

بررسی تأثیر سیستم پخت بر خواص مکانیکی کامپاند لاستیکی پایه PBR/RSS-1

امین حیدرنسب^۱، مجید هاشم زاده^{۱،۲*}

^۱ گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

^۲ مرکز تحقیقات فناوریهای نوین ساخت و تولید، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

*majid.hashemzadeh@iau.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، اثر تغییر سیستم پخت شامل نسبت‌های مختلف گوگرد (S) و شتاب‌دهنده CZ بر خواص مکانیکی کامپاند لاستیکی بر پایه ترکیب ثابت پلیمرهای PBR و RSS-1 بررسی شده است. سه فرمولاسیون مختلف با درصد‌های متغیر S و CZ طراحی گردید که در سایر اجزای فرمولاسیون یکسان بودند. خواصی همچون سختی، مقاومت سایشی، استحکام کششی، ازدیاد طول و نیروی پارگی بر اساس استانداردهای ASTM اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که با افزایش گوگرد و کاهش CZ، استحکام کششی و درصد ازدیاد طول افزایش یافت، در حالی که سختی تقریباً ثابت ماند.

واژه‌های کلیدی

کامپاند لاستیکی، سیستم پخت، گوگرد، CZ، خواص مکانیکی، شبکه پخت

۱- مقدمه

سیستم پخت در لاستیک‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در ساختار شبکه پلیمری و در نتیجه خواص نهایی کامپاند ایفا می‌کند. استفاده از ترکیبات مختلف گوگرد و شتاب‌دهنده‌هایی نظیر CZ می‌تواند تأثیر بسزایی بر میزان اتصال عرضی (crosslinking) و چگالی شبکه پخت بگذارد [1,2]. در مطالعات پیشین، تحقیقات زیادی روی تأثیر نوع فیلر [3] و پایه پلیمری [4] صورت گرفته، اما مطالعه هم‌زمان تأثیر نسبت گوگرد به شتاب‌دهنده با نگرداشتن پایه پلیمری ثابت، کمتر گزارش شده است.

به عنوان مثال، ریواتون و همکاران [5] تأکید کردند که پخت گرمایی در حضور شتاب‌دهنده‌های آلی منجر به بهبود خواص مکانیکی می‌شود. همچنین فورملا و همکاران نشان دادند که افزایش چگالی شبکه از طریق ترکیب دقیق S/CZ باعث ارتقای خواص کششی و مقاومت سایشی می‌گردد [6]. آمریت و همکاران نیز ارتباط مستقیمی بین نوع سیستم پخت و رفتار مکانیکی-دینامیکی در کامپاندهای NR/SBR یافته‌اند [7].

۲- مواد و روش‌ها

فرمولاسیون سه کامپاند که تنها تفاوت آن‌ها در مقدار S و CZ است در جدول ۱ آمده است. در تمامی نمونه‌ها سایر اجزا ثابت نگه داشته شده‌اند. شکل ۱ و ۲ به ترتیب مواد گوگرد و شتاب‌دهنده CBS مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

جدول ۱. بررسی فرمولاسیون کامپاندها

مواد اولیه	کامپاند ۳	کامپاند ۴	کامپاند ۵
PBR	50	50	50
RSS-1	50	50	50
N-330	60	60	60
OIL-290	12	12	12
ZNO	5	5	5
STEARIC ACID	2.5	2.5	2.5
TMQ	1	1	1
4010	1	1	1
COLOPHONY	3	3	3
SULFUR	0.9	1.2	1.8
CZ	1.8	1.5	0.9



شکل ۲. شتاب دهنده cbs



شکل ۱. گوگرد (S)

آزمون‌های زیر مطابق با استانداردهای ASTM انجام شده‌اند:

- استحکام کششی، ازدیاد طول و نیروی پارگی طبق استاندارد ASTM D412 (شکل ۳)
- مقاومت سایشی طبق استاندارد ASTM D5963 (شکل ۴)
- سختی طبق استاندارد ASTM D2240 (شکل ۵)



شکل ۵. تست سختی



شکل ۴. دستگاه رثومتر



شکل ۳. تست استحکام کششی، ازدیاد طول

۳- نتایج و بحث

جدول ۲. نتایج حاصل از آزمون‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است.

شرح آزمون	استاندارد	واحد	کامپاند ۳	کامپاند ۴	کامپاند ۵
سختی	D2240	Shore A	60	61	60
مقاومت سایشی	D5963	mm ³	59	53	48
استحکام کششی	D412	MPa	17.29	17.88	18.94
ازدیاد طول	D412	%	505.09	515.29	561.73
نیرو در پارگی	D412	N	314.96	335.89	344.15

با بررسی داده‌های جدول ۲ می‌توان تأثیر تغییر نسبت اجزای سیستم پخت (S و CZ) بر خواص مکانیکی را به‌وضوح مشاهده کرد. در این تحقیق، پایه پلیمری ثابت نگه داشته شد و تنها ترکیب گوگرد و شتاب‌دهنده تغییر یافت تا نقش دقیق این سیستم در شکل‌گیری شبکه پخت بررسی شود.

- **سختی (Shore A):** با وجود تغییرات قابل‌توجه در مقادیر گوگرد و CZ، سختی در سه کامپاند تقریباً ثابت باقی مانده است (۶۰-۶۱). این نشان می‌دهد که در محدوده استفاده شده، سختی نسبت به تغییرات سیستم پخت حساسیت بالایی نداشته و احتمالاً ناشی از تأثیر خنثی‌کننده متقابل بین افزایش پیوندهای عرضی و کاهش انعطاف‌پذیری زنجیره‌هاست.
 - **مقاومت سایشی (mm³):** کامپاند ۵، که بیشترین مقدار گوگرد (PHR 1.8) و کمترین مقدار CZ (PHR 0.9) را دارد، بهترین مقاومت سایشی را نشان می‌دهد (48 mm³). این به دلیل افزایش چگالی شبکه پخت و قفل‌شدگی بیشتر زنجیره‌های پلیمری است که سایش سطحی را کاهش می‌دهد. این یافته مطابق با گزارش فورملا و همکاران [6] است.
 - **استحکام کششی (MPa):** روند افزایشی کاملاً مشخص است. افزایش گوگرد باعث ایجاد پیوندهای بیشتر و قوی‌تر بین زنجیره‌ها شده و منجر به رشد استحکام از 17.29 MPa به 18.94 MPa شده است. کاهش شتاب‌دهنده نیز باعث کندتر شدن فرآیند پخت اما منجر به تشکیل شبکه‌های منظم‌تر شده است.
 - **ازدیاد طول (%):** افزایش ازدیاد طول از 505% به 561% در کامپاند ۵ نشان‌دهنده این است که در کنار استحکام بالا، انعطاف‌پذیری حفظ شده و حتی بهبود یافته است. این ویژگی بسیار مطلوب بوده و نشان‌دهنده ساختار تعادلی بین پیوندهای عرضی سخت و نواحی آمورف الاستیک است.
 - **نیرو در پارگی (N):** بیشترین مقدار نیرو در پارگی نیز در کامپاند ۵ مشاهده شد (344.15N)، که نشان‌دهنده بیشترین مقاومت ساختاری در برابر گسیختگی ناگهانی است. این ویژگی برای قطعات کاربردی تحت تنش‌های دینامیکی بسیار حیاتی است.
- به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که افزایش نسبت گوگرد به CZ باعث افزایش چگالی شبکه، کاهش سایش، بهبود استحکام و انعطاف‌پذیری شده است، بدون آنکه باعث افزایش ناخواسته در سختی شود. این رفتار به خوبی با مدل‌های تئوری شبکه پخت و مطالعات قبلی [6,7] سازگاری دارد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، با هدف بررسی نقش سیستم پخت در عملکرد مکانیکی کامپاندهای لاستیکی، سه فرمولاسیون طراحی شد که تنها تفاوت آن‌ها در مقادیر گوگرد و شتاب‌دهنده CZ بود، در حالی که پایه پلیمری و سایر اجزا ثابت نگه داشته شد.

نتایج نشان داد که با افزایش میزان گوگرد و کاهش مقدار شتاب دهنده، خواص مکانیکی از جمله مقاومت سایشی، استحکام کششی، ازدیاد طول و نیرو در پارگی به طور معناداری بهبود می یابد، در حالی که سختی تغییر محسوسی نمی کند. این موضوع نشان می دهد که می توان از طریق طراحی دقیق سیستم پخت، شبکه ای مقاوم و انعطاف پذیر ایجاد کرد که برای کاربردهای صنعتی با تنش دینامیکی بالا، ارتعاشات یا تغییر شکل های تکراری مناسب است. کامپاند ۵ به عنوان فرمول بهینه شناسایی شد که ترکیب آن با PHR 1.8 گوگرد و PHR CZ 0.9 عملکردی متعادل و برتر دارد. یافته های این پژوهش می تواند راهگشای طراحی کامپاندهای لاستیکی خاص برای کاربردهایی مانند لرزه گیر، ضربه گیر، کفی صنعتی، قطعات دینامیک مکانیکی و کفش های صنعتی باشد.

۵- مراجع

- [1] Blow, C. M., & Hepburn, C. (1982). *Rubber Technology and Manufacture*. Butterworths.
- [2] Coran, A. Y. (2003). Vulcanization. In *Science and Technology of Rubber* (3rd ed., pp. 321–366). Elsevier.
- [3] Leblanc, J. L. (2002). Rubber–filler interactions and rheological properties in filled compounds. *Progress in Polymer Science*, 27(4), 627–687. [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(01\)00042-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(01)00042-5)
- [4] Hayeemasae, N., Soontaranon, S., & Masa, A. (2024). Structure–property relationships of different natural rubber grades. *Journal of Rubber Research*, <https://doi.org/10.1177/14777606241243113>
- [5] Rivaton, A., et al. (2000). Influence of thermal oxidation on the ageing of EPDM. *Polymer Degradation and Stability*, 67(3), 463–469. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(99\)00124-5](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(99)00124-5)
- [6] Formela, K., et al. (2014). Curing behavior and mechanical properties of natural rubber compounds filled with lignocellulosic biomass. *Industrial Crops and Products*, 55, 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.01.033>
- [7] Amrith, R., & Kumar, M. (2019). Effect of curing systems on mechanical and dynamic properties of NR/SBR blends. *Materials Today: Proceedings*, 18, 1940–1947. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.024>
- [8] Bhattacharya, M., et al. (2020). Role of accelerator/sulfur ratio on network formation and mechanical behavior of rubber vulcanizates. *Polymer Testing*, 90, 106715. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106715>