

بررسی عددی پارامترهای شکست ترک انعکاسی در روسازی آسفالتی تحت بار ترافیکی

محمدرضا محمد علیها* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران

حمید بهبهانی (استاد)

مجید جالباززی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۳۹۵ (۱۳۹۵)
دوری ۲ - ۳۲، شماره ۱/۱، ص. ۱۲۳-۱۳۰، (پادداشت نشی)

ترک خوردگی لایه‌ی آسفالتی یکی از مودهای شایع خرابی در یک سیستم روسازی است. عوامل مختلفی در ایجاد و گسترش ترک‌ها نقش دارند که مهم‌ترین آنها بار ترافیکی و اثرات دمایی است. در این نوشتار یک رویه‌ی آسفالتی چندلایه که شامل یک ترک انعکاسی است، زیر جریان ترافیکی (عبور چرخ‌های جلو و عقب یک خودرو در حال حرکت به سمت ترک انعکاسی) به صورت عددی مورد تحلیل قرار گرفته و پارامترهای شکست لایه‌ی آسفالتی شامل ضریب شدت تنش مودهای کششی و برشی و همچنین ترم تنش T با مدل سازی اجزاء محدود محاسبه شده است. تأثیر فاصله‌ی چرخ‌های عقب و جلو خودرو از محل ترک، ضخامت لایه‌های آسفالتی، ضریب ارتجاعی لایه‌ی روکش و نیز طول ترک انعکاسی ایجاد شده در لایه در مقادیر پارامترهای شکست مورد بررسی قرار گرفته است. فاصله‌ی قرارگیری خودروی متحرک نسبت به ترک انعکاسی و نیز طول ترک، مؤثرترین پارامترها در مقدار و علامت پارامترهای شکست هستند.

واژگان کلیدی: تحلیل اجزاء محدود دو بعدی، ترک انعکاسی، ضرایب شدت تنش، ترم تنش T، بارگذاری ترافیکی، خواص مادی و هندسی رویه‌ی آسفالتی.

۱. مقدمه

در نوک ترک ایجاد می‌شود، که یکی از آنها در اثر تنش‌های خمشی و دو مورد دیگر در اثر تنش‌های برشی به وجود می‌آید. علاوه بر اثر بارهای ترافیکی، انبساط و انقباض روسازی و همچنین لایه‌های زیرین در اثر تغییر دما نیز باعث رشد و گسترش ترک‌های انعکاسی می‌شوند.^[۱] در نتیجه شکل ۱ نشان می‌دهد که ترک‌های انعکاسی به وجود آمده در رویه‌ی آسفالتی در حالت کلی در معرض بارهای ترکیبی کششی - برشی قرار خواهند گرفت.

در مناطق سردسیر و در دمای زیر صفر، لایه‌ی آسفالتی اغلب به صورت یک ماده‌ی شکننده رفتار می‌کند و بنابراین احتمال ایجاد و گسترش ترک در چنین شرایطی بیشتر می‌شود. استفاده از مبانی مکانیک شکست می‌تواند ابزار مناسبی برای توصیف خصوصیات شکست روسازی یا چگونگی رشد ترک در چنین شرایطی باشد.^[۱] ترک نوعی ناپویستگی است، که می‌تواند در یک قطعه یا سازه وجود داشته باشد. به دلیل تمرکز تنش بالا در این ناحیه، بررسی رفتار ترک و تنش‌های اطراف ترک مستقلاً اهمیت ویژه‌ی دارد. مود شکست یا چگونگی رشد ترک عبارت است از روش و شکل تغییر فرم لبه‌های ترک تحت بارگذاری متنوع و پیچیده‌ی اعمالی. به طور کلی ترک‌های داخل اجسام و قطعات در اثر شرایط بارگذاری اعمالی می‌توانند به چند صورت تغییر فرم دهند. پیش از پرداختن به چگونگی توزیع تنش در قطعات ترک‌دار لازم است که انواع بارگذاری قطعات ترک‌دار مشخص شود. این بارگذاری‌ها

استفاده از روکش‌های آسفالتی یکی از اقتصادی‌ترین روش‌های نوسازی روسازی‌های معیوب است. اما مشکلی که همواره در این روش از بازسازی وجود دارد، این است که ترک‌ها و همچنین درزه‌های ساختمانی موجود در روسازی قدیمی در اثر عبور وسائط نقلیه و شرایط محیطی گسترش می‌یابد و به سطح روکش جدید منعکس می‌شود.^[۱]

سالیانه هزینه‌های هنگفتی صرف تعمیر این روسازی‌های ترک‌دار می‌شود. این ترک‌ها به شکل‌های مختلف از قبیل طولی، عرضی، بلوکی و غیره و عمدتاً در سطح آسفالت‌هایی که روی بستر بتنی و یا خاکی تقویت شده با سیمان یا آهک و همچنین در روکش‌های آسفالتی که در آن بستر قدیمی به خوبی مرمت نشده باشد، مشاهده می‌شود. مکانیزم اصلی به وجود آمدن ترک‌های انعکاسی، حرکت‌های قائم و افقی بین روسازی اصلی و روکش است.^[۲] معمولاً جابجایی قائم به دلیل عبور وسائط نقلیه و جابجایی افقی ناشی از شرایط آب و هوایی و جریان ترافیکی هستند.^[۳] شکل ۱، تنش‌های ایجاد شده در اثر حرکت چرخ بر روی روکش آسفالتی را نشان می‌دهد. مطابق شکل مذکور، سه نوع از تمرکز تنش به هنگام عبور چرخ

* نویسنده مسئول

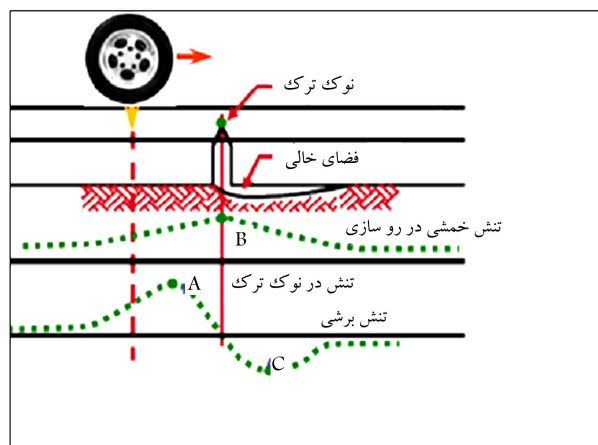
تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۹/۲۵، اصلاحیه ۱۳۹۳/۱/۲۷، پذیرش ۱۳۹۳/۲/۱۰

mrm_aliha@iust.ac.ir
behbahani@iust.ac.ir
m.jebalbarez@gmail.com

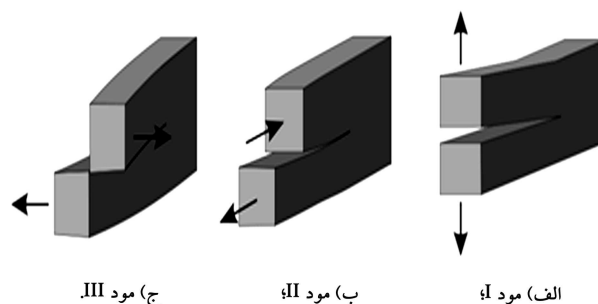
نیز بارگذاری پیچیده و متنوعی که به روسازی آسفالتی به واسطه‌ی نیروهای ترافیکی و مکانیکی وسائط نقلیه و نیز تغییرات دمایی و تنش‌های حرارتی اعمال می‌شود، استفاده از روش‌های عددی و نرم‌افزارهای اجزاء محدود، راهکار مناسبی جهت بررسی رفتار شکست و ترک‌خوردگی روسازی‌های آسفالتی است. در گذشته پژوهش‌هایی در خصوص مدل‌سازی مخلوط‌های آسفالتی و یا روسازی آسفالتی با استفاده از روش اجزاء محدود صورت گرفته است، که به برخی از آنها در ادامه اشاره شده است:

محققان در سال ۲۰۰۲، با در نظر گرفتن یک شبکه‌ی روسازی آسفالتی و با اختصاص خواص غیرخطی به آن به بررسی تأثیر یک لایه‌ی میانی از جنس فایبرگلاس (توری‌های فایبرگلاس) در بین رویه‌ی آسفالتی جدید و قبلی پرداخته‌اند. با توجه به مکانیزم ترک‌های انعکاسی که در اثر حرکت خودروها، ترک‌های موجود در لایه‌های قدیم روسازی به لایه‌ی جدید آسفالتی انعکاسی می‌یابند، نتایج پژوهش مذکور نشان داده است که اضافه‌کردن این توری‌های فایبرگلاس می‌تواند در جذب حرکت‌های انتقالی بین دو لایه و به تأخیر افتادن خرابی در لایه‌ی رویه‌ی آسفالتی مؤثر باشد.^[۵] در پژوهش دیگری در سال ۱۹۹۶، برای بررسی رفتار رشد ترک با استفاده از اصول مکانیک شکست، رشد ترک تجربی در مخلوط آسفالتی (رشد ترک ناپیوسته) با فرایند رشد ترک پیوسته، که با روش اجزاء محدود شبیه‌سازی شده بود، مقایسه شد و این نتیجه به دست آمد که اگرچه این مقایسه وابسته به اندازه‌ی سنگ‌دانه‌هایی است که در ترکیب مخلوط آسفالتی به کار گرفته شده‌اند، با وجود این فرایند رشد ترک در مخلوط‌های آسفالتی با دقت بسیاری می‌تواند با استفاده از تئوری مکانیک شکست مورد بررسی قرار گیرد. براساس نتایج پژوهش مذکور، هرچه اندازه‌ی سنگ‌دانه‌ها کوچک‌تر باشد، نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی مخلوط‌های آسفالتی توافق بهتری با نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های عددی روش اجزاء محدود خواهد داشت.^[۶] همچنین برخی پژوهشگران در پژوهش خود (۲۰۰۷) با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS، یک روسازی ترک‌خورده و تحت بارگذاری ناشی از اثر فقط یک چرخ از وسیله‌ی نقلیه را به صورت دو بُعدی مورد بررسی قرار دادند و مقادیر ضرایب شدت تنش مودهای کششی و برشی بارگذاری را به دست آوردند.^[۷] در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۱، با استفاده از روش المان محدود و آنالیز سه بُعدی یک ترک عرضی از بالا به پایین، تأثیرپذیری ترک از هر یک از مودهای سه‌گانه از ترافیک عبوری در دمای پایین مورد مطالعه قرار گرفته و نشان داده شده است که مود غالب در رشد ترک می‌تواند تابعی از موقعیت قرارگیری وسیله‌ی نقلیه نسبت به محل ترک در روسازی باشد.^[۸] برخی پژوهشگران نیز در پژوهش خود (۲۰۰۲) ضرایب شدت تنش را برای یک ترک در روسازی آسفالتی، که زیر بارگذاری‌های متفاوت چرخ خودرو قرار داشته است، به دست آوردند.^[۸] همچنین در پژوهشی در سال ۲۰۱۰ اثرات دما، سرعت وسائط نقلیه و طول ترک بر روی مقادیر ضریب شدت تنش ترک یک روسازی آسفالتی در معرض جریان ترافیک مورد بررسی قرار گرفت.^[۹] پژوهشگران دیگری نیز در همان سال اثر متغیرهای مختلف در ضریب شدت تنش را در یک ترک بالا به پایین مطالعه کردند و نشان دادند که با افزایش ضخامت، مقدار ضریب شدت تنش کاهش می‌یابد،^[۱۰] و همچنین رفتار کشسان لزج یک ترک انعکاسی موجود در رویه‌ی آسفالتی در معرض بار ترافیکی را با استفاده از مدل‌سازی سه بُعدی اجزاء محدود و نیز مدل ترک چسبیده مورد بررسی قرار دادند.^[۱۲]

در این نوشتار ضمن معرفی پارامترهای شکست ترک، به مدل‌سازی عددی یک رویه‌ی آسفالتی دو بُعدی با ترک انعکاسی و تحت اثر بارگذاری متغیر ناشی از تغییر موقعیت چرخ‌ها پرداخته شده و پارامترهای مؤثر در شکست و رشد ترک این رویه مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱. ساختار تنش‌های ایجاد شده در روکش آسفالتی در اثر عبور چرخ.



شکل ۲. مودهای مختلف بارگذاری در اجسام ترک‌دار.

عبارت‌اند از:

- مود I بارگذاری (یا بازشدگی لبه‌های ترک)؛
- مود II بارگذاری (یا مود لغزش داخل صفحه‌ی لبه‌های ترک)؛
- مود III بارگذاری (یا مود لغزشی خارج صفحه‌ی لبه‌های ترک)؛
- یا ترکیبی از مودهای ذکر شده.

اگر قطعه‌ی ترک‌دار به گونه‌ی تحت بارگذاری قرار گیرد که سطوح ترک نسبت به هم فقط باز شوند، قطعه‌ی تحت بارگذاری مود I است (شکل ۲ الف). در این حالت وجوه ترک هیچ‌گونه لغزشی بر روی هم ندارند. اگر بارگذاری به گونه‌ی اعمال شود که بدون بازشدگی دهانه‌ی ترک، وجوه ترک تمایل به لغزش داخل صفحه‌ی داشته باشند، مود II بارگذاری ایجاد می‌شود. در این حالت بارگذاری بر جبهه‌ی ترک، عمود است (شکل ۲ ب). اگر بارگذاری به گونه‌ی باشد که وجوه ترک تمایل به لغزش خارج صفحه‌ی داشته باشند، مود III بارگذاری ایجاد می‌شود، که در آن بارگذاری موازی با جبهه‌ی ترک است (شکل ۲ ج).

از بین ۳ مود گسیختگی در مفاهیم مکانیک شکست، مود I و مود II در ترک‌خوردگی لایه‌ی روکش آسفالتی تأثیر فراوانی دارند و مود پیچشی چندان موجود نیست و بسته به شرایط بارگذاری و شرایط حاکم در سیستم روسازی امکان وقوع هر یک از این مودها وجود دارد. به طور کلی ایجاد حالت گسیختگی توأمان برشی و کششی بستگی به نحوه و محل اعمال بارگذاری (مثلاً چرخ متحرک وسائط نقلیه) نسبت به موقعیت ترک دارد. با توجه به پیچیدگی‌های فراوان موجود در ترکیب و چیدمان رویه‌های آسفالتی و

۲. پارامترهای شکست

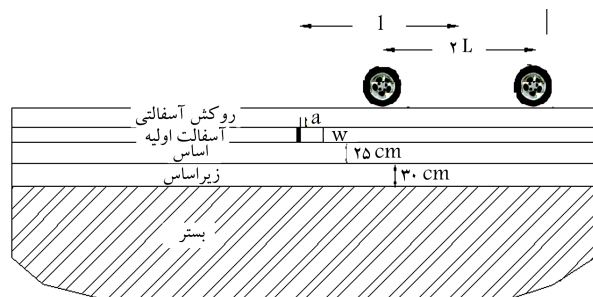
پائین به بالا، که در معرض بارهای ترافیکی حاصل از عبور چرخ‌های وسائط نقلیه قرار دارد، پارامترهای شکست K_I ، K_{II} و T در حالت‌های مختلف مود ترکیبی کششی - برشی و برای طول ترک‌های مختلف محاسبه شده‌اند.

معادلات تنش در اطراف نوک ترک در حالت مود ترکیبی بارگذاری به صورت روابط ۱ الی ۳ نوشته می‌شود: [۱]

۳. مدل‌سازی رویه‌ی آسفالتی

یک رویه‌ی آسفالتی مرمت‌شده از ۵ لایه به نام‌های (روکش، روسازی اولیه، اساس، زیراساس و بستر) تشکیل شده است. هر چند که انواع مختلفی از ترک‌ها در یک روسازی آسفالتی می‌تواند به وجود آید، اما هدف این نوشتار بررسی اثر بار ترافیکی در رفتار شکست رشد ترک در روسازی آسفالتی حاوی ترک‌های انعکاسی است. فرض شده است که ترک ایجادشده به صورت عمود بر بار ترافیکی اعمالی قرار داشته باشد. شکل ۴، نمای شماتیکی از لایه‌های مختلف روسازی به همراه ترک ایجادشده‌ی پایین به بالا را در حالت دو بُعدی نشان می‌دهد. به منظور شبیه‌سازی محل ترک در روسازی اولیه از یک شکاف به ضخامت ۶ میلی‌متر که از بالای اساس تا پایین روکش ادامه دارد، استفاده شده است. بدین ترتیب فرض شده است که ترک انعکاسی ایجادشده از انتهای شکاف شروع شده (شکل ۴) و رفته‌رفته با تداوم بارگذاری به صورت عمودی به سمت بالا رشد کرده است. به منظور بررسی اثر ابعاد ترک، محل و موقعیت اعمال بارهای ترافیکی نسبت به ترک ایجادشده در رویه‌ی آسفالتی در مقادیر پارامترهای شکست، یک مدل المان محدود دو بُعدی از رویه‌ی موردنظر در نرم‌افزار ABAQUS ایجاد شده است. در مدل‌سازی انجام‌شده، که ۵۰ متر از طول جاده را در نظر می‌گیرد، از المان‌های دو بُعدی CPE8R استفاده شده است. برای مدل‌سازی شرایط تکیه‌گی تنش در اطراف ترک از المان‌های سینگولار یا تکیه‌گی (که مخصوص مدل‌سازی ترک است)، و همچنین از تعداد بسیار بیشتری المان ریز در اطراف نوک ترک استفاده شده است. تمامی لایه‌های روسازی آسفالتی به یکدیگر چسبیده فرض شده و خواص مکانیکی لایه‌ها به صورت مواد همگن، ایزوتروپیک و ارتجاعی خطی در نظر گرفته شده است. این فرض برای بررسی رفتار آسفالت در دمای پائین و زیر صفر درجه فرض قابل قبولی است و بسیاری از پژوهشگران، آسفالت را در دمای پائین به صورت ماده‌ی همگن و ارتجاعی در نظر گرفته‌اند. [۱۳-۱۶] در جدول ۱، مشخصات لایه‌ها شامل ضریب پواسون و ضریب ارتجاعی هر لایه‌ی روسازی در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی المان محدود ارائه شده است. این مقادیر از پژوهش محققان، [۱] استخراج شده‌اند.

به منظور اعمال شرایط مرزی، تمام گره‌های واقع در قسمت زیرین لایه‌ی زیراساس در تمامی جهات و همچنین گره‌های واقع در وجوه جانبی مدل در جهت عمود بر مقطع مقید شده‌اند. در این نوشتار برخلاف سایر نوشتارهای موجود، که فقط



شکل ۴. نمای شماتیکی از لایه‌های مختلف روسازی به همراه بارگذاری ناشی از عبور وسائط نقلیه و یک ترک پایین به بالا.

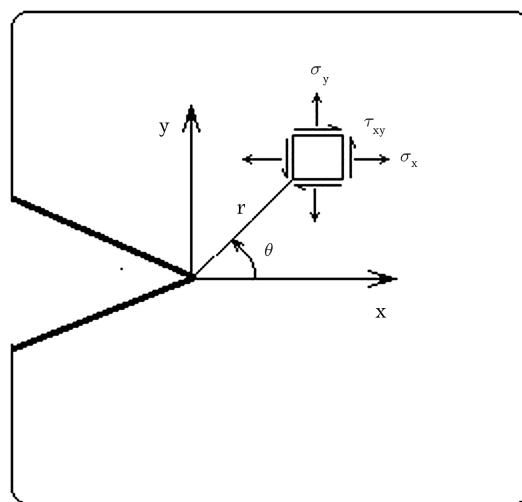
$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[\lambda - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] - \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right] + T \quad (1)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[\lambda + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (2)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[\lambda - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (3)$$

که در آن‌ها با توجه به شکل ۳، r ، θ ، مختصات نوک ترک در سیستم مختصات قطبی؛ K_I و K_{II} ضرایب شدت تنش مودهای I، II بارگذاری (مرتبط با جملات تکیه بسط سری تنش)؛ جمله T نیز ترم تنش ثابتی است که مستقل از فاصله از نوک ترک است.

براساس مطالعات انجام‌شده توسط پژوهشگران مکانیک شکست، سه پارامتر شکست K_I ، K_{II} و T پارامترهای اصلی برای بررسی رفتار شکست ترد مود ترکیبی قطعات و سازه‌های ترک‌دار هستند. [۱۱، ۱۲] پارامترهای مذکور برای هر قطعه و سازه‌ی ترک‌دار، تابعی از هندسه و بارگذاری اعمالی هستند و با تغییر بارگذاری یا شرایط هندسی قطعه، مقادیر آن‌ها تغییر می‌کند. برای یک روسازی ترک‌دار، که در معرض بارهای ترافیکی حاصل از عبور وسائط نقلیه قرار دارد، این پارامترها تابعی از طول ترک، محل شکل‌گیری ترک در روسازی، تعداد لایه‌های روسازی و خواص هر لایه، فاصله و مکان وسائط نقلیه عبوری نسبت به ترک و وزن وسائط نقلیه است. همچنان که قبلاً اشاره شد، با توجه به پیچیدگی بار اعمالی و تغییر محل بار و نیز پیچیدگی هندسی روسازی و لایه‌های آن، استفاده از روش‌های عددی و نرم‌افزارهای المان محدود، راهکاری مناسب برای بررسی رفتار رشد ترک در روسازی است. لذا در ادامه، با مدل‌سازی المان محدود یک روسازی حاوی ترک انعکاسی



شکل ۳. تنش‌های کشسان در اطراف نوک ترک در مختصات کارترین.

جدول ۱. خواص مادی لایه‌های مختلف رویه‌ی آسفالتی.

مصالح	روکش ۱	روکش ۲	روکش ۳	روکش ۴	اساس	زیراساس	بستر
مدول کشسان (MPa)	۲۵۰۰	۳۰۰۰	۳۵۰۰	۴۰۰۰	۲۷۶	۱۰۴	۳۴٫۵
ضریب پواسون	۰٫۳۵	۰٫۳۵	۰٫۳۵	۰٫۳۵	۰٫۳۵	۰٫۳۵	۰٫۴۵

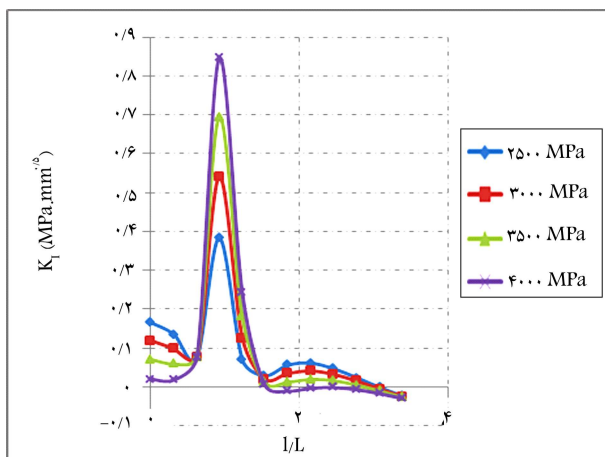
از نرم‌افزار ABAQUS محاسبه شده است. بدین ترتیب تعداد ۱۰۸ تحلیل المان محدود با مقادیر a ، l و E مختلف انجام و مقادیر متناظر پارامترهای شکست محاسبه شده است. در بخش بعدی نیز نتایج به‌دست‌آمده ارائه و بررسی شده است.

۴. نتایج

همچنان که قبلاً اشاره شده و براساس نتایج تحلیل‌های المان محدود انجام‌شده، مقادیر K_I ، K_{II} و تنش T با توجه به فواصل محل قرارگیری چرخ‌ها از ترک، که با مقادیر l/L نشان داده شده است، و همچنین جنس لایه‌های مختلف، ضخامت و طول ترک تغییر کرده است. در شکل ۷، تغییرات K_I به‌دست‌آمده از تحلیل‌های اجزاء محدود برای فواصل مختلف چرخ‌ها از ترک و به‌ازاء مقادیر مختلف مدول کشسانی رویه ارائه شده است. مطابق شکل مذکور با حرکت خودرو از دوردست به سمت ترک، ابتدا تا مقدار $l/L = ۲$ مود I افزایش می‌یابد؛ سپس با جلوآمدن خودرو تا محدوده‌ی $(l/L = ۱/۳)$ ، مقادیر آن کاهش می‌یابد؛ ولی هنگامی که خودرو به نزدیکی ترک می‌رسد، مقادیر مود کششی افزایش می‌یابد؛ و در $l/L = ۰/۹$ به بیشینه‌ی مقدار خود می‌رسد و پس از این نقطه با افزایش فاصله‌ی چرخ جلویی خودرو از ترک، مجدداً K_I کاهش و سپس با نزدیک شدن چرخ عقب به محل ترک، مجدداً مقدار آن افزایش می‌یابد.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار ضریب ارتجاعی، K_I در نقطه‌ی $(l/L = ۱)$ به طور قابل ملاحظه‌ی افزایش یافته و در نتیجه، احتمال رشد ترک موجود در لایه‌ی آسفالتی وقتی که خودرو در این موقعیت قرار داشته باشد، بیشتر شده است.

در شکل ۸، تغییرات K_I بر حسب مقادیر مختلف طول ترک رسم شده است. توزیع تنش در آسفالت به شکلی است که لاستیک خودرو باعث به‌وجود آمدن تنش خمشی (کشش) در نقاط بالایی فاصله‌های دور و تنش فشاری در نقاط زیرین



شکل ۷. منحنی تغییرات ضریب شدت تنش مود I (K_I) با فاصله‌ی خودرو از ترک (l/L) و برای مقادیر مختلف ضریب کشسانی رویه‌ی آسفالتی.

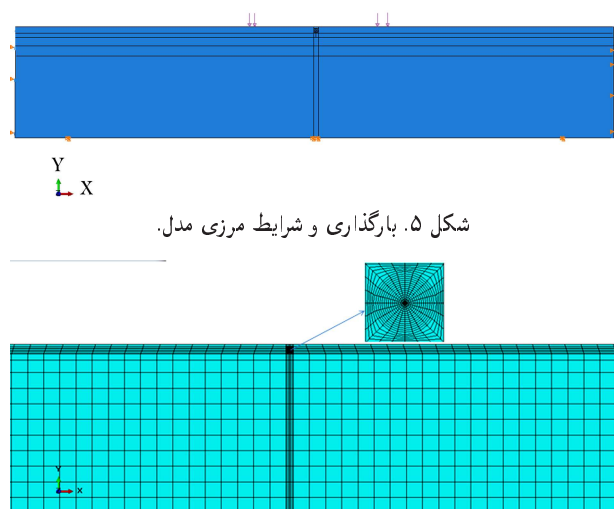
اثر یک چرخ از وسیله‌ی نقلیه را در نظر گرفته‌اند، برای مدل‌سازی واقعی‌تر و دقیق‌تر شرایط بارگذاری اعمالی به رویه، اثر چرخ‌های عقب و جلوی خودرو در مدل‌سازی‌های به‌طور هم‌زمان مورد بررسی قرار گرفته‌اند. فاصله‌ی بین چرخ‌ها (یا فاصله‌ی بین نیروهای محور عقب و جلو ماشین)، ۳٫۳۸ متر و طول تماس هر کدام از چرخ‌ها با سطح رویه، برابر ۲۶ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است و در سطح تماس هر لاستیک با آسفالت، بارگسترده‌ی ۵۳٫۴ کیلوپاسکال (ناشی از وزن یک وسیله‌ی نقلیه‌ی ۱۰ تنی) به‌صورت عمودی بالای سطح آزاد مدل و در فواصل مختلف نسبت به محل ترک اعمال شده است. شکل‌های ۵ و ۶، مدل المان محدود روسازی آسفالتی، بارگذاری اعمال‌شده، شرایط مرزی و یک تصویر بزرگ‌نمایی شده از المان‌های اطراف نوک ترک را نشان می‌دهند. در مدل‌سازی‌ها و تحلیل‌های انجام‌شده، طول ترک (a) و نیز محل اعمال بار ناشی از چرخ‌ها نسبت به ترک، به‌صورت متغیر در نظر گرفته شده است. فاصله‌ی بین مرکز ثقل ماشین (که در وسط دو چرخ فرض شده است) تا محل ترک با پارامتر l بیان می‌شود. همچنین به منظور بدون بُعد کردن پارامترهای متغیر مسئله از نسبت‌های l/L و a/w در ادامه استفاده شده است، که در آن w ضخامت آسفالت اولیه است (شکل ۴). ضرایب شدت تنش مودهای کششی و برشی (K_I ، K_{II}) و نیز ترم تنش T در این مسئله تابعی از وزن خودرو (P)، محل قرارگیری چرخ‌ها (l) نسبت به محل ترک، مدول کشسانی روکش (E) و نیز طول ترک (a) است (روابط ۴ الی ۶):

$$K_I = f(l/L, a/w, P, E) \quad (4)$$

$$K_{II} = f(l/L, a/w, P, E) \quad (5)$$

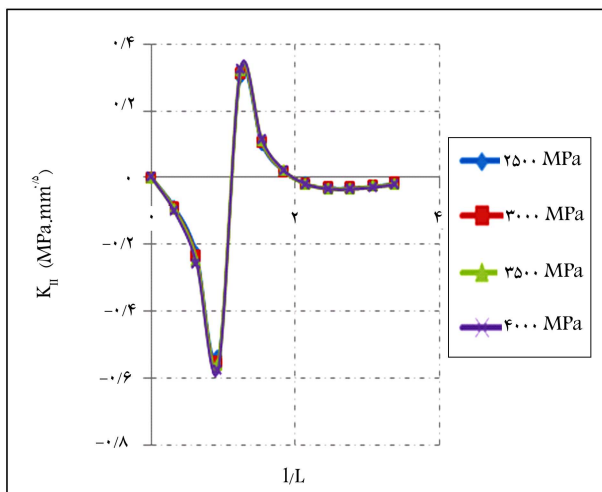
$$T = f(l/L, a/w, P, E) \quad (6)$$

با انجام یک تحلیل استاتیکی از رویه‌ی آسفالتی مدل‌سازی شده تحت شرایط بارگذاری و مرزی بیان‌شده، مقادیر K_I ، K_{II} و T مستقیماً از روش انتگرال J با استفاده

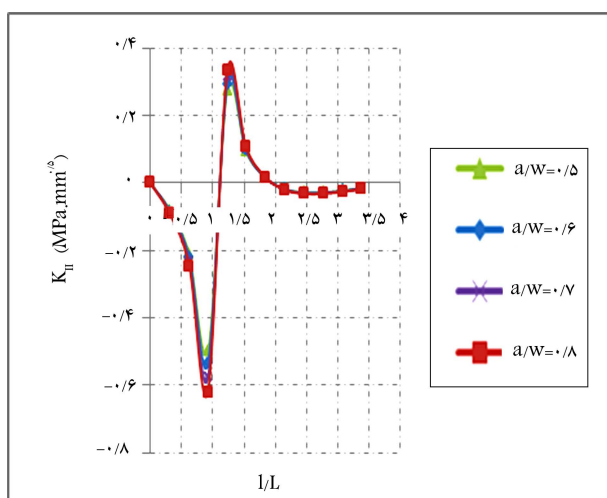


شکل ۵. بارگذاری و شرایط مرزی مدل.

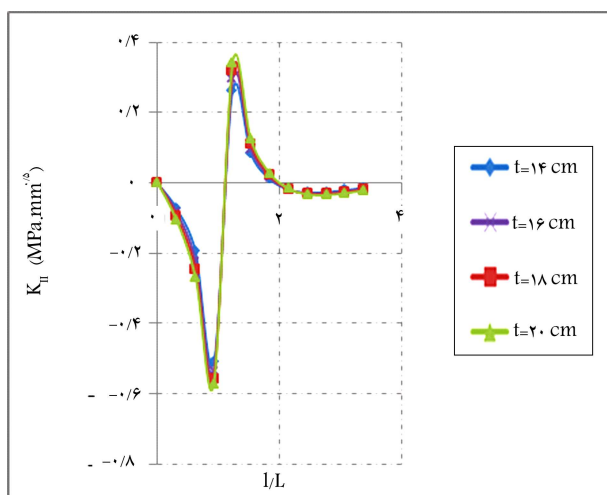
شکل ۶. مدل المان محدود روسازی آسفالتی تحت بارگذاری ناشی از عبور چرخ‌ها و نمای نزدیکی از المان‌های اطراف ترک.



شکل ۱۰. منحنی تغییرات ضریب شدت تنش مود II (K_{II}) با فاصله‌ی خودرو از ترک (l/L) و برای مقادیر مختلف ضریب کشسانی رویه‌ی آسفالتی.



شکل ۱۱. منحنی تغییرات ضریب شدت تنش مود II (K_{II}) با فاصله‌ی خودرو از ترک (l/L) و برای طول‌های مختلف ترک (a/w).

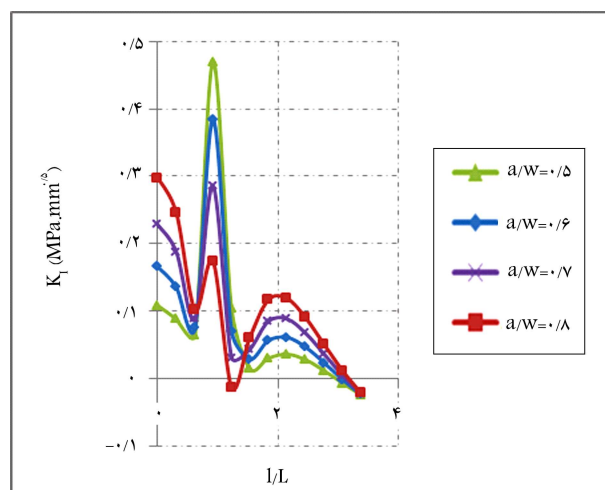


شکل ۱۲. منحنی تغییرات ضریب شدت تنش مود II (K_{II}) با فاصله‌ی خودرو از ترک (l/L) و برای ضخامت‌های مختلف رویه‌ی آسفالتی.

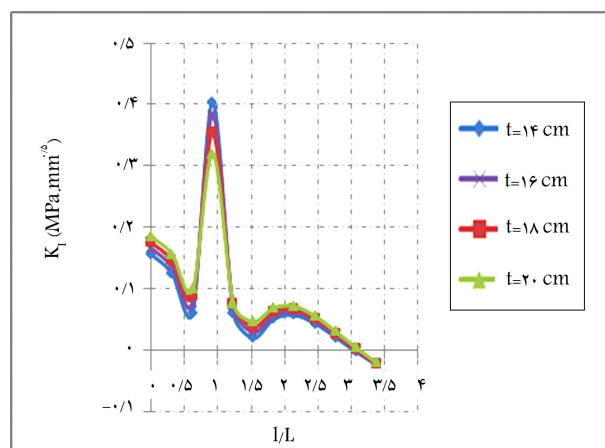
اطراف لاستیک شده است. بنابراین هنگامی که طول ترک افزایش می‌یابد، وقتی خودرو در نقاط دور از ترک قرار دارد، نوک ترک بیشتر در قسمت کششی قرار می‌گیرد و مقدار K_I افزایش می‌یابد (مثلاً برای مقادیر $l/L < 2$). اما هنگامی که چرخ جلویی خودرو به ترک نزدیک می‌شود، با افزایش طول ترک، نوک ترک وارد ناحیه‌ی فشاری می‌شود و مقدار K_I کاهش می‌یابد. سرانجام با دور شدن چرخ جلو از محل ترک، مجدداً تنش اطراف ترک به صورت کششی می‌شود و K_I افزایش می‌یابد.

در شکل ۹، تغییرات K_I به ازاء مقادیر مختلف ضخامت رویه نشان داده شده است. مطابق شکل مذکور با تغییر ضخامت رویه، در مقدار ضریب شدت تنش مود بازشوندگی ترک تغییرات محسوسی مشاهده نمی‌شود و فقط در محدوده‌ی $l/L = 1$ ، با افزایش ضخامت رویه مقادیر K_I تا حدودی کاهش یافته است.

شکل‌های ۱۰ الی ۱۲، تغییرات ضرایب تنش مود II (K_{II}) را برای روسازی آسفالتی تحلیل شده نشان می‌دهد. براساس شکل‌های مذکور، مقادیر بیشینه و کمینه‌ی K_{II} با افزایش ضریب ارتجاعی رویه، افزایش طول ترک و با افزایش ضخامت روکش تقریباً ثابت بوده و یا اندکی افزایش یافته است. تغییرات مود II به این نحو صورت می‌گیرد که وقتی که چرخ‌های خودرو در یک سمت ترک و در دوردست نسبت به ترک قرار داشته باشند، تا یک فاصله‌ی مشخص با نزدیک شدن چرخ‌ها به ترک، وجهی



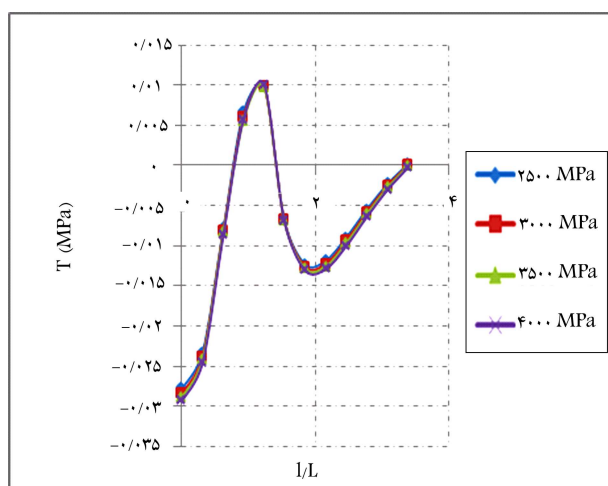
شکل ۸. منحنی تغییرات ضریب شدت تنش مود I (K_I) با فاصله‌ی خودرو از ترک (l/L) و برای طول‌های مختلف ترک (a/w).



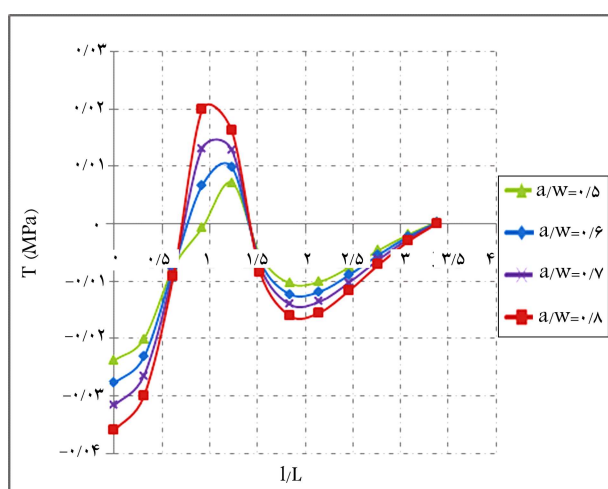
شکل ۹. منحنی تغییرات ضریب شدت تنش مود I (K_I) با فاصله‌ی خودرو از ترک (l/L) و برای ضخامت‌های مختلف رویه‌ی آسفالتی.

با توجه به اهمیت تنش T در رفتار شکست رویه‌ی آسفالتی، مقدار این پارامتر برای ترک انعکاسی بررسی شده در این پژوهش، با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS به دست آمده و تغییرات آن در شکل‌های ۱۴ الی ۱۶ نشان داده شده است. این تنش با شروع حرکت اتومبیل از فواصل دور نسبت به ترک منفی بوده و با جلوتر آمدن اتومبیل ($l/L < 2$)، در جهت منفی افزایش یافته است. پس از این نقطه در فاصله‌ی ($2 < l/L < 1/1$)، تنش T افزایش یافته و مجدداً پس از $l/L = 1/1$ ، با دور شدن چرخ جلو از ترک کاهش یافته است. مطابق شکل‌های مذکور در محدوده‌ی $1/4 < l/L < 0/7$ ، مقدار تنش T مثبت شده است، که می‌تواند باعث کاهش استحکام ترک خوردگی آسفالتی در این ناحیه شود. همچنین نتایج تحلیل‌ها نشان داده است که با کاهش مدول کشسانی رویه، افزایش طول ترک و یا افزایش ضخامت رویه، مقدار بیشینه‌ی تنش T افزایش یافته است (شکل‌های ۱۴ الی ۱۶). تغییرات مقدار تنش T با ضریب کشسانی چندان محسوس نیست و می‌توان گفت که تنش T تقریباً مستقل از جنس روکش و بیشتر به هندسه‌ی بارگذاری اعمالی به لایه‌ی آسفالتی وابسته است.

در این پژوهش، با انجام تحلیل‌های اجزاء محدود بسیار، پارامترهای شکست



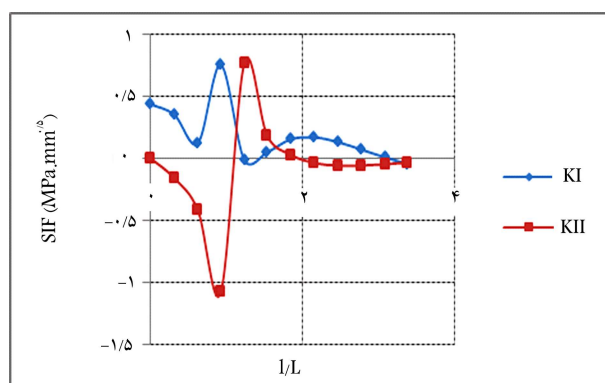
شکل ۱۴. منحنی تغییرات تنش T (T-stress) با فاصله‌ی خودرو از ترک (l/L) و برای مقادیر مختلف ضریب کشسانی رویه‌ی آسفالتی.



شکل ۱۵. منحنی تغییرات تنش T (T-stress) با فاصله‌ی خودرو از ترک (l/L) و برای طول‌های مختلف ترک (a/w).

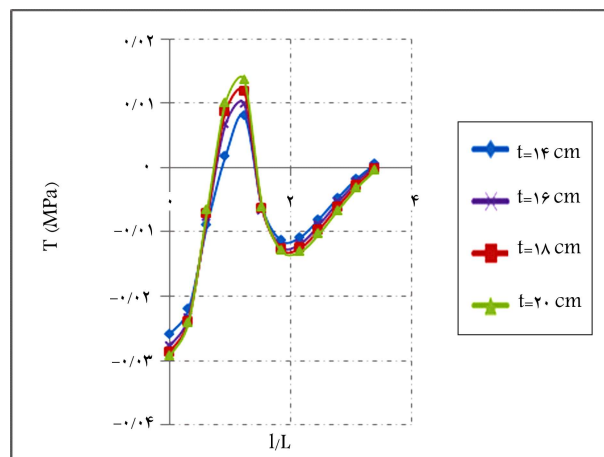
از ترک که به سمت خودرو است، تمایل به پایین رفتن دارد و با نزدیک شدن خودرو این لغزش بیشتر می‌شود. این به معنای افزایش ضریب شدت تنش مود II است. این حالت در شکل‌های ۱۰ الی ۱۲، برای فواصل تقریبی $1/5 < l/L < 3/2$ مشاهده می‌شود. با نزدیک شدن خودرو به ترک، آثار مود II کاهش می‌یابد (مثلاً وقتی که چرخ‌ها دقیقاً روی ترک قرار می‌گیرند، وجه ترک نباید نسبت به هم هیچ لغزشی داشته باشند). لذا از یک فاصله‌ی مشخص l/L به بعد، نمودار ضریب شدت تنش روند کاهشی دارد تا به مقدار صفر برسد (این حالت در شکل‌های ۱۰ الی ۱۲ برای فاصله‌ی $1/5 < l/L < 0/9$ قابل مشاهده است). اگر تأثیر بار وزن خودرو فقط به صورت چرخ‌های جلو مدل می‌شد، الزاماً ضریب شدت تنش صفر زمانی پیش می‌آمد که دقیقاً چرخ روی ترک قرار بگیرد. منتهی چون در این پژوهش، چرخ‌های جلو و عقب خودرو هر دو مدل شده‌اند، اثر چرخ عقب باعث می‌شود تا این فاصله به تأخیر افتد. زمانی که چرخ‌های جلوی خودرو از ترک عبور کنند و بعد از اینکه اثر مود برشی که چرخ‌های عقب بر وجه اولیه وارد می‌کنند، خنثی شد (ضریب شدت تنش به صفر رسید)، چرخ‌های جلوی خودرو باعث لغزش وجه دیگر ترک می‌شوند و ضریب شدت تنشی با علامت مخالف ضریب شدت تنش قبلی ظاهر می‌شود، که به همین دلیل انتقال لغزش از یک وجه ترک به وجه دیگر به وقوع می‌پیوندد. این ضریب شدت تنش مود II با حرکت خودرو افزایش می‌یابد، تا اینکه خودرو نسبت به ترک در حالت متقارن قرار گیرد (یعنی حالت $l/L = 0$). از اینجا به بعد دقیقاً روند اشاره شده تکرار می‌شود.

همچنین مقایسه‌ی نتایج حاصله برای ضریب شدت تنش مودهای I و II نشان می‌دهد که برخلاف مود بازشونده‌ی لبه‌های ترک، ضریب شدت تنش مود برشی (K_{II}) حساسیت بسیار کمتری به تغییرات مقادیر ضریب کشسانی رویه، ضخامت رویه و طول ترک دارد. شکل ۱۳، تغییرات ضریب شدت تنش (SIF) مودهای I و II را بر حسب فاصله‌ی خودرو از ترک، هنگامی که ضخامت رویه ۱۶ سانتی‌متر، مدول کشسانی آن ۲۵۰۰ مگاپاسکال و نسبت a/w برابر ۰/۶ باشد، نشان می‌دهد. مطابق شکل مذکور، مقادیر K_I در ترک انعکاسی، هنگامی که یک چرخ به ترک نزدیک می‌شود ($1/5 < l/L < 0/6$)، از مقادیر K_{II} کمتر است؛ ولی در سایر نقاط، ضریب شدت تنش در مود I نقش اساسی‌تری در گسترش ترک ایفا می‌کند. براساس پژوهش‌های انجام شده توسط پژوهشگران مکانیک شکست، تنش T تأثیر قابل توجهی در رشد ترک در بارگذاری مود ترکیبی کششی - برشی (I/II) دارد. مطابق پژوهش‌های انجام شده توسط آنان، مقادیر منفی تنش T باعث افزایش چقرمگی شکست مود ترکیبی کششی - برشی می‌شود و برای اجسام ترک‌داری که تنش T مثبت دارند، مقدار چقرمگی شکست مود ترکیبی کاهش می‌یابد.^[۱۷]



شکل ۱۳. مقایسه‌ی مقادیر K_I و K_{II} برای فواصل مختلف خودرو از محل ترک.

و بارگذاری‌ها قابل تخمین و محاسبه است. لذا برای تخمین عمر روسازی می‌توان ابتدا پارامترهای شکست دخیل در هر لحظه از بارگذاری را به صورت گسسته و نقطه به نقطه (با انجام تحلیل‌های استاتیکی) به دست آورد و نهایتاً با تجمیع نتایج حاصل با استفاده از مدل‌های تئوری و تجربی خستگی موجود عمر روسازی را تخمین زد. اما در برخی از پژوهش‌های مربوط به بررسی رفتار ترک روسازی آسفالتی، بارگذاری اعمالی از عبور وسائط نقلیه از طریق مدل‌سازی‌های پیچیده به صورت دینامیکی و وابسته به زمان هم در نظر گرفته شده است.^[۲] البته چنانچه واضح است، در واقع بار ترافیکی به صورت یک بار غیراستاتیکی است، که به عوامل متعددی چون سرعت و شدت بارگذاری، دمای رویه و غیره وابسته است. برای لحاظ کردن این اثرات آن‌چنان‌که معمول است، می‌توان از ضرایب دینامیکی مناسب با توجه به نوع و تناوب بارگذاری اعمالی و یا شرایط محیطی و دمایی استفاده کرد.



شکل ۱۶. منحنی تغییرات تنش T (T-stress) با فاصله‌ی خودرو از ترک (l/L) و برای ضخامت‌های مختلف رویه‌ی آسفالتی.

۵. نتیجه‌گیری

۱. پارامترهای شکست یک ترک انعکاسی در یک لایه‌ی آسفالتی شامل مقادیر K_{I1} ، K_{II} و تنش T بر حسب مقادیر مختلف فاصله‌ی چرخ‌های خودرو از ترک (l/L)، ضخامت‌های مختلف رویه‌ی آسفالتی، مدول کشسانی رویه و طول ترک‌های مختلف با تحلیل اجزاء محدود به دست آمده است.
۲. براساس نتایج به دست آمده موقعیت بار چرخ‌ها نسبت به ترک (l/L)، تأثیرگذارترین پارامتر در مقادیر K_{I1} ، K_{II} و تنش T است. همچنین بسته به محل قرارگیری خودرو متحرک نسبت به ترک، در مقدار و علامت پارامترهای شکست تغییرات زیادی مشاهده شده است.
۳. ضریب شدت تنش در مود I زمانی که طول ترک کوتاه باشد، هنگامی که بحرانی‌ترین حالت خود می‌رسد که چرخ جلو نزدیک ترک قرار داشته باشد؛ ولی برای ترک‌های بلند، بحرانی‌ترین حالت وقتی رخ می‌دهد که چرخ‌ها نسبت به ترک متقارن باشند.
۴. بحرانی‌ترین حالت ضریب شدت تنش در مود II هنگامی رخ می‌دهد که چرخ جلو کاملاً نزدیک به ترک باشد.
۵. افزایش ضریب کشسانی رویه، باعث افزایش مقدار ضرایب شدت تنش ترک (خصوصاً مود I) شده است، در نتیجه احتمال رشد ترک در رویه‌ی آسفالتی افزایش می‌یابد.
۶. در محدوده‌ی $0.7 < l/L < 1.4$ به سبب مثبت شدن تنش T احتمال ترک‌خوردگی رویه‌ی آسفالتی به هنگام عبور خودرو از این فواصل افزایش می‌یابد.
۷. در نظر گرفتن تأثیر فقط یک چرخ به جای هر دو چرخ عقب و جلو خودرو (که معمولاً در پژوهش‌های بررسی رفتار رشد ترک رویه‌ی آسفالتی لحاظ می‌شود)، باعث ایجاد خطاهای قابل ملاحظه در تعیین پارامترهای شکست روسازی ترک‌دار و در نتیجه تخمین عمر روسازی می‌شود.
۸. با توجه به نتایج تحلیل‌های انجام شده در این پژوهش وقتی که خودرو در موقعیت تقریبی $l/L = 1$ قرار می‌گیرد، به سبب وجود بیشترین مقادیر ضرایب شدت تنش K_{I1} و K_{II} و نیز بیشترین مقدار تنش T مثبت، بحرانی‌ترین حالت بارگذاری رویه‌ی آسفالتی حاوی ترک انعکاسی ایجاد می‌شود.

یک ترک انعکاسی موجود در یک روسازی و زیر بار ترافیک برای مجموعه‌ی متنوعی از شرایط مادی و هندسی روسازی و نیز محل اعمال بار ناشی از چرخ‌ها محاسبه شده است. همچنین اثر هم‌زمان بار ناشی از چرخ‌های عقب و جلو خودرو در رفتار ترک مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شده است که این عامل تأثیر زیادی در مقدار، علامت و نحوه‌ی توزیع ضرایب شدت تنش ترک دارد. این در حالی است که در سایر پژوهش‌های مشابه در این خصوص، فقط اثر یک چرخ در نظر گرفته شده است و لذا نتایج ارائه شده در مقالات مذکور می‌تواند خطاهای قابل ملاحظه‌ی در تعیین عمر خستگی روسازی به همراه داشته باشد. همچنین تأثیر تنش T در رفتار ترک انعکاسی مورد نظر بررسی شده است. در حالی که تمامی منابع قبلی موجود در این خصوص که توسط سایر پژوهشگران ارائه شده است، اثر این ترم را نادیده فرض کرده‌اند؛ اما نتایج تحلیل‌های انجام شده در این پژوهش نشان داده است که مقدار این تنش غیرتکنین در مقایسه با ضرایب شدت تنش (که معرف و نماینده‌ی جملات تکنین تنش هستند) قابل ملاحظه است و در نتیجه، در نظر نگرفتن این تنش در حوزه‌ی تنش اطراف ترک انعکاسی می‌تواند باعث ایجاد خطا در تخمین و پیش‌بینی رفتار رشد ترک روسازی شود. براساس نتایج به دست آمده برای تنش T در فواصل مختلف چرخ‌های خودرو نسبت به محل ترک، مقدار و علامت تنش T تغییر می‌کند. در حالت‌هایی که مقدار این تنش مثبت می‌شود، مقاومت در برابر رشد ترک کاهش می‌یابد و لذا از مجموع منحنی‌های به دست آمده برای ضرایب شدت تنش و همچنین تنش T در این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که بحرانی‌ترین حالت بارگذاری ترک ناشی از حرکت خودرو زمانی اتفاق می‌افتد که خودرو در فاصله‌ی تقریبی $l/L = 1$ نسبت به ترک قرار گیرد. چرا که در این موقعیت بیشترین مقدار ضرایب شدت تنش K_{I1} و K_{II} و نیز بیشترین مقدار تنش T مثبت به وجود می‌آید.

همچنین این تذکر لازم است که در انجام تحلیل‌های این پژوهش، بارگذاری اعمالی ناشی از ترافیک به صورت استاتیک است. به عبارت دیگر، چنانچه در یک لحظه‌ی مشخص و معین خودرو عبوری ثابت و بی‌حرکت فرض شود، وزن خودرو که در محل دو چرخ عقب و جلو ماشین متمرکز می‌شود، بسته به محل قرارگیری چرخ‌ها نسبت به ترک باعث ایجاد یک شدت تنش در اطراف نوک ترک موجود می‌شود. در این لحظه‌ی مشخص و معلوم متناسب با بار اعمالی، درصدی از فرایند آسیب و تخریب ترک (یا کاهش عمر روسازی) کامل می‌شود و در واقع آسیب تجمعی نهایی (رشد ترک و یا عمر خستگی روسازی) از تجمیع آسیب‌های ایجاد شده در تمامی لحظه‌ها

(References) منابع

1. Ameri, M., Mansourian, A., Heidary Khavas, M., Aliha, M.R.M. and Ayatollahi, M.R. "Cracked asphalt pavement under traffic loading- A 3D finite element analysis", *Engineering Fracture Mechanics*, **78**(8), pp. 1817-1826 (2011).
2. Baek, J. "Modeling reflective cracking development in hot-mix asphalt overlays and quantification of control techniques", Phd Dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign (2010).
3. Von Quintus, H.L., Mallela, J. and Lytton, R.L. "Techniques for mitigation of reflective cracks", *FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference Atlantic City*, New Jersey, USA: Confirmation/Paper No. P10067 (2010).
4. Al-Qadi, I.L. "Pavement interlayer system mechanisms: Separation, reinforcement, and reflective cracking control", Chinese Society of Pavement Engineering (2006).
5. Kim, J. and Buttlar, W.G. "Analysis of reflective crack control system involving reinforcing grid over base-isolating interlayer mixture", *Journal of Transportation Engineering*, **128**(4), pp. 375-384 (2002).
6. Jacobs, M.M., Hopman, P.C. and Molenaar, A.A. "Application of fracture mechanics principles to analyze cracking in asphalt concrete", *Proc., Annual Meeting of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **65**, pp. 1-39 (1996).
7. Fakhri, M., Farokhi, M. and Kheiry, P.T. "Modeling of top-down cracking (TDC) propagation in asphalt concrete pavements using fracture mechanics theory", *Adv Test Charact Bituminous Mater II*, pp. 681-692 (2009).
8. Luo, R. and Huang, X. "Research on the method to calculate the stress intensity factor of asphalt pavement's edge crack", *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, **19**, pp. 12-15 (2002).
9. Zhao, Y., Wang, S. and Zhou, C. "Analysis of top-down cracking of asphalt pavements based on fracture mechanics approach", *J. Tongji Univ. (Natural Science)*, **38**(2), pp. 218-222 (2010).
10. Miao, Y., He, T.G., Yang, Q. and Zheng, J.J. "Multi-domain hybrid boundary node method for evaluating top-down crack in Asphalt pavements", *Engineering Analysis with Boundary Elements*, **34**(9), pp. 755-760 (2010).
11. Aliha, M.R.M. and Ayatollahi, M.R. "Geometry effects on fracture behaviour of polymethyl methacrylate", *Materials Science and Engineering: A*, **527**(3), pp. 526-530 (2010).
12. Smith, D.J., Ayatollahi, M.R. and Pavier, M.J. "The role of T-stress in brittle fracture for linear elastic materials under mixed-mode loading", *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, **24**(2), pp. 137-150 (2001).
13. Novak, M., Birgisson, B. and Roque, R. "Near-surface stress states in flexible pavements using measured radial tire contact stresses and ADINA", *Computers & Structures*, **81**(8), pp. 859-870 (2003).
14. Akbulut, H. and Aslantas, K. "Finite element analysis of stress distribution on bituminous pavement and failure mechanism", *Materials & Design*, **26**(4), pp. 383-387 (2005).
15. Li, X. and Marasteanu, M. "The fracture process zone in asphalt mixture at low temperature", *Engineering Fracture Mechanics*, **77**(7), pp. 1175-1190 (2010).
16. Kim, H., Wagoner, M.P. and Buttlar, W.G. "Numerical fracture analysis on the specimen size dependency of asphalt concrete using a cohesive softening model", *Construction and Building Materials*, **23**(5), pp. 2112-2120 (2009).
17. Aliha, M.R.M., Ayatollahi, M.R. and Akbaridoost, J. "Typical upper bound-lower bound mixed mode fracture resistance envelopes for rock material", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **45**(1), pp. 65-74 (2012).