



بهینه‌سازی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت PVC/NBR/Graphene برای دستیابی به بیشینه استحکام کششی و ازدیاد طول در هنگام شکست

محمد پورحاجی^۱، امیرحسین حمداله زاده^۱، محمد رضا نخعی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: m_nakhaei@sbu.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

مقاله پژوهشی

دریافت: ۳ شهریور ۱۴۰۲
پذیرش: ۱۵ آذر ۱۴۰۲

کلیدواژگان:

نانوکامپوزیت
خواص مکانیکی
پلی وینیل کلراید
نیتریل بوتادین رابر
گرافن

در این پژوهش با استفاده از روش اختلاط مذاب، نانوکامپوزیت پلی وینیل کلراید (PVC) / نیتریل بوتادین رابر (NBR) / گرافن ساخته شد. برای بررسی تاثیر درصد وزنی الاستومر NBR و درصد وزنی نانوصفحات گرافن بر خواص مکانیکی (استحکام کششی و درصد ازدیاد طول در هنگام شکست) نانوکامپوزیت PVC/NBR/Graphene، از روش رویه پاسخ (RSM) استفاده شد. با استفاده از جدول آنالیز واریانس برای خواص مکانیکی نانوکامپوزیت روابط ریاضی ارائه گردید و میزان تاثیر هر یک پارامترهای موادی بر خواص مکانیکی مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه نتایج روابط ریاضی و نتایج تجربی خطای کمی را نشان داد. همچنین برای تایید نتایج خواص مکانیکی، ریز ساختار نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی (SEM) بررسی شد. نتایج نشان داد با افزایش درصد وزنی نانوصفحات گرافن از ۰ تا ۲ درصد وزنی و کاهش NBR از ۴۰ به ۲۰ درصد وزنی در نانوکامپوزیت، استحکام کششی افزایش می‌یابد، درحالی که درصد ازدیاد طول در شکست کاهش پیدا می‌کند. با بهینه‌سازی خواص مکانیکی جهت داشتن همزمان بیشینه استحکام کششی (۱۵/۴ مگاپاسکال) و بیشینه درصد ازدیاد طول در هنگام شکست (۱۰۷/۶ درصد)، درصد وزنی نانوصفحات گرافن و NBR به ترتیب ۰/۸۱ و ۳۵/۱۸ درصد خواهد بود.

Optimizing the mechanical properties of PVC/NBR/Graphene nanocomposite for achieve maximum tensile strength and elongation at break

Mohammad Purhaji¹, Amir Hosein Hamdollahzade¹, Mohammad Reza Nakhaei^{2*}

1- MSc Student, Department of Mechanical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: m_nakhaei@sbu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 25 August 2023

Accepted: 6 December 2023

Keywords:

Nanocomposite
Mechanical Properties
Polyvinyl Chloride
Nitrile Butadiene Rubber
Graphene

Abstract

In this study, a nanocomposite based on polyvinyl chloride (PVC)/nitrile butadiene rubber (NBR)/Graphene nanoplates was prepared by melt mixing method. The response surface methodology (RSM) was employed to investigate the effect of weight percentages of NBR elastomer and graphene nanosheets on the mechanical properties (tensile strength and elongation at break) of the PVC/NBR/graphene nanocomposite. Mathematical relationships for the mechanical properties of the nanocomposite were presented using analysis of variance (ANOVA) table, and the degree of influence of each material parameter on the mechanical properties was studied. The comparison of mathematical relationships and experimental results showed low error. Additionally, the microstructure of the samples was examined using scanning electron microscope (SEM) to confirm the results. The results showed that by increasing the weight percentage of graphene nanosheets from 0 to 2% and decreasing NBR from 40 to 20% weight percentage in the nanocomposite, the tensile strength increases while the elongation at break decreases. By optimizing the mechanical properties to achieve maximum tensile strength (15.4 MPa) and maximum elongation at break (107.6%), the weight percentages of graphene nanosheets and NBR will be respectively 0.81 and 35.18%.

Please cite this article using:

Purhaji M, Hamdollahzade A H, Nakhaei M R. Optimizing the mechanical properties of PVC/NBR/Graphene nanocomposite for achieve maximum tensile strength and elongation at break. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 August 23;10(6):1-15. doi: 10.22034/IJME.2023.412811.1822 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

ترموپلاستیک به پلیمرهایی گفته می‌شود که با افزایش دما بدون تغییر شیمیایی ذوب می‌شوند. یکی از پرمصرف‌ترین آن‌ها پلی وینیل کلراید^۱ (PVC) می‌باشد که در تولید لوله‌های منعطف و چند لایه آب و تانکرهای نگهداری مایعات کاربرد زیادی دارد [۱]. پلیمر PVC عیوبی هم دارد که از این عیوب می‌توان به تحمل گرمایی محدود، تخریب به وسیله‌ی حلال‌های هیدروکربنی قوی و انعطاف‌پذیری پایین اشاره کرد. این معایب باعث محدودیت‌هایی در کاربرد PVC می‌شود. به همین علت در صنعت PVC با دیگر انواع پلیمرها مثل الاستومرها که انعطاف‌پذیری بالایی دارند ترکیب می‌شود تا بهبود خواص برای کاربردهای مختلف داشته باشد [۲،۳]. از انواع الاستومر می‌توان به نیتریل بوتادین^۲ رابر (NBR) اشاره کرد که ترکیب PVC با NBR علاوه بر افزایش انعطاف‌پذیری ترکیب، موجب بالا رفتن مقاومت در برابر حلال‌های هیدروکربنی ترکیب می‌شود [۴]. اما استحکام کششی ترموپلاستیک الاستومر افت می‌کند و برای برطرف نمودن این عیب، به ترکیب مواد صلب با الاستوکام با افزوده می‌شود [۵]. زمانی که ابعاد مواد صلب بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر باشد، نانوکامپوزیت‌هایی بدست می‌آید که نسبت استحکام به وزن بالایی دارند [۶،۵]. یکی از نانومواد پرکاربرد در نانوکامپوزیت‌های پایه پلیمری، نانوصفحات گرافن^۳ می‌باشد که ساختاری دوبعدی و لانه زنبوری شکل دارد [۷،۸]. ساختار نانوصفحات گرافن به صورت لایه‌ای است که به دو دسته‌ی کم لایه^۴ (FLG) و چند لایه^۵ (MLG) تقسیم می‌شود. نانوصفحات FLG بدلیل پخش بهتر در نانوکامپوزیت، خواص مکانیکی بهتری را نسبت به نوع نانوصفحات MLG ایجاد می‌کند [۹].

اسمی‌زاده و همکاران [۱۰]، اثر افزودن نانوذرات خاک رس به PVC/NBR با تمرکز بر خواص مکانیکی را بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان دهنده‌ی افزایش مدول و استحکام کششی و کاهش ازدیاد طول در هنگام شکست بود. در پژوهشی دیگر حاجی بابا و همکاران [۱۱]، ریز ساختار و خواص مکانیکی نانوکامپوزیت PVC/NBR تقویت‌شده با دو نوع نانو ذره خاک رس و نانو لوله‌های کربنی مورد بررسی قرار دادند که نتایج آن، بهبود خواص مکانیکی ترکیب بوده است. به‌گونه‌ای که در ۱ درصد وزنی نانولوله‌ی کربنی و ۵ درصد وزنی نانوذرات گرافن استحکام و مدول کششی به ترتیب ۸۰ و ۹۲ درصد افزایش پیدا کرد. در این پژوهش با بررسی تصاویر ریزساختار سطح شکست نمونه‌ها، پخش و ترکیب بهتر فازهای نانوکامپوزیت گزارش شد. سوبرامانیان^۶ و همکاران [۱۲]، پژوهش خود را بر روی تاثیر درصد دوده^۷-گرافن^۸ (CB-GNP) بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت PVC/NBR انجام دادند که نتیجه‌ی آن بهبود خواص مکانیکی و برهم کنش‌های سطحی اجزا ترکیب با افزایش میزان نانوذرات بود. از دیگر پژوهش‌های انجام شده در حوزه‌ی نانوکامپوزیت با پایه PVC/NBR می‌توان به تحقیقات ژانگ^۹ و همکاران [۱۳] اشاره کرد. آن‌ها آزمایش‌های خود را بر اساس افزایش و یا کاهش میزان نانولوله‌های کربنی در ماده PVC/NBR انجام دادند. در قسمتی از این تحقیقات تاثیر درصد نانولوله‌های کربنی بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت بررسی شد. نتایج استخراج شده بیانگر افزایش استحکام کششی به میزان ۱۲ درصد در ۳۰ phr نانولوله‌ی کربنی است. همچنین در این پژوهش نحوه‌ی ترکیب نانوذرات با فاز پلیمر پایه و فاز الاستومر به‌عنوان دیگر عامل موثر بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت بیان شد، بدین منظور در حالت اول نانوذرات ابتدا با PVC و سپس با NBR و در حالت دوم نانوذرات ابتدا با NBR و سپس با PVC ترکیب شد. نتایج حصول خواص مکانیکی بهتر در حالت اول نسبت به حالت دوم را گزارش می‌دهد.

روش رویه پاسخ^{۱۰} (RSM) مجموعه‌ای از روش‌های ریاضی است که بین متغیرهای پاسخ و متغیرهای مستقل (متغیرهای ورودی) رابطه‌ی ریاضی ایجاد می‌کند [۱۴،۱۵]. هدف استفاده از روش RSM، بهینه‌سازی و مدل‌سازی پاسخ با توجه به متغیرهای ورودی است. امروزه RSM کاربرد زیادی در مدل‌سازی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های پلیمری بر اساس پارامترهای درصد مواد و فرایند ساخت دارد [۱۶،۱۷]. در روش RSM می‌توان با توجه به تعداد و سطوح پارامترها از طرح‌های متفاوتی استفاده کرد. طرح‌های باکس بنکن^{۱۱}

¹ Polyvinyl Chloride

² Nitrile Butadiene Rubber

³ Graphene Nanoplates

⁴ Few Layers Graphene

⁵ Multi-Layer Graphene

⁶ Subramanian

⁷ Carbon Black

⁸ Graphene

⁹ Zhang

¹⁰ Response Surface Methodology

¹¹ Box-Behnken Design

(BBD) و مرکب سازی مرکزی^۱ (CCD) از جمله طرح‌های RSM می‌باشند که روش CCD نسبت به دیگر روش‌ها متداول‌تر است [۱۸-۲۴].

پیروی و همکاران [۴]، تاثیر نانولوله‌ی هالوست (HNT) و لاستیک NBR را با استفاده از روش پاسخ سطح بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت PVC/NBR/HNT بررسی کردند. در این مطالعه بهینه‌سازی به روش پاسخ سطح نشان داد برای داشتن بیشترین استحکام کششی و ازدیاد طول در هنگام شکست، درصد وزنی HNT و NBR بایستی ۳/۰۳ و ۳۴/۳۴ درصد انتخاب شود. با توجه به گسترش کاربرد روزافزون PVC در صنایع و اهمیت بهبود خواص مکانیکی این ماده، بهینه سازی مواد تشکیل دهنده‌ی ترکیبات PVC برای کاهش هزینه‌های تولید امری ضروری است. همچنین تاکنون هیچ پژوهشی مبنی بر بررسی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت PVC/NBR/Graphene ارائه نشده است. در این پژوهش تاثیر افزودن الاستومر NBR و نانوصفحات گرافن بر تغییرات استحکام کششی، درصد ازدیاد طول و ریزساختار نانوکامپوزیت PVC/NBR/Graphene بررسی می‌شود. همچنین با استفاده از روش پاسخ سطح و طرح مرکب سازی مرکزی (CCD)، مدل سازی و بهینه سازی استحکام کششی و درصد ازدیاد طول بر اساس درصد وزنی مواد تشکیل دهنده جهت دستیابی به بیشینه خواص مکانیکی انجام خواهد شد.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مواد اولیه

PVC تولید پتروشیمی بندر امام با ضریب K معادل ۶۵ است. NBR مورد استفاده محصول شرکت Kumho کره جنوبی با نام تجاری 35L است. درصد وزنی آکریلو نیتریل^۲ (ACN) در NBR ۳۴ درصد است. گرافن تهیه شده از نوع MLG و محصول شرکت US Research Nanomaterial کشور آمریکا است. چگالی و هدایت الکتریکی نانوذرات مورد استفاده به ترتیب $2/26 \text{ g/cm}^3$ و $1/1$ است. سایر خواص فیزیکی مواد استفاده شده در ترکیب نمونه‌ها با توجه به برگه‌ی مشخصات محصول که توسط شرکت تولید کننده ارائه شده است در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

جدول ۱ خصوصیات مواد اولیه

مقدار	خصوصیات	مواد
1.3-1.6 g/cm ³	چگالی	PVC
34g/10min(190°C.21.6Kg)	شاخص جریان مذاب	
2.2g/ cm ³	چگالی	NBR
41 (ML (1+4),100°C)	ویسکوزیته	
> 95% wt	مقدار کربن	
400-800 (m ² /g)	سطح ویژه	Graphene
10-12 (nm)	ضخامت	

۲-۲- دستگاه‌ها و تولید نمونه‌ها

برای ساخت نمونه‌های اولیه ابتدا مواد اولیه PVC، NBR و نانوصفحات گرافن به مدت ۸ ساعت در دستگاه خشک‌کن در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به منظور رطوبت‌گیری قرار گرفت. اختلاط مواد اولیه با دستگاه مخلوط کن داخلی (Brabender) مدل TES-20 انجام شد. بدین صورت که ابتدا PVC همراه با پایدار کننده‌ای با پایه‌ی قلع در دستگاه مخلوط کن ریخته شد. استفاده از پایدار کننده از سوختن PVC در دما و فشار مخلوط کن داخلی جلوگیری می‌کند و خواص مکانیکی نمونه‌ها بهبود پیدا می‌کند [۴]. سپس الاستومر

¹ Central Composite Design

² Acrylonitrile

NBR به مخزن مخلوط کن اضافه شد و پس از تثبیت گشتاور، نانوذرات گرافن به ترکیب افزوده شد. اختلاط هر کدام از مراحل به مدت ۹ تا ۷ دقیقه بوده است. سپس نمونه‌ها در دستگاه پرس داغ مدل Mini Test Press ساخت شرکت Toyoseiki ژاپن قرار داده شدند. پارامترهای فرایند ساخت در جدول ۲ قابل مشاهده است.

جدول ۲ محدوده پارامترهای فرایند [۴]

مقدار	خصوصیات	مواد
160	دمای اختلاط (درجه سانتی‌گراد)	مخلوط کن داخلی
50	سرعت دوران (دور بر دقیقه)	
9	مدت زمان فرایند (دقیقه)	
170	دمای فرایند (درجه سانتی‌گراد)	پرس داغ
20	فشار (مگاپاسکال)	

۲-۳- طراحی آزمایش

در طراحی آزمایشات به روش RSM، طرح مرکب‌سازی مرکزی و طرح باکس-بنکن دو روش متداول است. در طرح مرکب‌سازی مرکزی، نقاط آزمایشی از ترکیب نقاط فاکتوریال، نقاط مرکزی و نقاط محوری تشکیل می‌شوند. نقاط فاکتوریال تمام ترکیب‌های ممکن از سطوح مختلف فاکتورها به طور خطی هستند و نقاط مرکزی در مرکز فاکتورها قرار می‌گیرند. همچنین نقاط محوری در مقادیر بین نقاط فاکتوریال و نقاط مرکزی قرار می‌گیرند. این نقاط به ما امکان می‌دهند تعاملات خطی و غیرخطی بین فاکتورها و تعاملات درجه دوم بین فاکتورها در مدل آزمایشی بررسی شود [۲۰]. در این پژوهش طراحی آزمایش با استفاده از نرم افزار Design expert به روش RSM و طرح CCD با دو متغیر گرافن و NBR و ۵ سطح درصد وزنی انجام شده است. بررسی تاثیرات گرافن از ۰ تا ۲ درصد وزنی بر خواص مکانیکی ترموپلاستیک الاستومرها در پژوهش‌های بسیاری مورد بررسی قرار گرفته است، به گونه‌ای که در درصد‌های وزنی بالاتر از نانوذرات پدیده‌ی کلوخگی گزارش شده است [۲۱-۲۳]. همچنین محدوده وزنی ۱۰ تا ۵۰ درصد الاستومر NBR در ترکیب با ترموپلاستیک‌ها در تحقیقات بسیاری مشهود است [۲۲-۲۶]. سطوح طراحی آزمون در جدول ۳ و طرح‌های خروجی از CCD و نتایج بدست آمده از آزمون کشش در جدول ۴ قابل مشاهده است.

جدول ۳ متغیرهای موادی و محدوده عملکرد آن‌ها بر اساس طرح CCD [۲۱،۴]

پارامترها	واحد	علائم اختصاری	سطوح				
NBR	%	N	-2	-1	0	1	2
			10	20	30	40	50
Graphene	%	G	0	0/5	1	1/5	2

۲-۴- آزمون‌ها

۲-۴-۱- آزمون کشش

آزمون کشش بر اساس استاندارد ASTM D-638 با دستگاه تست کشش STM-20 ساخت شرکت سنتام ایران انجام شد. در این آزمون سرعت فک ۵ میلی‌متر بر دقیقه و دمای آزمون ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد بوده است. برای اطمینان از صحت نتایج آزمایش، هر آزمون در شرایط یکسان ۳ مرتبه تکرار شد.

جدول ۴ طراحی آزمایش بر اساس سطوح متغیر ورودی

شماره آزمایش	علائم اختصاری	PVC (wt.)	NBR (wt.)	Graphene (wt.)	استحکام کششی (MPa)	ازدیاد طول در هنگام شکست (%)
1	PN30G1	69	30	1	19.2±0.3	82±0.6
2	PN20G1.5	78.5	20	1.5	26±0.9	54±0.2
3	PN30G0	70	30	0	17.1±0.4	101±0.8
4	PN40G0.5	59.5	40	0.5	12.6±0.4	124±1.5
5	PN30G2	68	30	2	24.3±0.5	67±0.8
6	PN40G1.5	58.5	40	1.5	14.9±0.2	99±1.2
7	PN50G1	49	50	1	8.3±0.9	156±1.1
8	PN30G1	69	30	1	19±0.3	80±0.8
9	PN30G1	69	30	1	19.1±0.1	84±0.9
10	PN10G1	89	10	1	26.2±1.0	45±0.2
11	PN20G0.5	79.5	20	0.5	20.4±0.8	60±0.1

۲-۴-۲- آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی

آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ (SEM) با دستگاه Vegall-XMU ساخت شرکت Tescan کشور جمهوری چک با ولتاژ 20KV و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد. برای بهبود رسانایی الکتریکی جهت جذب الکترون و بالا بردن کیفیت تصاویر ریز ساختار، سطح نمونه‌ها با لایه‌ی نازکی از طلا پوشیده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آنالیز واریانس

جدول آنالیز واریانس^۲ برای آنالیز داده‌ها و بدست آوردن تاثیر متغیرهای ورودی بر نتایج خروجی و ارایه مدلی با بهترین تطابق استفاده می‌شود. این جدول شامل مجموع مربعات، میانگین مربعات، P-value و F-value می‌باشد که P نشان دهنده‌ی پایین‌ترین سطح اطمینان و F نشان‌دهنده‌ی تغییرات داده در نزدیکی میانگین است. در جداول ۵ و ۶ مقادیر P-value پایین‌تر از ۵ درصد به عنوان استاندارد اطمینان برای هر پارامتر در نظر گرفته شده و پارامترهایی که دارای P-value بزرگتر از ۵ درصد هستند در مدل‌سازی مورد بررسی قرار نمی‌گیرد [۲۷-۲۹]. با توجه به جداول ۵ و ۶، مقادیر مربوط به ضرایب همبستگی بیانگر مناسب بودن معادلات برای توضیح مناسب ضریب رگرسیون خطی می‌باشند [۲۶]. همچنین در این جداول تفاوت مقادیر ضریب همبستگی تعدیل یافته و پیش‌بینی شده کمتر از مقدار عددی ۰/۲ می‌باشد که در کنار بیشتر بودن نسبت سیگنال به نویز از مقدار عددی ۴، نشان دهنده‌ی تطابق داده‌های تجربی و مقادیر پیش‌بینی شده با اختلاف ناچیز است [۳۰].

۳-۲- استحکام کششی

با توجه به جدول ۵ ضریب همبستگی و ضریب همبستگی پیش‌بینی شده برای استحکام کششی به ترتیب برابر ۰/۹۶۶۹ و ۰/۹۴۱۸ است که نشان دهنده‌ی تطابق بالای معادله‌ی ریاضی بدست آمده و داده‌های آزمایش می‌باشد. رابطه‌ی ۱، معادله‌ی بدست آمده برای استحکام کششی بر اساس درصد وزنی متغیرهای وزنی است؛ در این معادله همه‌ی پارامترها بدلیل داشتن مقدار P-value کمتر از ۵ درصد مهم تلقی می‌شوند و در معادله‌ی استحکام کششی تاثیر دارند.

$$\text{استحکام کششی} = 21.50 - 0.022 \times N + 5.35 \times G - 0.165 \times N \times G - 0.0044 \times N^2 + 1.66 \times G^2 \quad (1)$$

¹ Scanning Electron Microscopy

² ANOVA

جدول ۵ آنالیز واریانس برای استحکام کششی

تاثیر موثر	F-Value	P-Value	درجه آزادی	مجموع مربعات	پارامترها
دارد	282.3	<0.0001	5	305.41	رابطه
دارد	1146.5	<0.0001	1	249.34	NBR (N)
دارد	193.37	<0.0001	1	41.44	Graphene (G)
دارد	12.7	0.0160	1	2.72	N×G
دارد	20.18	0.008	1	3.87	N ²
دارد	15.45	0.0109	1	3.32	G ²
	----	-----	5	1.07	باقیمانده ^۱
ندارد	5.05	0.0579	3	0.75	عدم تناسب ^۲
نسبت سیگنال به نویز = 53.426			ضریب همبستگی = 0.9669		
ضریب همبستگی پیش‌بینی شده (predicted) = 0.9418			ضریب همبستگی تعدیل یافته (adjusted) = 0.9630		

جدول ۶ آنالیز واریانس برای ازدیاد طول در هنگام شکست

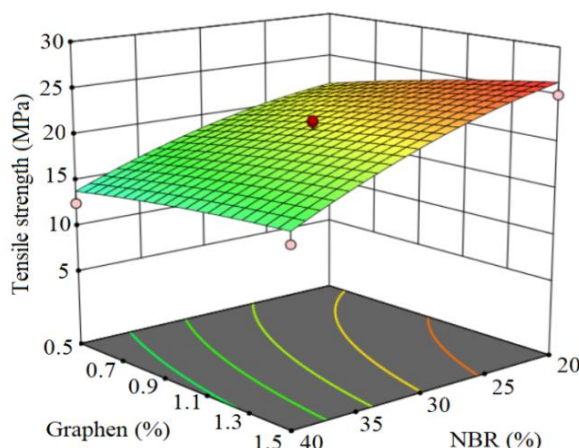
تاثیر موثر	F-Value	P-Value	درجه آزادی	مجموع مربعات	پارامترها
دارد	338.24	<0.0001	5	10501.6	رابطه
دارد	1470.3	<0.0001	1	9130.1	NBR (N)
دارد	131.53	0.0001	1	816.75	Graphene (G)
دارد	14.53	0.0125	1	90.25	N×G
دارد	68.68	0.0004	1	426.49	N ²
دارد	1.03	0.3567	1	6.40	G ²
	-----	----	5	31.05	باقیمانده
ندارد	1.92	0.3604	3	23.05	عدم تناسب
نسبت سیگنال به نویز = 59.951			ضریب همبستگی = 0.9941		
ضریب همبستگی پیش‌بینی شده (predicted) = 0.9831			ضریب همبستگی تعدیل یافته (adjusted) = 0.9901		

در روش پاسخ سطح می‌توان با استفاده از پاسخ‌های بدست آمده از معادلات و ثابت قرار دادن دیگر متغیرها تاثیر متقابل دیگر پارامترها را بررسی کرد. در شکل ۱ تاثیر متقابل پاسخ با دو متغیر NBR و گرافن را به صورت سه‌بعدی نشان می‌دهد. باتوجه به شکل ۱، با افزایش گرافن استحکام ماده بیشتر می‌شود. دلیل این افزایش، قوی‌تر شدن پیوندهای بین فازهای ترکیب با افزایش نانوذرات است که موجب محدود شدن حرکت زنجیره‌های پلیمری می‌شود و استحکام ماده افزایش می‌یابد [۲۷،۹]. مطابق شکل ۱، با افزایش NBR استحکام کششی کاهش پیدا می‌کند که این رفتار مکانیکی را می‌توان به استحکام کششی پایین‌تر لاستیک NBR نسبت به

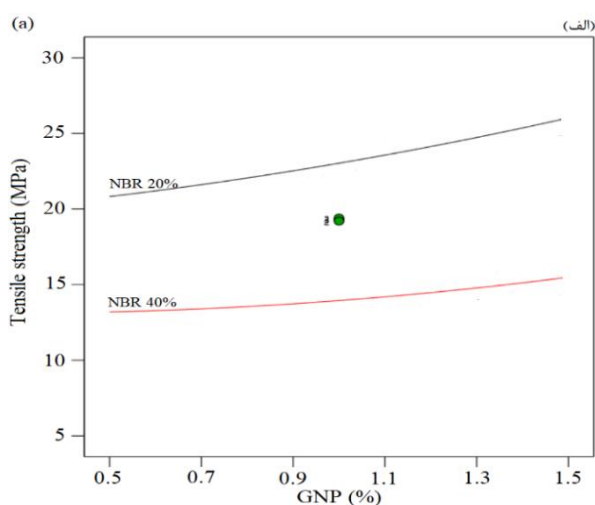
¹ Residual

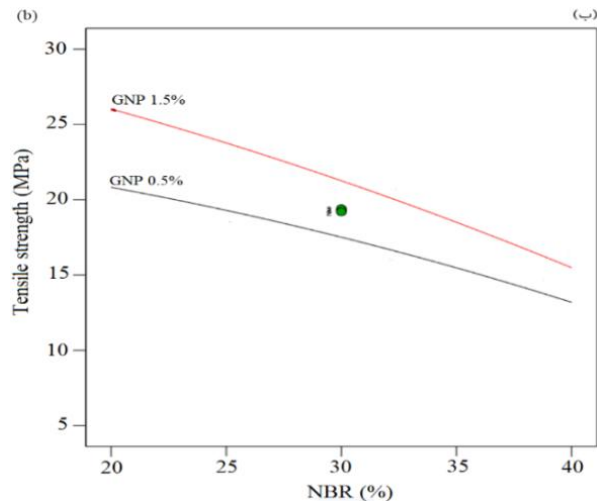
² Lack of Fit

ماتریس پایه‌ی PVC نسبت داد [۲۳]. شکل ۲ تغییرات استحکام کششی با تغییر هر یک از متغیرهای موادی را به صورت دو بعدی نشان می‌دهد. بدین منظور تغییرات به گونه‌ای بررسی می‌شود که تغییر یک متغیر با ثابت بودن متغیر دیگر چه تاثیری بر پاسخ می‌گذارد. با توجه به شکل ۲ الف، در ۲۰ درصد وزنی NBR، با تغییر نانوذرات گرافن از ۰/۵ تا ۱/۵ درصد، استحکام کششی ۲۷ درصد افزایش و در ۴۰ درصد وزنی NBR استحکام کششی ۱۸ درصد افزایش داشته است. دلیل افزایش نرخ کاهش استحکام با کاهش NBR، علاوه بر استحکام کششی پایین‌تر لاستیک NBR نسبت به PVC، کاهش تعامل کم بین نیتریل و PVC است. به طوری که با افزایش اندازه فاز لاستیک پیوند بین فازهای ترکیب تزیف می‌شود [۳۱]. از شکل ۲ ب افزایش نرخ کاهش استحکام کششی در درصد‌های وزنی بالاتر از گرافن مشاهده می‌شود. به طوری که با تغییر درصد وزنی NBR از ۲۰ به ۴۰ درصد در درصد وزنی ۰/۵ از نانوذرات گرافن، کاهش ۳۸/۲ درصدی و در درصد وزنی ۱/۵ از نانوذرات کاهش ۴۱/۵ درصدی مشاهده می‌شود. افزایش نرخ کاهش استحکام در درصد‌های بالا از نانوذرات، بدلیل افزایش احتمال کلوخه شدن نانوذرات در ترکیب است. نقاط کلوخه نقاط مناسبی برای تمرکز تنش و شروع ترک در نمونه‌ها هستند [۳۲، ۹]. همچنین با بالا رفتن درصد وزنی الاستومر، فاز بستر ترموپلاستیک کوچک‌تر می‌شود و احتمال کلوخگی نانوذرات در ترکیب بالا می‌رود. در واقع نانوذرات به دلیل داشتن سطح ویژه‌ی بالا، انرژی آزاد سطحی بسیار زیادی دارند، این امر باعث کاهش فاصله میان نانو صفحات گرافن می‌شود و امکان کم‌تر شدن فاصله‌ی صفحات فراهم می‌شود [۳۳-۳۲]. به طور کلی در صورت عدم کلوخگی نانوذرات در درصد‌های وزنی بالا و کاهش فاز الاستومری، پیوندهای بین ترکیبات نانوکامپوزیت قوی‌تر می‌شود که این امر موجب بهبود استحکام کششی نمونه‌ها می‌شود [۳۳].



شکل ۱ نمودار سه‌بعدی تاثیر درصد NBR و گرافن بر استحکام کششی





شکل ۲ تاثیر متغیرهای موادی بر استحکام کششی در درصدهای وزنی ثابت الف) NBR ب) GNP

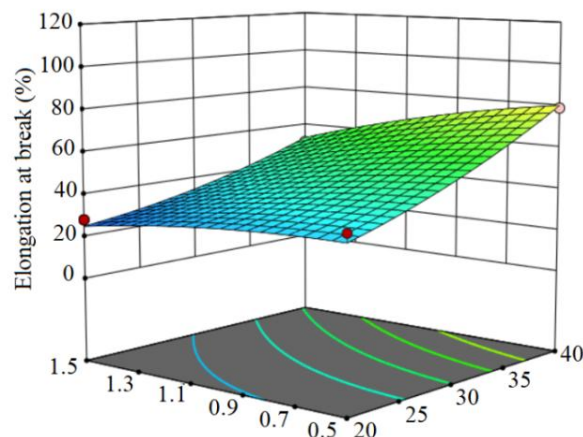
۳-۳- ازدیاد طول در هنگام شکست

از جدول آنالیز واریانس بدست آمده برای ازدیاد طول در هنگام شکست (جدول ۶)، مشاهده می‌شود که تمامی پارامترها به جز توان دوم پارامتر نانوذرات گرافن دارای P-value کمتر از ۵ درصد هستند و در معادله ریاضی اثر می‌گذارند. همچنین مقادیر ضریب همبستگی و ضریب همبستگی پیش‌بینی شده برابر با ۰/۹۹۴۱ و ۰/۹۸۳۱ است که می‌توان تطابق بالای معادله ریاضی بدست آمده برای ازدیاد طول در هنگام شکست و داده‌های تجربی را نتیجه گرفت.

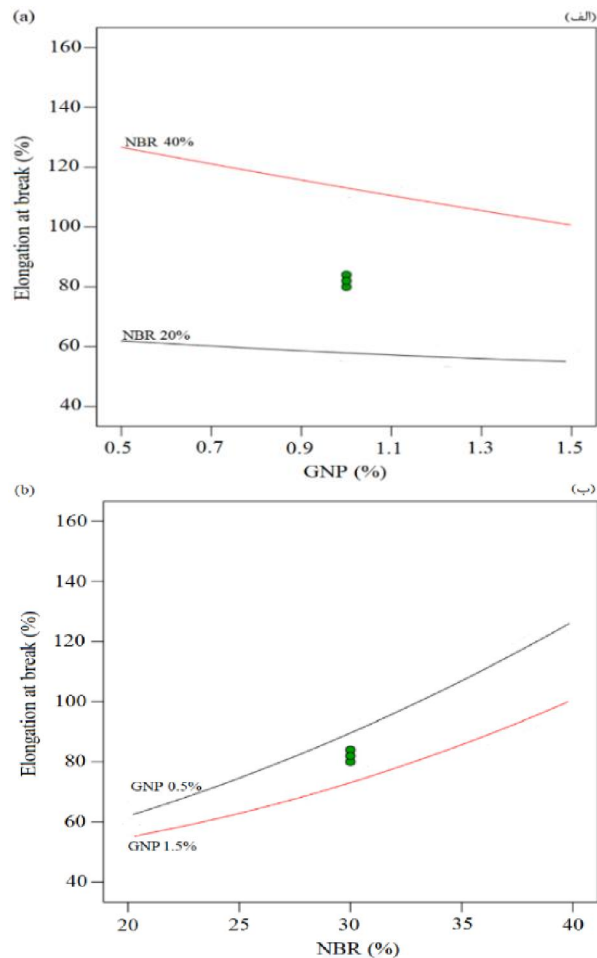
رابطه ۲، معادله بدست آمده برای درصد ازدیاد طول در هنگام شکست بر اساس درصد وزنی متغیرهای وزنی است.

$$30.65 + 0.89 \times N + 7.39 \times G - 0.95 \times N \times G + 0.05 \times N^2 \quad (2)$$

شکل ۳ الف نمودار سه‌بعدی تاثیر متقابل فاز NBR و گرافن را بر ازدیاد طول در هنگام شکست نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳، با افزایش نانوذرات گرافن شاهد کاهش ازدیاد طول در هنگام شکست خواهیم بود که می‌تواند مربوط به افزایش محدودیت زنجیره‌های پلیمری و احتمال کلوخه شدن نانوصفحات در درصدهای وزنی بالاتر نانو صفحات باشد [۳۴]. همچنین با افزایش NBR در ترکیب، درصد ازدیاد طول در هنگام شکست افزایش پیدا می‌کند که به دلیل افزایش فاز لاستیکی نرم‌تر در ساختار ترکیب است [۳۳، ۹]. تغییرات درصد ازدیاد طول در هنگام شکست با تغییر یک متغیر موادی و ثابت قرار دادن دیگر متغیر در شکل ۴ به صورت دوطرفه نشان داده شده‌است. با ثابت قرار دادن NBR در درصد وزنی ۲۰ و ۴۰ و تغییر درصد نانو ذرات از ۰/۵ تا ۱/۵ درصد، درصد ازدیاد طول در هنگام شکست به ترتیب ۸ و ۴۰ درصد کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۳ نمودار سه‌بعدی تاثیر درصد NBR و گرافن بر درصد ازدیاد طول هنگام شکست



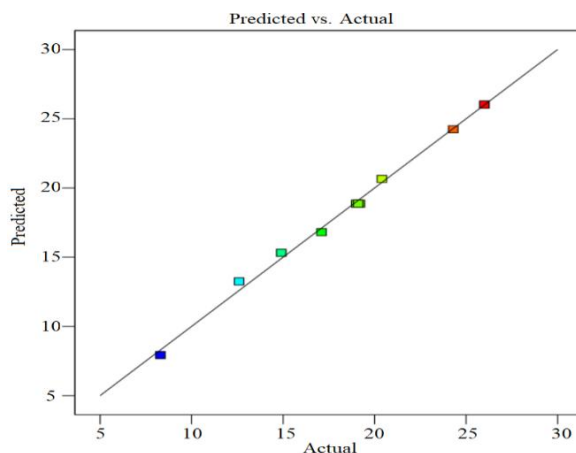
شکل ۴ تاثیر متغیرهای موادی بر درصد ازدیاد طول در هنگام شکست در درصدهای وزنی ثابت الف) NBR ب) GNP

با توجه به شکل ۴ ب از نتایج استنباط می‌شود که در درصدهای بالاتر نانوذرات گرافن، نرخ تغییر درصد ازدیاد طول در هنگام شکست کمتر می‌شود، به نحوی که با تغییر NBR از ۲۰ به ۴۰ درصد و گرافن با درصد وزنی ۰.۵، تغییر ۶۴ درصدی در ازدیاد طول هنگام شکست و در ۱.۵ درصد وزنی گرافن، با افزایش NBR درصد ازدیاد طول ۴۵ درصد افزایش پیدا می‌کند. این امر می‌تواند مربوط به بهبود برهم‌کنش فاز لاستیک با فاز ترموپلاستیک باشد، به گونه‌ای که با افزایش نانوذرات فاز لاستیک کوچک شده و سطح تماس و برهم‌کنش NBR و PVC در ترکیب بهبود می‌یابد [۳۵].

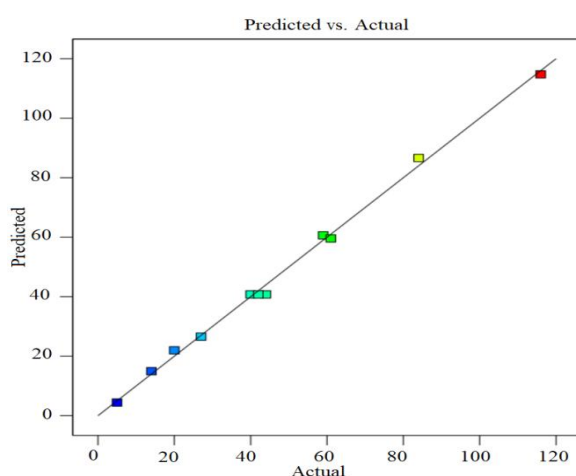
۳-۴- صحت سنجی مدل‌های ریاضی

از نمودار احتمال نرمال^۱ برای صحت‌سنجی معادلات بدست آمده برای پیش‌بینی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت ساخته شده استفاده شد. این نمودار معیاری برای صحت سنجی مقدار پیش‌بینی شده نسبت به مقدار واقعی است. در این نمودار هرچه فاصله‌ی داده‌های واقعی از تابع خطی کمتر باشد اعتبار روابط ریاضی بدست آمده بیشتر است. شکل ۵ و ۶ به ترتیب نمودار احتمال نرمال برای استحکام کششی و ازدیاد طول در هنگام شکست می‌باشند. همانطور که مشاهده می‌شود، در دو نمودار تمامی داده‌ها نزدیک به خط و یا بر روی خط صاف قرار دارند، که نشان دهنده‌ی درستی پراکندگی نقاط و صحت پیش‌بینی مدل ریاضی است [۲۴]. همچنین جهت بررسی بیشتر اعتبار روابط ریاضی ۳ و ۴، به غیر از آزمون‌های جدول ۳ چند آزمون کشش دیگر انجام شد تا نتایج بدست آمده از آزمون‌های تجربی جدید با نتایج پیش‌بینی شده روابط مقایسه گردد (جدول ۷).

¹ Perdicated vs Actual



شکل ۵ نمودار مقادیر واقعی به پیش‌بینی برای استحکام کششی



شکل ۶ نمودار مقادیر واقعی به پیش‌بینی برای ازدیاد طول در هنگام شکست

جدول ۷ اعتبار سنجی نتایج

خطا (%)	پیش‌بینی	استحکام کششی (MPa)		Graphene (%)	NBR (%)
		درصد ازدیاد طول در هنگام شکست (%)			
4.4	30.1	31.5			
4.2	31.8	33.5		1.5	10
3.7	23.1	22.7		1	20
2.4	55.4	4.1			
1.6	21.5	21.2		1.5	30
1.2	67.7	68.5			

۳-۵- بهینه‌سازی دو متغیره

در بهینه‌سازی متغیرها پارامترهای فرایند به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که به‌طور هم‌زمان یک یا چند متغیر تا حد امکان به بیشینه مقدار خود نزدیک باشند، به گونه‌ای که به پارامتر هدف درجه‌ی اهمیت بیشتری تعیین می‌شود. در این پژوهش ابتدا بهینه‌سازی با بیشینه قرار دادن هر یک از پارامترها به‌طور مجزا انجام شد (جداول ۸ و ۹)، به طوری که به پارامتر هدف در حالت بیشینه درجه‌ی اهمیت ۵ و برای پارامتر دوم درجه اهمیت ۱ اعمال شد. سپس بهینه‌سازی با بیشینه قرار دادن هم‌زمان استحکام کششی و ازدیاد طول در هنگام شکست با ضریب برابر انجام شده است که در جدول ۱۰ قابل مشاهده می‌باشد. در این جداول هرچه مقدار Desirability بیشتر باشد،

نشان دهنده‌ی نزدیک بودن مقادیر استحکام کششی و ازدیاد طول در ترکیب بهینه نسبت به بیشینه بودن هر یک از خواص در نمونه‌ها با درصد وزنی مختلف است [۶]. همانطور که در جدول ۸ و ۹ مشاهده می‌شود، زمانی که یکی از پارامترها مثل استحکام کششی در حالت بیشینه قرار می‌گیرد، درصد ازدیاد طول در هنگام شکست از بیشینه مقدار خود ۶۴ درصد کم‌تر است؛ یا زمانی که درصد ازدیاد طول در حالت بیشینه قرار می‌گیرد استحکام کششی ۴۹ درصد کمتر از بیشینه استحکام کششی در نمونه‌ها است. با توجه به جدول ۱۱ مقدار NBR و نانوذرات گرافن بهینه برای ساخت ترکیب با بیشینه خواص مکانیکی به ترتیب برابر با ۳۵/۱۸ و ۰/۸۱ درصد وزنی می‌باشد.

جدول ۸ متغیرهای موادی برای بیشینه شدن استحکام کششی

Desirability	ازدیاد طول هنگام شکست (%)	استحکام کششی (MPa)	Graphene (%)	NBR (%)	PVC (%)
0.7	55.78	25.82	1.52	20.58	74.8

جدول ۹ متغیرهای موادی برای بیشینه شدن ازدیاد طول هنگام شکست

Desirability	ازدیاد طول هنگام شکست (%)	استحکام کششی (MPa)	Graphene (%)	NBR (%)	PVC (%)
0.6	126.60	13.24	0.5	40	74.8

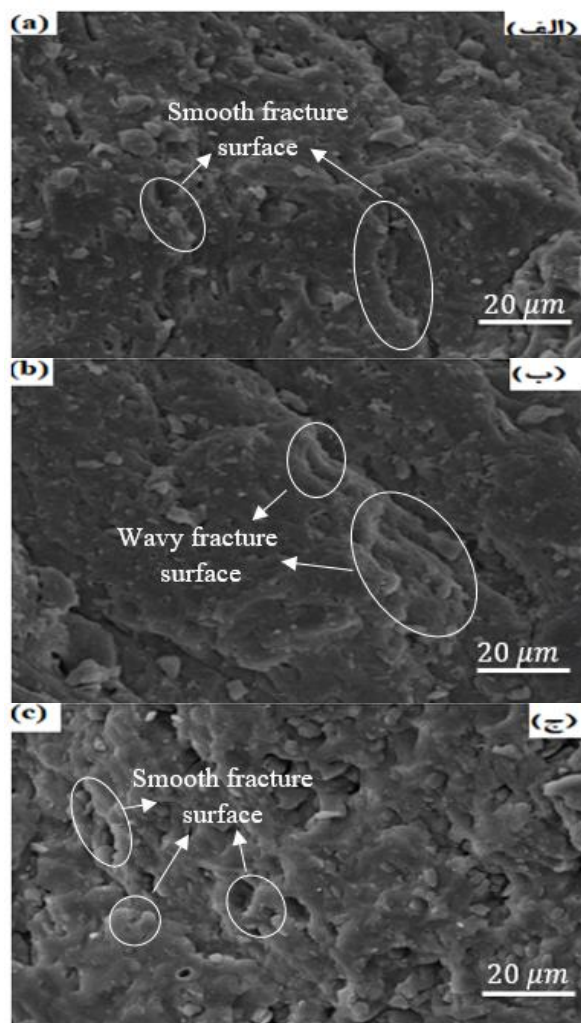
جدول ۱۰ متغیرهای موادی برای بیشینه شدن همزمان خواص مکانیکی

Desirability	ازدیاد طول هنگام شکست (%)	استحکام کششی (MPa)	Graphene (%)	NBR (%)	PVC (%)
0.5	107.65	15.36	0.81	35.18	74.8

۳-۶- بررسی ریز ساختار

با توجه به شکل ۷ پراکندگی قابل قبولی از پراکندگی نانوذرات در ترکیب ترموپلاستیک الاستومر PVC/NBR مشاهده می‌شود. حضور نانوذرات در ترکیب موجب چسبندگی بهتر بین فاز ترموپلاستیک و لاستیک شده و منجر به انتقال بار بهتر در بارگذاری‌های مختلف از فاز پلیمری زمینه به فاز تقویت کننده (نانوذرات گرافن) می‌شود که ارتباط مستقیمی بر بهبود خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها دارد [۳۶]. تاثیر تغییرات درصد نانوذرات گرافن بر ریز ساختار شکست نانوکامپوزیت PVC/NBR/Graphene با ۳۰ درصد وزنی NBR با مقایسه تصاویر SEM نمونه‌ها قابل تفسیر است. شکل ۷-الف و ۷-ب به ترتیب مربوط به ۱ و ۲ درصد وزنی گرافن در ترکیب است. با افزایش درصد وزنی نانوذرات سطوح شکست زبرتر می‌شوند که نشان دهنده‌ی افزایش مقاومت نمونه‌ها در برابر تنش وارده و شکست نرم نمونه‌ها است. مطابق با جدول ۷ استحکام کششی با افزودن یک درصد وزنی نانوذرات گرافن در ۳۰ درصد وزنی NBR استحکام کششی ۱۹.۱ به ۲۴.۳ افزایش پیدا کرده است.

با مقایسه شکل ۷-الف و ۷-ج می‌توان اثر تغییرات فاز الاستومر بر ریز ساختار ترکیب را مشاهده کرد. شکل ۷-ج تصویر SEM نمونه با نسبت وزنی PVC/NBR ۴۹/۵۰ و درصد نانوذرات گرافن در ترکیب ۱ درصد است. مشاهده می‌شود در شکل ۷-ج سطوح موج‌دار و زبر کاهش پیدا کرده‌است و با توجه به جدول ۵ استحکام کششی از ۱۹ به ۸/۳ مگاپاسکال کاهش پیدا کرده‌است. نتایج بدست آمده از بررسی ریزساختار با مطالعات پیروی و همکاران [۴] درخصوص تاثیر استحکام کششی بر سطح شکست ماده تایید می‌شود، به طوری که با افزایش زبری سطوح شکست استحکام کششی بیشتری در نانوکامپوزیت‌های پلیمری مشاهده می‌شود. همچنین مطابق با نتایج ریز ساختار نخعی و همکاران [۳۵] افزودن نانوذرات موجب افزایش ویسکوزیته‌ی فاز زمینه شده و موجب کاهش اختلاف ویسکوزیته‌ی فاز زمینه و فاز لاستیک می‌شود. به طوری که کاهش اختلاف ویسکوزیته‌ی دو فاز موجب اختلاط بهتر دو فاز ترموپلاستیک و لاستیک در فرایند اختلاط مذاب می‌شود. در نتیجه تعامل دوفاز بهتر شده و پیوند بین اجزا ترموپلاستیک ساخته شده بهبود پیدا می‌کند و موجب بهبود خواص مکانیکی ترکیب می‌شود.



شکل ۷ تصاویر SEM نمونه‌های الف) PN30G1 (ب) PN30G2 (ج) PN50G1

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر افزودن نانوذرات گرافن بر خواص مکانیکی (استحکام کششی و درصد ازدیاد طول در هنگام شکست) و ریز ساختار نانوکامپوزیت PVC/NBR/Graphene مورد بررسی قرار گرفت. همچنین با استفاده از روش رویه پاسخ و طرح مرکب‌سازی مرکزی، برهم‌کنش هر یک از مواد تشکیل دهنده‌ی نانوکامپوزیت جهت دستیابی به درصد وزنی بهینه مواد به‌منظور داشتن بهترین خواص مکانیکی بررسی شد و نتایج زیر بدست آمد.

- مطابق با نتایج آزمون تجربی بیشترین استحکام کششی در نانوکامپوزیت PVC/NBR در ۱ درصد وزنی گرافن و ۱۰ درصد وزنی NBR برابر با ۲۶ مگاپاسکال و کمترین استحکام کششی در ۱ درصد وزنی گرافن و ۵۰ درصد وزنی NBR به میزان ۸/۳ مگاپاسکال است.
- افزودن گرافن در ترکیب موجب بالا رفتن استحکام کششی می‌شود؛ به نحوی که با افزودن ۲ درصد گرافن به ترموپلاستیک الاستومر PVC/NBR با ۳۰ درصد وزنی NBR استحکام کششی از ۱۷/۱ به ۲۴ مگاپاسکال افزایش یافت.
- با افزایش مقدار NBR در ترکیب، استحکام کششی کاهش می‌یابد، به‌نحوی که با تغییر درصد وزنی NBR از ۱۰ به ۵۰ درصد استحکام در ۱ درصد وزنی گرافن، استحکام کششی ۶۸ درصد کاهش یافت.

- بهینه‌سازی چند متغیره نشان می‌دهد برای بیشینه شدن هم زمان استحکام کششی و درصد ازدیاد طول در هنگام شکست، بایستی درصد وزنی گرافن ۰/۸۱ و درصد وزنی NBR ۳۵/۱۸ درصد در نظر گرفته شود. بیشینه استحکام کششی و درصد ازدیاد طول در هنگام شکست نانوکامپوزیت PVC/NBR/Graphene در این حالت به ترتیب ۱۵/۳۶ مگاپاسکال و ۱۰۷/۶۵ درصد است.
- مدل‌های ریاضی بدست آمده جهت پیش‌بینی خواص مکانیکی با استفاده از نمودارهای اعتبار سنجی بین پاسخ‌های پیش‌بینی شده و نتایج تجربی صحت سنجی شد. بررسی‌ها نشان داد نتایج بدست آمده از مدل‌های ریاضی تطابق خوبی با نتایج تجربی دارند که نشان دهنده دقت بالای مدل‌های ریاضی است.
- مقایسه تغییرات فاز الاستومری در تصاویر SEM نشان داد که با افزایش درصد وزنی نانوصفحات گرافن در ترکیب PVC/NBR، اندازه‌ی فاز الاستومر کاهش می‌یابد. که این امر باعث افزایش استحکام در ترکیب می‌شود که با نتایج تجربی مطابقت دارد.
- مطالعه‌ی تصاویر SEM سطح شکست نمونه‌ها نشان داد که با افزایش الاستومر از زبری سطوح شکست کاسته می‌شود و با افزایش نانوذرات گرافن سطوح شکست موج‌دار و زبرتر می‌شوند.

References

- [1] Baeurle SA, Hotta A, Gusev A. On the glassy state of multiphase and pure polymer materials. *Polymer*. 2006 August 9;47(17):6243-6253. doi: 10.1016/j.polymer.2006.05.076
- [2] Wang H, Li, Song G, Gu ZH, Li P, Zhang CH, Gao L, Study of NBR/PVC/OMMT nanocomposites prepared by mechanical blending. *Iranian Polymer*. 2010 November 8;19(1).
- [3] Moghri M, Zanjanijam AR, Seifi L, Ramezani M. An investigation on rheological behavior of the PVC/NBR/nanoclay nanocomposites by torque rheometry: the effects of formulation variables using response surface approach. *Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*. 2017 September 20 ;Vol. 27:264-273. doi: 10.1007/s10904-017-0682-x
- [4] Peyravi S, Nakhaei MR, Safarpour P, Naderi G. Experimental study the effects of halloysite nanoparticles and acrylonitrile butadiene rubber elastomer on mechanical properties of PVC/NBR/HNT Nanocomposites. *Science and Technology of Composites*. 2021 December;8(2):1494-1502. doi: 10.22068/JSTC.2021.530671.1727 [In Persian]
- [5] Mehrabzadeh M, Delfan N. Thermoplastic elastomers of butadiene-acrylonitrile copolymer and polyamide. VI. Dynamic crosslinking by different systems. *Applied Polymer science*. 2000 June 20;77(9):2057-2066. doi: 10.1002/1097-4628(20000829)77:9<2057::AID-APP23>3.0.CO;2-8
- [6] Ghorbankhan A, Nakhaei MR, Safarpour P. Modeling and Optimization of Mechanical Properties of PA6/NBR Nanocomposite Reinforced with Perlite Nanoparticles, *Science and Technology of Composites*. 2021 June 5 ;8(1):1421-1430, 2021. doi: 10.22068/JSTC.2021.527365.1714 [In Persian]
- [7] Saad N A, Obaid MM. Enhanced the antibacterial and mechanical properties of UHMWPE by addition sort fibers of polyacrylonitrile (PAN), graphene nanoplate (GNP) and hydroxyapatite (HAp). *Indian Journal of Forensic Medicine and Toxicology*. 2020 August 17;14(2):1370-1376. doi: 10.37506/ijfmt.v14i2.3103
- [8] Al-Saleh MA, Yussuf AA, Al-Enezi S, Kazemi R, Wahit MU, Al-Shammari T, Al-Banna A. Polypropylene/graphene nanocomposites: Effects of GNP loading and compatibilizers on the mechanical and thermal properties. *Materials*. 2019 November 27;12(23). doi: 10.3390/ma12233924
- [9] Haghnegahdar M, Naderi G, M. Ghoreishy MHR. Fracture toughness and deformation mechanism of unvulcanized and dynamically vulcanized polypropylene/ethylene propylene diene monomer/graphene nanocomposites. *Composites Science and Technology*. 2017 March 22; 141:83-98. doi: 10.1016/j.compscitech.2017.01.015
- [10] Esmizadeh E, Naderi G, Ghoreishy MHR. Modification of Theoretical models to predict mechanical behavior of PVC/NBR/organoclay nanocomposites. *Applied Polymer Science*. 2013 June 14;130(5):3229-3239. doi: 10.1002/app.39556
- [11] Hajibaba A, Naderi G, Esmizadeh E, Ghomeshi MHR. Morphology and dynamic-mechanical properties of PVC/NBR blends reinforced with two types of nanoparticles. *Composite Materials*. 2012 December 26;48(2):131-141. doi: 10.1177/0021998312469242
- [12] Subramanian N, Senthilvel K, Prabu B. Studies on the morphology and physic mechanical properties of NBR/PVC hybrid nanocomposites. *Materials Today: Proceedings*. 2021;38(5):2810-2816. doi: 10.1016/j.matpr.2020.08.739
- [13] Zhang S, Zhai Y, Zhang Y. Microwave absorbing performance and mechanical properties of poly (vinyl chloride)/acrylonitrile-butadienerubber thermoplastic elastomers filled with multiwalled carbon nanotubes and silicon carbide. *Applied Polymer Science*. 2013 March 16;30(1):345-351. doi: 10.1002/app.39063

- [14] Goodarzi A, Shahrjadian H. Fabrication of polylactic acid / polyethylene glycol/ hydroxyapatite nanoparticles nanocomposite foam by mass porosity method. *Manufacturing Engineering*. 2021 December;8(9):37- 49. [In Persian]
- [15] Safarabadi A, Tahmasbi V, Sousanabadi Farahani A, Zolfaghari M. Electrical discharge machining of metal matrix composite AZ91 magnesium alloy and investigation and optimization of the effect of input parameters on material removal rate and workpiece surface roughness. *Manufacturing Engineering*. 2022 September;9(6):59-69. doi: 10.22034/ijme.2022.160942 [In Persian]
- [16] Ghasemi FA, Daneshpayeh S, Ghasemi I, 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*. 2015 December 8;73(6):1741-1760. doi: 10.1007/s00289-015-1574-2
- [17] Nakhaei MR, Naderi G, Ebrahimpour A. Mathematical modeling of mechanical properties of PA6/NBR/Clay Nanocomposites Fabrication using the Thermal Friction Stir Processing. *Science and Technology of Composites*. 2020 September;7(2):833-842. doi: 10.22068/JSTC.2020.112864.1582 [In Persian]
- [18] Malenga EN, Mulaba-Bafubiandi A, Nheta W. Application of the response surface method (RSM) based on central composite design (CCD) and design space (DS) to optimize the flotation and the desliming conditions in the recovery of PGMs from mine sludge. *Separation Science and Technology*. 2022 July 3;57(18):2960-2983. doi: 10.1080/01496395.2022.2092514
- [19] Khairuddin FH, Yusoff NM, Badri K, Koting S, Choy PN, Misnon NA, Osmi SC. Design and optimization of polyurethane modified bitumen (PUMB) using response surface method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020;476(1):12061 doi: 10.1088/1755-1315/476/1/012061
- [20] Montgomery DC. Design and analysis of experiments. Ninth Edition. Arizona State University: John wiley & sons; 2017.
- [21] Forghani N, Maghsoud Z, Ramezani N. Enhancing water flux and rejection performance through UV crosslinking: Optimization of surface modification of polyacrylonitrile (PAN)/ acrylonitrile butadiene rubber (NBR) blend membrane using benzophenone as a crosslinking agent. *Applied Surface Science*. 2023 December 1; 639:141-158. doi: 10.1016/j.apsusc.2023.158114
- [22] Nakhaei MR, Naderi G. Modeling and optimization of mechanical properties of pa6/nbr/graphene nanocomposite using central composite design. *International Journal of Engineering*. 2020 September;33(9): 1803-1810. doi: 10.5829/ije.2020.33.09c.15
- [23] Nakhaei MR, Ghorbankhan A. Experimental Investigation on Mechanical Properties of PA6/NBR/Graphene Nanocomposite by Response Surface Methodology. *Karafan*. 2021 Jan 1;18(3):327-341. doi: 10.48301/KSSA.2021.275252.1405 [In Persian]
- [24] Ghorbankhan A, Nakhaei MR, Safarpour P. Fracture behavior, microstructure, and mechanical properties of PA6/NBR nanocomposites. *Polymer Composites*. 2022 August 16;43(9):6696-6708. doi: 10.1002/pc.26993
- [25] Bakhtiari A, Ashenai Ghasemi F, Naderi G, Nakhaei MR. An approach to the optimization of mechanical properties of polypropylene /nitrile butadiene rubber /halloysite nanotube /polypropylene-g-maleic anhydride nano composites using response surface methodology. *Polymer Composites*. 2020 February 11;41(6):2330-2343. doi: 10.1002/pc.25541
- [26] Soleymani H, Nakhaei MR, Naderi G. Experimental and mathematical investigation of mechanical and microstructural properties of PA6/NBR nanocomposite reinforced with silicon carbide (SiC) nanoparticles, *Science and Technology of Composites*. 2022 August;8(4):1789-1796. doi: 10.22068/JSTC.2022.549961.1774
- [27] Daneshpayeh S, Ghasemi FA, Ghasemi I, Ayaz M. Predicting of mechanical properties of PP/LLDPE/TiO₂ nano-composites by response surface methodology, *Composites Part B: Engineering*. 2016 January;84: 109-120. doi: 10.1016/j.compositesb.2015.08.075
- [28] Zhang Y, Zhang X, Yang L, Yu X. Optimization design for downhole dynamic seal based on response surface method. *Advances in Mechanical Engineering*. 2019;11(2). doi: 10.1177/1687814019828441
- [29] Soleymani H, Nakhaei MR. Investigation of mechanical, thermal and microstructural properties of PA6/NBR nanocomposites reinforced with silicon carbide nanoparticles. *Manufacturing Engineering*. 2022 December;9(10):42- 54. doi: 10.22034/ijme.2023.391059.1764 [In Persian]
- [30] Yaghoobi H, Fereidoon A. An experimental investigation and optimization on the impact strength of kenaf fiber biocomposite: application of response surface methodology. *Polymer Bulletin*. 2017 October 17;75(8):3283-3309. doi: 10.1007/s00289-017-2212-y
- [31] Paran SMR, Naderi G, Ghoreishy MHR, Dubois C. Essential work of fracture and failure mechanisms in dynamically vulcanized thermoplastic elastomer nanocomposites based on PA6/NBR/XNBR-grafted HNTs. *Engineering Fracture Mechanics*. 2018 September; 200:251-262. doi: 10.1016/j.engfracmech.2018.07.018

- [32] Karimi M, Ghajar R, Montazeri A. Investigation of nanotubes' length and their agglomeration effects on the elastoplastic behavior of polymer-based nanocomposites. *Science and Technology of Composites*. 2017 September;4(2): 229-240. [In Persian]
- [33] Nakhaei MR, Naderi G, Mostafapour A. Effect of Processing Parameters on Morphology and Tensile Properties of PP/EPDM/Organoclay Nanocomposites Fabricated by Friction Stir Processing, *Iranian Polymer*. 2016 January 13;25(2):179-191. doi: [10.1007/s13726-015-0412-6](https://doi.org/10.1007/s13726-015-0412-6)
- [34] Purhaji M, Nakhaei MR. Experimental study of PP/EPDM/Graphene Nanocomposites Fabricated by Friction Stir Processing, The 6th International Conference on Technology Development in mechanical and Aerospace Engineering; Tehran, Iran, 2023 November 21. [In Persian]
- [35] Nakhaei MR, Mohammadi SH, Naderi G, Ghoreishy MHR. Experimental study of microstructure, thermal and mechanical properties of PA6/NBR nanocomposites reinforced with graphene nanoparticle. *Science and Technology of Composites*. 2019 December;6(3):419-426. doi: [10.22068/JSTC.2019.97568.1491](https://doi.org/10.22068/JSTC.2019.97568.1491) [In Persian]
- [36] Hamidi E, Panahizadeh V. Experimental Analysis of Mechanical Properties of Nanocomposites Based on Poly amide 6/EPDM/Carbon Nanotubes. *Science and Technology of Composites*. 2021 June;8(1):1453-1460. doi: [10.22068/JSTC.2021.529756.1723](https://doi.org/10.22068/JSTC.2021.529756.1723) [In Persian]