

بهینه‌سازی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های سه‌تایی بر پایه پلی‌پروپیلن /

لاستیک نیتریل / نانوپودر سیلیکا به روش رویه پاسخ

محمد مراد شیخی^۱، علی صناعی^۲ و ولی‌الله پناهی‌زاده^۳

دانشکده فنی و مهندسی مکانیک

دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۱۶)

چکیده

در این تحقیق، خواص مکانیکی شامل استحکام ضربه، مدول الاستیسیته و ازدیاد طول تا شکست نانوکامپوزیت‌های سه‌تایی پلی‌پروپیلن/لاستیک نیتریل کربوکسیل شده/ نانوپودر سیلیکا به کمک طرح Box-Behnken روش رویه پاسخ (RSM) بهینه‌سازی شده‌اند. براساس این طرح آزمایش ۱۵ نمونه شامل ۲، ۴ و ۶ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا، ۰، ۳ و ۶ درصد وزنی عامل سازگارکننده پلی‌پروپیلن مالئیکه (PP-gMA) و نیز ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی لاستیک نیتریل کربوکسیل شده توسط یک اکسترودر همسوگرد تهیه شدند. آزمون‌های مکانیکی کشش و ضربه برای تعیین مدول الاستیسیته، ازدیاد طول تا شکست و استحکام ضربه ترکیبات انجام شدند. نتایج حاصل از آنالیز واریانس نشان دادند که هر سه فاکتور اصلی نانوذرات سیلیکا، لاستیک نیتریل کربوکسیل شده و عامل سازگار کننده پلی‌پروپیلن مالئیکه با احتمال بالای ۹۰ درصد بر خواص مکانیکی مورد بررسی تاثیرگذار هستند. همچنین مقادیر کمیت احتمالی فیشر نشان می‌دهد که نانوپودر سیلیکا بیشترین تاثیر را بر مدول الاستیک و لاستیک نیتریل بیشترین تاثیر را بر استحکام ضربه و ازدیاد طول تا شکست دارند. از طرفی برای هر خاصیت مکانیکی یک مدل رگرسیون با مطلوبیت بالای ۸۵ درصد به دست آمد. سرانجام مقادیر بهینه به‌ازای ۱/۶۱۶۲ درصد وزنی از نانوپودر سیلیکا، ۱۰ درصد وزنی لاستیک نیتریل و ۴/۹۶۹۷ درصد وزنی عامل سازگار کننده پلی‌پروپیلن مالئیکه پیش‌بینی شدند.

واژه‌های کلیدی: پلی‌پروپیلن، خواص مکانیکی، بهینه‌سازی، روش رویه پاسخ، نانوکامپوزیت

Optimization of Mechanical Properties of trinary Nanocomposites Based on Polypropylene/Nitrile Rubber /Silica Nano-Powder by Using Response Surface methodology

M.M. Sheikhi, A. Sanaei and V. A. Panahizadeh

Faculty of Mechanical Engineering

Shahid Rajaei Teacher Training University

(Received: 01/July/2018 ; Accepted: 07/September/2018)

ABSTRACT

In this study, mechanical properties including impact strength, elastic modulus and elongation at break of nanocomposites based on polypropylene/ Carboxylated Nitrile Rubber (PP/XNBR) were optimized by using response surface methodology (RSM). The samples were produced using a co-rotating twin screw extruder including 0,2,4 Wt.% of nano particles, 0, 5, 10 Wt.% of XNBR and 0,3,6 Wt.% of Polypropylene-g-glycidyl Methacrylate (PP-gMA) as compatibilizer. Impact and tensile tests were carried out to obtain impact strength, elastic modulus and elongation at break of nano composites. The results of analysis of variance showed that all three major factors silica nanoparticles, Carboxylated Nitrile Rubber and PP-gMA as compatibilizer effect on the mechanical properties with a higher probability of 90%. Also, Fisher's probable quantity values showed that silica nanoparticles had the greatest effect on the elastic modulus and XNBR had the greatest effect on impact strength and elongation at break. On the other hand, for each mechanical property, a regression model with a desirability of over 85% was obtained. Finally, the optimal values of the nano-composites were predicted to be 1.6162 wt% for silica nano powder, 10 wt% for XNBR, and 4.9697 wt% for PP-gMA.

Keywords: Polypropylene, Mechanical Properties, Optimization, Response Surface Methodology, Nano Composites

۱- دانشیار (نویسنده پاسخگو): m.sheikhi@sru.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد: alisanaei.mechanic@gmail.com

۳- استادیار: v.panahizadeh@sru.ac.ir

۱- مقدمه

دانش پایه و همکاران در سال ۲۰۱۷ با افزودن نانوذرات سیلیکا به ترموست اپوکسی مشاهده کردند که حضور این نانوذرات در زمینه پلیمری موجب افزایش قابل توجهی در مدول الاستیک می‌شود [۱۷]. گارسیا و همکارانش در سال ۲۰۰۴ با افزودن نانوذرات سیلیکا (SiO_2) به ماتریس پلیمری PP، افزایش ۳۰ درصدی مدول یانگ و ۶۸ درصدی استحکام ضربه را گزارش کرده‌اند [۱۸].

تأثیر حضور نانوپودر سیلیکا به آلیاژ نایلون- پلی‌پروپیلن توسط جاکوب و همکارانش [۱۹] مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آنها نشان داد که نمونه با ۱ درصد وزنی نانوسیلیکا و ۳۰ درصد وزنی الیاف نایلون، بالاترین استحکام کششی، مدول الاستیک و استحکام را دارد. همچنین، آنها بیشترین استحکام ضربه‌ای را در نمونه با ۱ درصد وزنی نانوسیلیکا و ۱۰ درصد وزنی الیاف نایلون مشاهده نمودند. همچنین تأثیر نانوپودر سیلیکا بر خواص ماده مرکب کربن- فنولیک توسط میرزاپور و همکارانش [۲۰] نشان داد که استحکام ضربه با افزودن ۳ درصد وزنی نانو سیلیکا، به میزان ۱۳ درصد افزایش می‌یابد، اما در ۵ درصد وزنی نانوسیلیکا، استحکام ضربه کاهش پیدا می‌کند.

امروزه بررسی و بهینه‌سازی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌هایی حاصل از حضور هم‌زمان یک لاستیک چقرمه‌کننده و نانوذرات از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است [۲۱-۲۲]. بهبود بخشیدن یک خاصیت مکانیکی درحالی که خواص مکانیکی دیگر تضعیف شوند یک نقص به حساب می‌آید. بنابراین، برای دستیابی به بهترین خواص مکانیکی باید بهترین ترکیب به دست آید [۲۳-۲۴]. ترکیبی که بتواند خواص مکانیکی یک کامپوزیت را به طور هم‌زمان بهبود بخشد. از طرف دیگر برای دستیابی به یک ترکیب مناسب با خواص مکانیکی ایده‌آل به یک روش مناسب برای انجام بهینه‌سازی نیاز است. روشی که بتواند به طور هم‌زمان چند پاسخ (خاصیت مکانیکی) را بهینه کند.

روش رویه پاسخ^۱ (RSM) نرم‌افزار مینی تب^۲ یک روش مناسب برای طراحی آزمایش و بعد از آن تحلیل و بررسی مواد مرکب در زمینه‌های مختلف می‌باشد. اخیراً این روش برای بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها، نانوکامپوزیت و موارد دیگری از این قبیل به کار گرفته شده است [۲۵-۲۸].

پلی‌پروپیلن یکی از ترموپلاست‌هایی است که امروزه در صنعت به‌ویژه کالاهای خانگی، بسته‌بندی‌ها و صنایع اتومبیل‌سازی کاربردهای فراوانی دارد. خواص خوب این پلیمر از جمله فرآیندپذیری خوب، خواص مکانیکی نسبتاً بالا، قابلیت بازیافت آسان و هزینه پایین، دامنه وسیعی از کاربردها را برای پلی‌پروپیلن به وجود آورده است [۱-۲]. این درحالی است که استحکام ضربه (به‌خصوص در دمای پایین) و مدول یانگ پایینی دارد که تا حدی کاربرد آن را محدود کرده است [۳-۵].

ساختار شکننده پلی‌پروپیلن در بسیاری از کاربردها یک عیب محسوب می‌شود. بنابراین، چقرمه کردن این ماده از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. بین روش‌های مختلف چقرمه کردن، ترکیب پلی‌پروپیلن با یک لاستیک مناسب، به‌عنوان فاز دوم، یک روش بسیار موثر است [۶-۷]. محققان بسیاری توانسته‌اند از طریق آلیاژسازی پلیمری لاستیک‌های مختلفی را با پلی‌پروپیلن ترکیب کرده و اثر آنها را بر چقرمگی و ازدیاد طول تا شکست این پلیمر پرکاربرد مورد بررسی قرار دهند [۸-۱۰]. در این میان ترکیب کردن لاستیک نیتریل کربوکسیل شده مورد بررسی قرار نگرفته است و میزان تاثیرگذاری آن بر استحکام ضربه و چقرمگی پلی‌پروپیلن جای بررسی دارد.

نانوتکنولوژی باعث بهبود خواص مکانیکی ترکیبات پلیمری و فلزی به شکل نانوکامپوزیت می‌شود. حضور فاز ثانویه با ابعاد نانومتری در زمینه‌های پلیمری می‌تواند خواص مکانیکی را به مراتب بیشتر از تقویت‌کننده‌های معمولی افزایش دهد. محققان اثر افزودن نانو ذرات مختلفی از جمله نانوذرات سیلیکا [۱۱]، نانو ذرات تیتانیوم [۱۲-۱۳]، نانولوله‌های کربنی [۱۴-۱۵] و نانوذرات رس [۱۶] را بر روی خواص مکانیکی ماتریس‌های پلیمری بررسی کرده‌اند. در بین این نانوذرات، نانوپودر سیلیکا به دلیل خواص مکانیکی عالی از جمله مساحت سطح بالا، هدایت حرارتی عالی، مدول کششی بسیار بالا و غیره بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این نانوپودر به طور گسترده برای تقویت کردن انواع مختلف ماتریس‌های پلیمری استفاده می‌شود و کاربردهای زیادی در صنایع خودرو، هوافضا، الکترونیک و باتری پیدا کرده است.

1- Response Surface Methodology

2- Minitab

۱-۲- مواد

در تحقیق حاضر از پلی‌پروپیلن با نام تجاری PP-Z30S با شاخص جریان مذاب $25 \text{ gr}/10 \text{ min}$ محصول شرکت پتروشیمی اراک (ARPC) استفاده شده است. لاستیک مورد استفاده در این تحقیق، XNBR با ۲۶ درصد اکریلونیتریل با نام تجاری Nipol® NX 775 محصول شرکت شیمیایی زئون^۲ (محصول کشور ژاپن) می‌باشد. پودر نانو سیلیکا با کد تجاری k-۲۰۰ محصول شرکت کی‌سو^۳ کره جنوبی، با شکل هندسی کروی با قطر ۷ تا ۴۰ نانومتر و مساحت سطح $200 \text{ g}/\text{m}^2$ و چگالی $1.0-1.5 \text{ g}/\text{cm}^3$ استفاده شد. پلی‌پروپیلن مالئیکه مدل PHH با چگالی $0.903 \text{ g}/\text{cm}^3$ با شاخص نرخ مذاب $18 \text{ g}/10 \text{ min}$ و کاربرد اصلی عامل سازگار کننده در ساخت آلیاژهای پلیمری از شرکت کرانگین^۴ تولید کشور ایران تهیه شده است.

۲-۲- مفاهیم طرح Box-Behnken روش رویه پاسخ طراحی فرآیند تحقیق به کمک این روش

استفاده از طرح Box-Behnken روش رویه پاسخ از مرحله طراحی آزمایش تا تحلیل پایانی نتایج، مفاهیم و اصطلاحات مختلفی دارد که در این جا شرح مختصری از مفاهیم مورد استفاده در این تحقیق ارائه شده است.

در این روش اغلب از یک چند جمله‌ای درجه اول یا دوم برای مدل کردن پاسخ استفاده می‌شود که مدل‌های مرتبه اول و دوم به صورت معادلات زیر می‌باشند:

بنابراین، در این روش زیر مجموعه‌ای از یک مدل با تمامی جملات خطی و درجه ۲ به همراه اثرات متقابل ارائه می‌شود، که در روابط (۱) و (۲)، y پاسخ، β ضریب، x_i و x_j متغیرها و ε مقدار ثابت می‌باشد [۲۹].

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

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

روش رویه پاسخ از یک طرف با یک طراحی آزمایش مناسب برای بررسی خواص مکانیکی با کاهش تعداد ترکیبات (در مورد کامپوزیت‌ها و نانوکامپوزیت‌ها) موجب کاهش هزینه‌ها و صرفه‌جویی در وقت می‌شود و از طرف دیگر در بررسی خواص مورد نظر در مرحله تجزیه و تحلیل نتایج چندین مزیت را در اختیار محقق قرار می‌دهد از قبیل:

- به کمک مرحله آنالیز نتایج فاکتورهای مؤثر را با ارائه میزان تاثیر گذاری آنها بر هر خاصیت مکانیکی به کمک یک عدد بیان می‌کند.

- شدت تاثیرگذاری هر فاکتور بر خاصیت مکانیکی مورد نظر را به صورت یک عدد ارائه می‌دهد.

- برای هر فاکتور اصلی، مربع هر فاکتور و برهم کنش دو به دوی آنها یک ضریب ارائه می‌دهد که به کمک ضرایب می‌توان یک مدل ریاضی برای هر خاصیت مکانیکی به دست آورد.

- می‌تواند به صورت هم‌زمان چند خاصیت مکانیکی را بهینه کند. در واقع با به دست آوردن مقدار مورد نیاز از فاکتور به طور هم‌زمان مقدار بهینه هر خاصیت مکانیکی را ارائه می‌دهد.

در تحقیق حاضر نانوکامپوزیت پایه پلی‌پروپیلن/لاستیک نیتریل کربوکسیل شده/نانوذرات سیلیکا با عامل سازگار کننده پلی‌پروپیلن مالئیکه به روش اختلاط مذاب در یک اکسترودر دو ماریچه هم‌سوگرد تهیه گردید. درصدهای وزنی مختلفی از نانو ذرات (۰، ۲ و ۴)، عامل سازگارکننده (۰، ۳ و ۶) و لاستیک نیتریل کربوکسیل شده (۰، ۵ و ۱۰) در ماتریس پلی‌پروپیلن استفاده شده است. آنگاه به کمک طرح باکس بنکن روش رویه پاسخ (RSM) نرم‌افزار MiniTab فاکتورهای مؤثر و شدت اثر هر یک از آنها بر استحکام ضربه، مدول الاستیک و ازدیاد طول تا شکست ترکیبات بررسی شد و یک مدل برای هر یک از خواص مکانیکی مذکور ارائه گردید. همچنین برای دستیابی هم‌زمان به مقدار بهینه (بیشترین مقدار) از خواص مکانیکی مورد بررسی، میزان هر کدام از سه فاکتور اصلی برحسب درصد وزنی محاسبه شدند.

۲- تجربی

در بخش تجربی مواردی مانند مواد و روش های طراحی آزمایش، ساخت و انجام آزمون ها شرح داده می شوند.

جدول (۲): حالت‌های مختلف ترکیبات برحسب

درصد وزنی.

شماره ترکیب	Nano silica (wt%)	XNBR (wt%)	PP-gMA (wt%)
۱	۰	۰	۳
۲	۴	۰	۳
۳	۰	۱۰	۳
۴	۴	۱۰	۳
۵	۰	۵	۰
۶	۴	۵	۰
۷	۰	۵	۶
۸	۴	۵	۶
۹	۲	۰	۰
۱۰	۲	۱۰	۰
۱۱	۲	۰	۶
۱۲	۲	۱۰	۶
۱۳	۲	۵	۳
۱۴	۲	۵	۳
۱۵	۲	۵	۳

۳-۲- تهیه نمونه‌ها

پس از آماده شدن مواد اولیه، می‌بایست در ۱۵ حالت مختلف مطابق با جدول ۱ با همدیگر ترکیب می‌شدند. جهت حصول حداقل ۵ نمونه از هر ترکیب یک حالت فیزیکی اولیه ۴۰۰ گرمی در نظر گرفته شد.

بنابراین، مواد در ۱۵ حالت به صورت فیزیکی با همدیگر ترکیب شدند. سپس توسط یک اکسترودر همسوگرد (ZSK20) با محدوده دمایی 170°C تا 190°C و سرعت حرکت پیچ‌های 250 rpm به صورت گرانول با همدیگر ترکیب نهایی شدند. برای رسیدن به همگن‌ترین ترکیب هر نمونه دوبار توسط دستگاه ترکیب شده است. از گرانول آماده شده برای تهیه دست‌کم ۵ نمونه انجام آزمون مکانیکی کشش براساس استاندارد ASTM-D638 (با ابعاد $3\text{ mm} \times 19\text{ mm} \times 165\text{ mm}$) از هر ترکیب، به وسیله یک دستگاه قالب‌گیری تزریقی (ایمن ماشین) با توزیع دمایی 190°C - 200°C - 210°C ، سرعت بارگیری 45 rpm ، فشار تزریق 90 bar و زمان سرمایش 40 s ، استفاده شد. شکل ۱ نمونه‌های ترکیب شده را در قالب آزمون‌های کشش و ضربه نشان می‌دهد.

P-value: این کمیت سطح معنی داری فاکتورها و بر هم کنش‌های آن‌ها را مشخص می‌کند. اگر مقدار کمیت P برای یک فاکتور کمتر از $0/05$ باشد، بدین معنی است که با اطمینان ۹۵ درصد اثر آن فاکتور بر خاصیت مکانیکی مشخص شده است.

F: کمیت احتمالی فیشر نامیده می‌شود و شدت اثرگذاری یک فاکتور را نشان می‌دهد. در واقع هر چه مقدار این عدد برای یک فاکتور بیشتر باشد بدین معنی است که میزان اثرگذاری آن فاکتور شدت بیشتری دارد.

کمیت R-Sq مخفف عبارت R-Square به نام ضریب تعیین می‌باشد. مقدار این کمیت بین ۰ و ۱ بوده و غالباً به درصد بیان می‌گردد. هر چه مقدار این کمیت به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان می‌دهد که انتخاب مدل رگرسیونی برای برازش به مشاهدات درست بوده است.

با مشخص شدن مقادیر مواد مورد نظر برحسب درصد وزنی، طراحی آزمایش به کمک طرح Box-Behnken انجام شد. بر این اساس تعداد ترکیبات و حالات مختلف استفاده از درصدهای وزنی مواد مشخص شد. جدول ۱ فاکتورهای اصلی را به همراه سطوح مورد بررسی در حالت کدگذاری نشان می‌دهد. در واقع در این روش برای بالاترین سطح کد +۱، سطح وسط ۰ و پایین‌ترین سطح -۱ اختصاص داده می‌شود.

جدول (۱): متغیرها در طراحی آزمایش Box-Behnken

فاکتور (برحسب درصد وزنی)	سطح مورد بررسی		
	پایین (-۱)	وسط (۰)	بالا (+۱)
نانوذرات سیلیکا	۰	۲	۴
لاستیک نیتریل	۰	۵	۱۰
پلی پروپیلن مالئیکه	۰	۳	۶

پس از طراحی اولیه آزمایش مواد اولیه باید در ۱۵ حالت مختلف با همدیگر ترکیب شوند. جدول ۲ این ۱۵ حالت مختلف را نشان می‌دهد.

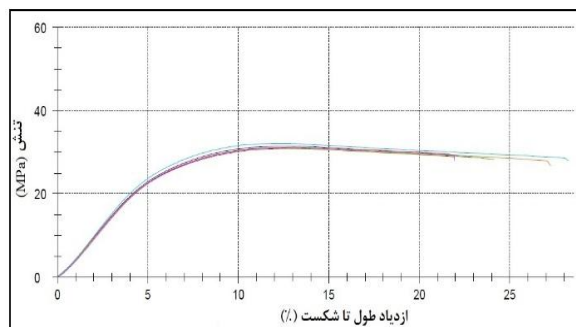


شکل (۳): نمونه شکسته شده بعد از آزمون ضربه.

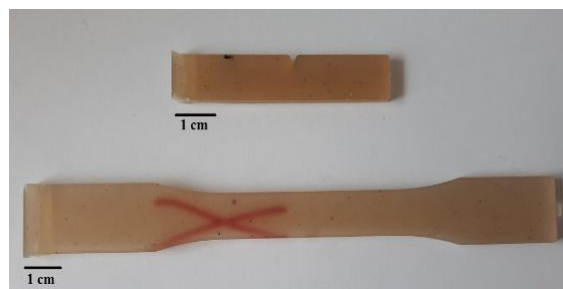
۳- نتایج و بحث

آزمون مکانیکی کشش برای به‌دست آوردن مدول الاستیک و ازدیاد طول تا شکست ترکیبات انجام شده و نمودار تنش کرنش یک ترکیب به‌عنوان نمونه در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

همان‌طور که، از شکل ۴ مشاهده می‌شود نمودار تنش-کرنش مربوط به ۵ نمونه می‌باشد که به دلیل دقت بالای فرآیند ساخت تقریباً بر هم منطبق شده اند. مدول الاستیک و ازدیاد طول تا شکست برای هر ترکیب به‌صورت میانگین سه عدد نزدیک به هم (از میان ۵ عدد) محاسبه شده است. همچنین نتایج استحکام ضربه نیز به‌صورت میانگین سه عدد نزدیک به هم برای هر ترکیب محاسبه و به‌همراه نتایج مدول الاستیک و ازدیاد طول تا شکست در جدول ۳ ارائه شدند.



شکل (۴): نمودار تنش- ازدیاد طول یک نمونه.



شکل (۱): نمونه‌های ساخته شده کشش و ضربه.

۲-۴- روش انجام آزمون کشش

برای انجام آزمون کشش از دستگاه زوییک/ رول مدل Z100 ساخت آلمان استفاده شد. این آزمون در دمای اتاق و با سرعت فک متحرک ۵۰ mm/min و تعداد ۵ تکرار از هر ترکیب انجام شد. کشش نمونه تا زمان گسیختگی کامل آنها ادامه پیدا می‌کرد. نتیجه نهایی حاصل از آزمون کشش برای هر ترکیب از میانگین ۵ عدد ناشی از ۵ تکرار به‌دست آمد. مدول الاستیسیته نمونه‌ها از نتیجه نهایی حاصل از آزمون کشش برای هر ترکیب از میانگین ۵ عدد ناشی از ۵ تکرار به‌دست آمد. آزمون کشش نمونه‌ها براساس استاندارد ASTM-D638 انجام شد. در شکل ۲ نمونه گسیخته‌شده بعد از انجام آزمون کشش نشان داده شده است.



شکل (۲): نمونه گسیخته‌شده بعد از آزمون کشش.

آزمون ضربه به‌روش آیزود فاق‌دار توسط دستگاه رزیل ایمپکتور^۱ ساخت شرکت کاست^۲ کشور ایتالیا با وزنه ۷/۵ ژول، در دمای اتاق، براساس استاندارد D256 و تعداد ۵ تکرار از هر ترکیب انجام شد. شکل ۳ نمونه شکسته‌شده حاصل آزمون ضربه را نشان می‌دهد.

جدول (۳): نتایج نهایی مدول الاستیک، ازدیاد طول تا شکست و استحکام ضربه ترکیبات.

شماره ترکیب	Elastic Modulus (MPa)	Elongation at break (%)	Impact Strength (J/m ²)
۱	۲۴۵	۲۸/۰۰	۱/۱۷
۲	۴۰۴	۱۹/۰۰	۲/۸۰
۳	۲۳۵	۳۵/۰۰	۸/۳۱
۴	۳۰۵	۳۱/۰۰	۵/۲۶
۵	۲۶۹	۳۱/۰۰	۲/۹۱
۶	۳۹۷	۲۵/۰۰	۲/۷۳
۷	۲۴۸	۲۹/۰۰	۵/۳۶
۸	۳۴۵	۲۳/۰۰	۳/۴۳
۹	۴۲۸	۲۴/۰۰	۳/۳۷
۱۰	۳۲۰	۳۳/۰۰	۷/۸۲
۱۱	۳۱۴	۲۳/۰۰	۳/۴۴
۱۲	۳۵۰	۳۲/۰۰	۸/۷۸
۱۳	۳۲۰	۲۶/۰۰	۴/۴۲
۱۴	۳۲۱	۲۵/۰۰	۴/۳۶
۱۵	۳۲۰	۲۶/۰۰	۴/۴۸

همان‌طور که، از جدول ۴ مشاهده می‌شود برای استحکام ضربه هر سه فاکتور اصلی نانوذرات سیلیکا، لاستیک نیتریل و عامل سازگار کننده با مقدار P کمتر از ۰/۰۵ مؤثر واقع شده‌اند. همچنین در بین مربعات و برهم کنش‌ها فقط مربع عامل سازگار کننده و برهم کنش عامل سازگار کننده و لاستیک نیتریل با مقدار P بالای ۰/۰۵ بر استحکام ضربه اثر کمتری دارند. از طرف دیگر مقادیر F نشان می‌دهند که از بین فاکتورهای اصلی، لاستیک نیتریل با مقدار ۶۳۸/۲۲ بیشترین شدت اثر را بر استحکام ضربه دارد.

نتایج آنالیز واریانس از جدول ۴ نشان می‌دهد که تقریباً تمامی فاکتورهای اصلی، مربعات و برهم کنش‌ها بر مدول الاستیک مؤثر هستند و مقدار P برای آنها (غیر از مربع لاستیک نیتریل با $P=0/64$) کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد. همچنین مقادیر کمیت احتمالی فیشر (F) برای مدول الاستیک نشان می‌دهند که نانوذرات سیلیکا با مقدار ۶۸۱/۹۰ بیشترین تأثیر را بر مدول الاستیک دارند. و در انتها در ستون‌های مربوط به ازدیاد طول تا شکست مشاهده می‌شود که سه فاکتورهای اصلی با مقدار $P=0/000$ بر آن مؤثر هستند و در بین مربعات و برهم کنش‌ها فقط دو برهم کنش لاستیک نیتریل و عامل سازگار کننده و نانوذرات سیلیکا و عامل سازگار کننده دارای P بالای ۰/۰۵ بوده و مؤثر واقع نشده‌اند. همچنین مقادیر F برای فاکتورهای اصلی نشان می‌دهند که لاستیک نیتریل با مقدار ۱۴۶۶/۵ بیشترین تأثیر را بر ازدیاد طول تا شکست دارد.

۳-۱- آنالیز واریانس برای استحکام ضربه، مدول الاستیک و ازدیاد طول تا شکست

نتایج حاصل از آنالیز اولیه نتایج به‌دست‌آمده از آزمون‌های ضربه و کشش برای استحکام ضربه، مدول الاستیک و ازدیاد طول تا شکست تحت عنوان جدول آنالیز واریانس در جدول ۴ ارائه شده‌اند. در این جدول منظور از N نانوذرات سیلیکا، منظور از X لاستیک نیتریل کربوکسیل شده و منظور از PP عامل سازگار کننده پلی‌پروپیلن مالئیکه می‌باشد.

جدول (۴): نتایج آنالیز واریانس برای خواص مکانیکی.

Term	استحکام ضربه		مدول الاستیک		ازدیاد طول تا شکست	
	P	F	P	F	P	F
Const	۰/۰۰۰	۱۳۲/۴	۰/۰۰۰	۱۳۷/۸	۰/۰۰۰	۷۲۲/۹
N	۰/۰۱۷	۱۲/۱۹	۰/۰۰۰	۶۸۱/۹	۰/۰۰۰	۶۶۱/۲
X	۰/۰۰۰	۳۶۸/۲	۰/۰۰۷	۱۰۸/۳	۰/۰۰۰	۱۴۶۶/۵
PP	۰/۰۰۸	۱۷/۰۱	۰/۰۵۱	۸۱/۵۵	۰/۰۰۶	۴۱/۰۶
N×N	۰/۰۰۲	۳۷/۴۶	۰/۰۰۹	۹۱/۹۰	۰/۰۳۷	۷/۹۳
X×X	۰/۰۰۲	۳۵/۳۷	۰/۰۶۴	۵/۶۲	۰/۰۰۱	۹۵/۳۰
PP×PP	۰/۱۳۷	۳/۱۲	۰/۰۲۱	۶۱/۴۸	۰/۰۳۹	۷/۷۰
N×X	۰/۰۰۱	۴۲/۸۶	۰/۰۰۷	۵۲/۴۱	۰/۰۰۲	۵۲/۹۰
N×PP	۰/۰۵۸	۵/۹۹	۰/۰۵۳	۶/۳۶	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰
X×PP	۰/۲۷۳	۱/۵۲	۰/۰۰۰	۱۳۷/۲	۰/۲۱۷	۱/۹۹

$$\begin{aligned} \text{Elongation at break} &= 0.504 (N)^2 + 1.746 (X)^2 \\ &+ 0.496 (PP)^2 + 1.250 (N \times X) - 3.125 N + \\ &4.654 X - 0.779 PP + 26.00 \end{aligned} \quad (5)$$

ردیف آخر جدول ۵ مقادیر R^2 را برای هر سه خاصیت مکانیکی نشان می دهد. از بررسی مقدار R^2 برای هر خاصیت مکانیکی مشخص می شود که این مقدار برای استحکام ضربه $R^2(adj) = 97.38$ و $R^2(pred) = 85.19$ برای مدول الاستیک $R^2(adj) = 98.88$ و $R^2(pred) = 93.59$ و در نهایت برای ازدیاد طول تا شکست $R^2(adj) = 99.40$ و $R^2(pred) = 96.57$ می باشد. بنابراین، می توان گفت که مدل های ارائه شده با احتمال بالای ۸۵ درصد توانایی پیش بینی بسیار خوبی دارند.

در پایان این قسمت نتایج حاصل از جای گذاری ترکیبات در مدل های در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول (۶): نتایج حاصل از مدل های ارائه شده برای مدول الاستیک، ازدیاد طول تا شکست و استحکام ضربه ترکیبات.

شماره ترکیب	Elastic Modulus (MPa)	Elongation at break (%)	Impact Strength (J/m ²)
۱	۲۳۳	۲۷/۷۴	۱/۲۳
۲	۳۹۱	۱۹/۲۲	۳/۵۷
۳	۲۳۲	۳۴/۷۷	۸/۴۲
۴	۳۰۱	۳۱/۰۳	۵/۱۹
۵	۲۷۷	۳۰/۹	۳/۱۹
۶	۳۹۱	۲۴/۶۵	۲/۳۱
۷	۲۳۸	۲۹/۳۴	۴/۲۴
۸	۳۵۱	۲۳/۱۰	۳/۳۶
۹	۴۲۳	۲۴/۳۶	۲/۵۷
۱۰	۳۰۶	۳۳/۶۷	۷/۴۳
۱۱	۳۱۲	۲۲/۸۰	۳/۶۲
۱۲	۳۳۹	۳۲/۱۱	۸/۴۷
۱۳	۳۲۰	۲۶/۰۰	۴/۴۲
۱۴	۳۲۰	۲۶/۰۰	۴/۴۲
۱۵	۳۲۰	۲۶/۰۰	۴/۴۲

همان طور که، از جدول ۶ مشاهده می شود نتایج حاصل از آزمون های مکانیکی انجام شده هم خوانی خوبی با نتایج حاصل از مدل های ارائه شده توسط روش رویه پاسخ وجود دارد.

۲-۳- ضرایب مدل رگرسیون برای استحکام ضربه،

مدول الاستیک و ازدیاد طول تا شکست

جدول آنالیز واریانس و ضرایب معادله رگرسیون برای مدول الاستیک در جدول ۵ ارائه شده اند.

جدول (۵): ضرایب معادله رگرسیون برای خواص مکانیکی.

Term	ضرایب مدل رگرسیون		
	استحکام ضربه	مدول الاستیک	ازدیاد طول تا شکست
Const	۴/۴۲۰	۳۲۰/۳۳	۲۶/۰۰
N	-۰/۴۴۱	۵۶/۷۵	-۳/۱۲۵
X	۲/۴۲۵	-۲۲/۶۳	۴/۶۵۴
P	۰/۵۲۱	-۱۹/۶۲	-۰/۷۷۹
N×N	-۱/۱۴۱	-۳۰/۶۷	۰/۵۰۴
X×X	۱/۱۰۶	۷/۵۸	۱/۷۴۶
P×P	۰/۳۲۹	۲۵/۰۸	۰/۴۹۶
N×X	-۱/۱۷۰	-۲۲/۲۵	۱/۲۵۰
N×P	-۰/۴۳۷	-۷/۷۵	۰/۰۰۰
X×P	۰/۲۲۰	۳۶/۰۰	-۰/۲۴۳
R ²	R ² (adj)= ۹۷/۳۸ R ² (pred)= ۸۵/۱۹	R ² (adj)= ۹۸/۸۸ R ² (pred)= ۹۳/۵۹	R ² (adj)= ۹۹/۴۰ R ² (pred)= ۹۶/۵۷

جدول ۵ ضرایب معادله رگرسیون کدگذاری شده برای هر یک از خواص مکانیکی مورد بررسی را نشان می دهد. برای نوشتن مدل رگرسیون کدگذاری شده باید فقط ضرایب مربوط به فاکتورها، مربعات و برهم کنش هایی آورده شوند که مقدار P مربوط به جدول آنالیز واریانس آنها کمتر از ۰/۰۵ باشد. مدل رگرسیون کدگذاری شده برای استحکام ضربه، مدول الاستیک و ازدیاد طول تا شکست به ترتیب به صورت معادله های (۳-۵) نشان داده شده اند:

$$\begin{aligned} \text{Impact strength} &= -1.141 (N)^2 + 1.106 (X)^2 - \\ &1.170 (N \times X) - 0.441 N + 2.425 X + 0.521 PP) \quad (3) \\ &+ 4.420 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Elastic modulus} &= -30.67 (N)^2 + 25.08 (PP)^2 - \\ &22.25 (N \times X) + 36 (X \times PP) + 56.75 N - 22.63 \quad (4) \\ &X - 19.62 PP + 320.33 \end{aligned}$$

۳-۳- پیش‌بینی حالت‌های بهینه

روش رویه پاسخ برای بهینه‌سازی مجموعه‌هایی شامل فازهای زیر است:

۱- غربالگری: آزمایش‌ها با هدف تعیین پارامترهای کنترل انجام شده است که باعث اثرات قابل توجه آماری از لحاظ اهمیت کاربردی برای موضوع مورد مطالعه می‌شود.

۲- مدل‌سازی: آزمایش‌ها با هدف مدل‌سازی ویژگی‌های کیفی پاسخ به‌عنوان یک تابع برحسب پارامترهای کنترل برنامه‌ریزی شده‌اند.

۳- بهینه‌سازی: مدل پاسخ برای تعیین مقادیر بهینه متغیرها که در آن شرایط بهینه خواص سیستم به‌دست می‌آید، تحلیل می‌شود.

یک رویکرد مفید برای حل یک مشکل بهینه‌سازی چند پاسخ، استفاده از تابع مطلوبیت است. رویکرد تابع مطلوبیت متشکل از مدل‌های پاسخ تخمین زده شده (y) است، که معمولاً مدل‌های درجه دوم به‌صورت توابع مطلوبیت انفرادی (d) هستند. که در نهایت توابع مطلوبیت انفرادی به‌صورت تابع مرکب (D) تجمیع پیدا می‌کنند. این تابع معمولاً یک هندسه یا میانگین محاسباتی است که به‌ترتیب به مقدار حداکثر یا حداقل خواهد شد. تابع مطلوبیت انفرادی در بازه ۰ تا ۱ (0 < d < 1) تغییر می‌کند. با توجه به مشخصات پاسخ (خاصیت)، سه شکل از تابع مطلوبیت وجود دارد:

۱- برای یک تابع هدف که باید بیشترین شود، بیشترین مقدار بهترین جواب است.

۲- برای یک تابع هدف که باید کمترین شود، کمترین مقدار بهترین جواب است.

۳- برای یک تابع هدف که باید مقدار مشخصی شود [۳۰]. در تحقیق حاضر هر سه پاسخ استحکام ضربه، مدول الاستیک و ازدیاد طول تا شکست باید بیشترین شوند. اگر هدف این باشد که پاسخ مورد نظر بیشترین شود، تابع مطلوبیت انفرادی می‌تواند به‌صورت معادله ۶ ارائه شود:

$$d = \begin{cases} 0 & y < L \\ \left(\frac{y-L}{T-L}\right)^r & L \leq y \leq T \\ 1 & y > T \end{cases} \quad (6)$$

که L حد پایین و T حد بالای پاسخ را نشان می‌دهند. زمانی که وزن $r=1$ باشد تابع مطلوبیت خطی خواهد بود. انتخاب مقدار بزرگتر از ۱ برای r اهمیت آن را برای یک

مقدار مشخص بیشتر می‌کند و انتخاب $0 < r < 1$ اهمیت آن را کم می‌کند. به‌دلیل این که در تحقیق حاضر به‌دنبال رسیدن به بیشترین مقدار برای هر سه خاصیت مکانیکی هستیم و نه به‌دنبال یک مقدار مشخص، مقدار $r=0.5$ انتخاب شده است.

در یک وضعیت چند پاسخی، حالت ایده‌آل زمانی اتفاق می‌افتد که مقدار هر یک از توابع مطلوبیت برابر ۱ باشد. بیشترین مقدار تابع مطلوبیت حالت مرکب $D(x)$ می‌تواند به‌صورت یک میانگین هندسی توابع مطلوبیت انفرادی $d_i(y_i(x))$ به‌شکل معادله زیر نشان داده شود:

$$D(x) = [d_1(y_1(x)) \times d_2(y_2(x)) \times \dots \times d_m(y_m(x))]^{\frac{1}{m}} \quad (7)$$

که در آن m به تعداد پاسخ‌ها اشاره دارد. بنابراین، تابع مطلوبیت در تحقیق حاضر برای سه پاسخ (استحکام ضربه، مدول الاستیک و ازدیاد طول تا شکست) تحت عنوان تابع مطلوبیت کامپوزیت مورد بررسی به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$D(x) = [d_1(\text{Impact}(x)) \times d_2(\text{Modulus}(x)) \times d_3(\text{Elongation}(x))]^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

که در آن، D اشاره به تابع مطلوبیت کامپوزیت اشاره دارد. d_1 مربوط به تابع مطلوبیت پاسخ استحکام ضربه، d_2 مربوط به تابع مطلوبیت پاسخ مدول الاستیک و d_3 مربوط به تابع مطلوبیت پاسخ ازدیاد طول تا شکست می‌باشند.

محاسبه مقادیر بهینه برای هر سه پاسخ به‌صورت هم‌زمان با کمک نرم‌افزار Minitab[®] 17 انجام شد نتایج حاصل از پیش‌بینی مقادیر بهینه در شکل ۵ نشان داده شده است.

براساس شکل ۵ مقدار تابع مطلوبیت کامپوزیت $D=0.9405$ به‌دست آمده است. همچنین برای رسیدن به بیشترین مقدار (بهینه) برای هر پاسخ، پارامترهای مؤثر باید به مقادیر زیر در ترکیبات حضور داشته باشند:

نانوذرات سیلیکا: ۱/۶۱۶۲ درصد وزنی

لاستیک نیتریل کربوکسیل شده: ۱۰ درصد وزنی

عامل سازگار کننده: ۴/۹۶۹۷ درصد وزنی

جدول (۷): نتایج آزمایش اعتبارسنجی برای حالت‌های بهینه.

پاسخ	مقدار پیش‌بینی شده	نتیجه آزمون اعتبارسنجی
استحکام ضربه (J/m ²)	۸/۹۰	۸/۴۰
مدول الاستیک (MPa)	۴۱۵/۱۲	۴۱۲/۳۲
ازدیاد طول تا شکست (%)	۳۲/۳۲	۲۹/۵۲

۴- نتایج

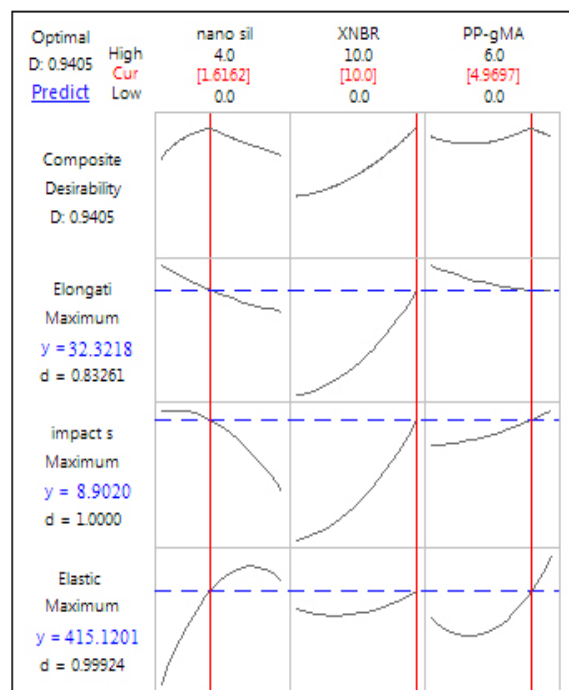
در تحقیق حاضر، خواص مکانیکی شامل استحکام ضربه، مدول الاستیک و ازدیاد طول تا شکست نانوکامپوزیت‌هایی شامل ماتریسی از دو فاز پلیمری پلی‌پروپیلن و لاستیک نیتریل کربوکسیل شده، تقویت شده با نانوپودر سیلیکا به کمک روش رویه پاسخ بهینه‌سازی شده است. نتایج حاصل نشان داد:

- ۱- هر سه فاکتور اصلی مورد بررسی با احتمال بالای ۹۵ درصد بر خواص مکانیکی مذکور مؤثر واقع شده‌اند.
- ۲- نانوپودر سیلیکا بیشترین تأثیر را بر مدول الاستیک و لاستیک نیتریل بیشترین تأثیر را بر استحکام ضربه و ازدیاد طول تا شکست دارند.
- ۳- برای هر خاصیت کششی یک مدل رگرسیون ارائه شده است. مقادیر بالای R^2 برای هر سه خاصیت کششی نشان می‌دهد که مدل‌های ارائه شده توانایی پیش‌بینی خوبی را دارا هستند.

۴- مقادیر بهینه J/m^2 ۸/۹۰ برای استحکام ضربه، Mpa ۴۱۵/۱۲ برای مدول الاستیک و ۳۲/۳۲ درصد برای ازدیاد طول تا شکست با ازای ۱/۶۱۶۲ درصد وزنی از نانوپودر سیلیکا، ۱۰ درصد وزنی از لاستیک نیتریل و ۴/۹۶۹۷ درصد وزنی از عامل سازگار کننده به‌دست آمدند.

۵- نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های اعتبارسنجی با مقادیر پیش‌بینی شده به کمک روش رویه پاسخ نزدیکی خوبی داشتند.

به عبارت دیگر روش رویه پاسخ در مرحله اول با طراحی آزمایش و در مرحله دوم با کمک تابع مطلوبیت توانسته است مقادیر بهینه خواص مکانیکی مورد بررسی را پیش‌بینی کند. همان‌طور که، از شکل ۵ مشاهده می‌شود مقادیر مطلوب پیش‌بینی شده به ترتیب برای استحکام ضربه ۸/۹۰ با مطلوبیت انفرادی ۱/۰۰، مدول الاستیک ۴۱۵،۱۲ با مطلوبیت انفرادی ۰/۹۹ و ازدیاد طول تا شکست ۳۲/۳۲ با مطلوبیت انفرادی ۰/۸۳ می‌باشند.



شکل (۵): نتایج و نمودارهای فرآیند بهینه‌سازی هم‌زمان پارامترها.

۴-۳- آزمایش‌های اعتبارسنجی

بعد از بهینه‌سازی و مشخص شدن مقادیر بهینه برای هر فاکتور و مقدار پاسخ مربوط به آن، یک آزمایش تأیید با استفاده از پارامترهای پیش‌بینی شده انجام شد. برای این کار ترکیباتی تقریباً شامل ۱/۶۱۶۲ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا، ۱۰ درصد وزنی لاستیک نیتریل کربوکسیل شده و ۴/۹۶ درصد وزنی عامل سازگار کننده تهیه شدند و برای به‌دست آوردن استحکام ضربه، مدول الاستیک و ازدیاد طول تا شکست آزمون‌های ضربه و کشش با سه‌بار تکرار انجام شدند. نتایج حاصل از آزمایش‌های اعتبارسنجی در جدول ۷ نشان داده شده‌اند.

۵- نتیجه گیری

در پایان این نتیجه حاصل می شود که با افزودن همزمان یک الاستومر و یک نانوذره به یک پلیمر پرکاربرد می توان بین خواص مکانیکی آن یک تعادل مناسب برقرار کرده و برخی محدودیت های کابردی پلیمر زمینه را برطرف کرد.

۶- منابع

- Jumahat, A. and Soutis, C. "Tensile Properties of Nanosilica/Epoxy Nanocomposites", *Procedia Engineering*, Vol. 41, pp.1634-1640. 2012.
- Bezy, N.A. and Fathima, A.L. "Effect of TiO2 Nanoparticles on Mechanical Properties of Epoxy-Resin System", *International Journal of Engineering Research and General Science*. Vol. 3, No. 5, pp. 143-151, 2015.
- Kumar, K. and Ghosh, P.K. "Improving Mechanical and Thermal Properties of TiO2-Epoxy Nanocomposite", *Composites Part B: Engineering*. Vol. 97, pp. 353-360, 2016.
- Montazeri, A. and Javadpour, J. "Mechanical Properties of Multi-walled Carbon Nanotube/epoxy Composites", *Materials & Design*. Vol. 31, No. 9, pp. 4202-4208, 2010.
- Yue, L. and Pircheraghi, G. "Epoxy Composites with Carbon Nanotubes and Graphene Nanoplatelets – Dispersion and Synergy Effects", *Carbon*. Vol. 78, pp. 268-278, 2014.
- Ying, Z. and Xianggao, L. "Highly Exfoliated Epoxy/clay Nanocomposites: Mechanism of Exfoliation and Thermal/mechanical Properties", *Composite Structures*, Vol. 132, pp. 44-49, 2016.
- Daneshpayeh, S., Tarighat, A., Ashenai Ghasemi, F. and Bagheri, M.S. "A fuzzy Logic Model for Prediction of Tensile Properties of Epoxy/Glass Fiber/Silica Nanocomposites", *Journal of Elastomers and Plastics*. DOI: 10.1177/0095244317733768.
- Garcia, M., Vilet, G.V. and Jain, S. "Polypropylene/SiO2nanocomposites with Improved Mechanical Properties", *Reviews on Advanced Materials Science*, Vol. 6, No. 2, pp. 169-175, 2004.
- Mirzapour, A., Asadollahi, M.H., Baghshaei, S. and Akbari, M." Effect of Nanosilica on the Microstructure, Thermal Properties and Bending Strength of Nanosilica Modified Carbon Fiber/Phenolic Nanocomposite", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. Vol. 63, pp. 159-167, 2014.
- Jacob, S. Suma, K.K. Mendez, J.M. and George, K.E."Reinforcing effect of nanosilica on polypropylene-nylon fiber composite", *Materials Science and Engineering: B*. Vol. 168, pp. 245-249, 2010.
- Singh, J., Singh, K., Ching, Y.C., Abdullah, L.C., Ching, K.Y., Razali, S. and Gan, S.N. "Optimization of Mechanical Properties for Polyoxymethylene/Glass Fiber/Polytetrafluoroethylene Composites Using Response Surface Methodology", *Polymers*, Vol. 10, No. 3, pp. 338-363, 2018.
- Pereira, E.L., Junior, A.L.O. and Fineza, A.G. "Optimization of Mechanical Properties in Concrete Reinforced with Fibers From Solid Urban Wastes (PET bottles) for the Production of Ecological Concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 149, pp. 837-848, 2017.
- Bäumer, A. and Zimmermann, E. "Optimization of Material Properties of High Strength Multiphase Steels via Microstructure and Phase Transformation Adjustment", *Characterization of Minerals, Metals, and Materials*, pp. 209-216. 2016.
- Selvakumar, V., Palanikumar, K., and Palanivelu, K. "Studies of Mechanical Characterization of Polypropylene/Na+-MMT Nanocomposites", *Journal of Minerals & Materials characterization & Engineering*, Vol. 9, No. 8, pp. 671-681, 2010.
- Bikiaris, D. "Microstructure and Properties of Polypropylene/Carbon Nanotube Nanocomposites", *Materials*, Vol. 3, No. 4, pp. 2884-2946, 2010.
- Wang, Y., Zou, H., Fu, Q., Zhang, G., Shen, K. and Thomann, R. "Shear-induced Morphological Change in PP/LLDPE Blend", *Macromolecular Rapid Communications*, Vol. 23, No. 13, pp. 749-752, 2012.
- Huerta-Martínez, B.M., Ramirez-Vargas, E., Medellín-Rodriguez, F.J. and Garcia, R.C. "Compatibility mechanisms between EVA and Complex Impact Heterophasicpp-Epx Copolymers as a Function of EP Content", *European Polymer Journal*, Vol. 41, No. 3, pp. 519-525, 2005.
- González, J., Albano, C., Ichazo, M. and Díaz, B. "Effects Ofcoupling Agents on Mechanical and Morphologicalbehavior of the PP/HDPE Blend with Two DifferentCaCO3", *European Polymer Journal*, Vol. 38, No. 12, pp. 2465-2475, 2002.
- Tchomakov, K.P., Favis, B.D., Huneault, M.A., Champagne, M.F. and Tofan, F. "Mechanical Properties and Morphology of Ternary PP/EPDM/PE Blends", *The Canadian journal of Chemical Engineering*, Vol. 83, No. 2, pp. 300-309, 2005.
- Bagheri, R. and Marouf, B. "Rubber-toughened Epoxies: A Critical Review", *Journal of Macromolecular Science®, Part C: Polymer Reviews*. Vol. 49, No. 3, pp. 201-225, 2009.
- Yang, H., Zhang, Q., Guo, M., Wang, C., Du, R. and Q. Fu, Q. "Study on the Phase Structures and Toughening Mechanism in PP/EPDM/SiO2 Ternary Composites", *Polymer*, Vol. 47, No. 6, pp. 2106-2115, 2006.
- Ashenai Ghasemi, F., Ghasemi, I. and Daneshpayeh, S. "A Study on Effect of Titanium Dioxide Nanoparticles on the Elastic Modulus, Impact and Tensile Strengths of Polypropylene/Linear Low Density Polyethylene (PP/LLDPE) Blends", *Journal of science and Technology of Composites*, Vol. 4, No. 4, pp. 386-390, 2018.
- Ashenai Ghasemi, F. and Eslami Farsani, M. "Effect of nano-CaCO3 on dynamic Mechanical Properties of Polypropylene", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 6, pp. 1-10, 2013.

27. Daneshpayeh, S., Ashenai Ghasemi, F., Ghasemi, I. and Ayaz, M. "Predicting of Mechanical Properties of PP/LLDPE/TiO₂ Nanocomposites by Response Surface Methodology", *Composites Part B*. Vol. 84, pp. 109-120, 2016.
28. Ashenai Ghasemi, F., Ghasemi, I., Menbari, S., Ayaz, M. and Ashori, A. "Optimization of mechanical Properties of Polypropylene/Talc/ Graphene Composites Using Response Surface Methodology", *Polymer Testing*. Vol. 53, pp. 283-292, 2016.
29. Montgomery, D.C. "Design and Analysis of Experiments", New York, John Wiley. 2001.
30. Kim, K. and Lin, D. "Simultaneous Optimization of Multiple Responses by Maximizing Exponential Desirability Functions", *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*. Vol. 49, No. 3, pp. 311-325, 2000.
24. Feli, S. and Jalilian, M. "Experimental and Optimization of Mechanical Properties of Epoxy/Nanosilica and Hybrid Epoxy/Fiberglass/Nanosilica Composites", *Journal of Composite Materials*. Vol. 50, No. 28, pp. 3891-3903, 2016.
25. Ashenai Ghasemi, F., Daneshpayeh, S., Ghasemi, I. and Ayaz, M. "An investigation on the Young's Modulus and Impact Strength of nanocomposites based on polypropylene/linear low-density polyethylene/titan dioxide (PP/LLDPE/ TiO₂) using response surface methodology", *Polymer Bulletin*. Vol. 73, No. 6, pp. 1741-1760, 2016.
26. Zare, Y., Garmabi, H. and Sharif, F. "Optimization of Mechanical Properties of PP/Nanoclay/ CaCO₃ Ternary Nanocomposite Using Response Surface Methodology", *Journal of Applied Polymer science*. Vol. 122, No. 5, pp. 3188-3200, 2011.

