

بهبود مقاومت سایشی و کاهش هیستریزیس در آمیزه های ترد تایر با استفاده از دوده هیستریزیس پایین اصلاح شده با سیستین برای کاربرد در تایرهای برقی

مسعود خوشنود^{۱*}، یاسر مقبولی^۲، علی جمالی نودری^۳، محمد حیدرپور^۴ و فائزه نجفی^۱

۱- کارشناس تکنولوژی کارخانه کویر تایر بیرجند

۲- رییس توسعه مواد و فرایند کارخانه کویر تایر بیرجند

۳- مدیر مهندسی مواد و فرایند کارخانه کویر تایر بیرجند

۴- سرپرست اختلاط کارخانه کویر تایر بیرجند

masoud.khoshnood@ut.ac.ir

چکیده: در این پژوهش، به منظور بهبود عملکرد آمیزه های ترد تایر مورداستفاده در خودروهای برقی، از دوده هیستریزیس پایین اصلاح شده با سیستین بهره گرفته شد و نتایج آن با نمونه مرجع حاوی دوده N-375 مقایسه شد. سیستین ابتدا در حضور هیدروژن پراکسید اکسید شد و به سیستین با پیوندهای دی سولفیدی تبدیل شد. سپس این ترکیب برای اصلاح سطح دوده هیستریزیس پایین به کار گرفته شد تا ضمن افزایش برهم کنش شیمیایی دوده-پلیمر، در واکنش های ولکانیزاسیون گوگردی نیز مشارکت کند. آمیزه ها براساس فرمولاسیون تایرهای ترد ساخته و در شرایط بهینه پخت شدند. نتایج آزمون های دینامیکی نشان داد که مقدار $\tan \delta$ در دمای ۶۰ °C از ۰/۲۱۷ در نمونه مرجع به ۰/۱۸۳ در نمونه اصلاح شده کاهش یافت که بیانگر افت قابل توجه هیستریزیس و بهبود مقاومت غلشی است. همچنین آزمون سایش DIN کاهش حدود ۸ درصدی حجم سایش را در نمونه اصلاح شده نشان داد. این یافته ها حاکی از آن است که اصلاح سطح دوده با سیستین نه تنها مقاومت غلشی را بهبود می بخشد، بلکه دوام مکانیکی آمیزه را نیز افزایش می دهد؛ بنابراین، این روش می تواند به عنوان رویکردی نوآورانه در طراحی تایرهای خودروهای برقی با کارایی بالاتر مطرح شود.

واژه های کلیدی: دوده هیستریزیس پایین، سیستین (Cystine)، مقاومت غلشی، تایر برقی

مقدمه

و لاستیک بوتادی ان (Br-Cis) به عنوان ماتریس اصلی استفاده شد. به منظور تقویت آمیزه، دو نوع دوده انتخاب شد: دوده مرسوم N-375 به عنوان نمونه مرجع و دوده هیستریزیس پایین که با سیستین اصلاح سطحی شده بود. سایر افزودنی های فرمولاسیون شامل ZnO، اسید استئاریک، 6PPD، TMQ، گوگرد نامحلول و شتاب دهنده CBS بودند که مطابق فرمولاسیون های رایج در تایرهای ترد به کار گرفته شدند.

سیستین خالص ابتدا در شرایط ملایم اکسید شد تا به سیستین (Cys₂) با پیوندهای دی سولفیدی تبدیل شود. این ترکیب سپس برای اصلاح سطح دوده هیستریزیس پایین مورداستفاده قرار گرفت. در این فرایند، محیط تعلیقی آبی حاوی دوده تحت هم زدن فراصوتی آماده شد و محلول سیستین به تدریج به آن افزوده شد. پس از ادامه واکنش در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد به مدت دو ساعت، محصول حاصل شسته و خشک شد تا دوده ای با سطح فعال و دارای پیوندهای دی سولفیدی در دسترس باشد. انتظار می رود که این اصلاح، برهم کنش شیمیایی دوده با ماتریس لاستیکی را تقویت کرده و امکان مشارکت مستقیم در شبکه ولکانیزاسیون گوگردی را فراهم آورد. جدول ۱ فرمولاسیون نمونه های تهیه شده در این پژوهش را نشان می دهد.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی، مکانیکی و فرایندی کاتچوهای مورداستفاده در این پژوهش

اجزای آمیزه (phr)	Ref-N375	LH-Cys2-CB
NR (SMR-10)	۷۰	۷۰
Br-Cis	۳۰	۳۰
دوده	۵۰	۵۰
بقیه اجزای آمیزه شامل: روغن آروماتیک: ۸، اکسید روی ۵، 6PPD: ۱، ۵، TMQ: ۱، ۰، گوگرد نامحلول: ۱، ۸، شتاب دهنده DCBS: ۰، ۷، تاخیر انداز (PVI): ۰، ۲ و پیتایزر (رناسیت): ۰، ۱		

در خودروهای برقی، کاهش مقاومت غلشی یکی از کلیدهای افزایش برد و کارآمدی باتری است؛ چراکه هرچه اتلاف انرژی در لاستیک کمتر باشد، انرژی کمتری صرف غلبه بر هیستریزیس و کشیدگی لاستیک می شود و این امر در مسافت های بزرگ تأثیر قابل توجهی دارد. دوده (carbon black) به عنوان پرکننده اصلی در ترکیب ترد کارکرد تقویتی دارد، اما در بسیاری از گریدها موجب افزایش هیستریزیس و تولید گرمای اضافی تحت بارگذاری مکرر می شود که نه تنها مصرف انرژی را بالا میبرد بلکه عمر مفید تایر را کاهش می دهد. به همین دلیل، گریدهای جدید دوده با سطح ویژه پایین تر، ساختار Aggregation/Structure کنترل شده و توزیع ذرات یکنواخت تر وارد صنعت شده اند تا توازن بین مقاومت سایشی، چسبندگی سطحی و هیستریزیس پایین برقرار شود. این دوده های هیستریزیس پایین به ویژه در بخش ترد تایر، تحت بارهای دینامیک و دماهای بالا در خودروهای برقی اهمیت ویژه پیدا کرده اند.

نوآوری جدیدی که در این زمینه مطرح است، استفاده از ماده سیستین (cystine) به عنوان عامل کمکی برای بهبود برهم کنش شیمیایی بین دوده و ماتریس لاستیکی است. سیستین که از دو مولکول سیستین به هم پیوند دی سولفیدی دارد، دارای پیوند S-S- است و این پیوند می تواند در سیستم ولکانیزاسیون گوگردی شرکت کند. با افزودن سیستین، انتظار می رود که سطح دوده به نحو بهتری سطح واکنشی پیدا کند، برهم کنش های پیوندی بین دوده و پلیمر افزایش یابد و بهبود انتقال تنش در فصل مشترک ها حاصل شود. افزون بر این، حضور سیستین می تواند منجر به افزایش چگالی پیوندهای گوگردی، تقویت شبکه ولکانیزه و کاهش دامنه های آزاد زنجیر پلیمر در نزدیکی دوده شود—که تمام این موارد به کاهش هیستریزیس و اتلاف انرژی در چرخه های بارگذاری و تخلیه کمک می کند.

بخش تجربی

در این پژوهش برای تهیه آمیزه های ترد تایر، از لاستیک طبیعی (NR)، گرید (SMR-10)

این ویژگی برای تایرهای خودروهای برقی که تحت بارهای سنگینتر و شرایط حرارتی متفاوتی نسبت به تایرهای معمولی عمل می‌کنند، بسیار ارزشمند است.

جدول ۲- خواص رئومتر پخت، کششی و مقاومت به رشد ترک نمونه‌ها

کد نمونه	Ref-N375	LH-Cys2-CB
مونی (MU)	۵۱ ± ۲	۵۷ ± ۱,۵
زمان برستگی (M:S)	۰۵:۱۳	۰۴:۲۸
زمان پخت بهینه (M:S)	۱۲:۰۵	۱۱:۳۹
گشتاور کمینه (lb-in)	۷,۲۵	۶,۵۶
گشتاور بیشینه (lb-in)	۴۱,۹۱	۴۶,۲۳
شاخص سرعت پخت (lb-in/min)	۹,۲	۱۰,۹
میزان سایش (cm ³)	۸۵	۷۸
شدت $\tan \delta$ در ۶۰ درجه سانتی گراد	۰,۲۱۷	۰,۱۸۳
E' در ۶۰ سانتی گراد	۴۲,۱	۳۹,۲

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، استفاده از دوده هیستریزیس پایین اصلاح‌شده با سیستین در آمیزه‌های ترد تایر باعث کاهش قابل‌توجه هیستریزیس ($\tan \delta @ 60^\circ\text{C}$) و هم‌زمان بهبود مقاومت سایشی شد. مکانیسم غالب در این بهبود، تقویت برهم‌کنش شیمیایی دوده-پلیمر از طریق پیوندهای دی‌سولفیدی سیستین و مشارکت آن در شبکه ولکانیزه است. این رویکرد نوآورانه می‌تواند به‌عنوان یک راه‌کار مؤثر برای طراحی تایرهای برقی با مقاومت غلتشی کمتر و عمر مفید بالاتر مطرح شود. مسیرهای آتی شامل بررسی مقدار بهینه سیستین، مطالعه ریزساختار پراکنش دوده به کمک میکروسکوپ الکترونی و مقایسه با دیگر عوامل کوپل‌کننده خواهد بود.

آمیزه‌سازی در دو مرحله انجام شد؛ ابتدا مواد پایه و دوده در بنیوری آزمایشگاهی مخلوط شدند و سپس سیستم پخت شامل گوگرد و شتاب‌دهنده‌ها روی میل دو غلتکی اضافه شد. زمان بهینه پخت (t_0) برای هر فرمول با استفاده از رئومتر MDR (دمای ۱۴۵ و زمان ۳۰ دقیقه) تعیین و نمونه‌ها در پرس گرم تحت شرایط استاندارد پخت شدند.

برای ارزیابی عملکرد نمونه‌ها، آزمون‌های مکانیکی شامل کشش و پارگی انجام شد. همچنین رفتار دینامیکی با آزمون RPA و سنجش $\tan \delta$ در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد بررسی شد تا تأثیر دوده اصلاح‌شده بر کاهش هیستریزیس و بهبود مقاومت غلتشی تایر تحلیل شود. مقایسه مستقیم بین دو فرمولاسیون امکان ارزیابی نقش سیستین در افزایش برهم‌کنش فیلر-پلیمر و مشارکت آن در شبکه ولکانیزه را فراهم کرد.

نتیجه‌ها و بحث

نتایج RPA نشان داد که نمونه حاوی دوده مرجع N-375 دارای $\tan \delta$ برابر با ۰,۱۳۵ بود، درحالی‌که نمونه تقویت‌شده با دوده هیستریزیس پایین اصلاح‌شده با سیستین مقدار ۰,۰۹۵ را نشان داد. این کاهش تقریباً ۱۵ درصدی بهروشنی بیانگر کاهش اتلاف انرژی در چرخه‌های اعمال نیروی برشی و در ادامه بهبود مقاومت غلتشی است. دلیل این رفتار را می‌توان در دو عامل دانست: نخست، ساختار ذره‌ای و سطح ویژه کنترل‌شده دوده هیستریزیس پایین که به‌طور ذاتی تولید گرما را کاهش می‌دهد؛ و دوم، حضور پیوندهای دی‌سولفیدی سیستین بر سطح دوده که موجب اتصال شیمیایی به شبکه پلیمری و کاهش لغزش نسبی زنجیرها در فصل مشترک می‌شود.

از سوی دیگر، آزمون سایش DIN نشان داد که حجم سایش در نمونه مرجع حدود ۸۵ سانتی‌متر مکعب و در نمونه اصلاح‌شده ۷۸ بود. این بهبود حدود ۸ درصدی نشان می‌دهد که اصلاح سطح نه‌تنها منجر به کاهش هیستریزیس شد، بلکه دوام مکانیکی در برابر سایش نیز حفظ و حتی اندکی بهبود یافت.

مراجع

- [1] Kim, I. J.; Kim, D.; Ahn, B.; Lee, H. J.; Kim, H. J.; Kim, W. Vulcanizate Structures of SBR Compounds with Silica and Carbon Black Binary Filler Systems at Different Curing Temperatures, *Polymers*, 2020, Vol. 12(10):2343. DOI:10.3390/polym12102343.
- [2] Z. H. Li, J. Zhang, S. J. Chen. Effects of carbon blacks with various structures on vulcanization and reinforcement of filled ethylene-propylene-diene rubber (EPDM), *Express Polymer Letters*, 2008, Vol. 2, No. 10, pp. 695–704.
- [3] V Bijina et al. Recent trends in industrial and academic developments of carbon black: role in hysteresis loss of rubber compounds, *Polymer Bulletin*, 2022, 10.1007/s00289-022-04445-2
- [4] Yu Dang, Yanshan Liao, Chuan Yu, Siwei Cao. Research progress of modified carbon black used in rubber properties, *Academic Journal of Materials & Chemistry*, Vol. 3, Issue 1, 2022.