



بررسی تجربی ورق FML تقویت شده با نانورس تحت ضربه‌ی ساچمه‌ی فولادی با سرعت بالا

محمد رضا زنگنه اینالو¹، مهدی یارمحمدتوسکی^{2*}

1- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران

* صندوق پستی ۱۳۱۱۴-۱۶۸۴۶، m_yarmohammad@azad.ac.ir

اطلاعات مقاله:	چکیده
دریافت: 98/02/09	این مقاله، به بررسی تجربی ضربه‌ی سرعت بالا بر روی چندلایه‌های فلز/الیاف بازالت با لحاظ نانورس می‌پردازد. چندلایه‌ی فلز/الیاف بازالت ساخته شده از دو رویه‌ی آلومینیومی 2024-T3 و هسته‌ی نانوکامپوزیتی بازالت/اپوکسی/نانورس تشکیل شده است. هسته‌ی نانوکامپوزیتی شامل چهار لایه الیاف بازالت با وزن واحد 300 گرم بر متر مربع، رزین EPR1080، سخت‌کننده EA1080 و نانوذرات رسی Bentonite B0109 با درصدهای وزنی نسبت به ماتریس 0، 1، 3 و 5 است. فرایند ساخت نمونه‌های آزمایش با روش لایه‌گذاری دستی انجام گرفت. همچنین برای پخش و توزیع بهتر ذرات نانورس در ماتریس اپوکسی از دستگاه آلتراسونیک استفاده شد. آزمایش‌های بالستیک با استفاده از دستگاه تفنگ گازی و یک گلوله‌ی ساچمه‌ای فولادی در سرعت‌های 205، 220 و 235 متر بر ثانیه انجام گرفت. نتایج حاصل از آزمایش‌های بالستیک نشان‌دهنده‌ی این است که افزودن ذرات نانورس به ساختار این دسته از FMLها سرعت حد بالستیک و جذب انرژی را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. همچنین بیشترین افزایش خواص استحکامی در درصد 3 از میان درصدهای نانورس استفاده شده است؛ به طوری که افزودن این مقدار از ذرات نانورس، میانگین سرعت حد بالستیک و انرژی جذب شده را به ترتیب 6.85 و 14.1 درصد افزایش داد.
پذیرش: 99/02/13	
کلیدواژگان	
ضربه‌ی سرعت بالا	
چندلایه‌ی فلز/الیاف	
نانورس	
سرعت حد بالستیک	
بازالت	

Experimental investigation of FML reinforced nanoclay under high velocity impact of steel spherical projectile

Mohammad Reza Zanganeh Inaloo¹, Mehdi Yarmohammad Tooski^{1*}

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

* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, m_yarmohammad@azad.ac.ir

Keywords

High velocity impact
FML
Nanoclay
Ballistic limit velocity
Basalt

Abstract

This paper experimentally investigated high velocity impact on basalt reinforced aluminum laminate with nanoclay. The FML plate is made of two Aluminum 2024 facing sheets and basalt/epoxy/nanoclay as nano composite core. Nano composite section has been composed of four basalt fibers 300 g/m², resin EPR1080, hardener EA1080 and nanoclay Bentonite B0109 dispersed into the epoxy system in a 0%, 1%, 3% and 5% ratio in weight with respect to the matrix. All panels are fabricated using Hand Lay-up method. Ultrasonic device was also used for homogenization and better dispersion of nanoclay in epoxy matrix. Ballistic tests were conducted using Gas Gun at the velocity of 205, 220 and 235 m/s. The results of the ballistic impact experiments show that the addition of nanoclay particles to the structure of this type of FMLs significantly increases the ballistic velocity and energy absorption. Also, the optimum addition rate of these nanoparticles has been 3% of mass compared to the resin; so addition of this amount of nanoclay particles increases the average of ballistic limit velocity and absorbed energy by 6.85% and 14.1%, respectively.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نماید:

Zanganeh Inaloo, M.R. Yarmohammad Tooski, M., "Experimental investigation of FML reinforced nanoclay under high velocity impact of steel spherical projectile", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 1, pp. 753-760, 2020.

1- مقدمه

کامپوزیت‌های هیبریدی فلز/الیاف نوع جدیدی از کامپوزیت‌ها می‌باشند که از ورقه‌های فلزی و کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف شکل گرفته‌اند. این مواد به منظور کاهش وزن محصولات برای جایگزینی با آلیاژهای آلومینیومی در صنعت هوافضا توسعه یافته‌اند. هر یک از این دو جزء به تنهایی دارای مشکلاتی است. آلیاژ آلومینیوم مقاومت زیادی در برابر خستگی و پدیده‌ی محیطی ندارد و از طرفی کامپوزیت‌های پلیمری نیز به شدت مستعد تخریب‌های ناشی از ضربه هستند. این چندلایه‌ها از روی هم‌گذاری لایه‌های کامپوزیتی 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، شکننده است، ولی چندلایه‌های ساخته شده از چندلایه‌های فلز/الیاف، نرم و انعطاف‌پذیر است [1].

آلومینیوم 2024 و آلومینیوم 7075 از جمله آلومینیوم‌های آلیاژی مورد استفاده در کامپوزیت‌های فلز/الیاف می‌باشد. خواص مکانیکی خوب از قبیل چقرمگی شکست بالا، استحکام خوب و ارزان بودن این نوع آلیاژها باعث استفاده بیشتر از آن‌ها نسبت به سایر آلیاژهای مورد استفاده در کامپوزیت‌های الیاف فلز شده است [2,3]. در میان الیاف طبیعی، الیاف بازالت به دلیل داشتن خواص استحکامی خوب، چسبندگی مناسب بین رزین و الیاف، خواص عایق صوتی، محدوده‌ی دمای کاری بالا، قیمت کمتر نسبت به الیاف کربن و کولار و همچنین استحکام بالاتر نسبت به الیاف شیشه‌گزینه‌ی مناسبی برای استفاده در صنایع مختلف به عنوان تقویت‌کننده در زمینه‌های پلیمری است. بازالت یک ماده‌ی طبیعی است که در سنگ ولکانیک¹ یافت می‌شود. فرآیند تولید الیاف بازالت بسیار شبیه الیاف شیشه است اما در مقایسه با الیاف شیشه هزینه تولید کمتری دارد [4]. مقاومت بالا در محیط اسیدی و بازی، مقاومت حرارتی بالا و جذب صدا از دیگر ویژگی‌های الیاف بازالت می‌باشد. با توجه به برتری اقتصادی الیاف بازالت نسبت به الیاف شیشه نوع S، الیاف بازالت می‌توانند جایگزین این نوع شیشه در کامپوزیت‌های حاوی الیاف باشند [5,6].

نانوکامپوزیت نیز همان کامپوزیت است که یک یا چند جزء از آن، ابعاد کمتر از 100 نانومتر دارد. نانوکامپوزیت‌ها از دو فاز تشکیل شده‌اند. فاز اول یک ساختار بلوری است که در واقع پایه یا زمینه نانوکامپوزیت محسوب می‌شود و ممکن است از جنس پلیمر، فلز و یا سرامیک باشد. فاز دوم نیز ذراتی در مقیاس نانومتر است که به عنوان تقویت‌کننده یا مواد پرکننده² به منظور اهداف خاص از قبیل استحکام، مقاومت، هدایت الکتریکی و خواص مغناطیسی در درون فاز اول (ماده‌ی زمینه) توزیع می‌شوند. در بحث نانومواد، نانوکامپوزیت‌ها از جایگاه ویژه‌ای برخوردار هستند. حضور ذرات و الیاف در ساختار نانوکامپوزیت‌ها معمولاً سبب ایجاد استحکام در ماده پایه می‌شود. در واقع هنگامی که ذرات و یا الیاف درون یک ماده پایه توزیع شوند، نیروهای اعمال شده به کامپوزیت به‌طور یکنواختی به ذرات یا الیاف منتقل می‌شود. با توزیع مواد پرکننده درون ماده‌ی پایه خصوصیات نظیر استحکام، سختی، خواص تریبولوژیکی و تخلخل تغییر می‌کند. ماده‌ی پایه می‌تواند ذرات را به‌گونه‌ای از هم جدا نگه دارد که رشد ترک به تأخیر افتد، همچنین اجزاء نانوکامپوزیت‌ها بر اثر برهمکنش سطحی بین ماده‌ی پایه و مواد پرکننده، از خواص بهتری برخوردار می‌شوند. نوع و میزان برهمکنش‌ها نقش مهمی در

خواص مختلف نانوکامپوزیت‌ها چون حلالیت، خواص نوری، خواص الکتریکی و مکانیکی آن‌ها دارد [7]. در نانوکامپوزیت‌ها تقویت‌کننده‌ها ذراتی در ابعاد نانومتر است. با افزودن درصد کمی از نانوذرات به یک پلیمر خالص، استحکام کششی، استحکام تسلیم و مدول یانگ افزایش چشم‌گیری می‌یابد. عوامل مؤثر بر خواص نانوکامپوزیت‌ها شامل پراکندگی ذرات نانو، ابعاد، کسر حجمی، ماهیت زمینه، ویژگی‌های بین لایه‌های بین پرکننده‌های نانویی و زمینه و فرایند تولید است. در حال حاضر بسیاری از نتایج تحقیقات جذب انرژی در کامپوزیت‌ها، به آزمایش‌ها و پارامترهای مختلف طراحی مانند نوع پرکننده، اندازه یا کسر حجمی بستگی دارد [8,9].

یکی از آسیب‌های مرتبط با سازه‌های هوایی و زره‌های نظامی که احتمال وقوع آن به صورت ضربه‌های کم‌سرعت یا پرسرعت وجود دارد، آسیب ضربه است. پارامتر وزن یکی از مهمترین پارامترها در طراحی و ساخت سازه‌های فضایی و زره‌ها و سپرهای نظامی است و طراحان همواره به دنبال ساخت وسایلی هستند که با وجود استحکام بالا، وزن و چگالی پایین‌تر و در نتیجه جذب انرژی بالاتری داشته باشد. بحث ضربه و مقاومت یک سازه در برابر بارهای ضربه‌ای یکی از مهم‌ترین بحث‌های علم مکانیک است. کامپوزیت‌های پایه‌پلیمری از جمله موادی هستند که در بیشتر سازه‌ها در معرض بارهای ضربه‌ای قرار دارند. بنابراین، مقاوم‌سازی و افزایش استحکام آن‌ها در برابر ضربه بخش وسیعی از مطالعات پژوهشگران را تشکیل داده است. با توجه به ورود نانوکامپوزیت‌ها به صحنه رقابت با آلیاژها و کامپوزیت‌ها در دو دهه‌ی اخیر، پژوهش‌های موجود در این زمینه از لحاظ ساختار و مشخصه‌سازی مواد در آغاز راه هستند. اسلام سلیمان و همکارانش [10] کامپوزیت‌های تقویت‌شده با نانولوله‌های 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 [11] به بررسی اثر کلوسید.سی.بی³ بر اپوکسی پرداختند. نتایج حاصل از آزمایش، درصد بهینه در مدول الاستیسیته را 4 درصد وزنی نشان داد. گودواری و همکارانش [12] به بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری با الیاف بافته شده کربن پرداختند. آن‌ها مونت موریلونیت معدنی اصلاح شده با درصد‌های وزنی مختلف را به روش سونیکیت پخش کردند. حاصل مطالعه‌ی میکروساختاری به وسیله‌ی عکس‌برداری میکروسکوپ الکترونی نشان داد که خواص چسبندگی بین ماتریس و الیاف بهبود پیدا کرده است. خوشگفتار و همکارانش به بررسی تأثیر افزودن نانولوله‌ی کربنی بر کامپوزیت‌های پلیمری با الیاف بافته شده شیشه پرداختند. نتایج نشان داد بیشترین افزایش استحکام تنش تسلیم به ازای 0.5% نانولوله کربنی و بیشترین افزایش جذب انرژی نفوذ پرتابه سر کروی به ازای 1.5% اتفاق افتاده است. لیاقت و همکارانش [13] تأثیر نانورس بر خواص بالستیکی فلز/ مواد مرکب شیشه اپوکسی را به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. فلز/ مواد مرکب شیشه اپوکسی ساخته شده، از دو رویه‌ی آلومینیومی 2024 و هسته‌ی نانوکامپوزیتی شیشه/ اپوکسی/ نانورس تشکیل شده بود. نتایج حاصل از آزمایش‌های بالستیکی نشان‌دهنده‌ی این بود که میزان تغییرات جذب انرژی مخصوص در 4% وزنی ناچیز بوده است ولی در 7% و 10% وزنی، میزان جذب انرژی مخصوص افزایش می‌یابد. در واقع نانورس تحت برخورد بالستیک

1 Volcanic

2 Filler

2- مواد مورد استفاده و روش ساخت

2-1- مواد

فلز/ الیاف بازالت اپوکسی ساخته شده، از دو رویه‌ی آلومینیومی و هسته‌ی نانوکامپوزیتی تشکیل شده است. رویه‌های آلومینیومی از جنس T3-2024 با ضخامت 0.75 میلیمتر انتخاب شد. برای اطمینان از استحکام اتصال چسبی لایه‌های کامپوزیت به فلز، آماده‌سازی سطح مناسب صفحات آلومینیومی امری اجتناب ناپذیر است. برای این امر در این مقاله روش اچ کردن با اسید سولفوریک¹ به کار گرفته شده است که پس از فرایند اچ ضخامت رویه‌ی آلومینیومی به 0.65 میلیمتر رسید. برای ساخت هسته‌ی نانوماده‌ی مرکب هیبریدی، الیاف بازالت به فرم پارچه با وزن واحد سطح 300 گرم بر متر مربع و رزین مورد استفاده از خانواده اپوکسی و ساخت شرکت چیمکس² روسیه با نام تجاری EPR1080 و با سخت‌کننده‌ی EA1080 انتخاب گردید. واکنش شیمیایی و پخت این رزین طبق دستورالعمل شرکت سازنده در دمای 25 الی 80 درجه‌ی سانتیگراد انجام می‌گیرد. نسبت سخت‌کننده به رزین، 15% در مقیاس وزنی بوده و پس از ساخت نمونه‌ها، پخت در دمای 25 درجه‌ی سانتیگراد به مدت هفت روز انجام شد. همچنین در این تحقیق از یک نانورس معدنی اصلاح شده با نام تجاری بنتونیت³ B0109 تولید شده توسط شرکت سامچون کره جنوبی استفاده شد. قابل ذکر است تمام مراحل آماده‌سازی، ساخت و پخت نمونه‌ها در آزمایشگاه مواد مرکب دانشگاه صنعتی امیرکبیر و با تجهیزات لازم انجام گردیده است.

2-2- فرایند ساخت

نانوذرات رسی در درصدهای وزنی 0، 1، 3 و 5 به رزین EPR1080 اضافه شده و با سرعت 3000 دور بر دقیقه هم زده شد. پس از آن محلول حاصل به مدت 20 دقیقه سونیکیت شده و توسط دستگاه آلتراسونیک 80 کیلوژول به آن انرژی وارد شد. در نهایت سخت‌کننده به رزین اضافه شده و مجدداً نیم ساعت با سرعت 3000 دور بر دقیقه هم زده شد. عامل ماوراء صوت، موجب افزایش فاصله‌ی بین لایه‌های نانورس و در نتیجه تسهیل نفوذ رزین اپوکسی به داخل فواصل بین لایه‌های نانوذرات خاک رس شده و به دلیل توزیع مناسب‌تر، امکان افزایش فواصل بین لایه‌ها، پراکنش بهتر و مناسب‌تر را فراهم کرده و در نتیجه میزان برهم کنش بین سطحی بیشتری ایجاد می‌کند، که ناشی از ساختار لایه‌ای شکل خاک رس و بالا بودن نسبت طول به سطح است.

به منظور ساخت هسته‌ی کامپوزیتی نمونه‌ها، چهار لایه بازالت در نظر گرفته شد و در بالا و پایین آن دو لایه‌ی آلومینیومی قرار گرفت. فرایند ساخت نمونه‌ها به روش لایه‌گذاری دستی انجام شد و نمونه‌ها در دمای 25 درجه‌ی سانتیگراد و تحت فشار 200 نیوتون به مدت 24 ساعت باقی ماند و پس از آن هفت روز در دمای اتاق پخت شد.

3- آزمون ضربه‌ی سرعت بالا

آزمون ضربه‌ی سرعت بالا با استفاده از دستگاه تفنگ گازی پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران و یک گلوله‌ی ساچمه‌ای فولادی به قطر 8.69 میلیمتر، جرم 2.71 گرم و سختی 50 راکول مطابق شکل ۱ انجام شد. سرعت پسماند گلوله برای تمام نمونه‌ها با درصدهای مختلف جرمی نانورس توسط یک دستگاه کرونگراف (سرعت‌سنج) مدل شوتینگ کرونی ام-۱ با دقت ۰.۱ متر بر ثانیه

در درصدهای بالا تأثیرگذار است. خوشگفتار و همکارانش [14] به بررسی تأثیر افزودن نانولوله‌ی کربنی بر کامپوزیت‌های پلیمری با الیاف بافته شده شیشه پرداختند. نتایج نشان داد بیشترین افزایش استحکام تنش تسلیم به ازای 0.5% نانولوله‌ی کربنی و بیشترین جذب انرژی نفوذ پرتابه سر کروی به ازای 1.5% اتفاق افتاده است. بهاری و همکارانش [15] تأثیر نانورس بر خواص بالستیکی و رفتار خمشی فلز/ مواد مرکب بازالت اپوکسی را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها فلز/ مواد مرکب بازالت اپوکسی ساخته شده، از دو رویه‌ی آلومینیومی T3-2024 با ضخامت 0.5 میلیمتر و هسته‌ی نانوکامپوزیتی بازالت/ اپوکسی/ نانورس را تحت ضربه‌ی گلوله‌ی مخروطی آلومینیومی با طول 40 میلیمتر، قطر 21 میلیمتر و جرم 27 گرم با سرعت 118 متر بر ثانیه قرار دادند. نتایج حاصل از آزمایش‌های بالستیکی نشان داد حداکثر تأثیر افزودن نانوذرات رس اصلاح شده در 3 درصد وزنی این نانوذرات اتفاق می‌افتد. همچنین سرعت حد بالستیک 99.7 متر بر ثانیه بدست آمد. نگو و همکارانش [16] به بررسی اثر کلوسید.سی.بی با دو نوع سخت‌کننده‌ی جف آمین دی 2000 و جف آمین دی 230 پرداختند. حاصل کار آن‌ها نشان‌دهنده‌ی بهبود خواص جف آمین دی 2000 نسبت به حالت بدون نانو بود. در حالی که جف آمین دی 230 تأثیر چندانی در بهبود خواص ایجاد نکرده بود. در مورد مطالعه‌ی ضربه بر نانوکامپوزیت‌ها، تحقیقات بسیار محدودی انجام شده است. لین و همکارانش [17] اثرات کلوسید.سی.بی را بر خواص مکانیکی و مقاومت به ضربه‌ی ماتریس اپوکسی در ضربه‌ی سرعت پایین را بررسی کردند. برای کامپوزیت‌های تقویت‌شده با کلوسید.سی.بی مقادیر بالاتر از 5 درصد حجمی نانوذرات 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 [18] تأثیر نانوذرات کلوسید.سی.بی را بر خواص مکانیکی و بالستیکی مواد مرکب هیبریدی شیشه/ اپوکسی بررسی کردند. حاصل کار آن‌ها نشان‌دهنده‌ی این بود که درصد بهینه‌ی نانوذرات وابسته به سرعت برخورد و حد بالستیک هدف است، پل و همکارانش [19] تأثیر نانوذرات رسی بر خواص بالستیکی مواد مرکب شیشه/ اپوکسی را بررسی کردند. نتایج نشان داد حالت بهینه‌ی افزایش خواص بالستیکی در 3% وزنی نانورس به مقدار 10% نسبت به نمونه‌های خالص است. همچنین پل و همکارانش [20] به بررسی خواص مقاومتی کامپوزیت‌های شیشه/ اپوکسی با لحاظ درصدهای مختلف نانورس پرداختند. نتایج نشان‌دهنده‌ی افزایش قابل توجه مقاومت کششی، مقاومت شکست و چقرمگی این مواد در مقدار 7% نانورس بود.

تحقیق حاضر به مطالعه‌ی تجربی مقاومت بالستیکی چندلایه‌ی فلز/ الیاف بازالت، اپوکسی و آلومینیوم با لحاظ درصدهای مختلف نانورس می‌پردازد. بدین منظور نمونه‌ها تحت بارگذاری ضربه با دستگاه تفنگ گازی به صورت آزمایشگاهی قرار می‌گیرد. با انجام این پژوهش سرعت حد بالستیک برای هر درصد نانورس به دست می‌آید و امکان انتخاب بهترین میزان نانورس، ناشی از اعمال ضربه‌ی پرتابه‌ی ساچمه‌ای فراهم می‌گردد تا بتوان از نتایج حاصله در ساخت زره‌های نظامی، صنایع هوافضا، صنایع خودروسازی و به طور کلی هر صنعتی که با چالش‌های ضربه و برخورد مواجه هستند، استفاده شود.

¹ P2 Etch

² Chimex

³ Bentonite

نمونه‌های ساخته شده، 20 در 20 سانتیمتر و تعداد تکرار آزمایش‌های صحیح برای هر درصد نانو، حداقل 3 عدد انجام گرفت. برای بررسی تأثیر نانورس در این مواد، مقدار سرعت خروجی پرتابه در درصدهای مختلف نانورس بررسی شد. سرعت خروجی از هدف می‌تواند نماینده رفتار ماده‌ی مورد مطالعه قرار گیرد. بدین صورت که هر چه مقدار سرعت خروجی از هدف کمتر باشد، نشان‌دهنده‌ی جذب انرژی بیشتر توسط هدف بوده است. به‌طور نمونه در جدول 1 درصد خطای سرعت پسماند نمونه‌های حاوی 1 درصد جرمی نانورس تحت ضربه با سرعت 220 متر بر ثانیه، نسبت به مقدار میانگین آن‌ها مشخص شده است. نتایج این جدول نشان می‌دهد آزمایش از تکرارپذیری بسیار خوبی برخوردار بوده و مقدار میانگین سرعت پسماند، معیار خوبی برای مقایسه است.

جدول 1 میزان خطای سرعت پسماند در نمونه‌های حاوی 1 درصد جرمی نانورس تحت ضربه با سرعت 220 متر بر ثانیه

کد نمونه	سرعت برخورد (m/s)	درصد نانورس	سرعت پسماند (m/s)	میزان خطا نسبت به میانگین
F11	220	1	128.3	2.8 %
F12	220	1	134.1	1.6 %
F13	220	1	133.6	1.2 %
F1	220	1	132	---

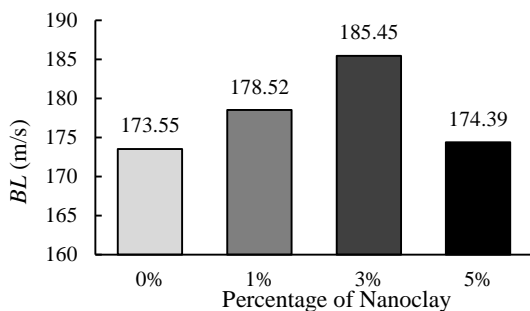


Fig. 4 Ballistic limit velocity for different percentages of nanoclay
شکل 4 سرعت حد بالستیک بر حسب درصد نانورس

4-نتایج آزمون

4-1- سرعت حد بالستیک

در این مقاله برای به دست آوردن حد بالستیک از رابطه‌ی (1) استفاده شده است:

$$BL = V_c = \sqrt{(V_s)^2 - (V_r)^2} \quad (1)$$

در این رابطه V_c سرعت بحرانی یا همان حد بالستیک، V_s سرعت اولیه‌ی پرتابه و V_r سرعت پرتابه پس از عبور از قطعه است. پس از میانگین‌گیری از مقادیر حد بالستیک برای تمام سرعت برخورد، حد بالستیک برای هر نمونه ماده، مطابق شکل 4 به دست می‌آید.

با توجه به نمودار بدست آمده از حدود بالستیک نمونه‌ها، می‌توان به مقاومت بالای نمونه‌ی حاوی 3 درصد ذرات نانورس نسبت به دیگر نمونه‌ها پی برد. این بدان معناست که ساچمه‌ی فولادی مورد استفاده در این آزمایش، برای نفوذ به این دسته از نمونه‌ها به حداقل 185.45 متر بر ثانیه

ثابت و پس از آن سرعت حد بالستیک، میزان انرژی جذب شده و همچنین نسبت انرژی نفوذ دینامیکی به انرژی اولیه‌ی پرتابه برای هر نمونه محاسبه شده است. نحوه‌ی ثبت سرعت خروجی به این صورت است که گلوله پس از گذشتن از نمونه از بین دو شاخک دستگاه کروماتوگراف عبور کرده و میزان سرعت آن بر روی نمایشگر دستگاه درج می‌گردد.



Fig. 1 Steel spherical bullet

شکل 1 گلوله‌ی ساچمه‌ی فولادی

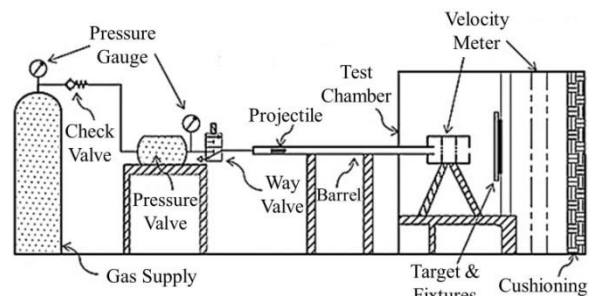


Fig. 2 High velocity impact testing machine (Gas Gun) [21]

شکل 2 دستگاه آزمون ضربه‌ی سرعت بالا (تفنگ گازی) [21]

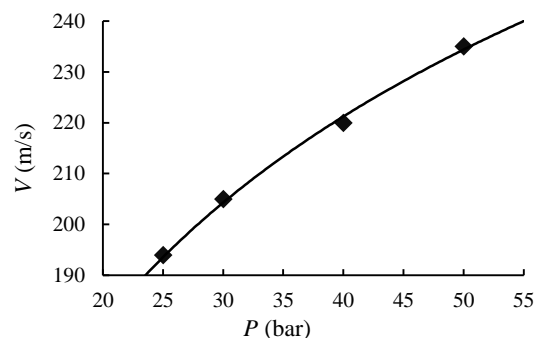


Fig. 3 Projectile velocity calibrations for various gas pressures

شکل 3 منحنی کالیبراسیون سرعت پرتابه نسبت به تغییرات فشار

فشار ورودی برای شلیک گلوله به وسیله‌ی گاز ازت تأمین گردید. تصویر شماتیک دستگاه آزمون ضربه‌ی سرعت بالا مطابق شکل 2 است که شامل منبع تغذیه‌ی گاز ازت، لوله‌های رابط و محل قرارگیری پرتابه، محل قرارگیری هدف و سیستم ثبت سرعت پسماند به وسیله‌ی سرعت‌سنج می‌باشد.

شکل 3 منحنی کالیبراسیون سرعت پرتابه‌ی ساچمه‌ای فولادی نسبت به تغییرات فشار در پیش‌رانه‌ی گازی برای گاز ازت را در محدوده‌ی سرعت‌های 190 تا 240 متر بر ثانیه نشان می‌دهد. سرعت‌های آزمون ضربه‌ی بالستیک در سه سرعت 205، 220 و 235 متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. ابعاد

نیاز دارد. این در حالیست که این مقدار برای نمونه‌های بدون نانو، 1 درصد و 5 درصد، به ترتیب 173.55، 178.52 و 174.39 متر بر ثانیه است.

با توجه به نمودارهای شکل 4 و 6 مشخص می‌شود که افزودن ذرات نانورس تأثیر به‌سزایی در بهبود مؤلفه‌های مهمی نظیر سرعت حد بالستیک و انرژی نفوذ دینامیکی فلز/ مواد مرکب دارد. ضمن این که در جدول 2 نیز مشاهده می‌شود در این نوع از نمونه‌ها، افزودن نانورس به اندازه‌ی 3 درصد جرمی، میانگین سرعت حد بالستیک و انرژی جذب شده را به ترتیب 6.85 و 14.1 درصد افزایش می‌دهد. بنابراین به‌طور کلی می‌توان گفت بیشترین افزایش خواص استحکامی این دسته از فلز/ مواد مرکب، با افزودن ذرات نانورس به میزان 3 درصد جرمی نسبت به رزین استفاده شده، رخ می‌دهد. این در حالیست که افزودن ذرات نانورس به میزان 5 درصد جرمی تأثیر چندانی در مقادیر یاد شده ندارد.

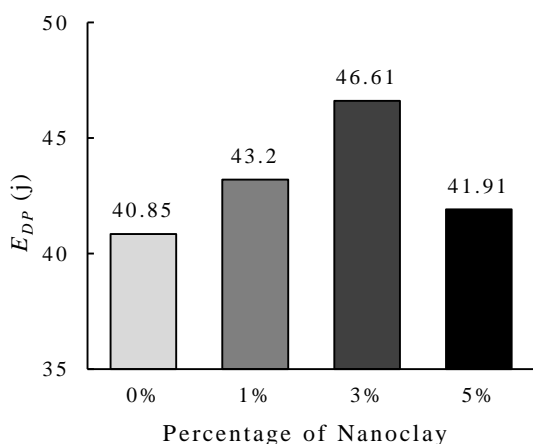


Fig. 6 The average of absorbed energy for different percentages of nanoclay

شکل 6 میانگین انرژی جذب شده برای درصد‌های مختلف نانورس

جدول 2 میزان تأثیر نانو در افزایش سرعت حد بالستیک و انرژی جذب شده نمونه‌ها
Table 2 Effect of nanoclay on increasing ballistic limit velocity and energy absorption

میزان تأثیر	میزان تأثیر	درصد نانوی استفاده شده در نمونه
+ 5.75 %	+ 2.86 %	1%
+ 14.1 %	+ 6.85 %	3%
+ 2.59 %	+ 0.48%	5%

3-4- نسبت انرژی جذب شده به انرژی اولیه

یکی دیگر از مؤلفه‌های مهم برای مقایسه‌ی نمونه‌ها، نسبت بی‌بعد انرژی جذب شده به انرژی اولیه‌ی پرتابه است. این نسبت بیانگر این است که نمونه چند درصد از انرژی پرتابه را به خود جذب کرده است.

$$R_E = \frac{E_{DP}}{E_s} \quad (3)$$

در این رابطه، EDP انرژی جذب شده و E_s انرژی اولیه‌ی پرتابه است. با قرار دادن مقادیر انرژی اولیه و انرژی جذب شده، این نسبت برای تمام نمونه‌ها بدست می‌آید. میانگین جذب انرژی مخصوص و داده‌های مربوط به هر تست برای فشارهای 30، 40 و 50 بار به ترتیب در جدول‌های 3، 4 و 5 ارائه شده است.

سرعت نیاز دارد. در حالی که این مقدار برای نمونه‌های بدون نانو، 1 درصد و 5 درصد، به ترتیب برابر با 173.55، 178.52 و 174.39 متر بر ثانیه است.

2-4- انرژی جذب شده (انرژی نفوذ دینامیکی)

مؤلفه‌ی مهم دیگری که برای مقایسه‌ی نمونه‌ها می‌توان از آن بهره برد، انرژی جذب شده یا انرژی نفوذ دینامیکی است. برای بدست آوردن مقدار انرژی جذب شده توسط هر نمونه، از رابطه‌ی (2) یعنی تغییر انرژی جنبشی استفاده می‌شود.

$$E_{DP} = \frac{1}{2}mV_s^2 - \frac{1}{2}mV_r^2 \quad (2)$$

در این رابطه E_{DP} انرژی نفوذ دینامیکی یا همان انرژی جذب شده توسط هدف، V_s سرعت برخورد پرتابه، V_r سرعت پسماند پرتابه و m جرم پرتابه است.

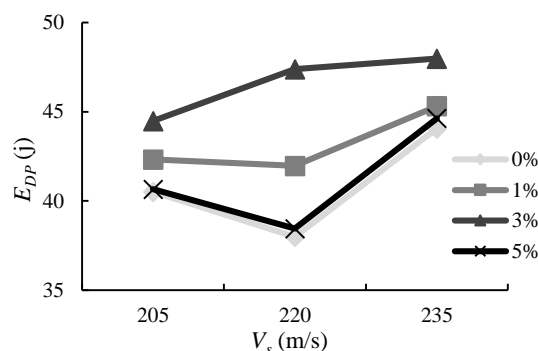


Fig. 5 Absorbed energy to impact velocity for different percentages of nanoclay

شکل 5 انرژی جذب شده بر حسب سرعت برخورد، با لحاظ درصد‌های مختلف نانورس

پس از انجام محاسبات، نمودار خطی انرژی جذب شده توسط نمونه‌ها بر حسب سرعت برخورد برای درصد‌های مختلف نانورس، مطابق شکل 5 بدست می‌آید. بر طبق نمودار هر چه سرعت پرتابه بیشتر باشد، انرژی‌ای که صرف تخریب نمونه شده، بیشتر شده و مقاومت شکست بالاتر می‌رود؛ اما نکته‌ی قابل تأمل در این نمودار این است که، در حالتی که سرعت برخورد مقدار قابل توجهی از حد بالستیک بیشتر است، در تمام نمونه‌ها (به غیر از نمونه‌ی حاوی 3 درصد نانورس)، مقدار جذب انرژی ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. این تغییر رفتار در سرعت برخورد 220 متر بر ثانیه رخ می‌دهد. دلیل این اتفاق آن است که مقدار و کیفیت پخش شدن نانورس در ماتریس اپوکسی باعث تغییر دادن مکانیزم‌های شکست، مساحت ناحیه‌ی خرابی و مساحت ناحیه‌ی تحت تنش شده و رفتار نمونه ماده را نسبت به ضربه‌ی بالستیک به کلی دگرگون کرده و موجب بهبود روند افزایش جذب انرژی می‌شود؛ تا حدی که در شکل 5 دیده می‌شود، نمودار مربوط به نمونه‌ی حاوی 3 درصد جرمی نانورس شیب منفی ندارد. قابل ذکر است در سرعت‌های بالاتر رفتار نمونه و شیب نمودار انرژی جذب شده به حالت صعودی بر می‌گردد.

با میانگین‌گیری از مقادیر بدست آمده برای انرژی جذب شده در سرعت‌های برخورد مختلف، میزان انرژی جذب شده میانگین برای درصد‌های مختلف نانورس مطابق شکل 6 به دست می‌آید. مشاهده می‌شود، نمونه‌ی حاوی 3 درصد نانورس، با جذب میانگین انرژی 46.61 ژول بهترین عملکرد را نسبت به دیگر نمونه‌ها از خود نشان داده است. این بدان معناست که ساچمه‌ی فولادی برای نفوذ در این نمونه به حداقل 46.61 ژول انرژی

مقاومت برشی بین دو لایه^۱ به نسبت پایین بوده و همین مقاومت پایین سبب می‌شود که در ضربه، دو لایه کنار هم براحتی از هم جدا شوند. البته نکته‌ی مهم این است که در ضربه، جدا شدن لایه‌ها از هم، در جذب انرژی پرتابه به چند لایه‌ی الیاف/ فلز کمک می‌کند. از این جهت اگر لایه‌ها از هم جدا شوند، بیشتر به حالت غشائی نزدیک شده و در آن حالت به طور مؤثری تغییر شکل داده و انرژی بیشتری جذب خواهند کرد.

آسیب وارد شده به نمونه‌ها در سرعت‌های 205، 220 و 235 متر بر ثانیه به ترتیب در شکل‌های 8، 9 و 10 قابل مشاهده است. از طرف دیگر جدا شدن لایه‌ها از هم باعث می‌شود تا سختی خمشی لایه‌ها پایین آمده و تغییر شکل‌های عرضی بیشتر صورت گیرد. وجود این تغییر شکل‌های عرضی باعث می‌شود که پرتابه بتواند لایه‌ها را تا حدی در جهت عمود بر صفحه با خود همراه کند و سبب ایجاد کشش در لایه‌ها شود. بنابراین بهترین حالت شکست آن است که تغییر شکل‌ها تا جایی که امکان دارد، گسترده بوده و شکست لایه‌ها در حالت کشش رخ دهد، تا این که تغییر شکل‌ها به صورت موضعی بوده و شکست در جهت عرضی و به صورت برشی باشد.

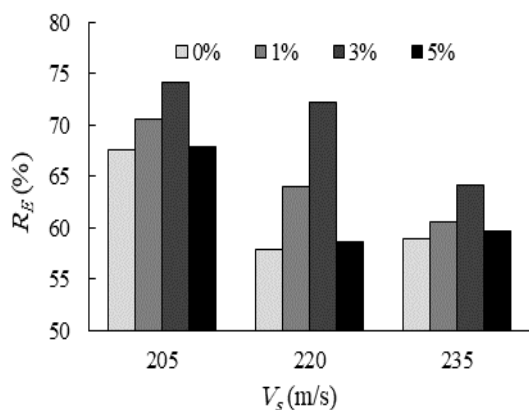


Fig. 7 Absorbed energy by plates per projectile initial energy for different percentages of nanoclay

شکل 7 نسبت انرژی جذب شده توسط نمونه‌ها به انرژی اولیه‌ی پرتابه

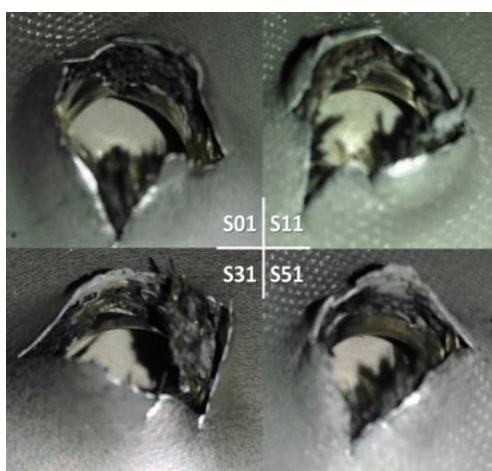


Fig. 8 Damage of samples under impact of velocity 205 m/s

شکل 8 آسیب وارد شده به نمونه‌ها تحت ضربه با سرعت 205 متر بر ثانیه

جدول 3 نتایج محاسبات نسبت انرژی جذب به انرژی اولیه برای فشار 30 بار
Table 3 Result of absorbed energy to initial energy for pressure 30 bar

کد نمونه	سرعت برخورد (m/s)	درصد جرمی نانورس	سرعت پسماند (m/s)	انرژی اولیه (j)	انرژی جذب (j)	نسبت انرژی جذب به انرژی اولیه
S0	205	0	110.1	59.94	40.51	67.58 %
S1	205	1	103.9	59.94	42.32	70.60 %
S3	205	3	95.9	59.94	44.48	74.21 %
S5	205	5	109.6	59.94	40.66	67.83 %

جدول 4 نتایج محاسبات نسبت انرژی جذب به انرژی اولیه برای فشار 40 بار
Table 4 Result of absorbed energy to initial energy for pressure 40 bar

کد نمونه	سرعت برخورد (m/s)	درصد جرمی نانورس	سرعت پسماند (m/s)	انرژی اولیه (j)	انرژی جذب (j)	نسبت انرژی جذب به انرژی اولیه
F0	220	0	142.7	65.58	37.99	57.93 %
F1	220	1	132.0	65.58	41.97	64.00 %
F3	220	3	115.9	65.58	47.38	72.25 %
F5	220	5	141.5	65.58	38.45	58.63 %

جدول 5 نتایج محاسبات نسبت انرژی جذب به انرژی اولیه برای فشار 50 بار
Table 5 Result of absorbed energy to initial energy for pressure 50 bar

کد نمونه	سرعت برخورد (m/s)	درصد جرمی نانورس	سرعت پسماند (m/s)	انرژی اولیه (j)	انرژی جذب (j)	نسبت انرژی جذب به انرژی اولیه
T0	235	0	150.7	74.83	44.06	58.88 %
T1	235	1	147.6	74.83	45.31	60.55 %
T3	235	3	140.8	74.83	47.97	64.11 %
T5	235	5	149.3	74.83	44.63	59.64 %

اولاً در همه‌ی نمونه‌های دارای نانو، جذب انرژی نسبت به نمونه‌ی بدون نانورس بیشتر می‌باشد؛ علاوه بر آن بیشترین مقدار جذب انرژی مربوط به نمونه‌ی دارای 3 درصد نانو است. همچنین نسبت انرژی جذب شده به انرژی اولیه در نمونه‌های حاوی 3 درصد نانورس از دیگر نمونه‌ها بیشتر است. نتایج نسبت‌های بدست آمده از این محاسبات در شکل 7 ترسیم شده است. با مشاهده‌ی دقیق این نمودار می‌توان دریافت که با افزایش سرعت برخورد، با وجود افزایش انرژی جذب شده توسط قطعه، شیب این افزایش کم شده و در نتیجه نمونه با نسبت کمتری از انرژی اولیه‌ی برخورد، انرژی جذب می‌کند. این بدان معناست که جذب انرژی توسط این مواد، در سرعت‌های بالاتر با شیب کمتری افزایش یافته و در نتیجه تأثیر وجود ذرات نانورس در سرعت‌های خیلی بالا به مرور کم‌رنگ می‌شود.

4-4- بررسی مکانیزم‌های شکست

اگرچه بهترین قسمت جذب انرژی پرتابه، به‌واسطه‌ی تغییر شکل پلاستیک است، اما از سهم جدا شدن لایه‌ها از هم نیز نمی‌توان گذشت. علت آن نیز این است که رزین نسبت به ورق‌های فلزی بکار برده شده در چندلایه‌های الیاف/ فلز بسیار ترد است. این تردی و شکننده بودن باعث می‌شود که در اثر ضربه، دو لایه که در کنار هم هستند، نتوانند به خوبی همراه با موج تنش تغییر شکل دهند و در کنار هم باقی بمانند. در واقع

¹ Interlaminar Shear Strength

مساحت ناحیه تحت تنش شده و رفتار نمونه ماده را نسبت به ضربه بالستیک در بازه کوچکی به کلی دگرگون می‌کند. لذا بیشترین سرعت حد بالستیک مربوط به نمونه حاوی 3 درصد جرمی نانورس بوده و نمونه 5 درصد با وجود داشتن حد بالستیک بیشتر نسبت به نمونه بدون نانو، تفاوت چندانی با آن ندارد.

6- مراجع

- [1] Sinmazçelik, T., Avcu, E., Bora, M. Ö. and Çoban, O., "A Review: Fibre Metal Laminates, Background, Bonding Types and Applied Test Methods" *Materials & Design*, Vol. 32, No. 7, pp. 3671-3685, 2011.
- [2] Alderliesten, R., Rans, C. and Benedictus, R., "The Applicability of Magnesium Based Fibre Metal Laminates in Aerospace Structures" *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 14, pp. 2983-2993, 2008.
- [3] Chai, G. B. and Manikandan, P., "Low Velocity Impact Response of Fibre-Metal Laminates—a Review" *Composite Structures*, Vol. 107, pp. 363-381, 2014.
- [4] Subagia, I. A., Tijjing, L. D., Kim, Y., Kim, C. S., Vista IV, F. P. and Shon, H. K., "Mechanical Performance of Multiscale Basalt Fiber-Epoxy Laminates Containing Tourmaline Micro/Nano Particles" *Composites Part B: Engineering*, Vol. 58, pp. 611-617, 2014.
- [5] Singha, K., "A Short Review on Basalt Fiber" *International Journal of Textile Science*, Vol. 1, No. 4, pp. 19-28, 2012.
- [6] Deák, T. and Czigány, T., "Chemical Composition and Mechanical Properties of Basalt and Glass Fibers: A Comparison" *Textile Research Journal*, Vol. 79, No. 7, pp. 645-651, 2009.
- [7] Fischer, H., "Polymer Nanocomposites: From Fundamental Research to Specific Applications" *Materials Science and Engineering: C*, Vol. 23, No. 6-8, pp. 763-772, 2003.
- [8] Tang, W., Santare, M. H. and Advani, S. G., "Melt Processing and Mechanical Property Characterization of Multi-Walled Carbon Nanotube/High Density Polyethylene (Mwnt/Hdpe) Composite Films" *Carbon*, Vol. 41, No. 14, pp. 2779-2785, 2003.
- [9] Bartzak, Z., Argon, A., Cohen, R. and Weinberg, M., "Toughness Mechanism in Semi-Crystalline Polymer Blends: II. High-Density Polyethylene Toughened with Calcium Carbonate Filler Particles" *Polymer*, Vol. 40, No. 9, pp. 2347-2365, 1999.
- [10] Soliman, E. M., Sheyka, M. P. and Taha, M. R., "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.
- [11] Zulfi, M., Chow, W., "Mechanical and Thermal Behaviors of Glass Fiber Reinforced Epoxy Hybrid Composites Containing Organ-Montmorillonite Clay", *Malaysian Polymer Journal*, Vol. 7, No. 1, pp. 8-15, 2012.
- [12] Chowdhury, F., Hosur, M. and Jeelani, S., "Studies on the Flexural and Thermomechanical Properties of Woven Carbon/Nanoclay-Epoxy Laminates" *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 421, No. 1-2, pp. 298-306, 2006.
- [13] Masoudi, A., Lighat, G. and Pol, M. H., "Effects of Nanoclay on the Ballistic Behavior of Glare-Experimental and Numerical Investigation" *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 7, pp. 43-51, 2014. (In Persian)
- [14] Khoshgoftar, M. and Liaghat, G., "Experimental and Numerical Investigation of Perforation Behavior of Composite Laminates Reinforced with Carbon Nanotubes" *Tarbiat Modares University, Mechanical Engineering Department*, 2010. (In Persian)
- [15] Bahari-Sambran, F., Eslami-Farsani, R., Arbab Chirani, Sh., "The Flexural and Impact Behavior of the Laminated Aluminum-Epoxy/Basalt Fibers Composites Containing Nanoclay: An Experimental Investigation" *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2018.
- [16] Ngo, T. D., Ton-That, M. T., Hoa, S. and Cole, K., "Reinforcing Effect of Organoclay in Rubbery and Glassy Epoxy Resins, Part 1: Dispersion and Properties" *Journal of*

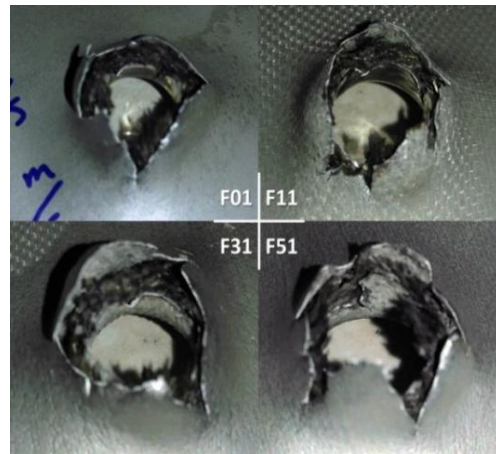


Fig. 9 Damage of samples under impact of velocity 220 m/s

شکل 9 آسیب وارد شده به نمونه‌ها تحت ضربه با سرعت 220 متر بر ثانیه

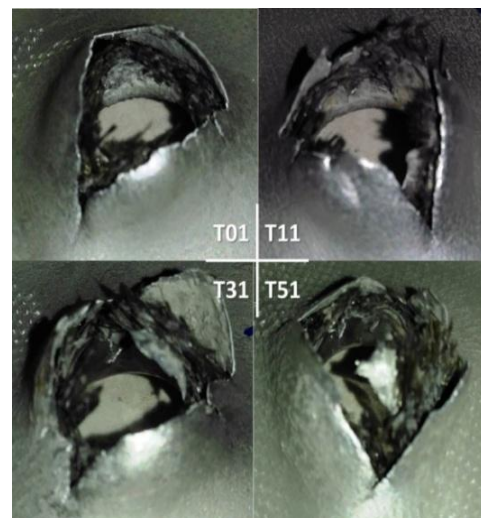


Fig. 10 Damage of samples under impact of velocity 235 m/s

شکل 10 آسیب وارد شده به نمونه‌ها تحت ضربه با سرعت 235 متر بر ثانیه

5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به بررسی تجربی ضربه سرعت بالا بر روی چندلایه‌های فلز/الیاف بازالت با لحاظ نانورس پرداخته شد. چند لایه فلز/الیاف بازالت از دو رویه آلومنیومی و هسته نانوکامپوزیتی بازالت/اپوکسی/نانورس تشکیل شده است. با روش لایه‌گذاری دستی فرایند ساخت نمونه‌های آزمایش انجام گرفت. آزمایش‌های بالستیک با استفاده از دستگاه تفنگ گازی بر روی نمونه‌های چندلایه الیاف/فلز با لحاظ نانو در سرعت‌های مختلف انجام گرفت. نتایج تجربی بیانگر آن است که میزان جذب انرژی در نمونه‌ها با افزایش این ذرات در ساختار رزین افزایش یافته و بیشترین میزان جذب انرژی مربوط به نمونه‌های حاوی 3 درصد وزنی نانورس است. این درحالیست که سیر صعودی گفته شده در نمونه دارای 5 درصد نانو متوقف شده و جذب انرژی در این نمونه‌ها تغییر زیادی نسبت به نمونه بدون نانو نکرده است. اما نکته قابل توجه در نمودار انرژی جذب شده بر حسب سرعت برخورد پرتابه، این است که در حالتی که سرعت برخورد مقدار قابل توجهی از حد بالستیک بیشتر است، مقدار جذب انرژی ابتدا کاهشی جزئی و سپس افزایش می‌یابد. دلیل این اتفاق آن است که مقدار و کیفیت پخش شدن نانورس در ماتریس اپوکسی باعث تغییر دادن مکانیزم‌های شکست، مساحت ناحیه خرابی و

- Applied Polymer Science, Vol. 107, No. 2, pp. 1154-1162, 2008.
- [17] Lin, J.-C., Chang, L., Nien, M. and Ho, H., "Mechanical Behavior of Various Nanoparticle Filled Composites at Low-Velocity Impact" Composite Structures, Vol. 74, No. 1, pp. 30-36, 2006.
- [18] Pol, M. H., Liaghat, G. and Hajjarazi, F., "Effect of Nanoclay on Ballistic Behavior of Woven Fabric Composites: Experimental Investigation" Journal of Composite Materials, Vol. 47, No. 13, pp. 1563-1573, 2013.
- [19] Pol, M. H., Liaghat, G., Zamani, E. and Oryds, A., "Investigation of the ballistic impact behavior of 2D woven glass/epoxy/nanoclay nanocomposites", Journal of Composite Materials, Vol. 49, No. 12, pp. 1449-1460, 2015.
- [20] Pol, M. H., Liaghat, G., "Studies on the mechanical properties of composites reinforced with nanoparticles", Journal of Polymer Composites, 38 (1), 205-212.
- [21] Taherkhani, A., Sadighi, M., Vanini, A. S. and Mahmoudabadi, M. Z., "An Experimental Study of High-Velocity Impact on Elastic-Plastic Crushable Polyurethane Foams", Journal of Aerospace Science and Technology, Vol. 50, pp 245-255, 2016.