

Experimental and Numerical Investigation of Impact Properties of Epoxy Biocomposite Reinforced with Nanocellulose and Lorestan Rosemary Plant Extract

Hamed Beyranvand ^a, Mahdi Karami Khorramabadi ^a, Hamid Mozafari ^b

^a Department of Mechanical Engineering, Khorramabad Branch, Islamic Azad University, Khorramabad, Iran

^b Department of Mechanical Engineering, Technical and Engineering Faculty, Payam Noor University, Tehran, Iran

Original Article

Use your device to scan
and read the article online



Citation: Beyranvand H, Karami Khorramabadi M, Mozafari H. Experimental and Numerical Investigation of Impact Properties of Epoxy Biocomposite Reinforced with Nanocellulose and Lorestan Rosemary Plant Extract. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2024; 4(4): 541-562.

 <https://10.61186/masm.4.4.541>

KEYWORDS

Impact properties,
Cellulose nanoparticles,
Rosemary extract,
Biocomposite.

ABSTRACT

In this research, the impact properties of epoxy biocomposites reinforced with nano cellulose and nano rosemary plant extract from Lorestan are investigated. The samples were made in 4 different weight percentages (pure, 5% by weight, 1% by weight, 1.5% by weight, 2% by weight) for uniform explanation and the quality of the construction was checked by scanning electron microscope. The results of this investigation show that the distribution of all types of nanoparticles is completely uniform up to 1.5% by weight, and after that, lumpiness of the particles is observed. In the next step, the samples are subjected to the Izod impact test, which obtains the most absorbed energy for all types of reinforcements in 1.5% by weight of nanoparticles, and after that, in the 2% by weight sample, this value significantly decreases. It starts to decrease. This trend can be due to the agglomeration of nanoparticles in epoxy, which has caused a decrease in mechanical properties. In the last step, in order to check the accuracy of the obtained results, for all types of samples of uniform distribution, modeling was done using the finite element method and with the help of software, and the modeling results were compared with the laboratory results.

Extended Abstract

1. Introduction

Composites based on natural fibers are rapidly replacing synthetic fiber composites because they are preferred due to their superior biodegradability, degradability, stiffness, higher length-to-weight ratio, and low cost. A composite is a material made from a combination of two or more materials that, when used alone, shows improved characteristics and properties compared to each of the constituent materials. In recent years, composites made of natural and synthetic fibers have attracted the attention of industries as a means to reduce weight and adapt to the environment. Excessive exploitation and excessive consumption of non-renewable resources have negative effects on the environment, and the use of fossil-based composites is increasing worldwide [1]. Impact is one of the very common phenomena that all materials and structures experience. The momentary load applied to the surface during an impact event can cause unpredictable damage that can sometimes lead to complete failure of the structure. It's even worse if the low-velocity impact event causes invisible damage. Accumulated damage after several repeated events can lead to serious failures. Experimentally, a low velocity impact can be simulated using a drop test tool. Izod and Charpy impact testers mostly describe the fracture toughness, which can be considered as the mechanical properties of materials [2]. Impact damage can compromise

* Corresponding author. Tel.: +989163606113

E-mail address: m.k.khorramabadi@gmail.com

DOI: <https://10.61186/masm.4.4.541>

Received: November 30, 2024; Received in revised form: December 22, 2024; Accepted: January 19, 2025.

© Author



the performance as well as the reliability of composite materials and therefore requires serious attention. Impact injuries can occur during on-the-job applications or during the manufacturing process. As a composite is subjected to impact, it experiences bending stress. The flexural properties of a composite can be determined through flexural testing. Bending test provides composite bending strength and stiffness. The flexural properties of a composite provide initial insight into the potential impact resistance properties of a composite. In general, literature studies show that when the flexural strength of a hybrid composite is higher than non-hybrid, then the impact strength will have the same result [3]. Cellulose is one of the main components of natural plants, which has good renewable and biodegradable properties. It is interwoven with lignin and hemicellulose, which helps to maintain good stability and good plant strength. With the development of technology, cellulose has attracted a lot of interest in its new form "nano-cellulose". Nanocellulose can be mainly divided into three categories, including cellulose nanocrystals (CNCs), cellulose nanofibrils (CNFs), and bacterial cellulose (BC). Among them, CNCs and CNFs are usually from a variety of plants or algae. They are extracted through a so-called "top-down" method. However, BC is produced by bacteria, which is a so-called "bottom-up" approach. Nowadays, nanocellulose has attracted wide attention for applications in the fields of drug delivery due to its large specific surface area, good mechanical strength, stiffness, biocompatibility and renewability. These features enable nanocellulose to have a good drug loading and binding capacity [4]. In this research, experimental and numerical investigation of the impact properties of epoxy biocomposite reinforced with nanocellulose and rosemary plant extract from Lorestan is done. The samples were made to 4% by weight (pure, 0.5% by weight, 1% by weight, 1.5% by weight, 2% by weight) which was checked by scanning electron microscope to explain the uniformity of the results given. Then the samples were observed under the Izod impact test. Which gives the most absorbed energy for uniform distribution of 1.5%. And after the 2% sample, it starts to decrease dramatically, which can be due to the agglomeration of nanoparticles in epoxy, which can reduce the mechanical properties of epoxy. To investigate the accuracy of the obtained results, using the finite element method and with the help of modeling Ansys software, it was done for the mentioned samples and the obtained results were compared with the laboratory results. Then, on the samples of uniform distribution, modeling was done with software, and then the modeling results were compared with the laboratory test results.

2. Materials and methods

The materials used in this research include epoxy resin, cellulose nanoparticles and rosemary extract nanoparticles. The epoxy used in this research is a two-component system consisting of Khuzestan Petrochemical Epoxy E06 and a hardener (hardener) with the brand Polyamine PC205, whose weight ratio is 2:1, and also cellulose nanoparticles with dimensions between 20-50 nm. It is a nanosecond company. The native sample of rosemary plant was also collected from Kamalvand region in Khorram Abad city (Lorestan province). To make biocomposite samples, first, the weight percentage of cellulose nanoparticles is separated to combine with epoxy. Then, cellulose nanoparticles are mixed with epoxy and the mixture is heated until it reaches 55 degrees Celsius and stirred for 5 minutes. And after that for 10 minutes with 200 revolutions per minute, using a mechanical stirrer made by KIA, Germany. In the next step, after using the mechanical stirrer, the desired composition should be placed in the ultrasonic stirrer. The use of this device, in addition to bubble removal, causes homogenization and uniform distribution of nanoparticles in the matrix and prevents the formation of lumps. The mixture is placed in an ultrasonic device with a frequency of 100 MHz and a reduction amplitude of 0.5 for 15 minutes. Then the created bubbles are removed and time is given for the temperature of the mixture to reach 20 degrees Celsius. At the end of the reference, add the hardener to the mixture and stir it manually for 5 minutes until it is completely combined. The prepared mixture is poured into the mold (Figure 1) and it is placed at room temperature for 24 hours and then at 80 degrees Celsius for 3 hours.

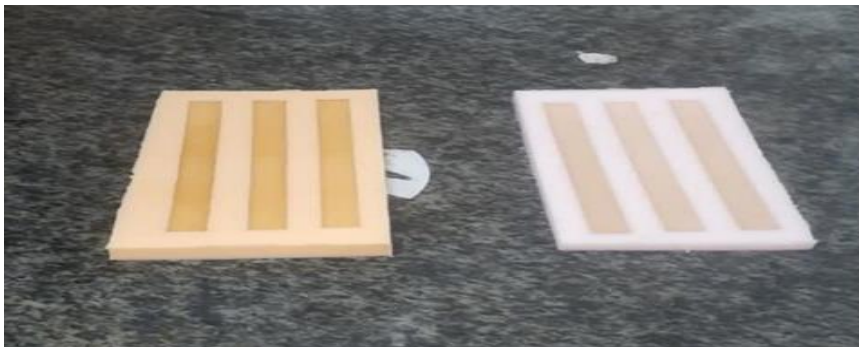


Figure 1. Samples made according to the standard ISO 179/2

For biocomposite samples reinforced with rosemary nanoparticles, first, the weight percentage of rosemary nanoparticles is separated and all the steps that were done in the manufacture of epoxy and nanocellulose are repeated to bake these types of samples.

3. Investigation the sample making process

In this section, the photos of the cross-section of the samples made after sprinkling a very thin layer of gold on the sample are taken and analyzed with the help of a scanning electron microscope. Scanning electron microscope for samples with uniform distribution of nanoparticles is ESEM-F type MIRA3LMU-made by TESCAN Company, which is used for photography.

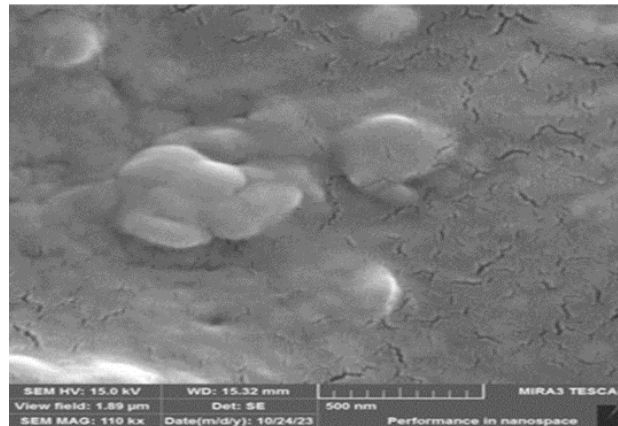


Figure 2. Electron microscope image of 0.5% composite sample with rosemary extract nanoparticles and cellulose nanoparticles

As shown in Figure 2, the distribution of cellulose nanoparticles and rosemary extract nanoparticles is completely uniform.

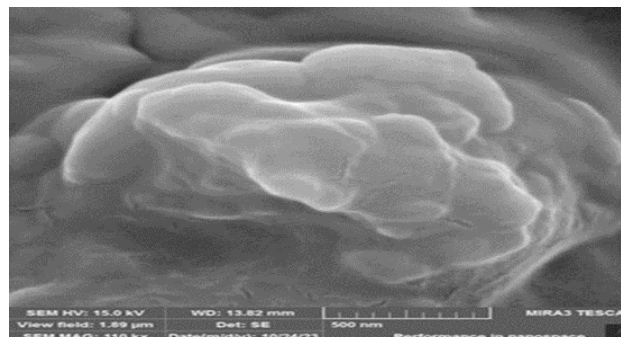


Figure 3. Electron microscope image of 2% composite sample with rosemary extract nanoparticles and cellulose nanoparticles

As shown in Figure 3, with the increase in the percentage of cellulose nanoparticles and rosemary extract nanoparticles, a connection was established between these cellulose nanoparticles and extract nanoparticles, and clumps were formed, indicating lumpiness.

4. Experimental Investigation

The dimensions of the manufactured samples (width 10 mm, length 80 mm and thickness 4 mm) to perform impact tests based on ISO 179/2 standards and include 5 pure samples and samples with different weight percentage and distribution of rosemary nanoparticles and nanocellulose (0.5 %, 1%, 1.5% and 2%). Izod impact test was performed using the impact test device made by the company (Gotek model OT_70_45_MDN) in Taiwan.



Figure 4. The impact testing machine made by Gutec Model (GT-70-45MDN)

After preparing each of the samples and placing it between the supports as shown in Figure 11, the required dimensions and data of the impact test device including length, width and thickness are entered and the impact test is performed based on the standard. In Table 1, the experimental values obtained from the impact test are presented.

Table 1. Experimental values of the impact test

Sample	Weight percentage of nanoparticles		Absorbed energy (J)
Nano Rosemary extract	Pure		0.0871
	0.5		0.1064
	1		0.1207
	1.5		0.1519
	2		0.0930
Nano cellulose	Pure		0.0871
	0.5		0.1019
	1		0.1157
	1.5		0.1673
	2		0.0985
Combination of nano cellulose and nano rosemary extract	Cellulose	Rosemary extract	Absorbed energy (J)
	0.1	0.4	0.1029
	0.4	0.6	0.1234
	0.9	0.6	0.1538
	1.6	0.4	0.1002

As can be seen, with the increase in the weight percentage of rosemary extract and nano cellulose and the combination of 1.5% sample, it gives the most absorbed energy, and after that, the 2% sample starts to decrease significantly, which can be due to the clumping of nanoparticles in it is epoxy, which can reduce the mechanical properties of epoxy.

5. Modeling

The results of the analysis of the effect of impact on the volume sample of the composite with different percentages of rosemary, cellulose and the combination of rosemary and cellulose have been presented with the software. For this purpose, at first, the volumetric sample and the impact tool have been modeled. After modeling the definition of the sample and its characteristics, a tensile test has been performed based on the sample, in which the modulus of elasticity, yield stress, and ultimate stress of the test sample have been entered into the software. The impactor hits the model with a speed of 3.46 m/s.

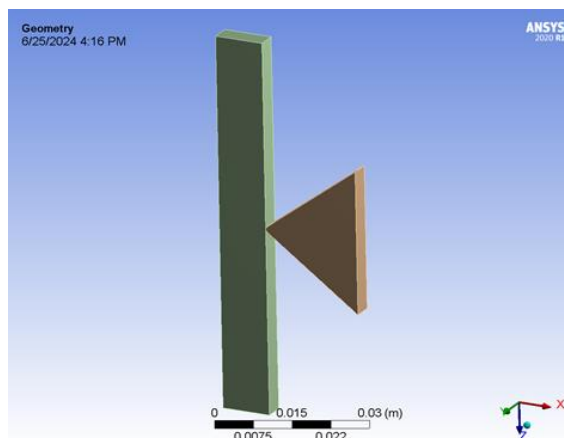


Figure 5. Example modeled in the Ansys software

The analysis performed in the software is of the finite element type and static and dynamic analyzes are performed based on the meshing performed. By changing the number and size of the elements by trial and error, we reached a stage where the answers did not change with the smaller elements and there was a correlation between the answers. In the following, the diagram related to the meshing sensitivity and also the amount of energy absorbed for each of the samples according to the figure 6 is presented.

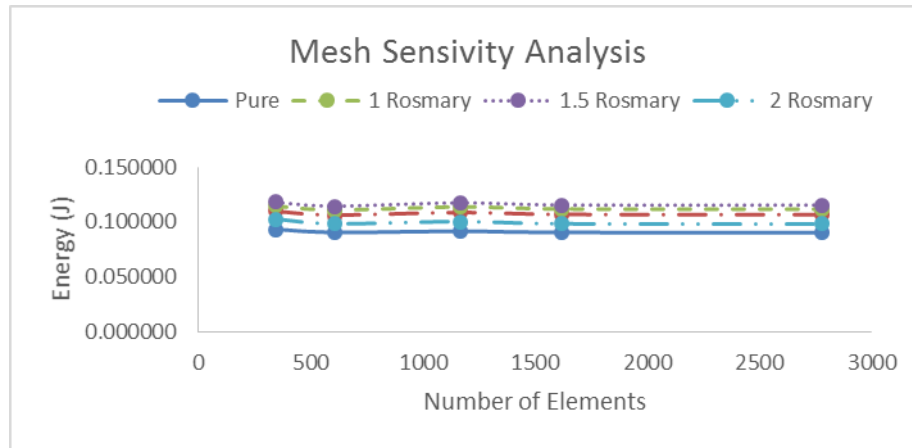


Figure 6. Element meshing sensitivity diagram for samples with uniform distribution

As can be seen from the above diagram, there is no noticeable change in the answers obtained from the values of more than 2500 elements. In Table 2, the numerical values obtained from the Ansys analysis are presented.

Table 2. Numerical values of the Ansys analysis

Sample	Weight percentage of nanoparticles		Absorbed energy (J)
Nano Rosemary extract	Pure		0.0917
	0.5		0.1079
	1		0.1122
	1.5		0.1410
	2		0.1006
Nano cellulose	Pure		0.0917
	0.5		0.1109
	1		0.1038
	1.5		0.1091
	2		0.1053
Combination of nano cellulose and nano rosemary extract	Cellulose	Rosemary extract	Absorbed energy (J)
	0.1	0.4	0.1034
	0.4	0.6	0.1163
	0.9	0.6	0.1437
	1.6	0.4	0.1082

6. Conclusion

In this study, it was shown that according to the Izod impact tests and software modeling on samples made in the laboratory with weight percentages (net, 0.5%, 0.1%, 1.5%, 2%) and the combination of cellulose nanoparticles and rosemary extract with epoxy resin strengthens the obtained nanocomposite against impact and starts to resist fracture due to impact up to 1.5% by weight. This may be due to the existence of a strong bond between the epoxy particles and the extract and nanoparticles, and after that, for the 2% sample, the resistance to failure due to impact decreased, the main reason of which can be due to the weakening of the bond between the matrix and the nanoparticles, and finally Agglomeration of nanoparticles in the sample



بررسی تجربی و عددی خواص ضربه بیوکامپوزیت اپوکسی تقویت شده با نانوسلولز و عصاره گیاه رزماری لرستان

حامد بیرانوند^{الف}، مهدی کرمی خرم آبادی^{ب*}، حمید مظفری^ج

^{الف} کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خرم آباد، خرم آباد، ایران، HamedBeyranvand6891@gmail.com

^ب استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خرم آباد، خرم آباد، ایران، m.k.khorramabadi@gmail.com

^ج استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیامنور، تهران، ایران، mozafari.h@pnu.ac.ir

واژگان کلیدی	چکیده
خواص ضربه، نانو ذرات سلولز، عصاره رزماری، بیوکامپوزیت، تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۰	در این پژوهش به بررسی خواص ضربه بایو کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت شده با نانوسلولز و نانو ذرات عصاره گیاه رزماری لرستان پرداخته می‌شود. نمونه‌ها برای توضیح یکنواخت در ۴ درصد وزنی مختلف (خالص، ۱/۵٪، ۱٪، ۱/۵٪ وزنی، ۲٪ وزنی) ساخته شده و کیفیت ساخت توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی گردیده است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که توزیع انواع نانو ذرات تا میزان ۱/۵٪ وزنی به صورت کاملاً یکنواخت بوده و پس از آن کلوخگی ذرات مشاهده می‌گردد. در مرحله بعد، نمونه‌ها تحت آزمایش ضربه ایزود قرار داده شده که برای انواع تقویت کننده‌ها در ۱/۵٪ وزنی نانو ذرات، بیشترین انرژی جذب شده را به دست می‌دهد و بعد از آن در نمونه ۲٪ وزنی، این مقدار به‌طور چشمگیری شروع به کاهش می‌کند. این روند می‌تواند به دلیل کلوخه شدن نانو ذرات در اپوکسی باشد که خود باعث کاهش خواص مکانیکی گردیده است. در مرحله آخر، به منظور بررسی صحت نتایج به دست آمده، برای انواع نمونه‌های توزیع یکنواخت، مدل سازی به روش اجزاء محدود و به کمک نرم افزار صورت گرفته و نتایج مدل سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده است.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۰۲	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۳۰	

۱- مقدمه

کامپوزیت‌های مبتنی بر الیاف طبیعی به سرعت جایگزین کامپوزیت‌های الیاف مصنوعی می‌شوند. دلیل این امر، زیست تخریب پذیری برتر، تجزیه پذیری، سفتی، نسبت طول به وزن بیشتر و هزینه کم می‌باشد. کامپوزیت ماده‌ای است که از ترکیب دو یا چند ماده ساخته شده است که وقتی به تنهایی استفاده می‌شود ویژگی‌ها و خواص بهبود یافته‌ای را نسبت به هر یک از مواد تشکیل دهنده نشان می‌دهد. کامپوزیت‌های مرکب از الیاف طبیعی و مصنوعی در سال‌های اخیر به عنوان وسیله‌ای برای کاهش وزن و سازگاری با محیط زیست بیشتر توجه صنایع را به خود جلب کرده‌اند. بهره‌برداری بیش از حد و مصرف بیش از حد منابع تجدید ناپذیر اثرات منفی بر محیط زیست دارد و استفاده از کامپوزیت‌های مبتنی بر فسیل در سراسر جهان رو به افزایش است [۱]. از طرف دیگر، ضربه یکی از پدیده‌های بسیار رایجی است که همه مواد و سازه‌ها تجربه می‌کنند. اعمال بار لحظه‌ای بر روی سطح در طی یک رویداد ضربه می‌تواند باعث آسیب‌های غیرقابل پیش بینی شود که گاهی می‌تواند منجر به شکست کامل سازه شود. حتی بدتر است اگر رویداد ضربه با سرعت کم باعث آسیب‌های غیرقابل مشاهده شود. خسارات انباشته شده پس از چندین رویداد مکرر می‌تواند منجر به شکست‌های جدی شود. به طور تجربی، ضربه با سرعت کم را می‌توان با استفاده از ابزار تست سقوط شبیه سازی کرد. آزمایش‌های ضربه ایزود^۱ و چارپی^۲ بیشتر توصیف کننده چقرمگی شکست هستند که می‌تواند

^۱ Izod

^۲ Charpy

به‌عنوان خواص مکانیکی مواد در نظر گرفته شود [۲]. آسیب ضربه می‌تواند عملکرد و همچنین قابلیت اطمینان مواد کامپوزیت را به خطر بیندازد و بنابراین توجه جدی را ایجاب می‌کند. آسیب ناشی از ضربه می‌تواند در طول برنامه‌های کاربردی در حین کار و یا در حین فرآیند تولید رخ دهد. همان‌طور که یک کامپوزیت در معرض ضربه قرار می‌گیرد، تنش خمشی را تجربه می‌کند. خواص خمشی یک کامپوزیت را می‌توان از طریق آزمایش خمشی تعیین کرد. تست خمشی استحکام خمشی مرکب و سفتی آن را فراهم می‌کند. خواص خمشی یک کامپوزیت بینشی اولیه در مورد خواص مقاومت ضربه احتمالی یک کامپوزیت ارائه می‌دهد. به‌طور کلی، مطالعات ادبیات نشان می‌دهد که زمانی که استحکام خمشی یک کامپوزیت هیبریدی بیشتر از غیر هیبریدی باشد، آنگاه استحکام ضربه همان نتیجه را خواهد داشت [۲]. سلولز یکی از اجزای اصلی گیاهان طبیعی است که قابلیت تجدیدپذیری و زیست‌تخریب‌پذیری خوبی دارد. با لیگنین^۳ و همی سلولز در هم تنیده شده است که به حفظ پایداری خوب و استحکام خوب گیاه کمک می‌کند. با توسعه فناوری، سلولز علاقه زیادی را به شکل جدید خود "نانوسلولز" جلب کرده است. نانوسلولز را می‌توان به‌طور عمده به سه دسته تقسیم کرد، از جمله نانولورهای سلولز (CNCs)، نانوفیبریل های سلولز (CNFs)، و سلولز باکتریایی (BC) در میان آن‌ها، CNC ها و CNF ها معمولاً از انواع گیاهان یا جلبک‌ها از طریق روشی به‌اصطلاح "بالا به پایین" استخراج می‌شوند. با این حال، BC توسط باکتری‌ها تولید می‌شود، که به‌اصطلاح یک رویکرد "پایین به بالا" است. امروزه نانوسلولز به دلیل سطح ویژه بزرگ، استحکام مکانیکی خوب، سفتی، زیست‌سازگاری و تجدیدپذیری، توجه گسترده‌ای را برای کاربردها در زمینه‌های تحویل دارو به خود جلب کرده است. این ویژگی‌ها، نانوسلولز را قادر می‌سازد تا ظرفیت بارگیری و اتصال دارویی خوبی داشته باشد [۴]. رمدان و همکاران، تحلیل ضربه را روی صفحات کامپوزیتی به روش تجربی مورد بررسی قرار دادند و اثر پرتابه با شکل‌های متفاوت و هدف با سه ضخامت مختلف را بررسی نمودند. همچنین تأثیر محل قرارگیری ورق آلومینیومی در کامپوزیت مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد زمانی که ورق آلومینیوم در لایه پشت کامپوزیت قرار می‌گیرد بیشترین جذب انرژی را داراست [۵]. ریس و همکاران، برای تقویت کامپوزیت تحت بار ضربه، از نانوخاک رس و پودر کرک استفاده کردند. نتایج حاصل از پژوهش آن‌ها نشان‌دهنده افزایش قابل‌ملاحظه خواص ضربه‌پذیری این کامپوزیت‌ها بود [۶]. چپریان و همکاران، به بررسی حد بالستیک در چندالیه الیافی-فلزی از لایه‌های آلومینیوم و کامپوزیت شیشه/اپوکسی پرداخته است. برای آزمایش نمونه‌ها از دستگاه تفنگ گازی استفاده شده و سرعت ورودی پرتابه ۹۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش نمونه‌های ساخته‌شده، نشان‌دهنده برتری چند لایه الیافی فلزی می‌باشد به‌گونه‌ای که سرعت حد بالستیک، انرژی نفوذ و انرژی مخصوص در این چندلایه‌ها بیشتر از آلومینیوم می‌باشد [۷]. سیکارور و همکاران، یک مدل تحلیلی ارائه کردند تا ناحیه آسیب لایه‌های کامپوزیت را تحت ضربه پایین‌تر از حد بالستیک ارزیابی کنند. این مدل بر این اساس ارائه شده که جذب انرژی پرتابه با مکانیزم‌های مختلف در طول ضربه رخ می‌دهد. نمونه‌های ساخته شده از جنس شیشه، کولار^۴ و ترکیب شیشه و کوالر بوده و جذب انرژی آن‌ها مقایسه گردید. نشان داده شد که کامپوزیت شیشه/کولار با درصد حجمی ۲۷/۵٪ کوالر، به میزان ۲۰٪ جذب انرژی کامپوزیت شیشه/اپوکسی را افزایش می‌دهد [۸]. سیواکومار و همکاران، بر روی رفتار مکانیکی و تأثیر الیاف مختلف تعبیه‌شده با بیوکامپوزیت رزین اپوکسی پودر پوسته تخم‌مرغ مشاهده شد کامپوزیت‌های الیاف طبیعی در حال تبدیل شدن به یک ماده جایگزین برای کامپوزیت‌های الیاف مصنوعی هستند و استفاده از پرکننده زیستی پوسته تخم‌مرغ در کامپوزیت‌های پلیمری به‌عنوان حفاظت از محیط‌زیست مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق از الیاف جوت^۵، کویر^۶ و سیزال^۷ برای ساخت کامپوزیت از الیاف طبیعی استفاده شد. کامپوزیت‌های پلیمری با استفاده از رزین اپوکسی با مقادیر مختلف پودر پوسته تخم‌مرغ (ESP) به‌عنوان پرکننده (۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد وزن) ساخته شدند. خواص مکانیکی و زیست‌تخریب‌پذیری کامپوزیت‌های سنتز شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش نشان داد که کامپوزیت‌هایی با درصد بهینه ۶٪ ESP به‌عنوان پرکننده، ویژگی‌های مکانیکی را به‌طور قابل‌توجهی در هر سه کامپوزیت الیافی بهبود دادند. در بین سه الیاف، الیاف زغال اخته با ۶٪ ESP اضافه شده به ترتیب به میزان ۳۴/۶۴٪، ۴۸/۵۰٪، ۳۳/۳۳٪ و ۳۵/۰۳٪ افزایش قابل‌توجهی در خواص کششی، خمشی، ضربه‌ای و سختی نشان داد. علاوه بر این، درصد کاهش وزن کامپوزیت‌های الیاف گشنیز در ۹ هفته از نظر آزمایش تجزیه‌پذیری قابل

^۳ lignin

^۴ kevlar

^۵ Jute

^۶ coir

^۷ sisal

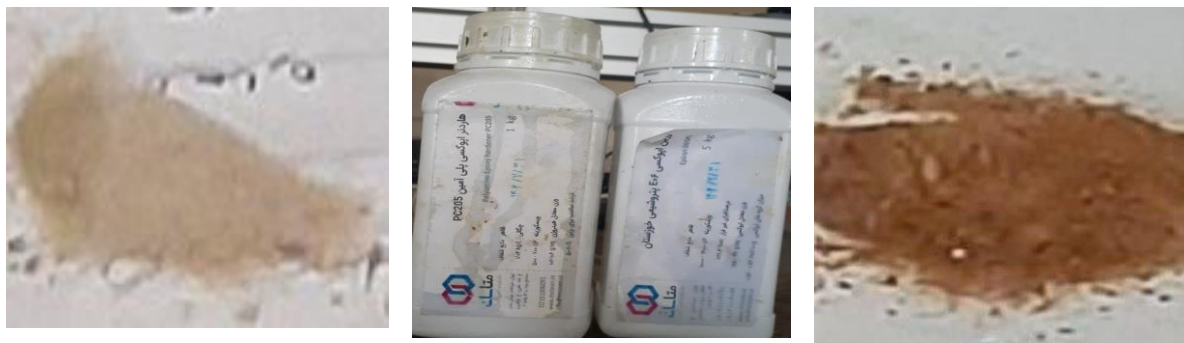
توجه است. در نتیجه، کامپوزیت‌های اپوکسی حاوی پرکننده‌های پوسته تخم مرغ می‌توانند در کاربردهایی که نیاز به استحکام کششی، خمشی، ضربه‌ای و سختی بهتری دارند، استفاده شوند [۹]. تقی پور و همکاران، یک مدل تحلیلی برای پدیده برخورد و نفوذ در اهداف کامپوزیتی ارائه کردند که با بررسی مکانیزم‌های جذب انرژی و مقایسه با انرژی کل گلوله در هنگام برخورد، انرژی باقیمانده پرتابه را پس از خروج از هدف پیش‌بینی می‌کند. با اضافه شدن مکانیک‌های جذب انرژی جدید شامل انرژی جذب شده ناشی از تغییر مکان رأس مخروط تحت نیروی گلوله، انرژی جذب شده در تغییر شکل الاستیک-پالستیک الیاف اولیه و انرژی جذب شده ناشی از اصطکاک ایجاد شده بین گلوله و هدف کامپوزیتی، مدل جذب انرژی دقیقی ارائه شده و سهم هر یک از مکانیزم‌های جذب انرژی در سرعت‌های گوناگون تخمین زده شده است [۱۰]. اخیراً هادی پور و همکاران، خواص مکانیکی و آنتی باکتریال بیوکامپوزیت اپوکسی تقویت شده با ناسلولز و نانو ذرات عصاره گیاه رزماری را مورد بررسی قرار داده‌اند. خواص مکانیکی مورد بررسی، بررسی استحکام کششی نمونه‌ها بوده و نشان داده شده که با افزایش درصد نانو ذرات تا میزان مشخصی، استحکام کششی نیز افزایش یافته است. همچنین ترکیب بهینه شامل بهترین پاسخ‌های مربوط به استحکام کششی و خواص آنتی باکتریال ارائه گردیده است [۱۱].

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، برای انواع بایو کامپوزیت‌ها، خواص مختلفی از جمله خواص آنتی باکتریال و ... قابل بررسی بوده و معمولاً در شکلی بهینه، به صورت هم‌زمان این خواص مورد بررسی قرار می‌گیرد. لذا با توجه به بررسی خواص آنتی باکتریال بیوکامپوزیت اپوکسی تقویت شده با نانوسلولز و نانو ذرات عصاره گیاه رزماری لرستان [۱۱]، در این پژوهش به بررسی تجربی و عددی خواص ضربه بیوکامپوزیت اپوکسی تقویت شده با نانوسلولز و نانو ذرات عصاره گیاه رزماری لرستان پرداخته شده است. نمونه‌ها برای توضیح یکنواخت با چهار درصد وزنی (خالص، ۰/۵٪ درصد وزنی، ۱٪ درصد وزنی، ۱/۵٪ درصد وزنی، ۲٪ درصد وزنی) ساخته شده و کیفیت ساخت آن‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شده است. سپس نمونه‌ها تحت آزمایش ضربه ایزود قرار داده شده و مشاهده گردید که برای توزیع یکنواخت ۱/۵٪ وزنی، بیشترین انرژی جذب شده به دست آمده و بعد از آن در نمونه ۲٪ وزنی، این مقدار به طور چشمگیری شروع به کاهش می‌کند. این امر می‌تواند به دلیل کلوخه شدن نانو ذرات در اپوکسی باشد که خود باعث کاهش خواص مکانیکی اپوکسی می‌گردد. برای بررسی صحت نتایج به دست آمده، با استفاده از روش اجزا محدود و به کمک نرم افزار مدل سازی برای نمونه‌های ذکر شده صورت گرفته و نتایج به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

مواد مورد استفاده در این تحقیق، شامل رزین اپوکسی، نانو ذرات سلولز و نانو ذرات عصاره رزماری است. اپوکسی مورد استفاده در این پژوهش به صورت دو جزئی شامل اپوکسی E06 پتروشیمی خوزستان و سخت کننده (هاردنر) با نام تجاری پلی آمین PC205 با نسبت وزنی ۲:۱ می‌باشد. همچنین نانو ذرات سلولز دارای ابعادی بین ۵۰-۲۰ نانومتر شرکت نانوثانی بوده و نمونه بومی گیاه رزماری نیز از منطقه کمالوند در شهرستان خرم‌آباد (استان لرستان) جمع آوری شده است.

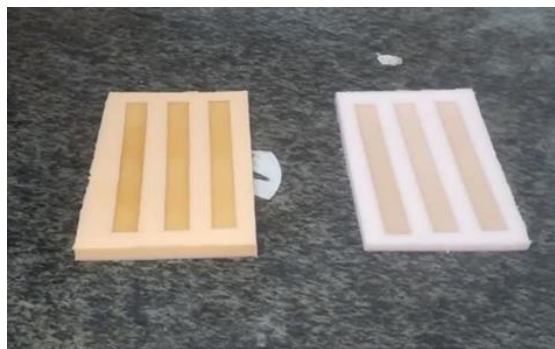


شکل ۱ نانو ذرات عصاره رزماری، رزین و هاردنر، نانوسلولز

۲-۲- ساخت

برای تهیه عصاره آبی ابتدا برگ گیاه رزماری به‌طور مجزا به کمک خردکن برقی به قطعات کوچک خرد شده است. ۱۰ گرم از هر یک از برگ‌های خرد شده به ارلن ۲۵۰ میلی‌لیتری حاوی ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر استریل اضافه گردید و درب ارلن مورد نظر با فویل پوشانده شد. سپس بر روی هیتر درون بشر آب در حال جوشیدن به مدت ۳۰ دقیقه با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. در مرحله بعد عصاره تهیه شده در سانتریفیوژ با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه قرار داده شد. این کار سه بار تکرار شد و هر بار رسوب باقیمانده دور ریخته شد. سپس از صافی‌های فلزی با قطر روزه حدود یک میلی‌متر عبور داده شد. در مرحله بعد عصاره به‌دست‌آمده از کاغذ اضافی واتمن (شماره ۴۲) عبور داده شد. نهایتاً به‌منظور تهیه عصاره عاری از باکتری، عصاره به‌دست‌آمده از فیلتر سرنگی (۲۲ میکرومتری) عبور داده شد. عصاره رزماری سانتریفیوژ شده به‌منظور خشک شدن درون پتری دیش‌های استریل ریخته و در آن در دمای (۶۰ درجه سانتی‌گراد) به مدت ۲۴ ساعت گذاشته شد. بعد از خشک شدن با تیغ اسکالپل^۸ خراش داده و درون میکروتیوب استریل ریخته و برای نگهداری کوتاه مدت در یخچال در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری و سنتز نانو ذرات عصاره رزماری انجام شد. در این مرحله نانو ذرات عصاره در اندازه‌های نانومتر به‌دست‌آمده است.

برای ساخت نمونه‌های بایو کامپوزیت، در ابتدا درصد وزنی نانو ذرات سلولز جهت ترکیب با اپوکسی جدا می‌گردد. سپس نانو ذرات سلولز را با اپوکسی مخلوط کرده و مخلوط را روی حرارت تا رسیدن به دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده و به مدت ۵ دقیقه به‌صورت دستی هم زده می‌شود. بعد از آن به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۲۰۰ دور در دقیقه و با استفاده از همزن مکانیکی ساخت شرکت (KIA) آلمان هم زده می‌شود. سپس ترکیب مورد نظر درون همزن التراسونیک^۹ قرار داده می‌شود. استفاده از این دستگاه علاوه بر حباب زدایی، باعث همگن‌سازی و توزیع یکنواخت نانو ذرات در ماتریس شده و سبب جلوگیری از به وجود آمدن کلوخه‌ها می‌شود. مخلوط درون دستگاه آلتراسونیک با فرکانس ۱۰۰ مگاهرتز و دامنه کاهش ۰/۵ به مدت ۱۵ دقیقه قرار می‌گیرد. سپس حباب‌های ایجاد شده را از میان برده و برای رسیدن دمای مخلوط به ۲۰ درجه سانتی‌گراد زمان داده می‌شود. در پایان به مقدار اشاره شده، هاردنر را به مخلوط اضافه کرده و به مدت ۵ دقیقه به‌صورت دستی هم زده شده تا کاملاً ترکیب شود. مخلوط آماده شده را درون قالب ریخته (شکل ۲) و آن را در دمای اتاق به مدت ۲۴ ساعت و به دنبال آن در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ ساعت قرار داده می‌شود.



شکل ۲ محلول ریخته شده در قالب‌های تیر شکل بر اساس استاندارد ISO 179/2

ترکیب نمونه‌های ساخته‌شده با درصد‌های مختلف وزنی در جدول ۱ ارائه گردید.

جدول ۱ درصد نانوسلولز در ماتریس اپوکسی - هاردنر

نمونه	اپوکسی + هاردنر	سلولز	ضخامت mm
۱	۹۹/۵	۰/۵٪	۴mm
۲	۹۹	۱٪	۴mm
۳	۹۸/۵	۱/۵٪	۴mm
۴	۹۸	۲٪	۴mm

^۸ Scalpel blade

^۹ Ultrasonic

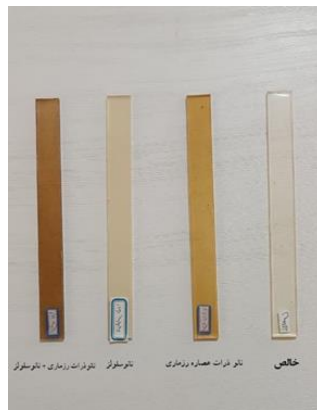
برای نمونه‌های بایو کامپوزیت تقویت شده با نانوذرات رزماری، در ابتدا مقدار درصد وزنی نانوذرات رزماری جدا شده و تمام مراحل که در ساخت اپوکسی و نانوسلولز انجام شد برای پخت این نوع نمونه‌ها تکرار می‌شود.

جدول ۲ درصد نانو ذرات عصاره رزماری در ماتریس اپوکسی - هاردنر

نمونه	اپوکسی+هاردنر	عصاره رزماری	ضخامت mm
۱	۹۹/۵	٪۰/۵	۴mm
۲	۹۹	٪۱	۴mm
۳	۹۸/۵	٪۱/۵	۴mm
۴	۹۸	٪۲	۴mm

جدول ۳ درصد نانوذرات عصاره رزماری+نانوسلولز در ماتریس اپوکسی - هاردنر

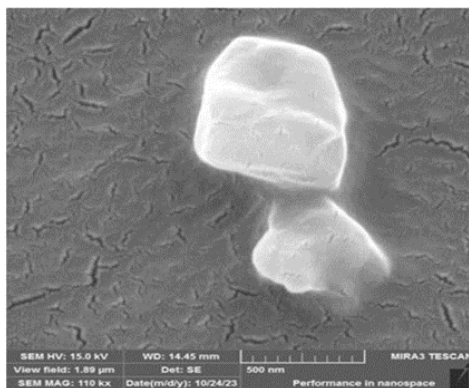
نمونه	اپوکسی+هاردنر	عصاره رزماری	نانوسلولز	ضخامت mm
۱	۹۹/۵	٪۰/۴	٪۰/۱	۴mm
۲	۹۹	٪۰/۶	٪۰/۴	۴mm
۳	۹۸/۵	٪۰/۶	٪۰/۹	۴mm
۴	۹۸	٪۰/۴	٪۱/۶	۴mm



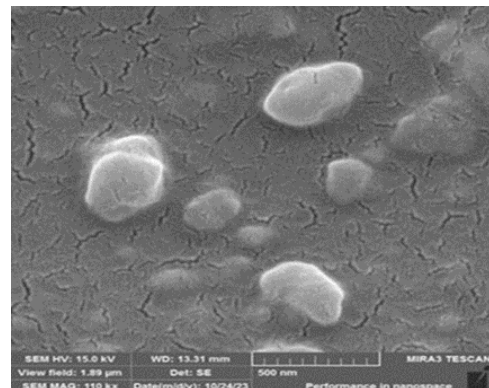
شکل ۳ نمونه خالص و بیو کامپوزیت‌ها با ۱/۵٪ وزنی تقویت کننده‌های متفاوت

۳- بررسی کیفیت ساخت

در این قسمت عکس‌های سطح مقطع نمونه‌های ساخته شده پس از پاشیدن لایه‌ای بسیار نازک از طلا بر روی نمونه و به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی گرفته شده و مورد بررسی قرار می‌گیرند. میکروسکوپ الکترونی روبشی برای نمونه‌های با توزیع یکنواخت نانو ذرات از نوع ESEM - F مدل MIRA3LMU ساخت شرکت TESCAN می‌باشد که برای عکس برداری استفاده می‌شود.

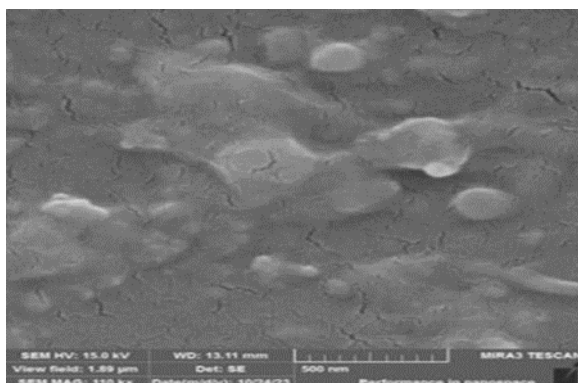


شکل ۵ تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونه بیوکامپوزیت با ۲٪ نانوسلولز

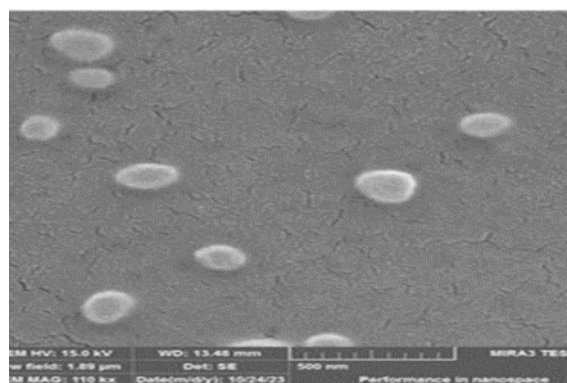


شکل ۴ تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونه بیوکامپوزیت با ۵٪ نانوسلولز

همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شد توزیع نانو ذرات سلولوز به صورت کاملاً یکنواخت می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده با افزایش درصد نانو ذرات سلولوز، میان این نانو ذرات اتصال برقرار گردیده و توده‌هایی تشکیل شده که نشان از کلوخگی می‌باشد.

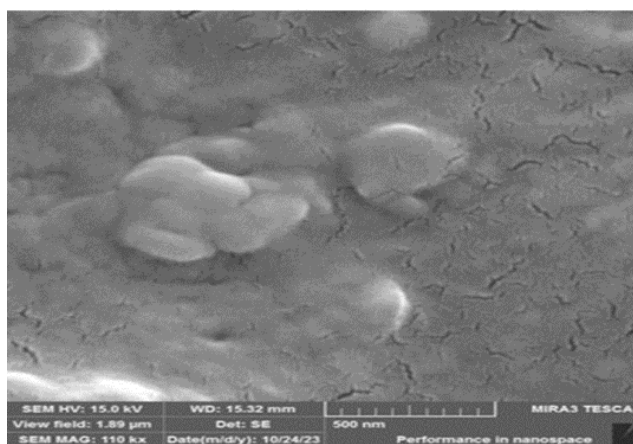


شکل ۷ تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونه بیوکامپوزیت با ۲٪ نانو ذرات عصاره رزماری



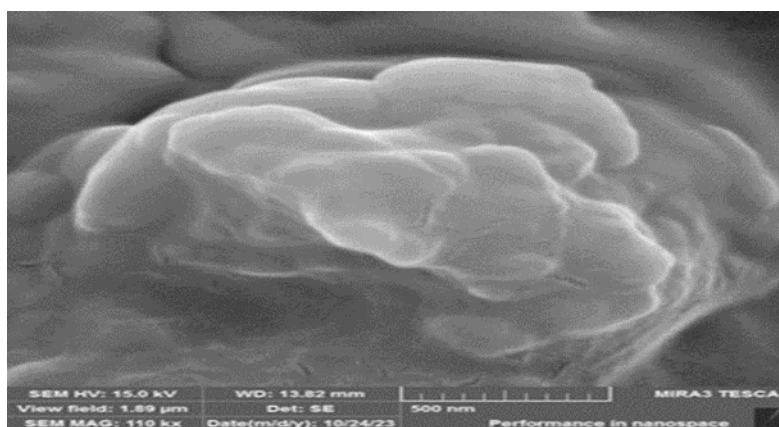
شکل ۶ تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونه بیوکامپوزیت با ۵٪ نانو ذرات عصاره رزماری

همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده می‌شود توزیع نانو ذرات عصاره به صورت کاملاً یکنواخت می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده با افزایش درصد نانو ذرات عصاره، میان این نانو ذرات اتصال برقرار گردیده و توده‌هایی تشکیل شده که نشان از کلوخگی می‌باشد.



شکل ۸ تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونه ترکیبی ۵٪ با نانوذرات عصاره رزماری و نانوذرات سلولوز

همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده می‌شود توزیع نانو ذرات سلولوز و نانوذرات عصاره رزماری به صورت کاملاً یکنواخت می‌باشد.



شکل ۹ تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونه ترکیبی ۲٪ با نانوذرات عصاره رزماری و نانوذرات سلولوز

که همان طور که در شکل ۹ نشان داده شده با افزایش درصد نانو ذرات سلولز و نانو ذرات عصاره رزماری، میان این نانو ذرات سلولز و همین طور نانوذرات عصاره اتصال برقرار گردیده و توده‌هایی تشکیل شده که نشان از کلوخگی می‌باشد.

۴- بررسی تجربی

ابعاد نمونه‌های ساخته شده (عرض ۱۰ میلی‌متر، طول ۸۰ میلی‌متر و ضخامت ۴ میلی‌متر) برای انجام آزمایش ضربه بر اساس استاندارد ISO179/2 و شامل نمونه خالص و نمونه‌های با درصد وزنی و توزیع مختلف نانو ذرات رزماری و نانو ذرات سلولز (۰/۵٪، ۱٪، ۱/۵٪ و ۲٪) می‌باشد. نمونه‌های ساخته شده در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰ نمونه‌های تیر ساخته شده

تست ضربه ایزود با استفاده از دستگاه تست ضربه ساخت شرکت (گوتک^{۱۰} مدل OT_70_45_MDN) کشور تایوان انجام شده و مشخصات آن به شرح زیر می‌باشد:

- سرعت ضربه ۳/۴۶ m/s
- زاویه ضربه ۱۵۰ درجه
- جنس چکش از فولاد با قدرت سایش بالا و محکم برای جلوگیری از تغییر شکل و قابلیت انتقال نیرو
- دقت زاویه ۵ صدم درجه
- دقت انرژی یک صدم ژول
- اندازه دستگاه ۷۸*۳۲*۶۰ سانتی‌متر
- وزن دستگاه ۲۵۰ کیلوگرم



شکل ۱۱ دستگاه تست ضربه ساخت شرکت گوتک مدل (GT-70-45MDN)

¹⁰ Gotek

بعد از آماده سازی هر یک از نمونه ها و قرار دادن آن در میان تکیه گاه ها مانند شکل ۱۱، ابعاد و داده های مورد نیاز دستگاه تست ضربه شامل طول، عرض و ضخامت را وارد نموده و بر اساس استاندارد، آزمایش ضربه انجام می شود در جدول ۴، ۵، ۶ مقادیر تجربی به دست آمده از آزمایش ضربه ارائه گردیده است.

جدول ۴ مقدار انرژی جذب شده برای بایو کامپوزیت تقویت شده با نانو ذرات عصاره رزماری

مقدار انرژی جذب بر حسب ژول	درصد عصاره رزماری
۰/۰۸۷۱	خالص
۰/۱۰۶۴	%۰/۱۵
۰/۱۲۰۷	%۱
۰/۱۵۱۹	%۱/۱۵
۰/۰۹۳۰	%۰/۱۲

جدول ۵ مقدار انرژی جذب شده برای بایو کامپوزیت تقویت شده با نانو ذرات سلولز

مقدار انرژی جذب بر حسب ژول	درصد ناسلولز
۰/۰۸۷۱	خالص
۰/۱۰۱۹	%۰/۱۵
۰/۱۱۵۷	%۱
۰/۱۶۷۳	%۱/۱۵
۰/۰۹۸۵	%۰/۱۲

جدول ۶ مقدار انرژی جذب شده برای بایو کامپوزیت تقویت شده با ترکیب نانو ذرات سلولز و عصاره رزماری

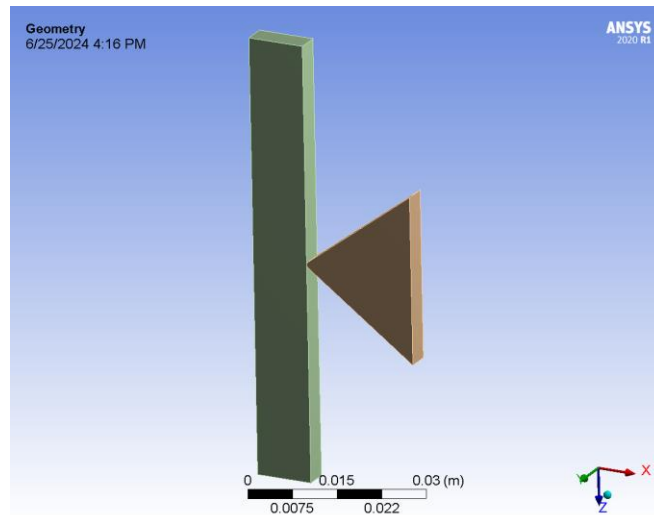
مقدار انرژی جذب بر حسب ژول	درصد ترکیبی سلولز و عصاره رزماری
۰/۰۸۷۱	رزماری سلولز
۰/۱۰۲۹	%۰/۱۱ %۰/۱۴
۰/۱۲۳۴	%۰/۱۴ %۰/۰۶
۰/۱۵۳۸	%۰/۰۹ %۰/۰۶
۰/۱۰۰۲	%۱/۱۶ %۰/۱۴

همان طور که مشاهده می شود با افزایش درصد وزنی نانو ذرات عصاره رزماری و نانوسلولز و ترکیبی نمونه %۱/۱۵ بیشترین انرژی جذب شده را می دهد و بعد از آن نمونه %۲ به طور چشمگیر شروع به کاهش می کند که این می تواند به دلیل کلوخه شدن نانو ذرات در اپوکسی باشد که خود می تواند باعث کاهش خواص مکانیکی اپوکسی گردد.

۵- مدل سازی

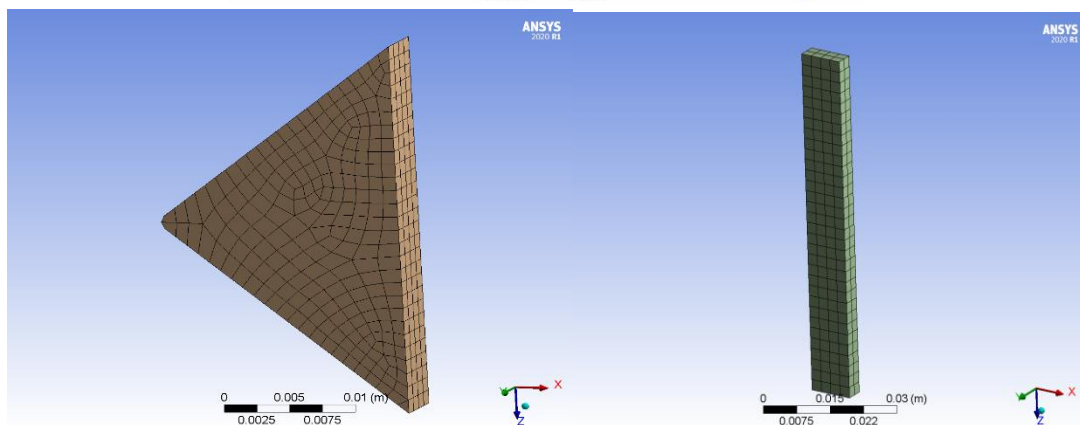
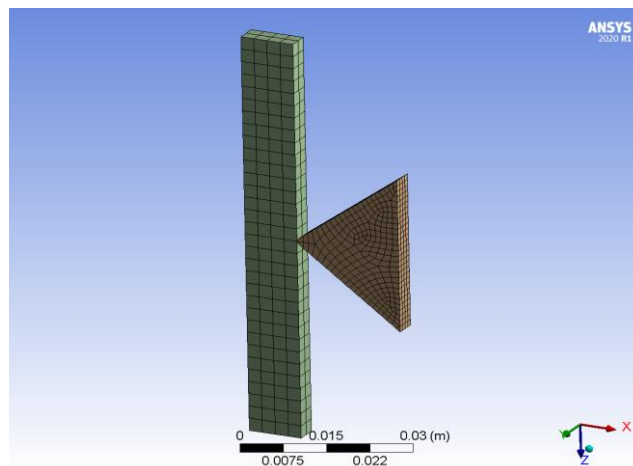
نتایج حاصل از تحلیل اثر ضربه به نمونه حجمی کامپوزیت با درصد های مختلف رزماری، سلولز و ترکیب رزماری و سلولز با استفاده از نرم افزار انسیس^{۱۱} ارائه گردیده است. برای این کار در ابتدا نمونه حجمی و ابزار ضربه زننده به نمونه مدل سازی گردیده است. بعد از مدل سازی تعریف نمونه و ویژگی های آن بر اساس نمونه تست کشش انجام گرفته است که در آن مدول الاستیسیته، تنش تسلیم و تنش حد نهایی از نمونه تست در نرم افزار وارد گردیده است. قطعه ضربه زننده با سرعت ۳/۴۶ m/s به مدل ضربه وارد می کند.

^{۱۱} ANSYS Software



شکل ۱۲ مدل سازی انجام شده در نرم افزار

تحلیل انجام شده در نرم افزار از نوع اجزاء محدود می باشد و بر اساس مش بندی انجام شده تحلیل های استاتیکی و دینامیکی انجام می پذیرد. با تغییر تعداد و سایز المان ها به صورت سعی و خطا به مرحله ای رسیدیم که پاسخ ها با ریزتر شدن المان ها تغییر نیافت و همبستگی پاسخ ها وجود داشت.



شکل ۱۳ مش گذاری انجام شده در نرم افزار برای قطعه ضربه زننده و کامپوزیت مدل

سرعت بر اساس نمونه آزمایش انجام شده در آزمایشگاه انتخاب گردیده است تا بتوان اعتبارسنجی نتایج را با معیار درستی انجام داد. بر اساس استاندارد D256-ASTM و D6110-ASTM جنس چکش ضربه زننده از فولاد با استحکام بالا و مقاوم به سایش می باشد که در جدول ذیل آورده شده است.

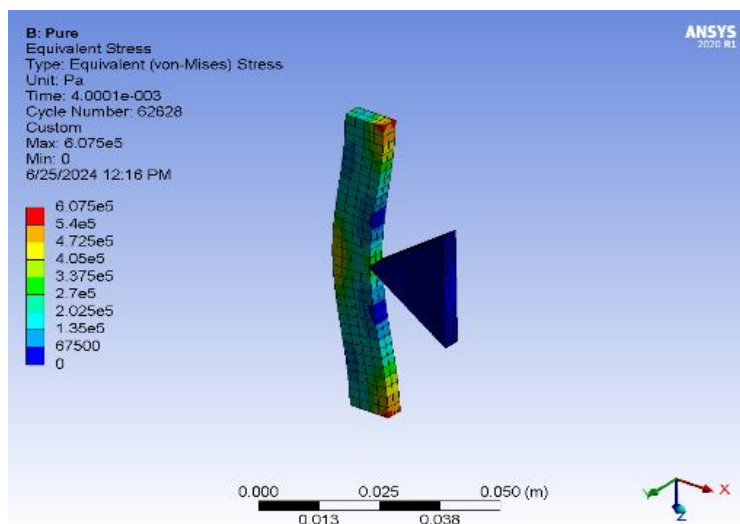
جدول ۷ مشخصات ضربه زننده

Value	Property
۸/۲۱ Kg/m	Density
۲۹۲ Mpa	Yield Strength
۷۵۰-۵۰۰ Mpa	Tensile Strength
۲۱۰-۱۹۲ Mpa	Elastic Modulus
۸۵ max	Hardness
%۵۰	Elongation

در انتها نتایج تحلیل با نرم افزار برای نمونه های حجمی مختلف در کنار یکدیگر آورده شده است و با نتایج حاصل از آزمایش مقایسه گردیده است. مشخصات مکانیکی قطعه ضربه زننده و نمونه های حجمی نماینده کامپوزیت در جدول ۷ آورده شده است:

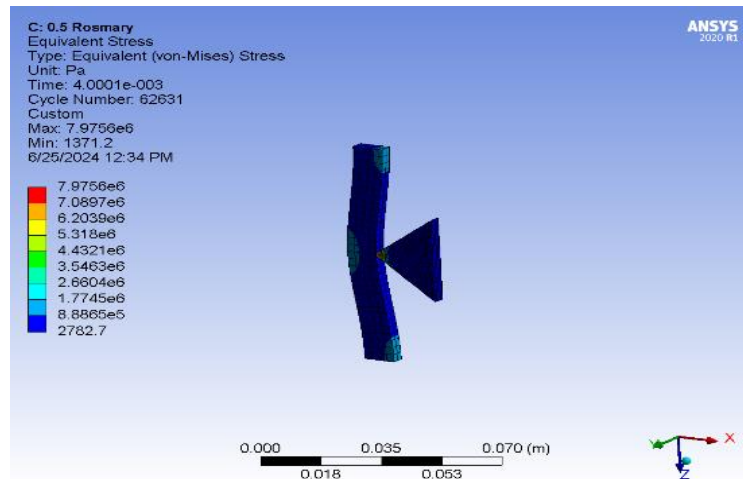
جدول ۸ مشخصات مکانیکی مدل [۱۱]

نمونه حجمی	مشخصه مکانیکی	خالص	%۵/۰	%۱	%۱/۵	%۲
	مدول الاستیسیته MPa	۲/۳۳۳	۶/۰۵۷	۷/۰۱۳	۷/۸۲۶	۴/۴۲۳
Rosmary	تنش تسلیم [kN/m ²]	۶۰۵۹/۵۶۶	۲۰۵۴۶/۰۸۷	۲۵۹۶۵/۲۱۰	۲۵۶۲۲/۹۶۴	۱۸۳۸۶/۷۸
	تنش حد نهایی MPa	۱۱/۶۹۶	۴۱/۱۱۹	۴۹/۲۷۷	۵۰/۶۹۲	۳۹/۹۶۱
	مدول الاستیسیته MPa	۲/۳۳۳	۳/۸۷۷	۶/۲۳۱	۸/۷۰۷	۵/۴۹۵
Cellulose	تنش تسلیم [kN/m ²]	۶۰۵۹/۵۶۵	۷۵۷۵/۹۹۳	۱۴۴۵۷/۹۲۱	۳۱۹۶۳/۶۹۶	۱۴۵۹۰/۳۵۲
	تنش حد نهایی MPa	۱۱/۶۹۶	۱۵/۱۳۶	۲۸/۶۴۲	۶۳/۶۷۵	۲۹/۱۲۰
	مدول الاستیسیته MPa	۲/۳۳۳	۵/۰۶۳	۷/۹۱۰	۸/۱۷۵	۶/۱۳۳
Blended	تنش تسلیم [kN/m ²]	۶۰۵۹/۵۹۵	۱۳۸۲۵/۰۴۷	۱۳۸۵۸/۷۰۴	۳۳۴۲۵/۳۹۵	۱۰۰۶۴/۵۰۴
	تنش حد نهایی MPa	۱۱/۶۹۶	۱۶/۵۰۸	۲۷/۳۷۷	۴۰/۲۹۲	۱۵۷/۲۰



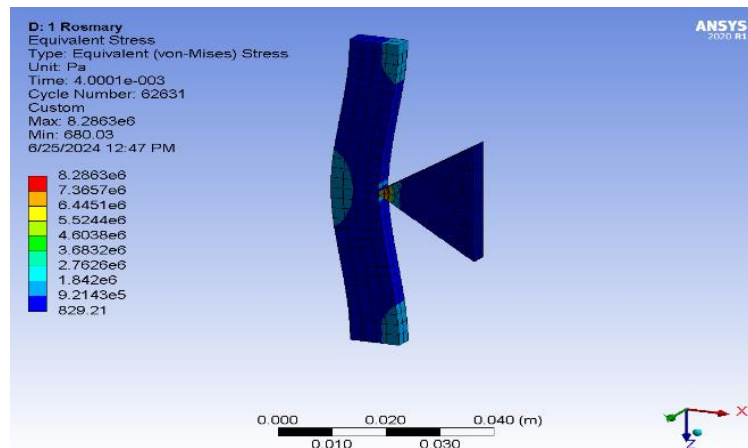
شکل ۱۴ تنش حاصل از ضربه به نمونه کامپوزیت خالص مدل

همان طور که مشاهده می شود برای نمونه خالص بر اثر ضربه با سرعت ۳/۴۶ m/s، ماکزیمم تنش معادل $۶/۰۷ \times ۱۰^۵$ Pa حاصل گردیده است. در ادامه نتایج حاصل ضربه برای نمونه های نانوذرات رزماری (خالص، ۱/۵، ۱/، ۱/۵، ۲/، %) نشان داده می شود.



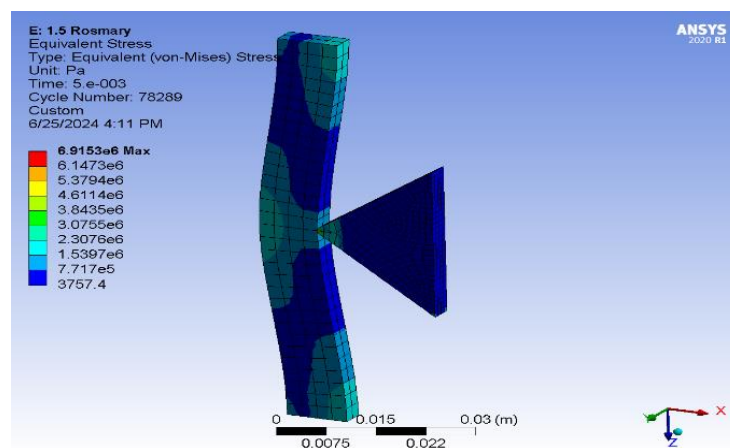
شکل ۱۵ تنش حاصل از ضربه به نمونه کامپوزیت با ۰/۵ درصد رزماری مدل

برای نمونه نانو کامپوزیت با ۰/۵ درصد رزماری بر اثر ضربه با سرعت ۳/۴۶ m/s، ماکزیمم تنش معادل $7/97 \times 10^6$ Pa حاصل گردیده است.



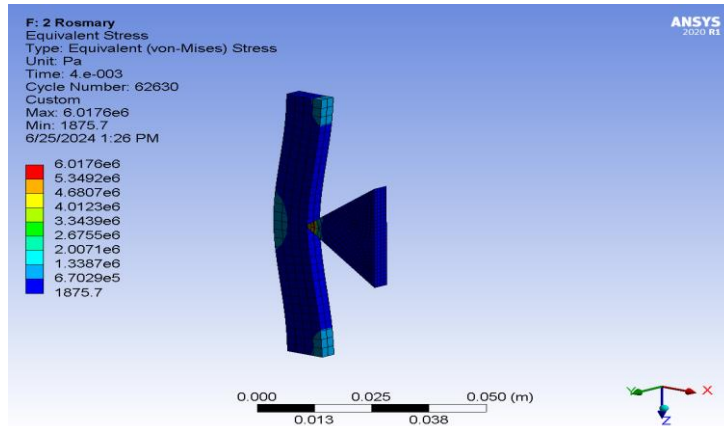
شکل ۱۶ تنش حاصل از ضربه به نمونه کامپوزیت با ۱ درصد رزماری مدل

برای نمونه نانو کامپوزیت با ۱ درصد رزماری بر اثر ضربه با سرعت ۳/۴۶ m/s، ماکزیمم تنش معادل $8/28 \times 10^6$ Pa حاصل گردیده است.



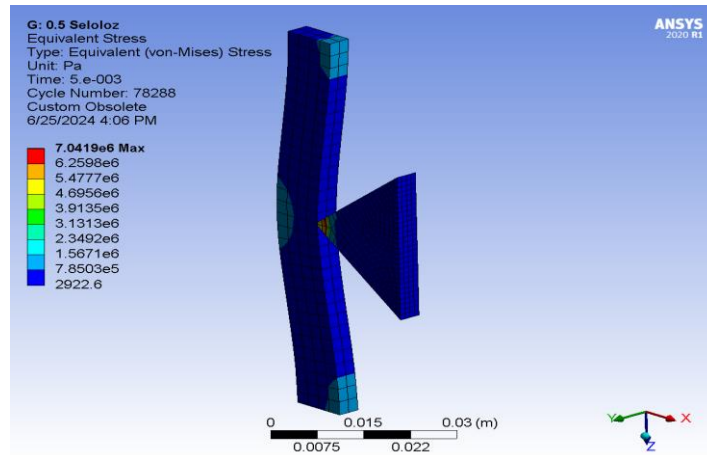
شکل ۱۷ تنش حاصل از ضربه به نمونه کامپوزیت با ۱/۵ درصد رزماری مدل

برای نمونه نانو کامپوزیت با ۱/۵ درصد رزماری بر اثر ضربه با سرعت ۳/۴۶ m/s، ماکزیمم تنش معادل $6/91 \times 10^6$ Pa حاصل گردیده است.



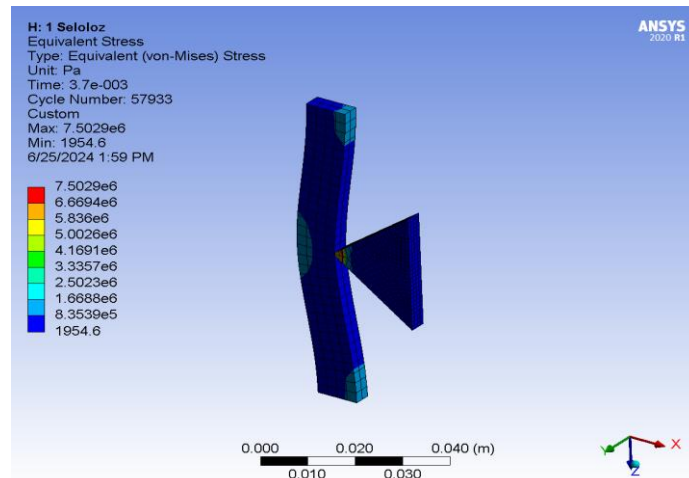
شکل ۱۸ تنش حاصل از ضربه به نمونه کامپوزیت با ۲ درصد رزماری مدل

برای نمونه نانوکامپوزیت با ۲ درصد رزماری بر اثر ضربه با سرعت ۳/۴۶ m/s، ماکزیمم تنش معادل $6/1 \times 10^6$ Pa حاصل گردیده است.



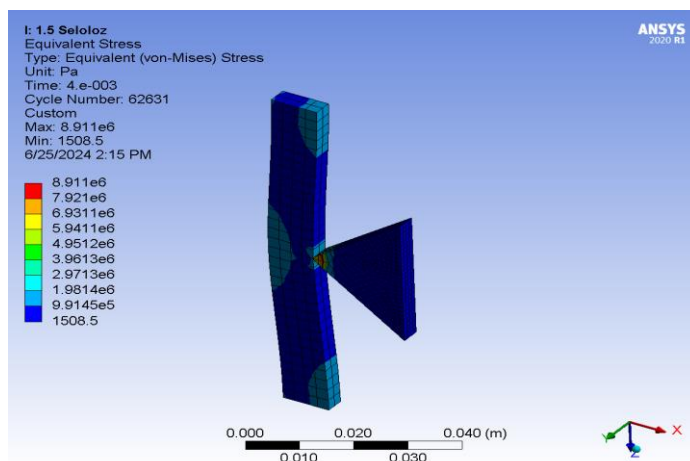
شکل ۱۹ تنش حاصل از ضربه به نمونه کامپوزیت با ۰,۵ درصد سلولوز مدل

برای نمونه نانوکامپوزیت با ۰/۵ درصد سلولوز بر اثر ضربه با سرعت ۳/۴۶ m/s، ماکزیمم تنش معادل $7/04 \times 10^6$ Pa حاصل گردیده است.



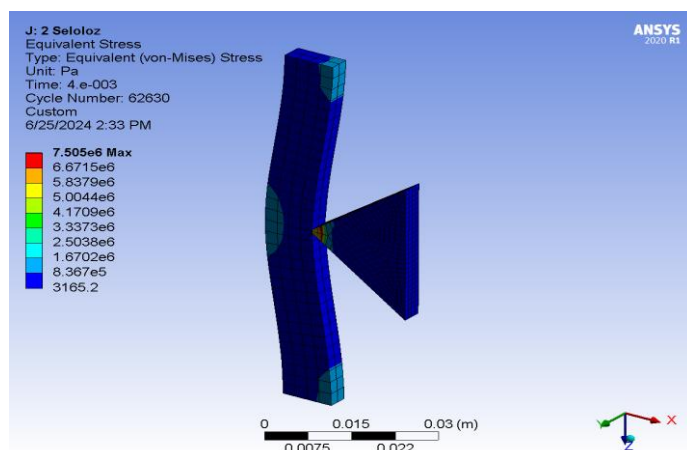
شکل ۲۰ تنش حاصل از ضربه به نمونه کامپوزیت با ۱ درصد سلولوز مدل

برای نمونه نانوکامپوزیت با ۱ درصد سلولوز بر اثر ضربه با سرعت ۳/۴۶ m/s، ماکزیمم تنش معادل $7/502 \times 10^6$ Pa حاصل گردیده است.



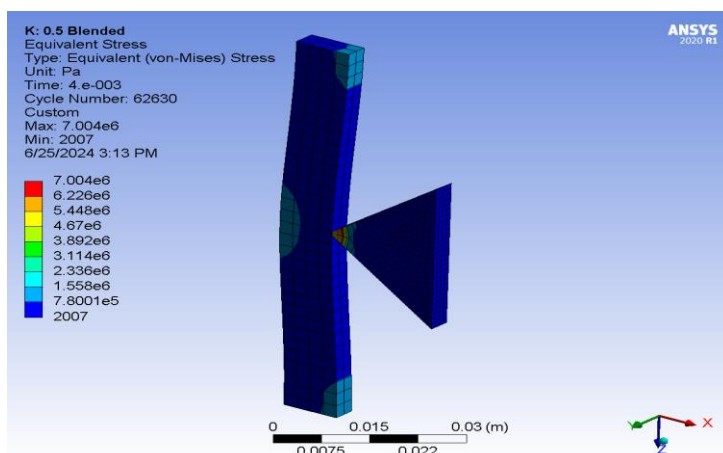
شکل ۲۱ تنش حاصل از ضربه به نمونه کامپوزیت با ۱/۵ درصد سلولز مدل

برای نمونه نانوکامپوزیت با ۱/۵ درصد سلولز بر اثر ضربه با سرعت ۳/۴۶ m/s، ماکزیمم تنش معادل 8.911×10^6 Pa حاصل گردیده است.



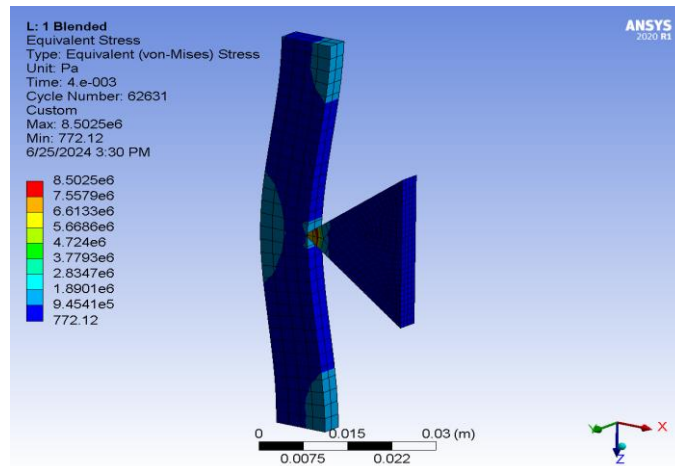
شکل ۲۲ تنش حاصل از ضربه به نمونه کامپوزیت با ۲ درصد سلولز مدل

برای نمونه نانوکامپوزیت با ۲ درصد سلولز بر اثر ضربه با سرعت ۳/۴۶ m/s، ماکزیمم تنش معادل 7.505×10^6 Pa حاصل گردیده است.



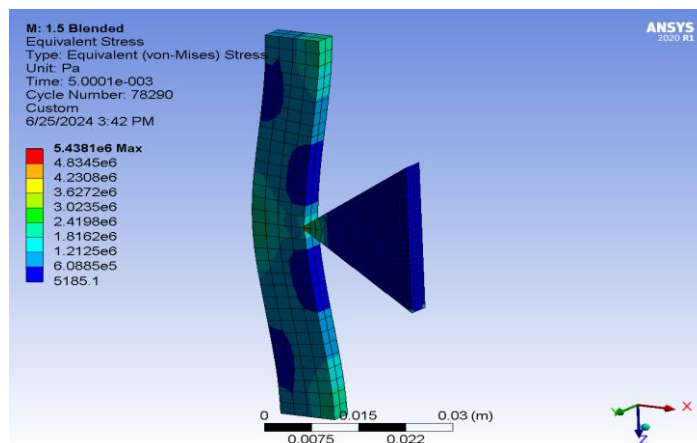
شکل ۲۳ تنش حاصل از ضربه به نمونه کامپوزیت با ۰/۵ درصد ترکیب رزماری و سلولز مدل

برای نمونه نانوکامپوزیت با ۰/۵ درصد ترکیب رزماری و سلولز بر اثر ضربه با سرعت ۳/۴۶ m/s، ماکزیمم تنش معادل 7.004×10^6 Pa حاصل گردیده است.



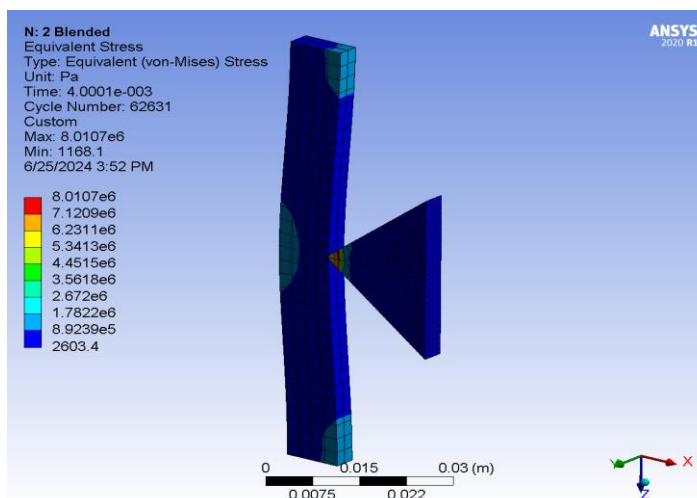
شکل ۲۴ تنش حاصل از ضربه به نمونه کامپوزیت با ۱ درصد ترکیب رزماری و سلولز مدل

برای نمونه نانوکامپوزیت با ۱ درصد ترکیب رزماری و سلولز بر اثر ضربه با سرعت $3/46 \text{ m/s}$ ، ماکزیمم تنش معادل $8/5025 \times 10^6 \text{ Pa}$ حاصل گردیده است.



شکل ۲۵ تنش حاصل از ضربه به نمونه کامپوزیت با ۱/۵ درصد ترکیب رزماری و سلولز مدل

برای نمونه نانوکامپوزیت با ۱/۵ درصد ترکیب رزماری و سلولز بر اثر ضربه با سرعت $3/46 \text{ m/s}$ ، ماکزیمم تنش معادل $5/4381 \times 10^6 \text{ Pa}$ حاصل گردیده است.

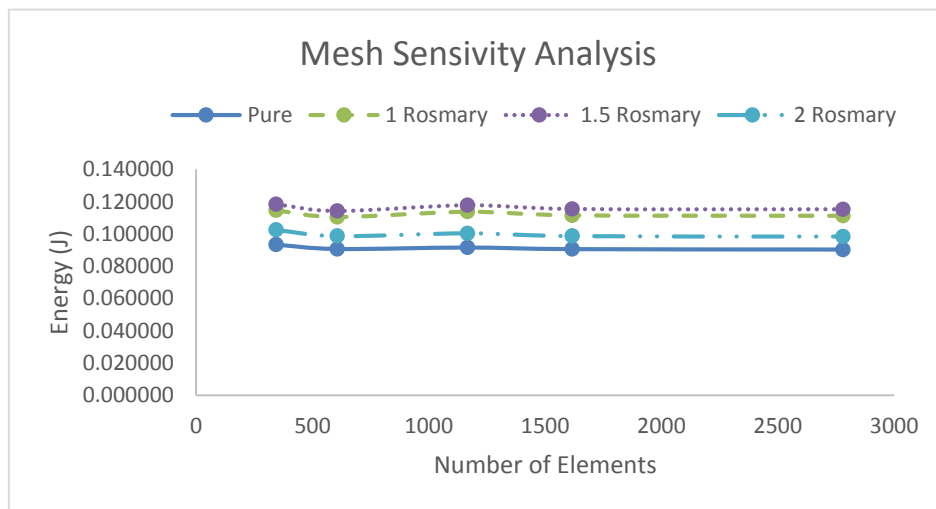


شکل ۲۶ تنش حاصل از ضربه به نمونه کامپوزیت با ۲ درصد ترکیب رزماری و سلولز مدل

برای نمونه نانوکامپوزیت با ۲ درصد ترکیب رزماری و سلولز بر اثر ضربه با سرعت $3/46 \text{ m/s}$ ، ماکزیمم تنش معادل

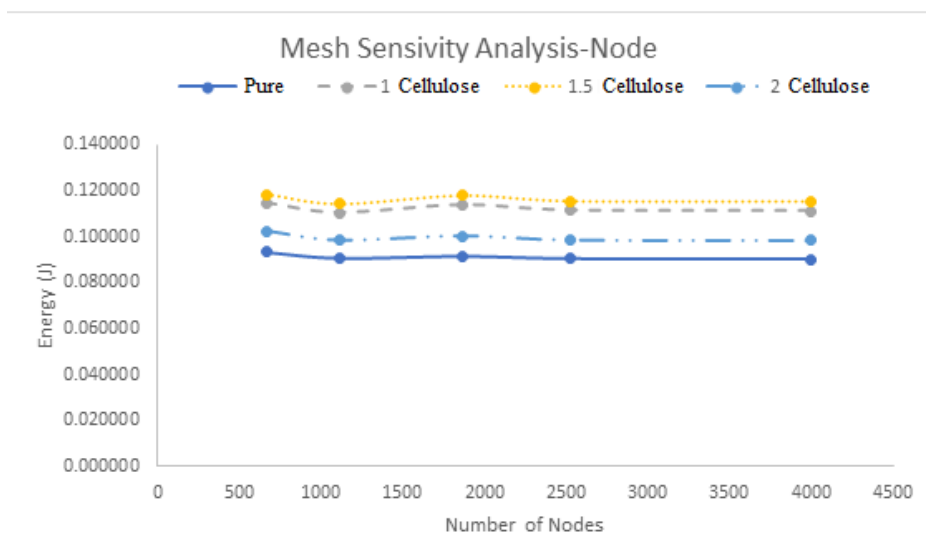
Pa 1.07×10^6 حاصل گردیده است.

در پایان این بخش، نمودار مربوط به حساسیت مش بندی و همچنین مقادیر انرژی جذب شده برای هر یک از نمونه‌ها مطابق شکل‌ها و جداول زیر ارائه گردیده است.



شکل ۲۷ نمودار حساسیت مش بندی المان برای نمونه‌های با توزیع یکنواخت نانوذرات رزماری

همان‌طور که از نمودار فوق مشاهده می‌شود از مقادیر بیش از ۲۵۰۰ المان، تغییر محسوسی در پاسخ‌های به‌دست‌آمده به وجود نمی‌آید.



شکل ۲۸ نمودار حساسیت مش بندی نود برای نمونه‌های با توزیع یکنواخت نانوذرات سلولز

همان‌طور که نمودار فوق مشاهده می‌شود از مقادیر ۴۰۰۰ نود، تغییر محسوسی در پاسخ‌های به‌دست‌آمده به وجود نمی‌آید.

جدول ۹ مقادیر انرژی جذب با استفاده از نرم‌افزار

خالص	٪۰/۵	٪۱	٪۱/۵	٪۲	
Rosmary	۰/۰۹۱۷۷۷۵۴۵	۰/۱۰۷۹۲۷۲۷۳	۰/۱۱۲۲۶۷۵	۰/۱۴۱۰۹۸۸۶۴	۰/۱۰۰۶۰۰۰۴۵
Cellulose	۰/۰۹۱۷۷۷۵۴۵	۰/۱۱۰۹۹۳۱۳۶	۰/۱۰۳۸۵۲۱۳۶	۰/۱۰۹۱۶۲۹۰۹	۰/۱۰۵۳۸۳۸۶۴
Blended	۰/۰۹۱۷۷۷۵۴۵	۰/۱۰۳۴۳۹۲۷۳	۰/۱۱۶۳۳۴۳۱۸	۰/۱۴۳۷۲۵۴۵۵	۰/۱۰۸۲۷۱۶۳۶

۶- بحث و نتیجه گیری

در این مطالعه نشان داده شد با توجه به انجام آزمون‌های تست ضربه ایزود و مدل‌سازی با نرم‌افزار بر روی نمونه‌های ساخته شده در آزمایشگاه با درصدهای وزنی (خالص، ۰/۵٪، ۰/۱٪، ۰/۱۵٪، ۰/۲٪) و ترکیب نانو ذرات سلولز و نانو ذرات عصاره رزماری با رزین اپوکسی باعث تقویت نانو کامپوزیت به دست آمده و در مقابل ضربه می‌باشد و شروع به مقاومت در مقابل شکست به علت ضربه تا ۰/۱۵٪ وزنی می‌کند. این ممکن است به دلیل وجود پیوند قوی بین ذرات اپوکسی و نانو ذرات عصاره و نانو ذرات سلولز باشد و بعد از آن برای نمونه ۰/۲٪ مقاومت در مقابل شکست به علت ضربه کاهشی پیدا کرد که علت اصلی آن می‌تواند به دلیل تضعیف پیوند ماتریس با نانو ذرات و نهایتاً کلوخه شدن نانو ذرات در نمونه باشد. در جدول زیر مقایسه میان نتایج تجربی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار ارائه گردیده است.

جدول ۱۰ مقایسه میان نتایج تجربی و مدل‌سازی با نرم‌افزار

خالص	۰/۵٪	۰/۱٪	۰/۱۵٪	۰/۲٪	
۰/۰۹۱۷۷۷۵۴۵	۰/۱۰۷۹۲۷۲۷۳	۰/۱۱۲۲۶۷۵	۰/۱۴۱۰۹۸۸۶۴	۰/۱۰۰۶۰۰۰۴۵	Analysis
۰/۰۸۷۱	۰/۱۰۶۴	۰/۱۲۰۷	۰/۱۵۱۹	۰/۰۹۳۰	Experimental result
۰/۰۹۱۷۷۷۵۴۵	۰/۱۱۰۹۹۳۱۳۶	۰/۱۰۳۸۵۲۱۳۶	۰/۱۰۹۱۶۲۹۰۹	۰/۱۰۵۲۸۳۸۶۴	Analysis
۰/۰۸۷۱	۰/۱۰۱۹	۰/۰۹۶۸	۰/۱۰۴۷	۰/۰۹۸۵	Experimental result
۰/۰۹۱۷۷۷۵۴۵	۰/۱۰۳۴۳۹۲۷۳	۰/۱۱۶۳۳۴۳۱۸	۰/۱۴۳۷۲۵۴۵۵	۰/۱۰۸۲۷۱۶۳۶	Analysis
۰/۰۸۷۱	۰/۱۰۲۹	۰/۱۲۳۴	۰/۱۵۳۸	۰/۱۰۰۲	Experimental result

Authorship Contribution Statement

Hamed Beyranvand



Biography: Hamed Biranvand received his master's degree in mechanical engineering in 1403 from Islamic Azad University, Khorramabad branch. His current research includes experimental and numerical investigation of impact properties of epoxy biocomposite reinforced with nano cellulose and rosemary plant of Lorestan.

Contribution Statement: Sample preparation, Experimental study, Writing the original draft.

Dr. Mahdi Karami Khorramabadi



Biography: Mahdi Karami Khorramabadi received his PhD in Mechanical Engineering from Razi University in 2018. He is currently Assistant Professor at the Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Khorramabad Branch, Iran. His current research interest includes preparation of functionally graded nanocomposites and modelling with theoretical predictions on mechanical properties of polymer/clay nanocomposites. His research also focuses on mechanical buckling, free vibration and dynamic stability analysis of functionally graded nanocomposite columns.

Contribution Statement: Validation, Analysis, Supervision, Project administration, Investigation.

Mohammad Reza Babaei zarch



Biography: Hamid Mozafari received his Ph.D. in mechanical engineering from the Technical University of Malaysia in 2012. He now serves as an assistant professor in the mechanical engineering department at Payame Noor University in Tehran. His research is currently centered on the development and utilization of nanocomposite materials.

Contribution Statement: Validation, Analysis, review & editing.

۶- مراجع

- [1] Sivakumar A A, Sankarapandian S, Avudaiappan S, & Flores E I S. Mechanical Behaviour and Impact of Various Fibres Embedded with Eggshell Powder Epoxy Resin Biocomposite. *Materials*. 2022; 15: 9044.
- [2] Md Shah A U, Hameed Sultan M T, Safri S N A. Experimental evaluation of low velocity impact properties and damage progression on bamboo/glass hybrid composites subjected to different impact energy levels. *Polymers*. 2020;12:1288.
- [3] Najeeb M I, Hameed Sultan M T, Md Shah A U, Muhammad Amir S M, Safri S N A, Jawaid M, Shari M R. Low-velocity impact analysis of pineapple leaf fiber (PALF) hybrid composites. *Polymers*. 2021;13: 3194.
- [4] Huo Y, Liu Y, Xia M, Du H, Lin Z, Li B, Liu H. Nanocellulose-based composite materials used in drug delivery systems. *Polymers*. 2022; 14: 2648.
- [5] Ramadhan A A, Talib A A, Rafie A M, Zahari R. High velocity impact response of Kevlar-29/epoxy and 6061-T6 aluminum laminated panels. *Materials & Design*. 2013; 43: 307-321.
- [6] Reis P N B, Ferreira J A M, Santos P, Richardson M O W, Santos J B. Impact response of Kevlar composites with filled epoxy matrix. *Composite Structures*. 2012; 94: 3520-3528.
- [7] Chaparian Y, Kabiri A, Khaje Arzani H, Gerami G. Experimental and numerical investigation of high velocity impact resistance in fiber metal laminates. *Journal of science and technology of composites*. 2018; 5: 99-108.
- [8] Sikarwar R S, Velmurugan R, Gupta N K. Effect of velocity and fibres on impact performance of composite laminates—Analytical and experimental approach. *International journal of crashworthiness*. 2017; 22: 589-601.
- [9] Sivakumar A A, Sankarapandian S, Avudaiappan S, Flores E I S. Mechanical Behaviour and Impact of Various Fibres Embedded with Eggshell Powder Epoxy Resin Biocomposite. *Materials*. 2022; 15: 9044.
- [10] Taghipoor H, Malekzade Fard K, Bigdeli A. Experimental, numerical and analytical study of energy absorption in high velocity penetration phenomena on composite targets. *Journal of Science and Technology of Composites*. 2018; 5: 11-24.
- [11] Hadipour F, Karami Khorramabadi M, Dousti B. Investigating the effect of nanocellulose and nanoparticles of rosemary extract on elastic and antibacterial properties of epoxy-based biocomposite. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2024; 3: 490-514.