

فرآیندهای نوین در مهندسی مواد

ma.iaumajlesi.ac.ir

بررسی اثر نانوگرافن کاهش یافته بر روی مقاومت شکست چسب در شرایط بارگذاری مود مرکب به وسیله

مدل ناحیه چسبان

یدالله بلغند^{۱*}، تاجبخش نوید چاخرلو^۲، حسن بیگلری^۳

مقاله پژوهشی

۱- مربی، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ارس، ایران.

۲- استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه تبریز، ایران.

۳- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه تبریز، ایران.

* yadollah_bolghand@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۹	اثر افزودن نانو گرافن کاهش یافته بر استحکام شکست چسب آرالدیت ۲۰۱۵ مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا مشخصات مکانیکی نمونه‌های حجمی چسب و گرافن با درصد های ۰، ۰/۵، ۰/۲۵ و ۱ توسط آزمون کشش با دستگاه Zwick به دست آمد. با استفاده از آزمون‌های DCB و ENF اثری شکست چسب و گرافن در درصد های ۰، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ محاسبه گردید. نمونه‌های آزمایشی از جنس PMMA ساخته شد و سپس به هم چسبانده شدند. حالات بارگذاری مختلف با استفاده از قید و بست آرکان اصلاح شده مورد آزمایش قرار گرفت. اثر افزودن نانو گرافن کاهش یافته به ترکیب چسب با استفاده از چهار نسبت وزنی مختلف گرافن شامل ۰، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد بررسی شد. نمونه‌های آزمایشی آزمون عملی گردید، نتایج به دست آمده از آزمایش‌های عملی نشان داد که استفاده از گرافن کاهش یافته ۰/۵٪ وزنی، در نیروهای بالاتری گسیختگی رخ داد. بیشترین نیروی گسیختگی، بین نمونه‌های با همان مقدار گرافن ۰/۵٪ وزنی، برای شرایط بارگذاری مود II به دست آمد. نتایج تجربی با نتایج مدل المان محدود در نرم افزار Abaqus مقایسه شد. بررسی لایه شکست چسب نشان می‌دهد که وجود نانوگرافن کاهش یافته در چسب تا حدودی مانع رشد ترک شده و این پدیده باعث افزایش مقاومت گسیختگی چسب در تمام مودهای شکست گردیده است.

Investigating the Effect of Reduced Nano Graphene on Adhesive Fracture Resistance under Mixed Mode Loading Conditions Using the Adhesive Zone Mode

Yadollah Bolghand^{1*}, Tajbakhsh Navid Chakherlou², Hassan Biglari³

1- Instructor, Department of Mechanic Engineering, Aras Branch, Islamic Azad University, Iran.

2- Full Professor, Department of Mechanics Engineering, University of Tabriz, Iran.

3- Associate professor, Department of Mechanics Engineering, University of Tabriz, Iran.

* yadollah_bolghand@yahoo.com

Article Information

Original Research Paper

Doi: 10.71753/ma.2024.1089988

Keywords:

Mix Mode Fracture

Cohesive Zone Model

Nano Graphene

Fracture Strength.

Abstract

The effect of adding graphene was studied on the fracture strength of the Araldite adhesive. First, the mechanical characteristics of adhesive and graphene with percentages of 0, 0.25, 0.5 and 1 were obtained by bulk specimens. Using DCB and ENF tests, the fracture energy of adhesive and graphene was calculated in percentages of 0, 0.25, 0.5 and 1. Experimental specimens were made of PMMA and then were bonded using a thin adhesive layer. Different loading modes were created by using the modified Arcan fixtures. Effect of adding graphene in the adhesive layer was studied by using four different weight ratio of graphene including 0, 0.25, 0.5 and 1 percent. The results achieved suggested the use of 0.5% wt. of graphene for achieving the highest fracture force for the experimental specimens. The highest fracture force, between the specimens with the same amount of graphene, was obtained for pure mode II loading condition. Examining the fracture behavior of the adhesive layer showed that by adding reduced Nano graphene to the adhesive, the fracture resistance of the adhesive increases in all failure modes due to the presence of reduced Nano graphene and preventing it from propagating cracks.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Yadollah Bolghand, Tajbakhsh Navid Chakherlou, Hassan Biglari, Investigating the Effect of Reduced Nano Graphene on Adhesive Fracture Resistance under Mixed Mode Loading Conditions Using the Adhesive Zone Mode, New Process in Material Engineering, 2024, 18(3), 17-28.

۱- مقدمه

در حال حاضر افزایش استحکام گسیختگی اتصالات و کاهش وزن آنها یکی از پارامترهای مهم در مرحله طراحی یک سازه مکانیکی از قبیل سازه های هوایی، صنعت ماشین و... است [۱].

اتصالات چسبی به عنوان یک نوع خاص از تکنیک های اتصال به طور گسترده ای برای اتصال انواع مختلف مواد استفاده شده است [۲]. اتصالات چسبی دارای ویژگی های بسیار بهتری از جمله کار ساده تر، استحکام بالاتر، عمر خستگی بیشتر و مقاومت در برابر خوردگی بهتر در مقایسه با اتصال پیچی، اتصال پرچ شده و اتصال جوشی هستند [۳]. با این حال، اتصالات چسب ممکن است در طول سرویس خود با شرایط بارگذاری متفاوتی مانند بارگذاری استاتیکی، خستگی و ضربه مواجه شوند [۴]. برای تغییر مکانیسم انتشار ترک در چسب و بهبود رفتار شکست چسب ها، نانوذرات مختلفی با هندسه و مواد مختلف به چسب ها اضافه شده است [۵]. مطالعات زیادی در مورد اثرات افزودن نانوذرات در چسب ها انجام شده است. زمانی و همکاران رفتار خمشی چهار نقطه ای اتصالات چسب تک لایه را بررسی کردند [۶]. جوجی بابو و همکاران^۱ [۷] کوپلیمرهای گرافن و سه بلوک را برای افزایش استحکام برشی لایه اتصالات چسب اضافه کردند. افزودن نانوذرات به چسب اپوکسی منجر به افزایش ۱۲۹٪ مقاومت برشی لایه در مقایسه با اپوکسی اصلاح نشده شد. گوپتا و شوکلا^۲ [۸] استحکام برشی اتصالات تک لایه آلایژ آلومینیوم را که با دو نانوذره مختلف از جمله نانوالومینای کروی و نانوالومینای میله ای شکل متصل شده و تقویت شده اند، مورد مطالعه قرار دادند. استحکام برشی استاتیکی و دینامیکی اتصالات حاوی نانوالومینای کروی در مقایسه با چسب خالص و نانوچسب های حاوی نانوالومینای میله ای بیشتر بود. راثو و همکاران^۳ [۹] چقرمگی شکست حالت I چسبده های کامپوزیت چسبده را با استفاده از نانولوله کربنی و گرافن افزایش داد. نتایج آزمایش نشان داد که هیبرید ۰/۷۵٪ وزنی MWCNTs/GNPs (۱:۴) در مقایسه با چسب خالص بالاترین اثر سخت کنندگی را با ۲۸۶٪ بهبود

داشت. مدل سازی ناحیه چسبان به طور گسترده به عنوان یک روش قدرتمند برای تجزیه و تحلیل شروع و انتشار لایه لایه در اتصالات چسبده تحت شرایط بارگذاری مختلف از جمله بارهای ضربه ای کششی [۱۰]. به هر حال اتصالات چسبی دارای معایبی نیز از قبیل عیوب ساختاری حاصل از سطح، هندسه، محیط و پارامترهای تولیدی که بر روی استحکام گسیختگی تأثیر دارند و مطالعات زیادی برای تکنیک بهبود هندسه اتصال جهت کاهش پیک تنش بر لایه های چسب محل اتصال انجام یافته است [۱۶-۱۱]. توسط داسیلوا و همکاران^۴ [۱۷] روش های زیادی بر اساس بهبود پارامترهای هندسی جهت افزایش استحکام گسیختگی چسب در اتصال انجام یافته است. اضافه کردن نانو مواد به چسب، روش جدید برای افزایش استحکام گسیختگی چسب در یک دهه گذشته است [۱۸]. گیکاس و همکاران^۵ [۱۹] اثر افزودن کسر وزن کمی از نانولوله های کربن چند جداره در یک چسب پلیمری را بررسی کرده اند. آنها به این نتیجه رسیدند که با افزودن نانولوله های کربنی به عنوان مواد افزودنی در چسب معمولی هوافضا، رفتار چسبندگی به طور قابل توجهی افزایش می یابد [۲۰]. نانوگرافن به عنوان یک نانو مواد دوبعدی که دارای استحکام بالا همانند نانولوله های کربنی و کم هزینه همانند نانو رس معرفی شده است [۲۱]. گرافن، ساختاری دو بعدی و تک لایه از اتم های کربن است که چینش اتم ها در کنار هم ساختاری لانه ی زنبوری به وجود آورده است که از آن جمله می توان به رسانش، هدایت الکتریکی بالا و تحرک بسیار زیاد الکترون در دمای اتاق، هدایت حرارتی استثنائی و خواص مکانیکی فوق العاده ی آن (مدول یانگ ۱TPa و مقاومت نهایی ۱۳۰ گیگاپاسکال) و بسیاری از خواص دیگر که در ادبیات فن گزارش شده است اشاره کرد [۲۲]. گرافن اکساید کاهش یافته نانوماده دو بعدی کربنی است که به صورت تک لایه از گرافن اکساید حاصل می گردد و با ساختار شش ضلعی و کریستالی است که گروه های اکسیژن بر روی آن قرار دارد. این ماده به دلیل وجود گروه های فعال سطحی زیاد و به هم ریختن ساختار اصلی گرافنی، دارای رسانایی الکتریکی کم اما قابلیت عامل دار شدن با انواع

جدول ۱- مشخصات چسب آرالدیت ۲۰۱۵ طبق کاتالوگ سازنده.

ویژگی (واحد)	مقدار
مدول الاستیک (گیگاپاسکال)	۱/۸۵
ضریب پواسون	۰/۳۳
استحکام کششی (مگاپاسکال)	۲۲
مدول برشی (گیگاپاسکال)	۰/۵۶
استحکام برشی (مگاپاسکال)	۱۸

۲-۲- آماده سازی چسب با گرافن

چسب اپوکسی آرالدیت ۲۰۱۵ از نوع چسب های دو جزئی شامل رزین و هاردنر می باشد که به نسبت ۵۰ درصد وزنی مخلوط و در کوره بازیخت می شود. جهت به دست آوردن خواص مکانیکی این چسب علاوه بر کاتالوگ چسب، ابتدا مطابق استاندارد ASTM D638 نمونه های حجمی چسب با گرافن (۰/۲۵، ۰/۵، ۱ درصد وزنی چسب) و بدون گرافن آماده شد. برای بررسی نمونه های حجمی شامل تأثیر نانوغرافن بر بهبود خواص مکانیکی چسب (مدول یانگ و استحکام کششی) از هر درصد وزنی مختلف (۰/۲۵ درصد، ۰/۵ درصد و ۱ درصد) ۳ نمونه با نانو (مجموع ۹ نمونه حجمی) و ۳ نمونه حجمی بدون نانو برای هر آزمایش کشش ساخته شد. برای آماده سازی چسب با درصد های مختلف گرافن (۰/۲۵، ۰/۵، ۱ درصد)، ابتدا گرافن را بر اساس وزن چسب مصرفی با ترازویی با دقت ۰/۰۰۱ گرم وزن کرده و طبق شکل (۲) سپس در ظرف مخصوص طراحی و ساخته شده از جنس پلی آمید و ساچمه های تنگستن کارباید (از ظرف و ساچمه فولادی به دلیل انتقال ناخالصی استفاده نگردید).



شکل (۲): ظرف مخصوص طراحی و ساخته شده از جنس پلی آمید جهت اختلاط رزین با گرافن.

مولکول های شیمیایی و زیستی را به میزان بالایی دارد و این امکان را به ما می دهد که با انواع پیوندهای الکترواستاتیک و کووالانسی صفحات را به پلیمرها یا مواد دیگری، پیوند بزیم [۲۳]. گواداگو و همکاران^۶ [۲۴] عملکرد مکانیکی و مورفولوژی چسب های ساختمانی که با افزودن نانوغرافن بهبود یافت، بررسی کردند. دآسیلوا-نتو و همکاران^۷ [۲۵] اثر افزودن گرافن بر چسب ویسکوزیته پایین مورد مطالعه و نشان داده اند که اتصالات با چسب اصلاح شده نشان می دهد دارای استحکام برشی لبه ای بالاتر است. وجه اشتراک این مقاله با تحقیقات مشابه، افزودن یک نانوماده به چسب جهت افزایش خواص چسب بر اساس صرفاً بهبود خواص فیزیکی نانو ماده است و وجه تمایز و نوآوری این پژوهش با کارهای قبلی، علاوه بر بهبود خواص فیزیکی چسب، ایجاد پیوندهای شیمیایی الکترواستاتیک و کووالانسی صفحات نانو گرافن کاهش یافته با ترکیب شیمیایی چسب بر پایه اپوکسی است که بر روی مقاومت گسیختگی چسب در اتصال لب به لب در شرایط بارگذاری مود مرکب بررسی گردید.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- مواد

طبق فلو چارت شکل (۱) مراحل پژوهش انجام یافت و جنس نمونه مورد استفاده در آزمون های کشش از پلی متیل متا اکریلیت بوده و چسب دو جزئی آرالدیت ۲۰۱۵ یک چسب دو جزئی نرم با مشخصات جدول (۱) است که برای اتصالات فلزات، پلاستیک ها و اکثر سطوح دیگری که ممکن است در معرض رطوبت قرار گیرند، مناسب می باشد. این چسب از نظر استحکام، قدرت چسبندگی، دوام و مقاومت بسیار قوی می باشد و زمان پخت بالایی دارد.



شکل (۱): فلو چارت مراحل آماده سازی نمونه و انجام آزمون.

۳-۲- آزمایش‌های تجربی

نمونه‌های حجمی ۱ تهیه شده از چسب جهت انجام آزمایش کشش در دستگاه کشش Zwick با لودسل دارای دقت ۰/۰۱ نیوتون در شرایط محیطی استاندارد آزمایشگاه مقاومت مصالح دانشکده مکانیک دانشگاه تبریز قرار گرفت و جهت تأثیر گرافن در درصد‌های وزنی مختلف بر خواص مکانیکی چسب، با سرعت حرکت ۱mm/min پیشانی فک دستگاه مطابق استاندارد تحت آزمون کشش به صورت عملی مطابق شکل (۶) قرار گرفت.



شکل (۶): آزمایش کشش نمونه‌های حجمی چسب.

۴-۲- بررسی سطح شکست نمونه‌ها با SEM و TEM

ابتدا از سطوح شکست نمونه‌های حجمی چسب با گرافن ۰/۵ درصد و بدون گرافن با دستگاه میکروسکوپ الکترونیک روبشی (SEM) تصاویری در ابعاد مختلف و مناسب تهیه گردید و سپس جهت مشخص شدن مورفولوژی چسب خالص و چسب با ۰/۵ درصد گرافن، ابتدا به صورت پودر به وسیله دستگاه ارتعاش صوتی در استون پخش یکنواخت گردیده و سپس توسط دستگاه TEM با مارک LEO 906 و قدرت ۱۲۰ کیلووات مورفولوژی نمونه‌ها در دانشکده مکانیک دانشگاه تبریز مورد بررسی قرار گرفت.

۵-۲- آنالیز عددی المان محدود و آزمایش‌های

تجربی جهت مدل سازی منطقه چسبان (CZM)

مدل منطقه چسبان بیانگر هیچ ماده فیزیکی‌ای نیست، بلکه نیروهای چسبندگی را نشان می‌دهد که وقتی عناصر ماده از هم جدا می‌شوند، رخ می‌دهد. هنگامی که سطوح (شناخته شده به عنوان سطوح چسبیده) جدا می‌شوند، کشش تا رسیدن به مقدار حداکثر افزایش یافته و پس از آن به صفر می‌رسد که در نهایت منجر به جدایی کامل

سپس طبق شکل (۳) در دستگاه بال میل چسب با رزین اپوکسی به مدت ۳ ساعت با ۳۰۰ دور در دقیقه به خوبی مخلوط گردید.



شکل (۳): دستگاه بال میل جهت اختلاط رزین با گرافن.

سپس پس از تهیه مخلوط همگن رزین با گرافن با درصد مشخص، به مخلوط حاصل هاردنر اضافه گردید و در دستگاه ارتعاش صوتی در فرکانس ۴۸۰ هرتز به مدت ۱۰ دقیقه جهت مخلوط همگن هاردنر به مخلوط رزین- گرافن طبق شکل (۴) در دانشکده مکانیک دانشگاه تبریز ارتعاش یافت.



شکل (۴): ارتعاش صوتی مخلوط رزین-هاردنر- نانوگرافن.

چسب با نانوگرافن با درصد‌های ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و بدون گرافن در داخل قالب نمونه‌های حجمی ریخته‌گری شده است و سپس نمونه‌ها جهت پخت به مدت ۳۵ دقیقه در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد مطابق با شکل ۵ در کوره باز پخت حرارت داده شد.



شکل (۵): پخت نمونه چسب در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد.

شکل (۸): فشار یکنواخت به نمونه‌ها برای ایجاد ضخامت ۰/۲ میلی‌متری.

برای به دست آوردن پارامترهای منطقه چسبان از روش CBBM استفاده گردید. دمورا و پینتو^۸ با توسعه یک طرح ساده توانست پارامترهای CZM را در اتصالات چسبی در مودهای I و II به دست آورد [۲۶]. تکنیک پردازش تصویر برای اندازه‌گیری طول ترک و فاصله باز شونده‌گی ترک استفاده گردید. برای این منظور نقاط سیاه با فاصله‌های مشخص روی هر یک از نمونه‌ها طبق شکل (۹) جاگذاری شد.



شکل (۹): نقاط سیاه برای اندازه‌گیری فاصله بازشونده‌گی ترک

۲-۸- نحوه تعیین مقدار انرژی آزاد شده از نتایج آزمون‌های DCB و ENF

قبل از مدل‌سازی اجزای محدود، لازم بود پارامترهای چسبیده برای مواد چسب آراالدیت ۲۰۱۵ مشخص شود. پارامترهای نرخ آزادسازی انرژی کرنش برای چسب خالص و نانو تقویت شده به ترتیب با انجام آزمایش‌های DCB و ENF تعیین شد. مقدار نرخ انرژی رها شده از منحنی‌های بار-جابجایی برای درصد‌های مختلف گرافن از رابطه (۱) به دست می‌آید [۲۶]:

$$G_{IC} = \frac{12P^2}{E_f B^2 h} \left(\frac{a_e^2}{h^2} + \frac{1+\nu}{5} \right) \quad (1)$$

در رابطه بالا P نیروی اعمال شده به نمونه، B پهنای نمونه، h ارتفاع نمونه، ν ضریب پواسون، مدول خمشی نمونه که از رابطه‌های (۲) و (۳) به دست می‌آید [۲۶]:

سطوح می‌شود. تغییر در کشش و رابطه آن با جابه‌جایی بر روی یک منحنی ترسیم می‌شود و منحنی کشش-جابجایی نامیده می‌شود. مساحت زیر این منحنی برابر با انرژی موردنیاز برای جدایش است. در این تحقیق لایه چسبی با استفاده از المان‌های مدل منطقه چسبان (CZM)، با استفاده از قانون کشش و جدایش ۳ دو خطی ۴ یا مثلثی شکل مدل شد. برای شبیه‌سازی با استفاده از CZM، مقدار انرژی شکست و کشش در مودهای I و II تعیین گردید. مقدار انرژی شکست بحرانی G_{IIC} و G_{IIC} از آزمون‌ها و نمونه‌های آزمون DCB در مد اول و ENF در مد دوم به دست آمد؛ و سپس مدل‌سازی سه بعدی انجام یافت.

۲-۶- آماده‌سازی نمونه‌های آزمون DCB و ENF

عملیات آماده‌سازی نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM D1780 انجام یافت. مخلوط چسب-گرافن به سطح نمونه‌ها مطابق شکل (۷) اعمال گردید.



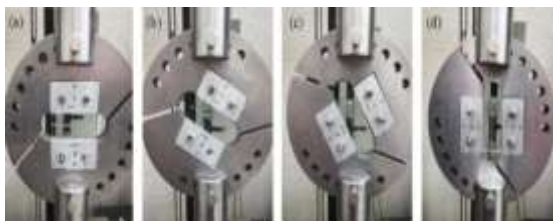
شکل (۷): اعمال مخلوط چسب-گرافن به سطح نمونه‌ها.

۲-۷- آماده‌سازی و انجام آزمون DCB و ENF

دو قطعه نمونه به وسیله قید و بست مخصوصی بر روی هم مونتاژ گردیدند و مطابق شکل (۸) یک فشار یکنواخت به نمونه‌ها برای ایجاد ضخامت ۰/۲ میلی‌متری ضخامت ثابت و یکنواخت، اعمال گردید. سپس چسب اضافه توسط کاتر برش خورده و عملیات پخت نمونه در کوره به مدت ۳۵ دقیقه در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد انجام یافت.



برای تثبیت صفحات PMMA به قید و بست آرکان پیچ شدند.



شکل (۱۰): پیکربندی‌های فیکسچر آرکان، (الف) مد اصلی I، (ب) مد مرکب (۳۰ درجه)، (ج) مد مرکب (۶۰ درجه)، (د) مد اصلی II.

۱۰-۲- مدل سازی سه بعدی شکست با استفاده از

مدل المان محدود

یک مدل سه بعدی کامل در شبیه سازی FE برای اندازه گیری بار شکست نمونه های PMMA متصل شده مطابق با شکل (۱۱) اجرا شد. المان های ناحیه چسبان از جمله چهار وجهی درجه دوم C3D10 و شش وجهی خطی C3D8R به ترتیب برای مش بندی آرکان و نمونه با تعداد ۳۶۷۸۵۲ المان برای همگرایی در نرم افزار Abaqus استفاده شده است. برای مدل سازی لایه چسب از تکنیک استفاده از سطح چسبان با ضخامت صفر با توسعه یک مدل المان محدود شبیه سازی شد. یک قانون جداسازی کشش دوخطی برای شبیه سازی پاسخ های حالت اصلی I، مد مرکب I/II و حالت اصلی II در سطوح چسبنده استفاده شد. شروع آسیب با استفاده از معیار حداکثر تنش اسمی در نظر گرفته شده است. در مرحله بعد، انتشار ترک با استفاده از معیار قانون توان درجه دوم مدل سازی شد. پارامترهایی از جمله کشش ترک خوردگی و انرژی شکست برای شروع آسیب و انتشار آسیب در نظر گرفته شد. خواص مواد الاستیک صفحات PMMA، $E = 2.65 \text{ GPa}$ و $\nu = 0.35$ در نظر گرفته شد. رفتار ارتجاعی نیز برای مواد فولادی قید و بست آرکان در نظر گرفته شد و پارامترهای مواد برابر و برای قید و بست آرکان اجرا شدند. برای تثبیت چرخش قید و بست آرکان، تمام DOF ها برای سوراخ های پایین فیکسچر آرکان ثابت شدند و جابجایی عرضی فقط برای سوراخ های بالایی قید و بست آرکان اعمال شد.

$$E_f = \frac{8(a_0 + \Delta)}{C_0 B h} \left(\frac{(a_0 + \Delta)^2}{h^2} + \frac{3(1 + \nu)}{5} \right) \quad (2)$$

در رابطه (۳)، E مدول یانگ، a_0 طول ترک پیش فرض، a طول ترک واقعی، a_e طول ترک معادل است که مقدار آن به راحتی از رابطه (۴) به دست می آید [۲۶]:

$$\frac{8a_e^3}{E_f B h^3} + \frac{24(1 + \nu)a_0}{5E_f B h} - \frac{8a}{E B h} \left(\frac{a^2}{h^2} + \frac{3(1 + \nu)}{5} \right) = 0 \quad (4)$$

$$a_e = a + \Delta a_{FPZ} = \left[\frac{C_{corr}}{C_{corr}} a_0^3 + \frac{2}{3} \left(\frac{C_{corr}}{C_{corr}} - 1 \right) L^3 \right]^{\frac{1}{3}}$$

مراحل شبیه به مراحل بالا برای به دست آوردن انرژی بحرانی رها شده در مود II با استفاده از آزمون های ENF به دست آمد. نمودارهای P- δ با استفاده از رابطه (۵) به دست آمد [۲۶].

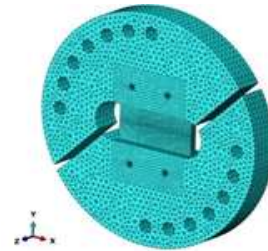
$$G_{IIC} = \frac{9p^2 \dot{a}_e^2}{16B^3 h^3 E_f'} \quad (5)$$

۹-۲- قید و بست آرکان اصلاح شده

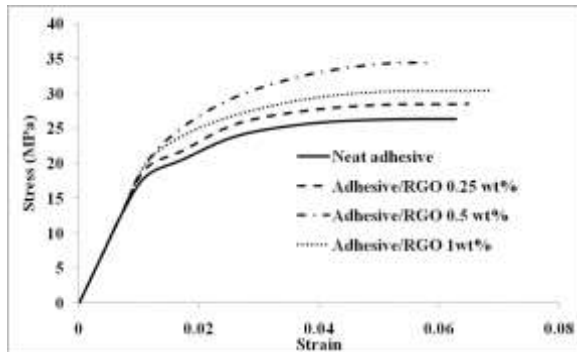
آزمایش های شکست برای حالت های مختلف از جمله مد I، مد II و بارگذاری مد مرکب با استفاده از یک قید و بست آرکان اصلاح شده انجام شد. شماتیک قید و بست آرکان در شکل (۱۰) نشان داده شده است. قید و بست آرکان از فولاد با استحکام بالا CK45 با ضخامت کامل ۲۰ میلی متر ساخته شده است. سوراخ های مختلف با فواصل ۱۵ درجه در هر قسمت از قید و بست آرکان ایجاد شد تا شرایط بارگذاری متفاوتی را برای حالت های مختلف شکست فراهم کند. یک حفره مستطیلی با عرض ۶۰ میلی متر و ارتفاع ۹۰ میلی متر در وسط قید و بست آرکان برای قرار دادن نمونه های آزمایش شکستگی بریده شد. عمق حفره ۱۲/۵ میلی متر بود. نمونه های شکست از مواد PMMA در حفره قرار داده شد و دو صفحه فولادی با ضخامت ۷/۵ میلی متر در قسمت بیرونی PMMA



شکل (۱۲): آزمون کشش نمونه‌های حجمی.



شکل (۱۱): نمای ایزومتریک عناصر مدل اجزای محدود.



شکل (۱۳): نمودار تنش کرنش.

جدول (۲): نام گذاری نمونه‌های حجمی به همراه متغیر و ثوابت.

نام گذاری نمونه‌های حجمی	میزان سرعت ثابت آزمون کشش	تنش نهایی (Mpa)	مدول یادگ (Mpa)
خالص	۱ mm/min	۲۴/۸	۱۱۳۶
۰/۲۵	۱ mm/min	۲۶/۷	۱۲۰۴
۰/۵	۱ mm/min	۳۴/۶	۱۴۹۶
۱	۱ mm/min	۳۰/۲	۱۲۹۸

۳-۲- سطوح شکسته پس از آزمایش‌های کششی

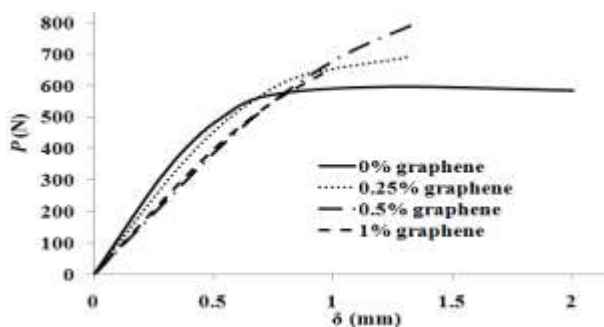
نیروهای کششی بر روی نمونه‌های آزمایشی در شرایط استاندارد محیطی در آزمایشگاه مقاومت مصالح دانشکده مکانیک دانشگاه تبریز تا زمانی که جدایی کامل بین صفحات PMMA رخ بدهد اعمال شد. برای مقایسه بهتر بین سطوح شکسته چسب خالص و تقویت شده با نانو، برخی از تصاویر SEM پس از آزمایش‌های عملی مطابق شکل (۱۴) گرفته شد. نتایج بررسی تصاویر SEM نشان داد که مورفولوژی فیلم چسب تقویت شده با گرافن بسیار متفاوت از چسب خالص بود. این به دلیل وجود نانو گرافن متعدد در ترکیب چسب‌های تقویت شده با نانو گرافن بود. علاوه بر تصاویر SEM، برخی از تصاویر TEM برای مطالعه

۳- نتایج و بحث

۳-۱- خواص مکانیکی نمونه‌های حجمی چسب

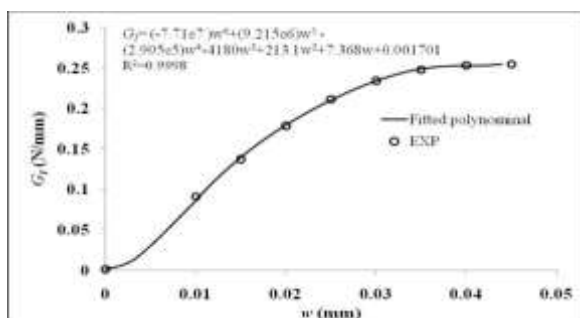
نمونه حجمی تهیه شده از چسب جهت انجام آزمایش کشش در دستگاه کشش قرار داده شد و با سرعت ۱ mm/min مطابق استاندارد و تحت آزمون کشش طبق شکل (۱۲) قرار گرفت. شکل (۱۳) نمودار تنش کرنش چسب با گرافن ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ درصد وزنی چسب و بدون گرافن حاصل از آزمون کشش را نشان می‌دهد. خواص مکانیکی مهم از جمله مدول یانگ، تنش تسلیم و استحکام نهایی چسب با گرافن ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ درصد وزنی چسب و بدون گرافن که از آزمایش کشش طبق جدول (۲) استخراج گردید، نتایج نشان داد که نمونه‌ها با ۰/۵ درصد وزنی گرافن بیشترین استحکام کششی را از خود نشان می‌دهند که حدود ۳۰ درصد از استحکام کششی چسب خالص بیشتر است و این امر به علت پیوندهای الکترواستاتیک و کووالانسی صفحات نانو گرافن کاهش یافته با ترکیب چسب است که سبب تقویت پیوند مابین ترکیبات چسب گردیده است و نتایج شکل (۱۳) بیانگر این است با افزایش درصد وزنی گرافن از ۰/۵ درصد به ۱ درصد، استحکام نهایی کشش ۱۳ درصد کاهش می‌یابد و این پدیده می‌تواند ناشی از تراکم ذره‌های نانو گرافن در مابین پیوندهای چسب با نانو گرافن باشد که نتوانسته‌اند با ترکیبات چسب پیوند ایجاد نمایند و همانند یک حفره، نابجایی و ناخالصی در داخل چسب باعث ایجاد تمرکز تنش شده است.

مراحل شبیه به مراحل بالا برای به دست آوردن انرژی بحرانی رها شده در مود II با استفاده از آزمون‌های ENF به دست آمد و نمونه‌های ENF آزمون عملی گردیدند و نتایج داده‌های آزمایش‌های عملی را به صورت منحنی‌ها در شکل (۱۷) درج گردیده است.



شکل (۱۷): منحنی‌های نتایج آزمون نمونه‌های ENF.

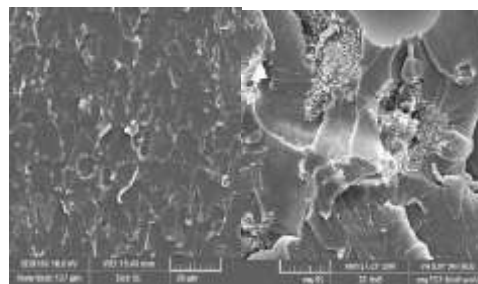
شکل (۱۸) منحنی G_I - w را که از نتایج آزمایش‌های نمونه‌های DCB به دست آمده نمایش می‌گذارد. منحنی σ - w که مربوط به قانون منطقه چسبان است می‌توان با استفاده از معادله ارائه شده در شکل به دست آورد.



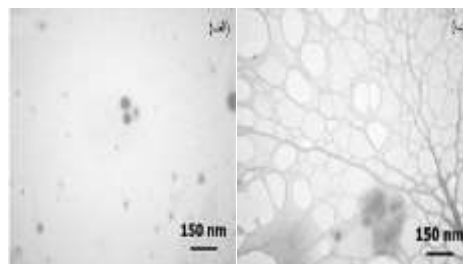
شکل (۱۸): منحنی G_I - w را که از آزمایش‌های نمونه‌های DCB با برازش پلی نامینال ۶ درجه.

شکل (۱۹) مقدار شکست کششی ۵ که با استفاده از رگرسیون خطی با روند خط بر روی داده‌های موجود نشان می‌دهد.

مورفولوژی چسب خالص و نانو تقویت شده طبق شکل (۱۵) گرفته شد. نتیجه مقایسه بیانگر این است که وجود ذرات گرافن مانعی برای انتشار ترک در مواد چسبنده ایجاد کرده است و در نتیجه استحکام گسیختگی لایه چسب افزایش یافته است.



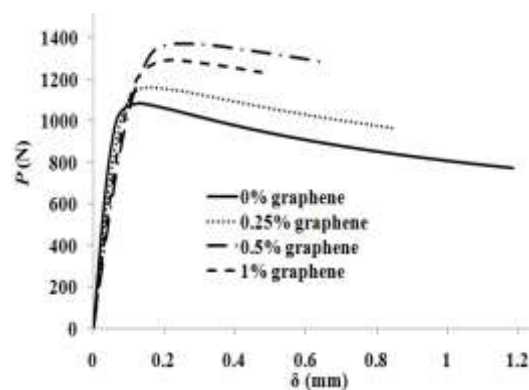
شکل (۱۴): تصاویر SEM: الف) چسب خالص و ب) چسب با نانو.



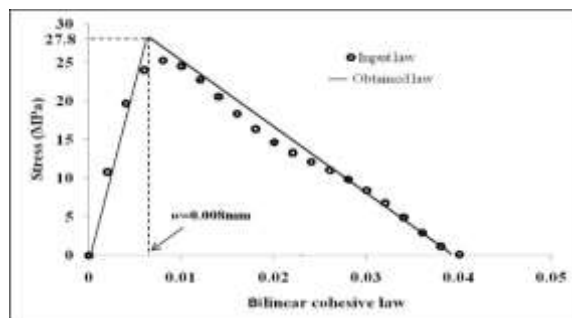
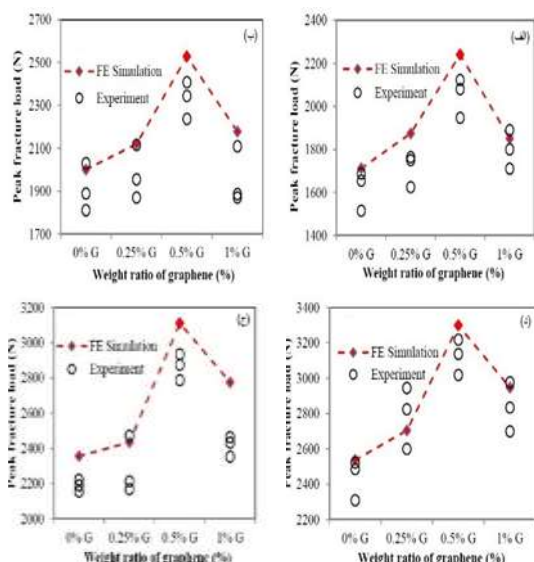
شکل (۱۵): تصاویر TEM از: الف) چسب خالص و ب) چسب با نانو.

۳-۳ پارامترهای منطقه چسبنده با نتایج آزمون‌های DCB و ENF

از نمونه‌های DCB و ENF جهت برآورد مقدار نرخ انرژی کرنشی در مد اول، دوم استفاده گردید، نمونه‌های DCB آزمون عملی گردیدند و نتایج داده‌های آزمایش‌های عملی را به صورت منحنی‌ها در شکل (۱۶) درج گردیده است.



شکل (۱۶): منحنی‌های نتایج آزمون نمونه‌های DCB

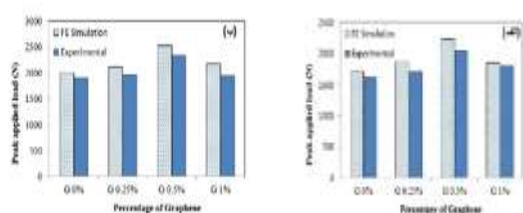


شکل (۱۹): قانون ناحیه چسبان دو خطی.

شکل (۲۰): پراکندگی داده‌ها برای اوج بار شکست: الف) مد اصلی I، ب) مود مرکب (۳۰ درجه)، ج) مود مرکب (۶۰ درجه) و د) مد اصلی II

۳-۵- اثرات نسبت وزنی مختلف گرافن

با توجه به نتایج شکل (۲۱) بار اعمال شده نهایی با افزایش نسبت وزنی گرافن تا ۰/۵٪ افزایش یافت. افزایش نسبت وزن گرافن به ۱٪ میزان بار شکست را بهبود نمی‌بخشد. به این معنی که بهترین عملکرد در برابر رفتار شکست برای نمونه‌هایی با ۰/۵٪ وزنی رخ داد؛ زیرا وقتی نوک ترک با نانو گرافن روبرو شد، انتشار ترک متوقف شد و این امر به علت پیوندهای الکترواستاتیک و کووالانسی صفحات نانو گرافن کاهش یافته با ترکیب چسب است که سبب تقویت پیوند مابین ترکیبات چسب گردیده است و با افزایش درصد وزنی گرافن از ۰/۵ درصد به ۱ درصد، بار شکست را بهبود نمی‌بخشد و این پدیده می‌تواند ناشی از تراکم ذره‌های نانوگرافن کاهش یافته در مابین پیوندهای چسب با نانو گرافن باشد که نتوانسته‌اند با ترکیبات چسب پیوند ایجاد نمایند و همانند یک حفره، نابجایی و ناخالصی در داخل چسب باعث ایجاد تمرکز تنش شده است.



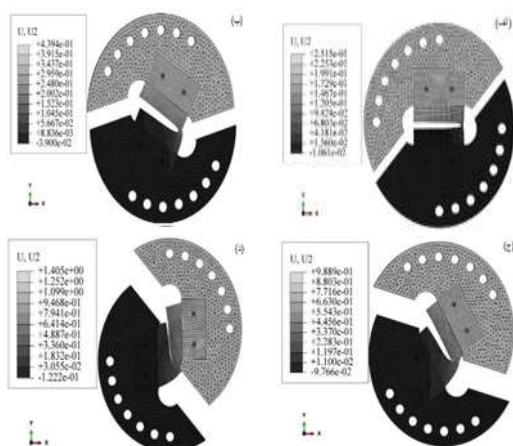
جدول (۳) بیانگر مقدار نرخ انرژی بحرانی آزاد شده برای نمونه‌ها با درصد مختلف وزنی گرافن که از آزمون‌های DCB و ENF به دست آمده است. همان‌طور که از جدول مشهود است مقدار نرخ انرژی بحرانی با افزایش میزان گرافن افزایش پیدا می‌نماید. همچنین این جدول مقدار گسیختگی کششی را که در شبیه‌سازی عددی برای مدل‌سازی گسیختگی لایه چسب از آن استفاده گردیده است، نشان می‌دهد.

جدول (۳): مقدار نرخ انرژی بحرانی رها شده برای نمونه‌ها با درصد مختلف وزنی نانوگرافن کاهش یافته.

گرافن کاهش یافته percent (%)	G_{IC} (N/mm ²)	G_{IIC} (N/mm ²)	Tripping traction
0	0.25 ± 0.04	2.61 ± 0.25	22.5/16.3
0.25	0.28 ± 0.05	2.95 ± 0.27	23.87/17.44
0.5	0.40 ± 0.04	4.50 ± 0.32	28.53/20.96
1	0.38 ± 0.07	4.6 ± 0.45	24.51/18.73

۳-۴- اعتبارسنجی نتایج FEM در برابر نتایج تجربی

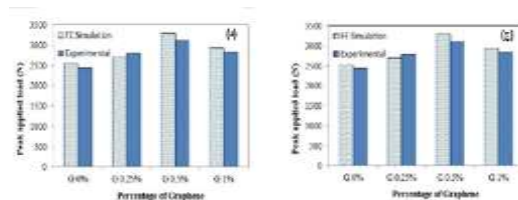
نتایج مدل المان محدود با خروجی‌های تجربی مقایسه شد. پراکندگی بار شکست تجربی در مقایسه با خروجی‌های عددی در شکل (۲۰) نشان داده شده است. طبق شکل (۲۰) بارهای شکست پیش‌بینی شده با شبیه‌سازی FE در بیشتر موارد بیشتر از بارهای شکست تجربی بود. ناسازگاری بین خروجی‌های عددی و تجربی می‌تواند به دلیل هندسه، مواد و شرایط بارگذاری رخ دهد.



شکل (۲۳): جابجایی عرضی (mm) برای مشاهده انتشار ترک در نمونه‌های آزمایشی با مقیاس ۱:۲۵: (الف) مد اصلی I، (ب) مد مرکب (۳۰ درجه)، (ج) مد مرکب (۶۰ درجه) و (د) مد اصلی II.

۴- نتیجه گیری

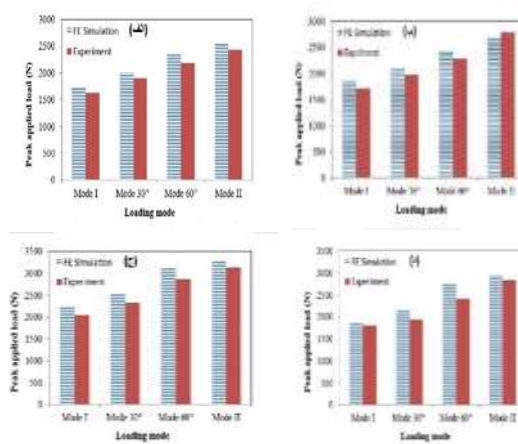
در این پژوهش ابتدا تأثیر افزایش درصد‌های مختلف وزنی نانو گرافن کاهش یافته بر خواص مکانیکی اتصالات چسبی پایه اپوکسی آراالدیت ۲۰۱۵ با آزمایش‌های عملی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج مورفولوژی نمونه‌ها تصاویر TEM نشان سطوح خاکستری همگن برای چسب خالص نشان می‌دهد. با این حال، نوارهای تاریک ورق‌های گرافن با وضوح قابل توجه در عکس چسب- گرافن قابل مشاهده است. تصاویر SEM از سطوح شکسته نمونه چسب خالص و چسب- گرافن ارائه شده است. این تصاویر نشان می‌دهد که مخلوط کردن گرافن تا حد زیادی تغییر مورفولوژی فیلم چسب- گرافن همراه است. این تغییرات منجر به افزایش انرژی مورد نیاز برای ایجاد یک سطح شکسته بزرگ‌تر در قطعات چسب- نانو گرافن شد. نتایج حاصل از آزمون‌های مکانیکی نشان داد که مدول یانگ با افزایش میزان با ۰/۵ درصد وزنی گرافن حدود ۲۵ درصد افزایش می‌یابد. مقاومت نهایی نمونه حجمی با ۰/۵ درصد وزنی گرافن در مقایسه با چسب خالص حدود ۳۰ درصد بالاتر بود و این امر به علت پیوندهای الکترواستاتیک و کووالانسی صفحات نانو گرافن کاهش یافته با ترکیب چسب است که سبب تقویت پیوند مابین ترکیبات لایه‌های چسب گردیده است و با افزایش درصد وزنی گرافن از ۰/۵ درصد به ۱ درصد، استحکام نهایی کشش ۱۳ درصد نسبت به نمونه ۰/۵ درصد



شکل (۲۱): نتایج عددی و تجربی برای بار اعمال شده در مقابل درصد‌های مختلف گرافن: (الف) مد اصلی I، (ب) مود مرکب (۳۰ درجه)، (ج) مود مرکب (۶۰ درجه) و (د) مد اصلی II.

۳-۶- اثرات اعمال حالت‌های مختلف بارگذاری

نتایج عددی و تجربی برای اوج بارهای اعمال شده نمونه‌ها با مواد چسبنده مختلف در شکل (۲۲) نشان داده شده است. بار شکست با تغییر زاویه بارگذاری از مد اصلی I به زاویه بارگذاری مد اصلی II افزایش یافته است؛ بنابراین، حداکثر بار شکست برای زاویه بارگذاری مد اصلی II برای همه مواد چسبنده با نسبت وزنی متفاوت گرافن از جمله چسب خالص، ۲۵٪ وزنی، ۵٪ وزنی، و ۱٪ وزنی به دست آمد؛ و ۱٪ وزنی جابجایی‌های عمودی نمونه‌ها در شکل ۲۳ ارائه شده است.



شکل (۲۲): نتایج عددی و تجربی برای اوج بارهای اعمال شده نمونه‌ها: (الف) چسب خالص، (ب) چسب ۰/۲۵ درصد وزنی G، (ج) چسب ۰/۵ درصد وزنی G، (د) چسب ۱ درصد وزنی G.

bonded pultruded GFRP/steel joint", *Compos. Struct.*, vol. 255, pp. 113012, 2021.

[4] M. Bagheri Tofighi & H. Biglari, "FEM Analyses of Low Velocity Impact Response of Sandwich Composites with Nanoreinforced Polypropylene Core and Aluminum Face Sheets", *Phys. Mesomech.*, vol. 24, no. 1, pp. 107–116, 2021.

[5] R. Gholami, H. Khoramishad L. F. M. da Silva, "The Glass Fiber-Reinforced Polymer Nanocomposite Adhesive Joints Reinforced with Aligned Carbon Nanofillers", *Compos. Struct.*, vol. 253, pp. 112814, 2020.

[6] P. Zamani, A. Jaamialahmadi & L. F. M. da Silva, "The influence of GNP and nano-silica additives on fatigue life and crack initiation phase of Al-GFRP bonded lap joints subjected to four-point bending", *Compos. B. Eng.*, vol. 207, pp. 108589, 2021.

[7] P. Jajibabu, Y. X. Zhang, A. N. Rider, J. Wang, R. Wuhner & B. Gangadhara Prusty, "High-performance epoxy-based adhesives modified with functionalized graphene nanoplatelets and triblock copolymers", *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 98, pp. 102521, 2020.

[8] S. K. Gupta & D. K. Shukla, "Effect of stress rate on shear strength of aluminium alloy single lap joints bonded with epoxy/nanoalumina adhesives", *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 99, pp. 102587, 2020.

[9] Q. Rao, Z. Ouyang & X. Peng, "Enhancing mode I fracture toughness of adhesively bonded unidirectional composite joints using surfactant-stabilized multi-walled carbon nanotube and graphene nanoplate", *Polym. Test.*, vol. 96, pp. 107110, 2021.

[10] J. P. A. Valente, R. D. S. G. Campilho, E. A. S. Marques, J. J. M. Machado & L. F. M. da Silva, "Adhesive joint analysis under tensile impact loads by cohesive zone modelling", *Compos. Struct.*, 2019.

[11] S. Akpinar, "The strength of the adhesively bonded step-lap joints for different step numbers", *Compos B Eng.*, vol. 67, pp. 170–178, 2014.

[12] E. Gavgali, R. Sahin & S. Akpinar, "An investigation of the fatigue performance of adhesively bonded step-lap joints: an experimental and numerical analysis", *Int J Adhesion Adhes.*, vol. 104, pp. 102736, 2021.

[13] S. Bayramoglu, S. Akpinar & A. Çalık, "Numerical analysis of elasto-plastic adhesively single step lap joints with cohesive zone models and

کاهش می یابد و بار شکست را بهبود نمی بخشد و این پدیده می تواند ناشی از تراکم ذره های نانوگرافن در مابین پیوندهای چسب با نانوگرافن باشد که نتوانسته اند با ترکیبات چسب پیوند ایجاد نمایند و همانند یک حفره، نابجایی و ناخالصی در داخل چسب باعث ایجاد تمرکز تنش شده است.

نتایج حاصل از حل عددی به خوبی با بار شکست تجربی اتصال های تک لبه اندازه گیری شده مطابقت داشت. از این رو، می توان نتیجه گرفت که روش CZM با دقت بالایی حدود ۹۲ درصدی می تواند بار شکست نهایی اتصال تک لبه ارائه شده را پیش بینی کند که پارامترهای مدل به صورت تجربی با آزمایش DCB و ENF تشخیص داده شده است. برای تحقیقات تجربی، نیروی گسیختگی با تغییر حالت بارگذاری از مد اصلی I به مد مرکب یا مد اصلی II افزایش یافت. بیشترین نیروی گسیختگی به میزان ۳۰۲۶ نیوتن برای شرایط مد اصلی II برای اتصال چسبی ۰/۵ درصد وزنی در مقایسه با سایر شرایط بارگذاری به دست آمد.

با توجه به نتایج تجربی، نیروی گسیختگی با افزودن گرافن تا ۰/۵٪ وزنی افزایش یافت. افزودن مقدار بیشتر گرافن از این حد باعث افزایش نیروی گسیختگی نشد؛ بنابراین بهترین کسر وزنی گرافن ۰/۵٪ است. شکاف های ناپیوسته مواد چسبنده با استفاده از مقدار کمی از نانوگرافن پر شد و انتشار ترک به دلیل ممانعت نانو ذرات گرافن کاهش یافته در مسیر انتشار ترک کاهش یافت. مقاومت چسب تقویت شده در برابر انتشار ترک برای همه حالت های بارگذاری و کاهش رشد ترک برای همه حالت های بارگذاری مشاهده شد.

۵- مراجع

[1] A. Hassan Ejaz, E. U. Mubashar, A. Zaib, A. Nabeel & W. Saad, "An experimental and simulation study of RGO effects on mechanical behaviour of structural adhesive and lap shear joints strength", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 126, pp. 103480, 2023.

[2] H. Khoramishad, M. Bagheri Tofighi & M. Khodaei, "Effect of Stacking Sequence on Low-Velocity Impact Behavior of Metal Laminates", *Phys. Mesomech.*, vol. 21, no. 2, pp. 140–149, 2018.

[3] Z. Jiang, Z. Fang, L. Yan, S. Wan & Y. Fang, "Mixed-mode I/II fracture criteria for adhesively-

[۲۲] ص. اسماعیلی، ت. احمدی، ح. ر. بخششی راد و ا. ع. نوربخش، "تأثیر افزودن اکسید گرافن بر رفتار خواص تریبولوژی پوشش های ایجاد شده روی آلایژ منیزیم AZ31 به روش اکسیداسیون الکترولیتی پلاسما"، فرایندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۱۶، شماره ۳، صفحه ۲۹-۴۱، پاییز ۱۴۰۱.

[۲۳] س. ح. دانشمند، م. ذاکری، ع. محمد بیگی و ع. نظری، "تأثیر گرافن بر خواص مکانیکی نانو کامپوزیت مس/گرافن"، فرایندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۹، شماره ۲، صفحه ۱۴۱-۱۴۸، تابستان ۱۳۹۴.

[24] L. Guadagno, M. Sarno, U. Vietri, M. Raimondo, C. Cirillo & P. Ciambelli, "Graphene-based structural adhesive to enhance adhesion performance", RSC Advances, vol. 5, pp. 27874-86, 2015.

[25] A. Silva Neto, D. T. L. D. Cruz & A. F. Ávila, "Nano-modified adhesive by graphene: the single lap-joint case", Materials Research, vol. 16, pp. 592-596, 2013.

[26] M. De Moura & A. M. G. Pinto, "Campilho R, Interlaminar fracture characterization of a carbo-epoxy composite in pure mode II", Materials Science Forum, January 2010.

۶- پی نوشت

- [1] Jojibabu et al
- [2] Gupta & Shukla
- [3] Rao et al
- [4] Da Silva
- [5] Gkikas et al
- [6] Guadagno et al
- [7] Silva Neto et al
- [8] De Moura & Pinto

its experimental verification", J Mech Sci Technol, vol. 35, pp. 641-649, 2021.

[14] S. Bayramoglu, K. Demir & S. Akpinar, "Investigation of internal step and metal part reinforcement on joint strength in the adhesively bonded joint: experimental and numerical analysis", Theor Appl Fract Mech, vol. 108, pp. 102613, 2020.

[15] H. Ejaz, H. Khan, F. Mazhar & IU. Haq, "An experimental and simulation study of various geometric modifications effects in single lap joint", Forces in Mechanics, vol. 9, pp. 100144, 2022.

[16] S. Akpinar, "Effects of different curvature patches on the strength of double-strap adhesive joints", J Adhes, vol. 89, no. 12, pp. 937-47, 2013.

[17] L. F. Da Silva, A. Ochsner & R. D. Adams, "Handbook of adhesion technology", Springer Science & Business Media, 2011.

[18] A. Hartwig, A. Lühning & J. Trautmann, "Spheroidal nanoparticles in epoxide-based adhesives", Macromol Mater Eng, vol. 294, no. 6-7, pp. 363-79, 2009.

[19] G. Gkikas, D. Sioulas, A. Lekatou, N. Barkoula & A. Paipetis, "Enhanced bonded aircraft repair using nano-modified adhesives", Materials & Design, vol. 41, pp. 394-402, 2012.

[20] J. Kim, B. S. Yim, J. M. Kim & J. Kim, "The effects of functionalized graphene nanosheets on the thermal and mechanical properties of epoxy composites for anisotropic conductive adhesives (ACAs)", Microelectronics Reliability, vol. 52, pp. 595-602, 2012.

[21] U. Khan, P. May, H. Porwal, K. Nawaz, J. N. Coleman, "Improved adhesive strength and toughness of polyvinyl acetate glue on addition of small quantities of graphene", ACS applied materials & interfaces, vol. 5, pp. 1423-1428, 2013.