



# Experimental Investigation of the Effect of the Functional Pattern of Laser Surface Treatment on the Strength of Aluminum/Composite Adhesive Bonded Joint in the Mode I Fracture

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Kariman Moghaddam A.<sup>1</sup>,  
Rahnama S.<sup>1\*</sup>

### How to cite this article

Kariman Moghaddam A, Rahnama S. Experimental Investigation of the Effect of the Functional Pattern of Laser Surface Treatment on the Strength of Aluminum/Composite Adhesive Bonded Joint in the Mode I Fracture. Modares Mechanical Engineering; 2023;23(08):485-495.

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

### \*Correspondence

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

srahnama@birjand.ac.ir

### Article History

Received: May 18, 2023

Accepted: August 1, 2023

ePublished: October 21, 2023

## ABSTRACT

The proper method for jointing Carbon fiber reinforced polymers (CFRP) to aluminum, which causes uniform stress distribution, more suitable fatigue performance and weight reduction, is adhesive bonded joint. In adhesive bonding, the interface of adhesives and adherent are sensitive areas for the initiation and propagation of failure. In order to eliminate surface contamination, adherents must be surface treated. In this research, the effect of the functional pattern of laser surface treatment on the strength of aluminum/composite adhesive bonded joint in the mode I fracture has been investigated. At first, laser surface treatments were performed throughout the specimen in order to find the parameters of the laser device that increase the strength of the adhesive bonding by creating a suitable surface quality. After that, the functional pattern of laser surface treatment with the appropriate parameters for ablation and cleaning of the adhesive surface is done. The results show a 15.5% increase in the critical strain energy release rate of the mode I for the all-over laser surface treatment specimen compared to the sanding method. Meanwhile, with the functional pattern of laser surface treatment, the critical strain energy release rate of the mode I has increased by 5.9% and 22.4% compared to all-over laser surface treatment and sanding, respectively. Examining the fracture surface of the specimen shows the delay in crack growth in the specimen of the functional pattern with changes from the adhesive failure to the fiber tearing, which has improved the strength of the adhesive bonding.

**Keywords** Adhesive Bonded Joint, Carbon Fiber Reinforced Polymers, Functional Pattern of Laser Surface Treatment, Double-Cantilever Beam Specimen, Critical Strain Energy Release Rate of the Mode I Fracture.

## CITATION LINKS

1- Dynamic response and fracture analysis ... 2- An approach for damage ... 3- Comparison of interfacial adhesion of ... 4- Loading and fracture response of ... 5- Effect of laser surface treatment ... 6- Standard Practice for Classifying ... 7- Debonding of CFRP-to-steel joints ... 8- Manufacturing and mechanical properties of ... 9- Development of a non-thermal atmospheric pressure ... 10- A simple and effective resin ... 11- Adhesion enhancement of PEEK/6161-T6 ... 12- The influence of surface treatment on ... 13- Effect of atmospheric pressure plasma ... 14- Time efficient laser modification of ... 15- Laser surface treatment for enhanced titanium to ... 16- The effect of laser ablation ... 17- Embedded flaws for crack path control in ... 18- Toughening strategies in adhesive joints ... 19- Improving mode II fracture toughness of ... 20- Influence of reversible and non-reversible fatigue on ... 21- Pure mode II fracture characterization ... 22- Durability assessment of laser treated aluminium ... 23- Standard Test Method for Mode I Interlaminar ... 24- Experimental investigation of the effect ... 25- CNT toughened aluminium and CFRP ... 26- Durability and mechanical behavior of ... 27- Experimental and numerical investigation of ...

## بررسی تجربی تاثیر الگوی هدفمند عملیات سطحی لیزری بر استحکام اتصال چسبی آلومینیوم/کامپوزیت در مود اول شکست

امیر کریمان مقدم<sup>۱</sup>، سعید رهنما<sup>\*</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

### چکیده

روش مناسب برای اتصال پلیمرهای تقویت شده با الیاف کربن (CFRP) به آلومینیوم که باعث توزیع تنش یکنواخت، عملکرد خستگی مناسب‌تر و کاهش وزن می‌گردد اتصال چسبی می‌باشد. در اتصال چسبی سطح تماس چسبنده‌ها و چسب نواحی حساس برای شروع و گسترش خرابی می‌باشند. برای از بین بردن آلودگی‌های سطحی چسبنده‌ها بایستی عملیات سطحی شوند. در این تحقیق تاثیر الگوی هدفمند عملیات سطحی لیزری در استحکام اتصال چسبی کامپوزیت/آلومینیوم مود اول شکست مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا عملیات سطحی لیزری در سرتاسر نمونه‌ها انجام شده تا بتوان پارامترهای دستگاه لیزر که با ایجاد کیفیت سطح مناسب باعث افزایش استحکام اتصال می‌گردند پیدا شوند. سپس الگوی سطح هدفمند لیزری با پارامترهای مناسب برای ایجاد سایش و تمیزکاری سطح چسبنده‌ها انجام شده است. نتایج نشان دهنده افزایش ۱۵/۵٪ نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی مود اول برای نمونه عملیات سطحی لیزری سرتاسری نسبت به روش سنباده‌زنی می‌باشد. این در حالی است که با الگوی هدفمند عملیات سطحی لیزری نرخ رهای انرژی کرنشی بحرانی مود اول بترتیب ۵/۹٪ و ۲۲/۴٪ نسبت به عملیات سطحی لیزری سرتاسری و سنباده‌زنی افزایش پیدا کرده است. بررسی سطح شکست نمونه‌ها نشان دهنده به تأخیر افتادن رشد ترک در نمونه‌های الگوی هدفمند عملیات سطحی لیزری با تغییر از حالت خرابی اتصال به پارگی الیاف می‌باشد که باعث بهبود استحکام اتصال شده است.

**کلیدواژه‌ها:** اتصال چسبی، پلیمرهای تقویت شده با الیاف کربن، الگوی هدفمند عملیات سطحی لیزری، نمونه تیریکسگریدار دولبه، نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی مود اول شکست.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۰

\*نویسنده مسئول: srahnama@birjand.ac.ir

### ۱- مقدمه

اخیراً، دستیابی به سازه‌ها با وزن کم به یک هدف اصلی برای کاهش انتشار آلاینده‌ها و صرفه جویی منابع در بسیاری از زمینه‌ها تبدیل شده است و استفاده از مواد سبک با عملکرد برجسته یک رویکرد مهم بوده است [1]. پلیمرهای تقویت شده با الیاف کربن (CFRP) به دلیل وزن مخصوص کمتر و خواص مکانیکی عالی به عنوان جایگزینی برای مواد سنتی در نظر گرفته شده‌اند [2]. متأسفانه کاربرد CFRP به دلیل هزینه گران و دشواری در ساخت محدود می‌باشد [3]. بنابراین یک طراحی ترکیبی از فلز

سبک و CFRP پیشنهاد می‌شود، که با موفقیت برای برخی از قطعات مهم در صنایع هوافضا و خودرو استفاده شده است [3]. اتصال چسبی یکی از متداول‌ترین تکنیک‌های اتصال آلومینیوم و CFRP است [4]. در مقایسه با اتصال مکانیکی، اتصال چسبی دارای مزایای بسیاری مانند عدم وزن اضافی اتصال دهنده‌ها (به عنوان مثال، پیچ، مهره، پرچ)، جذب انرژی بالا و انعطاف پذیری طراحی می‌باشد. به طور خاص، برای CFRP، اتصال دهنده‌ها یکپارچگی فیبر کربن را از بین می‌برند و وجود سوراخ‌ها باعث تمرکز تنش می‌شود [5]. به منظور شناسایی حالت‌های شکست اتصالات چسبی CFRP در آزمایش، معمولاً از استاندارد ASTM D5573 استفاده می‌شود که در آن حالت‌های شکست به شش نوع تقسیم می‌شوند: خرابی اتصال (adhesive failure)، خرابی چسب (cohesive failure)، خرابی لایه نازک چسب (thin-layer cohesive failure)، پارگی الیاف (fiber-tear failure)، پارگی سبک الیاف (light-fiber-tear failure)، خرابی قطعات اتصال (stock-break failure) [6]. با این وجود، در مورد اتصالات چسبنده فلز - پلیمر، با توجه به مسیرهای شکست، الگوهای شکست به طور معمول به چهار نوع تقسیم می‌شوند: خرابی اتصال، خرابی چسب، خرابی ترکیبی و خرابی چسبنده (Adherend failure) [7]. ایجاد خرابی در سطح مشترک چسب - چسبنده خرابی اتصال می‌باشد، در حالی که خرابی چسب شکست نیروهای پیوند بین مولکولی در ماده چسب می‌باشد. خرابی ترکیبی زمانی رخ می‌دهد که ترک هم در سطح مشترک و هم در چسب انتشار می‌یابد. خرابی چسبنده نشان دهنده طراحی مناسب عملیات سطحی چسبنده‌ها و انتخاب درست چسب می‌باشد. اگرچه خرابی چسبنده بهترین نوع خرابی می‌باشد و خرابی چسب ترجیح داده می‌شود، اما خرابی اتصال به دلیل کیفیت پایین اتصال سطحی بین چسب و چسبنده، احتمال بیشتری دارد که در طول کاربردها رخ دهد. بنابراین، تقویت پیوند سطحی بین چسبنده‌ها و چسب به نحوی که خرابی پارگی الیاف ایجاد شود، مسئله مطلوب می‌باشد [7].

به طور معمول، عملیات سطحی روی سطح فلز یا CFRP برای بهبود استحکام پیوند سطحی انجام می‌شود. در سال‌های اخیر، بسیاری از روش‌های عملیات سطحی توسعه یافته‌اند، از جمله عملیات مکانیکی [8]، پلاسما [9]، عملیات شیمیایی [10] و عملیات لیزری [11]. یانگ و همکاران اثرات جهت سایش کاغذ سنباده بر استحکام اتصال چسبی CFRP را مورد مطالعه قرار داده بودند. نتایج آن‌ها نشان دهنده بیشترین استحکام اتصال با جهت تصادفی سنباده بوده است [12]. سان و همکاران عملیات سطحی پلاسمای فشار اتمسفر برای سطوح CFRP استفاده کردند، عملیات سطحی پلاسما روی سطح CFRP منجر به بهبود قابل توجه استحکام پیوند سطحی بین CFRP و چسب شده بود [13]. ووسوینکل و همکاران تأثیر فرکانس پالس و سرعت اسکن

لیزری به دلیل ایجاد یک سطح همگن با ویژگی‌های ترشوندگی و شکل‌شناسی مطلوب به ویژه در اتصال مواد هم جنس بیشتر مورد توجه بوده است. در تحقیق حاضر الگوی هدفمند عملیات سطحی لیزری برای منحرف کردن مسیر رشد ترک و به تاخیر انداختن انتشار ترک در اتصال چسبی CFRP به آلومینیوم استفاده شده است. از نمونه تیر یکسرگیردار دولبه (Double-cantilever beam) برای انجام آزمایش تجربی استفاده شده است. ابتدا عملیات سطحی در سرتاسر سطح چسبده‌های آلومینیومی و CFRP انجام شده تا پارامترهای مناسب دستگاه لیزر که نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی اتصال را به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد، تعیین شوند. سپس عملیات سطحی هدفمند جهت به تاخیر انداختن مسیر رشد ترک و همچنین افزایش استحکام اتصال انجام شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

در این بخش ابتدا آماده‌سازی نمونه‌های تیر یکسرگیردار دولبه سپس مراحل اجرای عملیات سطحی لیزری و در نهایت مراحل انجام آزمون مود اول شکست توضیح داده شده است.

### ۲-۱- مواد

برای انجام آزمون مود اول شکست مطابق استاندارد ASTM D5528 از نمونه تیر یکسرگیردار دولبه استفاده شده است. در اتصال چسبی بررسی شده جنس چسبده آلومینیومی از آلومینیوم 7075-t6 ( $E = 71.4 \text{ GPa}, \nu = 0.33$ ) مطابق با مرجع [20] که بطور گسترده در صنایع هوافضا مورد استفاده قرار می‌گیرد می‌باشد. چسبده کامپوزیتی از پلیمرهای تقویت شده با الیاف کربن (CFRP) که دارای نسبت استحکام به وزن بالایی می‌باشند، انتخاب شده است. برای تولید چسبده کامپوزیتی از الیاف کربن تک جهته با وزن ۲۵۰ گرم در هر متر مربع به عنوان تقویت کننده و رزین اپوکسی LR660 به عنوان زمینه استفاده شده است. تعداد لایه‌های چسبده کامپوزیتی ۱۱ عدد و با زاویه صفر درجه می‌باشد. چسبده‌های کامپوزیتی جهت کاهش حباب‌های هوا با روش نفوذ در خلاء (Vacuum infusion process) ساخته شده‌اند. مطابق با استاندارد ASTM D2584 کسر حجمی الیاف ۵۹/۴٪ تعیین شده است. همچنین خواص مکانیکی چسبده کامپوزیتی مطابق با استاندارد ASTM D3039 ( $E_{11} = 94.5 \text{ GPa}, E_{22} = E_{33} = 7.43 \text{ GPa}, \nu_{12} = 0.2$ ) از آزمایش تجربی بدست آمده است. همچنین برای ایجاد اتصال از چسب دوجزئی آرالدایت ۲۰۱۵ (Araldite 2015) با نسبت اختلاط ۱:۱ ( $E = 1.85 \text{ GPa}, \nu = 0.3$ ) مطابق با مرجع [21] استفاده شده است.

### ۲-۲- آماده‌سازی و ابعاد نمونه‌ها

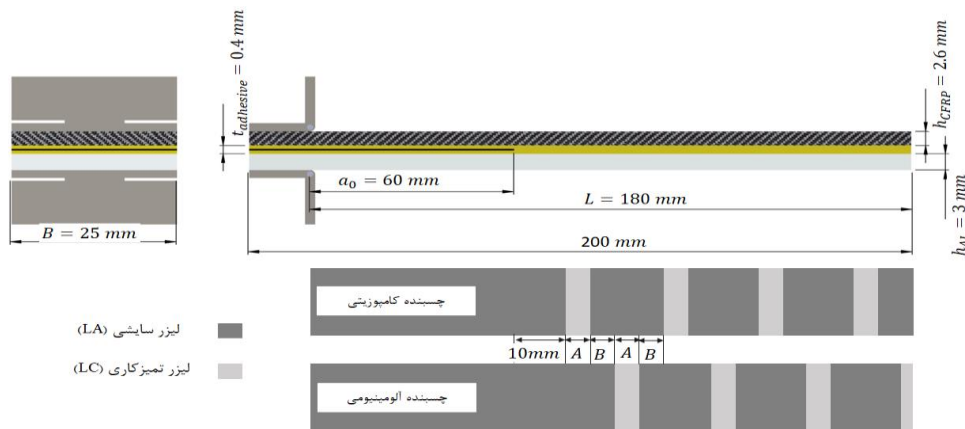
در تحقیق حاضر بعد از تولید صفحات کامپوزیتی آن‌ها با ابعاد  $۲۵۰ \times ۹۰ \times ۲/۶$  میلی‌متر مکعب توسط دستگاه واتر جت برشکاری

عملیات سطحی لیزری را بر روی خواص چسبندگی فولاد و CFRP مورد مطالعه قرار دادند [14]. مشخص شد که با افزایش فرکانس پالس و کاهش سرعت اسکن، مقدار لکه‌های لیزر روی سطح فولاد افزایش می‌یابد و در نتیجه استحکام برشی اتصالات چسب افزایش می‌یابد. پالاورا و همکاران استحکام اتصال چسبی آلیاژ تیتانیوم و CFRP را با استفاده از لیزر پالسی Nd: YAG بهبود بخشیدند [15]. بالاترین استحکام اتصال زمانی بدست آمده بود که در سطح CFRP الیاف کاملاً در معرض دید بوده و کمترین آسیب را دیده باشند. چنگ سان و همکاران نشان دادند عملیات سطحی لیزری باعث بهبود شکل‌شناسی سطح و ایجاد یک سطح همگن بر روی CFRP شده، ترشوندگی CFRP بهبود یافته و الیاف کربن آسیب نخورده پس از عملیات سطحی در معرض دید قرار گرفتند که برای بهبود استحکام اتصال چسبی مفید بودند [16].

با توجه به تحقیقات انجام شده عملیات سطحی مکانیکی با ایجاد یک سطح ناهمگن می‌تواند باعث بهبود کیفیت سطحی اتصال چسبی گردد این در حالی است که عملیات سطحی پلاسما و شیمیایی بدلیل انتشار مواد آلاینده برای سلامت انسان و محیط زیست مضر هستند، اما عملیات سطحی لیزری با ایجاد یک سطح همگن، بهبود شکل‌شناسی سطح و ترشوندگی باعث بهبود قابل توجه استحکام اتصال چسبی می‌گردند. با این حال، اگرچه با روش‌های فوق استحکام اتصال چسبی را می‌توان بهبود بخشید، اما مهمترین محدودیت‌ها هنگام استفاده از اتصالات چسبی عبارتند از: (۱) رفتار ترد پس از شروع رشد ترک، و (۲) مشکلات در تعیین وقوع جدایش بین لایه‌ای (Delamination) زودرس در اتصال چسبی CFRP به آلومینیوم. بنابراین، کاربرد گسترده اتصالات چسبی تا حدودی با مشکل مواجه شده است. چندین روش برای به تاخیر انداختن یا توقف انتشار ترک گزارش شده است. مطالعات قبلی نشان داده اند که با کنترل سطح مشترک بین قطعات تشکیل دهنده، پل زدن اتصال (bridging ligament)، انحراف ترک (crack deflection) و هسته سازی ترک‌های ثانویه (nucleation of secondary cracks) استحکام اتصال چسبی را می‌توان ارتقا داد [17]. مالونی و فلک نشان دادند که در اتصال چسبی مواد فلزی پل زدن ترک (bridging crack) با کنترل چسبندگی سطحی با استفاده از فیلم‌های PTFE غیر چسبنده امکان پذیر شده است و بنابراین افزایش قابل توجهی در چقرمگی اتصال مشاهده شد [18]. واگیه و همکارانش نشان دادند که اجرای الگوی سطح هدفمند عملیات سطحی لیزری می‌تواند با انحراف مسیر رشد ترک در اتصال چسبی CFRP مود دوم شکست باعث افزایش قابل توجه چقرمگی شکست مود دوم گردد [19].

در تحقیقات گذشته از روش‌های مختلفی مانند؛ روش‌های مکانیکی، شیمیایی، پلاسما و لیزر برای افزایش استحکام اتصال چسبی استفاده شده است. از بین روش‌ها فوق عملیات سطحی

شدند. همچنین صفحات آلومینیومی با ابعاد ۲۵۰×۹۰×۳ میلی- متر مکعب توسط دستگاه واتر جت برشکاری شدند. سپس عملیات سطحی بر روی نمونه‌ها انجام شده و قطعات برای ایجاد اتصال آماده شدند.



شکل ۱) هندسه نمونه تیریکسرگردار دولبه و الگوی هدفمند عملیات سطحی لیزری

جدول ۱) پارامترهای دستگاه لیزر برای عملیات سطحی لیزری

کد نمونه عملیات سطحی لیزری سرتاسری	چسبنده آلومینیومی			چسبنده کامپوزیتی		
	توان نامی متوسط (W)	سرعت اسکن (mm/s)	چگالی انرژی لیزر (J/mm <sup>2</sup> )	توان نامی متوسط (W)	سرعت اسکن (mm/s)	چگالی انرژی لیزر (J/mm <sup>2</sup> )
L - 1	۶	۱۰۰۰	۰/۱۷	۴/۵	۱۵۰۰	۰/۰۸۵
L - 2	۹	۱۰۰۰	۰/۳۴	۶	۲۰۰۰	۰/۰۸۵
L - 3	۱۸	۱۰۰۰	۰/۵۱	۹	۱۲۰۰	۰/۲۱
L - 4	۱۲	۳۰۰	۱/۱۴	۷/۵	۱۰۰۰	۰/۲۱
L - 5	۱۸	۳۰۰	۱/۷۱	۱۳/۵	۱۵۰۰	۰/۲۵
L - 6	۱۲	۹۰	۳/۸۱	۱۰/۵	۸۰۰	۰/۳۷
L - 7	۱۸	۹۰	۵/۷۱	۱۲	۶۰۰	۰/۳۷

در این رابطه ED چگالی انرژی پالس، V سرعت اسکن و  $\phi_s$  قطر دایره لیزر می‌باشد. در تحقیق حاضر ۷ حالت مختلف برای چسبنده‌های کامپوزیتی و آلومینیومی برای عملیات سطحی لیزر با فاصله عرضی شیارها ۵۰ میکرومتر در نظر گرفته شده است. همچنین از روش سنباده‌زنی (Sanding) و با سنباده شماره ۱۲۰ به عنوان عملیات سطحی مکانیکی برای مقایسه با روش عملیات سطحی لیزری استفاده شده است.

الگوی هدفمند عملیات سطحی لیزری مطابق با شکل ۱ بر روی سطح چسبنده‌های آلومینیومی و کامپوزیتی انجام شده است. برای این منظور طول عملیات سطحی با چگالی انرژی لیزر پایین که برای حذف آلودگی‌ها و چربی سطح انجام شده است، لیزر تمیزکاری (LC) (Laser cleaning) و طول عملیات سطحی لیزری با چگالی انرژی لیزر بالا که برای حذف رزین سطح با کمترین خرابی الیاف بر روی چسبنده کامپوزیتی و ایجاد زبری مناسب بر

### ۳-۲- آماده‌سازی سطوح اتصال

آماده‌سازی سطح اتصال با دوریکرد آماده‌سازی سرتاسری سطح چسبنده‌ها و الگوی هدفمند عملیات سطحی لیزری انجام شده است. در رویکرد عملیات سطحی سرتاسری تمامی سطح چسبنده‌ها با چگالی انرژی لیزر یکسان عملیات سطحی شده است. عملیات سطحی لیزر توسط دستگاه Yb: fiber با حدکثر توان نامی ۳۰ وات، طول موج ۱۰۵۰ نانومتر و فرکانس ۲۰ کیلوهرتز انجام شده است. الگوی عملیات سطحی عمود بر مسیر رشد ترک در تمامی نمونه‌ها می‌باشد. همچنین چگالی انرژی لیزر به عنوان پارامتر موثر در تغییر زبری سطح مورد بررسی قرار گرفته است. چگالی انرژی لیزر مطابق رابطه زیر بدست می‌آید [22]

$$ED = \frac{P}{V \phi_s} \quad (1)$$

که  $F$  بار اعمالی،  $\delta$  جابه‌جایی نقطه اعمال بار،  $b$  عرض نمونه و  $a$  طول ترک اولیه می‌باشد. برای از بین بردن اثرات چرخش و اصلاح رفتار تیر یکسرگیردار یک مقدار اصلاحی  $|\Delta|$  به طول ترک  $a$  اضافه می‌شود  $(a + |\Delta|)$ . مقدار  $|\Delta|$  به صورت عملی و از نمودار ریشه سوم نرمی  $C^{1/3} = \left(\frac{\delta}{P}\right)^{1/3}$  برحسب طول ترک  $a$  بدست می‌آید.

### ۳- نتایج

در این بخش نتایج آزمایش‌های تجربی برای عملیات سطحی در سرتاسر نمونه‌ها و همچنین الگوی هدفمند عملیات سطحی لیزری آورده شده است.

#### ۳-۱- نتایج عملیات سطحی در سرتاسر چسبنده‌ها

در تحقیق حاضر عملیات سطحی در سرتاسر چسبنده‌ها با دو رویکرد عملیات سطحی لیزری و عملیات سطحی سنباده‌زنی (S) انجام شده است. رویکرد عملیات سطحی لیزری در سرتاسر چسبنده‌ها با ۷ حالت مختلف بررسی شده است. جدول ۳ نتایج حاصل از عملیات سطحی لیزری و سنباده‌زنی در سرتاسر چسبنده‌ها را نشان می‌دهد [24]. برای بررسی پارامترهای لیزر بر کیفیت سطح چسبنده‌ها زبری سنجی توسط دستگاه TR200 انجام شده است.

مقایسه نتایج جدول ۱ و جدول ۳ نشان دهنده افزایش زبری متوسط سطح چسبنده‌های آلومینیومی و CFRP با افزایش چگالی انرژی لیزر بترتیب تا مقدار ۱/۷۱ و ۰/۲۵ ژول بر میلی‌متر مربع می‌باشد. اما با افزایش بیشتر چگالی انرژی لیزر بدلیل ذوب شدن سطح آلومینیوم زبری متوسط سطحی کاهش پیدا کرده است. برای چسبنده CFRP زبری متوسط سطحی در چگالی انرژی لیزر ۰/۲۵ برای حالت L-5 بیشترین مقدار است همچنین زبری باقی‌مانده سطحی کمترین مقدار می‌باشد. افزایش چگالی انرژی لیزر برای چسبنده CFRP به مقدار ۰/۳۷ و ۰/۵۷ ژول بر میلی‌متر مربع باعث خرابی الیاف در سطح چسبنده شده در نتیجه زبری متوسط و کیفیت سطح اتصال را کاهش داده است.

با توجه به اطلاعات جدول ۳ نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی برای نمونه L-5 نسبت به عملیات سطحی سنباده‌زنی ۱۵/۵ درصد افزایش پیدا کرده است. این موضوع بدلیل حالت خرابی الیاف و همچنین پل زدن الیاف در نمونه L-5 می‌باشد. همچنین نمونه L-5 دارای کمترین زبری سطحی در سطح CFRP و بیشترین مقدار زبری سطحی برای چسبنده آلومینیومی می‌باشد.

#### ۳-۲- نتایج عملیات سطحی با الگوی هدفمند

در این قسمت نتایج حاصل از آزمایش تجربی الگوی هدفمند عملیات سطحی لیزری ارائه شده است. برای انجام الگوی هدفمند عملیات سطحی لیزری مطابق شکل ۱ با توجه به نتایج جدول ۳ پارامترهای حالت L-1 در جدول ۱ به عنوان لیزر تمیز کاری و پارامترهای حالت L-5 در جدول ۱ به عنوان لیزر سایشی

روی چسبنده آلومینیومی انجام شده است، لیزر سایشی (Laser Ablation (LA) نامگذاری شده است. در الگوی هدفمند عملیات سطحی لیزری سه حالت مختلف برای طول‌های لیزر تمیز کاری و لیزر سایشی مطابق با جدول ۲ در نظر گرفته شده است.

#### جدول ۲) حالت‌های مختلف عملیات سطحی لیزری

کد نمونه الگوی هدفمند عملیات سطحی	طول ناحیه A (mm)	طول ناحیه B (mm)
P.5.5	۵	۵
P.5.10	۵	۱۰
P.10.5	۱۰	۵

#### ۲-۴- آزمون مود اول شکست

آزمون مود اول شکست اتصال چسبی مطابق با استاندارد ASTM D5528 انجام شده است. برای انجام آزمون مود اول شکست از دستگاه آزمون کشش زوئیک z-250 با ظرفیت ۲۵ تن و مجهز به نیروسنج ۲ کیلو نیوتنی استفاده شده است. دوربین دیجیتال سونی با سرعت فیلمبرداری ۱۰۰ فریم بر ثانیه برای ثبت رشد ترک در حین انجام آزمون مورد استفاده قرار گرفته است. مطابق با استاندارد آزمون به صورت کنترل جابه‌جایی با سرعت ۲ میلی‌متر بر دقیقه توسط نیروسنج ۲ کیلو نیوتنی انجام شده است. شکل ۲ تصویر نمونه در حین انجام آزمون و تجهیزات آزمون مود اول شکست را نشان می‌دهد.

#### ۲-۵- محاسبه نرخ رهایی انرژی کرنشی مود اول

در تحقیق حاضر نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی مود اول شکست مطابق با استاندارد ASTM D5528 از روش تئوری تیر اصلاح شده محاسبه شده است. در این روش نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی مود اول شکست مطابق با رابطه زیر محاسبه می‌شود [23].

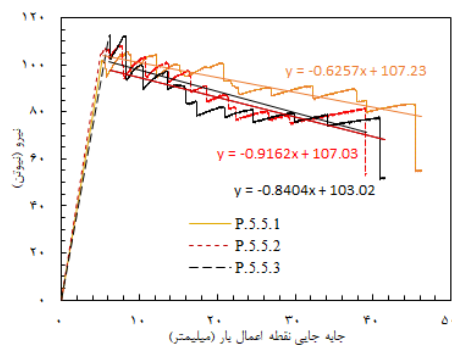
$$G_{IC} = \frac{3F\delta}{2b(a + |\Delta|)} \quad (2)$$



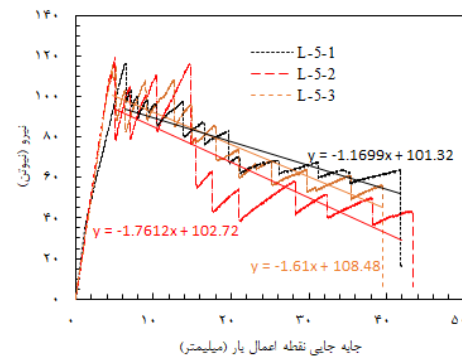
شکل ۲) نمونه تیریکسرگیردار دوبله در حین آزمون و تجهیزات آزمون مود اول شکست

جدول ۳) نتایج آزمون مود اول شکست با رویکرد عملیات سطحی در سرتاسر چسبندها

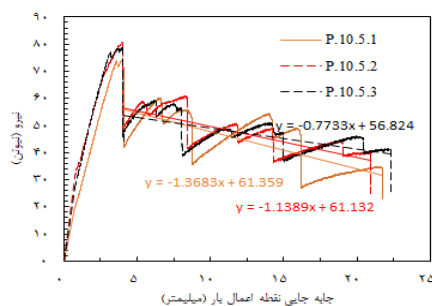
کد نمونه	نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی (N/mm)	زبری متوسط سطح آلومینیوم (μm)	زبری متوسط سطح کامپوزیت (μm)	نوع سطح شکست نمونه‌ها
L-1	۰/۰۵	۰/۱۸	۰/۴۵	خرابی اتصال در سطح تماس چسب و CFRP
L-2	۰/۱	۱/۸۲	۱/۸۵	خرابی اتصال در سطح تماس چسب و CFRP
L-3	۰/۲	۲/۳۲	۲/۲	خرابی اتصال در سطح تماس چسب و CFRP و مقدار کمی پارگی الیاف
L-4	۰/۳	۲/۵۰	۲/۴۳	خرابی اتصال در سطح تماس چسب و CFRP و چسب و آلومینیوم مقدار کمی پارگی الیاف
L-5	۰/۶۷	۵/۱۱	۳/۶۳	پارگی الیاف و پل زدن الیاف
L-6	۰/۴۹	۴/۸۸	۳/۱۹	پارگی الیاف
L-7	۰/۲۷	۴/۹۵	۳/۹۵	خرابی اتصال در سطح تماس چسب و CFRP و چسب و آلومینیوم مقدار کمی پارگی الیاف
S	۰/۵۸	۳/۴۷	۳/۲۶	پارگی الیاف



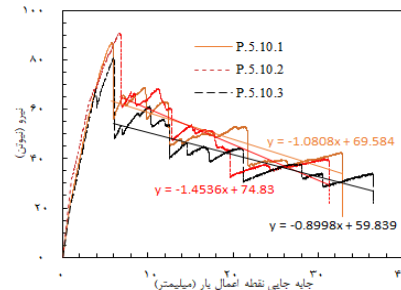
ب



الف



د



ج

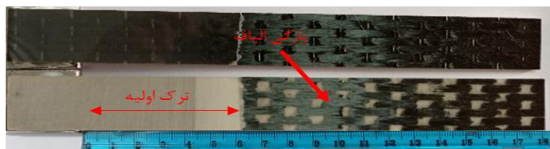
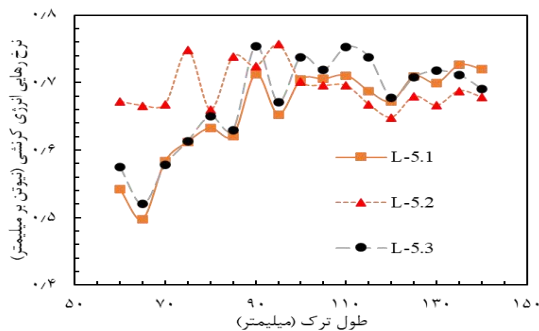
شکل ۳) نمودار نیرو - جابه‌جایی آزمون مود اول شکست برای نمونه‌های: (الف) L-5، (ب) P.5.5، (ج) P.5.10، (د) P.10.5



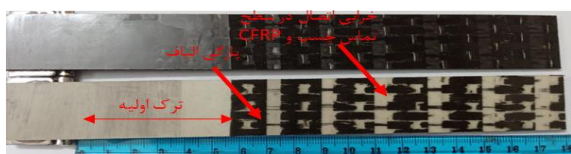
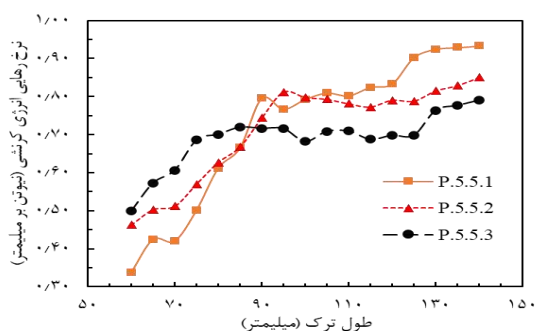
همچنین سطح شکست نمونه‌های L-5، P.5.5، P.5.10 و P.10.5 را نشان می‌دهد.

شکل ۴ نمودار مقاومت ماده در برابر رشد ترک و همچنین سطح شکست نمونه‌های L-5 را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۴ نمودار مقاومت ماده در برابر رشد ترک برای حالتی که سرتاسر چسبنده‌ها لیزر سایشی انجام شده باشد بعد از نوسانات اولیه که بدلیل نوسان در نمودار نیرو - جابه‌جایی حاصل می‌شود به سمت یک مقدار ثابت میل می‌کند. در مواد ترد انرژی سطح نسبت به خواص مواد تغییر نمی‌کند و نمودار مقاومت ماده در برابر رشد ترک مسطح می‌باشد [27]. پس با توجه به رفتار نمودار مقاومت در برابر رشد ترک می‌توان به این نتیجه رسید که رشد ترک ترد در نمونه L-5 اتفاق افتاده است. سطح شکست نمونه فوق بیانگر پارگی الیاف در تمام سطح نمونه می‌باشد و می‌تواند باعث افزایش استحکام اتصال گردد.

شکل ۵ نمودار مقاومت ماده در برابر رشد ترک و همچنین سطح شکست نمونه‌های P.5.5 را نشان می‌دهد.



شکل ۴) نمودار مقاومت ماده در برابر رشد ترک و سطح شکست نمونه‌های L-5



شکل ۵) نمودار مقاومت ماده در برابر رشد ترک و سطح شکست نمونه‌های P.5.5

برای سطح چسبنده‌های آلومینیومی و کامپوزیتی انتخاب شده است.

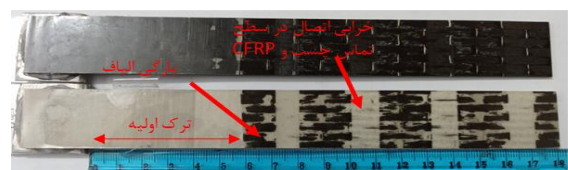
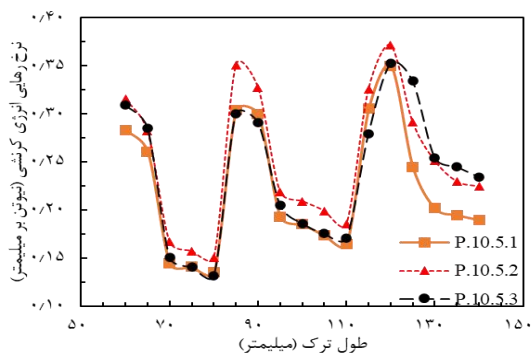
ابتدا نمودارهای نیرو - جابه‌جایی بدست آمده از آزمون تجربی مورد بررسی قرار می‌گیرند. مطابق استاندارد ASTM D5528 از روش انحراف از حالت خطی (Deviation from Linearity) و همچنین بازدید چشمی (Visual Observation) برای تشخیص بار بحرانی شروع رشد ترک استفاده شده است [23]. شکل ۳ نمودار نیرو - جابه‌جایی نمونه L-5 و همچنین نمونه‌های الگوی هدفمند عملیات سطحی لیزری را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳ در تمامی نمونه‌ها نمودار نیرو و جابه‌جایی تا شروع رشد ترک به صورت خطی افزایش پیدا می‌کنند و بعد از شروع رشد ترک نمودارهای نیرو - جابه‌جایی رفتار غیر خطی را از خود نشان داده‌اند. با توجه به شکل ۳-الف که نمودار نیرو - جابه‌جایی برای نمونه L-5 را نشان می‌دهد، بیشترین مقدار بار بحرانی مربوط به نمونه L-5.2 و به مقدار ۱۱۹/۲۵ نیوتن می‌باشد. همچنین در نقطه شکست نهایی نیرو برای نمونه فوق به مقدار ۴۳/۱۶ نیوتن کاهش پیدا کرده است. برای نمونه‌های با الگوی هدفمند عملیات سطحی بیشترین مقدار بار بحرانی شروع رشد ترک برای نمونه‌های P.5.5 است. شکل ۳-ب نمودار نیرو - جابه‌جایی برای نمونه‌های P.5.5 را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳-ب بار بحرانی شروع رشد ترک برای نمونه P.5.5.3 به مقدار ۱۱۶/۱۳ نیوتن و بار نقطه شکست نهایی ۷۵/۹۵ نیوتن می‌باشد. مقایسه نمودارهای نیرو - جابه‌جایی بیانگر رفتار کاهش در نمودار نیرو - جابه‌جایی با شیب بیشتر برای نمونه‌های L-5 در مقایسه با نمونه‌های P.5.5 بعد از شروع رشد ترک می‌باشد که می‌تواند باعث کاهش استحکام اتصال چسبی گردد.

با توجه به شکل ۳ با افزایش فاصله بین نواحی لیزر تمیز کاری در نمونه‌های P.5.10 و همچنین افزایش طول ناحیه لیزر تمیز کاری در نمونه‌های P.10.5 بار بحرانی شروع رشد ترک کاهش پیدا کرده است، همچنین افت‌های ناگهانی و زیادی در نمودار نیرو - جابه‌جایی مشاهده می‌گردد که می‌تواند باعث کاهش استحکام اتصال گردد. با توجه به شکل ۳-د با افزایش طول ناحیه لیزر تمیزکاری به ۱۰ میلیمتر افت نیرو در یک جابه‌جایی ثابت به مقدار بیشتری اتفاق افتاده است که بیانگر رشد ترک لحظه‌ای در طول بیشتری از نمونه می‌باشد.

در ادامه نمودار مقاومت در برابر رشد ترک (R-curve) و سطح شکست نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در اتصال چسبی کامپوزیت به فلزات بایستی به این نکته اشاره کرد که انحراف مسیر رشد ترک به سمت چسبنده فلزی بدلیل پیوند ضعیفتر بین چسب و چسبنده فلزی باعث کاهش استحکام اتصال می‌گردد [25]. همچنین در اتصال چسبی CFRP به فلزات حالت خرابی پارگی الیاف باعث افزایش استحکام اتصال می‌باشد [26]. شکل - های ۴ تا ۷ بترتیب نمودار مقاومت ماده در برابر رشد ترک و

بعد از رسیدن به طول ترک ۹۰ میلیمتر مجدد رشد ترک ناگهانی اتفاق می افتد و نمودار مقاومت ماده رفتار کاهشی را پیدا می کند. این ناحیه با دومین افت ناگهانی در نمودار نیرو - جابه جایی مطابقت دارد. سپس مجدد بدلیل تغییر از حالت خرابی اتصال به پارگی الیاف نمودار مجدد مقاومت در برابر رشد ترک افزایش می یابد. این رفتار نمودار مقاومت ماده در برابر رشد ترک باعث کاهش استحکام اتصال برای نمونه های P.5.10 می گردد. با توجه به سطح شکست برای نمونه های P.5.10 خرابی اتصال در سطح مشترک چسب و چسبنده CFRP و همچنین پارگی الیاف اتفاق افتاده است. خرابی اتصال در نواحی عملیات سطحی لیزر تمیزکاری ایجاد شده و با توجه به اینکه فاصله بین سطوح عملیات لیزری تمیزکاری برای نمونه فوق ۲۵ میلیمتر بوده است، نسبت به نمونه P.5.5 خرابی اتصالی کمتری در سطح نمونه P.5.10 مشاهده شده است. بیشتر شدن فاصله بین سطوح عملیات سطحی لیزر تمیزکاری برای نمونه P.5.10 نسبت به نمونه P.5.5 باعث افت های ناگهانی در نمودار نیرو - جابه جایی و نمودار مقاومت ماده در برابر رشد ترک شده است و استحکام اتصال را در نمونه فوق کاهش داده است.

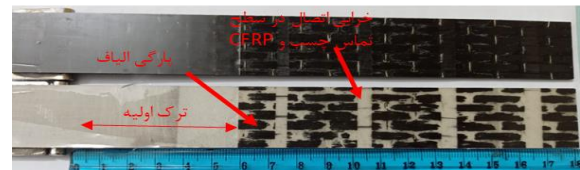
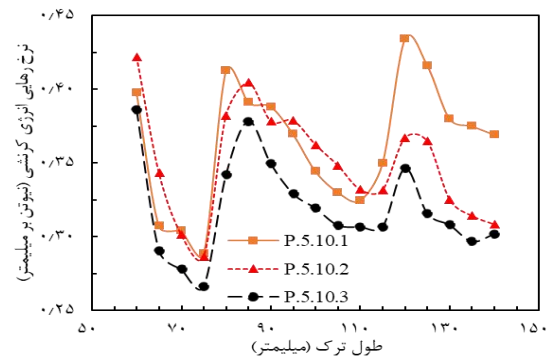
شکل ۷ نمودار مقاومت ماده در برابر رشد ترک و سطح شکست برای نمونه های P.10.5 را نشان می دهد. در نمونه های P.10.5 طول ناحیه عملیات لیزر تمیزکاری به ۱۰ میلیمتر افزایش پیدا کرده است. با توجه به نمودار مقاومت ماده و سطح شکست برای نمونه فوق بعد از شروع رشد ترک نرخ رهایی انرژی کرنشی بدلیل افت نیرو در یک جابه جایی ثابت روند کاهشی پیدا کرده است. روند کاهشی در مقاومت ماده تا طول ترک ۸۰ میلیمتر که ناحیه تغییر از حالت خرابی اتصال به پارگی الیاف می باشد ادامه داشته و سپس با تغییر حالت خرابی در مسیر رشد ترک مجدد نمودار نیرو - جابه جایی (شکل ۳-د) و مقاومت ماده در برابر رشد ترک روند افزایشی پیدا کرده است.



شکل ۷) نمودار مقاومت ماده در برابر رشد ترک و سطح شکست نمونه های P.10.5

همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، نمودار مقاومت ماده در برابر رشد ترک با شروع رشد ترک رفتار افزایشی را از خود نشان می دهد و بعد از طول ترک ۹۰ میلیمتر به سمت یک مقدار ثابت میل می کند. رشد ترک از نقطه ۶۰ میلیمتر شروع می شود و تا نقطه ۷۵ میلیمتر با شیب کمی افزایش می یابد. اما همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است در طول ترک ۷۰ تا ۷۵ میلیمتر خرابی اتصال در سطح تماس چسب و چسبنده کامپوزیتی بدلیل انجام لیزر تمیزکاری در سطح CFRP ایجاد شده است. طول ترک ۷۵ میلیمتر نقطه ای است که سطح شکست از خرابی اتصال به پارگی الیاف تغییر حالت می دهد و بعد از آن بدلیل انحراف مسیر ترک روند افزایشی نمودار مقاومت ماده با شیب بیشتری انجام می شود. این روند افزایشی تا طول ترک ۹۰ میلیمتر ادامه می یابد تا اینکه مجدد خرابی اتصال ایجاد گردد. در نمودار مقاومت ماده افزایش طول ترک باعث پایدار شدن مسیر رشد ترک می گردد [23]. بعد از افت ناچیز در طول ترک ۹۵ میلیمتر با توجه به افزایش طول ترک رفتار نمودار پایدار شده و به سمت یک مقدار ثابت میل می کند. با توجه به سطح شکست نمونه P.5.5 خرابی اتصال در سطح تماس چسب و چسبنده کامپوزیتی و همچنین پارگی الیاف مشاهده می گردد که استحکام اتصال را افزایش می دهد.

شکل ۶ نمودار مقاومت ماده در برابر رشد ترک و همچنین سطح شکست نمونه های P.5.10 را نشان می دهد. با توجه به شکل ۶ نمودار مقاومت ماده در برابر رشد ترک بعد از یک افزایش اولیه در لحظه شروع رشد ترک کاهش شدیدی پیدا می کند که با توجه به نمودار نیرو - جابه جایی برای نمونه P.5.10 بدلیل افت ناگهانی در نیرو در یک جابه جایی ثابت می باشد. بعد از رفتار کاهشی که تا طول ترک ۷۵ میلیمتر ادامه دارد با تغییر از خرابی اتصال به پارگی الیاف مجدد رفتار نمودار مقاومت ماده مجدد افزایشی می گردد.



شکل ۶) نمودار مقاومت ماده در برابر رشد ترک و سطح شکست نمونه های P.5.10



جدول ۴) مقادیر نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی مود اول برای حالت‌های مختلف الگوی هدفمند عملیات سطحی لیزری

کد نمونه	نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی مود اول ( $N/mm$ )			انحراف معیار
	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	
L-5	۰/۶۵	۰/۶۹	۰/۶۷	۰/۰۲
P.5.5	۰/۷۳	۰/۷۱	۰/۷	۰/۰۱
P.5.10	۰/۳۶	۰/۳۴	۰/۳۲	۰/۰۲
P.10.5	۰/۲۲	۰/۲۵	۰/۲۳	۰/۰۱

به مقدار ۵/۹٪ افزایش داشته است. از طرفی مقایسه نتایج جدول ۳ و ۴ نشان دهنده افزایش ۲۲/۴٪ در مقدار نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی محاسبه شده برای نمونه P.5.5 نسبت به نمونه عملیات سطحی شده به روش سنباده‌زنی می‌باشد.

جدول ۵ مساحت کل نواحی لیزر تمیزکاری در الگوی هدفمند عملیات سطحی لیزری بر روی چسبنده‌های آلومینیومی و کامپوزیتی را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۵ افزایش مساحت کل ناحیه لیزر تمیزکاری در نمونه P.10.5 به ۱۰۰۰ میلی‌متر مربع باعث کاهش انرژی و زمان لازم برای عملیات سطحی لیزری شده است اما برای نمونه فوق استحکام اتصال کاهش پیدا کرده است. با انتخاب الگوی هدفمند عملیات سطحی لیزری برای نمونه P.5.5 مساحت کل لیزر تمیزکاری در سطح چسبنده آلومینیومی ۶۲۵ میلی‌متر مربع و در سطح چسبنده کامپوزیتی ۷۵۰ میلی‌متر مربع می‌باشد. این درحالی است که برای نمونه فوق نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی نسبت به نمونه‌ای که عملیات سطحی لیزری سایشی در کل مساحت چسبنده‌ها انجام شده است ۵/۹٪ افزایش پیدا کرده است.

جدول ۵) مساحت ناحیه لیزر تمیز کاری با حالت‌های مختلف الگوی هدفمند عملیات سطحی لیزری

کد نمونه	مساحت کل ناحیه لیزر تمیز کاری ( $mm^2$ )	
P.5.5	۶۲۵	۷۵۰
P.5.10	۵۰۰	۵۰۰
P.10.5	۱۰۰۰	۱۰۰۰

رفتار فوق در طی مسیر رشد ترک مجدداً تکرار شده و این موضوع استحکام اتصال را برای نمونه فوق کاهش داده است. افت ناگهانی نیرو در جابه‌جایی ثابت باعث کاهش ناگهانی در مقدار نرمی ( $\delta/P$ ) برای نمونه‌های P.5.10 و P.10.5 شده است. در نتیجه آن افت‌های ناگهانی در نمودار مقاومت ماده مشاهده می‌شود. از طرفی با توجه به معادله (۲) نرخ رهایی انرژی کرنشی وابستگی مستقیم به مقدار نیرو و جابه‌جایی متناظر آن دارد پس افت ناگهانی در مقدار نیرو می‌تواند باعث افت ناگهانی در نمودار مقاومت ماده در برابر رشد ترک باشد.

با توجه به نمودارهای شکل ۳ و نمودارهای ۴ تا ۷ انجام عملیات سطحی هدفمند برای نمونه‌های P.5.5 که طول ناحیه لیزر تمیزکاری ۵ میلی‌متر و فاصله بین نواحی لیزر تمیزکاری ۱۵ میلی‌متر می‌باشد در تمامی طول نمونه حالت خرابی ۶ مرتبه از خرابی اتصال به پارگی الیاف تغییر پیدا کرده است. این تغییرات در حالت خرابی سطح شکست باعث شده افت‌های لحظه‌ای در نمودار نیرو - جابه‌جایی برای نمونه فوق با فاصله کمتری اتفاق بیافتد و در نتیجه روند کاهش نیرو بعد از شروع رشد ترک در نمودار نیرو - جابه‌جایی با شیب کمتری اتفاق افتاده است. این در حالی است که با افزایش فاصله بین نواحی لیزر تمیزکاری به ۲۵ میلی‌متر برای نمونه P.5.10 و همچنین افزایش طول ناحیه لیزر تمیزکاری به ۱۰ میلی‌متر برای نمونه P.10.5 افت‌های ناگهانی در نمودار نیرو - جابه‌جایی و مقاومت ماده در برابر رشد ترک مشاهده شده است که استحکام اتصال را کاهش می‌دهد.

جدول ۴ مقادیر نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی و انحراف معیار (Standard deviation) محاسبه شده برای اتصال چسبی با حالت‌های مختلف الگوی هدفمند عملیات سطحی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج جدول ۴ نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی برای اتصال چسبی مورد بررسی برای نمونه P.5.5 به مقدار ۰/۷۱ نیوتن بر میلی‌متر محاسبه شده است که در مقایسه با نمونه L-5

## منابع

- 1- Wang S, Wang S, Li G, Cui J. Dynamic response and fracture analysis of basalt fiber reinforced plastics and aluminum alloys adhesive joints. *Composite Structures*. 2021 Jul 15;268:114013.
- 2- Ammar MM, Shirinzadeh B, Zhao P, Shi Y. An approach for damage initiation and propagation in metal and carbon fiber hybrid composites manufactured by robotic fiber placement. *Composite Structures*. 2021 Jul 15;268:113976.
- 3- Kwon DJ, Kim JH, Kim YJ, Kim JJ, Park SM, Kwon IJ, Shin PS, DeVries LK, Park JM. Comparison of interfacial adhesion of hybrid materials of aluminum/carbon fiber reinforced epoxy composites with different surface roughness. *Composites Part B: Engineering*. 2019 Aug 1;170:11-8.
- 4- Anyfantis KN, Tsouvalis NG. Loading and fracture response of CFRP-to-steel adhesively bonded joints with thick adherents-Part I: experiments. *Composite Structures*. 2013 Feb 1;96:850-7.
- 5- Liu L, Liu X, Kong L, Wang M, Hu P, Wang D. Effect of laser surface treatment on surface and bonding properties of carbon fiber reinforced composites. *International Journal of Material Forming*. 2020 Nov;13:885-95.
- 6- American Society for Testing and Materials. ASTM D5573: Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Joints. ASTM.
- 7- He J, Xian G. Debonding of CFRP-to-steel joints with CFRP delamination. *Composite Structures*. 2016 Oct 1;153:12-20.
- 8- Yao Y, Shi P, Qi S, Yan C, Chen G, Liu D, Zhu Y, Herrmann A. Manufacturing and mechanical properties of steel-CFRP hybrid composites. *Journal of Composite Materials*. 2020 Oct;54(24):3673-82.
- 9- Takenaka K, Machida R, Bono T, Jinda A, Toko S, Uchida G, Setsuhara Y. Development of a non-thermal atmospheric pressure plasma-assisted technology for the direct joining of metals with dissimilar materials. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022 Mar 1;75:664-9.
- 10- Hu Y, Zhang J, Wang L, Jiang H, Cheng F, Hu X. A simple and effective resin pre-coating treatment on grinded, acid pickled and anodised substrates for stronger adhesive bonding between Ti-6Al-4V titanium alloy and CFRP. *Surface and Coatings Technology*. 2022 Feb 25;432:128072.
- 11- Wang Z, Bi X, Liu B, Xu M, Dong Z. Adhesion enhancement of PEEK/6161-T6 FLJ joints via laser surface modification. *Composites Part B: Engineering*. 2021 Jul 1;216:108797.
- 12- Yang G, Yang T, Yuan W, Du Y. The influence of surface treatment on the tensile properties of carbon fiber-reinforced epoxy composites-bonded joints. *Composites Part B: Engineering*. 2019 Mar 1;160:446-56.
- 13- Sun C, Min J, Lin J, Wan H. Effect of atmospheric pressure plasma treatment on adhesive bonding of carbon fiber reinforced polymer. *Polymers*. 2019 Jan 15;11(1):139.

بنابراین با انتخاب درست الگوی هدفمند عملیات سطحی لیزری انرژی و همچنین زمان اجرای عملیات سطحی لیزری کاهش می‌یابد در حالی که استحکام اتصال افزایش می‌یابد.

## ۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه تاثیر الگوی هدفمند عملیات سطحی بر رفتار اتصال چسبی پلیمرهای تقویت شده با الیاف کربن با آلومینیوم بررسی شده است. ابتدا عملیات سطحی لیزری در کل مساحت چسبنده‌ها انجام شده است و پارامترهای دستگاه لیزر برای انجام لیزر تمیز کاری و لیزر سایشی پیدا شده است. سپس الگوی هدفمند عملیات سطحی لیزری با سه حالت مختلف برای طول ناحیه لیزر تمیزکاری و لیزر سایشی انجام شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که:

- با انجام عملیات سطحی لیزری می‌توان استحکام اتصال چسبی را نسبت به روش‌های رایج مکانیکی مثل سنباده‌زدنی افزایش داد.
- الگوی هدفمند عملیات سطحی لیزری با کاهش شیب نمودار نیرو - جابه‌جایی بعد از شروع رشد ترک می‌تواند باعث افزایش استحکام اتصال چسبی گردد.
- با اجرای مناسب الگوی هدفمند لیزری رفتار نمودار مقاومت ماده افزایش می‌شود که باعث افزایش استحکام اتصال می‌گردد.
- در اتصال چسبی پلیمرهای تقویت شده با الیاف کربن به فلزات اجرای درست الگوی هدفمند عملیات سطحی لیزری می‌تواند با تغییر در حالت خرابی سطح شکست نمونه‌ها از خرابی اتصال به پارگی الیاف باعث افزایش استحکام اتصال گردد.
- در الگوی هدفمند عملیات سطحی لیزری کاهش فاصله بین نواحی عملیات سطحی لیزری تمیزکاری می‌تواند تغییرات مداوم در مسیر رشد ترک و در نتیجه افزایش استحکام اتصال را نتیجه دهد.
- با انتخاب درست الگوی هدفمند عملیات سطحی لیزری می‌توان مساحت ناحیه لیزر تمیزکاری و در نتیجه انرژی مورد نیاز و زمان لازم برای عملیات سطحی لیزری را کاهش داد.

**تاییدیه اخلاقی:** این مقاله تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده و محتوای ادبی مقاله منتج از فعالیت علمی خود نویسندگان است.  
**تعارض منافع:** مقاله حاضر هیچ گونه تعارض منافی با پایان نامه/رساله و طرح پژوهشی ندارد.

**منابع مالی:** منابع مالی توسط نویسندگان تامین شده است.

under mode I. *Modares Mechanical Engineering*. 2016 Jul 10;16(5):271-80.

14- Voswinkel D, Kloidt D, Grydin O, Schaper M. Time efficient laser modification of steel surfaces for advanced bonding in hybrid materials. *Production Engineering*. 2021 Apr;15:263-70.

15- Palavra A, Coelho BN, de Hosson JT, Lima MS, Carvalho SM, Costa AR. Laser surface treatment for enhanced titanium to carbon fiber-reinforced polymer adhesion. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2017 Aug;39:2917-24.

16- Sun C, Min J, Lin J, Wan H, Yang S, Wang S. The effect of laser ablation treatment on the chemistry, morphology and bonding strength of CFRP joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2018 Aug 1;84:325-34.

17- Orifici AC, Wongwichit P, Wiwatanawongsa N. Embedded flaws for crack path control in composite laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2014 Nov 1;66:218-26.

18- Maloney K, Fleck N. Toughening strategies in adhesive joints. *International Journal of Solids and Structures*. 2019 Feb 1;158:66-75.

19- Wagih A, Tao R, Yudhanto A, Lubineau G. Improving mode II fracture toughness of secondary bonded joints using laser patterning of adherends. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2020 Jul 1;134:105892.

20- Indeck J, Demeneghi G, Mayeur J, Williams C, Hazeli K. Influence of reversible and non-reversible fatigue on the microstructure and mechanical property evolution of 7075-T6 aluminum alloy. *International Journal of Fatigue*. 2021 Apr 1;145:106094.

21- De Moura MF, Campilho RD, Gonçalves JP. Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints. *International Journal of Solids and Structures*. 2009 Mar 15;46(6):1589-95.

22- Musiari F, Moroni F, Favi C, Pironi A. Durability assessment of laser treated aluminium bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2019 Sep 1;93:102323.

23- ASTM International. Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Undirectional Fiber-reinforced Polymer Matrix Composites. ASTM International; 2007.

24- Rahnama S, Kariman Moghadam A. Experimental investigation of the effect of different surface treatment on mode I fracture behavior of composite/aluminum adhesive joint. *Journal of Science and Technology of Composites*. 2023 May 15.

25- Han G, Tan B, Cheng F, Wang B, Leong YK, Hu X. CNT toughened aluminium and CFRP interface for strong adhesive bonding. *Nano Materials Science*. 2022 Sep 1;4(3):266-75.

26- Chen Y, Li M, Yang X, Wei K. Durability and mechanical behavior of CFRP/Al structural joints in accelerated cyclic corrosion environments. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2020 Oct 1;102:102695.

27- Kariman Moghadam A, Rahnama S, Maleki S. Experimental and numerical investigation of crack growth in adhesive bonding of two composites plates