



کویر تایر

اولین تولیدکننده مقدار بیشترین انرژی

بررسی تأثیر میزان دوده بر خواص فیزیکی - مکانیکی و رئولوژیکی RPA آمیزه آج تایر

فائزه نجفی^{۱*}، علی جمالی نوذری^۲ محمد حیدرپور^۲، یاسر مقبولی^۴، مسعود خوشنود^۱

^۱ کارشناس تکنولوژی - ^۲ مدیر مهندسی مواد و فرآیند - ^۳ سرپرست اختلاط - ^۴ رئیس توسعه مواد و فرآیند شرکت کویر تایر بیرجند

*Fnajafii2024@gmail.com

چکیده:

امروزه تایر به عنوان یکی از اجزای کلیدی صنعت حمل و نقل، نیازمند فرمولاسیون‌هایی است که همزمان ویژگی‌های مکانیکی مطلوب و عملکرد دینامیکی بهینه را فراهم آورند. دوده^۱ به عنوان پرکننده‌ی تقویتی اصلی در آمیزه آج تایر نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود سختی، استحکام و مقاومت سایشی دارد. در این پژوهش، اثر مقادیر مختلف دوده بر خواص فیزیکی-مکانیکی و رفتار دینامیکی آمیزه‌های لاستیکی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، چندین نمونه با درصد‌های متفاوت دوده تهیه و پس از پخت، آزمون‌های مکانیکی (کشش، سختی، سایش) و رئولوژیکی با استفاده از دستگاه تلیوگر فرآیند لاستیک^۲ (RPA) انجام شد. نتایج نشان داد با افزایش میزان دوده تا حد مشخص، استحکام کششی و مقاومت سایشی بهبود می‌یابد. با این حال افزایش بیش از حد دوده موجب کاهش ازدیاد طول در نقطه شکست و افزایش هیستریزس می‌گردد. تحلیل‌های RPA نیز نشان‌دهنده افزایش مدول ذخیره و کاهش انعطاف‌پذیری دینامیکی با افزایش درصد دوده بود. این نتایج اهمیت تعیین درصد بهینه دوده در فرمولاسیون آج تایر را نشان می‌دهد، به گونه‌ای که تعادل مناسبی میان مقاومت سایشی، چسبندگی و مقاومت غلتشی حاصل گردد.

واژه‌های کلیدی: RPA، خواص دینامیکی، دوده، تایر، آج، مقاومت سایشی

محور مقاله: مواد اولیه و آمیزه سازی

۱. مقدمه

صنعت تایر یکی از مهم‌ترین شاخه‌های کاربردی مهندسی پلیمر به شمار می‌رود که نقشی حیاتی در حمل و نقل ایمن و بهینه ایفا می‌کند.

آج تایر به عنوان بخشی از تایر که بیشترین تماس را با سطح جاده دارد، باید ترکیبی از ویژگی‌های متضاد را همزمان در خود داشته باشد. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به مقاومت سایشی بالا برای افزایش طول عمر، چسبندگی مناسب جهت ایمنی، و در عین حال انعطاف‌پذیری لازم برای کاهش مصرف انرژی و مقاومت غلتشی اشاره کرد. دستیابی به این تعادل پیچیده، همواره یکی از چالش‌های اصلی در طراحی فرمولاسیون کامپاندهای تایر محسوب می‌شود.

در این میان، استفاده از پرکننده‌های تقویتی، به ویژه دوده نقش کلیدی در بهبود خواص مکانیکی و دینامیکی لاستیک ایفا می‌کند. دوده به دلیل ساختار منحصربه‌فرد و تعامل قوی با ماتریس پلیمری، باعث افزایش سختی، مدول، و مقاومت سایشی می‌شود. بهبود خواص مکانیکی ناشی از ایجاد یک شبکه فیزیکی بین ذرات دوده و زنجیره‌های پلیمری است که به طور مستقیم بر استحکام کششی و مقاومت در برابر پارگی اثر گذار است.

با این حال، افزایش بیش از حد میزان دوده می‌تواند منجر به افزایش هیستریزس، کاهش الاستیسیته و افزایش تولید گرما در حین سرویس شود که خود عاملی نامطلوب در عملکرد تایر است. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که نوع دوده و میزان مصرف آن، اثر متفاوتی بر خواص نهایی تایر دارد. به عنوان مثال، گزارش شده است که دوده‌های با سطح ویژه بالاتر موجب بهبود استحکام و سختی می‌شوند اما در عوض، انعطاف‌پذیری و ازدیاد طول در شکست کاهش می‌یابد[۱]. از طرفی، پژوهش‌های دیگر نشان داده‌اند که وجود مقدار بهینه‌ای از دوده، بهترین توازن را میان مقاومت سایشی، چسبندگی و مقاومت غلتشی ایجاد می‌کند. بنابراین، تعیین مقدار بهینه دوده در فرمولاسیون آج تایر یک موضوع اساسی برای تولیدکنندگان تایر به شمار می‌رود[۲].

از سوی دیگر، بررسی دقیق خواص دینامیکی آمیزه‌های تایر با استفاده از ابزارهای پیشرفته مانند RPA امکان‌پذیر است. این دستگاه می‌تواند با اعمال دامنه‌های مختلف کرنش و دما، اطلاعات دقیقی در خصوص مدول ذخیره (G')، مدول اتلاف (G'')، و تن دلتا^۳ (tan δ) ارائه دهد. این پارامترها مستقیماً به ویژگی‌های عملکردی تایر از جمله چسبندگی روی سطوح مرطوب، مقاومت غلتشی و تولید گرما مربوط هستند. در نتیجه، تحلیل نتایج RPA به عنوان یک روش مکمل آزمون‌های مکانیکی، درک عمیق‌تری از نقش دوده در رفتار لاستیک فراهم می‌کند. با توجه به اهمیت موضوع و نیاز صنعت به بهبود عملکرد تایر، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر میزان دوده بر خواص فیزیکی-مکانیکی و رئولوژیکی آمیزه آج تایر انجام شده است. در این تحقیق، فرمولاسیون‌هایی با مقادیر مختلف دوده تهیه گردیده و پس از انجام آزمون‌های مکانیکی استاندارد و تحلیل رفتار دینامیکی با استفاده از RPA، رابطه میان درصد دوده و خواص کلیدی مورد بحث قرار گرفته است.

۲. مواد و روش‌ها

انتخاب مواد اولیه و شیوه‌ی فرآیند در مطالعه‌ی خواص کامپاندهای تایر، همواره مورد بحث و چالش بوده است. به طور خاص، انتخاب نوع دوده و مقدار آن در فرمولاسیون آج تایر، نه تنها بر ویژگی‌های مکانیکی بلکه بر عملکرد نهایی تایر در شرایط سرویس اثر مستقیم دارد. برای بررسی اثر میزان دوده، مطابق جدول ۱، چندین فرمولاسیون مختلف با مقادیر ۵۰ phr، ۷۰، ۶۰، ۸۰ دوده تهیه گردید. سایر اجزای فرمولاسیون ثابت در نظر گرفته شد تا تنها عامل متغیر، درصد دوده باشد.

جدول ۱- مقدار مواد اولیه در فرمولاسیون آمیزه آج تایر

D	C	B	A
57	57	57	SBR1712
23	23	23	BR-CIS
34	34	34	SBR1500
80	70	60	N330
7	7	7	روغن آروماتیک
3	3	3	اکسید روی
3	3	3	آتوکس
3	3	3	6PPD
1	1	1	ریوآکس
1	1	1	اسید استئاریک
2	2	2	کور زین
2	2	2	گوگرد
2	2	2	TBBS
0.8	0.8	0.8	MBTS
0.3	0.3	0.3	PVI

۳. نتایج و بحث

۳.۱. خواص مکانیکی و دینامیکی

در این بخش، نتایج حاصل از آزمون‌های مکانیکی و دینامیکی بر روی آمیزه‌های ترد حاوی مقادیر مختلف دوده (۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ phr) ارائه و تحلیل شده است (جدول ۲).

جدول ۲- نتایج خواص فیزیکی-مکانیکی

نمونه	سایش	دانسیته	دیسپرز	چگندگی	سختی	پارگی	مدول ۳۰۰٪	مدول ۱۰۰٪	ازدیاد طول	کشش
50 phr	86	1.09	9.3	36	52	36.36	6.05	1.65	498.36	14.88
60 phr	86	1.11	9.1	36	55	40.8	8.195	2.31	449.88	16.68
70 phr	90	1.13	9	34	60	42.24	11.11	2.97	412.2	19.68
80 phr	94	1.14	9.1	29	64	41.4	13.53	3.08	348.84	19.44

نتایج حاصل از آزمون‌های مکانیکی و دینامیکی نشان داد که میزان دوده تأثیر قابل‌توجهی بر خواص آمیزه ترد دارد. با افزایش مقدار دوده از ۵۰ تا ۸۰ phr، روندی صعودی در سختی^۴ مشاهده شد. این افزایش ناشی از تشکیل شبکه‌های تقویتی قوی‌تر بین ذرات دوده و ماتریس پلیمری است که حرکت زنجیره‌های پلیمری را محدود کرده و منجر به افزایش سختی می‌شود. در عین حال، ازدیاد طول در نقطه پارگی کاهش یافت که بیانگر کاهش انعطاف‌پذیری آمیزه در حضور سطوح بالاتر دوده است. در نتیجه، سختی بالاتر همواره مطلوب نیست؛ زیرا سختی بیش از حد می‌تواند باعث کاهش راحتی سواری و افت چسبندگی روی سطوح مرطوب گردد.

در آزمون کشش، مشاهده شد که استحکام کششی تا حدودی با افزایش دوده بهبود می‌یابد، اما ازدیاد طول در شکست کاهش قابل توجهی نشان داد. به عبارت دیگر، آمیزه با ۵۰ phr دوده انعطاف‌پذیری بالاتری داشتند، در حالی که در ۸۰ phr شکننده‌تر عمل کردند. این موضوع بیانگر آن است که افزایش بیش از حد پرکننده، موجب محدود شدن حرکت زنجیره‌های پلیمری و کاهش خاصیت الاستیک می‌شود.

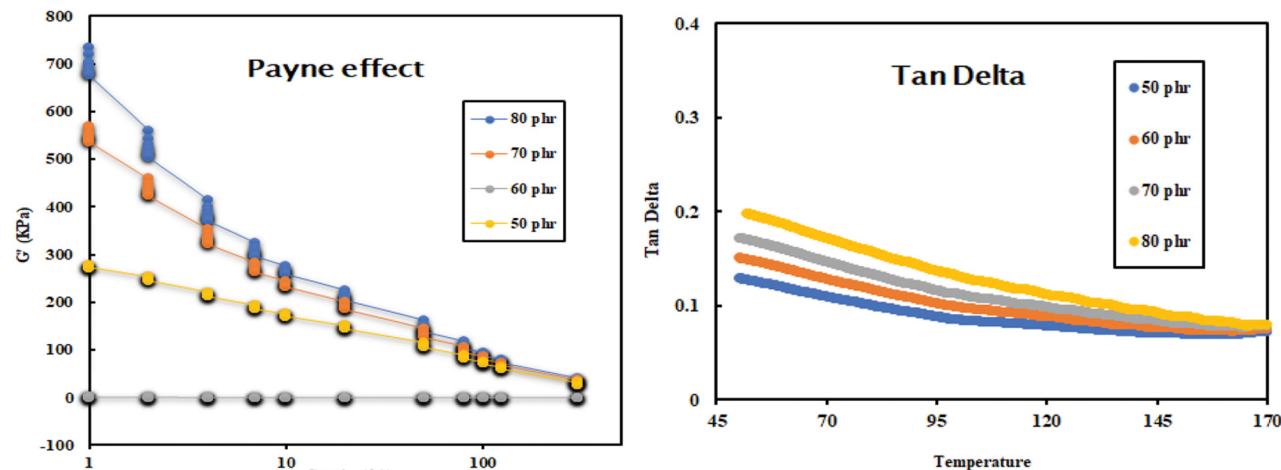
نتایج آزمون سایش نیز نشان می‌دهد که مقاومت به سایش در ترکیبات با مقدار دوده بالاتر بهبود یافته است که ناشی از سخت‌تر شدن ماتریس و تشکیل ساختارهای پایدارتر می‌باشد. همچنین، نتایج آزمون RPA نیز این روندها را تأیید کرد.

۳.۲. خواص دینامیکی و رئولوژیکی (RPA)

نتایج آزمون RPA (شکل ۲) بیانگر آن بود که مدول ذخیره (G') در کرنش‌های کم با افزایش میزان دوده به طور قابل توجهی افزایش یافت، در حالی که در کرنش‌های بالا کاهش محسوسی نشان داد. بنابراین ΔG' یا شاخص شدت پن افکت^۵ در آمیزه‌هایی با دوده بالاتر، بیشترین مقدار را داشت. این امر به خوبی نشان می‌دهد که افزایش میزان فیلر موجب ایجاد شبکه‌های فیلری متراکم‌تر و برهم‌کنش‌های قوی‌تر بین ذرات می‌شود که در اثر اعمال کرنش بالا فرو می‌پاشند. از سوی دیگر، مقدار tan δ نیز با افزایش میزان دوده در کرنش‌های بالا افزایش یافت که نشانه‌ی افزایش اتلاف انرژی و رفتار هیسترتیک بیشتر است. این موضوع می‌تواند در کاربردهای تایر، منجر به افزایش مقاومت غلتشی و گرمایی گردد.

⁴ Shore A

⁵ Payne effect



شکل ۲- نتایج خواص دینامیکی و رئولوژیکی

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش، تأثیر میزان دوده در محدوده‌ی ۵۰ تا ۸۰ phr بر خواص فیزیکی، مکانیکی و دینامیکی آمیزه ترد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد با افزایش میزان دوده از ۵۰ تا ۸۰ phr، سختی، مدول و مقاومت سایشی آمیزه ترد افزایش یافته، در حالی که ازدیاد طول و چگندگی کاهش یافته است. افزایش دوده موجب شکل‌گیری شبکه‌های فیلری متراکم‌تر و افزایش شدت پنین افکت در آزمون RPA شد. این تغییرات نشان‌دهنده‌ی تقویت مکانیکی و افزایش اتلاف انرژی در کرنش‌های بالا است. در نتیجه، دوده بیش از حد هرچند موجب بهبود استحکام می‌شود، اما انعطاف‌پذیری و رفتار دینامیکی مطلوب را کاهش می‌دهد. مقدار بهینه‌ی دوده باید با توجه به تعادل میان استحکام، سایش و هیستریزس تعیین گردد.

۵. مراجع

- Al-maamori, M. H., Al-Zubaidi, A. A. A., & Subeh, A. A. (2015). Effect of carbon black on mechanical and physical properties of acrylonitrile butadiene rubber (NBR) composite. *Academic Research International*, 6(2), 28.
- Robertson, C. G., & Hardman, N. J. (2021). Nature of carbon black reinforcement of rubber: Perspective on the original polymer nanocomposite. *Polymers*, 13(4), 538.
- Smith, J., & Brown, L. (2023). Advances in Rubber Process Analyzers for Tire Industry. *Polymer Testing*, 110, 107592. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.107592>
- Lee, K., et al. (2024). Viscoelastic Behavior of Rubber Compounds Measured by RPA. *Journal of Applied Polymer Science*, 141(12), e52710. <https://doi.org/10.1002/app.52710>
- Morrison, N. J., & Porter, M. (2021). Advances in Rubber Rheology Testing. *Journal of Applied Polymer Science*, 138(12).