



نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری کامپوزیت

http://jstc.iust.ac.ir



بررسی تأثیر افزایش نانوذرات پرلیت بر خواص مکانیکی و ریزساختار ترکیب پلیمری PP/NR تهیه شده با فرایند اختلاط مذاب: بهینه‌سازی با رویکرد سطح پاسخ

هادی سلیمانی¹، عبدالحسین فریدون^{2*}، علیرضا آلبویه³، محمدرضا نخعی امرودی⁴

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان
 2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان
 3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه دامغان، دامغان
 4- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران
 * سمنان، صندوق پستی 35131-19111، afereidoon@semnan.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: 1401/09/24	پژوهش حاضر به مطالعه اثر افزودن نانوذرات پرلیت و لاستیک طبیعی با درصدهای وزنی مختلف بر مدول کششی و استحکام ضربه‌ای پلی‌پروپیلن پرداخته است. برای این منظور، نمونه‌های مختلف با استفاده از دستگاه مخلوط‌کن داخلی بر اساس استانداردهای آزمون‌های کشش و ضربه تولید و آزموده شدند. همچنین با کمک روش بهینه‌سازی پاسخ سطح (RSM)، نقش پارامترهای ورودی بر پاسخ‌ها در جهت دست یابی به خواص مکانیکی بهینه و پیش‌بینی این خواص با مدل‌های ریاضی در قالب طرح پنج سطحی مرکب مرکزی (CCD) مورد بررسی قرار گرفت. علاوه، از آزمون SEM به جهت مشاهده تغییرات ایجاد شده در ریز ساختار نمونه‌ها بهره گرفته شد. نتایج نشان داد، افزودن 7 wt.% از نانوذرات پرلیت به ماتریس حاوی 20 wt.% از لاستیک طبیعی، مقدار مدول کششی را 11.27٪ افزایش و استحکام ضربه‌ای را 52.01٪ نسبت به افزودن 3 wt.% از نانوذرات پرلیت به همان ماتریس کاهش می‌دهد. نتایج بهینه‌سازی چند متغیره اثبات کرد که درصد وزنی بهینه نانوذرات پرلیت و لاستیک طبیعی به ترتیب 4.04 و 35.26٪ بود. در این صورت بیشترین مقدار حاصل شده برای مدول کششی 508.04 MPa و استحکام ضربه‌ای 108.52 J/m تعیین شد. با مشاهده تصاویر SEM استنباط شد که تغییر در اندازه فاز الاستومری به جهت استفاده از درصدهای وزنی گوناگون تقویت‌کننده، باعث متفاوت شدن نتایج خواص مکانیکی نمونه‌ها با یکدیگر شد.
پذیرش: 1402/01/20	
کلیدواژگان:	
پلی‌پروپیلن	
لاستیک طبیعی	
پرلیت	
نانوکامپوزیت	
روش پاسخ سطح	

Effect of perlite nanoparticles addition on the mechanical and microstructure properties of PP/NR blend fabricated by melt mixing processing: Optimizing by Response Surface Approach

Hadi Soleymani¹, Abdolhossein Fereidoon^{1*}, Alireza Albooyeh², Mohammad Reza Nakhaei³

1- Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
 2- School of Engineering, Damghan University, Damghan, Iran
 3- Faculty of Mechanics and Energy, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
 * P.O.B. 35131-19111, Semnan, Iran, afereidoon@semnan.ac.ir

Keywords

Polypropylene
 Natural rubber
 Perlite
 Nanocomposite
 Response surface methodology

Abstract

The present research has studied the effect of adding perlite and natural rubber nanoparticles with various weight percentages on the tensile modulus and impact strength of polypropylene. For this purpose, different samples were produced and tested using an internal mixer based on the standards of tensile and impact tests. Also, by using of response surface methodology (RSM), the role of input parameters on the responses was investigated in order to achieve optimal mechanical properties and predict these properties with mathematical models in the form of central composite five-level design (CCD). In addition, the SEM test was used to observe the changes made in the microstructure of the samples. The results showed that the addition of 7 wt.% of perlite nanoparticles to the matrix containing 20 wt.% of natural rubber, the value of the tensile modulus increased by 11.27% and the impact strength by 52.01% compared to the addition of 3 wt.% of perlite nanoparticles to the same matrix. The results of multiobjective optimization proved that the optimal weight percentage of perlite nanoparticles and natural rubber was 4.04 and 35.26% wt. respectively. In this case, the highest value obtained for tensile modulus was 508.04 MPa and impact strength was determined to be 108.52 J/m. By observing the SEM images, it was concluded that the change in the size of the elastomeric phase due to the use of different weight percentages of reinforcements has caused the results of the mechanical properties of the samples to differ from each other.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Soleymani, H., Fereidoon, A., Albooyeh, A., Nakhaei, M. R., "Effect of perlite nanoparticles addition on the mechanical and microstructure properties of PP/NR blend fabricated by melt mixing processing: Optimizing by Response Surface Approach," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 9, No. 4, pp. 2089-2098, 2023. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2023.1982818.1817>

1- مقدمه

در سال‌های اخیر، استفاده از کامپوزیت‌های بر پایه پلی‌پروپیلن (PP)¹ رواج گسترده‌ای در صنایع مختلف خودروسازی، تولید تجهیزات پزشکی و ساخت الیاف مصنوعی داشته است. از آنجایی که این نوع از مواد ترموپلاستیکی از ویژگی‌های خاص و مهمی برخوردارند، مورد توجه محققان قرار گرفتند. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به در دسترس بودن با قیمت ارزان، مقاومت بالای حرارتی، سبک بودن و قابلیت بازیافت چند باره اشاره کرد [1، 2]. پژوهش‌های فراوانی بر روی پلی‌پروپیلن به عنوان ماده پایه در ترکیبات مختلف نانوکامپوزیتی انجام شده است. به نحوی که پژوهشگران با افزودن مواد الاستومری و تقویت‌کننده‌های مؤثری همچون نانوذرات سرامیکی، سیلیکاتی و نانولوله‌های کربنی به فاز پایه پلیمری، سبب افزایش چقرمگی شکست و بهبود خواص مکانیکی، حرارتی و ریزساختاری پلی‌پروپیلن خالص شدند [3-6]. همچنین، در تحقیقاتی اثر افزودن نانوذرات مختلف در جهت بهبود خواص مکانیکی و ضربه‌ای کامپوزیت‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند [7-12].

نانوذرات پرلیت از تقویت‌کننده‌های سیلیکاتی پرکاربرد در صنعت و مهندسی به شمار می‌روند که استفاده از آن‌ها در ترکیبات مختلف باعث بهبود خواص مکانیکی، حرارتی و ریزساختاری نمونه‌های تهیه شده، می‌شود. با استفاده از نانوذرات پرلیت در ترکیبات می‌توان ایجاد پیوندهای قوی بین فازها را انتظار داشت. این امر باعث افزایش استحکام مکانیکی مواد در آزمون‌هایی نظیر کشش و ضربه می‌شود [13، 14]. در تحقیقی، صحرائیان و همکارانش [15]، به مطالعه تأثیر افزایش نانوذرات پرلیت به فیلم‌های بر پایه پلی‌اتیلن چگالی پایین بر خواص مکانیکی و ریزساختاری پرداخته‌اند. آن‌ها در بررسی‌های خود نتیجه گرفتند، با افزایش درصد وزنی پرلیت به مقدار 5 wt.%، میرایی ماده پایه کاسته شد، اما در مقابل دمای انتقال حرارت بلورهای شیشه‌ای نانوذرات، ویسکوزیته ترکیب و مدول الاستیسیته در مقایسه با پلیمر پایه افزایش یافت. الیورا و همکارانش [16]، خواص مکانیکی، ساختاری، حرارتی و رئولوژی پلیمر پلی‌استایرن تقویت‌شده با میکروذرات پرلیت را مورد بررسی قرار دادند. طبق بررسی‌های صورت گرفته مشاهده شد، میکروذرات پرلیت میزان پایداری دمایی ماتریس پایه را کاهش دادند. همچنین، شکستگی برخی از ذرات پرلیت در حین انجام فرایند پخت و اختلاط سبب کاهش استحکام کششی مخلوط شد. از طرفی، مقایسه نتایج دیگر نشان داد که حضور پرلیت دو خاصیت مدول الاستیک و ویسکوزیته ماده زمینه را افزایش داد.

استفاده از روش‌های متنوع طراحی آزمایش، نظیر روش پاسخ سطح² و تاگوچی³ برای آزمایش‌هایی که از تعداد پارامترهای مؤثر زیادی برخوردارند، رواج دارد [17]. این شیوه برای کاهش وقت و هزینه‌های پژوهش بسیار مناسب است. در این راستا، یعقوبی و فریدون [18]، با استفاده از روش پاسخ سطح در قالب طرح باکس بنکن به مدل‌سازی و بهینه‌سازی نانوکامپوزیت پلی‌پروپیلن تقویت‌شده با الیاف کتاف پرداختند. پس از مطالعه و جمع‌بندی نتایج، مشاهده شد که با آمیخته سازی 28.95 wt.% از الیاف کتاف به طول 6.22 mm و همچنین 5 wt.% از سازگار کننده PP-g-MA⁴، بیشترین مقدار استحکام و مدول کششی به ترتیب 32.70 MPa و 2182.33 MPa بدست آمد. شارما و نایاک [19]، به بررسی خواص مکانیکی، ساختاری و حرارتی نمونه‌های نانوذرات اصلاح شده خاک رس/ پلی‌پروپیلن پرداختند. آن‌ها به سبب نتایج بدست آمده دریافتند که استحکام و مدول کششی پلی‌پروپیلن خالص با افزایش نانورس به

ترتیب 95٪ و 152٪ افزایش داشت. بعلاوه، از طریق آزمون‌های حرارتی مانند آنالیز حرارتی TGA⁵ و گرما سنجی تفاضلی روشی DSC⁶ به افزایش 87° دمای تخریب و 4° نقطه ذوب نسبت به پلی‌پروپیلن پایه پی بردند. گل پرور و فصیحی [20] با بهره‌گیری از روش طراحی آزمایش، تأثیر افزودن 3، 6 و 9 wt.% از نانوسیلیکای پودری ترکیب‌شده با پلی‌پروپیلن/ الاستومر اولفینی را بر خصوصیات مکانیکی مورد مطالعه قرار دادند. بررسی نتایج نشان داد که استفاده نکردن از سازگار کننده موجب تخریب و کلوخه شدن نانوذرات در ترکیب پلیمری شد. همین موضوع سبب شد تا پس از افزودن نانوذرات به ماتریس پایه، استحکام کششی و ضربه‌ای که از خصوصیات مکانیکی کامپوزیت بشمار می‌روند، کاهش یابد. اما، افزودن سازگار کننده موجب افزایش مدول الاستیک شد. بعلاوه، با افزایش درصد وزنی الاستومر اولفینی تا 20 wt.%، تغییر طول تا شکست و استحکام ضربه‌ای نمونه‌ها در مقایسه با پلی‌پروپیلن خالص و ترموپلاستیک الاستومر ساخته شده با 10 wt.% از الاستومر اولفینی افزایش پیدا کرد. دانش پایه و همکارانش [21]، در پژوهش‌های خود با بهره‌گیری از روش پاسخ سطح، مطالعاتی را بر روی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت پلی‌پروپیلن/ پلی‌اتیلن خطی چگالی پایین همراه با افزودن نانوذرات تیتانیوم انجام دادند. آن‌ها دریافتند که در اثر حضور نانوذرات تیتانیوم در ترکیب ابتدایی پلی‌پروپیلن/ پلی‌اتیلن خطی چگالی پایین، مقدار استحکام کششی و تغییر طول تا شکست کاهش یافت. اما، مدول الاستیسیته و استحکام ضربه‌ای به ترتیب 7٪ و 5٪ نسبت به حالت بدون نانوذره تیتانیوم افزایش پیدا کرد.

لاستیک طبیعی از جمله الاستومرهای مهمی است که در ترکیبات نانوکامپوزیتی جهت افزایش انعطاف‌پذیری نمونه‌ها در برابر آزمون‌های کشش و ضربه بکار می‌رود [22، 23]. در پژوهش صورت گرفته توسط شریکا و همکارانش [24]، به بررسی سیر الکترومغناطیسی تشکیل شده در اثر ترکیب ریزساختار PP/NR با نانوذرات MWCNT پرداخته شد. در این مطالعه، نتیجه آزمایش‌ها نشان داد که کارکرد دی‌الکتریک، وابستگی بسیار زیادی به نانوذرات MWCNT موجود در ماتریس پایه پلیمری دارد. همچنین، افزایش چشمگیری در عملکرد سیر الکترومغناطیسی ایجاد شده، مشاهده شد. علت آن رسانایی الکتریکی بالا و رساناهای دی‌الکتریک ناهمگن به سبب وجود نانوذرات در فاز الاستومری NR بود. بررسی‌هایی که به تازگی توسط چاندران و همکارانش [25] انجام شد، مطالعه بر روی تأثیر تغییر شکل آلی ناشی از تحول سطحی، مورفولوژی و خصوصیات فیزیکی - مکانیکی نانوکامپوزیت‌های مخلوط مبتنی بر PP/NR بود. آن‌ها گزارش کردند که در اثر افزودن نانوذره رس به ترکیب PP/NR، فاز مورفولوژی اصلاح شد و خصوصیات فیزیکی - مکانیکی نیز بهبود پیدا کرد که برای استفاده‌های گوناگون در صنعت خودرو کاربرد دارد.

مطالعات گسترده‌ای در حوزه ساخت و بهینه‌سازی نانوکامپوزیت‌های پلیمری در جهت تولید ترکیبی نو با بهترین خواص مکانیکی و ساختاری برای رفع نیازهای متعدد صنایع مختلف انجام گرفته است. در همین راستا، پژوهش حاضر برای نخستین بار خواص مکانیکی، حرارتی و ساختاری نمونه‌های نانوکامپوزیتی PP/NR تقویت‌شده با نانوذرات پرلیت که با استفاده از فرایند اختلاط مذاب از طریق دستگاه مخلوط‌کن داخلی دو مارپیچه تحت درصدهای وزنی 10، 20، 30، 40 و 50 wt.% برای لاستیک طبیعی و 1، 3، 5، 7 و 9 wt.% برای نانوذره پرلیت ساخته شده‌اند، را مورد بررسی قرار داده است. از طرفی، با بهره‌گیری از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت و روش پاسخ سطح اعتبار نتایج بدست

⁴ Maleic anhydride (MA)-grafted PP⁵ Thermogravimetric analysis⁶ Differential scanning calorimetry¹ Polypropylene² Response surface methodology³ Taguchi

نمونه‌ها، از آزمون ضربه سرعت پایین آیزود بر اساس استاندارد ASTM D256 استفاده شد. همچنین، دستگاه برش لیزر (CNC) برای تهیه نمونه‌های آزمون ضربه با ابعاد $80 \times 10 \times 4$ mm مورد استفاده قرار گرفت. بدین ترتیب، استحکام ضربه‌ای نمونه‌ها توسط دستگاه آزمون ضربه محصول شرکت آلمانی زیوک با انرژی 200J سنجیده شد. شایان ذکر است، به منظور کاهش خطاهای انسانی و آزمایشگاهی، آزمون‌ها برای 3 نمونه تکرار شدند و میانگین نتایج استخراج و برای هر نمونه با تیرانس اندکی در جدول 4 گزارش شد. در شکل 1 تصاویری از نمونه‌های آزمون کشش و ضربه ارائه شده است.

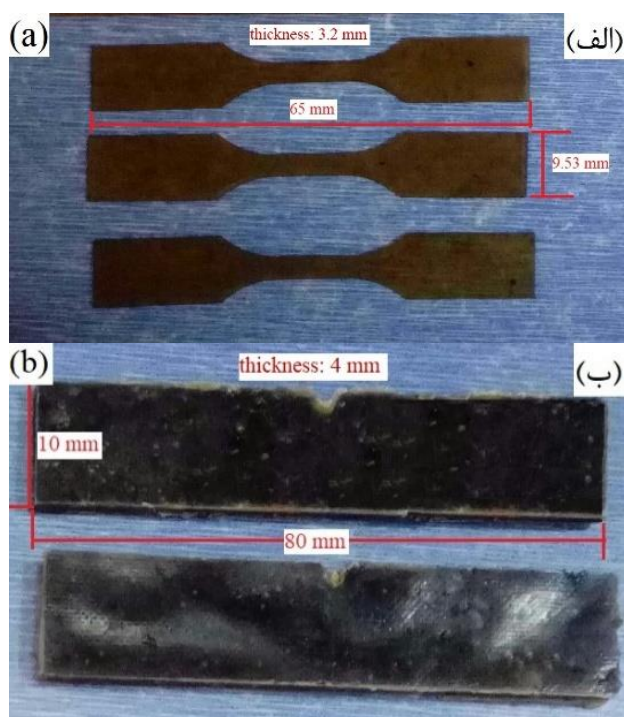


Fig. 1 The pictures of a) tensile test samples and b) low velocity impact test samples

شکل 1 تصاویر الف) نمونه‌های آزمون کشش و ب) نمونه‌های آزمون ضربه سرعت پایین

2-3- آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی

جهت عکس‌برداری از شکستگی‌های ایجاد شده در نواحی باریک شدگی بر اثر آزمون کشش و نیز شکستگی‌های رخ داده در اثر آزمون ضربه، دو نمونه در مایعی از نیتروژن قرار داده شدند تا شبکه بلوری آن‌ها دچار گسستگی شوند. از آنجایی که هدف از این آزمون، بررسی میزان اندازه فاز الاستومری ترکیب تهیه شده و فاز نانوذرات پرلیت پراکنده شده در ماتریس زمینه می‌باشد، می‌بایست به جهت تشخیص اندازه این فازها، با قرار دادن نمونه نانوکامپوزیتی مدنظر در مایعی از تولوئن، الاستومر موجود در آن بعد از گذشت یک شبانه روز حل شود. در این فرایند حفره‌های تیره‌رنگ نمایان شده نشان‌دهنده فاز الاستومری نمونه تولید شده است. همچنین، پیش از عکس‌برداری از نمونه، به کمک ورقه‌های نازکی از روکش‌های طلا، سطح شکست پوشانده شد تا با جذب الکترون‌های آزاد بر روی سطح، باعث افزایش کیفیت و بهبود تصویر ثبت شده شود. در این آزمون برای ثبت تصاویر SEM، از دستگاه محصول شرکت تسکن¹ جمهوری چک با مدل تجاری ویج² در شرایط دمایی محیط استفاده شد.

آمده از آزمون‌های تجربی به وسیله جداول آنالیز واریانس، مدل‌های ریاضی و نمودارهای داده‌های تجربی بر حسب داده‌های پیش‌بینی شده بررسی شده‌اند.

2- تجربی

1-2- مواد اولیه و آماده‌سازی نمونه‌ها

ساخت نانوکامپوزیت PP/NR/Perlite نیازمند تهیه مخلوطی از مواد اولیه شامل پلی‌پروپیلن، لاستیک طبیعی و نانوذرات پرلیت است. به همین جهت، از پلی‌پروپیلن با نام تجاری RP340N محصول شرکت پتروشیمی جم به عنوان ماده زمینه و لاستیک طبیعی با نام تجاری SMR 20 محصول کشور مالزی به عنوان الاستومر برای افزایش انعطاف‌پذیری ترکیب نانوکامپوزیتی در این پژوهش استفاده شد. همچنین، به سبب بررسی نحوه تغییرات ایجاد شده در خصوصیات مکانیکی، حرارتی و ریزساختار نمونه‌های تولید شده، در هر مرحله درصد مشخصی از نانوذرات پرلیت به عنوان تقویت‌کننده به ترکیب ابتدایی (پلی‌پروپیلن/لاستیک طبیعی) اضافه شد. مشخصات و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی هر سه ماده تشکیل‌دهنده در جدول 1 ارائه شده است. پیش از آغاز فرایند ساخت نمونه‌های نانوکامپوزیتی با روش اختلاط مذاب، به منظور حذف رطوبت احتمالی در پلی‌پروپیلن خالص و نانوذرات پرلیت، این مواد به مدت 24 ساعت در محفظه خشک‌کن (آون) با دمای 80°C قرار داده شدند. سپس، درون دستگاه مخلوط‌کن داخلی دو محوره طبق درصدهای وزنی مشخص، با سرعت اختلاط 60 rpm به مدت 12 min در دمای 180°C مخلوط شدند. پس از ذوب و ترکیب مواد با یکدیگر، ماده نهایی از داخل محفظه دستگاه مخلوط‌کن خارج شد. در نهایت پس از سرد شدن، ماده نانوکامپوزیتی برای قالب‌گیری و ساخت نمونه‌های ورقه‌ای در داخل قالبی به شکل مربع با ابعاد $150 \times 150 \times 3.2$ mm زیر دستگاه پرس داغ گذاشته شد. سپس، ماده تحت فشار 150 bar و حرارت 185°C قرار گرفت تا پس از گذشت زمان 10 min، مواد ترکیب شده در دستگاه مخلوط‌کن داخلی به صورت صفحه‌ای مربعی با ضخامت 3.2 mm ایجاد شود.

جدول 1 خواص فیزیکی و شیمیایی مواد مورد استفاده [13]

Table 1 The physical and chemical properties of materials [13]

مواد	خواص
چگالی	0.91 g/cm ³
پلی‌پروپیلن	شاخص جریان مذاب 11 g/10 min
	سختی 94 R Scale
چگالی	0.98 g/cm ³
لاستیک طبیعی	ناخالصی 0.16 wt.%
	انعطاف‌پذیری 30 wt.%
چگالی	2.2 g/cm ³
نانوذره پرلیت	شاخص سختی 5.5 Mohs

2-2- آزمون کشش و ضربه سرعت پایین

در این مقاله، از استاندارد ASTM D638 برای تهیه نمونه‌های دمبلی شکل آزمون کشش استفاده شد. به طوری که پس از قالب‌گیری مواد، نمونه‌های دمبلی با ابعاد $65 \times 9.53 \times 3.2$ mm به کمک دستگاه لیزر (CNC) از روی ورق-های بدست آمده در مرحله قبل، برش زده شدند. در ادامه از دستگاه آزمون کشش ساخت شرکت سنتام جهت بررسی نمونه‌های دمبلی با شرایط دمایی 25°C و سرعت فک 5 mm/min بهره گرفته شد. جهت ارزیابی استحکام ضربه‌ای

² Vage

¹ Tescan

3- طراحی آزمایش

روش بهینه‌سازی پاسخ سطح، یکی از روش‌های نوین و پرکاربرد در بهینه‌سازی پارامترها به جهت بدست آوردن حداکثر خواص مکانیکی است. در این روش، با در نظر گرفتن تأثیر هر کدام از پارامترها و برهمکنش‌های بین آن‌ها بر روی پاسخ‌های مکانیکی و آنالیز واریانس می‌توان به کمک مدل‌های ریاضی و نمودار-های دوبعدی و سه‌بعدی پاسخ سطوح، خواص مکانیکی را پیش‌بینی کرد. پیش‌بینی خواص مکانیکی با توجه به مدل ریاضی بدست آمده بر اساس تأثیر هر کدام از مؤلفه‌های مستقل، مربعات و برهمکنش‌های بین آن‌ها می‌تواند به وسیله‌ی معادله چندجمله‌ای زیر تحت عنوان معادله (1) صورت پذیرد.

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

در این معادله X_i و X_j نشان‌دهنده متغیرهای ورودی، k تعداد متغیرها و y بیانگر پاسخ‌ها هستند. علاوه، β_i ، β_{ij} و β_{ii} ضرایب رگرسیون، β_0 ضریب ثابت و ε ماتریس خطا هستند [26].

همانطور که در جدول 2 ذکر شده است برای انجام این آزمایش، حدود تغییرات پارامترها در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت با استفاده از مدل پنج سطحی روش مرکب مرکزی تبیین شد. به طوری که برای این طراحی، از دو پارامتر موادی لاستیک طبیعی و نانوذرات پرلیت با درصد‌های وزنی 10، 20، 30، 40 و 50 wt.% و 1، 3، 5، 7 و 9 wt.% در ترکیب نانوکامپوزیتی PP/NR/Perlite بهره گرفته شد [13، 24]. از این رو، درصد‌های وزنی نمونه‌ها جهت اختلاط در دستگاه مخلوط‌کن داخلی و تولید نمونه‌های استاندارد برای شرکت در آزمون-های مکانیکی از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت استخراج و در جدول 3 گزارش شد.

جدول 2 پارامترهای موادی و حدود عملکرد آن‌ها بر اساس مدل پنج سطحی CCD
Table 2 Material parameters and their performance limits based on the five surfaces model of CCD

پارامتر	واحد	علامت اختصاری				
		2-	1-	0	1+	2+
NR content	%wt.	10	20	30	40	50
Perlite content	%wt.	1	3	5	7	9

جدول 3 نام نمونه‌ها بر اساس طراحی مرکب مرکزی (CCD)

Table 3 The name of the samples based on central composite design (CCD)

ردیف	کد نمونه‌ها	PP (wt.%)	NR (wt.%)	Perlite (wt.%)
1	PP70/N30/P0	70	30	0
2	PP65/N30/P5	65	30	5
3	PP65/N30/P5	65	30	5
4	PP65/N30/P5	65	30	5
5	PP61/N30/P9	61	30	9
6	PP69/N30/P1	69	30	1
7	PP45/N50/P5	45	50	5
8	PP85/N10/P5	85	10	5
9	PP53/N40/P7	53	40	7
10	PP57/N40/P3	57	40	3
11	PP73/N20/P7	73	20	7
12	PP77/N20/P3	77	20	3

4- بحث و نتیجه‌گیری

1-4- خواص مکانیکی

نمودار تنش- کرنش بدست آمده از آزمون کشش برای نمونه‌های موجود در جدول 3 به صورت شکل 2 گزارش شده است. همچنین، نتایج خواص مکانیکی (الف) مدول کششی و (ب) استحکام ضربه‌ای حاصل از آزمون‌های تجربی کشش و ضربه برای نمونه‌های نانوکامپوزیت PP/NR/Perlite با درصد‌های متفاوت وزنی به صورت نمودار در شکل 3 ارائه شده است. علاوه بر این، حدود خطاها به همراه میانگینی از نتایج حاصل شده برای این دو خاصیت مکانیکی از طریق تکرار هر آزمایش برای 3 نمونه در جدول 4 مشخص شده است. در این جدول نمونه PP65N/30P5 از سه بار تکرار برخوردار است.

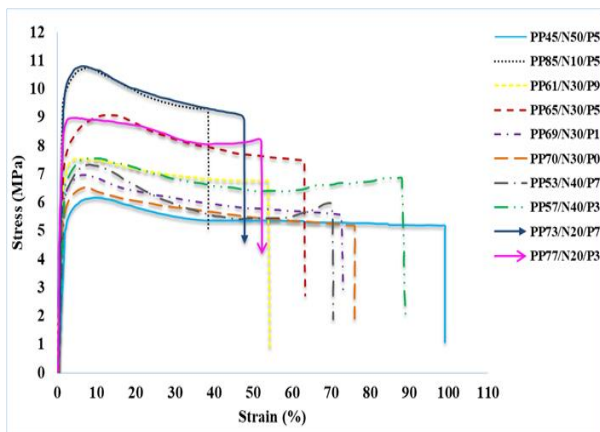


Fig. 2 The stress - strain diagram of samples

شکل 2 نمودار تنش- کرنش نمونه‌ها

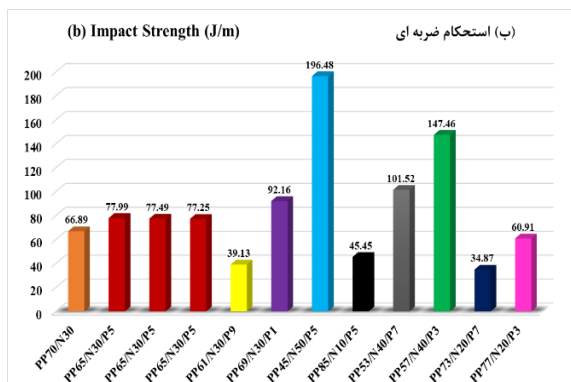
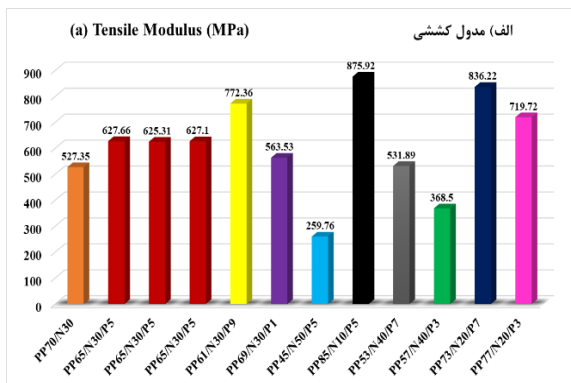


Fig. 3 The values of mechanical properties a) tensile modulus and b) impact strength

شکل 3 مقادیر خواص مکانیکی (الف) مدول کششی و (ب) استحکام ضربه‌ای

به تأثیر مثبت افزایش مقدار درصد وزنی نانوذرات پرلیت بر مقادیر مدول کششی اشاره کرد. اما با بیشتر شدن سهم لاستیک طبیعی در نانوکامپوزیت PP/NR/Perlite، مدول کششی روند کاهشی به خود گرفته است. بر اساس این نمودارها مشاهده شد که حداکثر مقدار مدول کششی 822.99 MPa بدست می‌آید. این مقدار در شرایطی بدست آمد که از 20 wt.% لاستیک طبیعی و 7 wt.% نانوذرات پرلیت (PP73N/20P/7) در هنگام ادغام مواد استفاده شد. از آنجایی که خاصیت مدول کششی ترکیب نهایی، وابسته به مدول اجزا تشکیل‌دهنده ترکیب است، در نتیجه می‌توان این رفتار (افزایش مدول کششی) را ناشی از پخش مناسب نانوذرات در درصدهای 3 تا 7 wt.% دانست [27-29]. با توجه به این مطالب، استنباط می‌شود که مقادیر خواص مکانیکی از وابستگی بالایی به پارامترهای موادی برخوردار هستند. به طوری که، به واسطه این وابستگی می‌توان با انتخاب مقادیر مناسب عددی برای پارامترهای درصد وزنی لاستیک طبیعی و نانوذرات پرلیت، حداکثر مقدار خواص مکانیکی را مشخص کرد. از طرفی، بررسی نتایج تجربی حاصل از آزمون کشش برای دو نمونه PP73N/20P/7 و PP77N/20P/3، بیانگر افزایش 13.93% مقدار مدول کششی نمونه PP73N/20P/7 نسبت به نمونه PP77N/20P/3 است. علت این امر، کاهش ناحیه پلاستیکی در نمودار تنش- کرنش (شکل 2) در نمونه PP73N/20P/7 در قیاس با نمونه PP77N/20P/3 به واسطه افزایش درصد وزنی نانوذرات پرلیت به 7% و تجمع زیاد آن‌ها در اطراف فاز الاستومری است. براساس قانون وو افزایش درصد وزنی نانوذرات پرلیت در فاز ترموپلاستیک الاستومر تأثیر مستقیمی بر نسبت ویسکوزیته فاز پلیمری پلی‌پروپیلن (PP) و فاز الاستومری لاستیک طبیعی (NR) دارد که منجر به کاهش اندازه حفره‌های ایجاد شده در ناحیه پلاستیکی می‌شود و در نتیجه افزایش مدول کششی را به دنبال دارد [30، 31].

جدول 4 مقادیر خواص مکانیکی مدول کششی و استحکام ضربه‌ای

Table 4 The values of mechanical properties of tensile modulus and impact strength

Impact Strength (J/m)	Tensile Modulus (MPa)	کد نمونه‌ها
66.89 ± 0.3	527.35 ± 0.94	PP70/N30/P0
77.99 ± 1.1	627.66 ± 3.89	PP65/N30/P5
77.49 ± 0.6	625.31 ± 1.27	PP65/N30/P5
77.25 ± 0.5	627.1 ± 2.43	PP65/N30/P5
39.13 ± 0.2	772.36 ± 1.46	PP61/N30/P9
92.16 ± 1.4	563.53 ± 0.81	PP69/N30/P1
196.48 ± 2.1	259.76 ± 1.09	PP45/N50/P5
45.45 ± 0.2	875.92 ± 2.07	PP85/N10/P5
101.52 ± 1.7	531.89 ± 2.67	PP53/N40/P7
147.46 ± 1.9	368.5 ± 2.96	PP57/N40/P3
34.87 ± 0.2	836.22 ± 1.29	PP73/N20/P7
60.91 ± 0.3	719.72 ± 1.98	PP77/N20/P3

2-4- نتایج مدول کششی

نتایج آنالیز واریانس برای خاصیت مدول کششی در جدول 5 آورده شده است. از مقایسه نتایج این جدول دریافت شد که مؤلفه اثر متقابل لاستیک طبیعی و نانوذره پرلیت (N×P) به واسطه مقدار ضریب P بزرگ‌تر از 0.05 در نگارش نهایی معادله رگرسیون برای پاسخ مدول کششی در دو حالت تجربی و پیش‌بینی شده حذف می‌شود. در صورتی که، دیگر مؤلفه‌های مستقل نظیر (N)، (P) و اثر مربعات (N²) و (P²) نقش اساسی در تعیین مقدار پاسخ مدول کششی به روش بهینه‌سازی آنالیز واریانس دارند. تأثیرگذاری این پارامترها بر مدول کششی به جهت ضریب P پایین‌تر، از اطمینان 95% برخوردار هستند.

جدول 5 نتایج بدست آمده از روش آنالیز واریانس برای مدول کششی

Table 5 The obtained result of analysis of variance for tensile modulus

P ضریب	F آزمون	مربعات اصلی	مجموع مربعات	پارامترها
0.0001>	273.46	69646.36	3.482E +05	نمونه
0.0001>	1166.16	2.970E +05	2.970E +05	N
0.0001>	159.21	40548.00	40548.00	P
0.2018	2.16	549.67	549.67	N×P
0.0104	15.93	4056.19	4056.19	N ²
0.0338	8.40	2140.08	2140.08	P ²
.....	254.69	7.18	Residual
0.0035	281.06	423.47	7.06	Lack of Fit
R ²		0.9927	R ² Adjusted	0.9964
Precision		53.3912	R ² Predicted	0.9633

در نتیجه، مدل ریاضی نهایی جهت تعیین مقدار پاسخ مدول کششی به صورت روابط تجربی (بر اساس مقادیر تجربی) و پیش‌بینی شده (بر اساس مقادیر حاصل از آنالیز واریانس) در معادلات (2) و (3) ارائه شده است.

$$\text{Tensile Modulus (MPa)} = 973.139 - 9.964 \times N - 14.843 \times P - 0.144 \times N^2 + 2.632 \times P^2 \quad (2) \text{ Actual Eq.}$$

$$\text{Tensile Modulus (MPa)} = 623.23 - 157.32 \times N - 58.13 \times P - 14.50 \times N^2 + 10.53 \times P^2 \quad (3) \text{ Predicted Eq.}$$

نمودارهای الف) دوعدی و ب) سه‌بعدی شکل 4 بیانگر پاسخ سطح مدول کششی در درصدهای مختلف وزنی از پارامترهای موادی لاستیک طبیعی و نانوذره پرلیت است. با توجه به مقادیر پاسخ‌های حاصل شده در سطوح مختلف که به واسطه تغییر در مقدار درصد وزنی مواد اولیه ایجاد شده است، می‌توان

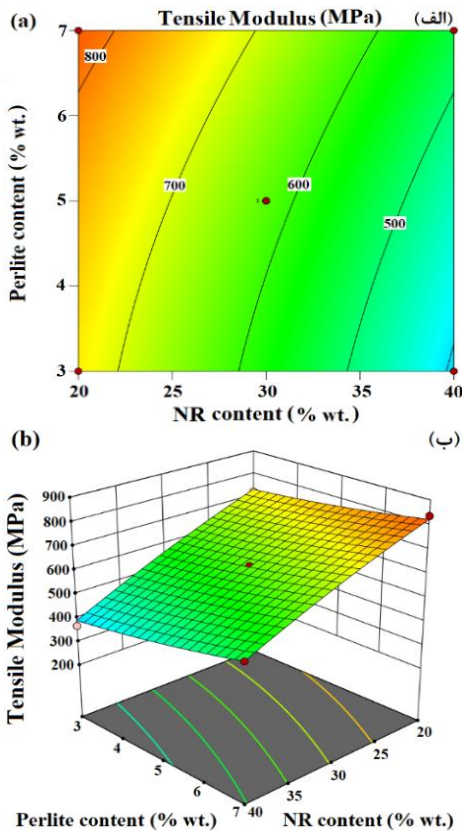


Fig. 4 Graphs of a) 2D b) 3D of the effect of interaction parameters on tensile modulus

شکل 4 گراف‌های الف) دوعدی و ب) سه‌بعدی اثر متقابل پارامترها بر مدول کششی

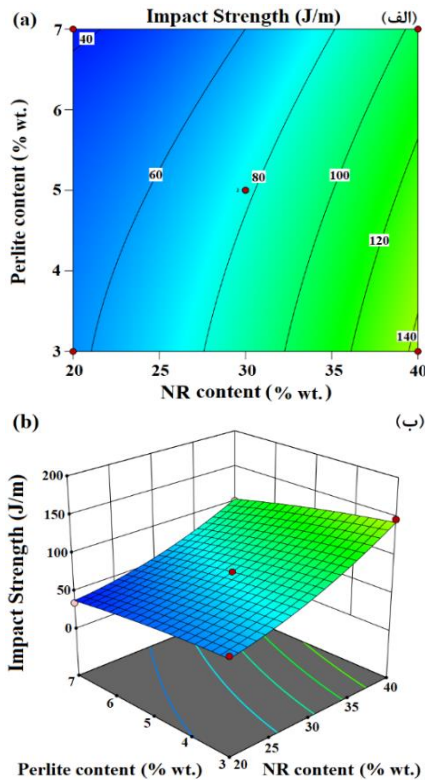


Fig. 5 Graphs of a) 2D b) 3D of the effect of interaction parameters on impact strength

شکل 5 گراف‌های الف) دوبعدی و ب) سه‌بعدی اثر متقابل پارامترها بر استحکام ضربه‌ای

4-4-4 اعتبارسنجی مدل‌های ریاضی

مقایسه داده‌های تجربی بدست آمده از آزمون‌های مکانیکی (کشش و ضربه) و داده‌های پیش‌بینی شده از فرمولاسیون آنالیز واریانس در نموداری نسبت به خط مورب 45° سنجیده شد. به طوری که، هر چه این داده‌ها به خط مورب نزدیک باشند، می‌توان نتیجه گرفت که داده‌های تجربی و پیش‌بینی شده از تطابق بالایی نسبت به یکدیگر برخوردار هستند که این امر موجب افزایش دقت در نتایج نهایی و اعتبار بخشیدن به پژوهش صورت گرفته می‌شود. از این رو، برای درک بهتر تطابق این داده‌ها با خط 45°، در شکل 6 نمودارهای مقادیر تجربی- پیش‌بینی شده برای دو خاصیت مکانیکی مدول کششی و استحکام ضربه‌ای آورده شده است. همچنین، مقایسه ستون خطای مربعات اصلی موجود در جداول 5 و 6 آنالیز واریانس و نمودارهای تجربی- پیش‌بینی شده، نشان از تطابق مناسب مقادیر باقی‌مانده با داده‌های تجربی دارند که برای هر یک از خصوصیات مکانیکی مدول کششی و استحکام ضربه‌ای صادق است (این موضوع توسط مدل‌های ریاضی محاسبه شده در بخش 2-4 و 3-4 نیز قابل درک است). علاوه بر این، در صورتی که دیگر مقادیر حاصل شده در این جداول همانند مقدار نسبت سیگنال به نویز (Precision) بزرگ‌تر از 4 و اختلاف بین داده‌های ضرایب همبستگی پیش‌بینی شده (R² Predicted) و داده‌های ضرایب همبستگی تعدیل یافته (R² Adjusted) از 0.2 کمتر باشد، می‌توان نتیجه گرفت که داده‌های بدست آمده از نتایج تجربی و پیش‌بینی شده، با اختلاف ناچیزی نسبت به یکدیگر با هم تطابق دارند. علاوه، در پیش‌بینی خواص مکانیکی می‌توان از مدل‌های بدست آمده که از همبستگی بسیار بالایی با داده‌های تجربی برخوردارند، استفاده کرد. این همبستگی برای مدول کششی و استحکام ضربه‌ای به ترتیب (R² = 0.9927) و (R² = 0.9947) محاسبه شدند [33].

3-4- نتایج استحکام ضربه‌ای

نتایج آنالیز واریانس برای استحکام ضربه‌ای در جدول 6 ارائه شده است. با مشاهده داده‌های حاصل شده در این جدول دریافت شد که تمامی مؤلفه‌های موجود به علت ضریب P کوچک‌تر از 0.05 بر روی مقدار پاسخ‌های تجربی و پیش‌بینی شده استحکام ضربه‌ای بدست آمده از معادلات رگرسیون مؤثر هستند. از این رو، مؤلفه‌های مورد نظر با اطمینان 95٪ بر روی مقدار پاسخ استحکام ضربه‌ای نقش دارند. این روش به کاهش زمان و هزینه‌های پژوهش کمک شایانی کرد.

جدول 6 نتایج بدست آمده از روش آنالیز واریانس برای استحکام ضربه‌ای

Table 6 The obtained results of analysis of variance for impact strength

ضریب P	آزمون F	مربعات اصلی	مجموع مربعات	پارامترها
0.0001>	376.91	4699.13	1022.82	نمونه
0.0001>	1385.33	17271.81	17271.81	N
0.0001>	211.87	2641.52	2641.52	P
0.0372	7.94	99.00	99.00	N×P
0.0001>	181.49	2262.76	2262.76	N ²
0.0135	13.96	174.02	174.02	P ²
.....	12.47	62.34	Residual
0.0263	37.13	20.68	62.05	Lack of Fit
R ²		0.9947	R ² Adjusted	0.9974
Precision		61.6884	R ² Predicted	0.9723

بنابراین، معادلات رگرسیون نوشته شده برای استحکام ضربه‌ای که به عنوان مدل ریاضی برای تعیین مقدار پاسخ استحکام ضربه‌ای کاربرد دارد، به صورت روابط تجربی و پیش‌بینی شده در معادلات 4 و 5 آمده است.

$$\text{Impact Strength (J/m)} = 42.536 - 1.458 \times N + 7.55 \times P - 0.248 \times N \times P + 0.108 \times N^2 - 0.750 \times P^2 \quad (4) \text{ Actual Eq.}$$

$$\text{Impact Strength (J/m)} = 77.89 + 37.94 \times N - 14.84 \times P - 4.98 \times N \times P + 10.83 \times N^2 - 3.00 \times P^2 \quad (5) \text{ Predicted Eq.}$$

نمودارهای پاسخ سطح الف) دوبعدی و ب) سه‌بعدی نمایش داده شده در شکل 5 مقدار پاسخ سطح استحکام ضربه‌ای در نمونه‌های PP/NR/Perlite تهیه شده بر حسب پارامترهای متنوع موادی درصد وزنی لاستیک طبیعی و نانوذرات پرلیت را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودارها، ملاحظه می‌شود که در صورت استفاده از 3 wt.% از نانوذرات پرلیت، استحکام ضربه‌ای نمونه‌ها در اثر افزایش درصد وزنی لاستیک طبیعی در ترکیب، به مرور افزایش پیدا کرده است. به طوری که افزایش مقدار استحکام ضربه‌ای، حداکثر تا 147.46 J/m برای نمونه PP57N40P3 ادامه دارد. همچنین، در مقدار ثابت 7 wt.% از نانوذرات پرلیت با افزایش لاستیک طبیعی به مقدار 40 wt.% می‌توان استحکام ضربه‌ای را از 37.91 J/m به 103.84 J/m افزایش داد. اما، افزایش 3 wt.% از نانوذرات پرلیت، سبب کاهش مقدار استحکام ضربه‌ای نمونه‌ها شد. به عبارت دیگر، بررسی‌های بیشتر نشان داد در مقدار ثابت 40 wt.% از لاستیک طبیعی، با افزایش نانوذرات پرلیت از 3 wt.% تا 7 wt.% استحکام ضربه‌ای از 147.46 J/m به 103.84 J/m کاهش می‌یابد. در نتیجه این امر، می‌توان به چسبندگی نانوذرات پرلیت به واسطه افزایش تعداد ذراتشان در ترکیب پایه و عدم نفوذ مناسب پلیمر پایه (پلی پروپیلن) در میان این ذرات اشاره کرد به نحوی که منجر به شکل گرفتن نقاط تمرکز تنش در ماده نهایی شده است [34, 33, 32, 76].

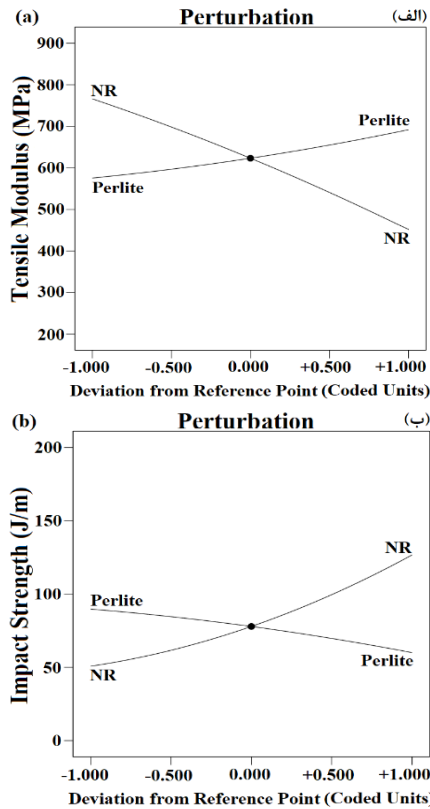


Fig. 7 The effect of material parameters on a) tensile modulus and b) impact strength

شکل 7 اثر پارامترهای موادی بر الف) مدول کششی و ب) استحکام ضربه‌ای

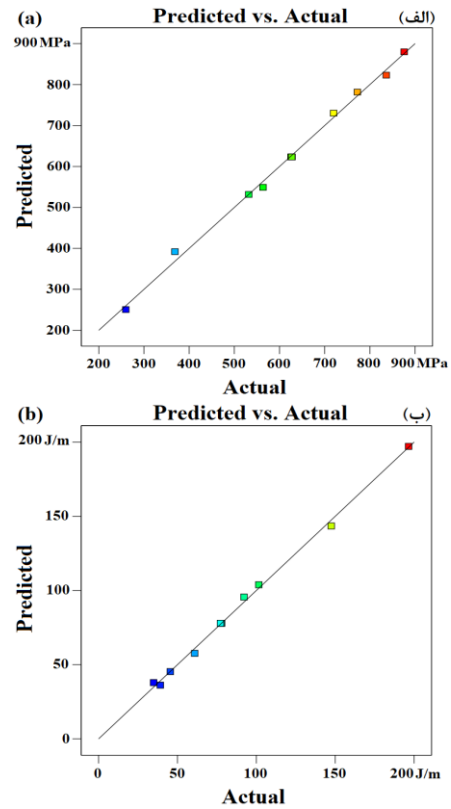


Fig. 6 Comparison of experimental and predicted data for a) tensile modulus b) impact strength relative to the diagonal line 45°

شکل 6 مقایسه داده‌های تجربی و پیش‌بینی شده برای الف) مدول کششی و ب) استحکام ضربه‌ای نسبت به خط مورب 45°

5-4- بهینه‌سازی چند متغیره

شکل 7 بیانگر نحوه اثرگذاری دو پارامتر ورودی درصد وزنی لاستیک طبیعی (N) و درصد وزنی نانوذرات پرلیت (P) بر روی هر یک از خصوصیات مکانیکی مطالعه شده نظیر مدول کششی و استحکام ضربه‌ای است. با توجه به این تصاویر مشخص شد که بیشتر شدن مقدار درصد وزنی لاستیک طبیعی در ترکیب PP/NR/Perlite سبب اثرگذاری منفی این پارامتر بر مدول کششی شده است. در صورتی که این امر بر استحکام ضربه‌ای اثری مثبت دارد. بعلاوه، مشاهدات نشان می‌دهند که افزایش مقدار درصد وزنی نانوذرات پرلیت در حین اختلاط، تأثیر مثبتی بر مدول کششی گذاشته است اما بر روی استحکام ضربه‌ای اثر کاهشی دارد. بررسی‌ها نشان دادند که تأثیرات هر یک از پارامترهای موادی بر روی خصوصیات مختلف مکانیکی متفاوت است. از این رو، می‌توان با استفاده از جداول 5 و 6 آنالیز واریانس و روابط ریاضی نوشته شده، یک تابع هدف از پارامترهای ورودی و خصوصیات مکانیکی در جهت بیشینه کردن هم‌زمان خصوصیات مکانیکی نمونه ساخته شده تعیین کرد. همانطور که در جدول 7 مشخص شده است، مقدار درصدهای وزنی لاستیک طبیعی و نانوذرات پرلیت در شرایطی که خصوصیات مکانیکی به طور هم‌زمان با استفاده از آنالیز واریانس بیشینه شدند را به ترتیب 35.268 wt. و 4.046 wt. نشان می‌دهد. ضمن آن که، تحت این مقادیر حداکثر مقدار مدول کششی 508.04 MPa و استحکام ضربه‌ای 108.52 J/m تعیین گردید. این مقادیر از نمودارهای بدست آمده به کمک نرم‌افزار دیزاین اکسپرت که در شکل 8 و 9 به ترتیب برای مدول کششی و استحکام ضربه‌ای آمده است، استخراج شد.

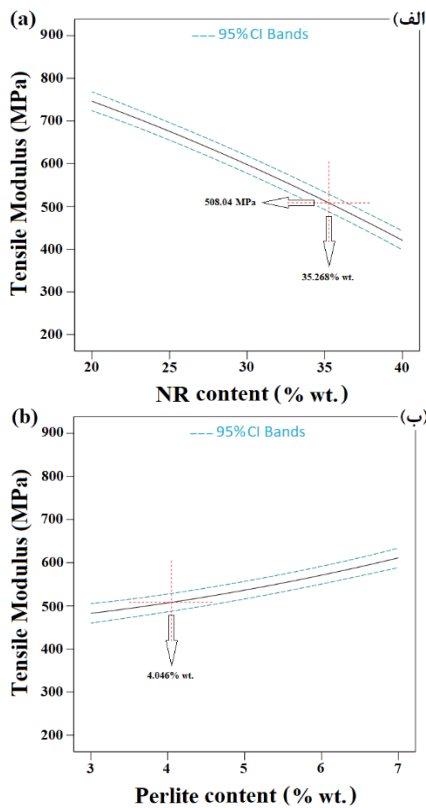


Fig. 8 The curves of optimal parameters in maximizing of tensile modulus

شکل 8 نمودار بهینه پارامترها در جهت بیشینه‌سازی مدول کششی

در برابر آزمون کشش و ضربه برخوردار هستند. به همین جهت می توان بیان کرد که تفاوت های ایجاد شده در مقدار خواص مکانیکی نمونه های تهیه شده با درصد وزنی های گوناگون ناشی از تغییر در مقدار ویسکوزیته ترکیب و استفاده از نانوذرات با درصد های وزنی متنوع است. به بیان دیگر، با مشاهده اندازه حفره ها در نمونه های (ب) و (پ)، دریافت شد که بکارگیری 5 wt.% از نانوذرات پرلیت در ترکیب، توزیع بهتر نانوذرات را در فاز پایه پلیمری به همراه دارد. این امر سبب کاهش اندازه حفره های الاستومری در سراسر سطح شکست و افزایش خواص مکانیکی به واسطه افزایش مقاومت در برابر آزمون های کشش و ضربه ای شده است. اما با توجه به کلوخگی و تجمع نانوذرات در اثر افزایش مقدار آن به 9 wt.%، اندازه حفره های فاز الاستومری در مقایسه با نمونه (ب) کمی بزرگ تر بوده و به دلیل افزایش اندازه حفره های الاستومری از استحکام ضربه ای پایین تری نسبت به این نمونه برخوردار است. از طرفی، تصاویر مپینگ ثبت شده از سطح شکست برای دو نمونه الف) PP65N/30P/5 و ب) PP61N/30P/9 که در شکل 11 آمده است، نحوه پخش نانوذرات در سطح ماتریس پایه را نشان می دهد. به طوری که تراکم نانوذرات در مناطق مختلف ریزساختار نمونه (ب) اثری مخرب بر روی خواص مکانیکی نمونه تولیدی دارد و منجر به ایجاد نقاط تمرکز تنش در نمونه شده و مقدار استحکام ضربه ای را کاهش می دهد. به همین جهت خاصیت استحکام ضربه ای این نمونه کمتر از نمونه الف) بدست آمد [35, 36].

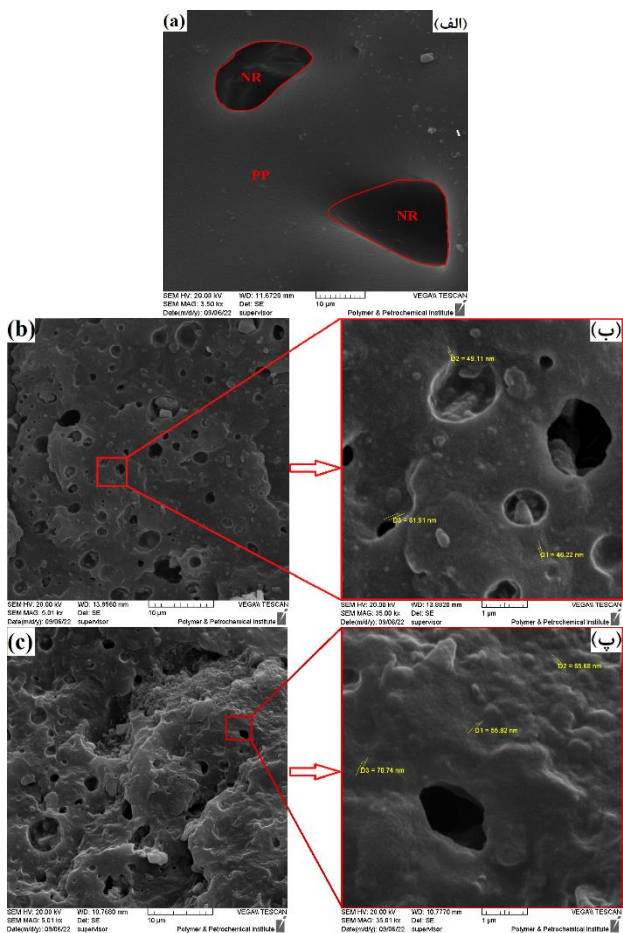


Fig. 10 The SEM images of fracture surface of nanocomposites a) PP₇₀/N₃₀/P₀, b) PP₆₅/N₃₀/P₅ and c) PP₆₁/N₃₀/P₉
 شکل 10 تصاویر SEM از سطح شکست نانوکامپوزیت های الف) PP₇₀/N₃₀/P₀، ب) PP₆₅/N₃₀/P₅ و پ) PP₆₁/N₃₀/P₉

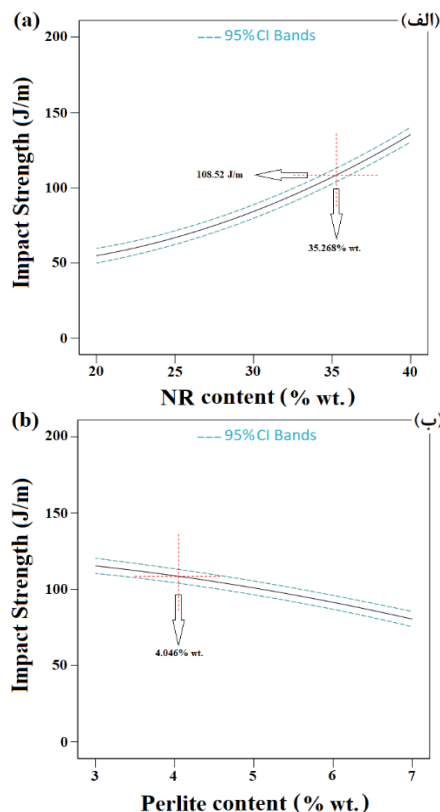


Fig. 9 The curves of optimal parameters in maximizing of impact strength

شکل 9 نمودار بهینه پارامترها در جهت بیشینه سازی استحکام ضربه ای

جدول 7 مقادیر پارامترها برای بیشینه کردن همزمان مدول کششی و استحکام ضربه ای
Table 7 The values of parameters for simultaneous maximization of tensile modulus and impact strength

MS (MPa)	درصد وزنی پرلیت (wt.%)	درصد وزنی لاستیک طبیعی (wt.%)
508.04	4.046	35.268
108.52		

6-4 نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

مطالعه ریزساختار نمونه های نانوکامپوزیتی درک درستی از نحوه اختلاط مواد اولیه با یکدیگر، اندازه فاز الاستومری و همچنین چگونگی پخش نانوذرات در فاز پایه می دهد. در همین راستا، شکل 10 نشان دهنده تصاویر SEM گرفته شده از سطح شکست نمونه های الف) PP₇₀N/30P/0، ب) PP₆₅N/30P/5 و پ) PP₆₁N/30P/9 است. در این تصاویر حفره های تیره به وجود آمده بیانگر اندازه فاز الاستومری خارج شده از ساختار نانوکامپوزیت می باشد. به نحوی که سطح شکست نمونه ها به مدت 24 ساعت در محلول تولوئن غوطه ور شدند. از این رو، پس از مقایسه اندازه حفره ها در سه نمونه مذکور استنباط شد که اندازه فاز الاستومری در نمونه الف) به سبب عدم حضور نانوذرات پرلیت در فاز پایه آن، بزرگ تر از دو نمونه ب) و پ) است. این رفتار اثبات کرد که حضور نانوذرات در ترکیبات کامپوزیتی باعث کوچک شدن اندازه حفره های الاستومری شد. در نتیجه، خواص مکانیکی مدول کششی و استحکام ضربه ای نمونه ب) به جهت کوچک تر بودن اندازه حفره های ایجاد شده در ساختار آن، از مقاومت بیشتری

بزرگی از الاستومر خارج شده توسط محلول تولوئن است که افزودن نانوذرات پرلیت به فاز پایه در دو نمونه PP65N/30P/5 و PP61N/30P/9 منجر به کاهش اندازه فاز الاستومری و افزایش مدول کششی و استحکام ضربه‌ای ماده شد.

(6) تصاویر میکینگ نشان داد، بهترین پخش نانوذرات در فاز پایه نمونه PP65N/30P/5 اتفاق افتاده است. در این نمونه توزیع مناسب نانوذرات با توجه به تصاویر میکینگ کاملاً مشهود است که منجر به افزایش مدول کششی این نمونه در مقایسه با نمونه بدون نانوذره شد. اما با توجه به افزایش درصد وزنی نانوذرات پرلیت در نمونه PP61N/30P/9 مشاهده شد که نانوذرات در نواحی مختلفی متراکم شده‌اند و توزیع مناسبی در فاز پایه به سبب افزایش درصد وزنی پرلیت نسبت به نمونه PP65N/30P/5 انجام نگرفته است. این موضوع افزایش تمرکز تنش در نقاط کلوخه شدگی و در پی آن کاهش مقدار استحکام ضربه‌ای را به همراه داشت.

6- مراجع

- [1] Fereidoon, A., Memarian, S., Albooyeh, A.R. and Tarahomi, S., "Influence of mesoporous silica and hydroxyapatite nanoparticles on the mechanical and morphological properties of polypropylene" *Materials & Design*, Vol. 57, pp. 201-210, 2014.
- [2] Albooyeh, A.R., "The effect of addition of Multiwall Carbon Nanotubes on the vibration properties of Short Glass Fiber reinforced polypropylene and polypropylene foam composites" *Polymer Testing*, Vol. 74, pp. 86-98, 2019.
- [3] Mostafapour, A., Naderi, G. and Nakhaei, M.R., "Effect of process parameters on fracture toughness of PP/EPDM/nanoclay nanocomposite fabricated by novel method of heat assisted friction stir processing" *Polymer Composites*, Vol. 39, No. 7, pp. 2336-2346, 2018.
- [4] Bakhtiari, A., Ashenai Ghasemi, F., Naderi, G. and Nakhaei, M.R., "An approach to the optimization of mechanical properties of polypropylene/ nitrile butadiene rubber/ halloysite nanotube/ polypropylene-gmaleic anhydride nanocomposites using response surface methodology" *Journal of Polymer Composites*, Vol. 41, No. 6, pp. 2330-2343, 2020.
- [5] Albooyeh, A.R. and Fereidoon, A., "The effect of mesoporous silica and carbon nanotube on the vibration properties of polypropylene" *In Persian, Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 1, pp. 67-73., 2014.
- [6] Albooyeh, A.R. and Fereidoon, A., "Effect of Mesoporous Silica and Hydroxyapatite Nanoparticles on the Tensile and Dynamic Mechanical Thermal Properties of Polypropylene and Polypropylene Foam" *In Persian, Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, Vol. 27, pp. 423-439., 2014.
- [7] Hoseinlghab, S., Farahani, M., Safarabadi M., and Nikkhah, M., "Tension-after-impact analysis and damage mechanism evaluation in laminated composites using AE monitoring" *Mechanical Systems and Signal Processing* Vol. 186, 109844, 2023.
- [8] Mohammadkhani, P., Jalali, S.S. and Safarabadi, M., "Experimental and numerical investigation of Low-Velocity impact on steel wire reinforced foam Core/Composite skin sandwich panels" *Composite Structures*, Vol. 256, 112992, 2021.
- [9] Hadad, M., Babazade, A., and Safarabadi, M., "Investigation of the Effect of Graphene Nano Plates and Carbon Nanotubes on the Improvement of Mechanical Properties of Aluminum Matrix Nanocomposites" *In Persian, Journal of Science and Technology of Composites* Vol. 7, pp. 1197-1206, 2021.
- [10] Hadad, M., Babazade, A., and Safarabadi, M., "Investigation and comparison of the effect of graphene nanoplates and carbon nanotubes on the improvement of mechanical properties in the stir casting process of aluminum matrix nanocomposites" *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 109, pp. 2535-2547, 2020.

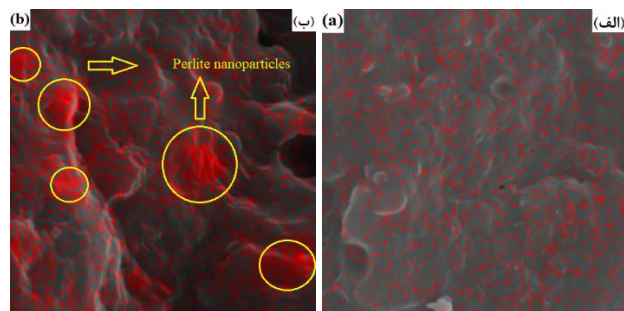


Fig. 11 Mapping images of fracture surface of nanocomposites a) PP₆₅/N₃₀/P₅ and b) PP₆₁/N₃₀/P₉

شکل 11 تصاویر میکینگ از سطح شکست نانوکامپوزیت‌های الف) PP₆₅/N₃₀/P₅ و ب) PP₆₁/N₃₀/P₉

5- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، ساخت نمونه‌های نانوکامپوزیتی بر پایه پلی‌پروپیلن (PP)/لاستیک طبیعی (NR) تقویت‌شده با نانوذرات پرلیت با روش اختلاط مذاب در یک مخلوط‌کن داخلی انجام شد. سپس، برای پیش‌بینی خواص مکانیکی (مدول کششی و استحکام ضربه‌ای) و مقایسه آن‌ها با داده‌های تجربی، از روش پاسخ سطح (RSM) در قالب مرکب مرکزی پنج سطحی (CCD) جهت بررسی و مطالعه اثر بخشی دو پارامتر موادی درصد وزنی لاستیک طبیعی با حدود تغییرات 10، 20، 30، 40 و 50 wt.% و درصد وزنی نانوذرات پرلیت با حدود تغییرات 1، 3، 5، 7 و 9 wt.% به همراه تعیین مدل‌های ریاضی استفاده شد. نتایج بدست آمده را می‌توان به صورت زیر طبقه‌بندی کرد:

- (1) طبق نتایج آنالیز واریانس و مقادیر بدست آمده توسط مدل‌های ریاضی برای مدول کششی و استحکام ضربه‌ای مشاهده شد که مؤلفه $N \times P$ برای مدول کششی به جهت مقدار ضریب پی بالاتر از 0.05، در نگارش روابط ریاضی و همچنین فرایند پیش‌بینی خواص مکانیکی بهینه به سبب تأثیر ناچیز روی مقدار پاسخ نهایی، حذف شده است.
- (2) با توجه به نزدیکی نقاط حاصل از نتایج تجربی برحسب داده‌های پیش‌بینی شده نسبت به خط 45° در نمودار اعتبار سنجی، مشاهده شد پاسخ مدل‌های ریاضی بدست آمده از روش پاسخ سطح نشان از صحت این روابط و تطابق مطلوب بین داده‌های تجربی و پیش‌بینی شده دارد.
- (3) دیاگرام‌های دوعده‌ای و سه‌بعدی پاسخ سطح مدول کششی و استحکام ضربه‌ای، نشان‌دهنده رفتار متفاوت این خواص با درصدهای وزنی مختلف است. با بررسی این دیاگرام‌ها مشاهده شد، با ثابت نگه داشتن مقدار لاستیک طبیعی در 20 wt.% و افزایش درصد وزنی نانوذرات پرلیت از 3 تا 7 wt.%، حداکثر مقدار مدول کششی 822.99 MPa بدست آمد. اما بر خلاف مدول کششی، مقدار بیشینه استحکام ضربه‌ای در شرایطی که مقدار نانوذرات پرلیت از 7 به 3 wt.% کاهش و مقدار لاستیک طبیعی از 20 به 40 wt.% افزایش یابد، 143.46 J/m بدست آمد.
- (4) با استفاده از نتایج بهینه‌سازی چند متغیره، مقادیر بهینه هر یک از دو پارامتر موادی، در شرایطی که مدول کششی و استحکام ضربه‌ای به طور هم‌زمان در مقدار بیشینه خود باشند، به ترتیب 4.046 wt.% از نانوذرات پرلیت و 35.268 wt.% از لاستیک طبیعی بدست آمد. در نتیجه بیشترین مقدار حاصل شده برای مدول کششی 508.04 MPa و استحکام ضربه‌ای 108.52 J/m تعیین شد.
- (5) تصویر SEM ثبت شده از نمونه PP70N/30P/0 نشان‌دهنده حفره‌های

- [27] Nakhaei, M.R., Mostafapour, A. and Naderi, G., "Optimization of mechanical properties of PP/EPDM/clay nanocomposite fabricated by friction stir processing with response surface methodology and neural networks" *Polymer Composites*, Vol. 38, No. S1, pp. E421-E432, 2017.
- [28] 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. 5, No. 2, pp. 169-176, 2018.
- [29] Maleki Khorasgani, A. and Shahrajabian, H., "Investigation of the physical and mechanical properties of wood plastic composites based on high density polyethylene/ polypropylene/ recycled poly (ethylene terephthalate): part II, Constrained Optimization" In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 1, pp. 119-126, 2019.
- [30] Nakhaei, M. R., Mostafapour, A., Dubois, C., Naderi, G., & Reza Ghoreishy, M. H., "Study of morphology and mechanical properties of PP/EPDM/clay nanocomposites prepared using twin-screw extruder and friction stir process. *Polymer composites*" Vol. 40, No. 8, pp. 3306-3314, 2019.
- [31] Ning, N., Li, S., Wu, H., Tian, H., Yao, P., Hu, Guo-Hua., Tian, M. and Zhang, L., "Preparation, microstructure, and microstructure-properties relationship of thermoplastic vulcanizates (TPVs): A review" *Progress in Polymer Science*, Vol. 79, pp. 61-97, 2018.
- [32] Fasihi, M. and Mansouri, H., "Effect of Rubber Interparticle distance distribution on toughening behavior of thermoplastic polyolefin elastomer toughened polypropylene" *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 133, No. 40, pp. 44068, 2016.
- [33] Yaghoobi, H. and Fereidoon, A., "An experimental investigation and optimization on the impact strength of kenaf fiber biocomposite: application of response surface methodology" *Polymer Bulletin*, Vol. 75, No. 8, pp. 3283-3309, 2018.
- [34] Mousavi, S.R., Faraj Nejad, S., Jafari, M. and Paydayesh, A., "Polypropylene/ethylene propylene diene monomer/cellulose nanocrystal ternary blend nanocomposites: Effects of different parameters on mechanical, rheological, and thermal properties" *Polymer Composites*, Vol. 42, No. 9, pp. 4187-4198, 2021.
- [35] Soleymani, H., Nakhaei, M.R. and Naderi, Gh., "Experimental and mathematical investigation of mechanical and microstructural properties of PA6/NBR nanocomposite reinforced with silicon carbide (SiC) nanoparticles" In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 8, No. 4, pp. 1789-1796, 2022.
- [36] Mehrdad Shokrieh, M., Zeinedini, A., and Ghoreishi, M., "Effects of adding multiwall carbon nanotubes on mechanical properties of Epoxy resin and Glass/Epoxy laminated composites" In Persian, *Madares Mechanical Engineering*, Vol. 15, pp. 125-133, 2015.
- [11] Albooyeh, A.R., Tarahomi, S., Fereidoon, A. and Taherian, Z., "The effect of processing conditions on the mechanical properties of polypropylene/mesoporous silica-hydroxyapatite hybrid nanocomposites" *Mechanics Of Advanced Composite Structures*, Vol. 3, No. 2, pp. 73-82, 2016.
- [12] Bastam, K., and Zeinedini, A., "Tensile properties of flexible latex-based composites reinforced by cotton fibers in the presence of shape memory alloys, In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites* Vol. 8, pp. 1780-1788, 2022.
- [13] Ghorbankhan, A., Nakhaei, M.R. and Safarpour, P., "Modeling and optimization of mechanical properties of PA6/NBR nanocomposite reinforced with perlite nanoparticles" In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 8, No. 1, pp. 1421-1430, 2021.
- [14] Sahraeian, R. and Esfandeh, M., "Mechanical and morphological properties of LDPE/perlite nanocomposite films Polym" *Polymer Bulletin*, Vol. 74, No. 4, pp. 1327-1341, 2017.
- [15] Sahraeian, R., Hashemi, S.A., Esfandeh, M. and Ghasemi, I., "Preparation of nanocomposites based on LDPE/Perlite: Mechanical and Morphological Studies" *Polymers and Polymer Composites*, Vol. 20, No. 7, pp. 639-646, 2012.
- [16] De Oliveira, A.G., Jandorno Jr, J.C., da Rocha, E.B.D., de Sousa, A.M.F. and da Silva, A.L.N., "Evaluation of expanded perlite behavior in PS/Perlite composites" *Applied Clay Science*, Vol. 181, No. 15, 105223, 2019.
- [17] Albooyeh, A.R., Soleymani, P., and Taghipoor, H., "Evaluation of the mechanical properties of hydroxyapatite-silica aerogel/ epoxy nanocomposites: Optimizing by response surface approach" *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, Vol. 136, No. 105513, 2022.
- [18] Yaghoobi, H. and Fereidoon, A., "Modeling and optimization of tensile strength and modulus of polypropylene/ kenaf fiber bio composites using box-behnken response surface method" *Polymer Composites*, Vol. 39, No. S1, pp. E1-E646, 2018.
- [19] Sharma, S.K. and Nayak, S.K., "Surface modified clay/polypropylene (PP) nanocomposites: Effect on physico-mechanical, thermal and morphological properties" *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 94, No. 1, pp. 132-138, 2009.
- [20] Golparvar, M. and Fasihi, M., "Investigation of mechanical properties of polypropylene-based hybrid nanocomposites using experimental design" In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 3, pp. 307-314, 2018.
- [21] Daneshpayeh, S., Ashenai Ghasemi, F. and Ghasemi, I., "Mechanical properties of nanocomposites based on polypropylene-linear low density polyethylene-titanium dioxide nano particles by response surface methodology" *Journal of Tabriz Mechanical Engineering*, Vol. 77, pp. 903-101, 2017.
- [22] Bicy, K., Rouxel, D., Poncot, M., Royaud, I., Bourson, P., Chapron, D., Kalarikkal, N. and Thomas, S., "Interfacial tuning and designer morphologies of microporous membranes based on polypropylene/natural rubber nanocomposites" *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 138, No. 41, pp. 51208, 2021.
- [23] Lopattananon, N., Tanglakwaraskul, S., Kaesaman, A., Seadan, M. and Sakai, T., "Effect of nanoclay addition on morphology and elastomeric properties of dynamically vulcanized natural rubber/polypropylene nanocomposites" *International Polymer Processing*, Vol. 29, No. 3, 2014.
- [24] Sharika, T., Abraham, J., Arif P, M., George, S.C., Kalarikkal, N. and Thomas, S., "Excellent electromagnetic shield derived from MWCNT reinforced NR/PP blend nanocomposites with tailored microstructural properties" *Composites Part B*, Vol. 173, 106798, 2019.
- [25] Chandran, N., Sarathchandran, C., Jose, S., Thankappan, S. and Thomas, S., "Organic modifier induced interfacial transformation, morphology and physico-mechanical properties of PP/NR based blend nanocomposites" *Composites Part B*, Vol. 194, 2020.
- [26] Banerjee, S., Joshi, M. and Ghosh, A.K., "Optimization of polypropylene/ clay nanocomposite processing using box-behnken statistical design" *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 123, No. 4, pp. 2042-2051, 2012.