

مقایسه تأثیر الیاف سلولزی و الیاف پشم سنگ بر مقاومت‌های مکانیکی و ضربه بالستیک نانو کامپوزیت اپوکسی-بنتونیتاشکان کشاورز روبهقانی^۱، حسین جلالی ترشیزی^{۲*}، فرانک محمد کاظمی^۳ و مجتبی کوشا^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین، دانشگاه شهید بهشتی، ایران

۲- نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین، دانشگاه شهید بهشتی، ایران، پست الکترونیک: H_jalali@sbu.ac.ir

۳- استادیار، دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین، دانشگاه شهید بهشتی، ایران

تاریخ دریافت: اردیبهشت ۱۳۹۷ تاریخ پذیرش: شهریور ۱۳۹۷

چکیده

امروزه پژوهش پیرامون کاربرد بهینه منابع طبیعی در تولید فراورده‌ها، به‌جای منابع فسیلی و تجدیدنپذیر از اهمیت روزافزونی برخوردار است. منابع سلولزی به‌عنوان تکیه‌گاه آینده فراورده‌های سبز و منابع معدنی به‌عنوان موادی فراوان، ارزان و در دسترس به‌ویژه در ایران، گزینه‌های مناسبی برای تولید فراورده‌های متنوع هستند. بنابر آنچه ذکر شد، در این پژوهش تأثیر کاربرد الیاف سلولزی و پشم سنگ (۰/۲۵ و ۰/۵ درصد جرم کامپوزیت) در حضور نانوبنتونیت (۰/۱ و ۰/۲ درصد جرم کامپوزیت) و عدم حضور آن بر ویژگی‌های متداول و ویژه کامپوزیت با بستر رزین اپوکسی بررسی گردید. نتایج نشان داد که ویژگی‌های مقاومت‌کششی (۴۷/۹ مگاپاسکال)، مدول گسیختگی (۸۶/۳ مگاپاسکال) و مدول الاستیسیته (۲۱۰۰ مگاپاسکال) کامپوزیت اپوکسی/الیاف معدنی و نیز نانوکامپوزیت اپوکسی/بنتونیت در مقایسه با کامپوزیت اپوکسی/الیاف سلولزی برتری داشته‌اند. با این حال در کامپوزیت اپوکسی/الیاف سلولزی میزان جذب انرژی ضربه بالستیک بیشتر و مساحت تخریب‌شده ناشی از ضربه مزبور کمتر از کامپوزیت اپوکسی/الیاف معدنی بوده و حفاظت بیشتری از کامپوزیت در برابر ضربه بالستیک ایجاد گردید. ویژگی‌های کششی، گسیختگی و الاستیسیته تابع نوع و میزان کاربرد تلفیقی نانوبنتونیت و الیاف طبیعی در کامپوزیت بوده و به‌طور کلی الیاف معدنی موفق‌تر از الیاف سلولزی در ماتریس اپوکسی/نانوبنتونیت عمل کرده است. در نقطه مقابل، انرژی ضربه بالستیک جذب‌شده توسط کامپوزیت و نیز مساحت تخریب‌شده در نانوکامپوزیت‌های الیاف سلولزی موفق‌تر از الیاف معدنی بوده است. به‌نحوی که بیشترین مقادیر مشاهده‌شده انرژی جنبشی جذب‌شده (۶۰/۷ ژول) و کمترین سطح تخریب‌شده (۱۰/۷ سانتی‌متر مربع)، از کاربرد بالاترین سطح الیاف سلولزی (۰/۵٪) و نانوبنتونیت (۰/۲٪) بدست آمد.

واژه‌های کلیدی: الیاف سلولزی، الیاف معدنی، ضربه بالستیک، ویژگی‌های نانوکامپوزیت.

مقدمه

امروزه در بسیاری از کاربردهای مهندسی و حتی روزمره، به تلفیق همزمانی از ویژگی‌ها نیاز بوده و امکان استفاده از یک نوع ماده برای برآورده کردن تمامی ویژگی‌های مورد نظر وجود ندارد. مثلاً در بسیاری از کاربردها به موادی نیاز است که علاوه بر استحکام بالا،

سبک نیز باشند. بنابراین ترکیب مواد مختلف به‌صورت فراورده مرکب (کامپوزیت) اجتناب‌ناپذیر است (Joshi et al., 2004). از این‌رو کامپوزیت ترکیبی از دو یا چند جزء بوده که اجزای تشکیل‌دهنده آن ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی متفاوتی دارند (Nascimento, et al., 2010). از منظر نوع ماده زمینه‌ای (ماتریس یا ماده غالب)، کامپوزیت‌ها

اکسیژن و کربن اپوکسی واکنش داده و موجب پیوند شیمیایی می‌شود. Chan و همکاران (۲۰۱۱) افزایش ۳۴٪ مدول یانگ و ۲۵٪ استحکام کششی نانوکامپوزیت را در مقایسه با اپوکسی خالص با کاربرد ۵٪ درصد نانوذرات رس گزارش کرده‌اند. Park و همکاران (۱۹۹۹) رزین اپوکسی را با الیاف بازالت و سیلیکون کاربرد تقویت کرده و دریافتند که مقاومت کششی کامپوزیت حاوی الیاف بازالت و سیلیکون کاربرد، با افزایش طول کاهش یافته که این کاهش را به اثرهای اندازه الیاف بر همگنی سیستم نسبت دادند. اما با کاربرد عامل آمینوسیلانی، مقاومت برشی بین صفحه‌ای بیش از سه برابر بهبود یافت. Sarasini و همکاران (۲۰۱۳) ویژگی‌های مکانیکی مطلوبی را از کاربرد پارچه بازالت و شیشه در کامپوزیت زمینه اپوکسی گزارش کرده‌اند. پیرامون بیومتریال‌ها، Xu و همکاران (۲۰۱۳) تأثیر نانوکریستالین سلولز (۱۵٪) بر ویژگی‌های مکانیکی رزین اپوکسی را بررسی کرده و افزایش دمای انتقال شیشه‌ای (T_g) از ۶۶/۵ به ۷۵/۵ درجه سانتی‌گراد، افزایش ۱۰۰٪ مدول یانگ و ۵۰٪ مقاومت کششی را مشاهده نمودند که به اتصال خوب اپوکسی و نانوسلولز منتسب گردید. Mottershead و Eichhorn (۲۰۰۷) پیوندیابی الیاف سلولز در کامپوزیت‌های پلیمری اپوکسی و پلی‌استر را با روش رامان مطالعه و بر قابلیت تقویت‌کنندگی ویژگی‌های مکانیکی الیاف سلولزی تأکید نمودند. Saba و همکاران (۲۰۱۷) نیز ویژگی‌های مکانیکی و ساختاری کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت‌شده با نانوالیاف سلولزی را بررسی و نشان دادند که کاربرد نانوالیاف سلولزی (به‌ویژه کاربرد ۰/۷۵ نانوالیاف) به‌طور چشمگیری ویژگی‌های مکانیکی کامپوزیت اپوکسی را بهبود می‌بخشد. بنابراین در این مطالعه و با هدف استفاده از مواد غیرسنتزی، غیرشیمیایی و طبیعی، تأثیر مقایسه‌ای الیاف سوزنی‌برگ^۱ و پشم‌سنگ^۲ بر ویژگی‌های مکانیکی و نیز ضربه بالستیک کامپوزیت اپوکسی/نانوبنتونیت مورد پژوهش قرار گرفت.

به سه دسته پلیمری، سرامیکی و فلزی تقسیم‌بندی می‌شوند (Joshi, et al., 2004). کامپوزیت‌های پلیمری در پژوهش‌های مدرن برای کاربردهای با عملکرد بالا مورد توجه ویژه‌ای هستند؛ زیرا دارای ویژگی‌های مکانیکی عالی مانند مقاومت‌های خمشی، سختی و سفتی (چقرمگی) بالا، دوام در برابر فرسایش و خوردگی و نیز مقاومت در برابر سوراخ‌شدن بوده و به‌دلیل ساخت آسان نیز در کانون توجه هستند. برخی کاربردهای معمول و ویژه این کامپوزیت‌ها عبارت‌اند از: قطعات تجهیزات هوافضا، خودرو، وسایل نقلیه رادیو کنترل، جلیقه ضدگلوله و قطعات زرهی (Pandya et al., 2013). البته کامپوزیت‌های پلیمری دارای معایب ذاتی مانند لایه‌ای شدن (به‌طور خاص)، ترک‌خوردن و خستگی پائین بوده و فاقد برخی ویژگی‌های عملکردی خاص مورد نیاز فضاپیما و موشک‌ها مانند مقاومت الکتریکی و حرارتی بالا برای تخریب الکترواستاتیک و حفاظت از اصابت رعد و برق هستند. از این‌رو کاربرد نانو مواد و الیاف پراکنده‌شده در ماتریس‌های پلیمری، مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند (Rana & Figueiro, 2016). از سویی کامپوزیت‌ها و نانوکامپوزیت‌های مورد استفاده در کاربردهای ویژه، بارهای مختلفی را تحمل کرده که بار ناشی از ضربه بالستیک، حالتی بحرانی است که در معرض آن قرار می‌گیرند (Pandya, et al., 2013) و همکاران (۲۰۰۶) افزایش سفتی و چقرمگی را با استفاده از نانوذرات رس در نانوکامپوزیت پلیمری زمینه اپوکسی گزارش کردند. Haque و همکاران (۲۰۰۳) با ساخت و مطالعه نانوکامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه/نانورس دریافتند که با افزایش ۱٪ نانوذره، استحکام برشی بهبود می‌یابد. Ngo و همکاران (۲۰۰۸) اثر نانورس بر خواص مکانیکی نوع لاستیکی (دمای انتقال شیشه‌ای پایین‌تر از محیط) و نوع شیشه‌ای (دمای انتقال شیشه‌ای بالاتر از محیط) را بررسی کردند و نشان دادند که مقاومت کششی، مدول و چقرمگی اپوکسی لاستیکی به‌طور چشمگیری بهبود یافته است. Chan و همکاران (۲۰۱۱) با بررسی سطح مشترک نانورس و ماتریس پلیمری اپوکسی نشان دادند که سیلیکون موجود در نانورس با اتم‌های

1-Soft Wood (SW)
2-Rock Wool (RW)

مواد و روش‌ها

مواد: رزین اپوکسی E20 و سخت‌کننده (هاردنر) پلی‌آمین H205 با مشخصات ارائه‌شده در جدول ۱، از شرکت پارس گوهر تهیه شد و براساس روش کار تولیدکننده، نسبت اختلاط هاردنر به رزین ۳۱ به ۶۹ در نظر گرفته شد و مورد استفاده قرار گرفت. الیاف سلولزی

سوزنی‌برگ (شکل ۱ راست) با میانگین طول ۱/۸ میلی‌متر از موجودی کارخانه چوب و کاغذ مازندران، الیاف پشم‌سنگ (شکل ۱ چپ) با میانگین طولی ۲/۱ میلی‌متر از شرکت پشم‌سنگ اسپادانا (اصفهان) و نانوبنتونیت با دانه‌بندی مش ۱۵۰۰ از شرکت فرزانه پودر (مشهد) تهیه شد.

جدول ۱- مشخصات رزین اپوکسی و سخت‌کننده مورد استفاده

نام	رنگ ظاهری	ویسکوزیته (cP) در ۲۵°C	چگالی (gr/cm ³)
رزین اپوکسی	بی‌رنگ	۹۴۵	۱
سخت‌کننده	زرد	۱۴۸-۱۵۸	۱/۰۲

آماده‌سازی الیاف: به منظور افزایش سازگاری الیاف ذاتاً آبدوست سوزنی‌برگ (SW) با رزین غیرآبدوست اپوکسی، از روش تبادل حلال با استفاده از اتانول و استون استفاده شد. بدین منظور ابتدا میزان مشخص الیاف به ترتیب در اتانول ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد غوطه‌ور و بعد به محیط استون (۹۸٪) منتقل شد. در نهایت الیاف در محیط آزمایشگاه قرار گرفت تا استون آن خارج شود (Lui et al., 1988). به منظور تمیزسازی و حذف ناخالصی‌ها، الیاف پشم‌سنگ (RW) نیز پس از چندین مرحله رقیق‌سازی، هم‌زدن شدید و ته‌نشین‌سازی، بر روی الک با مش ۷۰ آبگیری و بعد خشک گردید.

ساخت نمونه‌ها: ابتدا الیاف در دو سطح ۰/۵ و ۰/۲۵ درصد و نانوبنتونیت (NB) در دو سطح ۰/۱ و ۰/۲ درصد به رزین اپوکسی اضافه شده و به وسیله همزن مکانیکی با شدت ۵۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۲۰ دقیقه مخلوط گردید. در زمان اختلاط، سخت‌کننده نیز افزوده شد و شدت همزن به ۲۵۰ دور بر دقیقه کاهش یافت و پس از ۳ دقیقه متوقف گردید. مخلوط سیال حاصل به درون قالب‌های تفلونی صیقلی مسطح با ابعاد ۲۰۰×۲۰۰ میلی‌متر ریخته شد و به منظور خروج حباب‌های تولیدی زمان اختلاط، از لرزاننده استفاده شد. به منظور خروج

حباب‌های هوا، از دسیکاتور خلأ نیز استفاده شد که به دلیل ایجاد تجمع الیاف در سطح کامپوزیت، از کاربرد آن اجتناب گردید. سپس قالب نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای اتاق قرار گرفت و پس از جداکردن قالب‌ها برای تکمیل پرورده شدن، یک هفته زمان سپری شد. پس از برش نمونه‌ها با اره ظریف، آزمون‌های کشش و خمش سه نقطه با استفاده از دستگاه آزمون مقاومتی چندمنظوره به ترتیب براساس استانداردهای ASTM D790-03 و ASTM D638-02a انجام شد. از دستگاه تفنگ گازی (نیتروژن) پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران (شکل ۲) دارای لوله با جدار داخلی صاف (بدون خان)، برای آزمون ضربه بالستیک استفاده شد. بدین منظور نمونه‌هایی به ابعاد ۱۲۵×۱۲۵ میلی‌متر تهیه و از تفاوت سرعت اولیه $V_1=220$ m/s گلوله کروی با جرم (m) ۲/۷۱ گرم با سرعت ثانویه (V_2) اندازه‌گیری شده، میزان جذب انرژی با استفاده از رابطه ۱ محاسبه گردید (Moallemzadeh et al., 2017). از سرعت سنج نوری به همراه میکروکنترلر برای اندازه‌گیری سرعت گلوله استفاده گردید. ارزیابی شدت آسیب و تخریب وارده به نمونه‌های کامپوزیتی ناشی از اصابت و عبور گلوله تفنگ گازی نیز از طریق اسکن و اندازه‌گیری مساحت سطح

تخریب شده انجام شد.

$$K_{\text{absorb}} = K_1 - K_2 \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن K_{absorb} انرژی

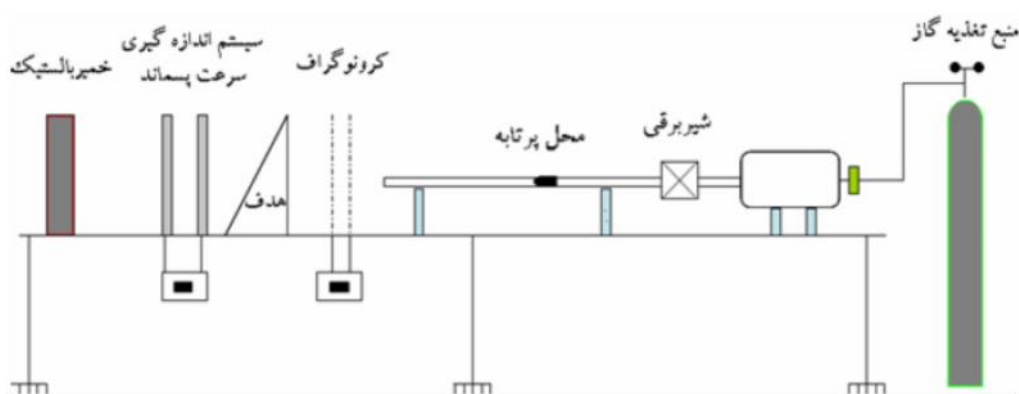
جنبشی جذب شده توسط کامپوزیت، K_1 انرژی جنبشی

اولیه گلوله و K_2 انرژی جنبشی ثانویه گلوله پس از تخریب و خروج از آزمون کامپوزیتی می باشد. انرژی های جنبشی K_1 و K_2 نیز با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد:

$$K_x = \frac{1}{2} m \cdot V_x^2 \quad \text{رابطه (۲)}$$



شکل ۱- توده الیاف سوزنی برگ (راست) و پشم سنگ (چپ)



شکل ۲- تصویر نمادین تفنگ گازی مورد استفاده در آزمون ضربه بالتیک

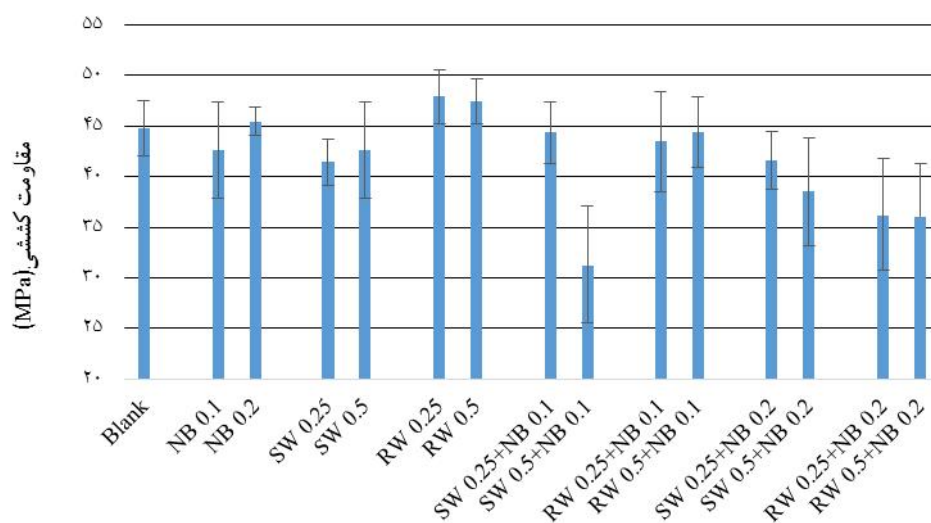
نتایج

مقاومت کششی: نتایج آزمون مقاومت کششی مواد مرکب مورد مطالعه در شکل (۳) آمده است. کامپوزیت های اپوکسی حاوی ۰/۲۵ درصد الیاف پشم سنگ با مقاومت ۴۷/۸۷ مگاپاسکال و نیز ۰/۵ درصد الیاف مزبور با مقاومت ۴۷/۴۶ مگاپاسکال بیشترین میزان مقاومت کششی تیمارها را نشان داد. در حالی که مقاومت کششی رزین اپوکسی خالص ۴۴/۷۵ مگاپاسکال بود. به عبارتی کاربرد منفرد الیاف

پشم سنگ توانسته برتری مقاومت کششی کامپوزیت زمینه اپوکسی را نسبت به کاربردهای منفرد الیاف سوزنی برگ و نانوبنتونیت و نیز حالات ترکیبی افزودنی های مورد مطالعه رقم بزند. الیاف پشم سنگ از مواد معدنی مانند SiO_2 ، TiO_2 و غیره تشکیل شده که قابلیت پیوندیابی خوبی با گروه های اپوکساید و هیدروکسیلی موجود در رزین اپوکسی را دارد و می تواند منجر به افزایش مقاومت گردد (Babu, 2016). از سویی الیاف معدنی پشم سنگ در مقایسه با الیاف طبیعی

سینرژی الیاف طبیعی/نانوبنتونیت بر مقاومت کششی کامپوزیت متفاوت بوده و با توجه به میزان و نوع افزودنی بوده است. اما به طور کلی و برخلاف کاربرد منفرد الیاف سوزنی برگ، افزایش سطح مصرف آن از ۰/۲۵ به ۰/۵ درصد جرم کامپوزیت در حضور نانوبنتونیت منجر به کاهش مقاومت کششی گردید که آن را می توان به شکل گیری نامناسب و دلمه شدگی الیاف در سطوح کاربردی بالا در بستر پلیمر مرتبط دانست.

سلولزی، از شدت و قابلیت آبدوستی کمتری برخوردار بوده که موجب می شود تا الیاف به راحتی از یکدیگر منفک و منفرد شده و در ماتریس پلیمری نیز کلوخه نشود. بنابراین پراکنش الیاف معدنی در بستر پلیمر در حال انعقاد، یکنواخت تر و توزیع تنش از مدل گسترده و یکدستی پیروی نموده و به عبارتی نقاط تمرکز تنش کمتر خواهد بود. در نتیجه مقاومت کششی ترکیب اپوکسی/الیاف پشم سنگ بیشترین میزان رصد شده بوده است (Babu, 2016). باین حال، تأثیر



شکل ۳- تأثیر کاربرد منفرد و ترکیبی الیاف سلولزی، الیاف پشم سنگ و نانوبنتونیت بر مقاومت کششی کامپوزیت پلیمری اپوکسی

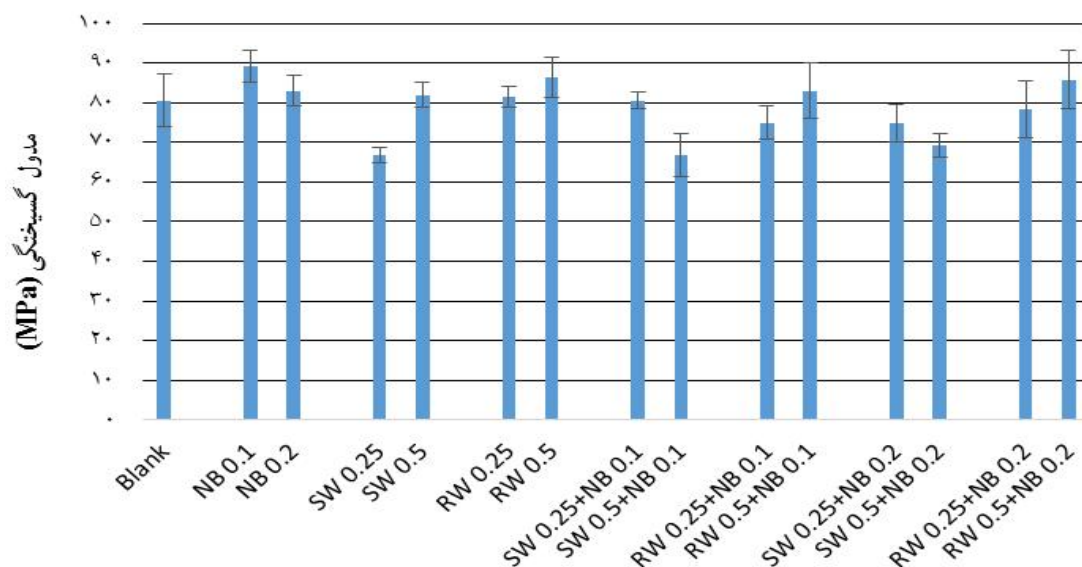
به هنگام اختلاط با اپوکسی، حباب زایی چشمگیری را ایجاد کرده است که هم افزایی دو عامل مذکور باعث کم تر بودن مقاومت کششی شده است.

مقاومت خمشی: نتایج مدول گسیختگی آزمون های ساخته شده از الیاف پشم سنگ، الیاف سلولزی و نانوبنتونیت در شکل (۴) آمده است. مدول گسیختگی بدست آمده برای رزین اپوکسی خالص ۸۰/۵ مگاپاسکال بوده و بالاترین مدول گسیختگی (۸۹/۲ مگاپاسکال) مربوط به کاربرد منفرد ۰/۱ درصد نانوبنتونیت مشاهده شد. به طور کلی کاربرد منفرد سطح ۰/۵ درصد الیاف سلولزی (۸۲ مگاپاسکال) و معدنی (۸۶ مگاپاسکال) منجر به افزایش ملموس مقاومت خمشی

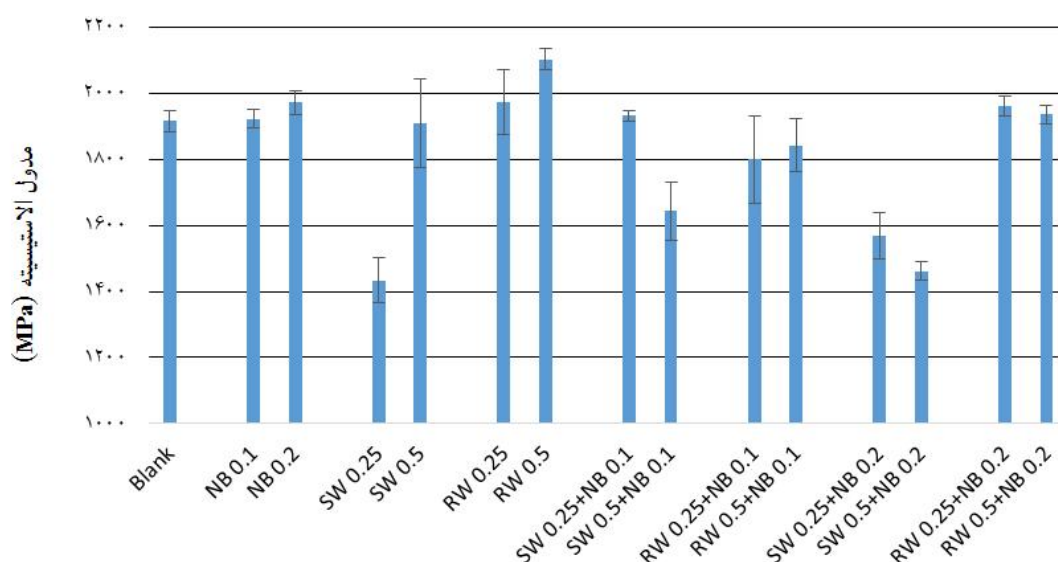
همچنین از آنجایی که الیاف طبیعی به دلیل وجود حفره سلولی، دارای انعطاف پذیری بالاتری نسبت به الیاف صلب و توپر پشم سنگ می باشند؛ بنابراین در این پژوهش نهایت تلاش بر پراکنده و همگن سازی خوب الیاف در رزین اپوکسی متمرکز گردید؛ به نحوی که در مقیاس میکروسکوپی شکل گیری یکدستی به دست آمد. اما براساس مطالعات انجام شده، ظاهراً در مقیاس میکروسکوپی الیاف سوزنی برگ به دلیل انعطاف پذیری و تمایل به دلمه یافتگی، در یکدیگر تنیده شده و موجب ناهمگنی ریزساختاری می گردد (Gurunathan et al., 2015). همچنین با وجود انجام روش تبادل حلال بر روی الیاف گیاهی سوزنی برگ، الیاف مزبور

برخلاف کاربرد منفرد الیاف سوزنی‌برگ، کاربرد همزمان آن با نانوبنتونیت منجر به کاهش مقاومت خمشی به دلیل کاربرد بیشتر الیاف شده‌است.

گردید که در مورد الیاف پشم‌سنگ، افزایش مزبور به نانوکامپوزیت حاوی بنتونیت نیز تسری داشته و کاربرد درصد بالاتری از الیاف پشم‌سنگ، منجر به افزایش مدول گسیختگی شده‌است. با این حال همانند مقاومت کششی،



شکل ۴- تأثیر کاربرد منفرد و ترکیبی الیاف سلولزی، الیاف پشم‌سنگ و نانوبنتونیت بر مدول گسیختگی خمشی کامپوزیت پلیمری اپوکسی



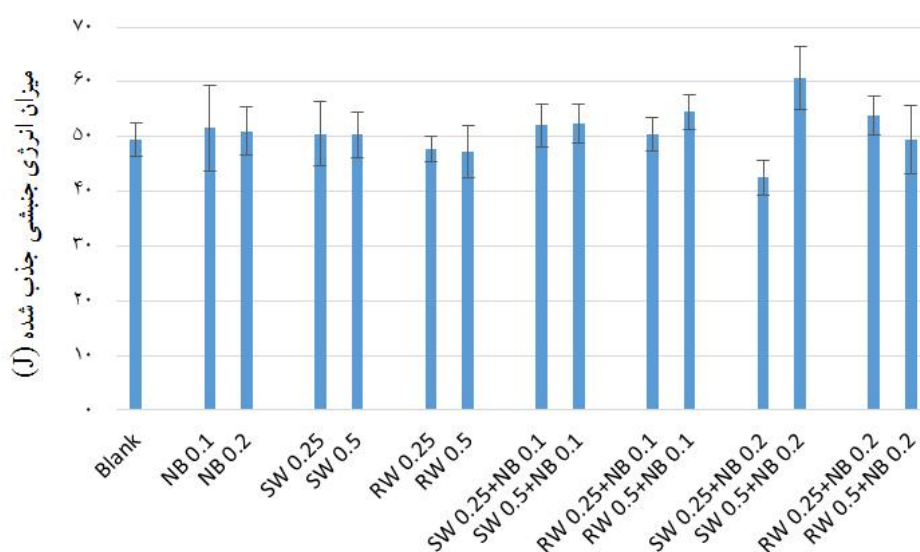
شکل ۵- تأثیر کاربرد منفرد و ترکیبی الیاف سلولزی، الیاف پشم‌سنگ و نانوبنتونیت بر مدول الاستیسیته خمشی کامپوزیت پلیمری اپوکسی

غیرمنعطف الیاف معدنی مزبور مربوط می‌شود (Masoodi, El-Hajjar *et al.*, 2012). نتایج مساحت تخریب‌شده (شکل ۷) نیز همراستا در سازگاری و تأیید این نتیجه و استدلال است. با این حال و پیرو برتری کامپوزیت حاوی نانوبنتونیت نسبت به نمونه شاهد و حاوی پشم‌سنگ، کاربرد تلفیقی الیاف معدنی و نانوبنتونیت منجر به افزایش قابلیت جذب انرژی جنبشی به بالاتر از نمونه شاهد گردید. البته ترکیب نانوبنتونیت با الیاف سلولزی نیز در اکثر موارد افزایش توان جذب انرژی جنبشی ضربه بالستیک را داشته‌است. به‌طور معمول با برخورد گلوله با انرژی جنبشی بسیار زیاد به کامپوزیت، نواحی غنی از رزین به دلیل استحکام پائین، مقاومت کمی از خود نشان می‌دهند. اما حضور الیاف به‌صورت گسسته و به‌ویژه به‌صورت بافته‌شده منجر به میرانمودن تنش وارده به ساختار ماده مرکب و توزیع تنش لحظه‌ای می‌گردد (M. Joshi & U. Chatterjee, 2016). نانوذرات بنتونیت نیز که از صفحات آلومینوسیلیکاتی با پراکنش ابعادی مختلفی تشکیل شده‌اند، به دلیل پراکنده بودن در ماتریس، هنگام برخورد گلوله با سرعت زیاد بخشی از انرژی را جذب و صرف چرخش یا کنده‌شدن می‌نمایند (Uddin, 2008).

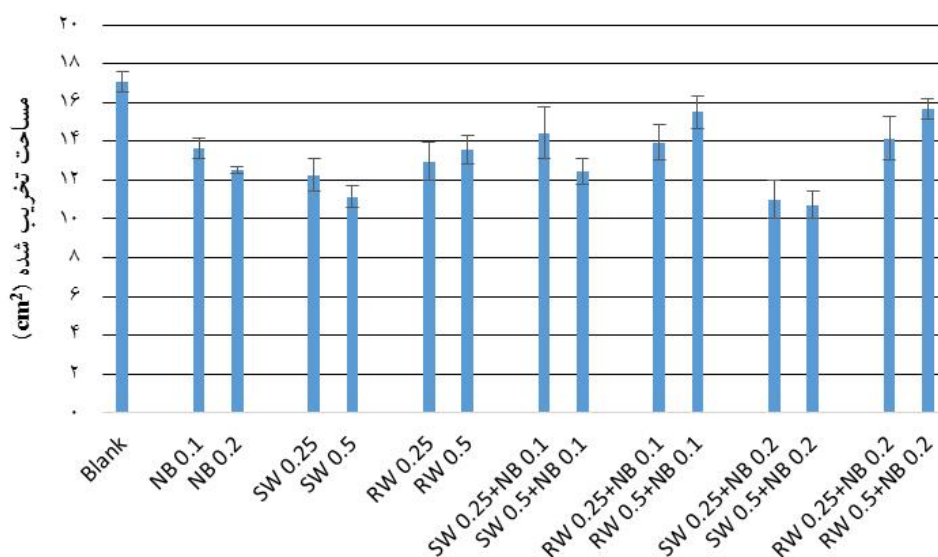
ارزیابی شدت تخریب ضربه بالستیک: همان‌طور که در شکل ۷ و تصاویر شکل ۸ مشاهده می‌شود مساحت سطح تخریب‌شده نمونه شاهد (۱۷ سانتیمتر مربع) به‌طور بارزی (شکل ۸ بالا) در مقایسه با دیگر نمونه‌ها (شکل ۸ پائین) بیشتر بوده و در نقطه مقابل، کمترین خسارت و مساحت تخریب‌شده در کاربردهای منفرد الیاف سلولزی (۱۱ سانتیمتر مربع) و ترکیبی آن با نانوبنتونیت (۱۰/۷ سانتیمتر مربع) گزارش شده است. همچنین و براساس تصاویر شکل ۸، عمق ترک‌ها و نایک‌نواختی سطح تخریب‌شده در نمونه‌های شاهد (شکل ۸ بالا) بیشتر از نمونه‌های حاوی افزودنی‌ها (شکل ۸ پائین) بوده‌است.

مدول الاستیسیته: در شکل (۵) نتایج مدول الاستیسیته خمشی کامپوزیت اپوکسی حاوی الیاف پشم‌سنگ، الیاف طبیعی سلولزی و نانوبنتونیت آمده‌است. در تأیید نتایج مقاومت کششی، بیشترین میزان مدول الاستیسیته خمشی (۲۱۰۳ مگاپاسکال) در نمونه‌های ساخته‌شده با الیاف معدنی مشاهده‌شده و پس از آن نانوبنتونیت در کاربرد منفرد برتر از الیاف سوزنی‌برگ ظاهر شد. همچنین افزایش میزان کاربرد منفرد هریک از افزودنی‌های مورد بررسی منجر به ارتقای مدول الاستیسیته کامپوزیت شده‌است. با این حال افزایش کاربرد الیاف سوزنی‌برگ در حضور نانوبنتونیت منجر به کاهش مدول الاستیسیته، حتی به سطوحی پائین‌تر از نمونه شاهد گردیده‌است که موارد ذکر شده در ویژگی کششی در اینجا نیز مصداق دارد (Babu, 2016).

آزمون ضربه بالستیک: نتایج میزان انرژی جنبشی جذب‌شده توسط کامپوزیت‌های ساخته‌شده با الیاف طبیعی سلولزی، الیاف معدنی پشم‌سنگ و نانوبنتونیت در شکل (۶) آمده‌است. میزان انرژی جذب‌شده توسط کامپوزیت‌های با مأموریت ویژه که کاربردهای متنوع روزمره (کلاه ایمنی) و خاصی همانند جلیقه‌های حفاظتی، مصارف نظامی و هوافضا دارند، از اهمیت متمایزی برخوردار است. برخلاف ویژگی‌های مقاومتی پیشین، بیشترین مقادیر انرژی جنبشی جذب‌شده عموماً در کامپوزیت‌های دارای الیاف سوزنی‌برگ، هم در حالت کاربرد منفرد الیاف مزبور و نیز توأم با نانوبنتونیت مشاهده گردید. با این حال، کاربرد منفرد نانوبنتونیت هم‌تراز با کاربرد منفرد الیاف سلولزی بوده که کاربرد تلفیقی بالاترین سطوح مصرفی آنها (SW 0.5+NB 0.2) منجر به ایجاد بالاترین میزان انرژی جذبی (۶۰/۷ ژول) توسط کامپوزیت‌های زمینه پلیمری گردید که بیش از ۲۰٪ بالاتر از نمونه شاهد بوده‌است. نکته جالب توجه، کمتر بودن توانایی کامپوزیت حاوی الیاف منفرد پشم‌سنگ در جذب انرژی جنبشی گلوله اصابت کرده به ماده مرکب در مقایسه با نمونه شاهد و نیز نمونه‌های فقط حاوی الیاف سلولزی یا نانوبنتونیت بوده‌است که به ماهیت



شکل ۶- تأثیر کاربرد منفرد و ترکیبی الیاف سلولزی، الیاف پشم سنگ و نانوبنتونیت بر جذب انرژی جنبشی ضربه بالستیک کامپوزیت



شکل ۷- کاربرد منفرد و ترکیبی الیاف سلولزی، الیاف پشم سنگ و نانوبنتونیت

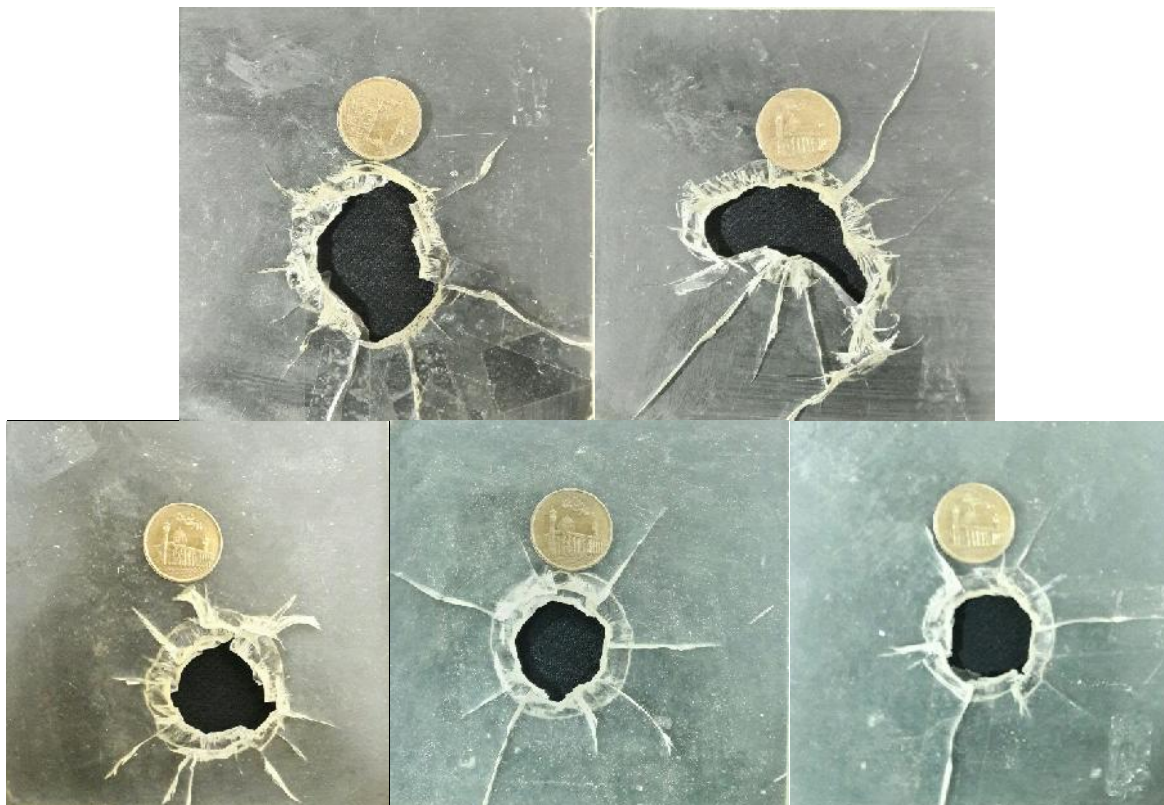
بر شدت تخریب ضربه بالستیک کامپوزیت پلیمری اپوکسی

گلوله می‌شود. در کاربردهای پارچه‌های سنتزی کولار^۱ آغشته به رزین‌ها اصل تقویت‌کنندگی الیاف پارچه برای ماتریس پلیمری تأیید شده است که به‌هنگام برخورد گلوله به چنین کامپوزیت‌هایی، الیاف از شکسته و تکه‌تکه شدن

این نتیجه بدان معنی است که با کاربرد افزودنی‌های مورد مطالعه به رزین اپوکسی، به‌دلایل احتمالی شبکه‌سازی افزودنی‌ها و میرانمودن ضربه آنی وارده و نیز تقویت اتصالات میان گروه‌های عاملی افزودنی‌ها و رزین اپوکسی، منجر به تخریب و خرد شدن مساحت کمتری در محل اصابت

تخریب شده کامپوزیت اپوکسی/الیاف سلولزی در مقایسه با اپوکسی/نانوبنتونیت (شکل ۷) می باشد که با وجود جذب انرژی تقریباً همتراز و برابر آن (شکل ۶) است که از برتری ماهیت لیفی افزودنی در مقایسه با ماهیت پودری نانوذرات، از جنبه جلوگیری از فروپاشی و خردشدگی ساختار کامپوزیتی حکایت دارد.

ماتریس پلیمری جلوگیری می کنند (Talib et al., 2012). همچنین الیاف و به ویژه الیاف سلولزی به دلیل انعطاف پذیری بالا، تنش اعمال شده به هنگام برخورد گلوله را به صورت پیوسته به اجزای (الیاف یا زنجیره های پلیمری) مجاور منتقل کرده که این انتقال تنش، منجر به خسارت کمتر به بستر رزینی می شود (شکل ۸). نکته جالب توجه، مساحت کمتر



شکل ۸- مقایسه تصویری خسارت وارده ناشی از اصابت ضربه بالستیک بر کامپوزیت های پلیمر اپوکسی

حاوی الیاف طبیعی و نانوبنتونیت

اپوکسی در حضور و نیز عدم حضور نانوبنتونیت بررسی شد. به طور کلی کاربرد منفرد هریک از سطوح متناظر الیاف سلولزی و معدنی، برتری الیاف معدنی را در ویژگی های مقاومت کششی، مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته کامپوزیت با بستر رزین اپوکسی به همراه داشت. اما از جنبه با اهمیت میزان انرژی بالستیک جذب شده و نیز مساحت تخریب شده ناشی از اصابت ضربه بالستیک، کاربرد منفرد

بحث

رویکرد صنایع و دولت ها به کاربرد و جایگزینی مواد طبیعی بجای مواد سنتزی، پژوهش های متعددی را موجب گردیده که نتایج آن به صورت فرآورده های دوستدار محیط زیست و با کاهش اثرهای نامطلوب نمایان شده است. در این پژوهش و با رویکرد مزبور، تأثیر الیاف طبیعی گیاهی و معدنی بر ویژگی های کاربردی کامپوزیت پلیمر

- 1821-1837.
- Ho, M.W., Lam, C.K., Kau, K.T., Ng, D.H.L. and Hui, D., 2006. Mechanical properties of epoxy based composites using nano clays. *Composites Structures*, 75(3): 415-421.
- Joshi, S.V., Drzal, L.T., Mohanty, A.K. and Arora, S., 2004. Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites? *Composites Part A: Applied science and manufacturing*, 35(3): 371-376.
- Lui, A., Talbot, F.D.F., Fouda, A., Matsuura, T. and Sourirajan, S., 1988. Studies on the solvent exchange technique for making dry cellulose acetate membranes for the separation of gaseous mixtures. *Journal of applied polymer science*, 36(8): 1809-1820.
- Masoodi, R., El-Hajjar, R., Pillai, K. and Sabo, R., 2012. Mechanical characterization of cellulose nanofiber and bio-based epoxy composite. *Materials & Design (1980-2015)*, 36, 570-576.
- Moallemzadeh, A.R., Sabet, A.R. and Abedini, H., 2017. Mechanical and morphological study of polymer composite plates having different fiber surface treatments with particular response to high velocity projectile impact. *Iranian Polymer Journal*, 26(3): 229-238.
- Joshi, M. and Chatterjee, U., 2016. Polymer nanocomposite: An advanced material for aerospace applications. In *Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering* (pp. 241-264).
- Mottershead, B. and Eichhorn, S.J., 2007. Deformation micromechanics of model regenerated cellulose fibre-epoxy/polyester composites. *Compos. Sci. Technol.*, 67(10): 2150-9.
- Nascimento, D.C.O., Lopes, F.P.D. and Monteiro, S.N., 2010. Tensile behavior of lignocellulosic fiber reinforced polymer composites. Part I piassava/epoxy, *Matéria (Rio de Janeiro)*, 15(2): 189-194.
- Ngo, T.D., Ton-That, M.T., Hoa, S. and Cole, K., 2008. Reinforcing effect of organoclay in rubbery and glass epoxy resins, part 1: Dispersion and properties. *Journal of Applied Science*, 107(2): 1154-1162.
- Pandya, K.S., Pothnis, J.R., Ravikumar, G. and Naik, N.K., 2013. Ballistic impact behavior of hybrid composites. *Materials & Design*, 44: 128-135.
- Park, J.M., Shin, W.G. and Yoon, D.J., 1999. A study of interfacial aspects of epoxy-based composites reinforced with dual basalt and SiC fibres by means of the fragmentation and acoustic emission techniques. *Composites science and technology*, 59(3): 355-370.
- الیاف سلولزی کارآمدتر بوده و حفاظت بیشتری را از کامپوزیت در برابر ضربه بالستیک بوجود آورده است. از منظر مزبور (انرژی جذب شده و سطح تخریب)، کاربرد منفرد الیاف سلولزی نسبت به نانوذرات بنتونیت نیز موفق تر عمل نموده است. البته تأثیر تلفیقی نانوبنتونیت و الیاف طبیعی بر ویژگی های کششی، گسیختگی و الاستیسیته، تابع نوع و میزان کاربرد آنها در کامپوزیت بوده است. اما به طور کلی تلفیق نانوبنتونیت/الیاف معدنی موفق تر از نانوبنتونیت/الیاف سلولزی در ماتریس پلیمری اپوکسی عمل نموده است. درحالی که در ویژگی های انرژی بالستیک جذب شده توسط کامپوزیت و نیز مساحت تخریب شده، به طور کلی تلفیق نانوبنتونیت/الیاف سلولزی از نانوبنتونیت/الیاف معدنی موفق تر بوده است.
- سپاسگزاری
از همکاری مسئولان محترم پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران و جناب آقایان دکتر ثابت، دکتر ناظریان و دکتر یرتوی نیا نهایت سپاس ابراز می گردد.
- منابع مورد استفاده**
- Babu, T.N., 2016. A review on mechanical and tribological properties of epoxy resin, SiO₂, TiO₂, BaSO₄, Al₂O₃, CaO, MgO, K₂O, Na₂O, Fe₂O₃ reinforced with basalt fibers. *International Journal of Chem. Tech. Research*, 9(4): 131-139.
- Chan, M.L., Lau, K.T., Wong, T.T. and Cardona, F., 2011a. Interfacial bonding characteristic of nanoclay/polymer composites. *Applied Surface Science*, 258(2): 860-864.
- Chan, M.L., Lau, K.T., Wong, T.T., Ho, M.P. and Hui, D., 2011b. Mechanism of reinforcement in a nanoclay/polymer composite. *Composites Part B: Engineering*, 42(6): 1708-1712.
- Gurunathan, T., Mohanty, S. and Nayak, S. K., 2015. A review of the recent developments in biocomposites based on natural fibres and their application perspectives. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 77: 1-25.
- Haque, A., shamsuzzoha, M. and Dean, D., 2003. S₂-glass/epoxy polymer Nano composites: manufacturing, structures, thermal and mechanical properties. *Journal of composite materials*, 37(20):

- fabric/epoxy resin composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 47: 109-123.
- Talib, A.A., Abbud, L.H., Ali, A. and Mustapha, F., 2012. Ballistic impact performance of Kevlar-29 and Al₂O₃ powder/epoxy targets under high velocity impact. *Materials & Design*, 35: 12-19.
- Uddin, F., 2008. Clays, nanoclays and montmorillonite minerals. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 39(12), 2804-2814.
- Xu, S., Girouard, N., Schueneman, G., Shofner, M.L. and Meredith, J.C., 2013. Mechanical and thermal properties of waterborne epoxy composites containing cellulose nanocrystals. *Polymer*, 54(24): 6589-6598.
- Rana, S. and Figueiro, R., 2016. *Advanced composite materials for aerospace engineering: Processing, properties and applications*. Woodhead Publishing, 496p.
- Saba, N., Mohammad, F., Pervaiz, M., Jawaid, M., Alothman, O.Y. and Sain, M., 2017. Mechanical, morphological and structural properties of cellulose nanofibers reinforced epoxy composites. *International journal of biological macromolecules*, 97: 190-200.
- Sarasini, F., Tirillò, J., Valente, M., Valente, T., Cioffi, S., Iannace, S. and Sorrentino, L. 2013. Effect of basalt fiber hybridization on the impact behavior under low impact velocity of glass/basalt woven

Effect of cellulosic and rockwool fibers on mechanical strengths and ballistic impact of epoxy-bentonite nanocomposite

A. Keshavarz Rubehghani¹, H. Jalali Torshizi^{2*}, F. MohamadKazemi³ and M. Koosha³

1-M.Sc. student, Faculty of New Technologies Eng., Shahid Beheshti University, Iran.

2*- Corresponding author, Assist. Prof., Faculty of New Technologies Eng., Shahid Beheshti University, Iran,

Email: H_Jalali@sbu.ac.i

3- Assist. Prof., Faculty of New Technologies Eng., Shahid Beheshti University, Iran

Received: May, 2018

Accepted: Sep., 2018

Abstract

Nowadays, research on optimum application of natural resources in products manufacturing instead of fossil and non-renewable resources are of utmost importance. Cellulosic resources as the future basis of Green products and also the availability and low cost of minerals, especially in Iran, are appropriate options for various products developing. In this study, the effects of cellulosic fibers and Rockwool fibers (0.25% and 0.5%) in the absence and presence of nano bentonite (0.1% and 0.2%) on normal and specific properties of Epoxy composite were evaluated. Tensile strength (47.9 MPa), modulus of rupture (86.3 MPa) and modulus of elasticity (2100 MPa) of the mineral fiber/epoxy composite and bentonite/epoxy nanocomposite were higher than the cellulosic fiber/epoxy composite. However, cellulosic fiber/epoxy composite showed higher energy absorption of the ballistic impact with lower damaged area caused by the impact compared to rockwool/epoxy composite which provide better protection against the ballistic impact. In the presence of nano bentonite particles in epoxy resin blend, modulus of rupture and elasticity and tensile strength were dependent on the type and amounts of the additives with superiority of the mineral fibers/epoxy nanocomposite compared to the cellulosic fibers. In contrast, the composites energy absorption caused by the ballistic impact and its damaged area were better in cellulosic fibers than the mineral ones. The highest absorbed energy of ballistic impact (60.7 J) and the least damaged area (10.7 cm²) were achieved by the highest application of cellulosic fibers (0.5%) and nano-bentonite (0.2%).

Keywords: Cellulosic fibers, mineral fibers, ballistic impact, nanocomposite properties.