



## بررسی تجربی تأثیر نانورس بر خواص بالستیکی فلز - مواد مرکب شیشه اپوکسی

عباس مسعودی<sup>1</sup>، غلامحسین لیاقت<sup>2\*</sup>، محمدحسین پل<sup>3</sup>

1-دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2-استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3-استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش

\*تهران، صندوق پستی 123456789@modares.ac.ir، ghlia530

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 14 آذر 1392

پذیرش: 18 دی 1392

ارائه در سایت: 10 خرداد 1393

کلید واژگان:

ضربه

نانورس

سرعت بالا

خواص مکانیکی

### چکیده

این مقاله، به تأثیر نانو ذرات رسی بر خواص بالستیکی فلز - مواد مرکب شیشه اپوکسی به صورت تجربی می‌پردازد. فلز - مواد مرکب شیشه اپوکسی ساخته شده، از 2 رويه آلومینیومی 2024 و هسته نانو کامپوزیتی شیشه/اپوکسی/نانورس تشکیل شده است. هسته نانو کامپوزیتی شامل الیاف شیشه تک جهت با وزن واحد سطح 409 گرم بر مترمربع، رزین CY 219، سخت‌کننده HY 5161 و نانو ذرات رسی کلوسیدسی بی با درصدهای وزنی نسبت به ماتریس 0، 4، 7، 10 است. نمونه‌های آزمایش با روش لایه چینی دستی و با کسر حجمی الیاف 60 درصد در قسمت کامپوزیتی ساخته شد. آزمایش‌های بالستیک با استفاده از دستگاه تفنگ گازی در سرعت‌های 205 و 225 متر بر ثانیه انجام گرفت. نتایج حاصل از آزمایش‌های بالستیکی نشان دهنده این است که میزان تغییرات جذب انرژی مخصوص در 4 درصد وزنی ناچیز است. در 7 و 10 درصد وزنی، میزان جذب انرژی مخصوص افزایش می‌یابد. برای تحلیل نتایج حاصل از آزمایش بالستیک، تأثیر نانورس بر خواص مکانیکی کامپوزیت در راستای طولی و عرضی بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات چقرمگی در جهت طولی و عرضی با نتایج حاصل از آزمایش‌های بالستیک هم‌پوشانی دارد.

## Experimental investigation of effects of nanoclay on ballistic properties of GLARE

Abbas Masoudi<sup>1</sup>, Golam Hossein Liaghat<sup>1\*</sup>, Mohammad Hossein Pol<sup>2</sup>

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Department of Mechanical Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran

\*P.O.B. 123456789 Tehran, Iran, ghlia530@modares.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 05 December 2013  
Accepted 08 January 2014  
Available Online 31 May 2014

**Keywords:**  
Impact  
Nanoclay  
High velocit  
Mechanical Property

### ABSTRACT

This paper investigated experimentally the effect of nanoclay on ballistic impact behavior of GLARE. The prepared GLARE is made of two Aluminum 2024 facing sheets and E glass/ epoxy/nanoclay as nano composite core. Nano composite section has been composed of unidirectional E glass 409 g/m<sup>2</sup>, resin CY 219, hardner HY 5161 and nanoclay clostite 30B dispersed into the epoxy system in a 0%, 4%, 7% and 10% ratio in weight with respect to the matrix. All panels fabricated using laid-up method in fiber volume fraction of 60%. Ballistic tests were conducted using Gas gun at the velocity of 205 and 225 m/s. The results of the ballistic impact experiments show that the amount of Specific energy absorption variations in 4% of nanoclay content is insignificant. However, in nanoclay contents of 7% and 10%, the Specific energy absorption increases. To analyze the results of the ballistic impact on the GLARE, the effect of nanoclay on the longitudinal and transversal mechanical properties of the composite was investigated. A noticeable correlation was found between ballistic impact results and Changes of toughness in longitudinal and transversal direction.

### 1- مقدمه

همراه لایه‌های کامپوزیتی از جنس شیشه و اپوکسی است که در سازه‌های پیشرفته هوافضایی کاربرد دارد. مقاومت بالای این ماده در مقابل خستگی و ضربه سبب شده که کاربرد فراوانی در صنایع هوافضا داشته باشد. هریک از این دو جز به تنهایی دارای مشکلاتی است. آلیاژ آلومینیوم مقاومت زیادی در برابر خستگی و پدیده محیطی ندارد از سویی کامپوزیت‌های پلیمری نیز به شدت مستعد تخریب‌های ناشی از ضربه است. این چند لایه‌ها از روی هم‌گذاری لایه‌های کامپوزیتی

چند لایه‌های الیاف - فلز انوعی از کامپوزیت‌های هیبریدی هستند که شامل ورق‌های نازک فلزی به همراه لایه‌های کامپوزیتی است. اگر الیاف تقویت‌کننده در قسمت کامپوزیتی شیشه باشد به آن فلز - مواد مرکب شیشه اپوکسی<sup>1</sup> گویند. در واقع فلز - مواد مرکب شیشه اپوکسی، نسل جدیدی از کامپوزیت‌های هیبریدی است که متشکل از صفحه‌های نازک آلومینیومی به

1- Glass laminate aluminum reinforced epoxy

Please cite this article using:

A. Masoudi, G.H. Liaghat, M.H. Pol, Experimental investigation of effects of nanoclay on ballistic properties of GLARE, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 141-146, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. Masoudi, G.H. Liaghat, M.H. Pol, Experimental investigation of effects of nanoclay on ballistic properties of GLARE, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 141-146, 2014 (In Persian)

و مقاومت به ضربه ماتریس اپوکسی در ضربه سرعت پایین را بررسی کردند. برای کامپوزیت‌های تقویت شده با کلوئیدسی بی مقادیر بالاتر از 5 درصد حجمی نانو ذرات یک تغییر رو به کاهش شدید در مقاومت کششی حاصل شد و دلیل آن کلوخه شدن و عدم پخش‌شدگی خوب ذرات در درصدهای بالاتر از 5 درصد حجمی به دلیل گسیختگی پیوند میان ذرات و رزین بیان شد. پل و همکارانش [15] تأثیر نانو ذرات کلوئیدسی بی را بر خواص مکانیکی و بالستیکی مواد مرکب هیبریدی شیشه/ اپوکسی بررسی کردند. حاصل کار آن‌ها نشان‌دهنده این است که درصد بهینه نانو ذرات وابسته به سرعت برخورد و حد بالستیک هدف است.

تحقیق حاضر به بررسی تأثیر کلوئیدسی بی، بر مقاومت بالستیکی فلز- مواد مرکب شیشه اپوکسی به صورت تجربی می‌پردازد. برای تحلیل نتایج آزمایش بالستیکی، تأثیر نانورس بر خواص مکانیکی قسمت کامپوزیتی در راستای طولی و عرضی بررسی شد. همچنین سطح شکست با عکس‌برداری میکروسکوپ الکترونی نیز مورد ارزیابی قرار گرفت.

## 2- ساخت نمونه‌ها

### 2-1- مواد

فلز - مواد مرکب شیشه اپوکسی ساخته شده، از دو رویه آلومینیومی و هسته نانو کامپوزیتی تشکیل شده است. رویه‌های آلومینیومی از جنس T3-2024 با ضخامت 1 میلی‌متر انتخاب شد.

برای ساخت هسته نانو ماده مرکب هیبریدی، الیاف شیشه نوع E و به فرم پارچه تک جهته با وزن واحد سطح 409 گرم بر متر مربع انتخاب شد. در این پارچه‌ها الیاف تار به شکل دسته شده در یک جهت و تارهای ضعیف‌تر به عنوان بود با فواصل نسبتاً زیاد در کنار یکدیگر قرار گرفته اند (355 گرم در جهت طولی، 44 گرم در جهت عرضی و 10 گرم به صورت بافته شده پارچه‌ای).

رزین مورد استفاده از خانواده اپوکسی و ساخت شرکت هانستمن با نام تجاری CY 219 و با سخت‌کننده HY 5161 انتخاب شد. واکنش شیمیایی و پخت این رزین براساس پیشنهاد شرکت سازنده در دمای 25 درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود. نسبت سخت‌کننده به رزین، یک به دو در مقیاس وزنی بوده و پس از ساخت نمونه‌ها، پخت در دمای 25 درجه سانتی‌گراد به مدت هفت روز انجام شد. همچنین در این تحقیق از یک نانو رس معدنی اصلاح شده با نام تجاری کلوئیدسی بی (مونت‌موریلیت اصلاح شده با نمک آمونیوم) تولید شده توسط راک‌وود آمریکا استفاده شد.

### 2-2- ساخت نمونه‌های نانو مواد اپوکسی

برای خشک کردن نانورس، نخست نانو ذرات رسی به مدت 24 ساعت در آن خلاء در دمای 80 درجه سانتی‌گراد قرار داده شده و سپس به رزین CY 219 اضافه شده و با سرعت 3000 دور بر دقیقه هم زده شد. پس از آن محلول حاصل به مدت سی دقیقه سونیکیت شده و در آخر دوباره یک ساعت با دور 3000 دور بر دقیقه هم زده شد.

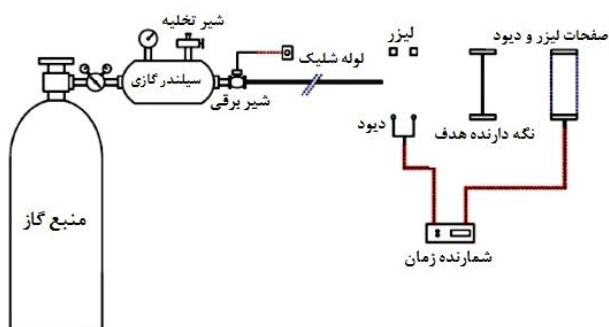
### 2-3- ساخت فلز - مواد مرکب شیشه اپوکسی

میان 6 نوع فلز - مواد مرکب شیشه اپوکسی که به صورت تجاری وجود دارد، فلز - مواد مرکب شیشه اپوکسی نوع 5 متقارن با لایه چینی ( $O_2, 90_2, 90_2, O_2$ ) 2/1، یعنی 8 عدد لایه کامپوزیتی (2 عدد لایه صفر درجه، 4 عدد لایه 90 درجه و در آخر 2 عدد لایه صفر درجه) که در بالا و پایین آن دو لایه آلومینیومی وجود دارد (شکل 1)، با کسر حجمی الیاف 60 درصد در قسمت کامپوزیتی انتخاب شد.

پیش‌ساخته با ورق‌های نازک آلومینیومی ساخته می‌شوند، بنابراین چگالی کمتری نسبت به آلومینیوم خالص دارند. از سوی دیگر به دلیل ترد بودن کامپوزیت‌ها، سازه‌های کامپوزیتی، ترد و شکننده است ولی چند لایه‌های ساخته شده از چند لایه‌های الیاف - فلز، نرم و انعطاف پذیر است. فلز - مواد مرکب شیشه اپوکسی به دلیل مقاومت کششی و فشاری بالا، فلز - کامپوزیت مناسب‌تری برای استفاده در صنایع هواپیماسازی نسبت به سایر فلز کامپوزیت‌هاست [1]. بررسی خستگی آن نسبت به آلومینیوم خالص و دیگر فلز - کامپوزیت‌ها نشان‌دهنده مقاومت بالای فلز - مواد مرکب شیشه اپوکسی در مقابل خستگی است [2, 3]. احمدی و همکارانش [4, 5] اثر تغییر ضخامت لایه‌های آلومینیومی را در فلز - مواد مرکب شیشه اپوکسی بررسی کردند. نتایج نشان داد که هرچه ضخامت ورق‌های آلومینیوم کمتر باشد انرژی مخصوص نفوذ (انرژی جنبشی متناظر با حد سرعت بالستیک بر چگالی سطحی) بیشتر می‌شود. همچنین آن‌ها بیان کردند در سرعت‌های نزدیک حد بالستیک میزان تأثیرگذاری آلومینیوم وسطی در آرایش 3/2 بیشتر از لایه‌های آلومینیوم رویی است. سید یعقوبی و لیبو [6] در بررسی فلز - مواد مرکب شیشه اپوکسی نوع 5 به این نتیجه رسیدند که بیشترین نیروی تماسی وابسته به سرعت برخورد و حد بالستیک هدف است. اولین کار تحلیلی بر فلز - مواد مرکب شیشه اپوکسی را میشل هوفت و همکارانش [7] با استفاده از روش انرژی انجام دادند. آن‌ها میزان جذب انرژی در فلز - مواد مرکب شیشه اپوکسی را با استفاده از روش تحلیلی به‌دست آوردند. صبوری و همکارانش [8] اثر لایه چینی را در فلز - مواد مرکب شیشه اپوکسی به صورت عددی و تجربی بررسی کردند. نتایج، تخمین حد بالستیک با استفاده از روش تجربی و عددی بود.

یکی از روش‌هایی که مورد توجه محققان قرار گرفته، استفاده از نانو ذرات برای تقویت سازه‌هاست که در عین حال که در وزن سازه تغییری ایجاد نمی‌کند خواص مکانیکی آن را بهبود می‌بخشد. اسلام سلیمان و همکارانش [9] کامپوزیت‌های تقویت شده با نانو لوله‌های کربنی را تحت آزمایش سقوط وزنه قرار دادند و بیشترین جذب انرژی را در 1/5 درصد وزنی مشاهده کردند. از طرفی، صفحات نانورس نیز به دلیل ارزانی کاربرد گسترده‌ای در صنایع پیدا کرده است. بیشتر تحقیق‌های انجام شده در مورد نانورس به بررسی خواص مکانیکی رزین یا الیاف می‌پردازد. زلفلی و همکارانش [10] به بررسی اثر کلوئیدسی بی<sup>1</sup> بر اپوکسی پرداختند. نتایج حاصل از آزمایش، درصد بهینه در مدول الاستیته را 4 درصد وزنی نشان می‌داد. گودواری و همکارانش [11] به بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری با الیاف بافته‌شده کربن پرداختند. آن‌ها مونت موریلونیت معدنی اصلاح شده با درصدهای وزنی مختلف را به روش سونیکیت پخش کردند. حاصل مطالعه میکرو ساختاری به‌وسیله عکس‌برداری میکروسکوپ الکترونی نشان داد که خواص چسبندگی بین ماتریس و الیاف بهبود پیدا کرده است. برانر و همکارانش [12] چقرمگی شکست را در کامپوزیت‌ها مورد بررسی قرار دادند. حاصل کار آن‌ها نشان‌دهنده افزایش مد دوم برشی تا 20 درصد بود. نگو و همکارانش [13] به بررسی اثر کلوئیدسی بی با دو نوع سخت‌کننده جف‌آمین‌دی 2000 و جف‌آمین‌دی 230 پرداختند. حاصل کار آن‌ها نشان‌دهنده بهبود خواص جف‌آمین‌دی 2000 نسبت به حالت بدون نانو بود. در حالی که جف‌آمین‌دی 230 تأثیر چندانی در بهبود خواص ایجاد نکرده بود.

در مورد مطالعه ضربه بر نانو کامپوزیت‌ها، تحقیقات بسیار محدودی انجام شده است. لین و همکارانش [14] اثرات کلوئیدسی بی را بر خواص مکانیکی



شکل 3 دستگاه تفنگ گازی [15]



شکل 4 نمای برش خورده از جسم پس از آزمایش ضربه



شکل 5 نمونه آزمایش کشش کشش رزین و الیاف عرضی

جدول 1: زاویه جدایش و فاصله لتانو رزین در درصد های مختلف نانورس

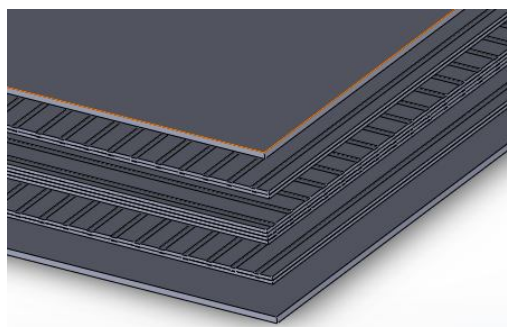
درصد	$2\theta$ (درجه)	d(A)
0	4/75	18/61
4	2/77	42/84
7	2/50	42/31
10	2/86	41/65

### 3- آزمایش ها

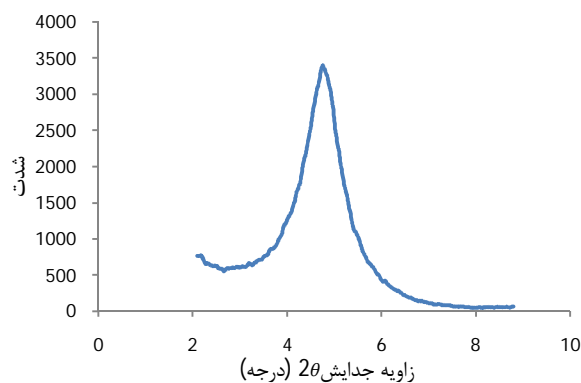
#### 3-1- آزمایش های بالستیک

آزمایش های بالستیک در دانشگاه تربیت مدرس با استفاده از یک تفنگ گازی که قابلیت اندازه گیری سرعت ورودی و خروجی را داشت انجام شد (شکل 3). سرعت آزمایش در دو سرعت یکی بسیار نزدیک حد بالستیک، 205 متر بر ثانیه، و دیگری در سرعتی بالاتر از آن، 225 متر بر ثانیه، در نظر گرفته شد. ابعاد فلز- مواد مرکب شیشه اپوکسی ساخته شده 12 در 12 سانتی متر و تعداد تکرار آزمایش های صحیح برای هر درصد نانو حداقل 6 عدد انجام شد.

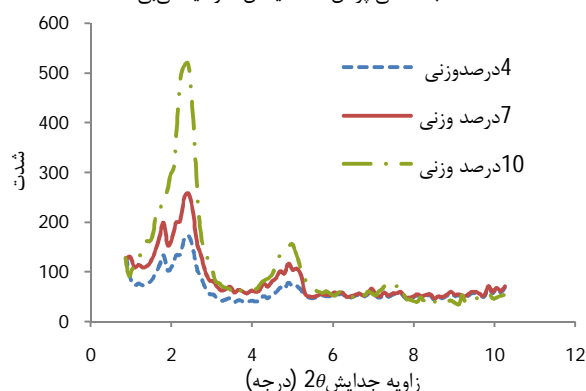
شکل 4 نمای برش خورده جسم را پس از عبور پرتابه نشان می دهد. پرتابه از جنس فولاد به قطر 10 میلی متر به طول قسمت استوانه ای 15 میلی متر و طول کل 122/5 میلی متر با زاویه مخروط 62 درجه و سختی 46 راکول انتخاب شد



شکل 1 شکل شماتیک لایه چینی در فلز- مواد مرکب شیشه اپوکسی ساخته شده



الف) منحنی پراش اشعه ایکس کلوئیدی بی



ب) منحنی پراش اشعه ایکس رزین اپوکسی

شکل 2 منحنی پراش اشعه ایکس الف) کلوئیدی بی (ب) اپوکسی - نانورس

برای ساخت نمونه های فلز- مواد مرکب شیشه اپوکسی، ورق های آلومینیومی به همراه لایه های شیشه اپوکسی در لایه چینی یاد شده به صورت دستی برهم قرار گرفته و در دمای 25 درجه سانتی گراد و فشار 4 بار به مدت یک هفته در اتوکلاو قرار گرفت.

#### 4-2- ساخت فلز- مواد مرکب شیشه اپوکسی

نخستین مشخصه برای هر نانو مواد، ساختار کریستالی آن است. نتایج به دست آمده از آزمایش پراش اشعه ایکس<sup>1</sup> برای نانورس خالص و رزین اپوکسی نشان می دهد (شکل 2 و جدول 1) نانو ذرات درون رزین اپوکسی به شکل در میان لایه رفته<sup>2</sup> هستند. در این نوع نانو کامپوزیت ها، نانو ذرات رس صرف نظر از درصد خاک رس از طریق جادادن پلیمر در فضای بین لایه های شان، به صورت ساختمان لایه ای منظم با ارتفاع بین لایه ای بیشتر نسبت به حالت بدون پلیمر، پراکنده می شوند.

1- XRD  
2- Interclated

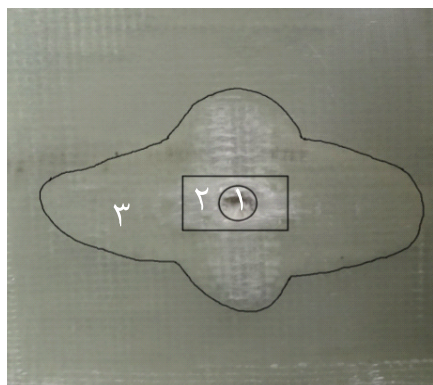
### 3-2- آزمایش‌های کشش

برای آزمایش کشش در جهت طولی، نمونه‌های 3 لایه‌ای با ابعاد 15 در 250 میلی‌متر و جهت انجام آزمایش در راستای عرضی نمونه‌هایی 6 لایه‌ای با ابعاد 20 در 175 میلی‌متر براساس استاندارد ایزو 3039 ساخته شد [16]. نرخ بارگذاری این نمونه‌ها طبق استاندارد 2 میلی‌متر بر دقیقه باید باشد. همچنین آزمایش خواص مکانیکی رزین طبق استاندارد ایزو 638 انجام گرفت [17]. شکل 5 نمونه آزمایش کشش رزین و الیاف عرضی را نشان می‌دهد

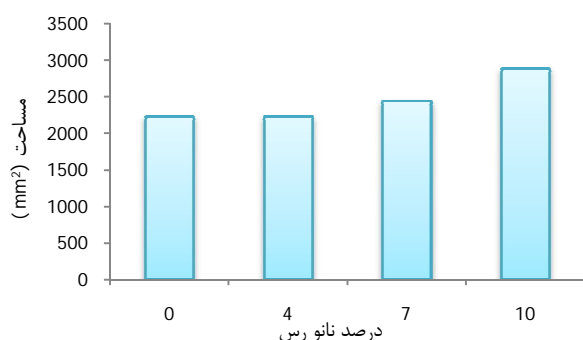
### 4- نتایج و بحث

مکانیزم‌های جذب انرژی که می‌توان برای فلز - مواد مرکب شیشه اپوکسی تعریف کرد شامل تغییر فرم خمشی و غشایی پنل، لایه‌شدگی در قسمت کامپوزیتی، جدایش میان قسمت کامپوزیتی و فلزی، شکست در هریک از لایه‌های کامپوزیتی، ایجاد پلاگ آلومینیوم در قسمت جلوی پنل، شکل‌گیری پتال آلومینیوم در قسمت پشتی پنل است. با تغییر میزان جذب انرژی هر یک از پارامترهای یاد شده، میزان جذب انرژی مورد نیاز برای نفوذ تغییر می‌کند. شکل 6 مقدار جذب انرژی مخصوص (درصد تفاضل انرژی جنبشی پرتابه پس و پیش از برخورد بر انرژی مورد نیاز) در مقابل درصد وزنی نانورس را در دو سرعت 205 و 225 متر بر ثانیه نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود. با افزایش مقدار نانورس، نخست میزان جذب انرژی مخصوص کاهش جزئی دارد سپس افزایش می‌یابد.

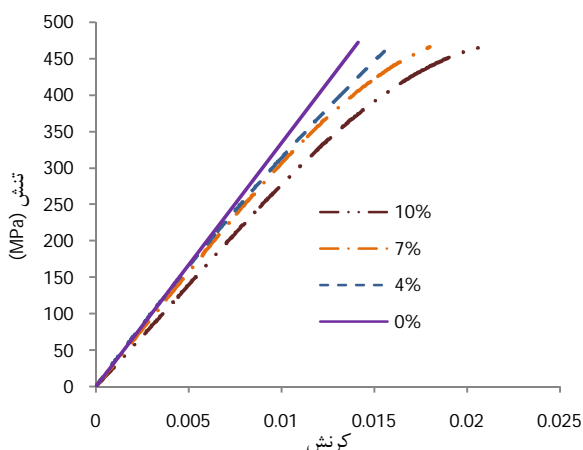
در آزمایش بالستیک هر چه انرژی در سطح گسترده‌ای پخش شده باشد، میزان جذب انرژی بیشتر است. بدین منظور مساحت خرابی پشت قسمت کامپوزیتی اندازه گرفته شد. شکل 7 مساحت سطح خرابی پشت قسمت کامپوزیتی را نشان می‌دهد که شامل 3 قسمت است. (1): ناحیه خرابی موضعی که بر اثر تشکیل پلاگ یا پارگی الیاف نخستین تشکیل می‌شود. (ناحیه 2): ناحیه خرابی یا پارگی الیاف عرضی که به دلیل ضعیف بودن الیاف عرضی نسبت به طولی ایجاد می‌شود. (3): ناحیه‌ای که به دلیل گسترش تنش و شکست رزین و جدایی الیاف تشکیل می‌شود. همان‌طور که از شکل 8 می‌توان دریافت تغییرات بین مساحت سطح خرابی (جمع سه ناحیه خرابی) در بدون نانو و 4 درصد وزنی ناچیز است. در 7 و 10 درصد وزنی مساحت سطح خرابی افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده این است که میزان پخش‌شدگی انرژی در 7 و 10 درصد وزنی بیشتر از سایر نمونه‌هاست و در 7 و 10 درصد وزنی انرژی بیشتری جذب شده است.



شکل 7 مساحت خرابی پشت کامپوزیت



شکل 8 کل مساحت خرابی پشت قسمت کامپوزیتی

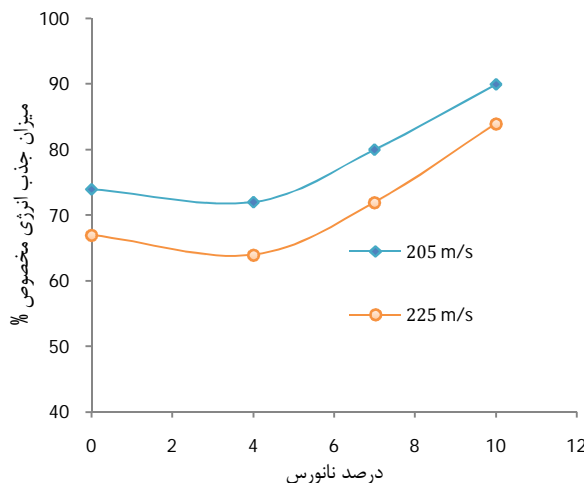


شکل 9 نمودار تنش - کرنش برای الیاف طولی

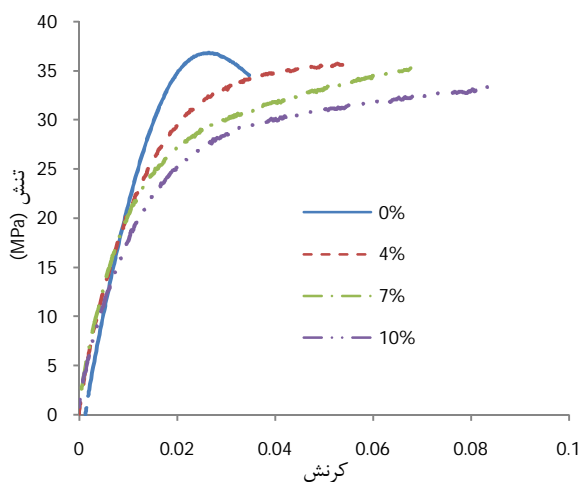
جدول 2 نتایج حاصل از کشش الیاف طولی

چقرمگی (MPa)	کرنش شکست	مدول الاستیسیته (GPa)	تنش نهایی (MPa)	درصد
3/25	0/014	31	465	بدون نانو
3/21	0/017	30/5	453	4
3/81	0/021	30	462	7
4/82	0/025	27	458	10

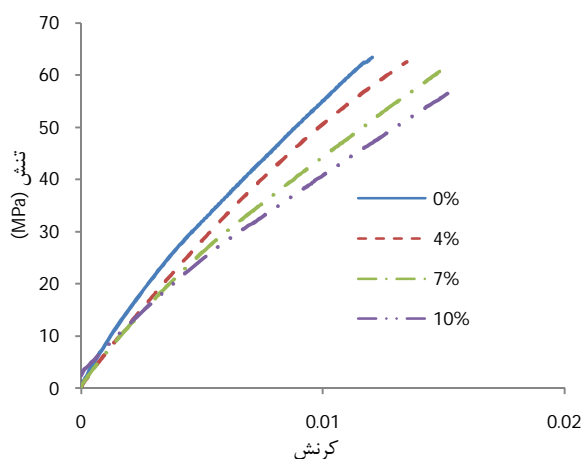
برای تحلیل نتایج آزمایش بالستیک در فلز - مواد مرکب شیشه اپوکسی، تأثیر نانو رس را بر خواص مکانیکی کامپوزیت در راستای طولی و عرضی بررسی کردیم. نانورس بیشترین تأثیر را بر شکست قسمت کامپوزیتی دارد. به همین دلیل بررسی میزان جذب انرژی در قسمت کامپوزیتی اهمیت ویژه‌ای دارد. با این فرض که نرخ تغییرات شرایط استاتیکی به دینامیکی در همه درصدهای نانورس یکسان است.



شکل 6 میزان جذب انرژی مخصوص با تغییرات نانورس



شکل 11 نمودار تنش - کرنش در رزین



شکل 12 نمودار تنش - کرنش در کشش الیاف عرضی

جدول 3 نتایج حاصل از کشش رزین

درصد	تنش نهایی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	کرنش شکست	چقرمگی (MPa)
بدون نانو	36/30	2/46	0/034	0/78
4	35/45	2/38	0/054	0/86
7	35/1	2/20	0/067	1/51
10	31/49	1/81	0/085	2/01

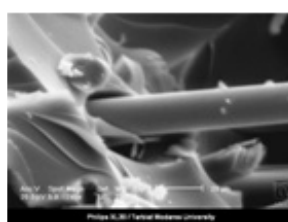
جدول 4 نتایج حاصل از کشش الیاف عرضی

درصد	مدول الاستیسیته (GPa)	کرنش شکست	چقرمگی (MPa)
بدون نانو	6/4	0/012	0/367
4	5/6	0/014	0/38
7	5/1	0/016	0/41
10	4/8	0/018	0/43

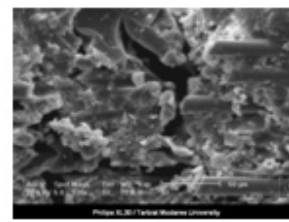
مقداری از انرژی پرتابه را الیاف عرضی تحمل می‌کند. بنابراین باید تأثیر افزودن نانورس بر الیاف عرضی را نیز بررسی کرد. نتایج کشش عرضی (شکل 12) نشان‌دهنده این است که با افزودن نانورس مدول الاستیسیته در همه درصدهای وزنی کاهش و کرنش شکست افزایش می‌یابد. زیرا در جهت عرضی تعداد الیاف کمی وجود دارد (44 گرم بر متر مربع) و نسبت رزین به الیاف در جهت عرضی بیشتر از طولی و میزان تغییرات آن نسبت به الیاف طولی بیشتر است. اگر مساحت زیر نمودار تنش - کرنش را

نتایج کشش الیاف طولی در شکل 9 نشان داده شده است. با افزودن نانورس مدول الاستیسیته تا 7 درصد وزنی تغییر چندانی نمی‌کند. در 10 درصد وزنی مدول کاهش می‌یابد ولی کرنش شکست در همه درصدهای وزنی افزایش می‌یابد و تغییرات تنش نهایی نامحسوس است (جدول 2). با افزودن نانو مدول الاستیسیته حداکثر تا 13 درصد کاهش پیدا کرده است در حالی که چقرمگی در 10 درصد وزنی 48 درصد افزایش می‌یابد. این دلیل می‌تواند به دلیل تأثیر نانو در چسبندگی بین الیاف و رزین و همچنین تغییر در خاصیت خود رزین ایجاد شود.

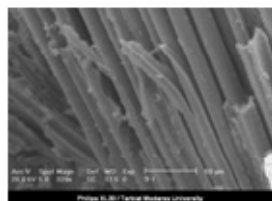
برای بررسی چسبندگی بین الیاف و رزین عکس‌برداری میکروسکوپ الکترونی (شکل 10) انجام گرفت. از این عکس‌ها می‌توان نتیجه گرفت که صفحه‌ها و توده‌های نانو ذرات، می‌توانند سبب افزایش چسبندگی بین الیاف و رزین، الیاف در محل شکست از رزین جدا می‌شود. در حالی که در نمونه‌های دارای نانو، چسبندگی بین الیاف و رزین قابل مشاهده است. عکس‌ها در درصدهای 4، 7 و 10 شبیه هم بود و نمی‌توان از این عکس‌ها نمی‌توان نتیجه گرفت که میزان چسبندگی بین الیاف و رزین در کدام درصد نانو بیشتر است. پس کلوئیدی بی بر اتصال بین الیاف و رزین تأثیر مثبت دارد. مساحت زیر نمودار تنش - کرنش بیان‌گر چقرمگی است. هر چه چقرمگی زیاد باشد میزان جذب انرژی زیاد است. اگر مساحت زیر نمودار شکل 7 را به دست آوریم (جدول 2) نخست کاهش جزئی مشاهده می‌شود، سپس افزایش می‌یابد. در واقع می‌توان به این نتیجه رسید که میزان جذب انرژی در الیاف طولی با افزودن نانورس نخست کاهش جزئی دارد سپس افزایش می‌یابد و بیشترین میزان جذب انرژی مربوط به 10 درصد وزنی نانورس است. با افزودن نانو به رزین خواص مکانیکی رزین تغییر می‌کند. شکل 11 نمودار تنش - کرنش را در درصدهای مختلف نانورس نشان می‌دهد. با افزودن نانورس تغییرات کاهش مدول الاستیسیته در 4 درصد وزنی کم، سپس با افزودن مقدار نانورس مدول الاستیسیته بیشتر کاهش می‌یابد. کرنش شکست و چقرمگی در تمام درصدهای وزنی افزایش و تنش نهایی کاهش می‌یابد. این به دلیل نفوذ صفحه‌های نانورس بین صفحه‌های کریستالی رزین و ایجاد نیروی جاذبه بین لایه‌ها ایجاد می‌شود که با این که مدول الاستیسیته کاهش جزئی داشته ولی چقرمگی افزایش چشم‌گیری دارد (جدول 3).



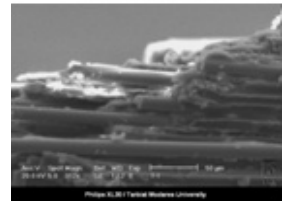
ب) عکس میکروسکوپ الکترونی - صفر درصد وزنی



الف) عکس میکروسکوپ الکترونی - صفر درصد وزنی



د) عکس میکروسکوپ الکترونی - 4 درصد وزنی



ج) عکس میکروسکوپ الکترونی - 4 درصد وزنی

شکل 10 عکس‌های میکروسکوپ الکترونی از سطح شکست شیشه اپوکسی نانورس در درصدهای مختلف نانو رس الف - ب) 0 درصد وزنی ج - د) 4 درصد وزنی

- [3] L. Vogelesang, and A. Vlot, "Development of fibre metal laminates for advanced aerospace structures" *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 103, No. 1, pp. 1-5, 2000.
- [4] H. Ahmadi, H. Sabouri, G. Liaghat and E. Bidkhori "Experimental and Numerical Investigation on the High Velocity Impact Response of GLARE with Different Thickness Ratio" *Procedia Engineering*, vol. 10, pp. 869-874, 2011.
- [5] H. Ahmadi, G. Liaghat, H. Sabouri, and E. Bidkhouri, "Investigation on the high velocity impact properties of glass-reinforced fiber metal laminates" *Journal of Composite Materials*, vol. 47, No. 13, pp. 1605-1615, 2013.
- [6] A. Seyed Yaghoubi, and B. Liaw, "Thickness influence on ballistic impact behaviors of GLARE 5 fiber. metal laminated beams: Experimental and numerical studies" *Composite Structures*, vol. 94, No. 8, pp. 2585-2598, 2012.
- [7] M. S. Hoo Fatt, C. Lin, D. M. Revilock Jr and D. A. Hopkins, "Ballistic impact of GLARE™ fiber- metal laminates" *Composite structures*, vol. 61, No. 1, pp. 73-88, 2003.
- [8] H. Sabouri, H. Ahmadi, and G. Liaghat, "Ballistic Impact Perforation into GLARE Targets: Experiment, Numerical Modelling and Investigation of Aluminium Stacking Sequence" *International Journal of Vehicle Structures & Systems*, vol. 3, No. 3, 2011.
- [9] E. M. Soliman, M. P. Sheyka, and M. R. Taha, "Low-velocity impact of thin woven carbon fabric composites incorporating multi-walled carbon nanotubes" *International Journal of Impact Engineering*, vol. 47, pp. 39-47, 2012.
- [10] M. Zulfli, and W. Chow, "Mechanical and thermal behaviours of glass fiber reinforced epoxy hybrid composites containing organ-montmorillonite clay" *Malaysian Polymer Journal*, vol. 7, No. 1, pp. 8-15, 2012.
- [11] F. Chowdhury, M. Hosur, and S. Jeelani, "Studies on the flexural and thermomechanical properties of woven carbon/nanoclay-epoxy laminates," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 421, No 1, pp. 298-306, 2006.
- [12] A. Brunner, A. Necola, M. Rees, P. Gasser, X. Kornmann, R. Thomann, and M. Barbezat, "The influence of silicate-based nano-filler on the fracture toughness of epoxy resin," *Engineering fracture mechanics*, vol. 73, No. 16, pp. 2336-2345, 2006.
- [13] T. D. Ngo, M. T. Ton-That, S. Hoa, and K. Cole, "Reinforcing effect of organoclay in rubbery and glassy epoxy resins, part 1: Dispersion and properties" *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 107, No. 2, pp. 1154-1162, 2008.
- [14] J. C. Lin, L. Chang, M. Nien, and H. Ho, "Mechanical behavior of various nanoparticle filled composites at low-velocity impact" *Composite Structures*, vol. 74, No. 1, pp. 30-36, 2006.
- [15] M. H. Pol, G. Liaghat, and F. Hajarazi, "Effect of nanoclay on ballistic behavior of woven fabric composites: Experimental investigation" *Journal of Composite Materials*, vol. 47, No. 13, pp. 1563-1573, 2013.
- [16] D. D. 3039, "Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials" 2006.
- [17] A. D. 638, "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics" 2004.

برای الیاف عرضی به دست آوریم متوجه می شویم که با افزودن نانورس میزان جذب انرژی مخصوص، به صورت جزئی افزایش می یابد (جدول 4).  
با بررسی چقرمگی در جهت طولی و عرضی مقدار جذب انرژی نخست به طور ناچیز تغییر کرده (در 4 درصد وزنی)، ولی پس از آن افزایش معناداری خواهد داشت. با نتایج حاصل از عکس های میکروسکوپ الکترونی، بررسی خاصیت خود رزین، ماهیت ذاتی کلوئیدیسی بی، می توان استنباط کرد که صفحه های کلوئیدیسی بی از طریق جا دادن پلیمر در فضای بین لایه های خود، نیروی جاذبه ای قوی بین مولکول های رزین ایجاد می کنند که این نیرو علاوه بر تغییر خاصیت خود رزین سبب افزایش چسبندگی بین رزین و الیاف شده و سبب افزایش چقرمگی و افزایش جذب انرژی در هر یک از لایه های فلز- مواد مرکب شیشه اپوکسی می شود. نتایج آزمایش بالستیک نیز به دلیل تغییر در میزان جذب انرژی قسمت کامپوزیتی تغییر می کند. گرچه پارامترهای دیگری مانند لایه شدگی و میزان جذب انرژی لایه های آلومینیومی نیز باید بررسی شود.

## 5- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر اثرات نانورس کلوئیدیسی بی بر قابلیت جذب انرژی بالستیکی فلز- مواد مرکب شیشه اپوکسی با استفاده از آزمایش های بالستیکی بررسی شد. نتایج نشان دهنده این است که میزان جذب انرژی در 4 درصد وزنی و بدون نانو تغییر زیادی نکرده. در 7 و 10 درصد وزنی میزان جذب انرژی افزایش یافته و بیشترین میزان جذب انرژی مربوط به 10 درصد وزنی است.

برای تحلیل نتایج آزمایش بالستیک فلز- مواد مرکب شیشه اپوکسی با افزودن کلوئیدیسی بی، تأثیر نانورس در راستای طولی و عرضی بررسی شد. نتایج نشان دهنده هم پوشانی تغییرات چقرمگی با آزمایش های بالستیک است.

## 6- مراجع

- [1] T. Sinmazçelik, E. Avcu, M. Ö. Bora, and O. Çoban, "A review: fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods," *Materials & Design*, vol. 32, No. 7, pp. 3671-3685, 2011.
- [2] R. Alderliesten, and J. Homan, "Fatigue and damage tolerance issues of Glare in aircraft structures" *International Journal of Fatigue*, vol. 28, No. 10, pp. 1116-1123, 2006.