



## بررسی تجربی تاثیر نانورس بر خواص بالستیکی مواد مرکب

محمدحسین پل<sup>۱</sup>، غلامحسین لیاقت<sup>۲\*</sup>، فرشید حاجی عرازی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکترا، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- استاد، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳- فوق لیسانس، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\* تهران، صندوق پستی ۱۲۳۴۵۶۷۸۹، ghlia530@modares.ac.ir

**چکیده-** در این مقاله، تاثیر نانورس کلوسید سی بی بر روی رفتار بالستیکی و خواص مکانیکی مواد مرکب لایه‌ای الیاف شیشه/اپوکسی با بافت دوبعدی به‌طور تجربی مورد بررسی قرار می‌گیرد. نانومواد مرکب دارای دوازده لایه الیاف شیشه با بافت دوبعدی با دانسیته  $200 \text{ gr/m}^2$  و با کسر حجمی الیاف ۶۰ درصد بوده و با روش انتقال رزین به کمک خلا ساخته شده است. سیستم رزین نیز از یک دی‌کلیسی‌دیل اتریسیفنول نوع آ (DGEBA) با نام تجاری ایپون ۸۲۸ به عنوان پایه اپوکسی و یک پلی اکسیپروپیلن دی‌امین با وزن مولکولی  $400 \text{ gr/mol}$  با نام تجاری جف امین دی ۴۰۰ به عنوان سفت‌کننده ساخته شده است. نانورس کلوسید سی بی درون سیستم اپوکسی با درصد وزنی نسبت به مجموعه رزین (اپوکسی-نانورس) ۰، ۱، ۲، ۳، ۵ و ۷ درصد پخش می‌گردد. علاوه بر آزمایش‌های بالستیکی بر روی نمونه‌های ساخته‌شده با پرتابه‌های سرتخت به وزن  $14 \text{ gr}$  و قطر  $9.77 \text{ mm}$  تحت برخورد با سرعت  $130 \text{ m/s}$ ،  $142 \text{ m/s}$  و  $155 \text{ m/s}$ ، آزمایش کشش نیز انجام شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که در سرعت‌های نزدیک حد بالستیک، بیشترین افزایش در مقدار جذب انرژی به مقدار  $4/5$  درصد مربوط به افزودن ۵ درصد وزنی می‌باشد. در حالی که، با افزایش سرعت برخورد، جهت افزایش توانایی جذب انرژی ممکن است احتیاج به درصدهای وزنی بالاتری از نانورس در حدود ۷ درصد وزنی است.

**کلیدواژگان:** نانومواد مرکب پلیمری، خواص بالستیکی، خواص مکانیکی، نانورس

## Experimental investigation of effect of nanoclay on ballistic properties of composites

M. H. Pol<sup>1</sup>, G. H. Liaght<sup>2\*</sup>, F. Hajjarazi<sup>3</sup>

1- PhD Student of Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran.

2- Prof. of Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran.

3- MSc of Mech. Eng. Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran.

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

**Abstract-** In this paper, the influence of nanoclay Closite 30B on ballistic impact behavior of 2D woven E-Glass/Epoxy laminated composite has been investigated experimentally. The glass/epoxy/nanoclay laminate nanocomposites have 12 layers and 60% fiber volume fraction is manufactured by VRTM method. Fibers have a plain weave configuration with density of  $200 \text{ gr/m}^2$ , while The epoxy resin system is made of a diglycidyl ether of bisphenol A (DGEBA), Epon 828, as the epoxy prepolymer and a polyoxypropylene diamine with average molecular weight of  $400 \text{ gr/mol}$ , Jeffamine D-400, as the curing agent. The nanoclay Closite 30B is dispersed into the epoxy system in a 0%, 1%, 2%, 3%, 5% and 7% ratio in weight with respect to the matrix. In addition to tensile test, ballistic impact test is carried out on the samples by flat-ended projectile with  $14 \text{ gr}$  mass and  $9.77 \text{ mm}$  diameter in  $130 \text{ m/s}$ ,  $142 \text{ m/s}$  and  $155 \text{ m/s}$  velocities. The results have shown that not only the mechanical properties, but also ballistic impact resistance can be improved with adding nanoclay.

**Keywords:** Polymer-matrix nanocomposites (PMCs), Impact behavior, Ballistic behavior, Mechanical property, Nanoclay

## ۱- مقدمه

رفتار مواد در حالت دینامیک برخورد سرعت بالا به دلیل کاربردهای زیاد در علوم فضایی و نظامی در سال‌های اخیر به طور وسیع مورد توجه قرار گرفته است. فلزات به عنوان مواد سنتی به دلیل قیمت کم در ساخت سپرهای حفاظت شخصی و تجهیزات مورد استفاده قرار می‌گیرند، ولیکن معمولاً این مواد بازده پایینی نسبت به وزن دارند. یک راه حل مناسب برای این مشکل استفاده از مواد مرکب ساخته شده از الیاف به همراه رزین پلیمری به دلیل نسبت مقاومت و سختی به وزن بالای آنان (نسبت به فلزات) است. به همین دلیل، در چند دهه اخیر تحقیقات فراوانی جهت بررسی خواص بالستیکی این مواد به صورت تجربی، تئوری و عددی انجام شده است [۱-۱۰].

در مواد مرکب پلیمری تقویت شده با الیاف، الیاف آرامید (کولار)، کربن و شیشه به صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. مواد مرکب ساخته شده با الیاف کولار هر چند با مقاومت و چقرمگی بالا یکی از بهترین سیستم‌های حفاظت بالستیکی را نسبت به وزن ارائه می‌دهند، ولیکن قیمت بالای آن‌ها استفاده آن‌ها را محدود می‌کند [۱۱]. مواد مرکب ساخته شده با الیاف کربن با مقاومت و سختی بالا نیز با وجود داشتن رفتار الاستیک خطی به دلیل شکنندگی، توانایی‌شان در جذب انرژی محدود است [۱۲]. به همین دلیل با وجود اینکه خواص مکانیکی مواد مرکب الیاف شیشه وابستگی زیادی به نرخ کرنش خرابی و رفتار ماتریسشان دارد، به دلیل قیمت نسبتاً پایین، شکل پذیری و چقرمگی بالا، یک گزینه مناسب برای کاربردهای حفاظت بالستیکی می‌باشند [۱۲]. یک راه حل مناسب برای حل این مشکل بهبود چقرمگی ماتریس با افزودن نانوذرات است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که با افزودن مقداری نانوذرات می‌توان خواص مکانیکی همچون سختی، چقرمگی شکست، مقدار جذب انرژی برخورد و میرایی ارتعاشات مواد مرکب را بهبود داد. از طرفی دیگر، جذب انرژی برخورد یک نانوماده مرکب هیبریدی به نوع مولفه‌های آن یعنی الیاف، رزین و نانوذرات و خواص فی مابین آن‌ها، نسبت وزنی ذرات، درصد حجمی الیاف و کیفیت و روش پخش نانوذرات بستگی دارد [۱۳]. یاسمین و همکارانش [۱۴] یک حداکثر افزایش حدود ۸۰ درصد در مدول الاستیک را هنگام افزودن ۱ تا ۱۰

درصد وزنی کلوسید سی بی<sup>۱</sup> در اپوکسی گزارش می‌دهند. در همین حال هو و همکارانش [۱۵] افزایش سختی و چقرمگی را هنگام استفاده از نانوذرات گزارش می‌دهند. لین و همکارانش [۱۶] نیز یک افزایش ۳۰ درصدی در مقاومت برخورد را هنگام استفاده از کلوسید سی بی در ۵۰ درصد وزنی در رزین اپوکسی گزارش می‌دهند.

برای یک نوع مشخص از اجزای نانوماده مرکب هیبریدی (الیاف، ماتریس و نانوذرات مشخص)، درصد وزنی نانوذرات و کیفیت پخش آن‌ها در رزین، مهم‌ترین عامل در رسیدن به خواص دلخواه‌اند. در کیفیت پخش اکسفولیت<sup>۲</sup>، به دلیل اینکه سطح لایه‌های قابل دسترس زیاد است، معمولاً خواص مکانیکی بهبود می‌یابد [۱۷]. تعداد زیادی از آزمایش‌ها و گزارش‌ها نشان می‌دهد این نوع کیفیت پخش، خواص مکانیکی [۱۸-۲۲] و جذب آب [۲۳] را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. از طرفی دیگر تعدادی از نتایج تجربی حاکی از بهبود چقرمگی شکست با استفاده از به کارگیری نانورس در کیفیت پخش اینترکلت<sup>۳</sup> دارد [۲۴]. میاگاوا و همکارانش [۲۵-۲۶] اشاره می‌کنند که چقرمگی شکست و نرخ آزادسازی انرژی بحرانی کربن/اپوکسی به طور چشمگیری با افزودن ۵ درصد نانورس در حالت اینترکلت بهبود می‌یابد، در حالی که این خواص در حالت ایکسفولیت خیلی کم افزایش می‌یابند.

تحقیقات انجام شده بر روی مقاومت در برابر ضربه نانومواد مرکب و نانومواد مرکب هیبریدی بیشتر در حالت بارگذاری نیمه‌استاتیکی و برخورد سرعت پایین است. اودین و سان [۲۷] نشان دادند که چقرمگی شکست درون لایه‌ای<sup>۴</sup> و مقاومت به ضربه نانومواد مرکب شیشه/اپوکسی تک راستا با افزایش نانوذرات سلیکا بهبود می‌یابند. اویلا و همکارانش [۲۸] تاثیر کلوسید سی بی را بر روی مقدار جذب انرژی نانومواد مرکب شیشه/اپوکسی در برخورد سرعت پایین بررسی کردند. آنان افزایش ۱۵ تا ۴۸ درصد در مقدار جذب انرژی با افزودن ۵ درصد وزنی نانورس کلوسید سی بی را گزارش می‌دهند. محققین و همکارانش [۲۹] رفتار نانومواد مرکب پلی‌اتیلن/نانورس را تحت بارگذاری پانچ نیمه‌استاتیکی و برخورد دینامیکی به طور تجربی

1. Closite 30B
2. Exfoliate
3. Intercalate
4. Interlaminar

**۲-۲- ساخت نمونه‌های نانومواد مرکب اپوکسی/نانورس**  
 به منظور ساخت نمونه‌ها، ابتدا نانوذرات رس با درصد‌های وزنی ۰، ۱، ۲، ۳، ۵ و ۷ درصد نسبت به وزن کل رزین با سفت‌کننده، جف امین دی ۴۰۰، به طور مکانیکی مخلوط شده و سپس مخلوط حاصل با استفاده از دستگاه آلتراسونیک به مدت ۲۰ دقیقه در دمای  $40^{\circ}\text{C}$  با توان  $150\text{kw/cm}^2$  و دامنه  $5\mu\text{m}$  سونیکت می‌شود. سپس مخلوط به دست آمده به مدت ۱۰ دقیقه در دمای  $80^{\circ}\text{C}$  به طور مکانیکی با سرعت  $1800\text{rpm}$  با ایپون ۸۲۸ مخلوط و هم زده می‌شود.

### ۲-۳- ساخت نانومواد مرکب هیبریدی با بافت دوبعدی شیشه/اپوکسی/نانورس

نمونه‌های نانومواد مرکب هیبریدی با ۱۲ لایه الیاف شیشه با بافت دوبعدی و وزن سطحی  $200\text{gr/m}^2$  با استفاده از روش انتقال رزین به کمک خلاء<sup>۱</sup> ساخته می‌شوند. نانومواد مرکب ساخته شده دارای درصد حجمی الیاف ۶۰ درصد و ضخامت متوسط  $2/6\text{mm}$  می‌باشند. به این منظور یک قالب تخت مربعی از الیاف شیشه با ۱۲ لایه به ابعاد  $600 \times 900\text{mm}^2$  آماده شده و رزین اپوکسی/نانورس با استفاده از روش انتقال رزین به کمک خلاء به آن تزریق می‌شود. همچنان که پیلا و همکارانش [۳۲] بیان می‌کنند، حداقل لزجت اپوکسی/نانورس در دمای  $60^{\circ}\text{C}$  است، ولیکن پس از ۱۰ دقیقه لزجت آن به طور فزاینده‌ای افزایش می‌یابد که امکان تزریق نانورزین را درون قالب از بین می‌برد. بنابراین در طی تزریق سعی می‌شود قالب و نانورزین در دمای  $40^{\circ}\text{C}$  به عنوان یک دمای بهینه برای تزریق ثابت نگهداشته شوند. پس از تزریق، پخت نانومواد مرکب در دمای  $80^{\circ}\text{C}$  به مدت ۱۵۰ دقیقه و به دنبال آن در دمای  $120^{\circ}\text{C}$  به مدت ۱۵۰ دقیقه صورت می‌گیرد.

### ۲-۴- مشخصات نانومواد مرکب هیبریدی

نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری فاصله پایه  $d$  با استفاده از روش پراش اشعه ایکس نشان می‌دهد (شکل ۱)، نانوذرات درون رزین اپوکسی بیش از اینکه به صورت کیفیت اکسفولیت باشند، به شکل اینترکت هستند. کیفیت اکسفولیت نانوذرات

بررسی کردند. آن‌ها بیان می‌کنند که با افزودن نانورس مقدار جذب انرژی در آزمایش‌های بارگذاری نیمه‌استاتیکی کاهش یافته ولیکن در آزمایش‌های بالستیکی تغییر مهمی دیده نمی‌شود. همچنین آویلا و همکارانش [۳۰] در تحقیق دیگری تاثیر افزودن نانورس و نانوگرافیت را در حالت اینترکت بر روی مواد مرکب شیشه/اپوکسی بررسی کردند و نتیجه گرفتند که این نانوذرات علاوه بر افزایش مقاومت بالستیکی، مکانیزم‌های شکست و جذب انرژی را نیز تحت شعاع خود قرار می‌دهند. علاوه بر آن‌ها، در حال حاضر گراجسیک و همکارانش [۳۱] در یک تحقیق عددی و تئوری دامنه‌دار، تحت حمایت ناسا، تاثیر نانولوله‌های کربنی را بر مقاومت بالستیکی شیشه/اپوکسی ونیل استر مورد مطالعه قرار می‌دهند. نتایج اولیه منتشر شده از این محققان نشان از بهبود خواص بالستیک با به‌کارگیری این نانوذرات دارد.

موضوع اصلی تحقیق حاضر بررسی تاثیر افزودن نانورس کلوسید سی‌بی بر مقاومت بالستیکی ماده مرکب شیشه/اپوکسی با بافت دوبعدی به طور تجربی است. علاوه بر بررسی خاصیت مقاومت بالستیک، به طور تجربی تاثیر این نانورس بر خواص اولیه مکانیکی با آزمایش‌های کشش نیز مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

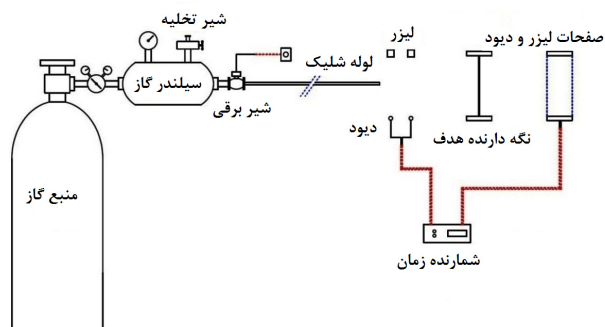
## ۲- آزمایش

### ۲-۱- مواد

نانوساختار استفاده در این تحقیق شیشه/اپوکسی تقویت شده با نانورس است. رزین پلیمری انتخاب شده از دو بخش تشکیل گردیده است. قسمت اول یک دیکلسیدیل اتریسیفنول نوع A (DGEBA) با نام تجاری ایپون ۸۲۸ تولید شده توسط شرکت شل به عنوان پایه اپوکسی و قسمت دوم یک پلی اکسیپروپیلن دیامین با وزن مولکولی  $400\text{gr/mol}$  با نام تجاری جف امین دی ۴۰۰ به عنوان سفت‌کننده ساخته شده توسط شرکت هانسن می‌باشد که با نسبت وزنی ۵۵:۱۰۰ نسبت به پایه اپوکسی (قسمت اول) با آن مخلوط می‌شود. در این تحقیق، از یک نانورس معدنی (MMT) اصلاح شده به شکل صفحه‌ای با نام تجاری کلوسید سی‌بی (مونتموریللیت اصلاح شده با نمک آمونیوم) تولید شده توسط شرکت راک وود آمریکا استفاده می‌شود. الیاف شیشه استفاده شده نیز از جنس شیشه با بافت دوبعدی و وزن واحد سطح  $200\text{gr/m}^2$  می‌باشند.

1. VRTM  
 2. Basal spacing

نانوماده مرکب شیشه/اپوکسی/نانورس درون یک نگهدارنده به ابعاد  $150 \times 150 \text{ mm}^2$  به طور ثابت قرار گرفت. پرتابه به صورت یک استوانه فولادی سرتخت به طول  $30 \text{ mm}$ ، قطر  $9/77 \text{ mm}$  و جرم  $14 \text{ gr}$  در آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفت. سرعت‌های برخورد  $130 \text{ m/s}$ ،  $142 \text{ m/s}$  و  $155 \text{ m/s}$  بوده و هر دو سرعت‌های اولیه و باقی‌مانده در آزمایش‌ها اندازه‌گیری شد.



شکل ۲ طرح شماتیک تفنگ گازی

به منظور اندازه‌گیری سرعت اولیه در جلوی لوله تفنگ گازی، از یک جفت منبع نور لیزر و دیود حساس نوری، که متصل به یک شمارنده زمان هستند، استفاده می‌شود. به دلیل اینکه پس از نفوذ، پرتابه از مسیر خود منحرف می‌شود امکان اندازه‌گیری سرعت باقی‌مانده پرتابه با روش اندازه‌گیری سرعت ورودی وجود ندارد. به همین دلیل از دو پرده دو بعدی موازی از منبع نور لیزر و دیود حساس به نور، که هر یک شامل  $80$  عدد منبع نور لیزر و دیود حساس به نور در دو راستای افقی و عمودی می‌باشند، برای تعیین موقعیت محل عبور پرتابه استفاده می‌شود. این دیودهای حساس به نور هر یک بطور جداگانه به شمارنده زمان متصل می‌باشند.

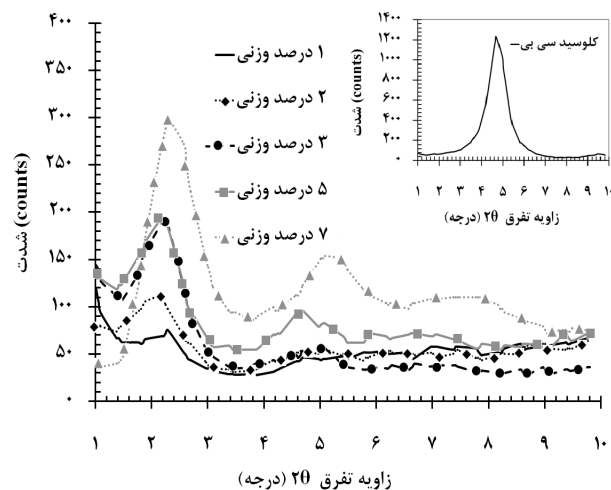
### ۶-۲- آزمایش‌های کشش

آزمایش‌های کشش مطابق با استاندارد ایزو  $527$  با استفاده از دستگاه کشش با سرعت بارگذاری  $2 \text{ mm/min}$  انجام گردید.

### ۳- نتایج و بحث

عوامل متعددی در تعیین مکانیزم شکست تحت برخورد بالستیکی و مقدار جذب انرژی در طی فرآیند نفوذ یک پرتابه در اهداف وجود دارد. تغییر شکل شماتیک یک صفحه از جنس ماده مرکب در طی فرآیند نفوذ در شکل ۳ نمایش داده شده است.

درون رزین با معیار فاصله پایه  $d$  بین صفحات بیش از  $10 \text{ nm}$  تعریف می‌شود [۳۳].



شکل ۱ منحنی‌های پراش اشعه ایکس اپوکسی/نانورس در درصد‌های مختلف نانورس

خلاصه نتایج شکل ۱ به دست آمده از پراش اشعه ایکس در جدول ۱ ارائه شده است. در همه نمونه‌های نانومواد مرکب، جدایش لایه‌ها بیش از دو برابر نانورس خالص است. همچنان که در شکل ۱ دیده می‌شود، نانورس یک قله در زاویه جدایش  $2\theta = 4/75^\circ$  که متناظر با فاصله  $d$  برابر با  $18/61 \text{ \AA}$  است، نشان می‌دهد.

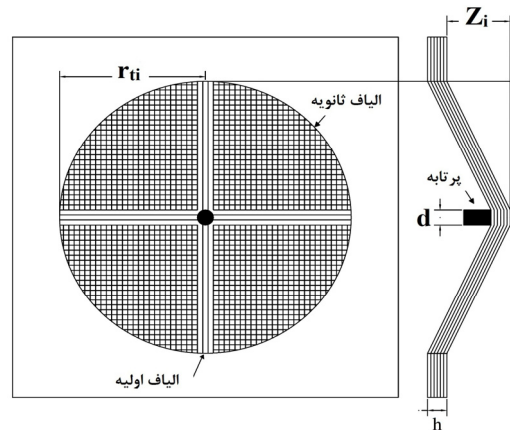
جدول ۱ زاویه جدایش و فاصله  $d$  نانومواد مرکب در درصد‌های مختلف نانورس

	$(2\theta)^\circ$	$d^* (\text{Å})$
٪۱	۲/۱۶	۴۰/۷۶
٪۲	۲/۰۲	۴۳/۶۳
٪۳	۲/۱۹	۴۰/۳۶
٪۵	۲/۰۹	۴۲/۲۳
٪۷	۲/۱۷	۴۰/۶۹

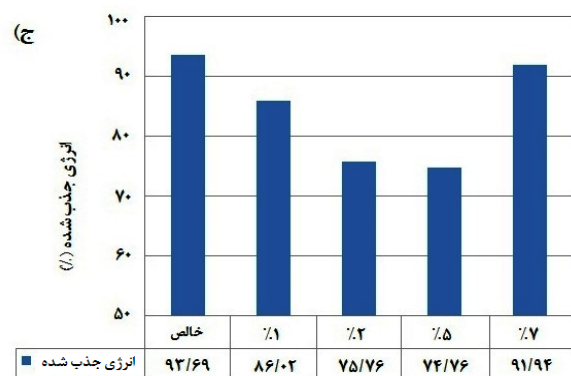
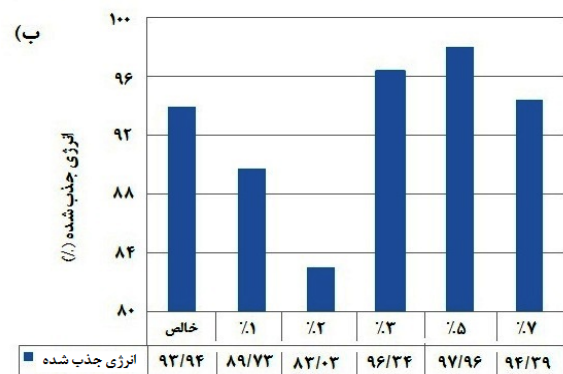
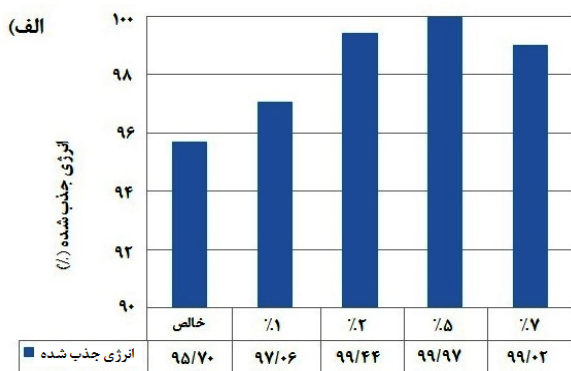
### ۵-۲- آزمایش‌های بالستیک

آزمایش‌های بالستیک در دانشگاه تربیت مدرس با استفاده از یک تفنگ گازی، که طرح شماتیک آن در شکل ۲ نشان داده شده است، انجام شد. هنگام آزمایش، هر یک از صفحات هدف

نانورس، درصد جذب انرژی نسبت به نمونه بدون نانورس بیشتر است. علاوه بر آن، بیشترین مقدار جذب انرژی مربوط به نانوماده مرکب هیبریدی محتوی ۵ درصد نانورس است. در حالی که سرعت برخورد مقدار قابل توجهی از حد بالستیک بیشتر است (شکل‌های ۴-ب و ۴-ج)، مقدار جذب انرژی ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. این تغییر رفتار در سرعت برخورد  $V_i=142\text{m/s}$  (شکل ۴-ب) هنگام ۳ درصد وزنی نانورس و در سرعت برخورد  $V_i=155\text{m/s}$  (شکل ۴-ج) هنگام ۷ درصد وزنی نانورس رخ می‌دهد.



شکل ۳ مخروط تشکیل شده در پشت صفحه هدف از جنس ماده مرکب در طی فرآیند نفوذ



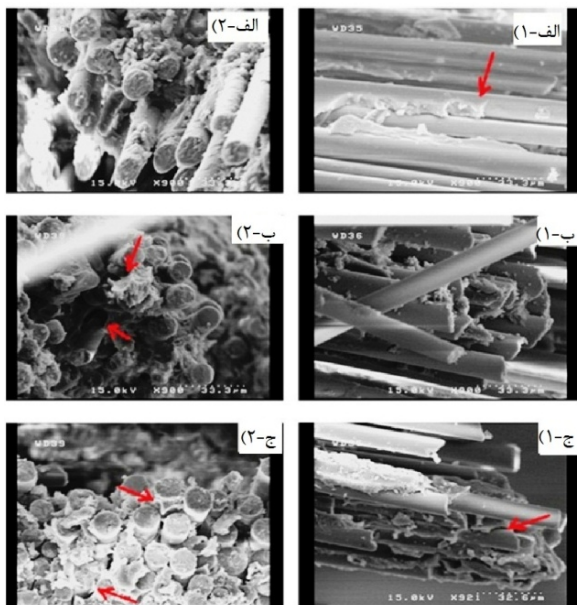
شکل ۴ درصد جذب انرژی اولیه برخورد بر حسب درصد نانورس؛ الف) سرعت برخورد  $V_i=130\text{m/s}$ ، ب) سرعت برخورد  $V_i=142\text{m/s}$ ، ج) سرعت برخورد  $V_i=155\text{m/s}$

مکانیزم‌های مهم جذب انرژی پرتابه در طی فرآیند نفوذ یک پرتابه سرتخت در اهداف از جنس مواد مرکب شیشه/اپوکسی و نانومواد مرکب هیبریدی با بافت دوبعدی عبارت‌اند از: انرژی جذب شده توسط کشش و یا شکست کششی الیاف اولیه (الیافی) که تحت برخورد مستقیم پرتابه قرار می‌گیرند، انرژی جذب شده توسط تغییر شکل الاستیک الیاف ثانویه (الیافی) که هر چند تحت برخورد مستقیم پرتابه قرار نمی‌گیرند، ولیکن تغییر شکل الاستیک خواهند داشت، انرژی جنبشی منتقل شده به الیاف اولیه و ثانویه، انرژی جذب شده توسط لایه‌لایه‌ای شدن صفحات ماده مرکب، انرژی جذب شده توسط ترک خوردگی ماتریس و در صورتی که پلاک تشکیل شود انرژی ایجاد و برش پلاک و جنبشی آن. توانایی و مقدار جذب انرژی هر یک از این مکانیزم‌ها، علاوه بر جنس و مشخصات اجزای نانوماده مرکب هیبریدی (الیاف، رزین و نانوذرات)، به خواص فیزیکی و مکانیکی آن از جمله جرم حجمی، مقاومت کششی، سختی، کرنش شکست، تغییرات تنش بر حسب کرنش، انرژی شکست مد دوم وابسته است [۹]. انتظار می‌رود با افزودن نانورس و تغییر خواص ماده مرکب، صفحات و دسته‌های تجمع شده نانورس همانند یک عامل اتصال در فصل مشترک پلیمر و الیاف عمل کرده و ضمن تغییر مکانیزم شکست مقدار جذب انرژی نانوماده مرکب هیبریدی را بهبود دهد.

شکل ۴ مقدار جذب انرژی صفحات نانومواد مرکب هیبریدی را بر حسب مقدار محتوی نانورس نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴-الف می‌توان دید هنگامی که سرعت برخورد نزدیک حد بالستیک است ( $V_i=130\text{m/s}$ )، در همه نمونه‌های محتوی

به نظر می‌رسد چندین عامل باعث تغییر مکانیزم شکست بالستیک و مقدار جذب انرژی پرتابه شده است. اول، همان‌طور که در شکل ۵ می‌توان دید، با افزودن نانورس، مدول یانگ نانومواد مرکب هیبریدی به مقدار خیلی زیادی افزایش می‌یابد (شکل ۵-الف) در حالی که کرنش شکست تغییر قابل توجهی نخواهد داشت (شکل ۵-ب)؛ بنابراین چقرمگی سیستم افزایش خواهد یافت.

دوم، صفحات و توده‌های نانوذرات می‌توانند باعث افزایش چسبندگی درون صفحه‌ای و بین صفحه‌ای نانومواد مرکب هیبریدی شوند. همچنان که با عکس‌برداری SEM در شکل ۶ می‌توان دید در حالت بدون نانورس (شکل ۶-الف)، به دلیل چسبندگی کم بین الیاف و رزین، پس از برخورد و نفوذ الیاف تقریباً در محل شکست از رزین جدا می‌شوند. در حالی که در نمونه‌های دارای نانورس (شکل ۶-ب و ۶-ج) به طور وضوح بهبود چسبندگی قابل مشاهده است. در این حالت‌ها، جدایش کامل ماتریس از الیاف مشاهده نمی‌شود.

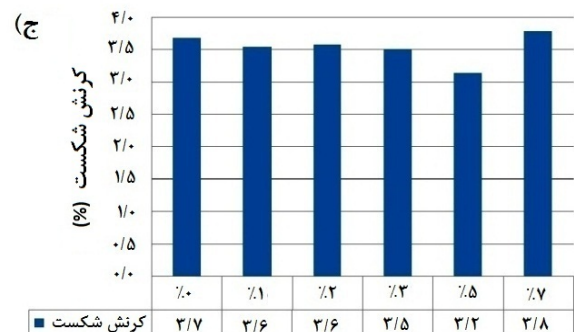
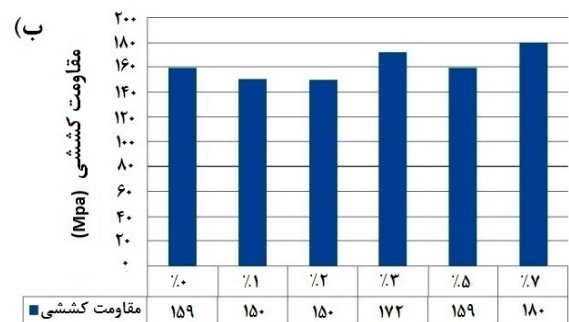
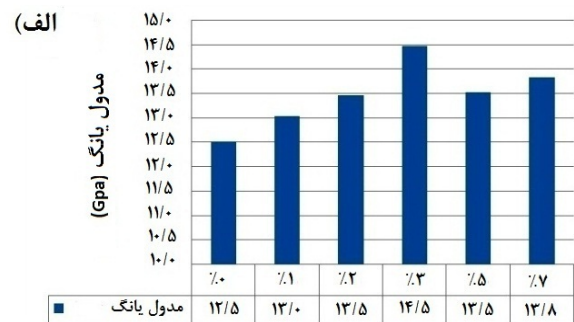


شکل ۶ عکس‌برداری SEM از سطح شکست نانومواد مرکب هیبریدی شیشه/اپوکسی/نانورس در درصدهای مختلف نانورس؛ الف) ۰ درصد وزنی، ب) ۳ درصد وزنی، ج) ۷ درصد وزنی

سوم، همچنان که با عکس‌برداری SEM از سطح شکست نانومواد مرکب اپوکسی/نانورس در شکل ۷ می‌توان دید، در

این تغییر رفتار به این دلیل است که مقدار و کیفیت پخش شدن نانورس در ماتریس اپوکسی باعث تغییر دادن مکانیزم شکست، مساحت ناحیه خرابی و مساحت ناحیه تحت تنش واقع شده نانومواد مرکب هیبریدی می‌شود که این تغییر به نوبه خود به دلیل تغییر دادن خواص اولیه مکانیکی ماتریس و نانومواد مرکب هیبریدی و تغییر دادن کیفیت اتصال الیاف و ماتریس است.

نتایج حاصل از آزمایش کشش در شکل ۵ نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود با افزایش مقدار نانورس، سختی، مقاومت کششی و کرنش شکست نانومواد مرکب هیبریدی تغییر می‌کند.



شکل ۵ تغییرات خواص مکانیکی اولیه نانومواد مرکب هیبریدی بر حسب درصد نانورس؛ الف) مدول یانگ، ب) مقاومت کششی، ج) کرنش شکست

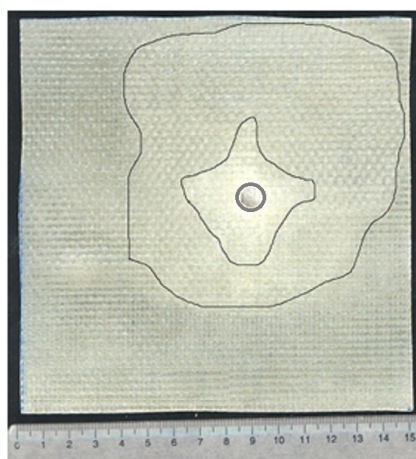


می‌دهد در ۷ درصد وزنی ذرات نانورس به شکل توده‌ای در ماتریس تجمع می‌کنند. این امر می‌تواند باعث تمرکز تنش نقاط ضعیف در ماتریس شده و در نتیجه باعث کاهش چقرمگی ماتریس شود.

چهارم، همان‌طور که پیشتر اشاره شد یکی از مهم‌ترین مکانیزم‌های جذب انرژی پرتابه تغییر شکل الیاف ثانویه در پشت صفحه هدف به شکل مخروط و انرژی جنبشی منتقل شده از پرتابه به آن می‌باشد. این مقادیر انرژی جذب شده وابستگی شدیدی به رفتار ماده در مقابل بارگذاری و سرعت انتشار موج الاستیک، موج پلاستیک و موج عرضی دارد که به نوبه خود وابسته به مدول الاستیک، مدول پلاستیک و جرم حجمی ماده می‌باشند [۹].

تغییر جرم حجمی، مدول الاستیک و نمودار تنش- کرنش با افزایش درصد نانوذرات باعث تغییر سرعت انتشار موج تنشی در مواد مرکب و مساحت بارگذاری شده، می‌گردد که در نتیجه مقدار جذب انرژی توسط آن تغییر می‌یابد.

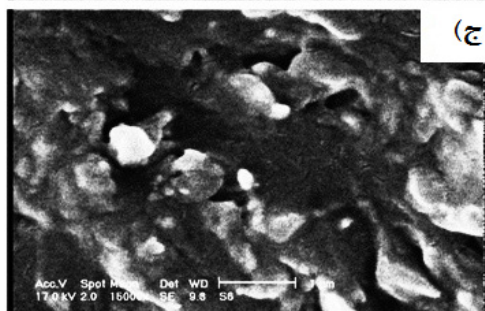
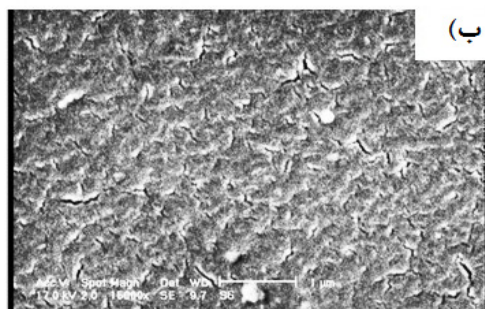
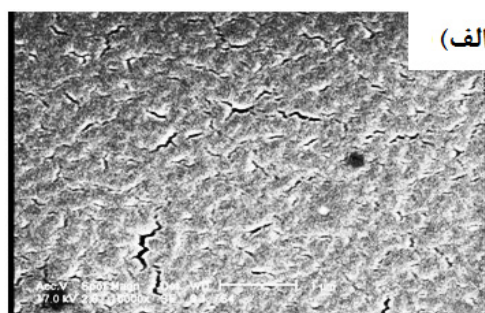
همان‌طور که در شکل ۸ می‌توان دید پس از برخورد بالستیک، ناحیه خرابی شامل سه بخش مختلف می‌باشد: الف) ناحیه خرابی موضعی که بر اثر تشکیل پلاک و یا پارگی الیاف اولیه تشکیل می‌شود، ب) ناحیه ورقه ورقه شدن وجه جلویی هدف، ج) ناحیه ورقه ورقه شدن سطح پشتی هدف.



شکل ۸ ناحیه‌های مختلف خرابی پس از برخورد بالستیک

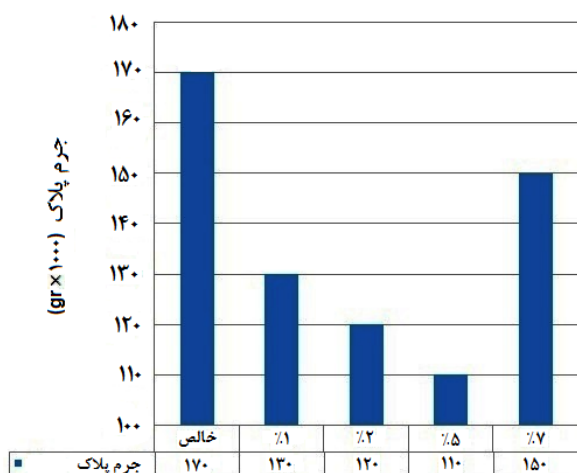
مساحت ناحیه خرابی (و در نتیجه مساحت بارگذاری شده) در سرعت برخورد  $V_i = 130 \text{ m/s}$  را می‌توان در شکل ۹ مشاهده کرد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، بیشترین مقدار

نمونه‌های با نانورس هر چند تعداد ترک‌های ماتریس زیادتر می‌باشد، ولیکن طول آن‌ها کوتاه‌تر و در مسیرهای مختلف و خمیده می‌باشند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت صفحات و دسته‌های تجمع شده نانورس می‌توانند همانند یک پرکننده صلب عمل کرده و مانع از گسترش و رشد میکروتترک‌ها در یک مسیر مستقیم گردند. این امر باعث بالا رفتن چقرمگی ماتریس خواهد شد.



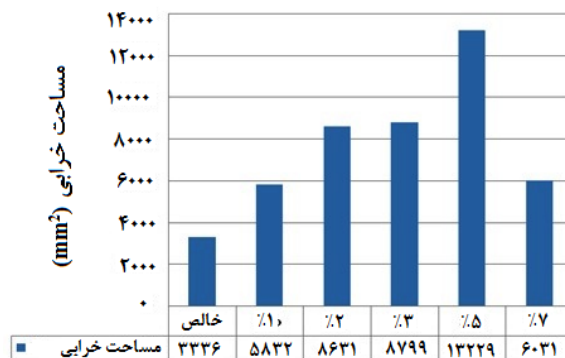
شکل ۷ عکس برداری SEM از سطح شکست نانومواد مرکب اپوکسی/نانورس تحت آزمایش کشش در درصدهای مختلف نانورس؛ الف) ۰ درصد وزنی، ب) ۳ درصد وزنی، ج) ۷ درصد وزنی

همان‌طور که در شکل ۷-ج می‌توان دید در ۷ درصد وزنی ذرات نانورس به شکل توده‌ای در ماتریس تجمع می‌کنند. این امر می‌تواند باعث تمرکز تنش و نقاط ضعیف در ماتریس شده و در نتیجه باعث کاهش چقرمگی ماتریس شود. شکل ۷-ج نشان



شکل ۱۰ جرم پلاک ایجادشده بر حسب درصد نانورس در سرعت برخورد  $V_i=130\text{ m/s}$

مساحت خرابی در نانومواد مرکب هیبریدی محتوی ۵ درصد وزنی نانورس می‌باشد که یکی از علل اصلی دارا بودن بهترین قابلیت جذب انرژی در این سرعت برخورد است.



شکل ۹ مساحت ناحیه خرابی بر حسب درصد نانورس در سرعت برخورد  $V_i=130\text{ m/s}$

#### ۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر اثرات نانورس کلوسید سی بی بر روی قابلیت جذب انرژی بالستیکی و خواص مکانیکی نانومواد مرکب هیبریدی شیشه/اپوکسی/نانورس با استفاده از آزمایشات بالستیک و تست کشش بررسی گردید و با استفاده از عکس برداری SEM از سطح شکست نانومواد مرکب هیبریدی و وجود اینکه کرنش شکست نانومواد مرکب هیبریدی با افزایش درصد وزنی نانورس تقریباً ثابت باقی می‌ماند ولیکن افزایش حداکثری ۱۵/۵ درصدی در مدول یانگ و ۱۱ درصدی در مقاومت شکست در حالت ۳ درصد وزنی نانوذرات دیده می‌شود. علاوه بر آن با افزایش درصد نانورس مکانیزم شکست و مقدار قابلیت جذب انرژی در طی فرآیند نفوذ تغییر خواهد کرد. به نظر می‌رسد بالاترین افزایش قابلیت جذب انرژی در سرعت‌های برخورد نزدیک به حد بالستیک به مقدار ۴/۵ درصد با افزودن ۵ درصد وزنی نانورس بدست می‌آید. درحالی که در سرعت‌های نسبتاً خیلی بالاتر از حد بالستیک قابلیت جذب انرژی ابتدا با افزودن نانورس کاهش و سپس در حدود ۷ درصد وزنی نانورس افزایش می‌یابد.

در تحقیق حاضر، اثرات نانورس کلوسید سی بی بر روی قابلیت جذب انرژی بالستیکی و خواص مکانیکی نانومواد مرکب هیبریدی شیشه/اپوکسی/نانورس با استفاده از آزمایش‌های بالستیک و تست کشش بررسی شد و با استفاده از عکس برداری

پنجم، اگرچه با حضور صفحات و دسته‌های تجمع نانورس و افزایش مقدار چسبندگی الیاف و رزین مقاومت در برابر لایه لایه‌ای شدن صفحات نانومواد مرکب هیبریدی و ترک خوردگی ماتریس افزایش می‌یابد، اما باعث تغییر مکانیزم شکست می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۰ می‌توان دید، با افزایش درصد نانورس جرم پلاک کاهش می‌یابد. هر چند پلاک ایجادشده و انرژی جنبشی آن می‌تواند مقدار قابل توجهی از انرژی پرتابه را جذب نماید، ولیکن تغییر مکانیزم شکست تاثیر بسیار زیادی در قابلیت جذب انرژی نانوکامپوزیت هیبریدی خواهد داشت. کاهش جرم پلاک نشان‌دهنده افزایش چقرمگی و شکل‌پذیری نانومواد مرکب است. کمترین جرم پلاک در حالت ۵ درصد وزنی نانورس است که دلیلی دیگر برای بالاتر بودن قابلیت جذب انرژی در برخورد بالستیک است.

در مجموع می‌توان نتیجه گرفت ذرات نانورس، علاوه بر نشان دادن قابلیت بهبود خواص اولیه مکانیکی و چقرمگی مواد مرکب، می‌توانند مقدار جذب انرژی در برابر برخورد بالستیکی را نیز افزایش دهند. به هر حال قابلیت مقدار جذب انرژی بالستیکی یک نانوماده مرکب هیبریدی وابسته به مکانیزم شکست، خواص مکانیکی، مقدار نانوذرات و کیفیت پخش شدگی ذرات درون رزین است. به هر حال تغییر مقدار جذب انرژی برخورد حاصل برآیند تاثیر افزودن نانوذرات بر خواص و عوامل مختلف تاثیر گذار در آن است.



- [8] Gu B., Xu J., "Finite Element Calculation of 4-Step 3-Dimensional Braided Composite under Ballistic Perforation", *Composites (Part B)*, Vol. 35, 2004, pp. 291-297.
- [9] Naik N. K., Shrirao P., Reddy B. C. K., "Ballistic Impact Behavior of Woven Fabric Composites: Formulation", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, No. 10, 2006, pp. 1521-1552.
- [10] Mamivand M., Liaghat G. H., "A Model for Ballistic on Multi-layer Fabric Targets", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37, 2010, pp. 806-812.
- [11] da Silva Junior J. E. L., Paciornik S., D'almeida J. R. M., "Evaluation of Effect of Ballistic Damaged Area on the Residual Impact Strength and Tensile Stiffness of Glass-Fabric Composite Materials", *Composite Structures*, Vol. 64, No. 1, 2004, pp. 123-127.
- [12] Davies G. A. O., Zhang X., "Impact Damage Prediction in Carbon Composite Structures", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 16, No. 1, 1995, pp. 149-170.
- [13] Sun L., Gibson R. F., Gordaninejad F., Suhr J., "Energy Absorption Capability of Nanocomposites: A Review", *Composites Science and Technology*, Vol. 69, No. 14, 2009, pp. 2392-2409.
- [14] Yasmin A., Abot J. L., Daniel I. M., "Processing of Clay-Epoxy Nanocomposites by Shear Mixing", *Scripta Materialia*, Vol. 49, No. 1, 2003, pp. 81-86.
- [15] Ho M. W., Lam C. K., Kau K. T., Ng D. H. L., Hui D., "Mechanical Properties of Epoxy Based Composites using Nanoclays", *Composites Structures*, Vol. 75, No. 3, 2006, pp. 415-421.
- [16] Lin J. C., Chang L. C., Nien M. H., Ho H. L., "Mechanical Behavior of Various Nanoparticle Filled Composites at Low-Velocity Impact" *Composite Structures*, Vol. 74, No. 1, 2006, pp. 30-36.
- [17] Beyer G., "Nanocomposites: A New Class of Flame Retardants for Polymers", *Plastics, Additives and Compounding*, Vol. 4, 2002, pp. 22-28.
- [18] Ngo T. D., Ton-That M. T., Hoa S. V., Cole K. C., "Curing Kinetics and Mechanical Properties of Epoxy Nanocomposites Based on Different Organoclays", *Polymer Engineering & Science*, Vol. 47, No. 5, 2007, pp. 649-661.
- [19] Ngo T. D., Ton-That M. T., Hoa S. V., Cole K. C., "Reinforcing Effect of Organoclay in Rubbery and Glassy Epoxy Resins, Part 1: Dispersion and Properties", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 107, No. 2, 2008, pp. 1154-1162.
- [20] Njuguna J., Pielichowski K., Alcock J. R., "Epoxy-Based Fiber Reinforced Nanocomposites", *Advanced Engineering Materials*, Vol. 9, No. 10, 2007, pp. 835-847.
- SEM از سطح شکست نانومواد مرکب هیبریدی و نانومواد مرکب اپوکسی/نانورس مورد ارزیابی قرار گرفت. با وجود اینکه کرنش شکست نانومواد مرکب هیبریدی با افزایش درصد وزنی نانورس تقریباً ثابت باقی می‌ماند، ولیکن افزایش حداکثری ۱۵/۵ درصدی در مدول یانگ و ۱۱ درصدی در مقاومت شکست در حالت ۳ درصد وزنی نانوذرات دیده می‌شود. علاوه بر آن، با افزایش درصد نانورس مکانیزم شکست و مقدار قابلیت جذب انرژی در طی فرآیند نفوذ تغییر خواهد کرد. به نظر می‌رسد بالاترین افزایش قابلیت جذب انرژی در سرعت‌های برخورد نزدیک به حد بالستیک به مقدار ۴/۵ درصد با افزودن ۵ درصد وزنی نانورس به دست می‌آید، در حالی که در سرعت‌های نسبتاً خیلی بالاتر از حد بالستیک قابلیت جذب انرژی ابتدا با افزودن نانورس کاهش و سپس در حدود ۷ درصد وزنی نانورس افزایش می‌یابد.

## ۵- مراجع

- [1] Zhu G., Goldsmith W., Dharan C. K., "Penetration of Laminated Kevlar by Projectiles: I. Experimental Investigation", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 29, 1992, pp. 399-419.
- [2] Jenq S. T., Kuo J. T., Sheu L. T., "Ballistic Impact Response of 3-D Four-Step Braided Glass/Epoxy Composites", *Key engineering materials Part 1*, Vol. 141-143, 1998, pp. 349-366.
- [3] Wu E., Chang L., "Woven Glass/Epoxy Laminates Subject to Projectile Impact", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 16, 1995, pp. 607-619.
- [4] Sun C. T., Potti S. V., "A Simple Model to Predict Residual Velocities of Thick Composite Laminates Subjected to High Velocity Impact", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 18, 1996, pp. 339-353.
- [5] Mines R. A. W., Roach A. M., Jones N., "High Velocity Perforation Behavior of Polymer Composite Laminates", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 22, 1999, pp. 561-588.
- [6] Morye S. S., Hine P. J., Duckett R. A., Carr D. J., Ward I. M., "Modelling of the Energy Absorption by Polymer Composites upon Ballistic Impact", *Composites Science and Technology*, Vol. 60, 2000, pp. 2631-2642.
- [7] Gu B., "Analytical Modeling for the Ballistic Perforation of Planar Plain-Woven Fabric Target by Projectile", *Composites (Part B)*, Vol. 34, 2003, pp. 361-371.

- [28] Avila A. F., Soares M. I., Silva Neto A., "A Study on Nanostructured Laminated Plates Behavior under Low-Velocity Impact Loadings", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 34, No. 1, 2007, pp. 28-41.
- [29] Mohagheghian I., Mcshane G. J., Stronge W. J., "Impact Response of Polyethylene Nanocomposites", *Engineering Procedia*, 2011, Vol. 10, pp. 704-709.
- [30] Avila A. F., Silva Neto A., Nascimento Junior H., "Hybrid Nanocomposites for Mid-Range Ballistic Protection", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 38, 2011, pp. 669-676.
- [31] Grujicic M., Pandurangan B., Koudela K. L., Cheeseman B. A., "A Computational Analysis of the Ballistic Performance of Light-Weight Hybrid Composite Armors", *Applied Surface Science*, Vol. 253, No. 2, 2006, pp. 730-745.
- [32] Peila R., Seferis J. C., Karaki T., Parker G., "Effects of Nanoclay on the Thermal and Rheological Properties of a VRTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding) Epoxy Resin", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 96, No. 2, 2009, pp. 587-592.
- [33] Tolle T. B., Anderson D. P., "Morphology Development in Layered Silicate Thermoset Nanocomposites", *Composites Science and Technology*, Vol. 62, 2002, pp. 1033-1041.
- [34] Zhu J., Imam A., Crane R., Lozano K., Khabashesku V. N., Barrera E.V., "Processing a Glass Fiber Reinforced Vinyl Ester Composite with Nanotube Enhancement of Interlaminar Shear Strength", *Composites Science and Technology*, Vol. 67, 2007, pp. 1509-1517.
- [21] Sinha Ray S., Okamoto M., "Polymer/Layered Silicate Nanocomposites: a Review from Preparation to Processing", *Progress in Polymer Science*, Vol. 28, 2003, pp. 1539-1641.
- [22] Paul D. R., Robeson L. M., "Polymer Nanotechnology: Nanocomposites", *Polymer*, Vol. 49, 2008, pp. 3187-3204.
- [23] Liu W. P., Hoa S. V., Pugh M., "Fracture Toughness and Water Uptake of High-Performance Epoxy/Nanoclay Nanocomposites", *Composites Science and Technology*, Vol. 65, 2005, pp. 2364-2373.
- [24] Miyagawa H., Drzal L. T., "The Effect of Chemical Modification on the Fracture Toughness of Montmorillonite Clay/Epoxy Nanocomposites", *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 18, No. 13, 2004, pp. 1571-1588.
- [25] Miyagawa H., Mohanty A. K., Drzal L. T., Misra M., "Effect of Clay and Alumina-Nanowhisker Reinforcements on the Mechanical Properties of Nanocomposites from Biobased Epoxy: a Comparative Study", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 43, No. 22, 2004, pp. 7001-7009.
- [26] Miyagawa H., Jurek R., Misra M., Drzal L. T., Mohanty A. K., "Biobased Epoxy/Clay Nanocomposites as a New Matrix for CFRP", *Composite (Part A: applied science and manufacturing)*, Vol. 37, No. 1, 2006, pp. 54-62.
- [27] Uddin M. F., Sun C. T., "Strength of Unidirectional Glass/Epoxy Composite with Silica Nanoparticle-Enhanced Matrix", *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 7-8, 2008, pp.1637-1643.