مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها/ سال ۱۴۰۴/ دوره ۱۵/ شماره ۵/ صفحه ۳۴۹-۳۶۵

نشریه مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها

DOI: 10.22044/JSFM.2026.16447.3984

تأثیر حضور نانوخاک‌رس و الیاف بازالت بر خواص مکانیکی کشش و ضربه کامپوزیت پلیمری PLA/NR به روش رویه پاسخ(RSM)

میثم نوری نیارکی[۱،*]، امین بداقی[۲]

[۱] استادیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران.

[۲] کارشناس مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران.

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۰۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۰

چکیده

در این تحقیق، تأثیر حضور نانوخاک‌رس و الیاف بازالت بر خواص مکانیکی کشش و ضربه کامپوزیت پلیمری **PLA/NR** به روش رویه پاسخ **(RSM)** مورد بررسی تجربی قرار گرفته است. متغیرهای مورد مطالعه شامل درصد وزنی نانوخاک‌رس (۰، ۳ و ۶ درصد)، درصد وزنی الیاف بازالت (۰، ۱۰ و ۲۰ درصد) و درصد وزنی لاستیک طبیعی (۰، ۱۵ و ۳۰ درصد) هستند. نمونه‌ها با استفاده از دستگاه مخلوط‌کن داخلی ترکیب و به‌وسیله دستگاه پرس گرم طبق استانداردهای مربوطه ساخته شدند. آزمون‌های کشش برای تعیین استحکام کششی و مدول الاستیک و آزمون ضربه شارپی برای ارزیابی استحکام ضربه انجام شد. نتایج نشان داد که افزایش درصد وزنی نانوخاک‌رس در درصدهای وزنی پایین استحکام کششی و مدول الاستیک را به ترتیب ۱۰ و ۲۱ درصد افزایش داده و در درصدهای وزنی بالا باعث کاهش خواص مکانیکی شده‌است. افزایش الیاف بازالت استحکام کششی، مدول الاستیک و استحکام ضربه را به ترتیب ۱۴، ۳۷ و ۳۹ درصد افزایش داده‌است. افزایش درصد وزنی لاستیک طبیعی منجر به افزایش ۴۴ درصدی استحکام ضربه و کاهش ۱۱ و ۲۳ درصدی استحکام کششی و مدول الاستیک شده‌است؛ همچنین، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی **(SEM)** برای بررسی نحوه پراکندگی ذرات نانو و الیاف بازالت در زمینه پلیمری استفاده شدند.

کلمات کلیدی: نانوکامپوزیت‌های زیست‌تخریب‌پذیر؛ نانوخاک‌رس؛ الیاف بازالت؛ خواص مکانیکی؛ میکروسکوپ الکترونی روبشی.

The effect of the presence of nanoclay and basalt fibers on the tensile and impact mechanical properties of PLA/NR polymer composites using the response surface method (RSM)

Meysam Nouri Niyaraki[1,*], Amin Bodaghi [2]

[1] Assist. Prof., Faculty of Aerospace Engineering, Shahid Sattari Aeronautical University, Tehran, Iran.

[2] BSc, Faculty of Aerospace Engineering, Shahid Sattari Aeronautical University, Tehran, Iran.

Abstract

In this study, the effects of nanoclay and basalt fibers on the tensile and impact properties of PLA/NR polymer composites were experimentally investigated using the Response Surface Methodology (RSM). The studied variables included the weight percentage of nanoclay (0%, 3%, and 6%), basalt fibers (0%, 10%, and 20%), and natural rubber (0%, 15%, and 30%). The samples were prepared using an internal mixer and a hot press machine according to relevant standards. Tensile tests were conducted to determine tensile strength and elastic modulus, and Charpy impact tests were performed to evaluate impact strength. The results indicated that increasing the weight percentage of nanoclay at low concentrations improved tensile strength and elastic modulus by 10% and 21%, respectively, while higher percentages led to a reduction in mechanical properties. The addition of basalt fibers enhanced tensile strength, elastic modulus, and impact strength by 14%, 37%, and 39%, respectively. Increasing the natural rubber content resulted in a 44% improvement in impact strength but an 11% and 23% decrease in tensile strength and elastic modulus, respectively. Scanning electron microscopy (SEM) images were also used to analyze the dispersion of nanoparticles and basalt fibers within the polymer matrix.

Keywords: Biodegradable nanocomposites; nanoclay; basalt fibers; mechanical properties; scanning electron microscopy.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۹۱۲۹۷۵۲۴۷۷

آدرس پست الکترونیک: meysam_nouri05@yahoo.com

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، کامپوزیت‌ها و نانوکامپوزیت‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین دستاوردهای علم مواد مطرح شده‌اند. کامپوزیت‌ها، موادی هستند که از ترکیب دو یا چند فاز مختلف تشکیل شده‌اند که هر یک نقش خاصی در بهبود خواص نهایی محصول ایفا می‌کنند. این مواد به دلیل خواص برجسته‌ای مانند استحکام بالا، سبکی و انعطاف‌پذیری، در صنایع مختلف از جمله هوافضا، خودروسازی، پزشکی و بسته‌بندی کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند [۱]. با توسعه فناوری نانو، نانوکامپوزیت‌ها به عنوان نسل جدیدی از کامپوزیت‌ها معرفی شدند. در این مواد، حداقل یکی از فازها در مقیاس نانومتری (کمتر از ۱۰۰ نانومتر) قرار دارد. وجود فاز نانومتری باعث افزایش سطح تماس و بهبود تعاملات بین فازها می‌شود که منجر به افزایش قابل توجه خواص مکانیکی، حرارتی و شیمیایی می‌گردد. از جمله کاربردهای نانوکامپوزیت‌ها می‌توان به تقویت پلاستیک‌ها، بهبود خواص مکانیکی اشاره کرد [۲].

با توجه به مشکلات زیست‌محیطی ناشی از تجمع زباله‌های پلاستیکی غیرقابل تجزیه، کامپوزیت‌های زیست‌تخریب‌پذیر به عنوان جایگزینی پایدار برای مواد سنتزی مطرح شده‌اند. کامپوزیت‌های زیست‌تخریب‌پذیر علاوه بر اینکه در پایان عمر مفید خود به‌راحتی در محیط زیست تجزیه می‌شوند، می‌توانند خواص مکانیکی و عملکردی مناسبی را نیز ارائه دهند. یکی از چالش‌های اصلی در کاربرد کامپوزیت‌های زیست‌تخریب‌پذیر، ضعف خواص مکانیکی آن‌ها در مقایسه با پلاستیک‌های معمولی است. برای غلبه بر این محدودیت، استفاده از تقویت‌کننده‌ها مانند نانوذرات و الیاف طبیعی یا مصنوعی پیشنهاد شده‌است [۳ و ۴].

نانوکامپوزیت‌های زیست‌تخریب‌پذیر به دلیل خواص منحصر به فرد خود، از جمله سبکی، استحکام بالا، مقاومت به ضربه و زیست‌سازگاری، در صنایع پیشرفته‌ای مانند هوافضا و خودروسازی کاربردهای گسترده‌ای پیدا کرده‌اند. این مواد نه تنها بهبود عملکرد را تضمین می‌کنند، بلکه با کاهش وزن و تأثیرات زیست‌محیطی، به توسعه پایدار در این صنایع کمک می‌کنند. در صنعت هوافضا، نیاز به موادی با وزن کم و استحکام بالا همواره یکی از اولویت‌های اصلی بوده است. در صنعت خودروسازی نیز، نانوکامپوزیت‌های زیست‌تخریب‌پذیر به دلیل خواص مکانیکی و سبکی، جایگزین‌های مناسبی برای مواد سنتی هستند. این مواد می‌توانند در طراحی و تولید قطعات مختلف خودرو استفاده شوند. به عنوان مثال، استفاده از نانوکامپوزیت‌های سبک در ساخت بدنه، پانل‌ها و سایر قطعات خودرو می‌تواند به کاهش وزن کلی خودرو و در نتیجه کاهش مصرف سوخت کمک کند. استفاده از نانوکامپوزیت‌های زیست‌تخریب‌پذیر در صنایع هوافضا و خودروسازی نه تنها بهبود عملکرد را تضمین می‌کند، بلکه به توسعه پایدار کمک می‌کند. این مواد به دلیل تجزیه‌پذیری در محیط زیست، می‌توانند مشکلات زیست‌محیطی ناشی از تجمع زباله‌های پلاستیکی را کاهش دهند [۸-۵].

پلی‌لاکتیک اسید (PLA) به عنوان یکی از مهم‌ترین پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر مطرح شده‌است. PLA یک پلیمر خطی و زیست‌سازگار است که از منابع تجدیدپذیر مانند نشاسته ذرت، نیشکر یا سیب‌زمینی تولید می‌شود. این ماده از طریق فرآیند پلیمریزاسیون اسید لاکتیک به دست می‌آید و به دلیل خواص مکانیکی و حرارتی قابل قبول، در صنایع مختلفی مانند بسته‌بندی، پزشکی و تولید محصولات مصرفی کاربرد گسترده‌ای یافته است. PLA به دلیل ساختار بلورین و زیست‌تخریب‌پذیری، پس از اتمام عمر مفید، به آب و دی‌اکسید کربن تجزیه می‌شود و هیچ آلودگی زیست‌محیطی ایجاد نمی‌کند. این ویژگی‌ها، PLA را به یکی از گزینه‌های ایده‌آل برای جایگزینی پلاستیک‌های سنتزی تبدیل کرده است. با این حال، یکی از چالش‌های اصلیPLA ، ضعف خواص مکانیکی و شکنندگی آن در مقایسه با پلاستیک‌های سنتزی است. این محدودیت باعث شده‌است که محققان به دنبال راهکارهایی برای بهبود خواص مکانیکی و انعطاف‌پذیری PLA باشند. در این میان، استفاده از تقویت‌کننده‌ها مانند نانوذرات و الیاف طبیعی یا مصنوعی به عنوان یک راهکار مؤثر پیشنهاد شده است.

رزکروز[1] و همکارانش [۹] به بررسی جامع خواص حرارتی و مکانیکی کامپوزیت‌های زیستی بر پایه PLA تقویت‌شده با الیاف سلولزی در مقیاس‌های مختلف پرداختند. آنها در این مطالعه به طور جامع تأثیر افزودن نانوذرات سلولزی و الیاف سلولزی ماکرو مقیاس را بر استحکام کششی، مدول الاستیک، دمای انتقال شیشه‌ای (Tg) و پایداری حرارتی کامپوزیت‌ها

[1] Ruz-Cruz

مورد ارزیابی قرار دادند. آنها به طور دقیق تأثیر افزودن نانوذرات سلولزی و الیاف سلولزی ماکرو مقیاس را بر استحکام کششی، مدول الاستیک و کرنش تا نقطه شکست بررسی کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که حضور نانوذرات سلولزی به دلیل اندازه کوچک و سطح ویژه بالا، بهبود قابل توجهی در استحکام کششی و مدول الاستیک ایجاد می‌کند، اما افزودن الیاف سلولزی ماکرو مقیاس بیشتر منجر به افزایش کرنش تا نقطه شکست و انعطاف‌پذیری می‌شود. همچنین، مقاله به اهمیت استفاده از عامل‌های سازگارکننده برای بهبود چسبندگی بین فازهای PLA و سلولزی تأکید کرده و نشان دادند که عدم وجود این عامل‌ها می‌تواند منجر به کاهش خواص مکانیکی شود.

ترایودی[1] و همکارانش [۱۰] در مقاله مروری به بررسی جامع کاربردهای کامپوزیت‌های پایه پلی‌لاکتیک اسید (PLA) تقویت‌شده با الیاف طبیعی و نانوذرات برای تولید محصولات پایدار پرداخته‌اند. آنها نشان دادند که کامپوزیت‌های PLA به دلیل زیست‌تخریب‌پذیری، سازگاری محیطی و قابلیت تنظیم خواص مکانیکی از طریق ترکیب با مواد طبیعی مانند الیاف گیاهی، لاستیک‌های زیست‌تخریب‌پذیر و نانو پرکننده‌ها گزینه‌ای ایده‌آل برای جایگزینی پلاستیک‌های متعارف هستند. آنها به چالش‌های موجود در بهبود چقرمگی، مقاومت به ضربه و پایداری حرارتی این کامپوزیت‌ها اشاره کرده و راهکارهایی نظیر اصلاح سطحی الیاف، آلیاژسازی با پلیمرهای انعطاف‌پذیر و بهینه‌سازی پارامترهای فرآیندی را پیشنهاد دادند.

وو[2] و همکارانش [۱۱] در مطالعه‌ای به بررسی خواص مخلوط‌های پلی‌لاکتیک اسید/لاستیک طبیعی در عملکرد مکانیکی، رفتار حرارتی و زیست تخریب‌پذیری پرداختند. آنها در این پژوهش نشان دادند که افزودن NR به ماتریس PLA منجر به بهبود قابل توجه چقرمگی و انعطاف‌پذیری کامپوزیت می‌شود، در حالی که استحکام کششی با افزایش درصد NR کاهش می‌یابد. آنها همچنین گزارش کردند که مخلوط‌های حاوی ۲۰-۳۰ درصد NR بهینه‌ترین تعادل بین استحکام و انعطاف‌پذیری را ارائه می‌دهند. از جنبه حرارتی، نتایج آنها نشان داد که NR پایداری حرارتی PLA را در دماهای بالا بهبود می‌بخشد. بخش زیست تخریب‌پذیری مطالعه نیز حاکی از آن بود که وجود NR سرعت تخریب زیستی کامپوزیت را در محیط‌های مختلف افزایش می‌دهد.

لاستیک طبیعی[3] (NR) به عنوان یکی از مواد زیست‌تخریب‌پذیر و تجدیدپذیر، توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است. NR یک پلیمر طبیعی است که از لاستیک‌های طبیعی موجود در شیره درختان لاستیک استخراج می‌شود. این ماده به دلیل خواص منحصر به فرد خود مانند انعطاف‌پذیری بالا، مقاومت به ضربه و استحکام کششی قابل توجه، در صنایع مختلفی از جمله تولید لاستیک‌ها، بسته‌بندی‌ها و حتی کاربردهای پزشکی استفاده می‌شود.

پونگ[4] و همکارانش [۱۲] در مطالعه‌ای به بررسی سیستماتیک تأثیر ترکیب این سه جزء بر خواص فیزیکی-مکانیکی فیلم‌های کامپوزیتی پرداختند. آنها در این پژوهش نشان دادند که افزودن ۲۰ درصد وزنی لاستیک طبیعی به ماتریس پلی لاکتیک اسید منجر به بهبود چشمگیر چقرمگی و انعطاف‌پذیری می‌شود، در حالی که استحکام کششی را تا حد قابل قبولی حفظ می‌کند. این یافته‌ها با نتایج مطالعات قبلی بهینه‌ترین محدوده NR را ۲۰-۳۰ درصد گزارش کرده بودند، همخوانی دارد. نکته نوآورانه این تحقیق، استفاده همزمان از الیاف کاه برنج به عنوان تقویت‌کننده طبیعی بود. محققان دریافتند که افزودن ۱۰ درصد وزنی الیاف کاه برنج به ترکیب PLA/NR موجب افزایش ۴۰ درصدی مدول کششی و ۳۵ درصدی مقاومت به ضربه می‌شود. این بهبود خواص ناشی از ایجاد پیوندهای هیدروژنی بین گروه‌های هیدروکسیل الیاف سلولزی و ماتریس پلیمری بود؛ همچنین، استفاده از عامل جفت‌کننده مناسب باعث کاهش اندازه ذرات NR و بهبود توزیع فازها در ماتریس شد که این موضوع در تصاویر میکروسکوپ الکترونی به وضوح مشاهده گردید. نتایج آزمون‌های نفوذپذیری در تحقیق آنها نشان داد که نمونه‌های حاوی الیاف کاه برنج تا ۲۵ درصد نفوذپذیری کمتری نسبت به بخار آب دارند. همچنین، آزمون‌های زیست‌تخریب‌پذیری در شرایط کمپوست نشان داد که این فیلم‌ها پس از ۸ هفته تا ۷۰ درصد تجزیه می‌شوند. این ویژگی‌ها، این کامپوزیت‌ها را به گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای بسته‌بندی دوستدار محیط زیست تبدیل می‌کند. این مطالعه از چند جهت برای پژوهش حاضر حائز

[1] Trivedi
[2] Wu
[3] Natural Rubber
[4] Pongputthipat

اهمیت است: اولاً تأیید می‌کند که ترکیب PLA با NR می‌تواند تعادل مناسبی بین استحکام و انعطاف‌پذیری ایجاد کند. ثانیاً نشان می‌دهد که استفاده از تقویت‌کننده‌های طبیعی مانند الیاف کاه برنج می‌تواند خواص مکانیکی را به طور قابل توجهی بهبود بخشد.

نیراچا[1] و همکارانش [۱۳] در مطالعه‌ای به بررسی تأثیر نانوکریستال‌های سلولز (CNC) استخراج‌شده از تنه نخل روغنی به‌عنوان پرکننده زیست‌تقویت‌کننده در ماتریس لاستیک طبیعی اصلاح‌شده (NR) پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن CNC به‌ویژه در مقادیر بهینه (۵-۱۰٪ وزنی)، منجر به بهبود چشمگیر خواص مکانیکی از جمله استحکام کششی، مدول یانگ و مقاومت به سایش می‌شود، در حالی که انعطاف‌پذیری کامپوزیت را نیز حفظ می‌کند. این بهبود ناشی از پراکندگی یکنواخت نانوذرات و تشکیل شبکه‌های هیدروژنی قوی بین گروه‌های هیدروکسیل CNC و زنجیره‌های پلیمری NR بود. علاوه بر این، استفاده از CNC به‌عنوان یک پرکننده زیست‌تخریب‌پذیر، پایداری محیطی کامپوزیت را افزایش داد.

یکی از تقویت‌کننده‌های مهم در توسعه نانوکامپوزیت‌های زیست‌تخریب‌پذیر، نانوخاک‌رس است که به دلیل ساختار لایه‌ای و ویژگی‌های منحصر به فرد خود، مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است [۱۴ و ۱۵]. نانوخاک‌رس به دلیل داشتن سطح ویژه بالا و توانایی تشکیل ساختارهای نانومتری در ماتریس پلیمری، می‌تواند خواص مکانیکی، حرارتی و سدی مواد را به طور قابل توجهی بهبود بخشد. این نانوذرات با ایجاد تعاملات قوی بین لایه‌ها و ماتریس پلیمری، استحکام و سفتی نانوکامپوزیت را افزایش می‌دهند و همچنین به دلیل ساختار متراکم خود، خواص سدی مانند مقاومت به نفوذ گاز و رطوبت را بهبود می‌بخشند. علاوه بر این، نانوخاک‌رس به دلیل منشأ طبیعی و زیست‌سازگاری، یک گزینه ایده‌آل برای استفاده در مواد زیست‌تخریب‌پذیر است [۱۶].

یکی از تقویت‌کننده‌های پیشرفته و کارآمد در توسعه نانوکامپوزیت‌های زیست‌تخریب‌پذیر، الیاف بازالت هستند که به دلیل خواص منحصر به فرد خود، مورد توجه بسیاری از صنایع قرار گرفته‌اند. الیاف بازالت از ذوب سنگ‌های آذرین طبیعی به دست می‌آیند و دارای ویژگی‌هایی مانند استحکام بالا، وزن کم، مقاومت به حرارت و شیمیایی و هزینه تولید پایین هستند. این الیاف به دلیل ساختار کریستالی و خواص مکانیکی برجسته، قادرند انرژی ضربه را جذب کرده و مقاومت به ضربه و استحکام کششی نانوکامپوزیت‌ها را به طور قابل توجهی افزایش دهند. علاوه بر این، الیاف بازالت به دلیل منشأ طبیعی و فرآیند تولید سازگار با محیط زیست، یک گزینه ایده‌آل برای استفاده در مواد زیست‌تخریب‌پذیر هستند [۱۷ و ۱۸].

هدف اصلی این مطالعه، بهینه‌سازی خواص مکانیکی کشش و ضربه نانوکامپوزیت‌های زیست‌تخریب‌پذیر تقویت‌شده با الیاف بازالت و نانوخاک‌رس است. این تحقیق با استفاده از روش باکس بنکن برای طراحی آزمایش، به دنبال تعیین تأثیر دقیق درصدهای مختلف تقویت‌کننده‌ها بر خواص مکانیکی است. همچنین، تحلیل ساختاری با استفاده از SEM به درک بهتر مکانیسم‌های تقویت و تعامل بین فازها کمک می‌کند. این مطالعه می‌تواند به عنوان پایه‌ای برای توسعه مواد نوین زیست‌تخریب‌پذیر در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

در این مطالعه، چهار ماده اصلی شامل پلی‌لاکتیک اسید (PLA)، لاستیک طبیعی(NR) ، نانوخاک‌رس و الیاف بازالت به عنوان مواد پایه و تقویت‌کننده استفاده شده‌اند. PLA مورد استفاده در این تحقیق از شرکت NatureWorks LLC خریداری شده‌است. این ماده دارای مدول یانگ حدود ۳/۵ گیگاپاسکال، استحکام کششی حدود ۶۰ مگاپاسکال و کرنش تا نقطه شکست حدود ۶٪ است؛ همچنین، دمای انتقال شیشه‌ای (T_g) آن حدود ۵۸ درجه سلسیوس است که آن را برای کاربردهای مختلف مناسب می‌کند.

NR مورد استفاده در این تحقیق از شرکت Rubberex Corporation مالزی تهیه شده‌است. این ماده دارای مدول یانگ حدود ۱/۵ مگاپاسکال، استحکام کششی حدود ۲۵ مگاپاسکال و کرنش تا نقطه شکست حدود ۸۰۰٪ است. دمای انتقال شیشه‌ای (T_g) آن حدود ۷۰- درجه سلسیوس است که آن را به یک ماده انعطاف‌پذیر تبدیل می‌کند. نانوخاک‌رس مورد استفاده در این تحقیق از شرکت Southern Clay Products تهیه شده‌است. این نانوذرات دارای اندازه ذرات

[1] Niracha

حدود ۴۰ نانومتر و سطح ویژه حدود ۷۵۰–۸۰۰ مترمربع بر گرم هستند؛ همچنین، ظرفیت جذب رطوبت آن‌ها کمتر از ۲٪ است که آن‌ها را به یک تقویت‌کننده ایده‌آل تبدیل می‌کند. الیاف بازالت مورد استفاده در این تحقیق از شرکت Basalt Fiber Co. چین تهیه شده‌است. این الیاف دارای استحکام کششی حدود ۴۰۰۰ مگاپاسکال، مدول یانگ حدود ۸۵ گیگاپاسکال هستند. چگالی آن‌ها ۲/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب است که آن‌ها را به یک ماده سبک و مقاوم تبدیل می‌کند.

انتخاب این مواد بر اساس نقش‌های مختلف آن‌ها در نانوکامپوزیت‌ها انجام شده‌است. PLA و NR به عنوان ماتریس زیست‌تخریب‌پذیر عمل می‌کنند، در حالی که نانوخاک‌رس به عنوان تقویت‌کننده نانومتری و الیاف بازالت به عنوان تقویت‌کننده ماکروسکوپی عمل می‌کنند. این ترکیب بهینه‌سازی شده به دنبال بهبود خواص مکانیکی (کشش و ضربه) نانوکامپوزیت‌های زیست‌تخریب‌پذیر است و می‌تواند در صنایع مختلف کاربرد داشته باشد.

۳- آماده‌سازی نمونه‌ها

برای آماده‌سازی نمونه‌های نانوکامپوزیت زیست‌تخریب‌پذیر، از مواد اولیه شامل پلی‌لاکتیک اسید (PLA)، لاستیک طبیعی (NR)، نانوخاک‌رس و الیاف بازالت استفاده شد. تمامی مواد بلافاصله پس از تهیه شدن مورد استفاده قرار گرفتند تا از خلوص و کیفیت آن‌ها اطمینان حاصل شود. قبل از شروع فرآیند اختلاط، نانوخاک‌رس به منظور حذف رطوبت باقی‌مانده، در دستگاه گرمکن با دمای ثابت ۹۰ درجه سلسیوس به مدت ۴ ساعت خشک شد. این مرحله برای جلوگیری از تشکیل حباب‌های هوا در ماتریس پلیمری و بهبود کیفیت نهایی نانوکامپوزیت ضروری بود. فرآیند آماده‌سازی نمونه‌ها با استفاده از روش اختلاط مذاب انجام شد. برای این منظور، از دستگاه مخلوط‌کن داخلی مدل HBISYS90 استفاده شد که با سرعت ۶۰ دور بر دقیقه (rpm) و در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس تنظیم شده بود. در ابتدا، PLA به عنوان ماده پایه در دستگاه مخلوط‌کن داخلی ذوب شد. سپس، NR در سه درصد وزنی مختلف شامل ۰، ۱۵ و ۳۰ درصد به ترکیب اضافه شد تا زمینه پلیمری نهایی شکل بگیرد. افزودن NR به PLA به بهبود انعطاف‌پذیری و مقاومت به ضربه نانوکامپوزیت کمک می‌کند.

در مرحله بعد، نانوخاک‌رس در سه درصد وزنی ۰، ۳ و ۶ درصد و الیاف بازالت در سه درصد وزنی ۰، ۱۰ و ۲۰ درصد به ترکیب اضافه شدند. این مواد به صورت دقیق وزن شده و به آرامی به مخلوط اضافه شدند تا توزیع یکنواخت آن‌ها در ماتریس پلیمری تضمین شود. زمان اختلاط برای تمامی نمونه‌ها ۱۰ دقیقه در نظر گرفته شد. این زمان بهینه‌سازی شده بود تا از توزیع یکنواخت تقویت‌کننده‌ها در ماتریس اطمینان حاصل شود و در عین حال از تخریب حرارتی مواد جلوگیری شود. پس از اتمام فرآیند اختلاط، نمونه‌ها برای آزمون‌های مکانیکی (کشش و ضربه) آماده‌سازی شدند. نمونه‌ها با استفاده از دستگاه پرس گرم در دمای ۱۹۰ درجه سلسیوس و تحت فشار ۲/۵ مگاپاسکال شکل‌دهی شدند. این شرایط بهینه‌سازی شده بودند تا از تراکم مناسب و خواص مکانیکی بهینه نمونه‌ها اطمینان حاصل شود. برای اطمینان از دقت و قابلیت تکرارپذیری نتایج، از هر ترکیب، ۵ نمونه استاندارد برای هر آزمون ساخته شد. تمامی نمونه‌ها تحت شرایط یکسان تهیه شدند تا تأثیر متغیرهای مختلف بر خواص مکانیکی به صورت دقیق و قابل اعتماد بررسی شود.

۴- طراحی آزمایش

در این تحقیق، به منظور برقراری یک رابطه کمی بین خواص مکانیکی و متغیرهای مؤثر و همچنین ایجاد قابلیت مدل‌سازی برای خواص مورد بررسی، از روش طراحی آزمایش بر پایه رویه پاسخ[1] استفاده شده‌است. این روش به طور گسترده برای مدل‌سازی و تحلیل مسائلی به کار می‌رود که در آن‌ها پاسخ مورد نظر تحت تأثیر چندین متغیر قرار دارد. در این رویکرد، پاسخ به صورت یک رویه یکپارچه ارائه می‌شود که به تحلیل دقیق رفتار سیستم کمک می‌کند. یکی از مزایای مهم این روش، کاهش تعداد آزمایش‌های لازم برای دستیابی به نتایج قابل اعتماد است. در اینجا، از یک مدل چندجمله‌ای درجه اول یا دوم برای مدل‌سازی پاسخ استفاده شده‌است. مدل‌های مرتبه اول و دوم به ترتیب به صورت معادلات (۱) و (۲) بیان می‌شوند [۱۹].

[1] Response Surface Methodology

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \varepsilon \quad (۱)$$

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} x_i^2 + \sum\sum_{i<j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (۲)$$

در معادلات مورد استفاده، yنشان‌دهنده پاسخ، kتعداد پارامترها، X_i و X_j متغیرهای مستقل و β_0، β_i، β_{ii} و β_{ij} به ترتیب ضرایب رگرسیونی برای عرض از مبدأ، ضرایب خطی، ضرایب درجه دوم و اثرات متقابل هستند [۱۹].

یکی از مهم‌ترین مزایای استفاده از این طرح آزمایش، کاهش چشمگیر تعداد آزمایش‌های لازم است. این موضوع به‌ویژه در شرایطی حائز اهمیت است که به دلیل محدودیت‌های فیزیکی فرآیند، تولید برخی نمونه‌ها غیرممکن یا از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نباشد. طرح باکس- بنکن[1] به دلیل نیاز به تعداد نقاط کمتر نسبت به طرح مرکب مرکزی در تعداد عامل‌های برابر، از لحاظ هزینه و زمان اجرای آزمایش‌ها مقرون‌به‌صرفه‌تر است. علاوه بر این، این طرح دارای خاصیت دوران‌پذیری است، به این معنا که فاصله تمام نقاط موجود در طراحی آزمایش از نقطه مرکزی یکسان است.

این ویژگی باعث می‌شود که واریانس خطا در تمام نقاط طراحی یکسان باشد و دقت نتایج بهبود یابد. تعداد نقاط لازم برای اجرای آزمایش در طرح باکس- بنکن با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود که در آن، N نشان‌دهنده تعداد آزمایش‌های لازم، k تعداد متغیرها و m تعداد تکرارهای نقطه مرکزی است [۲۰].

$$N = 2k(K-1) + m \quad (۳)$$

در این تحقیق، متغیرهای مورد نظر برای آزمایش شامل درصد وزنی پلیمر طبیعی (NR) ، درصد وزنی نانوخاک‌رس و درصد وزنی الیاف بازالت هستند. در این راستا، مقدار NR در سه سطح ۰، ۱۵ و ۳۰ درصد، نانوخاک‌رس در سه سطح ۰، ۳ و ۶ درصد و الیاف بازالت نیز در سه سطح ۰، ۱۰ و ۲۰ در نظر گرفته شدند. سپس، بر اساس طراحی آزمایش انجام‌شده توسط نرم‌افزار Design-Expert، تعداد ۱۵ حالت مختلف برای ترکیب نمونه‌های مورد آزمایش تعیین شدند که در جدول ۱ ارائه می‌گردد.

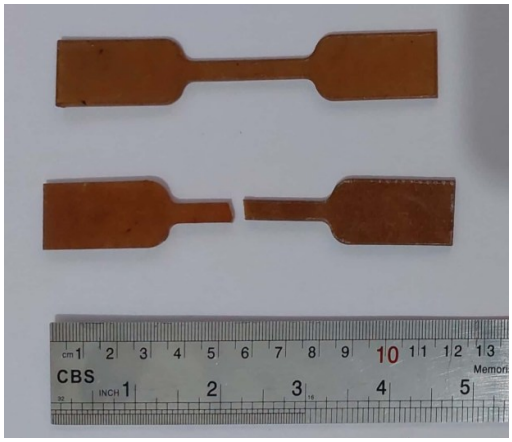
جدول ۱- درصد وزنی ترکیبات طراحی شده توسط نرم‌افزار دیزاین اکسپرت

ردیف	نانو رس (wt%)	الیاف‌بازالت (wt%)	NR (wt%)	PLA (wt%)
۱	۰	۰	۱۵	۸۵
۲	۶	۰	۱۵	۷۹
۳	۰	۲۰	۱۵	۶۵
۴	۶	۲۰	۱۵	۵۹
۵	۰	۱۰	۰	۹۰
۶	۶	۱۰	۰	۸۴
۷	۰	۱۰	۳۰	۶۰
۸	۶	۱۰	۳۰	۵۴
۹	۳	۰	۰	۹۷
۱۰	۳	۲۰	۰	۷۷
۱۱	۳	۰	۳۰	۶۷
۱۲	۳	۲۰	۳۰	۴۷
۱۳	۳	۱۰	۱۵	۷۲
۱۴	۳	۱۰	۱۵	۷۲
۱۵	۳	۱۰	۱۵	۷۲

۵- آزمون‌ها

آزمون کشش با استفاده از دستگاه زوبیک رول مدل Z100 و مطابق با استاندارد ISO 527-1 انجام شد. در این آزمون، سرعت حرکت فک‌ها برابر با ۵ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم شد و نمونه‌ها تا لحظه گسیختگی کامل تحت کشش قرار گرفتند. آزمون ضربه نیز مطابق با استاندارد ISO 179 در دمای محیط و با استفاده از دستگاه آزمون ضربه شارپی انجام شد. برای بررسی ریزساختار نمونه‌ها پس از آزمون ضربه، از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. به منظور جلوگیری از تجمع بار الکتریکی روی سطح نمونه‌ها در حین آزمایش، سطح آن‌ها با لایه‌ای از طلا به ضخامت ۱۰ نانومتر پوشش داده شد. تصاویر مربوط به نمونه‌های آزمون کشش و ضربه، قبل و پس از انجام آزمایش‌ها به ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ ارائه شده‌اند.

[1] Box-Behnken



شکل ۱- تصویر نمونهٔ آزمون‌کشش قبل و بعد از انجام آزمون

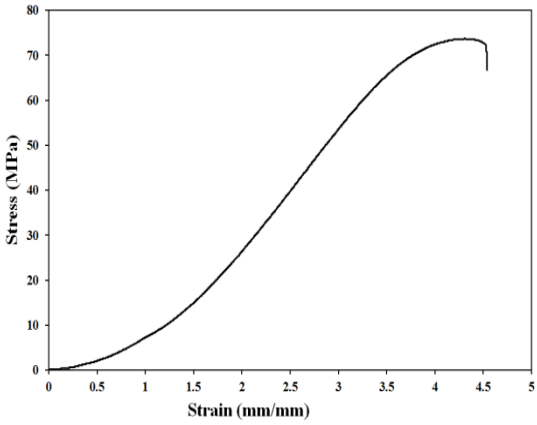
شکل ۲- تصویر نمونهٔ آزمون ضربه قبل و بعد از انجام آزمون

۶- نتایج و بحث

در این قسمت از تحقیق، حضور همزمان دو متغیر الیاف بازالت و نانوخاک‌رس در ماتریس پلیمری شامل پلی‌لاکتیک اسید (PLA)و لاستیک طبیعی (NR) مورد بررسی قرار گرفته است. پس از انجام آزمون‌های مکانیکی کشش و ضربه، میانگین نتایج آزمون‌ها برای استحکام ضربه، استحکام کششی و مدول الاستیک در جدول ۲ نشان داده شده‌است؛ همچنین برای نمونه نمودار تنش- کرنش ترکیب شماره ۱۰ که حاوی ۳ درصد وزنی نانورس، ۲۰ درصد وزنی الیاف بازالت و ۰ درصد وزنی لاستیک طبیعی می‌باشد در شکل شماره ۳ نشان داده شده است.

جدول ۲- نتایج آزمون‌های کشش و ضربه

کد نمونه	استحکام کششی (MPa)	مدول الاستیک (GPa)	استحکام ضربه (J/m)
۱	۵۷	۳/۱	۲۱
۲	۵۸	۳/۴	۱۵
۳	۶۵	۵/۳	۳۰
۴	۶۶	۵/۶	۲۴
۵	۶۵	۴/۸	۱۸
۶	۶۶	۵/۱	۱۲
۷	۵۹	۴/۰	۳۳
۸	۶۰	۴/۱	۲۸
۹	۶۵	۴/۳	۱۰
۱۰	۷۵	۶/۵	۱۹
۱۱	۵۹	۳/۵	۲۵
۱۲	۶۷	۵/۷	۳۵
۱۳	۶۷	۵/۲	۲۳
۱۴	۶۷	۵/۲	۲۳
۱۵	۶۷	۵/۲	۲۳

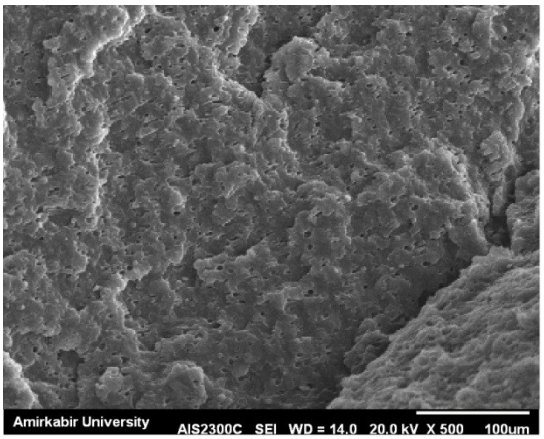


شکل ۳- نمودار تنش- کرنش نمونه شماره ۱۰

۶-۱- مطالعات ریخت شناسی

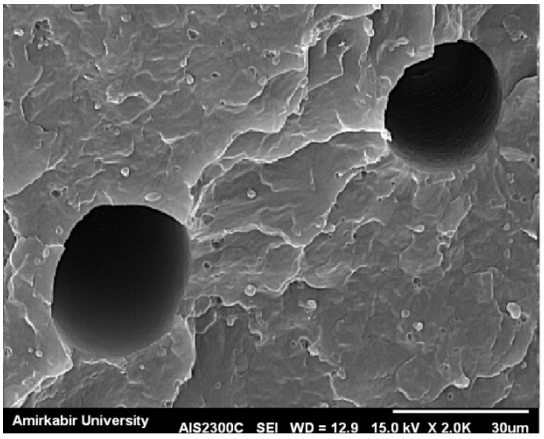
تصاویر گرفته شده از سطح شکست نمونه‌های آزمون ضربه در نیتروژن مایع در شکل‌های ۳ تا ۶ نشان داده شده است. شکل ۴ تصویری میکروسکوپی از سطح شکست نانوکامپوزیت PLA/NRرا نمایش می‌دهد که اطلاعات ارزشمندی درباره ساختار و عملکرد این ماده ارائه می‌کند. همانطور که در تصویر

مشاهده می‌شود، توزیع یکنواخت فازها در ماتریس پلیمری از عوامل کلیدی در دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب محسوب می‌شود. در واقع، کارایی نانوکامپوزیت‌ها به شدت تحت تأثیر دو پارامتر اساسی قرار دارد: پراکندگی مطلوب نانوذرات در سرتاسر زمینه پلیمری و ایجاد پیوندهای قوی در فصل مشترک بین نانوذرات و شبکه پلیمری. این ویژگی‌ها در کنار هم موجب بهینه‌سازی عملکرد مکانیکی ماده می‌گردند.



شکل ۴- تصویر SEM از نمونهٔ پلیمری دو فازی PLA/NR

شکل ۵ مورفولوژی سطح شکست نمونه حاوی ۱۰ درصد وزنی الیاف بازالت را بدون حضور نانوخاک‌رس و NR نمایش می‌دهد. تصویر میکروسکوپی به وضوح نقص چسبندگی بین الیاف و ماتریس پلیمری را آشکار می‌سازد، به طوری که الیاف به صورت کامل از بستر پلیمری خارج شده‌اند. این مشاهدات نشان می‌دهد که حضور صرف الیاف بدون اصلاح فصل مشترک نمی‌تواند منجر به ارتقای مطلوب خواص مکانیکی گردد. تحلیل ریزساختاری حاکی از آن است که نانوذرات خاک‌رس با پر کردن فضای بین الیاف و ماتریس، دو نقش کلیدی ایفا می‌کنند: نخست ایجاد پیوند شیمیایی قویتر بین فازها و دوم افزایش مسیر انتشار ترک.

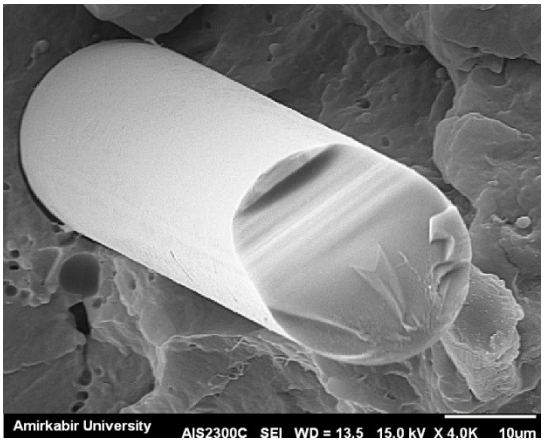


شکل ۵- تصویر SEM از نمونهٔ شامل ۰ درصد وزنی نانورس، ۱۰ درصد وزنی الیاف بازالت و ۰ درصد وزنی NR

شکل ۶ تصویری میکروسکوپی از سطح شکست نمونه حاوی ۳ درصد وزنی نانوخاک‌رس، ۱۰ درصد وزنی الیاف بازالت و ۱۵ درصد وزنی NR ارائه می‌دهد. تحلیل ریزساختاری نشان می‌دهد که نانوذرات خاک‌رس با اشغال فضای بین الیاف و ماتریس، عملکرد چندجانبه‌ای ایفا می‌کنند. این رفتار با یافته‌های پیشین در مورد پراکندگی نانورس در مرز مشترک الیاف و ماتریس همسو است [۲۱].

این ذرات با ایجاد پیوندهای فیزیکی مؤثر، استحکام چسبندگی بین فازها را به میزان قابل توجهی ارتقا می‌بخشند. مکانیزم عملکرد نانوذرات در بهبود خواص مکانیکی شامل سه فرآیند کلیدی است: اولاً، تشکیل پل‌های نانومتری بین دیواره‌های ترک که از گسترش آن‌ها جلوگیری می‌کند [۲۲]. ثانیاً، تغییر مسیر انتشار ترک‌ها که منجر به افزایش سطح شکست و جذب انرژی بیشتر می‌شود [۲۳]. ثالثاً، ایجاد مناطق تغییر شکل پلاستیک موضعی در اطراف نانوذرات که به‌عنوان منابع اتلاف انرژی عمل می‌کنند [۲۴]. این مکانیسم‌های همزمان به‌طور گسترده در نانوکامپوزیت‌های پلیمری گزارش شده‌اند و منجر به بهبود چشمگیر مقاومت به رشد ترک و افزایش انرژی شکست می‌شوند. از دیدگاه انتقال بار، حضور همزمان نانوذرات و الیاف بازالت می‌تواند منجر به ایجاد یک شبکه ترکیبی برای توزیع تنش شود که انتقال مؤثر بار از ماتریس به فازهای تقویت‌کننده را بهبود می‌بخشد [۲۵]. این رفتار سینرژیک در کامپوزیت‌های چندمقیاسی گزارش شده است؛ همچنین، نانوذرات می‌توانند با محدود کردن حرکت

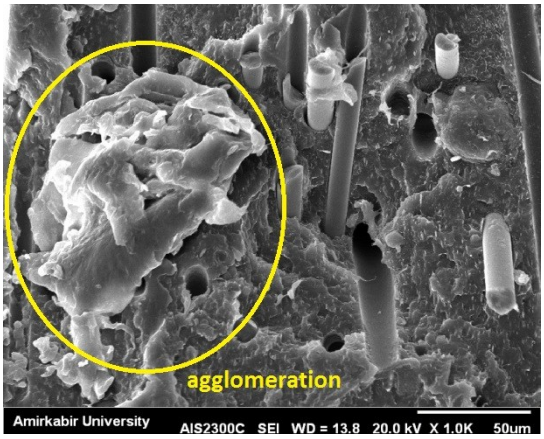
زنجیرهای پلیمری و ایجاد میدان‌های تنش موضعی، نقشی معادل با تقویت از طریق نابجایی در فلزات ایفا کنند و منجر به تقویت ماتریس شوند [۲۶]. این مکانیسم‌ها می‌توانند به‌عنوان تفسیری تئوریک از بهبود همزمان استحکام و مدول در نمونه‌های ترکیبی مطرح شوند [۲۷].



شکل ۶- تصویر SEM از نمونهٔ شامل ۳ درصد وزنی نانورس، ۱۰ درصد وزنی الیاف بازالت و ۱۵ درصد وزنی NR

شکل ۷ تصویری گویا از چالش‌های ناشی از افزایش غلظت نانوخاک‌رس (۶ درصد وزنی) در کنار ۲۰ درصد وزنی الیاف بازالت و ۱۵ درصد وزنی NR ارائه می‌دهد. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در این شکل به وضوح نشان می‌دهد که افزایش غلظت نانوخاک‌رس به بیش از ۶٪ منجر به تشکیل کلوخه‌هایی[1] با ابعاد تقریبی ۵۰ میکرومتر می‌شود که در سطح شکست نمونه قابل مشاهده هستند. این تجمع‌ها با علامت‌گذاری زرد در تصویر مشخص شده‌اند و احتمالاً به‌عنوان نقاط آغاز ترک عمل کرده‌اند.

این کلوخه‌ها عملکردی دوگانه دارند: از یک سو، با ایجاد موانع فیزیکی، حرکت زنجیره‌های پلیمری را محدود کرده و ممکن است به افزایش سفتی کمک کنند [۲۸]. از سوی دیگر، به دلیل چسبندگی ضعیف با ماتریس و عمل به‌عنوان تمرکزکننده تنش، می‌توانند به عنوان نقاط آغاز ترک عمل کنند [۲۹].

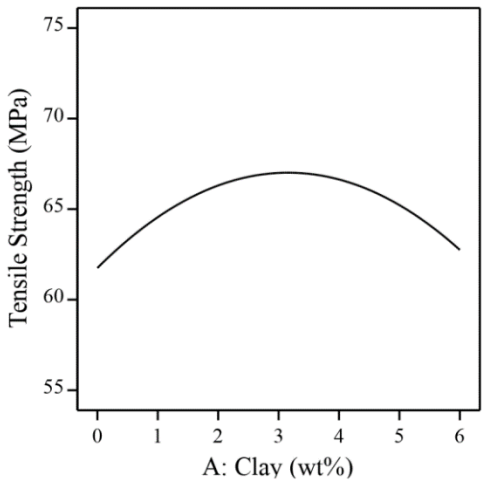


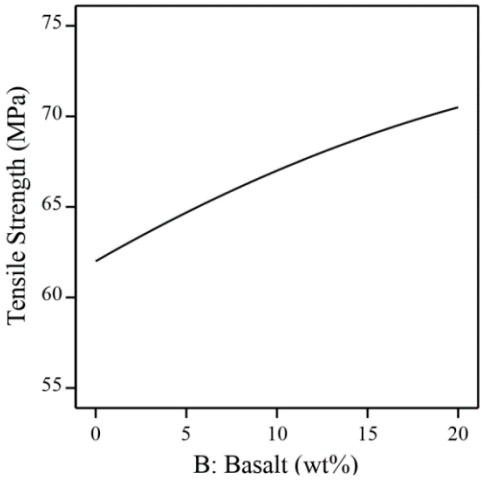
شکل ۷- تصویر SEM از نمونهٔ شامل ۶ درصد وزنی نانورس، ۲۰ درصد وزنی الیاف بازالت و ۱۵ درصد وزنی NR

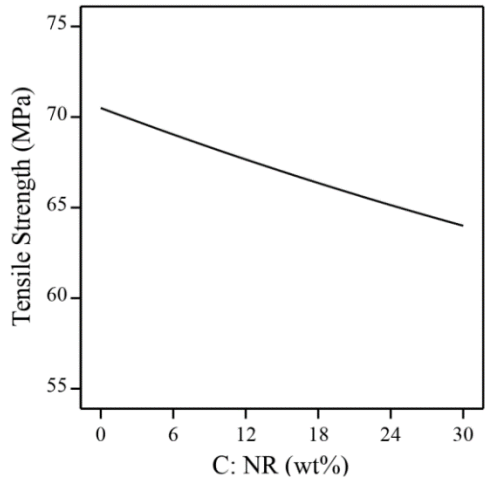
۶-۲- بررسی استحکام کششی نانوکامپوزیت‌ها

نتایج مربوط به تأثیر هر یک از مواد بر استحکام کششی در نمودارهای موجود در شکل ۸ نشان داده شده‌است. همچنین رویه‌های پاسخ سطح مربوط تأثیر دو به دوی تأثیر ترکیبات روی استحکام کششی نمونه‌ها در شکل ۹ نشان داده شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود، افزودن نانوخاک‌رس تا ۳ درصد وزنی به ماتریس PLA/NR منجر به افزایش ۱۰ درصدی استحکام کششی می‌شود. این بهبود را می‌توان به دو عامل اصلی نسبت داد: اولاً، نانوذرات خاک‌رس به دلیل نسبت سطح به حجم بالا و برهمکنش‌های قوی با زنجیره‌های پلیمری، موجب افزایش کارایی انتقال تنش در فصل مشترک ماتریس-نانوذره می‌شوند [۳۰]. ثانیاً، توزیع یکنواخت نانوذرات در غلظت‌های پایین (تا ۳٪) باعث ایجاد ساختار بین‌لایه‌ای می‌شود که استحکام کامپوزیت را افزایش می‌دهد [۳۱]. با افزایش درصد نانوخاک‌رس به بیش از ۳ درصد وزنی، روند کاهش ۸ درصدی در استحکام کششی مشاهده شد. در درصدهای وزنی بالا، نانوذرات خاک‌رس تمایل به تجمع و تشکیل کلوخه دارند که منجر به ایجاد نقاط تمرکز تنش و کاهش کارایی تقویت‌کنندگی می‌شود.

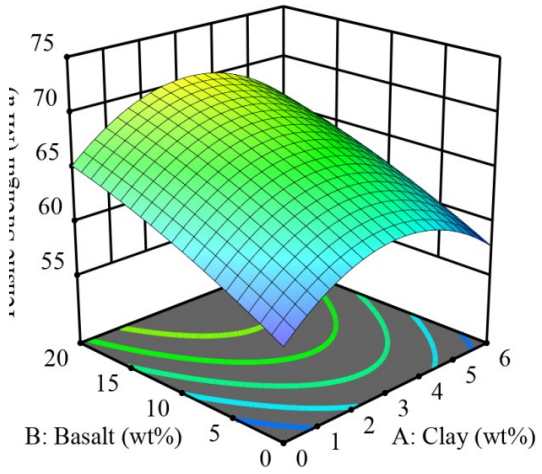
[1] agglomeration

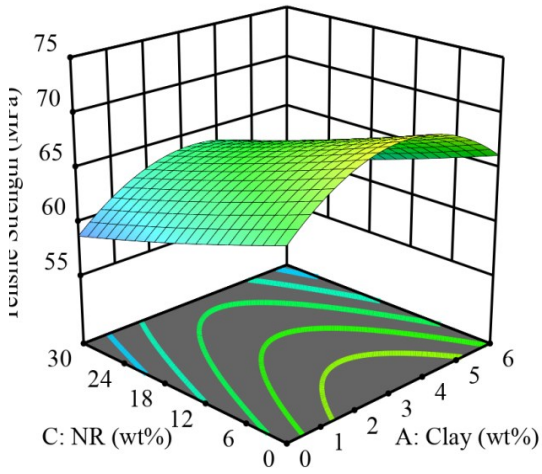


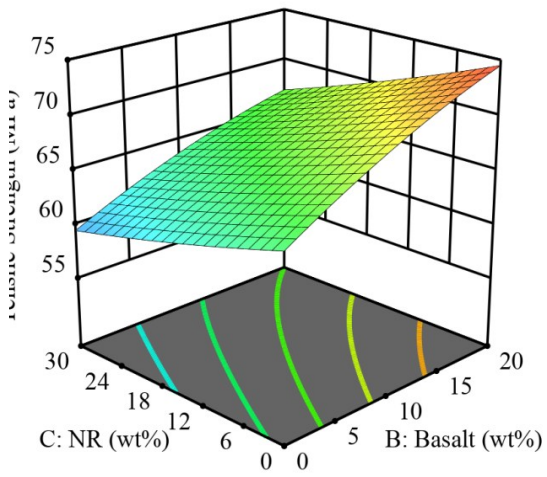




شکل ۸- نمودارهای تأثیر نانورس، الیاف بازالت و NR بر روی استحکام کششی







شکل ۹- رویه‌های پاسخ مربوط به استحکام کششی در درصدهای وزنی مختلف مواد

همچنین افزایش بیش از حد نانوذرات باعث محدودیت در حرکت زنجیره‌های پلیمری و کاهش قابلیت تغییر شکل پلاستیک ماتریس می‌گردد. حضور بیش از حد نانوخاک‌رس می‌تواند در توزیع یکنواخت NR و الیاف بازالت اختلال ایجاد کند [۳۲]. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش درصد الیاف بازالت تا ۱۵٪ وزنی، استحکام کششی نانوکامپوزیت‌های PLA/NR تا ۱۴٪ بهبود یافته است. هنگام اعمال بار، الیاف بازالت بخش عمده‌ای از تنش را تحمل می‌کنند و از تغییر شکل ماتریس پلیمری جلوگیری می‌نمایند. الیاف بازالت دارای سطحی ناهموار و فعال از نظر شیمیایی هستند که پیوندهای قوی‌تری با ماتریس PLA در غلظت ۱۵٪ وزنی، الیاف بازالت به صورت یکنواخت در ماتریس توزیع شده و جهت‌گیری مناسبی در جهت اعمال بار دارند. این توزیع مطلوب از تشکیل کلوخه‌های الیاف که می‌توانند به عنوان نقاط تمرکز تنش عمل کنند، جلوگیری می‌نماید؛ همچنین نانوذرات خاک‌رس با پر کردن فضای بین الیاف و ماتریس، کارایی انتقال تنش را افزایش می‌دهند [۳۳].

همانطور که مشاهده می‌شود، افزودن لاستیک طبیعی (NR) منجر به کاهش حدود ۱۱ درصدی استحکام کششی می‌شود. این کاهش استحکام عمدتاً ناشی از ماهیت متفاوت این دو ماده و برهمکنش‌های بین‌فازی آنهاست. PLA به عنوان یک پلیمر نیمه‌بلورین دارای ساختار مولکولی منظم و استحکام کششی نسبتاً بالایی است (در محدوده ۵۰-۷۰ مگاپاسکال)، در حالی که NR یک الاستومر طبیعی با ساختار آمورف و انعطاف‌پذیر است که استحکام کششی آن به مراتب کمتر می‌باشد. وقتی NR به ماتریس PLA اضافه می‌شود، چندین مکانیزم کاهش استحکام به طور همزمان فعال می‌شوند. اولاً، ذرات NR به عنوان نقاط نرم در ماتریس سخت PLA عمل می‌کنند که تحت بار کششی به راحتی تغییر شکل می‌دهند. این تغییر شکل موضعی باعث تمرکز تنش در اطراف ذرات NR شده و به عنوان نقاط شروع ترک عمل می‌کنند. ثانیاً، حضور NR چگالی پیوندهای بین مولکولی مؤثر در تحمل بار را کاهش می‌دهد، چرا که زنجیره‌های لاستیکی NR نمی‌توانند به اندازه زنجیره‌های PLA در انتقال تنش مشارکت کنند [۳۴].

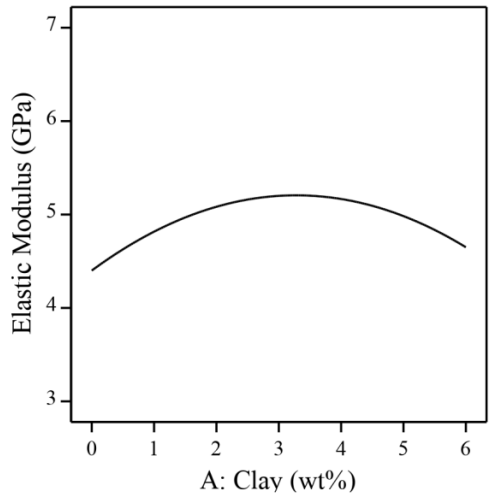
کاهش استحکام کششی و بهبود چشمگیر استحکام ضربه با افزودن لاستیک طبیعی در این تحقیق، با مطالعات قبلی در سیستم‌های PLA/NR تأیید می‌شود. چن[1] و همکارانش [۳۵] گزارش کردند که اختلاط ۳۰٪ لاستیک طبیعی با PLA منجر به کاهش ۱۲٪ در استحکام کششی و افزایش ۴۲٪ در استحکام ضربه می‌شود که به تشکیل ساختار مغز-پوسته و افزایش تغییر شکل پلاستیک موضعی نسبت داده. این نتایج، کارایی لاستیک طبیعی به‌عنوان عامل اصلاح‌کننده چقرمگی در ماتریس‌های ترد PLA را تأیید می‌کند.

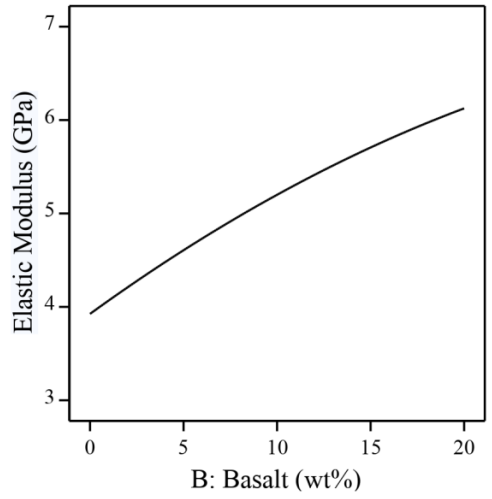
۶-۳- بررسی مدول الاستیک نانوکامپوزیت‌ها

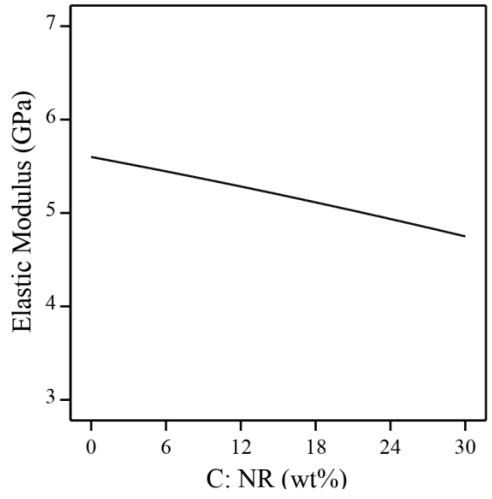
نتایج مربوط به تأثیر هر یک از مواد بر مدول الاستیک در نمودارهای موجود در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همچنین رویه‌های پاسخ سطح مربوط تأثیر دو به دوی تأثیر ترکیبات بر روی مدول الاستیک نمونه‌ها در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، افزودن نانوخاک‌رس تا ۳ درصد وزنی به ماتریس PLA/NR موجب افزایش ۲۱ درصدی مدول الاستیک می‌شود. این بهبود قابل توجه به دلیل این است که نانوذرات خاک‌رس به دلیل نسبت سطح به حجم بالا و پراکندگی مناسب، موجب افزایش سفتی ماتریس پلیمری می‌شوند. این ذرات با ایجاد محدودیت در حرکت زنجیره‌های پلیمری، مقاومت در برابر تغییر شکل الاستیک را افزایش می‌دهند. نانوذرات خاک‌رس در درصدهای وزنی بهینه با تشکیل پیوندهای هیدروژنی با زنجیره‌های پلیمری، سفتی فصل مشترک را افزایش می‌دهند. این امر منجر به کارایی بیشتر در انتقال تنش بین فازها می‌شود [۳۶]. یافته‌های این پژوهش مبنی بر بهبود استحکام کششی و مدول الاستیک با افزودن ۳ درصد وزنی نانوخاک‌رس و کاهش آن در غلظت بالاتر، با مطالعات پیشین همسو است. کومار[2] و همکارانش [۳۷] در پژوهشی روی نانوکامپوزیت‌های PLA تقویت‌شده با خاک‌رس، گزارش کردند که افزودن ۳٪ نانورس منجر به افزایش ۱۲٪ در استحکام کششی و ۲۰٪ در مدول الاستیک می‌شود، اما در غلظت ۶٪ به دلیل تجمع نانوذرات، روند کاهش خواص مشاهده می‌شود.

[1] Chen

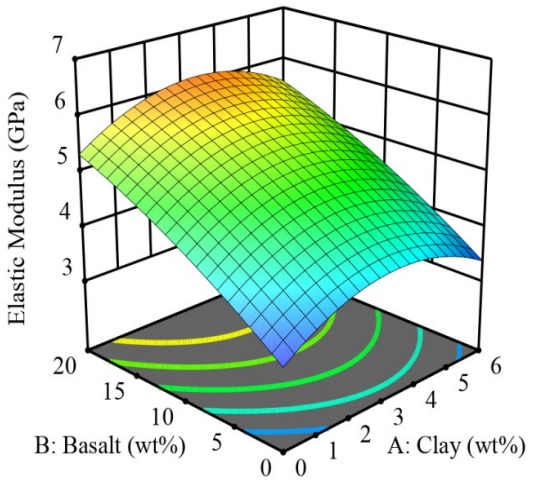
[2] Kumar

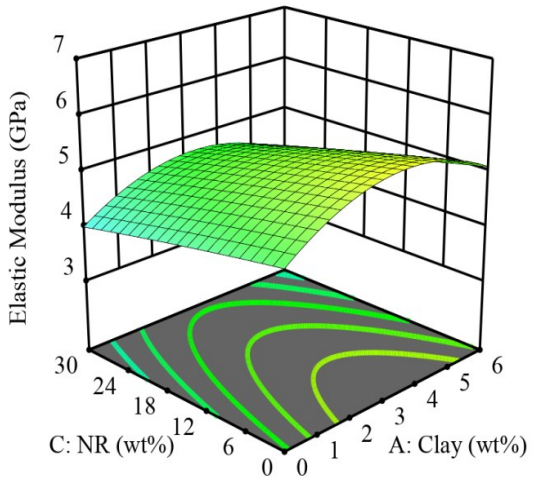


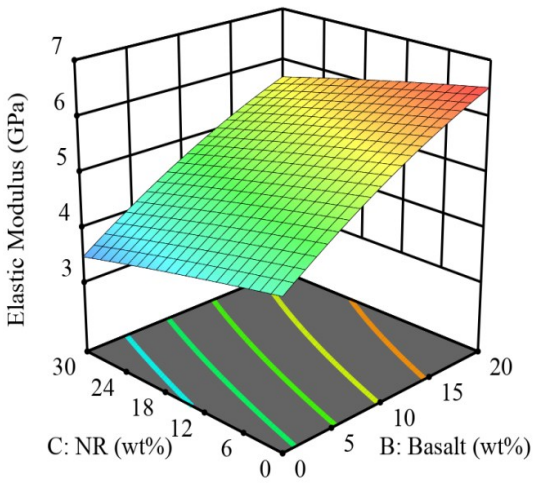




شکل ۱۰- نمودارهای تأثیر نانورس، الیاف بازالت و NR بر روی مدول الاستیک







شکل ۱۱- رویه‌های پاسخ مربوط به مدول الاستیک در درصدهای وزنی مختلف مواد

افزایش نانوخاک‌رس تا ۶ درصد وزنی منجر به کاهش ۱۴٪ مدول الاستیک می‌شود که عمدتاً ناشی از تجمع نانوذرات و تشکیل کلوخه است. این کلوخه‌ها به عنوان نقاط ضعف عمل کرده و با ایجاد تمرکز تنش، موجب کاهش کلی سفتی کامپوزیت می‌شوند. تصاویر SEM به وضوح وجود این کلوخه‌ها را در غلظت‌های بالاتر نشان می‌دهد. در غلظت‌های بالا، توزیع ناهمگن نانوذرات منجر به ایجاد نواحی با چگالی ذره متفاوت می‌شود.

این ناهمگنی موجب ایجاد تنش‌های داخلی و کاهش کارایی تقویت‌کنندگی می‌گردد [۳۸]. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، افزودن الیاف بازالت تا ۱۵ درصد وزنی به نانوکامپوزیت‌های PLA/NR موجب افزایش چشمگیر ۳۷ درصدی مدول الاستیک می‌شود. این بهبود قابل توجه را می‌توان اینگونه توجیه نمود. الیاف بازالت با دارا بودن مدول الاستیک بالا به عنوان تقویت‌کننده‌ای ایده‌آل عمل می‌کنند که به طور قابل ملاحظه‌ای بالاتر از مدول الاستیک ماتریس است. هنگامی که این الیاف به ماتریس اضافه می‌شوند، بخش عمده‌ای از تنش اعمال شده را تحمل می‌کنند و در نتیجه سفتی کلی کامپوزیت را افزایش می‌دهند.

بهبود چشمگیر مدول الاستیک و استحکام کششی با افزودن الیاف بازالت در این تحقیق، با یافته‌های لیو[1] و همکارانش همسو است. آن‌ها در مطالعه‌ای بر روی کامپوزیت پلی لاکتیک اسید و الیاف بازالت نشان دادند که افزودن ۱۵ تا ۲۰ درصد وزنی الیاف بازالت منجر به افزایش ۳۶٪ در مدول الاستیک و حدود ۱۵٪ در استحکام کششی می‌شود [۳۹]. این همخوانی نزدیک، نقش مؤثر الیاف بازالت به‌عنوان تقویت‌کننده ریزمقیاس در بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌های زیست‌تخریب‌پذیر را تأیید می‌کند.

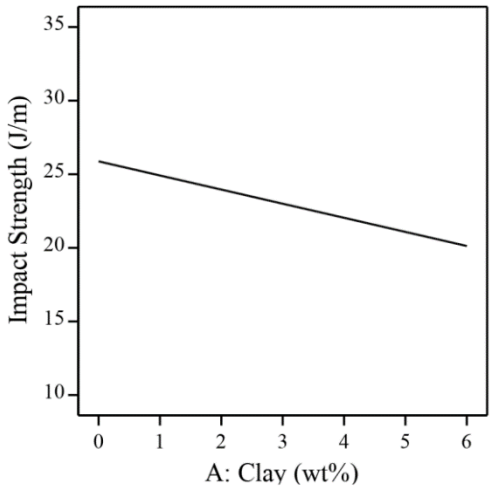
در درصدهای وزنی بهینه (۱۵ درصد وزنی)، الیاف بازالت به صورت یکنواخت در ماتریس توزیع شده و شبکه‌ای پیوسته تشکیل می‌دهند. این ساختار امکان انتقال مؤثر بار از ماتریس نسبتاً نرم پلیمری به الیاف سفت و محکم را فراهم می‌سازد. همچنین الیاف بازالت به دلیل سطح ویژه بالا و وجود گروه‌های عاملی فعال، پیوندهای قوی‌تری با ماتریس پلیمری برقرار می‌کنند. این چسبندگی مناسب فصل مشترک از لغزش الیاف تحت بار جلوگیری کرده و کارایی انتقال بار را افزایش می‌دهد [۴۰].

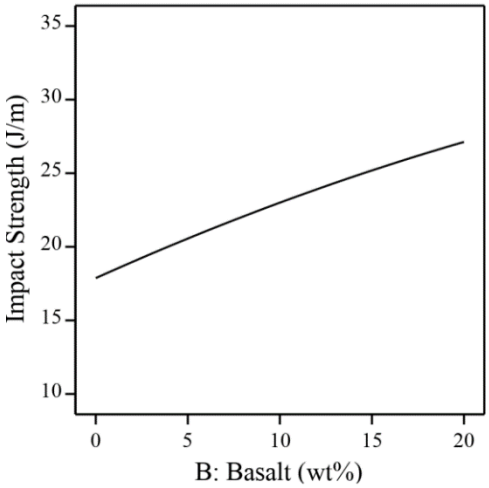
نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که افزودن لاستیک طبیعی (NR) به ماتریس PLA موجب کاهش ۲۳ درصدی مدول الاستیک می‌شود. با افزودن NR به ماتریسPLA، ذرات نرم لاستیکی در ساختار پلیمر سخت پراکنده می‌شوند و به عنوان نقاط نرم در ماتریس عمل می‌کنند. این ذرات نرم تحت بارگذاری تمایل به تغییر شکل الاستیک بیشتری دارند و در نتیجه سفتی کلی کامپوزیت را کاهش می‌دهند [۴۱].

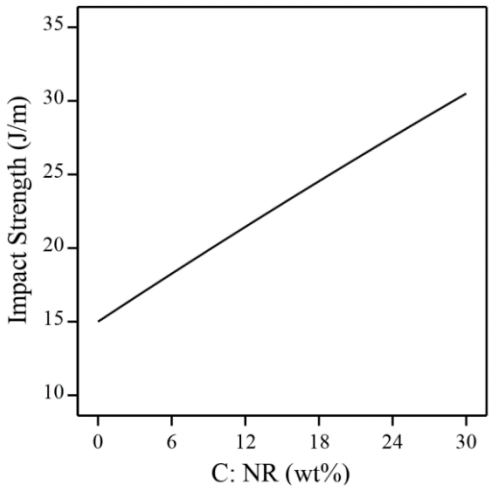
۶-۴- بررسی استحکام ضربه نانوکامپوزیت‌ها

نتایج مربوط به تأثیر هر یک از مواد بر استحکام ضربه در نمودارهای موجود در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همچنین رویه‌های پاسخ سطح مربوط تأثیر دو به دوی تأثیر ترکیبات بر روی استحکام ضربه نمونه‌ها در شکل ۱۳ نشان داده شده است.همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش درصد وزنی نانوخاک‌رس، استحکام ضربه نانوکامپوزیت‌ها به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. این کاهش چقرمگی به دلیل ایجاد شبکه‌ای سخت توسط نانوذرات خاک‌رس در ماتریس پلیمری است که حرکت زنجیرهای پلیمری و تغییر شکل پلاستیک موضعی را محدود کرده و منجر به تردشدگی ماتریس می‌شود [۴۲]. این امر موجب کاهش قابلیت تغییر شکل پلاستیک ماتریس تحت بارگذاری ضربه‌ای می‌شود. در حضور نانوخاک‌رس، الگوی شکست کامپوزیت از حالت نیمه‌شکننده به سمت شکست ترد تغییر می‌کند که دلیل اصلی کاهش انرژی جذب ضربه است. با افزایش درصد وزنی نانوخاک‌رس، احتمال تشکیل کلوخه‌های نانوذره افزایش می‌یابد. این کلوخه‌ها به عنوان نقاط تمرکز تنش عمل کرده و موجب آغاز و انتشار سریع ترک‌ها تحت بار ضربه می‌شوند. نانوخاک‌رس با ایجاد محدودیت در حرکت زنجیره‌های لاستیک طبیعی(NR)، از عملکرد مؤثر آن به عنوان بهبوددهنده چقرمگی جلوگیری می‌کند؛ در نتیجه، مکانیزم‌های جذب انرژی مانند تشکیل ناحیه تغییر شکل پلاستیک[2] و ایجاد ترک‌های ریز[3] به خوبی فعال نمی‌شوند.

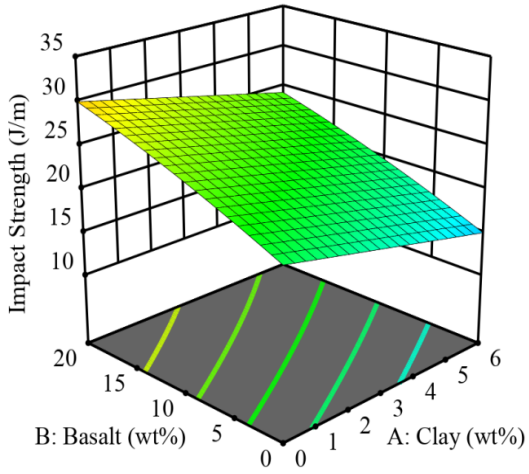
[1] Liu
[2] Plastic Zone
[3] Microcracking

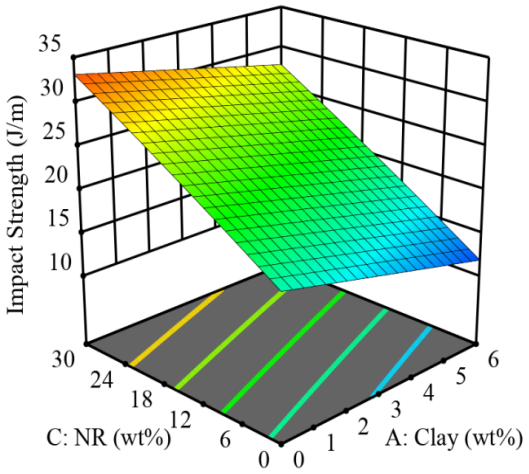


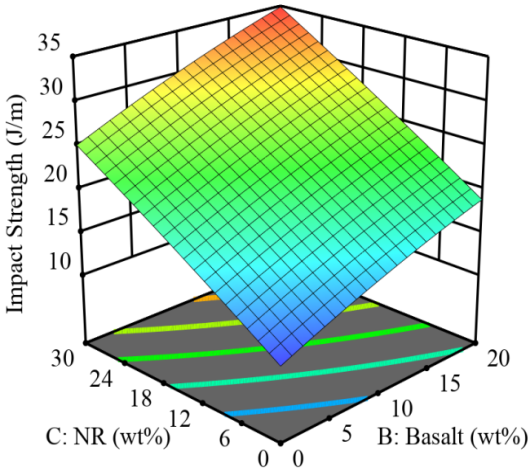




شکل ۱۲- نمودارهای تأثیر نانورس، الیاف بازالت و NR بر روی استحکام ضربه







شکل ۱۳- رویه‌های پاسخ مربوط به استحکام ضربه در درصدهای وزنی مختلف مواد

همچنین مشاهده می‌شود که افزودن الیاف بازالت تا ۱۵ درصد وزنی موجب افزایش چشمگیر ۳۹ درصدی استحکام ضربه در نانوکامپوزیت‌های PLA/NR شده‌است. یکی از دلایل این افزایش این است که الیاف بازالت دارای استحکام و مدول الاستیک بالایی می‌باشند و قادر به جذب مقادیر قابل توجهی از انرژی ضربه هستند. هنگام اعمال بار ضربه‌ای، این الیاف از طریق چندین مکانیزم همانند کشیده شدن و تغییر شکل الاستیک الیاف، بیرون کشیده شدن الیاف از ماتریس انرژی را جذب می‌کنند. همچنین الیاف بازالت با پل‌زنی بین سطوح ترک از گسترش سریع ترک جلوگیری می‌کنند [۴۳].

بهبود در استحکام ضربه با افزودن الیاف بازالت در این تحقیق، با مطالعات سیستم‌های ترکیبی همسو است. وو[1] و همکارانش در کامپوزیت‌های هیبریدی PLA تقویت‌شده با الیاف بازالت و نانورس، بهبود حدود ۳۹٪ در استحکام ضربه را گزارش کردند که به نقش الیاف در تغییر مسیر ترک و جذب انرژی نسبت داده شد [۴۴]؛ همچنین، آن‌ها تأکید کردند که افزودن نانورس بدون اصلاح سطحی مناسب می‌تواند منجر به کاهش چقرمگی شود، که با یافته‌های این تحقیق از کاهش ضربه با افزایش نانورس همخوانی دارد؛ همچنین نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که افزودن لاستیک طبیعی (NR) تا ۳۰ درصد وزنی به ماتریس PLA موجب افزایش چشمگیر ۴۴ درصدی در استحکام ضربه می‌شود. ذرات لاستیک طبیعی به عنوان مراکز جذب انرژی عمل می‌کنند. هنگام اعمال بار ضربه‌ای، این لاستیک‌ها با تشکیل نواحی متعدد تغییر شکل پلاستیک و ایجاد ترک‌های ریز، انرژی ضربه را در سراسر ماتریس پخش می‌کنند و موجب جذب انرژی می‌شوند. لاستیک طبیعی با ایجاد فاز نرم در ماتریس سختPLA ، مسیرهای انحرافی برای ترک‌ها ایجاد می‌کند، از انتشار مستقیم ترک‌ها جلوگیری می‌نماید و موجب تشکیل سطح شکست ناهموار با انرژی بیشتر می‌شود [۴۵].

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به بررسی تجربی خواص مکانیکی نانو کامپوزیت‌های طبیعی با زمینه پلیمری PLA/NR تقویت شده با نانو خاک رس و الیاف بازالت به روش رویه پاسخ پرداخته شده است. نتایج نشان داد:

- افزودن نانوخاک‌رس تا ۳ درصد وزنی به ماتریس PLA/NR منجر به افزایش ۱۰ درصدی استحکام کششی گردید. با افزایش درصد نانوخاک‌رس به بیش از ۳ درصد وزنی، روند کاهش ۸ درصدی در استحکام کششی مشاهده شد. افزایش درصد الیاف بازالت تا ۱۵٪ وزنی، استحکام کششی نانوکامپوزیت‌های PLA/NR تا ۱۴٪ بهبود یافت. افزودن لاستیک طبیعی (NR) منجر به کاهش حدود ۱۱ درصدی استحکام کششی شد.
- افزودن نانوخاک‌رس تا ۳ درصد وزنی به ماتریس PLA/NR موجب افزایش ۲۱ درصدی مدول الاستیک شد و افزایش نانوخاک‌رس تا ۶ درصد وزنی منجر به کاهش ۱۴٪ مدول الاستیک گردید که عمدتاً ناشی از تجمع نانوذرات و تشکیل کلوخه است. افزودن الیاف بازالت تا ۱۵ درصد وزنی به نانوکامپوزیت‌های PLA/NR موجب افزایش چشمگیر ۳۷ درصدی مدول الاستیک گردید؛ همچنین افزودن لاستیک طبیعی (NR) به ماتریس PLA موجب کاهش ۲۳ درصدی مدول الاستیک شد.
- با افزایش درصد وزنی نانوخاک‌رس، استحکام ضربه نانوکامپوزیت‌ها به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. همچنین افزودن الیاف بازالت تا ۱۵ درصد وزنی موجب افزایش چشمگیر ۳۹ درصدی استحکام ضربه شد. همچنین افزودن لاستیک طبیعی (NR) تا ۳۰ درصد وزنی به ماتریس PLA موجب افزایش چشمگیر ۴۴ درصدی در استحکام ضربه گردید.

مراجع

[1] Tsai S (2018) Introduction to composite materials. Routledge, New York

[2] Omanović-Mikličanin E, Badnjević A, Kazlagić A, Hajlovac M (2020) Nanocomposites: a brief review. J Health Technol 10(1): 51-59

[3] Alsuwait RB, Souiyah M, Momohjimoh I, Ganiyu SA, Bakare AO (2022) Recent development in the processing, properties, and applications of epoxy-based natural fiber polymer biocomposites. Polym J 15(1): 145

[4] Rajkumar A, Selvan MTGA, Neto V, Raja RS, Binoj JS, Bright BM (2025) Optimization and statistical analysis on mechanical, thermal, wear and

[1] Wu

based biopolymeric composites. J. Nanomater14(17):1403

[17] Taghipoor H, Mirzaei J (2024) Optimizing mechanical behavior in polymer bio-composites reinforced with basalt, graphene, and PP-g-MA. Phys Scr 99(9):095987

[18] KR P, Bheemappa S (2025) Experimental investigations on the mechanical behavior of basalt fabric reinforced epoxy composites. J Polym Res 32(3):1-20

[19] Montgomery DC (2017) Design and analysis of experiments. Wiley, Hoboken

[20] Eriksson L, Johansson E, Kettaneh-Wold N, Wikström C, Wold S (2000) Design of experiments: principles and applications. Learn Ways AB, Stockholm

[21] Ray, S. S., & Okamoto, M. (2003). Polymer/layered silicate nanocomposites: a review from preparation to processing. Prog. Polym. Sci., 28(11), 1539–1641.

[22] Zhang, W., et al. (2008). Toughening of epoxy resins by nanosilica particles: Mechanisms and modeling. Polym. Sci. Eng., 48(4), 765–774.

[23] Pegoretti, A., et al. (2009). Fracture toughness of polylactic acid (PLA) nanocomposites: Effect of nanofiller type and content. Polym. Test., 28(8), 805–811.

[24] Luo, J. J., & Daniel, I. M. (2003). Characterization and modeling of mechanical behavior of polymer nanocomposites. Compos. Sci. Technol., 63(11), 1607–1616.

[25] Liu, T., et al. (2005). Tailoring the interface creation of nanocomposites via in situ polymerization. Macromol. Mater. Eng., 290(5), 351–360.

[26] O'Connell, D. W., et al. (2012). Nanoparticle-induced strengthening in polymer nanocomposites. Compos. Sci. Technol., 72(14), 1665–1670.

[27] Wu, Q., et al. (2020). Mechanical reinforcement and thermal stability of PLA-based hybrid composites reinforced with natural fibers and nanoclay. Polym. Compos., 41(6), 2209–2220.

[28] Kornmann, X., et al. (2001). Clay-reinforced epoxy nanocomposites. Polym., 42(3), 1353–1362.

[29] Sapayan, T., et al. (2016). Effect of clay agglomeration on the mechanical and thermal properties of polylactide nanocomposites. J. Appl. Polym. Sci., 133(30), 43782.

[30] Alexandre, M., & Dubois, P. (2000). Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials. J. Mater. Sci. Eng., 28(1-2), 1–63.

[31] Sinha, V., et al. (2010). Progress in recycled PLA-based blends, composites and nanocomposites. Polym-Plast. Technol. Eng., 49(16), 1611–1625.

water-absorption characteristics of fragrant screwpine fiber-reinforced polymer biocomposites. Iran Polym J 34(3): 399–412.

[5] Olaniyan OT, Adeyomoye O, Adetunji CO, Oloruntoba A (2024) Biocomposites for aerospace engineering applications. In: Advances in biocomposites and their applications. Woodhead Publishing, pp 285–298

[6] Mazlan N, Shah AUM, Hua TC, Najmi I, Ramli N (2024) Biocomposites as aircraft materials. In: Sustainable materials and manufacturing techniques in aviation. Springer, pp 27–53

[7] Yadav K, Dutta K, Poudel R, Karak N (2024) Biocomposites for automotive applications. In: Advances in biocomposites and their applications. Woodhead Publishing, pp 257–284

[8] Joseph A, Mahesh V, Harursampath D, Loja MAR, Bhowmik S (2024) Crashworthiness of biocomposites in automotive applications. In: Biocomposites for industrial applications. Elsevier, pp 169–194

[9] Ruz-Cruz MA, Herrera-Franco PJ, Flores-Johnson EA, Moreno-Chulim MV, Galera-Manzano LM, Valadez-González A (2022) Thermal and mechanical properties of PLA-based multiscale cellulosic biocomposites. J Mater Res Technol 18:485–495

[10] Trivedi AK, Gupta MK, Singh H (2023) PLA based biocomposites for sustainable products: A review. Adv Ind Eng Polym Res 6(4):382–395

[11] Wu CS, Liao HT (2020) Study on the properties of polylactic acid/natural rubber blends: mechanical performance, thermal behavior, and biodegradability. Polym Test 81:106267

[12] Pongputthipat W, Ruksakulpiwat Y, Chumsamrong P (2023) Development of biodegradable biocomposite films from poly (lactic acid), natural rubber and rice straw. Polym Bull 80(9):10289-10307

[13] Koeipudsa N, Phinyocheep P (2024) Cellulose nanocrystals from oil palm trunk biomass as a bio-reinforcing filler for improved mechanical properties of modified natural rubber composites. Polym Compos 45(5):4524-4537

[14] Kirve M, Munde Y, Shinde A, Siva I (2022) Evaluation of mechanical properties of bamboo epoxy bio-composite filled with montmorillonite nanoclay. Mater Today Proc 62:806-810

[15] Kausar A, Ahmad I, Maaza M, Eisa MH (2022) State-of-the-art nanoclay reinforcement in green polymeric nanocomposite: from design to new opportunities. J. Minerals 12(12):1495

[16] Voicu RC, Gologanu M, Tibeica C, Santiago-Calvo M, Asensio M, Cañibano E, Sandu T (2024) Prediction of mechanical properties of nano-clay-

performance and interfacial characterization. Mater Des. 2021;205:109732.

[40] Zhao T, Li J, Wang H, Zhang K, Liu Y (2024) Ultra-high modulus basalt fiber reinforced PLA composites: interface optimization and mechanical enhancement. Compos Sci Technol 248:110487.

[41] Gao J, Li W, Wang J, Wang X, Sha C, Zhao K (2024) Comprehensive analysis of fused deposition modeling process conditions for enhancing mechanical properties and surface quality of 3D-printed poly-ether-ether-ketone. Polym. Test 134:108432

[42] Paul, D. R., & Robeson, L. M. (2008). Polymer nanotechnology: Nanocomposites. Polym., 49(15), 3187–3204.

[43] Sun D, Liang X, Ning H, Hu N (2024) Global sensitivity analysis for degraded braided composite with interval process. Compos Sci Technol 250:110542

[44] Wu Q, Zhang Y, Liu X, Wang H. Mechanical reinforcement and thermal stability of PLA-based hybrid composites reinforced with basalt fibers and nanoclay. Polym Compos.

[45] Garcia JM, Rodriguez-Lopez A, Martinez-Sanz M, Lopez-Rubio A, Lagaron JM (2024) Sustainable toughening of PLA using natural rubber: processing-structure-property relationships. ACS Sustain Chem Eng 12(5):2345-2356.

[32] Hussain F, Hojjati M, Okamoto M, Gorga RE (2006) Review: polymer-matrix nanocomposites. J Mater. Sci. 41:3289-3297

[33] Phetwarotai W, Potiyaraj P, Aht-Ong D (2021) Development of biodegradable biocomposite films from poly(lactic acid), natural rubber and rice straw. Int J Biol Macromol 183:1530-1538.

[34] Taib NAAB, Rahman MR, Huda D, Kuok KK, Hamdan S, Bin Bakri MK, Julaihi MRBM, Khan A (2023) PLA-based biocomposites for sustainable products: a review. Polym. 15(12):2817

[35] Chen L, Yang J, Zhu M, Huang T. Toughening of PLA with natural rubber: Morphology and impact behavior of binary and ternary blends. Polym. Test. 2023;117:107821.

[36] Zhang Y, Liu X, Wang L, Chen J, Li H (2023) Tailoring the dispersion of nanoclay in PLA-based nanocomposites: effects on mechanical and thermal properties. Compos Sci Technol 242:110215.

[37] Kumar A, Singh RK, Mishra S. Mechanical and thermal properties of polylactic acid nanocomposites reinforced with montmorillonite clay. Polym Compos. 2022;43(9):6245-56.

[38] Chen X, Wu Y, Zhang Q, Yang F, Sun P (2023) Critical nanoclay content for optimal mechanical performance in biodegradable polymer composites. Mater Today Commun 36:106568.

[39] Liu Y, Zhang H, Wang Q, Li C. Basalt fiber reinforced polylactic acid composites: Mechanical