

بهبود عملکرد و ظاهر تایر از طریق کنترل زاویه لایه نخ: یک مطالعه تجربی بر روی تایر سایز ۱۲-۹۰/۹۰

محمد ابهجي عزآبادي^{۱*}، الهام رضايي نژاد^۲، محسن غفاريان^۱ و مسعود حاتمي^۱

۱- کارشناس تحقیقات، مجتمع صنایع لاستیک یزد

۲- رئیس تحقیقات، مجتمع صنایع لاستیک یزد

mm.abhaji@gmail.com

چکیده: عیب «نخ نمایی» در داخل تایر، یکی از چالش‌های اصلی در تولید تایرهای موتور است که هم بر ظاهر محصول و هم بر یکنواختی سایش آن تأثیر منفی می‌گذارد. این پژوهش به بررسی تأثیر دو عامل کلیدی «نوع نخ» و «زاویه برش» بر بهبود این عیب و افزایش مقاومت تایر می‌پردازد. با استفاده از یک طرح آزمایش فاکتوریل کامل سه سطحی، سه نوع نخ (A, B, C) و یازده زاویه برش (از ۴۹ تا ۶۰ درجه) مورد مطالعه قرار گرفتند. معیار بهینه‌سازی، دستیابی به حداقل مقاومت ۳۴ ساعت در آزمون استاندارد مقاومت تایر بود. نتایج تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) نشان داد که هر دو عامل و همچنین اثر متقابل آن‌ها بر روی پاسخ، معنی‌دار هستند. در نهایت، ترکیب بهینه نوع نخ B و زاویه برش ۵۷ درجه به عنوان نقطه بهینه شناسایی شد که منجر به حذف عیب نخ نمایی و دستیابی به مقاومتی بالغ بر ۳۸ ساعت شد.

واژه‌های کلیدی: تایر موتور، نخ‌نمایی، زاویه برش لایه، طرح آزمایش فاکتوریل، بهینه‌سازی، مقاومت تایر.

مقدمه

تایر به عنوان تنها نقطه تماس وسیله نقلیه با جاده، نقش حیاتی در ایمنی، عملکرد و راحتی ایفا می‌کند. در تایرهای موتور سایز ۱۲-۹۰/۹۰، پدیده "نخ نمایی" در سطح اینر لاینر یک عیب ظاهری و عملکردی شایع است. در این عیب، الگوی نخ‌های لایه از زیر آج تایر قابل مشاهده می‌شود که این امر نه تنها از زیبایی محصول می‌کاهد، بلکه می‌تواند نشانه‌ای از توزیع نامناسب تنش و کاهش عمر تایر باشد. کنترل پارامترهای فرایندی در ساخت لایه تایر، کلید رفع این مشکل است. از میان این پارامترها، نوع نخ (جنس، استحکام و ساختار) و زاویه برش نخ‌ها در تشکیل لایه، تأثیر مستقیمی بر رفتار مکانیکی نهایی تایر دارند. این پژوهش با هدف کمی کردن اثر این عوامل و یافتن ترکیب بهینه آن‌ها برای حذف عیب نخ نمایی و تضمین حداقل مقاومت ۳۴ ساعته انجام شده است.

بخش تجربی

مواد و روش‌ها

این پژوهش به صورت تجربی در خط تولید واقعی یک کارخانه تایر سازی و با استفاده از طراحی آزمایش (DOE) انجام شد. هدف، مدل سازی رابطه بین پارامترهای ساخت لایه تایر و بهینه سازی آن‌ها برای رفع عیب نخ‌نمایی و افزایش مقاومت تایر بود.

مواد و تجهیزات

مطالعه حاضر با دقت بالا در انتخاب و کنترل مواد اولیه و تجهیزات انجام شد. ماده اولیه اساسی و مورد بررسی در این پژوهش، نخ مورد استفاده در ساختار تایر بود. برای این منظور، از سه نوع نخ ریون با مشخصات فنی متمایز از تأمین کنندگان مختلف که به صورت رمزگذاری شده با حروف A, B و C نام گذاری شده بودند، استفاده شد. این نخ‌ها عمدتاً در پارامترهای پایه‌ای همچون دنیر (که نشان دهنده ضخامت و وزن نخ است)، استحکام کششی اولیه و نیز مدول الاستیسیته (که بیانگر میزان کشسانی نخ است) با یکدیگر تفاوت داشتند. این تفاوت‌های عمدی، امکان بررسی اثر خواص ذاتی نخ بر روی عملکرد نهایی تایر را فراهم می‌ساخت. به منظور اطمینان از این که تنها متغیرهای مورد مطالعه (نوع نخ و زاویه برش) بر نتایج تأثیر می‌گذارند، سایر مواد مصرفی در ساخت تایر

به دقت کنترل شدند. تمامی آمیزه‌ها که در بخش‌های مختلف تایر از جمله ترد، اینر لاینر، بریکر، چیفر و... به کار می‌روند، دقیقاً مطابق با فرمولاسیون استاندارد و ثابت کارخانه برای تایر موتور سایز ۱۲-۹۰/۹۰ تهیه شدند. این کار تضمین می‌کرد که تغییرات مشاهده شده در خواص تایر نهایی، تنها ناشی از تغییر در نوع نخ و زاویه برش باشد و نه ناشی از تفاوت در ترکیب شیمیایی آمیزه‌ها. کلیه تایرهای آزمایشی (پایلوت) نیز در همین سایز مشخص (۱۲-۹۰/۹۰) تولید شدند. اجرای موفق این پژوهش، مستلزم استفاده از تجهیزات دقیق و ویژه صنعت تایر سازی بود. فرایند با استفاده از یک دستگاه بایاس کاتر با قابلیت تنظیم زاویه برش با دقت بسیار بالا (در حد ± 0.5 درجه) آغاز شد. این دقت بالا برای ایجاد تغییرات کنترل شده و معنی‌دار در فاکتور زاویه برش ضروری بود. در مرحله بعد، از یک ماشین کلندر برای پوشش دهی نخ‌های برش خورده استفاده شد. سپس، تایرها به کمک یک دستگاه ساخت تایر مونتاژ شدند. فرایند پخت که در آن تایر خام در قالب، شکل نهایی و خواص مکانیکی خود را به دست می‌آورد، در یک پرس پخت تایر با سیکل حرارتی و زمانی کنترل شده انجام پذیرفت. در نهایت، برای سنجش عملکرد تایرها، از یک دستگاه تست دوام استفاده شد که شرایط کاری سخت و مداومی را برای تایر شبیه سازی می‌کرد. این آزمون مطابق با پروتکل‌های استاندارد بین المللی نظیر و یا استاندارد داخلی دقیق کارخانه انجام شد تا قابلیت اطمینان و مقایسه پذیری نتایج تضمین شود.

طراحی آزمایش (Design of Experiment - DOE)

برای دستیابی به نتیجه‌ای معتبر و قابلیت پیش بینی، از یک طرح آزمایش فاکتوریل کامل استفاده شد. عامل‌های مستقل و سطوح آن‌ها: ۱- نوع نخ (Factor X1): یک عامل کیفی در سه سطح. (A, B, C). ۲- زاویه برش (Factor X2): یک عامل کمی در ۱۱ سطح (۴۹، ۵۰، ۵۱، ۵۲، ۵۳، ۵۴، ۵۵، ۵۶، ۵۷، ۵۸، ۵۹ و ۶۰ درجه). این گستره وسیع براساس دانش فنی و مطالعات مقدماتی برای پوشش دادن منطقه بهینه احتمالی انتخاب شد؛ و متغیر پاسخ مقاومت تایر (Y1): زمان تا شکست تایر در آزمون دوام که برحسب ساعت (h) گزارش می‌شود. شرط قبولی: حداقل ۳۴ ساعت. کیفیت ظاهری ترد (Y2): یک پاسخ کیفی که توسط اپراتورهای مجرب و با استفاده از چک لیست بصری مورد ارزیابی قرار گرفت و در دو دسته "قابل قبول" (عیب نخ‌نمایی مشاهده نشد) و

"غیرقابل قبول" (عیب نخ‌نمایی مشهود است) طبقه‌بندی شد.

نزدیک به پایه (۱/۲۹-) را نشان می‌دهد. این نتایج حاکی از اهمیت نوع نخ در تعیین تست دوام است.

روش اجرای آزمایش

در این پژوهش، لایه‌های تایر با استفاده از نخ‌های A، B یا C و زوایای برش مشخص در دستگاه برش و کلندر آماده‌شده و سپس تایرهای پایلوت براساس فرایند استاندارد مونتاز و پخت شدند. درنهایت، تایرهای پخته‌شده بر روی ریم استاندارد سوار شده و مقاومت آن‌ها در دستگاه تست دوام ارزیابی شد. آزمون مطابق با استاندارد، شامل مراحل مختلفی با بارهای افزایشی و سرعت‌های مشخص بود. زمان از شروع آزمون تا وقوع شکست در تایر (مانند ترکیدگی، جدایش یا افزایش دمای بیش‌ازحد) به‌عنوان مقاومت تایر ثبت شد؛ و درنهایت، ارزیابی ظاهری: پس از اتمام آزمون دوام (یا در حین آن در صورت شکست)، سطح ترد تایر توسط یک تیم سهنفره از کنترل کیفیت که از جزئیات ترکیب آزمایشی تایرها بی‌اطلاع بودند (روش کورسازی)، از نظر وجود عیب نخ‌نمایی بررسی و در چک‌لیست ثبت شد.

تحلیل داده‌ها

یک تحلیل واریانس دوطرفه برای بررسی معناداری اثرات اصلی و اثر متقابل بین آن‌ها بر روی مقاومت تایر انجام شد. سطح اطمینان ۹۵ درصد ($\alpha=0.05$) در نظر گرفته شد خلاصه نتایج جدول ANOVA برای متغیر پاسخ «مقاومت تایر» در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- نتایج خلاصه تحلیل واریانس (ANOVA) برای داده‌های مقاومت تایر

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	۳۵	۸۱۷۲.۰۰	۲۳۳.۴۹	۸۶۵	۰.۰۰۰
Linear	۱۳	۶۴۱۵.۹	۴۹۳.۵۳	۱۸.۲۸	۰.۰۰۰
نوع نخ	۲	۲۸۳۵.۶	۱۴۱۷.۷۹	۵۲.۵۱	۰.۰۰۰
زاویه برش	۱۱	۳۵۸۰.۳	۳۲۵.۴۸	۱۲.۰۵	۰.۰۰۰
2-Way Interactions	۲۲	۱۷۵۶.۱	۷۹.۸۲	۲.۹۶	۰.۰۰۲
نوع نخ*زاویه برش	۲۲	۱۷۵۶.۱	۷۹.۸۲	۲.۹۶	۰.۰۰۲
Error	۳۶	۹۷۲.۰	۲۷.۰۰		
Total	۷۱	۹۱۴۴.۰			

نتایج نشان داد که مدل کلی معنی‌دار است ($F = ۸۶۵$ ، $P < ۰.۰۰۱$) که بیانگر آن است که ترکیب عوامل واردشده در مدل تغییرات پاسخ را به‌طور قابل‌توجهی توضیح می‌دهد. اثر خطی هر یک از عوامل نیز موردبررسی قرار گرفت. اثر نوع نخ به‌صورت مستقل و معنی‌دار بر متغیر پاسخ مشاهده شد ($F = ۵۲.۵۱$ ، $P < ۰.۰۰۱$)، به‌طوری‌که تغییر نوع نخ تأثیر قابل‌توجهی بر پاسخ داشت. همچنین، اثر زاویه برش نیز معنادار بود ($F = ۱۲.۰۵$ ، $P < ۰.۰۰۱$)، هرچند شدت اثر آن کمتر از نوع نخ بود. تعامل بین نوع نخ و زاویه برش نیز بررسی شد و نتایج نشان داد که تعامل این دو عامل بر پاسخ معنی‌دار است ($F = ۲.۹۶$ ، $P = ۰.۰۰۲$). این موضوع بیانگر آن است که اثر نوع نخ بر پاسخ تحت تأثیر زاویه برش تغییر می‌کند و بالعکس. به‌طورکلی، مدل تقریباً ۸۹/۴٪ از تغییرات پاسخ را توضیح می‌دهد (۹۱۴۴/۸۱۷۲) که نشان‌دهنده تناسب بالایی مدل است. این نتایج حاکی از اهمیت هر دو عامل و تعامل آن‌ها در تعیین متغیر پاسخ است. رگرسیون خطی چندمتغیره برای پیش‌بینی تست دوام براساس نوع نخ و زاویه برش و تعامل آن‌ها انجام شد. معادله رگرسیون به‌صورت خلاصه در زیر ارائه شده است:

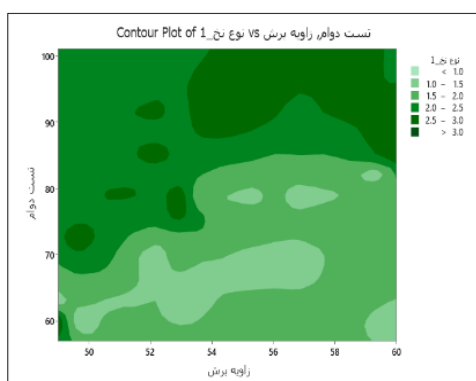
$$Y = \beta_0 + \sum_i^k \beta_i X_i + \sum_j^m \gamma_j Z_j + \sum_j^m \sum_i^k \delta_{ij} (X_i \cdot Z_j)$$

که در آن β_0 مقدار ثابت، (X_i) متغیر نوع نخ، (Z_j) متغیر زاویه، (γ_j) ضریب اثر زاویه برش، (δ_{ij}) ضریب اثر تعامل نوع نخ و زاویه برش است که با توجه به معادله کلی که در آن نوع نخ: بین سه نوع بررسی شده، HN52GK بیشترین اثر مثبت (۸/۲۵+) را دارد، HN43GK کمترین اثر (۶/۹۶-) و HN52MA اثر نسبتاً

زاویه برش:

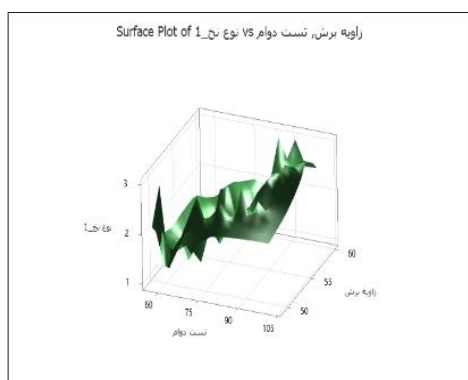
ضرایب مربوط به زاویه‌های مختلف نشان می‌دهد که برخی زاویه‌ها باعث افزایش و برخی باعث کاهش تست دوام می‌شوند. برای مثال، زاویه ۴۹ و ۵۰ اثر منفی دارند، درحالی‌که زاویه ۵۷ اثر مثبت قابل‌توجهی ایجاد می‌کند. ضرایب تعامل نشان می‌دهد که اثر زاویه برش بر تست دوام به نوع نخ وابسته است. مثال‌ها: HN52GK در زاویه ۴۹: کاهش شدید تست دوام (۱/۹۲-) یا HN52MA در زاویه ۵۲: افزایش قابل‌توجه تست دوام (۶/۱۲+) و یا HN43GK در زاویه ۵۹: افزایش تست دوام (۸/۹۶+) این موضوع بیانگر آن است که انتخاب بهینه زاویه برش برای هر نوع نخ متفاوت است و نمیتوان یک زاویه واحد برای همه نخ‌ها توصیه کرد. مدل ارائه‌شده قابلیت پیش‌بینی دقیق تست دوام را فراهم می‌کند و نشان می‌دهد که هم نوع نخ و هم زاویه برش و تعامل آن‌ها تأثیر معنادار بر دوام دارند. این مدل می‌تواند به‌عنوان راهنمایی برای انتخاب ترکیب بهینه نخ و زاویه برش در فرایند تولید یا طراحی آزمایش‌ها مورداستفاده قرار گیرد. برای درک بهتر اثر زاویه برش و تعامل آن با نوع نخ، از نمودارهای کانتو و سطح پاسخ استفاده شد.

شکل ۱ تأثیر همزمان زاویه برش و نوع نخ را بر تست دوام نشان می‌دهد. با افزایش زاویه برش از حدود ۴۹ تا ۶۰ درجه، مقدار تست دوام به‌طورکلی افزایش‌یافته و نوع نخ‌های خاص‌تر نیز دوام بیشتری ایجاد کرده‌اند. تغییر نامنظم رنگ‌ها در نمودار نشان می‌دهد که اثر زاویه برش در همه نوع نخ‌ها یکسان نیست و بین این دو عامل تعامل معناداری وجود دارد. در مجموع، دوام بیشینه در زاویه‌های برش بالا و برای نخ‌های باکیفیت‌تر حاصل می‌شود.



شکل ۱

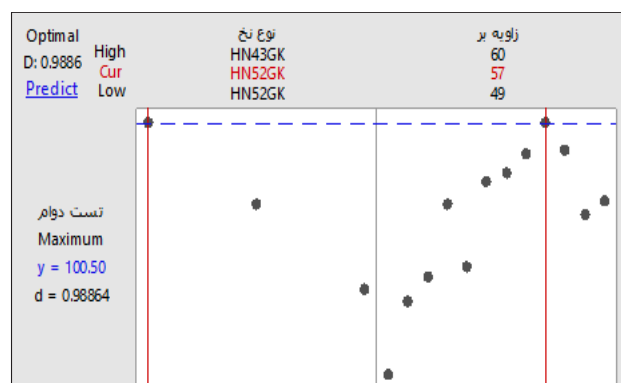
شکل ۲ پراکندگی نشان می‌دهد که نوع نخ و زاویه برش هر دو بر تست دوام تأثیر معناداری دارند. با افزایش زاویه برش، دوام افزایش‌یافته و نوع نخ‌های مختلف نیز مقادیر دوام متفاوتی ایجاد کرده‌اند. همچنین، شیب تغییرات دوام برای هر نوع نخ یکسان نیست که بیانگر تعامل قابل‌توجه بین نوع نخ و زاویه برش است.



شکل ۲

تعیین نقطه بهینه نهایی

با تلفیق نتایج کمی (مقاومت) و کیفی (ظاهر)، نقطه بهینه نهایی تعیین شد. ترکیبی که بالاترین مقاومت را ارائه داد و همزمان عیب نخ‌نمایی را به‌طور کامل حذف کرد، عبارت بود از: نوع نخ: B زاویه برش: ۵۷ درجه در این نقطه، مقاومت تایر به مقدار ۱۰۰٫۵ ساعت رسید که نه‌تنها حد استاندارد را به میزان قابل‌توجهی پشت سر می‌گذارد، بلکه حاشیه اطمینان بالایی برای کیفیت محصول ایجاد می‌کند. از دیدگاه فنی، این ترکیب احتمالاً منجر به یکنواختی بیشتر در توزیع تنش در بدنه تایر، کاهش حرارت‌زایی داخلی و در نتیجه، افزایش عمر خستگی و از بین رفتن عیب ظاهری می‌شود (شکل ۳).



شکل ۳

اعتبار سنجی

براساس نقطه مشخص‌شده در بهینه‌سازی مدل، ۲۰ عدد تایر مطابق شرایط

کنترل‌شده قبل تولید و مورد آزمون قرار گرفت که نتایج حاکی عدم وجود عیب نخ‌نمایی در ۱۰۱ ساعت تست دوام است

نتیجه‌ها و بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که عیب «نخ‌نمایی» در تایرهای موتوری، ارتباط مستقیمی با دو عامل کلیدی نوع نخ تقویتی و زاویه برش لایه‌ها دارد. تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از روش ANOVA بیانگر آن بود که هر دو عامل یادشده و همچنین اثر متقابل آن‌ها بر روی پاسخ مقاومت تایر معنادار هستند ($P < 0.05$). این یافته‌ها تأیید می‌کنند که تغییرات کوچک در پارامترهای فرایندی می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر کیفیت ظاهری و عملکرد مکانیکی تایر داشته باشد.

براساس نتایج تجربی، نوع نخ B در مقایسه با سایر نخ‌ها عملکرد بهتری در برابر سایش و خستگی از خود نشان داد. همچنین افزایش زاویه برش تا حدود ۵۵ تا ۵۷ درجه موجب بهبود قابل‌توجه در مقاومت تایر شد. ترکیب بهینه این دو عامل (نخ نوع B و زاویه برش ۵۷ درجه) ضمن حذف کامل عیب نخ‌نمایی، مقاومت تایر را تا حدود ۱۰۱ ساعت افزایش داد که بیش از معیار حداقل موردنیاز (۳۴ ساعت) است. از دیدگاه فنی، بهبود حاصل‌شده احتمالاً ناشی از توزیع یکنواخت‌تر تنش در ساختار تایر، کاهش تمرکز تنش در نواحی بحرانی و بهبود چسبندگی بین لایه‌ها در این شرایط بهینه است. این نتایج می‌تواند به‌عنوان راهنمایی برای طراحی بهینه فرایند برش و انتخاب مواد اولیه در تولید تایرهای موتوری مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

در نهایت، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی اثر سایر پارامترهای فرایندی نظیر فشار کلندر، دمای پخت و نوع آمیزه لاستیکی نیز بر رفتار مکانیکی و ظاهری تایر مورد بررسی قرار گیرد تا مدلی جامع‌تر برای کنترل کیفیت و افزایش عمر خستگی تایر ارائه شود.

مراجع

- [۱] استاندارد: ASTM International. (2019). ASTM D885-19. روش‌های آزمون نخ تایر، منسوجات تقویتی تایر و الیاف صنعتی مصنوعی. ایالات‌متحده
- [۲] کمیسیون اقتصادی اروپا. (۲۰۱۳). مقررات شماره ۳۰ ECE: مقررات یکنواخت برای تأیید تایرهای بادی وسایل نقلیه موتوری و یدک‌کش‌ها. ژنو: سازمان ملل متحد.
- [۳] مونته‌گومری، د. س. (۲۰۲۰). طراحی و تحلیل آزمایش‌ها (چاپ دهم). نیویورک: انتشارات جان وایلی و پسران.
- [۴] جنت، ا. ن.؛ و والتر، ج. د. (ویراستاران). (۲۰۰۶). تایر بادی. وزارت حمل‌ونقل ایالات‌متحده، سازمان ملی ایمنی ترافیک بزرگراه‌ها (NHTSA).
- [۵] چو، ج. ر.، کیم، ک.؛ و جئونگ، ج. ه. (۲۰۱۰). تحلیل المان محدود تغییر شکل تایر و مقاومت غلتشی تحت بارگذاری. نشریه علوم و فناوری مکانیک، ۲۴(۱)، ۲۴۴-۲۳۷.
- [۶] راجامانی، ر.؛ و سرینیواسان، س. (۲۰۱۷). مکانیک و اصطکاک تایر: مبانی و کاربردها. نیویورک: انتشارات CRC Press.
- [۷] ماهاجان، س.؛ و قوش، پ. ک. (۲۰۱۴). اثر زاویه نخ و پیکربندی لایه بر عملکرد تایر بایاس. مجله شیمی و فناوری لاستیک، ۸۷(۳)، ۴۷۰-۴۵۶.
- [۸] سازمان بین‌المللی استاندارد (ISO). (۲۰۱۵). استاندارد بین‌المللی ۱۰۱۹۱: تایر خودروهای سواری - راستی‌آزمایی قابلیت تایر. ژنو: ISO.
- [۹] راماراتنام، ک.؛ و پونوسامی، و. (۲۰۲۰). بهینه‌سازی فرمولاسیون آج تایر با استفاده از روش سطح پاسخ. مجله آزمون پلیمر، ۸۹، ۱۰۶۳۹.
- [۱۰] ریولین، ر. س.؛ و ساندروز، د. و. (۱۹۵۱). تغییر شکل‌های بزرگ الاستیک مواد همسان‌گرد. نشریه تراکنش‌های فلسفی انجمن سلطنتی لندن، بخش A، ۲۴۳(۸۶۵)، ۲۸۸-۲۵۱.