

طراحی آمیزه‌ی لاستیکی با توزیع بهینه‌ی سختی برای کاهش سایش غیریکنواخت در تایرهای سنگین

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

۱- کارشناس تکنولوژی شرکت لاستیک سبلان رازی

۲- کارشناس تضمین کیفیت شرکت لاستیک سبلان رازی

۳- رئیس مهندسی آمیزه شرکت لاستیک سبلان رازی

parisamorabbi@gmail.com

چکیده: سایش غیریکنواخت یکی از چالش‌های اصلی در عمر مفید تایرهای خودروهای سنگین است که نه تنها هزینه‌های نگهداری را افزایش می‌دهد، بلکه ایمنی رانندگی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این پژوهش، یک روش نوین برای طراحی آمیزه‌ی لاستیکی با توزیع فضایی بهینه‌شده‌ی سختی در ناحیه‌ی تماس لاستیک با سطح جاده ارائه شده است. با به کارگیری شبیه‌سازی‌های المان محدود (FEM) و الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه، توزیع سختی به گونه‌ای تنظیم شد که فشار تماسی در سراسر عرض تایر همگن‌تر شود. نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نشان داد که تایرهای طراحی شده با این روش، تا ۲۳٪ کاهش در سایش غیریکنواخت و ۱۷٪ افزایش در عمر کلی تایر را نسبت به آمیزه‌های متداول تجاری از خود نشان می‌دهند. همچنین، آزمون‌های دینامیکی-مکانیکی (DMA) و سایش DIN تأیید کردند که تغییرات سختی در محدوده‌ی طراحی شده، عملکرد پویایی تایر را مختل نمی‌کند. این پژوهش گامی مؤثر در جهت توسعه‌ی تایرهای پایدار، ایمن و کارآمد برای کاربردهای صنعتی محسوب می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تایر سنگین، سایش غیریکنواخت، توزیع سختی، آمیزه‌ی لاستیکی، بهینه‌سازی، آزمون آزمایشگاهی

مقدمه

تایرهای خودروهای سنگین در معرض شرایط بارگذاری شدید، دماهای بالا و نیروهای جانبی قابل توجهی قرار دارند. در چنین شرایطی، سایش غیریکنواخت به ویژه به صورت سایش شانه‌ای (shoulder wear) یکی از شایع‌ترین عیوب عملکردی تایر محسوب می‌شود [۱]. این پدیده نه تنها عمر تایر را کاهش می‌دهد، بلکه می‌تواند منجر به ناپایداری دینامیکی و خطرات ایمنی جدی شود [۲]. در سال‌های اخیر، تلاش‌های زیادی برای بهبود یکنواختی سایش از طریق بهینه‌سازی الگوی آج یا استفاده از مواد پرکننده‌ی پیشرفته انجام شده است [۳]. با این حال، کمتر به نقش توزیع فضایی سختی آمیزه‌ی لاستیکی در کنترل الگوی سایش پرداخته شده است. سختی لاستیک که به طور مستقیم تحت تأثیر نوع پلیمر، نوع و میزان پرکننده، و سیستم ولکانش قرار دارد تأثیر عمیقی بر نحوه‌ی توزیع فشار تماسی در ناحیه‌ی تماس دارد [۴]. در این پژوهش، فرضیه‌ی اصلی این است که با طراحی یک آمیزه‌ی لاستیکی که سختی آن در عرض تایر به صورت گرادیانی تغییر کند به گونه‌ای که سختی در نواحی مستعد سایش بیشتر، کمی کاهش یابد می‌توان توزیع فشار تماسی را یکنواخت‌تر کرد و در نتیجه سایش غیریکنواخت را کاهش داد.

بخش تجربی

مدل سازی المان محدود

یک مدل سه بعدی از تایر سنگین با مشخصات استاندارد اندازه‌ی R22.5 در نرم افزار ABAQUS توسعه یافت. مدل شامل لایه‌های مختلف ساختاری (لاستیک آج، باند، کارکاس و رینگ داخلی) بود. خواص مکانیکی هر لایه براساس داده‌های آزمایشگاهی تعیین شد [۵].

تعریف توزیع سختی

سختی آمیزه‌ی آج در سه ناحیه‌ی مرکز، نیمه‌عرضی و شانه‌ای به صورت جداگانه تنظیم شد. برای این منظور، سه دسته آمیزه با مقادیر سختی شور (Shore A) متفاوت طراحی شد:

• ناحیه‌ی مرکز: 68 ± 2

• ناحیه‌ی نیمه‌عرضی: 65 ± 2

• ناحیه‌ی شانه‌ای: 62 ± 2

این توزیع براساس تحلیل اولیه‌ی تنش در مدل FEM انتخاب شد که نشان می‌داد نواحی شانه‌ای بیشترین تنش برشی را تحمل می‌کنند [۶].

بهینه‌سازی چندهدفه

با استفاده از الگوریتم (GA)، توزیع سختی بهینه‌ای یافت شد که دو هدف زیر را هم‌زمان بهینه می‌کند:

۱. کمینه‌سازی انحراف معیار فشار تماسی در عرض تایر

۲. حداکثر کردن عمر پیش‌بینی شده‌ی آج

تابع هدف به صورت روبه‌رو تعریف شد: $\text{Minimize } f = w_1 \cdot \sigma_p + w_2 \cdot (1/L)$ که در آن σ_p انحراف معیار فشار تماسی، L عمر تایر و w_1, w_2 ضرایب وزنی هستند [۷].

بخش آزمایشگاهی

تهیه‌ی آمیزه‌های لاستیکی

در این پژوهش، سه نوع آمیزه‌ی لاستیکی با ترکیب پایه‌ی SBR/BR (نسبت ۴۰/۶۰) تهیه شد که هر کدام متناظر با یکی از نواحی عرضی تایر بودند. جدول ۱ ترکیب کامل آمیزه‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۱- ترکیب آمیزه‌های لاستیکی برحسب (phr)

ترکیبات	آمیزه‌ی مرکز	آمیزه‌ی نیمه عرضی	آمیزه‌ی شانه‌ای
SBR 1502	۶۰	۶۰	۶۰
BR (Nd-polybutadiene)	۴۰	۴۰	۴۰
N234	۵۰	۴۸	۴۵
روغن	۸	۹	۱۰
سولفور	۱٫۸	۱٫۷	۱٫۶
6PPD	۲	۲	۲
CBS	۱٫۵	۱٫۵	۱٫۵

(phr = parts per hundred rubber)

آمیزه‌ها در دو مرحله در مخلوط‌کن داخلی با دمای حداکثر 150°C تهیه شدند. مرحله‌ی اول (non-productive) شامل پلیمر، پرکننده و روغن بود و مرحله‌ی دوم (productive) شامل سولفور و شتاب‌دهنده‌ها بود [۸].

ولکانش و آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه‌های آزمایشگاهی در دمای 150°C و زمان ولکانش بهینه‌شده (t_{90}) طبق استاندارد ASTM D2084 ولکان شدند. برای آزمون‌های مکانیکی، نمونه‌های استاندارد ASTM D412 و ASTM D2240 تهیه شد.

آزمون‌های مکانیکی و فیزیکی

سختی شور A

سختی هر آمیزه با دستگاه دیجیتالی Shore A طبق استاندارد ASTM D2240 اندازه‌گیری شد. نتایج در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- نتایج آزمون سختی و سایش

آمیزه	سختی شور A	حجم سایش (MM3)
مرکز	68.2 ± 0.8	۹۸
نیمه‌عرضی	65.1 ± 0.7	۱۰۵
شانه‌ای	62.3 ± 0.6	۱۱۸

آزمون سایش (DIN Abrasion)

آزمون سایش طبق استاندارد ISO 4649 روش (A) انجام شد [۹].

آزمون DMA

با استفاده از دستگاه DMA (TA Instruments Q800)، مدول ذخیره‌سازی (E') و ضریب میرایی ($\tan \delta$) در دمای 60°C و فرکانس 10 Hz اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که $\tan \delta$ در محدوده‌ی 0.08 تا 0.12 باقی‌مانده است که نشان‌دهنده‌ی تعادل مناسب بین چسبندگی و مقاومت در برابر گرمایش داخلی است [۱۰].

ساخت نمونه‌ی تایر آزمایشگاهی و آزمون روی دینامومتر

یک نمونه‌ی کوچک‌مقیاس از تایر (مقیاس ۱:۳) با استفاده از آمیزه‌های سه‌بخشی ساخته شد. این تایر روی دینامومتر غلتکی مطابق با استاندارد ISO 18164 آزمایش شد. شرایط آزمایش: بار 8.0 kN ، سرعت 60 km/h ، دمای محیط 23°C ، مدت‌زمان 100 ساعت. پس از آزمایش، پروفیل آج با دستگاه اسکن لیزری اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که عمق باقیمانده‌ی آج در ناحیه‌ی شانه‌ای در تایر متداول 6.2 mm و در تایر بهینه‌شده 7.8 mm بود.

مراجع

اعتبارسنجی مدل FEM داده‌های آزمایشگاهی فشار تماسی با استفاده از فیلم‌های Prescale با نتایج شبیه‌سازی FEM مقایسه شد. خطای نسبی میانگین کمتر از 6.5% بود که نشان‌دهنده‌ی اعتبار بالای مدل عددی است [۱۱].

نتیجه‌ها و بحث

توزیع فشار تماسی

در تایر متداول، فشار تماسی در نواحی شانه‌ای تا 28% بیشتر از مرکز است. در مقابل، در تایر با آمیزه‌ی بهینه‌شده، این تفاوت به کمتر از 9% کاهش یافت.

پیش‌بینی عمر تایر

با استفاده از مدل سایش آرچارد [۱۲]، عمر تایر در شرایط استاندارد آزمایشگاهی (ISO 28580) شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد:

- تایر متداول: عمر ≈ 120000 کیلومتر
- تایر بهینه‌شده: عمر ≈ 140000 کیلومتر (افزایش 17%)
- همچنین، ضریب سایش غیریکنواخت (از 0.34 به 0.26) 23% کاهش یافت [۱۳].

بخش مقایسه‌ای

در جدول ۳، روش پیشنهادی با سایر استراتژی‌های کاهش سایش مقایسه شده است.

جدول ۳- مقایسه‌ی روش‌های کاهش سایش غیریکنواخت

روش	کاهش NUWI (%)	افزایش عمر (%)	هزینه‌ی تولید اضافی	پیچیدگی فرایند
استفاده از سیلیکا	۱۲	۸	بالا	متوسط
تغییر الگوی آج	۱۵	۱۰	پایین	پایین
ولکانش گرادایانی	۱۸	۱۳	متوسط	بالا
توزیع بهینه‌ی سختی (این پژوهش)	۲۳	۱۷	متوسط	متوسط

همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی از نظر عملکرد برتری قابل توجهی دارد، در حالی که پیچیدگی فرایند تولید به‌مراتب کمتر از روش‌های ولکانش گرادایانی است [۱۴].

نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد که طراحی آمیزه‌ی لاستیکی با توزیع فضایی بهینه‌شده‌ی سختی می‌تواند به‌طور مؤثری سایش غیریکنواخت در تایرهای سنگین را کاهش دهد. با همگن‌تر کردن فشار تماسی در ناحیه‌ی تماس، نه‌تنها عمر تایر افزایش یافت، بلکه رفتار دینامیکی آن نیز بهبود یافت. آزمون‌های آزمایشگاهی تأیید کردند که این روش بدون تأثیر منفی بر خواص پویایی لاستیک، قابلیت اجرا در خطوط تولید فعلی را دارد و می‌تواند به‌عنوان یک راهکار پایدار در صنعت لاستیک مورد استفاده قرار گیرد.

- [1] Schuring, J. R. (2004). Tire wear modeling and prediction. *Tire Science and Technology*, 32(2), 75–98.
- [2] Gent, A. N. (2012). *Engineering with Rubber: How to Design Rubber Components*. Hanser Publishers.
- [3] Wang, Y., et al. (2018). Effect of tread pattern on tire wear and rolling resistance. *Wear*, 404–405, 1–10.
- [4] Heinrich, G., & Klüppel, M. (2002). Rubber friction and tire dynamics. *Rubber Chemistry and Technology*, 75(3), 355–372.
- [5] Olatunji, O. A., & Youdeowei, P. O. (2010). Finite element analysis of truck tire under static load. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 5(4), 256–263.
- [6] Liu, C., et al. (2020). Contact pressure distribution and its effect on tire wear. *International Journal of Automotive Technology*, 21(3), 601–610.
- [7] Deb, K. (2001). *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*. Wiley.
- [8] Bhowmick, A. K., & Stephens, H. L. (2001). *Handbook of Elastomers*. CRC Press.
- [9] ISO 4649:2017. Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of abrasion resistance.
- [10] Wang, M. J., & Wolff, S. (1996). Filler-elastomer interactions and reinforcement. *Rubber Chemistry and Technology*, 69(3), 325–341.
- [11] Fujifilm. (2020). *Prescale Technical Guide for Contact Pressure Measurement*.
- [12] Archard, J. F. (1953). Contact and rubbing of flat surfaces. *Journal of Applied Physics*, 24(8), 981–988.
- [13] ISO 28580:2018. Passenger car, truck and bus tyre rolling resistance measurement method.
- [14] Zhang, L., et al. (2021). Gradient vulcanization for improved tire durability. *Polymer Testing*, 95, 107045.