



# اثر پارامترهای فرایندی اختلاط بر خواص فیزیکی - مکانیکی و جریان یابی آمیزه لاستیکی

مهدی شیوا\*، مهدیه احمدی، راحله یزدانی

بیرجند، واحد تحقیق و توسعه کارخانه کویر تایر، صندوق پستی ۵۱۸

دریافت: ۸۶/۱۷۱۰، پذیرش: ۸۷/۴/۲

## چکیده

در این پژوهش، با استفاده از طراحی آزمایش تاگوچی و ترسیم منحنی‌های برهم‌کنش با نرم افزار Minitab، بهترین شرایط دور چرخنده و دمای تخلیه اختلاط برای خواص فیزیکی - مکانیکی و جریان یابی آمیزه لاستیکی با اختلاط سه مرحله‌ای بر پایه آمیزه الاستومری NR/BR/SBR ارائه شد. هم‌چنین، با ترسیم منحنی‌های میانگین در محیط Excel، نحوه وابستگی خواص به متغیرهای دور چرخنده، دمای تخلیه و انرژی اختلاط مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دور چرخنده و دمای تخلیه در مرحله دوم اختلاط، پراکنش دوده با وجود کاهش زمان اختلاط بهبود می‌یابد. بهبود پراکنش به کاهش برهم‌کنش پراکننده به دلیل انجام عملیات اختلاط در دمای بالاتر نسبت داده شد. اثر دور چرخنده و دمای تخلیه بر خواص کششی ناچیز بود. ولی، افزایش دمای تخلیه روی مقاومت پارگی اثر منفی داشت. در حالی که افزایش دور چرخنده باعث بهبود جزئی مقاومت پارگی شد. مشابه این رفتار برای تورم پس از حدیده نیز مشاهده شد و ساز و کارهای حاکم بر این خواص مورد بررسی قرار گرفت.

## واژه‌های کلیدی

اختلاط لاستیک، دور چرخنده، دمای تخلیه، طراحی آزمایش، روش تاگوچی

\* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

mehdi.shiva@gmail.com

## Effect of Process Parameters of Mixing on Physico-mechanical and Rheological Properties of Rubber Compound

M. Shiva\*, M. Ahmadi, and R. Yazdani

Research Center of Kavir Tire Factory, P.O. Box: 518, Birjand, Iran

Received 31 January 2008; accepted 22 Jun 2008

## Abstract

In this research work with the aid of Tagouchi experimental design and drawing of interaction curves with Minitab software, the best rotor speed and dump temperature of mixing for physico-mechanical and rheological properties of the rubber compound with three mixing steps was obtained. Moreover by plotting the mean curves in Excel worksheet, the dependency of properties on rotor speed, dump temperature and mixing energy were analyzed. The Results showed that dispersion was improved with increasing rotor speed and dump temperature at the lower total time. The best dispersion occurred at the highest dump temperature and the rotor speed in the second stage. We attributed better dispersion to lower filler-filler interaction, because of the mixing process performed at higher temperatures when we used higher rotor speeds at higher dump temperatures. Effect of rotor speed and dump temperature on tension properties were negligible. However, the higher dump temperature had negative effect on tear resistance, whereas, the high rotor speed had positive effect. The same results were observed for die swell while the governed mechanism on these properties was studied as well.

## Key Words

rubber mixing, rotor speed, dump temperature, experimental design, Taguchi method

(\* ) To whom correspondence should be addressed.

E-mail: mehdi.shiva@gmail.com

## مقدمه

این طرح هاست [۱۱]. کاهش تعداد آزمایش‌ها با استفاده از فن آرایه متعامد امکان‌پذیر است. ویژگی خاص مربع‌های متعامد این امکان را می‌دهد که آثار کلی و درصد تأثیر هر یک از عوامل در طرح به طور مستقل به دست آید، بدون این که نیاز به انجام همه آزمایش‌ها باشد. از مزایا و برتری‌های روش تاگوچی می‌توان به صرفه‌جویی در زمان و هزینه، سیستماتیک بودن آزمایش‌ها و قابلیت تحلیل نتایج و بهینه‌سازی عالی اشاره کرد [۱۱].

در این کار پژوهشی سعی شده است تا به کمک طراحی آزمایش تاگوچی و ترسیم منحنی‌های برهم‌کنش به کمک نرم‌افزار Minitab و ترسیم منحنی‌های میانگین به کمک نرم‌افزار Excel برای همه خواص فیزیکی و مکانیکی آمیزه‌ها، با صرف وقت و هزینه کمتر، شرایط اختلاط بهینه به دست آید و از طرفی روند تغییرات خواص آمیزه با متغیرهای فرایند اختلاط بررسی و رفتارهای مشاهده شده توجیه شود.

## تجربی

## مواد

فرمول‌بندی آمیزه به کار رفته در جدول ۱ ارائه شده است. کائوچوی طبیعی مورد استفاده در آمیزه محصول شرکت Marub مالزی با نام تجاری

جدول ۱ - فرمول‌بندی آمیزه مورد آزمایش.

جزای آمیزه مرحله اول	phr	جزای آمیزه مرحله دوم و مرحله پخت	phr
لخته زدا	۰/۱	آمیزه مرحله اول	۲۵
کائوچوی طبیعی (SMR-20)	۱۰۰	کائوچوی طبیعی (SMR-20)	۳۳
دوده N-660	۲۹	SBR 1712	۳۷
روغن آروماتیک	۴	BR-cis	۱۳
روی اکسید	۴	دوده N-660	۴۸
استتاریک اسید	۷۴	روغن آروماتیک	۱۲
کائولن	۴	روی اکسید	۲
		استتاریک اسید	۰/۹
		CBS	۷/۱
		گوگرد	۳/۱
		PVI	۰/۲
		سایر مواد افزودنی	۸
		وزن کل	۱۸۲

فرایند تولید در صنعت لاستیک است و نقش عمده‌ای در کیفیت و کاربری محصول نهایی دارد. از این رو، بهینه‌سازی این فرایند از اهداف مهم شرکت‌های لاستیک‌سازی به شمار می‌آید [۱]. فرایند اختلاط شامل مراحل فروشکنی و نرم شدن کائوچو، افزودن مواد (incorporation) و توزیع و پراکنش دوده در فاز الاستومری است. فرایند اختلاط بهینه می‌تواند به شکل تولید آمیزه‌ای یک‌نواخت با کیفیت مطلوب در کمترین زمان ممکن و کیفیت می‌تواند بر مبنای میزان پراکنش مواد، به ویژه پرکننده در آمیزه تعریف شود.

عوامل بسیاری بر کیفیت و اقتصاد اختلاط آمیزه‌های الاستومری اثر می‌گذارند که می‌توان آنها را به دو گروه عوامل فرمول‌بندی و فرایندی دسته‌بندی کرد [۲-۴]. عوامل فرمول‌بندی شامل مساحت، ساختار و مقدار دوده مورد استفاده در فرمول‌بندی، مقدار روغن به کار رفته، نوع الاستومرها، نوع کمک پراکنش و سازگارکننده الاستومری آمیزه است. از عوامل فرایندی می‌توان به ضریب پرشوندگی، زمان اختلاط، ترتیب تغذیه مواد، سرعت چرخنده‌ها، فشارسمبه، دما و انرژی اختلاط اشاره کرد [۵،۶].

بیشتر شبیه‌سازی‌های انجام شده برای فرایند اختلاط در عمل بسیار پیچیده‌اند [۷،۸] که به طور عمده به شکل پیچیده چرخنده‌ها و عوامل فرمول‌بندی و فرایندی متنوعی مربوط می‌شود که روی فرایند اختلاط اثر می‌گذارند. هم‌چنین، هنگامی که آمیخته‌های الاستومری استفاده می‌شوند کار پیچیده‌تر می‌شود [۹،۱۰]. اغلب الاستومرهای صنعتی (به عنوان مثال الاستومرهای SBR/NR و NR/BR)، در همه دماهای اختلاط آمیخته‌های ناهمگن تشکیل می‌دهند که به دلیل نامحلول بودن متقابل دو پلیمر و وزن مولکولی بسیار زیاد کائوچوی طبیعی است. درجه آمیخته شدن دو الاستومر تحت تأثیر گرانی‌های نسبی آنها قرار می‌گیرد. هنگام افزودن دوده به آمیخته‌های الاستومری، دوده به یکی از فازها تمایل بیشتری نشان می‌دهد و در نتیجه بر خواص آمیخته اثر می‌گذارد. بنابراین، در آمیخته‌های الاستومری، در کنار مقدار پراکنش دوده، مقدار امتزاج‌پذیری الاستومرها و شکل‌شناسی آمیخته حاصل، نحوه توزیع دوده در فازها، می‌تواند اثر زیادی بر کیفیت محصول نهایی داشته باشد [۹،۱۰].

بنابراین به دلیل دخالت عوامل مختلف، استفاده از روش‌های آماری برای مطالعه فرایند اختلاط بسیار مفید است. با توجه به این که در اکثر آزمایش‌های صنعتی، عوامل مؤثر زیادی وجود دارند، طراحی یک آزمایش عاملی کامل نیاز به تعداد زیادی آزمایش دارد که بسیار وقت‌گیر و هزینه‌بر است. به همین دلیل، از طرح آزمایش‌های عاملی جزئی برای کاهش تعداد آزمایش‌ها، استفاده می‌شود. روش تاگوچی نمونه‌ای از

شرح زیر بودند:

- با مطالعه سامانه مورد نظر، متغیرها و سطوح مربوط، معین شدند. این طراحی دارای سه متغیر در سه سطح بود. متغیرهای فرایندی شامل دمای تخلیه و دور چرخنده در مراحل اول و دوم اختلاط بودند. دور چرخنده در مرحله اول در سه سطح ۵۰، ۴۰ و ۶۰ rpm، دور چرخنده در مرحله دوم نیز در سه سطح ۵۰، ۴۰ و ۶۰ rpm و زمان تخلیه در مرحله دوم، ۱۴۰ و ۱۵۰ و ۱۶۰°C انتخاب شدند.
- به کمک نرم افزار رایانه ای مربوط به روش تاگوچی، آرایه متعامد L9 برای تعیین ترکیب بندی آزمایش ها انتخاب شد (جدول ۲).
- بر اساس آرایه متعامد انتخابی، آزمایش ها با تکرار لازم انجام و نتایج ثبت شد. برای هر آزمایش سه آمیزه (در مجموع ۲۷ آمیزه) تولید و میانگین سه عدد گزارش شد (جدول ۳).
- با استفاده از روش آماری ANOVA از نرم افزار Minitab به ویژه طرح تاگوچی، منحنی های برهم کنش برای تک تک خواص ترسیم شد و آثار کلی و مقدار اثر عوامل در طرح به شکل نمودار مشخص (شکل های ۱-۴) و ترکیب بهینه عوامل معین شد.
- با متوسط گیری از داده ها و ترسیم منحنی های لازم، نحوه وابستگی خواص فیزیکی - مکانیکی و فرایندی به متغیرهای دور چرخنده و دمای تخلیه (دو متغیر طراحی تاگوچی) مشخص شد.
- با ترسیم رفتار خواص مختلف با انرژی اختلاط اثر این پارامتر نیز به شکل مجزا بررسی شد.

جدول ۲ - شرایط آزمایش طراحی شده بر اساس آرایه L9 در روش تاگوچی.

آمیزه	R <sub>1</sub> (rpm)*	R <sub>2</sub> (rpm)*	دما (°C)
A	۴۰	۴۰	۱۴۰
B	۴۰	۵۰	۱۵۰
C	۴۰	۶۰	۱۶۰
D	۵۰	۴۰	۱۵۰
E	۵۰	۵۰	۱۶۰
F	۵۰	۶۰	۱۴۰
G	۶۰	۴۰	۱۶۰
H	۶۰	۵۰	۱۴۰
I	۶۰	۶۰	۱۵۰

\*R<sub>1</sub> و R<sub>2</sub> به ترتیب دور چرخنده در مراحل اول و دوم اختلاط است.

SMR-20 و کائوچوی سیس بوتادی ان محصول شرکت کومپوهی کره با نام تجاری KBR01، کائوچوی استیرن - بوتادی ان SBR-1712 محصول پتروشیمی بندر امام و دوده ها از نوع دوده N660 محصول شرکت کرین ایران بودند. روغن به عنوان نرم کننده از شرکت نفت بهران و عوامل پخت شامل گوگرد از شرکت O.C.C.L هند و CBS از شرکت Neocil هند، فعال ساز روی اکسید از شرکت پارس اکسید ایران، استتاریک اسید از شرکت Acid Chem مالزی و سایر افزودنی ها شامل رزین ها و محافظت کننده ها بودند.

## دستگاه ها

برای اختلاط آمیزه ها از مخلوط کن بنبوری ساخت شرکت Pomini ایتالیا با حجم ۲۷۰ L و مخلوط کن ۴ پره، برای بررسی و تعیین خواص پخت از رنومتر ODR 2000E، برای اندازه گیری خواص کششی و مقاومت پارگی از دستگاه Dynamometer ساخت شرکت Hounsfield انگلیس و برای تعیین پراکنش از دستگاه Dispergrader استفاده شد. اندازه گیری خواص فرایندی با دستگاه گرانروی سنج مونی و اکسترودر آزمایشگاهی انجام شد. این اکسترودر از نوع تغذیه سرد با L/D=۱۵ است. در این اکسترودر، دمای پوسته به کمک سامانه کنترل گرمایی TCU و ناحیه سر به وسیله گرم کن الکتریکی گرم می شود. برای تعیین پارامتر تورم پس از حدیده (%،) از قالب مستطیل شکل به ابعاد ۲۲×۱۱ mm استفاده شد و برای همه آزمون ها، دمای پوسته ۸۵°C، دمای ناحیه سر ۱۰۰°C و سرعت پیچ ۴۰ rpm انتخاب شد. آزمون های رنومتری، پارگی و کشش مطابق استانداردهای ASTM D1349، D412 و D624 انجام شدند.

## روش ها

اختلاط آمیزه مطابق فرمول بندی جدول ۱ طی سه مرحله انجام شده است. مرحله اول، شامل اختلاط کائوچوی طبیعی با بخشی از دوده، فعال کننده و روغن است. در مرحله دوم اختلاط، بخشی از آمیزه مرحله اول با کائوچوی طبیعی باقی مانده و کائوچوهای مصنوعی مخلوط شده و باقی مانده مواد به آن اضافه شده است. در مرحله سوم، مواد پخت به آمیزه افزوده شد.

به منظور بررسی اثر دور چرخنده و دمای تخلیه روی بازده بنبوری، دو پارامتر زمان اختلاط و انرژی اختلاط برای آمیزه ها در مراحل مختلف اختلاط ثبت شد. به منظور بررسی خواص فیزیکی - مکانیکی، آزمون های کشش، پارگی و پراکنش انجام شد و به منظور بررسی وضعیت فراورده پذیری آمیزه تولید شده، آزمون های اندازه گیری گرانروی مونی و تورم پس از حدیده انجام گردید.

مراحل اجرای طراحی آزمایش ها بر اساس روش تاگوچی [۱۱] به

جدول ۳ - نتایج میانگین خواص از سه مرتبه تکرار در هر آزمایش.

آمیزه	جهندگی (%)	پراکنش	سختی (shore A)	استحکام کششی (MPa)	مدول ۳۰۰٪ (MPa)	ازدیاد طول تا پارگی (%)	مقاومت پارگی (kN/m)	زمان اختلاط (s)	انرژی اختلاط (kWh)
A	۲۱	۳/۲۱	۶۱	۱۵/۸۶	۱۲/۵	۳۷۲/۲	۱۸/۳	۳۱۸	۷۱
B	۲۱	۴/۵۸	۶۱	۱۶/۰۴	۱۲/۵۶	۳۷۵/۵	۲۳/۳	۳۰۶	۷۳/۸
C	۲۷۴	۴/۹۷	۶۱	۱۵/۸۵	۱۲/۷۷	۳۷۵/۷	۱۸/۷	۳۰۲	۷۷
D	۲۷۴	۳/۰۳	۶۲	۱۵/۵	۱۲/۶۹	۳۷۷/۵	۲۲/۷	۳۲۲	۷۲/۷
E	۲۱	۴/۸	۶۱	۱۵/۶۵	۱۲	۳۸۱/۲	۱۸/۴	۳۱۴	۷۵/۴
F	۲۰/۸	۴/۳	۶۲	۱۵/۲۵	۱۷/۷۲	۳۸۲/۳	۲۵/۳	۲۹۴	۷۲/۹
G	۲۱	۳/۳۶	۶۰	۱۵/۳۲	۱۷/۷۶	۳۸۲/۵۵	۲۴/۹	۳۵۶	۷۵/۱
H	۲۷۳	۳/۸۷	۶۲	۱۴/۳۸	۱۷/۵۳	۳۶۲/۵	۲۶/۶	۲۹۸	۷۰/۱
I	۲۱	۳/۵۷	۶۲	۱۵/۲۷	۱۷/۸۲	۳۷/۸۱	۲۸/۰۳	۲۹۷	۷۴/۱

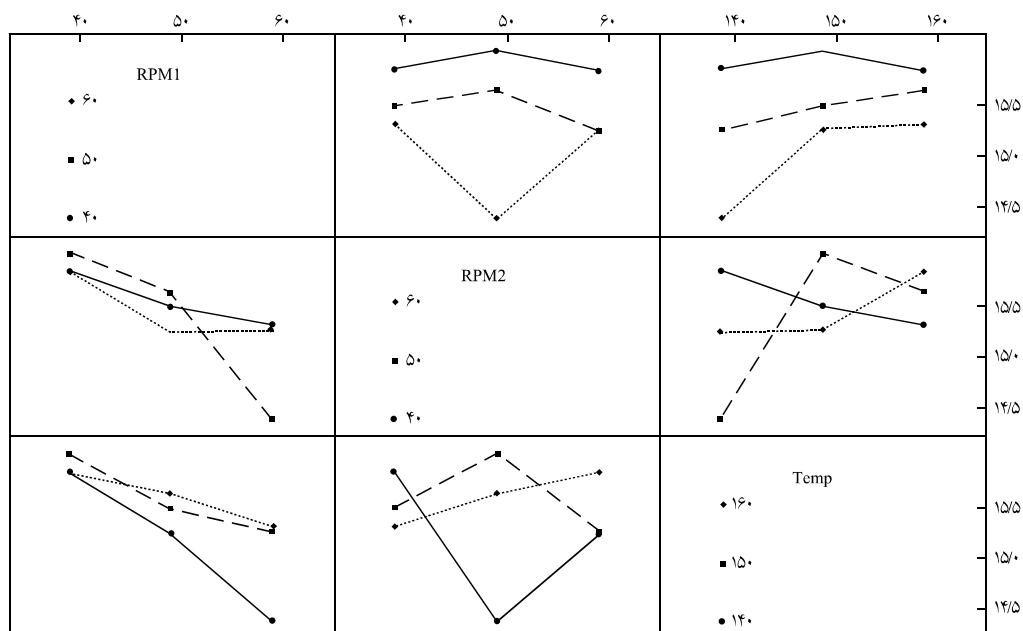
## نتایج و بحث

فرایندی و استحکامی، بهترین و بدترین حالت برای متغیرهای دور چرخنده و دمای تخلیه معین شد.

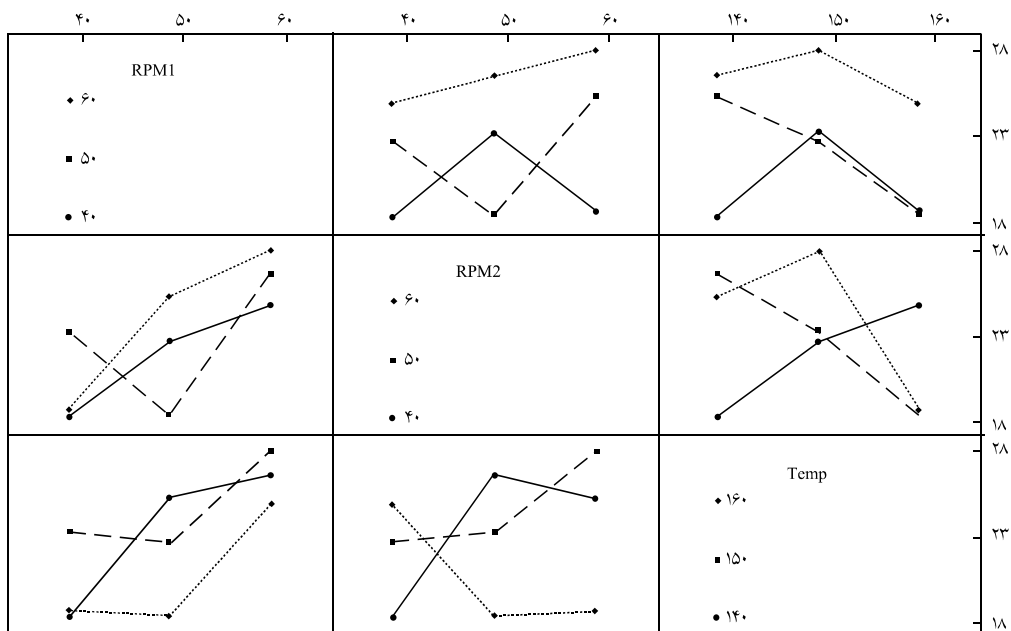
تعدادی از نمودارها به عنوان نمونه ارائه شده است (شکل ۱ تا ۴). در شکل ۱ تغییرات استحکام کششی با تغییر دور چرخنده در مرحله اول و دوم و دمای تخلیه ترسیم شده است. به راحتی می توان بهترین و بدترین شرایط را برای این خاصیت از منحنی ها استخراج کرد. برای مقاومت

## بررسی حالت های پهنه به کمک بخش ANOVA INTERACTION PLOT نرم افزار Minitab

در این مرحله پس از طراحی آزمایش و ثبت داده های به دست آمده، به کمک تحلیل آماری نرم افزار Minitab برای هر یک از خواص



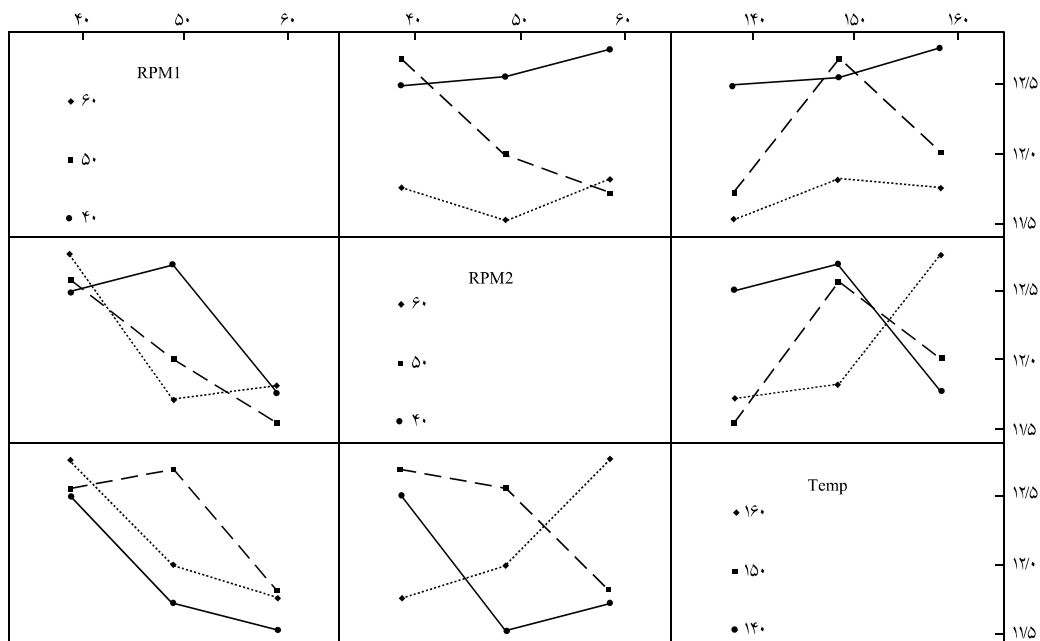
شکل ۱ - بررسی هم زمان تغییرات دما و دور چرخنده در دو مرحله اختلاط به کمک نمودارهای برهم کنش نرم افزار ANOVA روی استحکام کششی آمیزه پخت شده.



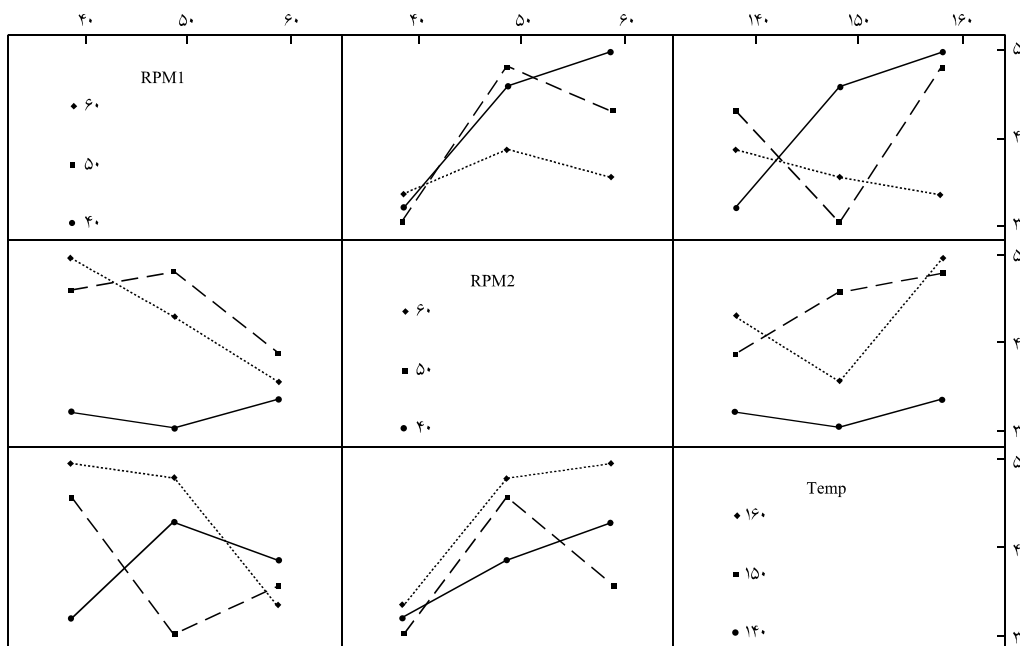
شکل ۲- بررسی هم زمان تغییرات دما و دور چرخنده در دو مرحله اختلاط به کمک نمودارهای برهم کنش نرم افزار ANOVA روی مقاومت پارگی آمیزه پخت شده.

پراکنش قابل مشاهده است. به این ترتیب می توان برای همه خواص بهترین و بدترین وضعیت اختلاط را معین کرد. خلاصه نتایج در جدول ۴ ارائه شده است.

شکل ۲، نیز روال کار مشابه است به طوری که بدترین مقاومت پارگی در شرایط  $T=150^{\circ}C$ ،  $R_1 = 60$  rpm و  $R_2 = 60$  حاصل شده است. از شکل های ۳ و ۴ به ترتیب بیشترین و کمترین مدول و میزان



شکل ۳- بررسی هم زمان تغییرات دما و دور چرخنده در دو مرحله اختلاط به کمک نمودارهای برهم کنش نرم افزار ANOVA روی مدول ۳۰۰ درصد آمیزه پخت شده.



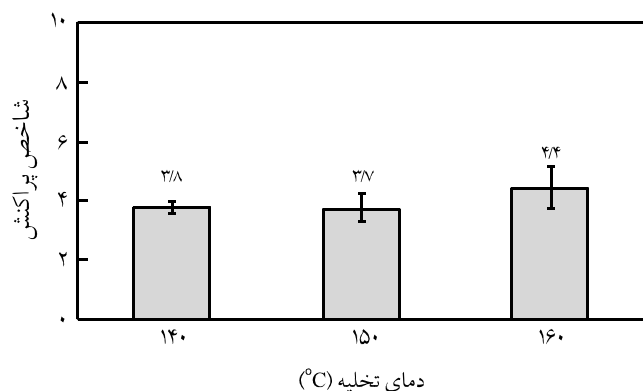
شکل ۴ - بررسی هم زمان تغییرات دما و دور چرخنده در دو مرحله اختلاط به کمک نمودارهای برهم کنش نرم افزار ANOVA روی مقدار پراکنش دوده در آمیزه پخت شده.

با بررسی دقیق تر منحنی ها و نتایج جدول ۴ می توان دریافت که کم ترین مصرف انرژی در دمای تخلیه  $T=140^{\circ}C$  و دورهای چرخنده  $R_2 = 60 \text{ rpm}$  و  $R_1 = 50$  شرایط کمترین مدول ۳۰٪ و استحکام کششی مشاهده می شود. بیشترین مصرف انرژی در دمای تخلیه  $T=160^{\circ}C$  و دور چرخنده های

مدول ۳۰۰ نیز در این شرایط دیده می شود. به طور کلی، نتایج ارتباط معکوس مدول ۳۰٪ و مقاومت پارگی را نشان می دهند، ضمن آن که در بیشتر حالت ها پراکنش با مقاومت پارگی ارتباط معکوس و با مدول ۳۰٪ در همه حالت ها ارتباط مستقیم دارد.

جدول ۴ - بررسی بهترین و بدترین شرایط برای خواص آمیزه با توجه به نتایج ANOVA INTERACTION PLOT نرم افزار Minitab.

مطلوب ترین		نامطلوب ترین		خواص	
دور چرخنده (rpm)		دور چرخنده (rpm)			دمای تخلیه ( $^{\circ}C$ )
مرحله دوم اختلاط	مرحله اول اختلاط	مرحله دوم اختلاط	مرحله اول اختلاط		
۵۰	۶۰	۶۰	۴۰	زمان	
۶۰	۵۰	۴۰	۶۰	انرژی اختلاط	
۴۰	۶۰	۵۰	۴۰	پراکنش	
۶۰	۶۰	۴۰	۴۰	مقاومت پارگی	
۴۰	۵۰	۶۰	۵۰	استحکام کششی	
۴۰	۶۰	۶۰	۵۰	مدول ۳۰٪	
۵۰	۵۰	۴۰	۴۰	گرانروی مونی	
۵۰	۵۰	۴۰	۵۰	تورم پس از حدیده	

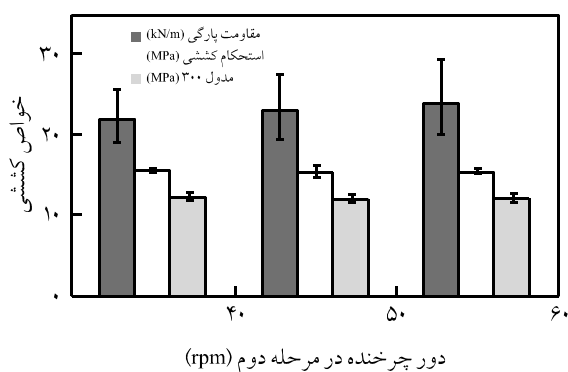


شکل ۶- اثر دمای تخلیه بر شاخص پراکنش.

دمای آمیزه به دلیل افزایش تنش های برشی است که باعث سریع تر رسیدن دمای آمیزه به دمای تنظیم شده نهایی و کمتر شدن زمان چرخه اختلاط و افزایش بازده تولید می شود. این در حالی است که افزایش انرژی مصرفی حاصل از افزایش دور چرخنده با کاهش زمان اختلاط جبران می شود. بنابراین، انرژی مصرفی نیز ثابت می ماند (جدول ۳). بنابراین، با تنظیم بهینه دور چرخنده و دمای تخلیه بهبود پراکنش در کنار کاهش زمان اختلاط میسر شده است.

#### اثر دور چرخنده و دمای تخلیه بر خواص استحکامی آمیزه ها

همان طور که در شکل ۷ مشاهده می شود، افزایش دور چرخنده بر خواص استحکام کششی و مدول ۳۰۰٪ اثری ندارد. در حالی که مقاومت پارگی اندکی بهبود یافته است. از طرفی، افزایش دور چرخنده باعث افزایش تنش برشی و افزایش دمای کل فرایند اختلاط و از طرف دیگر باعث کاهش زمان اختلاط می گردد که اثر اولی مثبت است و باعث افزایش برهم کنش پرکننده - لاستیک و کاهش برهم کنش پرکننده - پرکننده می شود. ولی، کاهش زمان اختلاط به معنی کاهش زمان



شکل ۷- اثر دور چرخنده در مرحله اصلی دوم بر خواص کششی.

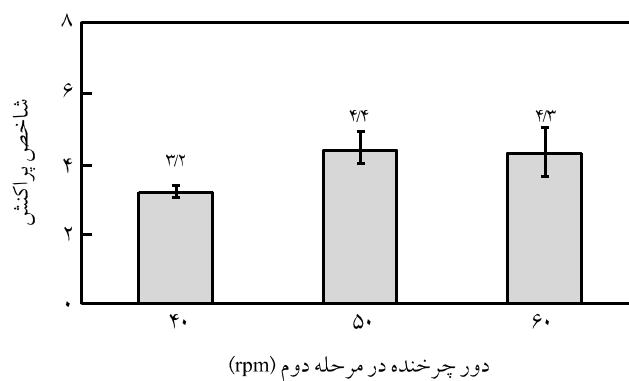
#### مطالعه کیفی شرایط اختلاط

در این پژوهش، از منحنی های برهم کنش بخش ANOVA نرم افزار Minitab، فقط برای به دست آوردن بهترین و بدترین شرایط اختلاط برای هر خاصیت استفاده شده است. زیرا، با بررسی شکل های ۱ تا ۴ مشاهده می شود که امکان پی گیری روند تغییرات هر خاصیت مشکل است. بنابراین، در ادامه کار به منظور مشاهده واضح تر روند تغییرات هر خاصیت با متغیرهای دور چرخنده و دمای تخلیه، از داده های جدول ۳ میانگین گیری و منحنی های ۵ تا ۱۰ ترسیم شده است. هم چنین، به طور جداگانه اثر انرژی اختلاط روی خواص با ترسیم مستقیم همه نقاط آزمایش در شکل های ۱۱ و ۱۲ مورد مطالعه قرار گرفته است.

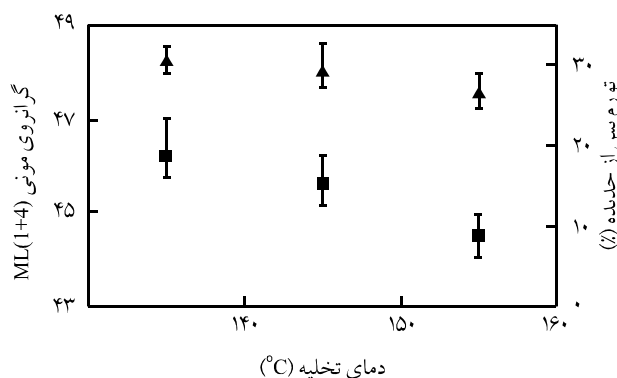
#### اثر دور چرخنده و دمای تخلیه بر پراکنش دوده

افزایش دور چرخنده و نیز افزایش دمای تخلیه در مرحله دوم اختلاط، باعث بهبود پراکنش دوده شده است (شکل های ۵ و ۶). در صنعت لاستیک، اثر افزایش دمای اختلاط بر پراکنش که با افزایش دور چرخنده و نیز افزایش دمای تخلیه آمیزه امکان پذیر است به Low Hysteresis Processing معروف است که به بهبود پراکنش دوده و بهبود در پیوند لاستیک - دوده نسبت داده می شود. معمولاً فرض می شود، بهبود در برهم کنش پلیمر - پرکننده علت سرعت پراکنش سریع تر کلوخه های دوده است. اما، عامل دیگری نیز مؤثر است. افزایش دما ممکن است، به طور قابل ملاحظه ای چسبندگی بین کلوخه ها را کاهش داده و به این ترتیب موازنه مطلوب تری بین نیروهای چسبندگی و برشی ایجاد شود [۱۲]. بنابراین، افزایش دمای اختلاط می تواند به پراکنش بهتر انبوهه های پرکننده کمک کند.

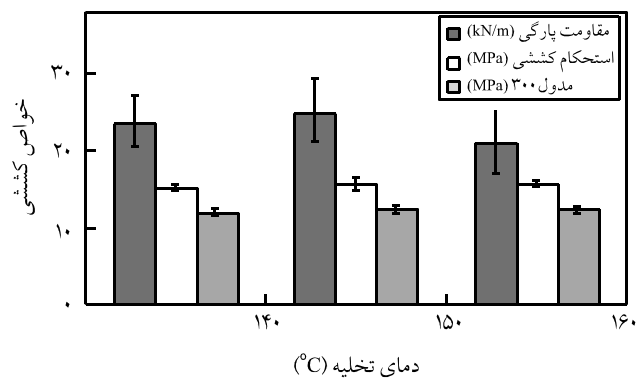
هم چنین، بدیهی است که با افزایش دور چرخنده، زمان اختلاط کاهش می یابد (جدول ۳). علت کاهش زمان اختلاط، افزایش سریع تر



شکل ۵- اثر دور چرخنده بر شاخص پراکنش.



شکل ۱۰- اثر دمای تخلیه در مرحله اصلی دوم بر گرانروی مونی و تورم پس از حدیده.



شکل ۸- اثر دمای تخلیه بر خواص کششی.

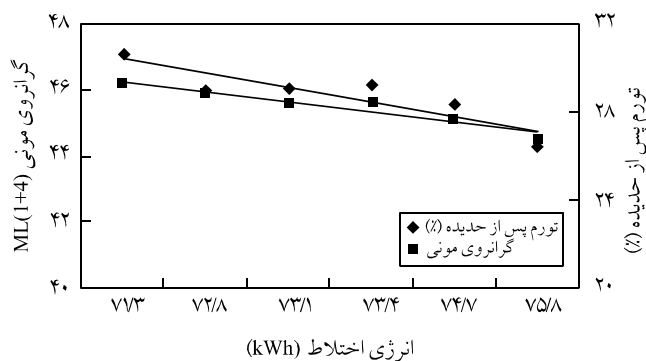
زمان اختلاط یا کاهش زمان شکست زنجیرهای پلیمری است، مقاومت پارگی افزایش می یابد. اما، با افزایش دمای تخلیه که به معنی افزایش زمان اختلاط و افزایش زمان شکست زنجیرهای پلیمری است، با وجود بهبود پراکنش، مقاومت پارگی افت می کند. هم چنین، افت شدید استحکام کششی در دمای تخلیه  $160^{\circ}\text{C}$  نیز با همین ساز و کار قابل توجیه است و طولانی شدن زمان اختلاط باعث کاهش طول زنجیرهای پلیمری و کاهش ازدیاد طول و استحکام کششی شده است.

#### اثر دور چرخنده و دمای تخلیه بر خواص رئولوژیکی آمیزه ها

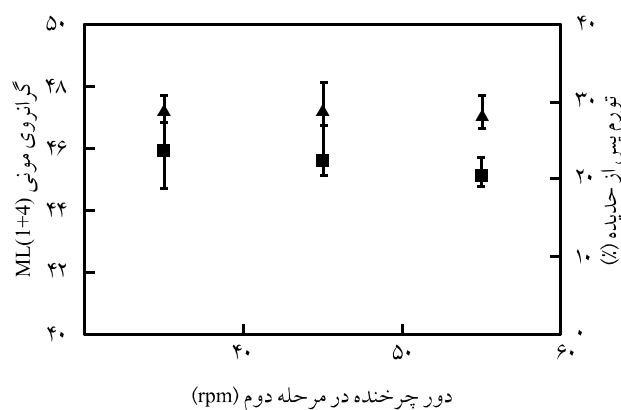
از آن جا که با افزایش دور چرخنده مقدار پراکنش بهبود یافته است، بنابراین، انتظار می رود گرانروی مونی آمیزه کاهش یابد [۱۳] (شکل ۹). در حالی که نتایج نشان می دهد، تغییر دور چرخنده اثر چندانی بر خواص تورم پس از حدیده آمیزه ندارد. هم چنین، با افزایش دمای تخلیه، گرانروی مونی و تورم پس از حدیده کاهش می یابند (شکل ۱۰) که مجدداً کاهش اولی بیشتر مربوط به بهبود پراکنش پرکننده است. از طرفی افزایش دمای تخلیه باعث طولانی تر شدن زمان اختلاط و افزایش

برهم کنش پرکننده - لاستیک و کاهش زمان پراکنش پرکننده است، به طوری که در محدوده مورد مطالعه در این پژوهش این دو اثر یک دیگر را خنثی کرده اند. به عبارت دیگر، چون انرژی اختلاط کل با افزایش دور چرخنده ثابت مانده است، خواص استحکامی نیز بدون تغییر باقی مانده اند.

با افزایش دمای تخلیه، استحکام کششی و مدول افزایش جزئی نشان می دهند (شکل ۸). در حالی که مقاومت پارگی آمیزه به وضوح کاهش می یابد. اشاره شد که افزایش دمای اختلاط باعث بهبود پراکنش پرکننده می شود، این امر به بهبود استحکام کششی و مدول کمک می کند. برای مقاومت پارگی وضعیت پیچیده تر است. از طرفی، با افزایش دمای تخلیه مقاومت پارگی افت کرده است، در حالی که پراکنش بهبود یافته (شکل های ۶ و ۸) و از طرف دیگر با افزایش دور چرخنده مقاومت پارگی بهبود می یابد در حالی که در این حالت نیز افزایش پراکنش مشاهده می شود (شکل های ۵ و ۷). بنابراین، افزون بر مقدار پراکنش، ساز و کار دیگری نیز بر مقاومت پارگی حاکم است که مقدار شکست زنجیرهای پلیمری است. با افزایش دور چرخنده که معادل با کاهش



شکل ۱۱- اثر انرژی اختلاط بر خواص رئولوژیکی.



شکل ۹- اثر دور چرخنده بر گرانروی مونی و تورم پس از حدیده.



## نتیجه گیری

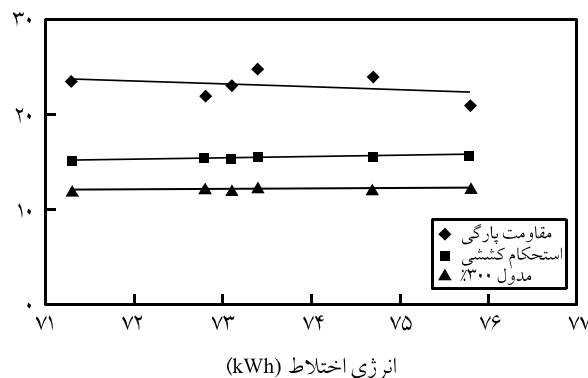
مطالعه اثر عوامل فرایندی اختلاط نظیر دور چرخنده و دمای تخلیه بر خواص فیزیکی - مکانیکی آمیزه لاستیکی به دلیل برهم کنش قوی بین متغیرهای حاکم بر این فرایند مشکل است. طراحی آزمایش تاگوچی به کمک نرم افزار Minitab و تحلیل نتایج در محیط ANOVA این نرم افزار امکان به دست آوردن بهترین شرایط برای هر خاصیت را با حداقل آزمایش ها میسر می کند. به ویژه در مواقعی که خاصیتی مشخص (به عنوان مثال مقاومت پارگی) هدف باشد، استفاده از این روش بسیار جالب است، اما بررسی جزئیات تغییرات خواص با متغیرهای فرایندی به کمک منحنی های برهم کنش مشکل بود. بنابراین، استفاده از منحنی های میانگین راهی مؤثر برای بررسی روند تغییرات است که در این مقاله مطالعه شد. با بررسی نتایج مشخص شد، دو ساز و کار مقدار پراکنش پرکننده و مقدار شکست زنجیرهای لاستیکی بیشترین اثر را بر خواص استحکامی و نقصی، به ویژه مقاومت در برابر پارگی و تورم پس از حدیده آمیزه لاستیکی حداقل در محدوده مورد مطالعه این پژوهش دارند. بهبود پراکنش به کمک افزایش دمای تخلیه و افزایش دور چرخنده میسر است. اما، بهبود پراکنش با افزایش دمای اختلاط ضمن کاهش بازده تولید، با شکست زیاد زنجیرهای لاستیکی همراه شده و افت خواص نقصی نظیر مقاومت پارگی را به دنبال دارد. اما افزایش دور چرخنده مخلوط کننده از یک طرف باعث بهبود نسبی پراکنش پرکننده به دلیل افزایش تنش برشی، افزایش دمای اختلاط و کاهش برهم کنش پرکننده - پرکننده می شود و از طرف دیگر شکست بیش از حد زنجیرهای پلیمری را به دنبال ندارد. بنابراین، با افزایش دور چرخنده، امکان افزایش بازده تولید در کنار حفظ خواص استحکامی و بهبود نسبی پراکنش و مقاومت پارگی آمیزه میسر است.

## تشکر و قدردانی

بدین وسیله از مسئولان محترم شرکت کویر تایر که زمینه فعالیت های پژوهشی را فراهم کرده اند، تشکر و قدردانی می شود.

## مراجع

1. Wiedmann W.M. and Schmid H.M., Optimization of Rubber Mixing in Internal Mixers, *Rubber Chem. Technol.*, **55**, 363-381,



شکل ۱۲ - اثر انرژی اختلاط بر خواص فیزیکی - مکانیکی.

شکست زنجیرهای پلیمری می شود. از آن جا که طول زنجیرهای پلیمری کنترل کننده اصلی رفتار کشسان الاستومرست. بنابراین، تورم پس از حدیده آمیزه با افزایش دمای اختلاط کاهش می یابد.

## مطالعه اثر انرژی اختلاط بر خواص فیزیکی - مکانیکی و رئولوژیکی

همان طور که در شکل های ۱۱ و ۱۲ مشاهده می شود، با افزایش انرژی مصرفی، مدول ۳۰۰٪ و استحکام کششی افزایش و مقاومت پارگی، تورم پس از حدیده و گرانی مونی کاهش می یابد. افزایش انرژی اختلاط که با افزایش زمان اختلاط یا افزایش دور چرخنده حاصل می شود، منجر به شکست بیشتر زنجیرهای کائوچو، افزایش برهم کنش لاستیک - پرکننده و پراکنش بهتر کلوخه های پرکننده در شبکه لاستیکی می شود. برهم کنش بیشتر و پراکنش بهتر کلوخه ها منجر به بهبود مدول ۳۰۰٪ به دلیل بهبود برهم کنش پلیمر پرکننده، کاهش گرانی مونی به علت آزاد شدن زنجیرهای در دام افتاده لاستیک در بین کلوخه ها و کاهش تورم پس از حدیده می شود. برعکس، چنان چه انرژی اختلاط کمتری به آمیزه اعمال شود، پراکنش ضعیف تر پرکننده و گیرافتادن زنجیرهای لاستیکی در میان کلوخه ها باعث کاهش مدول ۳۰۰٪ و افزایش گرانی مونی و تورم پس از حدیده می شود. مقاومت پارگی و تورم پس از حدیده در کنار وابستگی به مقدار پراکنش پرکننده ها به مقدار شکست زنجیرهای پلیمری حساس ترند، به طوری که با وجود بهبود مقدار پراکنش، این دو خاصیت کاهش می یابند.

1982.

2. Hess W.M., Swor R.A., and Micek E.J., The Influence of Carbon

- Black, Mixing and Compounding Variables on Dispersion., *Rubber Chem. Technol.*, **57**, 959-1000, 1984.
3. Cotton G.R., Mixing of Carbon Black with Rubber. 2 Mechanism of Carbon Black Incorporation, *Rubber Chem. Technol.*, **58**, 774-784, 1985.
  4. Iisch H.H., Jakob B., and Radusch H.J., Online Characterization of the Effect of Mixing Parameters on Carbon Black Dispersion in Rubber Compounds Using Electrical Conductivity, *Rubber Chem. Technol.*, **76**, 147-160, 2003.
  5. Akinlabi A.K., Okieimen F.E., Egharevba F., and Malomo D., Investigation of the Effect of Mixing Schemes on Rheological and Physico-mechanical Properties of Modified Natural Rubber Blends, *Mater. Design*, **27**, 783-788, 2006.
  6. Van Buskirk P.R., Turetzky S.B., and Gunberg P.F., Practical Parameters for Mixing, *Rubber Chem. Technol.*, **58**, 577-591, 1985.
  7. Zloczower I.M., Studies of Mixing Efficiency in Batch and Continues Mixers, *Rubber Chem. Technol.*, **68**, 504-528, 1994.
  8. Clark J. and Petera J., Modeling Dispersive of Rubber Compounds, *Rubber Chem. Technol.*, **72**, 807-828, 1999.
  9. Cotton G.R. and Murphy L.J., Mixing of Carbon Black with Rubber 6-Analysis of NR/SBR Blends, *Rubber Chem. Technol.*, **61**, 609-618, 1988.
  10. Clarke J., Clarke B., and Freakley P.K., Relationship between Mixing Method, Microstructure and Strength of NR:BR Blends, *Rubber Chem. Technol.*, **74**, 1-15, 2001.
  11. Ranjit K.R., *A Primer on the Taguchi Method*, Society of Manufacturing, 1st ed., USA, 1990.
  12. Cotton G.R., Mixing of Carbon Black with Rubber, 1-Measurement of Dispersion Rate by Changes in Mixing Torque, *Rubber Chem. Technol.*, **57**, 118-133, 1984.
  13. Clark J., and Freakley P.K., Reduction in Viscosity of an SBR Compound Caused by Mastication and Disagglomeration During Mixing, *Rubber Chem. Technol.*, **67**, 700-715, 1993.