



بررسی تجربی اتصالات چسبی L-شکل منفرد بین آلومینیوم و ورق کامپوزیتی تقویت شده با نانوگرافن کربن تحت بارگذاری کششی

سید فرزاد میرحسینی^۱، مهدی یارمحمد توسکی^۲، علی داور^{۳*}، محسن حیدری بنی^۴، جعفر اسکندری جم^۵

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۳- دانشیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

۴- دانشجوی دکتری، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

۵- استاد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

* تهران، صندوق پستی ۱۵۸۷۵-۱۷۷۴، a_davar@mut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۴ تیر ۱۴۰۱

داوری اولیه: ۱۵ مرداد ۱۴۰۱

پذیرش: ۲۵ مرداد ۱۴۰۱

کلیدواژگان:

اتصال چسبی

اتصال L-شکل

نانوکامپوزیت

نانوگرافن کربن

چکیده

در این پژوهش طراحی، ساخت و آزمون اتصال چسبی L-شکل منفرد بین ورق کامپوزیتی و قطعه آلومینیومی تحت بارگذاری کششی به صورت تجربی انجام شده است. برای ساخت نمونه تجربی از نانوگرافن با درصدهای مختلف وزنی جهت تقویت کامپوزیت و همچنین چسب ساختاری (هم جنس با رزین فاز زمینه کامپوزیت) جهت بهبود خواص مکانیکی اتصال استفاده شده است. همچنین تأثیر تغییر طول پایه قطعه L-شکل آلومینیومی بر مقاومت اتصال مورد بررسی قرار گرفته است. تعداد ۱۲ حالت اتصال با ترکیب درصدهای وزنی ۰/۱ و ۰/۳ برای چندلایه و درصدهای وزنی ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ برای چسب با در نظر گرفتن ۵ تکرار در هر آزمون، در مجموع ۶۰ نمونه ساخته شده و مورد بررسی قرار گرفته است. با مقایسه و بررسی نتایج آزمون کشش نمونه‌ها و عکس‌هایی که توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از نحوه جدایش چندلایه و قطعه L-شکل در محل جدایش اتصال تهیه شد، مشخص گردید که اتصال با ترکیب درصد وزنی صفر برای چندلایه و درصد وزنی ۰/۳ برای چسب بیشترین استحکام کششی را از خود نشان داده است. این بدان معناست که افزودن نانوگرافن به چندلایه موجب کاهش استحکام کششی و افزودن آن به رزین اپوکسی به عنوان چسب موجب بهبود استحکام کششی در اتصال گردیده است. در نهایت تأثیر افزایش طول ناحیه هم‌پوشانی دو قطعه چسبیده مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه در مورد اتصال با ترکیب درصد بهینه نانوگرافن در چندلایه و چسب نشان داد که افزایش ۲۵ درصدی طول ناحیه هم‌پوشانی افزایش ۱۴۸ درصدی و افزایش ۵۰ درصدی طول این ناحیه افزایش ۲۰۰ درصدی نیروی کشش عمودی تحمل شده توسط اتصال را در پی خواهد داشت.

Experimental study of single L-shaped adhesive joints between aluminum and carbon nanographene reinforced composite plate under tensile loading

Seyed Farzad Mirhosseini¹, Mehdi Yarmohammad Tooski¹, Ali Davar^{2*}, Mohsen Heydari Beni², Jafar Eskandari Jam²

1- Department of Mechanical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

Article Information

Original Research Paper

Received: 5 July 2022

First Decision: 6 August 2022

Accepted: 16 August 2022

Keywords:

Adhesive joint

L-shaped joint

Nanocomposite

Carbon nanographene

Abstract

In this research, the design, fabrication and testing of a single L-shaped adhesive joint between a composite sheet and an aluminum piece under tensile loading has been performed experimentally. To make an experimental sample, nanographene with different weight percentages was used to strengthen the composite and also structural adhesive (homogeneous with the composite phase resin) was used to improve the mechanical properties of the joint. The effect of changing the base length of the L-shaped aluminum part on the bond strength has also been investigated. 12 bonding modes with a combination of weight percentages of 0.1 and 0.3 for multilayer and weight percentages of 0.1, 0.3 and 0.5 for adhesive with 5 repetitions in each test, a total of 60 The sample is made and examined. By comparing and examining the results of the tensile test of samples and photographs taken by scanning electron microscopy (SEM) of the separation of multilayer and L-shaped piece at the separation site, it was found that the connection with a combination of zero weight percentage for multilayer and weight percentage of 3 / 0 for adhesive has shown the maximum tensile strength. This means that the addition of nanographene to the multilayer reduces the tensile strength and the addition to the epoxy resin as an adhesive improves the tensile strength of the joint. Finally, the effect of increasing the length of the overlap area of the two adhesive pieces was investigated. The result of the combination of the optimal percentage of nanographene in the multilayer and the adhesive showed that a 25% increase in the length of the overlap area would increase by 148% and a 50% increase in the length of this area would result in a 200% increase in the vertical tensile force borne by the joint.

Please cite this article using:

S. F. Mirhosseini, M. Yarmohammad Tooski, A. Davar, M. Heydari Beni, J. Eskandari Jam, Experimental study of single L-shaped adhesive joints between aluminum and carbon nanographene reinforced composite plate under tensile loading, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 4, pp. 47- 60, 2022 (in Persian).
<https://www.doi.org/10.22034/IJME.2022.159961>

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

استفاده از کامپوزیت‌های زمینه پلیمری باتوجه به خواص مکانیکی مناسب و چگالی پایین این مواد نسبت به فلزات در بسیاری از صنایع مانند خودروسازی، صنایع هوافضا و صنایع دریایی و غیره رو به افزایش است. با توجه به نیاز روزافزون به خودروهای کم‌مصرف و اقتصادی، استفاده از کامپوزیت‌های زمینه پلیمری به سبب چگالی کم‌تر، استحکام قابل‌رقابت و بسیاری از مزایای دیگر نسبت به فلزات در حال رشد و گسترش است. از طرفی متصل نمودن قطعات کامپوزیتی کوچک‌تر به منظور تولید قطعات بزرگ‌تر و اتصال این قطعات به شاسی، جهت طراحی بدنه یکپارچه در هواپیماها، کشتی‌ها و خودروها نیازمند طراحی اتصالات مناسب است. استفاده از پایه اتصال L-شکل که پوسته کامپوزیتی را به شاسی فلزی متصل کند، یکی از روش‌ها جهت اتصال کامپوزیتی‌ها به ورق‌های فلزی است. به منظور جلوگیری از آسیب به الیاف تقویت‌کننده در چندلایه‌های کامپوزیتی (اتصال با پیچ)، کاهش تمرکز تنش و افزایش سطح تماس دو قطعه در ناحیه اتصال، لازم است که پایه اتصال L-شکل فلزی، از یک سو به روکش کامپوزیتی چسبانده شود و از سوی دیگر به شاسی فلزی پیچ شود.

فیه و شرکلیف به بررسی شکست چسب و سازه‌های کامپوزیتی با اتصالات L-شکل تحت بارگذاری کششی پرداخته‌اند. آنها با تغییر شکل انحنای پروفیل L-شکل توانسته‌اند، استحکام اتصال را تا ۱۰۰ درصد افزایش دهند [۱].

رضانی و همکاران در یک پژوهش تحقیقی علمی - ترویجی به بررسی نحوه تولید و خواص نانوکامپوزیت‌های پلیمری با تقویت‌کننده نانوگرافن کربن پرداختند. این محققان به بحث درباره ساختار، روش‌های تولید و خواص نانوکامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با نانوگرافن به همراه مثال‌هایی از نتایج منتشرشده در مقالات علمی پرداختند. نتیجه پژوهش آنها نشان داد که بهره‌برداری کامل از نانوکامپوزیت‌های گرافن کربن با مقدار مناسب توزیع گرافن و جهت‌گیری صحیح این ذرات سبب افزایش مقاومت و در نتیجه صرفه اقتصادی ماده نهایی می‌شود [۲].

ژارا و کامپیلهو به بررسی تجربی و عددی اتصال چسبی L-شکل منفرد بین آلومینیوم و کامپوزیت کربن-اپوکسی تحت بارگذاری کششی پرداختند. در این پژوهش ضخامت قطعه L-شکل آلومینیومی و جنس چسب تجاری به‌عنوان متغیر در نظر گرفته شد. نتایج این کار تجربی نشان داد که افزایش ضخامت قطعه آلومینیومی موجب افزایش مقاومت کششی اتصال

می‌شود. همچنین استفاده از چسب‌های تجاری متفاوت تأثیر قابل توجهی در مقاومت اتصال و تحمل بار دارد [۳].

حسینی آب‌بندانک و همکاران به بررسی اثر نانوصفحات گرافن عامل‌دار بر رفتار خمشی کامپوزیت اپوکسی - الیاف بازالت پرداختند. در کار تحقیقاتی آنها، گرافن توسط عامل تری آمینوپروپیل متوکسی سیلان عامل‌دار شد و چهار نانوکامپوزیت با درصد‌های مختلف وزنی گرافن عامل‌دار به روش لایه‌گذاری دستی ساخته شد. در میان این چهار نمونه، نانوکامپوزیت حاوی ۰/۴ درصد وزنی گرافن عامل‌دار بهترین رفتار خمشی را نشان داده است [۴].

دومینیگز و همکاران به‌صورت تجربی و عددی اتصال چسبی بین صفحه کامپوزیتی کربن - اپوکسی و قطعه L-شکل آلومینیومی را تحت تنش کششی مورد بررسی قرار دادند. در پژوهش آنها اتصال L-شکل با استفاده از مدل ناحیه چسبناک^۱ (CZM) به‌صورت دوبعدی در نرم‌افزار آباکوس^۲ مورد بررسی عددی قرار گرفت. همچنین نمونه‌های ساخته‌شده با دو نوع چسب تجاری متفاوت و با در نظر گرفتن مقادیر مختلف برای ضخامت چسب و قطعه آلومینیومی تحت بارگذاری کششی قرار داده شد. نتایج تجربی و عددی آنها نشان داد، تغییر نوع چسب و افزایش ضخامت قطعه L-شکل باعث تغییرات چشمگیر در مقاومت اتصال قطعه خواهد شد [۵].

آکپینار و همکاران به بررسی تجربی اتصال تک‌لبه بین دو قطعه چسب‌بند^۳ آلومینیومی که در آن از چسب حاوی نانوساختارها استفاده شده است، پرداخته‌اند. آنها از ترکیب سه نوع چسب تجاری متفاوت با نانوساختارهای نانوگرافن^۴ کربن، نانولوله^۵ کربنی و فلورین C60 جهت افزایش استحکام اتصال استفاده کردند. در پژوهش آنها مقدار بهینه نانوگرافن برای ترکیب با هر سه نوع چسب ۱٪ وزنی اعلام گردید [۶].

در پژوهشی دیگر آکپینار و همکاران به بررسی تجربی تأثیر افزودن نانوساختارهای گرافن کربن، لوله‌های کربنی و فلورین C60 بر اتصال چسبی بین دو قطعه کامپوزیتی پرداختند. آنها به ترکیب سه نوع چسب تجاری با درجه کشسانی متفاوت با ۱٪ وزنی از نانوساختارهای یادشده پرداختند. سپس دو قطعه از جنس کامپوزیت کربن - اپوکسی را توسط چسب‌های تهیه شده چسبانده و تحت بارگذاری کششی و خمشی چهارنقطه‌ای قرار دادند. در نهایت به بررسی تأثیر ترکیب نانوساختارها و

¹ Cohesive Zone Model

² ABAQUS

³ Adherended

⁴ Nano graphene

⁵ Nano tube

هستند اما مزایای عدیده آنها باعث شده است که به‌عنوان بهترین گزینه برای اتصال ورق‌های کامپوزیتی به یکدیگر و یا قطعات فلزی مطرح شود.

با توجه مطالب ذکر شده هدف از این پژوهش، بررسی تجربی اتصال چسبی بین قطعه L-شکل فلزی (از جنس آلایاز آلومینیوم) و ورق کامپوزیت پلیمری جهت طراحی یک اتصال چسبی بهینه به‌عنوان پایه اتصال پوسته کامپوزیتی به بدنه فلزی خودرو خواهد بود. با توجه به کاربردی بودن این پایه اتصال در چسبانیدن ورق‌های غیرهمجنس به بدنه جهت ساخت سازه‌های چندتکه بزرگ‌تر، سبک‌تر و مستحکم‌تر، می‌تواند در صنایع خودروسازی، کشتی‌سازی، هواپیماسازی و غیره مورد استفاده قرار گیرد. از این رو پیش‌بینی می‌شود، نتایج این پژوهش در طراحی و تجزیه و تحلیل بسیاری از سازه‌های کامپوزیتی و ترکیبی مفید واقع شود. استفاده از نانوذرات گرافن درون چسب در اتصال نبشی کامپوزیت تقویت شده با نانوذره، نوآوری مقاله حاضر است.

۲- روش پژوهش

با توجه به این نکته که پژوهش حاضر کاملاً یک کار تجربی و آزمایشگاهی است، تعدد نمونه‌های موردنیاز به‌منظور آزمون و بررسی نتایج حاصل از بارگذاری، امکان‌سنجی اولیه و استفاده از روش یکسان در ساخت قطعات جهت صرفه‌جویی در وقت و هزینه الزامی است. در این بخش ضمن معرفی و ذکر خواص مکانیکی مصالح مصرفی به نحوه ساخت چندلایه^۱ کامپوزیتی، نحوه خم‌کاری و آماده‌سازی قطعه آلومینیومی، نحوه آماده‌سازی و اتصال آلومینیوم به چندلایه و نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها جهت آزمون کشش پرداخته خواهد شد.

۲-۱- مواد و ترکیبات

به منظور ساخت و تهیه اتصال L-شکل موردنظر به دو جزء چندلایه کامپوزیتی و قطعه از جنس آلومینیوم آلایازی با استحکام بالا نیاز است. دو جزء یادشده به‌وسیله چسب ساختاری (همجنس با رزین به‌کار رفته در چندلایه) و تحت شرایط مناسب به یکدیگر متصل می‌شوند. از دلایل استفاده از چسب ساختاری به‌جای چسب‌های تجاری موجود در بازار می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- مقرون به‌صرفه بودن نسبت به چسب‌های تجاری
- ایجاد پیوند شیمیایی قوی با رزین چندلایه به دلیل هم‌جنس بودن و انحلال شیمیایی

چسب‌های متفاوت بر مقاومت کششی و خمشی اتصال پرداخته‌اند [۷].

بنابراین و همکاران به بررسی تجربی و عددی اتصالات چسبی با ترکیب چسب‌بنده‌های متفاوت جهت کاربرد در صنعت خودروسازی پرداخته‌اند. آنها ترکیب حالات مختلف اتصال تک‌لبه سه ماده فولاد، آلومینیوم و کامپوزیت پلیمری الیاف کربن با چسب تجاری Sika Force7888 را ساختند و تحت بارگذاری کششی قرار داده‌اند. در پژوهش آنها طول ناحیه هم‌پوشانی نیز با طول‌های ۱۲، ۲۵ و ۵۰ میلی‌متر به‌عنوان متغیر در نظر گرفته شد. نتایج تجربی و عددی این کار پژوهشاتی نشان داد که بیشترین مقدار تحمل بار مربوط به اتصال دو قطعه کامپوزیتی بوده است [۸].

دومینیکوز و همکاران به بررسی تجربی و عددی اتصالات چسبی L-شکل بین اجزای آلومینیومی و سازه‌های کامپوزیتی تقویت شده با الیاف کربن تحت بارهای عمودی کششی، با در نظر گرفتن شرایط هندسی و چسب‌های مختلف پرداختند. آنها نشان داده‌اند که شکل‌پذیری چسب و ضخامت صفحه آلومینیومی پارامترهای بسیار موثر به منظور بهبود استحکام اتصالات هستند [۹].

لئو و همکاران، یک اتصال L-شکل تمام کامپوزیت را تحت آزمون خمش مورد بررسی قرار داده‌اند. از آسیب پیش‌رونده در تجزیه و تحلیل المان محدود به منظور نشان دادن حالت شکست آن استفاده شده است. برای به دست آوردن هندسه‌های بهینه از روش بهینه‌سازی بر اساس الگوریتم BP-GA انجام شد. نتایج نشان داد که حالت شکست اولیه اتصال L-شکل، ترک پوست بیرونی تقویت‌کننده بوده است [۱۰].

باتوجه به پیشرفت‌های صورت‌گرفته در زمینه ساخت کامپوزیت‌ها و فناوری چاپگرهای سه‌بعدی، امکان ساخت بدنه‌های تمام کامپوزیتی وجود دارد، اما باتوجه به هزینه بالای ساخت بدنه تمام کامپوزیتی و ضرورت تعمیرپذیر بودن خودروهای تجاری، به‌منظور طراحی یک خودروی اقتصادی، روش بدنه چندتکه عملی‌تر به نظر خواهد رسید. البته اتصال قطعات کامپوزیتی به یکدیگر و به قطعات فلزی و سرامیکی نیازمند طراحی اتصالات مناسب بین این اجزاء است.

استفاده از اتصالات مکانیکی برای ورق‌های کامپوزیتی به دلیل ایجاد تمرکز تنش در نزدیکی محل سوراخ‌کاری شده مناسب نیست، درحالی‌که اتصالات چسبی با توزیع یکنواخت تنش در ناحیه چسبیده شده و سطح تماس بیشتر بسیار مناسب‌تر است. اگرچه اتصالات چسبی نیز خود دارای معایبی

^۱ Laminate

باتوجه به نیاز به استفاده از آلومینیوم آلیاژی به‌عنوان یک‌پایه اتصال مستحکم و همچنین نیاز به در دسترس بودن و قابل توجه بودن آلیاژ موردنظر از لحاظ اقتصادی، پس از مطالعات و امکان‌سنجی اولیه آلومینیوم آلیاژی ۳۱۰۵ با ضخامت ورق ۱/۲۵ میلی‌متر به‌عنوان ورق مناسب جهت ساخت قطعه L-شکل آلومینیومی انتخاب شد. آلیاژ موردنظر می‌بایستی علاوه بر سختی مناسب قابلیت تحمل خم‌کاری ۹۰ درجه را نیز دارا باشد. خواص مکانیکی آلیاژ ۳۱۰۵ در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱ جدول مشخصات مکانیکی آلیاژ ۳۱۰۵ [۱۳]

استحکام کششی	استحکام برشی	استحکام تسلیم	ضریب ضربه	مدول	درصد افزایش
(مگا پاسکال)	(مگا پاسکال)	(مگا پاسکال)	پواسون	(گیگا پاسکال)	طول
۱۵۰	۹۷	۱۳۰	۰/۳۳	۷۰-۸۰	۷

۲-۲- فرایند ساخت قطعه L-شکل

باتوجه به هندسه L-شکل قطعه آلومینیومی نیاز است که ورق آلومینیومی ابتدا در ابعاد کوچک‌تر برش داده شود و سپس خم گردد. بدین منظور ابتدا ورق به‌وسیله پرس سنگین در ابعاد ۱۲×۲/۵ سانتی‌متر برش داده شده و آماده خم‌کاری شده است. باتوجه به کاهش یافتن ضخامت ورق آلومینیوم در روش خم‌کاری دستی، از ماشین خم‌کاری برک^۳ استفاده شده است تا قطعه در محل انحنای خم ۹۰ درجه دچار کاهش ضخامت و تمرکز تنش نشود.

۲-۳- فرایند ساخت چندلایه کامپوزیتی

ساخت چندلایه به‌صورت لایه‌چینی دستی^۴ و با ۴ لایه پارچه بازالت صورت گرفته است. چندلایه‌ها با درصد متغیر نانوگرافن و در ابعاد ۳۰×۳۰ سانتی‌متری ساخته شد و پس از پخت کامل به ابعاد ۱۵×۳ سانتی‌متر برش داده شده است. مطابق شکل ۲ چندلایه‌ها با درصد وزنی نانوگرافن ۰، ۰/۱ و ۰/۳ ساخته شده است.

۲-۴- عملیات چسباندن قطعه آلومینیومی به لمینیت کامپوزیتی

از مهم‌ترین و حساس‌ترین بخش این پروژه نحوه چسباندن قطعه L-شکل آلومینیومی به چندلایه کامپوزیتی می‌باشد.

- سازگاری و قابلیت همگن‌سازی رزین‌های اپوکسی با نانوذرات

- قابلیت تغییر کسر وزنی نانو به‌منظور بهینه‌سازی درصد نانو در چسب

در ابتدا دو قطعه به‌وسیله رزین اپوکسی خالص و در مراحل بعدی به‌وسیله رزین ترکیب‌شده با درصد‌های متغیر نانوگرافن چند دیواره با خلوص ۹۰٪ به یکدیگر متصل می‌شوند. با مقایسه کسر وزنی مختلف برای نانوگرافن، ضمن گزارش تأثیر نانو بر استحکام چسب، درصد بهینه برای کسر وزنی نانو در چندلایه و چسب به‌دست خواهد آمد.

از جمله پرکاربردترین زمینه‌های مورد استفاده در ساخت کامپوزیت‌های زمینه پلیمری، رزین‌های گرماسخت هستند. رزین مورد استفاده جهت ساخت چندلایه‌های کامپوزیتی از نوع اپوکسی epr 1080 ساخت کشور روسیه بوده است که به‌عنوان فاز پرکننده مورد استفاده قرار گرفته است. درصد وزنی رزین مصرفی و سخت‌کننده^۱ رزین طبق دستور کاتالوگ محاسبه و اجرا گردید:

$$\text{وزن رزین مصرفی} = \text{وزن کل } 4 \text{ لایه الیاف} + 20\%$$

$$\text{درصد هاردنر} = 12\% \text{ وزنی رزین مصرفی}$$

در بین الیاف طبیعی، الیاف بازالت به‌دلیل داشتن خواص استحکامی ایده‌آل، چسبندگی مناسب با رزین، خواص عایق صوتی، محدوده دمای کاری بالا، قیمت کمتر نسبت به الیاف کربن و کولار و همچنین استحکام بالاتر نسبت به الیاف شیشه گزینه مناسبی برای استفاده در صنایع مختلف به‌عنوان تقویت‌کننده در زمینه‌های پلیمری است. شکل ۱ قطعه‌ای از پارچه الیاف بازالت را نشان می‌دهد. در ساخت چندلایه کامپوزیتی از پارچه بافت اطلس الیاف بازالت ساخت شرکت بازالتکس^۲ کشور بلژیک استفاده شده است.



Fig. 1 Basalt fiber fabric

شکل ۱ پارچه الیاف بازالت

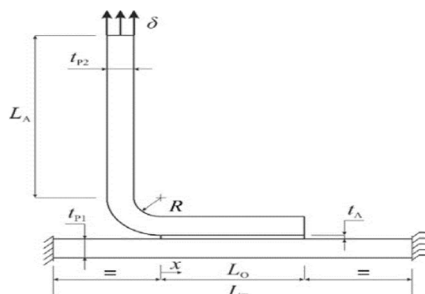
³ Brake

⁴ Hand lay-up method

¹ Hardener

² BASALTEX

است. روش‌های آماده‌سازی شیمیایی برای فلزات گوناگون متفاوت است اما در اینجا به روش زبرسازی^۱ (اچ کردن) با سولفوریک اسید که روش مناسب برای آلومینیوم است، اشاره شده است [۱۲].



t_{p2} (mm)	mL_A (mm)	R (mm)	t_A (mm)	t_{p1} (mm)	L_O (mm)	L_T (mm)
۱	۶۰	۵	۰/۲	۲	۲۰	۱۲۰

Fig. 3 L-joint adhesive geometry

شکل ۳ هندسه اتصال L-شکل چسبی [۴۴]



Fig. 4 Surface preparation of multilayer composite with Dacron fabric

شکل ۴ آماده‌سازی سطحی چندلایه کامپوزیتی به وسیله پارچه داکرون

پس از چربی‌زدایی و آماده‌سازی مکانیکی، قطعه‌ها به مدت ۵ دقیقه در محلول آب گرم و آلکالین NaOH قرار داده شده است. بدین منظور ۱۲۰ گرم NaOH خشک در یک لیتر آب حل شده و محلول آماده می‌شود. در انتها نیز باید نمونه‌ها در محلولی از اسیدسولفوریک، آب مقطر و سولفات فریت قرار داده شوند. در ابتدا قطعات آلومینیومی در داخل محلول بازی قرار می‌گیرند که دمای این محلول باید در حدود ۵۰ الی ۸۰ درجه سانتی‌گراد باشد. پس از این مرحله نمونه‌ها مطابق شکل ۵ توسط لایه سیاه رنگی پوشیده می‌شوند. سپس قطعات با آب شسته شده و کاملاً عاری از محلول آلکالین می‌شوند.

سپس محلولی از اسیدسولفوریک، آب و سولفات فریت با نسبت‌های ۱۰۰۰ میلی‌لیتر آب، ۲۰۰ میلی‌لیتر اسیدسولفوریک و ۱۲۵ گرم سولفات فریت تهیه شده و نمونه‌های شسته و خشک‌شده در داخل این محلول قرار داده شده است.

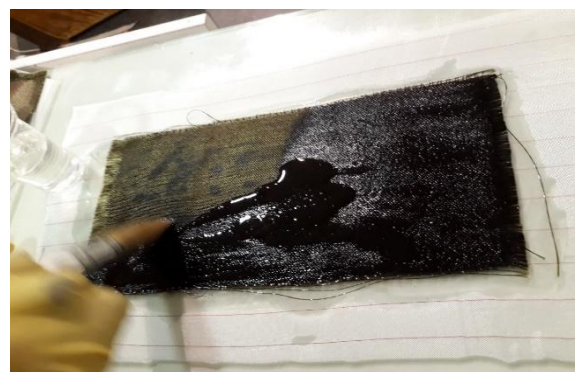


Fig. 2 Manufacturing multi-layer composite by manual layering method

شکل ۲ ساخت چند لایه کامپوزیتی به روش لایه‌چینی دستی

باتوجه به محدودیت تعداد تکرار آزمون‌ها، دستیابی به مقاومت بالا در برابر جدایش دو قطعه و کسب نتایج تجربی هماهنگ و همگرا بستگی زیادی به این مرحله دارد؛ بنابراین ایجاد شرایط مناسب جهت رسیدن به حداکثر چسبندگی بین دو قطعه، استفاده از روش منظم و یکسان برای چسباندن همه قطعات الزامی است. این عملیات شامل آماده‌سازی کامپوزیت، آماده‌سازی آلومینیوم و همچنین همگن‌سازی نانو در رزین چسب می‌باشد.

شکل ۳ هندسه اتصال L-شکل چسبی را نشان می‌دهد. پارامترهای نشان داده شده در شکل براساس استانداردها و کارهای پیشین انجام‌شده، تعیین گردید تا جهت مقایسه نتایج استفاده گردد. همچنین در انتها دو نمونه اتصال با طول پایه بزرگ‌تر ($L_O = 25,30\text{mm}$) به عنوان یک متغیر جدید ساخته و مورد آزمون و بررسی قرار گرفته است.

۲-۴-۱- آماده‌سازی چندلایه کامپوزیتی

برای جلوگیری از صیقلی شدن سطح کامپوزیت و ایجاد زبری سطحی مطابق شکل ۴ در هنگام ساخت چندلایه از پارچه داکرون در سطح زیرین و فوقانی چندلایه استفاده شد تا ضمن ایجاد سطح زبر جهت افزایش چسبندگی، اصطکاک لازم جهت جلوگیری از سرخوردن چندلایه در فیکسچر به وجود آید.

۲-۴-۲- آماده‌سازی سطحی آلومینیوم (عملیات زبر سازی)

صیقلی بودن سطح ورق‌های آلومینیومی و همچنین وجود آلودگی و چربی در سطح ورق مانع از چسبندگی مناسب بین دو قطعه می‌شود. از طرفی سطح صیقلی آلومینیوم باعث لیز خوردن قطعه درون فک دستگاه کشش خواهد شد. لذا استفاده از مواد شیمیایی جهت زدودن آلودگی و ایجاد خلل و فرج در سطح آلومینیوم به منظور دستیابی به نتایج مطلوب لازم و ضروری

^۱ Etching process



Fig. 6 Samples are placed inside the furnace after surface treatment for drying

شکل ۶ نمونه‌ها در داخل کوره پس از انجام عملیات سطحی به منظور خشک شدن



Fig. 5 Aluminum parts after reaction with sodium hydroxide

شکل ۵ قطعات آلومینیومی پس از واکنش با هیدروکسید سدیم



Fig. 7 Mechanical stirrer for mixing nano and resin

شکل ۷ همزن مکانیکی جهت اختلاط نانو و رزین



Fig. 8 Probe ultrasonic homogenizer

شکل ۸ دستگاه هموژنایزر اولتراسونیک پروبی



Fig. 9 Ice bath to keep the resin temperature low

شکل ۹ حمام یخ جهت پایین نگه داشتن دمای رزین

قطعات آلومینیومی برای مدت ۱۰ الی ۱۲ دقیقه در داخل محلول اچ در دمای بین ۶۰ الی ۶۵ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرند. سپس قطعات از محلول اچ خارج شده و با آب سرد شستشو داده می‌شود و مطابق شکل ۶ در داخل کوره با دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته و خشک می‌شوند. قطعات آماده شده به این روش در صورتی که رطوبت نسبی هوا بیش از ۵۰ درصد نباشد حداکثر ظرف مدت ۲۴ ساعت باید در ساخت کامپوزیت مورد استفاده قرار گیرند.

۲-۴-۳- همگن‌سازی نانوگرافن در رزین چسب

همگن‌سازی ذرات نانوگرافن در رزین از حساس‌ترین بخش‌های کار تجربی در زمینه نانو می‌باشد. عدم همگن‌سازی صحیح ذرات نانو و کلوخه^۱ شدن نانوگرافن‌های کربنی باعث کاهش قابلیت آنها در بهبود خواص مکانیکی و حتی باعث استحصال نتیجه معکوس خواهد شد. روش‌های مختلفی برای توزیع نانوگرافن کربن وجود دارد که مهم‌ترین آنها شامل اختلاط با سرعت بالا^۲ و استفاده از امواج اولتراسونیک^۳ است. مخلوط رزین و نانو مطابق شکل ۷ به وسیله همزن مکانیکی خوب مخلوط شده و سپس به وسیله هموژنایزر پروبی مدل سونوپلاس (ساخت شرکت بندلین آلمان) تحت تأثیر امواج اولتراسونیک قرار گرفته است. شکل ۸ دستگاه همگن‌سازی اولتراسونیک پروبی را نشان می‌دهد.

باتوجه به این نکته که دمای رزین تحت تأثیر امواج با طول موج کوتاه و انرژی بالا افزایش می‌یابد و از طرفی با عنایت به این که افزایش دمای رزین موجب از بین رفتن پیوند شیمیایی بین پلیمرهای رزین خواهد شد، مطابق شکل ۹ از حمام آب و یخ جهت پایین نگه‌داشتن دمای مخلوط استفاده شده است. همچنین جهت جلوگیری از آسیب رسیدن به دستگاه و جلوگیری از روند افزایش دما، مدت زمان لازم جهت انرژی‌دهی به بازه‌های کوچک‌تر تقسیم شده است.

¹ Agglomerate

² High speed shear mixing

³ Ultrasonic waves

گونه‌ای تنظیم شود که در داخل فک بالای دستگاه قرار گیرد. شکل ۱۱ نقشه شماتیک و فیکسچر ساخته شده مورد نیاز جهت آزمون کشش اتصال L-شکل را نشان می‌دهد.

جدول ۲ مقادیر وزنی ترکیبات رزین با ۰/۵ درصد نانوگرافن

Table 2 Weight values of resin compounds with 0.5% nanographene

وزن رزین m_r (gr)	وزن هاردنر m_h (gr)	وزن نانو $m_{n0.5\%}$ (gr)
۸۰	۸	۰/۴۴

جدول ۳ جدول میزان انرژی دریافتی مخلوط نانو گرافن و رزین اپوکسی در بازه‌های زمانی ۵ دقیقه‌ای

Table 3 Table of energy intake of nano-graphene and epoxy resin mixture in 5 minute intervals

مقدار انرژی پس از ۵ دقیقه سوم (کیلوژول)	مقدار انرژی پس از ۵ دقیقه دوم (کیلوژول)	مقدار انرژی پس از ۵ دقیقه اول (کیلوژول)	درصد نانو چسب
۵۵/۷۷۳	۳۶/۴۸۷	۱۷/۴۱۳	۰/۱
۵۷/۷۰۸	۳۷/۸۹۹	۱۸/۰۲	۰/۳
۵۸/۵۱۹	۳۸/۹۹۹	۱۹/۵۴۲	۰/۵



Fig. 10 Attached samples

شکل ۱۰ نمونه‌های چسبانده شده

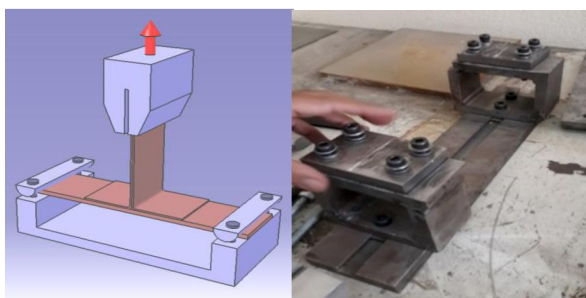


Fig. 11 Schematic and fixture map made to perform tensile test [13]

شکل ۱۱ نقشه شماتیک و فیکسچر ساخته شده جهت انجام آزمون کشش [۱۳]

به منظور آزمون کشش از دستگاه کشش هانسفیلد^۲ ساخت کشور انگلستان با ظرفیت ۲۵ کیلو نیوتن استفاده شده است.

به منظور تهیه مخلوط رزین و نانو جهت استفاده در ساخت چندلایه و چسب ساختاری، ابتدا حجم مشخصی از رزین داخل بشر ریخته شده و باتوجه به کسر وزنی مورد نیاز نانوگرافن به آن افزوده شده است. سپس مخلوط نانو و رزین همگن سازی شده است. این مقادیر برای ساخت رزین با ۰/۵٪ نانو در جدول ۲ آورده شده است.

موجدهی جهت همگن سازی نانو در رزین طی سه مرحله ۵ دقیقه‌ای صورت گرفته است و بر اساس افزایش درصد نانو میزان انرژی افزایش یافته است. این روند در جدول ۳ آمده است.

۲-۴-۴- نحوه چسباندن قطعه L-شکل آلومینیومی به چندلایه کامپوزیتی

وجود برخی از عوامل نامناسب در هنگام ساخت از قبیل کلوخه شدن نانو در مخلوط رزین و نانو، زبر نشدن صحیح و کافی قطعه آلومینیومی، وجود حباب هوا در چسب، ضخامت کم لایه چسب و غیره می‌تواند موجب کاهش مقاومت اتصال و ایجاد تغییرات زیاد در نتایج آزمون‌ها شود؛ بنابراین پیروی از دستورالعمل مناسب و یکسان برای چسباندن تمام نمونه‌ها الزامی است. همچنین تعداد تکرار آزمون جهت اطمینان به نتایج لازم و ضروری است. به همین جهت ساخت و آزمون هر حالت ترکیب درصد نانو، چسب و چندلایه ۵ مرتبه مورد تکرار قرار گرفته است.

به منظور یکسان سازی ضخامت لایه چسب سعی شده است تا در حد امکان حجم یکسان از مخلوط رزین و نانو (چسب ساختاری) بین دو قطعه ریخته شود. بدین منظور با استفاده از سرنگ مدرج بین دو قطعه هر نمونه مقدار ثابت ۲ سی سی چسب ریخته شد. همچنین برای یکسان سازی فشار وارد بر ناحیه هم پوشانی^۱ بین دو قطعه مطابق شکل‌های ۱۰ از استوانه فلزی با وزن ۵۰ گرم به عنوان وزنه برای همه نمونه‌ها استفاده شده است.

۲-۵- آزمون کشش

باتوجه به L-شکل بودن اتصال جهت انجام آزمون کشش، دستگاه آزمون کشش با دوفک کافی نمی‌باشد، بلکه نیاز به فیکسچر خاص جهت آزمون کشش قطعات T-شکل می‌باشد. این فیکسچر باتوجه به نیاز، متناسب با اندازه نمونه‌ها طراحی و ساخته شده است. این فیکسچر می‌بایستی به گونه‌ای باشد که چندلایه کامپوزیتی در آن ثابت شود و به جای فک پایین دستگاه کشش قرار گیرد و از طرف دیگر موقعیت قطعه آلومینیومی به

² HOUNSFIELD

¹ Overlap



Fig. 13 Gold-plated specimens, scanning electron microscope image

شکل ۱۳ نمونه‌های پوشش داده شده با طلا، تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی

برای انجام عکس برداری ابتدا ۱۲ نمونه به ابعاد 1×1 سانتی متر از محل جدایش چندلایه کامپوزیتی و آلومینیوم بریده شده و با طلا پوشش داده شده است. سپس نمونه‌ها در دو مرحله (باتوجه به محدودیت ظرفیت دستگاه) مورد عکس برداری قرار گرفت. از هر نمونه ۴ الی ۵ عکس در ابعاد میلی متر تا نانومتر جهت مقایسه و بررسی تهیه و ثبت گردید. عکس برداری توسط دستگاه وگاتسکن^۳ ساخت شرکت تسکن^۴ جمهوری چک صورت پذیرفته است.

۳- نتایج

باتوجه به مشکلات کار تجربی و احتمال بروز خطا در نتایج کار آزمایشگاهی، تصمیم بر آن گرفته شد تا با در نظر گرفتن تعداد تکرار بالا (۵ مرتبه برای هر حالت) و حذف نتایج با اختلاف زیاد، مقادیر قابل اطمینانی برای نتایج به دست آید. نتایجی که در این قسمت بیان خواهد شد شامل: نمودارهای نیرو - جابه‌جایی برای همه آزمون‌ها (۶۰ نمونه)، نمودار مقایسه‌ای ماکزیمم نیروی عمودی کشش برای تمامی آزمون‌ها، نمودار مقایسه‌ای ماکزیمم نیروی عمودی کشش پس از حذف داده‌های پرت (۳۶ مورد آزمون)، نمودار مقایسه‌ای میانگین نیروی عمودی کشش برای هر حالت از ترکیب تغییر درصد وزنی نانو در چندلایه و چسب، نمودار مقایسه‌ای ماکزیمم جابه‌جایی عمودی اتصال تا نقطه شکست، نمودار مقایسه‌ای جابه‌جایی عمودی اتصال در نقطه تحمل ماکزیمم نیروی عمودی کشش و نمودار مقایسه‌ای انرژی شکست مربوط به ۱۲ نمونه اتصال (نمونه‌های T5). در انتها نیز عکس‌های معمولی و میکروسکوپی (عکس SEM^۵) چند نمونه از اتصالات جهت مقایسه و بررسی شکست در اتصالات بررسی خواهد شد.

سرعت کشش دستگاه ۱ میلی متر بر ثانیه تنظیم شده است. نتایج به دست آمده شامل نیروی عمودی کششی و جابه‌جایی عمودی می‌باشد. شکل ۱۲ دستگاه آزمون کشش و اتصال L-شکل آماده جهت آزمون را نشان می‌دهد.

۲-۶- عکس برداری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ (SEM)

میکروسکوپ الکترونی روبشی یکی از انواع میکروسکوپ‌های الکترونی است که کاربردهای بسیاری در فناوری نانو پیدا کرده است. در این روش با بمباران نمونه‌ها با استفاده از پرتوی الکترونی سبب می‌شود تا از نمونه فوتون‌هایی خارج و به سمت آشکارسازها رها شوند. این فوتون‌ها در آشکارسازها به سیگنال‌هایی تبدیل می‌شوند که بر اساس آن‌ها میکروسکوپ می‌تواند تصویر متقابل از سطح نمونه را به صورت لحظه به لحظه نمایش دهد. مطابق شکل ۱۳ در این روش عکس برداری از طلا به عنوان یک ابررسانا جهت پوشش^۲ سطح نمونه‌ها استفاده می‌شود.



Fig. 12 How to test the tensile strength of L-shaped connection specimens

شکل ۱۲ نحوه آزمون کشش نمونه‌های اتصال L-شکل

³ WEGA TESCANA

⁴ TESCANA

⁵ Scanning Electron Microscope

¹ Scanning Electron Microscope

² Coating

۳-۱- نتایج آزمون کشش

عمودی در اتصال به شدت کاهش یافته است. این موضوع به تشکیل کلوخه‌های ذرات نانو و در نتیجه آن عدم توانایی رزین در پیوند با چندلایه و قطعه آلومینیومی ارتباط دارد.

نمودار شکل ۱۷ نتایج آزمون اتصال T-0.3-0.5 را ارائه داده است که در مورد این اتصال با بیشترین درصد نانوگرافن در چندلایه و چسب مقدار جابه‌جایی بیشینه کاهش یافته است و نتایج مربوط به بیشینه نیروی کشش عمودی تحمل شده کاهش چشمگیری یافته است و از حالت بهینه فاصله گرفته است. میانگین نیروی کشش تحمل شده برای سه داده نزدیک به هم T1، T2 و T3 تا مقدار ۰/۱۷۰ کیلونیوتن کاهش یافته است که نسبت به میانگین بهینه‌ترین حالت یعنی اتصال T-0-0.3 با کاهش ۳۸/۲ درصدی مواجه شده است.

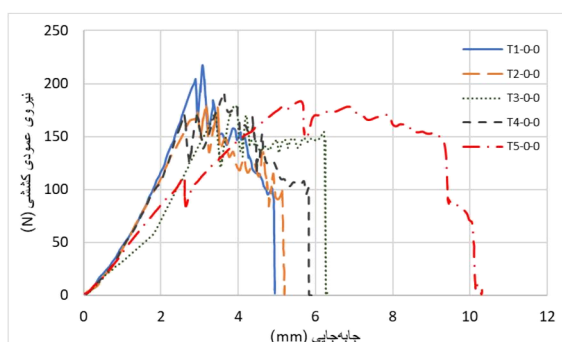


Fig. 14 Force – displacement diagram related to the T-0-0 joint
شکل ۱۴ نمودار نیرو - جابه‌جایی مربوط به اتصال T-0-0

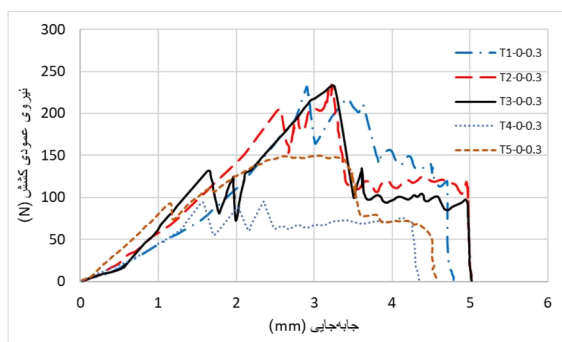


Fig. 15 Force – displacement diagram related to the T-0-0.3 joint
شکل ۱۵ نمودار نیرو - جابه‌جایی مربوط به اتصال T-0-0.3

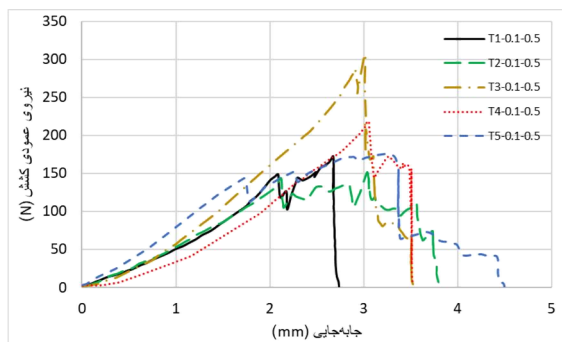


Fig. 16 Force – displacement diagram related to the T-0.1-0.5 joint
شکل ۱۶ نمودار نیرو - جابه‌جایی مربوط به اتصال T-0.1-0.5

نمودارهای نیرو-جابه‌جایی بیان‌کننده نیروی کشش عمودی تحمل‌شده برحسب جابه‌جایی عمودی اتصال می‌باشد. برای هر حالت از ترکیب درصد نانوگرافن در کامپوزیت و چسب (۱۲ حالت)، ۵ مرتبه تکرار صورت پذیرفته که نمودار مربوط به هر ۵ مورد تکرار برای هر چند حالت ترکیب درصد نانوگرافن چندلایه و چسب در قالب نمودار ارائه شده است. در نام‌گذاری اتصالات حرف T و عدد پس از آن معرف شماره آزمون (تکرار آزمون)، عدد دوم بیانگر درصد نانو چندلایه کامپوزیتی می‌باشد و عدد سوم درصد نانو در چسب را نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال: T1-0.1-0.3 بیانگر نخستین آزمون کشش انجام‌شده برای نمونه اتصالی با ۰/۱ درصد نانو در چندلایه و ۰/۳ درصد نانوگرافن در چسب می‌باشد.

در شکل ۱۴، نمودار نیرو - جابه‌جایی برای هر پنج حالت تکرار آزمون اتصال T-0-0 در قالب یک نمودار آورده شده است. مشاهده می‌شود به‌جز نمونه T5 که جابه‌جایی چندلایه در فیکسچر، در مورد آن اتفاق افتاده است، نتایج مابقی آزمون‌ها مشابه و نزدیک به هم هستند. البته این جابه‌جایی چندلایه در فیکسچر تأثیری بر نیروی ماکزیمم کشش نداشته و فقط باعث افزایش انرژی شکست خواهد شد. بیشترین نیروی عمودی کشش توسط نمونه T1-0-0 به میزان ۰/۲۲KN و کمترین نیرو توسط نمونه T3-0-0 تحمل گردیده است.

باتوجه به نمودار شکل ۱۵ نتایج مربوط به سه نمونه T2، T1 و T3 با میانگین تحمل نیروی کشش عمودی به مقدار عددی ۰/۲۳۳ کیلونیوتن و به ترتیب با ماکزیمم جابه‌جایی عمودی ۴/۹۱، ۵/۰۳۱ و ۵ میلی‌متر بسیار نزدیک به هم هستند. نمونه T4 از حیث تحمل نیروی عمودی کشش بسیار ضعیف عمل کرده است که در مراحل بعد نتیجه این آزمون در نظر گرفته نمی‌شود.

باتوجه به شکل ۱۶ که مربوط به اتصال T-0.1-0.5 است، به‌جز نمونه T3 (داده پرت) مابقی نمونه‌ها نسبت به حالت‌های قبلی، با افزایش درصد نانوگرافن با کاهش بیشینه نیروی کشش عمودی تحمل‌شده توسط اتصال مواجه شده‌اند. این موضوع به‌خوبی نشان می‌دهد که در مورد چندلایه با درصد وزنی نانوگرافن ۰/۱ درصد افزایش درصد نانو در چسب به مقدار بیش از ۰/۳ درصد وزنی موجب کلوخه شدن صفحات نانوگرافن و کسب نتیجه معکوس در خصوص تحمل نیروی کشش عمودی خواهد شد. همچنین نمودار ۱۶ به‌خوبی نشان می‌دهد که با افزایش بیش از حد بهینه نانوگرافن مقدار بیشینه جابه‌جایی

۳-۲- مقایسه ماکزیمم نیروی عمودی کشش

در نمودار ۱۸ و جدول ۴ تمامی نتایج آزمون کشش (۶۰ مورد) در قالب ماکزیمم نیروی عمودی کشش به صورت مقایسه‌ای بیان شده است. مقایسه نتایج بدین صورت است که شماره آزمون‌های یکسان برای درصد چسب‌های یکسان مقایسه شده است. به این صورت که مقایسه براساس تغییر درصد نانو چندلایه کامپوزیتی صورت گرفته است. بدین صورت که میله‌های با رنگ آبی نتایج آزمون چندلایه‌های بدون نانو گرافن، میله‌های قرمز نتایج چندلایه‌های با ۰/۱ درصد نانو گرافن و میله‌های سبز نتایج آزمون چندلایه‌ها با ۰/۳ درصد نانو گرافن را ارائه می‌دهند. البته چند مورد از داده‌هایی که پرت و غیرواقعی به نظر می‌رسند در مرحله بعد حذف خواهد شد.

جدول ۴ ماکزیمم نیروی عمودی کشش برای همه نمونه در آزمون تجربی

Table 4 Maximum vertical tensile force for all specimen in the experimental test

شماره نمونه نیرو (N)	شماره نمونه نیرو (N)	شماره نمونه نیرو (N)
۱۸۰	T1-0.3-0	۱۵۹
۲۱۹	T2-0.3-0	۲۲۲
۲۱۲	T3-0.3-0	۱۶۰
۱۵۷	T4-0.3-0	۱۶۹
۱۵۶	T5-0.3-0	۱۷۲
۱۷۹	T1-0.3-0.1	۱۶۹
۲۱۷	T2-0.3-0.1	۱۰۶
۲۳۴	T3-0.3-0.1	۲۱۹
۱۸۶	T4-0.3-0.1	۲۲۴
۱۶۰	T5-0.3-0.1	۱۸۳
۱۸۵	T1-0.3-0.3	۲۰۹
۱۷۴	T2-0.3-0.3	۲۴۵
۲۱۷	T3-0.3-0.3	۱۳۴
۱۳۵	T4-0.3-0.3	۲۲۱
۱۷۴	T5-0.3-0.3	۲۱۲
۱۵۶	T1-0.3-0.5	۱۷۷
۱۶۸	T2-0.3-0.5	۱۵۲
۱۸۷	T3-0.3-0.5	۳۰۳
۲۷۱	T4-0.3-0.5	۲۲۲
۱۹۳	T5-0.3-0.5	۱۷۷

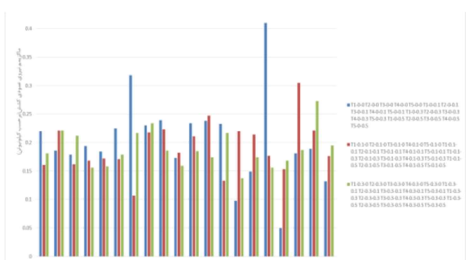


Fig. 18 Comparative diagram of the maximum vertical tensile force

شکل ۱۸ نمودار مقایسه‌ای ماکزیمم نیروی عمودی کشش

همان‌گونه که در نمودارهای ارائه شده، مشاهده می‌شود باتوجه به دستی‌بودن روش ساخت چندلایه کامپوزیتی و نحوه چسباندن قطعه L-شکل، علی‌رغم این که سعی شده است تا شرایط ساخت و آزمون کاملاً یکسان باشد تفاوت جزئی در نتایج دیده می‌شود. باتوجه به این موضوع سعی شده است تا در ادامه تعداد ۳ عدد از نتایجی را که نزدیک به هم هستند، نگه‌داشته و از میانگین آن‌ها به‌عنوان مطمئن‌ترین نتیجه استفاده شود.

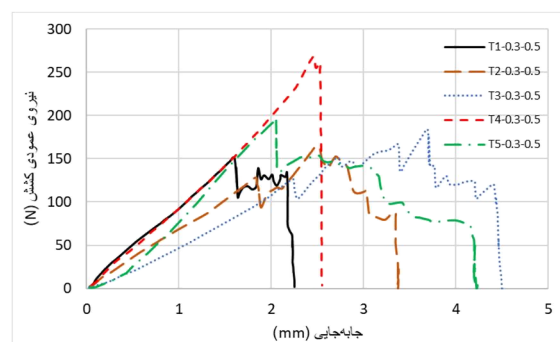


Fig. 17 Force – displacement diagram related to the T-0.3-0.5 joint

شکل ۱۷ نمودار نیرو - جابه‌جایی مربوط به اتصال T-0.3-0.5

نتایج آزمون کشش به‌دست آمده نشان می‌دهد که تا قبل از ایجاد اولین ترک در چسب (ترک در ناحیه پاشنه اتصال) نمودار نیرو - جابه‌جایی تقریباً به‌صورت خطی پیش می‌رود. در لحظه ایجاد اولین ترک در پاشنه اتصال با افت ناگهانی نیرو مواجه خواهیم شد. پس‌از این مرحله، اتصال هنوز توانایی تحمل نیرو را دارد و نمودار نیرو-جابه‌جایی مجدداً به‌صورت خطی سیر صعودی درپیش می‌گیرد. پس از لحظه‌ای که دومین شکست در اتصال پدیدار می‌شود (غالباً نقطه پیک نمودار)، نمودار به‌صورت غیرخطی (همراه با نوسان زیاد) روند نزولی به خود می‌گیرد. این مرحله بیانگر جدایش چسب از الیاف پارچه بازالت می‌باشد.

از آنجایی که در هنگام کشش عمودی اتصال چندلایه کامپوزیتی خیز بر می‌دارد و در حقیقت دچار خمش می‌شود، علاوه بر الیاف پارچه رزین کامپوزیت نیز در مقاومت آن و در نهایت مقاومت اتصال مؤثر خواهد بود (برخلاف حالت کشش چندلایه که الیاف نقش باربری را دارد). باتوجه به استدلال فوق قطعاً وجود ذرات نانو بر مقاومت اتصال مؤثر است (صرف‌نظر از مثبت و یا منفی بودن این اثر). افزایش غیرعادی جابه‌جایی عمودی در بعضی نمونه‌ها دو دلیل روشن دارد. دلیل اول لغزش چندلایه کامپوزیتی داخل فیکسچر (تنها در مورد نمونه T5-0-0 این اتفاق رخ داده است) و دلیل دوم تغییر شکل پایه قطعه L-شکل که در اثر تحمل بار زیاد قبل از جدایش کامل چسب اتفاق افتاده است.

تنها سبب کاهش استحکام خمشی و انرژی شکست و افزایش ناچیز در مدول خمشی می‌شود. با افزودن نانوگرافن بدون عامل به رزین اپوکسی چسبندگی میان الیاف و زمینه به خوبی صورت نگرفته است [۳]. اتصال با چسب ۰/۳ درصد نانو (درصد بهینه) و چندلایه صفر درصد نانو، ۹/۳ درصد نیروی کشش عمودی بیشتر از اتصال با درصد مشابه نانو چسب و چندلایه با ۰/۱ درصد نانو تحمل کرده است.

باتوجه به این نکته که عملیات چسباندن قطعه آلومینیومی پس از پخت کامل چندلایه صورت گرفته است و باتوجه به متجانس بودن چسب و رزین به نظر می‌رسد که رزین موجود در چسب مجدداً لایه فوقانی رزین چندلایه را در خود حل نموده و سبب پیوند دوباره ذرات نانوگرافن و کلوخه شدن آن‌ها شده است. این بدین معناست که مجموع درصد نانو در چسب و چندلایه باید به درصد بهینه ۰/۳ نزدیک باشد. در درصدی بالاتر از ۰/۳ برای مجموع درصد نانو چسب و چندلایه خواص مکانیکی موردنظر کاهش می‌یابد. علت اصلی این موضوع کلوخه شدن صفحات گرافن می‌باشد. ذرات نانوگرافن تمایل دارند از طریق پیوند واندروالس بایکدیگر اتصال برقرار کنند و کلوخه‌ها را به وجود آورند. این حالت در تمامی درصدی گرافن وجود دارد، اما با افزایش درصد نانو مقدار این کلوخه‌ها بیشتر شده و از درصدی به بعد محلی برای تمرکز تنش و رشد ترک می‌شوند [۳].

۳-۳- مقایسه انرژی شکست نمونه‌های T5

مطابق نمودار شکل ۲۱، مقایسه انرژی شکست برای تنها یک نمونه از هر حالت ترکیب درصد نانو چندلایه و چسب انجام شده است و بیان‌کننده انرژی صرف شده جهت شکست اتصال (سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی) می‌باشد. محدوده نرمال انرژی شکست جهت شکست اتصال بین ۲۰۰۰ الی ۳۰۰۰ میلی‌ژول می‌باشد. در بقیه موارد شکست زود هنگام اتفاق افتاده و یا اینکه دفرمگی قطعه آلومینیومی در اثر تحمل نیروی زیاد بر روی انرژی شکست تأثیر گذاشته است. همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، بزرگ بودن انرژی شکست ارتباطی با بزرگ بودن نیروی کشش تحمل شده ندارد و انرژی شکست صرفاً به مکانیزم شکست و جدایش اتصال ارتباط دارد.

از مقایسه عکس‌های نحوه جدایش چسب در محل شکست اتصال (عکس‌های ۲۲ و ۲۳) می‌توان دریافت که باتوجه به جدایش رزین از پارچه در کامپوزیت، استفاده از چسب ساختاری هم‌جنس با رزین مصرفی (به دلیل پیوند شیمیایی مناسب) انتخاب بسیار مناسبی بوده است.

همان‌گونه از ظاهر نمودار شکل ۱۹ و مقایسه آن با نمودار شکل ۱۸ مشاهده می‌شود، پس از حذف داده‌های غیرواقعی نتایج بسیار به هم نزدیک شده و قابل مقایسه می‌باشند. از این مرحله به بعد از نتایج این ۳۶ مورد آزمون به عنوان داده‌های قابل اطمینان استفاده شده است و اظهار نظر کلی در مورد درصد بهینه نانوگرافن صرفاً براساس این نتایج خواهد بود.

نمودار شکل ۲۰ در واقع بیان‌کننده میانگین ماکزیمم نیروی کشش به دست آمده از سه آزمون قابل اطمینان برای هر حالت ترکیب چندلایه و چسب می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بهینه‌ترین حالت از بین ۱۲ حالت ترکیب درصدی مختلف نانو در چسب و چندلایه اتصال T-0-0.3 می‌باشد. بدین معنا که اتصال با چندلایه صفر درصد نانو و چسب ۰/۳ درصد نانو بیشترین نیروی عمودی کشش را تحمل کرده است.

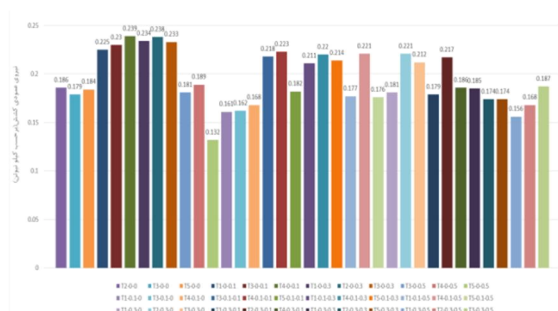


Fig. 19 Diagram of the maximum vertical tensile force after deleting the OUTLIER data

شکل ۱۹ نمودار ماکزیمم نیروی عمودی کشش پس از حذف داده‌های پرت

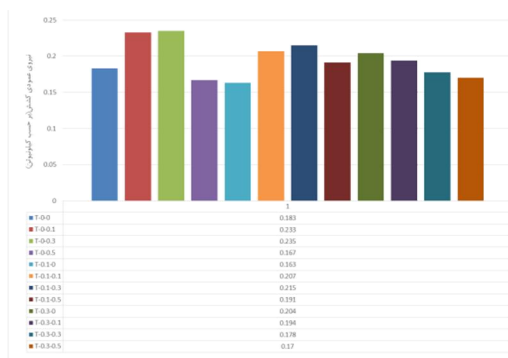


Fig. 20 Diagram of the mean maximum vertical tensile force for three reliable tests

شکل ۲۰ نمودار میانگین ماکزیمم نیروی عمودی کشش برای سه آزمون قابل اطمینان

آنچه که به‌طور قطعی از نتایج بالا به دست می‌آید این نکته خواهد بود که افزودن ذرات نانوگرافن بدون عامل سبب ضعیف شدن پیوند بین پارچه بازالت و رزین حاوی گرافن در چندلایه و نتیجه آن جدایش راحت‌تر چسب و رزین از پارچه بازالت خواهد شد. در واقع افزودن نانوگرافن بدون عامل سیلانی به چندلایه

آزمون کشش ماکزیمم بوده است اتصال به‌سختی و از پارچه بازالت جدا شده است و در واقع لایه فوقانی لمینیت را با خود جدا کرده است. عکس‌ها به‌خوبی نشان می‌دهد که افزایش بیش از حد نانو در چسب موجب جدایش آسان اتصال از قطعه آلومینیوم و ضعیف شده اتصال می‌شود.

با مقایسه شکل ۲۴ که مربوط به اتصال T1-0-0 و شکل ۲۵ که مربوط به اتصال T3-0.3-0.5 است، کاملاً مشهود است که در مورد چندلایه با درصد وزنی بالای نانو گرافن چسبندگی مناسب میان الیاف و زمینه به‌خوبی صورت نگرفته است و فاصله میان الیاف و فاز زمینه بیش از حد بهینه می‌باشد. همین فاصله و عدم پیوند مناسب موجب جدایش راحت‌تر چسب و رزین از الیاف پارچه و تحمل نیروی کوچک‌تر از سوی اتصال خواهد شد.

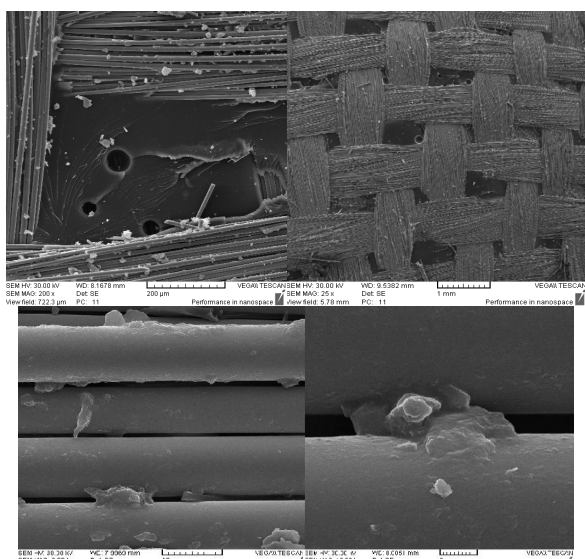


Fig. 24 SEM image of the T1-0-0 sample in the range of 1 mm and 200, 10 and 2 micrometers

شکل ۲۴ عکس SEM مربوط به نمونه T1-0-0 محدوده ۱ میلی‌متر و ۲۰۰، ۱۰ و ۲ میکرومتر

۳-۴- تأثیر افزایش طول پایه قطعه L-شکل آلومینیومی بر مقاومت اتصال

در این قسمت از کار تجربی سعی شده است تا با افزایش ۵ و ۱۰ میلی‌متری طول پایه قطعه L-شکل آلومینیومی به‌عنوان یک متغیر جدید، تأثیر آن را بر مقاومت اتصال (استفاده از مقدار بهینه درصد نانوگرافن در کامپوزیت و چسب) بررسی شود. باتوجه به شکل ۲۷ مشاهده می‌شود که افزایش ۵ و ۱۰ میلی‌متری پایه قطعه L-شکل آلومینیومی به ترتیب افزایش ۱۴۸ درصدی و ۲۰۰ درصدی تحمل نیروی عمودی کشش را در پی خواهد داشت که نتیجه بسیار شگفت‌انگیزی است.

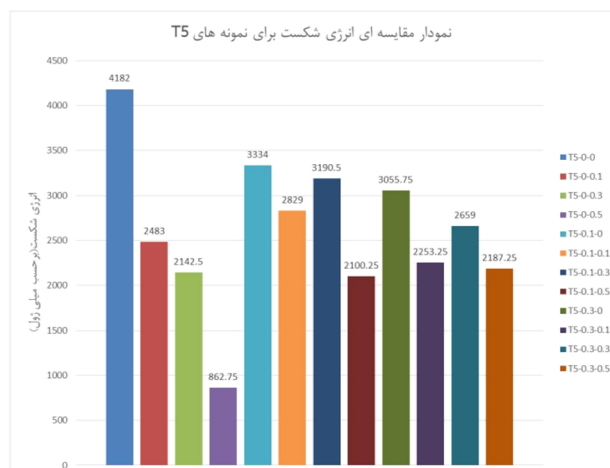


Fig. 21 Comparative diagram of failure energy for 12 joint samples (T5 samples)

شکل ۲۱ نمودار مقایسه‌ای انرژی شکست مربوط به ۱۲ نمونه اتصال (نمونه‌های T5)



Fig. 22 Photo of T5-0-0 and T5-0-0.5 junction failure area

شکل ۲۲ عکس ناحیه شکست اتصال T5-0-0.5 و T5-0-0



Fig. 23 Photo of T5-0.1-0.3 and T5-0.3-0.3 junction failure area

شکل ۲۳ عکس ناحیه شکست اتصال T5-0.3-0.3 و T5-0.1-0.3

تقریباً در هیچ موردی چسب به‌طور کامل از آلومینیوم جدا نشده است، این نشان می‌دهد که نحوه زبر سازی سطح آلومینیوم بسیار مناسب بوده است و چسب با سطح متخلخل آلومینیوم پیوند قوی برقرار کرده است. نتایج آزمون‌های کشش به‌طور کامل با عکس‌ها قابل انطباق می‌باشد. در مواردی که نتایج

مکانیکی اتصال و تحمل نیروی بیشتر توسط اتصال می‌گردد. ضمن این‌که با افزایش تحمل نیرو از سوی اتصال چندلایه کامپوزیتی بیشتر درگیر شده و جابه‌جایی عمودی که حاصل تحمل خیز توسط این جزء است بیشتر می‌شود.

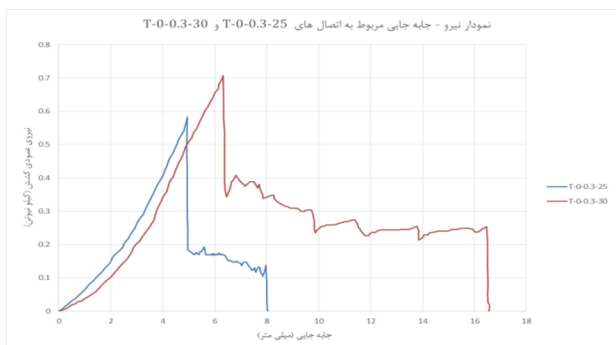


Fig. 27 Force – displacement diagram related to T-0-0.3-25 and T-0-0.3-30 joints

شکل ۲۷ نمودار نیرو-جابه‌جایی مربوط به اتصالات T-0-0.3-25 و T-0-0.3-30

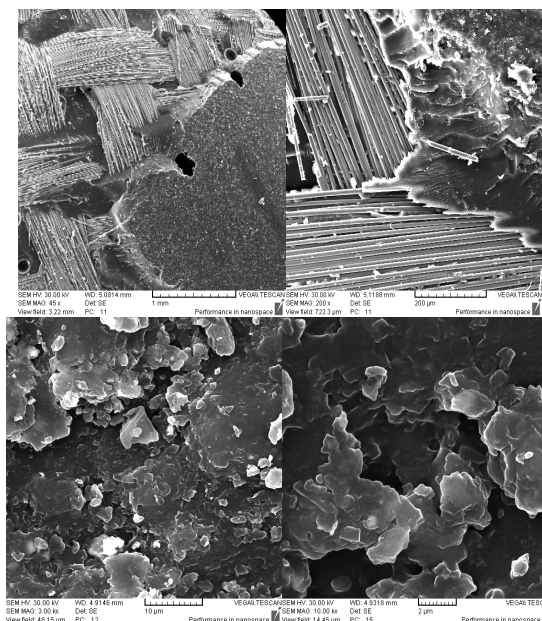


Fig. 25 SEM image of T1-0.3-0.5 specimens in the range of 1 mm and 200, 10 and 2 micrometers

شکل ۲۵ عکس SEM مربوط به نمونه T1-0.3-0.5 محدوده ۱ میلی‌متر و ۲۰۰، ۱۰ و ۲ میکرومتر



Fig. 28 Photo of junction failure area T-0-0.3-30 and T-0-0.3-30

شکل ۲۸ عکس ناحیه شکست اتصال T-0-0.3-30 و T-0-0.3-30

۴- نتیجه‌گیری

از میان ۱۲ حالت ترکیب درصد وزنی متفاوت در چندلایه کامپوزیتی و چسب ساختاری، بیشترین استحکام کششی (بیشینه نیروی کشش عمودی تحمل شده) مربوط به اتصال T-0-0.3 یعنی اتصالی با ۰٪ وزنی نانوگرافن در چندلایه کامپوزیتی و ۰/۳٪ وزنی نانوگرافن در چسب با تحمل میانگین بیشینه نیروی عمودی کشش به میزان ۰/۲۳۵ کیلونیوتن است. پس از آن از بین ۴ حالت ترکیب درصد وزنی متفاوت چسب (۰، ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ درصد) با چندلایه کامپوزیتی ۰/۱ درصد وزنی نانو، بیشینه تحمل نیروی کشش عمودی مربوط به اتصال T-0.1-0.3 با ۰/۱ درصد وزنی نانوگرافن در چندلایه و ۰/۳ درصد وزنی نانوگرافن در چسب با تحمل بیشینه نیروی ۰/۲۱۵ کیلونیوتن بوده است. در نهایت اتصال T-0.3-0 با ۰/۳٪ وزنی

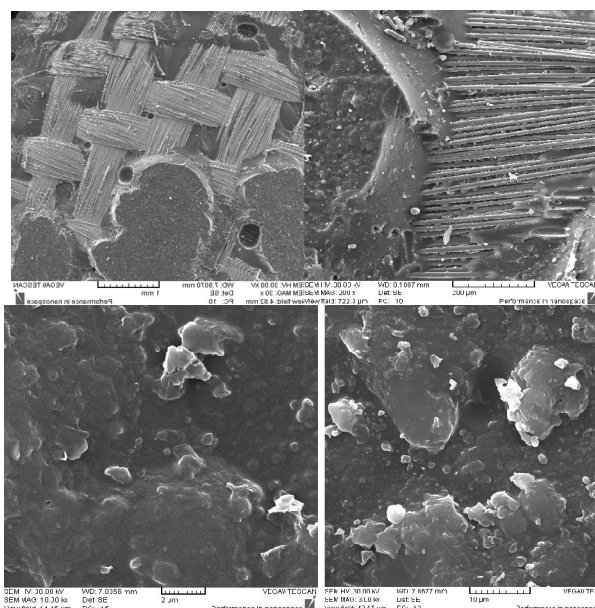


Fig. 26 SEM image of the T1-0-0.5 specimen in the range of 1 mm and 200, 10 and 2 micrometers

شکل ۲۶ عکس SEM مربوط به نمونه T1-0-0.5 محدوده ۱ میلی‌متر و ۲۰۰، ۱۰ و ۲ میکرومتر

همان‌گونه که از شکل ۲۸ مشخص است باتوجه به درصد بهینه نانوگرافن، پیوند قوی بین رزین لایه فوقانی کامپوزیت و چسب برقرار شده و جدایش از محل چسبیدن رزین و پارچه بازالت صورت گرفته است. همچنین آنچه که مشخص است، افزایش طول پایه قطعه L-شکل آلومینیومی به علت افزایش سطح تماس چسب با هر دو جزء اتصال موجب بهبود خواص

۵- مراجع

- [1] F S.Feih, , & H. R. Shercliff, "Adhesive and composite failure prediction of single-L joint structures under tensile loading, " *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 25(1), 47-59, 2005.
- [2] H. Ramezani, M. Sharif, A. Khoram Shokooh, "Graphene-based polymer nanocomposites, " *Resources Scientific-Extension Quarterly*, Fourth Year, No. 4, 107-86, 2012.(in persian)
- [3] J. T. S. Xará, , R. D. S. G. Campilho, "Strength estimation of hybrid single-L bonded joints by the eXtended Finite Element Method," *Composite Structures*, 17, 1-27, 2017.
- [4] S. N. Hosseini Abbandak, S. M. Siadati, R. Islami Farsani, "Effect of functionalized graphene nanosheets on the flexural behavior of epoxy composite - basalt fibers," *Journal of Composite Science and Technology*, 2018.(in persian)
- [5] N. R. E. Domingues, J. C. Trojan, R. D. S. G. Campilho, "Strength and failure modes of single-L adhesive joints between aluminium and composites," *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, 29(1), pp e114-e118, (2017).
- [6] I. A. Akpinar, K. Gültekin, S. Akpinar, "Experimental analysis on the single-lap joints bonded by a nanocomposite adhesives which obtained by adding nanostructures," *Composites Part B*, 110, 420-428, (2017).
- [7] I. A. Akpinar, K. Gültekin, S. Akpinar, "Research on strength of nanocomposite adhesively bonded composite Joints," *Composites Part B*, 126, 143-152 (2017).
- [8] M. D. Banea, M. Rosioara, R. J. C. Carbas, "Multi-material adhesive joints for automotive industry, " *Composites Part B*, 151, 71-77, 2018.
- [9] N. R. E. Domingues, J. C. Trojan, R. D. S. G. Campilho, R. J. C. Carbas, M. D. Banea, L. F. M. da Silva, "Strength and failure modes of single-L adhesive joints between aluminium and composites," *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, 29(1), e114-e118, 2017.
- [10] Y. Liu, M. Li, Q. Li, X. Lu, X. Zhu, "Parameter optimization of L-joint of composite sandwich structure based on BP-GA algorithm," *Composite Structures*, 289, 115508, 2022.
- [11] AZO MATERIALS , www.azom.com
- [12] Instructions for making composites of thermoelasticity laboratory of Tehran Polytechnic University.
- [13] H. Wu, J. Xiao, S. Xing, "Numerical and experimental investigation into failure of T700/bismaleimide composite T-joints under tensile loading," *Composite Structures*, 22(15). 1-21, (2015).

نانوگرافن در چندلایه و ۰٪ نانو گرافن در چسب با تحمل بیشینه نیروی کشش عمودی ۰/۲۰۴ کیلونیوتن پایین تر از دو نمونه‌ای قبلی قرار می‌گیرد.

از نتایج بالا می‌توان چنان استنباط کرد که:

- افزودن نانوگرافن بدون عامل (الیاف اصلاح سطحی نشده) به دلیل عدم توانایی ذرات نانو موجود در رزین فاز زمینه در پیوند مناسب با الیاف پارچه بازالت، موجب کاهش استحکام چندلایه کامپوزیتی و در نتیجه آن کاهش استحکام کششی قطعه اتصال گردیده است. این بدان معناست که در اتصالات با درصد بالای نانو در چندلایه و درصد کم نانو در چسب غالباً جدایش از ناحیه الیاف پارچه صورت گرفته است که با عکس‌های معمولی و عکس‌های مقیاس نانو قابل انطباق است.

- افزودن نانوگرافن به چسب ساختاری در مورد اتصالات با درصد کم نانو (۰٪ و ۰/۱٪ وزنی) در چندلایه و تا ۰/۳٪ وزنی نانوگرافن در چسب، تأثیر مثبت در افزایش استحکام کششی اتصال دارد. پس از این درصد خواص افت می‌کند و مقاومت قطعه اتصال کاهش می‌یابد. این بدین معناست که افزودن تنها ۰/۳٪ وزنی نانوگرافن در رزین برای تهیه چسب بهینه بوده است. افزایش بیش از ۰/۳٪ نانوگرافن در چسب موجب کلوخه شدن^۱ صفحات نانوگرافن و عدم تشکیل پیوند مناسب ذرات نانو موجود در چسب و ریزساختارها در صفحه آلومینیومی خواهد شد.

- افزایش جابه‌جایی عمودی (خیز عمودی) چندلایه کامپوزیتی و تغییر شکل قطعه آلومینیومی موجب افزایش انرژی شکست در اتصال می‌گردد. بدین معنا که استفاده از چندلایه‌های منعطف‌تر اما با استحکام خمشی بالاتر و همچنین کاهش ضخامت قطعه آلومینیومی باعث افزایش انرژی شکست خواهد شد.

- به نظر می‌رسد افزایش مقاومت کششی اتصال، در نتیجه افزودن نانوگرافن به چسب (در نمونه‌های دارای چندلایه‌های با درصد‌های پایین نانو) به علت ایجاد پیوند مناسب ذرات نانوگرافن موجود در چسب با ریزساختارهای صفحه آلومینیومی زیر شده می‌باشد.

- در مورد اتصال با ترکیب درصد بهینه نانوگرافن در چندلایه و چسب، افزایش طول پایه قطعه L-شکل آلومینیومی (طول ناحیه هم‌پوشانی) به میزان ۵ میلی‌متر موجب افزایش ۱۴۸ درصدی بیشینه نیروی کشش و افزایش این متغیر به میزان ۱۰ میلی‌متر افزایش ۲۰۰ درصدی تحمل نیروی کشش عمودی را توسط اتصال به همراه دارد.

¹ Agglomerated