

## key words

Optimization  
Tear strength  
Compression set  
Rubber spring  
EPDM rubber

## Optimization of Tear Resistance and Compression Set at Rubber Spring based on EPDM/NR Alloy

Mohammad Khabiri<sup>1\*</sup>, Milad Saadat Tagharoodi<sup>1</sup>, Mohammad Reza Pourhossainy<sup>1</sup>, Mohamoud Razavizade<sup>1</sup>, Mashhood Abbasi<sup>1</sup>

1- Faculty of Material & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Iran

\* PO Box 1774-15875, Tehran, Iran, Mkhairy283@gmail.com

## Abstract

**Research subject:** The rubber Springs with sponge structure must have acceptable tear resistance in addition to desirable compression set. Usually enhancing each of these properties leads to the weakening of the other property.

**Research approach:** Providing simultaneous optimum values of these two properties in the rubber spring compound requires consideration of the effective factors by performing several tests. Therefore, in this study, a test plan based on the Taguchi statistical analysis technique was presented to design the optimal formulation in exchange for reducing the number of required tests. Thus, the impact of four factors: weight percent of Natural rubber (NR), concentration of zinc oxide (ZnO), dicumyl peroxide (DCP), and ethylene glycol dimethacrylate (EDMA) on the ratio of tear resistance to compression set (design criterion, Q) was determined.

**Main results:** The data given by ANOVA showed that the amount of DCP with %66.93 has the highest influence on the design of the rubber spring compound. In addition, it was revealed that the curing system is a solution for the simultaneous optimization to maximum tear energy and minimum compression set of the compound. Statistical analysis predicted that the optimal formulation contained 60 weight percent of NR and 4, 1, and 2 phr of DCP, ZnO, and EDMA, respectively. Experimental test results confirmed the predicted Q value for optimal conditions.

\*To whom correspondence should be addressed:  
Mkhabiry283@gmail.com

# پژوهش‌های کاربردی مهندسی شیمی - پلیمر

## بهینه‌سازی مقاومت پارگی و مانایی فشاری فنر لاستیکی بر پایه آلیاژ EPDM/NR

محمد خبیری<sup>۱\*</sup>، میلاد سعادت تقروودی<sup>۲</sup>، محمدرضا پورحسینی<sup>۲</sup>، محمود  
رضوی زاده<sup>۲</sup>، مشهود عباسی<sup>۲</sup>

- ۱- دکتری، مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت،  
\* تهران، صندوق پستی ۱۷۷۴-۱۵۸۷۵
- ۲- کارشناس ارشد، مهندسی مواد مرکب / پلیمر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع مواد و  
فناوری‌های ساخت
- ۳- استادیار، مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت

فصلنامه علمی - پژوهشی بین رشته‌ای  
سال چهارم، شماره ۱، نسخه ۱  
بهار ۱۳۹۹، صفحه ۹۱-۱۰۷

### چکیده

فنرهای لاستیکی لاستیک اتیلن- پروپیلن دی ان مونومر (EPDM) با ساختاری اسفنجی باید علاوه بر مانایی فشاری مطلوب، از مقاومت پارگی قابل قبولی بهره‌مند باشند. معمولاً تقویت هر یک از این خواص به تضعیف خاصیت دیگر منجر می‌شود. تأمین هم‌زمان مقدار بهینه این دو خاصیت در آمیزه فنر لاستیکی، نیازمند ارزیابی عوامل مؤثر از طریق انجام آزمون‌های متعدد است. بنابراین در این پژوهش طرح آزمون‌های بر مبنای تکنیک تحلیل آماری برای طراحی فرمول‌بندی بهینه در ازای کاهش تعداد آزمون‌های لازم ارائه شد. بر این اساس تأثیر چهار عامل: ۱- درصد وزنی کائوچوی طبیعی (NR) در لاستیک پایه، ۲- مقدار اکسید روی (ZnO)، ۳- مقدار دی‌کیومیل پراکسید (DCP) و ۴- مقدار اتیلن گلیکول دی‌متاکریلات (EDMA) بر نسبت مقاومت پارگی به مانایی فشاری (به‌عنوان معیار طراحی، Q) تعیین شد. تحلیل نتایج نشان داد که مقدار DCP با سهم تأثیر ۶۶/۹۳ درصد، مؤثرترین عامل در طراحی آمیزه فنر لاستیکی است. همچنین مشخص شد که طراحی سامانه پخت، راه حل بهینه‌سازی هم‌زمان بیشینه انرژی پارگی و کمینه مانایی فشاری آمیزه است. تحلیل آماری پیش‌بینی کرد که فرمول‌بندی بهینه حاوی ۶۰ درصد وزنی NR و ۱، ۴ و ۲ phr به ترتیب از عامل‌های ZnO، DCP و EDMA است. نتایج آزمون‌های تجربی، مقدار Q پیش‌بینی شده برای شرایط بهینه را تأیید کرد.

### کلمات کلیدی

بهینه‌سازی

مقاومت پارگی

مانایی فشاری

فنر لاستیکی

لاستیک اتیلن- پروپیلن دی ان مونومر

\*عهده دار مکاتبات:

Mkhabiry283@gmail.com

## ۱ مقدمه

خواص ویژه آمیزه‌های لاستیکی امکان استفاده از آن‌ها را در طیف وسیعی از کاربردهای مهندسی فراهم می‌سازد [۱، ۲]. این مواد علاوه بر استفاده در ساخت جاذب‌های انرژی با رفتار پاسخ زمانی تأخیری به نیروهای دینامیکی برای سازه‌های مقاوم به زلزله مانند پل‌ها [۳]، ریل راه‌آهن [۴] و برج‌ها [۵]، در ساخت فنرهای لاستیکی با رفتار پاسخ زمانی بسیار سریع نیز به کار گرفته می‌شوند [۶].

فنرها قطعات کلیدی هستند که در تکمیل بسیاری از سازوکارهای حرکتی رفت و برگشتی و یا نوسانی سریع استفاده می‌شوند. نسل‌های جدیدی از فنرهای لاستیکی طراحی شده‌اند که نسبت به فنرهای فلزی از سهولت تولید و مونتاژ، قیمت پایین، گسترده‌گی طراحی و کاربری برخوردار هستند. لاستیک‌های اسفنجی علاوه بر خاصیت ارتجاعی و جذب انرژی مناسب، مشخصات مطلوب دیگری مانند چگالی کم، عایق‌بندی و تراکم‌پذیری بالا را تأمین می‌کنند [۷]. اکثر مطالعات صورت گرفته در زمینه اسفنج‌های لاستیکی بر روی کنترل شکل، ابعاد، فراوانی و پراکندگی سلولی در بستر لاستیک متمرکز هستند [۸، ۹]. در سال‌های اخیر اسفنج‌های پلیمری نانوکامپوزیتی از لحاظ علمی و صنعتی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱۰، ۱۱]. مشاهده شده است که مقدار کمی از نانومواد معدنی، مانند نانوخاک‌کرس به عنوان هسته‌گذار منجر به تشکیل ساختار فومی با فراوانی بالایی از سلول‌های بسیار ریز می‌شود [۱۲، ۱۳]. همچنین مطالعات گسترده‌ای بر روی ساختار اسفنجی حاصل از فرایندهای تولید با استفاده از عوامل فوم‌زای فیزیکی [۱۴، ۱۵] و شیمیایی [۱۶] انجام شده است.

علاوه بر ساختار اسفنجی، خواص آمیزه لاستیکی فنر لاستیکی نیز بر خواص و رفتار جمع‌شوندگی و بازگشت‌پذیری آن تأثیر دارد [۱۷]. با ایجاد ساختارهای اسفنجی در فنر لاستیکی خواص مکانیکی آن، از قبیل مقاومت پارگی، تضعیف می‌شوند [۱۸]. تخریب دیواره‌های سلولی در فنرهای لاستیکی موجب پارگی زودهنگام فنر لاستیکی و تضعیف رفتار فنری آن می‌شود [۱۹]. از طریق افزایش مقاومت پارگی آمیزه لاستیکی پایه مقاومت پارگی دیواره‌های سلولی در فنر لاستیکی بهبود می‌یابد [۱۷، ۱۸]. از طرف دیگر در مواد لاستیکی، افزایش مقاومت پارگی آمیزه با افزایش نامطلوب مانایی فشاری آن همراه است [۲۰]. این در حالی است که رفتار ارتجاعی لاستیک فنر مستلزم کاهش مانایی فشاری آن است.

آمیزه مناسب برای ساخت فنرهای لاستیکی باید در عین مقاومت پارگی مطلوب، از مانایی فشاری قابل قبولی برخوردار باشد تا پاسخگوی رفتار ارتجاعی

مناسب در سامانه‌های مهندسی باشد. عوامل مؤثر مانند نوع و غلظت عامل پخت، شتاب‌دهنده، فعال‌کننده، پیونددهنده و همچنین نوع پایه لاستیک نقش تعیین‌کننده‌ای بر خواص پارگی و مانایی فشاری آمیزه لاستیکی دارند [۲۰، ۲۱]. تعیین نوع و سطح عوامل مؤثر بر این خواص آمیزه فنر لاستیکی به منظور طراحی فرمول‌بندی بهینه نیازمند مطالعات گسترده و انجام تعداد آزمون‌های تجربی متعددی است. این‌رو در چنین تحقیقاتی از روش‌های تحلیل آماری مانند تاگوچی برای طراحی فرمول‌بندی بهینه بهره می‌جویند [۲۲]. با استفاده از روش تاگوچی می‌توان: ۱- پیش‌بینی تأثیر عوامل مؤثر، ۲- تخمین مقادیر بهینه عوامل مؤثر و ۳- تخمین خواص حاصل از مقادیر بهینه پیش‌بینی شده را انجام داد [۲۳، ۲۴]. مزیت استفاده از روش طراحی آماری تاگوچی، کاهش تعداد آزمون‌های لازم برای دستیابی به فرمول‌بندی مطلوب و در نتیجه کاهش زمان و هزینه‌های مورد نیاز است [۲۵، ۲۶]. بهینه‌سازی هم‌زمان مقاومت پارگی و مانایی فشاری در آمیزه‌های لاستیکی بر اساس سامانه پخت امری دشوار است. زیرا افزایش پخت، مانایی فشاری آمیزه را بهبود می‌بخشد اما مقاومت پارگی آن را نیز کاهش می‌دهد و بالعکس، کاهش پخت، بر خلاف بهبود مقاومت پارگی آمیزه، مانایی فشاری آن را تضعیف می‌کند [۲۰]. در این راستا به خوبی حس می‌شود که لازم است روشی کاربردی و اقتصادی به صنایع لاستیک ارائه شود تا بر اساس آن بتوانند دو خاصیت آمیزه با رفتار متضاد را در حد قابل قبولی نسبت به یکدیگر بهینه‌سازی نمایند. در این تحقیق، با توجه به گستردگی عوامل مؤثر، تضاد سازوکارهای بهبود دو خاصیت مقاومت پارگی و مانایی فشاری و لازمه طرح تعداد زیادی آزمون جهت بررسی آنها، از روش تحلیل آماری تاگوچی جهت دستیابی به آمیزه‌ای مناسب برای نمونه فنر لاستیکی که حد قابل قبولی از بیشینه مقاومت پارگی در ازای کمینه مانایی فشاری را داشته باشد، استفاده می‌شود. طراحی آمیزه بر پایه آلیاژی از لاستیک‌های EPDM و NR با مقادیر متنوعی از اجزای سامانه پخت (دی‌کیومیل پراکساید و اتیلن گلیکول دی‌متاکریلات، اکسید روی) صورت می‌گیرد. به منظور بهینه‌سازی هم‌زمان هر دو این خواص در آمیزه، طراحی آماری آن بر اساس معیار Q که به صورت نسبت انرژی پارگی بهنجارشده (Normalized Tear Energy) به مانایی فشاری بهنجارشده (Normalized Compression Set) تعریف شده است، صورت می‌پذیرد و کارآمدی آن به عنوان روشی کاربردی برای صنایع ذی‌نفع بررسی می‌شود.

## ۲ تجربی

### ۱-۲ مواد

سپس برای ساخت نمونه به منظور آزمون‌های مانایی فشاری و پارگی استفاده شدند. برای ساخت نمونه‌های آزمون پارگی از قالب مخصوص در زیر دستگاه پرس هیدرولیکی داغ ساخت شرکت کولین آلمان با ابعاد  $18 \times 18 \times 0.2$  سانتی‌متر در فشار ۱۵۰ بار، دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان ۶۰ دقیقه، برای تهیه ورقه‌های لاستیکی پخت شده استفاده شد. مطابق استاندارد ASTM D624، نمونه‌های آزمون پارگی

فهرست مواد اولیه مورد استفاده در طراحی و ساخت آمیزه‌های فنر لاستیکی به همراه نام تجاری و شرکت سازنده هر یک از مواد در جدول (۱) ارائه شد. لاستیک مصنوعی EPDM از نوع KEP-270 از شرکت کومهو پلی کم کره با جرم مولکولی متوسط، محتوی اتیلن پایین، سرعت پخت بالا، چگالی  $0.86 \text{ g/cm}^3$  و لزجت

جدول ۱. فرمول‌بندی پایه و مشخصات مواد اولیه مورد استفاده در طراحی و ساخت آمیزه‌های فنر لاستیکی

Table ۱. Basic formulation and specifications of raw materials used in the design and preparation of rubber spring compounds

Ethylene-propylene-diene monomer elastomer (EPDM)	Rubber	Variable	KEP - 270	Kumho Polychem, Korea
Natural rubber (NR)	Rubber	Variable	SMR 20	THE AH YAU (GM), Malaysia
Zinc oxide (ZnO)	Activator	Variable	-	Rangineh Pars, Iran
Stearic acid	Processing aid	1	Palmera	KLK, Malaysia
Dicumyl peroxide (DCP)	Peroxide curing agent	Variable	Perkadox BC-FF	Akzonobel, Netherlands
Ethylene glycol dimethacrylate (EDMA)	Coactivator	Variable	-	MERCK, Germany
Baking soda	Foaming agent	3	NC-220	Shandong Donglin, China

با هندسه نوع A به کمک قالب‌های برشی مخصوص از ورقه لاستیک مذکور، تهیه شد. خواص پارگی نمونه آمیزه‌های پخت شده با هندسه A توسط دستگاه کشش تک‌جهته Hiwa200 ساخت شرکت هیوا ایران مطابق استاندارد ASTM D624 در دمای محیط با سرعت فک ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه (با سه بار تکرار برای هر نمونه) انجام شد. در این استاندارد، هندسه A رشد پارگی در نمونه‌های لاستیکی را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. مطابق استاندارد مذکور، استحکام پارگی نمونه‌ها (TS) از معادله (۱) محاسبه شد.

$$T_s = F/d \quad \text{معادله ۱}$$

که F و d به ترتیب نیروی پارگی و ضخامت نمونه‌ها هستند. انرژی پارگی، بر اساس مساحت سطح زیر منحنی تغییرات نیروی پارگی برحسب درصد کرنش هر آمیزه محاسبه می‌شود.

همچنین نمونه‌های آزمون مانایی فشاری نیز در قالب مخصوص، منطبق با ابعاد و هندسه فنر لاستیکی مورد استفاده در صنعت (نمونه‌های استوانه‌ای به طول mm

$125 \text{ }^\circ\text{C}$ )  $4 \pm 0.1 \text{ ML}$  و لاستیک طبیعی NR از نوع SMR20 از شرکت جی‌ام مالزی استفاده شد.

### ۲-۲ دستگاه‌ها و روش‌ها

برای آمیزه‌سازی نمونه فرمول‌بندی‌های طراحی شده فنر لاستیکی از مخلوط‌کن دو غلتکه W150AP ساخت شرکت کولین آلمان با قطر ۱۵ و عرض ۳۵ سانتی‌متر استفاده شد. این دستگاه قابلیت تنظیم دما در گستره ۱۲۰-۲۵ درجه سانتی‌گراد، تنظیم سرعت‌های دورانی غلتک‌ها ۵۰-۱۰ دور بر دقیقه و همچنین به منظور اعمال تنش برشی در آمیزه، تغییر سرعت نسبی غلتک‌ها نسبت به همدیگر در محدوده ۱/۵-۱ را داشت.

در مرحله اول فرایند آمیزه‌سازی بر روی مخلوط‌کن دو غلتکه، لاستیک اتیلن- پروپیلن دی آن مونومر با مقادیر مشخصی از کائوچوی طبیعی (۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد وزنی) در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵ دقیقه تا یکنواخت شدن آلیاژ لاستیکی پایه انجام شد. طی مراحل بعدی، مقادیر مشخصی از مواد کمک فرایندی، مواد پخت و دیگر افزودنی‌های لازم بر روی غلتک به آمیزه‌ها اضافه شد. بعد از آماده‌سازی آمیزه‌ها، آن‌ها را به مدت ۲۴ ساعت استراحت داده و

طراحی، هر دو خاصیت را شامل شود [۲۷]. در نتیجه معیار طراحی فرمول‌بندی آمیزه EPDM فنر بر مبنای افزایش مقاومت پارگی هم‌زمان با کاهش مانایی فشاری آمیزه در نظر گرفته شد. در نهایت طراحی فرمول‌بندی آمیزه EPDM فنر بر مبنای نسبت مقاومت پارگی به مانایی فشاری (معادله ۳)،  $Q$  معیار طراحی آماری (Statistical Design Criteria) انجام شد. بنابراین در آنالیز آماری به روش تاگوچی هدف بهینه‌سازی مقدار  $Q$  بود که  $normE_T$  و  $normC$  به ترتیب انرژی پارگی بهنجارشده (معادله ۴) و مانایی فشاری بهنجارشده (معادله ۵) نمونه آمیزه‌های اسفنج لاستیکی فنر است.

$$Q = \frac{normE_T}{normC} \quad \text{معادله ۳}$$

$$normE_T = \frac{\text{انرژی پارگی هر نمونه}}{\text{انرژی پارگی بیشینه در بین نمونه‌ها}} \quad \text{معادله ۴}$$

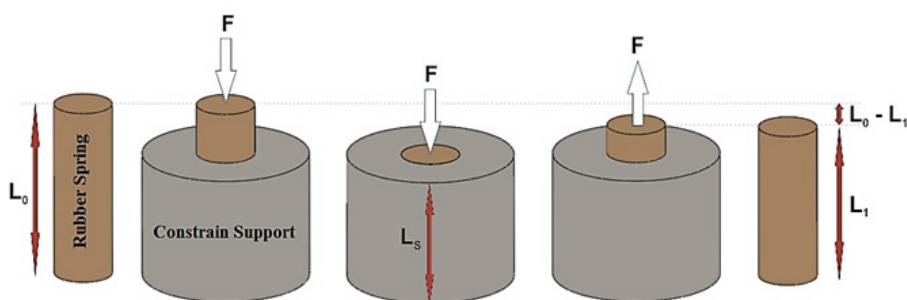
$$normC = \frac{\text{مانایی فشاری هر نمونه}}{\text{مانایی فشاری کمینه در بین نمونه‌ها}} \quad \text{معادله ۵}$$

#### ۲-۴ طراحی آماری آمیزه‌ها

طراحی آماری فرمول‌بندی آمیزه‌های فنر لاستیکی به روش تاگوچی بر اساس تغییر چهار عامل: ۱- درصد وزنی کائوچوی طبیعی در لاستیک آلیاژی پایه (آلیاژ EPDM / NR)، ۲- مقدار اکسید روی، ۳- مقدار دی‌کیومیل

۴۰، قطر ۱۳ mm)، با روش قالب‌گیری فشاری در دستگاه پرس داغ تحت شرایط فشار ۱۵۰ بار، دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان ۶۰ دقیقه تهیه شدند. ساختار اسفنجی نمونه‌های ساخته‌شده بوسیله میکروسکوپ الکترونی پویشی (Scanning Electron Microscope (SEM)) مدل TESCAN VEGA3 و با استفاده از نرم‌افزار image J بررسی شد. تمامی نمونه فنرهای لاستیکی ساخته‌شده بر پایه فرمول‌بندی‌های طراحی آزمایش دارای وزن  $4/1 \pm 0/01 \text{ g/cm}^3$  و چگالی  $0/01 \pm 0/01 \text{ g/cm}^3$  یکسانی بودند.

لازم به ذکر است آزمون مانایی فشاری بر روی نمونه‌ها مطابق دستورالعمل کاربری صنعتی فنر لاستیکی (با سه بار تکرار) انجام پذیرفت. در شکل (۱)، طرح‌واره‌ای از چگونگی انجام آزمون مانایی فشاری ارائه شده است. با توجه به شکل (۱)، نمونه فنرهای لاستیکی آماده‌سازی شده برای آزمون مانایی فشاری در داخل غلاف فلزی استوانه‌ای شکلی به طول  $30 \pm 0/1$  میلی‌متر در دمای محیط فشرده شدند. طول ثانویه نمونه‌ها بلافاصله بعد از حذف فشردگی در زمان‌های ۴، ۶، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۳۱ روز اندازه‌گیری و سپس درصد مانایی فشاری آنی نمونه‌ها در مدت زمان‌های مشخص شده (C) از معادله (۲) محاسبه شد.



شکل ۱. طرح‌واره تجهیزات آزمون مانایی فشاری نمونه فنر لاستیکی

Figure 1. Scheme of compression set test equipment for rubber spring specimens

پراکسید و ۴- مقدار اتیلن گلیکول دی‌متاکریلات در سه سطح انجام شد. سطوح تغییرات در نظر گرفته‌شده برای هر عامل، که در فرایند بهینه‌سازی هم‌زمان خواص پارگی و مانایی فشاری فنر لاستیکی مؤثرند، در جدول (۲) آورده شده است. لازم به ذکر است که انتخاب نوع عوامل مؤثر و سطوح تغییرات آن‌ها بر اساس مراجع علمی صورت پذیرفته است [۲۰].

با توجه به انتخاب سه سطح تغییر برای هر یک از چهار عامل مؤثر، بهینه‌سازی و بررسی اثر این عوامل بر دو خاصیت مقاومت پارگی و مانایی فشاری آمیزه فنر لاستیکی با استفاده از تمام ترکیب‌های ممکن به  $2 \times 3^4 = 162$  آزمایش می‌انجامد. درحالی‌که در این تحقیق استفاده از روش طراحی آماری تاگوچی بر

$$C = \frac{L_0 - L_1}{L_0 - L_s} \times 100 \quad \text{معادله ۲}$$

که  $L_0$  طول اولیه فنر لاستیکی،  $L_1$  طول فنر لاستیکی بلافاصله بعد از حذف فشردگی در زمان‌های مشخص و  $L_s$  طول غلاف فلزی استوانه‌ای شکل و برابر با  $30 \pm 0/1$  میلی‌متر است.

#### ۲-۳ معیار طراحی

افزایش خواص پارگی موجب تغییر نامطلوب و افزایش چشمگیر مانایی فشاری فنر لاستیکی می‌شود. از طرف دیگر، کاهش مانایی فشاری آمیزه فنر لاستیکی، افت مقاومت پارگی را در پی دارد. بنابراین به منظور بهینه‌سازی هم‌زمان لازم است تا طراحی آماری بر مبنای تابع هدفی انجام شود که به عنوان معیار

نیوتن، به ترتیب کمترین و بیشترین نیروی پارگی را دارا بودند. تمامی این سه آمیزه بر پایه لاستیک آلیاژی حاوی ۴۰ درصد وزنی لاستیک NR و ۶۰ درصد وزنی لاستیک EPDM بوده و غلظت عامل پخت رادیکالی (DCP) در آمیزه‌های ۶، ۴ و ۵ به ترتیب افزایش

مبنای معیار طراحی Q، تعداد آزمایش‌ها به ۹ آزمایش کاهش یافت. فرمول‌بندی‌های طراحی شده برای آمیزه فنر لاستیکی به روش تاگوچی در جدول (۳) ارائه شده است. هر آمیزه با یک شماره آزمون مشخص (از ۱ تا ۹) کدگذاری شده است.

جدول ۲. متغیرها و سطوحشان در طرح آماری بهینه‌سازی مقاومت پارگی و مانایی فشاری آمیزه EPDM  
Table 2. Factors and levels considered in the statistical design of the experiments

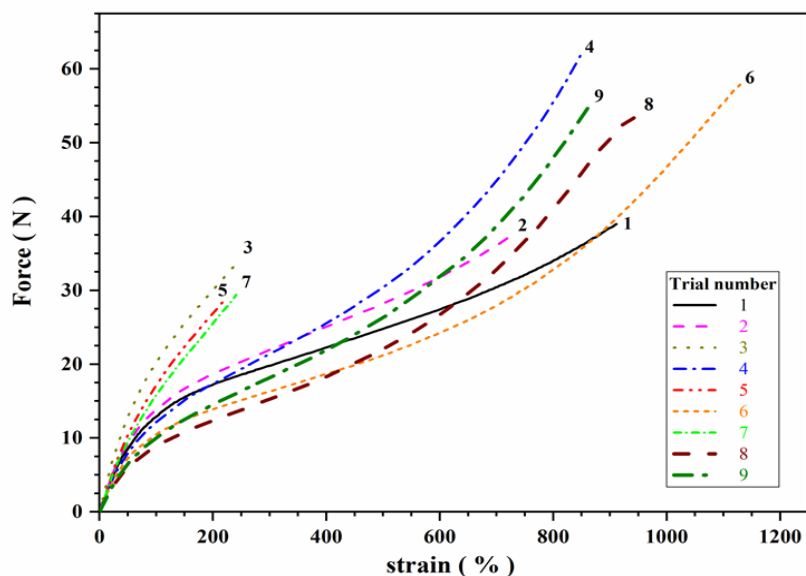
Factors	Additive type	Level 1	Level 2	Level 3
Weight Percent of NR in base rubber	Rubber	20	40	60
Amount of ZnO	Activator	1	2	4
Amount of DCP	Peroxide curing agent	0.5	1	2.5
Amount of EDMA	Coactivator	2	3	4

جدول ۳. طراحی آماری آزمون و فرمول‌بندی‌های فنر لاستیکی به روش تاگوچی  
Table 3. Statistical design of experiments and rubber spring formulations by Taguchi method

Trial number (Samples)	NR (%)	ZnO (phr)	DCP (phr)	EDMA (phr)
1	20	1	0.5	2
2	20	2	1	3
3	20	4	2.5	4
4	40	1	1	4
5	40	2	2.5	2
6	40	4	0.5	3
7	60	1	2.5	3
8	60	2	0.5	4
9	60	4	1	2

یافت. با توجه به نتایج آزمون پارگی (جدول (۴)) و فرمول‌بندی آمیزه‌ها (جدول (۳)) مشاهده می‌شود در آمیزه‌هایی که بر پایه آلیاژهای یکسانی بودند، افزایش غلظت عامل پخت DCP موجب کاهش کرنش‌پذیری آمیزه شد. این رفتار به افزایش میزان پخت و تراکم اتصالات عرضی در آمیزه مربوط می‌شود که ناشی از افزایش غلظت عامل پخت است [۲۰]. مساحت سطح زیر نمودار تغییرات نیروی پارگی بر

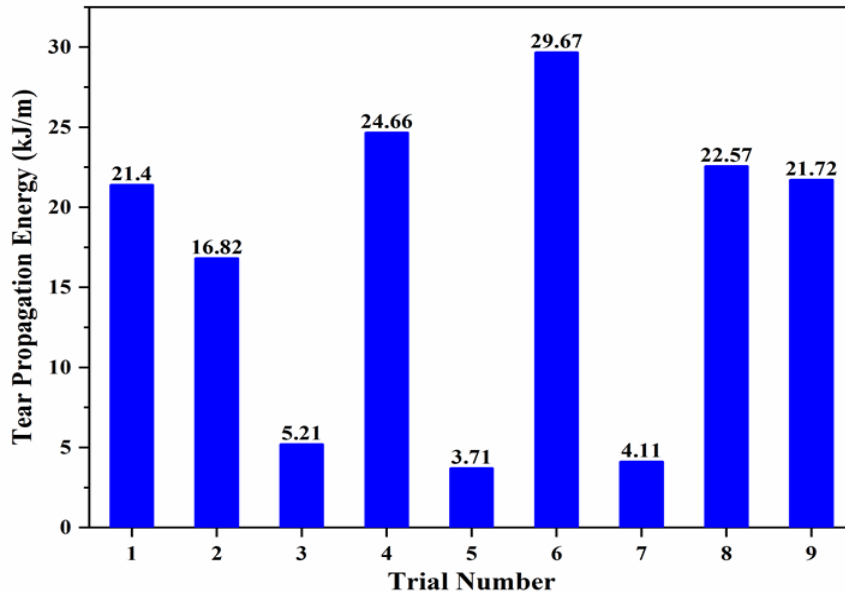
**۳ نتایج و بحث**  
**۳-۱ آزمون پارگی**  
نتایج آزمون پارگی نمونه فرمول‌بندی‌های یاد شده در شکل (۲) و جدول (۴) ارائه شده‌اند. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، نمونه‌های ۵ و ۶ به ترتیب دارای کمترین و بیشترین کرنش‌پذیری پارگی با میزان کرنش ۲۱۸ و ۱۱۲۹ درصد بودند. از طرف دیگر نمونه‌های ۴ و ۵ با تحمل نیروهای پارگی ۲۸/۴۵ و ۶۲/۲۱



شکل ۲. نمودار تغییرات نیروی پارگی برحسب درصد کرنش برای آمیزه‌های فنر لاستیکی  
Figure 2. Diagram of tear force vs. strain of cured rubber spring compounds

جدول ۴. نتایج آزمون‌های پارگی و مانایی فشاری و محاسبه معیار طراحی آماری (Q) برای هر نمونه  
Table 4. The results of tear and compression set tests and calculated statistical design criteria for each sample

Trial number (Samples)	Tear force (N)	Tear strength (N/mm)	Tear strain (%)	Tear energy (kJ/m)	Normalized tear energy (-)	Compression set @ 4 day (%)	Normalized compression set @ 4 day (-)	Statistical design criteria
	-	Ts	-	$E_T$	$\text{norm } E_T = E_T / (29.67)$	C	$\text{norm } C = C / (7.69)$	$Q = \text{norm } E_T / (\text{norm } C)$
	-	-	-	Maximum	Maximum	Minimum	Minimum	Maximum
1	38.990	19.019	911.196	$21.416 \pm 0.047$	$0.722 \pm 0.0016$	$26.603 \pm 0.021$	$3.461 \pm 0.0027$	$0.2085 \pm 0.0003$
2	37.314	18.113	724.046	$16.828 \pm 0.064$	$0.567 \pm 0.0021$	$18.711 \pm 0.013$	$2.434 \pm 0.0017$	$0.2329 \pm 0.0007$
3	34.081	15.562	245.862	$5.208 \pm 0.073$	$0.175 \pm 0.0025$	$7.687 \pm 0.006$	$1 \pm 0.0008$	$0.1755 \pm 0.0024$
4	62.218	32.237	850.496	$24.662 \pm 0.045$	$0.831 \pm 0.0015$	$21.797 \pm 0.008$	$2.836 \pm 0.001$	$0.2931 \pm 0.0004$
5	28.453	14.155	218.289	$3.704 \pm 0.016$	$0.125 \pm 0.0005$	$8.175 \pm 0.005$	$1.063 \pm 0.0007$	$0.1174 \pm 0.0004$
6	57.907	30.003	1129.553	$29.679 \pm 0.059$	$1 \pm 0.002$	$29.989 \pm 0.011$	$3.901 \pm 0.0014$	$0.2563 \pm 0.0005$
7	29.411	15.898	241.129	$4.117 \pm 0.033$	$0.139 \pm 0.0011$	$8.337 \pm 0.01$	$1.085 \pm 0.0013$	$0.1279 \pm 0.0009$
8	53.358	27.790	938.375	$22.579 \pm 0.07$	$0.761 \pm 0.0024$	$25.517 \pm 0.017$	$3.32 \pm 0.0022$	$0.2292 \pm 0.0006$
9	54.675	29.395	860.743	$21.734 \pm 0.05$	$0.732 \pm 0.0017$	$13.087 \pm 0.013$	$1.702 \pm 0.0016$	$0.4301 \pm 0.0006$

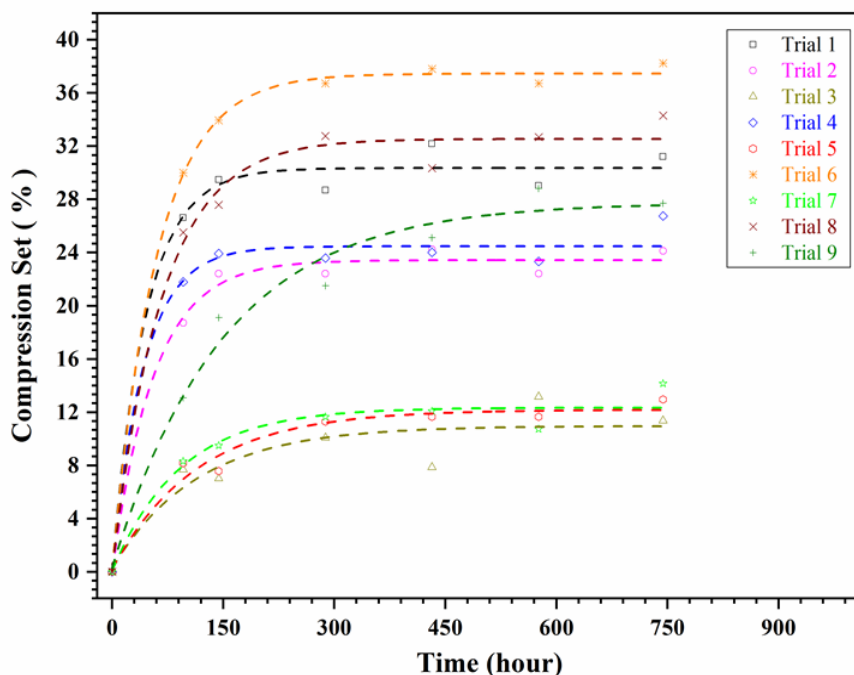


شکل ۳. انرژی پارگی آمیزه‌های فنر لاستیکی مطابق آزمون پارگی با نوع قالب A

Figure 3. Tear propagation energy of cured rubber spring compounds prepared using die type A

نتایج حاصل بیان‌گر خواص و رفتار رشد پارگی نمونه‌ها است. مقادیر انرژی رشد پارگی نمونه‌های طراحی شده در جدول (۴) و شکل (۳) آورده شده‌اند. همانطور که در شکل (۳) به خوبی مشاهده می‌شود، نمونه‌های ۵ و ۶ با انرژی پارگی ۳/۷۱ و ۲۹/۶۷ KJ/mm، به ترتیب کمترین و بیشترین انرژی رشد پارگی را دارا بودند. افزایش ۵ برابری مقدار عامل پخت DCP در آمیزه شماره ۵ نسبت به آمیزه شماره ۶ (از ۰/۵ phr به ۲/۵ phr) سبب شد تا با افزایش میزان پخت و

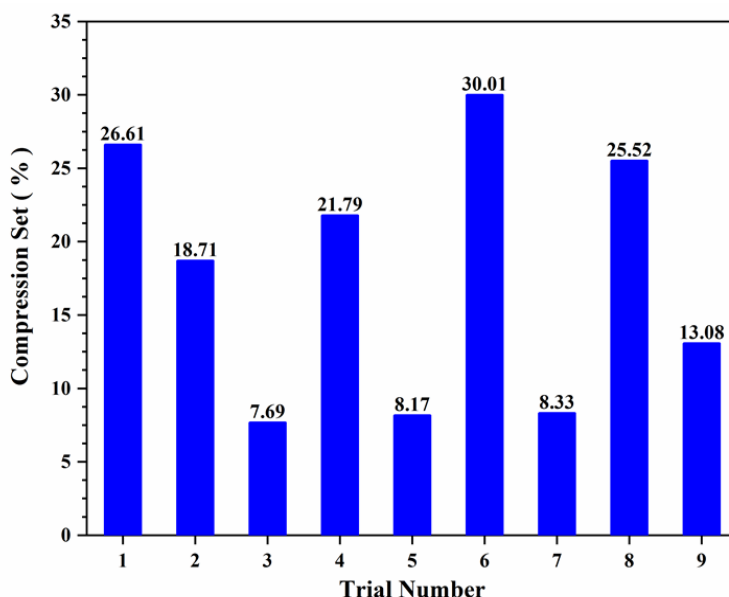
حسب درصد کرنش معیاری از انرژی پارگی است. استفاده از انرژی پارگی به جای استحکام پارگی طراحی آمیزه معیار جامع‌تری است؛ زیرا انرژی پارگی از هر دو خاصیت کرنش و نیروی پارگی تأثیر می‌پذیرد و بهینه‌سازی آن منجر به بهبود هر دو خاصیت در آمیزه می‌شود [۲۸]. در حقیقت مقاومت پارگی آمیزه لاستیکی علاوه بر استحکام پارگی با کرنش‌پذیری آن آمیزه رابطه مستقیم دارد [۲۰]. از آنجایی که آزمون پارگی بر روی نمونه‌های هندسه A انجام پذیرفت،



شکل ۴. نمودار تغییرات درصد مانایی فشاری برحسب زمان آمیزه‌های فنر لاستیکی

Figure 4. Diagram of compression set vs. time of cured rubber spring compounds





شکل ۵. مانایی فشاری آمیزه‌های فنر لاستیکی در زمان آزمون ۹۶ ساعت  
Figure 5. Compression set of cured rubber spring compounds in 96 hours

مقادیر مانایی فشاری به‌دست‌آمده برای آمیزه‌های فنر لاستیکی در زمان آزمون ۹۶ ساعت (۴ روز) در جدول (۴) و شکل (۵) آورده شده‌اند. از این مقادیر در طراحی آمیزه‌های فنر لاستیکی به روش تاگوچی استفاده شد. با توجه به شکل (۵)، نمونه‌های ۳ و ۶ با درصد مانایی فشاری ۷/۶۹ و ۳۰/۰۱ درصد، به ترتیب کمترین و بیشترین مانایی فشاری را دارا بودند. افزایش ۵ برابری مقدار DCP در آمیزه شماره ۳ نسبت به آمیزه شماره ۶ (از ۰/۵ phr به ۲/۵ phr) سبب کاهش مانایی فشاری آن آمیزه به میزان قابل توجه و مطلوبی شد. لاستیک NR در مقایسه با لاستیک EPDM از مانایی فشاری کمتری برخوردار است [۲۸]. با این وجود، درصد بالاتر لاستیک NR در فرمول‌بندی شماره ۶ (۴۰ درصد) نسبت به شماره ۳ (۲۰ درصد)، قادر به جبران اختلاف ۴ برابری مانایی فشاری بین این دو آمیزه نبود. این امر نشان داد که عامل DCP در مقایسه با عامل NR بر خواص مانایی فشاری آمیزه‌های فنر لاستیکی بسیار مؤثرتر است.

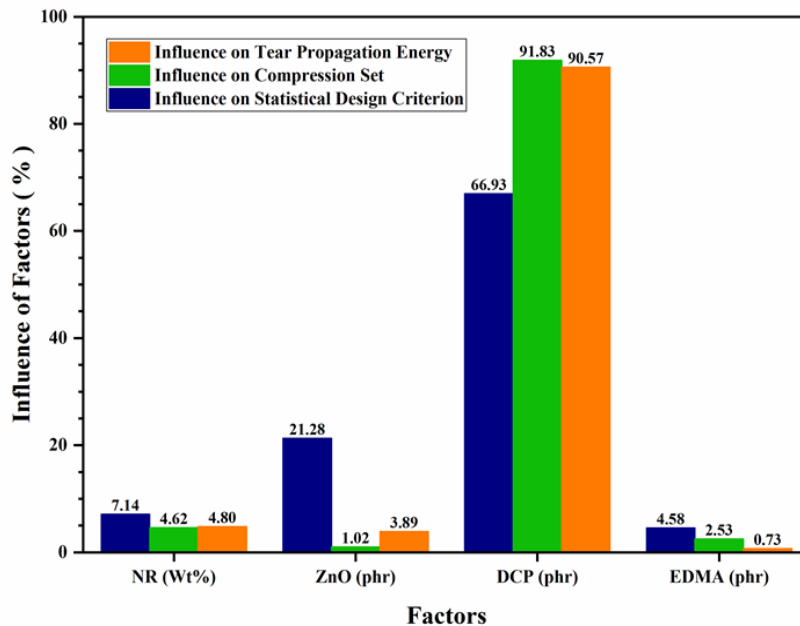
### ۳-۳ اثر عوامل طراحی آماری بر خواص آمیزه فنر لاستیکی

به منظور تعیین و بررسی اثر متغیرهای: درصد وزنی NR، مقدار ZnO، مقدار DCP و مقدار EDMA، به عنوان عوامل مؤثر انتخابی در طراحی آماری آمیزه‌های فنر لاستیکی، لازم بود تا داده‌های آزمون‌های پارگی و مانایی فشاری به طور مستقل نیز توسط نرم‌افزار تحلیل آماری مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) در شکل (۶) ارائه شده است. در شکل (۶)، درصد تأثیر هر عامل بر انرژی پارگی، مانایی

تراکم اتصالات عرضی، کرنش‌پذیری و استحکام پارگی آن آمیزه به شدت افت کند. به طوری که میزان انرژی رشد پارگی آمیزه شماره ۵ حدود یک‌هشتم انرژی رشد پارگی آمیزه شماره ۶ بود.

### ۳-۲ آزمون مانایی فشاری

روند تغییرات درصد مانایی فشاری بر حسب زمان برای آمیزه‌های طراحی شده در شکل (۴) نشان داده شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود، تغییرات مانایی فشاری بر حسب زمان برای تمامی نمونه‌ها از الگوی نمایی پیروی کرد و درصد مانایی فشاری پس از گذشت ۳۰۰ ساعت تقریباً ثابت شد. بیشترین میزان مانایی فشاری ۳۷٪ پس از ۳۰۰ ساعت به آمیزه شماره ۶ مربوط بود. باید توجه داشت که مانایی فشاری رفتاری نامطلوب برای آمیزه فنر لاستیکی است. بر خلاف نتایج آزمون مانایی فشاری، این آمیزه بالاترین میزان انرژی رشد پارگی را معادل با ۲۹/۶۷ KJ/m داشت که رفتاری مطلوب برای آمیزه فنر لاستیکی است. آمیزه‌های شماره ۳، ۵ و ۷ حاوی ۲/۵ قسمت وزنی DCP از پایین‌ترین میزان مانایی فشاری (به ترتیب ۱۰/۳۵، ۱۱/۹۵ و ۱۲/۲۵ درصد) برخوردار بودند. بالا بودن مقدار DCP موجب افزایش میزان پخت و در نتیجه افزایش شدید توانایی آمیزه به بازیابی حداکثری طول فشرده‌گی اعمال شده در آزمون مانایی فشاری می‌شود [۲۰، ۲۱]. از طرف دیگر مشاهده شد که با آن که محتوی لاستیک NR در فرمول‌بندی سه آمیزه شماره ۳، ۵ و ۷ به ترتیب به میزان ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد افزایش یافته است، مقادیر مانایی فشاری و انرژی پارگی آمیزه‌ها تغییر چندانی نکردند. این امر نشان داد که تغییرات مقدار DCP در مقایسه با تغییرات مقدار NR بر خواص مانایی فشاری و مقاومت پارگی آمیزه‌های فنر لاستیکی مؤثرتر است.



شکل ۶. نمودار درصد اثر پارامترهای طراحی بر خواص پارگی، مانایی فشاری و معیار Q  
Figure 6. Diagram of influence of factors on tear energy, compression set, and Q criterion

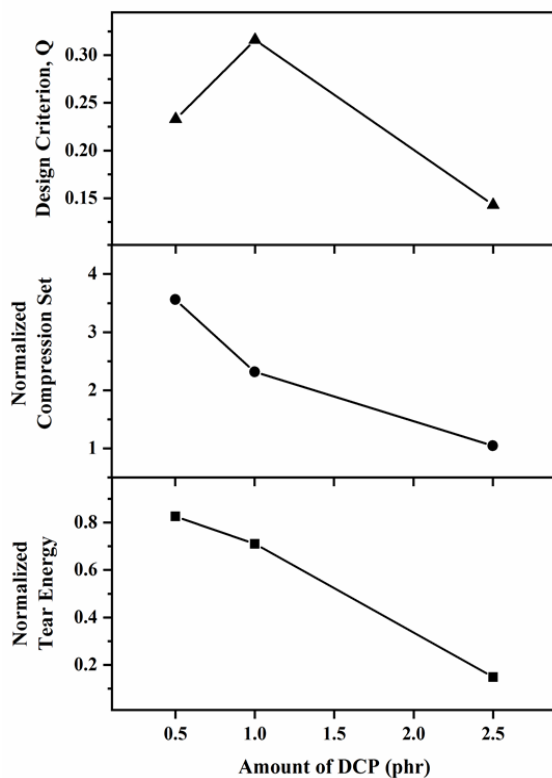
مقدار EDMA به عنوان یک کمک‌فعال‌کننده کمترین تأثیر را بر انرژی پارگی (۰/۷۳ درصد)، مانایی فشاری (۲/۵۳) و معیار طراحی آماری Q (۴/۵۸) دارد.

### ۳-۴ اثر تغییرات سطح عوامل بر خواص آمیزه فنر لاستیکی

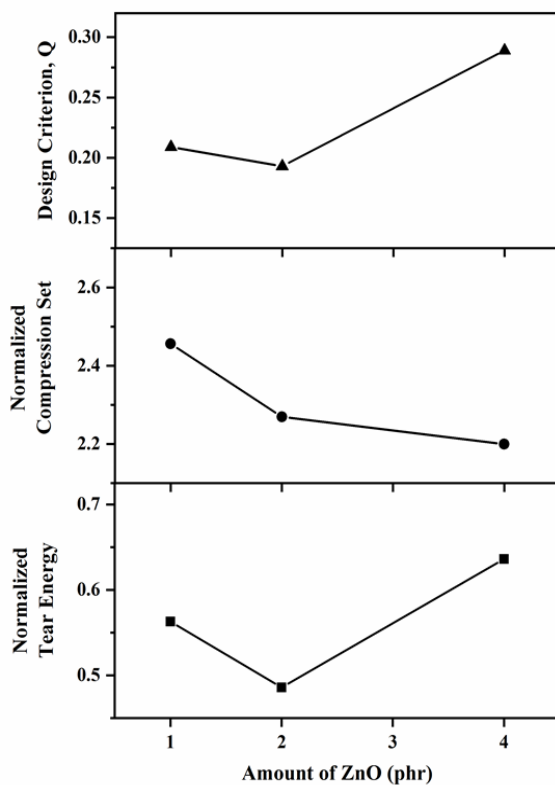
شکل (۷) تأثیر میزان عامل DCP بر خواص پارگی، مانایی فشاری و معیار Q را نشان می‌دهد. این عامل بالاترین تأثیر را در طراحی آماری آمیزه فنر لاستیکی به روش تاگوچی دارد. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار DCP در آمیزه، تغییرات خاصیت مقاومت پارگی نرمال‌شده و خاصیت مانایی فشاری نرمال‌شده روند کاهشی داشت، در صورتی که در مورد معیار طراحی به روش تاگوچی، تغییرات عوامل Q ابتدا روندی افزایشی و سپس روندی کاهشی داشت. روند نامطلوب کاهش انرژی پارگی و افزایش مطلوب مانایی فشاری با افزایش غلظت DCP، سبب می‌شود که غلظت بهینه DCP به سادگی مشخص نشود. مقدار مطلوب غلظت DCP بر مبنای انرژی پارگی ۰/۵ phr در حالی که بر مبنای مانایی فشاری ۲/۵ phr بود. اما معیار طراحی Q مقداری از DCP را پیشنهاد می‌دهد که بر مبنای آن آمیزه‌ای با حد مطلوبی از هر دو خاصیت انرژی پارگی و مانایی فشاری (بیشترین مقدار معیار Q) ساخته شود. بیشترین مقدار Q که همان حد مطلوب است، در سطح ۱ phr از عامل DCP به دست آمد.

شکل (۸) تأثیر میزان عامل ZnO بر خواص پارگی، مانایی فشاری و معیار Q را نشان می‌دهد. با افزایش مقدار ZnO در آمیزه، تغییرات خاصیت مقاومت پارگی و معیار Q ابتدا روندی کاهشی و سپس روندی افزایشی و

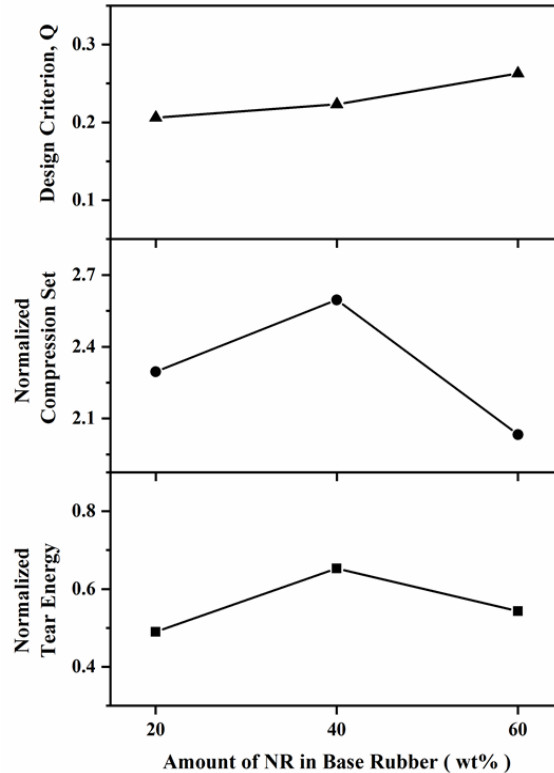
فشاری و معیار طراحی آماری Q با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود هنگام بهینه‌سازی تنها یکی از خواص مقاومت پارگی یا مانایی فشاری آمیزه، متغیرهای درصد وزنی NR، مقدار ZnO، مقدار DCP و مقدار EDMA با الگو و سهم تأثیر مشابهی بر این خواص مؤثر هستند. اما در حالت بهینه‌سازی هم‌زمان هر دو خاصیت (استفاده از معیار طراحی Q)، این متغیرها با الگو و سهم متفاوتی بر خواص تأثیر دارند. عامل مقدار DCP نسبت به دیگر عوامل بیشترین تأثیر را بر انرژی پارگی (۹۰/۵۷٪)، مانایی فشاری (۹۱/۸۳٪) و معیار Q (۶۶/۹۳٪) دارد. مقدار عامل DCP به طور مستقیم بر تعداد اتصالات عرضی اثر می‌گذارد. چگالی اتصالات عرضی بالا ناشی از غلظت بالای DCP موجب کاهش مطلوب مانایی فشاری و کاهش نامطلوب انرژی پارگی فنر لاستیکی می‌شود. بنابراین نیاز است غلظت عامل DCP به گونه‌ای بهینه‌سازی شود تا آمیزه فنر لاستیکی به طور هم‌زمان از مانایی فشاری مطلوب و انرژی پارگی کافی برخوردار شود. نتایج آنالیز ANOVA به خوبی نشان می‌دهد که عوامل دیگر (درصد وزنی NR، مقدار ZnO و مقدار EDMA) در مقایسه با مقدار DCP تأثیر ناچیزی بر انرژی پارگی و مانایی فشاری دارند و تقریباً تأثیر این عوامل قابل چشم‌پوشی است. اما در مورد معیار Q که شامل هر دو خاصیت انرژی پارگی و مانایی فشاری است، مشاهده می‌شود که تمامی عوامل مقدار DCP، مقدار ZnO، درصد وزنی NR و مقدار EDMA در طراحی فرمول‌بندی آمیزه با سهم قابل ملاحظه‌ای (به ترتیب ۶۶/۹۳، ۲۱/۲۸، ۷/۱۴ و ۴/۵۸ درصد) تأثیرگذار هستند. مشاهده می‌شود که عامل



شکل ۷. نمودار تأثیر تغییرات سطح عامل DCP بر خواص پارگی، مانایی فشاری و معیار Q  
 Figure 7. Diagram of influence of DCP levels on tear energy, compression set, and Q criterion



شکل ۸. نمودار تأثیر تغییرات سطح عامل ZnO بر خواص پارگی، مانایی فشاری و معیار Q  
 Figure 8. Diagram of influence of ZnO levels on tear energy, compression set, and Q criterion



شکل ۹. نمودار تراز برای تمامی چهار پاسخ  
Figure 9. The overlaid contour plot of all four responses

مشاهده می‌شود درصد وزنی NR سومین عامل مؤثر در بهینه‌سازی فرمول‌بندی آمیزه فنر لاستیکی بر مبنای معیار Q است.

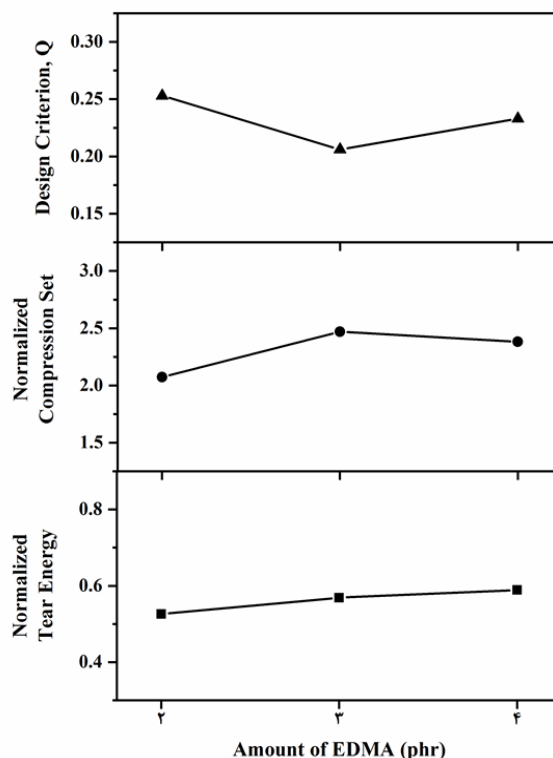
شکل (۱۰) تأثیر میزان عامل EDMA بر خواص پارگی، مانایی فشاری و معیار Q را نشان می‌دهد. افزایش مقدار EDMA در آمیزه، مقاومت پارگی آمیزه‌ها را افزایش و مانایی فشاری آنها را ابتدا افزایش و سپس به میزان کمی کاهش داد. تغییرات معیار طراحی Q با افزایش مقدار EDMA ابتدا روندی کاهشی و سپس افزایشی را دنبال کرد. با توجه به شکل (۶)، سهم تأثیر عامل EDMA بر خواص مقاومت پارگی و مانایی فشاری آمیزه فنر لاستیکی بسیار ناچیز و قابل چشم‌پوشی است. درحالی‌که سهم تأثیر EDMA بر معیار Q و بهینه‌سازی فرمول‌بندی آمیزه فنر لاستیکی غیر قابل چشم‌پوشی است. بیشترین مقدار معیار Q در آمیزه حاوی ۲ phr از عامل EDMA به‌دست می‌آید.

### ۳-۵ آنالیز ANOVA و فرمول‌بندی بهینه بر اساس معیار Q

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل واریانس داده‌ها (ANOVA) توسط نرم‌افزار تحلیل آماری در جدول (۵) ارائه شده است. در این جدول درجه آزادی (Degree of Freedom) (DOF)، مجموع مربعات (Sum of Squares)، واریانس (Variance)، جمع خالص اثر (Pure Sum) و درصد مشارکت هر عامل ((%P) Participation Percentage) با ضریب اطمینان (Confidence Level) ۹۰ درصد

تغییرات خاصیت مانایی فشاری روندی کاهشی داشت. تغییرات خواص در شکل (۸) نشان داد که بیشترین میزان مقاومت پارگی و کمترین میزان مانایی فشاری به عنوان مقدار مطلوب در آمیزه‌های حاوی ۴ phr از عامل ZnO به‌دست می‌آیند. همچنین مشاهده شد که آمیزه‌های حاوی ۴ phr از عامل ZnO بیشترین مقدار معیار طراحی Q را دارا هستند. نتایج آنالیزهای آماری در شکل (۶) نشان می‌دهند که عامل ZnO بعد از عامل DCP تأثیر قابل قبولی بر بهینه‌سازی معیار Q و طراحی آماری آمیزه فنر لاستیکی دارد.

شکل (۹) تأثیر میزان درصد وزنی NR بر خواص پارگی، مانایی فشاری و معیار Q را نشان می‌دهد. با افزایش درصد وزنی NR در آمیزه فنر لاستیکی، تغییرات خاصیت مقاومت پارگی و مانایی فشاری ابتدا روندی افزایشی و سپس روندی کاهشی داشت؛ در صورتی که در مورد معیار Q روند تغییرات افزایشی بود. تغییرات مقاومت پارگی در شکل (۹) نشان داد که بیشترین میزان مقاومت پارگی به عنوان حد مطلوب در آمیزه‌های حاوی مقدار ۴۰ درصد وزنی از لاستیک NR به‌دست می‌آید. از طرفی کمترین میزان مانایی فشاری به عنوان حد مطلوب در مقدار ۶۰ درصد وزنی از لاستیک NR حاصل می‌شود. درحالی‌که بیشترین مقدار معیار Q به عنوان معیار بهینه‌سازی آماری آمیزه فنر لاستیکی در آمیزه حاوی ۶۰ درصد وزنی از لاستیک NR به‌دست می‌آید. همانطور که در شکل (۶)



شکل ۱۰. نمودار تأثیر تغییرات سطح عامل EDMA بر خواص پارگی، مانایی فشاری و معیار Q  
Figure 10. Diagram of influence of EDMA levels on tear energy, compression set, and Q criterion

شامل عامل‌های پخت رادیکالی DCP و فعال‌کننده اکسید فلزی ZnO، نقشی چشمگیر و اثری کلیدی در بهینه‌سازی فرمول‌بندی آمیزه فنر لاستیکی دارند. به این ترتیب می‌توان از طریق کنترل سامانه پخت، هر دو خاصیت انرژی پارگی و مانایی فشاری (بیشترین مقدار معیار Q) را به طور هم‌زمان و در حد مطلوبی

مشخص می‌شود [۲۷]. با توجه به جدول (۵) و شکل (۶) واضح است که تمامی عوامل در نظر گرفته شده برای بهینه‌سازی فرمول‌بندی فنر لاستیکی به روش تاگوچی بر مبنای معیار Q، عواملی تأثیرگذار بودند. مقدار DCP، مقدار ZnO، درصد وزنی NR و مقدار EDMA به ترتیب بالاترین درصد مشارکت و سهم اثر را بر معیار

جدول ۵. نتایج ANOVA بر اساس معیار Q  
Table 5. ANOVA results based on Q criterion

Factors	DOF (f)	Sum of Sqrs. (S)	Variance (V)	F - Ratio (F)	Pure Sum (S')	Participation percentage P (%)
Weight percent of NR in the base rubber	2	0.015	0.007	175.402	0.015	7.142
Amount of ZnO	2	0.045	0.022	4096.037	0.045	21.279
Amount of DCP	2	0.143	0.071	12881.711	0.143	66.93
Amount of EDMA	2	0.009	0.004	881.786	0.009	4.576
Other / Error	18	0.001-	-	-	-	0.07
Total	26	0.213	-	-	-	%100

بهبود بخشید. فرمول‌بندی بهینه پیشنهادی برای آمیزه فنر لاستیکی از روش تاگوچی و تحلیل آماری داده‌های Q در جدول

Q داشتند. در جدول (۵)، درصد مشارکت این عوامل به ترتیب، ۴/۵۸، ۲۱/۲۸، ۶۶/۹۳ و ۷/۱۴ درصد بود. این نتایج نشان داد که بهینه‌سازی اجزای سامانه پخت،

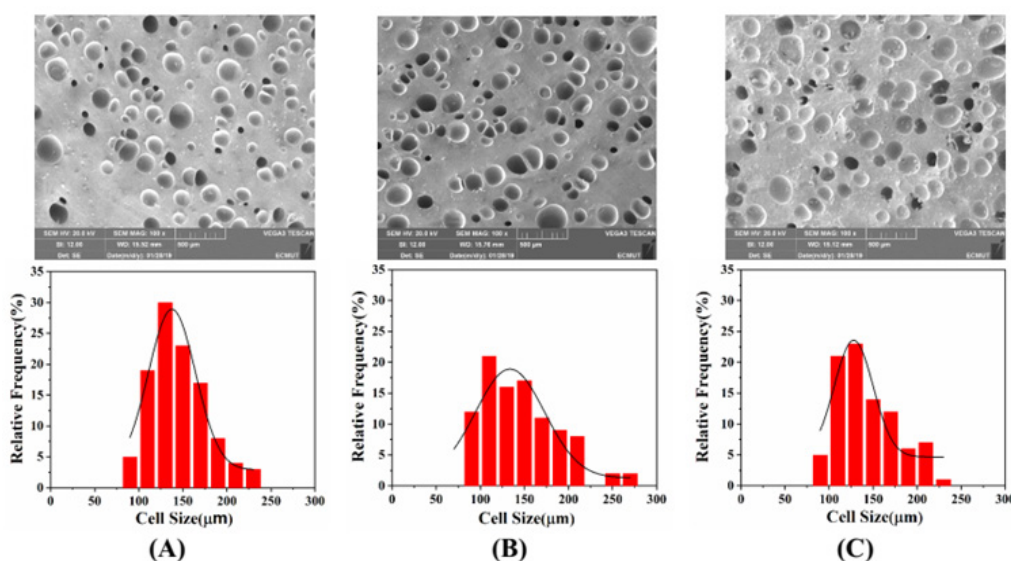
جدول ۶. فرمول‌بندی بهینه پیشنهادی بر مبنای معیار Q در روش تاگوچی  
Table 6. Optimal formulation proposed by Taguchi method based on Q criterion

Factors	Level	Level Description
Amount of NR in the base rubber	3	60 wt% of NR and 40 wt% of EPDM in base rubber
Amount of ZnO	3	4 phr
Amount of DCP	2	1 phr
Amount of EDMA	1	2 phr

به‌دست آمده است. در نتیجه مقدار Q به‌دست آمده از روش تجربی با مقدار پیش‌بینی‌شده در روش تاگوچی مطابقت دارد.

با توجه به شکل (۲) و (۴)، نمونه فنرهای لاستیکی ۳ و ۶ نسبت به نمونه ۹ (فرمول‌بندی بهینه) از خواص بسیار متمایزی برخوردار بودند. در نمونه بهینه هر دو خاصیت مانایی فشاری و مقاومت پارگی دارای مقادیر مطلوبی بودند. در آمیزه ۳ خاصیت مانایی فشاری بسیار خوب است اما مقاومت پارگی قابل قبولی ندارد. همچنین آمیزه ۶ از مقاومت پارگی بالایی برخوردار است ولی مانایی فشاری آن، کارآمد نیست. ریخت‌شناسی سلولی نمونه‌های مذکور با استفاده از آزمون SEM بررسی و نتایج حاصل از پردازش تصاویر به صورت نمودارهای میله‌ای در شکل (۱۱) ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود فراوانی اندازه سلول در تمامی نمونه‌ها در بازه ۸۰ تا ۲۵۰ میکرومتر بود. در جدول (۷) مشاهده می‌شود که اندازه سلولی با بیشینه

(۶) ارائه شده است. این فرمول‌بندی بر پایه لاستیک آلیاژی حاوی ۴۰ درصد وزنی لاستیک EPDM و ۶۰ درصد وزنی لاستیک NR بود. لاستیک NR در مقایسه با لاستیک EPDM از مقاومت پارگی بالاتری برخوردار است و در نتیجه افزایش غلظت لاستیک NR در لاستیک آلیاژی، مقاومت پارگی آمیزه فنر لاستیکی را بهبود می‌بخشد [۲۸]. به منظور بررسی اعتبار نتایج پیش‌بینی‌شده در روش تاگوچی، نمونه فنر لاستیکی با فرمول‌بندی بهینه مورد آزمون مانایی فشاری و مقاومت پارگی قرار گرفت و مقدار معیار Q برای آن محاسبه شد. مقایسه نتایج جدول‌های (۶) و (۴) نشان داد که فرمول‌بندی بهینه پیش‌بینی‌شده برای آمیزه فنر لاستیکی با فرمول‌بندی آزمایش ۹ جدول طراحی تاگوچی مطابقت دارد. نتایج تحلیل آماری پیش‌بینی کرد که مقدار معیار Q برای فرمول‌بندی بهینه برابر  $0.427 \pm 0.002$  (با ضریب اطمینان ۹۰٪) است. در جدول (۴) برای آمیزه شماره ۹ معیار Q،  $0.4301 \pm 0.0006$



شکل ۱۱. ریخت‌شناسی سلولی فنر لاستیکی با فرمول‌بندی‌های: (A) ۶، (B) ۹ و (C) ۳  
Figure 11. Cell morphology of rubber spring formulations: (A) 6, (B) 9, and (C) 3

جدول ۷. نتایج مطالعات آماری اندازه سلولی  
Table 7. The results of statistical studies of cell size

Trial number	Cell size with a maximum frequency ( $\mu\text{m}$ )	$D_w$ ( $\mu\text{m}$ )	$D_n$ ( $\mu\text{m}$ )	$\text{PDI} = D_w/D_n$
3	128	150	142	1.06
6	138	152	145	1.04
9	134	158	146	1.08

تأثیرگذار هستند. این نتایج به خوبی نشان دادند که هر دو خاصیت انرژی پارگی و مانایی فشاری، از طریق کنترل سامانه پخت، به طور هم‌زمان در حد مطلوبی بهبود می‌یابند. ریخت‌شناسی ساختار سلولی فنر لاستیکی نشان داد که ساختار اسفنجی نمونه‌ها تا حد زیادی نزدیک به یکدیگر است. فرمول‌بندی بهینه که با فرمول‌بندی آزمایش ۹ جدول طراحی تاگوچی مطابقت داشت، حاوی ۶۰٪ وزنی NR و ۱، ۴ و ۲ phr به ترتیب از عامل‌های ZnO، DCP و EDMA بود. نتایج تحلیل آماری، مقدار Q تحت شرایط بهینه را برابر  $0.427 \pm 0.002$  پیش‌بینی کرد. میانگین مقدار تجربی Q برای نمونه بهینه برابر  $0.4301 \pm 0.0006$  به دست آمد. نتایج به دست آمده حاکی از مطابقت خوب تحلیل‌های نظری و نتایج تجربی بود و کارآمدی روش به‌کاررفته را تأیید کرد. طراحی آماری آمیزه با تعریف معیارهایی مانند Q، در راستای بهینه‌سازی خواص با رفتار متضاد، روشی کاربردی و اقتصادی را در اختیار صنایع لاستیک قرار می‌دهد.

فراوانی در نمونه‌های ۳، ۶ و ۹ به ترتیب ۱۲۸، ۱۳۴ و ۱۳۸ میکرومتر بود. اما مقادیر متوسط عددی اندازه سلولی ( $D_n$ )، متوسط وزنی اندازه سلولی ( $D_w$ ) و شاخص بس‌پراکندگی اندازه سلولی (Polydispersity Index of Cell Size (PDI)) هر سه نمونه، تفاوت خیلی کمی با یکدیگر داشتند. در نتیجه می‌توان ساختار اسفنجی هر سه نمونه را نزدیک به یکدیگر در نظر گرفت.

#### ۴ نتیجه‌گیری

در این پژوهش بهینه‌سازی فرمول‌بندی آمیزه فنر لاستیکی بر مبنای نسبت مقاومت پارگی به مانایی فشاری (معیار طراحی Q) انجام شد. استفاده از معیار Q در روش تاگوچی منجر به طراحی آمیزه‌ای شد که به طور هم‌زمان حد قابل قبولی از بیشینه مقاومت پارگی در ازای کمینه‌ای از مانایی فشاری را برای فنر لاستیکی تأمین نماید. نتایج تجزیه و تحلیل ANOVA نشان داد که عوامل مقدار DCP، مقدار ZnO، درصد وزنی NR و مقدار EDMA به ترتیب با سهم مشارکت ۶۶/۹۳، ۲۱/۲۸، ۷/۱۴ و ۴/۵۸ درصد در تعیین فرمول‌بندی آمیزه بهینه

## مراجع

- [1] Moulton A., Turner, P., Rubber Springs for Vehicle Suspension, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Automobile Division, 10 (1), 17-41, 1956.
- [2] Mullins L., Engineering with Rubber, Rubber Chemistry and Technology, 59 (3), 69-83, 1986.
- [3] Politopoulos I., Pham H. K., Floor Spectra of Mixed Base Isolated Structures, Bulletin of Earthquake Engineering, 9 (4), 1115-1135, 2011.
- [4] Luo R., Wu W., Mortel W., A Method to Predict the Heat Generation in a Rubber Spring Used in the railway Industry, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 219 (4), 239-244, 2005.
- [5] Derham C., Kelly J., Thomas A., Nonlinear Natural Rubber Bearings for Seismic Isolation, Nuclear Engineering and Design, 84 (3), 417-428, 1985.
- [6] Luo R., Wu W., Fatigue Failure Analysis of Anti-Vibration Rubber Spring, Engineering Failure Analysis, 13 (1), 110-116, 2006.
- [7] Haberstroh E., Opdenwinkel K., Physical Foaming of EPDM and NBR in the Injection Moulding Process, Kautschuk Und Gummi Kunststoffe, 61 (5), 254, 2008.
- [8] Rodríguez-Pérez M., Crosslinked Polyolefin Foams: Production, Structure, Properties, and Applications. In Crosslinking in Materials Science, Springer: 2005; pp 97-126.
- [9] Velasco J., Antunes M., Ayyad O., López-Cuesta J., Gaudon P., Saiz-Arroyo C., Rodríguez-Pérez M., De Saja J., Foaming Behaviour and Cellular Structure of LDPE/Hectorite Nanocomposites, Polymer, 48 (7), 2098-2108, 2007.
- [10] Lee L. J., Zeng C., Cao X., Han X., Shen J., Xu G., Polymer Nanocomposite Foams, Composites Science And Technology, 65 (15-16), 2344-2363, 2005.
- [11] Antunes M., Realinho V., Velasco J., Foaming Behaviour, Structure, and Properties of Polypropylene Nanocomposites Foams, Journal of Nanomaterials, 2010, 4, 2010.
- [12] Zeng C., Han X., Lee L. J., Koelling K. W., Tomasko D. L., Polymer-Clay Nanocomposite Foams Prepared Using Carbon Dioxide. Advanced materials, 15 (20), 1743-1747, 2003.
- [13] Di Y., Iannace S., Maio E. D., Nicolais L., Poly (lactic Acid)/Organoclay Nanocomposites: Thermal, Rheological Properties and Foam Processing, Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 43 (6), 689-698, 2005.
- [14] Hopmann C., Lemke F., Nguyen Binh Q., Foaming of EPDM with Water as Blowing Agent in Injection Molding, Journal of Applied Polymer Science, 133 (27), 2016.
- [15] Lawindy A. M. Y. E., El-Kade K. M. A., Mahmoud W. E., Hassan H. H., Physical Studies of foamed Reinforced Rubber Composites Part I. Mechanical Properties of foamed ethylene-Propylene-Diene Terpolymer and Nitrile-Butadiene Rubber Composites, Polymer International, 51 (7), 601-606, 2002.
- [16] Dutta A., Cakmak M., Foaming of Vulcanized PP/EPDM Blends Using Chemical Blowing Agents, Rubber Chemistry And Technology, 65 (4), 778-791, 1992.
- [17] Shao L., Ji Z.-Y., Ma J.-Z., Xue C.-H., Ma Z.-L., Zhang J., The Synergy of Double Cross-Linking Agents on the Properties of Styrene Butadiene Rubber Foams, Scientific Reports, 6, 36931, 2016.
- [18] Zakaria Z., Ariff Z. M., Tay L. H., Sipaut C. S., Effect of Foaming Temperature on Morphology and Compressive Properties of Ethylene Propylene Diena Monomer Rubber (EPDM) Foam, Malaysian Polymer Journal, 2 (2), 22-30, 2007.
- [19] Bayat H., Fasihi M., Curing Characteristics and Cellular Morphology of Natural Rubber/Silica composite Foams, Polymer Bulletin, 1-14, 2019.
- [20] Hewitt N., Ciullo P., Compounding Precipitated Silica in Elastomers: Theory and Practice, William Andrew, 2007.
- [21] Khabiri M., Jafari S. H., Pourhossainy M. R., Khonakdar H. A., Alteration of Matrix Curing Characteristics and Its Role in Extension of Hydrodynamic Equation for Predicting Viscoelastic Properties of Nitrile Rubber/Silica Nanocomposites, Polymers for Advanced Technologies, 29 (8), 2381-2391, 2018.
- [22] Babae S., Monjezi Z., Tagharoodi M. S., Optimizing the Flexural Strength of Epoxy Resin Using Taguchi Statistical Design Method. Journal of Energetic Materials, 4 (28), 11-18, 2016.



- [23] Babae S., Monjezi Z., Tagharoodi M. S., Preparation of Epoxy-Based Insulator and Optimization of Its Thermal Property by Taguchi Robust Design Method in Double Base Propellant Grain Application, Iranian Polymer Journal, 26 (3), 213-220, 2017.
- [24] Babae S., Monjezi Z., Tagharoodi M. S., Statistical Taguchi Optimization for Preparation and Adhesion Evaluation of Epoxy Insulator to the Surface of Double Base Propellant Grain. Journal of New Developments in Chemistry, 2 (1), 38-47, 2018.
- [25] Pourmortazavi S. M., Babae S., Marashianpour Z., Kohsari I., Stabilizing of Magnesium Powder by Microencapsulation With Azidodeoxy Cellulose Nitrate, Progress in Organic Coatings, 81, 107-115, 2015.
- [26] Hosseini S., Pourmortazavi S., Fathollahi M., Orthogonal Array Design for the Optimization of Silver Recovery From Waste Photographic Paper, Separation Science and Technology, 39 (8), 1953-1966, 2005.
- [27] Roy R. K., A Primer on the Taguchi Method, Society of Manufacturing Engineers, Michigan, 2nd ed, 129-183, 2010.
- [28] Hofmann W., Technische Elastomere, Kunststoffe, 77 (10), 1057-1064, 1987.