

جلوگیری از خرابی فاجعه بار جدایش رویه از بت در تایر موتورسیکلت با کنترل خواص ویسکوالاستیک رویه و مسیر رشد ترک

سحر طاوسی^۱، محمد علیمردانی^{۱*}، میرحمیدرضا قریشی^۲، حسین روشنایی^۳، فرزاد عبدالحمید^۳، مجتبی خوش منظر^۲ و محمد لایقی قلعه سوخته^۲

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

۲- پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، پژوهشکده فرایند، گروه فرایند و مهندسی لاستیک، تهران، ایران

۳- شرکت ایران یاسا تایر و رابر، تهران، ایران

m.alimardani@modares.ac.ir

چکیده: این مطالعه به بررسی رویکرد نوینی برای به تأخیر انداختن خرابی فاجعه بار ناشی از جدایش رویه از بت در لاستیک‌های موتورسیکلت از طریق کنترل خواص ویسکوالاستیک و مسیر رشد ترک می‌پردازد. هدف این پژوهش امکان‌سنجی انحراف ترک از فصل مشترک بحرانی رویه-بت به بطن لایه، با استفاده از تغییر هدفمند خواص ویسکوالاستیک لایه رویه تایر است. سه آمیزه لاستیکی با سطوح مختلف اتلاف انرژی (Weak، Semi-Strong و Strong) ولی با سختی یکسان مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که هنگامی که نسبت مدول (این نسبت متناظر با نرخ رهاش انرژی ترک است)، لایه هدف به بت بزرگ‌تر از یک باشد، ترک به سمت لایه رویه منحرف می‌شود. با بهره‌گیری از آمیزه Weak (با اتلاف کم) با هدایت ترک به درون رویه، از جدایش رویه از بت جلوگیری شد، در حالی که آمیزه Semi-Strong به دلیل اختلاف در میزان Gc، باعث انحراف ترک به سمت بت و بروز جدایش شد. این پژوهش نشان می‌دهد که طراحی هوشمندانه خواص ویسکوالاستیک می‌تواند شکست فاجعه بار را به رشد ترک پایدار تبدیل کند که در این صورت تضعیف خواص سایشی-استحکامی نسبت به شکست‌های فاجعه بار قابل تحمل‌تر خواهد بود و ایمنی تایر را افزایش می‌دهد. همچنین با توجه به نتایج مشابه آزمون پوست‌کنی در هندسه ساده کامپوزیت دولایه و تایر، می‌توان قبل از انجام فرایندهای پیچیده ساخت تایر با انجام یک آزمون ساده پوست‌کنی در هندسه دولایه، پیش‌بینی‌ای از مسیر رشد ترک را داشت.

واژه‌های کلیدی: کنترل مسیر رشد ترک، خواص ویسکوالاستیک، جدایش رویه از بت، کامپوزیت‌های چندلایه لاستیکی

مقدمه

استفاده از کامپوزیت‌های لاستیکی دولایه و چندلایه تقویت‌شده با الیاف بلند در قطعات مختلف صنعتی مانند تایر و نوار نقاله و غیره رایج است [۱]. جدایش لایه‌ها در این ساختارها امری شایع است که بنا بر عواملی همچون نوع کاربری، شدت و نوع بارگذاری مشاهده می‌شود [۲ و ۳]؛ بنابراین به تعویق انداختن رشد ترک با استفاده از انحراف کنترل‌شده در مسیر آن می‌تواند از رخداد فاجعه‌های مخاطره‌آمیز جلوگیری کند که حائز اهمیت است. از سابق این پدیده با دو رویکرد مهندسی ساخت تایر [۴] و آمیزه‌کاری [۵] مورد مطالعه و بهبود قرار گرفته است؛ بنابراین به تعویق انداختن جدایش لایه‌ها در یک ساختار چندلایه لاستیکی با تغییر کنترل‌شده در مسیر رشد ترک ایده نوظهوری است که می‌تواند دارای اهمیت علمی-صنعتی باشد. مهم‌ترین مسئله برای پیاده‌سازی ایده فوق، امکان‌سنجی انحراف کنترل‌شده رشد ترک با استفاده از تغییر خواص ویسکوالاستیک رویه است. برای مطالعه شکست و رشد ترک در قطعات الاستومری مانند تایر عوامل تأثیرگذار بر آن یعنی ظرفیت مواد برای مقاومت در برابر انتشار ترک (Gc) و نیروی لازم برای پیش‌ران ترک به سمت جلو (G) باید به‌صورت مجزا توجه شود [۲]. بر طبق دیدگاه گریفیث، نیرومحرکه رشد ترک مطابق با رابطه (۱)، کاهش انرژی الاستیک کرنشی ذخیره‌شده در ماده است و شاخص نرخ رهاش انرژی (G) که به‌صورت زیر تعریف می‌شود می‌تواند در ارزیابی استعداد رشد ترک مؤثر واقع شود.

$$G = -\frac{1}{t} \left(\frac{dw}{dc} \right)_1 \quad (1)$$

این رابطه، شرایط رشد ترک را برای یک صفحه لاستیکی به ضخامت t و به طول ترک c که دارای انرژی ذخیره‌شده W است، بیان می‌کند [۶]. نیرومحرکه رشد (G)، تابع طول ترک، هندسه و نوع بارگذاری است و به‌جز برای هندسه‌های ساده، اندازه‌گیری تجربی آن به سهولت ممکن نیست. استفاده از روش‌های عددی در تخمین G از متداول‌ترین رویکردها در ارزیابی نیرومحرکه رشد ترک است. در نقطه مقابل این شاخص، مقاومت یا ظرفیت ماده در برابر رشد ترک

ایستایی است که با Gc نشان داده می‌شود [۷]. به‌طور کلی، مقاومت در برابر رشد ترک در ناحیه نزدیک به نوک ترک، از فرایندهای برگشتناپذیر و بسیار غیرخطی مانند کشیدگی، پارگی زنجیرهای پلیمر و حفره‌زایی که با G_0 بیان می‌شود و اتلاف ویسکوالاستیک که تابع نرخ اعمال بار (V) و دما (T) است و منشأ آن اصطکاک درونی زنجیرهای پلیمری است، نشأت می‌گیرد (رابطه (۲)) [۸].

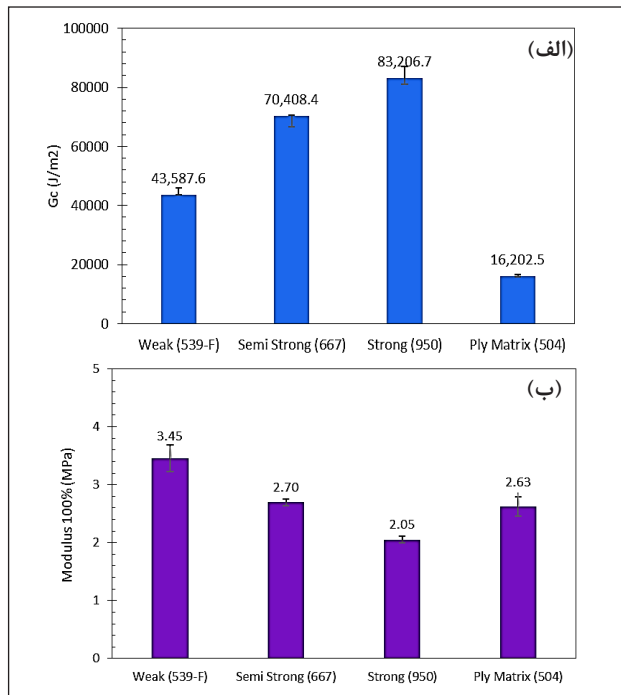
$$G_c = G_0 (1 + f(V, T)) \quad (2)$$

هدف این مقاله امکان‌سنجی انحراف کنترل‌شده رشد ترک با استفاده از تغییر خواص ویسکوالاستیک لایه رویه تایر، برای تبدیل از کارافتادگی فاجعه‌بار که ناشی از رشد ترکی ناپایدار در یک ساختار لایه‌ای است به رشد ترک پایدار و کنترل‌شده در بطن یک‌لایه (رویه تایر) است.

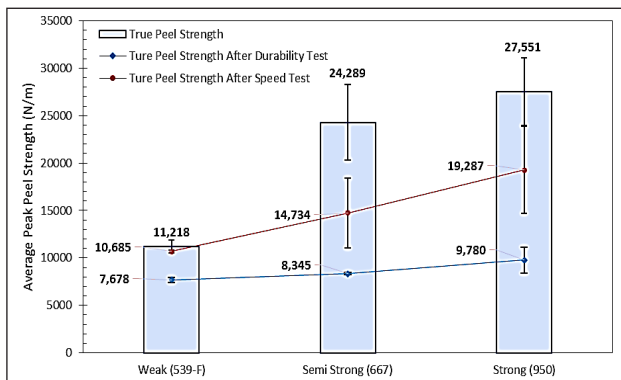
بخش تجربی

مبنای انتخاب سیستماتیک آمیزه‌های لایه هدف براساس اختلاف در میزان اتلاف ویسکوالاستیک آن‌ها بود. مطابق با (ترکیب‌بندی آمیزه‌ها که به‌دلیل خلاصه بودن مقاله در اینجا اشاره نشده است)، سه آمیزه با شناسه (539-F) Weak، (667) Semi Strong و (950) Strong با میزان سختی یکسان (Shore A) 64 ± 1 به‌ترتیب در سه سطح کم، متوسط و زیاد از خصلت اتلاف ویسکوالاستیک انتخاب‌شده‌اند. ردیابی مسیر ترک در دو هندسه دولایه کامپوزیتی (مطابق با شکل ۱) و هندسه اصلی تایر انجام شد. در هندسه دولایه، لایه هدف و لایه دارای الیاف بلند پلی‌امیدی به‌ترتیب نماینده لایه رویه و بت در تایر است. لایه بت ثابت برای هر سه نوع کامپوزیت و تایر با خواص مشخص استفاده شد. آزمون پارگی به‌منظور محاسبه Gc و آزمون کشش به‌منظور محاسبه مدول در کرنش ۱۰۰ درصد (تخمینی از میزان G) به‌ترتیب طبق استاندارد ASTM D624 و ASTM D412 انجام شد. در نهایت آزمون پوست‌کنی ۱۸۰ درجه مطابق با استاندارد ISO 36 انجام شد. در تایرها، آزمون چسبندگی مطابق استاندارد ملی ایران ۷۶۳ (ISO 10231) انجام شد.

به‌طوری‌که تایر Weak (F-539)، ۳۱٪، Semi Strong (667) و Strong (950) به‌ترتیب کاهش ۶۵٪ و ۶۴٫۵٪ را نشان دادند.



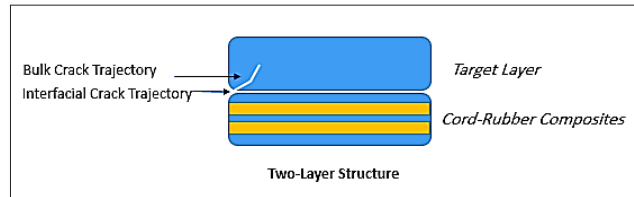
شکل ۲- الف) مقایسه میزان مقاومت در برابر رشد ترک Gc، ب) مقایسه مدول در کرنش ۱۰۰ درصد پیرامون آمیزه‌های مورد مطالعه



شکل ۳- میانگین استحکام چسبندگی تایرها در سه حالت تایر سالم، پس از انجام آزمون کارایی در سرعت بالا و پس از انجام آزمون دوام.

جدول ۱- ردیابی مسیر رشد ترک در سطح جدایش دولایه در کامپوزیت دولایه و تایر پس از انجام آزمون پوست‌کنی

نام کامپوزیت	کامپوزیت دولایه		تایر	
	لایه هدف	لایه حاوی الیاف بلند	رویه	بت
Weak (F-539)				
Semi Strong (667)				
Strong (950)				



شکل ۱- شماتیکی از ساختار دولایه کامپوزیتی حاوی یک‌لایه الیاف لیفی (لایه زیرین) و لایه هدف (لایه بالا).

نتیجه‌ها و بحث

ساخت نمونه‌ها از حیث خواص اتلافی به‌طور سیستماتیک ساخته شد. نتایج حاصل از آزمون تحلیل گر فرایندپذیری لاستیک (دستگاه RPA) حاکی از تفاوت نمونه‌ها از حیث اتلاف ویسکوالاستیک غیرخطی است. انتظار می‌رود با افزایش میزان اتلاف ویسکوالاستیک در سامانه‌های لاستیکی، میزان مقاومت ماده الاستومری در برابر رشد ترک بیشتر شود؛ بنابراین نتایج به‌دست‌آمده مطابق با شکل ۲-الف مطابق با انتظار است. همان‌طور که در بالا گفته شد برای بررسی انحراف ترک از مسیر رشد خود، می‌بایست به میزان نیروی محرکه رشد نیز توجه کرد. در همین راستا مدول ۱۰۰ درصد آمیزه‌ها به‌عنوان شاخصی از میزان نیروی محرکه رشد ترک مطابق با شکل ۲-ب محاسبه شد. پژوهش‌های گسترده و متعددی که با تغییر خواص موادی، هندسی و فرایندی انجام شد، منجر به نتیجه بسیار مهم در این پژوهش شد که وقتی نسبت مدول لایه هدف به بت (G target/G belt) بزرگ‌تر از یک باشد، ترک به سمت لایه هدف منحرف می‌شود. مطابق با جدول ۱ در آمیزه Weak ترک از داخل لایه هدف عبور کرد و از جدایش بین‌لایه‌ای جلوگیری شد، درحالی‌که در Semi-Strong ترک به سمت بت حرکت کرد و عریان‌سازی الیاف رخ داد. در آمیزه Strong نیز به‌دلیل استحکام بالای فصل مشترک، ترک از میان خود لایه هدف عبور کرد. همین نتایج در آزمون چسبندگی انجام‌شده بر روی تایر نیز به‌دست آمد. پس از انجام پژوهش‌ها بر روی آمیزه‌ها، مطالعات گسترده‌ای بر روی دوام تایر انجام شد. نتایج آماری نشان می‌دهند که تایر Weak (F-539) به‌دلیل ضعیف بودن خواص مکانیکی بیشتر دچار ترک‌های سطحی شده و سایش بیشتری را تجربه می‌کند اما تایر Semi Strong (667) دچار بادکردگی رویه که نمادی از جدایش بت از رویه است، می‌شود. Strong (950) نیز در مواردی دچار گل‌کندگی و در مواردی دچار بادکردگی رویه می‌شوند. این نتایج پس از انجام آزمون پوست‌کنی بر روی تایرهایی که تحت آزمون کارایی تایر پس از سرعت بالا و دوام بالا بودند نیز مشاهده شد. مطابق با شکل ۳، در Weak (F-539)، مقاومت در برابر جدا شدن پس از آزمون سرعت تقریباً بدون تغییر باقی ماند و تنها حدود ۴۷٪ کاهش یافت. در مقابل، Semi Strong (667) و Strong (950) به‌ترتیب کاهش تقریباً ۳۹٪ و ۳۰٪ را تجربه کردند. این روند در آزمون دوام نیز تقریباً مشابه بود.

نتیجه‌گیری

به کمک مهندسی خواص ویسکوالاستیک لایه رویه تایر می‌توان مسیر رشد ترک را از فصل مشترک خطرناک رویه-بت به سمت بطن رویه منحرف کرد و بدین ترتیب شکست فاجعه‌آمیز به رشد ترک پایدار تبدیل می‌شود. تایر با ترکیب Weak (539-F) که دارای مقاومت کمتری در برابر رشد ترک است ترک را به درون رویه هدایت کرده و ایمنی بیشتری در برابر جدایش نشان داد، هرچند مقاومت مکانیکی و سایشی پایین‌تری داشت. ترکیب Semi-Strong (667) بیشترین خطر جدایش رویه از بت را ایجاد کرد زیرا باوجود برابری میزان انرژی در دسترس برای

رشد (G یکسان)، لایه رویه Gc بالاتری از بت دارد که ترک در نهایت به سمت بت متمایل می‌شود. در (950) Strong وجود استحکام بالا، در شرایط سخت دچار گل‌کندگی و جدایش رویه از بت شد. از آنجایی که نتایج حاصل از پوست‌کنی کامپوزیت دولایه و تایر مشابه یکدیگر بودند، باهدف صرفه‌جویی در هزینه و زمان، می‌توان با انجام آزمون پوست‌کنی در یک هندسه دولایه ساده، مسیر ترک را پیش‌بینی کرده و تحت کنترل گرفت. درمجموع، طراحی هوشمندانه خواص ویسکوالاستیک یک رویکرد مؤثر برای به‌تأخیرانداختن شکست فاجعه‌آمیز در انواع تایرها از جمله تایر موتورسیکلت است. □

مراجع

- [1] Wang, W., et al., A review of experimental and theoretical fracture characterization of bi-material bonded joints. Composites Part B: Engineering, 2021. 206: p. 108537.
- [2] Govindjee, S., Firestone tire failure analysis. Confidential Bridgestone/Firestone Document, 2001.
- [3] Administration, N.H.T.S., Engineering analysis report and initial decision regarding EA00-023: Firestone Wilderness AT Tires. Washington, DC: US Department of Transportation. 2020.
- [4] Administration, N.H.T.S., Engineering analysis report and initial decision regarding EA00-023: Firestone Wilderness AT Tires. Washington, DC: US Department of Transportation. 2020.
- [5] Mark, J.E., B. Erman, and M. Roland, The science and technology of rubber. 2013: Academic press.
- [6] Rivlin, R. and A.G. Thomas, Rupture of rubber. I. Characteristic energy for tearing. Journal of polymer science, 1953. 10(3): p. 291-318.
- [7] Lake, G. and A. Thomas, The strength of highly elastic materials. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, 1967. 300(1460): p. 108-119.
- [8] Gent, A., Adhesion and strength of viscoelastic solids. Is there a relationship between adhesion and bulk properties? Langmuir, 1996. 12(19): p. 4492-4496.