



بررسی تجربی افزایش استحکام استاتیکی اتصال ترکیبی فلز-کامپوزیت با به کارگیری پین‌های واسط جدید در روش کاملد

روح‌اله حسینی^{۱*}، مسعود یگانه سرچشمه^۲، محمد صابری مقدم^۳، محمدجواد زینل بیک^۴

^۱استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

^۲کارشناس ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

^۳کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

^۴دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

برجسته‌ها

- بررسی میزان افزایش استحکام کششی اتصال فلز-کامپوزیت به روش ترکیبی جدید (کاملد)
- افزایش استحکام قابل توجهی نسبت به نمونه بدون پین
- شکست تدریجی در نمونه پین‌دار و شکست ناگهانی در نمونه بدون پین

چکیده گرافیکی



مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۶

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۰۲

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۵

ارائه برخط: ۱۴۰۱/۰۹/۲۱

*نویسنده مسئول:

r.hosseini.mech@gmail.com

کلیدواژه‌ها:

کاملد

کامپوزیت

اتصال ترکیبی

اتصال فلز به کامپوزیت

استحکام کششی

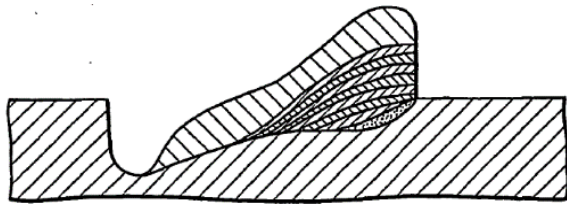
چکیده

استفاده از روش‌های متداول چسبی در اتصال فلز به کامپوزیت، منجر به ایجاد اتصالات ضعیف می‌گردد که با کمترین بار دچار جدایش می‌شود. هدف از پژوهش حاضر بررسی میزان افزایش استحکام کششی اتصال فلز آلومینیوم به کامپوزیت با الیاف شیشه و رزین اپوکسی به روش ترکیبی جدید (کاملد) که مزایای هر دو روش چسبی و مکانیکی (پینی) را شامل می‌شود، می‌باشد. در این روش از پین‌هایی که در سازه جا زده شده‌اند، به عنوان واسط و به منظور انتقال بار استفاده شده و هدف بررسی میزان تغییرات استحکام با انواع پین‌های واسط مختلف می‌باشد. لذا پین‌ها در زمان لایه‌چینی الیاف کامپوزیت، از میان آن‌ها عبور داده شده و سپس فرایند پخت تکمیل گشته است. از این رو بخشی از سازه فلزی در میان تار و پود کامپوزیت رسوخ کرده و انتظار می‌رود استحکام افزایش یابد. چهار مدل اتصال بدون پین (چسبی خالص)، پین با قطر ۱/۲ میلی‌متر، پین با قطر ۱/۶ میلی‌متر و پین کلگی‌دار با قطر ۱/۲ میلی‌متر مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج استحکام اتصال‌ها با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج تست کشش نشان داده است که این نوع اتصال، افزایش استحکام قابل توجهی نسبت به نمونه بدون پین داشته و در سه نوع اتصال با ویژگی‌های مختلف بیان شده، به ترتیب ۳۳۵٪، ۶۰۹٪ و ۴۲۱٪ افزایش استحکام مشاهده شده است. همچنین شکست در نمونه‌های پین‌دار به صورت تدریجی و در نمونه بدون پین به طور ناگهانی اتفاق افتاده است.

۱- مقدمه

نمی‌کنند و لذا محققین به دنبال برطرف کردن این گلوگاه بوده‌اند.

در سال ۱۹۹۹ شرکت بوئینگ اولین طرح تقویت در راستای ضخامت را ثبت اختراع کرد [۷]. این طرح که با عبور پین‌هایی در جهت عمود بر الیاف، موجب تقویت سازه می‌گردد را زدپین می‌نامند. در این طرح به هیچ‌عنوان نباید الیاف قطع و پاره شوند، بلکه باید در ناحیه پین به دور آن منحرف‌شده و عبور نمایند. موریتز [۵، ۶] بررسی جامعی از خواص مکانیکی مواد مرکب چندلایه با تقویت به روش زدپین را انجام داد و به این نتیجه رسید که استفاده از پین‌های تقویتی در راستای ارتفاع، می‌تواند در حدود حداقل ۵۰٪ استحکام اتصال را افزایش دهد. فای اسمیت [۸] با الهام از مفهوم زدپین، اولین ایده جدید خود را برای اتصال فلز فولاد به کامپوزیت الیاف شیشه‌ای بررسی نمود. در این کار با عملیاتی با نام حکاکی سطح به وسیله جوش الکترون بیم بر روی لبه اتصال قسمت فلزی، برآمدگی‌هایی را ایجاد نمودند (شکل ۱) که شبیه پین در ناحیه اتصال عمل می‌کردند (شکل ۲). همچنین اسمیت [۹] در پژوهشی دیگر بر روی تیتانیوم و الیاف کربنی، استحکام کششی این نوع اتصال را بررسی نمود. تو [۴] در سال ۲۰۱۱ با بررسی ارتفاع این برآمدگی‌ها به این نتیجه رسید که هر چه ارتفاع پین بلندتر باشد، استحکام بیشتری حاصل خواهد شد.



شکل (۱): ایجاد برآمدگی روی سطح فلزی [۸].



مواد مرکب از ترکیب دو یا چند ماده مختلف که هر یک خواص مکانیکی و فیزیکی منحصر به فرد خود را دارند، تشکیل شده‌اند. استفاده از مواد مرکب پلیمری در سازه‌ها باعث کاهش ۶۰ تا ۸۰ درصدی وزن قطعات در مقایسه با فلز فولاد و ۲۰ تا ۵۰ درصدی در مقایسه با فلز آلومینیوم شده است. علاوه بر مزیت چشمگیر کاهش وزن سازه، مواد مرکب بر اساس مقاومت و سختی در جهت دلخواه می‌توانند طراحی و ساخته شوند [۱، ۲]. چندلایه‌های مرکب (کامپوزیت‌ها) در قیاس با فلزات مقاومت کمی در راستای ضخامت دارند و تحمل نیروی لهیدگی آن‌ها پایین می‌باشد. این دو ماده یعنی پلیمر تقویت‌شده با الیاف که ارتوتروپ و فلزات که ایزوتروپ می‌باشند، ویژگی‌ها و روش‌های تولید متفاوتی نیز دارند که این مسئله منجر به ایجاد مشکلاتی در اتصال این دو ماده می‌شود. از این رو مهندسان باید در طراحی توجه خاصی داشته باشند. مقاومت ضعیف در راستای ضخامت و همچنین مقاومت پایین حرارتی رزین‌های پلیمری در زمینه مواد مرکب باعث شدند که هنوز فلزات سهم قابل توجهی در ساخت سازه‌ها داشته باشند؛ بنابراین بررسی اتصال بهینه، مستحکم و باصرفه اقتصادی توجیه‌پذیر مابین کامپوزیت‌ها و فلزات مورد نیاز می‌باشد [۳]. ایجاد اتصال فلز و کامپوزیت در بسیاری از سازه‌ها اجتناب‌ناپذیر است. به دلیل اینکه در بسیاری از سازه‌ها و ماشین‌آلات، موتور و اجزای متحرک از آلیاژهای فلزی تولید شده و برای سبک‌سازی و افزایش استحکام بدنه و دیگر قسمت‌ها، این بخش‌ها باید از کامپوزیت ساخته شوند. لذا فلز و کامپوزیت باید در محلی با یکدیگر تلاقی داشته باشند و بین آن‌ها اتصال ایجاد شود. بهبود عملکرد مواد تشکیل‌دهنده یک سیستم ترکیبی در سطح ماکروسکوپی شامل بهبود رفتار خستگی، مقاومت در برابر ضربه و کاهش وزن یا بهبود نسبت مقاومت به وزن است [۴].

اتصال فلز و کامپوزیت در کنار یکدیگر در صنایع مختلف بسیار پرکاربرد بوده و در سازه‌هایی نظیر زیردریایی‌ها و کشتی‌ها [۴] و ساختارهای هواپیماهای جنگی [۵، ۶] مورد استفاده قرار می‌گیرد. اتصالات رایج در این زمینه اتصالات چسبی می‌باشند که استحکام چندانای ایجاد

پارکز و همکارانش [۱۳] در سال ۲۰۱۴ با روش تفجوشی مستقیم فلز با لیزر، برآمدگی‌هایی را بر روی تیتانیوم ایجاد نمودند که همانند فرآیند زدپین عمل می‌نماید. همان‌طور که در شکل ۵ آمده است، پین‌ها به‌صورت مخروطی شکل هستند.



شکل (۵): ایجاد پین با روش ساخت افزایشی [۱۳].

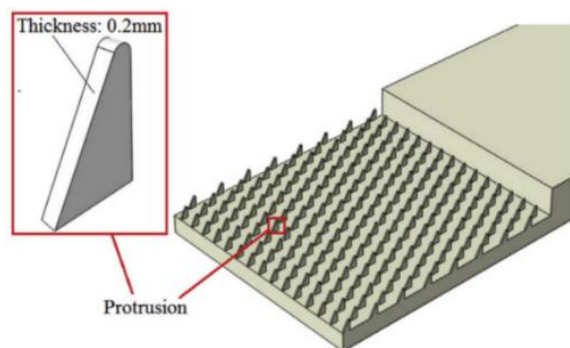
هافمن و اسکار [۱۴] در سال ۲۰۱۸، در مورد عملکرد کششی زدپین‌های مستطیلی و دایره‌ای در اپوکسی تقویت‌شده با فیبرکربنی مطالعه کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که باوجود زدپین‌ها، ازهم‌گسیختگی اپوکسی در برابر تنش‌های برشی تغییر کرده و مقاومت بیشتری در برابر تنش برشی نشان می‌دهد.

در سال ۲۰۱۹ وانگ و همکاران [۱۵]، ارتقاء خواص برشی بین لایه‌ای کامپوزیت زمینه آلومینیمی تقویت‌شده فیبرکربنی را با استفاده از زدپین‌ها موردبررسی قرار دادند. به دلیل ایجاد فاز مخرب در فصل مشترک زدپین با کامپوزیت استحکام خمشی تحت فشار اعمالی بر لایه‌ها کاهش می‌یابد، اما در مورد استحکام کششی بحث نکردند.

در سال‌های اخیر، استفاده از این مفهوم در مقیاس میکروسکوپی هم موردتوجه بسیاری از محققین بوده است و مفهوم استفاده از میکروپین‌ها در سال ۲۰۲۰، توسط سارانتینوس [۱۶] برای اتصال فلز به کامپوزیت و کامپوزیت به کامپوزیت، موردبررسی قرار گرفت و ملاحظه شد که تأثیر قابل‌توجهی در افزایش استحکام اتصال به دنبال دارد. همچنین روش‌های مشابه و خلاقانه‌ای که به نحوی بتوانند درگیری بین فلز و کامپوزیت را در محل اتصال افزایش دهند و بدین ترتیب منجر به افزایش استحکام اتصال گردند، موردتوجه واقع شده‌اند [۱۷-۲۰]. روش مورداستفاده در مقالات قبلی، مبتنی بر استفاده از تعدادی پین یا برآمدگی

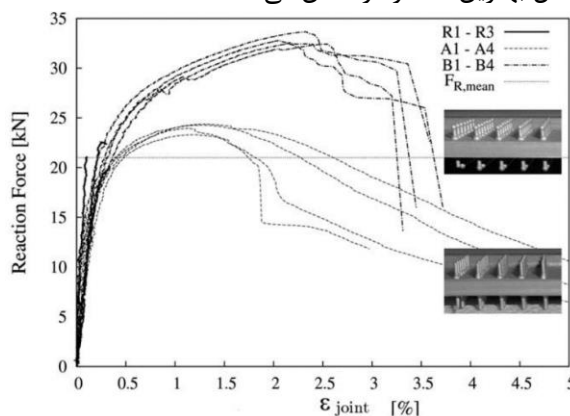
شکل (۲): برآمدگی‌های روی سطح فولادی [۹].

وی ژانگ و همکارانش [۱۰] در سال ۲۰۱۵ جهت‌های مختلف لایه‌چینی را بررسی نمودند که بهینه‌ترین طرح لایه‌چینی را استفاده از ۵۵ درصد لایه‌ها با زاویه ۴۵ درجه ثبت نمودند شکل ۳ طرحی را برای لایه‌چینی در زوایای خاص هنگام استفاده از روش حکاکی سطح را نشان می‌دهد. همچنین وی ژانگ [۱۱] در سال ۲۰۱۷ اثر تعداد برآمدگی را در سطح اندازه یکسان بررسی نمودند که بهترین نتیجه آن استفاده از تعداد هرچه بیشتر پین می‌باشد.



شکل (۳): شکل خاصی از برآمدگی با روش حکاکی سطح [۱۰].

یوزنیک و همکارانش [۱۲] از روش جوش نوینی با نام انتقال فلز سرد که پتنت آن توسط شرکت فرنیوس در سال ۲۰۰۹ ثبت‌شده بود، برای اتصال پین‌های استوانه‌ای شکل و سرتوپی شکل بر روی سطح فلزی استفاده نمودند. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، پین‌های با سرتوپی شکل بهترین عملکرد را نشان می‌دهند.

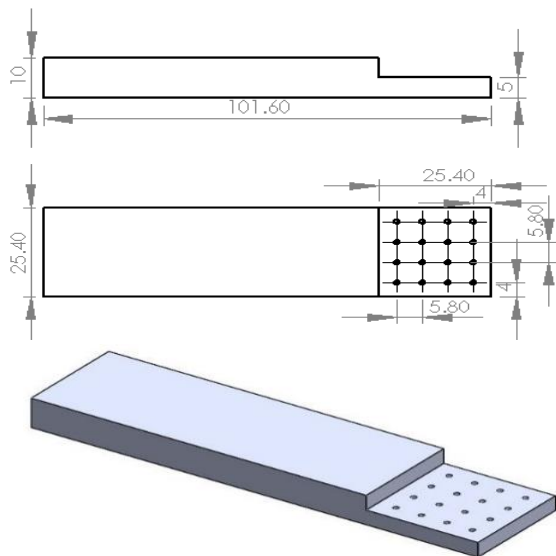


شکل (۴): پین‌های با روش انتقال فلز سرد [۱۲].

شکل (۶): سوراخ‌کاری قسمت فلزی به‌منظور جا زدن پین‌ها به‌صورت فشاری.

در بیشتر مراجع بررسی‌شده، طرح‌های اتصال محدودیت در ضخامت دارند، به‌طوری‌که فقط در ضخامت‌های زیر ۲ میلی‌متر کاربرد دارند، ولی با توجه به انتخاب دلخواه طول پین، پژوهش حاضر برای تمام ضخامت‌های اتصال قابل‌استفاده می‌باشد. در این کار مدنظر است پین‌ها با دو قطر مختلف ۱/۲ و ۱/۶ میلی‌متر و پین با سرگلگی اضافه موردبررسی و تحلیل قرار گیرد.

مشخصات اتصال مطابق استاندارد ASTM-D5868-01 در نظر گرفته شد [۲۲]. برای هر یک از قسمت‌های فلزی و کامپوزیتی طول ۱۰۱/۶ با عرض ۲۵/۴ میلی‌متر و ضخامت ۱۰ میلی‌متر انتخاب گردیده که ۲۵/۴ میلی‌متر از طول به ناحیه اتصال اختصاص داده می‌شود (شکل ۷). برای طرف فلزی از آلومینیوم ۷۰۷۵ استفاده گردید، همچنین برای ساخت چندلایه کامپوزیتی از الیاف تک‌جهته شیشه با چگالی سطحی ۴۰۰ گرم بر مترمربع و رزین ترموست اپوکسی با نام تجاری EPL1012 و سخت‌کننده EPH 112 استفاده شده است. مدل اتصال لبه‌ای پله‌دار با ضخامت ۵ میلی‌متر برای تمامی اتصالات بررسی خواهد شد.



شکل (۷): هندسه و مشخصات قسمت فلزی.

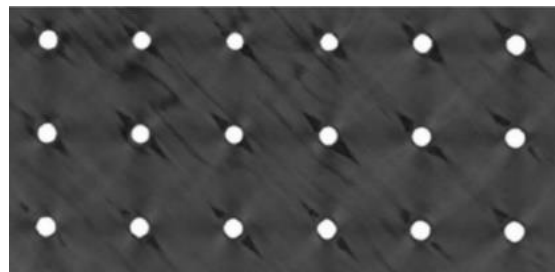
۳- فرایند ساخت

واسط که بتواند داخل الیاف نفوذ کرده و استحکام اتصال را افزایش دهد، اصطلاحاً به نام روش کاملد شناخته می‌شود [۲۱].

همان‌طور که پیشینه پژوهش در زمینه اتصالات نوین نشان می‌دهد، استفاده از روش اتصال موسوم به کاملد که بر مبنای ایجاد زدپین می‌باشد، می‌تواند تا حدود زیادی استحکام اتصال را افزایش دهد. متأسفانه در ایران روش‌های مبتنی بر لیزر، انتقال فلز سرد، ساخت افزایشی فلزی و ... وجود ندارند و یا هزینه زیادی را در بر دارند و لذا باید روش کاملد بومی‌سازی شده و قابلیت تجاری‌سازی پیدا کند. چراکه روش‌های اشاره‌شده در مقالات، حتی در دنیا هزینه‌های زیادی را تحمیل کرده و لذا مشکلات زیادی را برای تجاری‌سازی به دنبال خواهند داشت. در این پژوهش سعی بر آن است تا روش ارزان‌تری که بتواند نقش پین واسط را ایفا کند، استفاده‌شده و مورد ارزیابی قرار گیرد تا بتواند جایگزین مناسبی برای دیگر روش‌های هزینه‌بر کاملد شود. در این مقاله این کار به‌صورت تجربی موردبررسی و تحلیل قرار گرفته و استحکام استاتیکی اتصال به این روش و روش‌های سنتی مورد مقایسه قرار گرفته است.

۲- روش تجربی جدید

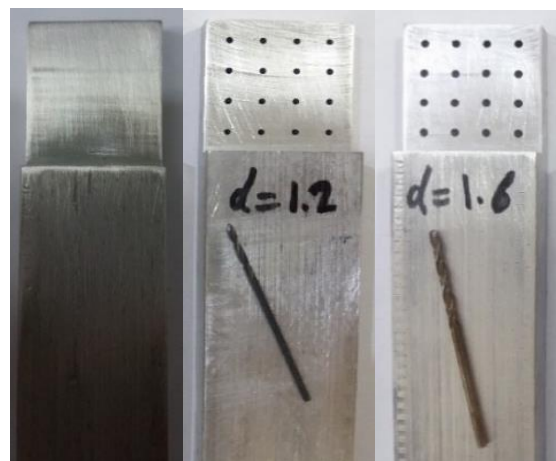
در این مطالعه برای اتصال فلز به کامپوزیت از مفهوم زدپین برای اتصال کمک گرفته می‌شود، به‌طوری‌که پین‌های فولادی در جهت ضخامت اتصال، به کار گرفته شدند. شکل ۶ نمایی از سطح فلز سوراخ‌کاری شده را نمایش می‌دهد. پین‌ها نقش فرآیند زدپین را در این مطالعه ایفا می‌کنند. بعد از جا زدن تمامی پین‌ها در ناحیه اتصال در طرف فلزی، در قسمت کامپوزیتی الیاف بدون قطع شدن و آسیب دیدن به دور پین‌ها جانمایی خواهند شد.



۳-۱- پین گذاری و مدل های اتصال

فلز آلومینیومی بعد از برش کاری، با ماشین کنترل عددی کامپیوتری (CNC) سوراخ کاری گردید. فرآیند سوراخ کاری به لحاظ دقت بیشتر در اندازه قطر سوراخ‌ها، در دو مرحله صورت پذیرفت. در مرحله اول ۱۶ سوراخ با ترتیب 4×4 به قطر ۱ میلی‌متر ایجاد گردید و در مرحله دوم همان سوراخ‌ها بسته به نمونه موردنظر، در اندازه قطرهای $1/2$ و $1/6$ میلی‌متر سوراخ‌ها شکل گرفتند. فاصله مرکز سوراخ‌های کناری تا لبه قطعه ۴ میلی‌متر و فاصله مراکز سوراخ‌ها $5/8$ میلی‌متر هستند (شکل ۸).

چهار مدل اتصال در این کار مورد بررسی قرار گرفتند. ۳ مدل پین‌دار و یک مدل R بدون پین به جهت مقایسه با آن‌ها ساخته شدند. هر ۳ مدل پین‌دار دارای ۱۶ سوراخ هستند، مدل A با قطر $1/2$ میلی‌متر و مدل B با قطر $1/6$ میلی‌متر و یک مدل A^+ با همان قطر $1/2$ میلی‌متر و با کلاگی اضافه مورد آزمایش قرار گرفتند. مطابق شکل ۹ پین‌های فولادی در ناحیه اتصال به داخل سوراخ‌ها، با پرس جازده شدند.



شکل (۸): نمونه با قطرهای مختلف.



شکل (۹): پرس پین‌ها.

۳-۲- لایه گذاری

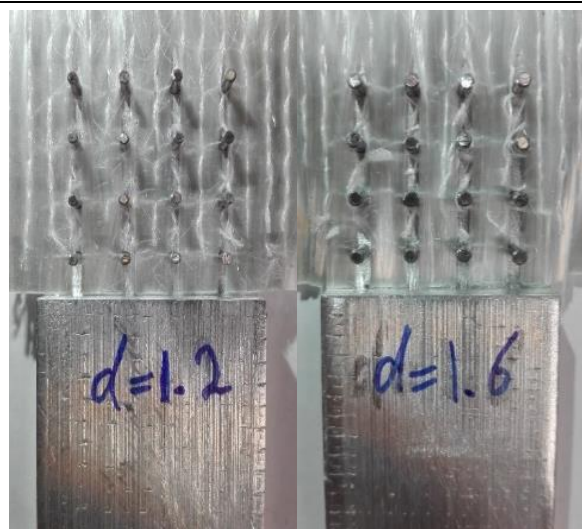
فرآیند لایه‌چینی دستی برای ساخت چندلایه کامپوزیتی انتخاب گردید. به جهت حذف اثرات متقابل برشی-محوری و خمشی-غشایی در ماتریس‌های سختی نیرو و ممان، از چندلایه‌های بالانس استفاده گردید. ۲۸ لایه الیاف با ضخامت یکسان برای قسمت کامپوزیتی با ترتیب ذیل لایه‌چینی شدند.

[45+/45-/0/90/0/45+/45-/45-/45+/0/90/0/45-/45+]Sym

در جدول ۱ مقدار استفاده هر یک از زوایای الیاف در چندلایه آمده است. مطابق [۱۰]، بهینه‌ترین طرح لایه‌چینی را استفاده از ۵۵ درصد لایه‌ها با زاویه ۴۵ درجه ثبت نمودند و همچنین تحقیقات آلن باکر نشان می‌دهد که برای یک چندلایه در اتصالات، استفاده حدود ۵۰ درصد از لایه‌های ۴۵ درجه بهترین شبکه‌بندی می‌باشد [۲۳]، بدین ترتیب در لایه‌گذاری کار حاضر از ۵۷/۱ درصد لایه‌های ۴۵ درجه استفاده گردید. الیاف تک‌جهته شیشه در ابعاد مورد نیاز بریده شدند. برای ساخت کامپوزیت، لایه به لایه الیاف با دقت زیاد از اطراف پین‌ها عبور داده شدند (شکل ۱۰).

جدول (۱): درصد استفاده الیاف در کامپوزیت

جهت الیاف	تعداد لایه	استفاده در کامپوزیت
۰	۸	۲۸/۶٪
۴۵	۱۶	۵۷/۱٪
۹۰	۴	۱۴/۳٪



شکل (۱۰): انحراف الیاف به دور پین‌ها.

است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در مدل اتصال بدون پین R، ۷ درصد خطا و در سه مدل دیگر خطا کمتر از ۱ درصد می‌باشد. جابجایی در مدل اتصال R به دلیل عدم وجود پین، زیر ۱ میلی‌متر است و شکست به‌صورت ناگهانی و لحظه‌ای نیز می‌باشد. در دیگر مدل‌های اتصال به‌دلیل وجود پین تا لحظه شکست و گسیختگی کامل با کرنش بیشتری همراه بود.

جدول (۲): نتایج تست‌های کشش

نمونه اتصال	استحکام نهایی (N)	کششی جابجایی در بار نهایی (mm)
T-R1	۲۵۰۱/۲	۰/۸۱۶
T-R2	۲۶۸۰/۶	۰/۷۹۵
T-A1	۱۱۲۷۲/۶	۲/۴۰۶
T-A2	۱۱۲۶۵/۲	۲/۳۷۶
T-A+1	۱۳۵۲۵/۶	۲/۸۴۸
T-A+2	۱۳۴۹۱/۲	۱/۷۰۶
T-B1	۱۸۴۳۲/۲	۴/۳۷۴
T-B2	۱۸۳۳۳/۹	۴/۱۶۴

۵- تحلیل مدل‌ها

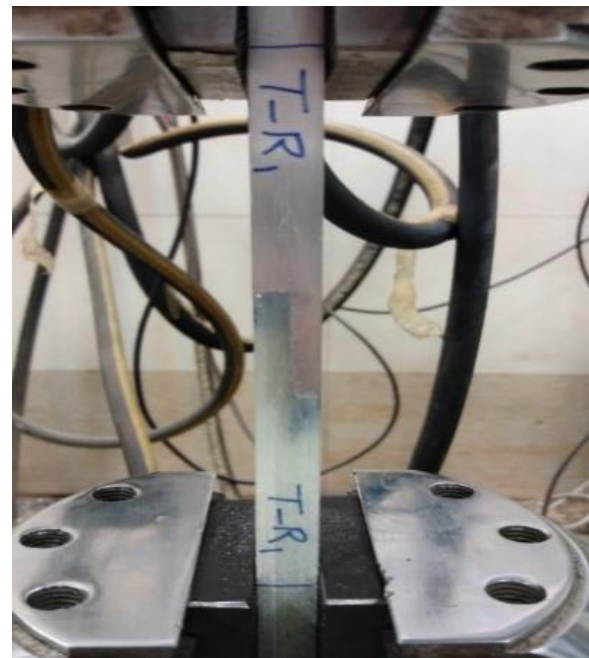
۵-۱- تحلیل مدل اتصال R

در شکل ۱۲ منحنی نیرو-جابجایی دو نمونه بدون پین R_1 و R_2 مشاهده می‌گردد. رفتار این نوع اتصال از ابتدا تقریباً به‌صورت خطی می‌باشد و در ماکزیمم تحمل نیرو، شکست به‌صورت لحظه‌ای و ناگهانی اتفاق می‌افتد. همان‌طور که مشاهده می‌شود جابجایی در محدوده ۰/۸ میلی‌متر می‌باشد.

بعد از اتمام لایه‌چینی و پخت اولیه مطابق دیتاشیت، چندلایه به مدت ۷ روز برای کامل مستحکم‌تر شدن در دمای اتاق قرار گرفت و بعد از آن به‌منظور کیفیت مطلوب و عدم تورق در چندلایه، برش‌کاری با واترجت مطابق اندازه موردنظر انجام گرفت.

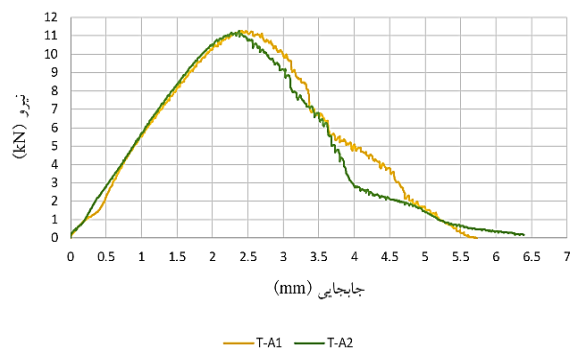
۴- تست کشش و نتایج آن

آزمایش‌های انجام‌گرفته در این پژوهش با استفاده از دستگاه سروهیدرولیک سنتام SAF-50 می‌باشد که توانایی اعمال بار کششی تا ۵۰ کیلو نیوتن را دارد. تست‌های کششی با روش کنترل جابجایی انجام گرفتند و نرخ باز شدن فک‌های دستگاه با جابجایی ۰/۵ میلی‌متر در دقیقه تنظیم گردید. در تمامی تست‌ها قسمت فلزی به فک بالا و قسمت کامپوزیتی به فک پایین بسته شدند (شکل ۱۱) و نمونه‌ها با نهایت دقت در هم‌محور بودن با جهت بارگذاری، به لحاظ جلوگیری از خمش مطابق استاندارد ASTM - E1012 بسته شدند. [۲۴]



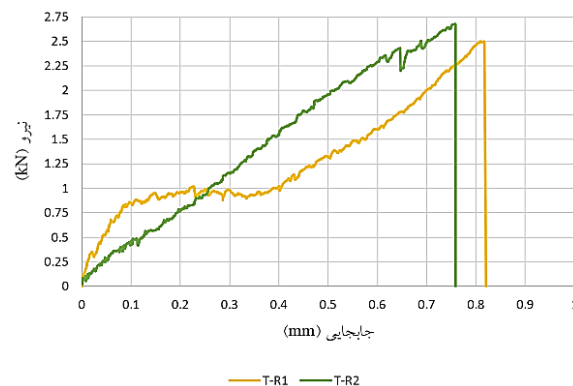
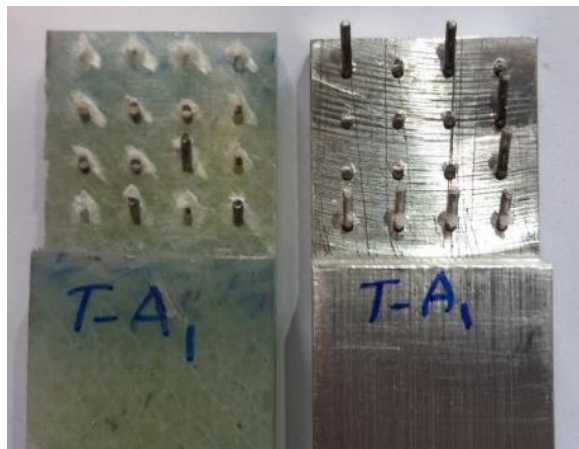
شکل (۱۱): نمونه بسته‌شده قبل از شروع تست.

استحکام کششی نهایی ۴ مدل اتصال و با دو بار تکرار برای هر مدل، در مجموع ۸ نمونه تست کشش در جدول ۲ آمده‌اند. مقدار جابجایی در بالاترین حد تحمل نیرو نیز آمده



شکل (۱۴): منحنی نیرو-جابجایی مدل اتصال A

در شکل ۱۵ مشخص است که نیمی از پین‌ها از مقطع بریده و گسیخته شده‌اند و ۸ پین دیگر بریده نشده‌اند ولی مقداری کج و به سمت خارج منحرف گشته‌اند. پین‌هایی که خم شده‌اند و تغییر زاویه نسبت به قائمه داده‌اند در حدود ۴۵ درجه تا ۶۰ درجه نیز می‌باشد. شکل پین قبل از اعمال بارگذاری و تغییر حالت پین بعد از بارگذاری در شکل ۱۶ نمایان می‌باشد. در طرف کامپوزیتی، اطراف پین گسیختگی لهیدگی غالب است تا گسیختگی کششی و یا گسیختگی برشی. ناحیه سفیدرنگ اطراف پین‌ها در طرف کامپوزیتی، نشان‌دهنده گسیختگی لهیدگی نیز می‌باشد که در شکل ۱۵ مشخص است. در طرف کامپوزیتی نمونه A_1 اثری از تورق در چندلایه مشاهده نگردید.



شکل (۱۲): منحنی نیرو-جابجایی مدل اتصال R

مدل شکست نمونه‌های بدون پین در شکل ۱۳ قابل مشاهده هستند. شکست و خرابی به صورت جدایش از ناحیه اتصال رزین و سطح فلزی می‌باشد. پس از بررسی نمونه ملاحظه گردید هیچ‌گونه آثاری از خرابی و یا تورق در چندلایه کامپوزیتی مشاهده نمی‌شود.



شکل (۱۳): مد خرابی نمونه R_1 .

۲-۵- تحلیل مدل اتصال A

منحنی نیرو-جابجایی دو نمونه پین‌دار A_1 و A_2 با قطر ۱/۲ میلی‌متر در شکل ۱۴ مشاهده می‌گردد. رفتار این نوع اتصال از ابتدا خطی می‌باشد و بعد از عبور در بالاترین حد تحمل نیرو، شکست به صورت تدریجی رخ می‌دهد. در حین تست کشش، صدای شکستن تعدادی از پین‌ها که از مقطع بریده‌اند، به صورت واضح شنیده می‌شد. مشاهده می‌گردد که جابجایی و کشیدگی این مدل اتصال در محدوده ۶ میلی‌متر می‌باشد.

شکل (۱۷): گسیختگی لهیدگی در طرف کامپوزیتی نمونه

A₁



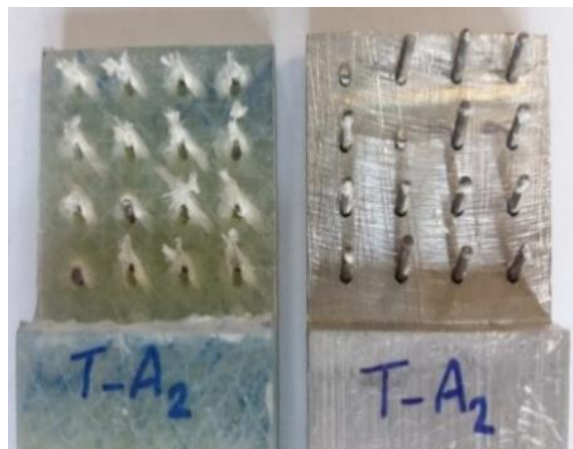
شکل (۱۸): اثر بیضوی شدن سوراخ و سطح شکست

پین‌ها.

در مجموع، لهیدگی در هر دو طرف کامپوزیتی و آلومینیومی اتفاق افتاده است. حالت خرابی به این صورت است که در مرحله اول، پین اثر لهیدگی را در هر دو طرف می‌گذارد و در مرحله دوم بعضی از پین‌ها بریده و یا تعدادی دیگر منحرف و خم می‌شوند و در مرحله سوم، جدایش اتصال رخ می‌دهد.

برای بررسی دقیق‌تر سطح شکست پین‌ها، سطح یکی از پین‌هایی که از مقطع بریده شده با میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM) تصویربرداری شده است (شکل ۱۹). با بررسی ظاهری سطح، مشخص است که نیمه بالایی سطح زیر است و به صورت ورقه ورقه جدا شده و نیمه پایینی پین به صورت نرم جدا و بریده است.

در نمونه A₂ نیز گسیختگی لهیدگی (ناحیه سفیدرنگ) در قسمت کامپوزیتی به خوبی نمایان است و اثری از تورق در چندلایه دیده نمی‌شود. پین‌ها تغییر زاویه‌ای ۳۵ تا ۴۵ درجه نیز داده‌اند و تعداد دو پین از مقطع گسیخته شده است (شکل ۲۰).



شکل (۱۵): گسیختگی لهیدگی اطراف پین‌ها در نمونه A₁

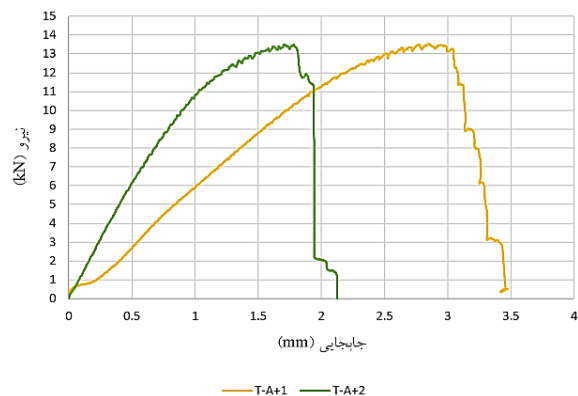
و A₂



شکل (۱۶): انحراف و خم شدن پین‌ها.

گسیختگی لهیدگی اطراف حفره‌های قسمت کامپوزیتی در ردیف اول سمت راست شکل ۱۷ به خوبی نمایان است. مطابق شکل ۱۸ مشخص می‌باشد که قسمت بالای سوراخ‌های دایروی طرف آلومینیومی، بعد از تست به شکل بیضوی تغییر فرم داده‌اند و قطر قسمت بالا در محدوده ۱/۸ تا ۲ میلی‌متر نیز می‌باشد. همچنین قطر پین‌ها که در این مدل اتصال ۱/۲ میلی‌متر انتخاب شده، در قسمت بالای پین نیز تا ۱/۵ میلی‌متر افزایش یافته است. این اتفاق در تمامی پین‌هایی که بریده‌اند، قابل مشاهده می‌باشند.





شکل (۲۱): منحنی نیرو-جابجایی مدل اتصال A^+ .



شکل (۲۲): گسیختگی نمونه A_1^+ .



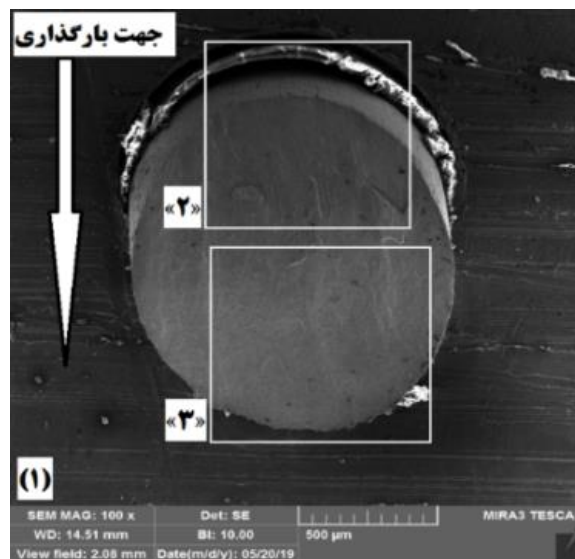
شکل (۲۳): گسیختگی نمونه A_2^+ .



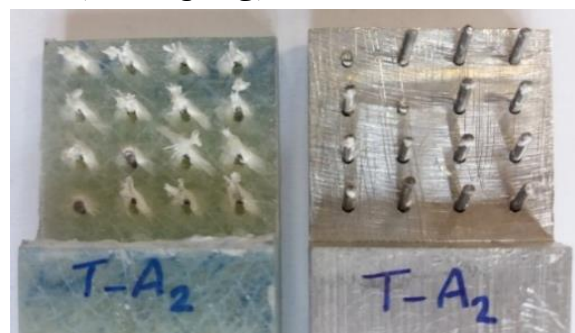
شکل (۲۴): عدم تغییر فرم در کلگی.

۵-۴- تحلیل مدل اتصال B

منحنی نیرو-جابجایی نمونه‌های پین‌دار B_1 و B_2 با قطر پین $1/6$ میلی‌متر در نمودار شکل ۲۵ ترسیم شده‌اند. از منحنی



شکل (۱۹): تصویر میکروسکوپی سطح شکست پین.



شکل (۲۰): گسیختگی لهدگی اطراف پین‌ها در نمونه A_2 .

۳-۵- تحلیل مدل اتصال A^+

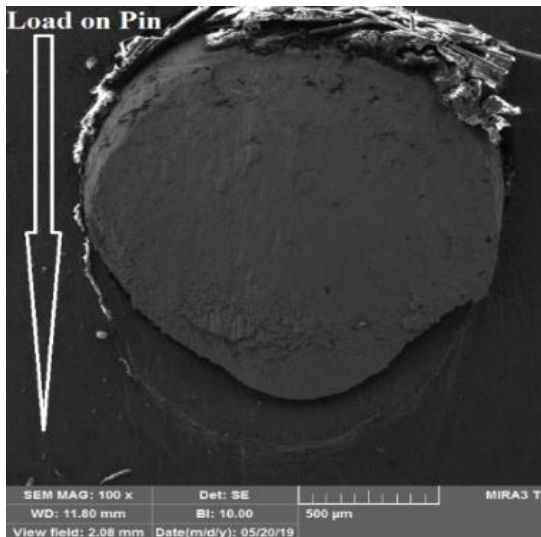
منحنی نیرو-جابجایی دو نمونه پین‌دار A_1^+ و A_2^+ با قطر $1/2$ میلی‌متر در نمودار شکل ۲۱ مشاهده می‌گردد. رفتار این نوع اتصال از ابتدا خطی می‌باشد و بعد از استحکام کششی نهایی شبیه مدل اتصال R تقریباً به‌طور ناگهانی اتصال گسیخته گردید. مشابه مدل اتصالات A در حین تست کشش، صدای شکستن پین‌ها به‌صورت واضح شنیده می‌شد. مشاهده می‌گردد که جابجایی و کشیدگی این نوع اتصال در مقایسه با مدل اتصال A کمتر می‌باشد. تمامی پین‌ها در نمونه A_2^+ از مقطع بریده‌اند (شکل ۲۲). دلیل کشیدگی بیشتر منحنی نمونه A_1^+ نیز عدم شکست یک پین در ردیف آخر می‌باشد که در شکل ۲۳ قابل مشاهده می‌باشد. در قسمت کلگی پین‌ها نیز هیچ‌گونه تغییر فرمی مشاهده نگردید (شکل ۲۴).

غیراستاتیکی چنین برشی خواهند داشت. سایر فلزات که ساختار بلوری مکعبی مرکز پر دارند نیز معمولاً دارای الگوی رفتاری مشابهی هستند. با توجه به سطح برش به نظر می‌رسد نوع شکست، بین‌دانه‌ای می‌باشد. در واقع گسست از مرز دانه‌ها که به هر دلیل ضعیف شده‌اند، انتشار می‌یابد. در نمونه B_2 اثر گسیختگی برشی در کامپوزیت به خوبی نمایان است (شکل ۲۹) و پین‌ها تغییر زاویه‌ای بین ۳۰ تا ۴۰ درجه داده‌اند. شکست به صورت حفره حفره‌ای در آخرین محل‌های جدایش در پین نمونه B_2 نیز قابل مشاهده است (شکل ۳۰).

۶- نتایج

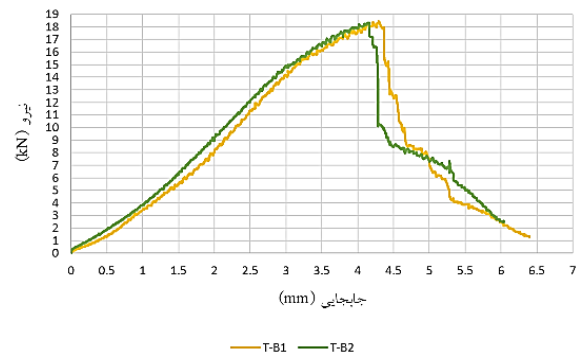
۶-۱- مقایسه نتایج مدل A و A^+

تفاوت مدل‌های A و A^+ در پین‌های معمولی و پین‌های کلگی دار می‌باشد. نمونه A_2^+ به دلیل برش همه ۱۶ پین، کرنش کمتری داشته است و در نتیجه جذب انرژی کمتری را دارد. هر دو نمونه A^+ بعد از استحکام نهایی، شکست سریع‌تری نسبت به دو نمونه A داشته‌اند. دلیل شباهت رفتار نمونه A_1^+ به دو نمونه A در سالم ماندن یک پین و تغییر زاویه دادنش می‌باشد (شکل ۳۱).



شکل (۲۷): سطح شکست پین‌های نمونه B_1 .

مشخص است که بعد از استحکام کششی نهایی، اتصال کشیدگی زیادی داشته و رفتار شکست تدریجی را بروز می‌دهد. مشابه مدل اتصالات A و A^+ در حین تست کشش، صدای بریده شدن تعدادی از پین‌ها شنیده می‌شدند. در این مدل تعدادی پین از مقطع بریده شده و تعدادی پین خم و تغییر فرم یافته‌اند (شکل ۲۶). در نمونه B_1 دو پین به صورت کامل خم و ۸۵ درجه تغییر زاویه داده‌اند.

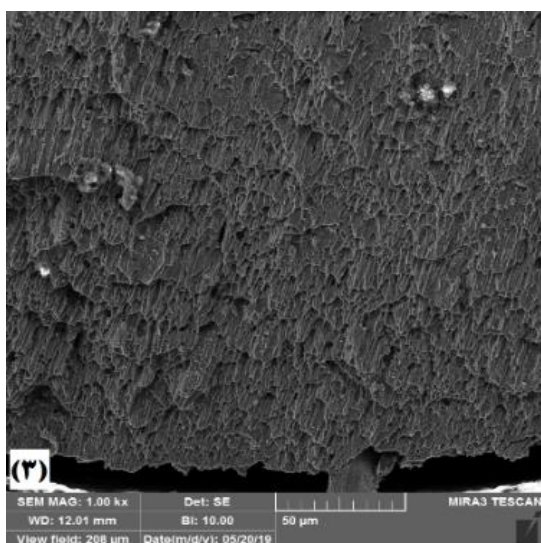
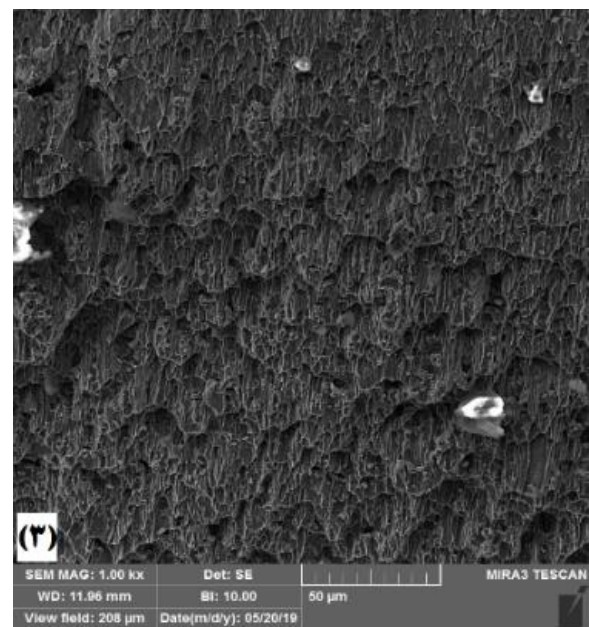
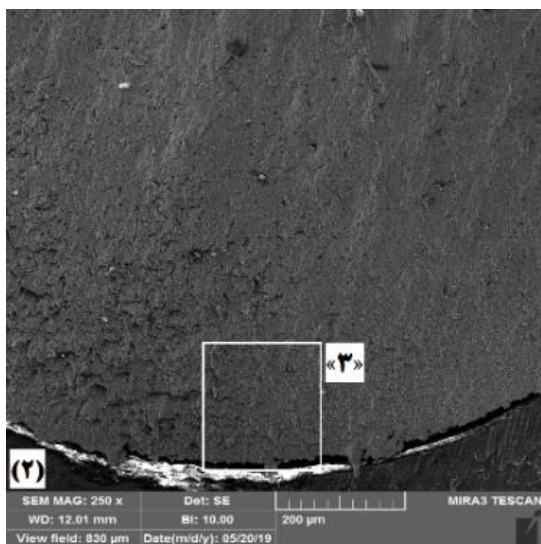
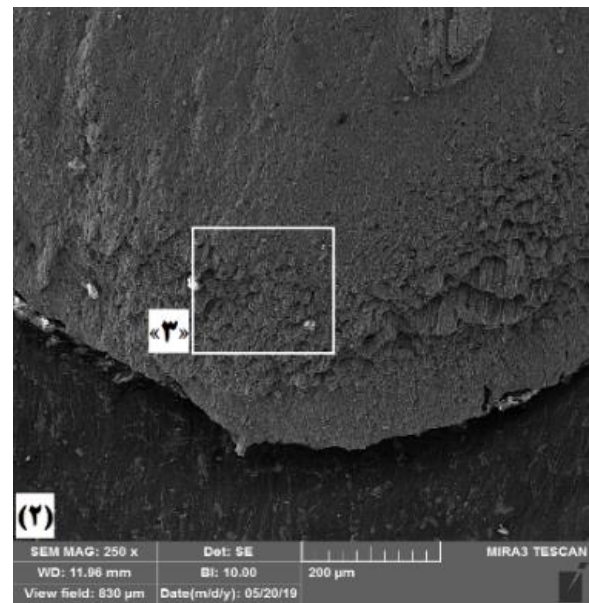
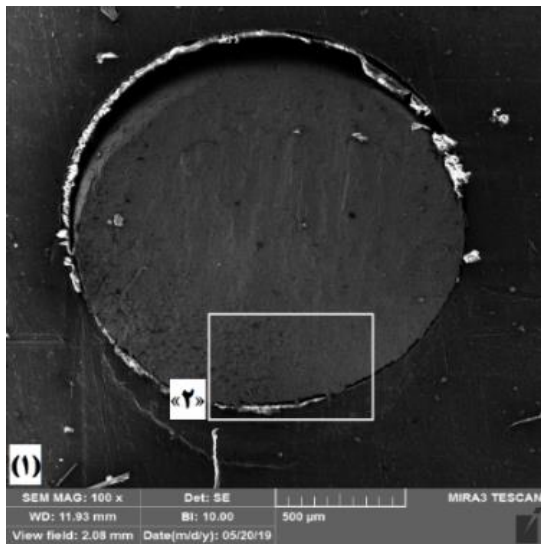


شکل (۲۵): منحنی نیرو-جابجایی مدل اتصال B.



شکل (۲۶): گسیختگی نمونه B_1

تصاویر میکروسکوپ الکترون روبشی دو پین بریده شده از مقطع نمونه B_1 در شکل ۲۷ مشخص می‌نماید لهیدگی در قسمت آلومینیومی رخ داده است. همچنین تکه‌هایی از الیاف شیشه که آسیب دیده‌اند، پشت پین‌ها به جامانده‌اند. تصویر سطح شکست پین و آخرین قسمت جدا شده از پین فولادی (نیمه پایینی) در شکل ۲۸ با بزرگنمایی آمده است. در تصاویر مشخص است که شکست به صورت حفره شدن رخ داده است. گسست‌های ترد فلزات بسیار سخت بوده و ریزدانه‌ها معمولاً دارای هیچ‌گونه طرح گسست مرئی نیست و یا طرح جزئی به وجود می‌آورد. معمولاً در این موارد، تعیین مبدأ گسست مشکل است. معمولاً انواع فولادهای کربن و آلیاژی و همچنین برخی فولادهای زنگ‌زن



شکل (۲۸): حفره حفره شدن سطح شکست پین.



شکل (۲۹): گسیختگی در نمونه B₂.

شکل (۳۰): سطح شکست پین‌های نمونه B₂

نهایی کشش را دارد. در تمام نمونه‌های پین‌دار به‌غیر از مدل A^+ که کلگی دارند، در پین‌هایی که بریده و قطع نشده‌اند، در واقع تغییر زاویه داده‌اند، از داخل جایشان (سوراخ‌هایشان) کمی حرکت نموده و از پشت تورفتگی مشاهده می‌شود. بالطبع پین‌هایی که از مقطع بریده شده‌اند، جابجایی نداشته‌اند. این امر در هر ۴ نمونه مدل‌های اتصال A و B قابل مشاهده هستند. هر دو نمونه B_1 و B_2 که پین با قطر ۱/۶ میلی‌متر داشتند، حین تست در هر دو قسمت آلومینیومی و کامپوزیتی انحراف مشاهده گردید. کج شدگی نمونه B_1 با قطر ۱/۶ در مقایسه با نمونه A^+ با قطر ۱/۲ میلی‌متر در شکل ۳۳ قابل مشاهده هستند.

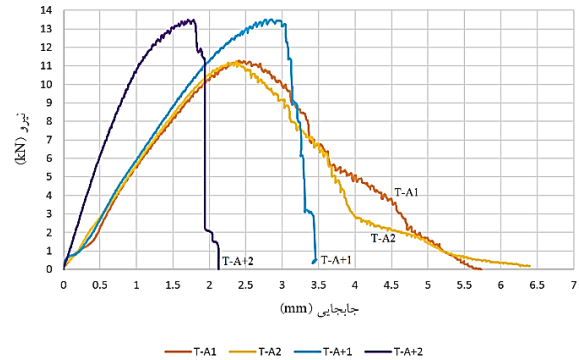
به‌منظور مقایسه بهتر نتایج، نتایج استحکام کششی نهایی چهار مدل اتصال بدون پین R ، اتصال پین‌دار با قطر پین ۱/۲ میلی‌متر A ، اتصال پین‌دار با کلگی و قطر پین ۱/۲ میلی‌متر A^+ و اتصال پین‌دار با قطر پین ۱/۶ میلی‌متر B در شکل ۳۴ نیز نشان داده شده است و افزایش استحکام نسبت به مدل اتصال R به ترتیب در مدل‌های A ، A^+ و B برابر ۳۳٪، ۴۲٪ و ۶۰٪ می‌باشند.

جدول (۳): مقایسه نتایج استحکام نسبت به مدل اتصال R و A

مدل اتصال	میانگین بار نهایی		(N)
	نسبت به R	نسبت به A	
T-R	—	—	۲۵۹۰/۹
T-A	—	٪۳۳۵	۱۱۲۶۸/۹
T- A^+	٪۱۹/۸۷	٪۴۲/۳	۱۳۵۰۸/۴
T-B	٪۶۳/۱	٪۶۰/۵	۱۸۳۸۳



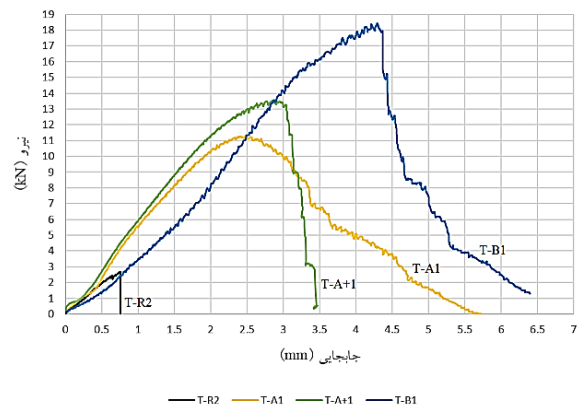
شکل (۳۳): مقایسه کج شدگی نمونه B_1 با A^+



شکل (۳۱): مقایسه منحنی نیرو جابجایی مدل‌های اتصال A و A^+

۲-۶- مقایسه نتایج هر چهار مدل اتصال

منحنی نیرو-جابجایی تمامی مدل‌های اتصال در نمودار شکل ۳۲ آمده است. مشاهده می‌گردد که رفتار دو نمونه A_1 و A^+ تا تحمل ۸ کیلو نیوتن یکسان است. بیشترین تحمل نیرو تحت بار کششی مربوط به نمونه B_1 و معادل ۱۸۴۳۲ نیوتن می‌باشد. در هیچ‌یک از نمونه‌های تست کشش، گسیختگی در ناحیه چندلایه کامپوزیتی رخ نداده و گسیختگی در ناحیه اتصال و خرابی پین‌ها بوده است.



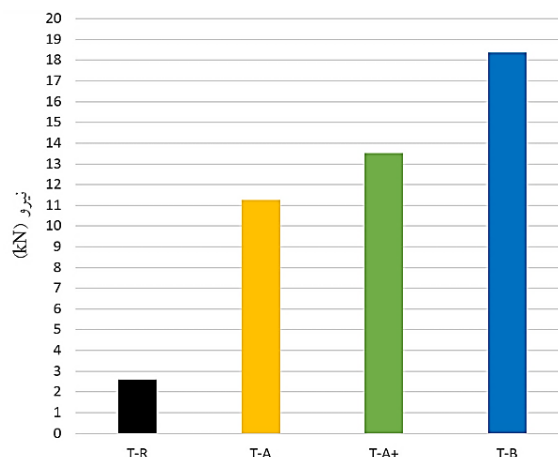
شکل (۳۲): منحنی نیرو جابجایی هر ۴ مدل اتصال.

میانگین استحکام نهایی هر مدل اتصال در جدول ۳ آمده‌اند. نمونه‌های پین‌دار استحکام خیلی بیشتری نسبت به نمونه بدون پین تحمل نمودند. افزایش استحکام نسبت به نمونه R و نمونه A در جدول با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مدل اتصال A^+ نسبت به مدل اتصال A حدوداً ۲۰ درصد به دلیل کلگی‌دار بودن پین‌ها، بهبود داشته است و مدل اتصال B نسبت به مدل اتصال A افزایش ۶۳ درصدی در استحکام

کامپوزیتی، تورقی رخ نداد و خرابی‌ها در قسمت پین‌ها و ناحیه اتصال بوده است. در مدل‌های A و A⁺ اطراف پین در قسمت کامپوزیتی مد خرابی لهیدگی غالب بوده و در مدل اتصال B گسیختگی برشی به دلیل قطر بزرگ‌تر پین‌های این مدل مشاهده شده است. حالات گسیختگی نسبت به ضریب مؤثر عرض به قطر و نیز فاصله لبه به قطر وابسته می‌باشند. برای مقادیر بالاتر از ۴/۵ عرض به قطر و نیز بالاتر از ۳ لبه اتصال به قطر، اتصال در حالت لهیدگی گسیخته می‌شود و در پایین‌تر از مقادیر ذکر شده در مورد گسیختگی کششی و در خصوص گسیختگی برشی رخ می‌دهد [۲۴]. در تمامی پین‌هایی که از مقطع بریده شده‌اند، در قسمت بالای سوراخ حالت دایروی سوراخ به شکل بیضی تغییر حالت داده‌اند به طوری که قطر بزرگ‌تر بیضی در نمونه‌های A و A⁺ از ۱/۲ به حدود ۱/۸ میلی‌متر رسیده است و در نمونه‌های B از ۱/۶ به ۲ میلی‌متر افزایش یافته است.

۸- مراجع

- [1] Man LI. Mechanics of Composite Structures. 2017.
- [2] Yi X-S, Du S, Zhang L. Composite Materials Engineering, Volume 2. 2018.
- [3] Seif MM, Vahedi K, Ghiasi E, Hosseini R. Experimental, numerical and analytical investigation of the new metal/composite Comeld Joint. Journal of Simulation and Analysis of Novel Technologies in Mechanical Engineering. 2016;9(3):569-86.
- [4] Tu W, Wen P, Hogg P, Guild F. Optimisation of the protrusion geometry in Comeld™ joints. Composites Science and Technology. 2011;71(6):868-76.
- [5] Mouritz A. Compression properties of z-pinned composite laminates. Composites Science and Technology. 2007;67(15-16):3110-20.
- [6] Mouritz A. Review of z-pinned composite laminates. Composites Part A: applied science and manufacturing. 2007;38(12):2383-97.
- [7] Alston MS, Brown JP, Childress JJ. Composite patches having Z-pin reinforcement. Google Patents; 1999.
- [8] Hart-Smith LJ. Bolted joint analyses for composite structures—Current empirical methods and future scientific prospects. Joining and Repair



شکل (۳۴): استحکام کششی نهایی مدل اتصال.

۷- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر استحکام کششی اتصال فلز آلومینیوم ۷۰۷۵ به کامپوزیت زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه بین سه مدل اتصال از نوع ترکیبی پینی-چسبی با مدل اتصال چسبی خالص صورت گرفته است. استفاده از پین‌های جدید واسط به منظور افزایش استحکام اتصال، فرآیند انحراف الیاف و عبور آن‌ها از اطراف پین و عدم پاره شدگی الیاف حین ساخت، مهم‌ترین وجه تمایز اتصالات در این پژوهش می‌باشد.

نتایج استحکام کششی نهایی چهار مدل اتصال نشان داد مدل اتصال A⁺ نسبت به مدل اتصال A ۱۹/۸۷٪ و مدل اتصال B نسبت به مدل اتصال A ۶۳/۱٪ افزایش استحکام در کشش داشته است. خطا بین نمونه R₁ و R₂ ۷٪ و در سه مدل اتصال پین‌دار بین نمونه اول و دوم هر مدل کمتر از ۱٪ بوده است که نشان از یکنواختی مواد، روش ساخت و شرایط تست می‌باشد. شکست در مدل اتصال بدون پین R به صورت لحظه‌ای و ناگهانی رخ داده و در سه مدل پین‌دار، شکست به صورت تدریجی و همراه با علائمی از جمله صدای شکستن و بریده شدن پین‌ها از مقطع بوده است. جابجایی در مدل اتصال بدون پین R کمتر از ۱ میلی‌متر و در سه مدل اتصال پین‌دار بسیار بیشتر و حدود ۶ میلی‌متر بود و تغییر زاویه و منحرف شدن از حالت قائمه بعضی از پین‌ها نیز دلیل این امر بوده است. در نمونه‌های کشش در طرف

- Conference Proceedings 2020; 2021: Springer Nature.
- [21] Zhang H, Wen W, Cui H. Study on the strength prediction model of Comeld composites joints. *Composites Part B: Engineering*. 2012;43(8):3310-7.
- [22] D-01 A. Standard test method for lap shear adhesion for fiber reinforced plastic (FRP) bonding. 2012.
- [23] Dutton S, Kelly D, Baker A. *Composite materials for aircraft structures*: American Institute of Aeronautics and Astronautics; 2004.
- [24] Baker AA. *Composite materials for aircraft structures*: AIAA; 2004.
- of Composite Structures: ASTM International; 2004.
- [9] Smith F. Comeld™: an innovation in composite to metal joining. *Materials Technology*. 2005;20(2):91-6.
- [10] Xiong W, Blackman B, Dear JP, Wang X. The effect of composite orientation on the mechanical properties of hybrid joints strengthened by surfi-sculpt. *Composite Structures*. 2015;134:587-92.
- [11] Xiong W, Wang X, Dear JP, Blackman BR. The effect of protrusion density on composite-metal joints with surfi-sculpt reinforcement. *Composite Structures*. 2017;180:457-66.
- [12] Ucsnik S, Scheerer M, Zaremba S, Pahr D. Experimental investigation of a novel hybrid metal-composite joining technology. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2010;41(3):369-74.
- [13] Parkes P, Butler R, Meyer J, De Oliveira A. Static strength of metal-composite joints with penetrative reinforcement. *Composite Structures*. 2014;118:250-6.
- [14] Hoffmann J, Scharr G. Compression properties of composite laminates reinforced with rectangular z-pins. *Composites Science and Technology*. 2018;167:463-9.
- [15] Wang S, Zhang Y, Sun P, Cui Y, Wu G. Microstructure and flexural properties of Z-pinned carbon fiber-reinforced aluminum matrix composites. *Materials*. 2019;12(1):174.
- [16] Σαραντινός N. Micro-pins: the next step in composite to composite & metal to composite joining. 2020.
- [17] Amiri M, Farahani M. Adhesive composite joint reinforcement using button shape interlocking features. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2020;102:102651.
- [18] Graziosi S, Cannazza F, Vedani M, Ratti A, Tamburrino F, Bordegoni M. Design and testing of an innovative 3D-printed metal-composite junction. *Additive Manufacturing*. 2020;36:101311.
- [19] Ramaswamy K, O'Higgins RM, Corbett MC, McCarthy MA, McCarthy CT. Quasi-static and dynamic performance of novel interlocked hybrid metal-composite joints. *Composite Structures*. 2020;253:112769.
- [20] Lotte J, Reisgen U, Schiebahn A, editors. *Resistance Welding of FRP to Steel Components in High-Volume-Production. Technologies for Economic and Functional Lightweight Design*:



Experimental Investigation of Tensile Strength of Metal-Composite Hybrid Joints Using New Inserts in Comeld Process

R. Hosseini^{1*}, M. Y. Sarcheshmeh², M. S. Moghaddam³, M. J. Zeynalbeyk⁴

¹ Assistant Professor, Faculty of Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

² M.Sc., Faculty of Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

³ M.Sc., Faculty of Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

⁴ Ph.D. Student, Faculty of Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

HIGHLIGHTS

- Investigating the increase in the tensile strength of the metal-composite bonding using the new combined method (Comeld)
- Significant increase in strength compared to the sample without a pin
- Gradual failure in the sample with a pin and sudden failure in the sample without a pin

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 7 August 2022

Received in revised form: 24 August 2022

Accepted: 27 October 2022

Available online: 12 December 2022

*Correspondence:

r.hosseini.mech@gmail.com

How to cite this article:

R. Hosseini, M.Y. Sarcheshmeh, M.S. Moghaddam, M.J. Zeynalbeyk. Experimental investigation of tensile strength of metal-composite hybrid joints using new inserts in Comeld process. *Journal of Aerospace Mechanics*. 2023; 19(1):29-43.

Keywords:

Comeld

Composite

Hybrid joint

Metal-Composite joint

Tensile strength

GRAPHICAL ABSTRACT



ABSTRACT

The use of common adhesive methods in metal-composite bonding leads to weak joints that are separated with the least load. The purpose of this research is to investigate the increase in the tensile strength of aluminum metal to glass fibers reinforced with epoxy resin using a new combined method that includes the advantages of both adhesive and mechanical (pinning) methods. In this method, the pins embedded in the structure are used as an interface for load transfer, and the aim is to investigate the amount of strength changes with different types of interface pins. Therefore, the pins are passed through them during the layering of composite fibers and then the curing process is completed. Therefore, a part of the metal structure has penetrated between the warp and weft of the composite and it is expected that the strength will increase. Four connection models without pin (pure adhesive), pin with a diameter of 1.2 mm, pin with a diameter of 1.6 mm and pin with a claw with a diameter of 1.2 mm have been evaluated and the results of the strength of the connections have been compared. Tensile test results have shown that this type of connection has a significant increase in strength compared to the sample without pins, and in three types of connections with different characteristics, 335%, 609%, and 421% increase in strength has been observed, respectively. Also, failure occurred gradually in samples with pins and suddenly in samples without pins.

