

Research Article



DOI: 10.22034/ijche.2023.381205.1271



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International license (CC BY-NC-ND 4.0).

## Relationship between Screw Configuration and Physio-Mechanical and Structural Properties of Devulcanized Waste Tires

H. Yazdani<sup>1\*</sup>, H. Fakhari<sup>2</sup>, V. Garshasbi<sup>3</sup>

1- Assistant Professor of Chemical Engineering, Payam Noor University, Tehran, Iran

2- M. Sc. Student of Chemical Engineering, Payam Noor University, Tehran, Iran

3- Assistant Professor of Chemical Engineering, Iran University of Science and Technology

Email: h.yazdani@pnu.ac.ir

### Abstract

*One of the most concernative challenges of the current century is the disposal of waste tires; recycling them by devulcanization can be a solution to environmental problems. To find the relationship between the screw configuration and the properties of the samples, some new elements with different angles and shears were designed, and installed on the extruder. Then, 15 rubber samples were devulcanized by the extruder and Physical-mechanical tests were performed on them. To determine what process conditions will cause favorable mechanical properties in samples. During the tests, it was determined that temperature will be the most influential parameter in the devulcanization process. It was found that the highest percentage of devulcanization occurs at lower temperatures and medium and high shear rates. In this condition, the weight fraction of sol will be at its maximum value, which increases the processability of the samples. While increasing the temperature and decreasing the cutting rate cause a negative effect on the process. Among the investigated properties; the changes in abrasion and resilience were independent of screw configuration.*

Received: 13 January 2023

Accepted: 12 May 2023

Page Number: 137-154

### Keywords:

Block Copolymer,  
Screw Configuration,  
Devulcanization,  
Extruder,  
Mechanical Properties,  
Worn Tires,  
Shear Rate

### Please Cite this Article Using:

Yazdani, H., Fakhari, H., & Garshasbi, V. (2024). Relationship Between Screw Configuration and Physio-Mechanical and Structural Properties of Devulcanized Waste Tires. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 23(133), 137-154, [In Persian].



## ارتباط آرایش مارپیچ اکسترودر با خواص فیزیکی - مکانیکی و ساختاری تایرهای ضایعاتی واولکانیده

حمید یزدانی<sup>۱\*</sup>، حورا فخاری<sup>۲</sup>، وحید گرشاسبی<sup>۳</sup>

۱- استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

۳- استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

پیام نگار: h.yazdani@pnu.ac.ir

### چکیده

یکی از نگران‌کننده‌ترین چالش‌های قرن حاضر موضوع دفع تایرهای فرسوده است، که بازیابی آن‌ها با واولکانش می‌تواند راه حلی برای مشکلات زیست‌محیطی حاصل از آن‌ها باشد. در این مقاله برای یافتن ارتباط میان آرایش مارپیچ و خواص نمونه‌ها، المان‌هایی با زوایا و برش‌های گوناگون برای اکسترودر ساخته شدند. سپس پانزده نمونه لاستیکی در شرایط گوناگون فرایندی واولکانیده شدند و بر روی هر کدام آزمون‌های فیزیکی- مکانیکی انجام گرفت تا مشخص شود که تحت چه شرایطی نمونه‌های واولکانیده از خواص مکانیکی مطلوب‌تری برخوردار خواهد بود. طی آزمون‌ها مشخص شد که دما تأثیرگذارترین مشخصه در فرایند واولکانش خواهد بود. به‌گونه‌ای بیشترین درصد واولکانش در دماهای پایین‌تر و برش‌های متوسط و زیاد حاصل شد؛ زیرا بالابودن میزان سل در این شرایط سبب افزایش فرایندپذیری نمونه‌ها می‌شود. درحالی‌که افزایش دما و کاهش نرخ برش، اثر منفی بر روند فرایند خواهد داشت. هم‌چنین در بین خواص بررسی‌شده تغییرات میزان سایش و جهندگی، مستقل از آرایش مارپیچ شناخته شدند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۲۲

شماره صفحات: ۱۳۷ تا ۱۵۴

### کلیدواژه‌ها:

آرایش مارپیچ،

واولکانش،

اکسترودر،

خواص مکانیکی،

تایر فرسوده،

نرخ برش

\* تهران، دانشگاه پیام نور، گروه مهندسی شیمی

### استناد به مقاله:

یزدانی، حمید، فخاری، حورا، و گرشاسبی، وحید. (۱۴۰۳). ارتباط آرایش مارپیچ اکسترودر با خواص فیزیکی- مکانیکی و ساختاری تایرهای ضایعاتی واولکانیده، نشریه مهندسی شیمی ایران، ۲۳(۱۳۳)، ۱۳۷-۱۵۴.

## ۱. مقدمه

پیشرفت پویای صنعت خودروسازی باعث تولید روزافزون لاستیک‌های ضایعاتی شده است [۱]. تولید سالانه لاستیک در سراسر جهان حدود ۱/۵ میلیارد است که عمر مفیدشان پس از یک دوره زمانی خاص به پایان می‌رسد [۲]. تخمین زده می‌شود که در حال حاضر تقریباً ۴ میلیارد لاستیک ضایعاتی در انبارها و محل‌های دفن زباله در سراسر جهان وجود داشته باشد [۳]. تایرهای فرسوده به دلیل حجم بالا و شکل ثابتی که دارند؛ نیازمند فضای اضافی بیشتری نسبت به سایر زباله‌ها هستند. هم‌چنین از آن جایی که بعید است در محیط زیست تجزیه شوند [۴] دفن آن‌ها عمر مفید محل‌های دفن زباله را کوتاه می‌کند و صرفه اقتصادی پایینی دارد [۵]. لذا جرارد و کاندلیکار احیای لاستیک‌های ضایعاتی وسایل نقلیه را به‌عنوان یک راه حل برای این مشکل پیشنهاد کردند [۶]. یکی از راه‌های بازیابی و سازگار کردن این گونه مواد با محیط زیست واولکانش است [۷] که طی این فرایند پیوند ۳ بعدی شکسته و ساختار لاستیک تجدیدپذیر می‌شود [۸]. بدین منظور لاستیک‌ها تا اندازه حدود  $10\ \mu\text{m}$  خرد می‌شود و اتصالات عرضی گوگرد-گوگرد (S-S) و کربن-گوگرد (C-S) از بین می‌رود، درحالی‌که زنجیره اصلی دست نخورده باقی می‌ماند [۹]. پس از چنین تغییر شکلی لاستیک انعطاف‌پذیر می‌شود و میرایی داخلی نشان می‌دهد. در نتیجه می‌توان آن را به اشکال گوناگون پردازش کرد [۱۰]. لاستیک واولکانش شده را می‌توان با لاستیک بکر یا دیگر آمیزه‌ها، برای استفاده مجدد، مخلوط کرد، بدون این‌که تغییر چشم‌گیری در خواص فیزیکی و مکانیکی آن ایجاد شود.

فرایندهای واولکانش شامل گرمایی، شیمیایی، مکانیکی، تابشی، فراصوت، زیستی و یا ترکیبی از آن‌هاست [۱۱]. دستگاه اکسترودر که یکی از تجهیزات متداول برای انجام این فرایند است، با ایجاد تنش برشی باعث شکسته شدن پیوندهای سه‌بعدی در لاستیک‌ها می‌شود و آن‌ها را برای پخت مجدد آماده می‌سازد [۱۲ و ۱۳]. از میان اکسترودرها نوع دو مارپیچه، که در این مطالعه استفاده شده، دارای برتری‌های بسیاری نسبت به گونه تک مارپیچه، از جمله؛ سرعت عمل بالا، تغذیه بهتر و انتقال حرارت مناسب‌تر و اختلاط کامل تر است.

شیفر در کتاب خود برای تعیین مشخصه‌هایی هم‌چون زمان پخت و دمای فرایند، از رئومتر با دیسک نوسانی بهره گرفت و نتیجه آزمایش‌هایش نشان داد که پخت مجدد در اتوکلیو خواص فشرده‌سازی لاستیک ولکانیده را بهبود می‌بخشد [۸]. روح و همکاران در ارزیابی خواص مکانیکی لاستیک واولکانش به این نتیجه رسیدند که خواص مکانیکی تحت تأثیر عامل واولکانش است و نیز دریافتند که استحکام کششی تابعی از چگالی اتصالات عرضی است و نسبت مستقیم دارند [۱۴]. در پژوهش ولنتاینی و دوریگاتو خواص مکانیکی از جمله ازدیاد طول در هنگام شکست و استحکام کششی، با دستگاه تست جهانی الکترونیکی WDT50 با سرعت هد متقاطع ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه اندازه‌گیری شد [۱۵]. کالوم و همکارانش نیز برای جلوگیری از تغییرات احتمالی در چگالی پیوندهای عرضی، تجزیه و تحلیل ریزساختاری نمونه‌ها را به صورت پودری و بدون هیچ‌گونه پردازش اضافی انجام دادند [۱۶].

در این مقاله ۱۵ نمونه لاستیکی بر پایه لاستیک طبیعی و استاتین بوتادین، که اجزای اصلی تشکیل دهنده تایرهای مصرفی است [۱۷]، تهیه و واولکانش شدند. سپس روی آن‌ها آزمون‌هایی، با هدف بررسی ارتباط آرایش مارپیچ با خواص مکانیکی نمونه انجام گرفت. به منظور این بررسی، المان‌های آسیاب‌ساز با زوایای گوناگون برای دستگاه اکسترودر طراحی و با المان‌های اصلی دستگاه اکسترودر تعویض شدند تا تأثیر پیکربندی و برش مارپیچ بر خواص نمونه‌ها مشخص شود. به کمک نتایج این تحقیق می‌توان نمونه‌های مستعدتر برای فرایند بازیابی را شناخت. هم‌چنین می‌توان پی برد که در چه برش‌هایی از مارپیچ خواص نمونه واولکانش مطلوب تر خواهد بود.

## ۲. مواد و روش‌ها

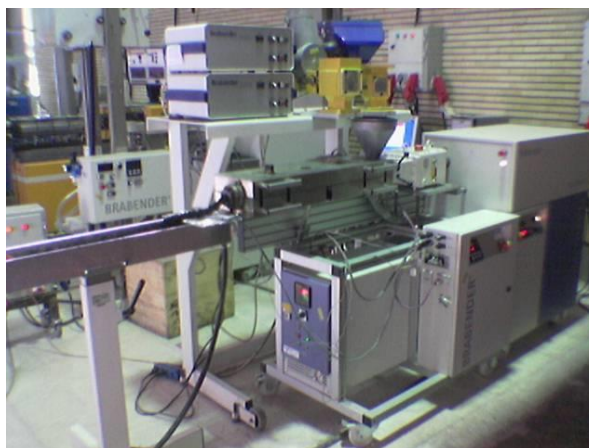
### ۲-۱ مواد مصرفی و تجهیزات

در این پژوهش آمیزه‌ای مشابه تایرهای مصرفی NR/SBR تهیه و پخته شد (استاندارد ASTM D15-627). سپس آمیزه پخته شده با دی‌زایلن دی‌سولفاید  $\text{C}_8\text{H}_8\text{S}-\text{SC}_8\text{H}_8$  (عامل واولکانش) در دستگاه اکسترودر واولکانش شده شد. اکسترودر استفاده شده از نوع دو مارپیچه همسوگرد مدل برابندر TSE20، با قطر مارپیچ ۲۰ میلی‌متر و حداکثر دور ۱۵۰ rpm است.



شکل ۲. تصویر راست: نمونه‌ای از المان‌های طراحی شده / تصویر چپ: المان اصلی دستگاه.

Figure 2. The right one is an example of the designed elements / the left one is the main element of the device.



شکل ۱. نمای اکسترودر در حال فرایند واولکانشن.

Figure 1. The view of the extruder in the devulcanizing process.

### ۲-۳ ساختار نمونه‌ها

هرکدام از نمونه‌ها با درصد‌های متفاوتی از لاستیک طبیعی و استایرن بوتادین تهیه شدند. سپس ساختار برخی از آن‌ها به وسیله آزمون FTIR، مطابق با روشی که دیگر محققان برای کشف ساختار سایر نمونه‌های لاستیکی از آن استفاده کرده‌اند [۱۹-۲۲] مشخص شده و مقادیر مربوطه در جدول (۱) جهت معرفی ساختار آورده شده‌است.

### ۲-۲ طراحی المان آسیاب‌ساز

در این پژوهش برای مشاهده تأثیر تغییر آرایش ماریپیج، المان‌های آسیاب‌ساز جدیدی با زوایای ۶۰ و ۹۰ درجه برای اکسترودر طراحی و روی دستگاه نصب شدند. همان‌گونه که ژانگ و همکاران برای بررسی سایر مشخصه‌های فرایندی (از جمله زمان ماندگاری) این زوایا را در نظر گرفتند [۱۸].

### جدول ۱. ترکیب درصد اجزای نمونه‌ها (به دست آمده از طیف FTIR).

Table 1. The composition percentage of the sample's components (obtained from the FTIR spectrum).

Samples	Component	St (mass %)	Bu (mass %)	Bd1,4 (mol %)	Vinyl (mol %)	Cis (mol %)	Trans (mol %)
SBR		78.74	21.2	82.2	20.8	19.7	59.5
NR/SBR		79.8	20.2	82.04	19.3	19.5	61.2
2		74.4	26.6	88.1	16.9	30.4	52.7
3		75.36	24.64	89.3	15.7	32.5	51.8
5		68.6	31.4	87.3	17.7	29.5	52.8
6		66.6	33.4	88.1	15.99	28.21	55.8
8		74.2	25.8	85.4	18.6	32.1	49.3
10		67.7	32.3	89.1	15.1	29.1	55.8
12		23.61	23.64	82.4	22.6	29.6	47.8
14		72.2	27.8	88.2	16.8	27.4	55.8
15		72.6	27.4	87.4	17.6	30.3	52.1
12		23.61	23.64	82.4	22.6	29.6	47.8

## ۴-۲ آزمون‌های فیزیکی - مکانیکی برای سنجش خواص

## ۴-۲-۱ کشش

بررسی خواص کششی نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM D412 و با دستگاه اینسترون Instron مدل ۶۰۲۵ انجام گرفت.

## ۴-۲-۲ سختی

تست سختی با دستگاه سختی‌سنج Zwick و بر پایه استاندارد ASTM D2240-02 انجام شد.

## ۴-۲-۳ گران‌روی مونی

گران‌روی آمیزه لاستیکی برطبق استاندارد ASTM D1646 و به کمک دستگاه ویسکومتر Zwick ۴۳۰۹ تعیین شد. در این آزمون گران‌روی مونی در دمای ۱۰۰ °C درجه اندازه‌گیری شد.

## ۴-۲-۴ رئومتر

برای بررسی نحوه پخت آمیزه و محاسبه مشخصه‌های مربوطه پخت، آزمون فوق مطابق با استاندارد ASTM D2084 انجام شد. نتیجه این آزمون، منحنی گشتاور برحسب زمان است که می‌توان به کمک آن زمان مناسب پخت، زمان اسکورچی شدن، درجه واولکنش و اختلاف بیشینه و کمینه گشتاور (Atorque) را تخمین زد.

## ۴-۲-۵ مانایی فشاری

مانایی فشاری بیانگر میزان کشسانی یک ماده است. این آزمون مطابق با استاندارد ASTM D395 و به مدت ۲۲ ساعت در دماهای محیط و ۷۰ °C صورت گرفت.

مانایی فشاری نمونه‌ها با فرمول زیر به دست می‌آید:

$$\text{Compression set} = \frac{t_i - t_f}{t_i - t_n} \times 100 \quad (1)$$

که در این فرمول  $t_i$  ضخامت اولیه،  $t_f$  ضخامت نهایی نمونه و  $t_n$  ضخامت واشر است.

جهندگی: جهندگی، که از خواص دینامیکی وابسته به چگالی اتصالات عرضی است، مطابق با استاندارد ASTM D1054 و با دستگاه Tripsometer Dunlop ساخت شرکت فرانک آلمان به دست آمد. درصد آن از رابطه (۲) حساب می‌شود.  $\theta_1$  زاویه تغییر مکان پاندول دستگاه (۴۵ درجه) و  $\theta_2$  زاویه برگشت است [۴ و ۲۳]:

$$R (\%) = \frac{1 - \cos \theta_2}{1 - \cos \theta_1} \quad (2)$$

## ۴-۲-۶ سایش

سنجش مقاومت سایشی طبق استاندارد ASTM D 5963 انجام گرفت. درصد سایش از تقسیم تفاوت وزن نمونه‌ها پیش و پس از سایش به وزن اولیه به دست می‌آید.

## ۴-۲-۷ پارگی

آزمون پارگی براساس استاندارد ASTM D 624 و با استفاده از دستگاه ایسترون مدل ۶۰۲۵ ساخت انگلیس انجام شد.

## ۴-۲-۸ چگالی

چگالی نمونه‌ها براساس استاندارد ASTM1505D در دمای ۲۳°C به دست آمده است.

## ۴-۲-۹ میزان تورم و کسر وزنی سل

آزمایش تورم، مطابق استاندارد ASTM D ۰۲-۶۸۱۴ انجام شد، که هدف آن بررسی ساختار شبکه لاستیک است. کسر وزنی سل را می‌توان با استفاده از آزمایش تورم و براساس رابطه (۳) حساب کرد:

$$\text{Sol weight fraction} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (3)$$

در این رابطه  $W_1$  و  $W_2$  به ترتیب وزن نمونه قبل از انجام آزمایش تورم و بعد از اتمام آزمایش تورم خشک شدن در آن است.

جدول ۲. نتایج آزمایش‌های فوق بر روی نمونه‌های واولکانیده.

Table 2. The results of the tests on the devulcanized samples.

Samples	Screw configuration	Temperature	Revolutions per minute	Devulcanizing agent (wt%)	$\Delta_{torque}$ (Ibf.in)	Sol fraction (wt%)	Percentage of devulcanization	Swelling index (%)
1	-1	230	30	5	26.35	30.3	75.75	345.65
2	-1	210	30	10	13.09	36.6	81.81	362.58
3	-1	190	30	5	29.17	30.9	85.48	412.71
4	1	210	30	0	30	26.4	79.39	376.27
5	0	190	30	0	28.23	26.6	88.6	460.19
6	0	210	30	5	13.18	32.8	76.73	337.32
7	0	210	30	10	18.56	33.5	79.09	364.41
8	0	230	30	0	50.96	26.5	55	275.82
9	0	190	30	10	31.16	30.4	83.71	373.5
10	1	190	30	5	34.39	26.9	85	415.94
11	0	210	30	5	8.7	34.5	71.4	289.81
12	0	230	30	10	6.62	30.1	59.2	269.23
13	-1	210	30	0	26.39	30.1	77	345.03
14	0	210	30	5	19.57	34	86.57	417.45
15	-1	210	30	5	20.5	28.7	67.15	308.13

بهبود فرایند واولکانش و بیشترین شکست اتصالات عرضی در لاستیک می‌شود. هم‌چنین کمترین درصد واولکانش در دمای بالا، آرایش متوسط و در غیاب عامل واولکانش حاصل شده‌است. گویا در برش‌های پایین، تنش کافی برای شکسته‌شدن پیوندهای عرضی در دمای بالا، به‌خوبی اعمال نشده‌است. افزایش درصد واولکانش با افزایش دورمارپیچ و غلظت عامل واولکانش در دیگر مقالات نیز گزارش شده‌است [۲۵].

همان‌طور که در جدول (۲) آورده شده، بیشترین میزان کسر وزنی سل در حضور ۱۰ wt% عامل واولکانش به‌دست آمده‌است. حال آن‌که کمترین میزان کسر وزنی سل در دمای ۲۲۰ °C، آرایش متوسط مارپیچ و عدم حضور عامل واولکانش حاصل شده‌است. بنابراین می‌توان گفت افزایش عامل واولکانش بر کسر وزنی سل و فرایندپذیری نمونه اثر مثبت دارد.

منحنی ۵ رابطه چگالی اتصالات عرضی با کسر وزنی سل را نشان می‌دهد. براساس تئوری هوریکس نمونه‌های بالای منحنی یا

### ۳. نتایج و بحث

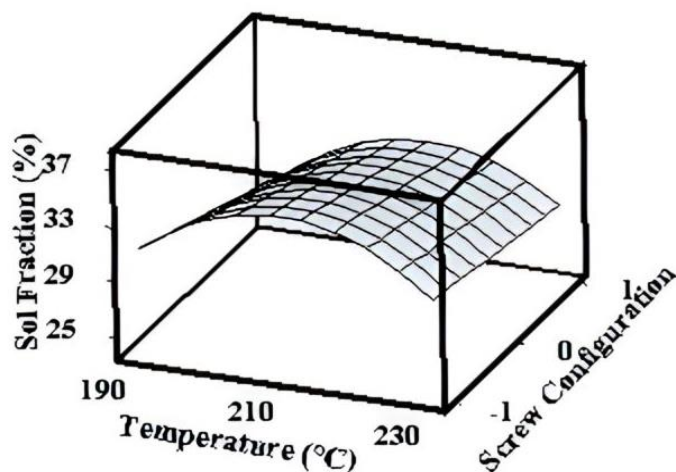
باتوجه به جدول (۲) در نمونه ۸، مقدار  $\Delta_{torque}$  بسیار بالا است؛ اما این نمونه باتوجه به میزان بالای بخش ژل، برای ولکانش مجدد مناسب نیست. از طرفی مقدار  $\Delta_{torque}$  در دو نمونه ۱۱ و ۱۲ در پایین‌ترین مقدار خود قرار دارد، که به‌نظر می‌رسد این نمونه‌ها طی فرایند واولکانش دچار تخریب شدند. علت این امر وجود بخش سل تخریب‌شده در این نمونه‌هاست. میزان اختلاف گشتاور برای سایر نمونه‌ها تقریباً در محدوده معمول آمیزه‌های لاستیکی است. به‌طور کلی از جدول فوق می‌توان فهمید که روند تغییرات در آرایش مارپیچ با برش متوسط شدت بیشتری داشته‌است.

### ۳-۱ درصد واولکانش

مقایسه نتایج بیانگر این است که دما بیشترین تأثیر را روی درصد واولکانش به‌ویژه در دماهای کمتر داشته‌است. علت این امر افزایش تنش برشی در دماهای پایین است. میزان بالای تنش برشی منجر به

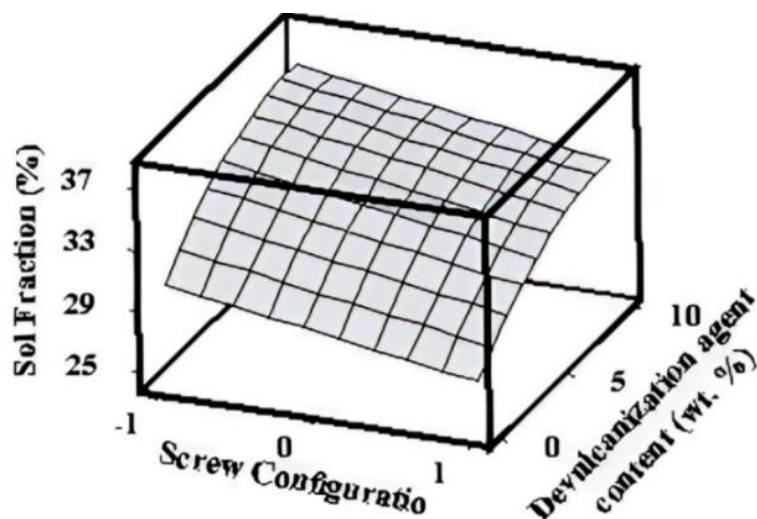
نمونه‌های ۸، ۱۱ و ۱۲ است. که نمونه‌های ۱۱ و ۱۲ دچار تخریب شده‌است.

روی آن دچار تخریب در زنجیره اصلی شده‌اند؛ اما هنگامی که نقاط در پایین منحنی قرار گیرند یعنی پیوندهای عرضی به صورت انتخابی شکسته شده‌است. در شکل زیر نقاط بالای منحنی مربوط به



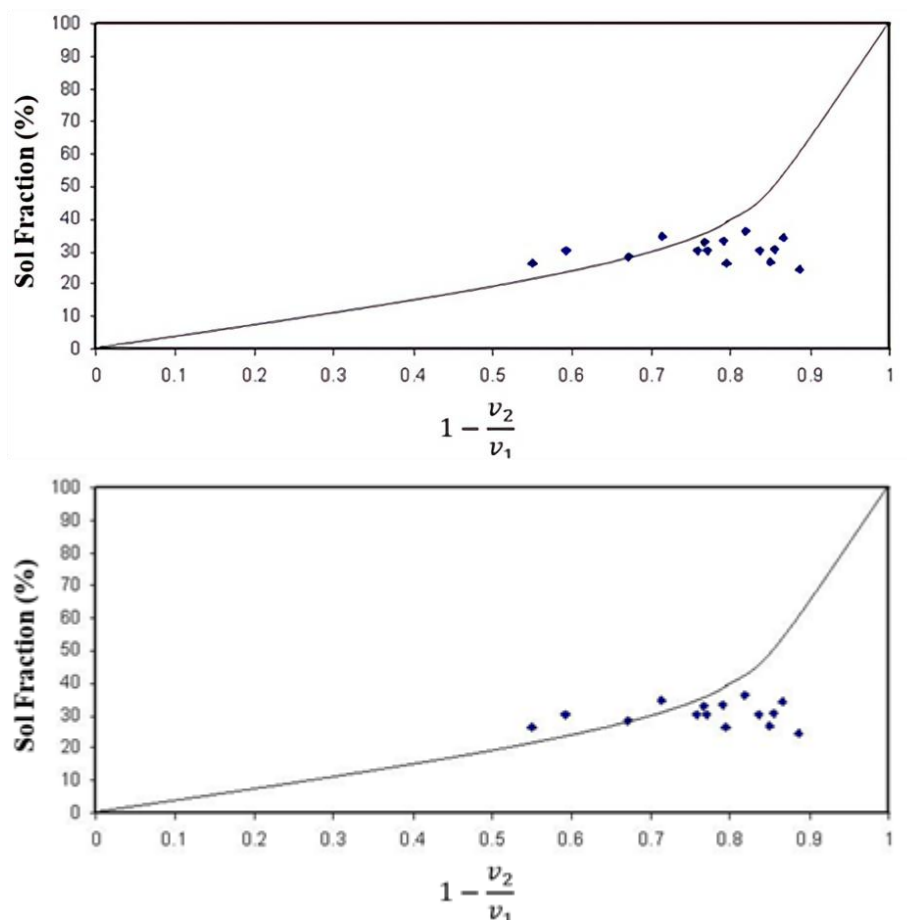
شکل ۳. رویه تغییرات کسر وزنی سل با دمای سیلندر و آرایش مارپیچ در حضور ۵ wt% عامل اولکانش.

Figure 3. Changes in the sol fraction as a function of temperature and screw configuration.



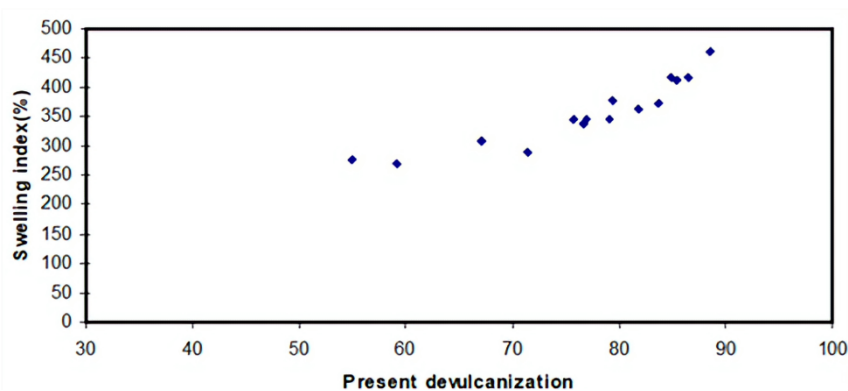
شکل ۴. تغییرات کسر وزنی سل با آرایش و عامل اولکانش در دمای ۲۱۰ °C.

Figure 4. Procedure for changes in the sol fraction with temperature and screw configuration at 210°C.



شکل ۵. تغییرات کسر وزنی سل با تغییرات نسبی در چگالی اتصالات عرضی؛ (—): تئوری، (■): نتایج تجربی.

Figure 5. Changes in sol fraction with relative changes in crosslink density.



شکل ۶. نمودار شاخص تورم نسبت به درصد واولکاننش.

Figure 6. Swelling index chart by devulcanization percent.

نسبتاً زیاد است. بالابودن گران روی در دمای پایین باعث ایجاد تنش برشی بیشتر و شکست انتخابی اتصالات عرضی می‌شود که افزایش شاخص تورم را به همراه دارد. قابلیت بازپخت شدن نمونه‌های واولکانیده نشان دهنده آن است که

با بالارفتن دما از میزان شاخص تورم کاسته می‌شود؛ بیشترین شاخص تورم مربوط به نمونه ۵ و کمترین مقدار برای نمونه شماره ۸ است که هر دو نمونه با آرایش برش متوسط و در غیاب عامل واولکاننش تهیه شده‌اند، که علت این تفاوت بسیار، اختلاف دمای

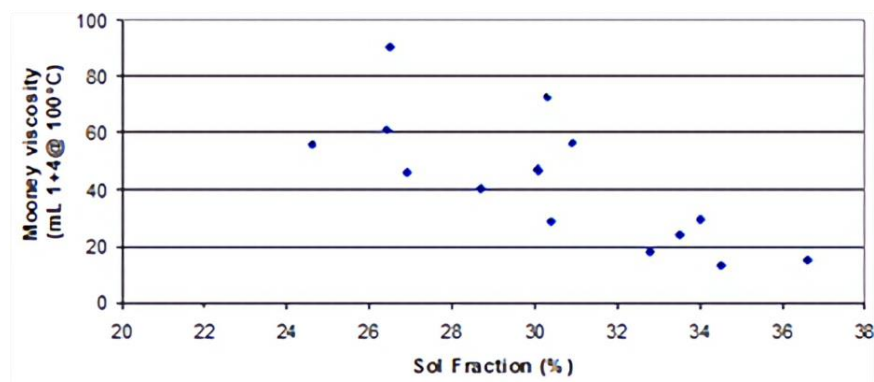
است که دارای درصد سل کم، میزان ژل و چگالی اتصال عرضی بالاست. در شکل (۷) همان طور که توقع می‌رود با افزایش کسر وزنی سل، گرانروی مونی نیز کم می‌شود. کاهش شدید گرانروی مونی در نمونه‌های ۲ و ۱۱ ناشی از تخریب پیش‌آمده در این نمونه‌هاست.

زنجیره‌های آزاد با پیوندهای دوگانه از نو پدید می‌آیند که قابلیت بازیخت شدن لاستیک بازیابی شده را به همراه دارد. نتایج مشابه به‌کوشش پژوهشگران دیگر نیز به‌دست آمده‌است [۲۶-۲۸]. در جدول (۳) بیشترین میزان گرانروی مونی مربوط به نمونه ۸

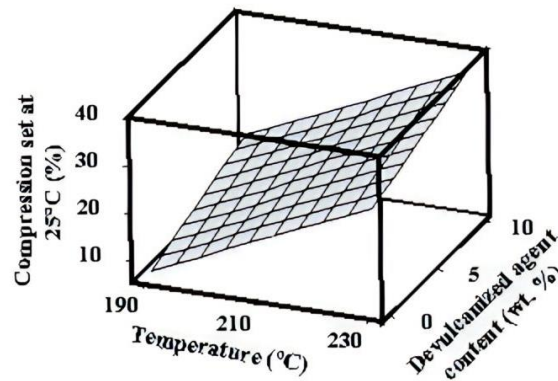
جدول ۳. نتایج آزمون‌ها بر روی نمونه‌های بازیخت شده.

Table 3. Test results of recured samples.

Samples	Mooney viscosity (ML 1+4 @ 100°C)	tensile strength (MPa)	Elongation (%)	(N/mm) Tear strength	Compression set % @ 70 °C	Compression set % @ 25°C	Abrasion (%)	Hardness	Resilience (%)	Cross link density ( $\times 10^4$ mol/cm <sup>3</sup> )
1	72.67	2.91	52	8.36	65.69	32.6	35.27	82	11.35	4.31
2	15.35	2.68	113	14.83	47.4	29.68	44.01	64	15.75	3.23
3	56.4	6.4	89	18.18	40.2	12.49	21.00	63	27.4	2.58
4	61.4	4.6	172	13.39	45.03	23.1	31.53	63	21.33	3.66
5	56.12	6.2	121	20.09	36.8	13.4	27.12	61	25.37	2.03
6	18.04	2.83	099	10.75	46.2	25.8	46.74	63	15.9	4.13
7	24.3	4.59	143	17.46	48.07	26.7	30.23	62	20.95	3.71
8	90.34	4.75	110	12.91	63.8	36.72	39.56	96	15.00	7.99
9	28.9	7.3	166	17.46	49.72	18.5	20.6	64	25.00	2.89
10	45.99	6.5	132	22.73	50.6	17.6	19.13	63	27.35	2.67
11	13.09	2.4	136	9.32	54.38	25.2	25.86	56	16	5.08
12	46.34	2.15	75	9.56	66.86	36.53	49.38	66	13.95	7.25
13	47.24	2.79	57	13.63	42.2	27.45	42.64	72	15.05	4.09
14	29.26	4.89	13	15.07	56.7	22.2	35.94	64	21	2.39
15	40.12	2.15	52	11.71	58.3	30.4	42.84	78.5	12	5.84

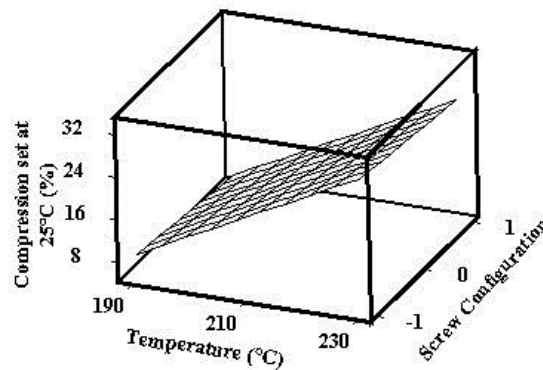


همان‌طور که در جدول (۳) پیداست، بیشترین درصد مانایی فشار در دمای  $25^{\circ}\text{C}$  و  $70^{\circ}\text{C}$  در نمونه‌های بازپخت مربوطه نمونه ۱۲ (نمونه تخریب‌شده) است. در دمای بالاتر به علت ایجاد زنجیره‌های کوتاه‌تر کشسانی آمیزه کم می‌شود. با توجه به شکل‌های (۸) تا (۱۰) نیز با افزایش دما میزان مانایی فشار افزایش می‌یابد. هم‌چنین تغییر غلظت عامل واولکانش تأثیر قابل تأملی بر مانایی فشار ندارد.



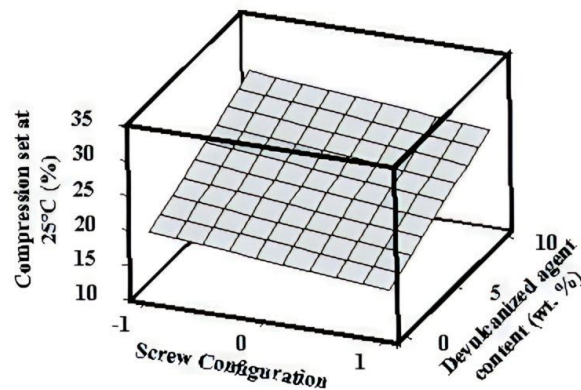
شکل ۸. تغییرات مانایی فشار با دما و عامل واولکانش برای آرایش برش متوسط.

Figure 8. Changes of compression set with temperature and devulcanizing agent, for medium shear rate.



شکل ۹. تغییرات مانایی فشار با دما و آرایش مارپیچ در غیاب عامل واولکانش.

Figure 9. Changes of compression set with temperature and screw configuration. Without devulcanizing agent.

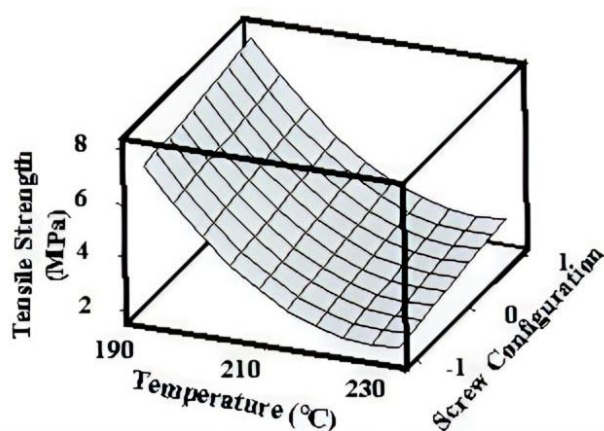


شکل ۱۰. تغییرات مانایی فشار با آرایش مارپیچ و عامل واولکانش در  $210^{\circ}\text{C}$ .

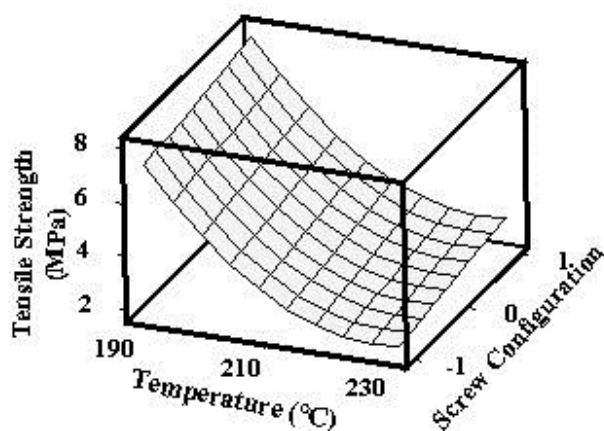
Figure 10. Changes of compression set with screw configuration and devulcanizing agent at  $210^{\circ}\text{C}$ .

نمونه‌ها، بازپخت شدن به صورت بهینه انجام نمی‌شود، درحالی‌که با افزایش میزان برش به‌علت بالارفتن چگالی اتصالات عرضی، میزان کسر وزنی سل زیاد می‌شود و استحکام پارگی افزایش می‌یابد. استحکام کششی تابعی از متغیرهای دما، آرایش مارپیچ و عامل واولکانش است. استحکام کششی در دماهای بالاتر به‌علت احتمال تخریب در زنجیره اصلی کاهش می‌یابد؛ اما هرچه نرخ برش بالا رود استحکام کششی نیز متعاقباً افزایش می‌یابد؛ زیرا در برش‌های پایین به‌خاطر درصد بالای ژل، نفوذ مواد پخت به‌داخل نمونه دشوار می‌شود و قابلیت بازپخت شدن کم می‌شود. عامل واولکانش تأثیر چندانی بر استحکام کششی نیز نخواهد داشت.

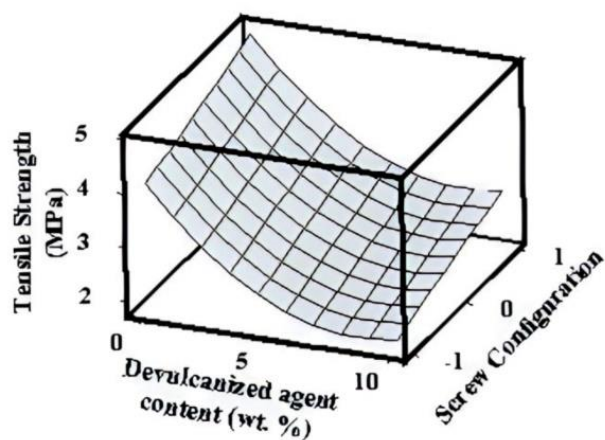
باتوجه به جدول (۳) با افزایش دما از مقدار استحکام پارگی کاسته و با افزایش برش، بر این مقدار افزوده می‌شود. بیشترین میزان به‌دست‌آمده مربوط به نمونه ۱۰ با دمای  $190^{\circ}\text{C}$ ، آرایش با برش بالا و ۵ درصد وزنی عامل واولکانش است و پایین‌ترین میزان استحکام پارگی مربوط به نمونه ۱ با دمای  $230^{\circ}\text{C}$ ، آرایش برش پایین و ۵ درصد وزنی عامل واولکانش است؛ لذا می‌توان گفت که میزان عامل واولکانش تأثیر مشهودی بر استحکام پارگی نخواهد داشت. از آنجایی که با افزایش دما انعطاف‌پذیری نمونه‌ها - به‌دلیل فراریت ترکیبات با دمای جوش پایین‌تر - پایین می‌آید، میزان استحکام پارگی کم می‌شود. نیز در برش‌های پایین به‌علت مقدار بالای ژل در



شکل ۱۱. رویه تغییرات استحکام کششی با دمای سیلندر و عامل واولکانش برای آرایش مارپیچ با میزان برش متوسط.  
Figure 11. Changes of tensile strength with temperature and devulcanizing agent at medium shear rate.



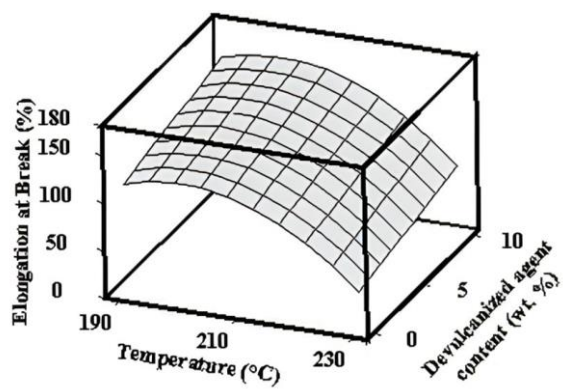
شکل ۱۲. تغییرات استحکام کششی با دما و آرایش مارپیچ (با ۱۰ wt% عامل واولکانش).  
Figure 12. Changes of tensile strength with temperature and screw configuration (10 wt.% of DA).



شکل ۱۳. تغییرات استحکام کششی با عامل واولکانش و آرایش مارپیچ در ۲۳۰°C.

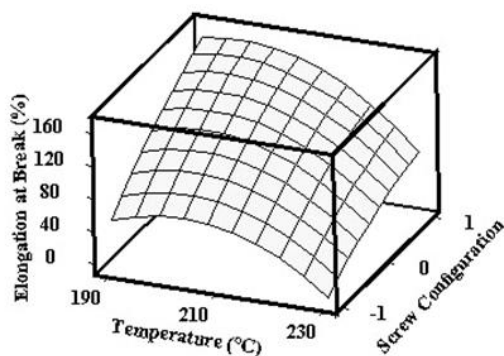
Figure 13. Changes of tensile strength with devulcanizing agent and screw configuration at 230°C.

چنان که از شکل زیر پیداست، با بالا رفتن دما از درصد ازدیاد طول در نقطه پارگی کاسته می‌شود؛ اما بالارفتن نرخ برش این مشخصه را افزایش می‌دهد (شکل (۱۵)) و علت آن اثر برش مارپیچ در افزایش کسر وزنی سل است. نتایج جداول (۲) و (۳) بیانگر آن است که ازدیاد طول در نمونه‌هایی که کسر وزنی سل بالاتری دارند، بیشتر است.



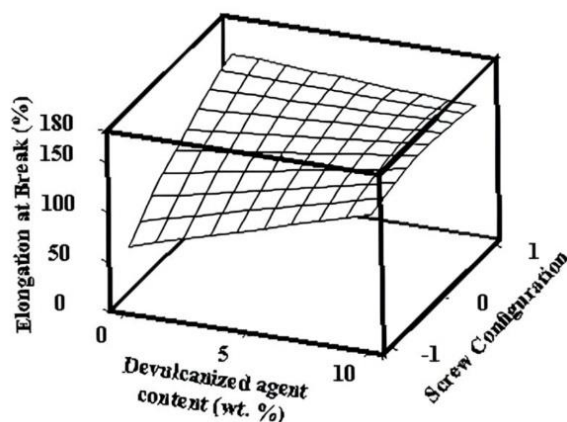
شکل ۱۴. تغییرات ازدیاد طول در نقطه پارگی با دمای سیلندر و عامل واولکانش برای آرایش مارپیچ با برش متوسط.

Figure 14. Changes of elongation with temperature and devulcanizing agent at medium shear rate.



شکل ۱۵. رویه تغییرات ازدیاد طول در نقطه پارگی با دمای سیلندر و آرایش مارپیچ در غیاب عامل واولکانش.

Figure 15. Changes of elongation with temperature and screw configuration.

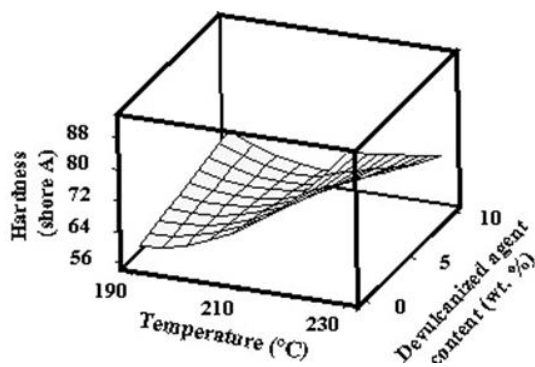


شکل ۱۶. رویه تغییرات ازدیاد طول در نقطه پارگی با آرایش مارپیچ و عامل واولکانش با دمای سیلندر در ۲۱۰°C.

Figure 16. Changes of elongation with devulcanizing agent and screw configuration 210°C.

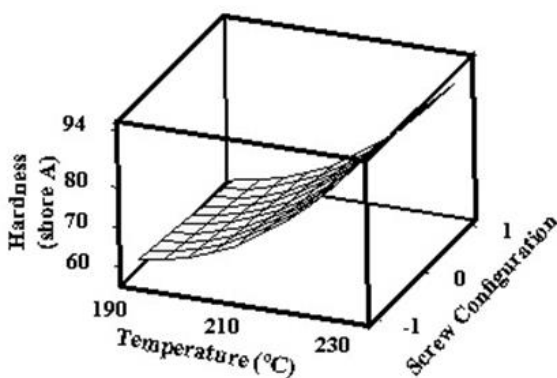
گوگرد-گوگرد و گوگرد-کربن که کاهش چگالی پیوندهای عرضی را در پی دارد. باتوجه به نمودارها تغییرات آرایش مارپیچ تأثیر زیادی بر میزان سختی نمونه‌های واولکانیده ندارد.

باتوجه به شکل‌های (۱۷) تا (۱۹)، با افزایش دما سختی بیشتر خواهد شد، زیرا تبخیر ترکیب‌های فراتر در دمای بالا سبب بالارفتن سختی نمونه‌ها می‌شود؛ اما با افزایش عامل واولکانش میزان سختی کاهش می‌یابد (به‌علت شکسته‌شدن بیشتر پیوندهای



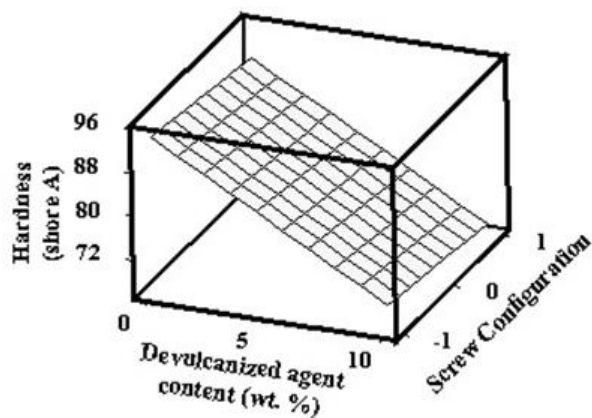
شکل ۱۷. تغییرات سختی با دما و عامل واولکانش برای آرایش مارپیچ با نرخ برش متوسط.

Figure 17. Changes of hardness with temperature and devulcanizing agent at medium shear rate.



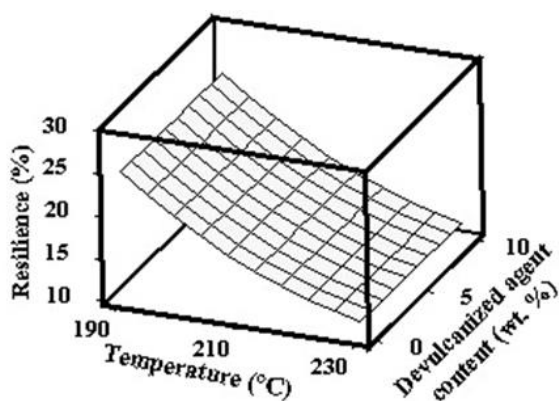
شکل ۱۸. تغییرات سختی با دمای و آرایش مارپیچ بدون عامل واولکانش.

Figure 18. Changes of hardness with temperature and screw configuration.

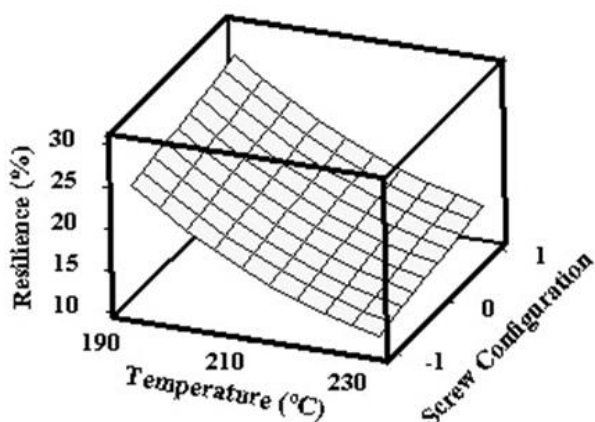


شکل ۱۹. تغییرات سختی با آرایش مارپیچ و عامل اولکانش با دمای سیلندر در ۲۳۰°C.  
 Figure 19. Changes of hardness with devulcanizing agent and screw configuration 230°C.

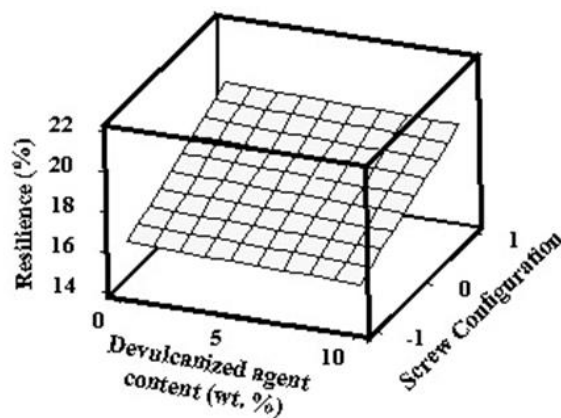
با رسم نمودارهای (۲۰) تا (۲۲)، آشکار شد که با افزایش دما میزان جهندگی نمونه‌ها کاهش می‌یابد، ولی تغییرات در میزان اولکانش و آرایش مارپیچ تأثیر قابل توجهی بر جهندگی نخواهد داشت.



شکل ۲۰. تغییرات جهندگی با دما و عامل اولکانش برای آرایش مارپیچ با نرخ برش کم.  
 Figure 20. Changes of resilience with temperature and devulcanizing agent at low shear rate.



شکل ۲۱. تغییرات جهندگی با دما و آرایش مارپیچ به همراه ۵ wt% عامل اولکانش.  
 Figure 21. Changes of resilience with temperature and screw configuration (5% wt. DA).

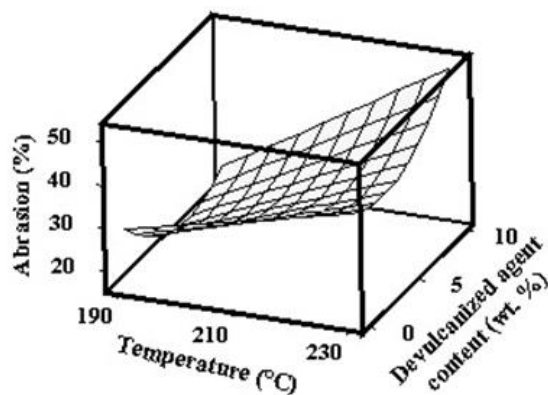


شکل ۲۲. تغییرات جهندگی با آرایش مارپیچ و عامل واولکانش در ۲۱۰°C.

Figure 22. Changes of resilience with screw configuration and devulcanizing agent at 210°C.

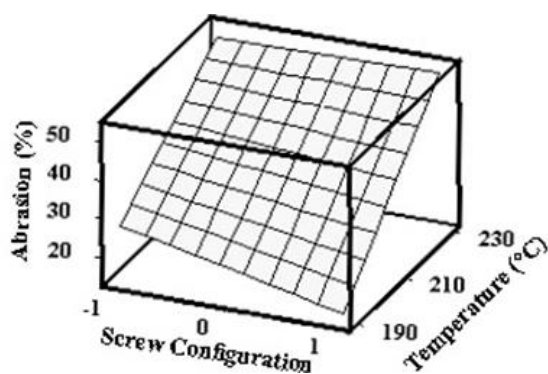
عامل واولکانش باعث افزایش شکست بیشتر پیوندهای عرضی، کسر وزنی سل و میزان ژل در نمونه‌ها می‌شود که سایش را کاهش می‌دهد و قابلیت بازپخت شدن مطلوب را فراهم می‌کند.

شکل‌های (۲۴) و (۲۵) نشان می‌دهد که با افزایش دما انعطاف‌پذیری نمونه‌ها کم شده می‌شود و سایش افزایش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش عامل واولکانش میزان سایش یک مقدار کمینه و سپس تقریباً ثابت خواهد شد، لذا می‌توان نتیجه گرفت که افزایش



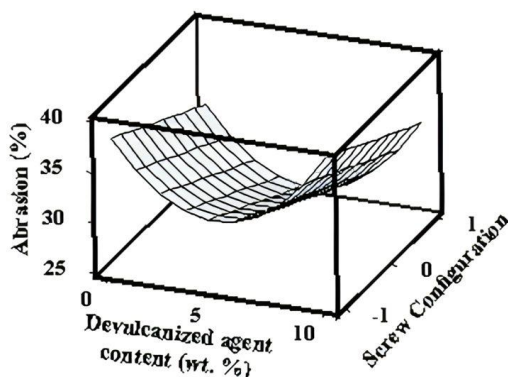
شکل ۲۳. تغییرات سایش با دما و عامل واولکانش برای آرایش مارپیچ با برش متوسط.

Figure 23. Changes of abrasion with temperature and devulcanizing agent at medium shear rate.



شکل ۲۴. رویه تغییرات سایش با دما و آرایش مارپیچ ( ۱۰wt% عامل واولکانش).

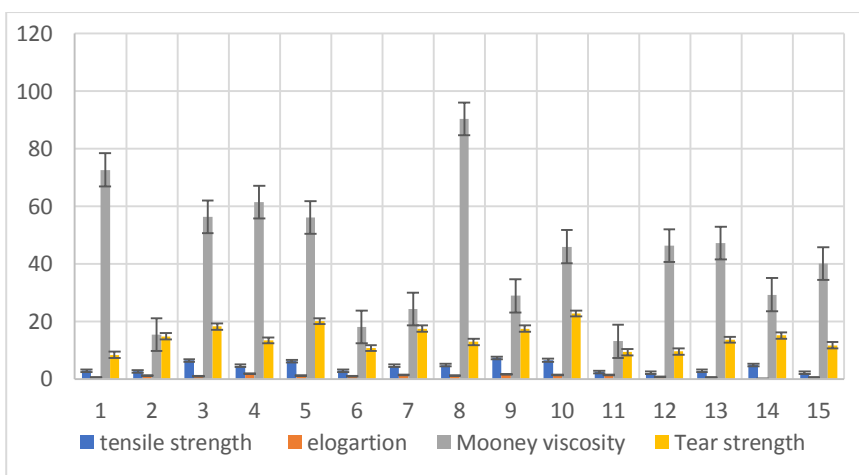
Figure 24. Changes of abrasion with temperature and screw configuration (10 wt.% DA).



شکل ۲۵. تغییرات سایش با آرایش مارپیچ و عامل واولکانش در ۲۱۰°C.

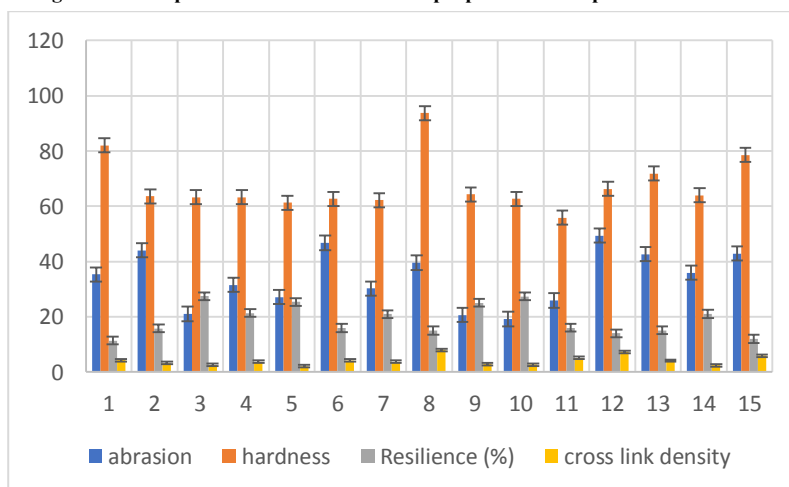
Figure 25. Changes of abrasion with screw configuration and devulcanizing agent at 210°C.

به منظور افزایش دقت و بیان بهتر ارتباط خواص مکانیکی نمودار در شکل (۲۶) و (۲۷) نشان داده شد. میله‌ای برای خواص ترسیم شد و نیز خطای میله‌ای برای هر ستون



شکل ۲۶. نمودار مقایسه خواص مکانیکی نمونه‌ها به همراه Error bars

Figure 26. Comparison chart of mechanical properties of samples with error bars.



شکل ۲۷. نمودار مقایسه خواص مکانیکی نمونه‌ها به همراه Error bars

Figure 26. Comparison chart of mechanical properties of samples with error bars.

## مراجع

- [1] Colom, X., Marín-Genescà, M., Mujal, R., Formela, K., & Cañavate, J. (2018). Structural and physico-mechanical properties of natural rubber/gtr composites devulcanized by microwaves: Influence of gtr source and irradiation time. *Journal of composite materials*, 52(22), 3099-3108.
- [2] Tyres, E.E.o.L. (2011). European tyre and rubber manufactures association: Brussels. belgium.
- [3] Mokhtar, N., Omar, R., & Idris, A. (2012). Microwave pyrolysis for conversion of materials to energy: A brief review. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 34 (22), 2104-2122.
- [4] Barikani, M., & Barikani, M. (2019). Pyrolysis of Scrap Tire Powder and Identification of the Resulting Liquid Fuel. *Iranian Journal of Chemical Engineering*, 18(105), 65-77, In Persian.
- [5] Ali, M. A., Raslan, H. A., El-Nemr, K. F., & Hassan, M. M. (2020). Thermal and mechanical behavior of sbr/devulcanized waste tire rubber blends using mechano-chemical and microwave methods. *Journal of Polymer Engineering*, 40(10), 815-822.
- [6] Gerrard, J., & Kandlikar, M. (2007). Is european end-of-life vehicle legislation living up to expectations; Assessing the impact of the elv directive on 'green'innovation and vehicle recovery. *Journal of Cleaner Production*, 15, 17-27.
- [7] Ghavipankeh, F., Ziaei Rad, Zh, & Ghavipankeh, F. (2012). Investigating the possibility of recycling worn tires by biological method. *Iranian Journal of Chemical Engineering*, 11, 60, In Persian.
- [8] Asaro, L., Gratton, M., Seghar, S., & Hocine, N. A. (2018). Recycling of rubber wastes by devulcanization. *Resources, Conservation and Recycling*, 133, 250-262.
- [9] Nicholas, P. P. (1982). The scission of polysulfide crosslinks in scrap rubber particles through phase transfer catalysis. *Rubber Chemistry and Technology*, 55(5), 1499-1515.
- [10] Schaefer, R. J. (2010). Mechanical properties of rubber. *Harris' Shock and Vibration Handbook*, Sixth edition, A. Piersol, T. Paez (Eds), McGraw-Hill Companies Inc, 33.31-33.18.
- [11] Ostad Movahed, S., & Babakhani, B. (2019). The study on the mechanical properties of the de-vulcanized waste rubber by a mechanical technique. *Applied And Computational Sciences In Mechanics*, 30(2), 95-108.

## ۴. جمع بندی

در این پژوهش با سنجش خواص نمونه‌های لاستیکی واولکانیده نتایج زیر به دست آمد:

- افزایش تنش برشی سبب بهبود فرایند واولکانش می شود و افزایش استحکام کششی، استحکام پارگی و ازدیاد طول در نقطه پارگی را به همراه دارد.
- افزایش دما باعث کاهش استحکام پارگی و درصد واولکانش می شود، از طرفی سایش، سختی و مانایی فشار را افزایش می دهد، از این رو می توان گفت دماهای پایین تر برای افزایش کارایی فرایند مطلوب تر خواهد بود.
- بیشترین درصد واولکانش در آرایش مارپیچ برش متوسط و زیاد به دست آمده است. این بدان معناست که تغییر آرایش مارپیچ تأثیر مثبتی بر کسر وزنی سل داشته است.
- سختی نمونه‌ها وابسته به چگالی اتصالات عرضی است. با افزایش چگالی اتصالات عرضی، سختی نمونه‌ها روندی افزایشی نشان داده است. تغییرات آرایش مارپیچ تأثیر قابل توجهی بر میزان سختی، جهندگی و سایش نمونه‌های واولکانیده نشان نداده است.
- افزودن عامل واولکانش بر خواصی چون استحکام کششی، استحکام پارگی و جهندگی تأثیر چندانی ندارد؛ اما به طور کلی می توان گفت که حضور این عامل تأثیر مثبتی بر روند فرایند واولکانش خواهد داشت.
- نمونه ۸ دارای بیشترین مقدار ژل و کمترین کسر وزنی سل و شاخص تورم بود (به دلیل چگالی بالای پیوندهای عرضی). همین موضوع باعث افزایش گرانروی و کاهش فرایندپذیری آن می شود. بالارفتن گشتاور با گذشت زمان برای این نمونه در این آزمون به دلیل پخت نبوده و تنها به دلیل اعمال نیرویی است که از طرف روتور برای خردکردن آن به کار برده شده است.
- کاهش شدید گرانروی مونی در نمونه‌های ۲ و ۱۱ مربوط به تخریب شدیدی است که در بخش سل این نمونه‌ها به وجود آمده، نیز گشتاور نمونه‌های مذکور بسیار کمتر از سایر نمونه‌ها گزارش شده است.

- [12] De, D., & Singharoy, G. (2007). Reclaiming of ground rubber tire by a novel reclaiming agent. I. Virgin natural rubber/reclaimed grt vulcanizates. *Polymer Engineering & Science*, 47(7), 1091-1100.
- [13] De, D. (2011). Processing and material characteristics of a reclaimed ground rubber tire reinforced styrene butadiene rubber. *Materials Sciences and Applications*, 2(2), 486-496.
- [14] Rooj, S., Basak, G. C., Maji, P. K., & Bhowmick, A. K. (2011). New route for devulcanization of natural rubber and the properties of devulcanized rubber. *Journal of Polymers and the Environment*, 19, 382-390.
- [15] Valentini, F., Dorigato, A., & Pegoretti, A. (2020). Evaluation of the role of devulcanized rubber on the thermo-mechanical properties of polystyrene. *Journal of Polymers and the Environment*, 28(9), 1737-1748.
- [16] Colom, X., Faliq, A., Formela, K., & Cañavate, J. (2016). FTIR spectroscopic and thermogravimetric characterization of ground tyre rubber devulcanized by microwave treatment. *Polymer Testing*, 52, 200-208.
- [17] Mousavi, S. A., & Khademzadeh, J. (2023) Effect of Nanoclay and Its Hybrid with Carbon Black on Physical and Mechanical Properties of Styrene Butadiene Rubber. *Iranian Journal of Chemical Engineering*, 22(126), 66-81, In Persian.
- [18] Zhang, X. M., Feng, L. F., Chen, W. X., & Hu, G. H. (2009). Numerical simulation and experimental validation of mixing performance of kneading discs in a twin-screw extruder. *Polymer Engineering & Science*, 49(9), 1772-1783.
- [19] Chen, R., Lun, L., Cong, K., Li, Q., & Zhang, Y. (2019). Insights into pyrolysis and co-pyrolysis of tobacco stalk and scrap tire: thermochemical behaviors, kinetics, and evolved gas analysis. *Energy*, 183(2), 25-34.
- [20] Yan, K., Chen, J., You, L., & Tian, S. (2020). Characteristics of Compound Asphalt Modified by Waste Tire Rubber (WTR) and Ethylene Vinyl Acetate (EVA): Conventional, Rheological, and Microstructural Properties. *Journal of Cleaner Production*, 258(13), 120732.
- [21] Yan, K. Z., He, W. L., Chen, M., & Liu, W. Y. (2016). Laboratory investigation of waste tire rubber and amorphous poly alpha olefin modified asphalt. *Construct. Build. Material*, 129, 256-265.
- [22] Uguz, G., Ayanoglu, A. (2021). Chemical characterization of waste tire pyrolysis products. *International Advanced Researches and Engineering*, 5(2), 163-170.
- [23] Kraus, G. (1965). Reinforcement of elastomers. Ed. Interscience, New York.
- [24] Cho, K., Jang, W. J., Lee, D., Chun, H., & Chang, Y. W. (2000). Fatigue crack growth of elastomers in the swollen state. *Polymer*, 41(1), 179-183.
- [25] Sutanto, P., Picchioni, F., & Janssen, L. (2006). Modelling a continuous devulcanization in an extruder. *Chemical Engineering Science*, 61(21), 7077-7086.
- [26] Sutanto, P., Picchioni, F., Janssen, L., Dijkhuis, K., Dierkes, W. K., & Noordermeer, J. W. (2006). EPDM rubber reclaim from devulcanized EPDM. *Journal of applied polymer science*, 102(6), 5948-5957.
- [27] Jalil, V. A., Ghasemi, E., Azizi, H., & Karabi, M. (2007). A study of EPDM devulcanization in a co-rotating twin-screw extruder. *Iranian Polymer Journal*, 16(5), 327-335.
- [28] Mouri M., O. H., Matsushita M., Honda H., Nakashima K., Takeushi K., Suzuki Y., & Owaki M. (2000). Continuous devulcanization by shear flow stage reaction control technology for rubber recycling. Part 4. Devulcani station mechanism for EPDM, *International Polymer Science and Technology*, 27, T/17- T/22.