

بررسی اثر طراحی میکروسلولی در لاستیک‌های تایر سنگین برای کاهش وزن و مقاومت غلتشی بدون افت خواص مکانیکی

پریسا مربی^{۱*}، سمراء نیک‌بخت سرداری^۲ و رضا عابدی^۳

۱- کارشناس تکنولوژی، شرکت لاستیک سیلان رازی

۲- کارشناس تضمین کیفیت، شرکت لاستیک سیلان رازی

۳- رئیس مهندسی آمیزه، شرکت لاستیک سیلان رازی

parisamorabbi@gmail.com

چکیده: کاهش وزن و مقاومت غلتشی (Rolling Resistance) از اهداف کلیدی در توسعه تایرهای سنگین پایدار است، اما این اهداف اغلب با کاهش خواص مکانیکی همراه می‌شوند. در این پژوهش، یک رویکرد نوین مبتنی بر ایجاد ساختار میکروسلولی کنترل‌شده در لایه زیر آج (undertread) تایر سنگین ارائه شده است. با استفاده از فرایند ولکانش در حضور عامل دمش‌دهنده شیمیایی (chemical blowing agent)، ساختاری با تخلخل ۸ تا ۱۲٪ و اندازه سلول میانگین ۴۵ میکرون ایجاد شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که تایرهای مجهز به این ساختار، ۱۱٪ کاهش در وزن لایه زیر آج و ۱۹٪ کاهش در مقاومت غلتشی را بدون کاهش قابل توجه در استحکام کششی (کاهش تنها ۴٪) و مدول (کاهش ۱۰٪) از خود نشان می‌دهند. آزمون DMA نیز تأیید کرد که ضریب اتلاف انرژی (tan δ) در دمای ۶۰ °C به‌طور معنی‌داری کاهش یافته است. مقایسه توزیع اندازه سلول‌ها و جدول مقایسه عملکردی، برتری این روش را نسبت به روش‌های سنتی کاهش وزن (مانند کاهش ضخامت یا استفاده از پرکننده‌های سبک) نشان می‌دهد. این پژوهش گامی نو در جهت طراحی «تایرهای سبک‌وزن هوشمند» برای کاربردهای صنعتی محسوب می‌شود.

واژه‌های کلیدی: میکروسلول، تایر سنگین، مقاومت غلتشی، کاهش وزن، ساختار متخلخل، خواص مکانیکی

مقدمه

تایرهای خودروهای سنگین نقش تعیین‌کننده‌ای در مصرف سوخت و انتشار گازهای گلخانه‌ای دارند. حدود ۲۰ تا ۳۰٪ از مقاومت حرکتی یک کامیون ناشی از اتلاف انرژی در تایر است که عمدتاً به‌صورت گرمایش داخلی ناشی از تغییر شکل‌های چرخه‌ای ظاهر می‌شود [۱]. یکی از راه‌کارهای مؤثر برای کاهش این اتلاف، کاهش جرم متحرک تایر است، زیرا جرم کمتر منجر به نیروهای اینرسی پایین‌تر و در نتیجه تغییر شکل‌های کمتر می‌شود [۲]. با این حال، روش‌های سنتی کاهش وزن مانند کاهش ضخامت لایه‌ها یا استفاده از پرکننده‌های سبک، اغلب با کاهش چشم‌گیر در استحکام، سختی و عمر خستگی همراه هستند [۳]. در مقابل، طراحی ساختار میکروسلولی (Microcellular Structuring) که در آن حباب‌های ریز گاز در ماتریس لاستیکی ایجاد می‌شوند می‌تواند به‌طور هم‌زمان وزن را کاهش دهد و با هدایت بهینه تنش، از تمرکز تنش‌های موضعی جلوگیری کند [۴].

در این پژوهش، فرضیه اصلی این است که ایجاد یک ساختار میکروسلولی کنترل‌شده و یکنواخت در لایه زیر آج (undertread) که بیشترین سهم را در جرم تایر دارد می‌تواند بدون افت قابل توجه در خواص مکانیکی، منجر به کاهش وزن و مقاومت غلتشی شود.

بخش تجربی

مواد و فرمولاسیون

آمیزه پایه براساس (۶۰/۴۰) SBR/BR با ۵۰ phr کربن‌بلک N234 تهیه شد. به‌عنوان عامل دمش‌دهنده، از azodicarbonamide (ADC) با غلاف پلیمری استفاده شد تا تجزیه آن در دمای ولکانش (۱۵۰ °C) کنترل شود [۵]. سه فرمولاسیون طراحی شد:

• شاهد: بدون عامل دمش

• میکرو-۸: ۲ → phr ADC → تخلخل ۸٪

• میکرو-۱۲: ۳٫۵ → phr ADC → تخلخل ۱۲٪

فرایند تولید

آمیزه‌ها در میکسر تهیه و سپس در قالب لایه زیر آج ولکان شدند. دمای ولکانش ۱۵۰ °C و زمان t90 بود. پس از ولکانش، نمونه‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای بررسی مورفولوژی سلول‌ها مورد بررسی قرار گرفتند [۶].

بخش آزمایشگاهی

آنالیز مورفولوژی

تصاویر SEM نشان داد که ساختار میکروسلولی یکنواختی با اندازه سلول ۳۵ تا ۵۵ میکرون و ضخامت دیواره سلول ۸ میکرون ایجاد شده است. توزیع اندازه سلول‌ها در نمونه میکرو-۱۲: اوج توزیع در ۴۵ μm نشان‌دهنده یکنواختی خوب است.

آزمون‌های مکانیکی

- کشش: طبق ASTM D412
- سختی: طبق ASTM D2240
- وزن مخصوص: (ASTM D297)

آزمون DMA و مقاومت غلتشی

آزمون DMA در دمای ۶۰ °C و فرکانس ۱۰ Hz انجام شد. هم‌چنین، مقاومت غلتشی با دینامومتر غلتکی طبق ISO 18164 اندازه‌گیری شد [۷].

نتیجه‌ها و بحث

کاهش وزن و تخلخل

نتایج نشان داد که تخلخل واقعی با مقدار طراحی شده همخوانی خوبی دارد:

که منجر به کاهش تغییر شکل های هیستریزیسی می شود [۹].

بخش مقایسه ای

همان طور که در جدول ۳ مشاهده می شود، روش میکروسلولی بهترین تعادل بین کاهش وزن، کاهش مقاومت غلتشی و حفظ خواص مکانیکی را ارائه می دهد [۱۰].

جدول ۳- مقایسه روش های کاهش وزن در تایر سنگین

روش	درصد کاهش وزن	درصد کاهش RR	درصد کاهش استحکام	پیچیدگی فرایند
کاهش ضخامت ۱۰٪	۱۰	۸	۱۵	پایین
استفاده از سیلیس سبک	۷	۱۲	۹	بالا
میکروسلول (این پژوهش)	۱۱	۱۹	۴	متوسط

نتیجه گیری

این پژوهش نشان داد که طراحی ساختار میکروسلولی کنترل شده در لایه زیر آج تایر سنگین می تواند به طور هم زمان وزن و مقاومت غلتشی را کاهش دهد، بدون این که خواص مکانیکی به صورت چشم گیری کاهش یابند. این روش با استفاده از فناوری های موجود در خط تولید (مانند عوامل دمش دهنده کنترل شده) قابل پیاده سازی است و نیازی به تغییرات اساسی در فرایند ندارد. باتوجه به فشارهای فزاینده زیست محیطی و اقتصادی بر صنعت حمل و نقل، چنین رویکردهای نوینی می توانند نقش کلیدی در توسعه تایرهای نسل بعدی ایفا کنند.

جدول ۱-

نمونه	درصد تخلخل	درصد کاهش وزن لایه
شاهد	۰	۰
میکرو-۸	8.2 ± 0.5	۷.۹
میکرو-۱۲	11.7 ± 0.6	۱۱.۳

خواص مکانیکی

جدول ۲- خواص مکانیکی آمیزه های میکروسلولی

نمونه	استحکام کششی (MPa)	مدول ۱۰۰٪ (MPa)	سختی (SHORE A)
شاهد	۲۲.۴	۳.۸۵	۶۸
میکرو-۸	۲۱.۸	۳.۷۲	۶۶
میکرو-۱۲	۲۱.۵	۳.۶۲	۶۴

کاهش خواص کاملاً جزئی بوده و در محدوده قابل قبول برای کاربردهای تایر سنگین است [۸].

کاهش مقاومت غلتشی

$\tan \delta$ در 60°C :

شاهد: ۰.۱۲۶

میکرو-۱۲: ۰.۱۰۲ / کاهش (۱۹٪)

مقاومت غلتشی اندازه گیری شده در دینامومتر: کاهش ۱۷.۵٪

این کاهش ناشی از کاهش جرم و کاهش حجم ماده فعال در لایه زیر آج است

مراجع

- [1] ISO 28580:2018. Passenger car, truck and bus tyre rolling resistance measurement method.
- [2] Schuring, J. R. (2004). Tire wear modeling and prediction. Tire Science and Technology, 32(2), 75–98.
- [3] Gent, A. N. (2012). Engineering with Rubber: How to Design Rubber Components. Hanser Publishers.
- [4] Colton, J. S., & Suh, N. P. (1987). Microcellular foams: A new class of engineering materials. Polymer Engineering & Science, 27(7), 485–492.
- [5] Zhang, G., et al. (2019). Controlled foaming of rubber using encapsulated blowing agents. Journal of Cellular Plastics, 55(4), 321–335.
- [6] ASTM D297-15. Standard Test Methods for Rubber Products—Chemical Analysis.
- [7] SO 18164:2005. Tyres—Method for measuring rolling resistance.
- [8] Bhowmick, A. K., & Stephens, H. L. (2001). Handbook of Elastomers. CRC Press.
- [9] Heinrich, G., & Klüppel, M. (2002). Rubber friction and tire dynamics. Rubber Chemistry and Technology, 75(3), 355–372.
- [10] Liu, C., et al. (2021). Lightweight tire design through microcellular rubber technology. Polymer Testing, 99, 107189.
- [11] Wang, Y., et al. (2020). Foamed rubber composites for low rolling resistance tires. Composites Part B: Engineering, 182, 107632.
- [12] Gupta, A., et al. (2022). Sustainable tire materials: A review of structural innovations. Progress in Rubber Plastics and Recycling, 38(3), 145–162.