



تأثیر نانوذرات رسی بر روی رفتار بالستیکی مواد مرکب شیشه/اپوکسی - بررسی تجربی

محمد حسین پل^{۱*}، غلامحسین لیاقت^۲، سیامک مزدک^۳

۱- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش

۲- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش

* تفرش، صندوق پستی ۷۹۶۱۱-۳۹۵۱۸، m_h_pol@tafreshu.ac.ir

چکیده- در این مقاله، تأثیر نانوذرات رسی بر روی رفتار بالستیکی مواد مرکب چند لایه شیشه/اپوکسی با بافت دوبعدی به طور تجربی بررسی شده است. نانومواد مرکب هیبریدی از جنس شیشه/اپوکسی/نانورس بوده و با روش لایه چینی دستی تحت فشار ساخته شده است. نانورس کلوسید-سی بی بوده و درون سیستم اپوکسی با درصد وزنی نسبت به مجموعه رزین (اپوکسی-نانورس) ۰، ۳، ۵، ۷ و ۱۰ درصد پخش می شود. علاوه بر آزمایش های بالستیکی بر روی نمونه های ساخته شده با پرتابه های سرتخت به وزن ۸/۹gr و قطر ۱۰mm تحت برخورد با سرعت ۱۳۴m/s و ۱۶۹m/s، آزمایش کشش نیز انجام شده است. بررسی نتایج نشان می دهد حالت بهینه افزایش خواص بالستیکی با افزودن ۳ درصد وزنی نانورس به مقدار ۱۰ درصد بدست می آید. با این وجود بیشترین افزایش خواص بالستیکی در سرعت های نسبتاً بیش از حد بالستیک به مقدار ۲۰ درصد با افزودن ۱۰ درصد نانورس بدست می آید.

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

Effect of nanoclay particles on the ballistic behavior of glass/epoxy composites- experimental investigation

M. H. Pol^{1*}, G. H. Liaghat², S. Mazdak³

1- Assis. Prof., Mech. Eng., Tafresh Univ., Tafresh, Iran

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

3- Assis. Prof., Mech. Eng., Tafresh Univ., Tafresh, Iran

* P. O. B. 39518- 79611 Tafresh, Iran. m_h_pol@tafreshu.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 hybrid laminate nanocomposites are manufactured by layup method under pressure. The nanoclay particles are Closite 30B and are dispersed into the epoxy system in a 0%, 3%, 5%, 7% 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 8.9gr mass and 10mm diameter in 134m/s and 169m/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

مواد مرکب بدلیل داشتن مقاومت ویژه (مقاومت به وزن) و سفتی ویژه (سفتی به وزن) بالا نسبت به مواد سنتی همچون فلزات در ساخت سپرهای حفاظتی در برابر تهدیدهای بالستیکی به طور وسیع استفاده می‌شود [۱].

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 اما قیمت بالای آنها، استفاده آنان را محدود می‌کند [۲]. مواد مرکب ساخته شده با الیاف کربن با مقاومت و سختی بالا نیز با وجود داشتن رفتار الاستیک خطی به دلیل شکننده بودن، توانایشان در جذب انرژی محدود است [۳]. به همین دلیل با وجود اینکه خواص مکانیکی مواد مرکب الیاف شیشه وابستگی زیادی به نرخ کرنش خرابی و رفتار ماتریسشان دارد، بدلیل قیمت نسبتاً پایین، شکل‌پذیری و چقرمگی بالا یک گزینه مناسب برای کاربردهای حفاظت بالستیکی می‌باشند [۳]. 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 مؤلفه‌های آن یعنی الیاف، رزین، نانوذرات و خواص بین آنها، نسبت وزنی ذرات، درصد حجمی الیاف و کیفیت و روش پخش نانوذرات بستگی دارد [۴]. یاسمین و همکارانش [۵] حداکثر افزایش حدود ۸۰ درصد در مدول الاستیک را هنگام افزودن ۱ تا ۱۰ درصد وزنی کلوسید سی بی^۱ در اپوکسی گزارش می‌دهند. در همین حال هو و همکارانش [۶] افزایش سختی و چقرمگی را هنگام استفاده از نانوذرات گزارش دادند. لین و همکارانش [۷] نیز افزایش ۳۰ درصدی در مقاومت برخورد را هنگام استفاده از کلوسیدسی بی در ۵۰ درصد وزنی در رزین اپوکسی گزارش می‌دهند.

برای یک نوع مشخص از نانوماده مرکب هیبریدی (الیاف،

ماتریس و نانوذرات مشخص)، درصد وزنی نانوذرات و کیفیت پخش آنها در رزین، مهمترین عامل در رسیدن به خواص دلخواه می‌باشند. در کیفیت پخش اکسفولیت^۲ به دلیل این که سطح لایه‌های قابل دسترس زیاد است، معمولاً خواص مکانیکی بهبود می‌یابد [۸]. تعداد زیادی از آزمایش‌ها و گزارش‌ها نشان می‌دهد این نوع کیفیت پخش، خواص مکانیکی را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد [۹-۱۳]. از طرفی دیگر تعدادی از نتایج تجربی حاکی از بهبود چقرمگی شکست با استفاده از بکارگیری نانورس در کیفیت پخش اینترکلت^۳ دارد [۱۴]. میاگوا و همکارانش [۱۵، ۱۶] اشاره می‌کنند که چقرمگی شکست و نرخ آزاد سازی انرژی بحرانی کربن/اپوکسی به طور چشمگیری با افزودن ۵ درصد وزنی 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 نیمه استاتیکی و برخورد سرعت پائین است. اودین و سان [۱۷] نشان دادند که چقرمگی شکست درون لایه^۴ و مقاومت به ضربه نانومواد مرکب شیشه/اپوکسی تک راستا با افزایش نانوذرات سلیکا بهبود می‌یابند. آویلا و همکارانش [۱۸] تأثیر کلوسیدسی بی را بر روی مقدار جذب انرژی نانومواد مرکب شیشه/اپوکسی در برخورد سرعت پائین بررسی کردند. آنان افزایش ۱۵ تا ۴۸ درصدی در مقدار جذب انرژی با افزودن ۵ درصد وزنی نانورس کلوسیدسی بی را گزارش دادند. پل و همکاران [۱۹] تأثیر نانوذرات رسی کلوسیدسی بی را بر روی ماده مرکب الیاف شیشه/اپوکسی ساخته شده با روش تزریق به کمک خلاء را بررسی کردند. طبق نتایج این بررسی، بیشترین افزایش خواص بالستیکی در سرعت برخورد نزدیک حد بالستیک در ۵ درصد وزنی نانورس و در سرعت‌های نسبتاً بالاتر در بیش از ۷ درصد وزنی بدست می‌آید.

موضوع اصلی تحقیق حاضر، بررسی تأثیر افزودن نانورس کلوسیدسی بی بر مقاومت بالستیکی ماده مرکب شیشه/اپوکسی با بافت دوبعدی بطور تجربی است. علاوه بر مقدار جذب انرژی، مساحت خرابی نمونه‌ها نیز اندازه‌گیری و بررسی می‌شود.

2. Exfoliate
3. Intercalate
4. Interlaminar

1. Closite 30B

۲- آزمایش

۲-۱- مواد

نانوساختار استفاده شده در این تحقیق شیشه/اپوکسی تقویت شده با نانورس است. رزین پلیمری انتخاب شده از دو بخش تشکیل شده است. قسمت اول یک دیکلیسیدیل اتریسیفونول 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 gr/mol با نام تجاری جفامین دی ۴۰۰ به عنوان سفت کننده ساخته شده توسط شرکت هانسن می باشد که با نسبت وزنی ۵۵:۱۰۰ نسبت به پایه اپوکسی (قسمت اول) با آن مخلوط می شود. در این تحقیق از یک نانورس معدنی (MMT) اصلاح شده به شکل صفحه ای با نام تجاری کلوسیدسی بی (مونتموریللیت اصلاح شده با نمک آمونیوم) تولید شده توسط شرکت راکوود امریکا استفاده می شود. الیاف شیشه استفاده شده نیز از جنس شیشه با بافت دوبعدی و وزن واحد سطح 200 gr/m^2 می باشد.

۲-۲- ساخت نمونه های نانومواد مرکب اپوکسی/نانورس

ابتدا نانوذرات رس با درصدهای وزنی ۰، ۳، ۵، ۷ و ۱۰ نسبت به وزن کل رزین با سفت کننده، جفامین دی ۴۰۰، به طور مکانیکی مخلوط شده و سپس مخلوط حاصل ابتدا با مخلوط کن سرعت بالا با سرعت 6000 rpm به مدت ۶۰ دقیقه هم زده شده و سپس با استفاده از دستگاه آلتراسونیک به مدت ۳۰ دقیقه در دمای 40°C ، توان 150 kW/cm^2 و دامنه $5 \mu\text{m}$ سونیکت شده و مخلوط بدست آمده به مدت ۱۰ دقیقه در دمای 40°C به طور مکانیکی با سرعت 1800 rpm با ایپون ۸۲۸ مخلوط و هم زده می شود.

۲-۳- ساخت نانومواد مرکب هیبریدی با بافت دوبعدی

شیشه/اپوکسی/نانورس

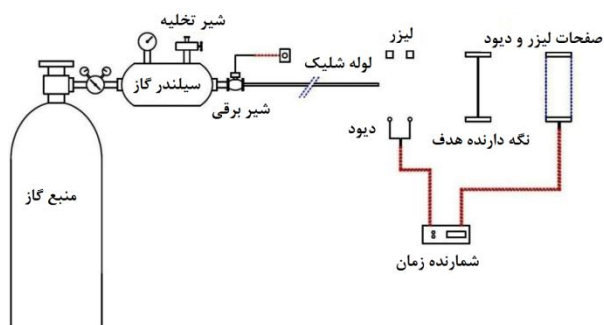
نمونه های نانومواد مرکب هیبریدی با ۱۲ لایه الیاف شیشه با بافت دوبعدی و وزن سطحی 200 gr/m^2 با استفاده از روش لایه چینی دستی ساخته می شوند. نانومواد مرکب ساخته شده دارای درصد وزنی الیاف ۵۰ درصد و ضخامت متوسط $2/6 \text{ mm}$ می باشند. به این منظور با استفاده از نانورزین (ماتریس) ساخته شده، نمونه های نانومواد مرکب هیبریدی

شیشه/اپوکسی/نانورس ۱۲ لایه ای با استفاده از روش لایه چینی دستی ساخته می شوند. پس از لایه چینی، پخت نانومواد مرکب هیبریدی طبق پیشنهاد شرکت هانسن در دمای 80°C به مدت ۱۵۰ دقیقه و به دنبال آن در دمای 120°C به مدت ۱۵۰ دقیقه در اتوکلاو تحت فشار $2/5$ و ۴ بار به ترتیب مراحل پخت، انجام می شود.

۲-۴- آزمایش بالستیک

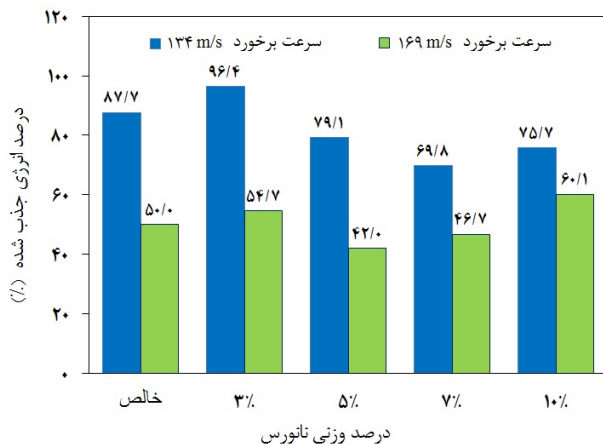
آزمایش های بالستیک در دانشگاه تربیت مدرس با استفاده از یک تفنگ گازی که طرح شماتیک آن در شکل ۱ نشان داده شده است، انجام گرفت. هنگام آزمایش هر یک از صفحات هدف، درون یک نگهدارنده به ابعاد $150 \times 150 \text{ mm}^2$ به طور ثابت قرار گرفت. پرتابه یک استوانه فولادی سرتخت به طول 15 mm ، قطر 10 mm و جرم $8/9 \text{ gr}$ در آزمایشات مورد استفاده شد. برخورد در دو سرعت مختلف برخورد 134 m/s (سرعت نزدیک حد بالستیک اهداف) و 169 m/s (سرعت بیش از حد بالستیک اهداف) بوده و هر دو سرعت های اولیه و باقی مانده در آزمایش ها اندازه گیری شد. حداقل تعداد تکرار هر آزمایش ۵ عدد در نظر گرفته شد.

به منظور اندازه گیری 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 می شود. به دلیل این که پس از نفوذ، پرتابه از مسیر خود منحرف می شود امکان اندازه گیری سرعت باقی مانده پرتابه با روش اندازه گیری سرعت ورودی وجود ندارد.



شکل ۱ طرح شماتیک تفنگ گازی

به همین دلیل از دو پرده دو بعدی موازی، که هر یک شامل



شکل ۳ درصد جذب انرژی برخورد بر حسب درصد وزنی نانورس در سرعت‌های برخورد مختلف

همان‌طور مشاهده می‌شود در سرعت برخورد $V_i=134\text{m/s}$ ، تنها در نمونه محتوی ۳ درصد وزنی نانورس، درصد جذب انرژی بیش از نمونه بدون نانورس است. در این حالت سرعت باقی‌مانده پرتابه ۴۶ درصد کاهش و انرژی جذب شده ۱۰ درصد افزایش نسبت به نمونه‌های خالص دارد. علاوه بر آن می‌توان مشاهده کرد که با افزودن ۱۰ درصد وزنی هنوز خواص بالستیک نسبت به حالت خالص کمتر است، اما مجدداً شروع به افزایش می‌کند. در سرعت برخورد $V_i=169\text{m/s}$ ، علاوه بر نمونه محتوی ۳ درصد وزنی نانورس، در نمونه‌های محتوی ۱۰ درصد نانورس نیز خواص بالستیک بیش از نمونه‌های خالص است. در حالت ۳ درصد وزنی نانورس سرعت باقیمانده پرتابه ۵ درصد کاهش و انرژی جذب شده ۱۰ درصد افزایش نسبت به نمونه‌های خالص دارد. این مقادیر برای ۱۰ درصد وزنی نانورس به ترتیب ۱۱ و ۲۰ درصد است.

شکل ۴ تفاوت سطح آسیب دیده نمونه‌های ۳ و ۱۰ درصد با نمونه‌های خالص را نشان می‌دهد. همچنین مقادیر اندازه‌گیری شده سطح آسیب دیده نمونه‌های مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۵ می‌توان دید در سرعت برخورد $V_i=134\text{m/s}$ ، نمونه‌های محتوی ۳ درصد وزنی نانورس و در سرعت برخورد $V_i=169\text{m/s}$ ، نمونه‌های محتوی ۳ و ۱۰ درصد وزنی نانورس، سطح آسیب دیده بیش از نمونه خالص است. مساحت این سطح به عوامل متعددی همچون خواص مکانیکی نانوماده مرکب هیبریدی (شکل ۶)، سرعت موج الاستیک و موج عرضی در آن، و سطح تحت تنش واقع شده نمونه‌ها در

۸۰ 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 هریک بطور جداگانه به شمارنده زمان متصل می‌باشند.

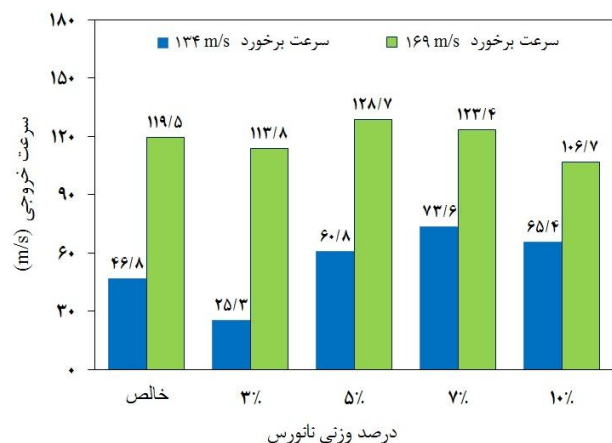
۵-۲- آزمایش کشش

برای بررسی اثر تأثیر نانوذرات رسی در بهبود خواص مکانیکی بعنوان عوامل تأثیرگذار در خواص بالستیکی، علاوه بر آزمایش بالستیک، آزمایش کشش مطابق با استاندارد ایزو ۵۲۷ با استفاده از دستگاه کشش با سرعت بارگذاری 2mm/min انجام شد.

۳- نتایج و بحث

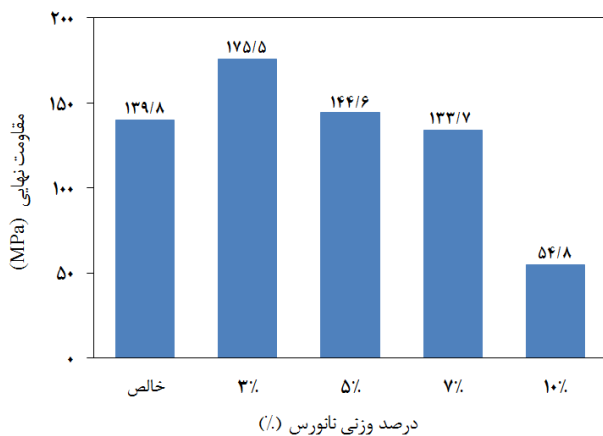
عوامل متعددی در تعیین مکانیزم شکست تحت برخورد بالستیکی و مقدار جذب انرژی در طی فرایند نفوذ یک پرتابه در اهداف وجود دارد. انتظار می‌رود با افزودن نانوذرات رسی و تغییر خواص ماده مرکب، صفحات و دسته‌های تجمع شده نانورس همانند یک عامل اتصال در فصل مشترک پلیمر و الیاف عمل کرده و با تغییر مقدار جذب انرژی توسط مکانیزم‌های مختلف جذب انرژی در طی فرایند نفوذ، رفتار بالستیکی نانوماده مرکب هیبریدی را بهبود دهد.

سرعت خروجی پرتابه و انرژی جذب شده در طی فرایند نفوذ بر حسب درصد نانوذرات رسی نمونه‌های نانوماده مرکب هیبریدی به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نمایش داده شده است.

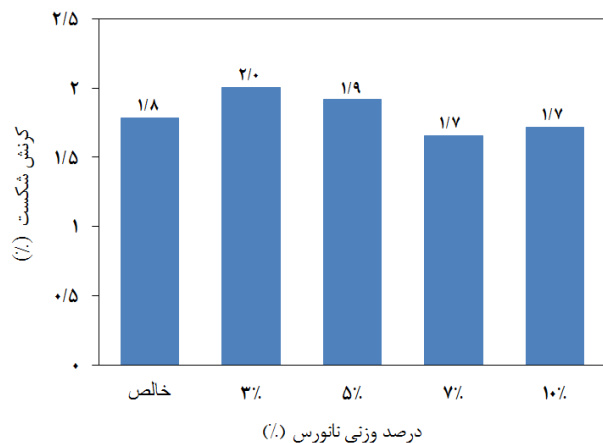


شکل ۲ سرعت خروجی پرتابه بر حسب درصد وزنی نانورس در سرعت‌های برخورد مختلف

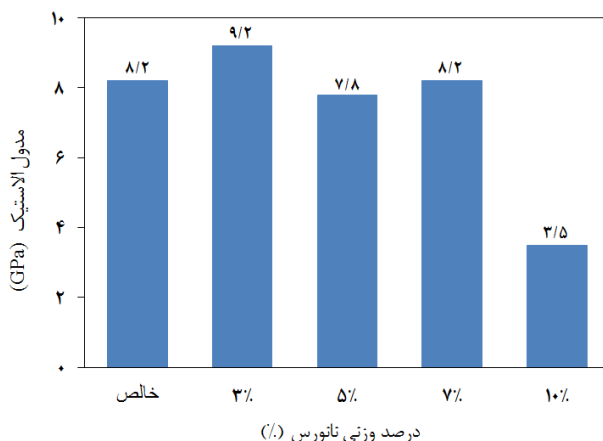
بیشتر می‌باشند. در ۷ درصد وزنی نانورس، خواص مکانیکی به جز مدول الاستیک کمی کمتر از حالت خالص بوده و در نهایت در درصدهای بالاتر (۱۰ درصد وزنی نانورس) خواص مکانیکی با شیب زیاد کاهش می‌یابند، لذا بهترین خواص مکانیکی اولیه در حالت افزودن ۳ درصد وزنی نانورس حاصل می‌شود.



الف- تغییرات مقاومت نهایی بر حسب درصد وزنی نانورس

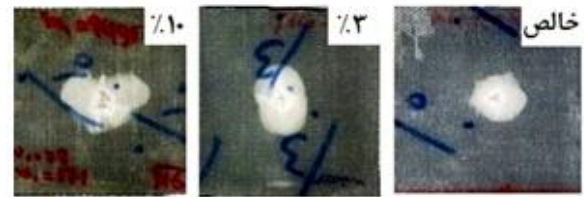


ب- کرنش شکست بر حسب درصد وزنی نانورس

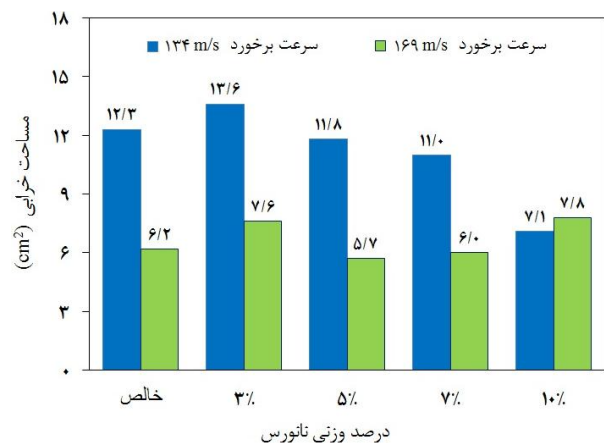


ج- تغییرات مدول الاستیک بر حسب درصد وزنی نانورس

حین برخورد و همچنین به خواص مکانیکی نانورزین، چسبندگی نانورزین به الیاف و مقاومت نمونه‌ها در مقابل ورقه‌ورقه‌ای شدن دارد.

الف- سرعت برخورد $V_i=134\text{ m/s}$ ب- سرعت برخورد $V_i=169\text{ m/s}$

شکل ۴ سطح آسیب دیده در ۱۰ و ۳۰ درصد وزنی نانورس



شکل ۵ مساحت ناحیه خرابی بر حسب درصد وزنی نانورس در سرعت‌های برخورد مختلف

به نظر می‌رسد علت اصلی بیشتر شدن سطح خرابی در ۳ درصد وزنی نانورس به دلیل زیاد شدن سطح تحت بارگذاری شده در طی فرایند نفوذ و در درصدهای بالاتر به دلیل کاهش خواص مکانیکی و مقاومت در برابر ورقه‌ورقه شدن نمونه‌ها باشد.

نتایج آزمایش کشش در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تمامی خواص مکانیکی با افزودن ۳ درصد وزنی نانورس مقدار قابل توجهی نسبت به رزین خالص افزایش می‌یابد. در ۵ درصد وزنی نانورس هر چند خواص مکانیکی کاهش یافته، اما هنوز نسبت به حالت خالص

تغییر شکل یافته (بارگذاری شده) و سطح خرابی، مقدار جذب انرژی و در نتیجه خواص بالستیکی افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۵ می‌توان مشاهده کرد در سرعت‌های نزدیک حد بالستیک، بیشترین سطح خرابی مربوط به ۳ درصد وزنی می‌باشد که یکی از علل اصلی دارا بودن بهترین قابلیت جذب انرژی در سرعت برخورد نزدیک به حد بالستیک می‌باشد. برخلاف افزایش خواص بالستیک در ۳ درصد وزنی نانورس، افزایش خواص بالستیکی در ۱۰ درصد نانورس به دلیل تأثیر موضعی گروه‌های تجمع شده نانورس (حالت اگلومرشدید نانوذرات در درصدهای بالای نانوذرات) است. این تأثیر موضعی در سرعت‌های برخورد بالاتر ($V_f=169\text{m/s}$) که فرایند نفوذ را در محدوده نزدیک محل برخورد محدودتر می‌کند، همان‌طور که انتظار می‌رود بیشتر است.

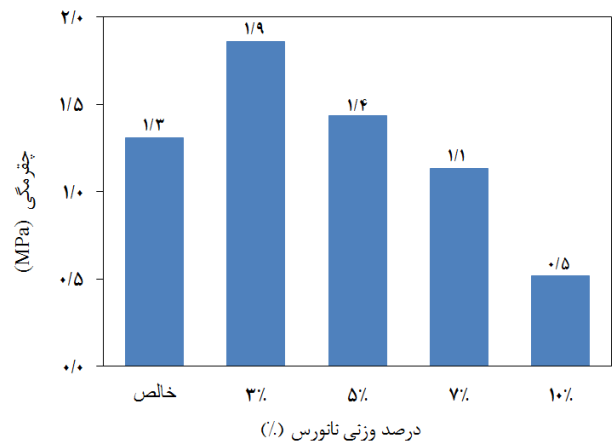
۴- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر اثر نانورس کلوسیدسی 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 گردید. نتایج آزمایش نشان می‌دهد در حالی که بیشترین افزایش خواص مکانیکی در ۳ درصد نانورس بدست می‌آید، خواص مکانیک در ۱۰ درصد وزنی کاهش چشمگیری دارد.

حالت بهینه افزایش خواص بالستیکی در ۳ درصد وزنی نانورس بدست می‌آید. در این درصد وزنی نانورس، مقدار جذب انرژی در هر دو سرعت‌های نزدیک حد بالستیک و نسبتاً بیش از آن، به مقدار ۱۰ درصد نسبت به نمونه‌های خالص می‌باشد. با این وجود بهترین افزایش جذب انرژی در سرعت‌های نسبتاً بالاتر از حد بالستیک، در ۱۰ درصد وزنی نانورس به مقدار ۲۰ درصد حاصل می‌شود.

۵- مراجع

- [1] Laible R.C., "Ballistic Materials and Penetration Mechanics", Amsterdam, Elsevier, 1980, p. 9.
- [2] 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.



د- تغییرات چقرمگی بر حسب درصد وزنی نانورس

شکل ۶ تغییرات خواص مکانیکی بر حسب درصد وزنی نانورس

افزایش مقاومت نهایی، کرنش شکست، مدول الاستیک و چقرمگی در ۳ درصد وزنی نانورس نسبت به حالت خالص به ترتیب ۲۶٪، ۱۱٪، ۱۲٪ و ۴۶٪ است. به نظر می‌رسد چندین عامل باعث بهبود خواص بالستیکی در ۳ درصد وزنی نانورس هدف شده است.

اول، با افزودن نانورس بویژه در ۳ درصد وزنی، خواص مکانیکی نانومواد مرکب هیبریدی به مقدار خیلی زیادی افزایش می‌یابد (شکل ۶).

دوم، همان‌طور که پل و همکارانش [۱۹] بیان می‌کنند صفحات و توده‌های نانوذرات می‌توانند باعث افزایش چسبندگی درون صفحه‌ای و بین صفحه‌ای نانومواد مرکب هیبریدی شوند.

سوم، صفحات و دسته‌های تجمع شده نانورس می‌توانند همانند یک پرکننده صلب عمل کرده و مانع از گسترش و رشد میکروتُرکها در یک مسیر مستقیم شوند. این امر باعث بالا رفتن چقرمگی ماتریس و در نتیجه قابلیت جذب انرژی ماتریس و نمونه‌های نانوماده مرکب هیبریدی خواهد شد. همچنین در درصدهای بالاتر از ۵ درصد، 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 قابلیت جذب انرژی شوند [۱۹].

چهارم، طبق بررسی تئوری پل و همکارانش [۲۰]، 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. بنابراین با افزایش سطح

- [13] Paul D.R., Robeson L.M., "Polymer Nanotechnology: Nanocomposites", *Polymer*, Vol., 2008, pp. 3187-3204.
- [14] Miyagawa H., Drzal L.T., "The Effect of Chemical Modification on the Fracture Toughness of Montmorillonite Clay/Epoxy Nanocomposites", *J. of Adhesion Science and Technology*, Vol. 18, No. 13, 2004, pp. 1571-1588.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Avila A.F., Soares M.I., Silva Neto A., "A Study on Nanostructured Laminated Plates Behavior under Low-Velocity Impact Loadings", *International J. of Impact Engineering*, Vol. 34, No. 1, 2007, pp. 28-41.
- [19] M. H. Pol, G. H. Liaght, F. Hajiarazi, Experimental investigation of effect of nanoclay on ballistic properties of composites, *Journal of Modares Mechanical Engineering*, Vol.12, No.1, pp.11-20, 2012.(In Persian)
- [20] M. H. Pol, G. H. Liaght, Analytical modeling of perforation of projectiles into glass/epoxy composites, *Journal of Modares Mechanical Engineering*, Vol.12, No.2, pp.11-19, 2012, (In Persian)
- [3] Davies G.A.O., Zhang X., "Impact Damage Prediction in Carbon Composite Structures", *International J. of Impact Engineering*, Vol. 16, No. 1, 1995, pp. 149-170.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Beyer G., "Nanocomposites: A New Class of Flame Retardants for Polymers", *Plastics, Additives and Compounding*, Vol. 4, 2002, pp. 22-28.
- [9] 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.
- [10] 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", *J. of Applied Polymer Science*, Vol. 107, No. 2, 2008, pp. 1154-1162.
- [11] Njuguna J., Pielichowski K., Alcock J.R., "Epoxy-Based Fiber Reinforced Nanocomposites", *Advanced Engineering Materials*, Vol. 9, No. 10, 2007, pp. 835-847.
- [12] 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.