

اهمیت استفاده از منحنی سایش پذیری آموزه روبه در پیش بینی سایش تابلر

سید حمید رضا صباغی^۱، مهدی رزاقی کاشانی^{۱*} و میر حمید رضا قریشی^۲

۱= گروه مهندسی، پلیمر، دانشکده مهندسی، شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲= گروه لاستیک، پژوهشگاه پلیمرها، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی، ایران، تهران، ایران

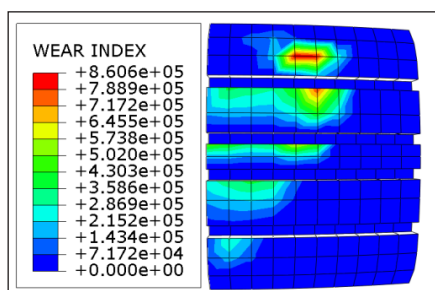
mehdi.razzaghi@modares.ac.ir

چکیده: امروزه یکی از چالش‌های صنعت تایر، مقایسه سایش آمیزه‌های رویه و پیش‌بینی قابل‌اطمینان سایش تایر است. مکانیک غلظشی تایر، شدت انرژی سایشی متغیر در نقاط مختلف جاپا، و سازوکار سایش خستگی رویه تایر حکم می‌کند که آزمون سایش آمیزه با این سازوکارها منطبق و نرخ سایش در شدت انرژی سایشی متفاوت اندازه‌گیری شود. بدین منظور آزمون آزمایشگاهی سایش آمیزه باید در وضعیت غلظشی (ساینده‌های آکرون با VMI-LAT100) اندازه‌گیری و برحسب شدت انرژی سایشی (شاخص سایش یا انرژی اصطکاکی) رسم شده تا منحنی سایش‌پذیری آمیزه حاصل شود. مقایسه خواص آمیزه‌های مختلف توسط این منحنی دقیق‌تر از مقایسه سایش آن‌ها در شدت انرژی سایشی ثابت است. ایجاد منحنی مستلزم محاسبه انرژی اصطکاکی است که از حاصل ضرب نیروهای اعمالی (طولی یا جانبی) و لغزش در جاپای چرخ حاصل می‌شود. ساینده گران قیمت VMI-LAT100 افزون‌بر اندازه‌گیری نرخ سایش، نیروی جانبی (و نیروهای طولی و قائم) اعمالی به چرخ حین غلظش را نیز اندازه می‌گیرد. این در حالی است که ساینده ارزان قیمت آکرون قادر به اندازه‌گیری این نیروها و محاسبه انرژی اصطکاکی نیست. در مطالعه حاضر دستگاه ساینده آکرون با طراحی ساده و نوآورانه، به واحدی برای اندازه‌گیری نیروی جانبی و منحنی سایش‌پذیری رویه تایر تبدیل شد. به‌منظور ارزیابی صحت و دقت منحنی سایش‌پذیری، چهار آمیزه رویه تایر سواری حاوی مقادیر مختلف لاستیک BR و نرخ سایش متفاوت بکار گرفته و نشان داده شد که منحنی‌های حاصل تفاوت سایش آمیزه‌ها را در شدت انرژی‌های سایشی متفاوت به‌خوبی نمایش می‌دهد. این منحنی‌ها در پیش‌بینی سایش تایر سواری، توسط شبه‌سازی آلمان محدود تایر به خدمت گرفته خواهند شد.

واژه‌های کلیدی: منحنی، سایش پذیری لاستیک، نیروی جانبی، انرژی اصطکاکی، اتلافی، ساینده آکرون، بیش‌بینی، سایش تابر

مقدمه

حصول است. اهمیت محاسبه و اندازه‌گیری این متغیر (شدت انرژی سایشی) تا حدی است که گاهی آن را «شاخص سایش» در تایرها می‌نامند. دستگاه ساینده آکرون در مقابل دستگاه پیشرفته LAT100 تنها قادر به اندازه‌گیری حجم ساینده شده در شرایط بار قائم متفاوت و زوایا لغزش مختلف است، اما فاقد قابلیت در محاسبه انرژی اصطکاکی اتلافی و نهایتاً ساخت منحنی سایش‌پذیری است. از این رو به‌منظور ساخت منحنی سایش‌پذیری به‌واسطه دستگاه ساینده آکرون لازم است این دستگاه مجهز به ابزاری دقیق برای اندازه‌گیری نیروی جانبی F_Y شود. این پژوهش با استفاده از طراحی مشخص در نحوه اندازه‌گیری نیروی جانبی چرخ ساینده آکرون، توانسته روند ساخت منحنی سایش‌پذیری را تسهیل کند. این منحنی در پیش‌بینی سایش تایر توسط شبیه‌سازی المان محدود به‌کار گرفته خواهد شد.



شکل ۱) شاخص سایش رویه تایر در سرعت ۵۰km/h توسط شبیه‌سازی FEA در زاویه لغزش ۳° مطابق استاندارد سایش LAT100

بخش تجربی

چهار آمیزه با مشخصه‌های SBR100، BR10، BR20 و BR30 طراحی و ساخته شدند. برای تمامی آمیزه‌ها آزمون‌های ریومتری پخت (ASTM-D-5289) و خواص مکانیکی (تنش-کرنش ASTM-D-412-C) انجام و نتایج آن در جدول ۱ قابل مشاهده است.

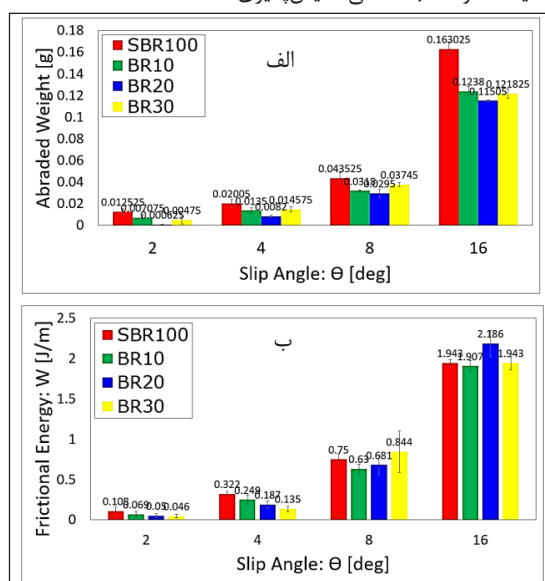
خواص تریبولوژیکی چرخ‌های لاستیکی پخت‌شده ساینده اکرون برای مقایسه رفتار ساییش در شرایط مختلف از زاویه و بار اعمال انجام شد. به‌منظور محاسبه انرژی

برقراری همبستگی میان اندازه‌گیری آزمایشگاهی سایش آمیزه رویه و متعاقباً پیش‌بینی سایش تایرها از منظر فنی، اقتصادی، و زیست‌محیطی از اهمیت بسزایی برخوردار بوده و یکی از چالش‌های اساسی محققان و طراحان تایر است. باوجود پیشرفت تجهیزات آزمایشگاهی و آزمون‌های رایج (تخمین آزمایشگاهی سایش تایر و سایش جاده)، همچنان انجام این آزمون‌ها بسیار هزینه‌بر و زمان‌بر است. روند سایش تایر یک پدیده پیچیده است که به پارامترهای متعددی نظیر آمیزه رویه، نحوه طراحی سازه و هندسه تایر، نگره‌ای الگوهای رویه، شرایط جاده و زبری سطح آن بستگی دارد. این مهم موجب شده تا همچنان روش‌های نوینی به‌منظور ردیابی این پدیده ارائه شود [۱]. ازاین‌رو دانش‌گران و مهندسان حوزه طراحی تایر به‌منظور سهولت، از فن منحنی سایش‌پذیری (نرخ سایش لاستیک برحسب انرژی اصطکاکی) برای مقایسه سایش آمیزه‌های رویه و پیش‌بینی سایش تایرها بهره می‌برند. رابطه نرخ سایش A و انرژی اصطکاکی اتلافی W توسط رابطه غیرخطی $A = \gamma(W) \times W$ معرفی شده که (ضریب سایش‌پذیری است که خود تابعی از انرژی اصطکاکی اتلافی است [۲]). اهمیت استفاده از چنین فنی در فراهم آوردن اندازه آزمایشگاهی سایش لاستیک در طیف گسترده‌ای از شدت انرژی سایشی است چون تایرها توزیعی از شاخص سایش یا انرژی اصطکاکی اتلافی را در ناحیه جاپا تجربه می‌کنند (شکل ۱)، برخلاف رویکرد رایج که میزان سایش را تنها در شرایط ثابتی از شدت انرژی سایشی بررسی می‌کنند؛ که این مهم می‌تواند منشأ اصلی خطا در پیش‌بینی سایش تایر باشد. Heinz و Grosch توانستند با طراحی دستگاهی با نام LAT100 روشی آزمایشگاهی برای ساخت منحنی سایش‌پذیری برحسب انرژی اصطکاکی ابداع، و بدین طریق سایش لاستیک در آزمایشگاه را با سایش تایر تا حدودی همبسته کنند [۳]. این دستگاه امکان اندازه‌گیری سه نیروی طولی، جانبی، و قائم وارد به چرخ را با استفاده از یک نیروسنج فراهم می‌کند. از آنجایی که تغییر شدت انرژی سایشی در این دستگاه با تغییر بار قائم و زاویه گردش (تعیین می‌شود، Grosch نشان داد که انرژی اصطکاکی بر واحد مسافت از معادله $W = F_Y \times \sin\theta$ قابل

جدول ۱- فرمولاسیون برحسب قسمت وزنی نسبت به لاستیک (phr)، زمان پخت، و استحکام کششی آمیزه‌های رویه تایر سواری

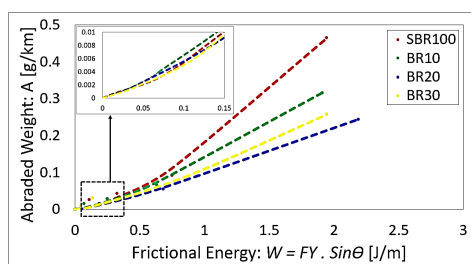
نام آمیزه	SBR	BR	CB N375	Aromatic Oil	Zinc Oxide	Stearic Acid	Paraffinic Wax	Antiozonant 6PPD	Accelerator CBS	Sulfur	$t_{90} - t_8$ [min:sec]	Tensile Strength [MPa]
SBR100	۱۰۰	۰	۷۰	۱۵	۲.۵	۱	۱	۱	۱.۵	۲	۴:۳۷	۱۵.۶۳
BR10	۹۰	۱۰	۷۰	۱۵	۲.۵	۱	۱	۱	۱.۵	۲	۴:۳۱	۱۵.۵۷
BR20	۸۰	۲۰	۷۰	۱۵	۲.۵	۱	۱	۱	۱.۵	۲	۴:۰۲	۱۴.۷۹
BR30	۷۰	۳۰	۷۰	۱۵	۲.۵	۱	۱	۱	۱.۵	۲	۳:۵۱	۱۰.۶۲

به تشریح انرژی اصطکاکی برحسب زاویه لغزش می‌پردازد. افزایش زاویه لغزش، انرژی اصطکاکی (شدت انرژی سایشی یا شاخص سایش) را افزایش می‌دهد. اما روند تغییر انرژی با افزایش θ در زوایای کم (2° و 4°) کاهش است اما در زوایای زیاد (8° و 16°) این روند دنبال نمی‌شود. به عبارت دیگر شدت انرژی سایشی یا انرژی اتلافی اصطکاکی با افزایش θ لزوماً کم نمی‌شود که دلیلی بر لزوم مقایسه نمونه‌ها با منحنی سایش‌پذیری است.



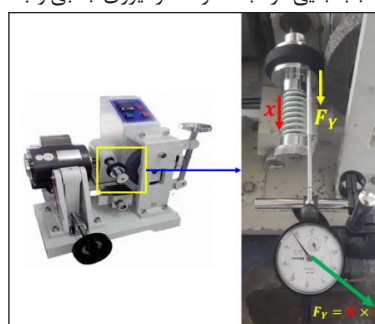
شکل ۴) به ترتیب اندازه‌گیری وزن ساییده‌شده (الف) و انرژی اصطکاکی (ب) در زوایای لغزشی 2° ، 4° ، 8° و 16° برای آمیزه‌های رویه تایر سواری

حال با در دست داشتن نیروی جانبی و محاسبه انرژی اتلافی اصطکاکی، امکان ساخت منحنی سایش‌پذیری میسر است. توجه شود که برای ساخت این منحنی، داده‌های محور عمودی (مقدار وزنی نرخ سایش) از شکل ۴-الف، و محور افقی انرژی اتلافی اصطکاکی بر واحد مسافت از شکل ۴-ب خواهد بود (شکل ۵). نکته حائز اهمیت تغییر روند منحنی‌ها از نقطه مشخصی از انرژی‌های اصطکاکی کم (2° تا 4°) نسبت به انرژی‌های اصطکاکی زیاد (زوایای لغزشی 8° الی 16°) بوده که رویکرد آزمایشگاهی انرژی اصطکاکی ثابت (شکل ۳) فاقد ردیابی چنین تغییری است. از این منحنی می‌توان برای اعمال در پیش‌بینی سایش رویه تایر توسط شبیه‌سازی المان محدود استفاده کرد.



شکل ۵- منحنی سایش‌پذیری ساینده آکرون در ۱۰۰۰ دور معادل مسافت تقریبی ۰.۵ km برای چهار آمیزه لاستیکی طراحی‌شده رویه تایر سواری

اتلافی اصطکاکی از طریق اندازه‌گیری نیروی جانبی چرخ لاستیکی آکرون، آزمون در بار ثابت 6lb تحت زوایای سایشی 2° ، 4° ، 8° و 16° ساییده شدند. ایده اندازه‌گیری نیروی جانبی بر این است که با نصب یک محور جانبی و جانشانی فنری خطی روی محور پشت صفحه فلزی در تماس با چرخ لاستیکی (به منظور درک بهتر به شکل ۲ توجه کنید)، می‌توان جابه‌جایی این صفحه بر اثر نیروی جانبی ناشی از حرکت چرخ لاستیکی با زاویه لغزش مشخص را اندازه‌گیری کرد. میزان جابه‌جایی صفحه یا فشردگی فنر با ابزاری دقیق نظیر نشانگر جابه‌جایی اندازه‌گیری و ردیابی می‌شود و نهایتاً حاصل ضرب جابه‌جایی در ثابت فنر مقدار نیروی جانبی را به دست خواهد داد.

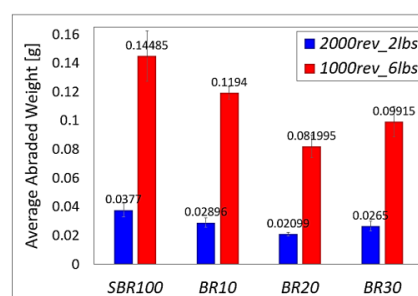


شکل ۲- دستگاه ساینده آکرون (سمت چپ). طراحی جانشانی فنر صلب در پشت صفحه فلزی نگه‌دارنده چرخ لاستیک (سمت راست)

نتیجه‌ها و بحث

آزمون سایش ساینده آکرون

متوسط کاهش وزن بر اثر سایش در مسافت غلتشی مشخص برحسب گرم در حالت انرژی اصطکاکی (زاویه لغزش) ثابت در شکل ۳ قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نرخ سایش آمیزه‌ها در هردو بار عمودی 2lb و 6lb با افزایش الاستومر پلی‌بوتادین کاهش می‌یابد که محدوده سایشی مناسبی را برای بررسی صحت و دقت منحنی سایش‌پذیری فراهم می‌آورد.



شکل ۳- آزمون سایش آمیزه‌های تایر سواری در زاویه 15° (انرژی اصطکاکی ثابت)

اندازه‌گیری نیروی جانبی چرخ لاستیکی و ساخت منحنی سایش‌پذیری

در شکل ۴-الف اثر زاویه لغزش بر میزان وزن ساییده‌شده آمیزه‌ها گزارش شده است. نیروی جانبی در حین غلتش برای تمامی آمیزه‌ها با اعمال بار عمودی 6lb و زوایای 2° ، 4° ، 8° و 16° به وسیله ردیابی نشانگر جابه‌جایی‌سنج اندازه‌گیری شده، و مطابق معادله $W = F_y \times \sin\theta$ محاسبه و در شکل ۴-ب گزارش شد. همان‌طور که در تمام زوایای لغزش مشاهده می‌شود افزایش الاستومر BR تا 20° قسمت وزنی، سایش را کاهش و پس از آن افزایش می‌دهد. شکل ۴-ب

مراجع

- [1] Liu, Huaqiao, et al. "Research on tire tread abrasion performance considering the pattern and slippage with verification" Polymer Testing 142 (2025): 108684.
- [2] Gent, A. N. "A hypothetical mechanism for rubber abrasion" Rubber chemistry and technology 62.4 (1989): 750-756.
- [3] Heinz, M., and K. A. Grosch. "A laboratory method to comprehensively evaluate abrasion, traction and rolling resistance of tire tread compounds" Rubber Chemistry and Technology 80.4 (2007): 580-607.