

تحلیل و بهینه‌سازی خواص مکانیکی بایوکامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کناف و نانو

ذرات گرافن در حضور سازگارکننده

حسین تقی پور^{۱*}، جابر میرزایی^۲

۱- گروه مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه ولایت ایرانشهر، ایرانشهر، ایران

۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده:

در این مقاله به بررسی خواص مکانیکی در بایوکامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف طبیعی کناف/نانوگرافن در زمینه پلی پروپیلن با اضافه کردن سازگار کننده پرداخته شده است. از روش آماری سطح پاسخ با رویکرد باکس-بهنکن جهت بررسی و ارائه مدل ریاضی برای رفتار بایوکامپوزیت با توجه به پارامترهای درصد وزنی الیاف کناف، درصد وزنی نانوگرافن و درصد وزنی سازگارکننده استفاده شده است. رفتار نمونه‌ها تحت آزمون‌های کشش، خمش و ضربه تحلیل گردید و نتایج با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی توجیه شد. سطح شکست نمونه‌ها نشان داد مکانیزم اصلی در بهبود رفتار بایوکامپوزیت معرفی شده، شکست الیاف و جدایش به همراه بیرون کشیدگی الیاف از ماده زمینه است. فرایند بهینه‌سازی چند هدفه با دو روش فراابتکاری و تابع مطلوبیت انجام گردید. بهینه‌سازی، با هدف افزایش استحکام خمشی، ضربه و کشش، و همزمان کاهش وزن نمونه‌ها انجام گردید و درصد وزنی الیاف، نانو ذرات و سازگارکننده به عنوان متغیرهای مسئله تعریف گردیدند. نتایج نشان داد نمونه بایوکامپوزیت با درصدهای بهینه پارامترهای طراحی، در سه خاصیت مکانیکی شامل، استحکام کششی، ضربه و خمشی به ترتیب برابر ۲۸/۵ مگاپاسکال، ۹۲/۲۹ ژول بر متر و ۵۰ مگاپاسکال است. در پایان حالت بهینه نشان داد، وزن نمونه بایوکامپوزیت را می توان تا ۳۲ درصد کاهش داد.

کلمات کلیدی: خواص مکانیکی، بهینه‌سازی، طراحی آزمایش، سازگارکننده، الیاف طبیعی

در سال‌های اخیر، استفاده از الیاف طبیعی در ساخت مواد کامپوزیتی سازگار با محیط زیست در صنایع مختلف مورد توجه قرار گرفته‌اند؛ که علت آن وجود خواص ذاتی مناسب آنها، مانند نسبت مقاومت به وزن بالا، خواص حرارتی مناسب، عدم نفوذپذیری آب و تجزیه پذیری در محیط زیست است [۱]. استفاده از کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف طبیعی و نانو ذرات در طیف وسیعی از صنایع، قابلیت جایگزین با فلزات را دارند، از جاذب‌های انرژی در سپر خودرو گرفته تا صنایع غذایی و هوایی [۲-۶]. الیاف طبیعی جهت کارهای تحقیقاتی و صنعتی جهت تقویت پلیمرها و به دست‌آوردن تکنولوژی جدید در کامپوزیت‌ها به طور گسترده در سراسر جهان در دسترس است [۷]، به طوریکه در طی ۳ ماه پس از کاشت بذر، در گستره وسیعی از آب و هوا می‌تواند رشد کند و ارتفاع آن به ۳ متر با قطر ۳-۵ سانتیمتر برسد [۸]. الیاف کناف یکی از الیاف‌های طبیعی است که به عنوان تقویت کننده در ماده زمینه کامپوزیت‌های پلیمری استفاده می‌شود. الیاف کناف به عنوان یک منبع سلولزی با هر دو مزیت اقتصادی و زیست تخریب پذیر بودن شناخته شده است. رشته‌های کناف شامل فیبرهای مجزایی است که به طور معمولی ۲-۶ میلی‌متر هستند. دانشمندان معتقد هستند که خواص کلی الیاف کناف به خواص ذاتی هریک از اجزای آن بستگی دارد [۹]. استحکام و سختی این الیاف توسط اجزای سلولز بواسطه پیوندهای هیدروژنی حاصل می‌گردد. در زمان‌های قدیم مردم به طور ماهرانه از کناف به عنوان طناب، پارچه، گونی استفاده می‌کردند و اخیراً بیشتر به عنوان جایگزین مواد خام، به جای چوب مورد استفاده در صنایع کاغذ سازی جهت جلوگیری از تخریب جنگل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین الیاف کناف در ساخت وسایل غیرفلزی در صنعت خودرو و منسوجات مورد استفاده قرار می‌گیرند. الیاف ساقه‌ی کناف به علت داشتن نسبت سختی به وزن بسیار بالا، نسبت به الیاف دیگر دارای پتانسیل مناسبی برای تقویت کامپوزیت‌های ترموپلاستیک است. میزان استحکام کششی و مدول فیبر کناف به ترتیب ۱۱/۹ گیگاپاسکال و ۶۰ گیگاپاسکال است [۱۰].

جی^۱ و همکاران [۱۱]، به بررسی درصد وزنی الیاف کناف بر روی خواص مکانیکی و حرارتی کامپوزیت‌ها پرداختند. الیاف کناف در ۲۵ تا ۵۰ درصد وزنی در کامپوزیت استفاده شد. نتایج آنها نشان داد که افزودن الیاف تا ۳۰ درصد وزنی باعث افزایش خواص کششی و خمشی کامپوزیت شده است. همچنین گزارش کردند، افزایش الیاف در درصدهای وزنی بالاتر باعث کاهش خواص مکانیکی می‌گردد. گوچنگ^۲ و همکاران [۱۲] به بررسی تاثیر میزان الیاف کناف بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت الیاف کناف و اپوکسی پرداختند. آنها به بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت که شامل ۲۰ تا ۶۰ درصد وزنی الیاف کربن می‌باشد پرداختند. آنها گزارش کردند که افزایش میزان الیاف تا ۶۰ درصد وزنی باعث کاهش خواص مکانیکی نانو کامپوزیت گردیده است. یو^۳ و همکاران [۱۳]، به بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کوتاه طبیعی پرداختند. در نمونه‌های مورد مطالعه از الیاف جوت و رمی با میانگین طول ۱۰ میلی‌متر و درصد وزنی بین ۱۰ تا ۵۰ استفاده کردند. نتایج کار آنها نشان داد که بیشترین بهبود در خواص مکانیکی در ۳۰ درصد وزنی الیاف صورت پذیرفته است.

سونگ و همکاران [۱۴]، نشان دادند که افزودن ۱ درصد وزنی نانو ذرات گرافن به پلی پروپیلن استحکام تسلیم و استحکام کششی را افزایش می‌دهد و افزودن بیش از ۱ درصد وزنی (تا ۵ درصد وزنی) آن موجب کاهش استحکام در کامپوزیت می‌گردد. در یک مطالعه دیگر، یوان و همکاران [۱۵]، به بررسی خواص مکانیکی نانو کامپوزیت‌های پلی پروپیلن / اکسید گرافن پرداختند. گزارش های آن‌ها نشان می‌دهد که افزودن تا ۱ درصد وزنی اکسید گرافن، مدول الاستیک و استحکام کششی را افزایش می‌دهد ولی باعث کاهش ازدیاد طول تا پارگی می‌شود. نوری نیارکی و همکارانش [۱۶]، به تحلیل تجربی تاثیر حضور همزمان نانوصفحات گرافن و الیاف شیشه بر خواص مکانیکی و حرارتی نانو کامپوزیت‌های پایه پلی پروپیلن / ای پی دی ام^۴ پرداختند. آنها گزارش کردند که

¹ Jai

² Guocheng

³ YU

⁴ EPDM

حضور مقادیر پایین نانوصفحات گرافن، استحکام ضربه را ۱۶ درصد افزایش داده است. این در حالی است حضور مقادیر بالای این میزان، از استحکام ضربه و استحکام کششی را کاسته است. آنها نتیجه گرفتند که افزودن نانوصفحات گرافن به طور کلی مدول الاستیک ترکیبات را ۱۳ درصد افزایش داده است. شکریه و همکارانش [۱۷]، به ساخت و مشخصه‌سازی آزمایشی نانوکامپوزیت‌های گرافن/ پلی‌پروپیلن پرداختند. آنها دریافتند که با اضافه کردن ۰/۵ درصد وزنی گرافن به پلی‌پروپیلن، استحکام ضربه ۳۰ درصد افزایش پیدا می‌کند. همچنین بیشترین افزایش خواص ضربه در ۰/۵ درصد وزنی گرافن مشاهده شد و با افزایش بیشتر درصد حجمی نانوذرات گرافن، خواص ضربه افت نموده و در ۲ درصد وزنی گرافن، خواص ضربه نانوکامپوزیت حاصل، از زمینه پلی‌پروپیلن نیز کمتر شد. آشنای قاسمی و همکارانش [۱۸]، به بررسی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های پلی‌پروپیلن/ گرافن/ الیاف شیشه و ای‌پی‌دی‌ام پرداختند. آنها بعد از نمونه‌سازی و انجام تست کشش به این نتیجه رسیدند که افزایش نانوصفحات گرافن در درصدهای وزنی پایین باعث افزایش ۱۷ درصدی استحکام کششی و افزایش ۵ درصدی ازدیاد طول تا شکست شده است، ولی در درصدهای وزنی بالای نانوصفحات گرافن، منجر به افت و کاهش خواص کششی شده‌اند.

نواقص اصلی در هنگام افزودن الیاف طبیعی، از جمله الیاف کناف به یک ماده زمینه پلیمری، عدم وجود چسبندگی میان فاز بی‌دو جزء است که منجر به خواص ضعیف در محصول نهایی می‌شود [۱۹]. علاوه بر این به علت ایجاد پراکندگی و تمایل الیاف به ایجاد پیوند هیدروژنی ترکیب الیاف کناف به عنوان پرکننده در ماده زمینه پلیمری اکثراً با تراکم همراه است [۲۰]. امروزه برای بهبود خواص مکانیکی بسیاری از کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف، از سازگارکننده استفاده می‌شود. پاراشانتا^۱ و همکاران [۲۱]، به بررسی اثر سازگارکننده بر روی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با نانوتیوب‌های کربنی پرداختند. آنها گزارش کردند که افزودن این سازگارکننده به نانوکامپوزیت، باعث افزایش و بهبود استحکام و مدول کششی و خمشی آنها گردیده است. بونس^۲ و همکاران [۲۲]، به بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف بامبو و سازگارکننده پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که افزایش سازگارکننده بین ۲ تا ۴ درصد وزنی باعث بهتر شدن چسبندگی بین الیاف بامبو و زمینه گردیده است و این چسبندگی باعث بهبود در خواص مکانیکی کامپوزیت می‌گردد. لویز و همکاران [۲۳]، در تحقیقی به بررسی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با نانوس و سازگارکننده در زمینه پلی‌پروپیلن پرداختند. آنها برای بهبود در چسبندگی رس و پلی‌پروپیلن از این سازگارکننده استفاده کرده و باعث بهبود در خواص مکانیکی شده‌اند. میرزایی و همکاران [۲۴] در مقاله‌ای به بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت تقویت شده با الیاف کناف و نانو ذرات گرافن در حضور سازگارکننده پرداختند، همچنین در مقاله‌ای دیگر [۲۵]، با تغییر در نوع الیاف کار خود را تکرار کردند.

مطالعه حاضر به بررسی خواص مکانیکی در بایوکامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف طبیعی کناف و نانو ذرات گرافن در زمینه پلی‌پروپیلن با اضافه کردن سازگارکننده می‌پردازد. از روش آماری سطح پاسخ با رویکرد باکس به‌نکن جهت بررسی و ارائه مدل ریاضی برای پیش‌بینی رفتار بایوکامپوزیت با توجه به پارامترهای درصد وزنی الیاف کناف، درصد وزنی نانوگرافن و درصد وزنی سازگارکننده استفاده می‌شود. با توجه به نتایج کارهای گذشته، در این مقاله دقت معادلات رگرسیون با بکارگیری از توابع توانی و حذف عامل‌های کم‌تأثیر در این معادلات بهبود می‌یابد. با افزایش دقت این معادلات، این امکان ایجاد می‌گردد که مقادیر بهینه پارامترها با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری محاسبه گردد. در ادامه جهت بررسی دقیق‌تر رفتار بایوکامپوزیت از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی جهت بررسی مکانیزم‌های آسیب و چگونگی تأثیر هر یک از پارامترها در بهبود رفتار ساختار معرفی شده استفاده می‌شود. در پایان تحلیل و بهینه‌سازی چند هدفه با رویکرد افزایش استحکام و به حداقل رساندن وزن ساختار بایوکامپوزیت انجام می‌شود و چگونگی پراکندگی مقادیر پارامترها در فضای مسئله و جبهه هدف در پاسخ‌ها مشخص می‌گردند. همچنین جایگاه مقدار بهینه بدست آمده از روش تابع مطلوبیت با استفاده از روش آماری، در جبهه پارتو نشان داده می‌شود.

¹ Prashantha

² Bonse

۲. مواد و روش‌ها

۱,۲. مواد

در این کار تحقیقاتی از ماده زمینه پلی‌پروپیلن محصول شرکت پتروشیمی اراک برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی، استفاده شده است. الیاف کناف با قطر ۵۰ میکرون و با دانسیته ۷۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب که به طور کامل از مواد طبیعی تشکیل شده، جهت فاز تقویت کننده استفاده می‌شود. طبق اطلاعات ارائه شده از شرکت سازنده، این الیاف دارای استحکام کششی ۹۳۰-۲۴۰ مگاپاسکال، مدول یانگ ۵۳-۱۴ گیگاپاسکال و ازدیاد طول تا شکست ۱/۶-۲/۹ درصد می‌باشند. سازگار کننده^۱ با نام تجاری پی‌پی‌جی ۲۶۰۶۰ از شرکت آریا پلیمر پیشگام (ایران) تهیه شده است. این سازگار کننده یک ماده پلیمری است که یک شاخه‌ی پلی‌پروپیلن و شاخه دیگر به گرافت کولپینگ با مالئیک انیدرید دارد. مالئیک انیدرید^۲ نیز یک ترکیب شیمیایی است که در فرآیندهای گرافتینگ پلیمری، به منظور افزایش خواص پلیمری مانند چسبندگی، استفاده می‌شود. همانطور که توسط شرکت سازنده گزارش شده است، این سازگار کننده دارای شاخص جریان مذاب ۱۸ گرم در ۱۰ دقیقه است. از پودر گرافن محصول شرکت ایکس-جی ساینس^۴ آمریکا، به عنوان نانو ذرات در این تحقیق استفاده شد. بر اساس برگه اطلاعات فنی محصول، این نانو ذرات، با قطر متوسط کمتر از ۵ میکرون، ضخامت ۲ نانومتر، مساحت سطح ۷۵۰ مترمربع و چگالی ۲۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب شناسایی شده‌اند.

۲,۲. ساخت نمونه‌ها

نمونه‌های کامپوزیتی از روش اختلاط مذاب و به کمک مخلوط‌کن داخلی ساخت شرکت هک آمریکا با سرعت ۶۰ دور بر دقیقه در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد ساخته شدند. بعد از ذوب کردن پلی‌پروپیلن در مخلوط‌کن داخلی، سازگار کننده، به آن اضافه شده و ترکیب، به مدت ۵ دقیقه مخلوط می‌گردد. در ادامه نانو ذرات گرافن به تدریج اضافه می‌شود و با سرعت پایین ۲۰ دور بر دقیقه عمل اختلاط به مدت ۵ دقیقه انجام می‌گیرد، ترکیب در ادامه با سرعت ۶۰ دور بر دقیقه به مدت ۳ دقیقه دیگر مخلوط می‌شود. در مرحله پایانی الیاف کناف به صورت تدریجی با درصد وزنی مشخص شده برای هر نمونه با دور پایین ۲۰ دور بر دقیقه به ترکیب اضافه می‌شود. بعد از اضافه شدن الیاف، ترکیب با دور بالا به مدت ۵ دقیقه با هم مخلوط شدند. مدت زمان اختلاط برای تمامی نمونه‌ها ثابت و برابر ۱۸ دقیقه می‌باشد. با توجه به انتخاب دستگاه مخلوط‌کن داخلی برای پخت و ترکیب مواد و ظرفیت ۶۰ سانتی‌متر مکعبی محفظه مواد این دستگاه، مقادیر اجزای آن‌ها مطابق درصدهای وزنی خود توزین شد. نمونه‌های استاندارد برای آزمون‌های خواص مکانیکی، با استفاده از قالب‌گیری فشاری توسط دستگاه پرس گرم محصول شرکت تویوسکی ساخت کشور ژاپن در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۲/۵ مگاپاسکال تهیه شدند. کار با این دستگاه پرس، طی سه مرحله انجام گرفت. ابتدا مواد به مدت ۱۰ دقیقه پیش‌گرمایش شدند. سپس المنت‌های حرارتی روشن و دما روی ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشار روی ۲/۵ مگاپاسکال تنظیم گردید. پس از گذشت زمان ۲۰ دقیقه المنت‌ها خاموش شدند و جهت جلوگیری از سوختن ماده و تخریب حرارتی، سیستم خنک کننده آبی باز شد و در نهایت نمونه‌ها به دمای محیط رسیدند و از قالب‌ها خارج شدند. در شکل ۱ فرایند ساخت نمونه‌ها به صورت شماتیک نشان داده شده است.

با توجه به مطالعات انجام شده و محدودیت‌های موجود در حداکثر میزان الیاف در نمونه، تصمیم بر آن شد که نانو ذرات گرافن در محدوده درصد وزنی ۰ تا ۱/۵، الیاف کناف در محدوده درصد وزنی ۰ تا ۱۵، و سازگار کننده در محدوده درصد وزنی ۰ تا ۶،

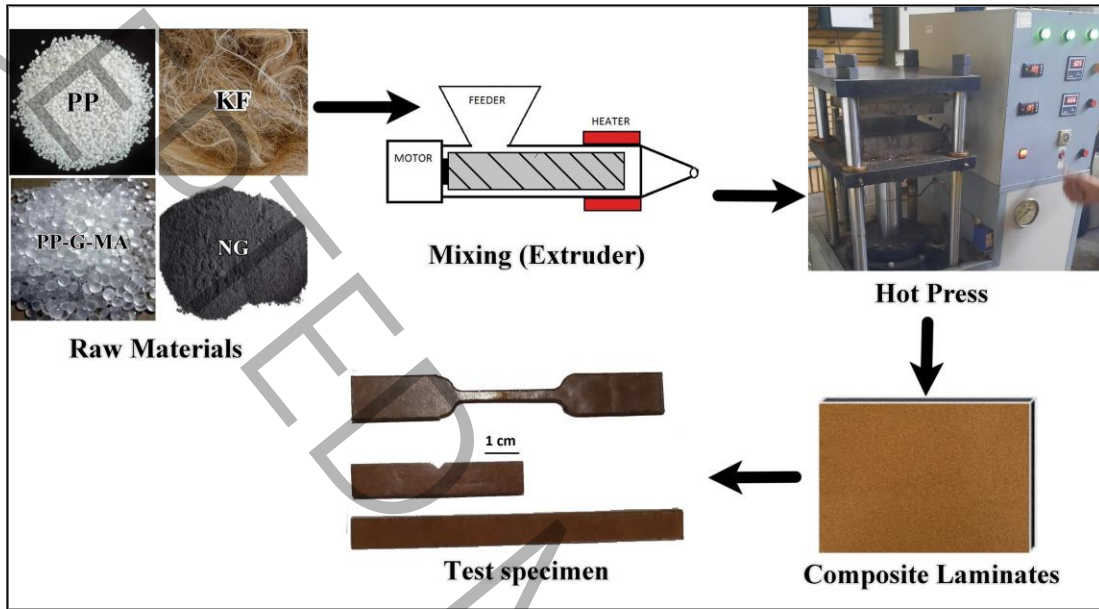
^۱ PP-g-MA

^۲ PPG6060

^۳ MA

^۴ XG Sciences-(xGnP-C750)

به پلی پروپیلن افزوده شوند. از هر نمونه، برای هر آزمون ۳ نمونه استاندارد ساخته شد. پس از مشخص شدن مقدار مواد مورد استفاده، براساس طراحی آزمایش روش سطح پاسخ و طراحی باکس-بهنکن، تعداد ترکیبات مشخص شده و در جدول ۱ نشان داده شده است. در این جدول برای نمونه با مقادیر میانی پارامترها یعنی نمونه با ۰/۷۵ درصد وزنی گرافن، ۷/۵ درصد وزنی الیاف و ۳ درصد وزنی سازگارکننده، مجموعاً ۹ بار تکرار انجام شد که در نمونه‌های شماره ۱۳، ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است. این کار برای تعیین درصد خطا توسط این روش آماری و آنالیز واریانس انجام می‌شود.



شکل ۱. فرایند ساخت نمونه های آزمون
 Figure 1. The process of making test samples

جدول ۱ معرفی نمونه های آزمون و درصد وزنی پارامترها

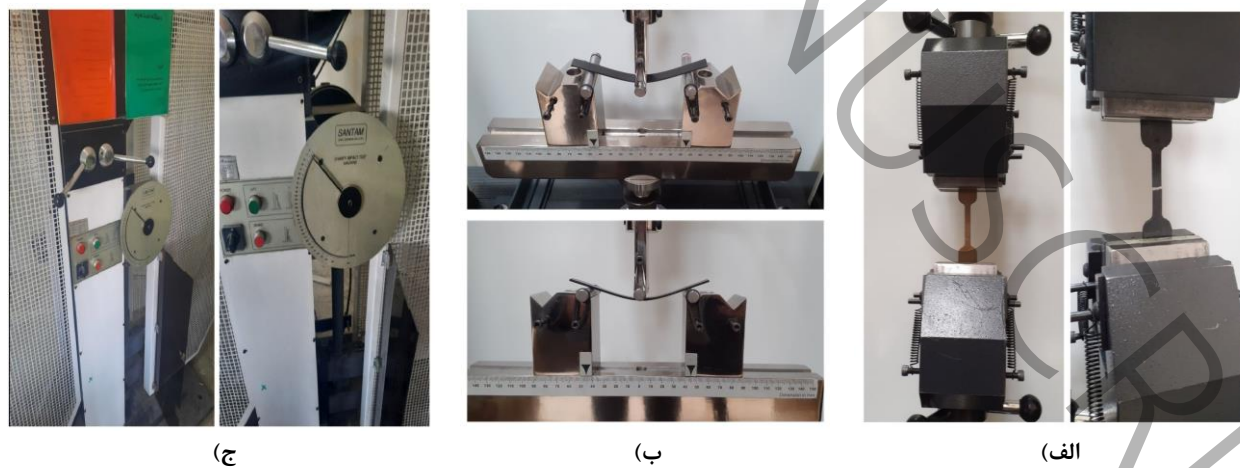
Table 1. Introduction of test samples and weight percentage of parameters

کد نمونه	گرافن (درصد وزنی)	الیاف کناف (درصد وزنی)	سازگارکننده (درصد وزنی)	پلی پروپیلن (درصد وزنی)
۱	۰	۰	۳	۹۷
۲	۱/۵	۰	۳	۹۵/۵
۳	۰	۱۵	۳	۸۲
۴	۱/۵	۱۵	۳	۸۰/۵
۵	۰	۷/۵	۰	۹۲/۵
۶	۱/۵	۷/۵	۰	۹۱
۷	۰	۷/۵	۶	۸۶/۵
۸	۱/۵	۷/۵	۶	۸۵
۹	۰/۷۵	۰	۰	۹۹/۲۵
۱۰	۰/۷۵	۱۵	۰	۸۴/۲۵
۱۱	۰/۷۵	۰	۶	۹۳/۲۵
۱۲	۰/۷۵	۱۵	۶	۷۸/۲۵
۱۳	۰/۷۵	۷/۵	۳	۸۸/۷۵
۱۴	۰/۷۵	۷/۵	۳	۸۸/۷۵
۱۵	۰/۷۵	۷/۵	۳	۸۸/۷۵

۳. آزمون های تجربی

۱,۳. آزمون کشش

آزمایش کشش برای اندازه گیری استحکام کششی و مدول الاستیک انجام شد. برای خواص کششی، نمونه های دمبلی شکل طبق استاندارد ASTM D638 ساخته شدند. همانطور که در شکل ۲-الف مشاهده می شود، تست کشش از طریق دستگاه تست کشش و فشار شرکت سنتام (ایران) با سرعت پیشروی فک ۱/۳ میلی متر در دقیقه در دمای اتاق انجام شد.



شکل ۲. تصویر نمونه ها تحت آزمون الف) کشش، ب) خمش و ج) ضربه
figure 2. The image of the samples under a) tensile, b) bending and c) impact tests

۲,۳. آزمون خمشی

آزمایش خمشی (خمشی سه نقطه) مطابق با شکل ۲-ب، با استفاده از دستگاه سنتام با ظرفیت ۱۵ تن مطابق با استاندارد ASTM D790، برای اندازه‌گیری مقاومت خمشی نمونه‌ها انجام شد. این آزمایش بر روی نمونه‌های مکعبی مستطیلی با ابعاد ۱۲۵×۱۲×۵ میلی‌متر و طول ۵۰ میلی‌متر تحت سرعت بارگذاری ۱/۳ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. از این رو، استحکام خمشی (σ_f)، نمونه‌ها با معادله (۱) محاسبه شد.

$$\sigma_f = \frac{3fl}{2bh^2} \quad (1)$$

در این معادله، b عرض نمونه، h ضخامت نمونه، l طولی است که به عنوان طول موثر مورد آزمایش در نظر گرفته می‌شود، و f نشان دهنده نیرویی است که توسط ماشین آزمایش اعمال می‌شود.

۳,۳. آزمون ضربه

همانطور که در شکل ۲-ج مشاهده می‌شود، تست ضربه ایزود برای بررسی استحکام ضربه نمونه‌ها و مقاومت آنها در برابر شکست انجام شد. برای خواص ضربه، نمونه‌های مکعب مستطیلی با بریدگی در وسط آن بر اساس استاندارد ASTM D256 ساخته شد. آزمایش ضربه در دمای اتاق از طریق دستگاه تست کیست^۱ انجام شد. میزان انرژی جذب شده در نمونه‌های شکست از اختلاف ارتفاع ثانویه و اولیه برآورد شده از طریق معادله (۲) محاسبه می‌شود.

$$E_a = Mg(h_1 - h_2) \quad (2)$$

در این معادله E انرژی جذب شده، M جرم نمونه، g شتاب گرانش، و h_1 و h_2 به ترتیب نشان دهنده ارتفاع اولیه و ثانویه آونگ می‌باشد. پس از آنکه نمونه‌های تهیه شده مورد آزمون مکانیکی ضربه قرار گرفتند، در ادامه نتایج بدست آمده به کمک روش رویه پاسخ تحلیل و مقایسه می‌شوند.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

پس از انجام کلیه آزمون‌ها میانگین نتایج برای چهار پاسخ استحکام کششی، مدول الاستیک، استحکام ضربه و استحکام خمشی در جدول ۲ نشان داده شده است. در ادامه با توجه به نتایج آزمون‌های تجربی، به کمک روش آماری، تحلیل و بررسی پارامترها و تاثیر آنها بر استحکام‌های کششی، خمشی و ضربه پرداخته می‌شود.

جدول ۲. نتایج آزمون‌های مختلف به همراه مقادیر خطا

Table 2. Results of different tests along with error values

کد نمونه	استحکام کششی (MPa)	مدول الاستیک (GPa)	استحکام ضربه (J/m)	استحکام خمشی (MPa)
۱	۰/۹۵±۲۱/۸	۰/۱±۰/۵	۱/۷۳±۷۵	۰/۸۳±۴۳/۴۷
۲	۱/۲۶±۲۰/۰	۰/۴۳±۲/۳	۰/۷۳±۸۳	۱/۳۲±۴۶/۱۵
۳	۱/۶±۲۷/۴	۰/۲۶±۲/۵	۱/۴±۸۵	۱/۰۶±۵۰/۸۹
۴	۱/۶۶±۲۹/۸	۰/۵۲±۳/۴	۰/۷۵±۹۳	۱/۲۳±۵۲/۳۳
۵	۱/۳۵±۲۳/۴	۰/۰۸±۰/۹	۰/۹۱±۷۷	۰/۸۷±۴۳/۲۰
۶	۱/۳۲±۲۴/۵	۰/۴۵±۲/۱	۱/۳۱±۸۴	۱/۳۲±۴۷
۷	۱/۰۵±۲۵/۸	۰/۴۳±۲/۴	۱/۷۴±۸۱	۰/۶۵±۵۰/۴۱

¹ Ceast

۰/۹۵±۴۹	۱/۲۴±۸۹	۰/۵۲±۳/۵	۰/۹۶±۳۱/۱	۸
۱/۲۱±۴۶/۰۸	۱/۴۱±۸۴	۰/۱±۰/۸	۱/۱۵±۲۳/۴۸	۹
۰/۹۱±۵۲	۰/۸۸±۹۵	۰/۴۵±۲/۵	۱/۷۳±۲۷/۹	۱۰
۰/۸۸±۵۰/۲	۱/۳۷±۹۰	۰/۴۳±۲/۳	۱/۴۴±۲۶/۲	۱۱
۱/۰۲±۵۷/۶۳	۱/۱۵±۱۰۰	۰/۴۵±۳/۸	۰/۸۷±۳۲	۱۲
۰/۹۸±۵۳	۰/۹۱±۹۲	۰/۴۵±۲/۲	۱/۱۱±۲۹	۱۳
۰/۹۱±۵۰	۱/۰۴±۹۶	۰/۳۴±۲/۵	۱/۰۴±۳۰	۱۴
۰/۷۵±۵۲/۸	۱/۲۴±۸۹	۰/۵۵±۲/۰	۰/۵۱±۲۸/۲	۱۵

۱.۴. بررسی استحکام کششی

پس از آنکه نمونه‌های تهیه شده مورد آزمون مکانیکی کشش قرار گرفتند، نتایج بدست آمده به کمک روش روبه پاسخ تحلیل و مقایسه شدند. در جدول ۳ نتایج آنالیز واریانس مربوط به پاسخ استحکام کششی مشاهده می‌شود. مقادیر مربوط به ستون P برای پارامترهای مستقل، مربعات پارامترها، و اثرات متقابل بین پارامتر درصد نانوذرات و سازگارکننده (گرافن * سازگارکننده) کمتر از ۰/۰۵ است و این بدین معنی است که تاثیر این عوامل با اطمینان ۹۵% بر روی استحکام کششی معنی‌دار می‌باشد، بنابراین معادله‌ی رگرسیون برای استحکام کششی به صورت معادله (۳) است:

$$\begin{aligned}
 (TensileStrength)^{1.4} = & 64.59141 + 34.64763 \times Geraphen + 3.30499 \times KenafFiber \\
 & + 3.67792 \times PPgMA + 2.53564 \times Geraphen \times PPgMA - 20.70220 \times Geraphen^2 \\
 & - 0.095725 \times KenafFiber^2 - 0.352629 \times PPgMA^2
 \end{aligned} \quad (3)$$

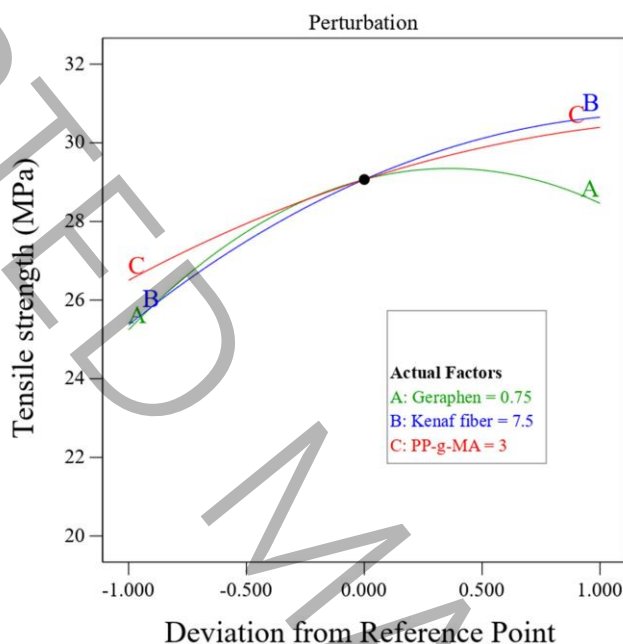
جدول ۳. نتایج مربوط به آنالیز واریانس استحکام کششی

Table 3. Results of variance analysis of tensile strength

پارامترها	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقادیر فاکتور F	مقادیر فاکتور P
نانو ذرات گرافن- A	۵۴۶/۶۱	۲	۵۴۶/۶۱	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۴
الیاف کناف- B	۱۵۷۲/۱۱	۱	۱۵۷۲/۱۱	۱۱۲/۴۹	< ۰/۰۰۰۱
سازگارکننده- C ($PP-g-MA$)	۸۶۳/۸۹	۱	۸۶۳/۸۹	۶۱/۸۲	۰/۰۰۰۱
AC	۱۳۰/۲۰	۱	۱۳۰/۲۰	۹/۳۲	۰/۰۱۸۵
A^2	۵۰۰/۷	۱	۵۰۰/۷	۳۵/۸۳	۰/۰۰۰۶
B^2	۱۰۷/۰۵	۱	۱۰۷/۰۵	۷/۶۶	۰/۰۲۷۸
C^2	۳۷/۱۹	۱	۳۷/۱۹	۲/۶۶	۰/۱۴۶۸
$Predicted R^2$	۰/۸۹۵۹		$Adjusted R^2$	۰/۹۴۸۸	R^2
					۰/۹۷۴۴

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود حضور الیاف کناف، استحکام کششی را افزایش داده است که علت این است که الیاف چسبندگی خیلی خوب با زمینه دارند و موقع اعمال بار کششی، تمایل به خارج شدن از زمینه پلیمری نشان نمی‌دهد. همچنین الیاف کناف با ساختار شیمیایی $(C_6-H_{10}-O_5)_n$ در ساختار سه بعدی خود وجود تعداد زیادی گروه‌های عاملی هیدروکسیل را نشان می‌دهد. نتایج مطالعات قبلی نشان داده است که این گروه عاملی در شرایط مناسب به راحتی با گروه عاملی کربونیل موجود در سازگارکننده واکنش می‌دهد و تولید پیوند اتری می‌کند که باعث تقویت پیوند کامپوزیت سلولز-مالیک اسید می‌گردد. حضور نانو ذرات تا ۰/۷۵ درصد وزنی باعث افزایش استحکام کششی شده است که علت آن بهبود چسبندگی الیاف به زمینه در این

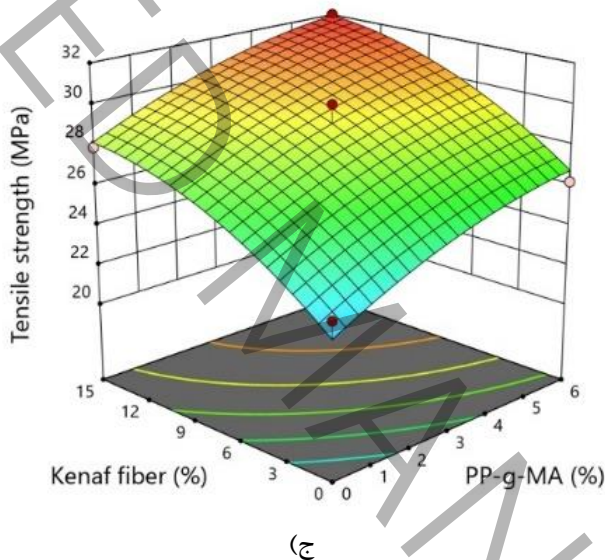
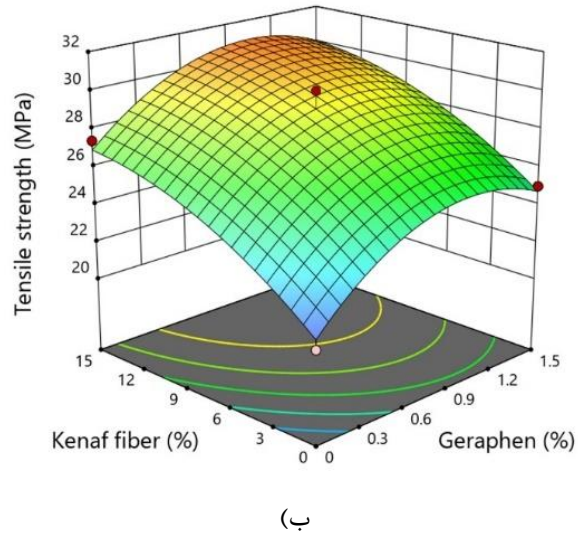
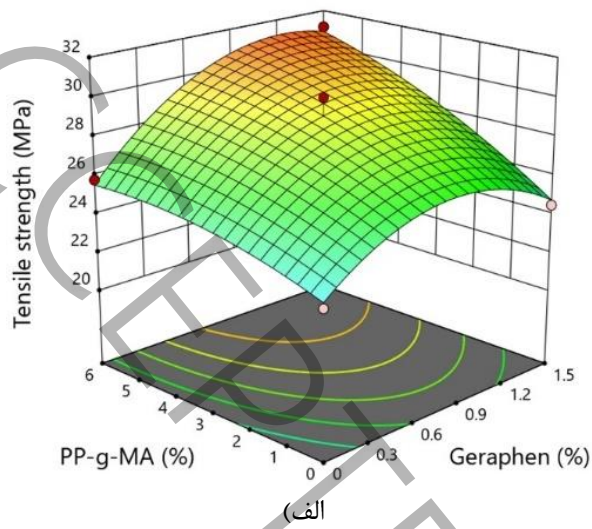
نمونه‌ها می‌باشد. در درصد‌های بالاتر گرافن، کاهش استحکام کششی مشاهده می‌شود؛ که علت آن می‌تواند کلوخه شدن نانوذرات در ترکیبات باشد که این کلوخه شدن نانوذرات باعث کاهش اثر آن‌ها در خواص کشش شده است. همچنین همانطور که در شکل مشاهده می‌شود افزودن سازگار کننده به ترکیبات باعث افزایش استحکام کششی شده است. حضور این سازگار کننده در ترکیبات باعث افزایش چسبندگی بین الیاف زمینه شده است که همین امر بیرون کشیده شدن الیاف از زمینه را مشکل‌تر کرده است. همچنین سازگار کننده در پراکندگی و پخش شدن مناسب نانوگرافن در زمینه نقش مهمی داشته و از کلوخه شدن نانوذرات جلوگیری کرده و باعث افزایش استحکام کششی می‌شود. این نتایج در مطالعات سایر محققین نیز مشاهده شده است [۲۶].



شکل ۳. نمودار پرتurbation برای پاسخ استحکام کششی

Figure 3. Perturbation plot for tensile strength response

شکل ۴ رویه‌های پاسخ مربوط به استحکام کششی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در رویه (الف) مشاهده می‌شود که با ثابت ماندن درصد وزنی الیاف کناف، افزایش درصد وزنی سازگار کننده باعث افزایش استحکام کششی و افزودن نانو ذرات تا ۰/۷۵ درصد وزنی، باعث افزایش و افزودن آن در درصد‌های وزنی بالاتر باعث کاهش استحکام کششی شده است. همچنین در رویه (ب) مشاهده می‌شود، با ثابت ماندن درصد وزنی سازگار کننده، افزایش درصد وزنی الیاف کناف باعث افزایش استحکام کششی و افزودن نانو ذرات گرافن تا ۰/۷۵ درصد وزنی، باعث افزایش و افزودن آن در درصد‌های وزنی بالاتر باعث کاهش استحکام کششی شده است، که این رفتار نانو ذرات توسط سایر محققین نیز گزارش شده است [۲۷]. در رویه (ج) مشاهده می‌شود با ثابت ماندن درصد وزنی گرافن، افزایش درصد وزنی الیاف کناف و سازگار کننده باعث افزایش استحکام کششی شده است [۲۸].



شکل ۴. رویه پاسخ استحکام کششی در حالت‌های، الف) الیاف کناف ثابت، ب) سازگارکننده ثابت، و ج) نانو ذرات گرافن ثابت.

Figure 4. Tensile strength response surface in the states of, a) fixed knaf fibers, b) fixed compatibilizer, and c) fixed graphene nanoparticles.

۲,۴. بررسی مدول الاستیک

نتایج بدست آمده از تحلیل رگرسیونی برای پاسخ مدول الاستیک در جدول ۴ نشان می‌دهد، توان‌های دوم تاثیر پارامترهای الیاف کناف، نانو ذره گرافن و سازگارکننده به علت دارا بودن مقدار ضریب P بالاتر از 0.05 حذف شده‌اند و مدلی خطی را بوجود آورده است. مقادیر مربوط R^2 و R_{Adj}^2 به ترتیب 0.9823 و 0.9752 بدست آمده که نشان از قابلیت مدل خروجی برای پیش بینی رفتار پاسخ بوده است. همچنین در اینجا به منظور بالا بردن دقت مدل خروجی، پاسخ به توان $1/1$ رسیده است. رابطه نهایی به صورت رابطه (۴) حاصل شده است.

$$(ElasticModulus)^{1.1} = -0.274792 + 1.28596 \times Geraphen + 0.154630 \times KenafFiber + 0.281444 \times PPgMA - 0.041357 \times Geraphen \times KenafFiber \quad (4)$$

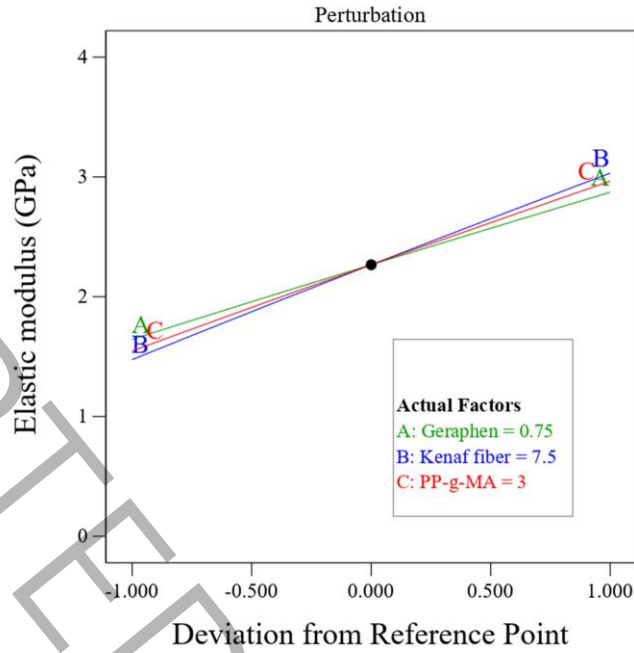
جدول ۴. نتایج مربوط به آنالیز واریانس مدول الاستیک

Table 4. The results related to the analysis of variance of the elastic modulus

پارامترها	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقادیر فاکتور <i>F</i>	مقادیر فاکتور <i>P</i>
نانو ذرات گرافن-A	۴/۲۸	۱	۴/۲۸	۱۳۸/۹۲	< ۰/۰۰۰۱
الیاف کناف-B	۶/۸۸	۱	۶/۸۸	۲۲۲/۹۳	< ۰/۰۰۰۱
سازگار کننده-C (PP-g-MA)	۵/۷۰	۱	۵/۷۰	۱۸۴/۹۱	< ۰/۰۰۰۱
AB	۰/۲۱۶۵	۱	۰/۲۱۶۵	۷/۰۲	۰/۰۲۴۳
Predicted R²	۰/۹۶۶۲	Adjusted R²	۰/۹۷۵۲	R²	۰/۹۸۲۳

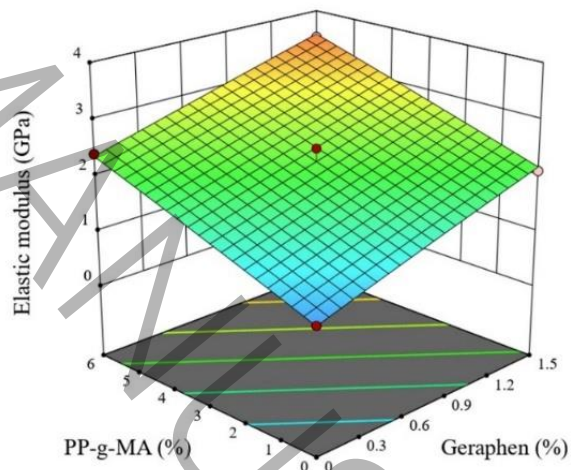
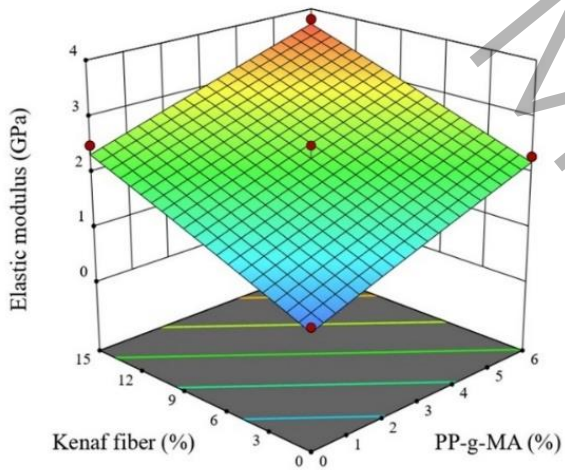
همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، افزایش الیاف کناف باعث افزایش مدول الاستیک نانو کامپوزیت‌ها شده است. مهم‌ترین علت این امر را می‌توان مدول بسیار بالای الیاف و تاثیر انتقال بار از زمینه نرم پلیمری به الیاف سفت‌تر ذکر کرد. افزودن نانوذرات گرافن، باعث افزایش مدول الاستیک شده است که علت آن را می‌توان در نقش نانوذرات در چسبندگی بین الیاف و زمینه جستجو کرد. 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 [۲۶]. همچنین افزودن سازگار کننده به ترکیبات باعث افزایش استحکام کششی شده است. حضور سازگار کننده در ترکیبات باعث افزایش چسبندگی بین الیاف زمینه شده است که همین امر بیرون کشیده شدن الیاف از زمینه را مشکل‌تر کرده است. همچنین حضور سازگار کننده در پراکندگی و پخش شدن مناسب نانوغرافن در زمینه نقش مهمی داشته و از کلوخه شدن نانوذرات جلوگیری کرده و باعث افزایش خواص کششی از جمله مدول الاستیک شده است، این رفتار سازگار کننده در مطالعات سایر محققین نیز گزارش شده است [۲۹].

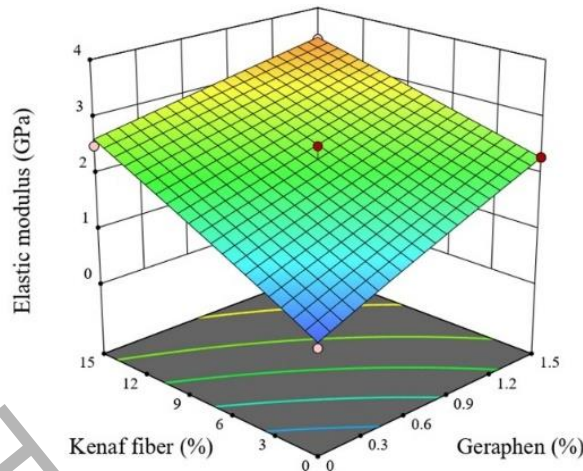
شکل ۶ رویه‌های پاسخ مربوط به مدول الاستیک را نشان می‌دهد. همان‌طور که در رویه (الف) مشاهده می‌شود با ثابت ماندن درصد وزنی گرافن، افزایش درصد وزنی الیاف کناف و سازگار کننده باعث افزایش مدول الاستیک شده است. همچنین در رویه (ب) مشاهده می‌شود که با ثابت ماندن درصد وزنی الیاف کناف، افزایش درصد وزنی سازگار کننده و نانو ذرات گرافن، باعث افزایش مدول الاستیک شده است. همان‌طور که در رویه (پ) نیز مشاهده می‌شود، با ثابت ماندن درصد وزنی سازگار کننده، افزایش درصد وزنی الیاف کناف و نانو ذرات، باعث افزایش مدول الاستیک می‌گردد.



شکل ۵. تاثیر الیاف کناف، نانو ذرات گرافن و سازگارکننده بر مدول الاستیک

Figure 5. Effect of knaf fibers, graphene nanoparticles and compatibilizer on elastic modulus





(ج)

شکل ۶. رویه پاسخ مدول الاستیک در حالت‌های الف) نانو ذرات گرافن ثابت، ب) الیاف کناف ثابت و ج) سازگار کننده ثابت.

Figure 6. Response surface of elastic modulus in the states of a) fixed graphene nanoparticles, b) fixed Knaf fibers and c) fixed compatibilizer.

۳،۴. بررسی استحکام ضربه

نتایج بدست آمده از تحلیل رگرسیونی برای پاسخ انرژی ضربه‌ای مطابق جدول ۵، نشان می‌دهد، توان دوم تاثیر نانو ذرات گرافن و سازگار کننده، مدلی مرتبه دوم را بوجود آورده است. مقادیر مربوط به R^2 و R_{Adj}^2 به ترتیب ۰/۹۸۰۷ و ۰/۹۷ بدست آمده که نشان از قابلیت مدل خروجی برای پیش بینی رفتار پاسخ بوده است. در اینجا با توجه به شرط مقدار ضریب P کمتر از ۰/۰۵ برای معنادار بودن پارامترها، ملاحظه شده که در این رابطه، ترم مرتبه دوم درصد الیاف کناف و همچنین برهمکنش دوتایی بین پارامترها در کامپوزیت حذف شده است. همچنین در اینجا به منظور بالا بردن دقت مدل خروجی، پاسخ به توان ۰/۲۷- رسیده است. رابطه نهایی به صورت رابطه (۵) حاصل شده است.

$$(ImpactStrength)^{-0.27} = 0.314849 - 0.030092 \times Geraphen - 0.000629 \times KenafFiber - 0.001927 \times PPgMA + 0.016673 \times Geraphen^2 + 0.000193 \times PPgMA^2 \quad (5)$$

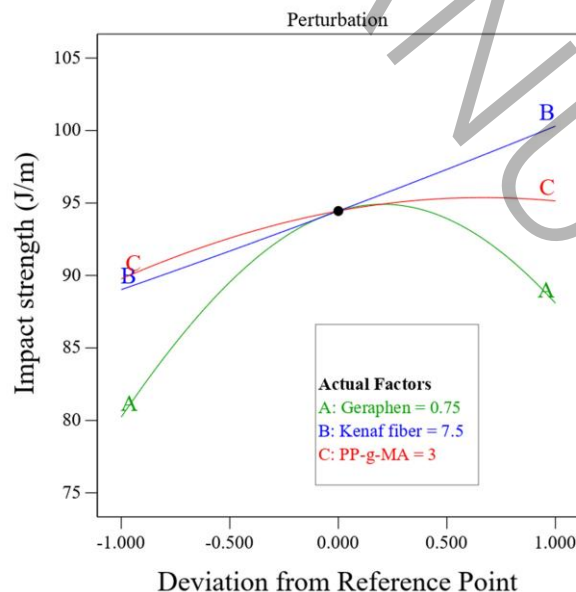
جدول ۵ نتایج مربوط به آنالیز واریانس استحکام ضربه

Table 5 results related to analysis of variance of impact strength

پارامترها	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقادیر فاکتور F	مقادیر فاکتور P
نانو ذرات گرافن-A	۰/۰۰۰۱	۱	۰/۰۰۰۱	۹۷/۵۷	< ۰/۰۰۰۱
الیاف کناف-B	۰/۰۰۰۲	۱	۰/۰۰۰۲	۱۲۱/۸۱	< ۰/۰۰۰۱
سازگار کننده- $PP-g-MA$ C	۰/۰۰۰۰	۱	۰/۰۰۰۰	۲۹/۲۴	۰/۰۰۰۴
A^2	۰/۰۰۰۳	۱	۰/۰۰۰۳	۲۲۳/۶	< ۰/۰۰۰۱
C^2	۰/۰۰۰۰	۱	۰/۰۰۰۰	۷/۶۵	۰/۰۲۱۹
Predicted R^2	۰/۹۶۱۳	Adjusted R^2	۰/۹۷۰۰	R^2	۰/۹۸۰۷

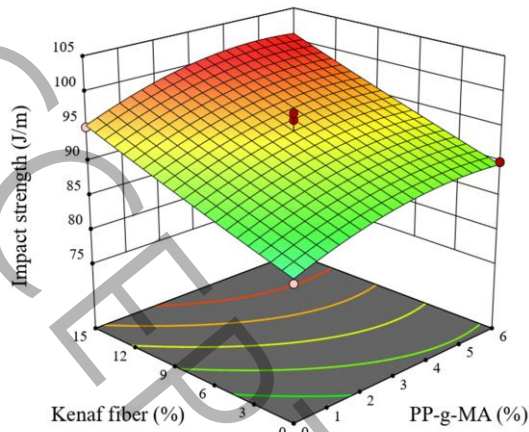
نتایج استحکام ضربه در نمودار شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود افزودن الیاف کناف به زمینه پلیمری باعث افزایش استحکام ضربه شده است. تاثیر حضور الیاف کناف در اتلاف انرژی رشد ترک در نمونه‌های شیاردار آزمون شارپی باعث افزایش استحکام ضربه می‌شود. همچنین فیبر سلولز (کناف) با ساختار شیمیایی $(C_6-H_{10}-O_5)_n$ در ساختار سه بعدی خود وجود تعداد زیادی گروه‌های عاملی هیدروکسیل را نشان می‌دهد. نتایج مطالعات قبلی نشان داده است که این گروه عاملی در شرایط مناسب به راحتی با گروه عاملی کربونیل موجود در MA واکنش می‌دهد و تولید پیوند اتری میکند که باعث تقویت پیوند کامپوزیت سلولز-مالیک اسید می‌گردد. همچنین افزودن گرافن به ترکیب، استحکام ضربه را افزایش داده و نمونه‌ها را چقرمه‌تر کرده است. همانطور که مشاهده می‌شود، حضور تنها 0.75% درصد وزنی نانو ذرات گرافن در ترکیب نمونه‌ها افزایش استحکام ضربه را به همراه داشته که علت آن بهبود اتصال زمینه و الیاف می‌باشد. به علاوه حضور نانو ذرات توسط مکانیزم‌های مختلفی چون ایجاد حفره، پل زدن و انحراف مسیر ترک، می‌تواند مانعی بر رشد ترک باشد و با جذب انرژی بالاتر سبب افزایش انرژی شکست شود. اما در نمونه‌های با $1/5\%$ درصد وزنی نانو ذرات گرافن استحکام ضربه، نسبت به 0.75% درصد وزنی گرافن، کاهش پیدا کرده است. در واقع در نمونه‌های با مقادیر بالای نانوذرات، شاهد تشکیل کلوخه‌هایی هستیم که می‌توانند سبب تمرکز تنش شده و مناطقی برای شروع رشد ترک ایجاد کند و در نهایت منجر به تردتر شدن ماده گردد [۳۰]. همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، افزودن 5% درصد وزنی سازگارکننده منجر به تشکیل پیوندهای مناسب و افزایش چسبندگی بین الیاف و نانو ذرات با پلیمر زمینه شده است که در نهایت باعث افزایش استحکام در برابر ضربه کامپوزیت می‌شود. اما در درصد وزنی بالاتر، به دلیل ماهیت شکننده انیدرید مالیک، باعث شکننده شدن ترکیبات و کاهش مقاومت در برابر ضربه می‌شوند. این نتایج توسط سایر محققین نیز گزارش شده است [۳۱].

شکل ۸ رویه‌های پاسخ مربوط به استحکام ضربه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در رویه (الف) مشاهده می‌شود با ثابت ماندن درصد وزنی گرافن، افزایش درصد وزنی الیاف کناف و افزایش سازگارکننده تا 5% درصد وزنی باعث افزایش استحکام ضربه می‌شود. همچنین در رویه (ب) مشاهده می‌شود که با ثابت ماندن درصد وزنی الیاف کناف، افزودن گرافن تا 0.75% درصد وزنی و افزودن سازگارکننده تا 5% درصد وزنی باعث افزایش استحکام ضربه و افزودن آنها در درصدهای وزنی بالاتر باعث کاهش استحکام ضربه شده است [۳۲]. همان‌طور که در رویه (پ) مشاهده می‌شود، با ثابت ماندن سازگارکننده، افزایش درصد وزنی الیاف کناف باعث افزایش استحکام ضربه می‌گردد. همچنین افزودن درصد وزنی گرافن، استحکام ضربه را در ابتدا افزایش و سپس کاهش داده است.

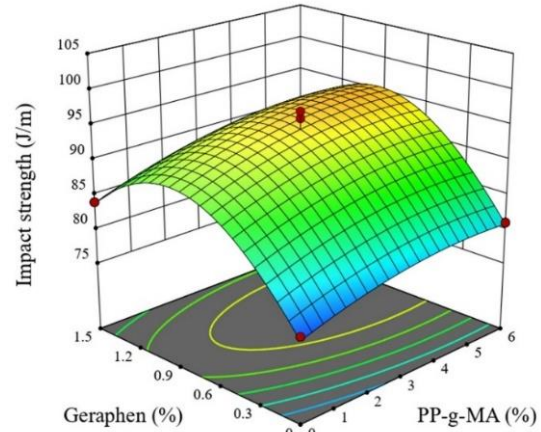


شکل ۷. تاثیر الیاف کناف، نانو ذرات گرافن و سازگارکننده بر استحکام ضربه

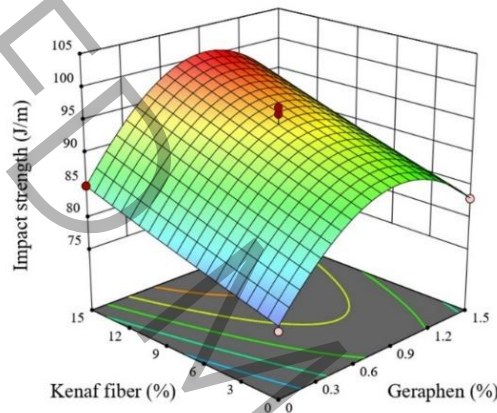
Figure 7. Effect of Kenaf fibers, graphene nanoparticles and compatibilizer on impact strength



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۸. رویه پاسخ استحکام ضربه در حالت‌های الف) نانو ذرات گرافن ثابت، ب) الیاف کناف ثابت و ج) سازگارکننده ثابت.

Figure 8. Effect of Kenaf fibers, graphene nanoparticles and compatibilizer on impact strength.

۴.۴. بررسی استحکام خمشی

در جدول ۶ نتایج آنالیز واریانس مربوط به پاسخ استحکام خمشی مشاهده می‌شود. از آنجایی که مقادیر مربوط به ستون P برای عوامل مستقل، مربعات (گرافن*گرافن)، (سازگارکننده * سازگارکننده) کمتر از ۰/۰۵ است و این بدین معنی است که تاثیر این عوامل با اطمینان ۹۵٪ بر روی استحکام خمشی معنی‌دار می‌باشد. برهمکنش بین پارامترهای سازگارکننده و نانو ذرات گرافن در استحکام خمشی مشاهده شد. در راستای نرمال شدن نتایج و بردن دقت مدل خروجی، پاسخ توانی مورد استفاده قرار گرفت. بنابراین معادله‌ی رگرسیون برای استحکام خمشی به صورت معادله (۶) معرفی می‌گردد.

$$\begin{aligned} (FlexuralStrength)^{-0.2} = & 0.477234 - 0.025047 \times Geraphen - 0.000828 \times KenafFiber \\ & - 0.003202 \times PPgMA + 0.001163 \times Geraphen \times PPgMA + 0.012882 \times Geraphen^2 \\ & + 0.000143 \times PPgMA^2 \end{aligned} \quad (6)$$

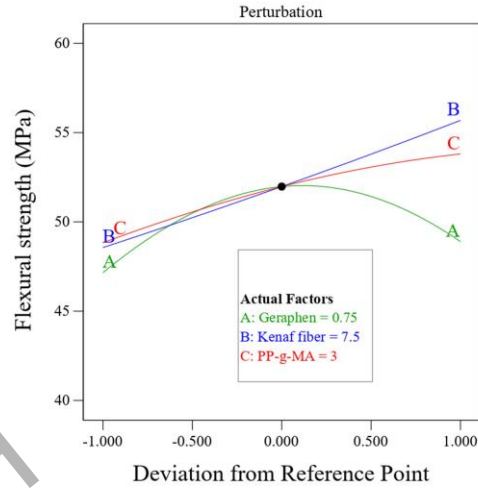
جدول ۶. نتایج مربوط به آنالیز واریانس استحکام خمشی

Table 6. Results related to analysis of variance of flexural strength

پارامترها	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقادیر فاکتور F	مقادیر فاکتور P	تاثیرگذار
نانو ذرات گرافن-A	۰/۰۰۰۰	۱	۰/۰۰۰۰	۸/۰۰	۰/۰۲۲۲	تاثیرگذار
الیاف کناف-B	۰/۰۰۰۳	۱	۰/۰۰۰۳	۱۰۹/۸۷	< ۰/۰۰۰۱	تاثیرگذار
سازگارکننده-C (PP-g-MA)	۰/۰۰۰۲	۱	۰/۰۰۰۲	۵۵/۴۴	< ۰/۰۰۰۱	تاثیرگذار
AC	۰/۰۰۰۰	۱	۰/۰۰۰۰	۹/۷۷	۰/۰۱۴۱	تاثیرگذار
A ²	۰/۰۰۰۲	۱	۰/۰۰۰۲	۶۹/۴۸	< ۰/۰۰۰۱	تاثیرگذار
C ²	۰/۰۰۰۰	۱	۰/۰۰۰۰	۲/۲۰	۰/۱۷۶۴	تاثیر ناچیز
Predicted R²	۰/۹۳۲۲	Adjusted R²	۰/۹۴۶۴	R²	۰/۹۶۹۴	

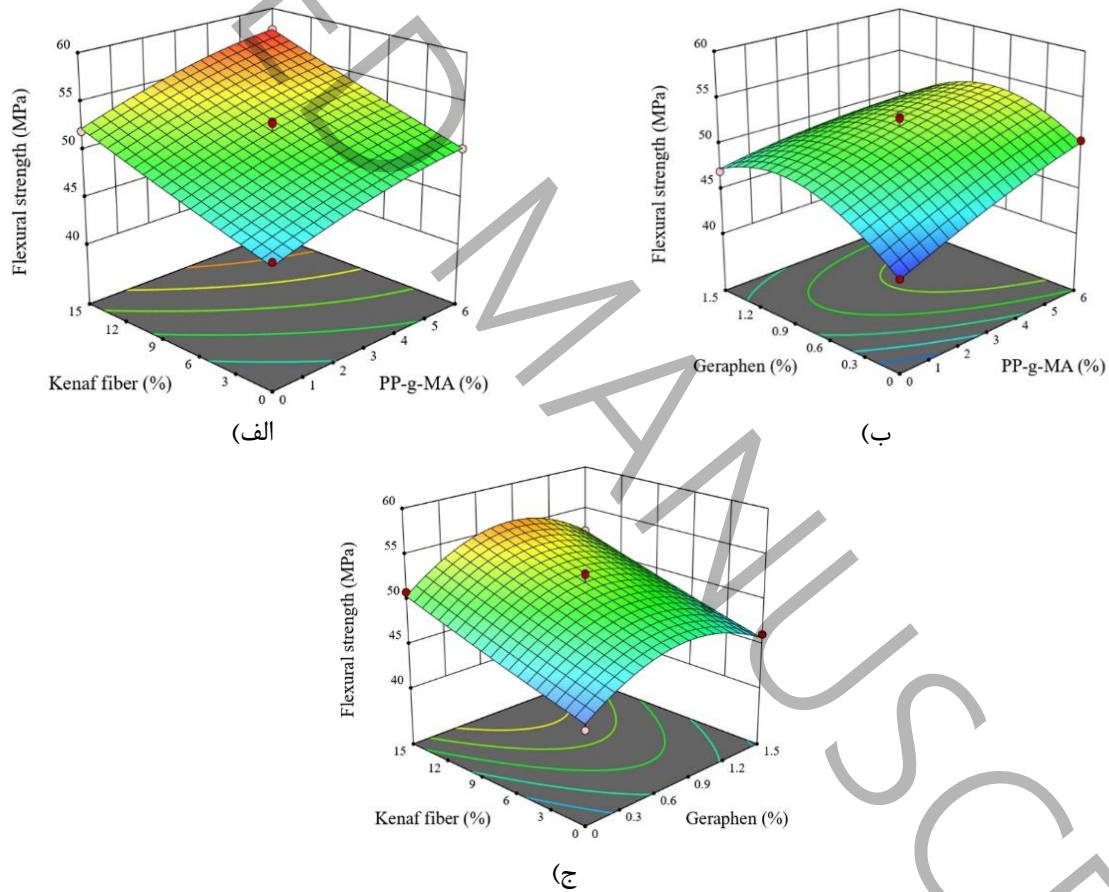
نتایج استحکام خمشی در نمودارهای شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود افزودن الیاف کناف به زمینه پلیمری باعث افزایش استحکام خمشی شده است. تاثیر حضور الیاف کناف در اتلاف انرژی رشد ترک در نمونه‌های آزمون خمشی باعث افزایش استحکام خمشی می‌شود. افزودن گرافن به ترکیب، استحکام خمشی را افزایش داده است. همانطور که در نمودارها مشاهده می‌شود، حضور تنها ۰/۷۵ درصد وزنی نانو ذرات گرافن در ترکیب نمونه‌ها افزایش استحکام خمشی را به همراه داشته که علت آن بهبود اتصال زمینه و الیاف می‌باشد. به علاوه حضور نانو ذرات توسط مکانیزم‌های مختلفی چون ایجاد حفره، پل زدن و انحراف مسیر ترک، می‌تواند مانعی بر رشد ترک باشد و با جذب انرژی بالاتر سبب افزایش انرژی شکست شود. اما در نمونه‌های با ۱/۵ درصد وزنی نانو ذرات گرافن استحکام خمشی، نسبت به ۰/۷۵ درصد وزنی گرافن، کاهش پیدا کرده است. در واقع در نمونه‌های با مقادیر بالای نانوذرات، شاهد تشکیل کلوخه‌هایی هستیم که می‌توانند سبب تمرکز تنش شده و مناطقی برای شروع رشد ترک ایجاد کند و در نهایت منجر به تردتر شدن ماده گردد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، افزودن ۵ درصد وزنی سازگارکننده منجر به تشکیل پیوندهای مناسب و افزایش چسبندگی بین الیاف و نانو ذرات با پلیمر زمینه شده است که در نهایت باعث افزایش استحکام خمشی ترکیبات می‌شود. اما در درصد وزنی بالاتر، به دلیل ماهیت شکننده انیدرید مالیک، باعث شکننده شدن ترکیبات و کاهش استحکام خمشی می‌شوند. این نتایج توسط سایر محققین نیز گزارش شده است [۳۱].

شکل ۱۰ رویه‌های پاسخ مربوط به استحکام خمشی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در رویه (الف) مشاهده می‌شود با ثابت ماندن درصد وزنی گرافن، افزایش درصد وزنی الیاف کناف و افزایش سازگارکننده تا ۵ درصد وزنی باعث افزایش استحکام خمشی شده است. همچنین در رویه (ب) مشاهده می‌شود که با ثابت ماندن درصد وزنی الیاف کناف، افزایش ۵ درصد وزنی سازگارکننده باعث افزایش استحکام خمشی و افزودن گرافن تا ۰/۷۵ درصد وزنی گرافن باعث افزایش و افزودن آنها در درصدهای وزنی بالاتر باعث کاهش استحکام خمشی شده است [۳۳]. همان‌طور که در رویه (پ) مشاهده می‌شود، با ثابت ماندن درصد وزنی سازگارکننده، افزایش درصد وزنی الیاف کناف باعث افزایش استحکام خمشی شده است. همچنین افزودن درصد وزنی گرافن، استحکام خمشی را در ابتدا افزایش و سپس کاهش داده است، که در مرجع [۳۴]، نیز رفتار مشابهی از نانو ذرات را گزارش کرده اند.



شکل ۹. تاثیر الیاف کناف، نانو ذرات گرافن و سازگار کننده بر استحکام خمشی

Figure 9. Effect of knaf fibers, graphene nanoparticles and compatibilizer on flexural strength

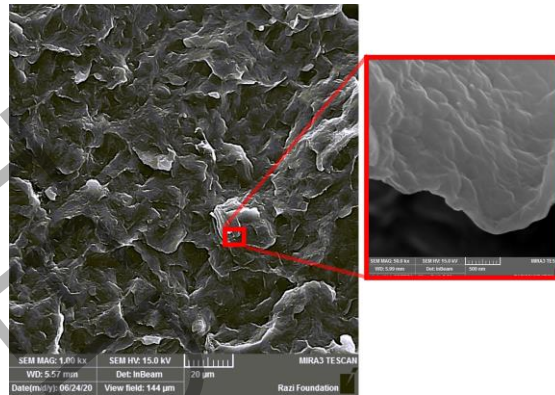


شکل ۱۰ رویه پاسخ استحکام خمشی در حالت‌های الف) نانو ذرات گرافن ثابت، ب) الیاف کناف ثابت و ج) سازگار کننده ثابت.

Figure 10. The response surface of flexural strength in the states of a) fixed graphene nanoparticles, b) fixed knaf fibers and c) fixed compatibilizer.

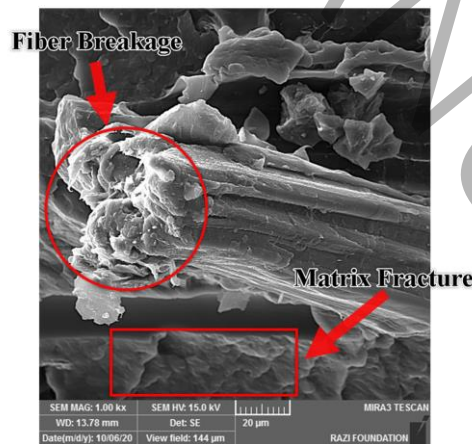
۵. مطالعات ریخت شناسی

تصاویر گرفته شده از سطح شکست نمونه‌ها تحلیل چگونگی رفتار بایوکامپوزیت معرفی شده را بهتر نشان می‌دهد. این تصاویر از سطح شکست نمونه‌های آزمون کشش، ضربه و خمش گرفته شده است که در ادامه به بررسی و بحث در مورد آنها پرداخته می‌شود. شکل ۱۱ تصویر نانو ذرات گرافن موجود در ترکیبات را در مقیاس نانو نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود ذرات گرافن به صورت صفحاتی نازک در ترکیبات دیده می‌شوند، همچنین در این شکل پراکندگی همگن و یکنواخت نانو ذرات در پلی پروپیلن پایه مشخص است (نمونه ۹).



شکل ۱۱. تصویر FE-SEM گرفته شده از گرافن در مقیاس نانو و پراکندگی مناسب نانو ذرات در پلیمر زمینه سازگارکننده. Figure 11. FE-SEM image taken of graphene at the nano scale and proper dispersion of nanoparticles in the background polymer

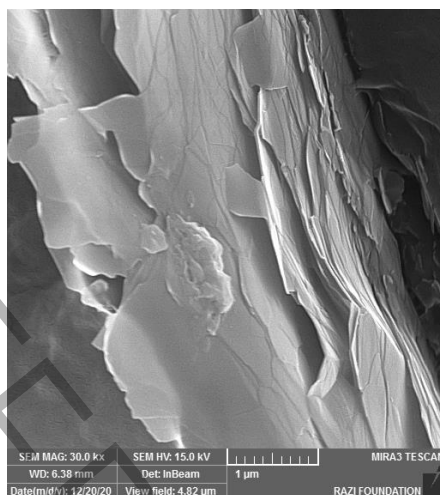
در شکل ۱۲ سطح شکست نمونه شامل ۰/۷۵ درصد وزنی نانو ذرات گرافن، ۷/۵ درصد وزنی الیاف کناف و ۳ درصد وزنی سازگارکننده، تحت بارگذاری خمشی نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود شکست الیاف کناف و همچنین چسبندگی نانو ذرات گرافن به الیاف به راحتی قابل مشاهده است. مکانیزم شکست الیاف و همچنین چسبندگی زمینه به عنوان پدیده‌های اصلی جذب انرژی، در این شکل به وضوح دیده می‌شود. نتایج نشان داد حضور نانو ذرات چسبندگی الیاف به پلیمر پایه را بهبود بخشیده است.



شکل ۱۲. تصویر FE-SEM گرفته شده از نمونه شامل ۰/۷۵ درصد وزنی نانو ذرات گرافن، ۷/۵ درصد وزنی الیاف کناف و ۳ درصد وزنی سازگارکننده

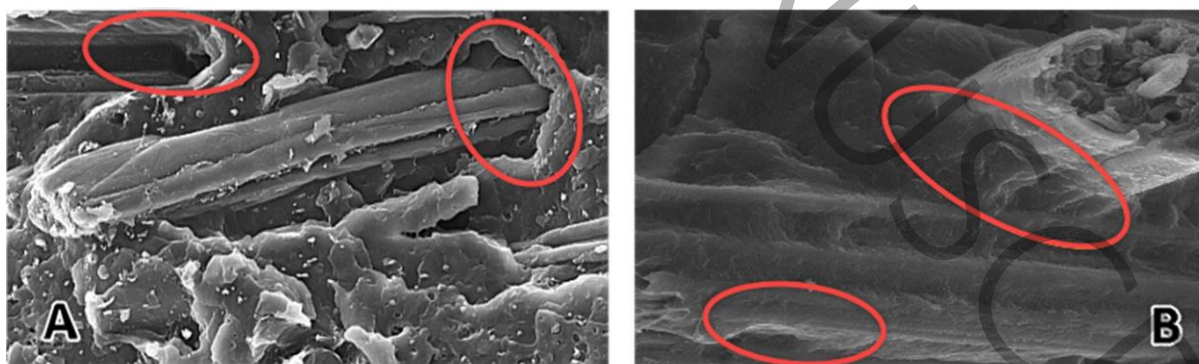
Figure 12. FE-SEM image taken from the sample containing 0.75% by weight of graphene nanoparticles, 7.5% by weight of knaf fibers, and 3% by weight of a compatibilizer

شکل ۱۳ سطح شکست نمونه شامل ۱/۵ درصد وزنی نانو ذرات گرافن تحت بارگذاری کششی را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود نانو ذرات گرافن در درصدهای بالا کلوخه شده و که این کلوخه شدن باعث کاهش چسبندگی بین الیاف و زمینه شده است که در نهایت باعث کاهش خواص مکانیکی در ترکیبات می‌شود.



شکل ۱۳. تصویر FE-SEM گرفته شده از کلوخه شدن نانو ذرات در نمونه شامل ۱/۵ درصد وزنی گرافن
Figure 13. FE-SEM image taken from the agglomeration of nanoparticles in the sample containing 1.5% by weight of graphene

شکل ۱۴ تاثیر حضور سازگارکننده بر چگونگی چسبندگی الیاف به ماده زمینه را به خوبی نشان می‌دهد. در شکل ۱۴-الف نمونه بدون سازگارکننده (نمونه ۱۰) را نشان می‌دهد که چسبندگی پایین الیاف به ماده زمینه، باعث بیرون کشیدگی الیاف از ماده زمینه شده و جدایش الیاف از پلیمر به وضوح دیده می‌شود. همچنین در این شکل پراکندگی یکنواخت نانو ذرات نیز مشخص است. از طرفی در شکل ۱۴-ب، به خوبی دیده می‌شود در نمونه با حضور سازگارکننده (نمونه ۷) چسبندگی الیاف به ماده زمینه به خوبی صورت گرفته و مکانیزم اصلی در افزایش استحکام، شکست الیاف و ماده زمینه است و در این نمونه پدیده بیرون کشیدگی الیاف از ماده زمینه دیده نمی‌شود.



شکل ۱۴. تصویر FE-SEM گرفته شده از الف) نمونه بدون سازگارکننده و ب) نمونه با حضور سازگارکننده
Figure 14. FE-SEM image taken from a) sample without compatibilizer and b) sample with compatibilizer presence

۶. بهینه سازی

افزایش استحکام کششی، ضربه و خمشی و درعین حال کاهش وزن سازه از عوامل مهم برای طراحی کامپوزیت‌ها محسوب می‌شود؛ از این رو مؤلفه‌هایی که برای انجام بهینه‌سازی چند هدفه در نظر گرفته شده است، شامل دستیابی به بالاترین میزان در استحکام، و در عین حال کمترین مقدار برای وزن است. به‌طور کلی رویکرد بهینه‌سازی چند هدفه و پارامترهای در نظر گرفته شده در جدول ۷ نشان داده شده است. جدول ۷، محدوده‌ی پارامترها، توابع هدف و قیود طراحی بر اساس بهینه‌سازی چند هدفه، برای هر یک از پاسخ‌های استحکام خمشی، کششی و ضربه را تعریف می‌کند.

جدول ۷: توابع هدف، قیود و پارامترهای طراحی در بهینه‌سازی چند هدفه

Table 7: Objective functions, constraints and design parameters in multi-objective optimization

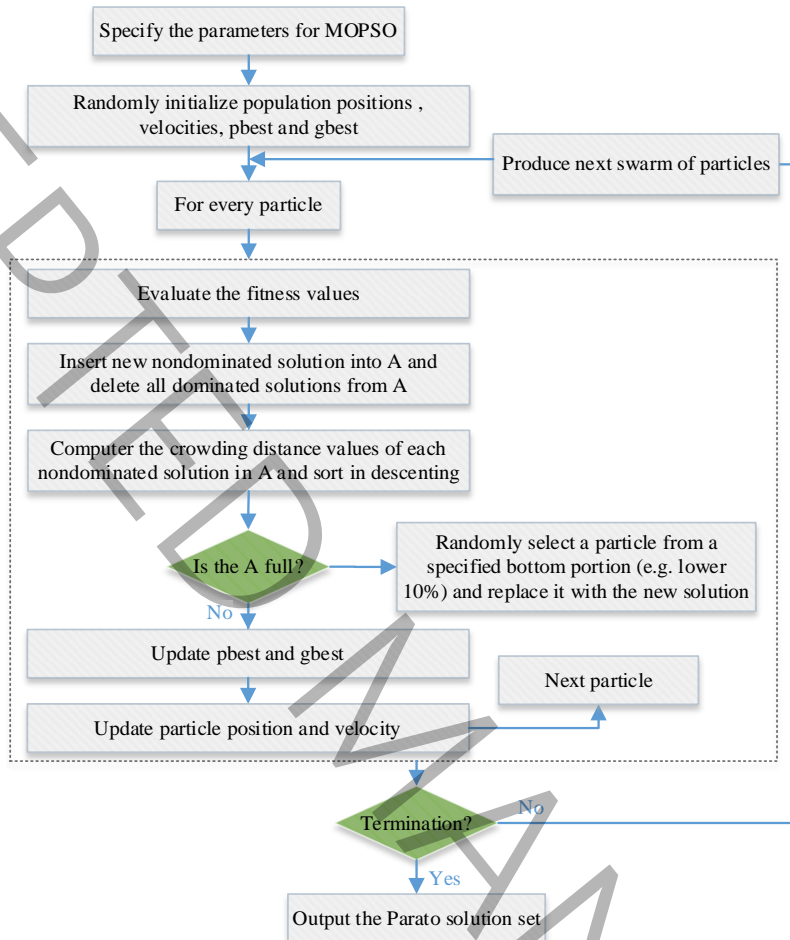
توابع	پارامترها و پاسخ‌ها	واحد	هدف	حد پایین	حد بالا
استحکام کششی و وزن نمونه	سازگارکننده	%	در بازه مشخصه	۰	۶
	الیاف کناف	%	در بازه مشخصه	۰	۱۵
	نانو ذرات گرافن	%	در بازه مشخصه	۰	۱/۵
	استحکام کششی	MPa	افزایش	۲۰/۸	۳۲
	وزن	g	کاهش	۱۰۴۵۴۱	۱/۹۹۳۶
استحکام خمشی و وزن نمونه	سازگارکننده	%	در بازه مشخصه	۰	۶
	الیاف کناف	%	در بازه مشخصه	۰	۱۵
	نانو ذرات گرافن	%	در بازه مشخصه	۰	۱/۵
	استحکام خمشی	MPa	افزایش	۴۳/۲	۵۷/۶۳
	وزن	g	کاهش	۲/۰۴۱۷	۲/۷۶۷۱
استحکام ضربه و وزن نمونه	سازگارکننده	%	در بازه مشخصه	۰	۶
	الیاف کناف	%	در بازه مشخصه	۰	۱۵
	نانو ذرات گرافن	%	در بازه مشخصه	۰	۱/۵
	استحکام ضربه	MPa	افزایش	۷۵	۱۰۰
	وزن	g	کاهش	۱/۱۳۶۳	۱/۵۸۷۸

در این پژوهش از روش تابع مطلوبیت و بهینه‌سازی چندهدفه دسته ذرات برای دستیابی به حالت بهینه برای پاسخ‌ها با استفاده از معادلات خروجی از نتایج طراحی آزمایش‌ها، بهره گرفته شده است. روش تابع مطلوبیت به علت سادگی، در دسترس بودن در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت و به دلیل انعطاف‌پذیری در درصد وزنی و توانایی تعیین میزان اهمیت مقادیر برای هر پاسخ منحصر به فرد در این پژوهش بکار گرفته شده است. این نرم‌افزار مسائل بهینه‌سازی چند هدفه را با استفاده از روش مطلوبیت با تکنیکی برای ترکیب پاسخ‌ها به کمیت بدون بعد که تابع مطلوبیت نامیده می‌شود، حل می‌کند. به‌طور خاص، رویکرد مطلوبیت شامل انتقال هر پاسخ تخمین زده شده به یک محدوده بدون واحد به صورت $0 < di < 1$ می‌شود، به‌طوری‌که زمانی که di مقدار بالاتر را نشان می‌دهد، میزان پاسخ دارای مطلوبیت بیشتر است. الگوریتم ازدحام ذرات^۱ نیز یک روش فراابتکاری مبتنی بر جمعیت است و با الهام گرفتن از حرکت جمعی پرنده یا ماهی‌ها بوجود آمده که اولین بار توسط ابرهارد^۲ و همکاران [۳۵]، معرفی شد. با توجه به سادگی در اجرا و بازده محاسباتی بالا، الگوریتم ازدحام ذرات نشان داد که نسبت به دیگر روش‌های بهینه‌سازی تصادفی دارای عملکرد بهتری است [۳۶]. بهینه‌سازی چند هدفه ازدحام ذرات اخیراً توجهات زیادی را به دلیل همگرایی نسبتاً

¹ MOPSO

² Eberhart

سریع و توزیع خوب پرتو^۱ در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های بهینه‌سازی چند هدفه مانند *NSGA* و *PEAS* و غیره، به خود جلب کرده است. فلوچارت شکل ۱۵ نحوه عملکرد الگوریتم ازدحام ذرات را نشان می‌دهد. همچنین مقادیر پارامترهای تاثیر گذار بر بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات، به صورت جدول ۸ در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۵: فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات [۳۶]

Figure 15: MOPSO optimization algorithm flowchart [36]

جدول ۸: پارامترهای تعریف شده برای بهینه‌سازی چند هدفه الگوریتم ازدحام ذرات

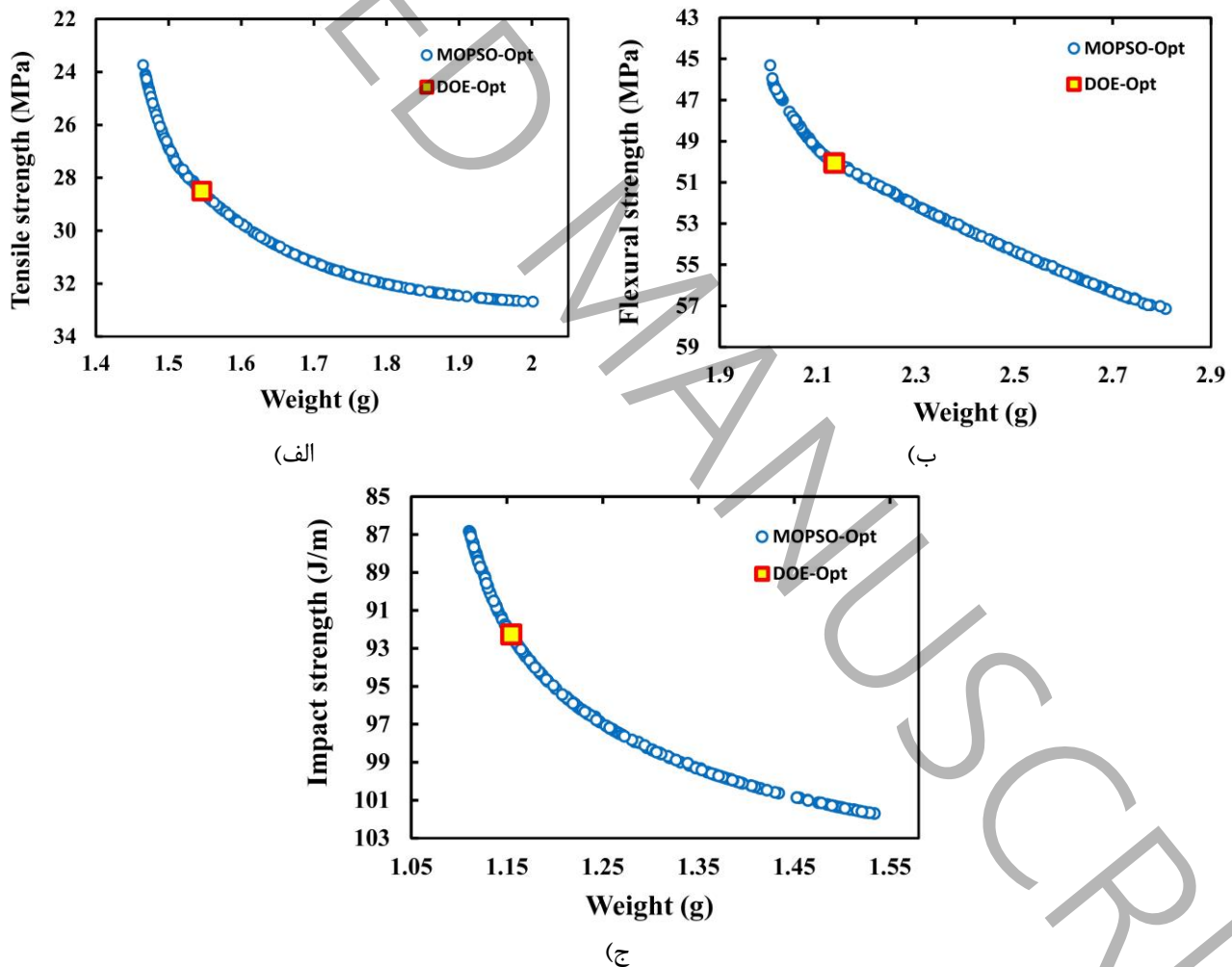
Table 8: Defined parameters for MOPSO multi-objective optimization

پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم	مقادیر
تعداد ذرات	۲۵۰
تعداد مخازن	۲۵۰
حداکثر تعداد نسل	۲۵۰
وزن اینرسی	۰/۵
نرخ میرایی وزن اینرسی	۰/۹۹
ضریب یادگیری شخصی	۱
ضریب یادگیری جهانی	۲

^۱ Pareto front

۱,۶. نتایج بهینه سازی

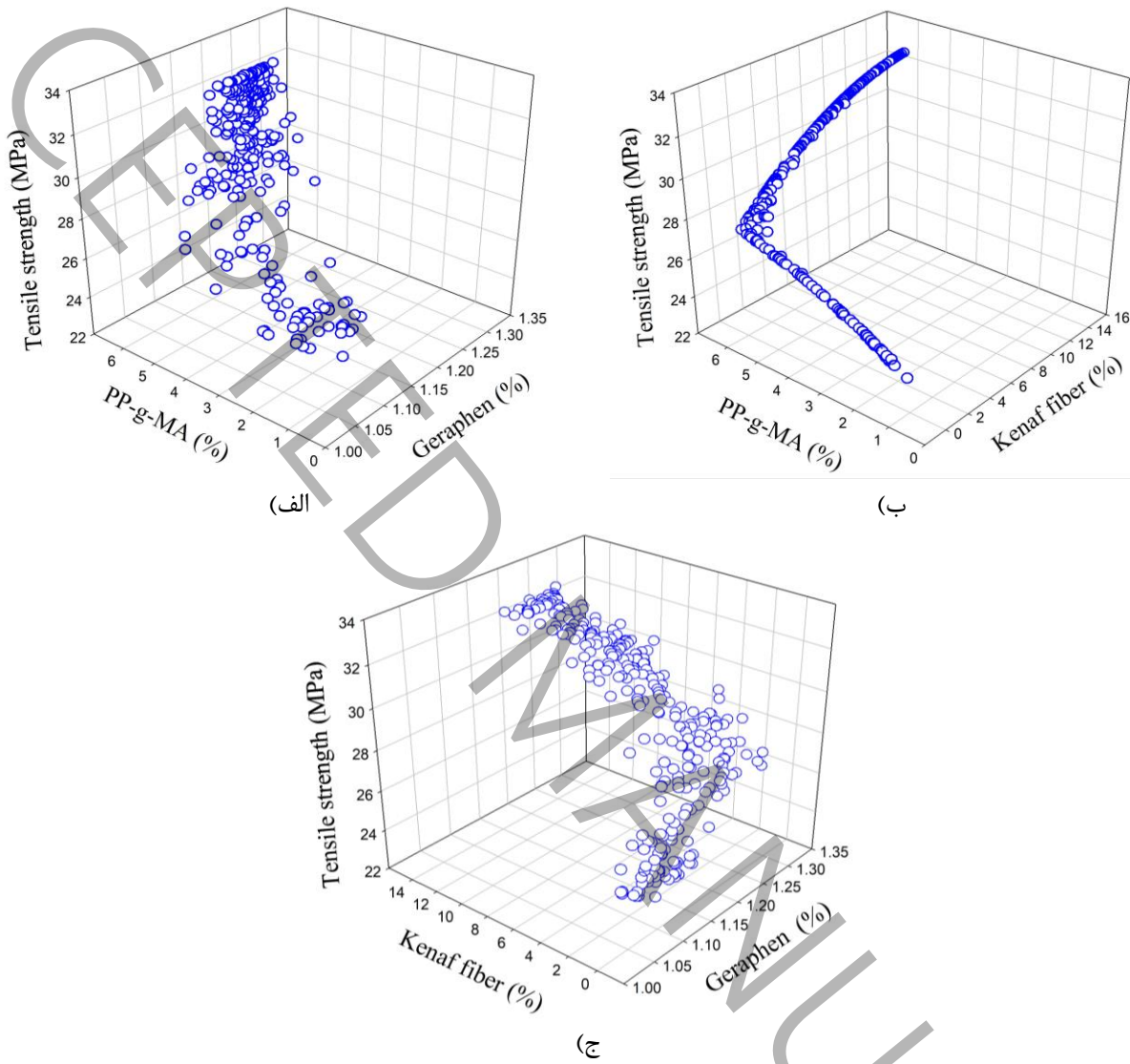
با توجه به بهینه‌سازی انجام شده به کمک نرم‌افزار دیزاین اکسپرت و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و شرایط ذکر شده در جدول ۷، به ارائه نمودارهای جبهه پرتو به‌دست‌آمده از بهینه‌سازی چند هدفه برای استحکام کششی خمشی و استحکام ضربه پرداخته شده، که نمودارهای نقاط بهینه برای هر سه مورد در شکل ۱۶ نشان داده شده است. تمام نقاط نشان داده شده در شکل ۱۶ برای هر سه فرایند بهینه‌سازی، شامل بهترین نقاط بهینه با اعمال شرایط اشاره شده در جدول ۶ است و هر یک از این نقاط را می‌توان به‌عنوان نقطه بهینه معرفی نمود. نتایج نشان داد نقاط بهینه پاسخ‌ها که از روش طراحی آزمون و با شیوه تابع مطلوبیت به‌دست آمد، کاملاً بر نمودار پرتو منطبق بوده و بر روی نمودار قرار گرفته است. همچنین نحوه توزیع مقادیر پارامترهای الیاف کناف و نانو گرافن و جزء سازگارکننده با تغییرات استحکام کششی، ضربه و خمشی به ترتیب در شکل‌های ۱۷، ۱۸ و ۱۹ نشان داده شده است.



شکل ۱۶: نمودار نقاط بهینه جبهه پرتو به‌دست‌آمده با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات برای: (الف) استحکام کششی (ب) مدول الاستیک (ج) استحکام ضربه

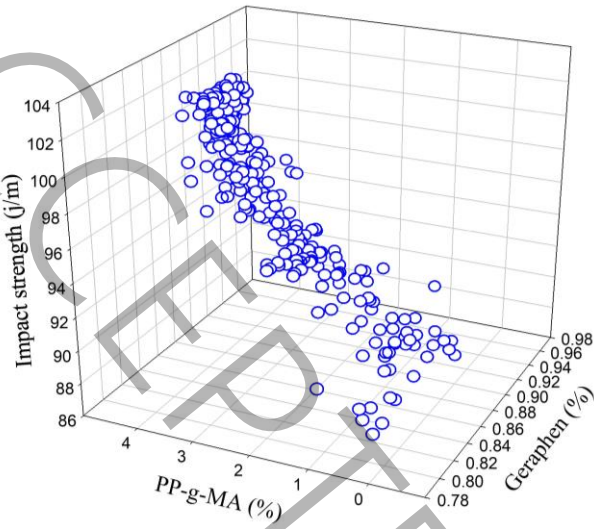
Figure 16: Diagram of Pareto front optimal points obtained using MOPSO for; (a) Tensile strength (b)

Elastic modulus (c) Impact strength

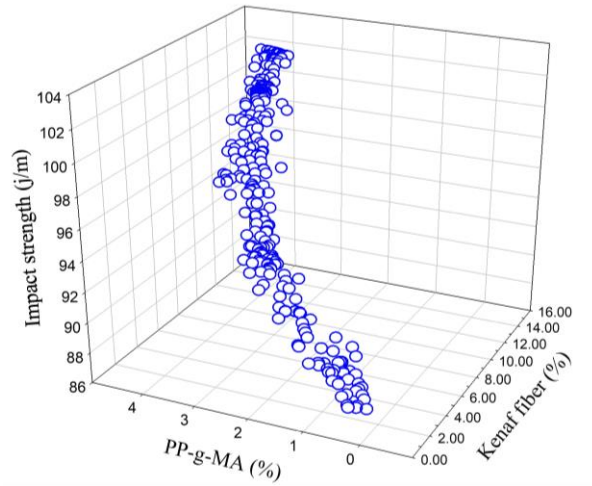


شکل ۱۷: توزیع متغیرهای طراحی الف) نانو ذرات و سازگار کننده، ب) الیاف کناف و سازگار کننده، ج) نانو گرافن و الیاف کناف در حالت بهینه برای افزایش استحکام کششی

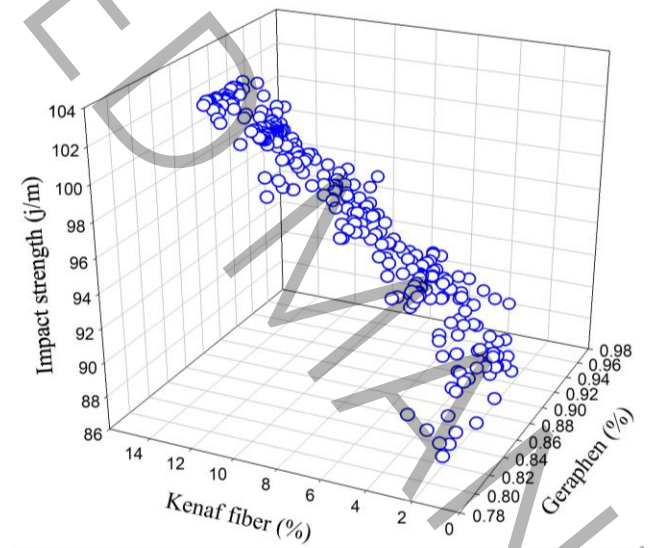
Figure 17: Distribution of design variables a) nanoparticles and compatibilizer, b) kenaf fibers and compatibilizer, c) nanographene and kenaf fibers in the optimal state to increase tensile strength



(الف)



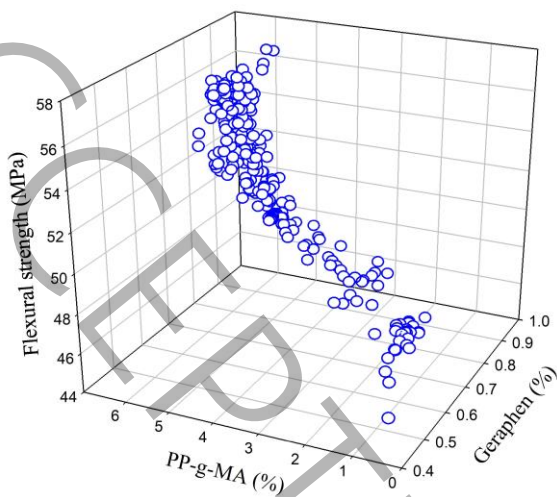
(ب)



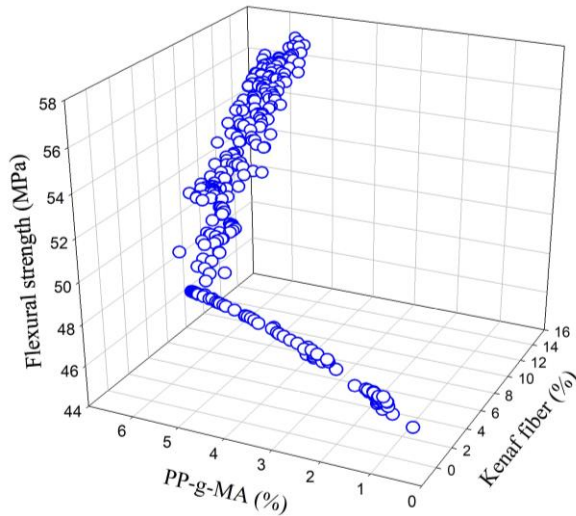
(ج)

شکل ۱۸: توزیع متغیرهای طراحی (الف) نانو ذرات و سازگار کننده، (ب) الیاف کناف و سازگار کننده، (ج) نانو گرافن و الیاف کناف در حالت بهینه برای افزایش استحکام ضربه

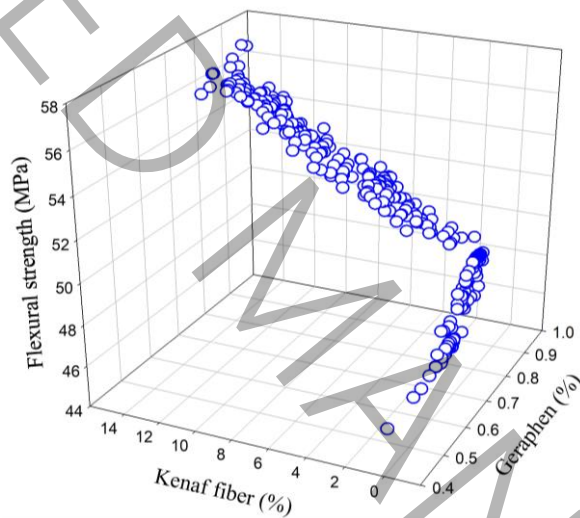
Figure 18: Distribution of design variables a) nanoparticles and compatibilizers, b) kenaf fibers and compatibilizers, c) nanographene and kenaf fibers in the optimal state to increase impact strength



(الف)



(ب)

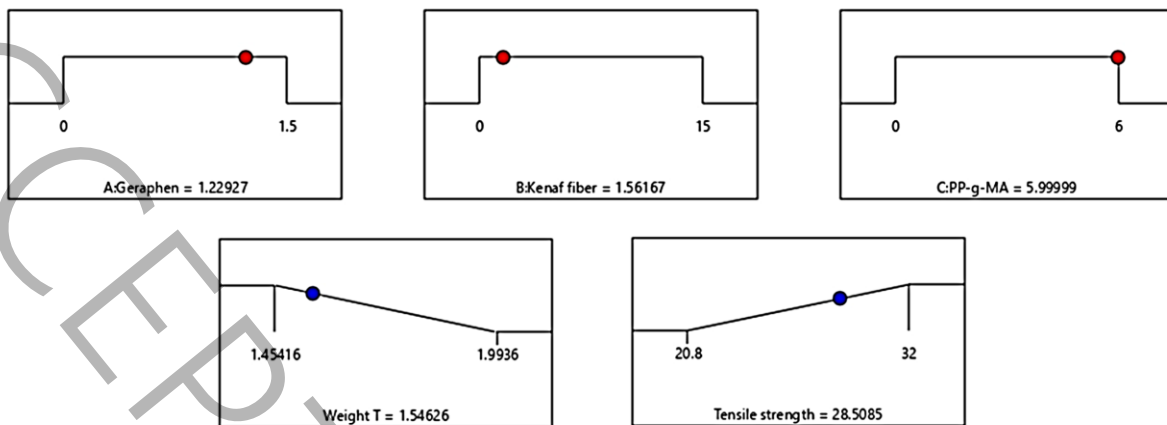


(ج)

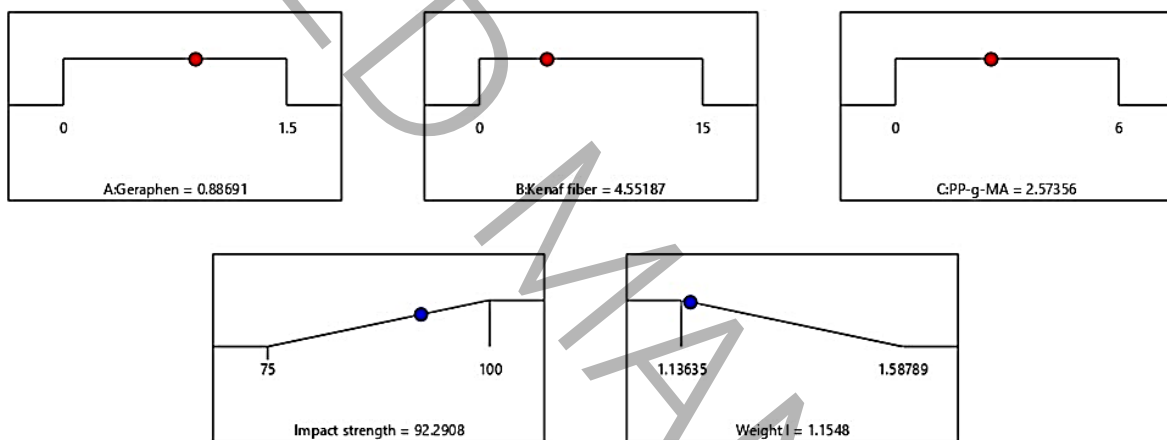
شکل ۱۹: توزیع متغیرهای طراحی (الف) نانو ذرات و سازگار کننده، (ب) الیاف کناف و سازگار کننده، (ج) نانو گرافن و الیاف کناف در حالت بهینه برای افزایش استحکام خمشی

Figure 19: Distribution of design variables a) Nanoparticles and compatibilizer, b) Kenaf fibers and compatibilizer, c) Nanographene and Kenaf fibers in the optimal state to increase bending strength

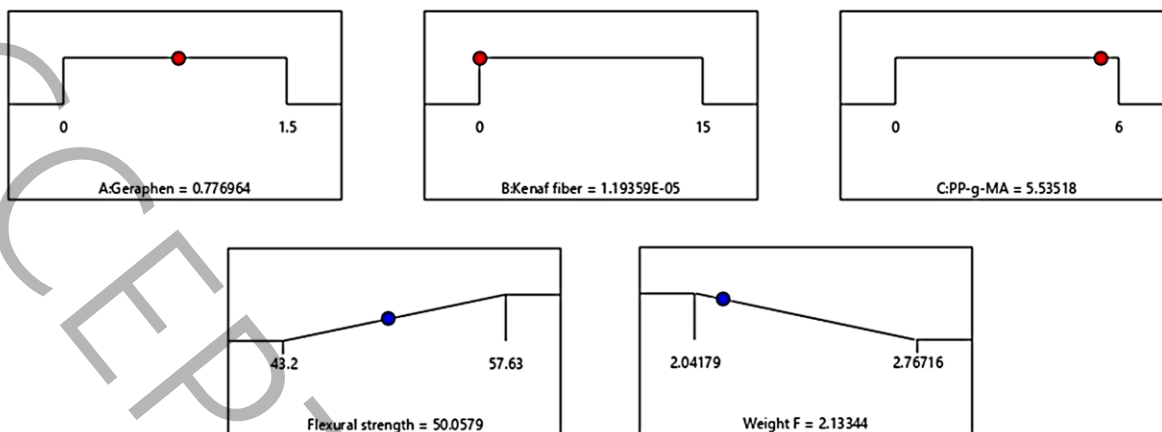
مقادیر مربوط به درصد الیاف کناف، نانو ذرات گرافن و جزء سازگار کننده به همراه مقادیر بهینه پاسخهای مورد نظر و محل قرارگیری این نقاط در بازه کلی تغییرات با استفاده از روش تابع مطلوبیت، برای حالت بیشینه استحکام کششی، ضربه و خمش و کمینه وزن نمونه‌ها، به ترتیب در شکل‌های ۲۰، ۲۱ و ۲۲ نشان داده شده است. این نقاط در نمودارهای جبهه پارتو نشان داده شده در شکل ۱۶ نیز مشخص شده‌اند.



شکل ۲۰: مقادیر بهینه و محل قرارگیری در محدوده تغییرات پارامترها و پاسخ‌های طراحی برای افزایش استحکام کششی و کاهش وزن
Figure 20: Optimum values and location in the range of parameter changes and design responses to increase tensile strength and reduce weight



شکل ۲۱: مقادیر بهینه و محل قرارگیری در محدوده تغییرات پارامترها و پاسخ‌های طراحی برای افزایش استحکام ضربه و کاهش وزن
Figure 21: Optimum values and location within the range of parameter changes and design responses to increase impact strength and reduce weight



شکل ۲۲: مقادیر بهینه و محل قرارگیری در محدوده تغییرات پارامترها و پاسخ‌های طراحی برای افزایش استحکام خمشی و کاهش وزن
Figure 22: Optimum values and location in the range of parameter changes and design responses to increase bending strength and reduce weight

۷. نتیجه‌گیری

در این مطالعه تاثیر درصد وزنی الیاف کناف و نانو ذرات گرافن در حضور سازگارکننده بر خواص مکانیکی بایوکامپوزیت معرفی شد. استحکام کششی، خمشی و ضربه‌ای در بایوکامپوزیت معرفی شده با استفاده از طراحی در آزمون با رویکرد سطح پاسخ و روش باکس-بهینکن انجام گردید و بهینه‌سازی چند هدفه با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات در راستای بهبود خواص مکانیکی و کاهش وزن انجام گردید. نتایج کلی به صورت زیر بدست آمد:

- حضور ۰/۸۸ درصد وزنی گرافن ۱۶٪ استحکام کششی را افزایش و حضور ۱/۵ درصد وزنی گرافن، باعث کاهش استحکام کششی نسبت به نمونه با ۰/۸۸ درصد وزنی گرافن گردید. افزایش ۱۵ درصد وزنی الیاف کناف، استحکام کششی را ۲۴٪ افزایش داد. افزایش ۶ درصد وزنی سازگارکننده، استحکام کششی را ۱۸٪ افزایش داد.
- حضور ۱/۵ درصد وزنی نانو ذرات گرافن باعث ۷۰٪ افزایش در مدول الاستیک شده است. افزایش ۱۵ درصد وزنی الیاف کناف، مدول الاستیک را ۸۴٪ افزایش داد. افزایش ۱۵ درصد وزنی سازگارکننده، مدول الاستیک را ۷۵٪ افزایش داد.
- حضور ۰/۷۵ درصد وزنی گرافن ۱۹٪ استحکام ضربه را افزایش و حضور ۱/۵ درصد وزنی گرافن، کاهش استحکام ضربه نسبت به نمونه با ۰/۷۵ درصد وزنی را به همراه دارد. افزایش ۱۵ درصد وزنی الیاف کناف، استحکام ضربه را ۱۱٪ افزایش داد. افزایش سازگارکننده تا ۵ درصد وزنی استحکام ضربه را ۱۰٪ افزایش داده و افزایش آن تا ۶ درصد وزنی باعث کاهش استحکام ضربه شده است.
- حضور ۰/۸۸ درصد وزنی گرافن ۲۴٪ استحکام خمشی را افزایش و حضور ۱/۵ درصد وزنی گرافن، کاهش استحکام خمشی نسبت به نمونه با ۰/۸۸ درصد وزنی گرافن را به همراه دارد. افزایش ۱۵ درصد وزنی الیاف کناف، استحکام خمشی را ۱۸٪ افزایش داد. افزایش سازگارکننده تا ۵ درصد وزنی استحکام خمشی را ۵٪ افزایش داده و افزایش آن تا ۶ درصد وزنی باعث کاهش استحکام ضربه شده است.

- بیشترین میزان استحکام در خواص مکانیکی در نمونه شماره ۱۲، با ۱۵ درصد وزنی الیاف کناف، ۶ درصد وزنی سازگارکننده و ۰/۷۵ درصد وزنی گرافن مشاهده شده است (استحکام کششی ۳۲MPa، مدول الاستیک ۳/۸GPa، استحکام ضربه ۱۰۰J/m و استحکام خمشی ۵۷/۶۳MPa).
- نتایج بهینه‌سازی نشان داد، بیشترین مقدار استحکام کششی در حالتی که وزن نمونه کمترین مقدار خود را داشته باشد، در نمونه شامل ۱/۲۲ درصد نانو گرافن، ۱/۵۶ درصد الیاف کناف و ۶ درصد سازگارکننده، با میزان ۲۸/۵ MPa حاصل شده است.
- نتایج بهینه‌سازی نشان داد، بیشترین مقدار استحکام ضربه در حالتی که وزن نمونه کمترین مقدار خود را داشته باشد، در نمونه شامل ۰/۸۸ درصد نانو گرافن، ۴/۵۵ درصد الیاف کناف و ۲/۵۷ درصد سازگارکننده، با میزان ۹۲/۲۹ J/m حاصل شده است.
- نتایج بهینه‌سازی نشان داد، بیشترین مقدار استحکام خمشی در حالتی که وزن نمونه کمترین مقدار خود را داشته باشد، در نمونه شامل ۰/۷۷ درصد نانو گرافن، ۱/۱۹۳ درصد الیاف کناف و ۵/۵۳ درصد سازگارکننده، با میزان ۵۰ MPa حاصل شده است.

۸. علائم اختصاری

نماد	توضیح
E	Elastic modulus
ρ	Density
M	Mass of pendulum striker
m	The mass of the sample
PP	Polyporipilen
$FESEM$	Field Emission Scanning Electron Microscopy
σ	Tensile stress
σ_f	Bending stress
E_a	Energy absorption
MA	maleic anhydride
PP-g-MA	compatibilizer
MOPSO	Multi-Objective Particle Swarm Optimization
P-value	Probability value
R^2	The determination coefficient
R_{adj}^2	A corrected goodness-of-fit (model accuracy)
RSM	Response Surface Method
BBD	Box-Behnken Design

- [1] V.K. Thakur, M.K. Thakur, R.K. Gupta, Rapid synthesis of graft copolymers from natural cellulose fibers, *Carbohydrate Polymers*, 98(1) (2013) 820-828.
- [2] M. Shariati, H. Hatami, H.R. Eipakchi, H. Yarahmadi, H. Torabi, Experimental and Numerical Investigations on Softening Behavior of POM Under Cyclic Strain-Controlled Loading, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 50(15) (2011) 1576-1582.
- [3] Y. Sahloddin, A. Dalvand, M. Ahmadi, H. Hatami, M. Houshmand Khaneghahi, Performance evaluation of built-up composite beams fabricated using thin-walled hollow sections and self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, 305 (2021) 124645.
- [4] H. Hatami, M. Shariati, Numerical and Experimental Investigation of SS304L Cylindrical Shell with Cutout Under Uniaxial Cyclic Loading, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 43(2) (2019) 139-153.
- [5] H. Hatami, A.B. Fathollahi, Theoretical and Numerical Study and Comparison of the Inertia Effects on the Collapse Behavior of Expanded metal tube Absorber with Single and Double Cell under Impact Loading, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 50(5) (2018) 999-1014.
- [6] A. Ghodsbin Jahromi, H. Hatami, Numerical Behavior Study of Expanded Metal Tube Absorbers and Effect of Cross Section Size and Multi-Layer under Low Axial Velocity Impact Loading, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 49(4) (2018) 685-696.
- [7] H.P.S. Abdul Khalil, M.Y. Nur Firdaus, M. Anis, R. Ridzuan, The Effect of Storage Time and Humidity on Mechanical and Physical Properties of Medium Density Fiberboard (MDF) from Oil Palm Empty Fruit Bunch and Rubberwood, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 47(10) (2008) 1046-1053.
- [8] V. Fiore, T. Scalici, G. Di Bella, A. Valenza, A review on basalt fibre and its composites, *Composites Part B: Engineering*, 74 (2015) 74-94.
- [9] D. Rouison, M. Sain, M. Couturier, Resin transfer molding of natural fiber reinforced composites: cure simulation, *Composites Science and Technology*, 64(5) (2004) 629-644.
- [10] J.G. Teng, J.-F. Chen, S. Smith, L. Lam, T. Jessop, Behaviour and strength of FRP-strengthened RC structures: A state-of-the-art review, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 156 (2003) 334-335.
- [11] J. Singh, S. Sehijpal, V. Dhawan, Influence of fiber volume fraction and curing temperature on mechanical properties of jute/PLA green composites, *Polymers and Polymer Composites*, 28 (2020) 096739111987287.
- [12] G. Qi, B. Zhang, Y. Yu, Research on carbon fiber/epoxy interfacial bonding characterization of transverse fiber bundle composites fabricated by different preparation processes: Effect of fiber volume fraction, *Polymer Testing*, 52 (2016) 150-156.
- [13] T. Yu, Y. Li, J. Ren, Preparation and properties of short natural fiber reinforced poly(lactic acid) composites, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 19 (2009) s651-s655.
- [14] P. Song, Z. Cao, Y. Cai, L. Zhao, Z. Fang, S. Fu, Fabrication of exfoliated graphene-based polypropylene nanocomposites with enhanced mechanical and thermal properties, *Polymer*, 52(18) (2011) 4001-4010.
- [15] B. Yuan, C. Bao, L. Song, N. Hong, K.M. Liew, Y. Hu, Preparation of functionalized graphene oxide/polypropylene nanocomposite with significantly improved thermal stability and studies on the crystallization behavior and mechanical properties, *Chemical Engineering Journal*, 237 (2014) 411-420.

- [16] M. Nouri-Niyaraki, F. Ashenai Ghasemi, I. Ghasemi, S. Daneshpayeh, Experimental analysis of graphene nanoparticles and glass fibers effect on mechanical and thermal properties of polypropylene/EPDM based nanocomposites, *Journal of Science and Technology of Composites*, 5(2) (2018) 169-176.
- [17] V.A.J. M.M.shokrieh, Manufacturing and experimental characterization of Graphene/Polypropylene nanocomposites, *Modares Mechanical Engineering*, 13(11) (2014) 55-63.
- [18] F.A. Ghasemi, M.N. Niyaraki, I. Ghasemi, S. Daneshpayeh, 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*, 28(10) (2021) 981-989.
- [19] V. Tserki, P. Matzinos, C. Panayiotou, Novel biodegradable composites based on treated lignocellulosic waste flour as filler. Part II. Development of biodegradable composites using treated and compatibilized waste flour, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(9) (2006) 1231-1238.
- [20] W. Liu, A.K. Mohanty, P. Askeland, L.T. Drzal, M. Misra, Influence of fiber surface treatment on properties of Indian grass fiber reinforced soy protein based biocomposites, *Polymer*, 45(22) (2004) 7589-7596.
- [21] K. Prashantha, J. Soulestin, M.F. Lacrampe, M. Claes, G. Dupin, P. Krawczak, Multi-walled carbon nanotube filled polypropylene nanocomposites based on masterbatch route: Improvement of dispersion and mechanical properties through PP-g-MA addition, *Express Polymer Letters*, 2 (2008) 735-745.
- [22] J. Boonlertsamut, R. Wongpajan, S. Thumsorn, H. Hamada, Effects of Compatibilizers on Properties of Polypropylene/Bamboo Fiber Composites, *Key Engineering Materials*, 728 (2017) 301-306.
- [23] M.L. López-Quintanilla, S. Sanchez, L. Ramos, R. Miranda, Preparation and mechanical properties of PP/PP-g-MA/Org-MMT nanocomposites with different MA content, *Polymer Bulletin*, 57 (2006) 385-393.
- [24] J. Mirzaei, A. Fereidoon, A. Ghasemi-Ghalebahman, Experimental study on mechanical properties of polypropylene nanocomposites reinforced with a hybrid graphene/PP-g-MA/kenaf fiber by response surface methodology, *Journal of Elastomers & Plastics*, 53 (2021) 009524432110153.
- [25] H. Taghipoor, A. Fereidoon, A. Ghasemi-Ghalebahman, J. Mirzaei, Experimental assessment of mechanical behavior of basalt/graphene/PP-g-MA-reinforced polymer nanocomposites by response surface methodology, *Polymer Bulletin*, 80(7) (2023) 7663-7685.
- [26] M. Chaharmahali, Y. Hamzeh, G. Ebrahimi, A. Ashori, I. Ghasemi, Effects of nano-graphene on the physico-mechanical properties of bagasse/polypropylene composites, *Polymer Bulletin*, 71(2) (2014) 337-349.
- [27] R. Rahman, S. Zhafer Firdaus Syed Putra, 5 - Tensile properties of natural and synthetic fiber-reinforced polymer composites, in: M. Jawaid, M. Thariq, N. Saba (Eds.) *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, Woodhead Publishing, 2019, pp. 81-102.
- [28] H. Obasi, Effects of Native Cassava Starch and Compatibilizer on Biodegradable and Tensile Properties of Polypropylene, (2014) 96-104.
- [29] F.A. Ghasemi, G.h. Payganeh, M. Rahmani, The effect of stearic acid surface-modified calcium carbonate nanoparticles and PP-g-MA on the mechanical properties of PP/CaCO₃/PP-g-MA nanocomposites, *Modares Mechanical Engineering*, 13(4) (2013) 139-152.

- [30] A. Erklig, N. Dogan, M. Bulut, Charpy Impact Response of Glass Fiber Reinforced Composite with Nano Graphene Enhanced Epoxy, *Periodicals of engineering and natural sciences*, 5 (2017) 341-346.
- [31] C.-Q. Li, J.-W. Zha, Z.-J. Li, D.-L. Zhang, S.-J. Wang, Z.-M. Dang, Towards balanced mechanical and electrical properties of thermoplastic vulcanizates composites via unique synergistic effects of single-walled carbon nanotubes and graphene, *Composites Science and Technology*, 157 (2018) 134-143.
- [32] B. Akbari, R. Bagheri, Influence of PP-g-MA on Morphology, Mechanical Properties and Deformation Mechanism of Copolypropylene/Clay Nanocomposite, *Journal of Applied Polymer Science*, 114 (2009) 3751-3759.
- [33] G.d.S. Maradini, M.P. Oliveira, L.G. Carreira, D. Guimarães, D. Profeti, A.F. Dias Júnior, W.T.N. Boschetti, B.F.d. Oliveira, A.C. Pereira, S.N. Monteiro, Impact and Tensile Properties of Polyester Nanocomposites Reinforced with Conifer Fiber Cellulose Nanocrystal: A Previous Study Extension, *Polymers*, 13(11) (2021) 1878.
- [34] S. Ahmed, K. Satyasree, R. Kumar, O. Kumar, S. Shanmugavel, A Comprehensive Review on Recent Developments of Natural Fiber Composites Synthesis, Processing, Properties, And Characterization, *Engineering Research Express*, 5 (2023).
- [35] R.C. Eberhart, J. Kennedy, A new optimizer using particle swarm theory, *MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, (1995) 39-43.
- [36] R.C. Eberhart, Y. Shi, J. Kennedy, *Swarm Intelligence*, Elsevier, 2021.

Analysis and Optimization of Mechanical Properties of Biocomposites Reinforced with Kenaf Fibers/Graphene in the Presence of Compatibilizers

Hossein Taghipoor^{a1}, Jabber Mirzaei^b

^a Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Velayat University

^b PhD, Department of Mechanical Engineering, Semnan University

ABSTRACT

This article examines the mechanical properties of bio-composites reinforced with kenaf fibers and nano-graphene within a polypropylene matrix by adding a compatibilizer. The response surface methodology with the Box-Behnken approach was used to investigate and present a mathematical model for the behavior of the bio-composite considering the parameters of fiber weight percentage, nano-graphene weight percentage, and compatibilizer weight percentage. The behavior of the samples was analyzed under tensile, bending, and impact tests, and the results were justified using FE-SEM. The fracture surface of the samples indicated that the main mechanism in improving the introduced bio-composite behavior is fiber fracture and fiber pull-out. Multi-objective optimization was carried out using two meta-heuristic methods and the desirability function. The optimization aimed to increase the flexural, impact, and tensile strength while simultaneously reducing the weight of the samples, with the weight percentages of the fibers, nanoparticles, and compatibilizer defined as the problem variables. The results showed that the bio-composite sample with the optimal design parameters has three mechanical properties, including tensile strength, impact strength, and flexural strength, equal to 28.5MPa, 92.29J/m, and 50MPa, respectively. Finally, the optimal state showed that the weight of the bio-composite sample could be reduced by up to 32%.

KEYWORDS

Mechanical Properties, Optimization, Design of experiment, Compatibilizer, Natural fibers

¹ Corresponding Author: Email: h.taghipoor@velayat.ac.ir