه افزایش یافت. با افزایش نرخ جابجایی در بارگذاری کششی، ناحیه شکست از قسمت اتصال چسبی به قسمت مواد کامپوزیتی تغییر یافت. در مورد نمونه‌های شیشه- اپوکسی، می‌توان ابراز داشت که افزایش نرخ جابجایی در بارگذاری کششی، به تدریج باعث افزایش نیروی بیشینه شد. در نهایت، بر اساس تحلیل حساسیت مشخص شد که آنالیز رگرسیون برای هر دو تابع هدف نیروی بیشینه و تغییر طول، بطور مناسبی، معتبر نبوده است.

واژه‌های راهنما: اتصال چسبی، اتصال کامپوزیت - فلز، بارگذاری کششی، تحلیل حساسیت، نرخ جابجایی

فاطمه فرهادیان

لنگرودی

کارشناس ارشد
دانشکده مهندسی هوافضا،
دانشگاه سمنان

میثم شکوری

دانشیار
دانشکده مهندسی هوافضا،
دانشگاه سمنان

محمد آزادی*

دانشیار
دانشکده مهندسی مکانیک،
دانشگاه سمنان

مقاله ترویجی

دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۲۰

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۱۱

Fatemeh Farhadian

Langrudi

MSc.

Faculty of Aerospace
Engineering, Semnan
University, Semnan

Meisam Shakouri

Associate Professor
Faculty of Aerospace
Engineering, Semnan
University, Semnan

Mohammad Azadi*

Associate Professor,
Faculty of Mechanical
Engineering, Semnan
University, Semnan

Sensitivity analysis in adhesively-joined glass/carbon-epoxy composite-metal pipes under tensile loading

Abstract: In this article the effect of the displacement rate under tensile loading on the adhesive connection in glass-epoxy and carbon-epoxy composite and metal pipes has been investigated. For this purpose, bonded pipe specimens were fabricated with different thicknesses and adhesive areas (the length of 10, 20, and 30 mm and the thickness of 0.25, 0.10, and 0.40 mm). Then, samples were exposed to tensile loading at various displacement rates (0.5, 5, and 50 mm/min) and moreover, their strengths and failure types were determined. Based on the results, for the carbon-epoxy specimens, the maximum force increased by increasing the displacement rate. The fracture area was also changed from the adhesive area to the composite due to the increase in the displacement rate. It could be claimed about the glass-epoxy samples that under tensile loading, the maximum force enhanced gradually by increasing the displacement rate. Finally, the regression analysis for the maximum force and the elongation was not properly valid based on the sensitivity analysis.

Keywords: Adhesive connection, Composite-metal joint, Tensile loading, Sensitivity analysis, Displacement rate

۱- مقدمه

مدل آسیب برای توصیف رفتار تغییر شکل نانوکامپوزیت پلیمری ارائه داده و کاربرد این مدل را برای مواد کامپوزیتی تقویت شده با نانوتیوب کربنی و اپوکسی تقویت شده با نانوتیوب گرافیتی، بیان نمود.

مگنید و سان [۷]، به بررسی گسیختگی کششی و خواص برشی کامپوزیت تقویت شده با دو نوع نانوفیلر کربن نانوتیوب و نانوپودر آلومینا که بصورت همگن پخش شده بودند، پرداختند. اتصالات کامپوزیتی مورد استفاده، از رشته کربن- لایه اپوکسی و آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ با عملیات حرارتی T6 ساخته شده بود. نتایج نشان داد که تغییر درصد وزنی نانوفیلرها در زمینه اپوکسی، بر روند گسیختگی و خواص برشی، اثرگذار بوده است. همچنین، ساخت نانوفیلرها با کسر وزنی بیش از اتصال چسبی، مقاومت نمونه را کاهش داده است. مورتنسن و تومسن [۸]، به ارائه یک مدل منحصر به فرد جهت تحلیل و طراحی اتصالات چسبی پرداختند. آن‌ها اتصالات را بصورت یک تیر یا صفحه گسترده در خمش استوانه‌ای و بصورت لایه‌های ارتوتروپیک با تئوری لایه-های کلاسیک مدل کردند. براساس نتایج، اتصالات، لایه‌های کامپوزیتی نامتعادل و نامتقارنی ساختند که در تحلیل‌ها، از آن استفاده شد. لایه‌های اتصال چسبی به دو شکل، مدل شد. در روش اول، لایه اتصال چسبی، بصورت ماده الاستیک خطی فرض شد و در روش دوم، رفتار آن، غیرالاستیک، در نظر گرفته شد. روابط نیز، بصورت معادلات دیفرانسیل معمولی مرتبه اول در نظر گرفته شد. روش ارائه شده، با مدل‌های المان محدود و تئوری مرتبه بالا نیز مقایسه گردید. مورتنسن و تومسن [۹]، به استفاده از یک روش منحصر به فرد تحلیل و طراحی اتصالات چسبی در اتصالات لایه‌ای نامتقارن جهت بررسی اثر نوع اتصال پرداختند. لایه اتصال چسبی، بصورت برش خطی و حالت ارتجاعی کشش- فشار، مدل شد. روابط، بصورت معادلات دیفرانسیل مرتبه اول مرتب شد که با روش عددی انتگرال چندبخشی، حل شد.

واشچنکو و همکاران [۱۰]، به بررسی رابطه خطی بین مقاومت کششی کامپوزیت‌های شیشه- پلی آمید با لگاریتم نرخ کرنش، پرداختند. استاب و گیلان [۱۱، ۱۲]، در دو پژوهش، به منظور آزمون‌های با نرخ کرنش زیاد و نیز آزمون‌های شبه استاتیک، با استفاده از دستگاه تقسیم تنش هایپکینسون، یک مطالعه سیستمی بر روی اثرات نرخ کرنش بر رفتار مکانیکی شیشه- اپوکسی لایه لایه زاویه‌دار انجام دادند. آزمون‌های کشش با نرخ کرنش زیاد، افزایش چشمگیر تنش عمودی را درمقایسه با آزمون‌های شبه استاتیک، نشان دادند. آن‌ها همچنین ابراز داشتند که رشته‌ها، حساسیت بیشتری نسبت به زمینه به نرخ کرنش داشتند. رابرتز و هاردینگ [۱۳]، به منظور بررسی اثر نرخ

امروزه، استفاده از مواد کامپوزیتی، به دلیل خواص منحصر به فرد، در بسیاری از سازه‌ها در صنایع مختلف از قبیل هوافضا، به امری رایج تبدیل شده است. خواصی از قبیل مقاومت زیاد در برابر خوردگی و اثرات محیط‌های اسیدی و بازی و نسبت استحکام به وزن مناسب، آن‌ها را یک کاندید بالقوه به عنوان جایگزین در لوله‌ها، مخصوصاً در محیط‌های خورنده می‌سازد. با این وجود، برخی محدودیت‌ها در استفاده از مواد کامپوزیتی، مخصوصاً در محل اتصالات و رزوه‌ها، باعث می‌شود که در بسیاری از کاربردها قسمتی از سازه‌ها هنوز از جنس فلزاتی مثل فولاد و آلومینیوم باقی بماند. در چنین مواردی نیاز است که بخش‌های ساخته شده از مواد کامپوزیتی به بخش‌های فلزی متصل شود. یکی از روش‌های پرکاربرد در این موارد، استفاده از اتصالات چسبی است. این موضوع یکی از موارد مورد علاقه محققان بویژه در حوزه هوافضا بوده و تحقیقات مختلفی بر روی آن صورت گرفته است. اتصال چسبی لوله‌های کامپوزیتی و فلزی متصل در صنایع هوایی با رویکرد این صنایع به مواد کامپوزیتی با توجه به مزایای زیاد مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است [۱-۳] که در ادامه، به اختصار، به ارائه برخی از آن‌ها پرداخته شده است.

اسیونه و منکوزی [۴]، به تحلیل المان محدود رفتار اتصال چسبی بین پلیمرهای تقویت شده با رشته، پرداختند. آن‌ها، اتصالات دولبه را در حالت تنش عمودی و تنش برشی/خمشی، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در پژوهش خود، رفتار چسب را تا لحظه شکست، الاستیک خطی در نظر گرفتند. نتایج نشان داد که به دلیل ویژگی‌های مکانیکی متفاوت چسب، تنها امکان تجمیع تحلیل صحیح داده‌ها، وجود دارد. این پژوهشگران، در نهایت، نتایج عددی بدست آمده با روش ارائه شده را با نتایج سایر مقالات، مقایسه نمودند. بانی و داسیلوا [۵] به بررسی مروری اتصالات چسبی سازه‌های کامپوزیت پلاستیکی تقویت شده با رشته، پرداختند. آن‌ها اثر آماده‌سازی سطح، پیکربندی اتصالات، خواص چسب و عوامل محیطی را بر رفتار اتصالات، به شکل مختصر شرح دادند. آن‌ها، چندید روش را برای پیش‌بینی آسیب اتصالات مورد مطالعه قرار دادند. روش‌های عددی مورد استفاده، شامل مدل‌های خطی و غیرخطی بود. گان [۶]، اثر ساختارهای رابط را بر خواص مکانیکی مواد کامپوزیتی تقویت شده با رشته، مورد بررسی قرار داد. ابتدا او به عنوان پیشینه تحقیق، به تولید و کاربردهای مواد کامپوزیتی هیبریدی، پرداخت. سپس، اثر بهبود زمینه و رابط‌های نانومعماری را بر خواص مکانیکی مواد نانوکامپوزیتی، بررسی نمود. در نهایت، یک

است که ۰/۰۰۲ الی ۲/۱۰۰ درصد از وزن خود، کربن دارد. چسب مورد استفاده در این تحقیق، برای اتصال بخش‌های فلزی و کامپوزیتی، رزین اپوکسی اندفست شامل رزین اپوکسی ML-506 و سفت‌کننده اپوکسی HA-11 از سری محصولات شرکت مواد مهندسی مکرر است.

شایان ذکر است که چسب اپوکسی در محل اتصال، یک چسب دو جزئی، با نام تجاری UHU-PLUS-ENDFEST-300 بوده است که توانایی تحمل ۳۰۰ کیلوگرم در هر سانتیمتر مربع را دارد. ضمناً برای ساخت لوله‌های ساخته شده از مواد کامپوزیت از روش پیچش الیاف استفاده، با زاویه ۴۵ درجه ساخته شده‌اند. قابل توجه است که برای کامپوزیت، فرایند پختی لحاظ نشده است. شکل ۱، یک تصویر کلی از تمام مواد مورد مطالعه در این تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۱ مواد کامپوزیتی و فلزی با سطح مقطع لوله‌ای

طول لوله‌های ساخته شده از مواد کامپوزیتی، یکسان و ۱۰۰ میلی‌متر است. قطر داخلی هر یک از نمونه‌ها نیز ۳۰ میلی‌متر است. لوله‌های فلزی استفاده شده، به طول‌های ۱۱۰، ۱۲۰ و ۱۳۰ میلی‌متر توسط دستگاه کاترال (اره برش نواری)، برش خورده‌اند. این تفاوت طول‌ها، به دلیل تفاوت طول ناحیه‌ای است که چسب برای اتصال لوله فلزی به لوله کامپوزیتی قرار می‌گیرد. ۱۸ قطعه فلزی و ۱۸ قطعه از مواد کامپوزیتی شامل ۹ قطعه از جنس کربن-اپوکسی و ۹ قطعه از جنس شیشه-اپوکسی، است. یک طرف هر یک از نمونه‌های فلزی به اندازه مورد نیاز از قسمت طول، به‌عنوان ناحیه چسب‌خور توسط دستگاه تراش، تراشیده شد. این مقدار در نمونه‌های با طول ۱۱۰ میلی‌متر، ۱۰ میلی‌متر و در نمونه‌های با طول ۱۲۰ میلی‌متر، ۲۰ میلی‌متر و در نمونه‌های با طول ۱۳۰ میلی‌متر، ۳۰ میلی‌متر است. ضخامت این نواحی تراش‌خورده به اندازه ۰/۲۵، ۰/۱۰ و ۰/۴۰ میلی‌متر بوده که از هر

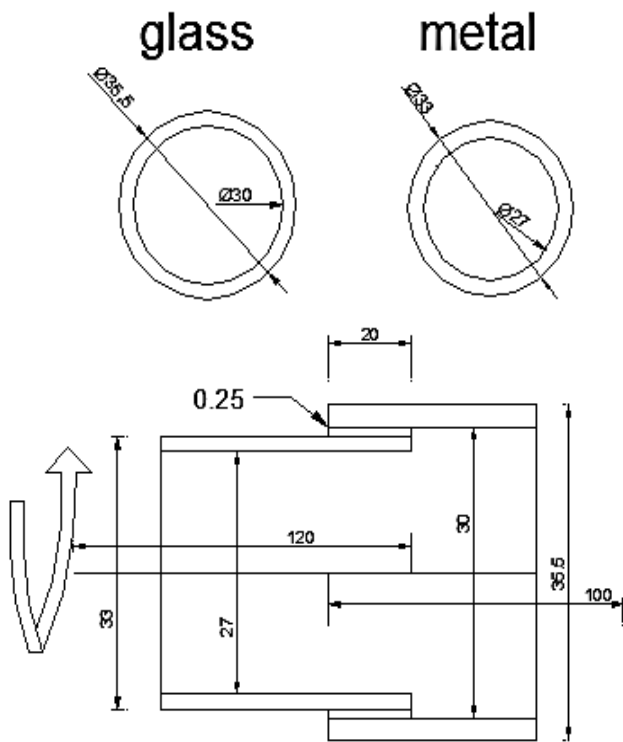
کرنش بر خواص کششی کامپوزیت شیشه-رزین فنلی، آزمون-های کشش را در پنج نرخ جابجایی مختلف انجام دادند. آن‌ها در زمان آسیب، افزایش چشمگیر مقاومت کششی، سختی و جابجایی را در نرخ‌های جابجایی زیادتر، مشاهده نمودند. این امر، به دلیل وابستگی مقاومت زمینه رزین به نرخ بارگذاری، جهت رشته‌ها و مقاومت شکست رشته‌های شیشه‌ای بوده است.

شهریاری فرد و همکاران [۱۴] بر روی میزان تحمل بار توسط دو لوله فلزی متصل شده با کامپوزیت شیشه-اپوکسی مطالعه کردند. آنها همچنین بر روی بهینه‌سازی پارامترهای هندسی و اثر آنها بر اتصال لوله‌های فلزی-کامپوزیتی مطالعه نمودند [۱۵،۱۶]. همچنین، پاکزادیان و همکاران [۱۷] موضوع تقویت لوله‌های جوش داده شده را با استفاده از پیچش الیاف کامپوزیتی بررسی کرده‌اند و علی یاری و همکاران [۱۸،۱۹] نیز با استفاده از روش المان محدود به بررسی اتصال لوله‌های فلز-کامپوزیت تحت بار خمشی و بهینه‌سازی اثر پارامترهای مختلف هندسی و مکانیکی بر استحکام سازه پرداخته‌اند.

با توجه به پیشینه تحقیق، می‌توان دریافت که بررسی اثر نرخ بارگذاری بر روی کامپوزیت‌ها انجام پذیرفته است اما این مطالعه روی اتصالات چسبی، کمتر یافت می‌شود. بعلاوه، تحلیل کمی با استفاده از تحلیل رگرسیون، می‌تواند در مقابل تحلیل‌های کیفی بسیار انجام شده قبلی روی اتصالات چسبی، نوآوری دیگر این تحقیق باشد. مقایسه رفتار دو نوع اتصال کامپوزیتی از دیگر نوآوری‌های کار حاضر است. لذا در این مقاله، به تحلیل حساسیت اثر نرخ جابجایی در بارگذاری کششی بر نیروی بیشینه و تغییر طول در اتصال چسبی لوله‌های ساخته شده از مواد کامپوزیت و فلزی پرداخته شده است. بدین منظور، از دو نوع ماده کامپوزیتی، یکی از جنس شیشه-اپوکسی و دیگری از جنس کربن-اپوکسی، با سطح مقطع لوله‌ای، استفاده گردیده است. این قطعات، در دستگاه آزمون کشش، آزمایش شده و در نهایت، کشش، مقدار تغییر طول ایجاد شده، تاثیر نرخ بارگذاری و تحلیل حساسیت مربوط به آن‌ها، ارائه گردید.

۲- مواد و آزمون‌ها

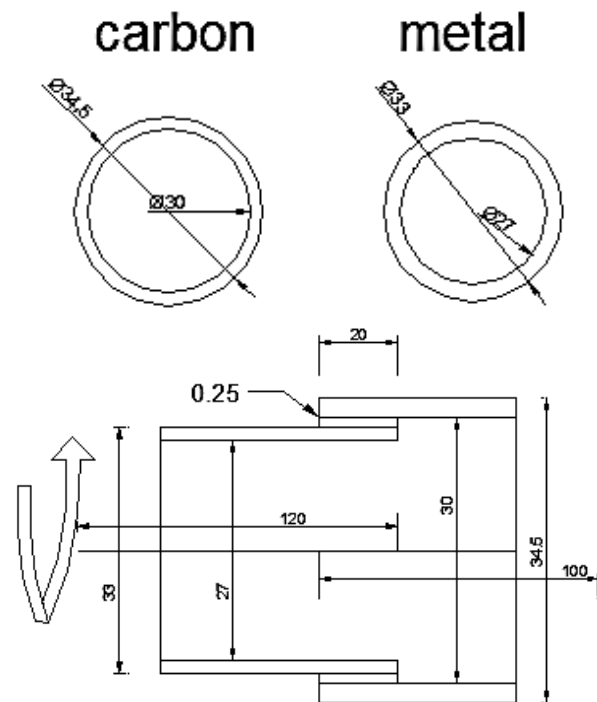
در این تحقیق، از لوله‌های متصل کامپوزیتی-فلزی استفاده شده است. نمونه‌های ساخته شده از جنس مواد کامپوزیتی و فلزی با سطح مقطع لوله‌ای، به همراه یک چسب به‌عنوان اتصال دهنده، مورد استفاده قرار گرفته است. کامپوزیت استفاده شده از جنس کربن-اپوکسی و شیشه-اپوکسی بوده و فلز استفاده شده لوله گازی از جنس فولاد نرم است. این ماده شامل فولاد آلیاژ آهنی



شکل ۲ شماتیک مقطع برش طولی در نمونه کربن-اپوکسی و شیشه-اپوکسی

بعد از ترکیب شدن چسب، مقداری از چسب توسط کاردک، بر روی قسمتی از لوله فلزی که برای ناحیه چسب از قبل آماده شده بود، قرار داده شد. پس از چسب کاری، تمام قطعات به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق نگه داشته شدند و سپس، به مدت ۱۵ دقیقه در کوره و در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد قرار گرفته و پس از سرد شدن در دمای محیط، قطعات برای انجام آزمایش آماده شدند. جهت نگهداشته شدن نمونه‌ها توسط فک دستگاه آزمون کشش، تعداد سه نگهدارنده فلزی تعبیه شد. این نگهدارنده‌ها در سه اندازه متفاوت برای فلز و مواد کامپوزیتی از جنس شیشه-اپوکسی و کربن-اپوکسی ساخته شد. هر کدام از این نگهدارنده‌ها، شامل یک قسمت داخلی که به شکل میله توپر رزوه شده با طول ۲۰ میلی‌متر و دو قسمت بیرونی است. این میله رزوه شده، از مرکز به قطر ۸ میلی‌متر، توسط فلاویز و دستگاه تراش برای رد شدن یک پیچ ۸ با طول ۱۲۰ میلی‌متر سوراخ شد که این پیچ داخل فک دستگاه آزمون کشش قرار گرفت. قسمت بیرونی از دو قطعه تشکیل شده است که از داخل به شکل نیم‌دایره برای قرار گرفتن روی این میله توپر رزوه شده، تعبیه گردیده و توسط دستگاه تراش، تراشیده شدند. این قطعات بیرونی از دو طرف توسط دریل برای اتصال با پیچ، سوراخ کاری شدند. از دو پیچ نیز برای اتصال طرفین این نگهدارنده استفاده شده است.

اندازه، تعداد ۳ نمونه، برای سه نرخ جابجایی در بارگذاری کششی، ساخته شده است. اندازه هر نمونه فلزی اعم از طول لوله و ضخامت تراش خورده به‌عنوان محل چسب روی خود نمونه توسط سمبه حک شده است. شایان ذکر است که حرف C نمایانگر ماده از کربن-اپوکسی و حرف G نمایانگر ماده از شیشه-اپوکسی می‌باشد. بطور مثال C110-5 در واقع نمونه ساخته شده از کربن-اپوکسی با طول ناحیه چسب خور ۱۰ میلی‌متر و ضخامت ناحیه چسب خور ۰/۲۵ میلی‌متر بوده و به همین ترتیب، نمونه G120-8 نمونه ساخته شده از شیشه-اپوکسی با طول ناحیه چسب خور ۲۰ میلی‌متر و ضخامت ناحیه چسب خور ۰/۴۰ میلی‌متر است. شکل ۲، ارائه نقشه اجرایی و مقطع برش برای هر دو جنس ماده است. مشخصات کامل همه نمونه‌های مورد بررسی در این تحقیق، شامل ضخامت و طول چسب مورد استفاده، در جدول ۱ درج گردیده است. این قطعات که از جنس مواد کامپوزیتی و فلزی هستند، توسط چسب اپوکسی به یکدیگر متصل شده‌اند. این چسب از دو قسمت تشکیل شده است که شامل یک بخش اپوکسی و بخش دیگر سفت‌کننده است. برای اطمینان از حصول زیادترین استحکام، از ترازوی دقت بالا استفاده گردید تا ترکیب چسب از هر بخش، به یک میزان و به مقدار مساوی، انجام شود.



و F-Value می‌توان پارامترهای موثر را بر روی هر یک از خروجی‌ها، یافت. مقدار P-Value نشان دهنده موثر بودن پارامتر ورودی (در ازای کمتر بودن مقدار آن از عدد $0/05$ و معادل با سطح اطمینان ۹۵ درصد) و یا موثر نبودن (در ازای بیشتر بودن مقدار آن از عدد $0/05$)، است. مقدار F-Value هر چه بیشتر باشد، نشان دهنده تاثیر بیشتر ورودی بر خروجی مسئله است.

۳- نتایج و تفسیر

همان‌گونه که ذکر شد، در مجموع ۱۸ نمونه ساخته و مورد آزمون کشش قرار گرفت. برای اختصار، در شکل ۴، تعدادی از نمونه‌های اتصال کربن- فولاد نشان داده شده است. نتایج آزمون کشش بر روی تعدادی از لوله‌های متصل شده از جنس شیشه- فولاد نیز، در شکل ۵ نشان داده شده است.

در شکل ۶، نمونه‌ای از نتایج نیرو- جابجایی برای آزمون کشش در لوله‌های متصل شده از جنس کربن- فولاد نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، سرعت بارگذاری یا نرخ جابجایی، باعث تغییر نوع خرابی می‌گردد. همچنین در شکل ۶، نمونه‌ای از نتایج نیرو- جابجایی برای آزمون کشش در لوله‌های متصل شده از جنس شیشه- فولاد، نشان داده شده است.

در جدول ۲، نتایج بدست آمده از آزمون کشش، شامل نیروی بیشینه، تغییر طول در نیروی بیشینه و همچنین نوع و نحوه خرابی برای لوله‌های مربوط به اتصال فولاد به کربن- اپوکسی جمع‌بندی شده است. همان‌گونه که از نتایج جدول ۲ مشاهده می‌شود، با افزایش نرخ جابجایی در بارگذاری کششی در هر یک از نمونه‌ها، نیروی بیشینه افزایش یافت. این تغییر در نمونه با طول ناحیه چسب‌خور ۳۰ میلی‌متر، بطور قابل توجهی بیشتر است. چنین نتیجه‌ای توسط گروز و همکاران [۲۰] نیز بررسی شده و نشان دادند که خواص فشاری و کششی کامپوزیت کربن- اپوکسی در نتیجه افزایش نرخ بارگذاری، افزایش یافته است. دنیل و همکاران [۲۱] ابراز داشتند که افزایش نرخ کرنش در بارگذاری کششی کربن- اپوکسی، موجب افزایش شیب نمودار که معرف مدول الاستیک است، گردیده است که در این تحقیق، بصورت محسوسی دیده نشد. با افزایش نرخ جابجایی از $0/5$ به 5 میلی‌متر بر دقیقه، تغییری در محل شکست ظاهر نشد و این در حالی است که با افزایش نرخ جابجایی از 5 به 50 میلی‌متر بر دقیقه، محل شکست از قسمت اتصال چسبی به قسمت مواد کامپوزیتی تغییر یافت. لذا مطابقتی با پژوهش رابرتز و هاردینگ [۱۳] نیز دیده می‌شود که به حساسیت بیشتر چسب اپوکسی به نرخ بارگذاری، اشاره شده است. افزایش طول ناحیه چسب‌خور در نرخ‌های کمتر،

جدول ۱ نمونه‌های مورد مطالعه در این تحقیق

شماره نمونه	طول چسب	ضخامت چسب
	mm	mm
C110-2	۱۰	۰/۲۵
C120-5	۲۰	۰/۱۰
C130-8	۳۰	۰/۴۰
G110-2	۱۰	۰/۲۵
G120-5	۲۰	۰/۱۰
G130-8	۳۰	۰/۴۰

در این پژوهش، نمونه‌های ساخته شده، تحت آزمون کشش توسط دستگاه آزمون کشش- فشار ۴۰ تن، مدل STM-400 ساخته شده توسط شرکت سنتام انجام شد. نرخ جابجایی نیز، $0/5$ و 5 و 50 میلی‌متر بر دقیقه، انتخاب شد. شکل ۳، نمونه ساخته شده در حال آزمون کشش را نشان می‌دهد.

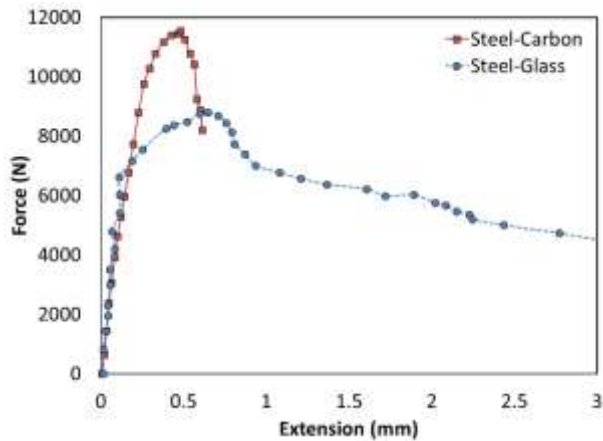


شکل ۳ نمونه در حال انجام آزمایش کشش

به منظور درک صحیح‌تر از داده‌های تجربی، می‌توان از تحلیل حساسیت استفاده نمود. به عبارت دیگر، برای شناسایی عکس- العمل یک خاصیت یا یک رفتار به داده‌های متغیر خروجی یک آزمایش و سپس بهینه‌سازی آن، می‌توان از روش تحلیل رگرسیون استفاده کرد. لذا با استفاده از تحلیل آماری ورودی‌ها و خروجی‌ها، تحلیل حساسیت انجام می‌گیرد که در نرم‌افزار مینی‌تب انجام گرفته است. به منظور آنالیز رگرسیون نیروی بیشینه (F_{max}) و مقدار جابجایی در نیروی بیشینه (D) برای نمونه‌های مختلف، از رابطه (۱) استفاده شده است.

$$F_{max} \text{ or } D = \alpha_0 + \alpha_1 L + \alpha_2 T + \alpha_3 C + \alpha_4 R \quad (1)$$

در این رابطه، L طول چسب، T ضخامت چسب، C نوع کامپوزیت (کربن یا شیشه) و R نرخ جابجایی است. همچنین، α_i مقادیر ثابت هستند. پس از تحلیل حساسیت و محاسبه مقادیر P-Value



شکل ۶ نمودارهای نیرو-جابجایی در اتصالات کربن- فولاد و شیشه- فولاد در نرخ بارگذاری ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه

همان گونه که از نتایج و تصاویر نمونه‌ها پس از شکست مشخص است، در نمونه کربن- اپوکسی با طول ناحیه چسب‌خور ۳۰ میلیمتر و ضخامت ناحیه چسب‌خور ۰/۲۵ میلیمتر، با افزایش نرخ جابجایی در بارگذاری کششی، دقیقاً مانند دو نمونه قبلی کربن- اپوکسی، ناحیه شکست از قسمت اتصال چسبی به قسمت مواد کامپوزیتی تغییر یافته است. لذا نتایج حاصل حاکی از آن است که با تغییر طول ناحیه چسب‌خور در نمونه کربن- اپوکسی، نمی‌توان اثر بارگذاری را تغییر داد. در واقع در هر یک از قطعات، در نرخ جابجایی ۰/۵ و ۵ میلیمتر بر دقیقه، نمونه‌ها از ناحیه چسب دچار شکست شدند اما در نرخ جابجایی ۵۰ میلیمتر بر دقیقه، نمونه‌ها از ناحیه مواد کامپوزیتی شکسته شدند.

نتایج حاصل از آزمون کشش نیز، برای نمونه‌های شیشه- اپوکسی، در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به جدول ۳ مشخص می‌شود که افزایش نرخ جابجایی در بارگذاری کششی، به تدریج باعث افزایش نیروی بیشینه در هر یک از نمونه‌های ساخته شده از شیشه- اپوکسی شده است. همچنین، به جز یک نمونه، افزایش نرخ جابجایی، هیچ تغییری در محل شکست ایجاد نکرده است. با توجه به مطالعه مراجع مختلف [۱۱، ۱۲، ۲۲، ۲۳]، افزایش نرخ بارگذاری، افزایش خواص کششی را در کامپوزیت- های شیشه- اپوکسی موجب شده است. افزایش ضخامت چسب نیز، تاثیر مستقیم و ثابتی بر نیروی بیشینه نداشته است. همچنین افزایش ضخامت چسب اثری بر تغییر محل شکست نداشته است.

با توجه به نتایج و تصویر نمونه‌ها بعد از شکست، در نمونه شیشه- اپوکسی با طول ناحیه چسب‌خور ۲۰ میلیمتر و ضخامت ناحیه چسب‌خور ۰/۴۰ میلیمتر، شکست‌ها بصورت یکسان رخ نداده است. در نرخ جابجایی ۰/۵ و ۵۰ میلیمتر بر دقیقه، دو نمونه

باعث کاهش نیروی بیشینه شده است. اما در نرخ‌های بیشتر، تغییری در مقدار نیروی بیشینه ظاهر نشد. همچنین افزایش طول ناحیه چسب‌خور، تاثیری بر تغییر محل شکست نداشته است.



شکل ۴ نمونه‌های اتصال کربن- فولاد پس از شکست برای نمونه C110-5 با نرخ بارگذاری ۵ میلیمتر بر دقیقه، نمونه C110-5 با نرخ بارگذاری ۵۰ میلیمتر بر دقیقه و نمونه C120-5 با نرخ بارگذاری ۵ میلیمتر بر دقیقه



شکل ۵ نمونه‌های اتصال شیشه- فولاد پس از شکست برای نمونه G120-5 با نرخ بارگذاری ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه، نمونه G120-2 با نرخ بارگذاری ۵ میلیمتر بر دقیقه و نمونه G120-2 با نرخ بارگذاری ۵۰ میلیمتر بر دقیقه

G120-2	۵	کامپوزیت	۸۶۷۲	۰/۵
G120-2	۵۰	کامپوزیت	۹۳۳۹	۰/۴
G120-5	۰/۵	کامپوزیت	۸۸۰۰	۰/۶
G120-5	۵	کامپوزیت	۸۰۹۳	۰/۴
G120-5	۵۰	کامپوزیت	۸۹۳۷	۰/۴
G120-8	۰/۵	کامپوزیت	۹۰۸۴	۰/۸
G120-8	۵	چسب	۵۲۴۸	۰/۱
G120-8	۵۰	کامپوزیت	۹۶۳۳	۰/۵

ژائو و همکارانش [۲۴] نشان دادند که در اتصال کامپوزیت الیاف کربن- فلز، پدیده لایه لایه شدن، کیفیت کامپوزیت و نحوه اتصال می تواند خواص ماده را تحت تاثیر بگذارد. سان و همکاران [۲۵]، اتصال کامپوزیت الیاف کربن- آلومینیوم را بررسی کردند و نشان دادند که جدایش دو ماده از یکدیگر، عامل اصلی خرابی است. روزگار و همکاران [۲۶]، عواملی همچون اندازه لوله و نوع چسب را بر خواص اتصال کامپوزیت- فلز، موثر دانستند.

برای درک بهتر تاثیر هر یک از پارامترهای ورودی بر خروجی های مسئله، تحلیل حساسیت با استفاده از تحلیل رگرسیون انجام پذیرفته است که نتایج آن در جداول ۵ و ۶ برای مقادیر نیروی بیشینه و تغییر طول در نیروی بیشینه، آورده شده است. لذا خروجی های این مدل رگرسیون، نیروی بیشینه و تغییر طول در نیروی بیشینه است. ورودی های مسئله نیز شامل نوع اتصال (کربن- اپوکسی و یا شیشه- اپوکسی)، نرخ جابجایی در بارگذاری کششی (۵/۰، ۵ و ۵۰ میلیمتر بر دقیقه)، طول (۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلیمتر) و ضخامت (۰/۱۰، ۰/۲۵ و ۰/۴۰ میلیمتر) برای ناحیه چسب است.

همان طور که در جداول ۵ و ۶ مشاهده می شود، P-Value برای تحلیل رگرسیون نیروی بیشینه و جابجایی، به ترتیب کمتر و بیشتر از ۰/۰۵ و مقدار R^2 بدست آمده نیز ۵۵/۹۹ و ۲۳/۳۰ درصد بوده که نشان دهنده آن است که رگرسیون به اندازه کافی، مناسب نبوده است. همچنین تنها مقدار P-Value برای پارامتر نرخ بارگذاری کمتر از ۰/۰۵ بوده که به این معنی است که نیروی بیشینه به نرخ بارگذاری حساس است. بقیه مقادیر P-Value برای پارامترهای دیگر بیشتر از ۰/۰۵ بوده که به این معنی است بجز نرخ جابجایی، سایر پارامترها همچون نوع کامپوزیت، طول چسب و ضخامت چسب بر روی نیروی بیشینه تاثیری ندارند. مطابق با جدول ۶، مقدار P-Value رگرسیون و همه پارامترهای ورودی بیشتر از ۰/۰۵ است که نشان دهنده رگرسیون نامناسب و پارامترهای غیر موثر بر جابجایی است.

مذکور از ناحیه مواد کامپوزیتی، دچار شکست شدند. اما در نرخ جابجایی ۵ میلیمتر بر دقیقه، نمونه از ناحیه اتصال، در واقع همان ناحیه چسب دچار شکستگی شده است. نتایج حاصل حاکی از آن است که در ضخامت های چسب خور ۰/۱۰ و ۰/۲۵ میلیمتر، رفتار ماده مانند نمونه های کربن- اپوکسی است. در واقع با تغییر ضخامت ناحیه چسب خور نمی توان اثر نرخ بارگذاری را تغییر داد و در هر یک از نمونه ها، قطعه از ناحیه مواد کامپوزیتی دچار شکست شده است. اما در یک نمونه با ضخامت ناحیه چسب خور ۰/۴۰ میلیمتر، فقط در نرخ جابجایی ۵ میلیمتر بر دقیقه، قطعه از ناحیه اتصال چسبی دچار شکست شده است. دلیل شکست این نمونه از ناحیه اتصال چسبی، مشکل در ساخت نمونه بوده است.

در نمونه های آزمون با جنس متفاوت، طول و ضخامت ناحیه چسب خور یکسان، با افزایش نرخ جابجایی، در نمونه های کربن- اپوکسی، نیروی بیشینه افزایش یافته است. در حالی که در نمونه های شیشه- اپوکسی، با افزایش نرخ جابجایی، نیروی بیشینه بصورت متعارف افزایش نداشته است. در نرخ های ثابت جابجایی در بارگذاری کششی، محل شکست در نمونه های کربن- اپوکسی و شیشه- اپوکسی متفاوت است. این مقایسه محل شکست، در جدول ۴ ارائه شده است. مطابق با پیشینه تحقیق، عوامل تاثیرگذار مختلفی برای کیفیت اتصالات کامپوزیت- فلز، بیان شده است.

جدول ۲ نتایج بدست آمده از آزمون کشش نمونه کربن- اپوکسی

شماره نمونه	نرخ	محل	نیروی	تغییر
	بارگذاری	خرابی	بیشینه	طول
	mm/min	-	N	mm
C110-5	۰/۵	چسب	۱۰۴۳۸	۰/۵
C110-5	۵	چسب	۱۰۰۶۵	۰/۲
C110-5	۵۰	کامپوزیت	۱۲۰۷۶	۲/۲
C120-5	۰/۵	چسب	۸۵۴۵	۱/۷
C120-5	۵	چسب	۸۶۳۳	۱/۷
C120-5	۵۰	کامپوزیت	۱۲۸۲۷	۰/۲
C130-5	۰/۵	چسب	۳۲۴۷	۰/۱
C130-5	۵	چسب	۸۳۳۹	۰/۱
C130-5	۵۰	کامپوزیت	۱۲۰۶۶	۰/۲

جدول ۳ نتایج بدست آمده از آزمون کشش نمونه شیشه- اپوکسی

شماره نمونه	نرخ	محل	نیروی	تغییر
	بارگذاری	خرابی	بیشینه	طول
	mm/min	-	N	mm
G120-2	۰/۵	کامپوزیت	۸۴۹۵	۰/۴

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، به تحلیل حساسیت اثر نرخ جابجایی در بارگذاری کششی بر نیروی بیشینه و تغییر طول در اتصال چسبی لوله‌های ساخته شده از مواد کامپوزیتی و فلزی، پرداخته شد. بطور کلی، تحلیل رگرسیون برای خروجی‌ها نسبت به ورودی‌ها، نتایج قابل قبولی ارائه نداد که این موضوع، لزوم تکرار بیشتر آزمون‌ها را مشخص می‌نماید. تغییر طول ناحیه چسب‌خور در اتصالات مذکور، از جنس کربن- اپوکسی و در نرخ جابجایی ثابت، نمی‌تواند ناحیه شکست را تغییر دهد. در نرخ‌های جابجایی کم (۵/۰ و ۵ میلی‌متر بر دقیقه)، شکست نمونه از ناحیه اتصال چسبی اتفاق می‌افتد و در نرخ جابجایی زیاد (۵۰ میلی‌متر بر دقیقه)، شکست نمونه از ناحیه مواد کامپوزیتی رخ می‌دهد.

افزایش نرخ بارگذاری در اتصالات شامل مواد کامپوزیتی از جنس کربن- اپوکسی، باعث تغییر ناحیه شکست از قسمت اتصال چسبی به قسمت مواد کامپوزیتی شد. اما افزایش نرخ بارگذاری در اتصالات شامل مواد کامپوزیتی از جنس شیشه- اپوکسی، تاثیری در تغییر ناحیه شکست نداشته است. ضمناً افزایش ضخامت چسب تاثیر مستقیم و ثابتی بر نیروی بیشینه نداشته است. همچنین، افزایش طول ناحیه چسب‌خور در نرخ‌های کمتر باعث کاهش نیروی بیشینه شده است، درحالی‌که در نرخ‌های بیشتر تغییری در مقدار نیروی بیشینه ظاهر نشده است. این موضوع به این دلیل است که در نرخ‌های بیشتر، محل شکست قطعات از اتصال چسبی به مواد کامپوزیتی تغییر می‌کند و بنابراین، نیروی بیشینه همان نیروی لازم برای شکست در کامپوزیت است که بدون تغییر باقی می‌ماند.

۵- مراجع

[1] Dragoni, E., Goglio, L., Adhesive stresses in axially-loaded tubular bonded joints - Part I: Critical review and finite element assessment of published models, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 47, pp. 35-45, (2013).

[2] Han, J., Yuan, H., Full debonding process of adhesively bonded composite and metallic pipe joints under torsion, *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2016, Article ID: 1237493, (2016).

[3] Clark, G., Wang, C. H., Review on the fatigue of composite hybrid joints used in aircraft structures, *Advanced Materials Research Advanced Materials Research*, Vols. 891-892, pp.1591-1596, (2014).

در انتها، برای پژوهش‌های بعدی پیشنهاد می‌گردد که با تکرار آزمون‌های تجربی، دقت مدل رگرسیون و تحلیل حساسیت افزایش یابد تا نتایج در سطح قابلیت اطمینان بیشتری، استخراج گردد. در این صورت، مواردی همچون ایرادات در فرایند ساخت نمونه که امری اجتناب ناپذیر است، پوشش داده می‌شود و تاثیری بسزایی بر تحلیل خروجی‌ها ایجاد نمی‌کنند. ضمناً بررسی خستگی [۲۷]، خوردگی و وجود فشار داخلی [۲۸]، تاثیر نرخ بارگذاری [۲۹]، ترک و شکست [۳۰]، میزان چسبندگی [۳۱]، در این گونه اتصالات و اتصالات پیچی [۳۲] و همچنین در بحث تعمیرات [۳۳-۳۵]، می‌تواند از پیشنهادات آتی برای ادامه کار باشد.

جدول ۴ مقایسه نتایج نمونه‌های کربن- اپوکسی و شیشه- اپوکسی

شماره نمونه	نرخ بارگذاری mm/min	محل خرابی	نیروی بیشینه N	تغییر طول mm
C120-5	۰/۵	چسب	۸۵۴۵	۱/۷
C120-5	۵	چسب	۸۶۳۳	۱/۷
C120-5	۵۰	کامپوزیت	۱۲۸۲۷	۰/۲
G120-5	۰/۵	کامپوزیت	۸۸۰۰	۰/۶
G120-5	۵	کامپوزیت	۸۰۹۳	۰/۴
G120-5	۵۰	کامپوزیت	۸۹۳۷	۰/۴

جدول ۵ نتایج تحلیل رگرسیون برای نیروی بیشینه

Source	DF	F-Value	P-Value
Regression	۴	۴/۱۴	۰/۰۲۲
L	۱	۴/۵۴	۰/۰۵۳
T	۱	۰/۳۷	۰/۵۵۵
C	۱	۱/۸۷	۰/۱۹۴
R	۱	۹/۷۶	۰/۰۰۸
Error	۱۳	-	-
Total	۱۷	R ² (%)	۵۵/۹۹

جدول ۶ نتایج تحلیل رگرسیون برای تغییر طول

Source	DF	F-Value	P-Value
Regression	۴	۰/۹۹	۰/۴۴۸
L	۱	۲/۸۱	۰/۱۱۷
T	۱	۰/۰۰	۰/۹۴۸
C	۱	۱/۱۱	۰/۳۱۲
R	۱	۰/۰۲	۰/۸۷۷
Error	۱۳	-	-
Total	۱۷	R ² (%)	۲۳/۳۰

- [16] Shahryarifard, M. M., Golzar, M., Safarabadi, M., Investigation of the geometrical parameters effect on laminated GFRP/steel circular tube joints, *1st International Conference on Composite Pipes, Vessels and Tanks*, 28-29 January, Tehran, Iran, (2015). (in Persian فارسی)
- [17] Pakzadian, P., Safarabadifarahani, M., Ganjiani, S. M., Reinforcement of welded metal tubes joints using polymeric laminated composites, *5th International Conference on Composites: Characterization, Fabrication and Application*, 20-21 December, Tehran, Iran, (2016).
- [18] Aliyari, M., Safarabadi, M., M. Shariat Panahi, Finite element analysis of piping composite joints under bending load, *5th International Conference on Composites: Characterization, Fabrication and Application*, 20-21 December, Tehran, Iran, (2016).
- [19] M. Aliyari, M. Safarabadi, Shariat Panahi, M., Optimization of fiber-reinforced plastic (FRP) /metal joints using the complex method, *5th International Conference on Composites: Characterization, Fabrication and Application*, 20-21 December, Tehran, Iran, (2016).
- [20] Groves, S. E., Sanchez, R. J., Lyon, R. E., Brown, A. E., High strain rate effects for composite materials, *Composite Materials: Testing and Design, ASTM STP 1206*, Editor: E. T. Camponeschi. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Vol. 11, pp. 162-176, (1993).
- [21] Hsiao, I. M., H. M., Cordes, R. D., High strain rate effects on polymer, metal and ceramic matrix composites and other advanced materials, *American Society of Mechanical Engineers*, Vol. 48, pp. 167-177, (1995).
- [22] Daniel, I. M., Liber, T., Testing of fiber composites at high strain rates, *2nd International Conference on Composite Materials*, Toronto, Canada, pp. 1003-1018, (1978).
- [23] Daniel, I. M., Liber, T., Strain rate effects on the mechanical properties of fiber composites, *Report NASA CR-135087, Part 3*, (1976).
- [24] Zhao, W., Zhang, W., Duan, Z., Yang, F., Xu, J., Torsion properties of carbon fiber reinforced polymer composite-metal transmission shaft based on delamination damage analysis, *Acta Materiae Compositae Sinica*, Vol. 38(5), pp. 1476-1486, (2021).
- [25] Sun, H., Kosukegawa, H., Takagi, T., Uchimoto, T., Hashimoto, M., Takeshita, N., Electromagnetic pulse-induced acoustic testing and the pulsed guided wave propagation in composite/metal adhesive
- [4] Ascione, F., Mancusi, G., Axial/bending coupled analysis for FRP adhesive lap joints, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, Vol. 17, No. 2, pp. 85-98, (2010).
- [5] Banea, M. D., da Silva, L. F. M., Adhesively bonded joints in composite materials: An overview. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Journal of Materials: Design and Applications*, Vol. 223, No. 1, pp. 1-18, (2009).
- [6] Gan, Y. X., Effect of interface structure on mechanical properties of advanced composite materials, *International Journal of Molecular Sciences*, Vol. 10, No. 12, pp. 5115-5134, (2009).
- [7] Meguid, S. A., Sun, Y., On the tensile and shear strength of nano-reinforced composite interfaces, *Materials and Design*, Vol. 25, No. 4, pp. 289-296, (2004).
- [8] F. Mortensen, O. T. Thomsen, Analysis of adhesive bonded joints: A unified approach, *Composites Science and Technology*, Vol. 62, No. 7, pp. 1011-1031, (2002).
- [9] Mortensen, F., Thomsen, O. T., Coupling effects in adhesive bonded joints, *Composite Structures*, Vol. 56, No. 2, pp. 165-174, (2002).
- [10] Vashchenko, A., Spiridonova, I., Sukhovaya, E. V., Deformation and fracture of structural materials under high-rate strain, *Metalurgija*, Vol. 39, No. 2, pp. 89-92, (2000).
- [11] Staab, G. H., Gilat, A., High strain rate response of angle-ply glass/epoxy laminates, *Journal of Composite Materials*, Vol. 29, pp. 1308-1328, (1995).
- [12] Gilat, G. H. A., High strain rate characterization of angle-ply glass/epoxy laminates, *9th International Conference on Composite Materials*, Madrid, Spain, pp. 278-285, (1993).
- [13] Roberts, S., Harding, J., Effect of strain rate on the tensile failure of glass-fiber braided tubes, *Journal of Physique IV*, Vol. 1, pp. 353-359, (1991).
- [14] Shahryarifard, M. M., Golzar, M., Safarabadi, M., Novel parameters in load capacity and failure of coaxial steel tubes jointed by wrapped GFRP sleeve, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 82, pp.79-89, (2018).
- [15] Shahryarifard, M. M., Golzar, M., Safarabadi, M., Optimization of laminated GFRP pipe/steel tube joints under axial tensile loads, *1st International Conference on Composite Pipes, Vessels and Tanks*, 28-29 January, Tehran, Iran, (2015).(in Persian فارسی)

- [31] Osouli-Bostanabad, K., Tutunchi, A., M., Eskandarzade, Kianvash, A., Numerical and experimental investigation on bonding strength optimization of glass fibers-reinforced epoxy composites on a structural steel substrate, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 19, No. 2, pp. 387-396, (2019).
- [32] Galinska, A., Mechanical joining of fibre reinforced polymer composites to metals - A Review. Part I: Bolted joining, *Polymers*, Vol. 12, No. 10, Article ID: 2252, (2020).
- [33] Cherpakov, A. V., Chebakov, M. I., Zecheru, G., Dumitrescu, A., Modeling of corrosion in filler defect in the repair of pipes overlay composite bandage, *Advanced Materials*, Editors: I. Parinov, S. H. Chang, M. Jani, Springer, Vol. 193, (2017).
- [34] da Rocha, M. L., M. C., de O. Leite, da C. Ferreira, E. P., Melo, J. D. D., Barbosa, A. P. C., Accelerated aging effects in composites used as repair for pipes in oil industry, *Polymer Composites*, DOI: 10.1002/pc.26271, (2021).
- [35] Echtermeyer, A. T., Sund, O. E., Ronold, K. O., Moslemian, R., Hassel, P. A., A new recommended practice for thermoplastic composite pipes, *21th International Conference on Composite Materials*, 20-25 August, Xi'an, China, (2017).
- bonding specimens, *Composites Science and Technology*, Vol. 201, Article ID: 108499, (2021).
- [26] Rouzegar, J., Niknejad, A., S. M., Elahi, Elahi, S. A., Experimental investigation into the energy absorption of composite-metal tubes subjected to lateral load, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, Vol. 44, pp. 585-598, (2020).
- [27] Abdel Wahab, M. M., Fatigue in adhesively bonded joints: A review, *International Scholarly Research Notices*, Vol. 2012, Article No. 746308, (2012).
- [28] Lees, J. M., Behavior of GFRP adhesive pipe joints subjected to pressure and axial loadings, *Composite Part A*, Vol. 37, No. 8, pp. 1171-1179, (2006).
- [29] Azadi, M., Saeedi, M., Shirazabad, M.M., Lopez-Crespo, P., Sensitivity analysis of fracture behavior in carbon-epoxy composite at different displacement rates under mode I tensile loading by regression analysis, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 53, No. 4, pp. 15-15, (2021).
- [30] Maleki, S., Andakhshideh, A., Seyfi, A., Experimental and numerical investigation of second mode of failure in unlike end notch flexure samples, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 52, No. 8, pp. 2093-2106, (2020).