

## تأثیر نانوذرات پرلیت بر خواص کششی کامپوزیت HDPE/NR و بهینه‌سازی ترکیب با روش سطح پاسخ و طرح مرکب مرکزی

سید محمد آقائزاد تولون و جعفر قنبری\*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قم، قم، صندوق پستی ۳۷۱۹۵-۱۵۱۹

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱/۵)

چکیده: در این پژوهش اثر افزودن نانوذرات پرلیت بر کامپوزیت پلی اتیلن چگالی بالا/لاستیک طبیعی به منظور بهبود خواص کششی نانوکامپوزیت پرلیت NR/HDPE به صورت تجربی مطالعه شده است. برای تولید نمونه‌ها، با استفاده از مخلوط‌کن داخلی و روش اختلاط مذاب، نانوکامپوزیت پلی اتیلن چگالی بالا / لاستیک طبیعی / پرلیت با درصدهای مختلف تهیه شد. با برش ورق حاصله، نمونه‌های آزمون کشش تهیه و با انجام آزمون‌های مورد نیاز، استحکام کششی و درصد ازدیاد طول تا نقطه گسیختگی نمونه‌های مختلف به دست آمد. برای تحلیل و بررسی تأثیر پارامترهای ترکیب کامپوزیت یعنی درصد وزنی پرلیت و لاستیک طبیعی، از روش بهینه‌سازی سطح پاسخ و از طرح پنج سطحی مرکب مرکزی استفاده شد. همچنین از میکروسکوپ الکترونی روبشی برای بررسی ریز ساختار نمونه‌های نانوکامپوزیت و ارزیابی نحوه اختلاط بهره گرفته شد. نتایج نشان داد مقدار پرلیت تأثیر غیر هم‌نمایی روی خواص کششی نانوکامپوزیت حاصل دارد و در برخی موارد منجر به افزایش استحکام و کاهش ازدیاد طول می‌شود. همچنین، مشخص گردید در صورت توزیع یکنواخت نانوذرات پرلیت در ماده زمینه، حضور این نانوذرات منجر به کوچک شدن اندازه فاز لاستیک طبیعی می‌شود که به نوبه خود موجب بهبود خواص کششی کامپوزیت حاصل می‌شود. مقایسه نتایج کسب شده از نمونه‌های مختلف نشان داد نمونه با نانوذره پرلیت به میزان ۷ درصد وزنی و لاستیک طبیعی با ۲۰ درصد وزنی، مقدار استحکام کششی کامپوزیت حاصل به ۱۲ مگاپاسکال افزایش می‌یابد. با توجه به نتایجی که بهینه‌سازی چند متغیره ارائه کرد، مقدار بهینه درصد وزنی لاستیک طبیعی و نانوذرات پرلیت به ترتیب برابر ۳۶/۸۹ و ۳/۰۰ درصد به دست آمد که در این صورت مقدار استحکام کششی و تغییر طول تا شکست در بیشینه مقدار خود به ترتیب مگاپاسکال ۳۸/۸۹ و ۸/۳۲ درصد تعیین شدند.

واژه‌های کلیدی: پلی اتیلن چگالی بالا، لاستیک طبیعی، پرلیت، نانوکامپوزیت، روش سطح پاسخ.

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: ghanbari@qut.ac.ir

# The Effect of Perlite Nanoparticles on the Tensile Properties of NR/HDPE Composite and Optimization of its Composition Using Response Surface Method

S.M. Aghanejad and J. Ghanbari\*

Department of Mechanical Engineering, Qom University of Technology, Qom, P.O. Box 1519-37195

## ABSTRACT

In this study, the effect of the perlite nanoparticles on the mechanical properties of a pearlite/NR/HDPE nanocomposite was experimentally investigated. A high-density polyethylene/natural rubber /perlite nanocomposite was synthesized using an internal mixer and a melt mixing method, with varying compositions. Uniaxial tension tests were carried out to obtain the tensile strength and elongation of the samples. The response surface method and the central composite design were employed as experiment design and optimization tools to obtain the influence of composite composition parameters, specifically, the weight percentage of perlite and natural rubber. Furthermore, scanning electron microscopy was utilized to inspect the microstructure of the nanocomposite samples, and to evaluate the efficacy of the mixing method. The experimental results derived from the various samples revealed that a sample containing 7 wt.% perlite nanoparticles and 20 wt.% natural rubber demonstrated a significant enhancement in the tensile strength, reaching up to 12 MPa. Moreover, the multivariable optimization data suggested that the optimal weight percentages for natural rubber and perlite nanoparticles were 36.89% and 3.00%, respectively. Under these conditions, both the tensile strength and the elongation at failure point achieved their maximum values, recorded as 8.32 MPa and 38.89%, respectively.

**Keywords:** High-density Polyethylene, Natural rubber, Perlite, Nanocomposite, Response surface method (RSM).

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر مخلوط کردن پلیمرها با یکدیگر به صورت فیزیکی برای تولید آلیاژهای جدید پلیمری افزایش چشمگیری داشته است به گونه‌ای که درصد زیادی از مصارف گروه پلیمری را آلیاژهای پلیمری تشکیل داده‌اند. دلیل اصلی مخلوط کردن چندین پلیمر با یکدیگر به منظور کاهش ضعف پلیمرهای خالص، تولید کامپوزیت و آلیاژهای پلیمری جدید به منظور بهبود خواص آن و مصرف در کاربردهای متنوع با ویژگی‌های خاص بوده است. یک دسته از کامپوزیت‌های با زمینه پلیمری که در سال‌های اخیر با استقبال محققان قرار گرفته است، نانوکامپوزیت‌ها می‌باشند که با افزودن میزان کمی از نانو ساختارهایی مانند نانوذرات، نانورق‌ها و نانولوله‌ها، بهبود قابل ملاحظه‌ای در خواص فیزیکی و مکانیکی ماده حاصل ایجاد می‌شود (۱).

در همین راستا پژوهشگران روش‌هایی مانند تولید آلیاژهایی با اختلاط چندین پلیمر برای اصلاح و یا تقویت پلیمرها، مقاوم کردن پلیمرها با استفاده از نانوذرات و انجام فرایند

پلیمریزاسیون یا کوپلیمریزاسیون دو مونومر با یکدیگر به صورت هم‌زمان را برای حصول به خواص مورد نیاز خود از ماده مرکب حاصل مد نظر قرار داده‌اند (۲). به علت نسبت سطح به حجم زیاد نانوذرات نسبت به ذرات میکرونی، این مواد اثرگذاری بیش‌تری بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت‌های حاصل از خود نشان می‌دهند (۳ و ۴). یکی دیگر از دلایل توجه به نانوذرات در ساخت کامپوزیت‌های جدید، انرژی سطحی بالای آن‌ها و در نتیجه واکنش پذیری بالا در بین اتم‌ها و مولکول‌های آن و ایجاد پیوند مستحکم‌تر نسبت به سایر ذرات با ابعاد بزرگ‌تر است (۵).

یک دسته دیگر از مواد مرکبی که در شاخه مواد پلیمری توسعه داده شده است، ترکیب پلیمرهای ترموپلاستیک با الاستومرهاست. در طی سال‌های اخیر، محققان با ترکیب ترموپلاستیک‌های سازگار با الاستومرها توانسته‌اند دسته چهارمی از پلیمرها به نام ترموپلاستیک الاستومرها را تهیه کنند که دارای حد واسطی از استحکام ترموپلاستیک‌ها و انعطاف‌پذیری بالای الاستومرها هستند. همچنین به دلیل وجود

کامپوزیت حاصل افزایش می‌یابد اما ازدیاد طول کاهش چندانی پیدا نمی‌کند. در تحقیقی دیگر صحرائیان و همکارانش (۱۳) با افزودن نانوذرات پرلیت<sup>۹</sup> به فیلم‌های نانوکامپوزیتی برپایه LDPE تأثیر آن را بر خواص ریزساختار و مکانیکی بررسی کردند و گزارش کردند با افزایش نانوذرات پرلیت استحکام کششی افزایش می‌یابد و کرنش شکست کاهش پیدا می‌کند. سلیمانی و همکارانش (۱۴) نیز تأثیرات افزودن نانوذرات پرلیت بر روی خواص مکانیکی و مورفولوژی ترکیب لاستیک طبیعی و پلی پروپیلن را با استفاده از روش سطح پاسخ مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که با انتخاب ۳۵/۲ درصد لاستیک طبیعی و ۴ درصد وزنی نانوذره پرلیت مقادیر بهینه مدول یانگ و استحکام کششی به دست می‌آید.

در این مقاله، با توجه به این که نتایج مثبتی از اثرات نانوذره پرلیت بر خواص آلیاژهای مختلف پلیمری گزارش شده است، اثر افزودن این نانوذره به کامپوزیت پلی‌اتیلن چگالی بالا و لاستیک طبیعی به منظور افزایش استحکام کششی و در عین حال افزایش درصد ازدیاد طول بررسی شده است. به منظور یافتن رابطه معنی‌دار افزودن نانوذرات پرلیت و نیز میزان آن و حصول به ترکیب بهینه از درصد مواد تشکیل‌دهنده آلیاژ پلیمری حاصل، از روش سطح پاسخ و طرح پنج سطحی مرکب مرکزی برای بهینه‌سازی استحکام کششی و ازدیاد طول تا شکست نانوکامپوزیت‌های HDPE/NR/Perlite استفاده شده است. با بررسی رفتار کامپوزیت حاصل و نیز ریزساختار هر مورد، اثر افزودن نانوذرات پرلیت در کامپوزیت مطالعه می‌شود و مشخص می‌شود که حضور نانوذرات پرلیت در این ترکیب موجب تغییر اندازه فاز لاستیک طبیعی شده و این عمل به نوبه خود در خواص کششی کامپوزیت حاصل تأثیرگذار است.

## ۲- مواد و روش تحقیق

### ۲-۱- مواد اولیه

همان‌گونه که ذکر شد، در این پژوهش نانوکامپوزیت پرلیت/لاستیک طبیعی/پلی‌اتیلن چگالی بالا مورد مطالعه قرار

ریزساختار متفاوت دوفازی و نحوه چینش اتم‌ها و زنجیره‌های پلیمری، این مواد قابلیت بازیافت شدن دارند که این امر به اقتصادی بودن شرایط تولید و کاهش هزینه‌ها منجر شده است (۶ و ۷). یکی از پرکاربردترین و رایج‌ترین ترموپلاستیک‌ها که در صنایع مختلف مورد استفاده فراوان قرار می‌گیرد پلی‌اتیلن<sup>۱</sup> است. از جمله دلایلی که موجب استفاده رایج این مواد در صنایع هوافضا، خانگی و خودروسازی می‌شود می‌توان به قابلیت بازیافت، فرایند پذیری مناسب، خواص مکانیکی بالا و دمای کاربری بالای آن اشاره کرد (۸). انواع متفاوتی از پلی‌اتیلن‌ها مطابق شکل چیدمان زنجیره‌های پلیمری و وزن ملکولی آن وجود دارند که می‌توان به پلی‌اتیلن خطی چگالی پایین<sup>۲</sup>، پلی‌اتیلن چگالی بالا<sup>۳</sup> و پلی‌اتیلن چگالی پایین<sup>۴</sup> اشاره کرد. پلی‌اتیلن خالص قابلیت انعطاف پایینی دارد که یکی از دلایل آن، نلغزیدن زنجیره‌های پلیمری در دماهای پایین نسبت به یکدیگر بر اثر اعمال بار است. برای رفع این مشکل و افزایش چقرمگی آن، یک راهکار مخلوط کردن آن با موادی مانند لاستیک طبیعی<sup>۵</sup> است که خواص انعطاف‌پذیری بالایی دارند (۹).

یوهایدا و همکارانش (۱۰)، اثرات اسید اکریلیک<sup>۶</sup> را بر خواص کششی و مورفولوژیکی و لاستونیت<sup>۷</sup> در کامپوزیت‌های HDPE/NR مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه نشان داده شد که کامپوزیت‌های اصلاح شده یا به اصطلاح اچ شده دارای خواص کششی بهتری نسبت به کامپوزیت‌های اصلاح نشده هستند. در مطالعه‌ای دیگر اسحاق و همکارانش (۱۱)، اثرات الیاف PBO<sup>۸</sup> و خاک رس را بر خواص مکانیکی و مورفولوژیکی ترکیبات HDPE/NR مورد تحلیل و بررسی قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که با افزودن ۱۵ درصد وزنی PBO و ۵ درصد وزنی میکروذره خاک رس، استحکام کششی، مدول یانگ و استحکام ضربه بهبود بیشتری می‌یابد. ثابت‌زاده و همکارانش (۱۲) در پژوهش خود نانو ذرات خاک رس را به ماده پایه PE افزودند و به این نتیجه رسیدند که مقاومت در برابر ضربه و استحکام کششی نهایی فیلم‌های ساخته شده از

جدول ۱- خصوصیات مواد اولیه

مواد	خصوصیات
چگالی	$0.938 \text{ g/cm}^3$
پلی اتیلن چگالی بالا (HDPE)	شاخص جریان مذاب دمای ذوب
	$4 \text{ g} / 10 \text{ min}$ $127^\circ \text{C}$
لاستیک طبیعی (NR)	ناخالصی
	$16\% \text{ wt.}$
	چگالی
	$0.98 \text{ g/cm}^3$
پرلیت (Perlite)	چگالی
	$2/2 \text{ g/cm}^3$
	شاخص سختی
	$5/5 \text{ Mohs}$

اختلاط ادامه یافت. نمونه‌ای از نمودار گشتاور- زمان همزن داخلی در شکل (۱) به نمایش در آمده است. پس از تکمیل فرایند اختلاط، مخلوط حاصل از دستگاه مخلوط‌کن خارج گردیده و در دستگاه پرس گرم یا همان قالب‌گیر فشاری ساخت شرکت ستنام مدل (Signal Plate Hot Press SPH-300 Test Machine) قرار گرفت. هریک از نمونه‌ها به مدت پنج دقیقه و در دمای  $150^\circ \text{C}$  در دستگاه پرس گرم قرار گرفتند.

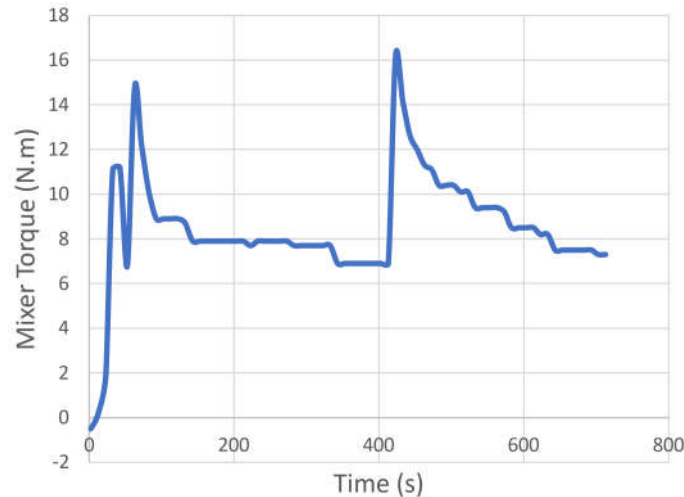
#### ۲-۲- ساخت نمونه‌ها

پس از تهیه ورق‌های ترکیب مورد نظر، نمونه‌های دمبلی تست کشش مطابق استاندارد ASTM D638 با استفاده از قالب برش تهیه گردید. پس از بازبینی نمونه‌های تهیه شده در زیر نور و اطمینان از عدم وجود حباب و عیوب ساختاری، آزمون تست کشش با استفاده از دستگاه کشش ستنام مدل STM20 با سرعت فک  $10 \text{ mm/min}$  و در دمای محیط انجام شد. شکل (۲) نشان‌دهنده تصویر نمونه آزمون کشش مطابق استاندارد برای نانوکامپوزیت با ۲۰ درصد لاستیک طبیعی و ۷ درصد نانوذرات پرلیت پیش و پس از انجام تست کشش می‌باشد.

#### ۲-۳- آماده‌سازی نمونه‌ها برای تحلیل ریزساختار

برای بررسی ریزساختار نمونه‌های تهیه شده، از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۱</sup> مدل Tescan-Vage3 ساخت کشور جمهوری چک استفاده گردید. برای بررسی دقیق ابعاد و

گرفته است. پلی اتیلن چگالی بالا با نام تجاری HDPE 3840UA، محصول شرکت پتروشیمی تبریز به‌عنوان فاز بستر، لاستیک طبیعی با کد تجاری SMR 20 محصول کشور مالزی در جهت ایجاد انعطاف‌پذیری و نانوذره پرلیت تولید شرکت وارث سبز درفک مورد استفاده قرار گرفت. برخی خصوصیات و مشخصات شیمیایی و فیزیکی این مواد در جدول (۱) نشان داده شده است. در ابتدا پیش از تهیه نمونه‌ها، پودر نانوذرات پرلیت و گرانول پلی اتیلن چگالی بالا در دمای  $80^\circ \text{C}$  و به مدت ۲۴ ساعت در آون خلاء قرار گرفتند تا رطوبت آن‌ها گرفته شود. سپس برای انجام اختلاط مذاب از دستگاه میکسر داخلی دو ماریچه ساخت پژوهشگاه پلیمر پتروشیمی ایران استفاده شد. اختلاط مذاب مواد با درصدهای مختلف مورد نیاز لاستیک طبیعی و نانوذره پرلیت صورت گرفت که در این تحقیق درصد وزنی لاستیک طبیعی NR بین (۱۰ تا ۵۰ درصد) و نانوذره پرلیت بین (۱ تا ۹ درصد) در نظر گرفته شده است. اختلاط مذاب با سرعت  $60 \text{ rpm}$  و در دمای  $137^\circ \text{C}$  انجام شد. در مرحله اول، نانوذرات پرلیت به میزان مورد نظر با گرانول پلی اتیلن چگالی بالا در مخلوط کن قرار گرفته و تا زمان پایدار شدن نمودار گشتاور مخلوط کن، اختلاط ادامه یافت. سپس لاستیک طبیعی به مخلوط حاصل اضافه گشته و مجدداً تا اختلاط تا پایدار شدن گشتاور انجام گردید. برای به‌دست آوردن نمونه مناسب و اطمینان از انجام اختلاط و پخت کامل تا دو دقیقه بعد از پایدار شدن نمودار گشتاور پخت- زمان عمل



شکل ۱- نمودار گشتاور- زمان دستگاه میکسر داخلی.



شکل ۲- نمونه تست کشش ساده قبل و بعد از انجام تست.

#### ۲-۴- طراحی آزمایش

با توجه به این که در این پژوهش تأثیر دو پارامتر درصد وزنی نانوذرات پرلیت و لاستیک طبیعی در خواص نانوکامپوزیت حاصل بررسی می‌شود، برای اجتناب از الزام به بررسی تعداد زیاد نمونه‌ها، از روش طراحی آزمایش برای بررسی تأثیر هر دو پارامتر استفاده می‌شود. بدین ترتیب، می‌توان با انجام تعداد محدودی آزمایش، تأثیر پارامترهای مختلف در بازه تغییرات خود را بر روی تابع هدف بررسی کرد. همچنین مزیت دیگر این روش، یافتن مقادیر بهینه متغیرها برای حصول به مقدار مطلوب تابع یا توابع هدف است. یکی از روش‌هایی که به‌طور گسترده برای بهبود، آنالیز و طراحی آزمایش‌های مورد نیاز جهت برآورد رفتار یک سیستم وابسته به تعدادی از پارامترها استفاده می‌شود روش سطح پاسخ<sup>۱۱</sup> است. این روش، یک

کیفیت توزیع فاز لاستیک طبیعی در کامپوزیت حاصل، نمونه‌های به‌دست آمده ابتدا در نیتروژن مایع تحت دمای بسیار پایین شکسته شدند. این نمونه‌ها پس از شکست به مدت ۲۰ ساعت در محلول تولوئن قرار گرفتند تا فاز لاستیک طبیعی به‌طور کامل در محلول حل شود. جهت تهیه تصاویر با کیفیت مناسب با استفاده از دستگاه میکروسکوپ روبشی و نیز ایجاد رسانایی الکتریکی به‌منظور جذب بهتر الکترون از سطح نمونه‌های شکست نانوکامپوزیتی، سطح شکست نمونه‌های نانوکامپوزیتی با استفاده از لایه‌ای بسیار نازک از طلا پوشانده شد. سپس تصاویر الکترونی مورد نیاز تهیه شد و برای تعیین میزان اختلاط لاستیک طبیعی در ماده زمینه و نیز اختلاط همگن نانوذرات پرلیت مورد مطالعه قرار گرفتند که در بخش نتایج مورد بحث قرار می‌گیرند.

جدول ۲- متغیرهای مواد و حدود عملکرد آنها بر اساس مدل پنج سطحی CCD

متغیر	واحد	علامت اختصاری	سطح				
			۲	۱	۰	-۱	-۲
Perlite content	Wt. %	P	۹	۷	۴	۳	۱
NR content	Wt. %	N	۵۰	۴۰	۳۰	۲۰	۱۰

پایه‌سازی روش سطح پاسخ با استفاده از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت ۱۲ بر اساس دو متغیر درصد وزنی لاستیک طبیعی و درصد وزنی نانوذره پرلیت انجام گرفت. بازه تغییرات هر یک از این مواد با توجه به میزان قابل اختلاط که در مراجع مختلف ذکر شده است تعیین گردید. همچنین، برای هر متغیر، پنج سطح تغییر در نظر گرفته شد. مقادیر این سطح‌ها برای هر دو متغیر در جدول (۲) نشان داده شده است. با ورود این اطلاعات به نرم‌افزار دیزاین اکسپرت و انتخاب طراحی مرکب مرکزی، تعداد ۱۱ آزمایش با ترکیبات مختلف توسط این نرم‌افزار طراحی گردید. علاوه بر این آزمایش‌ها، یک ترکیب نیز بدون نانوذرات پرلیت جهت امکان بررسی و مقایسه رفتار آن در نظر گرفته شد که مشخصات هر یک از این آزمایش‌ها در جدول (۳) مشخص شده است.

در ادامه نمونه‌های مورد نیاز که در طراحی آزمایش تعیین شدند مطابق روش شرح داده شده در بخش پیشین ساخته شده و آزمون کشش روی آن‌ها انجام گرفت. لازم به ذکر است که برای اطمینان از صحت انجام آزمایش‌ها، در هر مورد سه نمونه کشش تهیه و تحت آزمون قرار گرفت و میانگین مقادیر حاصل برای استحکام کششی و درصد ازدیاد طول مد نظر قرار گرفت. این مقادیر به نرم‌افزار وارد گردید و با انجام بهینه‌سازی در این نرم‌افزار، مدل تجربی و ریاضی مسئله و مقدار بهینه متغیرها برای بیشینه شدن هر دو تابع هدف به صورت مرکب به دست آمد. همچنین صحت مدل‌های به دست آمده با جدول‌های آنالیز واریانس مورد بررسی قرار گرفت تا تأثیر این پارامترها بر روی پاسخ‌ها نیز ارزیابی شود.

روش تحقیقاتی است که از ریاضیات و آمار برای ساخت مدل‌های تجربی از فرآیندها استفاده می‌کند. این روش به علاوه اثرات اصلی بین پارامترهای مسئله، امکان تخمین اثرات تعاملی و برهم‌کنش بین پارامترها را نیز فراهم می‌کند. دو روش متداول در طراحی سطح پاسخ وجود دارند که عبارتند از طراحی باکس-بکن<sup>۱۲</sup> و طراحی مرکب مرکزی<sup>۱۳</sup> که در پژوهش حاضر از این روش استفاده شده است. در روش سطح پاسخ معمولاً رابطه بین پاسخ‌های سیستم و پارامترهای فرایند با استفاده از توابع چند جمله‌ای نشان داده می‌شود:

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

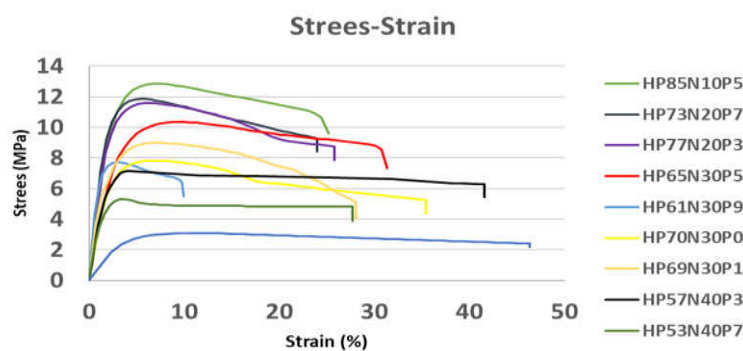
در این رابطه،  $k$  تعداد متغیرها و  $x_i$  و  $x_j$  متغیرهای ورودی هستند.  $\beta_0$ ،  $\beta_i$ ،  $\beta_{ii}$  و  $\beta_{ij}$  ضرایب رگرسیون،  $\varepsilon$  ماتریس خطا و  $\beta_0$  پارامتر ثابت هستند. در طراحی مرکب مرکزی سطح پاسخ، برای هر تابع پاسخ، یک تابع مطلوبیت<sup>۱۴</sup> ( $d_i$ ) ایجاد می‌شود که مقدار آن می‌تواند بین صفر تا یک باشد. در صورتی که مسئله دارای بیش از یک پاسخ باشد، تابع مطلوبیت کل مسئله با ترکیب توابع مطلوبیت به صورت زیر تشکیل می‌شود:

$$D = \left( \prod d_i^{w_i} \right)^{\sum w_i} \quad (2)$$

که در این رابطه،  $w_i$  ها وزن هر یک از توابع مطلوبیت هستند. با استفاده از وزن‌های مختلف برای توابع مطلوبیت، اثر آن در یافتن نقطه بهینه نهایی پررنگ تر می‌شود. نقطه بهینه در این روش با یافتن مسیرهای دارای بیش‌ترین شیب روی سطح پاسخ انجام می‌شود. برای جزئیات بیش‌تر، به مرجع (۱۵) مراجعه شود.

جدول ۳- ماتریس طراحی و مقادیر پاسخها

شماره آزمایش	کد نمونه‌ها	Perlite (wt.)	NR (wt.)	TS (MPa)	EB (%)
۰	HP70N30	۰	۳۰	۷/۸۵ ± ۰/۵	۳۵/۴۰ ± ۰/۳
۱	HPN30P5	۵	۳۰	۱۰/۳۶ ± ۰/۶	۳۱/۵۷ ± ۰/۶
۲	HPN30P5	۵	۳۰	۱۰/۳۱ ± ۰/۴	۳۱/۹۹ ± ۰/۴
۳	HPN10P5	۵	۱۰	۷۵/۱۰ ± ۰/۵	۲۵/۲۰ ± ۰/۴
۴	HPN30P9	۹	۳۰	۱۳/۴۲ ± ۰/۲	۹/۹۴ ± ۰/۱
۵	HPN50P5	۵	۵۰	۳/۰۵ ± ۰/۳	۴۶/۳۳ ± ۰/۶
۶	HPN20P7	۷	۲۰	۱۱/۷۸ ± ۰/۱	۲۸/۹۶ ± ۰/۲
۷	HPN30P1	۱	۳۰	۸/۹۹ ± ۰/۵	۲۸/۰۸ ± ۰/۳
۸	HPN40P7	۷	۴۰	۵/۳۲ ± ۰/۴	۲۷/۶۷ ± ۰/۲
۹	HPN30P5	۵	۳۰	۱۰/۲۹ ± ۰/۱	۳۰/۵ ± ۰/۳
۱۰	HPN40P3	۳	۴۰	۷/۱۲ ± ۰/۱	۳۸/۵۶ ± ۰/۳
۱۱	HPN20P3	۳	۲۰	۱۱/۵۹ ± ۰/۵	۲۹/۸۳ ± ۰/۲



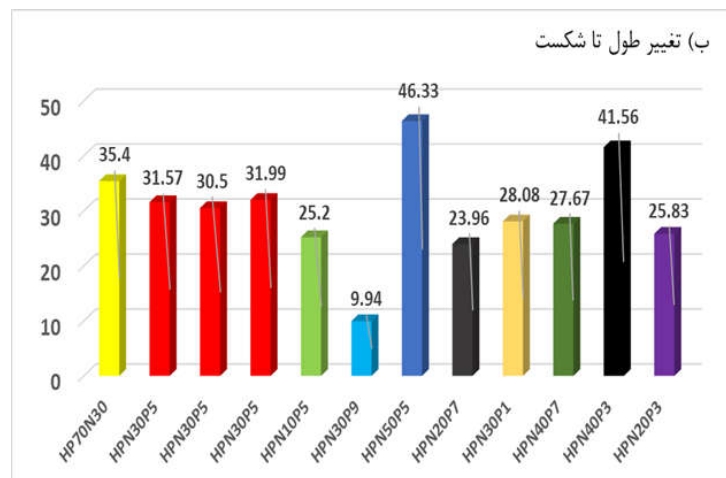
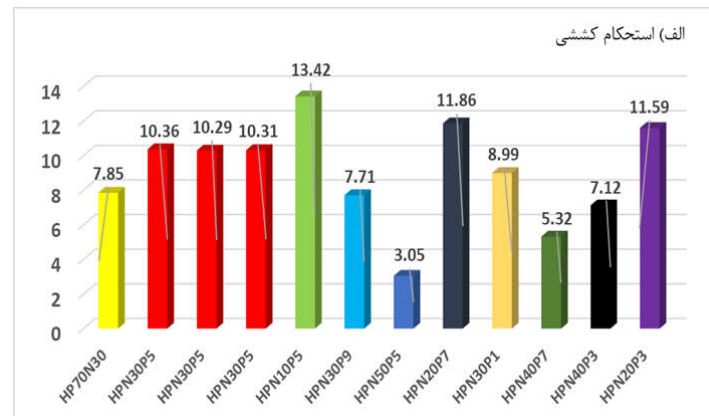
شکل ۳- نمودار تنش- کرنش نمونه‌های مختلف بر اساس کدگذاری جدول ۳.

### ۳- نتایج حاصله

#### ۳-۱- خواص مکانیکی

همان‌گونه که ذکر شد، آزمون‌های مورد نیاز بر اساس نمونه‌های تعیین شده توسط روش سطح پاسخ انجام گرفت و مقادیر پارامترهای فرایندی یعنی استحکام کششی<sup>۱۵</sup> و ازدیاد طول تا شکست<sup>۱۶</sup> برای هر نمونه به دست آمد. برای اطمینان از صحت آزمون و نتایج به دست آمده، هر آزمون سه بار تکرار شده است. در جدول (۳) نتایج به دست آمده از استحکام کششی و تغییر طول تا شکست نمونه‌های نانوکامپوزیت HDPE/NR/Perlite

نشان داده شده است. همچنین، نمودار تنش- کرنش نمونه‌ها در شکل (۳) به نمایش درآمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به‌طور کلی افزایش میزان لاستیک طبیعی منجر به نرم‌تر شدن نمونه و کاهش استحکام کششی می‌شود. اما مقدار نانوذرات پرلیت، تأثیر هم‌نواپی بر روی خواص مکانیکی نمونه‌ها ندارد. در اغلب موارد، نانوذرات پرلیت منجر به افزایش استحکام کششی می‌شود اما در برخی نمونه‌ها، افزایش درصد وزنی این ذرات تأثیر افزایش‌دهنده‌ای روی استحکام کششی نمونه‌ها ندارد. همچنین با مقایسه رفتار کششی نمونه‌ها مشخص می‌شود



شکل ۴- مقادیر خواص مکانیکی الف) استحکام کششی و ب) تغییر طول تا شکست.

مجازست. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نمونه دارای ۱۰ درصد لاستیک و ۵ درصد پرلیت بیش‌ترین استحکام کششی (برابر با ۱۳,۴۲ مگاپاسکال) و نمونه با ۵۰ درصد لاستیک و ۵ درصد پرلیت بیش‌ترین ازدیاد طول شکست (۴۳,۳۳ درصد) را دارد.

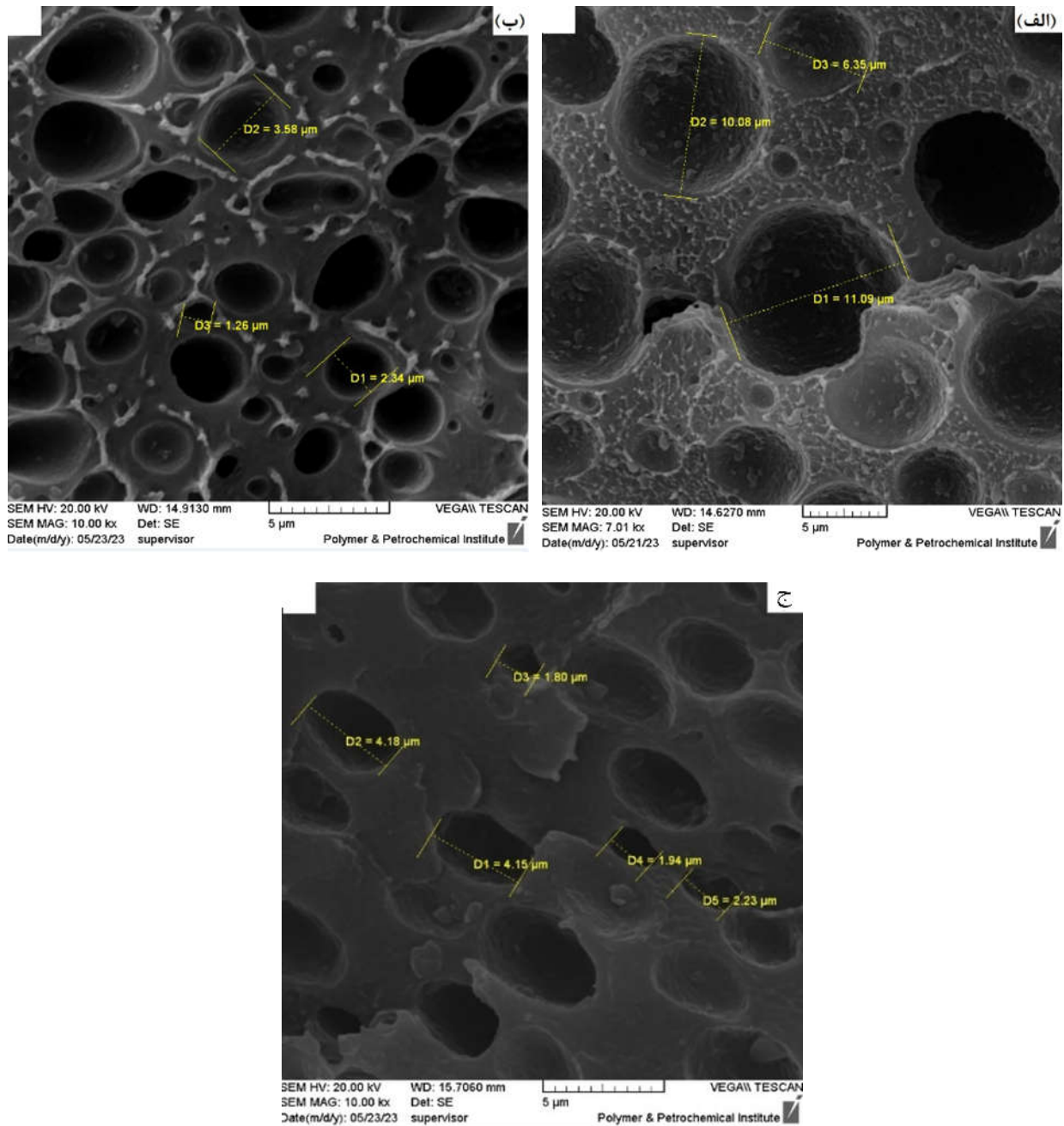
### ۳-۲- بررسی ریزساختار با میکروسکوپ الکترونی روبشی

برای بررسی کیفیت ریزساختار نانوکامپوزیت‌های تولید شده، از تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده گردید. بدین منظور، سه نمونه انتخاب شد تا مورد بررسی قرار گیرند. در شکل (۵) تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های HP70N30، HP65N30P5 و HP61N30P9 نشان داده شده است. برای تهیه این تصاویر، ابتدا نمونه‌ها در نیتروژن مایع قرار داده شده و پس

که نمونه دارای ۳۰ درصد وزنی لاستیک طبیعی و ۵ درصد وزنی نانوذره پرلیت دارای حد متوسطی از استحکام کششی و درصد ازدیاد طول است. این نکته بدان معنا است که توزیع بهینه نانوذرات پرلیت منجر به افزایش سلول‌های منفرد تشکیل شده از زنجیره‌های پلیمری شده و این امر باعث کوچک‌تر شدن فاز لاستیکی در ترکیب شده است (۱۶ و ۱۷). از سوی دیگر، نتایج حاصل از تست کشش نمونه ۳۰ درصد وزنی لاستیک طبیعی و ۹ درصد وزنی نانوذره پرلیت نشان‌دهنده عملکرد ضعیف نمونه در ازدیاد طول و استحکام کششی است که در نتیجه کلسوخی نانوذرات پرلیت رخ داده است (۱۸ و ۱۹).

شکل (۴) نشانگر نتایج حاصله برای کلیه نمونه‌ها برای استحکام کششی و درصد ازدیاد طول شکست به‌صورت

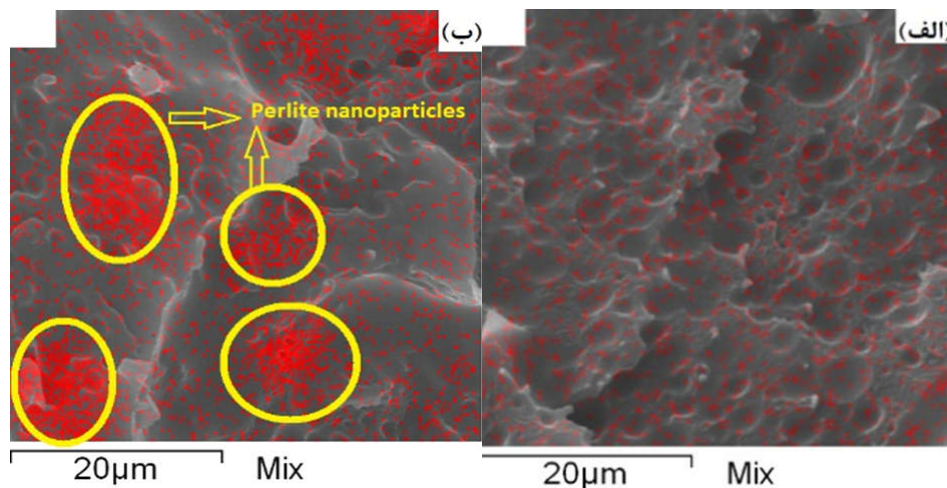




شکل ۵- تصاویر SEM نمونه‌های الف) HP70N30، ب) HP65N30P5، ج) HP61N30P9

پرلیت در ترکیب، اندازه فاز لاستیکی کاهش پیدا می‌کند (شکل ۵- الف و ب). در ترکیب این کامپوزیت، اندازه فاز لاستیکی به دو اصل بر هم‌کنش‌های بین سطحی و نسبت ویسکوزیته فازهای NR و HDPE وابسته است. دلیل متفاوت بودن اندازه فاز لاستیکی NR در این نمونه‌ها، متغیر بودن ویسکوزیته نمونه‌ها در درصدهای وزنی متفاوت فازها بر اثر حضور

از شکستن آن به مدت ۲۰ ساعت در اسید تولوئن قرار گرفته شده‌اند تا فاز لاستیکی NR آن حل شده و از ترکیب خارج شود. در نتیجه، فاز لاستیکی در این تصاویر به صورت حفره‌هایی مشخص شده است. با بررسی تصاویر به دست آمده مشخص می‌شود که اندازه این حفره‌ها با افزایش نانوذره پرلیت رابطه عکس دارد. به عبارت دیگر با حضور محتوای نانوذره



شکل ۶- تصاویر نقشه پراکندگی نانوذرات نمونه‌های الف) HP65N30P5 و ب) HP61N30P9.

نمی‌یابد این است که با افزایش میزان محتوای نانوذرات پرلیت در کامپوزیت، توزیع همگن آن دچار اختلال شده و ذرات تمایل به کلوخه شدن از خود نشان می‌دهند. در نتیجه، اثر مثبت توزیع آن‌ها در ماده زمینه بر روی کاهش اندازه فاز لاستیک کاهش می‌یابد.

برای بررسی چگونگی پخش و توزیع نانوذرات پرلیت در زمینه پلی‌اتیلن چگالی بالا از تصاویر مپینگ عناصر استفاده شده است که نمونه‌ای از آن در شکل (۶) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در نمونه نانوکامپوزیتی HP65N30P5 توزیع نانوذرات پرلیت به خوبی اتفاق افتاده است (شکل ۶- الف). این نمونه، دارای ۵ درصد نانوذرات پرلیت و ۳۰ درصد لاستیک طبیعی است. نتیجه توزیع همگن و یکنواخت نانوذرات پرلیت، خواص مکانیکی خوبی است که این نمونه از خود نشان داده است. از سوی دیگر، تصویر مپینگ مربوط به نمونه HP61N30P9 که در شکل (۶- ب) نشان داده شده است، وضعیت متفاوتی را در مقایسه با نمونه قبلی نشان می‌دهد. در این تصویر می‌توان مشاهده کرد که توزیع نانوذرات پرلیت به صورت یکنواخت انجام نشده است و نواحی وجود دارد که تراکم ذرات در آن‌ها بالاست. این امر نشان‌دهنده کلوخه شدن ذرات در این نواحی است و با توجه به این تصویر می‌توان دریافت که توزیع همگن نانوذرات پرلیت برای این

نانوذرات پرلیت است (۱۷ و ۱۹). با توجه به این‌که کوچک‌تر شدن فاز لاستیکی در کامپوزیت حاصل منجر به افزایش اثر آن در بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت حاصل از جمله ازدیاد طول می‌شود، حضور نانوذرات پرلیت به صورت غیر مستقیم با اثرگذاری روی اندازه فاز لاستیک در کامپوزیت، در این زمینه نیز نقش مثبتی ایفا می‌کند. این نکته با بررسی و مقایسه دو نمونه نانوکامپوزیتی HP65N30P5 و HP61N30P9 که به ترتیب دارای ۵ و ۹ درصد وزنی نانوذرات پرلیت به‌ازای ۳۰ درصد لاستیک طبیعی هستند تأیید می‌شود. با توجه به تصاویر میکروسکوپی این دو نمونه می‌توان نتیجه گرفت که فاز لاستیکی در نمونه نانوکامپوزیتی HP65N30P5 کوچک‌تر از نمونه HP61N30P9 است که با توجه به یکسان بودن سایر شرایط، می‌توان نتیجه گرفت که علت این تفاوت، مقدار نانوذرات پرلیت می‌باشد. از سوی دیگر و با مقایسه ریزساختار این دو نمونه نسبت به نمونه HP70N30 که بدون نانوذرات پرلیت است، مشخص می‌شود که دو نمونه دارای نانوذرات پرلیت دارای فاز لاستیکی کوچک‌تری نسبت به نمونه بدون پرلیت هستند. یعنی حضور نانوذرات پرلیت منجر به کاهش اندازه فاز لاستیک می‌شود اما این تأثیر به صورت یکنواخت و همنا با مقدار این نانوذرات نیست. یکی از دلایل این‌که روند کاهش اندازه فاز لاستیک با افزودن نانوذرات پرلیت ادامه

جدول ۴- آنالیز واریانس برای تابع هدف استحکام کششی

ضریب پی	آزمون فیشر	مربعات اصلی	درجه آزادی	مجموع مربعات	پارامترها
$0/0001 <$	۲۵۷/۳۶	۱۸/۶۷	۵	۹۳/۳۴	مدل
$0/0001 <$	۱۱۵۸/۰۹	۸۴/۰۱	۱	۸۴/۰۱	N-NR
۰/۰۰۰۷۱	۱۹/۲۲	۱/۳۹	۱	۱/۳۹	P-Perlite
۰/۰۱۲۱	۱۴/۷۷	۱/۰۷	۱	۱/۰۷	P×N
۰/۰۰۰۰۴	۶۹/۸۸	۵/۰۷	۱	۵/۰۷	N <sup>2</sup>
۰/۰۰۰۰۵	۶۲/۲۶	۴/۵۲	۱	۴/۵۲	p <sup>2</sup>
-----	-----	۰/۰۷۲	۵	۰/۳۶۲۷	باقیمانده <sup>۱۷</sup>
۰/۰۱۰۷	۹۲/۳۳	۰/۱۲	۳	۰/۳۶۰۱	عدم تناسب <sup>۱۸</sup>
R <sup>2</sup> Predicted:		۰/۹۷۰۹	R <sup>2</sup> Adjusted:		۰/۹۹۲۳

جدول ۵- آنالیز واریانس برای تابع هدف درصد ازدیاد طول

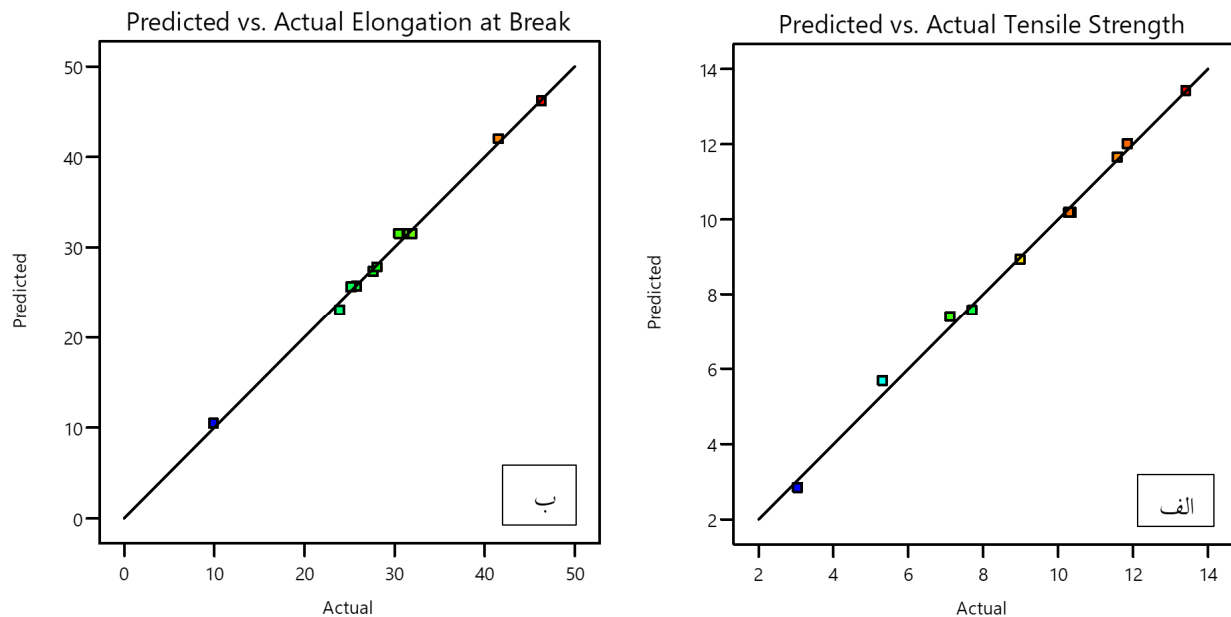
ضریب پی	آزمون فیشر	مربعات اصلی	درجه آزادی	مجموع مربعات	پارامترها
۰/۰۰۰۰۱	۲۹۸/۴۰	۱۷۷/۵۰	۵	۸۸۷/۴۹	مدل
۰/۰۰۰۰۱	۵۳۳/۳۲	۳۱۷/۲۴	۱	۳۱۷/۲۴	N-NR
۰/۰۰۰۰۱	۳۷۹/۴۰	۲۲۵/۶۸	۱	۲۲۵/۶۸	P-Perlite
۰/۰۰۰۰۶	۶۰/۷۲	۳۶/۱۲	۱	۳۶/۱۲	P×N
۰/۰۰۰۱۶	۳۸/۷۵	۲۳/۰۵	۱	۲۳ ۰۵	N <sup>2</sup>
۰/۰۰۰۰۱	۳۱۱/۰۲	۱۸۵/۰۰	۱	۱۸۵/۰۰	p <sup>2</sup>
-----	-----	۰/۵۹۴۸	۵	۲/۹۷	باقیمانده
۰/۵۳۱۶	۱/۰۱	۰/۵۹۷۹	۳	۱/۷۹	عدم تناسب
:R <sup>2</sup> Predicted		۰/۹۷۷۸	:R <sup>2</sup> Predicted		۰/۹۹۳۳

استخراج شده برای وابستگی پارامترهای هدف نسبت به متغیرهای مسئله استفاده شده است. مطابق این روش، مؤلفه‌هایی که مقدار آزمون فیشر بالاتر و مقدار ضریب پی کمتری (کمتر از ۰/۰۵) را دارا باشند، تأثیر بیش‌تری در ساخت مدل‌های ریاضی و پاسخ‌های به‌دست آمده دارند. نتایج آنالیز واریانس در جدول (۴) برای استحکام کششی و در جدول (۵) برای درصد ازدیاد طول نشان داده شده است. مطابق نتایج به‌دست آمده، مشخص می‌شود مؤلفه‌های N<sup>2</sup> (توان دوم پارامتر درصد لاستیک NR) برای استحکام کششی، N×P (جمله تعامل

میزان درصد وزنی (۹ درصد وزنی پرلیت در نمونه دارای ۳۰ درصد لاستیک طبیعی) رخ نمی‌دهد. افت خواص مکانیکی کامپوزیت حاصله را می‌توان این امر دانست که افزودن نانوذرات به علت کلوخه شدن تأثیر معکوس در خواص مکانیکی داشته است (۱۶ و ۱۸).

### ۳-۳- آنالیز واریانس و مدل‌ها

همان‌گونه که در بخش‌های پیشین ذکر شد، از آنالیز واریانس و آزمون فیشر جهت تعیین و ارزیابی مدل‌های تجربی و ریاضی



شکل ۷- نمودار مقادیر واقعی در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده برای الف) استحکام کششی و ب) تغییر طول تا شکست.

### ۳-۴- اعتبارسنجی مدل‌ها

برای اعتبارسنجی مدل‌ها، از روش مقایسه‌ای استفاده می‌شود. به بیان دیگر، با استفاده از هر دو مدل تجربی و پیش‌بینی به‌دست آمده، به‌ازای متغیرهای مشابه، مقدار تابع هدف محاسبه شده و دو مدل با هم مقایسه می‌شوند. شکل (۷) نشان‌دهنده مقایسه انجام شده از دو مدل تجربی و پیش‌بینی شده برای مقادیر استحکام کششی و ازدیاد طول تا شکست است. با توجه به این شکل می‌توان نتیجه گرفت که مقدارهای پیش‌بینی شده به‌واسطه مدل‌های ریاضی برای مقادیر استحکام کششی و تغییر طول تا شکست با نتایج تجربی به‌دست آمده تطابق مناسبی دارد. بدین ترتیب از مدل استخراج شده در معادلات (۵) و (۶) برای پیش‌بینی رفتار کامپوزیت‌هایی که درصد ترکیبات آن‌ها در این آزمایش‌ها پوشش داده نشده می‌توان استفاده کرد.

برای اعتبارسنجی مدل ارائه شده نسبت به داده‌های تجربی، می‌توان مقدار  $R^2$  ضریب همبستگی بین وضعیت پیش‌بینی شده و تنظیم‌شده را نیز باهم مقایسه کرد. همان‌گونه که در جداول (۵) و (۶) مشاهده می‌شود، این مقادیر اختلاف کمی با هم دارند و در نتیجه می‌توان گفت مدل ریاضی ارائه شده به‌خوبی داده‌های تجربی را توصیف می‌کند. مقدار این ضریب در هر

بین دو پارامتر) برای مدول کششی و ازدیاد طول و  $P^2$  (توان دوم پارامتر درصد نانوذره پرلیت) برای ازدیاد طول تا شکست برای استفاده در مدل‌ها مناسب می‌باشند. در نتیجه، مدل‌های تجربی و پیش‌بینی شده توابع هدف این تحلیل (استحکام کششی و درصد ازدیاد طول) برحسب متغیرهای طراحی (درصد وزنی لاستیک طبیعی و نانوذرات پرلیت) در روابط (۳) تا (۶) تعیین شده است.

الف) روابط نهایی بر اساس نتایج تجربی:

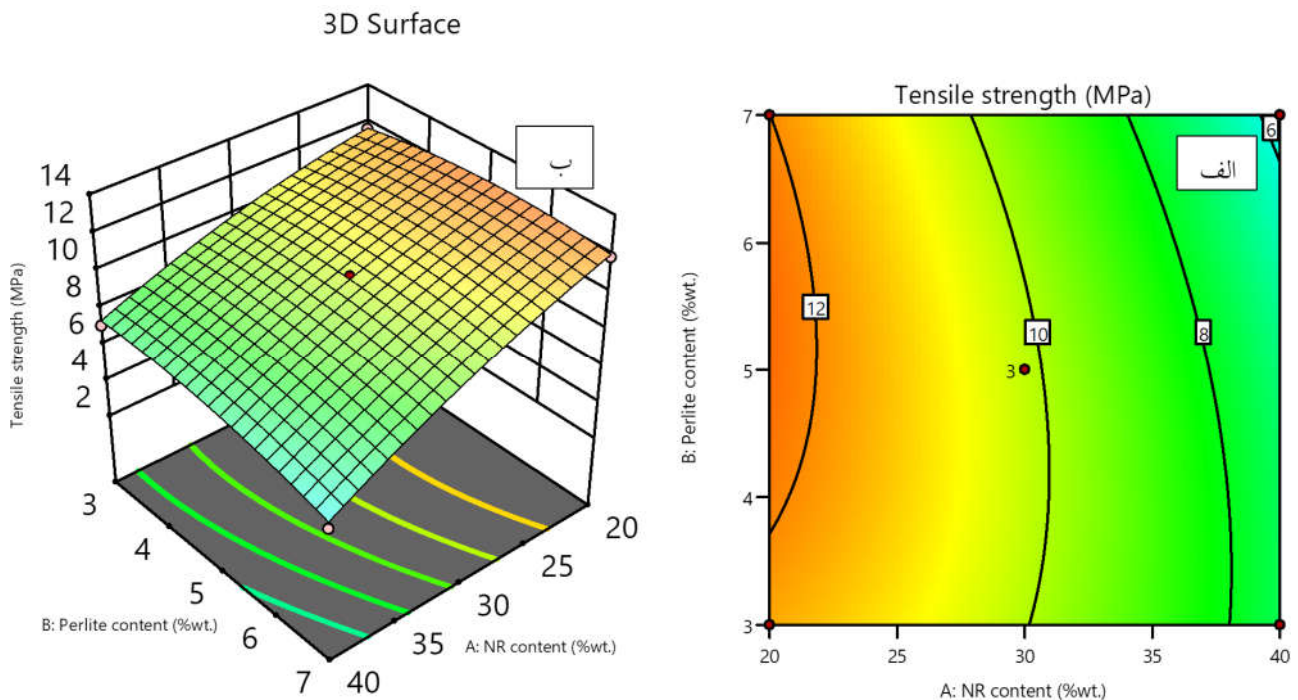
$$\text{Tensile strength} = 7.45 + 0.172 \times N + 1.81 \times P - 0.02 \times N \times P - 0.005 \times N^2 - 0.12 \times P^2 \quad (3)$$

$$\text{Elongation at break} = -5.12 + 0.60 \times N + 10.07 \times P - 0.15 \times N \times P + 0.01 \times N^2 - 0.77 \times P^2 \quad (4)$$

ب) روابط نهایی بر اساس نتایج پیش‌بینی شده در محدوده مقادیر متغیرها:

$$\text{Tensile strength} = 10.18 - 2.65 \times N - 0.34 \times P - 0.51 \times N \times P - 0.51 \times N^2 - 0.48 \times P^2 \quad (5)$$

$$\text{Elongation at break} = 31.52 + 5.14 \times N - 4.34 \times P - 3.01 \times N \times P + 1.09 \times N^2 - 3.10 \times P^2 \quad (6)$$



شکل ۸- نمودار الف) دویبعدی و ب) سه‌بعدی اثر بر هم‌کنش متغیرهای موادی بر استحکام کششی.

پرلیت ثابت می‌باشد، ماده حاصل نرم‌تر شده و استحکام کششی کاهش پیدا می‌کند. از طرفی با ثابت بودن درصد وزنی لاستیک NR و افزایش درصد وزنی پرلیت، استحکام کششی تغییرات همگنی از خود نشان نمی‌دهد و میزان تغییرات آن وابسته به مقدار لاستیک می‌باشد. بدین صورت که با ثابت بودن مقدار لاستیک NR در ۴۰ درصد وزنی و افزایش مقدار نانوذره پرلیت از ۳ درصد وزنی به ۷ درصد وزنی، استحکام کششی از ۲۰ MPa به ۷/۴ MPa کاهش یافته اما در مقدار لاستیک NR ۲۰ درصد وزنی، افزایش مقدار نانوذره پرلیت از ۳ درصد وزنی به ۷ درصد وزنی منجر به افزایش استحکام کششی از ۱۱/۵۶ MPa به ۱۲ MPa می‌شود. در طرف دیگر با ثابت بودن مقدار نانوذره پرلیت در ۳ درصد وزنی و افزایش مقدار لاستیک NR از ۲۰ درصد وزنی به ۴۰ درصد وزنی مقدار استحکام کششی از ۱۱/۵۶ MPa به ۷/۲۹ MPa کاهش پیدا می‌کند. در نتیجه می‌توان گفت اثر نانوذرات پرلیت صرفاً تغییر فیزیکی ترکیب حاصل نیست و از آنجا که استحکام کامپوزیت حاصل رابطه همنوا با افزایش میزان نانوذرات ندارد، اثری علاوه

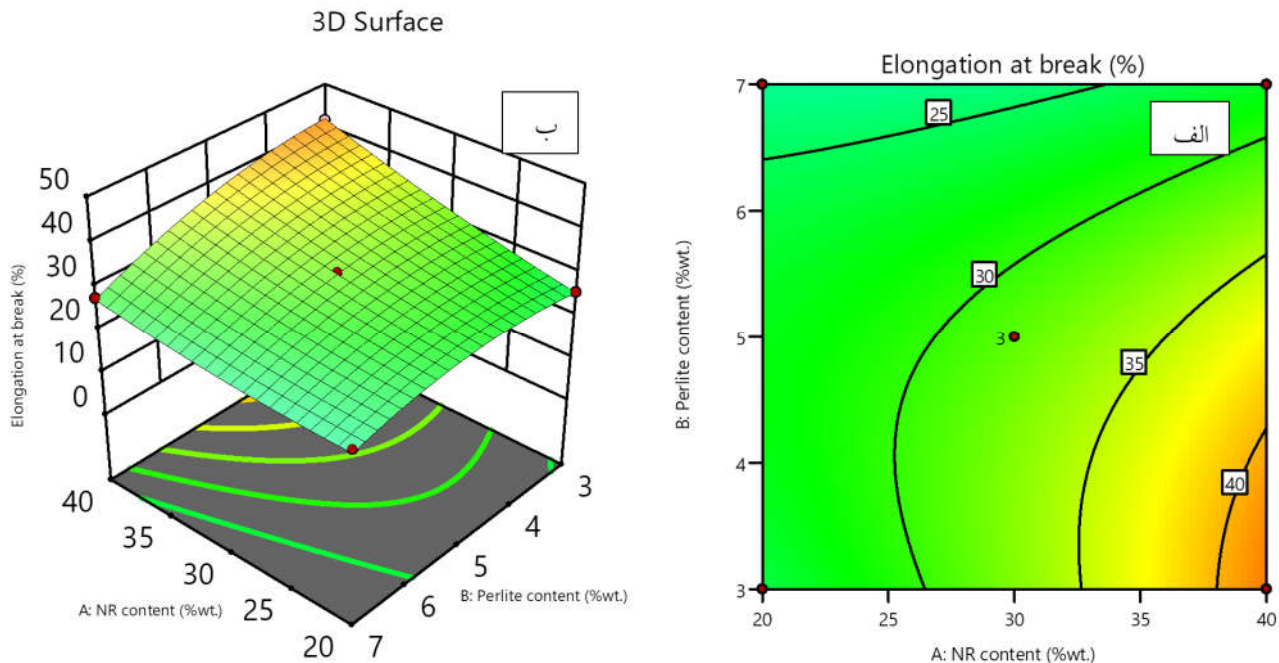
حالت نیز عدد بسیار مناسبی است و نشان‌دهنده این است که برازش انجام شده برای داده‌های تجربی، دقت مطلوبی داشته است.

### ۳-۵- تأثیرات متغیرها بر خواص مکانیکی

همان‌گونه که مشاهده شد، نتایج اعتبارسنجی مدل‌های ریاضی نشان داد که این مدل‌ها برای پیش‌بینی استحکام کششی و تغییر طول تا شکست مناسب هستند. این امر امکان استفاده از مدل‌ها برای تجزیه و تحلیل تأثیر پارامترهای مختلف بر پاسخ فرایند را فراهم می‌کند. بنابراین، در این قسمت، به‌صورت جزئی، تأثیر هر یک از پارامترها را روی پاسخ‌های مسئله به‌صورت مجزا بررسی می‌کنیم.

شکل (۸) چگونگی تأثیر متغیرهای فرایندی (درصد وزنی لاستیک NR و درصد وزنی نانوذره پرلیت) را بر تغییرات ایجاد شده در استحکام کششی نانوکامپوزیت HDPE/NR/Perlite نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش درصد وزنی لاستیک NR در صورتی که مقدار نانوذره

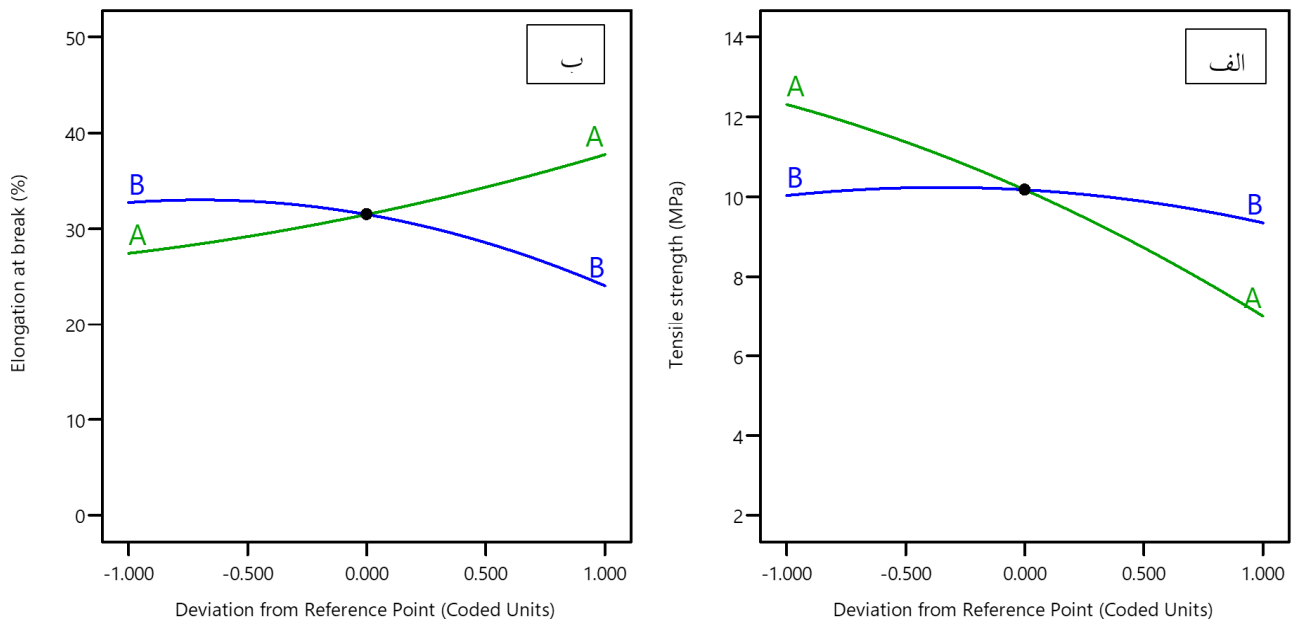




شکل ۹- نمودار الف) دوبعدی و ب) سه بعدی اثر بر هم کنش متغیرهای موادی بر درصد ازدیاد طول.

جهت، افزودن بیش از اندازه نانوذرات پرلیت به افزایش استحکام کششی کامپوزیت حاصل کمکی نمی‌کند. تصاویر دوبعدی و سه بعدی مربوط به درصد ازدیاد طول نمونه نانوکامپوزیتی HDPE/NR/Perlite برحسب دو متغیر پارامتر فرایندی لاستیک NR و درصد نانوذره پرلیت در شکل (۹) آورده شده است. با توجه به این شکل می‌توان گفت افزایش مقدار لاستیک طبیعی منجر به افزایش درصد ازدیاد طول تا شکست نمونه حاصله خواهد شد. به‌عنوان نمونه، با افزایش درصد لاستیک از ۲۰ درصد وزنی به ۴۰ درصد وزنی با ثابت بودن نانوذره پرلیت در ۳ درصد وزنی، تغییر طول تا شکست نمونه کامپوزیتی HDPE/NR/Perlite افزایش پیدا کرده و به ماکسیمم مقدار خود یعنی  $40/71$  MPa می‌رسد. از سوی دیگر، می‌توان مشاهده کرد که با افزایش درصد نانوذرات پرلیت به‌ازای مقدار ثابت لاستیک طبیعی، درصد ازدیاد طول رفتار همگن و یکسانی ندارد. مجدداً نکته‌ای را که در مورد تغییر رفتار استحکام کششی به‌ازای افزودن نانوذرات در درصد‌های وزنی بیش‌تر لاستیک طبیعی بیان شد در اینجا نیز می‌توان مطرح کرد. بدین صورت که با افزودن نانوذرات بیش از یک مقدار

بر تغییر افزایش وزنی روی کامپوزیت حاصل با تغییراتی در اندازه و ترکیب ریزساختار ایجاد می‌شود. اندازه فازها در ریزساختار نمونه‌های نانو کامپوزیتی یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در خواص مکانیکی آن است. با توجه به تحقیقاتی که توسط پژوهشگران مختلف انجام شده است، مشخص شده است که با نفوذ نانوذرات بین ماتریس پلیمری در ریزساختار نهایی نمونه نانوکامپوزیتی، فاز لاستیکی کوچک‌تر می‌شود. این امر نشان‌دهنده نیروی پیوندی قوی بین فاز لاستیکی و نانوذرات با ماتریس پایه است و این مورد به بهتر شدن استحکام کششی کمک می‌کند (۲۰ و ۲۱). از سوی دیگر تفاوت اثر نانوذرات پرلیت به این کامپوزیت در درصد‌های مختلف لاستیک طبیعی روی خواص کامپوزیت بدین جهت است که با زیاد شدن درصد وزنی لاستیک طبیعی در ماده حاصله، بالطبع میزان ماتریس پلی‌اتیلن کاهش یافته و در نتیجه نانوذرات پرلیت فضای کمی برای پخش شدن در داخل ماده کامپوزیتی خواهند داشت. این امر منجر به عدم پخش یکنواخت نانوذرات شده و کلوخه شدن آن‌ها را در پی خواهد داشت که این نکته در تصاویر میکروسکوپی مشهود است. بدین



شکل ۱۰- تأثیرات متغیرهای موادی بر الف) استحکام کششی و ب) تغییر طول تا شکست.

در خواص ندارد و میزان تأثیر آن بسته به درصد وزنی لاستیک طبیعی است. برای مقادیر کمتر لاستیک طبیعی، افزودن نانوذرات پرلیت اثر مثبتی روی استحکام کششی دارد. اما این اثر برای مقادیر زیاده‌تر لاستیک طبیعی (بیش از ۴۰ درصد) اثر مثبتی ندارد و منجر به کاهش استحکام می‌شود. یکی از دلایل این امر نیز همان‌گونه که اشاره شد، عدم اختلاط و پخش همگن نانوذرات پرلیت در فاز بستر برای کامپوزیت‌های با محتوای بالای لاستیک طبیعی می‌باشد.

برای یافتن مقادیر بهینه متغیرهای مسئله یعنی درصد وزنی لاستیک طبیعی و نانوذرات پرلیت، با توجه به رفتار ناهمگن اثرات این پارامترها روی دو مشخصه درصد ازدیاد طول و استحکام کششی، از بهینه‌سازی چند متغیره با استفاده از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت استفاده شده است. در جدول (۶) مقدار پارامترهای فرایندی که به کمک آنالیز مدل‌های ریاضی برای پیشینه کردن هم‌زمان خواص مکانیکی به دست آمده نشان داده شده است. با توجه به داده‌های جدول (۶) مقادیرهای بهینه لاستیک NR و نانوذره پرلیت به ترتیب برابر با ۳۶/۸۲ و ۳ درصد وزنی است و با توجه به این درصدها مقادیر استحکام

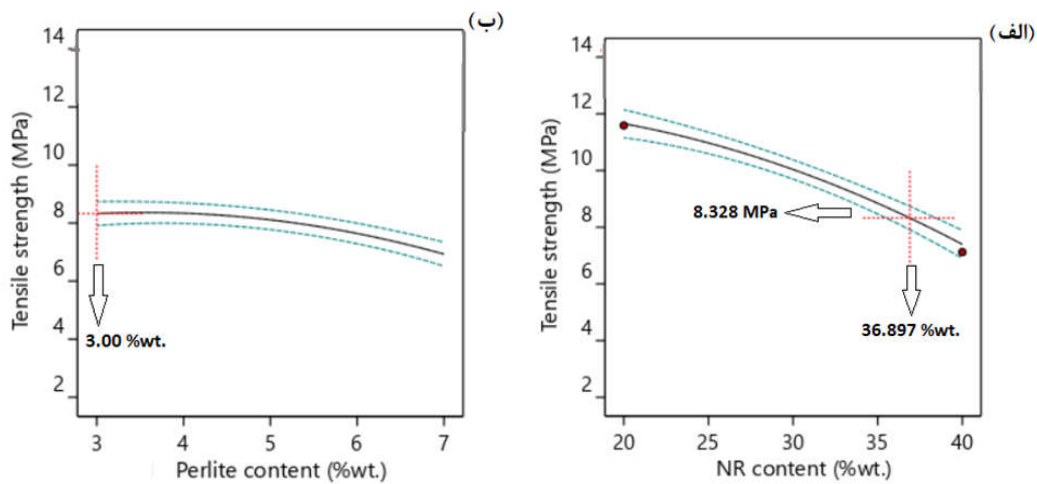
مشخص، در کامپوزیت‌های با درصد وزنی بیش‌تر لاستیک به علت پدیده کلوخه شدن نانوذرات بهبودی در رفتار مکانیکی نانوکامپوزیت حاصل مشاهده نمی‌شود. هرچه میزان لاستیک افزایش می‌یابد، فضای پخش همگن نانوذرات پرلیت کاهش می‌یابد و در نتیجه احتمال کلوخه شدن افزایش می‌یابد (۱۹).

### ۳-۶- بهینه‌سازی چندمتغیره

نمودارهای شکل (۱۰) نشان‌دهنده اثرات پارامترهای فرایندی بر استحکام کشش و ازدیاد طول تا شکست است. در این شکل مؤلفه‌های A و B به ترتیب درصد وزنی لاستیک NR و درصد وزنی نانوذره پرلیت است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، استحکام کششی نمونه نانوکامپوزیتی HDPE/NR/Perlite با افزایش لاستیک NR کاهش می‌یابد. این اثر قابل انتظار است چراکه لاستیک طبیعی در مقایسه با پلی‌اتیلن چگالی بالا نرم‌تر بوده و افزودن آن در درصد وزنی‌های استفاده شده منجر به کاهش استحکام کششی کامپوزیت حاصل می‌شود. اثر افزودن نانوذرات پرلیت را نیز در این نمودارها می‌توان مشاهده کرد. همان‌گونه که قبلاً ذکر شد، افزودن نانوذرات پرلیت اثر همگنی

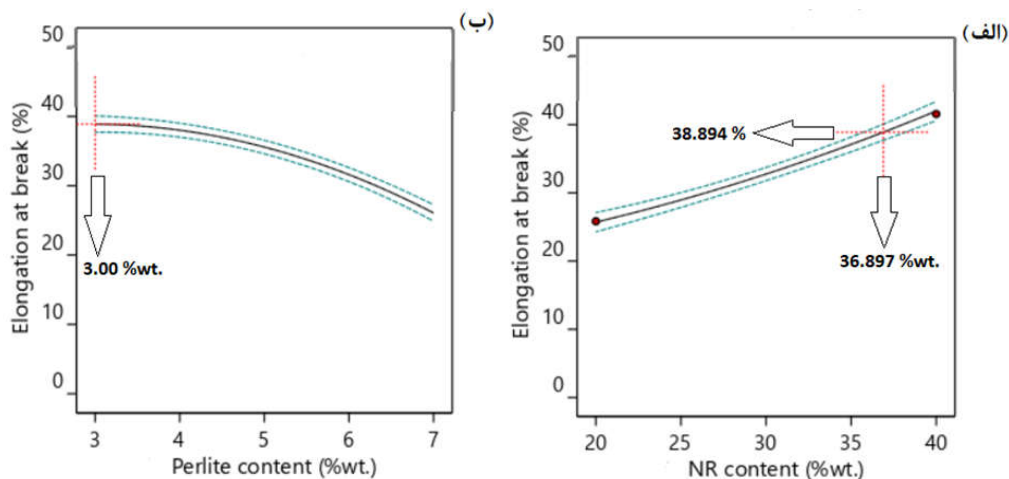
جدول ۶- متغیرهای موادی برای بیشینه شدن هم‌زمان خواص مکانیکی حاصل از بهینه‌سازی

TS (MPa) EB (%)	درصد وزنی پرلیت (wt.%)	درصد وزنی لاستیک طبیعی (wt.%)
۸/۳۲۵	۳۶/۸۹۷	۳/۰۰
۳۸/۸۹۴		



شکل ۱۱- نمودار بهینه شده متغیرها برای بیشینه‌سازی استحکام کششی.

(الف) برحسب درصد وزنی لاستیک طبیعی، (ب) برحسب درصد وزنی پرلیت.



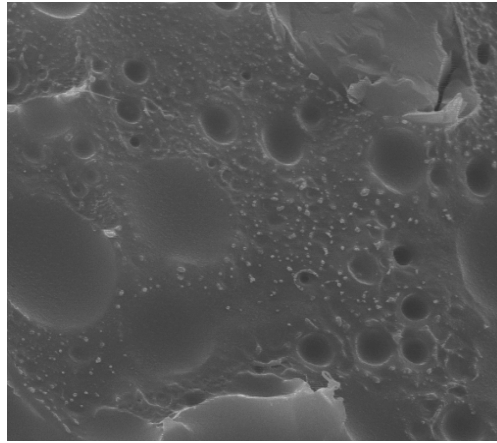
شکل ۱۲- نمودار بهینه شده متغیرها برای بیشینه‌سازی درصد ازدیاد طول.

(الف) برحسب درصد وزنی لاستیک طبیعی، (ب) برحسب درصد وزنی پرلیت.

استحکام کششی و ازدیاد طول تا شکست نشان داده شده، به‌دست آمده است. در شکل (۱۱) محدوده تغییرات تابع پاسخ مربوط به استحکام کششی برحسب متغیرهای مسئله یعنی

کششی و تغییر طول تا شکست به ترتیب برابر  $32/8 \text{ MPa}$  و  $38/88$  درصد خواهد بود (جدول ۶). این مقادیر به کمک نرم افزار دیزاین اکسپرت که در شکل (۱۱) و (۱۲) به ترتیب برای





شکل ۱۳- تصویر SEM نمونه ساخته شده از مقادیر بهینه سازی شده.

جدول ۷- نتیجه مقدار تجربی به دست آمده از مقادیر بهینه سازی شده

TS (MPa)	(wt.) درصد وزنی پرلیت	(wt.) لاستیک طبیعی درصد وزنی
۷/۸۵۱	۳۶/۸۹۷	۳۵/۹۵۴
EB (%)		

تطابق خوبی با پیش بینی بهینه سازی دارد و حداکثر اختلاف کمتر از ۷ درصد می باشد. مقدار استحکام کششی به دست آمده از نمونه بهینه با ۳ درصد وزنی نانوذره پرلیت و ۳۶/۸۹ درصد وزنی لاستیک طبیعی برابر ۷/۸۵ MPa و مقدار درصد ازدیاد طول نمونه ۳۵/۹۵ درصد است. همچنین با مقایسه عکس SEM نمونه بهینه سازی شده با سایر نمونه ها، می توان گفت اندازه حفره های ایجاد شده (فاز لاستیک طبیعی) در نمونه بهینه مابین نمونه های با ۳۰ درصد وزنی لاستیک طبیعی و ۹ درصد وزنی نانوذره پرلیت و نمونه با ۳۰ درصد وزنی لاستیک طبیعی و ۵ درصد وزنی نانوذره پرلیت قرار دارد.

#### ۴- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، اثر نانوذرات پرلیت بر رفتار مکانیکی کامپوزیت لاستیک طبیعی/ پلی اتیلن چگالی بالا به صورت تجربی بررسی شد. نمونه های نانوکامپوزیتی HDPE/NR/Perlite با روش اختلاط مذاب با استفاده از دستگاه مخلوط کن داخلی و

درصد وزنی لاستیک طبیعی و نانوذرات پرلیت نشان داده شده است. علامت + در این نمودار مربوط به نقطه بهینه است که مقدار متغیر و تابع هدف را در آن نشان می دهد. همچنین، به طور مشابه شکل (۱۲) همین داده ها را برای تابع پاسخ درصد ازدیاد طول نمایش می دهد.

با توجه به تغییرات توابع هدف به صورت غیر همنا با متغیرها، برای بیشینه کردن همزمان خواص مکانیکی ذکر شده، با استفاده از مدل های ریاضی و تجربی به دست آمده نقطه بهینه سطح پاسخ به دست آمده است.

با توجه به نتیجه بهینه سازی انجام شده و بر اساس مقادیر به دست آمده برای درصد وزنی لاستیک طبیعی و نانوذرات پرلیت، نمونه بهینه سازی شده ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت که ریزساختار آن در شکل (۱۳) نشان داده شده است. مقادیر مربوط به استحکام کششی و درصد ازدیاد طول این نمونه در جدول (۷) مشخص شده است. همان گونه که مشاهده می شود، مقدار استحکام کششی و درصد ازدیاد طول نمونه

مشخصی بهبودی در رفتار نانوکامپوزیت مشاهده نمی‌شود. حضور نانوذرات باعث کاهش اندازه فاز لاستیک طبیعی در نانوکامپوزیت می‌شود. البته این کاهش نیز وابسته به پخش یکنواخت و همگن نانوذرات در ماده زمینه و قرارگیری آن‌ها در مرز بین فاز زمینه و لاستیک طبیعی است. برای محتوای زیاد نانوذرات، به علت کلوخه شدن اثر کاهش اندازه فاز لاستیک در کامپوزیت کاهش می‌یابد.

بیش‌ترین میزان استحکام کششی برای نمونه با ۱۰ درصد وزنی لاستیک طبیعی و ۵ درصد وزنی پرلیت برابر با ۱۳/۴۲ مگاپاسکال مشاهده شد. همچنین بیش‌ترین میزان درصد ازدیاد طول برای نمونه با ۵۰ درصد لاستیک طبیعی و ۵ درصد پرلیت به میزان ۴۶/۳۳ درصد بوده است.

بهینه‌سازی چند متغیره نشان داد که بهترین ترکیب برای بهبود استحکام کششی و درصد ازدیاد طول با میزان لاستیک NR ۳۹/۸۹ درصد وزنی و نانوذره پرلیت ۳/۰۰ درصد وزنی می‌باشد. مقادیر بهینه خواص مکانیکی به ترتیب برای استحکام کششی و ازدیاد طول تا شکست برابر ۸/۳۲ MPa و ۳۸/۸۹ % می‌باشد.

### تشکر و سپاسگزاری

این تحقیق حمایت خاصی از مؤسسات عمومی، صنعتی و غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

### تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ نوع تضاد منافی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

در درصدهای مختلف لاستیک طبیعی NR و نانوذره پرلیت تهیه شدند. مقدار لاستیک NR برابر با درصد وزنی (۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد) و نانوذره پرلیت در درصد وزنی (۱، ۳، ۵، ۷ و ۹ درصد) در نظر گرفته شد. با استفاده از روش بهینه‌سازی سطح پاسخ و همچنین طراحی پنج سطحی مرکب مرکزی، نمونه‌های مورد نیاز مشخص و نتایج تجربی آن‌ها به دست آمد. دو تابع هدف استحکام کششی و درصد ازدیاد طول برای بهینه‌سازی در بهینه‌سازی در نظر گرفته شدند. با انجام بهینه‌سازی، درصد مواد تشکیل‌دهنده و نیز مقدار متناظر پارامترهای پاسخ به دست آمدند. در نهایت، نمونه‌ای متناظر با این طرح بهینه ساخته و با انجام آزمایش مشخص شد نتایج حاصل از بهینه‌سازی تطابق خوبی با یافته‌های تجربی دارد. مهم‌ترین نتایج به دست آمده از این پژوهش به شرح زیر است:

تحلیل و بررسی نمودارهای اعتبارسنجی به دست آمده از نتایج تجربی و پاسخ‌های پیش‌بینی شده نشان داد که مدل ارائه شده توسط روش سطح پاسخ با نتایج تجربی به دست آمده تطبیق مناسبی دارد و این موضوع بیان‌کننده درستی مدل‌های به دست آمده است.

افزایش محتوای لاستیک طبیعی در نانوکامپوزیت موجب کاهش استحکام مکانیکی و افزایش درصد ازدیاد طول شده است. این امر با توجه به نرمی لاستیک در مقایسه با ماده زمینه دور از انتظار نبوده و یافته‌های تجربی نیز مؤید این نکته است. افزایش میزان پرلیت در نانوکامپوزیت رفتار یکسانی به دست نمی‌دهد و در برخی نمونه‌ها منجر به بهبود خواص مکانیکی و در برخی دیگر منجر به تضعیف آن‌ها می‌شود. علت این امر عدم پخش یکنواخت نانوذرات در ماده زمینه برای محتوای زیاد نانوذرات است. در نتیجه، با افزایش میزان نانوذرات از حد

### واژه‌نامه

1. polyethylene (PE)
2. linear low density polyethylene (LLDPE)
3. high density polyethylene (HDPE)
4. low density polyethylene (LDPE)
5. natural rubber (NR)
6. acrylic acid (AA)
7. wollastonite (WS)
8. p-phenylene-2,6-benzobisoxazole (PBO)
9. perlite
10. scanning electron microscope (SEM)

11. response surface methodology (RSM)
12. box-behnken design
13. central composite design
14. desirability function ( $d_j$ )

15. tensile strength (TS)
16. elongation at break (EB)
17. residual
18. lack of fit

## مراجع

1. Dashtbayazi M, Mahmoudi Meymand M. Simulation of Elastic Properties of Polymer- Clay Nanocomposite. *J Adv Mater.* 2022; 34(3): 69-86. doi: 10.18869/acadpub.jame.34.3.69.
2. Arefazar A, Shokoohi S. Polymer blends and alloys. Amirkabir University of Technology Publications, Tehran, Iran. 2010:1-3.
3. Soltani M, Niroumand B, Shamanian M. Optimization of surface mechanical properties and characterization of AZ31B/CNT nano-composite through friction stir processing (FSP) using response surface methodology (RSM) design of experiment. *J Adv Mater.* 2022;36(2):15-32.
4. Nazari M, Baharvandi, HR, Ehsani, N. Investigating the Effect of Chemical Composition and Sintering Temperature on Mechanical Properties of SiC-5TiB2 Nano Composite Reinforced by Graphene Quantum dot using Taguchi Test Design Method. *J Adv Mater.* 2023; 42(2): 69-84. doi: 10.47176/jame.42.2.1034.
5. Akbari B, Tavandashti MP, Zandrahimi M. Particle size characterization of nanoparticles-a practical approach. *Iran J Mater Sci Eng.* 2011;8(2):1-9.
6. Drobny JG. Handbook of thermoplastic elastomers. Elsevier; 2014.
7. Marić M, Macosko CW. Improving polymer blend dispersion in mini-mixers. *Polym Eng Sci.* 2001; 41(1):118-30.
8. Cui YY, Dong BJ, Li BL, Li SC. Properties of polypropylene/poly(ethylene terephthalate) thermostimulative shape memory blends reactively compatibilized by maleic anhydride grafted polyethylene-octene elastomer. *Int J Polym Mater.* 2013;62(13):671-7.
9. Knuuttila H, Lehtinen A, Nummila-Pakarinen A. Advanced Polyethylene Technologies- Controlled Material Properties. *Adv Polym Sci.* 2004;169:13-7.
10. Yuhaida I, Salmah H, Hanafi I, Firuz Z. The Effect of Acrylic Acid on Tensile and Morphology Properties of Wollastonite Filled High Density Polyethylene/Natural Rubber Composites. *Procedia Chem.* 2016;19:401-5.
11. Ahmad I, Ismail R, Abdullah I. Effects of PBO fiber and clay on the mechanical, morphological, and dynamic mechanical properties of NR/HDPE blends. *Polym Eng Sci.* 2011;51(3):419-25.
12. Sabetzadeh M, Bagheri R, Masoomi M. Effect of nanoclay on the properties of low density polyethylene/ linear low density polyethylene/ thermoplastic starch blend films. *Carbohydr Polym.* 2016;141:75-81.
13. Sahraeian R, Esfandeh M. Mechanical and morphological properties of LDPE/perlite nanocomposite films. *Polym Bull.* 2017;74(4):1327-41.
14. Soleymani H, Fereidoon A, Albooyeh A, Nakhaei M. 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. *J Sci Technol Comp.* 2023;9(4):2089-98 (In Persian).
15. Berger PD, Maurer RE, Celli GB, Berger PD, Maurer RE, Celli GB. Introduction to response-surface methodology. *Experimental Design: With Application in Management, Engineering, and the Sciences.* 2018:533-84.
16. Soleymani H, Fereidoon A, Albooyeh A, Nakhaei M. Optimization of Mechanical and Morphological Properties of Polypropylene Reinforced with Natural Rubber-Perlite Nanoparticles Using Response Surface Method. *J Mater Metall Eng.* 2023; 34(2): 1-18. doi: 10.22067/jmme.2023.80165.1092.
17. Ghorbankhan A, Nakhaei MR, Safarpour P. Fracture behavior, microstructure, and mechanical properties of PA6/NBR nanocomposites. *Polym Compos.* 2022 Sep;43(9):6696-708.
18. Ghorbankhan A, Nakhaei MR, Safarpour P. Modeling and optimization of mechanical properties of PA6/NBR nanocomposite reinforced with perlite nanoparticle. *JSci Technol Comp.* 2021; 8(1): 1421-1430. doi: 10.22068/jstc.2021.527365.1714.
19. Chandran N, Sarathchandran C, Jose S, Thankappan S, Thomas S. Organic modifier induced interfacial transformation, morphology and physico-mechanical properties of PP/NR based blend nanocomposites. *Comp B Eng.* 2020;194:108045.
20. Haghnegahdar M, Naderi G, Ghoreishy MH. Fracture toughness and deformation mechanism of unvulcanized and dynamically vulcanized polypropylene/ethylene propylene diene monomer/graphene nanocomposites. *Compos Sci Technol.* 2017;141:83-98.
21. 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. *Iran Polym J.* 2016;25:179-91.