

بررسی تجربی خواص مکانیکی کشش و ضربه در نانوکامپوزیت‌های هیبریدی پایه پلیمری به روش رویه پاسخ

ابراهیم نوری نیارکی^۱، محمدرضا عیسوند زبائی*^۲، میثم نوری نیارکی^۳

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد اندیمشک، دانشگاه آزاد اسلامی، اندیمشک، ایران

۳- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۲)

چکیده

در این تحقیق، خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های هیبریدی با زمینه پلیمری پلی‌پروپیلن و اتیلن‌پروپیلن‌دی‌ان‌مونومر تقویت شده با نانوصفحات گرافن، نانوخاک رس و الیاف شیشه به روش رویه پاسخ بررسی شده است. ترکیبات شامل ۱، ۰ و ۲ درصد وزنی نانوصفحات گرافن ۳، ۰ و ۶ درصد وزنی نانوخاک رس ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی الیاف شیشه ۵، ۰ و ۱۰ درصد وزنی اتیلن‌پروپیلن‌دی‌ان‌مونومر می‌باشند که توسط یک مخلوط‌کن داخلی و یک دستگاه پرس داغ تهیه شدند. آزمون کشش برای تعیین استحکام کششی و مدول کششی و آزمون ضربه برای تعیین استحکام ضربه ترکیبات انجام شدند. همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی جهت مشاهده نحوه پراکندگی ذرات نانو و الیاف شیشه در زمینه پلیمری استفاده شدند. نتایج نشان می‌دهد که نانو صفحات گرافن و نانو خاک رس در درصدهای بالا دچار کلوخگی شده‌اند. حضور نانوصفحات گرافن در درصدهای وزنی پایین استحکام ضربه، استحکام کششی و مدول کششی را به ترتیب ۲۳، ۴۶ و ۱۶ درصد افزایش داده است. افزودن نانورس در درصدهای وزنی پایین باعث افزایش ۲۱٪ استحکام کششی و در درصدهای وزنی بالا باعث کاهش خواص مکانیکی شده است. افزودن الیاف شیشه باعث افزایش ۱۸٪ و ۲۴٪ استحکام ضربه و مدول کششی شده و استحکام کششی را ابتدا افزایش و سپس کاهش داده است. نتایج نشان می‌دهد که افزودن اتیلن‌پروپیلن‌دی‌ان‌مونومر استحکام ضربه را ۵۷٪ افزایش داده در صورتیکه بر روی خواص کششی ماده تأثیر کاهشی داشته است.

واژه‌های کلیدی: نانوکامپوزیت‌های هیبریدی، خواص مکانیکی، نانوصفحات گرافن، نانوخاک رس، الیاف شیشه

Experimental Study of Tensile and Impact Mechanical Properties in Polymer-Based Hybrid Nanocomposites by Response Surface Methodology

Ebrahim Nouri Niyaraki¹, Mohammad Reza Isvandzibaei*², Meysam Nouri Niyaraki³

Abstract

In this study, the mechanical properties of polymeric hybrid nanocomposites based polypropylene (PP) and ethylene-propylene diene monomer (EPDM) reinforced with graphene nanosheets, a nano clay, and glass fiber by response surface methodology is investigated. Compounds include 0, 1, and 2 wt% graphene nanosheets, 0, 3, and 6 wt% nano clay 0, 10, and 20 wt% glass fibers, and 0, 5, and 10 wt% EPDM which were prepared by an internal mixer. Samples for mechanical testing were made by a hot press machine. The tensile tests were performed to determine the tensile strength and tensile modulus and the impact test was performed to assess the impact strength of the compounds. SEM images were also used to observe how the nanoparticles and glass fibers dispersed in the polymer. It was observed that graphene and clay nanoparticles had well dispersion at low wt%, but aggregation was observed at high wt% of them. Graphene nanosheets at low wt% increased impact strength, tensile strength, and tensile modulus by 23%, 46%, and 16% respectively. However, high weight percentages, it has reduced them. With addition of nanoclay at low wt% has increased the tensile strength by 21%, reduced it at high wt%, and reduced impact strength and tensile modulus. With the addition of glass, fibers has increased the impact strength and tensile modulus by 18% and 24%, and the tensile strength is increased at low wt% and reduced at high wt%. The addition of EPDM increased the impact strength by 57% while reducing the tensile properties.

Key words: Hybrid nanocomposites, Mechanical properties Graphene nanosheete, Nanoclay, Glass fiber

مقدمه

امروزه برای تغییر دادن و نیز بهینه کردن خواص فیزیکی و شیمیایی مواد، آن‌ها را با هم ترکیب یا اصطلاحاً کامپوزیت می‌کنند. دلیل اصلی توسعه و پیشرفت کامپوزیت‌ها این است که نمی‌توان هیچ ماده‌ای را یافت که با ساختار یکنواخت، تمام خواص مطلوب را برای ما دارا باشد. از مزایای اصلی کامپوزیت‌ها نسبت به سایر مواد مهندسی می‌توان سبک بودن، شکل‌دهی آسان، استحکام نسبتاً بالا و دوام و مقاومت به خوردگی را نام برد. در میان انواع کامپوزیت‌ها، کامپوزیت‌های پلیمری بیشترین حجم استفاده را دارد [۱].

در سال‌های اخیر نانوتکنولوژی به یکی از مهم‌ترین و بزرگترین زمینه‌های تحقیقات در علوم نوین تبدیل شده است. این دانش به بررسی رفتار ترکیب ذراتی با اندازه کمتر از ۱۰۰ نانومتر می‌پردازد. نانوکامپوزیت‌ها نیز به نوعی از کامپوزیت‌ها اطلاق می‌شود که در آنها ابعاد مواد پرکننده، حداقل در یک بعد خود در مقیاس نانو باشند که این ترکیب می‌تواند خواص جدید و منحصر به فردی به مواد ساخته شده جدید بدهد [۲]. پلی‌پروپیلن (PP) یکی از پر مصرف‌ترین و اساسی‌ترین پلیمرهای مورد استفاده در دنیا است که اولین بار در اوایل دهه ۱۹۵۰ در مقیاس آزمایشگاهی تولید و در اواخر این دهه تجاری سازی شد. فرآیندپذیری و شکل‌پذیری مناسب، خواص مکانیکی نسبتاً خوب، قابلیت بازیافت و هزینه نسبتاً کم تولید، دامنه بسیار گسترده‌ای برای کاربردهای خانگی، هوا فضا، بسته‌بندی، خودروسازی، کشتی‌سازی و بسیاری از صنایع دیگر را برای پلی‌پروپیلن به وجود آورده است [۳ و ۴]. اما در کنار خواص خوب و مطلوب، پلی‌پروپیلن دارای استحکام ضربه و نیز مدول کششی نسبتاً پایینی می‌باشد که برای برطرف نمودن این مشکل، به پلی‌پروپیلن یک لاستیک مناسب، به عنوان فاز دوم، اضافه می‌کنیم [۵].

یکی از لاستیک‌های بسیار پرکاربرد که در ترکیب با پلی‌پروپیلن بسیار مفید واقع شده است لاستیک اتیلن پروپیلن دی‌ان مونومر (EPDM) است که دارای خواصی از جمله مقاومت در برابر بارگذاری‌های ضربه‌ای، مقاومت به ساییش و مقاومت در برابر پیر شدن را دارا می‌باشد [۶]. با توجه به گسترش علم نانو، از نانوذرات فراوانی به منظور تقویت کننده زمینه استفاده می‌شود که یکی از متداول‌ترین و گسترده‌ترین آنها نانوصفحات گرافن می‌باشد. گرافن یک ورق کربنی با ضخامت

یک اتم کربن است که شامل یک شبکه دو بعدی لانه زنبوری می‌باشد [۷].

گرافن دارای خواص فیزیکی و مکانیکی عالی از جمله مساحت سطح بالا، مدول کششی بسیار بالا و نیز رسانایی گرمایی و الکتریکی بسیار خوبی می‌باشد [۸ و ۹]. همچنین یکی دیگر از پرکاربردترین پرکننده‌های نانو در پلیمرها، نانو خاک رس می‌باشد که به دلیل مصرف کمتر فاز معدنی از دیگر ذرات نانو سبک تر است و نیز هزینه بسیار پایین در تولید، کاربرد آن را بسیار گسترش داده است [۱۰].

مهمترین نوع نانوکامپوزیت‌های پلیمری، از اختلاط یک پلیمر با پرکننده نانو ذرات خاک رس به دست می‌آید. علت آن این است که خاک رس ساختار لایه‌ای دارد و این پرکننده استعداد زیادی برای پذیرش زنجیره‌های پلیمری بین لایه‌های ورقه‌ای خود (به صورت ورقه‌های کاغذ) دارد. نانو ذرات خاک رس دارای لایه‌هایی است که ابعاد نانومتری دارد و با ورود زنجیره پلیمری بین آن، برهمکنش قوی بین خاک رس و زنجیره پلیمری تشکیل می‌شود. بنابراین افزودن ۳ تا ۵ درصد نانوذرات خاک رس، سبب افزایش استحکام مکانیکی و افزایش مدول الاستیک معادل ۴۵ درصد کربن جامد خواهد شد. علت استقبال صنعت خودرو از نانوکامپوزیت، توانایی ایجاد موادی با وزن کمتر و استحکام بالاتر و فرایندپذیری بیشتر است که با افزودن مقدار کم از پرکننده‌ها محقق می‌شود.

الیاف شیشه یکی از رایج‌ترین و پرکاربردترین تقویت‌کننده‌های کامپوزیت‌های زمینه پلیمری است. مزایایی اصلی آن استحکام کششی و مقاومت شیمیایی بالا بوده و هزینه تولید آن نیز پایین است [۱۱]. منبری و همکارانش [۱۲]، در تحقیقی با روش اختلاط مذاب تالک، پلی‌پروپیلن و نانو صفحات گرافن را با هم ترکیب نمودند. آنها مشاهده کردند که در ۰/۷۵ درصد وزنی گرافن، مدول کششی، استحکام کششی و استحکام ضربه افزایش یافته است اما در درصد‌های وزنی بالای گرافن، مدول کششی افزایش و استحکام کششی و ضربه کاهش یافته است.

نوری نیارکی و همکارانش [۱۳]، به بررسی تجربی ترکیب پلی‌پروپیلن، اتیلن پروپیلن دی‌ان مونومر، الیاف شیشه و نانوصفحات گرافن پرداختند. آنها پس از انجام تست‌های ضربه و کشش مشاهده نمودند که در درصد‌های پایین نانو صفحات گرافن، استحکام کششی و ضربه افزایش می‌یابد. انصاری و همکارانش [۱۴]، در بررسی حضور نانو لوله‌های

کربن و پلی پروپیلن به این نتیجه رسیدند که خواص استحکام کششی و ضربه بسیار بهبود یافته است، اما برای بهتر شدن نتایج خود به یکنواختی در پراکندگی تأکید داشتند. اسمی‌زاده و همکارانش [۱۵]، به بررسی رفتار مکانیکی نانوکامپوزیت‌های هیبریدی پایه پلی اتیلن تقویت شده با نانوپرلیت و نانوخاک رس پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که با افزودن نانوپرلیت و نانو خاک رس سطح شکست نمونه‌ها زبرتر شده و شدت تفرورفتگی‌ها و برآمدگی‌ها تشدید می‌یابد. همچنین آنها گزارش کردند که با افزایش نانوذرات تا ۷ درصد وزنی (۵ درصد وزنی نانوخاک رس و ۲ درصد وزنی نانوپرلیت) همچنان پخش یکنواختی از نانوذرات درون زمینه پلیمری وجود دارد ولی با افزایش بیشتر نانوذرات به ۹ درصد وزنی (۵ درصد وزنی نانوخاک رس و ۴ درصد وزنی نانوپرلیت)، نانو ذرات شروع به کلوخه شدن می‌گردند. همچنین آنها استحکام و مدول کششی نمونه با ۵ درصد وزنی نانوخاک رس و ۲ درصد وزنی نانوپرلیت را دو برابر نمونه پلی اتیلن خالص گزارش کرده‌اند.

وانگ^۱ و همکارانش [۱۶]، درصد‌های مختلف EPDM را در زمینه پلی پروپیلن مخلوط کرده و خواص مکانیکی آن‌ها را مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که افزایش EPDM باعث افزایش چشمگیر استحکام ضربه می‌شود ولی استحکام کشش و ازدیاد طول تا شکست را کاهش می‌دهد. هلسون^۲ و همکارانش [۱۷]، به مقایسه تأثیر حضور انواع الاستومرها در زمینه پلی پروپیلن پرداختند و گزارش دادند که از میان الاستومرها EPDM بیشترین تأثیر در افزایش استحکام ضربه داشته است. پل و همکارانش [۱۸]، به بررسی تجربی تأثیر نانو خاک رس و نانو ذرات سلیکا بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های اپوکسی/الیاف شیشه پرداختند. آنها پس از انجام تست‌های کشش و ضربه مشاهده نمودند که حضور ۴۰ درصد وزنی الیاف شیشه، ۵ درصد وزنی نانو خاک رس و ۰/۵ درصد وزنی سیلیکا باعث افزایش ۱۰ درصدی استحکام کششی، افزایش ۱۴ درصدی کرنش شکست و افزایش ۲۷ درصدی چقرمگی شده است.

در تحقیق حاضر نانو کامپوزیت‌های هیبریدی بر پایه پلی پروپیلن/ EPDM با افزودن نانو صفحات گرافن، نانو خاک رس و الیاف شیشه توسط یک مخلوط کن داخلی تهیه شدند.

درصد‌های وزنی مختلفی از نانو صفحات گرافن (۰، ۱ و ۲ درصد وزنی)، نانوخاک رس (۰، ۳ و ۶ درصد وزنی) و الیاف شیشه (۰، ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی) در ماتریس پایه پلی پروپیلن/ EPDM استفاده شدند. نانوکامپوزیت‌های هیبریدی از اهمیت فراوانی برخوردارند و هدف از ساخت آنها دستیابی به یک ماده با استحکام کششی و ضربه بالا می‌باشد و به همین منظور، در طراحی و ساخت این نانوکامپوزیت از نانوذرات گرافن، نانو خاک رس و الیاف شیشه برای بهبود استحکام کششی و مدول الاستیک استفاده شده است و به منظور بهبود استحکام ضربه از EPDM استفاده شده است. ویژگی مهم این تحقیق به استفاده از دو نانوذره به عنوان پرکننده به همراه الیاف کوتاه شیشه در نانوکامپوزیت‌های هیبریدی می‌باشد. هدف از این تحقیق بررسی تأثیر نانو ذرات و الیاف شیشه بر خواص مکانیکی (استحکام ضربه، استحکام کششی و مدول کششی) و دستیابی به یک نانوکامپوزیت پلیمری با خواص مکانیکی بالا می‌باشد. برای همین منظور نانوصفات گرافن، نانوخاک رس و الیاف شیشه به ماتریس پلی پروپیلن توسط مخلوط کن داخلی اضافه شده و نمونه‌های بدست آمده را مورد آزمون کشش و ضربه قرار داده و نتایج بدست آمده مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین به منظور بررسی سطوح شکست نمونه‌ها از آنها تصاویر SEM تهیه و مورد بحث و بررسی قرار گرفتند.

مواد

در این تحقیق از پلی پروپیلن با نام تجاری (v30s) دارای چگالی 0.9 g/cm^3 و همچنین EPDM نوع KEP 270 که شامل ۵۷ درصد وزنی اتیلن، ۴/۵ درصد وزنی دی ان مونومر و دارای چگالی 0.9 g/cm^3 می‌باشد، به عنوان زمینه (ماتریس) انتخاب شدند. نانوصفات گرافن گونه xGnP-C750 با ضخامت متوسط ۲ نانومتر و قطر متوسط ۰/۳ تا ۲ میکرومتر و مساحت سطح متوسط 750 g/m^2 مورد استفاده قرار گرفت. الیاف شیشه استفاده شده در این تحقیق، الیاف شیشه کوتاه با قطر متوسط ۱۲ میکرون و طول متوسط ۴ میلیمتر و چگالی 22 g/cm^3 می‌باشد. همچنین در این تحقیق از نانوخاک رس نوع مونت موریلونیت اصلاح شده با نام تجاری کلوزیت A15 استفاده شده است.

¹ Wang

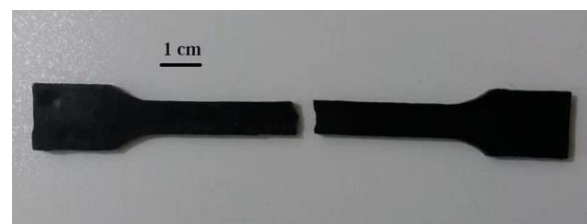
² Helson

آماده سازی نمونه‌ها

پلی پروپیلن، نانوصفحات گرافن، نانوخاکرس، الیاف شیشه و EPDM بلافاصله بعد از تهیه شدن مورد استفاده قرار گرفتند. نانوخاکرس قبل از استفاده در گرمکن با دمای 90°C و به مدت ۴ ساعت خشک شد. تمامی نمونه‌ها به روش اختلاط مذاب و با استفاده از مخلوط‌کن داخلی مدل HBISYS90 با سرعت 60rpm در دمای 180°C تهیه شدند. بعد از مذاب کردن پلی پروپیلن در مخلوط‌کن داخلی، EPDM در سه درصد وزنی ۰، ۵ و ۱۰ به آن اضافه شد تا زمینه پلیمری شکل بگیرد. سپس گرافن در سه درصد وزنی ۰، ۱ و ۲، نانوخاکرس در سه درصد وزنی ۰، ۳ و ۶ و الیاف شیشه در سه درصد وزنی ۰، ۱۰ و ۲۰ با هم مخلوط شدند که زمان اختلاط برای تمامی نمونه‌ها ۱۰ دقیقه در نظر گرفته شد. همچنین نمونه‌ها جهت آزمون‌های کشش و ضربه، با استفاده از قالب‌گیری فشاری توسط دستگاه پرس گرم در دمای 200°C و فشار $2/5\text{MPa}$ تهیه شدند. تمام ترکیب‌ها با شرایط یکسان آماده شدند و از هر نمونه، برای هر آزمون ۵ نمونه استاندارد ساخته شد.

آزمون‌ها

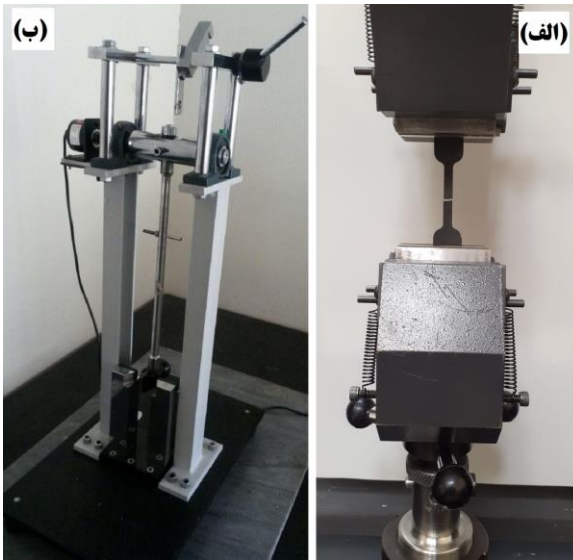
آزمون کشش با استفاده از دستگاه زوبیک رول مدل Z100 مطابق با استاندارد ISO 527-1 با سرعت فک‌های mm/min ۵ انجام شد. کشش نمونه‌ها تا زمان گسیختگی کامل آن‌ها ادامه پیدا می‌کرد. آزمون ضربه در دمای اتاق و با استفاده از دستگاه آزمون ضربه شارپی مطابق با استاندارد ISO 179 انجام شد. تصاویر SEM از سطح شکست نمونه‌ها بعد از آزمون ضربه توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد. نمونه‌ها برای جلوگیری از بار الکتریکی در طی آزمایش، توسط طلا و به اندازه‌ی ۱۰ نانومتر روکش‌دهی شدند. سپس با ولتاژ کاری برابر 20KV آزمایش‌ها انجام شد. تصویر نمونه آزمون کشش و ضربه بعد از آزمون به ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ آمده است. تصاویر دستگاه‌های کشش و ضربه در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۱- تصویر نمونه آزمون کشش بعد از شکست



شکل ۲- تصویر نمونه آزمون ضربه بعد از شکست



شکل ۳- تصویر دستگاه‌های آزمون: الف) دستگاه تست کشش و ب) دستگاه تست ضربه

طراحی آزمایش

در این تحقیق جهت کم کردن تعداد آزمایش‌ها و همچنین دست یافتن به یک رابطه کمی برای هر خاصیت مکانیکی با در نظر گرفتن تمامی مواد تشکیل دهنده ترکیبات و ایجاد قابلیت مدل‌سازی برای خواص مورد بررسی از طراحی آزمایش به روش رویه پاسخ استفاده شده است. در این تحقیق از طرح باکس-بنکن در روش رویه پاسخ استفاده شده است. از مزیت‌های این روش این است که همه نقاط موجود در طراحی آزمایش دارای فاصله یکسانی از نقطه مرکزی می‌باشند که این موضوع باعث یکسان شدن واریانس خطا در همه نقاط می‌شود [۲۰، ۱۹]. در جدول ۱ سه سطح پارامترهای ورودی ترکیبات شامل نانوصفحات گرافن، نانوخاکرس، الیاف شیشه و EPDM نشان داده شده است.

جدول ۲- آزمایش‌های طراحی شده توسط نرم‌افزار مینی‌تب به روش رویه پاسخ

ردیف	نانوگرافن (wt%)	الیاف شیشه (wt%)	نانورس (wt%)	EPDM (wt%)	PP (wt%)
۱	۲	۱۰	۳	۱۰	۷۵
۲	۱	۲۰	۳	۰	۷۶
۳	۱	۲۰	۰	۵	۷۴
۴	۰	۱۰	۳	۱۰	۷۷
۵	۱	۰	۳	۱۰	۸۶
۶	۰	۱۰	۰	۵	۸۵
۷	۱	۱۰	۳	۵	۸۱
۸	۲	۰	۳	۵	۹۰
۹	۱	۱۰	۶	۱۰	۷۳
۱۰	۲	۱۰	۶	۵	۷۷
۱۱	۰	۰	۳	۵	۹۲
۱۲	۱	۱۰	۳	۵	۸۱
۱۳	۲	۱۰	۳	۰	۸۵
۱۴	۱	۱۰	۶	۰	۸۳
۱۵	۲	۲۰	۳	۵	۷۰
۱۶	۱	۲۰	۶	۵	۶۸
۱۷	۱	۱۰	۳	۵	۸۱
۱۸	۰	۱۰	۳	۰	۸۷
۱۹	۱	۱۰	۰	۰	۸۹
۲۰	۱	۰	۰	۵	۹۴
۲۱	۲	۱۰	۰	۵	۸۳
۲۲	۱	۰	۳	۰	۹۶
۲۳	۱	۱۰	۰	۱۰	۷۹
۲۴	۰	۱۰	۶	۵	۷۹
۲۵	۱	۲۰	۳	۱۰	۶۶
۲۶	۱	۰	۶	۵	۸۸
۲۷	۰	۲۰	۳	۵	۷۲

متغیرها	حد پایین (درصد وزنی)	حد وسط (درصد وزنی)	حد بالا (درصد وزنی)
نانوصفحات گرافن (X1)	۰	۱	۲
الیاف شیشه (X2)	۰	۱۰	۲۰
نانو خاک رس (X3)	۰	۳	۶
EPDM (X4)	۰	۵	۱۰

از این روش برای مدل‌سازی و تحلیل مسائلی که پاسخ مورد نظر تحت تأثیر چندین متغیر قرار می‌گیرد، استفاده می‌شود و پاسخ به صورت یک رویه یکپارچه ارائه می‌گردد [۲۰]. در این روش اغلب از یک چندجمله‌ای درجه دوم برای مدل کردن پاسخ استفاده می‌شود که در معادله (۱) آورده شده است.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{j=1}^{i-1} \sum_{j=1}^k \beta_{ij} X_i X_j + \epsilon \quad (1)$$

که در آن Y پاسخ، k تعداد پارامترها، X_i و X_j متغیرهای مستقل و β_0 ، β_i ، β_{ii} و β_{ij} ضرایب رگرسیونی برای به ترتیب عرض از مبدأ، ضرایب خطی، ضرایب درجه دوم و اثر متقابل می‌باشند [۲۰ و ۲۱]. تعداد نقاط لازم برای آزمایش در طرح باکس-بنکن در روش رویه پاسخ از معادله (۲) محاسبه می‌شود.

$$N = 2^k + 2k + m \quad (2)$$

که در آن N تعداد آزمایش‌های لازم، k تعداد متغیرها و m تعداد تکرار نقطه مرکزی است [۲۰ و ۲۱]. در این تحقیق تعداد ۲۷ حالت آزمایش توسط نرم‌افزار مینی‌تب و با تعداد نقاط مرکزی ۳ تعیین و در جدول ۲ ارائه می‌گردد.

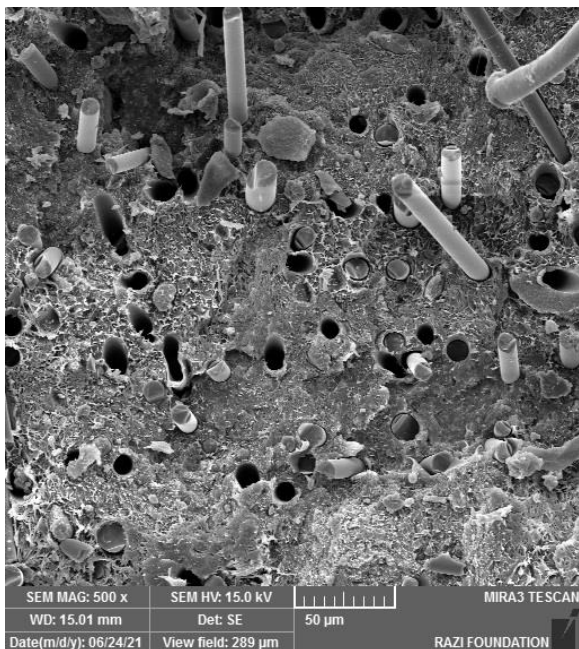
بحث و نتایج

مطالعات ریخت شناسی

تصاویر گرفته شده از سطح شکست نمونه‌های آزمون ضربه در نیتروژن مایع در شکل‌های ۴ تا ۸ نشان داده شده است. در شکل ۴ سطح شکست نمونه تهیه شده از نمونه پلیمری پلی‌پروپیلن/EPDM نشان داده شده است.

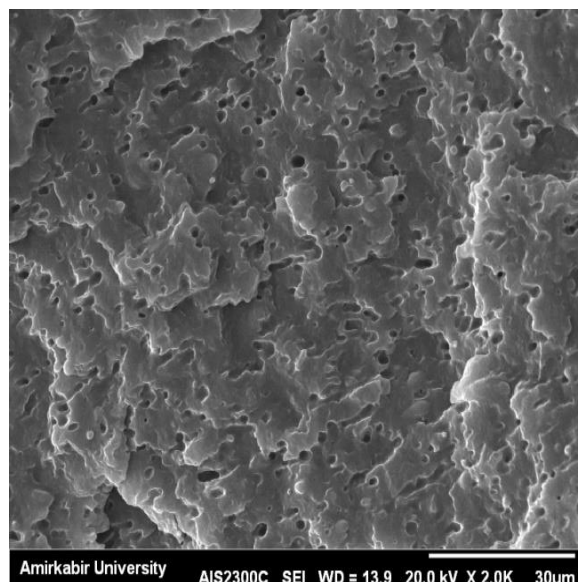
یکی از ملزومات بهبود خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های پلیمری توزیع همگن نانوذرات (عدم کلوخگی) در زمینه پلیمری می‌باشد. چون بهبود در خواص مکانیکی منوط به دو عامل توزیع مناسب نانوذرات و چسبندگی سطحی بالا بین نانوذرات و شبکه پلیمر است.

در شکل ۵ سطح شکست نمونه شامل ۱ درصد وزنی نانو صفحات گرافن، ۳ درصد وزنی نانو خاک رس، ۰ درصد وزنی الیاف شیشه و ۱۰ درصد وزنی EPDM می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود در این نمونه دارای توزیع مناسبی در درصدهای پایین نانو صفحات گرافن و نانو خاک رس می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که حفره‌های موجود در زمینه پلیمری به خوبی پر شده‌اند که این باعث بهبود در خواص



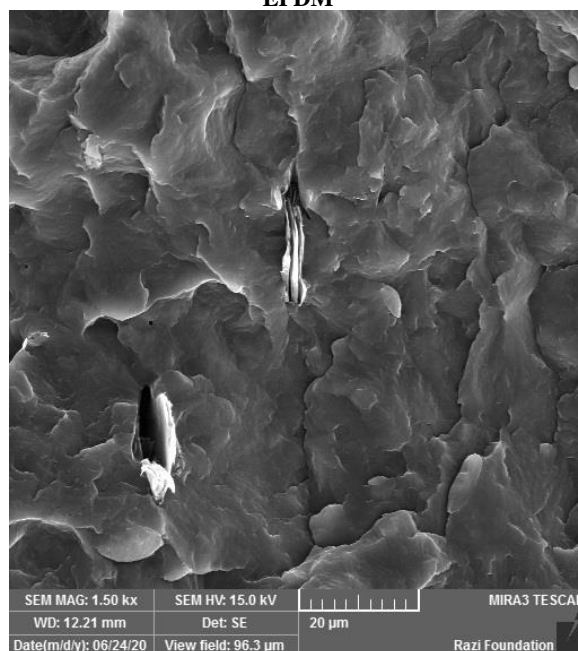
شکل ۶- تصویر SEM از نمونه شامل ۰ درصد وزنی نانو صفحات گرافن، ۰ درصد وزنی نانو خاک رس، ۱۰ درصد وزنی الیاف شیشه و ۵ درصد وزنی EPDM

مکانیکی پلیمر زمینه شده است. همچنین در شکل توزیع مناسب نانوذرات در درصدهای پایین نشان داده شده است که بیان کلوخه نشدن در درصدهای پایین نانوذرات می‌باشد. شکل ۶ سطح شکست نمونه شامل ۰ درصد وزنی نانو صفحات گرافن، ۰ درصد وزنی نانو خاک رس، ۱۰ درصد وزنی الیاف شیشه و ۵ درصد وزنی EPDM را نشان می‌دهد.

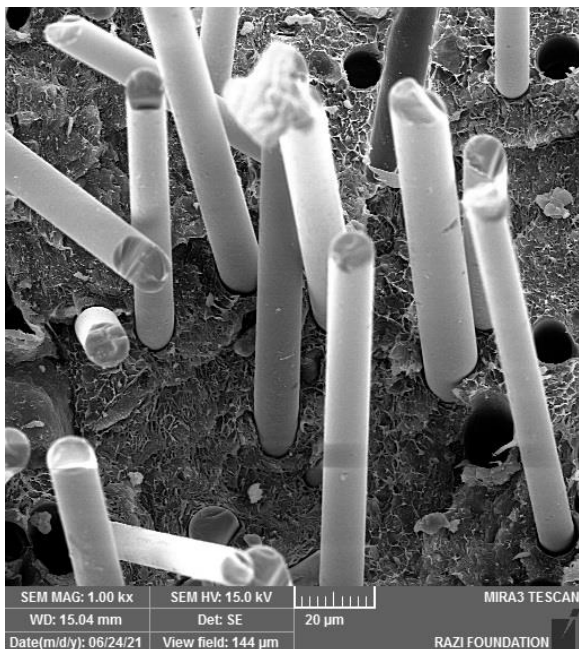


شکل ۴- تصویر SEM از نمونه پلیمری دو فازی پلی پروپیلن و EPDM

در این شکل مناسب نبودن چسبندگی بین الیاف شیشه و زمینه پلیمری به علت عدم وجود نانو صفحات گرافن و نانو خاک رس به صورت واضح مشاهده می‌شود که این باعث بیرون کشیده شدن الیاف شیشه در هنگام اعمال بارگذاری‌های مختلف از زمینه می‌شود. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که وجود الیاف به تنهایی تأثیر زیادی در بهبود خواص مکانیکی ندارند و باید از نانو ذرات برای ایجاد چسبندگی بهتر با پر کردن حفره‌های موجود بین الیاف و زمینه استفاده کرد. این نتایج با گزارش‌های مرجع [۲۲] مطابقت خوبی نشان می‌دهد. نمونه‌های بدون نانوذرات با اعمال نیرو و انتشار ترک اولیه منهدم می‌شود در صورتیکه نمونه‌های دارای نانوذرات به خوبی با ماتریس پیوند برقرار کرده و مانع از رشد ترک درون قطعه می‌شوند. از این رو، انهدام قطعه در نیرو و زمان بیشتری رخ می‌دهد. همچنین، از آنجاییکه با انحراف رشد ترک از مسیر اولیه، نیروی بیشتری برای پیشرفت ترک لازم است، خواص مکانیکی نیز بهبود می‌یابد. یکی از سازوکارهای چقرمه‌سازی، انحراف ترک است که در مقیاس میکرومتری رخ می‌دهد. در این پدیده، در صورت برخورد ترک با نانوذره، نوک ترک از مسیر اولیه رشد منحرف شده و بار اعمالی برای رشد ترک در حالت ترکیبی به سطوح وارد می‌شود.



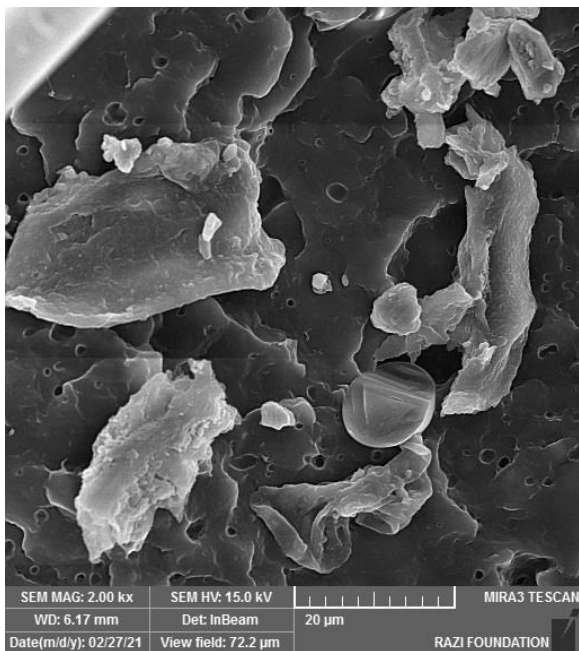
شکل ۵- تصویر SEM از نمونه شامل ۱ درصد وزنی نانو صفحات گرافن، ۳ درصد وزنی نانو خاک رس، صفر درصد وزنی الیاف شیشه و ۱۰ درصد وزنی EPDM



شکل ۷- تصویر SEM از نمونه شامل ۱ درصد وزنی نانو صفحات گرافن، ۳ درصد وزنی نانو خاک رس، ۱۰ درصد وزنی الیاف شیشه و ۵ درصد وزنی EPDM

شکل ۷ سطح شکست نمونه شامل ۱ درصد وزنی نانو صفحات گرافن، ۳ درصد وزنی نانو خاک رس، ۱۰ درصد وزنی الیاف شیشه و ۵ درصد وزنی EPDM را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، نانو صفحات گرافن و نانو خاک رس چسبیده شده به الیاف شیشه مشخص می‌باشد که این نانو ذرات با پرکردن حفره های بین الیاف شیشه و زمینه پلیمری باعث بالا رفتن چسبندگی بین زمینه و الیاف شده اند که این امر سبب می‌شود که در هنگام اعمال بارگذاری‌های مختلف الیاف از داخل زمینه پلیمری جدا نشوند [۲۳]. همچنین حضور حفره، پل زدن و انحراف مسیر ترک، می‌تواند مانعی بر رشد ترک باشد و با جذب انرژی بالاتر سبب افزایش انرژی شکست شود. در یک سامانه کامپوزیت انتقال نیرو از از زمینه پلیمری به فاز تقویت کننده و نیز افزایش چگالی نابعایی‌ها موجب افزایش استحکام زمینه پلیمری می‌شود.

در شکل ۸ سطح شکست نمونه شامل ۲ درصد وزنی نانو صفحات گرافن، ۶ درصد وزنی نانو خاک رس، ۱۰ درصد وزنی الیاف شیشه و ۵ درصد وزنی EPDM را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌گردد، در نمونه های شامل درصدهای بالای نانو صفحات گرافن و نانو خاک رس به هم پیوستن نانو ذرات و عدم توزیع یکنواخت آنها در زمینه پلیمری باعث کلوخه شدن آنها گردیده که همین امر باعث ایجاد تمرکز تنش و کاهش خواص مکانیکی در درصدهای بالای نانو ذرات می‌گردد [۲۴].



شکل ۸- تصویر SEM از نمونه شامل ۲ درصد وزنی نانو صفحات گرافن، ۶ درصد وزنی نانو خاک رس، ۱۰ درصد وزنی الیاف شیشه و ۵ درصد وزنی EPDM

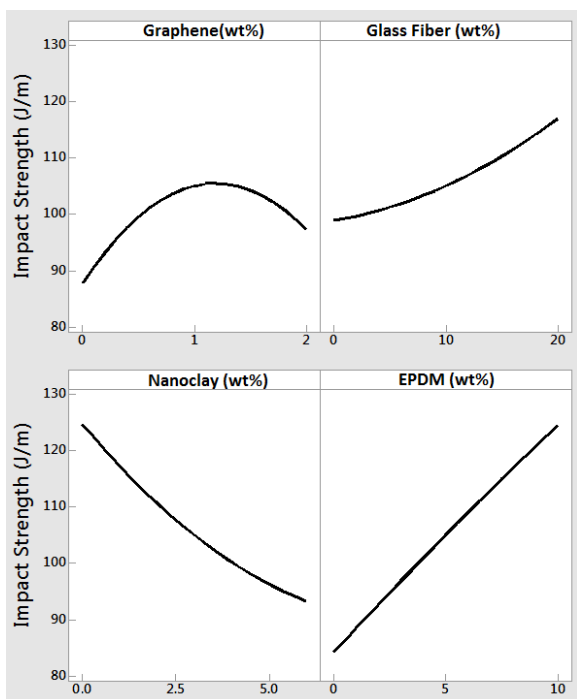
همچنین افزودن نانوذرات به پلیمرها و قرار گرفتن آنها بین زنجیرهای پلیمری موجب لغزش زنجیرها و کاهش گره خوردگی زنجیرها شده و خواص مکانیکی نمونه‌ها را کاهش می‌دهند. نتیجه دیگر کاهش تحرک و گره خوردگی زنجیرها ممانعت از آرایش یافتگی زنجیرهای پلیمری در جهت نیروی اعمال شده می‌باشد که این موضوع نیز موجب کاهش خواص مکانیکی می‌شود. افزایش سختی نمونه‌ها در نتیجه وجود نانوذرات و شکل‌گیری برخی از خلل و فرج‌های بسیار کوچک اطراف نانوذرات در طول اعمال بار که می‌توانند به عنوان نقاط تمرکز تنش عمل کنند، در نهایت به ایجاد پاسخ شکننده طی اعمال بار منجر می‌شوند.

بررسی استحکام ضربه نانوکامپوزیت‌ها

پس از آنکه نمونه‌های تهیه شده مورد آزمون مکانیکی ضربه قرار گرفتند، نتایج بدست آمده به کمک روش رویه پاسخ

جدول ۳ تحلیل واریانس استحکام ضربه

عوامل	مقدار P	مقدار F
مدل رگرسیون	۰/۰۰۰	۱۸/۶۴
عوامل خطی	۰/۰۰۰	۵۴/۵۱
گرافن (X ₁)	۰/۰۲۵	۶/۵۴
الیاف شیشه (X ₂)	۰/۰۰۰	۲۳/۴۷
نانورس (X ₃)	۰/۰۰۰	۷۱/۱۳
EPDM(X ₄)	۰/۰۰۰	۱۱۶/۸۸
عوامل درجه ۲	۰/۰۰۲	۸/۳۵
گرافن × گرافن (X ₁ ×X ₁)	۰/۰۰۱	۱۹/۹۹
الیاف شیشه×الیاف شیشه (X ₂ ×X ₂)	۰/۳۱۶	۱/۱۰
نانورس × نانورس (X ₃ ×X ₃)	۰/۱۸۵	۱/۹۸
EPDM × EPDM (X ₄ ×X ₄)	۰/۸۰۴	۰/۰۶
تأثیر متقابل	۰/۲۳۱	۱/۵۹
گرافن × الیاف شیشه (X ₁ ×X ₂)	۰/۳۳۲	۱/۰۲
گرافن × نانورس (X ₁ ×X ₃)	۰/۰۳۳	۵/۸۰
گرافن × EPDM(X ₁ ×X ₄)	۰/۸۲۰	۰/۰۵
الیاف شیشه × نانورس (X ₂ ×X ₃)	۰/۱۲۰	۲/۶۶
الیاف شیشه × EPDM(X ₂ ×X ₄)	۰/۸۷۹	۰/۰۲
نانورس × EPDM(X ₃ ×X ₄)	۱/۰۰۰	۰/۰۰



شکل ۹- نمودارهای تأثیر نانوصفحات گرافن، الیاف شیشه، نانوحاک رس و EPDM بر استحکام ضربه

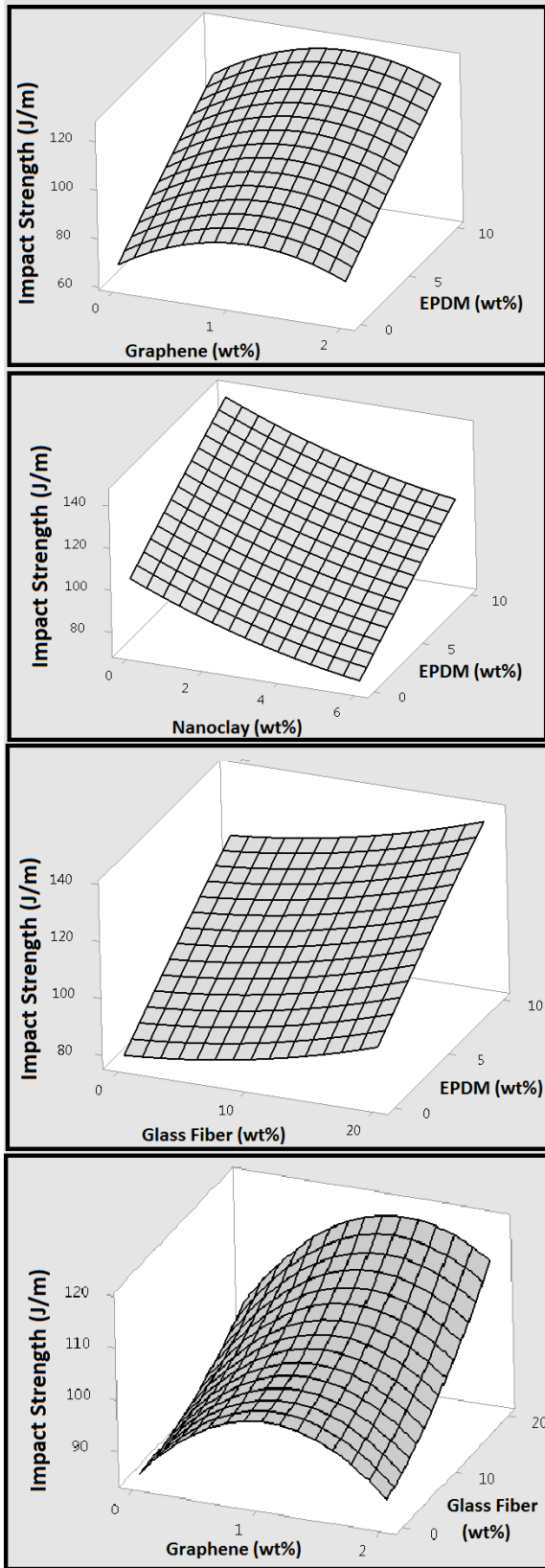
تقویت زمینه پلیمری توسط نانوذرات تمرکز تنش بر روی سطح الیاف را کاهش داده و تنش لازم برای پارگی الیاف که از مهمترین مکانیزم‌های شکست در کامپوزیت‌ها تحت بارگذاری

تحلیل و مقایسه شدند. نتایج مربوط به تحلیل واریانس استحکام ضربه در جدول ۳ نشان داده شده است. مقدار F برای بررسی فاصله متغیرها تا میانگین استفاده می‌شود و مقدار P برای موثر بودن حضور یک عامل در مدل به کار برده می‌شود که در این تحلیل دامنه انتخاب برای مقدار P کمتر از ۰/۰۵ انتخاب شده است [۲۰]. از آنجا که R₂ نزدیک به ۱۰۰ درصد به معنای اعتبار بیشتر مدل است، دامنه بدست آمده برای R₂ در این مطالعه نشانگر تناسب مناسب با داده های تجربی است. به این ترتیب معادله رگرسیون مربوط به استحکام ضربه به صورت معادله (۳) می‌باشد. همانطور که در این معادله دیده می‌شود، نانوصفحات گرافن دارای بیشترین تأثیر بر روی استحکام ضربه می‌باشند.

$$\text{Impact Strength} = 72.00 + 33.42X_1 + 0.46X_2 - 3.50X_3 + 4.05X_4 - 12.46X_1^2 - 2.58X_1X_3 \quad (3)$$

نتایج تأثیر هر کدام از مواد بر روی استحکام ضربه در نمودارهای شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود که عموماً حضور ۲۰ درصد وزنی الیاف شیشه مقاومت به ضربه زمینه را تا ۱۸٪ افزایش داده است. تأثیر حضور الیاف در اتلاف انرژی رشد ترکی در نمونه‌های شیاردار آزمون شارپی ایجاد گردیده، باعث افزایش استحکام ضربه می‌شود. این تأثیر الیاف توسط محققین نیز گزارش شده است [۲۵ و ۲۶].

در کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف، چسبندگی بین سطحی زمینه و الیاف دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد. زیرا هنگامی که کامپوزیت تحت بارگذاری قرار می‌گیرد، انتقال تنش از طریق فصل مشترک زمینه و الیاف صورت می‌پذیرد. در کامپوزیت‌های زمینه پلیمری باید بین زمینه و تقویت کننده اتصال کامل، محکم و استوار برقرار باشد تا نیرو بتواند از زمینه به الیاف منتقل شود. علاوه بر آن هنگامیکه اتصال بین الیاف و زمینه تضعیف شود، الیاف در حین اعمال نیرو می‌تواند از زمینه بیرون کشیده شوند و در نتیجه استحکام و مقاومت به شکست کامپوزیت کاهش می‌یابد. اضافه نمودن نانوذرات به کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف باعث افزایش چسبندگی بین زمینه و الیاف می‌گردد که تقویت فصل مشترک و در نتیجه بهبود انتقال بار را به همراه دارد.



شکل ۱۰- رویه‌های پاسخ مربوط به استحکام ضربه در درصدی مختلف مواد

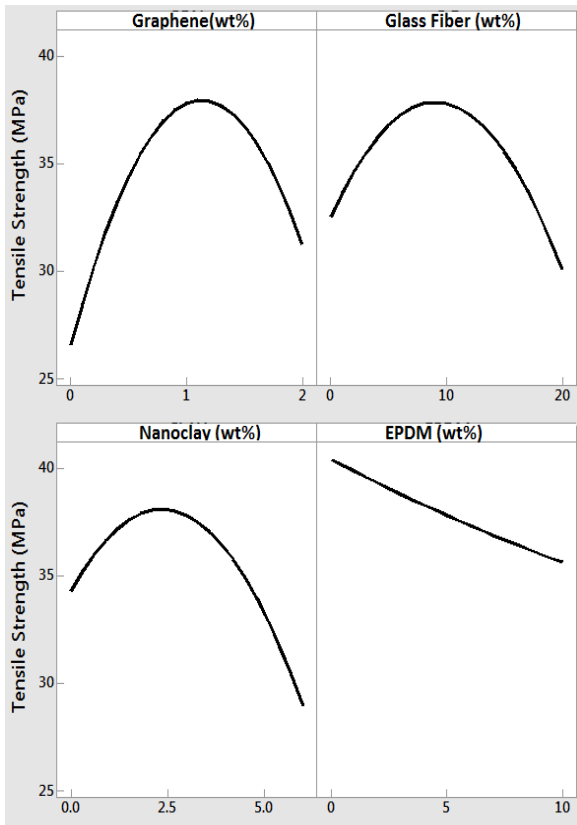
ضربه‌ای هستند را افزایش می‌دهد و در نتیجه خواص ضربه بهبود می‌یابد. همچنین افزودن نانو صفحات گرافن به ترکیب، استحکام ضربه را افزایش داده که علت آن جلوگیری از رشد ترک و انحراف مسیر رشد ترک در زمینه پلیمری بوده است. هنگامی که ترک به صفحات نانوغرافن می‌رسد، برای اشاعه ترک نیاز به تغییر مسیر رشد ترک است و از این طریق مسیر رشد ترک افزایش می‌یابد. این مسئله موجب افزایش انرژی لازم برای اشاعه ترک شده و در نتیجه افزایش جذب انرژی را نیز به همراه دارد. این نتایج توسط هنگ و همکارانش [۲۷] نیز گزارش شده است.

افزودن درصدی بالای نانوصفحات گرافن و همچنین افزودن نانوخاک رس باعث کاهش استحکام ضربه شده است. دلیل این امر را می‌توان به نسبت منظر بالای نانوصفحات گرافن نسبت داد. این نانوذرات به علت داشتن نسبت منطری بالا نسبت به نانوخاک رس، تعامل سطحی بین زمینه و تقویت کننده را افزایش می‌دهند و مانع قوی‌تری در برابر حرکت زنجیرهای پلیمری ایجاد می‌کنند، به همین دلیل ماده ماهیت تردی یافته و استحکام ضربه آن کاهش می‌یابد. همچنین نشان داده شده که افزایش ۱۰ درصد وزنی EPDM، باعث افزایش ۵۷٪ در استحکام ضربه می‌شود که علت آن انعطاف‌پذیری بالای EPDM در دماهای پایین می‌باشد [۲۲].

شکل ۱۰ رویه‌های پاسخ مربوط به استحکام ضربه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودارها نشان داده است افزایش درصد وزنی الیاف شیشه و افزایش درصد وزنی EPDM باعث افزایش استحکام ضربه شده است. همچنین افزودن نانو صفحات گرافن تا ۱ درصد وزنی گرافن باعث افزایش و افزودن آن در درصدی بالاتر باعث کاهش استحکام ضربه شده است. نانوخاک رس در استحکام ضربه تأثیر منفی داشته و افزایش نانوخاک رس باعث کاهش استحکام ضربه شده است.

بررسی استحکام کششی نانوکامپوزیت‌ها

پس از آنکه نمونه‌های تهیه شده مورد آزمون مکانیکی کشش قرار گرفتند، نتایج بدست آمده به کمک روش رویه پاسخ تحلیل و مقایسه شدند. نتایج مربوط به تحلیل واریانس استحکام کششی در جدول ۴ نشان داده شده است.



شکل ۱۱- نمودارهای تاثیر نانوصفحات گرافن، الیاف شیشه، نانوکاکرس و EPDM بر استحکام کششی

همانطور که مشاهده می‌شود مقدار P در همه عوامل کمتر از ۰/۰۵ بوده است و از آنجا که R₂ نزدیک به ۱۰۰ درصد به معنای اعتبار بیشتر مدل است. به این ترتیب معادله رگرسیون مربوط به استحکام ضربه به صورت معادله (۴) می‌باشد. همانطور که در این معادله دیده می‌شود، نانو صفحات گرافن دارای بیشترین تأثیر بر روی استحکام کششی می‌باشند.

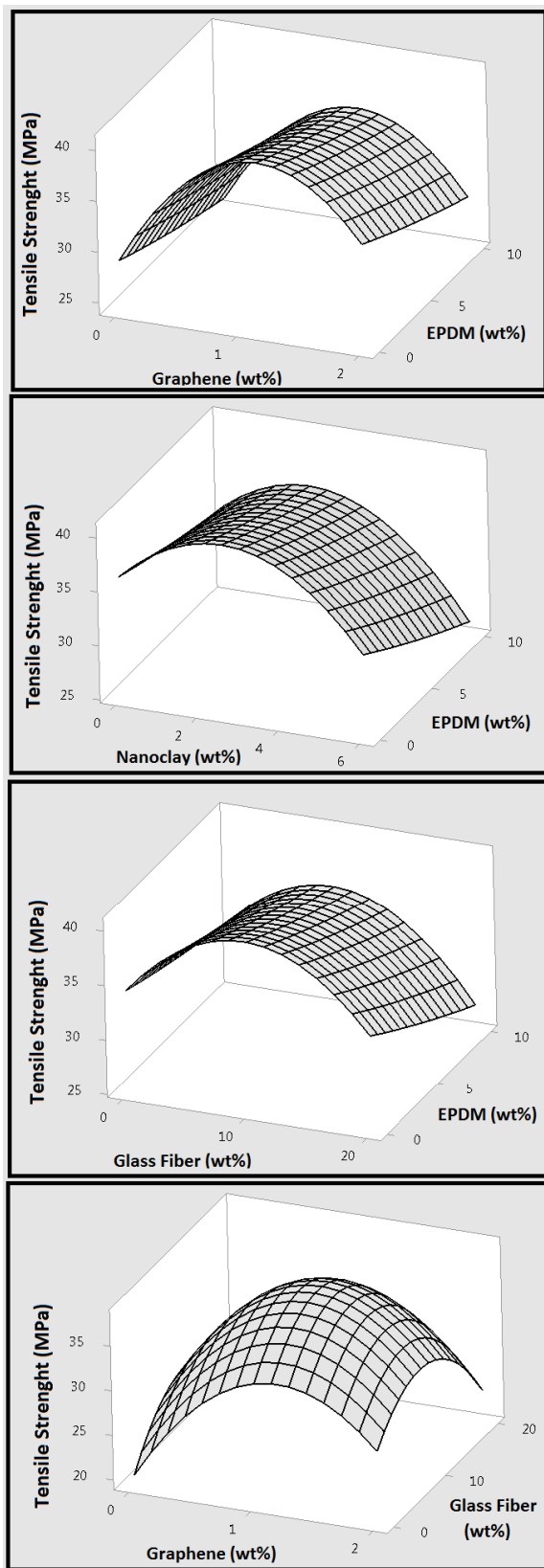
$$\text{Tensile Strength} = 16.25 + 22.89X_1 + 1.34X_2 + 3.79X_3 - 0.127X_4^2 - 8.90X_1^2 - 0.06X_2^2 - 0.68X_3^2 + -0.008X_4^2 \quad (4)$$

نتایج استحکام کششی در نمودارهای شکل ۱۱ نشان داده شده است. استحکام کششی به معنی بیشترین مقدار تنش کششی است که ماده می‌تواند در آزمون کشش تحمل کند. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود حضور ۱۰ درصد وزنی الیاف شیشه، استحکام کششی را ۲۲٪ افزایش داده که علت این امر را می‌توان مدول بسیار بالای الیاف شیشه، چسبندگی خوب الیاف و زمینه و تأثیر انتقال بار از زمینه نرم پلیمری به الیاف سفت تر ذکر کرد [۲۸ و ۲۹].

جدول ۴- تحلیل واریانس استحکام کششی

عوامل	مقدار P	مقدار F
مدل رگرسیون	۰/۰۰۰	۲۱/۲۷
عوامل خطی	۰/۰۰۰	۱۹/۱۲
گرافن (X ₁)	۰/۰۰۱	۲۰/۹۹
الیاف شیشه (X ₂)	۰/۰۳۲	۵/۸۶
نانورس (X ₃)	۰/۰۰۰	۲۷/۵۹
EPDM (X ₄)	۰/۰۰۱	۲۲/۰۵
عوامل درجه ۲	۰/۰۰۰	۵۳/۷۸
گرافن × گرافن (X ₁ ×X ₁)	۰/۰۰۰	۱۳۵/۸۵
الیاف شیشه×الیاف شیشه (X ₂ ×X ₂)	۰/۰۰۰	۷۲/۴۹
نانورس× نانورس (X ₃ ×X ₃)	۰/۰۰۰	۶۵/۶۹
EPDM × EPDM (X ₄ ×X ₄)	۰/۷۹۰	۰/۰۷
تاثیر متقابل	۰/۴۵۷	۱/۰۲
گرافن × الیاف شیشه (X ₁ ×X ₂)	۰/۳۱۷	۱/۷۰
گرافن × نانورس (X ₁ ×X ₃)	۰/۱۹۰	۱/۹۳
گرافن × EPDM (X ₁ ×X ₄)	۰/۶۷۸	۰/۱۸
الیاف شیشه × نانورس (X ₂ ×X ₃)	۰/۶۳۹	۰/۲۳
الیاف شیشه × EPDM (X ₂ ×X ₄)	۰/۳۱۵	۰/۱۰
نانورس × EPDM (X ₃ ×X ₄)	۰/۳۴۱	۰/۹۸

با افزودن ۲۰ درصد وزنی الیاف شیشه استحکام کششی ۳۱٪ کاهش یافته که علت این است که در درصدهای بالا، الیاف شیشه چسبندگی خیلی خوب با زمینه ندارند و موقع اعمال بار کششی، تمایل به خارج شدن از زمینه پلیمری داشته است. این رفتار در کامپوزیت‌ها دور از انتظار نیست [۲۶]. همچنین حضور نانو صفحات گرافن تا ۱ درصد وزنی باعث افزایش ۴۶ درصدی استحکام کششی شده است که علت آن بهبود چسبندگی الیاف به زمینه در این نمونه‌ها می‌باشد. در درصدهای وزنی بالاتر از این نانو صفحات، اُفت ۲۳ درصدی استحکام کششی مشاهده می‌شود که علت آن می‌تواند کلوخه شدن نانو ذرات در ترکیبات باشد. دلیل این امر می‌تواند توزیع نامطلوب نانوصفحات گرافن درون زمینه پلیمری باشد و این امر به رد ترک در نمونه‌ها کمک کرده و در نهایت باعث کاهش مدول الاستیک در نانوکامپوزیت‌ها گردیده است. همچنین افزایش ۳ درصد نانو خاک رس باعث افزایش ۲۱ درصدی استحکام کششی شده و با افزایش تا ۶ درصد وزنی استحکام کششی ۲۹٪ کاهش یافته است. در واقع کلوخه شدن نانو ذرات



شکل ۱۲- رویه‌های پاسخ مربوط به استحکام کششی در درصدهای وزنی مختلف مواد

باعث کاهش اثر آن‌ها در خواص کشش شده و این مطلب در نتایج کار محققان دیگر نیز ذکر گردیده است [۲۵].

به طور کلی، نانوذرات به دلیل داشتن سطح ویژه زیاد، انرژی آزاد سطحی بسیار زیادی دارند. همچنین، فاصله میان صفحه‌های گرافن کاهش می‌یابد و امکان کلوخه شدن آنها بیشتر می‌شود. از این رو برای کاهش انرژی آزاد سامانه، صفحات گرافن به یکدیگر چسبیده و به عنوان مراکز تمرکز تنش عمل می‌کنند و سبب کاهش خواص مکانیکی می‌شوند. همچنین افزایش ۱۰ درصد وزنی EPDM، ۱۴٪ استحکام کششی را کاهش داد که علت آن را می‌توان نرم‌تر بودن EPDM نسبت به پلی‌پروپیلن دانست.

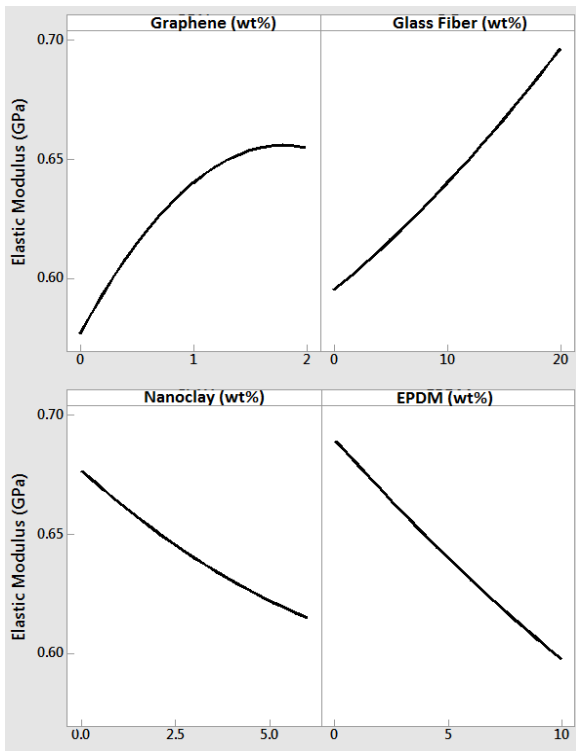
شکل ۱۲ رویه‌های پاسخ مربوط به استحکام کششی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودارها نشان داده است افزایش درصدهای پایین نانو صفحات گرافن و نانو خاک کرس و الیاف شیشه باعث افزایش استحکام کششی و افزودن نانو ذرات والیاف شیشه در درصدهای بالاتر تأثیر برعکس داشته و باعث کاهش استحکام کششی گردیده است. همچنین افزودن EPDM باعث کاهش استحکام کششی گردیده است.

بررسی مدول الاستیک نانوکامپوزیت‌ها

پس از آنکه نمونه‌های تهیه شده مورد آزمون مکانیکی کشش قرار گرفتند، نتایج بدست آمده به کمک روش رویه پاسخ تحلیل و مقایسه شدند. نتایج مربوط به آنالیز واریانس مدول کششی در جدول ۵ نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار P در همه عوامل کمتر از ۰/۰۵ بوده است و از آنجا که R_2 نزدیک به ۱۰۰ درصد به معنای اعتبار بیشتر مدل است. به این ترتیب معادله رگرسیون مربوط به مدول الاستیک به صورت معادله (۵) می‌باشد. همان‌طور که در این معادله دیده می‌شود، نانو صفحات گرافن دارای بیشترین تأثیر بر روی مدول الاستیک می‌باشند.

$$Elastic Modulus = 0.615 + 0.1X_1 + 0.0026X_2 - 0.0116X_3 - 0.011X_4 - 0.02417X_1^2 \quad (5)$$



شکل ۱۳- نمودارهای تاثیر نانوصفحات گرافن، الیاف شیشه، نانوخاک رس و EPDM بر مدول الاستیک

از آنجاییکه افزودن درصدهای وزنی بالای خاک رس پیوند ضعیفی با سایر اجزای کامپوزیت در فصل مشترک به آنها ایجاد می کند و سبب کاهش مدول الاستیک می شود. همچنین کاهش مدول در درصدهای بالای نانورس را می توان تشکیل کلوخه های آنها دانست که پیوند میان آنها از نوع واندروالس است که باعث نرم تر شدن ماده در مکان های ایجاد کلوخه و کاهش مدول الاستیک می شود. کلوخه ها به علت درشت بودن می توانند سبب تمرکز تنش شده و ترک ایجاد کنند.

ترک ایجاد شده به دلیل تعداد بیشتر کلوخه ها و فاصله کمتر میان کلوخه ها، راحت تر توسعه یافته و بدین ترتیب مدول الاستیک کاهش می یابد. همچنین علت کاهش مدول الاستیک را می توان عدم پراکندگی مناسب نانورس در زمینه و بالا رفتن حرکات زنجیره های پلیمری در اثر اعمال نیرو دانست. همچنین به دلیل زیاد بودن نسبت منظر نانوصفحات و قرار گرفتن آنها بین زنجیره های پلیمری، تحرک و گره خوردگی زنجیره ها کاهش پیدا کرده و بین آنها لغزش رخ می دهد که در پی آن انعطاف پذیری زنجیره ها کاهش پیدا کرده و رفتار نمونه ها از حالت چقرمه به حالت شکننده تبدیل می شود.

نتایج مدول الاستیک در نمودارهای شکل ۱۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، افزایش ۲۰ درصد وزنی الیاف شیشه باعث ۲۴٪ افزایش مدول شده است. مهم ترین علت این امر را می توان مدول بسیار بالاتر الیاف شیشه و تاثیر انتقال بار از زمینه نرم پلیمری به الیاف سفت تر ذکر کرد [۲۹ و ۳۰]. افزودن ۱ و ۲ درصد وزنی نانوصفحات گرافن، به ترتیب باعث افزایش ۱۶٪ و ۴٪ مدول شده است که علت آن را می توان در نقش نانوذرات در چسبندگی بین الیاف و زمینه جستجو کرد. حضور نانوگرافن در ترکیب باعث چسبندگی بیشتر زمینه به الیاف و تشکیل پیوندهای قوی تر شده که افزایش سفتی یا مدول الاستیک را در پی داشته است [۲۴ و ۲۵]. افزایش نانو خاک رس با ۶ درصد وزنی باعث کاهش مدول الاستیک شده است.

مدول الاستیک یک خاصیتی از ماده است که به خواص ذاتی ماده باز می گردد. بنابراین نوع پیوند میان اتم های ماده بر مقدار آن اثر بسزایی دارد. مواد سفت تر مدول الاستیک بالاتری دارند. از آنجاییکه در ناحیه کشسان (پیش از تسلیم نمونه) فاصله میان اتم ها در اثر اعمال نیرو تغییر یافته و تغییر حجم ایجاد می شود. از این رو، پیوند قوی تر اتم ها با یکدیگر سبب مقاومت بیشتر ماده در برابر کش آمدن یا افزایش حجم شده و مدول الاستیک افزایش می یابد. بدین ترتیب ایجاد پیوندهای ضعیف نیز باعث کاهش مدول می شود.

جدول ۵- تحلیل واریانس مدول الاستیک

عوامل	مقدار P	مقدار F
مدل رگرسیون	۰/۰۰۰	۲۱/۲۷
عوامل خطی	۰/۰۰۰	۱۹/۱۲
گرافن (X ₁)	۰/۰۰۰	۲۰/۹۹
الیاف شیشه (X ₂)	۰/۰۰۰	۵/۸۶
نانورس (X ₃)	۰/۰۰۰	۲۷/۵۹
EPDM (X ₄)	۰/۰۰۰	۲۲/۰۵
عوامل درجه ۲	۰/۰۱۷	۵۳/۷۸
گرافن × گرافن (X ₁ ×X ₁)	۰/۰۰۶	۱۳۵/۸۵
الیاف شیشه × الیاف شیشه (X ₂ ×X ₂)	۰/۴۳۶	۷۲/۴۹
نانورس × نانورس (X ₃ ×X ₃)	۰/۴۳۶	۶۵/۶۹
EPDM × EPDM (X ₄ ×X ₄)	۰/۶۵۳	۰/۰۷
تاثیر متقابل	۰/۷۸۱	۱/۰۲
گرافن × الیاف شیشه (X ₁ ×X ₂)	۰/۷۷۰	۱/۷۰
گرافن × نانورس (X ₁ ×X ₃)	۰/۳۸۷	۱/۹۳
گرافن × EPDM (X ₁ ×X ₄)	۰/۷۷۰	۰/۱۸
الیاف شیشه × نانورس (X ₂ ×X ₃)	۰/۵۶۱	۰/۲۳
الیاف شیشه × EPDM (X ₂ ×X ₄)	۰/۳۴۵	۰/۱۰
نانورس × EPDM (X ₃ ×X ₄)	۰/۵۶۱	۰/۹۸

همچنین افزایش EPDM باعث کاهش مدول الاستیک در ترکیب شده است که علت این است که الاستومر EPDM نسبت به پلی‌پروپیلن نرم‌تر بوده و دارای مدول الاستیک کمتری می‌باشد.

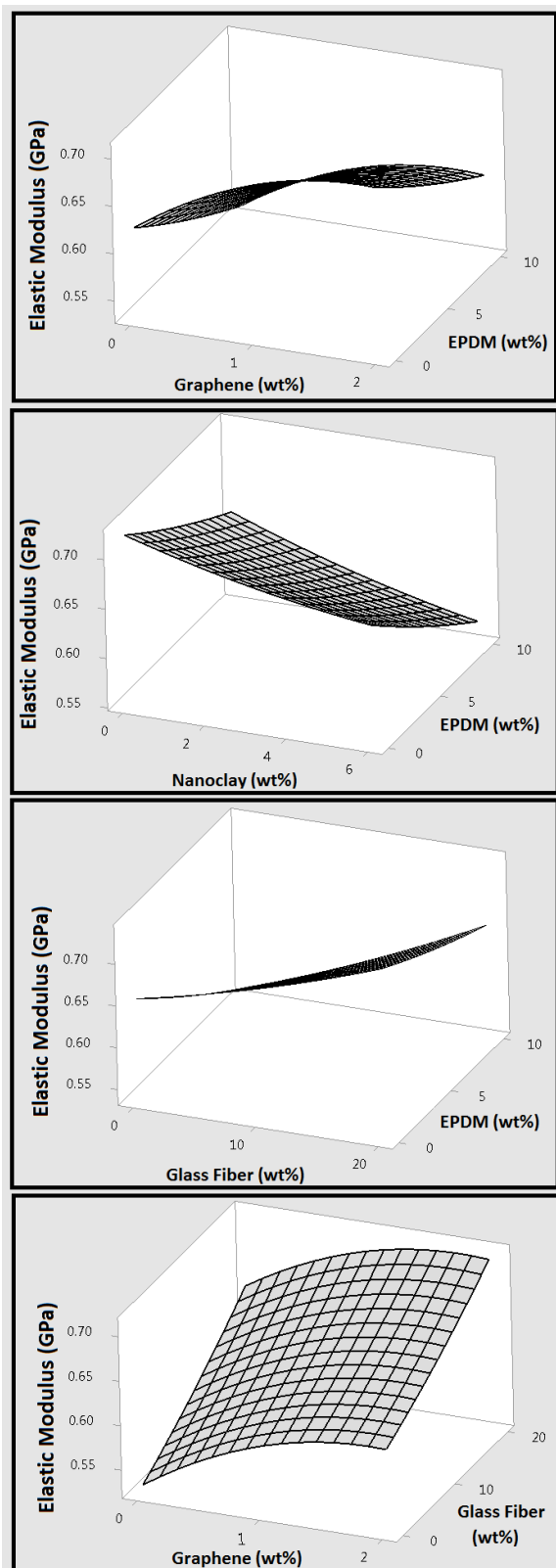
شکل ۱۴ رویه‌های پاسخ مربوط به مدول الاستیک را نشان می‌دهد. در این شکل با ثابت در نظر گرفتن تک تک متغیرها تأثیر همزمان مواد تشکیل دهنده بر روی مدول الاستیک نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودارها نشان داده است افزایش و الیاف شیشه باعث افزایش مدول الاستیک شده که علت آن بالا بودن مدول الیاف شیشه و تأثیر انتقال بار از زمینه نرم پلیمری به الیاف سفت‌تر می‌باشد.

همچنین افزایش نانوصفحات گرافن باعث افزایش مدول الاستیک شده است زیرا حضور نانوغرافن در ترکیب باعث چسبندگی بیشتر زمینه به الیاف و تشکیل پیوندهای قوی‌تر شده که افزایش سفتی یا مدول الاستیک را در پی داشته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزودن نانوخاک رس و EPDM باعث کاهش مدول الاستیک شده و تأثیر منفی بر روی مدول الاستیک دارد که علت آن کلوخه شدن نانو ذرات در درصدهای بالای آنها می‌باشد.

نتیجه گیری

در این تحقیق، خواص مکانیکی نانو کامپوزیت‌های هیبریدی با زمینه پلیمری پلی‌پروپیلن و اتیلن پروپیلن دی‌ان مونومر تقویت شده با نانوصفحات گرافن، نانو خاک رس و الیاف شیشه به روش رویه پاسخ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد:

- افزودن نانوصفحات گرافن تا ۱ درصد وزنی استحکام ضربه را تا ۲۳٪ و استحکام کششی را تا ۴۶٪ افزایش داده و با افزودن آن تا ۲ درصد وزنی استحکام ضربه و استحکام کششی را کاهش داده است.
- افزودن نانو صفحات گرافن تا ۱ و ۲ درصد وزنی به ترتیب مدول الاستیک را تا ۱۶٪ و ۴٪ افزایش داده است.
- افزودن الیاف شیشه تا ۲۰ درصد وزنی استحکام ضربه را ۱۸٪ و مدول کششی را ۲۴٪ افزایش داده است.
- افزودن الیاف شیشه تا ۱۰ درصد وزنی استحکام کششی را تا ۲۲٪ افزایش و افزودن آن تا ۲۰ درصد وزنی استحکام کششی را ۳۱٪ کاهش داده است.



شکل ۱۴- رویه‌های پاسخ مربوط به مدول الاستیک در درصدهای وزنی مختلف مواد

- [11] Etcheverry, M. and Barbosa S. E., "Glass Fiber Reinforced Polypropylene Mechanical Properties Enhancement by Adhesion Improvement," *Materials*, Vol. 5, No. 6, pp. 1084-1113, 2012.
- [12] Menbari, S., Ashenai ghasemi F. and Ghasemi I., "Comparison of mechanical properties of hybrid nanocomposites of Polypropylene/ Talc/ Graphene with Polypropylene/ Graphene," In Persian, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 7, pp 329-335, 2015.
- [13] Nouri Niyaraki, M., Ashenai Ghasemi, F., Ghasemi, I. and Daneshpayeh, S., "Predicting the tensile strength and elongation at break of PP/graphene/glass fiber/EPDM nanocomposites using response surface methodology," *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 5(29) May, pp. 1537-6532, 2019.
- [14] Ansari, M. J. and Jabbaripour, B., "Manufacture and Comparison of Mechanical Properties of Reinforced Polypropylene Nanocomposite with Carbon Fibers and Calcium Carbonate Nanoparticles," in Persian, *Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 6, No. 5, pp. 1-12, 2019.
- [15] Esmizadeh, E., Sahraeian, R., Naderi, Gh. and Esfandeh, M., "Mechanical behavior of nanoperlite/nanoclay hybrid nanocomposites based on polyethylene: Experimental and numerical validation of hyperplastic models," in Persian *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 2, pp. 283-293, 2019.
- [16] Wang, W. and Tang, L., "Mechanical properties and morphological structures of short glass fiber reinforced PP/EPDM composite," *European Polymer Journal*, Vol. 39, No. 11, pp. 2129-2134, 2003.
- [17] Helson, M and Ramos, D. M., "Analysis of thermal properties and impact strength of PP/SRT, PP/EPDM and PP/SRT/EPDM mixtures in single screw extruder," *Polymer Testing Journal*, Vol. 25, No. 4, pp. 498-503, 2006.
- [18] Pol, M. H., Liaghat, Gh. H., Mehrabani Yeganeh, E. and Afrouzian, A., "Experimental investigation of nan clay and nan silica particles effects on mechanical properties of glass epoxy composites," In Persian, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 16, pp. 76-82, 2015.
- [19] Ghasemi, I., Karrabi, M., Mohammadi, M and Azizi, H., "Evaluating the effect of processing conditions and organoclay content on the

- افزودن نانو خاک رس تا ۳ درصد وزنی استحکام کششی را ۲۱٪ افزایش داده ولی در درصدهای بالا باعث کاهش استحکام ضربه، استحکام کششی و مدول الاستیک شده است.
- افزودن EPDM تا ۱۰ درصد وزنی باعث افزایش ۵۷٪ در استحکام ضربه گردیده است.

مراجع

- [1] Rosato, D., "Reinforced plastics handbook," Third ed, Plastic source publication, Concord MA, USA, pp. 113-121, 2004.
- [2] Koch, C., Ovidko, I., Seal, S. and Veprek, S., "structural nanocrystalline material, first published," Cambridge University press, New York, pp. 346-347, 2007.
- [3] Selvakumar, V., Palanikumar, K. and Palanivelu, K., "Studies of mechanical characterization of Polypropylene/Na⁺-MMT nanocomposites," *Journal of Minerals & Materials characterization & Engineering*, Vol.9, No.8, pp.671-681, 2010.
- [4] Bikiaris, D., "Microstructure and properties of polypropylene/carbon nanotube nanocomposites," *Materials*, Vol. 3, No. 4, pp. 2884-2946, 2010.
- [5] Kargarzadeh, H., Ahmad, I., "Mechanical Properties of Epoxy-Rubber Blends," *Handbook of epoxy blends*, pp. 1-36, 2016.
- [6] Firouze, M., kazemi S., Ghasemi, I., "Production of Wood/Plastic Composites Based on PP/HDPE Blends: Determination of Optimum Conditions," In Persian, *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, Vol. 24, No. 1, 43-53, 2011.
- [7] Mittal, V., "Polymer-Graphene Nanocomposites," RSC Publishing, Cambridge, pp. 1-3, 2012.
- [8] Wei J. T., "Epoxy/graphene Nanocomposites- Processing and Properties: a Review," *RSC Advances* 5(90): 73510-73524, 2015.
- [9] Galpaya, D. and Wang, M., "Preparation of Graphene Oxide/epoxy Nanocomposites with Significantly Improved Mechanical Properties," *Journal of Applied Physics*, 116(5): 053518, 2014.
- [10] HadadiAsl, V. and Karimkhani, V. "Introduction to Nanotechnology applications in polymers," In Persian, *Petroleum Industry Research Center*, pp. 165-178, Tehran, 2010.

- Geometry and Test Temperature, Fibers and Polymers,” Vol. 14, No. 11, pp. 1877-1885, 2013.
- [29] Stpckreiter, W., Schninger, R. and kastl, J., “Glass fiber reinforced polypropylene,” US008519044B2, 2013.
- [30] Okabe, T., Nishikava, M., “GLS strength prediction of glass-fiber-reinforced polypropylene,” Journal of Materials Science 44:331-334, 2009.
- properties of styrene butadiene rubber/organoclay nanocomposites by response surface methodology, ”eXPRESS Polymer Letters, Vol. 4, No. 2, pp. 62–70, 2010.
- [20] Montgomery, D. C., “Design and analysis of experiments,” New York: J. Wiley Sons, 2005.
- [21] Homauoonfal, M., Khodaian, F., Moosavi, M and Hoseini Panjaki, M., “Preparation and evaluation of properties of walnut oil emulsions prepared on the basis of response surface method,” In Persian, Journal of Food Industries, Vol. 8, No. 2, pp. 191-199, 2013.
- [22] Nouri Niyaraki, M., Ashenai Ghasemi, F., Ghasemi, I. and Daneshpayeh, S., “Experimental analysis of graphene nanoparticles and glass fibers effect on mechanical and thermal properties of polypropylene/EPDM based nanocomposites,” In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 05, No. 02, pp. 169-176, 2018.
- [23] Mohedi, H. A., Liaghat, Gh. H., Pol, M. H. and Afrosian, A., “Experimental study on the effect of nano-silica composite interlaminar fracture toughness third of materials reinforced with glass fibers,” In Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 3, pp. 290-283, 2015.
- [24] Rahman, N. A., Hassan, A., Yahya, R., Lafia-Araga, R. A. and Hornsby, P. R., “Microstructural, thermal, and mechanical properties of injection-molded glass fiber/nanoclay/polypropylene composites,” Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 31 No. 4, pp. 269-281, 2012.
- [25] Chaharmahali, M., Hamzeh, Y., Ebrahimi, G., Ashori, A. and Ghasemi, I., “Effect of nano-graphene on the physic-mechanical properties of bagasse/polypropylene composites,” Polymer Bulletin Vol. 71, No. 2, pp. 337-349. 2014.
- [26] Daneshpayeh, S., Ashenai Ghasemi, F., Missouri, Sh and Nouri Niyaraki, M., “Prediction of mechanical properties of quaternary nanocomposites based on polypropylene using fuzzy logic,” Journal of Elastomers & Plastics, pp. 1-17, 2020.
- [27] Liu, H., Wang, G., Mai, Y. and Zeng, Y., “On fracture toughness of nano-particle modified epoxy,” Composites Part B Engineering 42(8):2170-2175, 2011.
- [28] Rahman N.A., “Impact Properties of Glassfiber/ Polypropylene Composites: The Influence of Fiber Loading, Specimen