



Original Research Paper

Experimental and Analytical Investigation of Impact Strength of Functionally Graded Epoxy/Graphene Nanocomposite

Saeed Tarhani¹ and Mahdi Karami Khorramabadi^{2*} 

1. Department of Mechanical Engineering, Khorramabad Branch, Islamic Azad University, Khorramabad, Iran

2. Department of Mechanical Engineering, Khorramabad Branch, Islamic Azad University, Khorramabad, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received 13 May 2023

Revised 31 July 2023

Accepted 23 August 2023

Available Online 23 August 2023

Keywords:

Functionally graded nanocomposite

Impact properties

Finite element method

Graphene nanoparticles

Scanning electron microscope

ABSTRACT

In this research, the impact strength of functionally graded epoxy/graphene nanocomposite has been investigated. First, the samples were made for uniform and functionally graded distributions. Then, the distribution of nanoparticles has been investigated using a scanning electron microscope. Based on this investigation for uniform distribution up to 1.5% by weight of graphene nanoparticles, no signs of agglomerated particles were found. In addition, imaging was also done for the functionally graded sample, and it was observed that the boundary of the layers is completely connected. Then, the samples were subjected to the Izod impact test, and it was observed that for uniform distribution, the amount of energy absorption increased up to 1% by weight of graphene nanoparticles, and then for the sample with 1.5% by weight of graphene nanoparticles, its value started to reduce. To validate the accuracy of the obtained results, modeling has been done for the mentioned samples using the finite element method, and the obtained results have been compared with the experimental results.

* Corresponding Author's E-mail: m.k.khorramabadi@gmail.com

How to Cite this Article:

S. Tarhani and M. Karami Khorramabadi, "Experimental and Analytical Investigation of Impact Strength of Functionally Graded Epoxy/Graphene Nanocomposite," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, vol. 8, no. 2, pp. 45-54, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jtae.2024.8.2.4>.

COPYRIGHTS

Authors retain the copyright and full publishing rights.

Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article licensed under the [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).





بررسی تجربی و تحلیلی استحکام ضربه نانو کامپوزیت تابعی اپوکسی / گرافن

سعید طرهانی^۱ و مهدی کرمی خرم‌آبادی^{۲*} 

۱- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد خرم‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم‌آباد، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد خرم‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم‌آباد، ایران

چکیده

در این تحقیق به بررسی استحکام ضربه نانو کامپوزیت تابعی اپوکسی تقویت شده با نانو ذرات گرافن پرداخته شده است. ابتدا نمونه‌ها برای توزیع یکنواخت و تابعی ساخته شده است. سپس نحوه توزیع نانو ذرات با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شده است. بر اساس این بررسی برای توزیع یکنواخت، در نمونه‌های کمتر از ۱/۵٪ درصد وزنی نانو ذرات گرافن هیچ نشانه‌ای از ذرات به هم چسبیده یافت نگردید. برای نمونه تابعی نیز تصویربرداری صورت گرفته و مشاهده گردیده که مرز لایه‌ها به هم پیوسته است. سپس نمونه‌ها تحت آزمایش ضربه‌ای ایزود قرار داده شده و مشاهده گردیده که برای توزیع یکنواخت، میزان جذب انرژی تا ۱٪ درصد وزنی نانو ذرات گرافن افزایش یافته و سپس برای نمونه ۱/۵٪ درصد وزنی نانو ذرات گرافن، مقدار آن شروع به کاهش می‌کند. برای بررسی صحت نتایج به دست آمده، با استفاده از روش اجزاء محدود مدل‌سازی برای نمونه‌های ذکر شده صورت گرفته و نتایج به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۲۳ اردیبهشت ۱۴۰۲

بازنگری ۹ مرداد ۱۴۰۲

پذیرش ۱ شهریور ۱۴۰۲

اولین انتشار ۱ شهریور ۱۴۰۲

واژه‌های کلیدی:

نانو کامپوزیت تابعی

استحکام ضربه

روش اجزاء محدود

نانو ذرات گرافن

میکروسکوپ الکترونی روبشی

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m.k.khorramabadi@gmail.com

How to Cite this Article:

S. Tarhani and M. Karami Khorramabadi, "Experimental and Analytical Investigation of Impact Strength of Functionally Graded Epoxy/Graphene Nanocomposite," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, Vol. 8, No. 2, pp. 45-54, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jtae.2024.8.2.4>.

COPYRIGHTS

Authors retain the copyright and full publishing rights.

Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article licensed under the [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



در این تحقیق به بررسی استحکام ضربه نانو کامپوزیت تابعی اپوکسی تقویت شده با نانو ذرات گرافن پرداخته شده است. نمونه‌ها برای توزیع یکنواخت با سه درصد وزنی مختلف نانو ذرات گرافن (خالص، ۰/۵٪، ۱٪ و ۱/۵٪) ساخته شده و در مرحله بعد، نمونه تابعی نیز ساخته شده است. سپس نحوه توزیع نانو ذرات با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شده است. سپس نمونه‌ها تحت آزمایش ضربه ای ایزود قرار داده شده و مشاهده گردیده که برای توزیع یکنواخت، میزان جذب انرژی تا ۱٪ درصد وزنی نانو ذرات گرافن افزایش یافته و سپس برای نمونه ۱/۵٪ درصد وزنی نانو ذرات گرافن، مقدار آن شروع به کاهش می‌کند. برای بررسی صحت نتایج بدست آمده، با استفاده از روش اجزاء محدود و به کمک نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی برای نمونه‌های ذکر شده صورت گرفته و نتایج به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده است.

۲ مواد و روش‌ها

۱.۲ مواد

مواد مورد استفاده در این تحقیق، شامل رزین اپوکسی و نانو ذرات گرافن است. اپوکسی مورد استفاده در این تحقیق سامانه دو جزئی شامل اپوکسی با نام تجاری ایپون ۸۲۸ ساخت شرکت کومپو کره و سخت‌کننده با نام تجاری Epotec ساخته شده توسط شرکت کومپو کره می‌باشد که نسبت وزنی آن ۵۰:۱۰۰ است. همچنین نانو ذرات گرافن دارای ابعادی بین ۲-۱۸ nm ساخت کشور آمریکا می‌باشد.

۲.۲ ساخت

مقدار درصد وزنی نانو ذرات گرافن را جدا نموده و در درون کوره به مدت ۲ ساعت در دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد گذاشته تا رطوبت احتمالی حذف شود. در شکل ۱ نمونه نانو ذرات گرافن نشان داده شده است.



شکل ۱- نانو ذرات گرافن ساخت کشور آمریکا

۱ مقدمه

پلیمرهای پایه اپوکسی به خاطر انعطاف‌پذیری و خواص مناسب، بطور گسترده در بسیاری از صنایع نظیر صنایع هوافضا، صنایع خودروسازی و غیره کاربرد دارند. پلیمر اپوکسی دارای خواص برجسته از جمله خواص حرارتی و مکانیکی خوب سازگار با اکثر فیبرهای، مواد شیمیایی و مقاومت در برابر سایش و هزینه کم است [1]. با توجه به این خواص، جذابیت آن‌ها بیشتر شده تا در کارهای وسیع مانند چسب، پوشش، مواد ساختار یا به‌عنوان ماتریس کامپوزیت مورد استفاده قرار گیرند [2-3]. اما برخی از خواص آن‌ها نظیر شکنندگی، استحکام پایین و مقاومت کم در برابر رشد ترک، صنایع را به سمت تقویت این مواد به کمک پرکننده‌های آلی و غیرآلی سوق داده است. گرافن یک لایه واحد از گرافیت است که به شکل شبکه‌ای شش ضلعی از اتم‌های کربن به هم پیوسته است و به‌عنوان یک تقویت کننده مناسب محسوب می‌شود [4]. نانو کامپوزیت مبتنی بر پلیمر / گرافن در سال‌های اخیر بیشتر توجه در دانشگاه‌ها و صنایع را به خود جلب کرده است زیرا بهبود چشمگیری در خصوصیات پلیمر در بخش‌های مختلف بدست داده است [5].

تاکنون تحقیقات مختلفی در مورد خواص مکانیکی نانو کامپوزیت‌ها توسط محققین صورت گرفته است. برهان الدین و همکاران [6] در مورد خواص مکانیکی نانو کامپوزیت اپوکسی / گرافن شامل خواص الاستیک به صورت تجربی بررسی و تحقیق نموده اند. همچنین دانگ و همکاران [7] در خصوص مدل‌سازی خواص مکانیکی نانو کامپوزیت پلی پروپیلن / خاک رس به روش اجزاء محدود تحقیقاتی صورت داده‌اند. با توجه به اهمیت ویژه برخی از خواص مکانیکی مانند سفتی، مقاومت در برابر ضربه و ... تحقیقات مختلفی نیز در مورد این نوع خواص مکانیکی در نانو کامپوزیت‌ها صورت گرفته است [8-10]. به‌عنوان نمونه می‌توان به تحقیق دوگان و همکاران [11] در زمینه بررسی خواص مکانیکی و ضربه در نانو کامپوزیت اپوکسی تقویت شده با نانو ذرات گرافن و شیشه / آرامید اشاره نمود. پراسانتی و همکاران [12] خواص مکانیکی در نانو کامپوزیت اپوکسی تقویت شده با نانو ذرات گرافن و نانو لوله‌های کربنی را مورد بررسی قرار داده‌اند. همچنین توراکا و همکارش [13] بهبود خواص مکانیکی نانو کامپوزیت شیشه / اپوکسی با ترکیبی از نانو لوله‌های کربنی چند جداره و نانو ذرات گرافن را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در ادامه بشیری گودرزی و همکارش اثر نانو لوله‌های کربنی و گرافن بر استحکام ضربه کامپوزیت اپوکسی تقویت شده با الیاف بازالت را به صورت تجربی مورد بررسی قرار داده‌اند [14]. همچنین نوری نیارکی و همکارانش خواص مکانیکی کشش و ضربه در نانو کامپوزیت‌های هیبریدی پایه پلیمری را به صورت تجربی مورد مطالعه قرار داده‌اند [15].



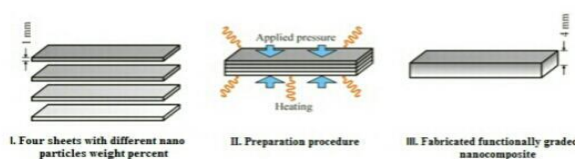
شکل ۴ - محلول ریخته شده در قالب‌های تیر

مشخصات نمونه‌های ساخته شده با درصد‌های مختلف وزنی در جدول زیر ارائه گردیده است.

جدول ۱ - درصد گرافن و اپوکسی

شماره	اپوکسی	گرافن	ضخامت
۱	۱۰۰	۰	۴mm
۲	۹۹/۵	۰/۵	۴mm
۳	۹۹	۱	۴mm
۴	۹۸/۵	۱/۵	۴mm

در مرحله‌ی بعد نمونه‌های تابعی نیز ساخته می‌شود. ابتدا نمونه‌های با درصد وزنی نانوغرافن (۰/۵، ۱ و ۱/۵) با ضخامت 1mm درون قالب‌های تیر شکل ساخته می‌شود. سپس مطابق شکل ۵، این لایه‌ها درون قالب روی هم از درصد کم تا درصد بالاتر قرار داده شده و تحت نیروی فشاری ۱۱۰۰ N و حرارت با دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرد.



شکل ۵ - نحوه ساخت نمونه کامپوزیت تابعی

حرارات وارد شده باعث اتصال لایه‌ها به یک دیگر و ممزوج شدن آن‌ها در مرز لایه‌ها خواهد شد. در آخر نمونه به دست آمده به لحاظ ظاهری در راستای ضخامت دارای تغییر رنگ از شفاف تا حالت تیره خواهد بود. نمونه‌های ساخته شده در شکل ۶ نشان داده شده است. ابعاد نمونه‌های ساخته شده (عرض ۲۰ میلی‌متر، طول ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۴ میلی‌متر) و تعداد آن‌ها برای هر درصد از نانو ذرات (برای هر نمونه با توزیع و درصد مشخص از نانو ذرات به تعداد ۳ عدد) بر اساس استاندارد ISO179/2 می‌باشد.

بعد از رطوبت‌گیری نانو ذرات گرفتن و رسیدن دمای آن به دمای محیط، آن را با اپوکسی مخلوط کرده و به مدت ۵ دقیقه به صورت دستی همزده می‌شود. سپس به مدت ۱ ساعت با سرعت ۳۰۰ دور در دقیقه مطابق شکل ۲ با استفاده از همزن مکانیکی ساخت شرکت IKA آلمان، همزده می‌شود.



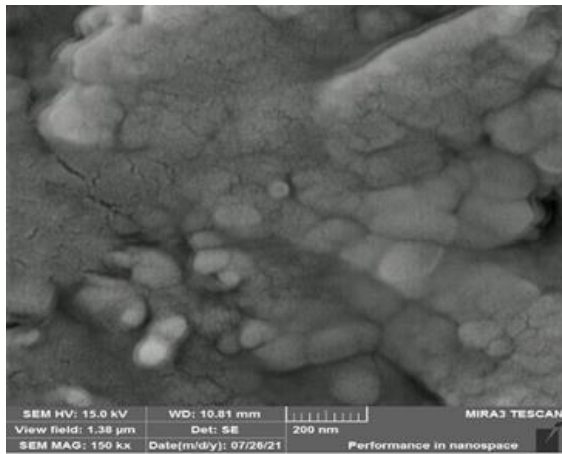
شکل ۲ - همزن مکانیکی دیجیتال ساخت شرکت IKA کشور آلمان

در مرحله‌ی بعد با استفاده از دستگاه آتراسونیک ساخت کشور آلمان به منظور جلوگیری از کلوخه شدن نانو ذرات و همچنین توزیع یکنواخت، مخلوط همزده می‌شود. این مخلوط با فرکانس ۵۰ مگاهرتز و دامنه کاوش ۰/۵ به مدت یک ساعت مطابق شکل ۳ همزده شده و بعد از آن مخلوط را به مدت ۱۵ دقیقه درون دستگاه حمام آتراسونیک قرار داده شده تا حباب‌های هوا از بین بروند. سپس هاردنر به مخلوط اضافه می‌شود و به مدت ۵ دقیقه به صورت دستی همزده می‌شود تا کاملاً مخلوط شود و مخلوط را درون قالب‌های اغشته به واکس مطابق شکل ۴ ریخته و در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ ساعت و به دنبال آن ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۲ ساعت قرار داده می‌شود.



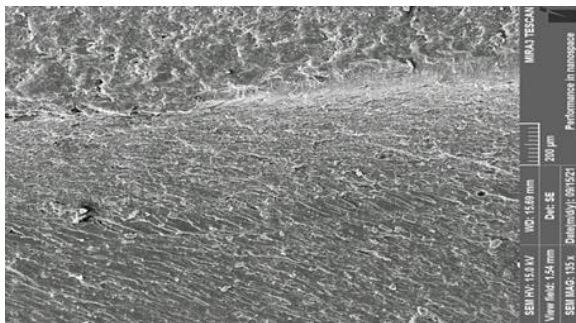
شکل ۳ - دستگاه آتراسونیک مورد استفاده شده ساخت شرکت هلشر آلمان با نام تجاری UP400s

توان بالای این اشعه، ترک‌های ریز در این شکل قابل مشاهده می‌باشد. لازم به توضیح است که کلوخه شدن با توجه به ابعاد نانو ذرات گرافن و مقیاس تصویر بدست آمده قابل بررسی می‌باشد. بدین صورت که اگر چسبیدن نانو ذرات به یکدیگر به حدی باشد که اندازه ذره بوجود آمده از مقیاس نانو فراتر رود، آنگاه کلوخه شدن رخ داده است. برای درصد‌های بالاتر این احتمال افزایش یافته و همان طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، در 1.5 درصد وزنی کلوخه شدن نانوگرافن مشهود است. مطابق این شکل اتصال نانو ذرات گرافن به یکدیگر، موجب ایجاد سلول‌های بزرگتر شده که می‌تواند به‌عنوان نقاط تمرکز تنش عمل نموده و سبب کاهش خواص مکانیکی گردد.



شکل ۹- تصویر میکروسکوپ الکترونی برای نمونه ۱/۵٪

در شکل ۱۰ تصویر نمونه تابعی نشان داده شده است. این تصویر مربوط به مرز لایه‌ها بوده و همانطور که مشاهده می‌شود، مرز لایه‌ها کاملاً به هم پیوسته می‌باشد.



شکل ۱۰- تصویر میکروسکوپ الکترونی برای نمونه تابعی

۳ آزمایش‌های تجربی

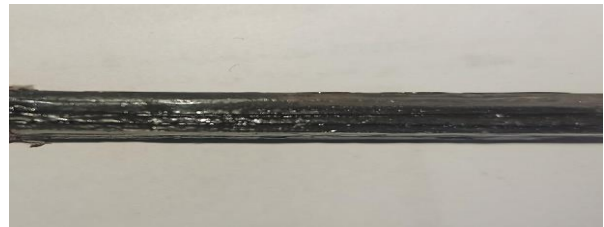
ابعاد نمونه‌های ساخته شده (عرض ۲۰ میلی‌متر، طول ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۴ میلی‌متر) برای انجام آزمایش ضربه بر اساس استاندارد ISO179/2 بوده و شامل پنج نمونه خالص و نمونه‌های با درصد وزنی

بررسی تجربی و تحلیلی استحکام ضربه نانو کامپوزیت تابعی اپوکسی / گرافن



شکل ۶- نمونه‌های تیر با توزیع یکنواخت و تابعی

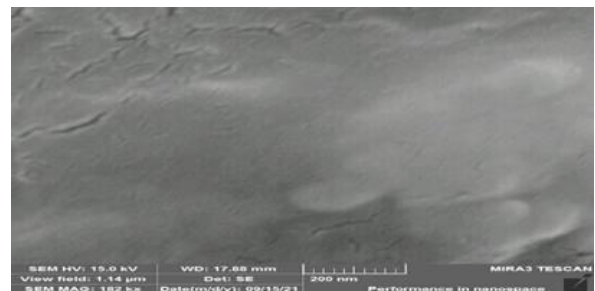
همچنین در خصوص نمونه تابعی کیفیت ساخت علاوه بر بررسی تصویر میکروسکوپ الکترونی که در ادامه به آن اشاره خواهد شد، به‌صورت ظاهری و با چشم غیر مسلح قابل ارزیابی است. مطابق شکل ۷، اتصال ظاهری مناسب لایه‌ها قابل مشاهده خواهد بود.



شکل ۷- نمای عرضی برش خورده نمونه تابعی

۳.۲ بررسی کیفیت ساخت با استفاده از میکروسکوپ الکترونی

در این قسمت تصاویر سطح مقطع نمونه‌های ساخته شده پس از پاشیدن لایه‌ای بسیار نازک از طلا بر روی نمونه و به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) ارائه گردیده و مورد بررسی قرار گرفته است. میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد استفاده برای نمونه‌های با توزیع یکنواخت نانو ذرات از نوع F-ESEM مدل MIRA3-LMU ساخت شرکت TESCAN می‌باشد.



شکل ۸- تصویر میکروسکوپ الکترونی برای نمونه 0.5٪

در شکل ۸ تصویر نمونه با توزیع یکنواخت نشان داده شده است. همانطور که در تصویر بالا مشاهده می‌شود، نمونه با توزیع یکنواخت فاقد نانوذرات گرافن کلوخه شده است. همچنین به علت مقاومت پایین مواد پلیمری در برابر حرارت تولید شده در اثر برخورد اشعه الکترونی و

بعد از آماده‌سازی هر یک از نمونه‌ها و قرار دادن آن میان تکیه‌گاه‌ها مانند شکل ۱۲، ابعاد و داده‌های مورد نیاز دستگاه تست ضربه شامل طول، عرض و ضخامت را وارد نموده و بر اساس استاندارد، آزمایش ضربه انجام می‌شود. در جدول ۲ مقادیر تجربی به دست آمده از آزمایش ضربه ارائه گردیده است.

جدول ۲- مقادیر حاصل از آزمایش تجربی ضربه

درصد گرافن	مقدار انرژی جذب شده بر حسب ژول
خالص	۰/۱۸۸
۰/۵٪	۰/۲۹۸
۱٪	۰/۳۳۹
۱/۵٪	۰/۲۳۳
FGM	۰/۴۲۸

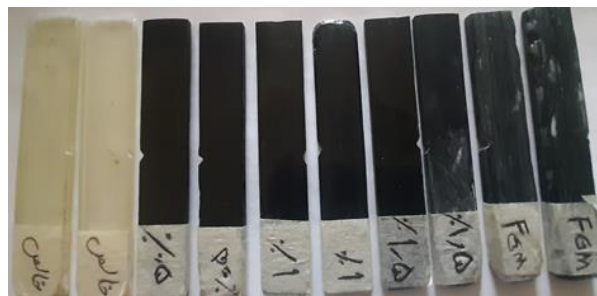
همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش درصد وزنی نانو ذرات گرافن میزان جذب انرژی ناشی از ضربه افزایش می‌یابد و این روند تا مقدار ۱٪ درصد وزنی ادامه داشته و پس از آن سیر نزولی به خود گرفته است. همانطور که قبلاً اشاره شده، برای توزیع یکنواخت و در درصدهای بالاتر از مقدار ۱٪ درصد وزنی کلوخه شدن نانو ذرات مشهود است. این ذرات کلوخه شده، تبدیل به نقاط تمرکز تنش گردیده و به رشد ترک کمک خواهند کرد. به همین دلیل میزان جذب انرژی در مقادیر بیش از ۱٪ درصد وزنی، سیر نزولی خواهد داشت.

همچنین مقدار جذب انرژی نمونه تابعی بیش از دیگر نمونه‌های با توزیع یکنواخت بوده است. یکی از دلایل مهم این امر می‌تواند به وجود اتصال قوی و کافی میان لایه‌ها و پیوستگی پس از فرآیند ساخت بازگردد.

۴ مدل‌سازی

در گام اول، لازم است علاوه بر مدل کردن هندسه نمونه، مدل مربوط به چکش (ضربه زننده) نیز در نظر گرفته شود. این کار در ماژول پارت نرم‌افزار انجام می‌شود. بعد از مدل کردن هندسه مساله، لازم است با دستورات چرخش و انتقال مطابق شکل ۱۳، اجزاء در موقعیت مناسب قرار گیرند.

و توزیع مختلف نانو ذرات گرافن (۰٪، ۱٪، ۱/۵٪، تابعی) می‌باشد. در مرحله بعد، مطابق شکل ۱۱، بر روی نمونه‌ها شیار V شکل ایجاد نموده و نمونه‌ها تحت تست ضربه (IZOD) قرار داده می‌شوند.



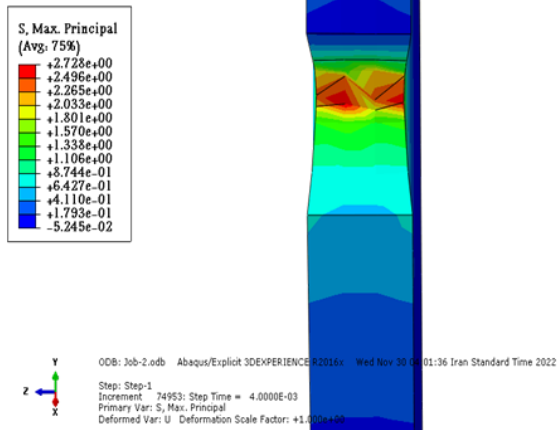
شکل ۱۱- نمونه‌های تیر ساخته شده همرا با شیار V شکل

تست ضربه (IZOD) با استفاده از دستگاه تست ضربه ساخت شرکت (گوتک مدل GT-70-45-MDN) کشور تایوان انجام شده و مشخصات آن به شرح زیر می‌باشد:

- سرعت ضربه 3.46 m/s
- زاویه ضربه ۱۵۰ درجه
- جنس چکش از فولاد با قدرت سایش بالا محکم برای جلوگیری از تغییر شکل و قابلیت انتقال نیرو
- دقت زاویه ۵مدم درجه
- دقت انرژی یک صدم ژول
- اندازه دستگاه ۷۸*۳۲*۶۰ سانتی متر
- وزن دستگاه ۲۵۰ کیلو گرم

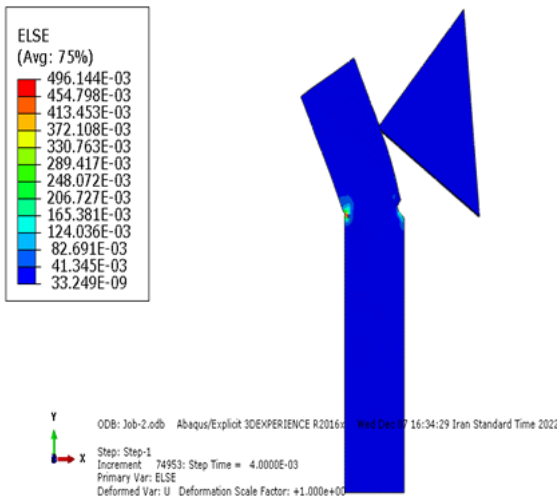


شکل ۱۲- دستگاه تست ضربه ساخت شرکت گوتک مدل (GT-70-45-MDN)



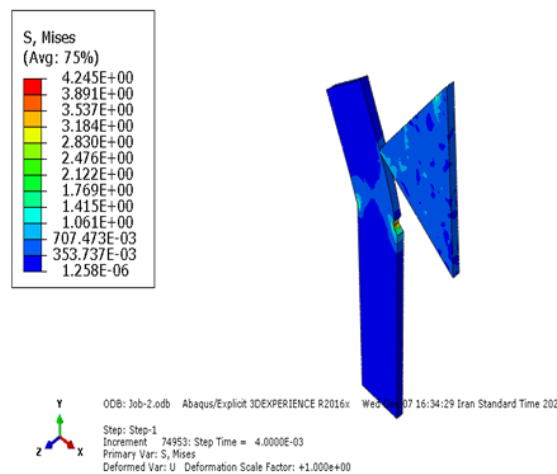
شکل ۱۵- مقادیر تنش در ابتدای برخورد برای نمونه خالص

شکل ۱۳- موقعیت مربوط به مدل چکش و نمونه

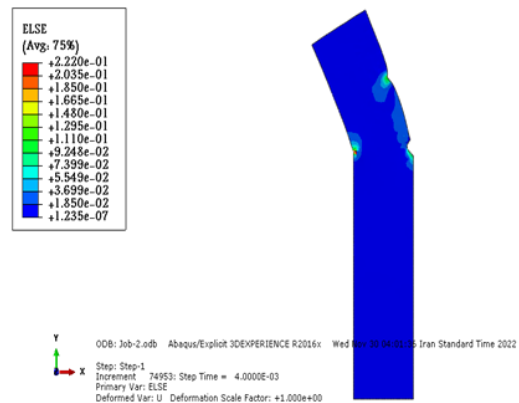


شکل ۱۶- مقادیر انرژی کرنشی در ابتدای برخورد برای نمونه ۰/۵٪

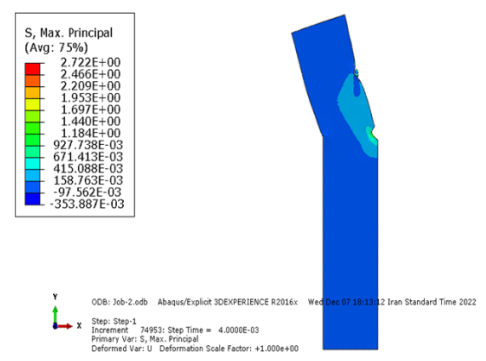
شبکه بندی نمونه و چکش در ماژول مش انجام می‌گیرد. با توجه به هندسه چکش و نمونه، از استراتژی مش بندی جارویی استفاده شده‌است. در مورد تعریف المان نیز، المان از نوع پیوسته هرمی (هشت گرهی) و اندازه آن نیز وابسته به حساسیت مش بر اساس عدم تغییر معنادار در نتایج تعریف می‌گردد. خواص نمونه‌ها بر اساس فرض الاستیک-پلاستیک (EPFM) در نظر گرفته شده‌است. پس از تعریف خواص مکانیکی ورودی مانند مدول یانگ و ... [16] با توجه به دینامیکی و غیر خطی بودن مساله، زمان تناوب را لحاظ نموده و خروجی‌های مورد نظر شامل انرژی کرنشی و ... استخراج می‌گردد. لازم به ذکر است که برای سنجش صحت عملکرد نرم‌افزار، پیش از این تحلیلی در مورد ضربه در ساندویچ پنل‌های نانو کامپوزیت به کمک این نرم‌افزار صورت گرفته و نتایج آن به چاپ رسیده است [17]. در ادامه برای هر نمونه به صورت مجزا، شکل‌های مربوط به خروجی‌های یاد شده ارائه گردیده است. شکل‌های ۱۴ الی ۲۱ به ترتیب مربوط به مقادیر انرژی کرنشی و تنش برای نمونه‌های خالص و توزیع یکنواخت نانو ذرات می‌باشند.



شکل ۱۷- مقادیر تنش در ابتدای برخورد برای نمونه ۰/۵٪

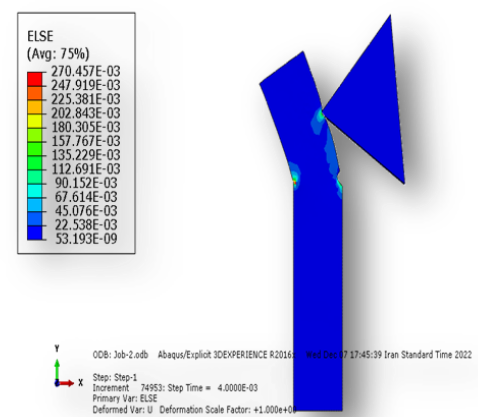


شکل ۱۴- مقادیر انرژی کرنشی در ابتدای برخورد برای نمونه خالص

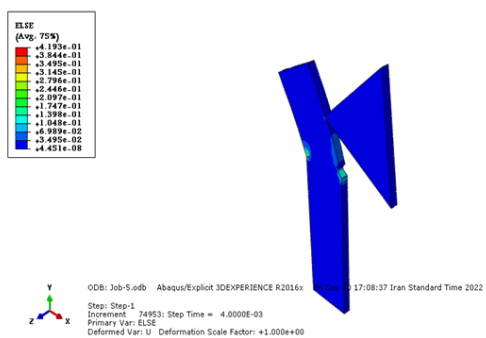


شکل ۲۱- مقادیر تنش در ابتدای برخورد برای نمونه ۱.۵٪

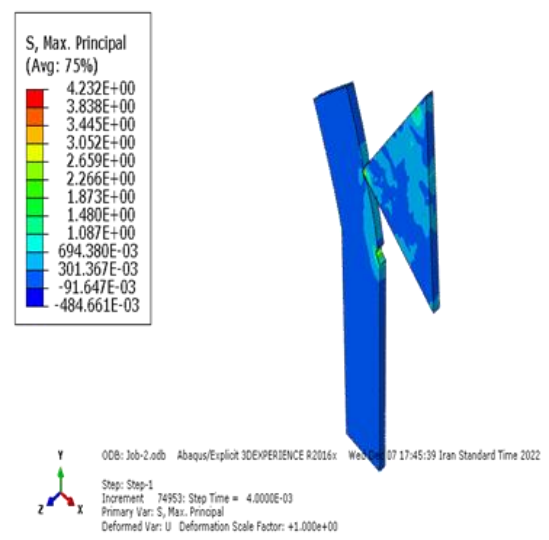
برای مدل سازی نمونه تابعی، با توجه به این که تعریف مقطع کامپوزیت لایه ای و حتی زیر روال مربوط به حل گر آباکوس استاندارد هستند و حلگر شبیه سازی پیش رو در نرم‌افزار آباکوس از نوع صریح است، لذا در تحلیل حاضر از رویکرد افزایش استفاده شده‌است. بدین معنا که برای نمونه تابعی مطابق روش ساخت، چهار لایه با توزیع یکنواخت نانو ذرات در نظر گرفته و سپس خواص را به ترتیب برای هر لایه اختصاص داده و پس از آن با قید گره، این لایه‌ها به یکدیگر متصل گردیده است. در ادامه برای نمونه تابعی به صورت مجزا، در شکل‌های ۲۲ الی ۲۳ مقادیر انرژی کرنشی و تنش ارائه گردیده است.



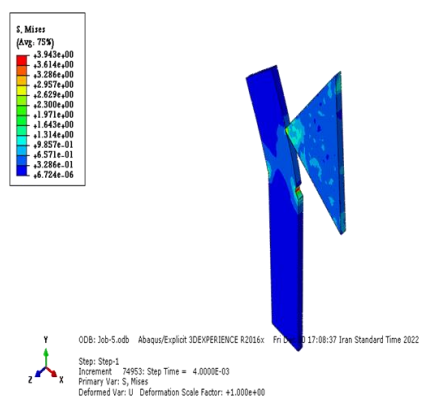
شکل ۱۸- مقادیر انرژی کرنشی در ابتدای برخورد برای نمونه ۱٪



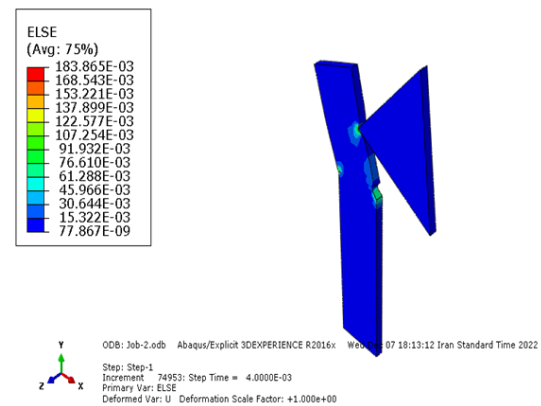
شکل ۲۲- مقادیر انرژی کرنشی در ابتدای برخورد برای نمونه تابعی



شکل ۱۹- مقادیر تنش در ابتدای برخورد برای نمونه ۱٪



شکل ۲۳- مقادیر تنش در ابتدای برخورد برای نمونه تابعی



شکل ۲۰- مقادیر انرژی کرنشی در ابتدای برخورد برای نمونه ۱/۵٪

جدول ۴- مقایسه میان نتایج تجربی و مدل سازی با نرم افزار آباکوس

درصد خطا (Error percentage)	تست ضربه مدل سازی (آباکوس)	تست ضربه تجربی (آزمایشگاهی)	درصد وزنی (نانو ذرات گرافن)
۶/۳۸	۰/۱۷۶	۰/۱۸۸	خالص
۸/۷۲	۰/۲۷۲	۰/۲۹۸	نیم درصد
۱۸/۸۸	۰/۲۷۵	۰/۳۳۹	یک درصد
۱۵/۰۲	۰/۱۹۸	۰/۲۳۳	یک نیم درصد
۲/۳۹	۰/۴۱۸	۰/۴۲۸	تابعی

با توجه به مقایسه نتایج تجربی و مدل سازی با نرم افزار آباکوس و درصد خطای بدست آمده، می توان مشاهده نمود که تعاریف و فرضیات در نظر گرفته شده برای مدل سازی بدرستی صورت گرفته است. همچنین، با افزایش درصد نانو گرافن، میزان درصد خطای محاسبه شده افزایش یافته که دلیل اصلی آن عدم در نظر گرفتن عامل مهم کلوخه شدن نانو گرافن در این درصدها از سوی نرم افزار می باشد.

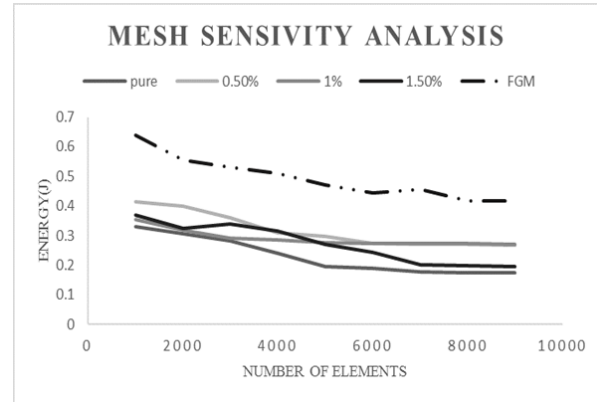
تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

مراجع

- [1] J. Ma *et al.*, "Fabrication, structure and properties of epoxy/metal Nanocomposites," *Macromolecular Materials and Engineering*, vol. 296, no. 5 pp. 465-474, 2011, <https://doi.org/10.1002/mame.201000409>.
- [2] J. Ma *et al.*, "Development of polymer composites using modified, high-structural integrity graphene platelets," *Composites Science and Technology*, vol. 91, pp. 82-90, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2013.11.017>.
- [3] Q. Meng *et al.*, "Improvement of adhesive toughness measurement," *Polymer Testing*, vol. 30, no. 2, pp. 243-250, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2011.01.001>.
- [4] P. Mukhopadhyay and R. K. Gupta, *Graphite, Graphene, and their Polymer Nanocomposites*, CRC Press, 2012.
- [5] T. Kuilla, S. Bhadra, D. Yao, N. H. Kim, S. Bose, and J. H. Lee, "Recent advances in graphene based polymer composites," *Progress in Polymer Science*, vol. 35, no. 11, pp. 1350-1375, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2010.07.005>.
- [6] N. I. C. Berhanuddin *et al.*, "Enhancement of mechanical properties of epoxy/graphene nanocomposite," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 914, no. 1, Art. no. 012036, 2017, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/914/1/012036>.

در پایان این بخش نمودار مربوط به حساسیت مش بندی و همچنین مقادیر انرژی جذب برای هر یک از نمونه ها مطابق شکل ۲۴ ارائه گردیده است.



شکل ۲۴- نمودار حساسیت مش بندی برای نمونه های با توزیع یکنواخت و تابعی

همانطور که از نمودار فوق مشاهده می شود، از مقادیر بیش از ۸۰۰۰ المان، تغییر محسوسی در پاسخ های بدست آمده بوجود نمی آید.

جدول ۳- مقادیر انرژی جذب با استفاده از نرم افزار آباکوس

مقدار انرژی جذب بر حسب ژول	درصد وزنی (نانو ذرات گرافن)
۰/۱۷۶	خالص
۰/۲۷۲	نیم درصد
۰/۲۷۵	یک درصد
۰/۱۹۸	یک نیم درصد
۰/۴۱۸	تابعی

۵ بحث و نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی استحکام ضربه نانو کامپوزیت اپوکسی تقویت شده با نانو ذرات گرافن برای توزیع یکنواخت و تابعی پرداخته شده است. نمونه ها برای توزیع یکنواخت با سه درصد وزنی مختلف نانو ذرات گرافن (خالص، ۰/۵٪، ۱٪، ۱/۵٪) ساخته شده و در مرحله بعد، نمونه تابعی نیز ساخته شده است. سپس نمونه ها تحت آزمایش ضربه ای ایزود قرار داده شده و برای بررسی صحت نتایج بدست آمده، با استفاده از روش اجزاء محدود و به کمک نرم افزار آباکوس مدل سازی برای نمونه های ذکر شده صورت گرفته است. در جدول زیر مقایسه میان نتایج تجربی و نتایج حاصل از شبیه سازی به کمک نرم افزار ارائه گردیده است.

- [13] S. Turaka and A. K. Bandaru, "Enhancement in mechanical properties of glass/epoxy composites by a hybrid combination of multi-walled carbon nanotubes and graphene nanoparticles," *Polymers*, vol. 15, no. 5, 2023, Art. no. 1189, pp. 1-23, <https://doi.org/10.3390/polym15051189>.
- [14] H. Bashiri Goodarzi and M. Yarmohammad Tooski, "An experimental study of the effects of carbon nanotube and graphene addition on the impact strength of Epoxy/Basalt fiber composite," *Journal of Science and Technology of Composite*, vol. 6, no. 3, pp. 411-418, 2019, (in Persian), <https://doi.org/10.22068/jstc.2019.97533.1490>
- [15] E. Nouri Niyaraki, M. R. Isvandzibaei, and M. Nouri Niyaraki, "Experimental study of tensile and impact mechanical properties in polymer-based hybrid nanocomposites by response surface methodology, " *Journal of Aeronautical Engineering*, vol. 24, no. 2, pp. 137-151, 2022, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/joae.2022.338348.1097>.
- [16] M. Alipour, M. Karami Khorramabadi, and M. Mahdipour Jalilian, "Experimental and theoretical investigation of mechanical properties of functionally graded epoxy/graphene nanocomposite," *Journal of Stress Analysis*, 2023, (in Persian).
- [17] A. Azadi, M. Karami Khorramabadi, and M. Mahdipour Jalilian, "Finite element analysis of the impact behavior of sandwich panels with nanocomposite face sheet (epoxy/ fiberglass/nanosilica)," *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*, vol. 16, no.2, pp. 25-33, 2023, (in Persian), <https://doi.org/10.30486/admt.2023.1957517.1349>.
- [7] Y. Dong, D. Bhattacharyya, and P. J. Hunter, "Experimental characterisation and object-oriented finite element modelling of polypropylene/organoclay nanocomposites," *Composites Science and Technology*, vol. 68, no. 14, pp. 2864-2875, 2008, <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.10.026>.
- [8] K. Hbaieb, Q. X. Wang, Y. H. J. Chia, and B. Cotterell, "Modelling stiffness of polymer/clay nanocomposites," *Polymer*, vol. 48, no. 3, pp. 901-909, 2007, <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2006.11.062>.
- [9] Ö.Y. Bozkurt, Ö. Özbek, A.R. Abdo, "Investigation of the effect of nanoclay inclusion on Charpy impact behavior of the glass fiber reinforced composite laminate," in *International Conference on Advanced Technology and Sciences*, Konya, Turkey, 2016, pp. 1179-1182.
- [10] K. Friedrich, "Microstructural efficiency and fracture toughness of short fiber/thermoplastic matrix composites," *Composites Science and Technology*, vol. 22, no. 1, pp. 43-74, 1985, [https://doi.org/10.1016/0266-3538\(85\)90090-9](https://doi.org/10.1016/0266-3538(85)90090-9).
- [11] N. F. Dogan, O. Ozbek, and A. Erklig, "Effect of graphene nanoplatelets on mechanical and impact properties of an aramid/glass reinforced epoxy composite," *Materials Testing*, vol. 64, no. 4, pp. 490-501, 2022, <https://doi.org/10.1515/mt-2021-2064>.
- [12] P. Prasanthi *et al.*, "Mechanical properties of carbon fiber reinforced with carbon nanotubes and graphene filled epoxy composites: experimental and numerical investigations," *Material Research Express*, vol. 10, 2023, Art. no. 025308, pp. 1-14, <https://doi.org/10.1088/2053-1591/acaf5>.