

فرآیندهای نوین در مهندسی مواد

ma.iaumajlesi.ac.ir

بهبودسازی خواص مکانیکی آلیاژهای پلی وینیل کلراید (PVC) حاوی نانو ذرات آکریلونیتریل بوتادین رابر (NBR) با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی

علیرضا افشاری^۱، محمدرضا کلائی^{۲*}، مهدی مگر^۳

۱- مجتمع فنی و مهندسی، دانشکده مهندسی شیمی و پلیمر، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، ایران.

۲- مرکز تحقیقات نانو، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، ایران.

۳- دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی پلیمر، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کاشان، ایران.

*mr_kalae@azad.ac.ir, moghri@iaukashan.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۴	هدف از مقاله حاضر بررسی مورفولوژی و خواص مکانیکی آلیاژهای پلی وینیل کلراید (PVC) حاوی نانو ذرات آکریلونیتریل بوتادی
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۱	ان رابر (NBR) که در اکسترودر دو پیچ ناهمسوگرد تهیه شده‌اند، می‌باشد. اثرات درصد نانو ذرات، دما، زمان و شدت اختلاط بر روی
کلید واژگان:	خواص مذکور به کمک روش طراحی آزمون مطالعه شدند. با در نظر گرفتن بیشینه چقرمگی آلیاژها به عنوان حالت بهینه، شرایط
پلی وینیل کلراید	فرآیندی و همچنین ترکیب درصد مناسب با استفاده از طراحی آزمایش تاگوچی تعیین شدند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی
نانو ذره نیتریل رابر	(SEM) مورفولوژی ماتریس-قطرات پراکنده را نشان داد. پخش و توزیع مناسب و یکنواخت ذرات لاستیکی نیتریل رابر در درون
مورفولوژی	ماتریس PVC مشاهده شد که دلیل آن سازگاری مناسب بین ذرات لاستیک و ماتریس اطراف آن است. مشاهده شد که قطرات پراکنده
خواص مکانیکی	به صورت ذرات کروی و همچنین ذرات کشیده شده در درون ماتریس PVC حضور دارند. نتایج تجربی در کنار داده‌های طراحی
چقرمگی	آزمایش نشان داد که حالت بهینه کرنش شکست و چقرمگی مربوط به حالتی است که دمای اختلاط در حدود ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد،
طراحی آزمایش	زمان اختلاط ۶ دقیقه، سرعت اختلاط در حدود ۷۰ rpm و درصد نانو ذرات برابر با ۲ درصد وزنی باشند. آنالیز واریانس نشان داد
	بیشترین اثر بر روی مدول مربوط به درصد ذرات NBR است در حالی که کمترین سهم مربوط به زمان اختلاط است. سپس دمای
	اختلاط بالاترین سهم را دارد. برهمکنش بین فاکتورهای مختلف و اثر آن‌ها بر روی مدول کششی نشان داد که بیشترین شاخص
	برهمکنش مربوط به دمای اختلاط با زمان اختلاط و کمترین آن زمان و درصد NBR است.

Optimization the Mechanical Properties of PVC/n-NBR Blends Using Taguchi Experimental Design Method

Alireza Afshari¹, Mohammadreza Kalaei^{1,2*}, Mehdi Moghri³

1- Department of Polymer Engineering, Tehran South Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2- Nano Research Center, Tehran South Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

3- Department of Polymer Engineering, Kashan Branch, Islamic Azad University, Kashan, Iran.

* mr_kalae@azad.ac.ir, moghri@iaukashan.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Doi:

20.1001.1.24233226.1401.16.1.7.4

Keywords:

Poly (Vinyl Chloride)

Acrylonitrile Butadiene Rubber

Morphology

Mechanical Properties

Toughness

Design Of Experiment

Abstract

The aim of this paper is to study the morphology and mechanical properties of poly(vinyl chloride) (PVC) blends containing acrylonitrile butadiene rubber (NBR) nanoparticles prepared in a counter rotating twin- screw extruder. The effect of nanoparticle's percent, mixing temperature and time and rotor speed on the properties were studied using the experimental design method. Considering toughness increase of the blends as an optimal state, the process conditions and NBR percent were determined. Scanning electron microscopy (SEM) images showed dispersed matrix-droplet morphology. Uniform distribution of NBR rubber particles was observed within the PVC matrix due to the good compatibility between the rubber particles and the matrix. It was also observed that scattered droplets are present in the spherical form as well as elongated particles within the PVC matrix. Obtained results along with experimental design data showed that the optimal state of break strain and toughness is related to the state with a mixing temperature of about 180 °C, mixing time of 6 minutes, mixing speed of about 70 rpm and a nanoparticle percentage of 2%. The analysis of variance showed that the greatest effect on the modulus was related to the percentage of NBR, while the lowest was related to the mixing time. After that, mixing temperature has the highest share. Interactions between different factors and their effects on tensile modulus showed that the highest intensity of the interaction index is related to the interaction of mixing temperature with mixing time and the lowest is the time and percentage of NBR.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Alireza Afshari, Mohammadreza Kalaei, Mehdi Moghri, Optimization the Mechanical Properties of PVC/n-NBR Blends Using Taguchi Experimental Design Method, New Process in Material Engineering, 2022, 16(1), 93-104.

۱- مقدمه

الاستومرهای نیتریلی یکی از اصلاح‌کننده‌های پر مصرف جهت بهبود خواص ضربه‌ای پلی وینیل کلراید (PVC) می‌باشد. در صورت انتخاب الاستومر با میزان آکریلونیتریل مناسب، می‌توان این ماده را با هر نسبتی با هموپلیمرهای PVC مخلوط کرد. بسته به نسبت اجزاء، پخت الاستومر و همچنین نوع کاربرد ماده نهایی، آلیاژ حاصل را می‌توان به صورت PVC اصلاح شده با فاز لاستیکی و الاستومر اصلاح شده با PVC در نظر گرفت. نسبت اجزاء، محتوای آکریلونیتریل فاز لاستیکی و مقدار ویسکوزیته آن و همچنین وزن مولکولی PVC و مقدار افزودنی‌های موجود در ترکیب آمیزه از مهم‌ترین فاکتورهای مؤثر بر خواص نهایی می‌باشند. به عنوان نتیجه‌گیری کلی می‌توان بیان کرد که در آلیاژ حاصل، رزین PVC در تعیین میزان مقاومت در برابر روغن‌ها، مواد سوختی و ازن، استحکام (کششی و پارگی)، سفیدی و همچنین مقاومت در برابر هوازدگی، مقاومت در برابر سایش و فرسایش، مقاومت در برابر اشتعال‌پذیری و مقاومت الکتریکی بالا نقش مؤثری دارد. [۱-۲]

تاکنون مطالعات بسیاری در خصوص آلیاژهای PVC/NBR انجام شده است [۳-۵]. نتایج محققان مختلف نشان می‌دهد که فصل مشترک نقش مهمی در بهبود مقاومت ضربه‌ای و خواص چقرمگی کامپاندهای PVC حاوی ذرات بسیار ریز پودری رابر UFPR دارا می‌باشد. لیو و همکاران^۱ انتقال از خواص شکننده به خواص چکش‌خوار برای آلیاژهای PVC/NBR را با بررسی مورفولوژی مطالعه کردند. نتایج نشان داد که ذرات NBR با پراکنش خوب در درون ماتریس PVC سبب تولید آلیاژهای به‌شدت چقرمه می‌شود. توزیع اندازه ذرات فاز لاستیکی، متوسط اندازه ذرات، کسر حجمی ذرات و ضخامت لیگامنت ماتریس در فضای بین ذرات لاستیکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر چقرمگی آلیاژ می‌باشند [۶-۸].

طبق مطالعات انجام شده توسط ماتسو و همکاران^۲، امتزاج‌پذیری PVC و NBR (چسبندگی فصل مشترک بین

PVC و NBR) با افزایش در میزان آکریلونیتریل فاز NBR تا ۴۰ درصد وزنی افزایش می‌یابد. نتایج مطالعات این محققان نشان می‌دهد که برای کسب بالاترین استحکام ضربه در آلیاژهای PVC/NBR یک حد بهینه از مقدار آکریلونیتریل وجود دارد [۹-۱۰]. مورفولوژی آلیاژهای PVC/NBR با میزان بهینه از آکریلونیتریل عمدتاً به صورت یک شبکه پیوسته از فاز لاستیکی به همراه تعدادی از ذرات پراکنده لاستیکی است [۱۰].

وانگ و همکاران^۳ [۱۱] مشاهده کردند که دمای انتقال شیشه‌ای PVC در کامپاند بالاتر از دمای انتقال شیشه‌ای نمونه PVC خالص است. این یافته با بسیاری از دیگر یافته‌ها در تناقض است. آن‌ها هم‌چنین مشاهده کردند که NBR سبب افت در دمای انتقال شیشه‌ای PVC از حدود ۷۴ تا ۶۲ و ۴۲ درجه سانتی‌گراد در اثر افزودن ۱۰ و ۳۰ پی‌اچ‌آر از NBR می‌شود.

کرابی و همکاران [۱۲] تأثیر نانو ذرات گرافن و خاک رس مونت موری لونیت را بر روی پخت، استهلاک تنش و خواص مکانیکی نانوکامپوزیت بر پایه آلیاژ PVC/NBR بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که زمان برشتگی و زمان پخت نانو کامپوزیت‌های تقویت شده با گرافن افزایش می‌یابد در حالی که در نانوکامپوزیت حاوی مونت موری لونیت این مقادیر کاهش می‌یابد. راد و همکاران [۱۳] خواص آلیاژهای PVC/NBR حاوی عامل پخت گوگردی در حضور ۳، ۵ و ۸ درصد خاک رس و پرتو الکترونی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که نانوکامپوزیت حاوی ۸ درصد خاک رس پخت شده با پرتو الکترونی دارای خواص مطلوبی می‌باشد.

روش تاگوچی ترکیبی از روش‌های ریاضی و آماری است که به کارگیری آن جهت مدلسازی و آنالیز مسائلی که در آن پاسخ تحت تأثیر پارامترهای متفاوتی است مفید است. هدف استفاده از این روش، بهینه‌سازی متغیرهای پاسخ در محدوده تغییرات متغیرهای مستقل است. این روش در جهت تعیین شرایط بهینه، ساده، دقیق، کارآمد و از نظر اقتصادی به صرفه خواهد بود.

دقیقه پیش گرم شدند و پس از آن در دمای ۱۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ دقیقه تحت فرآیند قالب‌گیری فشاری قرار گرفته، در انتها زمانی که دمای قالب به دمای محیط رسید، نمونه‌ها از قالب خارج شدند.

۳-۲- طراحی آزمایش به روش تاگوچی

در این تحقیق اثر چهار متغیر (فاکتور) دمای اختلاط، زمان اختلاط و دور میکسر و درصد پودر NBR هر یک در سه سطح (مقدار) مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور از روش طراحی آزمایش تاگوچی استفاده گردید. تعداد ۹ آزمایش طراحی و نمونه‌ها بر اساس این طراحی تهیه گردید. سطوح تغییرات هر یک از این فاکتورها در جدول ۱ و آرایه طراحی شده بر اساس روش تاگوچی در جدول ۲ ارائه می‌گردد.

جدول (۱): فاکتورهای مختلف و سطوح تغییرات هر یک از فاکتورها

فاکتور	کد فاکتور	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
دمای اختلاط (°C)	A	۱۷۵	۱۸۰	۱۸۵
زمان اختلاط (دقیقه)	B	۶	۹	۱۲
دور میکسر (rpm)	C	۷۰	۷۵	۸۰
درصد نانوذره NBR	D	۰	۲	۵

جدول (۲): آرایه طراحی شده توسط روش طراحی آزمون تاگوچی

نمونه (آزمایش)	دمای اختلاط	زمان اختلاط	دور میکسر
۱	۱۷۵	۶	۷۰
۲	۱۷۵	۹	۷۵
۳	۱۷۵	۱۲	۸۰
۴	۱۸۰	۶	۷۵
۵	۱۸۰	۹	۸۰
۶	۱۸۰	۱۲	۷۰
۷	۱۸۵	۶	۸۰
۸	۱۸۵	۹	۷۰
۹	۱۸۵	۱۲	۷۵

۴-۲- آزمون‌های انجام شده

آزمون کشش بر روی نمونه‌های مختلف توسط دستگاه کشش تولیدی شرکت سنتام با سرعت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه و در دمای اتاق انجام گرفت. تعداد ۴ نمونه برای هر ترکیب درصد با ابعاد $۱/۵ * ۳/۶۵ * ۲۵$ میلی‌متر استفاده شد و مقادیر متوسط گزارش گردید. همچنین برای مطالعه مورفولوژی از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل

هدف این مقاله استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی به منظور بهینه‌سازی خواص مکانیکی نانو کامپوزیت‌های PVC حاوی نانو ذرات الاستومری کاملاً پخت شده نیتریل رابر می‌باشد. ذرات الاستومری از نوع ذرات کاملاً پخت شده با اندازه کمتر از ۱۰۰ نانومتر است. اثر مقادیر مختلف این ذرات و همچنین اثر شرایط فرآیندی بر روی خواص مکانیکی آلیاژهای نهایی بررسی و شرایط بهینه از نظر پارامترهای فرآیندی و ترکیب درصد آلیاژ نهایی پیشنهاد می‌شود. یافتن شرایط بهینه یکی از مهم‌ترین اهداف این تحقیق است که تاکنون توسط محققین دیگر با این جزئیات مطالعه نشده است.

۲- مواد، روش‌ها و آزمون

در این قسمت مواد استفاده شده، روش تهیه نمونه‌های مختلف آزمون و همچنین آزمون‌های بکار رفته برای ارزیابی خواص نمونه‌های تهیه شده بیان می‌شود.

۱-۲- مواد

پلی وینیل کلراید مورد استفاده در این تحقیق تولید شرکت پتروشیمی آبادان (گرید S-65) و با دانسیته‌ی 0.6 – 0.46 g/cm^3 می‌باشد. از ذرات نانومتری آکریلونیتریل بوتادین رابر (NBR) تهیه شده توسط موسسه تحقیقاتی SINOPEC Beijing کشور چین با اندازه قطر ذرات کمتر از ۱۰۰ نانومتر استفاده گردید. پایدارکننده حرارتی مصرفی بر پایه سرب با کد تجاری GH220CBL محصول شرکت کیمیاران با دانسیته‌ی 1.30 g/cm^3 می‌باشد. این ترکیب به دلیل دارا بودن درصد بالای صابون‌های سری، علاوه بر پایداری حرارتی در هنگام فرآیند، باعث حفظ خواص مکانیکی طولانی مدت در محصول می‌شود.

۲-۲- روش تهیه نمونه‌های مختلف

در ابتدا مواد درون دستگاه مخلوط کننده ساخت شرکت Brabender آلمان در دما زمان فرایند متفاوت با هم مخلوط شدند. به منظور تهیه نمونه با استفاده از فرآیند قالب‌گیری فشاری، نمونه‌های حاصل از فرآیند اختلاط به مدت ۱۰

جدول (۳): خواص مکانیکی نمونه‌های مختلف

شماره	مدول الاستیک	تنش تسلیم	کرنش تسلیم	تنش شکست	کرنش شکست	چقرمگی
۱	۱۸۳۵	۶۳/۵	۴/۷۵	۵۴/۵	۴۹/۵	۳۰۵۸/۹
۲	۱۹۹۰	۷۰/۴	۴/۶	۴۰	۲۲/۴	۱۶۰۸/۵
۳	۱۹۴۰	۶۹/۸	۴/۵	۵۰	۱۰/۱	۱۱۹۶/۶
۴	۱۹۹۵	۷۰/۴	۴/۵	۳۷	۱۸/۲	۱۹۵۹/۱
۵	۱۷۰۰	۶۵	۴/۸	۴۵/۵	۴۲/۸	۲۸۶۰/۶
۶	۱۹۷۰	۶۹	۴/۵	۵۴	۵۰/۸	۳۹۷۰/۶
۷	۲۰۸۰	۷۶	۴/۷	۶۰	۳۶/۳	۲۹۳۴
۸	۲۱۵۰	۷۳	۴/۵	۳۸	۱۷/۳	۱۱۴۷/۵
۹	۱۹۷۸	۷۶	۴/۷	۴۸	۷	۵۰/۱/۹

MIRA TESCAN با ولتاژ بالا (۷ کیلوولت) استفاده شد.

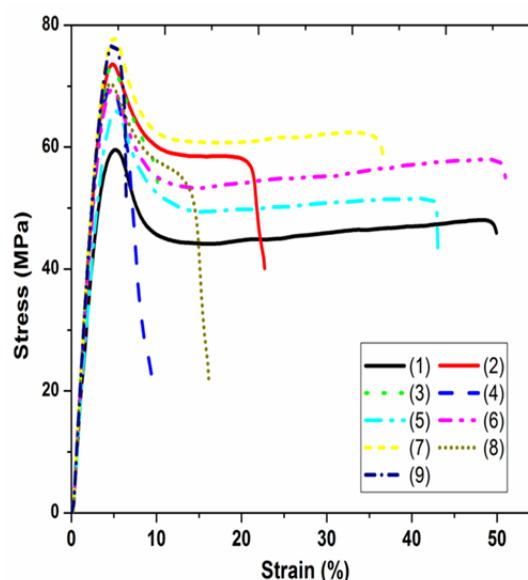
در ابتدا نمونه‌ها در نیتروژن مایع شکسته شدند و سپس با لایه نازکی از طلا پوشش داده شده و در نهایت از آن‌ها تصویر برداری شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی اثر فاکتورهای مختلف بر

خواص مکانیکی

منحنی‌های تنش-کرنش مربوط به نمونه‌های مختلف در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود،



شکل (۱): منحنی‌های تنش-کرنش مربوط به نمونه‌های مختلف

۳-۱-۱- اثر فاکتورهای مختلف بر روی

مدول الاستیک

شکل ۲ تأثیر پارامترهای مختلف را بر روی مدول الاستیک نمونه‌ها نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش دمای فرایندی، مدول الاستیک نیز افزایش می‌یابد. نمونه شماره ۸ در بالاترین دمای انتخابی یعنی ۱۸۵ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۹ دقیقه تحت فرآیند قرار گرفته است و دارای بالاترین مدول الاستیک است. اگرچه این نمونه دارای بالاترین میزان نانو ذرات لاستیکی (یعنی ۵ درصد وزنی) است و این موضوع می‌تواند سبب افت در مدول الاستیک گردد، اما فرآیند شدن در بالاترین دما و به مدت نسبتاً طولانی (یعنی ۹ دقیقه) سبب می‌شود مقاومت در برابر تغییر شکل به میزان کمتری افزایش یابد. نمونه شماره ۸ و به دنبال آن نمونه شماره ۷ دارای بالاترین مقدار مدول الاستیک بوده در حالی که نمونه شماره ۵ و به دنبال آن نمونه شماره ۱ نیز دارای کمترین مقادیر مدول یانگ در بین این نمونه‌ها هستند. بنابراین صرف‌نظر از میزان درصد پودر لاستیکی نانو در درون آلیاژ، دمای فرایندی بالا به همراه سرعت اختلاط بالا توأماً سبب افزایش در مدول می‌شود.

نتایج نشان می‌دهد که دمای اختلاط پایین‌تر، سرعت اختلاط کمتر و زمان اختلاط کوتاه‌تر به کمتر شدن مدول ماده می‌انجامد اگرچه هیچ‌گونه فاز لاستیکی در ماده حضور نداشته باشد. تحت این شرایط فرآیندی، میزان حرارت زایی ایجاد شده در حین اختلاط مذاب نیز کمتر شده و در نتیجه احتمال تخریب حرارتی ماتریس PVC نیز کمتر می‌شود.

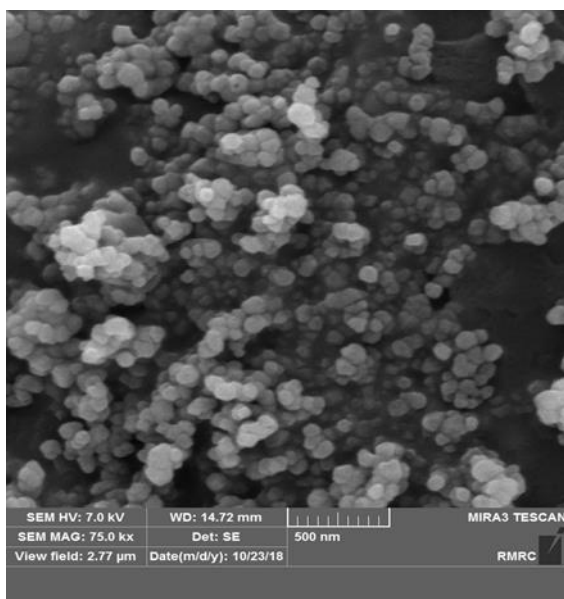
بالاترین مقدار کرنش شکست مربوط به نمونه ۱ و در حدود ۵۰ درصد است. کمترین مقدار کرنش شکست مربوط به نمونه ۹ و در حدود ۷ درصد است. به جز نمونه‌های ۴ و ۹ که رفتار شبه چکش‌خوار (Ductile) دارند، دیگر نمونه‌ها یک رفتار کاملاً چکش‌خوار را از خود نشان می‌دهند. نتایج مربوط به انجام آزمون کشش بر روی ۹ نمونه تهیه شده در جدول ۳ خلاصه شده است.

۳-۱-۳- اثر فاکتورهای مختلف بر روی کرنش تسلیم

نتایج موجود در جدول ۳ نشان می‌دهد که تمامی نمونه‌ها دارای کرنش تسلیم بسیار نزدیکی هستند و برای تمامی نمونه‌ها مقدار کرنش تسلیم در محدوده ۴/۸-۴/۵ درصد قرار دارد. با توجه به نتایج می‌توان ادعا کرد که پارامتر کرنش تسلیم برای محدوده پارامترهای بررسی شده در این تحقیق تغییرات قابل توجهی را نشان نمی‌دهد.

۳-۲- مطالعه مورفولوژی نمونه‌های مختلف

شکل ۴ تصویر SEM از نانو ذرات لاستیکی آکریلونیتریل بوتادین را بر نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود این ذرات لاستیکی دارای شکل کروی با اندازه تقریبی در حدود ۱۰۰ نانومتر هستند.



شکل (۴): تصویر تهیه شده توسط SEM از پودر نانومتری لاستیکی

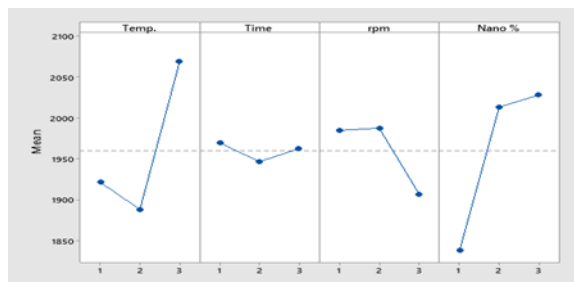
مورد استفاده

تصاویر SEM تهیه شده از آلیاژهای تهیه شده حاوی درصد‌های مختلفی از نانو ذرات لاستیکی در شکل ۵ نشان داده شده است. تصویر (A) مربوط به نمونه بدون نانو ذرات است. ناخالص‌های موجود در تصویر مربوط به این نمونه ممکن است مربوط به ذرات پایدارساز حرارتی استفاده شده طی فرآیند کردن این نمونه باشد. تصاویر ب، ج و د به

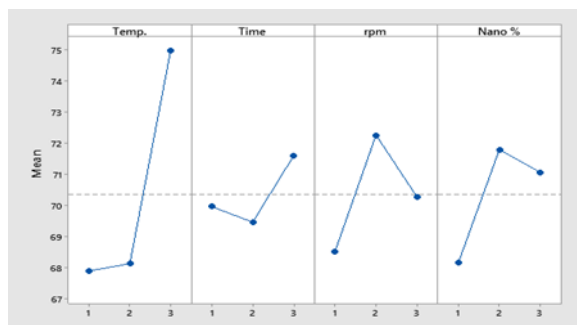
۳-۱-۲- اثر فاکتورهای مختلف بر روی استحکام در نقطه تسلیم

شکل ۳ تأثیر پارامترهای مختلف را بر روی استحکام تسلیم نمونه‌ها نشان می‌دهد. نتایج موجود در جدول ۳ و شکل ۳ در مورد استحکام تسلیم نشان می‌دهد که نمونه‌های با شماره‌های ۷، ۸ و ۹ دارای بالاترین مقدار تنش تسلیم هستند. این نمونه‌ها همگی در بالاترین دمای فرایندی یعنی ۱۸۵ درجه سانتی‌گراد تهیه شده‌اند. پارامتر استحکام در نقطه تسلیم به شدت متأثر از دمای فرآیندی است. تنش تسلیم معیاری از قابلیت ماده برای تسلیم برشی و تغییر شکل پلاستیک است.

نمونه شماره ۱ که در کمترین دمای فرایندی یعنی ۱۷۵ درجه سانتی‌گراد تهیه شده است کمترین میزان استحکام تسلیم را دارد. می‌توان این‌گونه بیان کرد که تنش تسلیم آلیاژهای تهیه شده بیشتر تابع شرایط فرآیندی است تا حضور نانو ذرات لاستیکی و یا درصد آن در آلیاژهای تهیه شده. دمای فرآیندی کمتر، شدت اختلاط پایین‌تر و زمان اختلاط کوتاه‌تر باعث می‌شوند تا ماده استحکام تسلیم کمتری داشته باشد.



شکل (۲): تأثیر پارامترهای مختلف بر روی مدول نمونه‌ها



شکل (۳): تأثیر پارامترهای مختلف بر روی استحکام تسلیم نمونه‌ها

۳-۳-۳- بهینه‌سازی تأثیر متغیرهای مختلف بر

روی خواص مکانیکی

۱-۳-۳- اثر پارامترهای مختلف بر روی مدول

نتایج مربوط به بررسی اثر و سهم متغیرهای مختلف بر روی مقدار مدول آلیاژ نهایی با استفاده از تکنیک تاگوجی در قالب آنالیز واریانس در جدول ۴ ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، بیشترین اثر بر روی مدول مربوط به درصد ذرات نانو است در حالی که کمترین سهم مربوط به زمان اختلاط است. بعد از درصد نانو، دمای اختلاط بالاترین سهم را بر روی مدول ماده نهایی دارد. سهم سرعت اختلاط بسیار کمتر از سهم دمای اختلاط است.

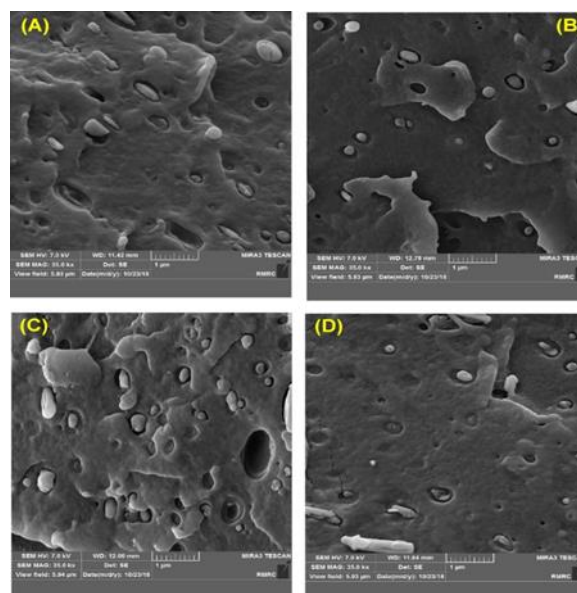
جدول (۴): جدول آنالیز واریانس مربوط به اثر فاکتورهای مختلف بر

روی مدول الاستیک

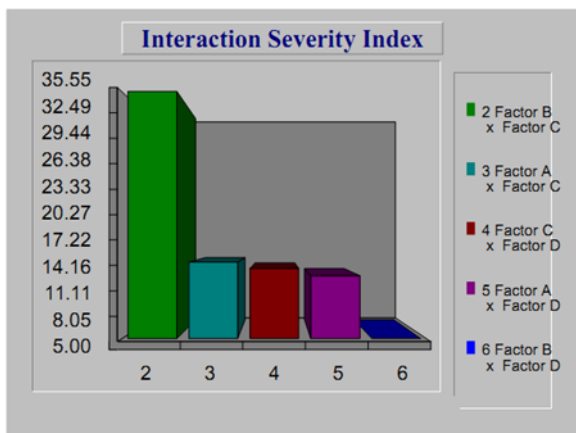
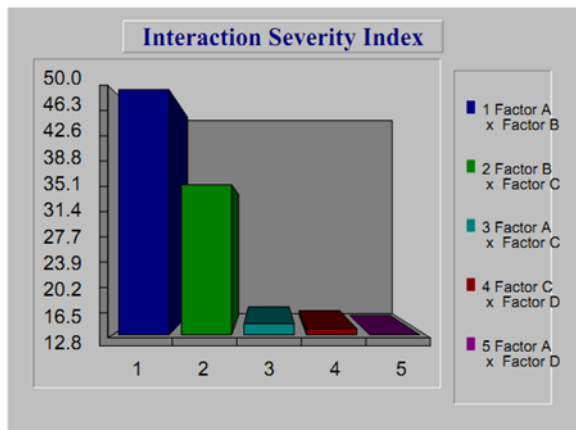
فاکتور	دمای اختلاط	زمان اختلاط	دور میکسر	درصد نانو ذره NBR
درصد سهم	۴۰/۳	۰/۶	۹/۸	۴۹/۳

با در نظر گرفتن مدول کششی آلیاژ به عنوان متغیر پاسخ، مقدار متوسط این پارامتر برای فاکتورهای مختلف و در سطوح مختلف در جدول ۵ ارائه شده است. با توجه به اهمیت بالا بودن مدول نمونه‌های تهیه شده، نتایج این جدول نشان می‌دهد که برای فاکتورهای مختلف مورد مطالعه، بیشترین مقدار متوسط مدول زمانی است که سطح سه دمای اختلاط (۱۸۵ درجه سلیسیوس)، سطح یک زمان اختلاط (۶ دقیقه)، سطح دو سرعت اختلاط (دور میکسر) یعنی rpm و ۷۵ و سطح سه درصد نانو ذرات انتخاب شده باشد.

ترتیب مربوط به نمونه‌های حاوی ۲، ۵ و ۲ درصد وزنی از ذرات لاستیکی هستند. تصویر الف مربوط به نمونه شماره ۱، تصویر ب مربوط به نمونه شماره ۲ و تصاویر ج و د به ترتیب مربوط به نمونه‌های با شماره ۴ و ۷ هستند. تصاویر ب تا د نمونه‌های مختلف مورفولوژی ماتریس-قطرات پراکنده را نشان می‌دهند. در اینجا ماتریس شامل فاز پلیمری PVC است و قطرات پراکنده مربوط به ذرات لاستیکی NBR هستند. پخش و توزیع مناسب و یکنواختی از ذرات لاستیکی در درون ماتریس را می‌توان در این تصاویر دید که دلیل آن سازگاری مناسب بین ذرات لاستیکی و ماتریس اطراف آن‌ها است. همچنین مشاهده می‌شود که قطرات پراکنده به صورت ذرات کروی و ذرات کشیده شده در درون ماتریس PVC حضور دارند. به نظر می‌رسد که تعداد قطرات فاز پراکنده در تصویر ج مربوط به نمونه شماره ۴ بیشتر از تعداد قطرات در دیگر تصاویر باشد. دلیل آن وجود درصد بالاتری از ذرات لاستیکی NBR در این نمونه در مقایسه با دیگر نمونه‌ها است.



شکل (۵): تصاویر SEM تهیه شده از مورفولوژی نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف ذرات نانومتری. (الف) نمونه ۱ (صفر درصد)، (ب) نمونه ۲ (۲ درصد)، (ج) نمونه ۴ (۵ درصد) و (د) نمونه ۷ (۲ درصد)



شکل (۶): مقادیر شاخص پارامتر برهمکنش برای فاکتورهای مختلف

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که بیشترین شدت شاخص برهمکنش مربوط به برهمکنش دمای اختلاط با زمان اختلاط و کمترین میزان برهمکنش مربوط به زمان و درصد نانو است. همچنین نتایج شاخص برهمکنش نشان می‌دهد که برهمکنش‌های فی‌مابین دمای اختلاط با سرعت اختلاط، سرعت اختلاط و درصد نانو ذرات لاستیکی، دمای اختلاط و درصد نانو از نظر میزان تأثیر در سطوح نزدیک به هم قرار دارند.

۲-۳-۳- اثر پارامترهای مختلف بر روی کرنش شکست

نتایج مربوط به بررسی اثر و سهم متغیرهای مختلف بر روی مقدار کرنش در نقطه شکست آلیاژ نهایی با استفاده از تکنیک تاگوجی در قالب آنالیز واریانس در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول (۵): مقدار متوسط مدول برای فاکتورهای مختلف در سطوح مختلف

فاکتور	سطح یک	سطح دو	سطح سه
دمای اختلاط	۱۹۲۱/۷	۱۸۸۸/۳	۲۰۶۹/۳
زمان اختلاط	۱۹۷۰	۱۹۴۶/۷	۱۹۶۲/۷
دور میکسر	۱۹۸۵	۱۹۸۷/۷	۱۹۰۶/۷
درصد نانوذره NBR	۱۸۳۷/۷	۲۰۱۳/۳	۲۰۲۸/۳

با انتخاب بالاتر بودن مدول ماده نهایی، شرایط بهینه برای حداکثر پارامتر مدول تعیین شد که شرایط بهینه به دست آمده از متغیرهای مختلف در جدول ۶ آورده شده است. نتایج موجود در جدول سطح هر فاکتور در شرایط بهینه از مدول ماده نهایی را نشان می‌دهد.

جدول (۶): سطوح بهینه (شرایط بهینه) هر یک از متغیرهای مستقل برای پارامتر مدول الاستیک

فاکتور	دمای اختلاط	زمان اختلاط	دور میکسر	درصد نانوذره NBR
سطح	۳	۱	۲	۳
سهم	۱۰۹/۵	۱۰/۲	۲۷/۹	۶۸/۶

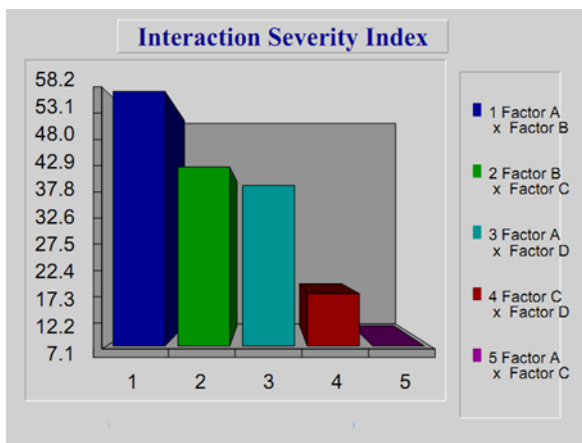
حالت بهینه مدول کششی مربوط به زمانی است که دمای اختلاط در حدود ۱۸۵ درجه سانتی‌گراد، زمان اختلاط برابر با ۶ دقیقه، سرعت اختلاط در حدود ۷۵ rpm و درصد نانو ذرات برابر با ۵ درصد وزنی باشند. با در نظر گرفتن شرایط بهینه، بالاترین سهم مربوط به فاکتور دمای اختلاط است. سهم دیگر متغیرها بسیار کمتر از سهم دمای اختلاط است. کمترین سهم نیز مربوط به زمان اختلاط است. نتایج مربوط به برهمکنش بین فاکتورها نیز در شکل ۶ نشان داده شده است.

شد. شرایط بهینه به دست آمده از متغیرهای مختلف در جدول ۹ آورده شده است.

جدول (۹): سطوح بهینه (شرایط بهینه) برای پارامتر کرنش شکست

فاکتور	دمای اختلاط	زمان اختلاط	دور میکسر	درصد نانوذره NBR
سطح	۲	۱	۱	۲
سهام	۸/۸	۶/۴	۱۰/۹	۸/۴

طبق جدول ۹، حالت بهینه کرنش شکست مربوط به زمانی است که دمای اختلاط در حدود ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد، زمان اختلاط برابر با ۶ دقیقه، سرعت اختلاط در حدود rpm ۷۰ و درصد نانو ذرات برابر با ۲ درصد وزنی باشند. با در نظر گرفتن شرایط بهینه، بالاترین سهم مربوط به فاکتور سرعت اختلاط است. سهم دیگر متغیرها کمتر از سهم دمای اختلاط است. کمترین سهم نیز مربوط به زمان اختلاط است. سهم فاکتورهای دمای اختلاط و درصد نانو ذرات بسیار نزدیک به هم هستند. اثر وجود برهمکنش بین فاکتورها بر روی مقدار کرنش شکست در شکل ۷ نشان داده شده است.



همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین اثر بر روی کرنش شکست مربوط به سرعت اختلاط است در حالی که کمترین سهم مربوط به زمان اختلاط است. داده‌های این جدول نشان می‌دهند که سهم درصد نانو نیز با اختلاف ناچیزی نسبت به سهم سرعت اختلاط در رتبه دوم قرار دارد.

جدول (۷): جدول آنالیز واریانس مربوط به اثر فاکتورهای مختلف بر روی کرنش شکست

فاکتور	سطح یک	سطح دو	سطح سه
دمای اختلاط	۲۷/۷	۳۷/۳	۲۰/۲
زمان اختلاط	۳۴/۷	۲۷/۸	۲۲/۶
دور میکسر	۳۹/۳	۱۶/۲	۲۹/۷
درصد نانوذره NBR	۳۳/۲	۳۶/۸	۱۵/۲

با در نظر گرفتن کرنش شکست آلیاژ به عنوان متغیر پاسخ، مقدار متوسط این پارامتر برای فاکتورهای مختلف و در سطوح مختلف در جدول ۸ ارائه شده است. با توجه به اینکه بالا بودن این ویژگی برای نمونه‌های تهیه شده مهم بوده است، با در نظر گرفتن آن به عنوان متغیر پاسخ، مقدار متوسط این پارامتر برای فاکتورهای مختلف و در سطوح مختلف در جدول ۹ ارائه شده است. نتایج جدول نشان می‌دهد که برای فاکتورهای مختلف مورد مطالعه، بیشترین مقدار متوسط کرنش شکست زمانی است که دمای اختلاط برابر با ۱۸۰ درجه سلیسیوس، زمان اختلاط برابر با ۶ دقیقه، سرعت اختلاط برابر با rpm ۷۰ و درصد نانو برابر با ۲ درصد باشد.

جدول (۸): مقدار متوسط کرنش شکست برای فاکتورهای مختلف در سطوح مختلف

فاکتور	دمای اختلاط	زمان اختلاط	دور میکسر	درصد نانوذره NBR
درصد سهم	۱۹/۳	۹/۸	۳۵/۵	۳۵/۴

با توجه به اینکه بالا بودن مقدار کرنش شکست حائز اهمیت است لذا شرایط بهینه برای پارامتر کرنش شکست نیز تعیین

فاکتور	دمای اختلاط	زمان اختلاط	دور میکسر	درصد نانو ذره NBR
درصد سهم	۳۰/۳	۱۱/۶	۲۹/۱	۲۸/۹

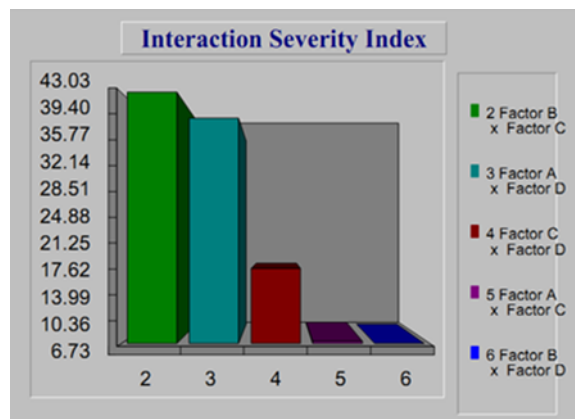
با در نظر گرفتن چقرمگی آلیاژ به عنوان متغیر پاسخ، مقدار متوسط این پارامتر برای فاکتورهای مختلف و در سطوح مختلف در جدول ۱۱ ارائه شده است. با توجه به اینکه بالا بودن این ویژگی برای نمونه‌های تهیه شده مهم بوده است، با در نظر گرفتن آن به عنوان متغیر پاسخ، مقدار متوسط این پارامتر برای فاکتورهای مختلف و در سطوح مختلف در جدول ۱۲ ارائه شده است.

نتایج جدول نشان می‌دهد که برای فاکتورهای مختلف مورد مطالعه، بیشترین مقدار متوسط چقرمگی زمانی است که دمای اختلاط برابر با ۱۸۰ درجه سلیسیوس (سطح ۲)، زمان اختلاط برابر با ۶ دقیقه (سطح ۱)، سرعت اختلاط برابر با ۷۰ rpm (سطح ۱) و درصد نانو برابر با ۲ درصد (سطح ۲) باشد.

جدول (۱۱): مقدار متوسط چقرمگی برای فاکتورهای مختلف در

فاکتور	سطوح مختلف		
	سطح یک	سطح دو	سطح سه
دمای اختلاط	۱۹۵۴/۷	۲۹۳۰/۱	۱۵۲۷/۸
زمان اختلاط	۲۶۵۰/۷	۱۸۷۲/۲	۱۸۸۹/۷
دور میکسر	۲۷۲۵/۶	۱۳۵۶/۵	۲۳۳۰/۴
درصد نانو ذره NBR	۲۱۴۰/۵	۲۸۳۷/۷	۱۴۳۴/۴

شرایط بهینه برای پارامتر چقرمگی نیز بر مبنای بالا بودن میزان چقرمگی ماده نهایی تعیین گردید. بود. شرایط بهینه به دست آمده از متغیرهای مختلف در جدول ۱۲ آورده شده است.



شکل (۷): مقادیر شاخص پارامتر برهمکنش برای فاکتورهای مختلف

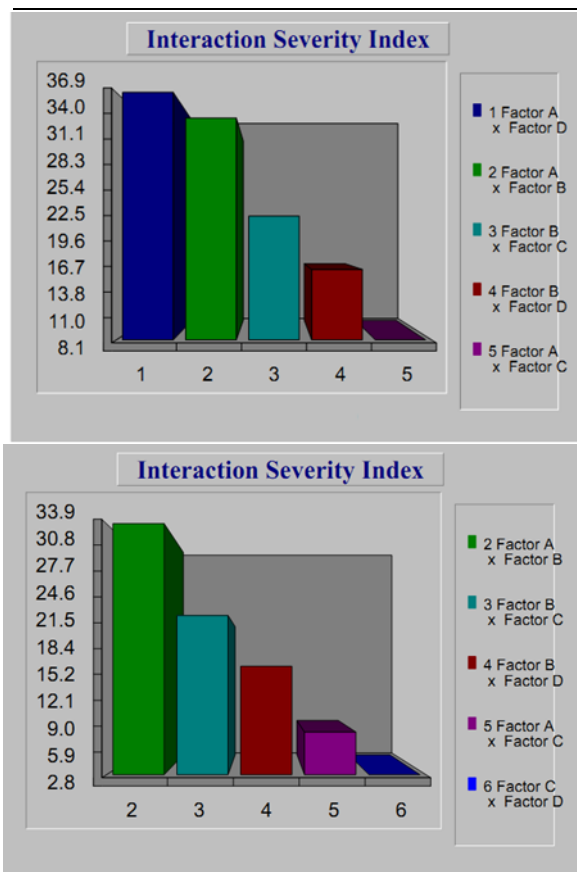
نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که بیشترین شدت شاخص برهمکنش مربوط به برهمکنش دمای اختلاط با زمان اختلاط است. کمترین میزان برهمکنش مربوط به زمان اختلاط و درصد نانو است. همچنین نتایج شاخص برهمکنش نشان می‌دهد که برهمکنش‌های دما و سرعت اختلاط کمی بالاتر از کمترین شاخص برهمکنش است.

۳-۳-۳- بررسی اثر پارامترهای مختلف بر روی چقرمگی

اثر چهار فاکتور در سه سطح مختلف بر روی چقرمگی نیز به کمک روش طراحی آزمایش مطالعه شد. نتایج مربوط به آنالیز واریانس در جدول ۱۰ آورده شده است. نتایج موجود در این جدول میزان سهم هر یک از فاکتورهای مورد مطالعه را بر روی چقرمگی آلیاژ نهایی مشخص می‌سازد. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، بیشترین اثر بر روی چقرمگی مربوط به دمای اختلاط است در حالی که کمترین سهم مربوط به زمان اختلاط است. داده‌های جدول نشان می‌دهند که سهم سرعت اختلاط نیز با اختلاف کمی نسبت به سهم دمای اختلاط در رتبه دوم قرار دارد.

جدول (۱۰): جدول آنالیز واریانس مربوط به اثر فاکتورهای

مختلف بر چقرمگی



شکل (۸): مقادیر شاخص پارامتر برهمکنش برای فاکتورهای مختلف

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر فاکتورهای مانند شرایط فرآیندی (مانند دمای اختلاط، زمان اختلاط و سرعت اختلاط) و درصد فاز لاستیکی NBR (در مقادیر صفر، ۲ و ۵ درصد وزنی) با استفاده از روش طراحی آزمون تاگوشی بر روی خواص مکانیکی مانند مدول، کرنش شکست و چقرمگی بررسی شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که:

۱- توزیع مناسب و یکنواخت ذرات لاستیکی در درون ماتریس به دلیل سازگاری مناسب بین ذرات لاستیکی و ماتریس اطراف آن است. مشاهده شد که قطرات پراکنده به صورت ذرات کروی و همچنین ذرات کشیده شده در درون PVC حضور دارند.

۲- جدول آنالیز واریانس نشان داد که بیشترین اثر بر روی مدول مربوط به درصد نانو ذرات است درحالی که کمترین سهم مربوط به زمان اختلاط است. بعد از درصد نانو، دمای اختلاط بالاترین سهم را بر روی مدول ماده نهایی دارد.

جدول (۱۲): فاکتورها و سطوح بهینه (شرایط بهینه) برای پارامتر

چقرمگی

فاکتور	دمای اختلاط	زمان اختلاط	دور میکسر	درصد نانو ذره NBR
سطح	۲	۱	۱	۲
سهم	۷۹۲/۶	۵۱۳/۱	۵۸۸/۱	۷۰۰/۲

طبق جدول فوق، حالت بهینه از چقرمگی مربوط به زمانی است که دمای اختلاط در حدود ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد، زمان اختلاط برابر با ۶ دقیقه، سرعت اختلاط در حدود rpm ۷۰ و درصد نانو ذرات برابر با ۲ درصد وزنی باشند. لازم به ذکر است که سطوح هر یک از فاکتورهای مورد مطالعه در حالت بهینه برای پارامتر چقرمگی دقیقاً مشابه با سطوح این فاکتورها در حالت بهینه برای پارامتر کرنش شکست است. دلیل آن این است که هر دو پارامتر کرنش شکست و چقرمگی ارتباط نزدیک و مستقیمی با هم دارند. بالاتر بودن کرنش در نقطه شکست به معنای بیشتر بودن قابلیت ماده برای جذب و اتلاف انرژی بدون شکست می‌باشد. بدین معنی که ماده چقرمگی بالایی را نیز از خود نشان می‌دهد.

با در نظر گرفتن شرایط بهینه برای چقرمگی، بالاترین سهم مربوط به فاکتور دمای اختلاط است. سهم دیگر متغیرها کمتر از سهم دمای اختلاط است. کمترین سهم نیز مربوط به زمان اختلاط است.

اثر وجود برهمکنش بین فاکتورها بر روی مقدار چقرمگی نیز در شکل ۸ نشان داده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که بیشترین شدت شاخص برهمکنش مربوط به برهمکنش دمای اختلاط با درصد نانو ذرات لاستیکی است. برهمکنش بین دمای اختلاط و زمان اختلاط با اختلاف کمی در رتبه دوم قرار دارد. کمترین میزان برهمکنش مربوط به سرعت اختلاط و درصد نانو است.

۵- منابع

- [1] M. C. Senake Perera, U. S. Ishiaku & Z. A. Mohd. Ishak, "Characterisation of PVC/NBR and PVC/ENR50 binary blends and PVC/ENR50/NBR ternary blends by DMA and solid state NMR", *European Polymer Journal*, vol. 37, no. 1, pp.167-178, 2001.
- [2] M. C. Senake Perera, U. S. Ishiaku & Z. A. Mohd. "Ishak, *Polymer Degradation and Stability*", vol. 68, no. 3, pp. 393-402, 2000.
- [3] Ch. T. Ratnam, S. Kamaruddin & Z. Abdullah, "Irradiation Modification of PVC/NBR Blend", *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, vol. 50, no. 8, pp. 833-838, 2011.
- [4] J. X. Li & C. M. Chan, "Effect of the size of the dispersed NBR phase in PVC/NBR blends on the stability of PVC to electron irradiation", *Polymer*, vol. 42, no. 16, pp. 6833-6839, 2001.
- [5] A. Hajibaba, G. Naderi, E. Esmizadeh & M. H. R. Ghoreishy, "Morphology and dynamic-mechanical properties of PVC/NBR blends reinforced with two types of nanoparticles", *Journal of Composite Materials*, vol. 48, no. 2, pp. 131-141, 2012.
- [6] Z. H. Liu, et al. "Effect of morphology on the brittle ductile transition of polymer blends: 2. Analysis on poly (vinyl chloride)/nitrile rubber blends", *Polymer*, vol. 39, no. 2, pp. 5019-5025, 1998.
- [7] Z. H. Liu, et al. "Effects of interfacial adhesion on the rubber toughening of poly (vinyl chloride) Part 1. Impact tests", *Polymer*, vol. 42, no. 2, pp. 737-746, 2001.
- [8] X. P. Zhang, S. Z. Liu, L. Liu & J. Yin, "Partially sulfonated poly(arylene ether sulfone)-b-polybutadiene for proton exchange membrane", *Polymer*, vol. 46, no 6, pp.1719-1724, 2005.
- [9] M. Matsuo, C. Nozaki & Y. Jyo. "Fine structures and fracture processes in plastic/rubber two -phase polymer systems. II. Observation of crazing behaviors under the electron microscope", *Polym. Eng. & Sci.* vol. 9, no. 3, pp. 206-212, 1969
- [10] M. Matsuo, A. Ueda & Y. Kondo, "Fine structures and fracture processes in plastic-rubber two-phase polymer systems III. Temperature dependence of Charpy impact

حالت بهینه از مدول کششی مربوط به زمانی است که دمای اختلاط در حدود ۱۸۵ درجه سانتی‌گراد، زمان اختلاط برابر با ۶ دقیقه، سرعت اختلاط در حدود ۷۵ rpm و درصد نانو ذرات برابر با ۵ درصد وزنی باشند. همچنین بیشترین و کمترین شدت شاخص برهمکنش مربوط به برهمکنش دمای اختلاط با زمان اختلاط و زمان و درصد نانو می‌باشد.

۳- طبق نتایج آنالیز واریانس، بیشترین اثر بر روی کرنش شکست مربوط به سرعت اختلاط و کمترین سهم مربوط به زمان اختلاط بود. حالت بهینه از کرنش شکست مربوط به زمانی است که دمای اختلاط در حدود ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد، زمان اختلاط برابر با ۶ دقیقه، سرعت اختلاط در حدود ۷۰ rpm و درصد نانو ذرات برابر با ۲ درصد وزنی باشند. بیشترین شدت شاخص برهمکنش مربوط به برهمکنش دمای اختلاط با زمان اختلاط بود. کمترین میزان برهمکنش مربوط به زمان اختلاط و درصد نانو بود.

۴- طبق نتایج آنالیز واریانس، بیشترین اثر بر روی چقرمگی مربوط به دمای اختلاط بود در حالی که کمترین سهم را زمان اختلاط داشت. سهم سرعت اختلاط نیز با اختلاط کمی نسبت به سهم دمای اختلاط در رتبه دوم قرار داشت. بیشترین مقدار متوسط چقرمگی در حالت دمای اختلاط برابر با ۱۸۰ درجه سلیسیوس، زمان اختلاط برابر با ۶ دقیقه، سرعت اختلاط برابر با ۷۰ rpm و درصد نانو برابر با ۲ درصد مشاهده شد. حالت بهینه از چقرمگی مربوط به دمای اختلاط در حدود ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد، زمان اختلاط برابر با ۶ دقیقه، سرعت اختلاط در حدود ۷۰ rpm و درصد نانو ذرات برابر با ۲ درصد وزنی است.

۵- سطوح هر یک از فاکتورهای مورد مطالعه در حالت بهینه برای پارامتر چقرمگی دقیقاً مشابه با سطوح این فاکتورها در حالت بهینه برای پارامتر کرنش شکست بود. دلیل آن این است که هر دو پارامتر کرنش شکست و چقرمگی ارتباط نزدیک و مستقیمی با هم دارند.

۶- بیشترین شدت شاخص برهمکنش مربوط به برهمکنش دمای اختلاط با درصد نانو ذرات لاستیکی است.

strength", Polym. Eng. & Sci, vol. 10, no. 5, pp. 253-260, 1968.

- [11] Q. Wang, X. Zhang & S. Liu, "Ultrafine full-vulcanized powdered rubbers/PVC compounds with higher toughness and higher heat resistance", Polymer, vol. 46, no. 46, pp.10614-10617, 2005
- [12] M. Barghamadi, M. Karrabi & M. H. R. Ghoreishy, "Somayyeh Mohammadian-Gezaz, Effects of two types of nanoparticles on the cure, rheological, and mechanical properties of rubber nanocomposites based on the NBR/PVC blends", Journal of Applied Polymer Science, vol. 136, no. 25, pp. 47550, 2019.
- [13] S. Rad, E. Aali, S. Hallajian, D. Zangeneh, M. Tavakoli, K. Ayub & M. Peyravi, "Enhancement in the mechanical property of NBR/PVC nanocomposite by using sulfur and electron beam curing in the presence of Cloisite 30B nanoclay", Journal of Macromolecular Science, Part A, Pure and Applied Chemistry, vol. 57, no. 2, pp. 123-130, 2020.

۶- پی نوشت

- [1] Liu et al
[2] Matsu et al
[3] Wang et al