



مقایسه ترمیم به کمک وصله کامپوزیتی و نیروی پیش بار پیچ بر روی ورق آلومینیوم ترک‌دار

هادی ناصری ملکی^{*}، تاج‌بخش نوید چاخارلو

دانشکده فنی و مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۶ فروردین ۱۳۹۶
بازنگری: ۱۳ خرداد ۱۳۹۶
پذیرش: ۲۵ تیر ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۲۷ تیر ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

مکانیک شکست
وصله کامپوزیتی
نیروی پیش بار
دستگاه اصلاح شده آرکان
فاکتور شدت تنش

چکیده: بسیاری از قطعات موجود در صنایع مختلف حین کار تحت تأثیر تنش‌های چند محوری قرار دارند. از آنجایی که مبدأ شروع شکست این قطعات، ترک‌ها می‌باشند بنابراین تحلیل استحکام سازه‌های ترک‌دار تحت بارهای چند محوری و تلاش برای افزایش استحکام و پایداری آن‌ها بسیار بااهمیت است. در این مقاله تأثیر نیروی پیش‌بار ناشی از اتصالات پیچ و مهره و وصله کامپوزیتی بر اشاعه ترک جانبی موجود در یک نمونه مستطیلی از جنس آلیاژ آلومینیوم 2024-T3 به صورت تجربی و تئوری مورد مقایسه قرار گرفته است. برای ایجاد مود کششی خالص، برشی خالص و مود ترکیبی نمونه ترک‌دار، دستگاه اصلاح شده آرکان مورد استفاده قرار گرفته و در حل تئوری نیز از نرم‌افزار المان محدود انسیس استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده افزایش چشمگیر استحکام کششی قطعات ترمیم‌شده با این دو روش، در مقایسه با قطعات ترک‌دار ساده می‌باشد. در بهترین حالت افزایش استحکام کششی قطعات ترمیم‌شده توسط وصله کامپوزیتی برای مود کششی خالص ۴۴ درصد بوده که این میزان با کاهش سهم مود یک در بارگذاری کاهش می‌یابد تا در مود برشی خالص به ۹ درصد می‌رسد. نیروی پیش‌بار نیز در بهترین حالت، استحکام نمونه‌های ترمیم‌شده را ۲۴ درصد برای مود برشی خالص افزایش می‌دهد که با افزایش سهم مود یک در بارگذاری این میزان به ۱۸ درصد کاهش می‌یابد.

۱- مقدمه

جلوگیری از شروع ترک و گسترش آن برای نگهداری سازه‌های مهندسی و تجهیزات در کنار تشخیص شروع ترک بسیار مهم است. تعمیر ترک با به تأخیر انداختن رشد ترک یا جلوگیری کردن از رشد ترک انجام می‌شود، که می‌تواند با کاهش شدت تنش در نوک ترک با استفاده از ایجاد تنش پسماند فشاری یا کاهش تمرکز تنش در نوک ترک صورت گیرد. کاهش تمرکز تنش در نوک ترک می‌تواند با پر کردن ترک^۱ [۱]، وصله‌های کامپوزیتی^۲ [۲]، جوشکاری^۳ دو سطح مجزا [۳] و ایجاد سوراخ‌های متوقف کننده^۴ [۴] انجام شود. ایجاد تنش‌های فشاری نیز می‌تواند با تکنیک‌های مختلفی از جمله انبساط سرد^۵ [۵]، تداخل^۶ [۶] و گشتاور سفت کننده^۷ [۷، ۸] صورت گیرد.

در بین روش‌های مختلف تعمیر، ترمیم به وسیله نیروی پیش‌بار^۸ پیچ و مهره و وصله‌های کامپوزیتی به طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته‌اند و

به‌عنوان مؤثرترین روش‌ها شناخته شده‌اند که هر کدام از این روش‌ها مزایا و معایب خاص خود را دارند.

پارامترهای مختلفی بر طول عمر یا مقاومت شکست اعضای پیچ و مهره شده تأثیر می‌گذارند که تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر رفتار اتصال پیچ شده مقدار نیروی پیش‌بار می‌باشد. مطالعات مختلفی درباره اتصالات پیچ و مهره و پارامترهای مؤثر در رفتار مکانیکی این اتصالات انجام شده است [۹-۱۱]. یان و همکاران [۹] مطالعه‌ای تجربی در مورد اثرات نیروی پیش‌بار بر مقاومت کششی صفحات کامپوزیتی گرافیت-اپوکسی انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که نیروی پیش‌بار مقاومت کششی صفحات کامپوزیتی را افزایش می‌دهد و باعث کاهش تنش ماکزیمم تا حدود ۲۰٪ می‌شود. سلام و همکاران [۱۰] اثر نیروی پیش‌بار پیچ و ضریب اصطکاک را روی فاکتور شدت تنش اتصالات یک لبه و دولبه‌ی ترک‌خورده بررسی کردند و نشان دادند که نیروی پیش‌بار باعث کاهش تمرکز تنش در اتصال بدون ترک و کاهش فاکتور شدت تنش و افزایش عمر خستگی اتصالات ترک‌خورده می‌شود. چاخارلو و همکاران [۱۱] در مقاله‌ای تأثیر نیروی پیش‌بار و طول ترک بر مقاومت باقیمانده را در نمونه‌های مستطیلی شکل از جنس پلی متیل متاکریلات^۹ که دارای ترک جانبی بوده را در حالت مود مرکب^{۱۰} شکست به صورت نرم‌افزاری و عملی بررسی کردند. مشاهده

- 1 Crack filling
- 2 Composite patches
- 3 Welding
- 4 Stop holes
- 5 Cold expansion
- 6 Interference fit
- 7 Torque tightening
- 8 Clamping force

9 PMMA

10 Mixed mode

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: H.Nasери@tabrizu.ac.ir

آرکان به صورت تجربی و تئوری (المان محدود) مورد مقایسه قرار گرفته است.

۲- مبانی تئوری مکانیک شکست در مود ترکیبی:

مکانیک شکست الاستیک خطی^۲ ابزار مفیدی برای تحقیق در مورد ترک‌ها است. هدف از آزمایش چقرمگی شکست، به دست آوردن مقادیر فاکتور شدت تنش بحرانی یا چقرمگی شکست (K_{Ic}) در حالت کرنش صفحه‌ای است. این خصوصیت جسم برای توصیف مقاومت در مقابل شکست، در طراحی سازه‌ای به کار می‌رود. استاندارد ASTM E399 [۱۶] و D5045 [۱۷] اطلاعاتی در مورد چقرمگی شکست مود یک در حالت کرنش صفحه‌ای ارائه می‌دهد. فاکتور شدت تنش K_{Ic} در حین شکست در رأس یک ترک در یک نمونه کششی پیوسته از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$K_{Ic} = \frac{P_c \sqrt{\pi a}}{wt} f \quad (1)$$

که P_c عبارت از بار بحرانی شکست، w پهنای نمونه، t ضخامت نمونه و f برابر با ضریب (هندسه/ بار) فاکتور شدت تنش است. مکانیک شکست الاستیک خطی و شرایط تنش صفحه‌ای، شرایط لازم و اولیه‌اند. فاکتورهای شدت تنش در رأس ترک برای نوع اصلاح‌شده نمونه آرکان با استفاده از روابط (۲) محاسبه می‌شوند [۲۳-۱۸].

$$K_{I1} = \frac{P \sqrt{\pi a}}{wt} f_{I1} \quad (2)$$

$$K_{II} = \frac{P \sqrt{\pi a}}{wt} f_{II}$$

K_{I1} و K_{II} به ترتیب با استفاده از ضرایب هندسی بی‌بعد f_{I1} و f_{II} محاسبه می‌شوند، که از طریق المان محدود نمونه آزمایش آرکان به دست می‌آیند. فاکتور شدت تنش در رأس ترک در حالت مود مرکب نیز از رابطه (۳) به دست می‌آید که به راحتی می‌توان با استفاده از معادلات (۲) ضریب هندسی بی‌بعد مود مرکب را از رابطه (۴) به دست آورد.

$$K_{eff} = \sqrt{K_{I1}^2 + K_{II}^2} \quad (3)$$

$$f_{eff} = \sqrt{f_{I1}^2 + f_{II}^2} \quad (4)$$

اصولاً وصله کامپوزیتی بواسطه دو مکانیزم متفاوت مقدار پارامترهای شکست را در ترک، تغییر می‌دهد. در مکانیزم اول، وصله تقویت‌کننده مستقل از راستای ترک و تنها با افزایش مقدار سفتی ورق در راستای اعمال بار خارجی، باعث کاهش مؤلفه‌های جابجایی در ورق ترک‌دار می‌گردد که طبعاً این جنبه از تأثیرات وصله، مقدار پارامترهای ترک را نیز تغییر می‌دهد. در مکانیزم دوم، وصله کامپوزیتی وابسته به جهت ترک، با کاهش مقدار بازشدگی لبه‌های ترک، مقدار K_{I1} و با کاهش مقدار لغزش لبه‌های ترک بر

شده که نیروی پیش‌بار پیچ اثر مهمی در کاهش فاکتور شدت تنش^۱ مود ترکیبی در تمام زوایای بارگذاری دارد و این اثر برای طول‌های ترک متفاوت تقریباً یکسان است. تعمیر قطعات ترک‌دار در سازه‌های هوایی با استفاده از مواد کامپوزیت استحکام بالا برای اولین بار در سال ۱۹۷۰، در آزمایشگاه تحقیقاتی نیروی هوایی استرالیا توسط آلن بیگر ابداع گردید [۱۲] و برای ترمیم بال و بدنه هواپیماهای قدیمی مورد استفاده قرار گرفت. این تکنولوژی شامل لایه‌هایی از مواد مرکب پیشرفته است که به صورت وصله روی محل ترک به سازه چسبانده می‌شود و برای تعمیر سازه‌های هواپیماهای آسیب‌دیده و متوقف کردن خوردگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. چانگ و یانگ [۱۳] رفتار ترک مایل مرکزی ترمیم‌شده توسط وصله کامپوزیتی را تحت بارگذاری خستگی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که عمر خستگی نمونه‌های ترمیم‌شده به وسیله وصله کامپوزیتی حدود ۵-۲/۴ برابر در مقایسه با نمونه‌های ترک‌دار افزایش پیدا کرد. همچنین گزارش کردند که بیشترین تأثیر وصله کامپوزیتی در ترک با زاویه ۰ درجه (مود خالص یک) و کمترین اثر در ترک با زاویه ۴۵ درجه مشاهده شد. آیت‌اللهی و هاشمی [۱۴] در تحقیقی به تجزیه و تحلیل المان محدود سه‌بعدی اثر ترمیم یک‌طرفه ورق ترک‌دار توسط وصله‌های کامپوزیتی بر روی پارامترهای نوک ترک شامل ضرایب تمرکز تنش در حالت ترکیبی بارگذاری و تنش تی پرداختند. آن‌ها برای حالت ترکیبی بارگذاری نمونه دارای ترک مرکزی زاویه‌دار را بررسی کردند. آن‌ها برای وصله‌های کامپوزیت خود دو نمونه مختلف شامل بور/اپوکسی و گرافیت/اپوکسی را در نظر گرفته، مشاهده کردند که ترمیم با وصله کامپوزیتی تأثیر به‌سزایی بر مقادیر ضرایب شدت تنش (K_{I1} ، K_{II}) در زوایای مختلف ترک داشته و آن‌ها را کاهش می‌دهد. رامجی و همکاران [۱۵] مکانیزم ترمیم دوطرفه و یک‌طرفه را برای ورق با ترک مرکزی مایل با استفاده از روش المان محدود مورد مطالعه قراردادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که مکانیزم ترمیم دوطرفه ورق ترک‌دار کاملاً با ترمیم یک‌طرفه متفاوت است. آن‌ها همچنین مشاهده کردند که ترمیم دوطرفه بسیار کارآمدتر از ترمیم یک‌طرفه ورق ترک‌دار است.

در بسیاری از موارد عملی و در سازه‌های مهندسی و اماندگی کلی سازه به واسطه شرایط بارگذاری پیچیده اتفاق می‌افتد. در این شرایط شکست ترد و ناگهانی ترک یکی از مودهای شایع تخریب سازه می‌باشد. از آنجاکه ترک‌های تیز، شکاف‌ها و ناچ‌های موجود در داخل قطعات در زاویه‌ها و جهت‌های مختلفی نسبت به راستای بارگذاری کلی سازه قرار دارند، رشد ترک‌ها و نهایتاً فرآیند شکست سازه‌های ترک‌دار، در اثر اعمال بارگذاری‌ها و تغییر فرم‌های پیچیده و عمدتاً ترکیبی از بارگذاری کششی و برشی (بارگذاری مود ترکیبی یک و دو) ایجاد می‌شود و تحقیق بر روی این نوع نمونه‌های عملی مورد انتظار است. در این مقاله، تأثیر ترمیم به کمک وصله کامپوزیتی و نیروی پیش‌بار پیچ و مهره بر مقاومت باقیمانده و مقدار فاکتور شدت تنش در حالت‌های مود کششی خالص، برشی خالص و مرکب بر مبنای آزمایش

جدول ۱: پیکربندی دستگاه اصلاح شده آرکان برای ۵ نسبت مختلف از بارگذاری ترکیبی

Table 1. Arcan test configuration with five levels of Mixed-Mode.

| شماره سوراخ | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ |
|-------------|------|-----|-----|-----|------|
| سهم مود یک | ۱۰۰٪ | ۷۵٪ | ۵۰٪ | ۲۵٪ | ۰٪ |
| سهم مود دو | ۰٪ | ۲۵٪ | ۵۰٪ | ۷۵٪ | ۱۰۰٪ |

سوراخ‌هایی جهت اعمال نیرو وجود دارد که می‌تواند ۵ حالت مختلف مود ترکیبی شکست را از بارگذاری ۱۰۰٪ برای مود یک تا بارگذاری ۱۰۰٪ برای مود دو را شبیه‌سازی کند. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود اگر ترک در نمونه عمود بر جهت بارگذاری باشد نمونه در حالت ۱۰۰٪ برای مود یک شکست و اگر ترک در راستای موازی جهت بارگذاری باشد نمونه در حالت ۱۰۰٪ برای مود دو شکست در حال بارگذاری می‌باشد. سه حالت دیگر ترکیبی از دو حالت ذکر شده، بین مود کششی خالص و مود برشی خالص می‌باشد (جدول ۱). ابعاد و اندازه‌های دستگاه آرکان اصلاح شده مورد استفاده را می‌توان در شکل ۱ مشاهده نمود.

۳-۲- نمونه‌های آزمایش

در این تحقیق سه سری نمونه آزمایش استفاده شده که سری اول نمونه‌های ترک‌دار ساده، سری دوم نمونه‌های ترمیم شده با وصله کامپوزیتی و سری سوم نمونه‌های ترمیم شده با اتصال پیچ و مهره می‌باشند. برای ساخت نمونه‌های آزمایش ابتدا صفحات مستطیلی به طول ۱۸۰ میلی‌متر و

روی یکدیگر، مقدار K_{II} را در نوک ترک کاهش می‌دهد.

گشتاور اعمال شده به اتصال پیچ و مهره نیز به واسطه دو مکانیزم متفاوت باعث بهبود مقاومت شکست تحت بارگذاری ایستا و عمر خستگی تحت بارگذاری سیکلی می‌شود. در مکانیزم اول نیروی کششی (پیش‌بار) در پیچ، صفحات سوراخ شده را تحت فشار قرار می‌دهد و توزیع تنش و کرنش حاصل در اطراف سوراخ و نوک ترک، K_I را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد (اثر مستقیم نیروی پیش‌بار). در مکانیزم دوم نیروی اصطکاکی که بین سطوح در حال تماس در اثر حرکت لغزشی ایجاد می‌شود، مانند یک تنش برشی سطحی و در جهت عکس نیروی طولی اعمال شده (نیروی مقاوم) عمل کرده و در نتیجه تنش حاصل در اطراف سوراخ را کاهش می‌دهد (اثر غیرمستقیم نیروی پیش‌بار).

۳- کارهای تجربی

۳-۱- دستگاه اصلاح شده آرکان

در روش عملی برای انجام آزمایش‌های شکست در مدهای مختلف از دستگاه اصلاح شده آرکان استفاده شده است. این دستگاه نخستین بار توسط آرکان و همکارانش در سال ۱۹۷۸ برای بررسی مدهای یک، دو و مرکب بر روی مواد کامپوزیتی به کار برده شد [۲۴].

برای ساخت دستگاه اصلاح شده آرکان از فولاد مقاومت بالا CM5 با ضخامت ۲۰ میلی‌متر استفاده شده و در مرکز ضخامت آن شیار به ضخامت ۳/۲ میلی‌متر ایجاد شده است تا در هر دو نیمه دستگاه آرکان جابه‌جایی در راستای عمود بر جهت اعمال نیرو مهار شده باشد. در لبه‌های خارجی آن نیز

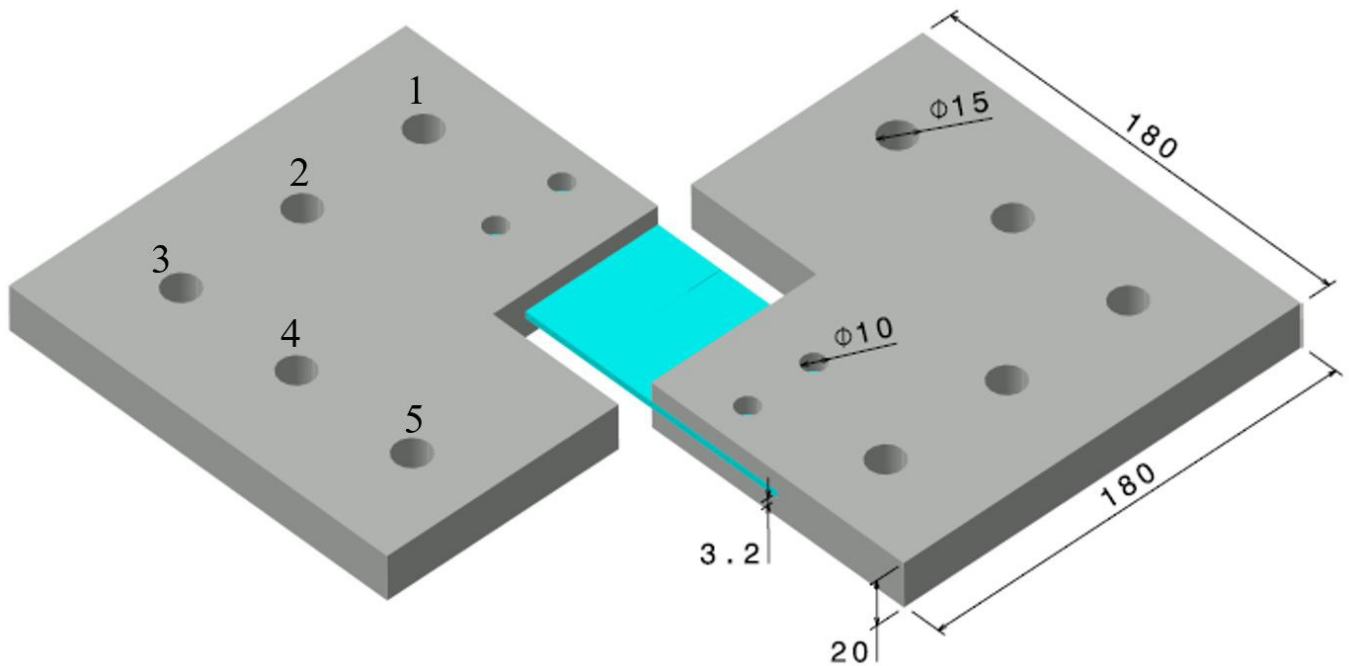


Fig. 1. Modified Arcan fixture dimensions (mm).

شکل ۱: ابعاد و اندازه‌های دستگاه اصلاح شده آرکان (اندازه‌ها برحسب میلی‌متر)

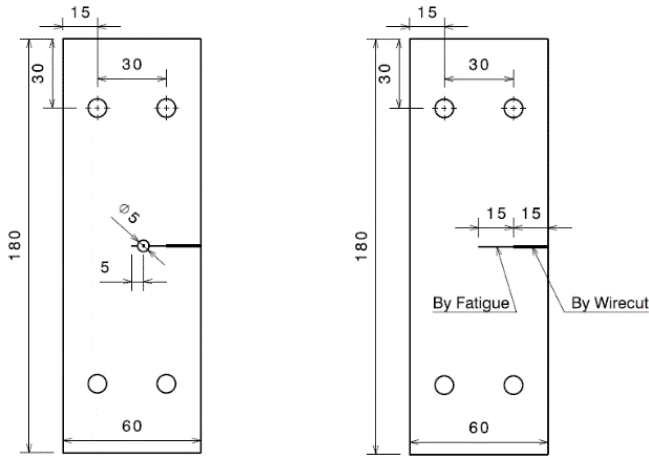


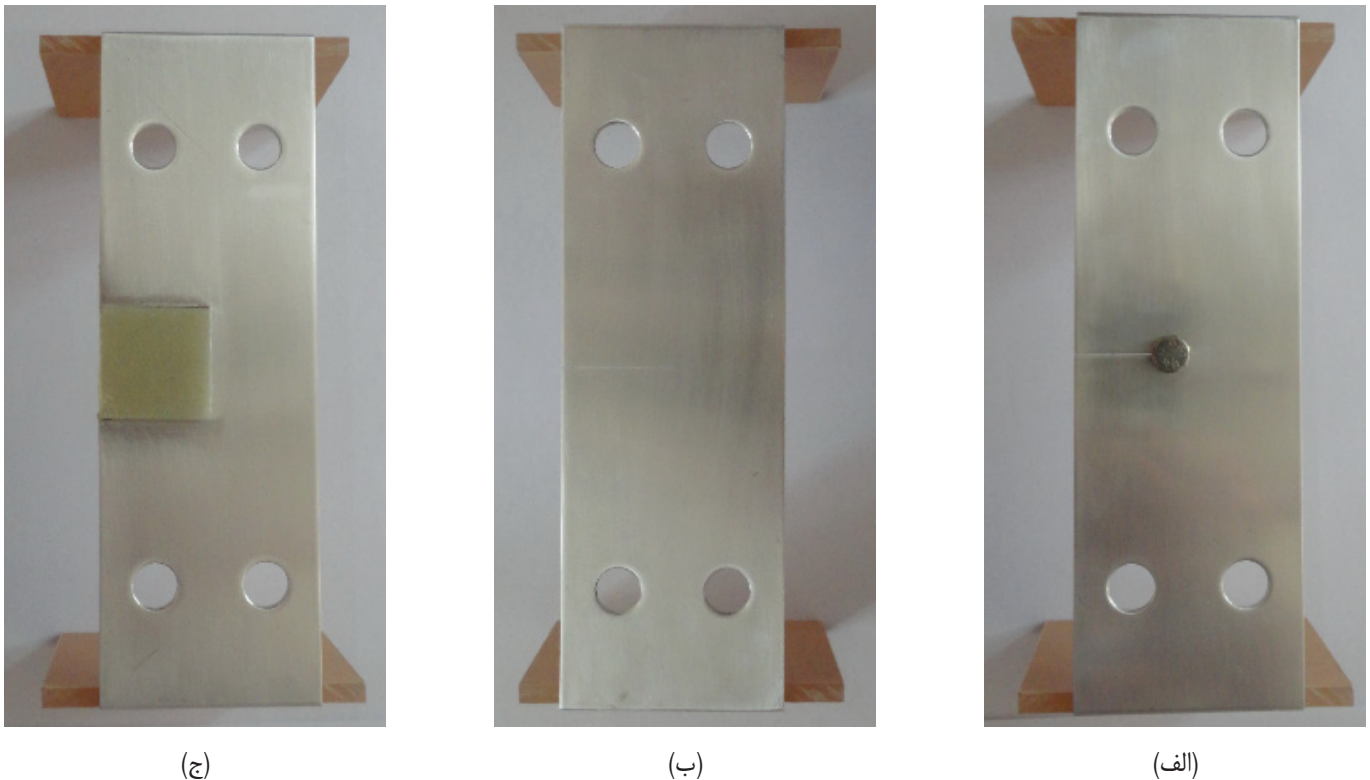
Fig. 2. Experimental test specimens and its dimensions (mm). a) Composite patched, b) Bolt clamped

شکل ۲: ابعاد و اندازه‌های نمونه‌های مورد استفاده، الف) برای ترمیم با وصله کامپوزیتی، ب) برای ترمیم با نیروی پیش‌بار (اندازه‌ها برحسب میلی‌متر)

در این تحقیق برای آماده‌سازی سطوح آلومینیوم برای اتصال چسب از روش ارائه‌شده در استاندارد [۲۵] ASTM D2651-90 استفاده شده است. بدین‌صورت که ابتدا برای جلوگیری از هرگونه خراش سطحی، نمونه‌ها توسط سمباده‌های ضدآب (۴۰۰، ۶۰۰ و ۱۰۰۰) پولیش داده شد. سپس صفحات اتصالی به وسیله محلول استون از چربی‌ها و آلودگی‌های احتمالی پاک شدند. در انتها نمونه‌ها به مدت ۱۰ دقیقه در محلول اسید سولفوریک

عرض ۶۰ میلی‌متر با توجه به ابعاد دستگاه اصلاح‌شده آرکان از یک ورق آلومینیومی 2024-T3 به ضخامت $3/2$ میلی‌متر در جهت نورد ورق بریده شد. به منظور ایجاد ترک اولیه در نمونه‌ها، نیاز به ایجاد این ترک‌ها تحت بارگذاری سیکلی بود که با توجه به دقت بسیار بالا و همچنین هزینه‌بر بودن این مرحله از دشوارترین قسمت‌های پژوهش می‌باشد. جهت ایجاد ترک موردنیاز در نمونه‌های آزمایش شکست ابتدا باید شکافی برای به وجود آمدن تمرکز تنش ایجاد می‌شد تا سپس توسط بارگذاری تناوبی، ترک از انتهای این شکاف اشاعه یابد. بدین منظور برای ایجاد ترک با طول نهایی ۳۰ میلی‌متر شکاف لبه‌ای به طول ۱۵ میلی‌متر و ضخامت $0/2$ میلی‌متر از وسط لبه طولی نمونه و در راستای عرضی با استفاده از دستگاه وایرکات ایجاد گردید (شکل ۲).

برای مشاهده بهتر اندازه ترک رشد یافته، ابتدا مسیر گسترش ترک با استفاده از کاغذ سمباده بسیار ریز سمباده زده شد تا صافی سطح مطلوب حاصل گردد. سپس با استفاده از پولیش کاری مسیر ترک، منطقه‌ای با صافی سطح بالا برای مشاهده رشد ترک ایجاد شد. همچنین اندازه‌گیری ترک با استفاده از دوربین اولترازوم و نصب خط‌کش مدرج بر روی نمونه‌ها انجام گردید. در نهایت با استفاده از دستگاه خستگی و اعمال بارگذاری تناوبی ترکی به طول نهایی ۳۰ میلی‌متر در نمونه‌ها ایجاد گردید. در نهایت در نمونه‌های سری سوم برای مونتاژ اتصال پیچ و مهره سوراخی به قطر ۵ میلی‌متر در فاصله ۵ میلی‌متری از انتهای ترک ایجاد شد (شکل ۳).



شکل ۳: نمونه‌های آزمایش‌های تجربی الف) ترمیم‌شده با نیروی پیش‌بار ب) ترک‌دار ساده ج) ترمیم‌شده با وصله کامپوزیتی

همزن مکانیکی دور بالا با پره‌های سه‌تایی به مدت ۵ دقیقه استفاده شد. این مرحله از انجام کار برای این منظور است که یک محلول همگن از رزین و سخت‌کننده به دست آید. بعد از لایه‌چینی و بستن قالب ورق کامپوزیتی به مدت ۲۴ ساعت تحت فشار در دمای اتاق قرار داده شد. سپس ورق کامپوزیتی ساخته‌شده به ابعاد ۳۰×۳۰ میلی‌متر مربع با استفاده از دستگاه برش دقیق در ابعاد موردنظر برای اتصال به ورق آلومینیومی برش داده شد. برای به دست آوردن خواص مکانیکی کامپوزیت نمونه‌های آزمایش کشش ساخته‌شده طبق استاندارد ASTM D3039 [۲۷] تحت آزمایش قرار گرفتند. خواص مکانیکی وصله کامپوزیتی در جدول ۳ ارائه گردیده است.

۳-۴- چسب آرالدیت ۲۰۱۵

ضخامت چسب یکی از پارامترهای مهم در تعیین میزان تأثیر وصله کامپوزیتی بر افزایش مقاومت نمونه‌های ترمیم‌شده می‌باشد. به منظور به دست آوردن ضخامت ثابت و دقیق برای لایه چسب در آزمایش‌های عملی از یک دستگاه حرکت دوعده‌ای سنج دقیق استفاده شده است، این دستگاه شامل دو عدد میکرومتر برای حرکت دقیق در راستاهای افقی و عمودی می‌باشد. روش کار به این صورت است که ابتدا سطح کاملاً صاف و آماده‌شده قطعه کار به‌عنوان مبدأ حرکت برای دستگاه در راستای عمودی تعیین می‌شود. سپس دستگاه به سمت بالا حرکت داده شده و قطعه کامپوزیتی به دستگاه متصل می‌شود. بعد از قرار دادن لایه‌ای از چسب در محدوده هم‌پوشانی بر روی ورق آلومینیومی، دستگاه از بالا به سمت پایین حرکت داده می‌شود تا به ارتفاع موردنظر برسد، ارتفاع موردنظر ضخامت چسب به همراه ضخامت قطعه کامپوزیتی می‌باشد. سپس حجم اضافی چسب که در اثر فشار دستگاه از لبه‌های محدوده هم‌پوشانی به بیرون تراوش کرده، تمیزکاری می‌شود. این اتصالات به مدت ۷۲ ساعت در دمای محیط طبق دستورالعمل سازنده چسب نگه‌داشته شدند (شکل ۵).

برای به دست آوردن خواص مکانیکی چسب، نمونه کشش مطابق با استاندارد ASTM D638-02 [۲۸] ساخته شد و سپس نمونه‌های آماده‌شده توسط دستگاه زوئیک تحت آزمایش قرارگرفتند. نمودار تنش- کرنش به

و بی‌کربنات‌سدیم در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد غوطه‌ور شدند. این عملیات شیمیایی آماده‌سازی سطح تضمینی برای یک اتصال پربازده چسبی بود. برای به دست آوردن خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم 2024-T3، نمونه‌های کشش مطابق با استاندارد ASTM E8 [۲۶] برای آلومینیوم ساخته شد و سپس نمونه‌های آماده‌شده توسط دستگاه زوئیک تحت آزمایش قرارگرفتند. نمودار تنش- کرنش به دست آمده از آزمایش کشش در شکل ۴ نشان داده شده و داده‌های کرنش پلاستیک و تنش متناظر در جدول ۲ آورده شده است.

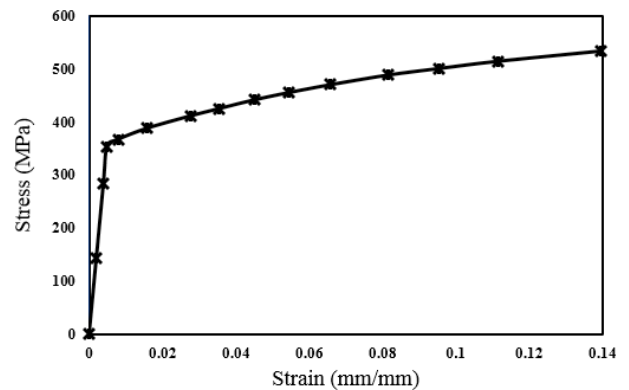


Fig. 4. True stress-strain curve of 2024-T3 aluminum alloy.

شکل ۴: نمودار تنش-کرنش برای آلیاژ آلومینیوم 2024T3

۳-۳- وصله کامپوزیتی

برای تولید ورق‌های کامپوزیتی از الیاف شیشه بافته‌شده از نوع E ساخت شرکت کلان استرالیا با کد AF301، استحکام کشش ۳۷۰۰ نیوتن بر مترمربع، چگالی سطح ۱۸۵ گرم بر مترمربع، ضخامت ۰/۱۵ میلی‌متر و بافت ۶۸×۱ در تاروپود استفاده شده است. ورق‌های کامپوزیتی از ۸ لایه الیاف با زوایای بافت صفر و نود درجه به روش لایه‌چینی دستی ساخته شده‌اند. جز ماتریس از دو بخش رزین اپوکسی ML506 و سخت‌کننده HA11 تشکیل شده که نسبت اختلاط جز رزین اپوکسی به سخت‌کننده طبق پیشنهاد شرکت سازنده ۱۰۰ به ۱۵ واحد است. برای این کار از یک

جدول ۲: کرنش پلاستیک و تنش متناظر برای آلیاژ آلومینیوم 2024-T3

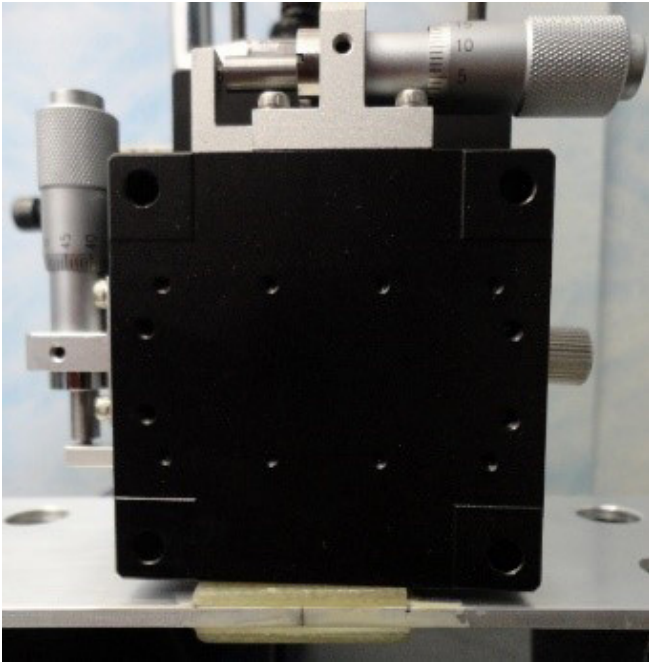
Table 2. Plastic strain and corresponding stress of the 2024-T3 aluminum alloy.

| کرنش پلاستیک (میلی‌متر/میلی‌متر) | ۰/۰۰۴۹ | ۰/۰۲۷۶ | ۰/۰۴۵ | ۰/۰۶۵۷ | ۰/۰۹۵۳ | ۰/۱۳۹۷ |
|----------------------------------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| تنش (مگا پاسگال) | ۳۵۳/۸ | ۴۱۱/۲ | ۴۴۱/۴ | ۴۶۹/۹ | ۵۰۰/۵ | ۵۳۳/۶ |

جدول ۳: خواص مکانیکی وصله کامپوزیتی

Table 3. Mechanical properties of composite patch.

| ν_{yz} | ν_{xz} | ν_{xy} | G_{yz} (MPa) | G_{xz} (MPa) | G_{xy} (MPa) | E_z (MPa) | E_y (MPa) | E_x (MPa) |
|------------|------------|------------|----------------|----------------|----------------|-------------|-------------|-------------|
| ۰/۳ | ۰/۳ | ۰/۱۵ | ۲۸۵۰ | ۲۸۵۰ | ۲۸۵۰ | ۳۵۷۰ | ۱۸۴۳۰ | ۱۸۴۳۰ |



(ب)



(الف)

Fig. 5. Set up to create uniform adhesive thickness a) far view and b) near view.

شکل ۵: مکانیزم طراحی شده برای ایجاد ضخامت یکنواخت چسب (الف) نمای کلی (ب) نمای نزدیک

محوری در سطح خارجی بوش که در دو طرف مقابل هم چسبانده شده‌اند را می‌توان ملاحظه نمود.

بوش به همراه کرنش‌سنج‌های متصل شده به آن مابین مهره و واشر قرار می‌گیرد که کرنش‌سنج‌های بکار رفته بر روی بوش توسط دو عدد سیم به اندیکاتورهایی وصل می‌شوند تا در آن بتوان تغییرات کرنش‌ها بر اساس تغییرات نیروی پیش‌بار را دنبال کرد. با استفاده از گشتاورسنج مقادیر گشتاور ۷-۱ نیوتن-متر به پیچ و مهره اعمال شده و در هر حالت کرنش‌های محوری ثبت شده‌اند که این آزمایش برای هر گشتاور، سه مرتبه تکرار شده است. سرانجام نیروهای پیش‌بار متناظر با گشتاور اعمالی که معادل نیروی محوری در پیچ می‌باشند با به‌کارگیری مقدار میانگین کرنش محوری (ϵ_m) در رابطه (۵) تعیین شده‌اند. مدول الاستیسیته بوش با استفاده از آزمون کشش ساده برای فولادی که بوش از آن ساخته شده است ۲۰۴ گیگا پاسگال به دست آمده است.

$$F_{clamping} = E_{bush} \cdot \epsilon_m \cdot A_{bush} = 204188 \times \frac{\pi}{4} (9^2 - 5^2) \times \epsilon_m = 89.9 \times 10^5 \times \epsilon_m \quad (5)$$

که در رابطه بالا A_{bush} مساحت مقطع استوانه بوش است. با محاسبه و جایگذاری کرنش‌های به وجود آمده شکل ۸ برای گشتاور سفت‌کنندگی و نیروی پیش‌بار متناظر با آن به دست می‌آید.

دست آمده از آزمایش کشش در شکل ۶ نشان داده شده و داده‌های کرنش پلاستیک و تنش متناظر در جدول ۴ آورده شده است.

۳-۵- اندازه‌گیری نیروی پیش‌بار

جهت تعیین مقدار نیروی پیش‌بار پیچ ناشی از اعمال گشتاور پیچشی به پیچ و مهره از کرنش فشاری محوری به وجود آمده در سطح جانبی یک بوش فولادی که بین مهره و ورق پایینی قرار می‌گیرد، استفاده شده است. در شکل ۷ ابعاد بوش به کار رفته و همچنین دو عدد کرنش‌سنج که به صورت

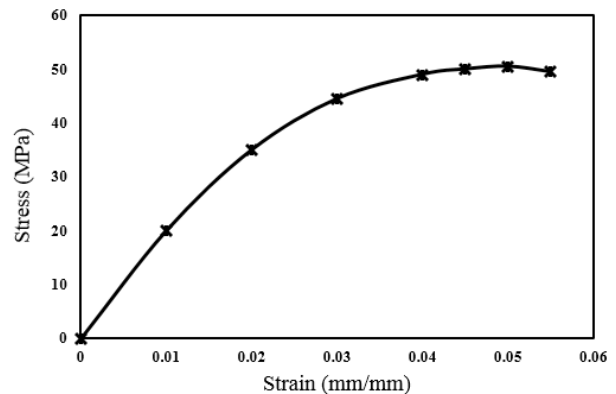


Fig. 6. Engineering stress-strain curve of the Araldite 2015 adhesive.

شکل ۶: نمودار تنش-کرنش برای چسب آردیت ۲۰۱۵

جدول ۴: کرنش پلاستیک و تنش متناظر برای چسب آرالایت ۲۰۱۵

Table 4. Plastic strain and corresponding stress of the Araldite 2015 adhesive.

| کرنش (میلی متر/میلی متر) | تنش (مگا پاسگال) |
|--------------------------|------------------|
| + / +۰۰۵ | ۴۹/۵ |
| + / +۰۰۵ | ۵۰/۵ |
| + / +۰۴۵ | ۵۰ |
| + / +۰۴ | ۴۹ |
| + / +۰۳ | ۴۴/۵ |
| + / +۰۲ | ۳۵ |

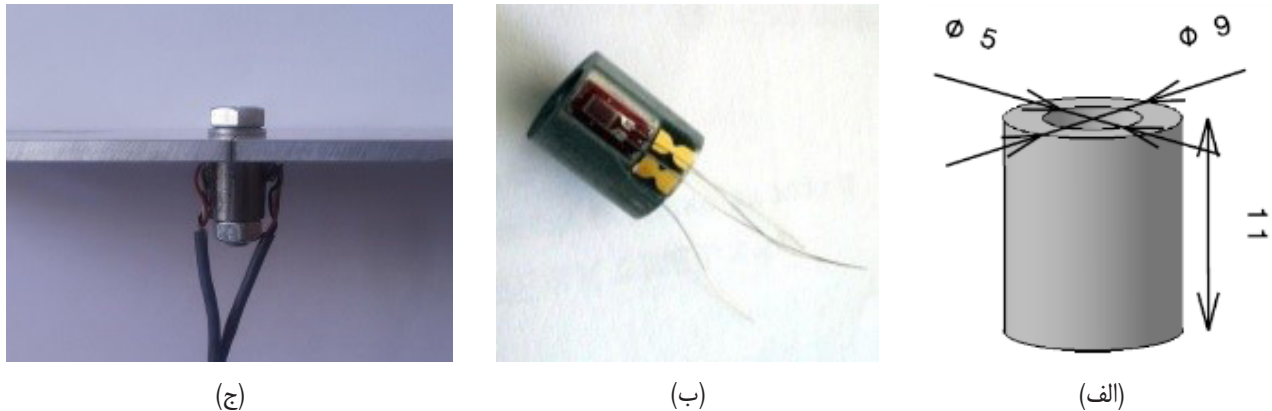


Fig. 7. Strain gauges attached to the bush and steel bush dimensions (mm).

شکل ۷: الف) ابعاد بوش به کاررفته برحسب میلی متر ب) محل قرارگیری کرنش سنجها بر روی بوش ج) نحوه قرارگیری بوش بین مهره و ورق آلومینیومی

شده است، بار کششی استاتیکی تا شکست کامل نمونه‌ها ادامه می‌یابد. برای دستیابی به نسبت مودهای مختلف یک و دو، محل بارگذاری از سوراخ شماره ۱ تا ۵ بر روی فیکسچر تغییر داده شده است. آزمایش کشش برای هر کدام از نسبت‌های بارگذاری در سه سری که سری اول بدون ترمیم و در حالت ترک‌دار ساده، سری دوم برای نمونه‌های ترمیم‌شده با وصله کامپوزیتی و سری سوم برای نمونه‌های ترمیم‌شده با اتصال پیچ و مهره می‌باشد، انجام شده و مقادیر بار ماکزیمم اعمالی تا شکست (مقاومت باقیمانده) نمونه‌ها به دست آمده است. برای دستیابی به نتیجه بهتر هر کدام از آزمایش‌ها سه بار تکرار شده و در نهایت مقدار میانگین بار ماکزیمم اعمالی در نظر گرفته شده است. نمایی از فیکسچر آزمایش تحت بارگذاری در مودهای مختلف در شکل ۹ نشان داده شده است.

شکل ۱۰ نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی را برای هر سه سری از نمونه‌ها نشان می‌دهد. با بررسی نمودارهای حاصل از نتایج تجربی مشخص می‌گردد که هر چه سهم مود یک در بارگذاری بیشتر باشد، استحکام نمونه‌های ترمیم‌شده به کمک وصله کامپوزیتی به میزان بیشتری افزایش می‌یابد. به نحوی که در حالت بارگذاری ۱۰۰٪ برای مود یک که راستای بارگذاری بر راستای ترک عمود است بیشترین میزان استحکام و هنگامی که بارگذاری برای حالت ۱۰۰٪ برای مود دو، یعنی راستای بارگذاری با راستای ترک موازی بوده، کمترین میزان استحکام به دست آمده است. بالعکس، برای نمونه‌های ترمیم‌شده با اتصال پیچ و مهره هر چه سهم مود دو در بارگذاری بیشتر باشد، استحکام به میزان بیشتری افزایش می‌یابد.

در آزمایش‌های تجربی مشاهده گردید که در نمونه‌های ترمیم‌شده که میزان استحکام آن‌ها نسبت به نمونه‌های ترک‌دار ساده افزایش یافته، در

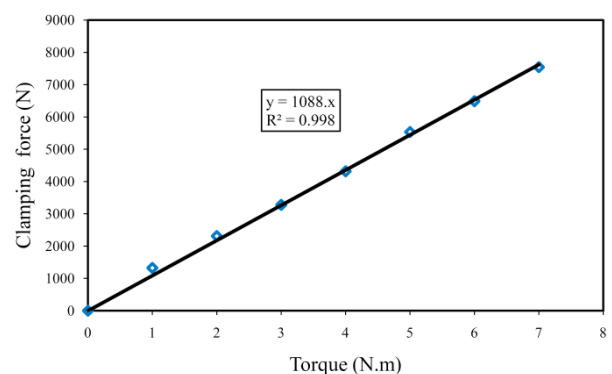


Fig. 8. Bolt clamping forces due to applied torques.

شکل ۸: رابطه بین گشتاور سفت‌کنندگی و نیروی پیش‌بار در اتصال

با توجه به رابطه به دست آمده از نمودار، نیروی متناظر برای گشتاور سفت‌کنندگی ۷ نیوتن-متر برابر با ۷۶۰۰ نیوتن به دست می‌آید. مقدار به دست آمده برای نیروی پیش‌بار در مدل‌سازی اجزاء محدود نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳-۶- آزمایش‌های شکست و نتایج

برای انجام آزمایش‌های شکست از دستگاه آزمایش کشش استاتیکی از نوع ژوئیک^۱ با ظرفیت کشش حداکثر ۱۰۰ کیلو نیوتن استفاده شده است. پس از اتصال نمونه‌ها به فیکسچر اصلاح‌شده آرکان نیرو به صورت کششی با سرعت ثابت ۵ میلی متر بر دقیقه به انتهای یک رابط اتصال دستگاه اعمال شده و درحالی که انتهای رابط دیگر در تمامی درجات آزادی گیردار



(ج)

(ب)

(الف)

Fig. 9. Fixture and specimen configuration. a) 100% Mode I, b) 50% Mode I c) 0% Mode I

شکل ۹: نمایی از دستگاه اصلاح شده آرکان و نمونه‌های ترمیم شده با وصله کامپوزیتی و نیروی پیش‌بار برای حالت بارگذاری الف) ۱۰۰٪ (ب) ۵۰٪ (ج) ۰٪ مود یک

پیچ و مهره عملکرد به مراتب بهتری را در افزایش استحکام داشته است. علاوه بر این در تصاویر ثبت شده حین انجام آزمایش‌های تجربی، ما می‌توانیم یک منطقه سفید کوچک در اطراف نوک ترک مشاهده کنیم که شکلی شبیه به بال پروانه دارد. این منطقه نشان‌دهنده ناحیه پلاستیک در نوک ترک می‌باشد. از آنجایی که اندازه ناحیه پلاستیک در مقایسه با طول ترک بسیار کوچک است، نشان می‌دهد که ترک در ناحیه پلاستیک کوچک گسترش می‌یابد؛ بنابراین مفهوم مکانیک شکست الاستیک می‌تواند در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

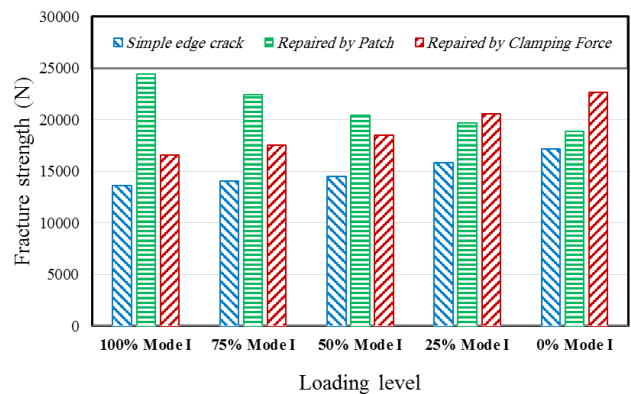


Fig. 10. Fracture force (strength) of simple edge crack and repaired specimens.

شکل ۱۰: نیروی شکست برای نمونه‌های ترک‌دار ساده و ترمیم شده

لحظه شکست نمونه‌ها رفتار تردتری از خود نشان داده‌اند. این امر به دلیل عملکرد مناسب ترمیم در تحمل بار است، زیرا هنگامی که نیروی کششی در نمونه‌های ترمیم شده از نیروی شکست نمونه های ترک‌دار ساده افزایش می‌یابد، در لحظه جدایش وصله یا اتصال پیچ و مهره، افزایش ناگهانی بار اعمالی بر روی نوک ترک در نمونه، باعث رشد ناپایدار و ناگهانی ترک‌های منشعب از شیار و شکست ترد آن‌ها می‌شود.

با توجه به مقایسه نتایج مشخص می‌گردد که در بارگذاری برای حالتی که سهم مود یک ۱۰٪ می‌باشد وصله کامپوزیتی در مقایسه با اتصال پیچ و مهره عملکرد به مراتب بهتری را در افزایش استحکام قطعات ترمیم شده داشته و برعکس، یعنی برای حالتی که سهم مود دو ۱۰٪ می‌باشد، اتصال

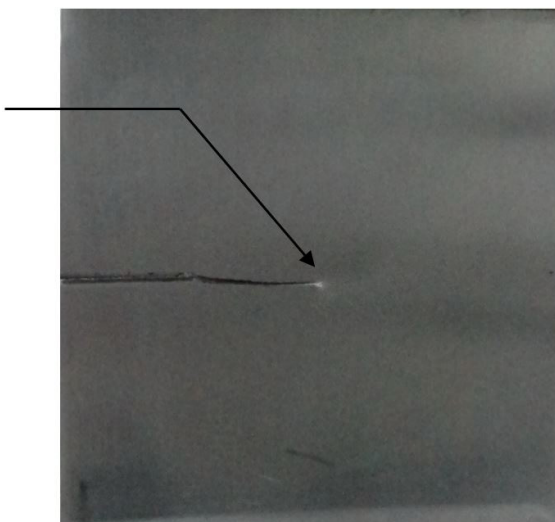


Fig. 11. Photo taken during the fracture test

شکل ۱۱: تصویر ثبت شده حین انجام آزمایش تجربی

۴- روشی عددی

۴-۱ مدل سازی المان محدود

برای بررسی تئوری اثر وصله کامپوزیتی و اتصال پیچ و مهره بر فاکتور شدت تنش از روش عددی المان محدود و از نرم افزار انسیس^۱ استفاده شده است. دستگاه اصلاح شده آرکان و نمونه به صورت سه بعدی و یکپارچه مدل سازی شده است. در مدل سازی سعی شده ویژگی های هندسی و فیزیکی نمونه های هر سه سری آزمایش برای هر کدام از نسبت های بارگذاری تا حد امکان رعایت شود. با توجه به شکل ۱۲، کل مدل چه از لحاظ هندسه و چه از لحاظ بارگذاری نسبت به صفحه $X-Y$ دارای تقارن است لذا با اعمال شرایط مرزی قرینه جابجایی^۲ بر سطوح برش خورده، از نصف کل مدل برای انجام تحلیل استفاده شده است.

برای مدل کردن رفتار ماده برای ورق های آلومینیومی، به صورت الاستیک-پلاستیک با سخت شونده گی سینماتیکی با معیار فون میسز در نظر گرفته شده است تا تحلیل ها هر چه بیشتر به واقعیت نزدیک تر باشند. بدین منظور از منحنی تنش-کرنش آلیاژ آلومینیوم 2024-T3 که با آزمایش های کشش ساده به دست آمده، استفاده شده است (شکل ۴). مدول الاستیسیته و ضریب پواسون مربوطه نیز ۷۲ گیگاپاسگال و ۰/۳۳ در نظر گرفته شده است. رفتار ماده چسب به صورت الاستیک-پلاستیک چندخطی مدل شده است. شکل ۶ رفتار غیرخطی چسب مورد استفاده را نشان می دهد. مدول الاستیسیته و ضریب پواسون چسب ۲ گیگاپاسگال و ۰/۳ می باشد.

به علت اینکه دستگاه آرکان فولادی و پیچ، تحت بارگذاری محوری در ناحیه الاستیک باقی می ماند رفتار آن ها به صورت الاستیک خطی با مدول یانگ ۲۱۰ گیگا پاسگال برای دستگاه آرکان و ۲۰۷ گیگاپاسگال برای پیچ و ضریب پواسون ۰/۳ برای هر دو در نظر گرفته شده است.

برای شبکه بندی ورق از المان سالیید^۳ ۱۸۶ استفاده شده که دارای ۲۰ گره و هر گره دارای سه درجه آزادی جابجایی در راستای (X, Y, Z) می باشد. این نوع المان دارای گره میانی^۴ در بین گره های رأس ها بوده و قابلیت تبدیل به المان های منفرد^۵ را داراست که مناسب برای به دست آوردن فاکتور شدت تنش ترک می باشد. شکل ۱۳ مدل شبکه بندی شده ترک دار را نشان می دهد. به منظور شبکه بندی لایه چسب، پیچ و دستگاه اصلاح شده آرکان مورد استفاده از المان سالیید^۶ ۱۸۵ استفاده شده که دارای ۸ گره و هر گره دارای سه درجه آزادی جابجایی در راستای (X, Y, Z) است. البته امکان استفاده از المان سالیید ۱۸۶ نیز موجود بود، ولی چون المان سالیید ۱۸۵ ساده تر از المان سالیید ۱۸۶ بوده ترجیح داده شد از این المان استفاده گردد. برای شبکه بندی وصله کامپوزیتی نیز از المان سالیید ۱۸۵ ولی با قابلیت لایه بندی استفاده شده است. شکل ۱۳ مدل شبکه بندی شده نمونه های ترمیم شده را نشان می دهد.

جهت مدل کردن تماس بین سطوح هم پوشانی آلومینیوم، چسب و کامپوزیت و همچنین آلومینیوم و سرپیچ، تماس انعطاف پذیر با انعطاف پذیر^۷ مورد استفاده قرار گرفته است. هر جفت المان تماسی شامل المان هدف و

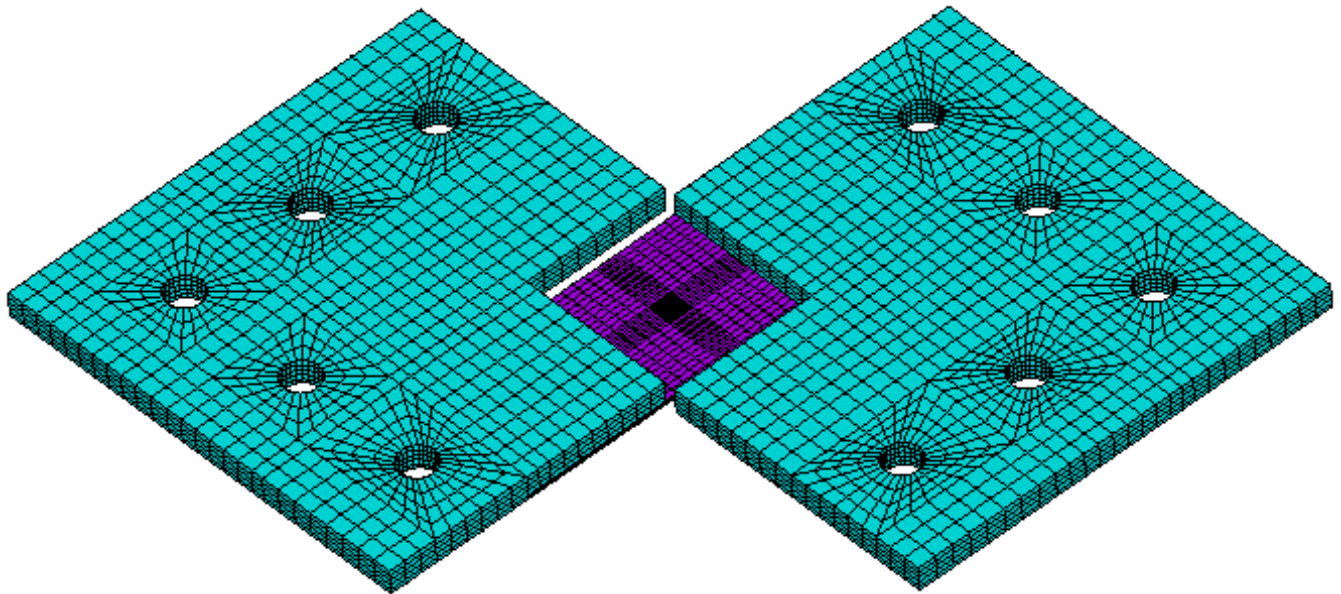


Fig. 12. FE Mesh of the fixture and the specimen.

شکل ۱۲: مدل شبکه بندی شده دستگاه اصلاح شده آرکان و نمونه

- 3 Solid 186
- 4 Mid node
- 5 Singular
- 6 Solid 185
- 7 Flexible-to-flexible

- 1 ANSYS
- 2 Symmetry B.C.

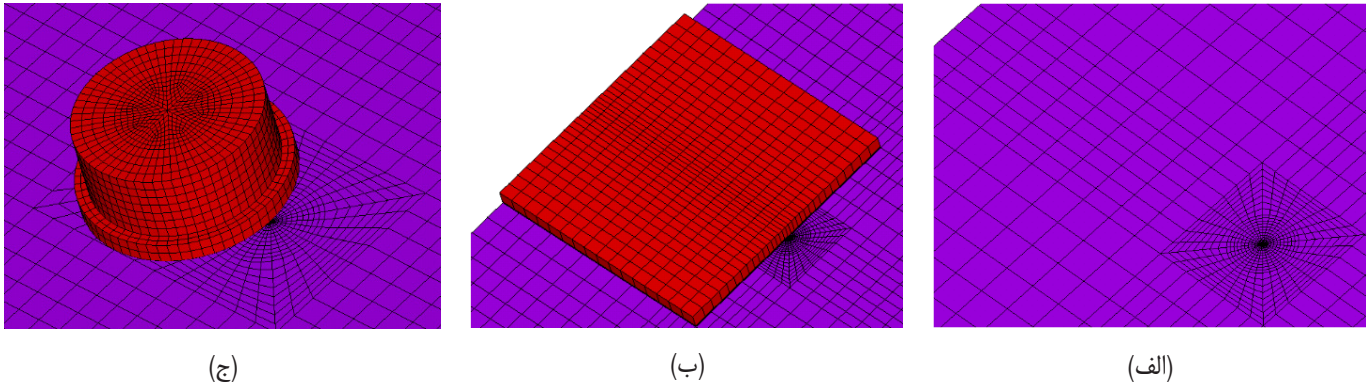


Fig. 13. Meshes of a) simple edge crack b) patched specimens c) bolted specimens

شکل ۱۳: مدل شبکه‌بندی شده (الف) نمونه ترک‌دار ساده (ب) نمونه وصله شده (ج) نمونه پیچ و مهره شده

و برای ترمیم با نیروی پیش‌بار پیچ و مهره ۱۸ درصد کاهش یافته است، ولی با کاهش سهم مود یک در بارگذاری، از میزان تأثیر ترمیم با وصله کامپوزیتی کاسته شده و بر میزان تأثیر ترمیم با نیروی پیش‌بار پیچ و مهره افزوده می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که ترمیم به کمک وصله کامپوزیتی تأثیر بیشتری بر ضریب فاکتور شدت تنش مود یک نمونه‌های ترک‌دار در مقایسه با ترمیم به کمک نیروی پیش‌بار پیچ و مهره داشته است که دلیل آن را می‌توان به سطح تماس بیشتر طول ترک با وصله در مقایسه با سطح تماس طول ترک با سرپیچ مربوط دانست.

۵-۲- تأثیر نیروی پیش‌بار پیچ و مهره و وصله کامپوزیتی بر f_{II} ضریب (هندسه/ بار) فاکتور شدت تنش مود دو

شکل ۱۵ مقادیر ضریب فاکتور شدت تنش مود دو را برای دو روش ترمیم با وصله کامپوزیتی و نیروی پیش‌بار پیچ و مهره مقایسه می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضریب فاکتور شدت تنش مود دو نیز برای همه حالت‌های بارگذاری ترکیبی بررسی شده برای هر دو روش ترمیم کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که برخلاف ضریب فاکتور شدت تنش مود یک، در حالت بارگذاری ۱۰۰٪ برای مود دو، بیشترین تأثیر ترمیم در ضریب فاکتور شدت تنش مود دو مربوط به ترمیم با نیروی پیش‌بار پیچ و مهره می‌باشد و هر چه سهم مود یک در بارگذاری کاهش می‌یابد، تأثیر ترمیم با وصله کامپوزیتی کاهش یافته و برعکس تأثیر ترمیم با نیروی پیش‌بار پیچ و مهره افزایش می‌یابد. برای حالت بارگذاری ۱۰۰٪ برای مود دو مقدار ضریب فاکتور شدت تنش مود دو برای نیروی پیش‌بار پیچ و مهره ۲۴ درصد و برای وصله کامپوزیتی ۹ درصد کاهش یافته است. بنابراین می‌توان گفت که بر کاهش ضریب فاکتور شدت تنش مود دو، ترمیم با نیروی پیش‌بار پیچ و مهره مؤثرتر از ترمیم به کمک وصله کامپوزیتی می‌باشد و دلیل آن را می‌توان به عملکرد بهتر پیچ در جلوگیری از لغزش لبه‌های ترک نسبت به عملکرد چسب مربوط دانست.

المان تماس می‌باشد. TARGET 170 [۲۹] به‌عنوان المان هدف و CONTACT 174 [۳۰] به‌عنوان المان تماس انتخاب شده است. اثر اصطکاک بین آلومینیوم با آلومینیوم و سرپیچ و نمونه نیز توسط مدل اصطکاک الاستیک کولمب به ترتیب با تعریف ضریب اصطکاک ایستایی ۰/۴ و ۰/۱ شبیه‌سازی شده است.

۵- نتایج و بحث

۵-۱- تأثیر نیروی پیش‌بار پیچ و مهره و وصله کامپوزیتی بر f_I ضریب (هندسه/ بار) فاکتور شدت تنش مود یک

در شکل ۱۴ مقادیر ضریب فاکتور شدت تنش مود یک برای حالت‌های ترمیم با نیروی پیش‌بار پیچ و مهره و وصله کامپوزیتی برای پنج حالت مختلف از بارگذاری ترکیبی به‌صورت نمودار میله‌ای مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، مقدار ضریب فاکتور شدت تنش مود یک برای نمونه‌های ترمیم‌شده به هر دو روش، نسبت به نمونه‌های ترک‌دار ساده کاهش داشته است. مقدار ضریب فاکتور شدت تنش مود یک در حالت بارگذاری ۱۰۰٪ برای مود یک برای وصله کامپوزیتی ۴۴ درصد

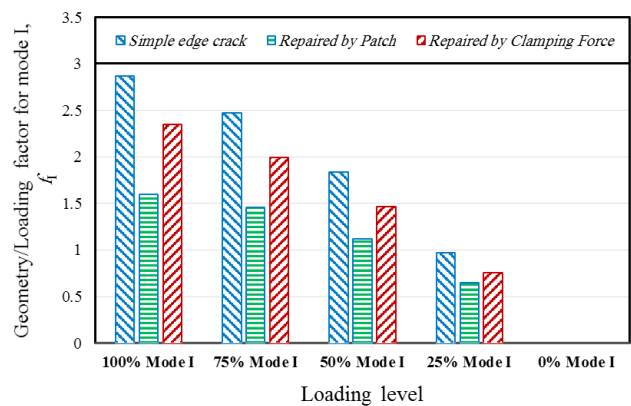


Fig. 14. The geometry/loading factors for different loading level of simple edge crack and repaired specimens at fracture load for mode I.

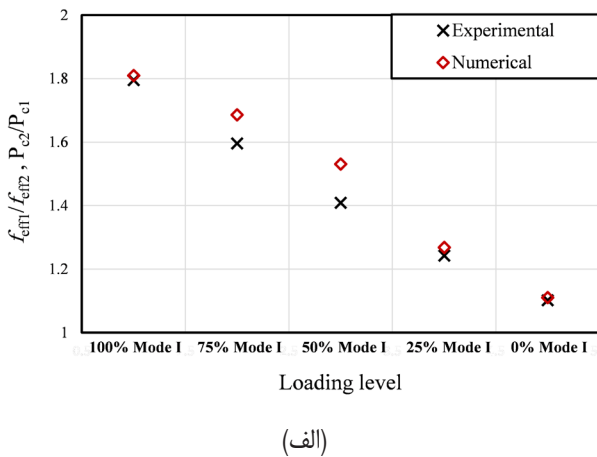
شکل ۱۴: نمودار ضریب فاکتور شدت تنش مود یک خالص برای نمونه‌های ترک‌دار ساده و ترمیم‌شده برحسب سهم مود یک در بارگذاری

ضریب فاکتور شدت تنش مؤثر و نیروی بحرانی شکست را مشخص می‌کند، استفاده کرد. با فرض f_{eff1} به‌عنوان ضریب فاکتور شدت تنش مؤثر نمونه ترک‌دار ساده و f_{eff2} برای نمونه ترمیم‌شده و K_c به‌عنوان چقرمگی شکست آلیاژ آلومینیوم برای ضخامت مورد آزمایش، P_{c1} به‌عنوان نیروی بحرانی شکست برای نمونه ترک‌دار ساده و P_{c2} برای نمونه ترمیم‌شده، برای طول ترک ثابت رابطه (۶) به دست می‌آید.

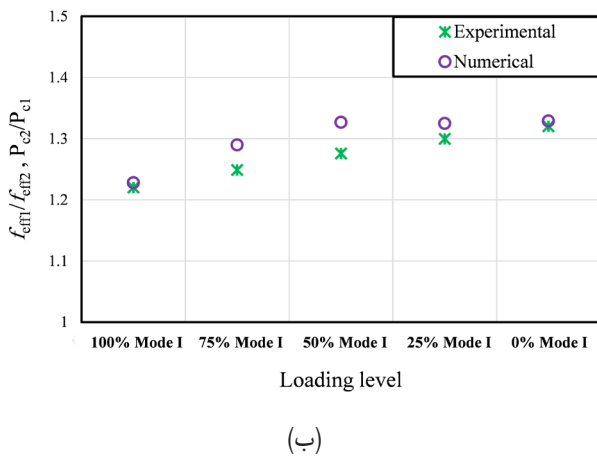
$$K_c = \frac{P_{c1} \sqrt{\pi a}}{wt} f_{eff1} = \frac{P_{c2} \sqrt{\pi a}}{wt} f_{eff2} \quad (۶)$$

$$\frac{f_{eff1}}{f_{eff2}} = \frac{P_{c2}}{P_{c1}}$$

که در این رابطه نسبت (f_{eff1}/f_{eff2}) از نتایج عددی و نسبت (P_{c2}/P_{c1}) از نتایج آزمایش‌های تجربی به دست می‌آیند. مقادیر این نسبت‌ها در شکل ۱۷، برای نمونه‌های ترمیم‌شده به کمک وصله کامپوزیتی و نیروی پیش‌بار پیچ به‌صورت جداگانه ارائه شده است. همان‌گونه که در شکل مشخص است، تطابق بسیار خوبی بین نتایج عددی حاصل از روش المان محدود با نتایج آزمایش‌های عملی انجام‌گرفته وجود دارد.



(الف)



(ب)

Fig. 17. Comparison of numerical and experimental results. a) Composite patched b) Bolt clamped

شکل ۱۷: مقایسه نتایج عددی و تجربی (الف) ترمیم با وصله کامپوزیتی (ب) ترمیم با نیروی پیش‌بار

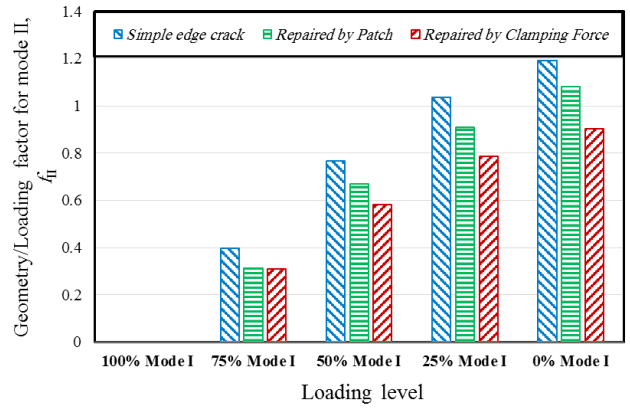


Fig. 15. The geometry/loading factors for different loading level of simple edge crack and repaired specimens at fracture load for mode II. شکل ۱۵: نمودار ضریب فاکتور شدت تنش مود دو خالص برای نمونه‌های ترک‌دار ساده و ترمیم‌شده برحسب سهم مود یک در بارگذاری

۳-۵ تأثیر نیروی پیش‌بار پیچ و مهره و وصله کامپوزیتی بر f_{eff} ضریب هندسه/بار فاکتور شدت تنش مؤثر

نتایج به دست آمده از تحلیل عددی برای ضریب فاکتور شدت تنش مؤثر در شکل ۱۶ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالت بارگذاری برای ۱۰۰٪ مود یک، ضریب فاکتور شدت تنش مؤثر برای ترمیم با وصله کامپوزیتی ۴۴ درصد کاهش می‌یابد، ولی با کاهش سهم مود یک در بارگذاری از این میزان تأثیر کاهش، کاسته شده به‌طوری‌که در بارگذاری برای ۱۰۰٪ مود دو این تأثیر به ۹ درصد کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که ترمیم با نیروی پیش‌بار پیچ و مهره برای حالت بارگذاری ۱۰۰٪ مود یک ضریب فاکتور شدت تنش مؤثر را ۱۸ درصد کاهش داده و این میزان تأثیر با کاهش سهم مود یک در بارگذاری افزایش می‌یابد به‌طوری‌که در بارگذاری ۱۰۰٪ برای مود دو این تأثیر به ۲۴ درصد افزایش می‌یابد.

۴-۵ مقایسه نتایج عددی و تجربی

برای مقایسه نتایج عددی و تجربی می‌توان از رابطه (۱) که تناسب بین

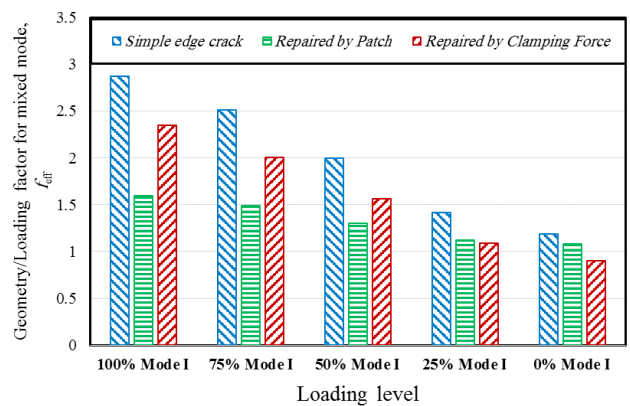


Fig. 16. The geometry/loading factors for different loading level of simple edge crack and repaired specimens at fracture load for mixed mode.

شکل ۱۶: نمودار ضریب فاکتور شدت تنش مؤثر برای نمونه‌های ترک‌دار ساده و ترمیم‌شده برحسب سهم مود یک در بارگذاری

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق، میزان تأثیر دو روش ترمیم به کمک وصله کامپوزیتی و نیروی پیش‌بار پیچ و مهره بر مقاومت باقیمانده و پارامترهای مؤثر در حالت‌های مود کششی خالص، برشی خالص و مرکب بر مبنای آزمایش آرکان به صورت تجربی و تئوری (المان محدود) مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به کارهای انجام شده به نتایج کلی به دست آمده زیر می‌توان اشاره نمود:

با اعمال گشتاور پیچشی به مهره جهت محکم کردن پیچ و مهره در سوراخ قطعات اتصالی، نیرویی محوری به صورت کششی در پیچ ایجاد می‌شود که به نیروی پیش‌بار معروف است. به منظور یافتن ارتباط بین گشتاور اعمالی و نیروی به وجود آمده می‌توان از کرنش‌های محوری ایجاد شده در قطعه‌ای استوانه‌ای با استحکام بالا که بین مهره و ورق قرار می‌گیرد استفاده کرد. نتیجه حاصل ایجاد رابطه خطی بین گشتاور و نیروی پیش‌بار را در محدوده آزمایش نشان می‌دهد.

نتایج آزمایش‌های تجربی بیان می‌کند که با کاهش سهم مود یک در بارگذاری نمونه‌ها، نیروی بحرانی شکست افزایش می‌یابد و مشاهده می‌شود که این ماده در مقابل شکست در مود دو خالص چقرمه‌تر است و با صرف انرژی بیشتری می‌شکند.

نتایج تجربی نشان می‌دهد که نیروی لازم برای شکست نمونه‌های ترمیم شده، در مود یک خالص، مود دو خالص و مودهای ترکیبی بیشتر از نمونه‌های ترک‌دار ساده می‌باشد. ولی این افزایش در رابطه با مود کششی خالص نسبت به مود برشی خالص محسوس‌تر است. نتایج عددی نیز این یافته را تأیید می‌کند که ضریب فاکتور شدت تنش مؤثر برای نمونه‌های ترمیم شده کمتر از نمونه‌های ترک‌دار ساده می‌باشد.

وصله کامپوزیتی برای حالت بارگذاری مود یک خالص، مطلوب‌ترین حالت ترمیم بوده و بیشترین تأثیر را در ارتقای استحکام نمونه‌ها داشته است، این بدان معنی است که میزان تأثیرپذیری بازشدگی دهانه ترک از وصله کامپوزیتی بیشتر از تأثیرپذیری لغزش لبه‌های ترک می‌باشد.

برای حالت بارگذاری مود دو خالص، ترمیم با نیروی پیش‌بار پیچ و مهره مؤثرترین حالت ترمیم بوده و استحکام نمونه‌ها را به میزان بیشتری افزایش می‌دهد، به بیان دیگر تأثیر نیروی پیش‌بار روی جلوگیری از لغزش لبه‌های ترک بیشتر از بازشدگی دهانه ترک می‌باشد.

منابع

- Technology// (Welding metallurgy, Volume 2, Technology, covering filler metals, shrinkage and distortion, defects, heating and weld tests), (1967).
- [4] M. Goto, H. Miyagawa, H. Nisitani, CRACK GROWTH ARRESTING PROPERTY OF A HOLE AND BRINELL-TYPE DIMPLE, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 19(1) (1996) 39-49.
- [5] T. Chakherlou, J. Vogwell, The effect of cold expansion on improving the fatigue life of fastener holes, *Engineering failure analysis*, 10(1) (2003) 13-24.
- [6] T. Chakherlou, M. Mirzajanzadeh, J. Vogwell, Experimental and numerical investigations into the effect of an interference fit on the fatigue life of double shear lap joints, *Engineering Failure Analysis*, 16(7) (2009) 2066-2080.
- [7] T. Chakherlou, B. Abazadeh, J. Vogwell, The effect of bolt clamping force on the fracture strength and the stress intensity factor of a plate containing a fastener hole with edge cracks, *Engineering Failure Analysis*, 16(1) (2009) 242-253.
- [8] B. Abazadeh, T. Chakherlou, R.C. Alderliesten, Effect of interference fitting and/or bolt clamping on the fatigue behavior of Al alloy 2024-T3 double shear lap joints in different cyclic load ranges, *International Journal of Mechanical Sciences*, 72 (2013) 2-12.
- [9] Y. Yan, W.-D. Wen, F.-K. Chang, P. Shyprykevich, Experimental study on clamping effects on the tensile strength of composite plates with a bolt-filled hole, *Composites Part A: Applied science and manufacturing*, 30(10) (1999) 1215-1229.
- [10] H. Sallam, A. El-Sisi, E. Matar, O. El-Hussieny, Effect of clamping force and friction coefficient on stress intensity factor of cracked lapped joints, *Engineering Failure Analysis*, 18(6) (2011) 1550-1558.
- [11] T. Chakherlou, H. Maleki, A. Aghdam, B. Abazadeh, Effect of bolt clamping force on the fracture strength of mixed mode fracture in an edge crack with different sizes: Experimental and numerical investigations, *Materials & Design*, 45 (2013) 430-439.
- [12] A. Baker, *Fatigue crack propagation studies on aluminium panels patched with boron/epoxy composites*, in: *International Conference on Aircraft Damage Assessment and Repair*: 1991; Preprints of Papers, Institution of Engineers, Australia, 1991, pp. 209.
- [13] K.H. Chung, W.H. Yang, Mixed mode fatigue crack growth in aluminum plates with composite patches, *International journal of fatigue*, 25(4) (2003) 325-333.
- [14] M. Ayatollahi, R. Hashemi, Computation of stress intensity factors (K I, K II) and T-stress for cracks reinforced by composite patching, *Composite structures*,
- [1] P. Song, B. Sheu, H. Chou, Deposition of plating metals to improve crack growth life, *International journal of fatigue*, 23(3) (2001) 259-270.
- [2] J. Schubbe, S. Mall, Investigation of a cracked thick aluminum panel repaired with a bonded composite patch, *Engineering Fracture Mechanics*, 63(3) (1999) 305-323.
- [3] G. LINNERT, *Welding Metallurgy. Volume 2-*

- Engineering fracture mechanics*, 20(1) (1984) 145-157.
- [23] E. Gdoutos, *Engineering Application of Fracture Mechanics, VII, Problems of Mixed Mode Crack Propagation*, in, Martinus Nijhoff Pub., Boston, 1984.
- [24] M. Arcan, Z.a. Hashin, A. Voloshin, A method to produce uniform plane-stress states with applications to fiber-reinforced materials, *Experimental mechanics*, 18(4) (1978) 141-146.
- [25] ASTM, D2651-90. *standard guide for preparation of metal surfaces for adhesive bonding*, ASTM Standards, (1990).
- [26] ASTM, E8. *Standard test methods for tension testing of metallic materials*, Annual book of ASTM standards., (2001).
- [27] ASTM, D3039. *Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials*, ASTM Standards, (2000).
- [28] ASTM, D638-02. *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*, ASTM, West Conshohocken, PA, (2003).
- [29] Swanson Analysis Systems Inc. ANSYS, User's Guide for Revision 14, ANSYS 14 Documentation. Theory Reference, Element Library TARGET170 - 3D Target Segment, (2014).
- [30] Swanson Analysis Systems Inc. ANSYS, User's Guide for Revision 14, ANSYS 14 Documentation, Theory Reference, Element Library, CONTA174 – 3D Surface-to-Surface Contact, (2014).
- 78(4) (2007) 602-609.
- [15] M. Ramji, R. Srilakshmi, Design of composite patch reinforcement applied to mixed-mode cracked panel using finite element analysis, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 31(9) (2012) 585-595.
- [16] ASTM, E399. *Standard test method for plane strain fracture toughness and strain energy release rate of metallic materials*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, (1983).
- [17] ASTM, D5045. *Standard test methods for plane-strain fracture toughness and strain energy release rate of plastic materials*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, (1995).
- [18] N. Choupani, Experimental and numerical investigation of the mixed-mode delamination in Arcan laminated specimens, *Materials Science and Engineering: A*, 478(1) (2008) 229-242.
- [19] P. Noury, R. Sheno, I. Sinclair, On mixed-mode fracture of PVC foam, *International journal of fracture*, 92(2) (1998) 131-151.
- [20] R.A. Jurf, R.B. Pipes, Interlaminar fracture of composite materials, *Journal of Composite Materials*, 16(5) (1982) 386-394.
- [21] S. Yoon, C. Hong, Interlaminar fracture toughness of graphite/epoxy composite under mixed-mode deformations, *Experimental Mechanics*, 30(3) (1990) 234-239.
- [22] L. Banks-Sills, M. Arcan, Y. Bortman, A mixed mode fracture specimen for mode II dominant deformation,

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

H. N. Maleki, T. N. Chakherlou, Comparison Between Composite Patches and Bolt Clamping Force to Repair an Edge Crack in Aluminum Alloy 2024-T3 Specimens, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(3) (2018) 627-640.

DOI: 10.22060/mej.2017.12695.5399



