



Experimental Study of the Effects of Rectangular and H-Shaped Woven Nanocomposites Patch on Tensile Properties of Repaired AL5251 Sheets

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Shiri K.¹,
Eftekhari Shahri S. E.^{1*},
Rastegari Koupaii H.¹

How to cite this article

Shiri K, Eftekhari Shahri S E, Rastegari Koupaii H. Experimental Study of the Effects of Rectangular and H-Shaped Woven Nanocomposites Patch on tensile properties of Repaired AL5251 Sheets. Modares Mechanical Engineering. 2022;22(03):201-211.

¹ Department of Mechanical Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran.

*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran.

e.eftekhari@birjandut.ac.ir

Article History

Received: June 17, 2021
Accepted: August 04, 2021
ePublished: January 28, 2022

ABSTRACT

Crack nucleation and propagation in engineering segments and structures are unavoidable. Replacing a damaged part is the easiest way to prevent failure, but it is not always cost-effective. Therefore, in many cases, by repairing a component, the life of defective working parts can be increased. One of the effective strategies, is mending the cracked area using composite patches which are glued in crack formation place. The purpose of this study was to investigate the effect of patch on crack growth behavior as well as the effects of patch geometry on the mechanical properties of repaired AL5251 aluminum alloy. For this purpose, a Kevlar-epoxy composite patch with rectangular and H-shaped geometry has been used. Tensile test was performed to evaluate the mechanical properties and the crack growth behavior in the samples. The influences of effective area and geometry shape of the patch on the maximum tensile force applicable, specimen ductility, toughness and crack forming force have been investigated. The results showed that with the use of composite patch, ductility, force at the moment of cracking and the failure force increased compared to samples without repair. Also, comparison of patches with equal effective area showed that samples repaired with H-shaped patch have more load capacity than rectangular patch. In addition, the amount of toughness in the sample repaired with H-shaped patch has increased.

Keywords 5251 Aluminum Alloy, Sample Repairing, Composite Patch, Patch Geometry, Tensile properties

CITATION LINKS

[1] Fatigue crack propagation studies on aluminum panels... [2] Advances in the bonded composite repair of metallic aircraft structure. [3] Design, analysis and performance of adhesively bonded composite patch repair of cracked aluminum aircraft panels. [4] Analysis of the plastic zone size ahead of repaired cracks... [5] Modified couple stress theory and finite strain assumption... [6] Failure analysis of unidirectional polymeric matrix composites with two serial pin loaded-holes. [7] Analytical study of a pin-loaded hole in unidirectional laminated composites... [8] Fatigue analysis of cracked thick aluminum plate bonded with composite patches. [9] Thermo-magneto-mechanical long-term creep behavior... [10] Agglomeration effects on the vibrations of CNTs/fiber/polymer/metal hybrid laminates cylindrical shell. [11] Repairing cracked aluminum plates by aluminum patch using diffusion method. [12] Successive 3D FE analysis technique for characterization of fatigue crack growth... [13] Experimental and numerical study of the fatigue behaviour ... [14] Effects of curing thermal residual stresses on fatigue crack propagation of aluminum plates repaired by FML patches. [15] Acoustic emission characterization of a notched aluminum plate... [16] Experimental analysis of tensile strength of lateral notched aluminum plates... [17] An experimental study on the tensile behavior of the cracked aluminum plates... [18] Fatigue Analysis of Pre-cracked Aluminium Alloy Thin Sheets Repaired with a CFRP Patch at Elevated Temperature. [19] Comparison of SCC behaviour of crack in thin aluminium structure ... [20] Optimization of composite patch repair for center-cracked rectangular plate using design of experiments method. [21] Analysis of Crack Propagation by Bonded Composite for Different Patch Shapes Repairs in Marine Structures. [22] Comparison between rectangular and trapezoidal bonded composite repairs in aircraft structures. [23] Fatigue crack growth in aluminum panels repaired with different shapes of single-sided composite patches. [24] Optimisation of the sizes of bonded composite repair in aircraft structures. [25] Design, analysis and performance of adhesively bonded composite... [26] Numerical modeling of adhesively bonded composite patch repair...

بررسی تجربی تأثیر وصله نانو کامپوزیتی مستطیلی و H شکل بر خواص کششی نمونه‌های ترمیم شده آلیاژ آلومینیوم ۵۲۵۱

کیوان شیری

دانشکده مهندسی مکانیک و مواد، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

سیداحسان افتخاری شهری*

دانشکده مهندسی مکانیک و مواد، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

حبیب الله رستگاری کوپایی

دانشکده مهندسی مکانیک و مواد، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

چکیده

جوانه‌زنی و رشد ترک در قطعات و سازه‌های مهندسی یک امر اجتناب‌ناپذیر است. تعویض قطعه یا قسمتی از آن که دچار آسیب شده، ساده‌ترین راه برای جلوگیری از وقوع از کار افتادگی است که البته همواره مقرون به صرفه نمی‌باشد. لذا در بسیاری از موارد می‌توان با تعمیر قطعه، عمر قطعات کار کرده معیوب را افزایش داد. یکی از راهکارهای مؤثر، ترمیم محل ترک خوردگی به وسیله وصله‌های کامپوزیتی از طریق چسباندن آنها بر روی محل تشکیل ترک است. هدف این پژوهش، بررسی چگونگی اثر وصله بر رفتار رشد ترک و همچنین تأثیر هندسه وصله بر خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم A15251 می‌باشد. برای این منظور، از وصله کامپوزیتی کولار با هندسه مستطیلی و H شکل استفاده شده است. برای بررسی خواص مکانیکی و ارزیابی رفتار رشد ترک در نمونه‌ها، آزمون کشش اجرا شد. تأثیر مساحت مؤثر و شکل هندسی وصله بر حداکثر نیروی کششی قابل اعمال، بیشترین تغییر طول نمونه، چقرمگی و نیروی آغاز ترک بررسی شده است. نتایج بدست آمده نشان داد که با استفاده از وصله کامپوزیتی، میزان تغییر طول نمونه تا شکست، مقدار نیرو در لحظه شروع ترک و مقدار نیروی شکست نسبت به نمونه‌های بدون ترمیم افزایش یافته است. همچنین، مقایسه وصله‌ها با مساحت مؤثر برابر نشان داد نمونه ترمیم شده با وصله با هندسه H شکل، قابلیت تحمل بار بیشتری نسبت به وصله مستطیل شکل دارد. همچنین میزان چقرمگی در نمونه ترمیم شده با وصله H شکل نیز افزایش یافته است.

کلیدواژه‌ها: آلیاژ آلومینیوم ۵۲۵۱، ترمیم قطعه، وصله کامپوزیتی، هندسه وصله، خواص کششی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۱۳

*نویسنده مسئول: e.eftekhari@birjandut.ac.ir

۱- مقدمه

وجود نواقص گوناگون مکانیکی مانند ترک و گسترش آن بر اثر اعمال بارهای متنوع استاتیکی و یا متناوب خستگی به سازه‌ها، مسئله‌ای عادی و اجتناب‌ناپذیر برای مهندسان طراح و تکنسین‌های بخش تعمیر و نگهداری ماشین‌آلات مکانیکی است [1]. به بیان دیگر، وجود ترک و شکست قطعه ناشی از گسترش آن، یکی از معیارهای مهم و غیرقابل صرفنظر برای تخمین عمر سازه‌های مکانیکی در صنایع گوناگون از قبیل هوافضا، خودروسازی، پل‌سازی و صنایع دریایی می‌باشد. علی‌رغم

اینکه بسیاری از مهندسان طراح، قطعات مهندسی را طوری طراحی می‌کنند که سازه مورد نظر تنها در محدوده سالم (بدون ترک) به کارکرد خود ادامه دهد، اما در برخی صنایع مانند صنعت هوافضا، به علت شرایط خاص بارهای آئروپنایمیکی و مکانیکی وارد بر بال و بدنه هواپیما، مشاهده ترک در سازه هواپیماهای نظامی و مسافری مسئله‌ای رایج به شمار می‌آید. به بیان دیگر، به دلیل پیچیده و متنوع بودن بارهای وارد بر سازه هواپیما، ترک در محل‌های تمرکز تنش، مانند محل سوراخ‌های پرچ‌کاری جوانه‌زده و شروع به رشد می‌نماید که در صورت عدم تشخیص ترک و تخمین استحکام باقیمانده سازه، احتمال شکست قطعه در حین عملکرد هواپیما وجود دارد.

به منظور افزایش عمر کاری هواپیماهایی که بخشی از عمر کاری خود را سپری نموده‌اند، اجزای ترک‌دار باید تعویض یا ترمیم گردند [2]. استفاده از وصله‌های کامپوزیتی یک روش نوین در تکنولوژی تعمیر قطعات می‌باشد. در این روش به جای پرچ کردن پنل‌های فلزی به بدنه هواپیما در نواحی ترک‌دار، وصله کامپوزیتی چسبانده می‌شود. تعمیر قطعات ترک‌دار به وسیله وصله‌های کامپوزیتی روشی مؤثر و اقتصادی است که در آن وصله در یک یا دو طرف قطعه متصل شده و باعث بالا رفتن عمر سازه می‌شود [3]. با توجه به مزیت‌های این وصله‌ها، از آنها برای استحکام‌دهی و ترمیم سازه‌ها بویژه قطعات هواپیما، مخازن فشار، لوله‌های انتقال مواد و دیگر صنایع استفاده می‌شود [4-7]. از آنجا کامپوزیت‌ها ویژگی‌هایی مانند نسبت استحکام به وزن بالا، قابلیت ساخت راحت و مقدار سفتی بالا دارند، برای ساخت وصله‌های ترمیم‌کننده مورد توجه بوده‌اند [8-10]. در حالتی که بارگذاری روی قطعه به‌گونه‌ای باشد که ترک در یک جهت نیاز به ترمیم داشته باشد، وصله‌های کامپوزیتی با زمینه پلیمری می‌توانند ترمیم مفیدتری ایجاد کنند [11]. تحقیقات نشان می‌دهد این نوع وصله به عنوان تقویت‌کننده برای ساختارهای فلزی ترک خورده در هواپیما و صنایع هوافضا مورد استفاده قرار گرفته و عملکرد مناسب و بهبود بهره‌وری اقتصادی آن به تایید رسیده است [3,12]. همچنین این نوع از وصله، سبب افزایش قابل توجه در وزن سازه نمی‌شود که این موضوع در صنایع هوافضا بسیار مهم است [13].

آلیاژهای آلومینیوم به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا و شکل‌پذیری مناسب کاربرد زیادی در صنایع مختلف، از جمله صنایع هوافضا دارند. لذا در خصوص استفاده از وصله‌های کامپوزیتی در ترمیم قطعات ساخته شده از آلیاژهای آلومینیوم و تأثیر آن بر خواص مکانیکی، مطالعاتی توسط محققین انجام شده است. از آن جمله حسینی و همکارانش [14] تأثیر دمای پخت و تنش‌های پسماند حرارتی بر عملکرد خستگی نمونه‌های آلومینیومی ترمیم شده با الیاف چند لایه فلزی در قیاس با وصله‌های کامپوزیتی را بررسی کردند.

در زمینه بررسی تأثیر شکل وصله در ترمیم قطعات دارای نقص آلومینیومی، تحقیقات محدودی توسط محققین انجام شده است. سادک و همکارانش^[21] یک بررسی عددی با استفاده از روش المان محدود بر روی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ ترک‌دار با استفاده از چهار نوع وصله کامپوزیتی با شکل‌های دایره، مستطیل، بیضی، دوزنقه انجام دادند. طبق نتایج این تحقیق، وصله دایره‌ای با چسب بورن اپوکسی بهترین و مقاوم‌ترین وصله برای ترمیم این آلیاژ می‌باشد. باچیر بویادجرا و همکارانش^[22] به بررسی مقایسه‌ای عملکرد ورق آلومینیومی ترک‌دار پس از نصب وصله کامپوزیتی مستطیلی و دوزنقه‌ای پرداختند. تحقیق ایشان نشان داد برای ترک‌های در محدوده بین ۵ تا ۲۰ میلی‌متر وصله‌های دوزنقه‌ای دارای عملکرد بهتری هستند و شدت تنش در نوک ترک را کاهش داده که این موضوع سبب بهبود عمر خستگی سازه تعمیر شده و کاهش تنش‌های چسبندگی می‌شود. خان‌محمد و همکارانش^[23] اثر شکل وصله بر مقاومت خستگی نمونه‌های آلومینیوم آلیاژی ۲۰۲۴ و ۷۰۷۵ ترمیم شده با وصله کامپوزیتی را به صورت عددی و تجربی بررسی کردند. از سه شکل کامپوزیتی متفاوت بصورت مستطیلی شکل، دوزنقه‌ای و مثلثی با جهت‌گیری‌های متفاوت برای ارزیابی عملکرد وصله استفاده شد. نتایج تجربی این تحقیق نشان داد که وصله‌های مستطیلی کارآمدترین ترمیم را ایجاد می‌کند، در حالی که شکل مثلثی با جهت‌گیری چپ، به نسبت سایر وصله‌ها نتایج نامناسبی در پی دارد. فیکاه و همکارانش^[24] به بهینه‌سازی ابعاد وصله در ترمیم قطعات آلومینیوم آلیاژ ۲۰۲۴ مورد استفاده در اجزاء هواپیما با وصله کامپوزیتی پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان‌دهنده تأثیر بسیار زیاد پارامترهای طول، عرض و ضخامت وصله بر خواص مکانیکی نمونه‌های ترمیم شده بود. آنچه از نتایج تحقیقات پیشین به دست آمد، متغیرهای زیادی از جمله جنس وصله، تعداد لایه، نحوه اتصال و هندسه وصله بر خواص مکانیکی نمونه‌های ترمیم شده مؤثر هستند که در این میان متغیرهای هندسی شامل شکل و ابعاد وصله بر عملکرد وصله تأثیر زیادی دارند^[21-24]. لذا در این تحقیق، با در نظر گرفتن شکل مستطیلی برای وصله که بر اساس نتایج تحقیقات^[22,23] ترمیم مناسب ایجاد می‌کند و سپس تقویت آن به کمک پایه‌های طرفین وصله، اثر شکل هندسی وصله بر خواص مکانیکی کششی بررسی شده است. از وصله‌های کامپوزیتی کولار برای ترمیم و بهبود خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۵۲۵۱ ترک‌دار استفاده شده است. این آلیاژ در سازه‌های دریایی، قطعات هواپیما و پنل‌های خودرو کاربرد گسترده دارد و تا کنون نتایجی در خصوص ترمیم قطعات ساخته شده با این آلیاژ منتشر نشده است. همچنین با انجام آزمون کشش تک‌محور، اثر هندسه وصله بر میزان استحکام، کشش و چقرمگی ارزیابی شده است.

استفاده از آزمون کشش تک محور به دلیل در دسترس بودن و خواص مکانیکی متنوعی که از آن حاصل می‌شود، جهت ارزیابی خواص مکانیکی نمونه‌های آلومینیومی ترمیم شده استفاده شده است. گو و همکارانش^[15] از وصله‌های کامپوزیت فایبرگلس برای ترمیم نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ دارای سوراخ لبه‌دار استفاده کردند و عملکرد وصله را تحت بارهای کششی به صورتی تابعی از تعداد لایه‌ها بررسی کردند. آنها نشان دادند ایجاد شکست در نمونه در سه مرحله رخ می‌دهد، در مرحله اول ترک خوردگی تنها در رزین و در مرحله سوم تنها در ورق آلومینیوم ایجاد می‌شود. تحقیق ایشان بر مرحله دوم متمرکز شده بود که رشته‌های تقویت‌کننده دچار شکست می‌شوند که بر اساس ویژگی‌های انتشار صوت در ماده، رفتار آنها مطالعه شد.

آشنای قاسمی و همکارانش^[16] رفتار کششی ورق‌های ترک‌دار از جنس آلومینیوم آلیاژی ۲۰۲۴ که به کمک وصله کامپوزیتی از نوع کامپوزیت لایه فلزی (FML) با لایه‌های الیاف کربن و لایه فلزی فسفر برنز ترمیم شده بود را بررسی کردند. نتایج آنها نشان دهنده افزایش قابل توجه استحکام کششی ورق‌های ترمیم‌شده در مقایسه با ورق‌های بدون وصله بود. این محققین در پژوهش دیگری^[17] از وصله‌های کامپوزیتی لایه فلزی با الیاف شیشه و رزین اپوکسی LY۵۰۵۲ در ترمیم ورق‌های آلومینیوم آلیاژی ۱۰۳۵ استفاده کردند و تأثیر متغیرهای طول شیار، زاویه ترک و نحوه لایه‌چینی را بر خواص کششی نمونه‌های ترک‌دار بررسی کردند. شینده و همکاران^[18] به بررسی عمر خستگی نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ دارای ترک مرکزی که با وصله‌های سه‌لایه و پنج‌لایه از جنس پلاستیکی تقویت شده با فیبر کربن (CFRP) ترمیم شده بودند پرداختند. یافته‌های این تحقیق تایید می‌کرد عمر خستگی نمونه‌ها با اتصال وصله‌های CFRP به میزان قابل توجهی بهبود یافته است. همچنین نتایج نشان داد که عملکرد وصله پنج‌لایه به میزانی زیادی بهتر از وصله سه‌لایه بود. بیکر و همکاران^[19] به مقایسه رفتار ترک در یک سازه آلومینیومی نازک در حالت عادی و در شرایط ترمیم یک طرفه با یک وصله کامپوزیتی CFRP پرداختند. آنها از یک روش سیستماتیک بر اساس معیارهای غربالگری فدرسن، برای ایجاد نمونه‌های آزمایش استفاده کردند. نتایج تحقیق نشان داد استفاده از وصله کامپوزیتی سبب شده ضریب شدت تنش به اندازه ۳ تا ۴ مرتبه کاهش یابد. همچنین ترمیم با وصله کامپوزیت سبب کاهش میزان جابجایی بازشدگی نوک ترک (CTOD) گردید. ایبید و همکاران^[20] از یک مدل اجزاء محدود سه بعدی برای بررسی نحوه رشد ترک در یک صفحه مستطیلی آلومینیوم ۲۰۲۴ ترمیم شده با وصله کامپوزیتی تحت تنش کششی یک محوری یکنواخت استفاده کردند. آنها سپس با استفاده از طرحی آزمایش، پارامترهای مؤثر وصله کامپوزیتی و خواص چسب را با هدف بهبود کیفیت و دوام ترمیم، بهینه‌سازی کردند.

۲- آزمایشات تجربی

۱-۲- نمونه اولیه

نمونه‌های آزمون کشش در این تحقیق از آلیاژ آلومینیوم ۵۲۵۱ مطابق با استاندارد ASTM-B209 تهیه شده‌اند. ابعاد هندسی نمونه‌های مورد آزمایش در جدول ۱ نشان داده شده است. با استفاده از وایرکات، یک شیار افقی در قسمت میانی نمونه ایجاد شده که به صورت یک‌بی‌نظمی هندسی سبب تمرکز تنش و آغاز رشد ترک می‌شود (شکل ۱- الف). از وصله‌های کامپوزیتی کولار برای ترمیم ورق آلومینیومی ترک‌دار استفاده شده است. شکل شماره ۱- ب تعمیر یکطرفه ورق آلومینیومی با وصله کولار را نشان می‌دهد. وصله کامپوزیتی از الیاف کولار با ضخامت الیاف ۱/۵ میلی‌متر و دانسیته سطحی ۲/۶ گرم بر سانتیمتر مربع، به صورت دولایه بافته شده و ضخامت ورق وصله نهایی ۳ میلی‌متر می‌باشد. برای اتصال بین وصله و فلز از چسب اپوکسی UHU استفاده شده است.

۲-۲- اتصال وصله کامپوزیتی

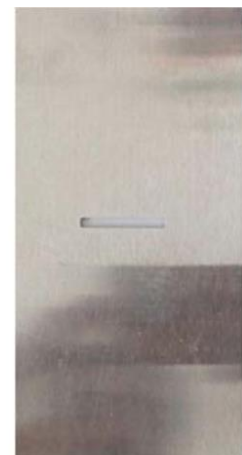
یکی از مراحل مهم در ترمیم ورق آلومینیومی با وصله‌های کامپوزیتی، ایجاد سطحی است که قابلیت چسبندگی خوبی داشته باشد. در حالت عادی به دلیل وجود لایه بسیار نازک اکسید که روی سطح آلومینیوم وجود دارد، میزان چسبندگی سطح به شدت پائین است. روش‌های مختلفی برای آماده‌سازی سطح آلومینیوم به کار می‌رود، از جمله آندایزینگ سطح (Anodizing) با محلول فسفات و یا کروماته کردن سطح (Surface chromate coatings) که در این تحقیق از روش دوم استفاده شده است.

جدول ۱) مشخصات ابعادی نمونه‌های آزمایش (ابعاد به میلی‌متر)

ابعاد نمونه	ضخامت ورق	طول شیار مرکزی	پهنای شیار
۸۰×۱۵۰	۲/۵	۲۷	۳



ب



الف

شکل ۱) الف) نمونه اولیه ترک‌دار آلومینیوم ۵۲۵۱ بدون وصله، ب) ترمیم نمونه ترک‌دار با وصله کامپوزیتی کولار

برای کروماته کردن سطح از دی‌کرومات سدیم، اسید سولفوریک و آب در دمای ۶۰ تا ۶۵ درجه استفاده شده است. دلیل استفاده از محلول در دمای بالا ایجاد سطح میکروسکوپی متخلخل برای چسبندگی بهتر است. پس از انجام این فرایند، به دلیل حذف لایه اکسید سطح آلومینیوم روشن‌تر می‌شود.

عملیات چسباندن وصله بر روی سطوح، نهایتاً دو ساعت بعد از آماده‌سازی سطح انجام می‌شود تا خواص کروماته آن به خوبی حفظ شود. وصله کامپوزیتی به وسیله چسب بر روی سطح ورق آلومینیومی از یک‌طرف چسبانده شده است. مراحل اتصال وصله شامل لایه‌گذاری دستی و سپس پخت چسب رزین اپوکسی می‌باشد. جهت تکمیل فرایند اتصال وصله، با استفاده از دستگاه پرس، کامپوزیت به مدت ۱۵ دقیقه تحت فشار ۸۰ بار در دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد قرار داده شده است. دستگاه پرس مورد استفاده در این تحقیق شامل یک جک هیدرولیکی و یک فیکسچر با دو فک بالا و پایین است که در هر کدام از این فک‌ها سه المنت میله‌ای برای حرارت دادن وصله تعبیه شده است. با حرارت ناشی از المنت‌ها و فشار ناشی از جک هیدرولیکی، لایه‌های وصله در داخل فیکسچر کاملاً به هم می‌چسبند. کامپوزیت آماده شده پس از فرایند پرس در شکل ۲ نشان داده شده است.

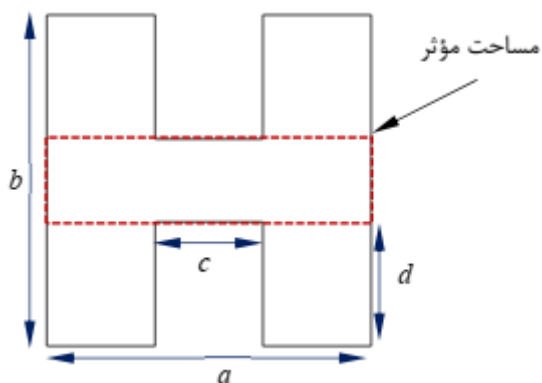
۲-۳- آزمون کشش

از آزمون کشش تک محور جهت ارزیابی نیرو، حداکثر میزان تغییر شکل و چقرمگی کششی استفاده شده است. دستگاه آزمون کشش با نام تجاری SANTAM-STM-150 جهت آزمایشات این تحقیق به کار گرفته شده است. یک فیکسچر جهت گیره‌بندی نمونه‌های ترمیم شده طراحی و روی دستگاه آزمون کشش نصب شد. آزمایشات با سرعت کشش ثابت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه برای تمام نمونه‌ها انجام شد. در شکل ۳ نحوه قرارگیری نمونه آزمون کشش در فیکسچر نشان داده شده است.



شکل ۲) کامپوزیت آماده شده پس از پرس

در آزمایشات بخش دوم تحقیق، ابعاد وصله‌ها بر اساس مساحت مؤثر یکسان طراحی شده‌اند. توضیح اینکه وصله H شکل به صورت وصله مستطیل شکل تقویت شده با چهار عدد پایه عمل می‌کند. در مورد این وصله‌ها، پارامتری به نام مساحت مؤثر تعریف شده که سطح تماس اصلی وصله با قطعه را نشان می‌دهد. این قسمت از وصله اثر اصلی استحکام بخشی را به وجود می‌آورد. ابعاد وصله H شکل و مساحت مؤثر در شکل ۵ و جدول ۳ ارائه شده است. در نمونه‌های ۷ تا ۵۰ مساحت مؤثر جفت وصله‌های معادل با هم برابر هستند.



شکل ۵) مساحت مؤثر و ابعاد در وصله H شکل

جدول ۳) مشخصات ابعادی وصله‌های H شکل (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

شماره قطعه	عرض a	طول b	عرض بریده شده c	طول بریده شده d
۲۹	۴۵	۴۵	۱۵	۱۶
۳۰	۴۵	۴۵	۱۵	۱۵/۵
۳۱	۴۵	۴۵	۱۵	۱۴/۸
۳۲	۴۵	۴۵	۱۵	۱۴/۳
۳۳	۴۵	۴۵	۱۵	۱۳/۶
۳۴	۴۵	۴۵	۱۵	۱۳
۳۵	۴۵	۴۵	۱۵	۱۲/۱
۳۶	۴۵	۵۰	۱۵	۱۳/۸
۳۷	۴۵	۵۰	۱۵	۱۲/۸
۳۸	۴۵	۵۰	۱۵	۱۱/۸
۳۹	۴۵	۵۰	۱۵	۱۱
۴۰	۴۵	۵۰	۱۵	۹/۸
۴۱	۴۵	۵۰	۱۵	۸/۶
۴۲	۴۵	۵۰	۱۵	۷/۳
۴۳	۴۸	۵۵	۱۵	۹/۲
۴۴	۴۸	۵۵	۱۵	۸/۲
۴۵	۴۸	۵۵	۱۵	۶/۶
۴۶	۴۸	۵۵	۱۵	۴/۱
۴۷	۴۸	۵۵	۱۵	۲/۶
۴۸	۴۹	۶۵	۱۵	۵/۷
۴۹	۴۹	۶۵	۱۵	۳/۴
۵۰	۴۹	۷۰	۱۵	۲/۵

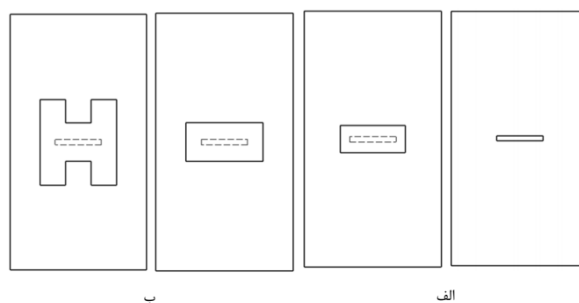


شکل ۳) نحوه قرارگیری نمونه آزمون کشش در فیکسچر دستگاه آزمون کشش

در بخش اول این تحقیق، هدف بررسی میزان تأثیر نصب وصله‌های کامپوزیتی بر خواص کششی نمونه‌ها و میزان رشد ترک در نمونه‌های آلومینیومی بوده است. برای این منظور ۳ نمونه ترک‌دار و ۳ نمونه ترمیم شده با وصله تحت آزمون کشش قرار گرفتند. برای ۳ نمونه دوم از وصله کولار مستطیل شکل با مساحت ثابت ۵۰۰ میلی‌متر مربع جهت ترمیم استفاده شد. در بخش دوم تحقیق به مطالعه تأثیر مساحت و شکل هندسی وصله‌های کامپوزیتی بر روی خواص مکانیکی نمونه‌های ترمیم شده پرداخته شده است. بدین منظور ۴۴ قطعه با دو هندسه متفاوت وصله مورد آزمایش قرار می‌گیرد، ۲۲ قطعه با وصله مستطیل شکل با مساحت متفاوت و ۲۲ قطعه با وصله H شکل. در جدول ۲ اطلاعات مربوط به آزمایشات انجام شده با شرایط ترمیم متفاوت ارائه می‌گردد. در شکل ۴ نیز نمونه‌های آزمایش در دو بخش این تحقیق به صورت شماتیک نشان داده شده است. با افزایش شماره نمونه‌ها (از ۷ تا ۲۸ و از ۲۹ تا ۵۰) مساحت وصله افزایش یافته است.

جدول ۲) نمونه‌های مورد آزمایش در دو بخش تحقیق

شماره نمونه	نوع نمونه
از ۱ تا ۳	نمونه‌های آلیاژ آلومینیم ۵۲۵۱ ترک‌دار
از ۴ تا ۶	نمونه‌های ترمیم شده با وصله مستطیلی- مساحت ثابت
از ۷ تا ۲۸	نمونه‌های ترمیم شده با وصله مستطیلی با مساحت افزایشی
از ۲۹ تا ۵۰	نمونه‌های ترمیم شده با وصله H شکل با مساحت افزایشی



شکل ۴) شماتیک نمونه‌های آزمایش در الف) بخش اول تحقیق جهت ارزیابی تأثیر وصله. ب) بخش دوم تحقیق برای ارزیابی مساحت و شکل هندسی وصله

۳- نتایج

۳-۱- بررسی تأثیر وصله کامپوزیت بر خواص مکانیکی

در جدول ۴ داده‌های میزان تغییر طول تا شکست، نیرو در لحظه شروع ترک و نیروی شکست برای نمونه‌های معمولی (بدون وصله) و نمونه‌های ترمیم شده با وصله مستطیلی شکل با مساحت ثابت ۵۰۰ میلی‌متر مربع ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، استفاده از وصله کامپوزیتی سبب افزایش میانگین میزان تغییر طول نهایی، میانگین نیروی بیشینه و نیرو در لحظه شکست شده است. مقادیر میانگین نیروهای حاصل در نمودار ستونی شکل ۶ مقایسه شده است. نیروهای کششی اعمال شده اول به وصله منتقل شده و پس از شکست چسب و با اعمال نیروی بیشتر، رشد ترک در قطعه آلومینیوم شروع می‌شود [5,25]. بنابراین وجود وصله‌های کامپوزیتی بر روی قطعات آلومینیوم، رشد ترک در قطعه را به تاخیر انداخته و لذا میزان تغییر طول و نیروی قابل اعمال به قطعه افزایش می‌یابد. در شکل ۷ نتیجه آزمون کشش به صورت نمودار نیرو بر حسب تغییر طول برای نمونه شماره ۱ (از قطعات بدون وصله) و نمونه شماره ۴ (از قطعات ترمیم شده با وصله مستطیلی) با هم مقایسه شده است.

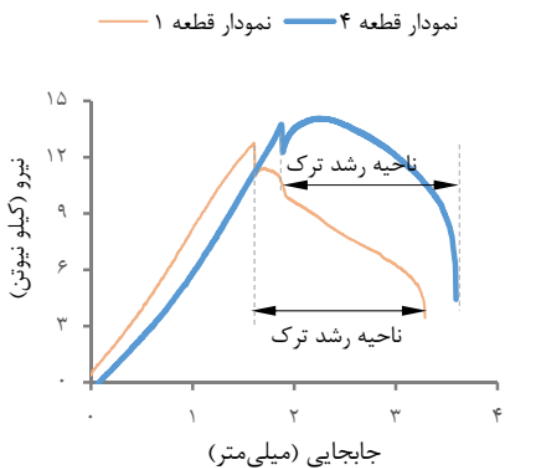
جدول ۴) میزان تغییر طول و نیرو در ۶ نمونه اول

شماره نمونه	نوع وصله	تغییر طول (mm)	نیرو در لحظه ترک (kN)	نیرو در لحظه شکست (kN)
۱	ندارد	۳/۲۸	۱۲/۷۶	۳/۴۴
۲	ندارد	۳/۲۸	۱۲/۷۶	۳/۴۴
۳	ندارد	۳/۲۹	۱۴/۳۱	۳/۴۲
میانگین				
۴	مستطیلی	۳/۵۹	۱۳/۶۷	۴/۰۹
۵	مستطیلی	۳/۷۰	۱۶/۷۹	۴/۴۲
۶	مستطیلی	۳/۹۲	۱۷/۵۰	۴/۱۹
میانگین				
		۳/۷۳	۱۵/۹۹	۴/۲۳
اختلاف (%)				
		۱۳/۳۷	۲۰/۵۰	۲۲/۹۷

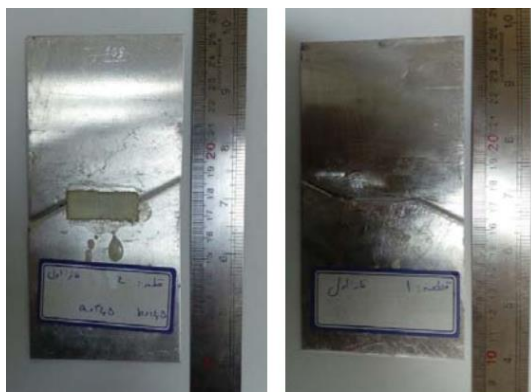
در شکل ۸ نیز نمونه‌های ۱ و ۴ پس از آزمون کشش نشان داده شده‌اند. طبق نمودار نیرو-تغییر طول، برای قطعه شماره ۱ در نیروی ۱۲/۷۵۸ کیلو نیوتن و مقدار تغییر طول ۱/۶۰ میلی‌متر، نمودار نیرو دچاریک افت ناگهانی شده که نشان‌دهنده شروع رشد ترک در ورق می‌باشد [25,26]. با ادامه کشش، ترک ایجاد شده با نیروی کمتر در نمونه آلومینیومی رشد خواهد کرد تا به شکست منتهی شود.

با ترمیم نمونه با استفاده از وصله کامپوزیتی، پیش از رشد ترک در نمونه آلومینیوم، ترک در چسب ایجاد می‌شود [26]. لذا در فرایند کشش نمونه ترمیم شده، ابتدا بخش بزرگی از چسب در مجاورت ترک خراب می‌شود و با ادامه فرایند، تنش‌ها در وصله کامپوزیت افزایش می‌یابد، تا زمانی که به دلیل خرابی چسب، طول ترک در نمونه آلومینیومی افزایش یابد.

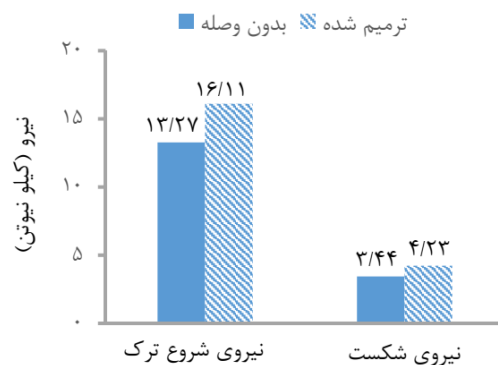
در نمونه شماره ۴، پس از ترمیم قطعه با وصله کامپوزیتی کولار، مقدار نیرو در لحظه شروع ترک به مقدار ۱۳/۶۷۰ کیلو نیوتن رسیده است. به عبارت دیگر مقدار نیروی مورد نیاز جهت شروع ترک به میزان ۷/۱۵ درصد افزایش داشته است.



شکل ۷) مقایسه نمودار نیرو-تغییر طول نمونه‌های شماره ۱ و ۴



شکل ۸) الف- نمونه شماره ۱ (بدون وصله)، ب- نمونه شماره ۴ (نمونه ترمیم شده با وصله مستطیلی) پس از انجام تست کشش



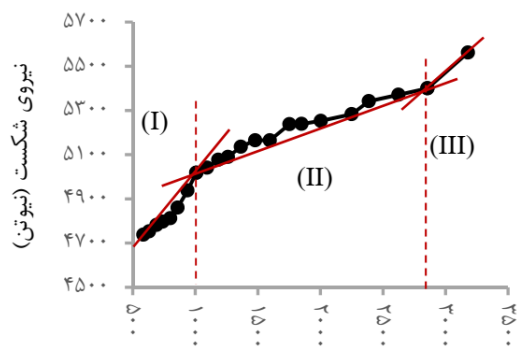
شکل ۶) مقایسه میانگین نیروی قابل اعمال در نمونه‌های بدون وصله و ترمیم شده

همانطور که اعداد جدول نشان می‌دهد، با افزایش مساحت وصله از ۵۸۵ تا ۳۱۸۰ میلی‌متر مربع، مقدار حداکثر تغییر طول نمونه و مقدار نیروی بیشینه مطابق شکل ۹ روند افزایش دارند. با افزایش مساحت وصله، بواسطه انتقال نیرو به سطح مشترک بزرگتر وصله و ورق، مقاومت در برابر رشد ترک افزایش یافته و به تبع آن نیروی لازم برای شروع رشد ترک و تغییر طول تا شکست افزایش خواهد یافت.

همانگونه که در شکل ۹ نشان داده شده است، شیب تغییر طول نمونه کشش نسبت به شیب افزایش مساحت وصله کمتر است. به گونه‌ای که با افزایش مساحت وصله از ۵۸۵ میلی‌متر مربع برای قطعه شماره ۷ تا ۳۱۸۰ میلی‌متر مربع برای قطعه شماره ۲۸ (افزایش ۴/۴۴ برابری) میزان تغییر طول تا شکست ۲۷/۴ درصد افزایش یافته است. لذا میزان تغییر طول نمونه با مساحت وصله رابطه خطی ندارد و شکل هندسی وصله نیز تأثیرگذار است. در شکل ۱۰ روند تغییرات نیروی شکست بر حسب مساحت وصله به وسیله سه خط مستقیم نشان داده شده است. همانطور که مشخص است با افزایش مساحت وصله، نیرو با تقریب خوبی به صورت چندخطی با شیب‌های متفاوت افزایش یافته است.



شکل ۹ تغییرات مساحت وصله مستطیلی و میزان تغییر طول نمونه‌های مختلف



شکل ۱۰ اثر افزایش مساحت وصله بر چگونگی تغییرات نیروی شکست برای وصله مستطیلی شکل

همچنین میزان تغییر طول در لحظه ترک از ۱/۶۰ برای قطعه شماره ۱ به مقدار ۱/۸۶ در قطعه شماره ۴ رسیده که نشان می‌دهد آغاز ترک به مقدار ۱۶/۲۵ درصد برای تغییر طول نمونه به تأخیر افتاده است. افزایش نیرو پس از افت ناگهانی در نمونه ترمیم شده، به دلیل تحمل نیروی کشش توسط وصله و چسب تا زمان خرابی چسب است. بدین ترتیب، افزایش نیروی ایجاد ترک و همچنین تغییر موقعیت ناحیه وقوع افت ناگهانی نیرو به تغییر طول‌های بیشتر، به معنی به تأخیر افتادن شروع رشد ترک می‌باشد. همچنین با مقایسه مساحت زیر نمودار در ناحیه پس از آغاز رشد ترک در نمودارهای شکل ۷ مشاهده می‌شود میزان چقرمگی کششی در ناحیه رشد ترک از مقدار ۱۳/۹۵ کیلوژول در نمونه بدون وصله شماره ۱ به مقدار ۲۱/۴۷ کیلوژول در قطعه شماره ۴ ترمیم شده با وصله کولار افزایش یافته است. به عبارت دیگر میزان چقرمگی در ناحیه رشد ترک به میزان ۵۳/۹ درصد بهبود داشته است.

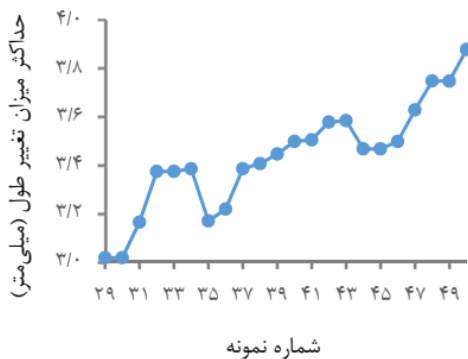
۳-۲- بررسی وصله با هندسه مستطیل شکل

در جدول ۵، نیروی بیشینه، نیروی شکست و میزان تغییر طول مربوط به آزمون کشش ۲۲ نمونه آلومینیومی ترمیم شده با وصله مستطیل شکل (نمونه شماره ۷ تا ۲۸) نشان داده شده است که بر حسب مساحت وصله مرتب شده‌اند.

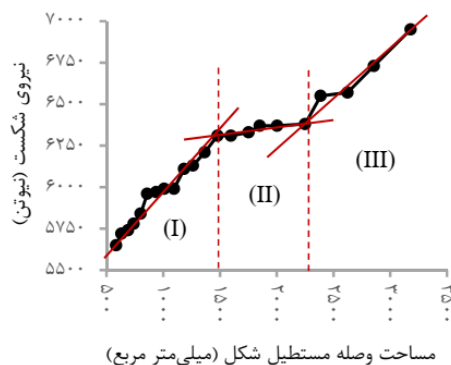
جدول ۵) نتایج آزمون کشش برای نمونه های تقویت شده با وصله های مستطیل شکل

شماره نمونه	مساحت وصله (mm ²)	تغییر طول تا شکست (mm)	نیرو در لحظه ایجاد ترک (kN)	نیرو در لحظه شکست (kN)
۷	۵۸۵	۲/۸۵۹۶	۱۴/۵۴	۴/۷۴
۸	۶۳۱	۲/۹۶۶۲	۱۵/۳۰	۴/۷۵
۹	۶۹۰	۲/۸۵۹۸	۱۴/۵۲	۴/۷۸
۱۰	۷۴۰	۳/۱۲۶	۱۴/۶۳	۴/۸۰
۱۱	۸۰۱	۳/۱۲۶۲	۱۵/۲۲	۴/۸۱
۱۲	۸۵۹	۳/۲۱۸	۱۴/۱۶	۴/۸۶
۱۳	۹۳۸	۳/۳۴۴۹	۱۴/۷۴	۴/۹۴
۱۴	۱۰۰۸	۳/۴۱۲۸	۱۴/۳۹	۵/۰۲
۱۵	۱۰۹۵	۳/۴۱۳۱	۱۴/۴۱	۵/۰۴
۱۶	۱۱۸۴	۳/۳۲۹۷	۱۴/۶۰	۵/۰۸
۱۷	۱۲۶۲	۳/۳۴۳۹	۱۴/۸۳	۵/۰۹
۱۸	۱۳۶۵	۳/۴۹۵۸	۱۴/۶۴	۵/۱۴
۱۹	۱۴۷۹	۳/۴۹۶۷	۱۴/۵۴	۵/۱۷
۲۰	۱۵۹۷	۳/۵۲۲۷	۱۴/۴۷	۵/۱۷
۲۱	۱۷۵۳	۳/۵۲۵۲	۱۶/۴۵	۵/۲۴
۲۲	۱۸۵۰	۳/۴۹۸۳	۱۵/۴۴	۵/۲۴
۲۳	۲۰۰۴	۳/۵۱۱۶	۱۶/۴۷	۵/۲۵
۲۴	۲۲۵۰	۳/۵۵۳۸	۱۶/۳۵	۵/۲۸
۲۵	۲۳۸۷	۳/۶۴۲۷	۱۴/۲۶	۵/۳۴
۲۶	۲۶۲۴	۳/۶۱۶	۱۸/۹۱	۵/۳۷
۲۷	۲۸۵۶	۳/۶۴۲۸	۱۷/۸۲	۵/۴۰
۲۸	۳۱۸۰	۳/۶۴۳۹	۱۴/۱۱	۵/۵۶

همچنین مشابه با وصله مستطیل شکل، رفتار مکانیکی نمونه‌ها نسبت به افزایش مساحت وصله‌ها یکنواخت نیست. در شکل ۱۲ این موضوع برای تغییرات نیروی شکست بر حسب مساحت وصله H شکل نشان داده شده است. در این شکل روند تغییرات نیروی شکست به وسیله سه خط مستقیم بررسی شده است. همانگونه که در شکل ۱۲ مشخص است، نمودار نیروی شکست- مساحت وصله برای نمونه ترمیم شده با وصله H شکل مشابه با وصله مستطیلی، شامل سه ناحیه با شیب تغییرات متفاوت است. در ناحیه اول (نمونه‌های شماره ۲۹ تا ۴۱) میزان شیب نمودار برابر ۰/۶۹، در ناحیه دوم (نمونه‌های شماره ۴۱ تا ۴۶) میزان شیب نمودار برابر ۰/۱۴ و در ناحیه سوم (نمونه‌های شماره ۴۶ تا ۵۰) میزان شیب نمودار برابر ۰/۵۲ می‌باشد. مشابه با وصله مستطیل شکل، تغییرات شیب نمودار به دلیل تأثیر متفاوت مساحت وصله بر رفتار رشد ترک در نمونه می‌باشد. با مقایسه نتایج نیروی شکست در نمونه‌های ترمیم شده با وصله مستطیلی و H در شکل‌های ۱۰ و ۱۲ مشخص می‌گردد روند کلی تغییرات نیروی شکست در هر دو نوع وصله مشابه است. همچنین در هر دو نوع هندسه، در وصله‌های کوچکتر (ناحیه I)، تأثیر افزایش مساحت وصله بیشتر می‌باشد. با مقایسه اعداد شیب نمودار برای دو وصله در جدول ۷ مشخص می‌شود افزایش مساحت وصله H شکل، تأثیر بیشتری بر تغییر نیروی شکست نمونه‌های ترمیم شده دارد.



شکل ۱۱ اثر مساحت وصله H شکل بر حداکثر میزان تغییر طول نمونه‌های ترمیم شده



شکل ۱۲ اثر افزایش مساحت وصله بر چگونگی تغییرات نیروی شکست برای وصله H شکل

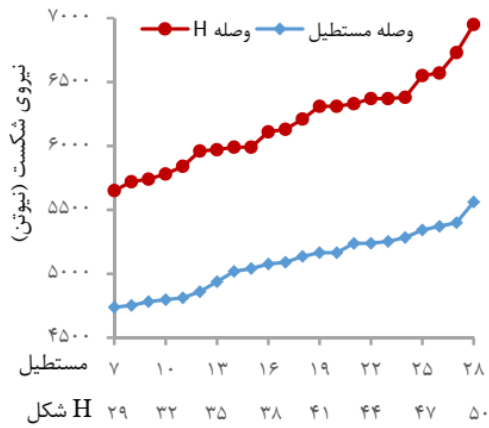
در شکل ۱۰ سه ناحیه متفاوت در نمودار نیروی شکست با تغییر شیب نمودار به دست آمده است. در ناحیه اول (نمونه‌های با شماره ۷ تا ۱۴) میزان شیب نمودار برابر ۰/۵۲ در ناحیه دوم (نمونه‌های با شماره ۱۴ تا ۲۷) میزان شیب نمودار برابر ۰/۲۱ و در ناحیه سوم (نمونه‌های ۲۷ و ۲۸) میزان شیب نمودار برابر ۰/۵ می‌باشد. تغییر شیب نمودار نیروی شکست در نواحی مختلف این نمودار نشان‌دهنده تأثیر متفاوت مساحت وصله بر روی رفتار مکانیکی نمونه ترمیم شده می‌باشد. به عبارت دیگر، استفاده از وصله کامپوزیتی مستطیل شکل در مساحت‌های پایین‌تر (ناحیه I)، تأثیر بیشتری در به تاخیر انداختن رشد ترک و افزایش نیروی شکست دارد، ولی با افزایش مساحت وصله، اثر ترمیمی وصله کمتر می‌شود.

۳-۳- هندسه H شکل

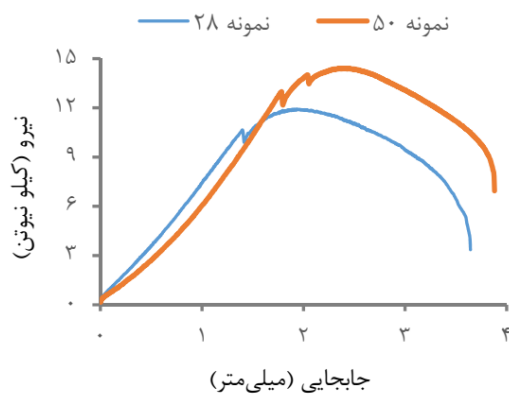
جدول ۶، بیشترین میزان تغییر شکل در آزمون کشش ۲۲ نمونه ترمیم شده با وصله H شکل و نیروهای ترک و شکست این قطعات را نشان می‌دهد. در شکل ۱۱ نیز حداکثر تغییر طول قطعات ترمیم شده با وصله H شکل بر حسب شماره قطعه نشان داده شده است. همانطور که در جدول ۶ و شکل ۱۱ نشان داده شده است روند تغییرات حداکثر میزان کشش نمونه‌ها نسبت به مساحت افزایشی است.

جدول ۶ نتایج آزمون کشش برای نمونه‌های تقویت شده با وصله‌های H شکل

شماره قطعه	مساحت وصله (mm ²)	تغییر طول تا شکست (mm)	نیرو در لحظه ایجاد ترک (kN)	نیروی شکست (kN)
۲۹	۵۸۵	۳/۱۵۹	۱۴/۰۱	۵/۶۵
۳۰	۶۳۱	۳/۱۵۹	۱۶/۱۰	۵/۷۲
۳۱	۶۹۰	۳/۱۶۳۷	۱۷/۲۵	۵/۷۴
۳۲	۷۴۰	۳/۳۷۴۲	۱۵/۹۸	۵/۷۸
۳۳	۸۰۱	۳/۳۷۴۵	۱۷/۳۵	۵/۸۴
۳۴	۸۵۹	۳/۳۸۵۲	۱۴/۵۱	۵/۹۶
۳۵	۹۳۸	۳/۱۶۸۷	۱۴/۵۲	۵/۹۷
۳۶	۱۰۰۸	۳/۲۱۸۲	۱۷/۷۹	۵/۹۹
۳۷	۱۰۹۵	۳/۳۸۵۷	۱۸/۵۰	۵/۹۹
۳۸	۱۱۸۴	۳/۴۰۶۳	۱۳/۹۲	۶/۱۱
۳۹	۱۲۶۲	۳/۴۴۶۴	۱۳/۹۴	۶/۱۳
۴۰	۱۳۶۵	۳/۴۹۸۸	۱۶/۹۱	۶/۲۱
۴۱	۱۴۷۹	۳/۵۰۵۲	۱۴/۳۹	۶/۳۱
۴۲	۱۵۹۷	۳/۵۷۹۳	۱۴/۳۹	۶/۳۱
۴۳	۱۷۵۳	۳/۵۸۵۱	۱۴/۵۱	۶/۳۳
۴۴	۱۸۵۰	۳/۴۶۷۸	۱۶/۶۳	۶/۳۷
۴۵	۲۰۰۴	۳/۴۶۷۹	۱۴/۵۶	۶/۳۷
۴۶	۲۲۵۰	۳/۴۹۸۷	۱۸/۸۸	۶/۳۸
۴۷	۲۳۸۷	۳/۶۲۹۵	۱۴/۳۹	۶/۵۵
۴۸	۲۶۲۴	۳/۷۴۹۹	۱۴/۴۱	۶/۵۷
۴۹	۲۸۵۶	۳/۷۴۹۳	۱۷/۷۵	۶/۷۳
۵۰	۳۱۸۰	۳/۸۸۰۷	۱۴/۴۲	۶/۹۵



شماره نمونه آزمایش
شکل ۱۳) اثر هندسه وصله بر نیروی شکست قطعه در مساحت‌های مساوی



شکل ۱۴) مقایسه نمودار نیرو - تغییر طول برای دو قطعه ترمیم شده با وصله مستطیل و H شکل (قطعات ۲۸ و ۵۰) و مساحت مؤثر یکسان

همچنین با مقایسه مساحت زیر نمودار نیرو- تغییر طول در ناحیه دوم نمودار، یعنی ناحیه پس از افت نیرو، انرژی تغییر شکل تا لحظه شکست از مقدار $22/605$ کیلوژول در وصله نمونه شماره ۲۸ به مقدار $26/873$ کیلوژول برای نمونه شماره ۵۰ رسیده است، به عبارتی انرژی مورد نیاز جهت تغییر شکل نمونه تا نقطه شکست، برای نمونه ترمیم شده با وصله H شکل با مساحت مؤثر یکسان به میزان $18/88$ درصد افزایش داشته است.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، نمونه‌های آلومینیومی ۵۲۵۱ ترک‌دار ترمیم شده با وصله‌های کامپوزیتی تحت بار کششی قرار گرفتند. پارامترهای ارزیابی در این تحقیق، نیرو در لحظه ایجاد ترک، میزان تغییر طول پیش از شکست، میزان نیروی شکست و انرژی تغییر شکل در آزمون کشش بود. از نتایج این تحقیق استنباط می‌شود:

۱- ترمیم قطعات آلومینیومی با وصله کامپوزیتی سبب بهبود خواص مکانیکی آن می‌گردد. با استفاده از ترمیم وصله، میانگین میزان تغییر طول تا شکست به اندازه $13/37$ درصد، مقدار نیرو در

جدول ۷) مقایسه شیب نمودار در نواحی سه‌گانه در شکل‌های ۱۰ و ۱۲

ناحیه	شیب نمودار در وصله مستطیلی	وسعت ناحیه در وصله مستطیلی	شیب نمودار در وصله H شکل	بزرگی ناحیه در وصله H شکل
ناحیه اول	۰/۵۲	۸ نقطه	۰/۶۹	۱۳ نقطه
ناحیه دوم	۰/۲۱	۱۲ نقطه	۰/۱۴	۴ نقطه
ناحیه سوم	۰/۵۰	۲ نقطه	۰/۵۲	۵ نقطه

افزایش وسعت ناحیه و شیب نمودار در ناحیه اول و سوم در وصله H شکل و کاهش محسوس ناحیه دوم (ناحیه با شیب پایین‌تر) نشان می‌دهد این نوع وصله تأثیر بیشتری نسبت به وصله مستطیل شکل در به تاخیر انداختن رشد ترک دارد.

۳-۴- اثر هندسه وصله

برای بررسی اثر هندسه وصله بر نتایج آزمون کشش نمونه آلومینیوم ۵۲۵۱ ترک‌دار، نتایج نیروی شکست برای نمونه‌های تقویت شده با وصله مستطیلی و H در شکل ۱۳ مقایسه شده است. محور افقی در این شکل، شماره نمونه‌های متناظر با دو وصله مختلف است که مساحت مؤثر یکسان دارند. ملاحظه می‌شود که میزان نیروی شکست در وصله H شکل در مساحت مؤثر یکسان بطور مشخصی بیشتر از وصله مستطیل شکل است. بیشترین اختلاف بین نتایج دو وصله مربوط به نمونه‌های شماره ۲۸ (مستطیل شکل) و ۵۰ (H شکل) می‌باشد که با استفاده از وصله H شکل با مساحت مؤثر یکسان، نیروی شکست نمونه ترمیم شده بیش از ۲۵ درصد افزایش یافته است. برای دو نمونه با بیشترین اختلاف انرژی شکست در شکل ۱۳، یعنی دو نمونه ۲۸ و ۵۰ ترمیم شده با دو وصله با مساحت مؤثر یکسان (برابر 3180 میلی‌متر مربع) و با دو هندسه متفاوت، نمودار نیرو- تغییر طول حاصل از آزمون کشش مقایسه شده است (شکل ۱۴).

شکل ۱۴ نشان می‌دهد در دو نمونه مورد بررسی با دو وصله متفاوت، استفاده از وصله H شکل با سطح مؤثر یکسان باعث افزایش تغییر طول تا شکست شده است. همانطور که قبلاً عنوان شد، افت‌های نمودار مربوط به شکست چسب و شروع رشد ترک می‌باشد. در وصله H شکل در شکل ۱۴، دو افت در نیروی‌های بالاتر ظاهر شده که به دلیل شکست چسب در دو مرحله رخ داده است و با توجه به نیروهای بالاتر و تغییر طول بیشتر نمونه در زمان‌های افت نیرو، نشان‌دهنده به تاخیر افتادن شروع رشد ترک نسبت به نمونه ترمیم شده با وصله مستطیلی است. به عبارتی نمونه ترمیم‌شده با وصله H شکل، در برابر نیروی تغییر شکل مقاومت بیشتری دارد.

- 5- Mohandes M, Ghasemi AR. Modified couple stress theory and finite strain assumption for nonlinear free vibration and bending of micro/nanolaminated composite Euler-Bernoulli beam under thermal loading. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2017;231(21):4044-56.
- 6- Attar MM, Barati F, Ahmadpour M, Rezapour E. Failure analysis of unidirectional polymeric matrix composites with two serial pin loaded-holes. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2016;30(6):2583-91.
- 7- Robati H, Mahdi Attar M. Analytical study of a pin-loaded hole in unidirectional laminated composites with triangular and circular fibers. *Journal of applied mechanics*. 2013;80(2).
- 8- Tsai GC, Shen SB. Fatigue analysis of cracked thick aluminum plate bonded with composite patches. *Composite Structures*. 2004;64(1):79-90.
- 9- Ghasemi AR, Hosseini K. Thermo-magneto-mechanical long-term creep behavior of three-phase nano-composite cylinder. *Composites Science and Technology*. 2018;167:71-8.
- 10- Ghasemi AR, Mohandes M, Dimitri R, Tornabene F. Agglomeration effects on the vibrations of CNTs/fiber/polymer/metal hybrid laminates cylindrical shell. *Composites Part B: Engineering*. 2019;167:700-16.
- 11- Dehghanpour S, Nezamabadi A, Attar M, Barati F, Tajdari M. Repairing cracked aluminum plates by aluminum patch using diffusion method. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2019;33(10):4735-43.
- 12- Lee WY, Lee JJ. Successive 3D FE analysis technique for characterization of fatigue crack growth behavior in composite-repaired aluminum plate. *Composite Structures*. 2004;66(1-4):513-20.
- 13- Tsouvalis NG, Mirisiotis LS, Dimou DN. Experimental and numerical study of the fatigue behaviour of composite patch reinforced cracked steel plates. *International journal of fatigue*. 2009;31(10):1613-27.
- 14- Hosseini-Toudeshky H, Sadighi M, Vojdani A. Effects of curing thermal residual stresses on fatigue crack propagation of aluminum plates repaired by FML patches. *Composite Structures*. 2013;100:154-62.
- 15- Gu JU, Yoon HS, Choi NS. Acoustic emission characterization of a notched aluminum plate repaired with a fiber composite patch. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2012;43(12):2211-20.
- 16- Ghasemi FA, Bagheri G, Anaraki AP. Experimental analysis of tensile strength of lateral notched aluminum plates reinforced by the Fiber metal laminate (FML) patches. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(3).
- 17- Ghasemi FA, Rahmatabadi AF, Payganeh G, Anaraki AP. An experimental study on the tensile behavior of the cracked aluminum plates repaired by fiber metal laminate (FML) patches. *Mechanics & Industry*. 2013;14(1):53-8.

لحظه شروع ترک به اندازه $21/4$ درصد و مقدار نیروی شکست به اندازه 23 درصد نسبت به نمونه‌های معمولی بهبود یافت.

۲- در لحظه شروع ترک در نمونه آلومینیوم، نمودار نیرو دچرافت ناگهانی می‌شود. استفاده از وصله کامپوزیتی سبب تغییر موقعیت وقوع افت نیرو به تغییر طول‌های بیشتر می‌شود که به معنی به تأخیر افتادن رشد ترک در نمونه می‌باشد.

۳- با استفاده از وصله کامپوزیتی، میزان انرژی تغییر شکل در ناحیه رشد ترک افزایش می‌یابد. ترمیم قطعه با وصله کولار مستطیلی در این تحقیق، با افزایش مقاومت در برابر رشد ترک در نمونه، سبب شد میزان انرژی مورد نیاز تغییر شکل در ناحیه رشد ترک به میزان $53/9$ درصد افزایش یابد.

۴- برای هر دو وصله، منحنی تغییرات نیروی شکست بر حسب مساحت وصله شامل سه ناحیه می‌باشد که نشان دهنده اثر متفاوت تغییرات مساحت وصله در افزایش نیروی شکست می‌باشد. در وصله H شکل شیب تغییرات نیروی شکست بیشتر از وصله مستطیل شکل است.

۵- نتایج نشان داد میزان نیروی شکست برای نمونه ترمیم شده با وصله H شکل در مساحت موثر یکسان، بیشتر از وصله مستطیل شکل است. همچنین با استفاده از وصله H شکل، شروع رشد ترک در نیروی‌های بالاتر رخ داده و تغییر طول تا شکست افزایش می‌یابد.

تشکر و قدردانی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

تأییدیه اخلاقی: محتوای علمی و اخلاقی این مقاله حاصل فعالیت نویسندگان است و در نشریه دیگری منتشر نشده است و تحت داوری نشریه دیگری نیست.

تعارض منافع: هیچ گونه تعارض منافی وجود ندارد.

سهم نویسندگان: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

منابع مالی: هزینه‌های این پژوهش توسط نویسندگان تامین اعتبار شده است.

منابع

- 1- Baker AA. Fatigue crack propagation studies on aluminum panels patched with boron/epoxy composites. In *International conference on aircraft damage assessment and repair 1991*; 209-15.
- 2- Baker AA, Rose LF, Jones R, editors. *Advances in the bonded composite repair of metallic aircraft structure*. Elsevier; 2003.
- 3- Okafor AC, Singh N, Enemuoh UE, Rao SV. Design, analysis and performance of adhesively bonded composite patch repair of cracked aluminum aircraft panels. *Composite structures*. 2005;71(2):258-70.
- 4- Oudad W, Bouiadra BB, Belhouari M, Touzain S, Feaugas X. Analysis of the plastic zone size ahead of repaired cracks with bonded composite patch of metallic aircraft structures. *Computational Materials Science*. 2009;46(4):950-4.

- structures: a numerical analysis. *Materials & Design*. 2011;32(6):3161-6.
- 23-Mohammed SM, Mhamdia R, Albedah A, Bouiadjra BA, Bouiadjra BB, Benyahia F. Fatigue crack growth in aluminum panels repaired with different shapes of single-sided composite patches. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2021;105:102781.
- 24-Fekih SM, Albedah A, Benyahia F, Belhouari M, Bouiadjra BB, Miloudi A. Optimisation of the sizes of bonded composite repair in aircraft structures. *Materials & Design*. 2012;41:171-6.
- 25-Okafor AC, Singh N, Enemuoh UE, Rao SV. Design, analysis and performance of adhesively bonded composite patch repair of cracked aluminum aircraft panels. *Composite structures*. 2005;71(2):258-70.
- 26-Talebi B, Abedian A. Numerical modeling of adhesively bonded composite patch repair of cracked aluminum panels with concept of CZM and XFEM. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*. 2016;230(8):1448-66.
- 18-Shinde H, Kumar P, Karnik M, Shinde P, Todkar A. Fatigue Analysis of Pre-cracked Aluminium Alloy Thin Sheets Repaired with a CFRP Patch at Elevated Temperature. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*. 2020;101(2):303-11.
- 19-Bakare AK, Shaikh AA, Kale SS. Comparison of SCC behaviour of crack in thin aluminium structure with and without single sided composite patch repair. *Engineering Failure Analysis*. 2020;118:104781.
- 20-Aabid A, Hrari M, Ali JS. Optimization of composite patch repair for center-cracked rectangular plate using design of experiments method. *Materials Today: Proceedings*. 2020;27:1713-9.
- 21-Sadek K, Aour B, Bachir Bouiadjra BA, Fari Bouanani M, Khelil F. Analysis of Crack Propagation by Bonded Composite for Different Patch Shapes Repairs in Marine Structures: A Numerical Analysis. *International Journal of Engineering Research in Africa* 2018;35:175-184.
- 22-Bouiadjra BB, Bouanani MF, Albedah A, Benyahia F, Es-Saheb M. Comparison between rectangular and trapezoidal bonded composite repairs in aircraft