

بررسی نحوه گسترش ترک‌های خستگی در روسازی آسفالتی در اثر تغییر دما، با استفاده از فرضیه مکانیک شکست

منصور فخری*، استادیار راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
پیمان کریمی ابیانه، کارشناس ارشد راه و ترابری

E-mail: fakhri@kntu.ac.ir

دریافت: ۹۲/۰۶/۱۴ - پذیرش: ۹۲/۱۱/۱۷

چکیده

یکی از خرابی‌های اصلی و مهم که در روسازی‌های آسفالتی اتفاق می‌افتد ترک‌های ناشی از خستگی می‌باشد، که در بخش پایینی مقطع آسفالتی پدید می‌آیند و سپس با تکرار بار به سمت بالا گسترش می‌یابند. پیدایش این نوع ترک‌ها در مقاطع آسفالتی با ضخامت کم، رایج است. در این پژوهش، برای شناخت بهتر و درک بیشتر نحوه گسترش ترک‌های روبه بالا و پارامترهای مؤثر در آن، از روش مکانیک شکست استفاده شده و پدیده‌ی ترک و نحوه پیشروی آن در روسازی در سه دمای کم، متوسط و زیاد تحلیل نظری گردید. نتایج نشان داد که مقدار ضریب شدت تنش ارتباط مستقیمی با فاصله مرکز بارگذاری از ترک دارد. همچنین، مشاهده شد که در حالت اساس دانه‌ای مقدار ضریب شدت تنش در حالتی که بار در نزدیکی ترک قرار دارد افزایش بیشتری را نسبت به حالت اساس سیمانی نشان می‌دهد. این مسئله، تأثیر زیاد نوع اساس، بخصوص اساس دانه‌ای، را بر تغییرات ضریب شدت تنش نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: روسازی، آسفالت، ترک‌های پایین به بالا، رشد ترک، مکانیک شکست.

۱. مقدمه

می‌باید. در چنین شرایطی، فاکتورهای شدت تنش می‌توانند به عنوان پارامترهای اساسی در جهت تشخیص گسیختگی ناشی از شکستگی ترد در روسازی یا رشد ناشی از خستگی ترک مورد استفاده قرار گیرند. در حالی که ترک خوردن لایه آسفالت اجتناب‌ناپذیر می‌باشد، بررسی نحوه رشد ترک در روسازی‌های آسفالتی برای تخمین زمان مناسب بازسازی و بهبود روسازی و سرویس مناسب راه‌ها و بزرگراه‌ها دارای اهمیت می‌باشد. مطالعات عددی و آزمایشگاهی زیادی برای بررسی رفتار رشد ترک روسازی‌های آسفالتی انجام شده است. به عنوان مثال، ویلیامز (۱۹۵۷) مطالعاتی را در مورد نحوه توزیع تنش در اطراف نوک ترک انجام داده است که در آن مشخص شده که می‌توان هر یک از مؤلفه‌های تنش

سالانه حجم زیادی از سرمایه ملی صرف طراحی، ساخت و نگهداری روسازی می‌شود، علی‌الخصوص در کشورهایی که دارای شبکه‌های زیادی از راه و بزرگراه هستند (لوگمار و همکاران، ۲۰۰۹؛ کیم و بوتلار، ۲۰۰۹). ترک خوردگی یکی از مدل‌های معمول زوال و یکی از مهمترین دلایل گسیختگی کلی در روسازی آسفالتی راه‌ها و بزرگراه‌ها، خصوصاً در مناطق سردسیر، می‌باشد (لابوز و دای، ۱۹۹۴؛ لی و ماراستیانو، ۲۰۱۰). در دمای زیر صفر و دماهای خیلی کم، روسازی آسفالتی اغلب به صورت یک ماده شکننده عمل کرده و بنابراین خطر گسیختگی ناگهانی ناشی از ترک‌های موجود در روسازی افزایش

بسط سری معادلات تنش وجود دارد، معادلات در حالت مورد I بارگذاری به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\sigma_{xx} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] + T \quad (1)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] + T \quad (2)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (3)$$

۲. توصیف مدل

مدل‌سازی به این صورت انجام شد که روسازی در هر سه ضخامت و در سه دمای کم، متوسط و زیاد و دو نوع اساس دانه‌ای و سیمانی و همچنین سه نوع زیراساس رس نرم، رس متوسط و زیراساس معمولی مورد تحلیل قرار گرفت. همچنین، بار وسیله‌ی نقلیه در فواصل مختلف نسبت به ترک قرار گرفت. بارگذاری چرخ وسیله‌ی نقلیه به صورت دایره‌ای با قطر ۱۰ سانتی‌متر و با شدت ۵۲۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شد. برای این تحلیل، از ۱۷۰۶۴ المان و ۵۱۷۶۶ نقطه‌ی گرهی استفاده شد که المان‌ها به صورت ۸ گرهی درجه دو در نظر گرفته شده‌اند.

نوع تحلیل المان محدود به صورت Plane strain در نظر گرفته شد که در این نوع تحلیل طول روسازی نسبت به ضخامت آن بینهایت در نظر گرفته می‌شود.

پارامترهای در نظر گرفته شده در نرم‌افزار المان محدود شامل ضریب شدت تنش K_1 ، انتگرال I ، مدول برجهندگی E و ضریب پواسون ν می‌باشد.

با توجه به اینکه مقدار تنش در نوک ترک به بینهایت نزدیک می‌باشد، مش‌بندی و المان‌بندی ترک و بخصوص نوک ترک اهمیت به سزایی دارد. لذا، در این پژوهش، مش‌بندی نوک ترک به صورت گوه‌ای انجام شده و از المان‌های سینگولار که مقدار تنش را بهتر نشان می‌دهد استفاده شده است.

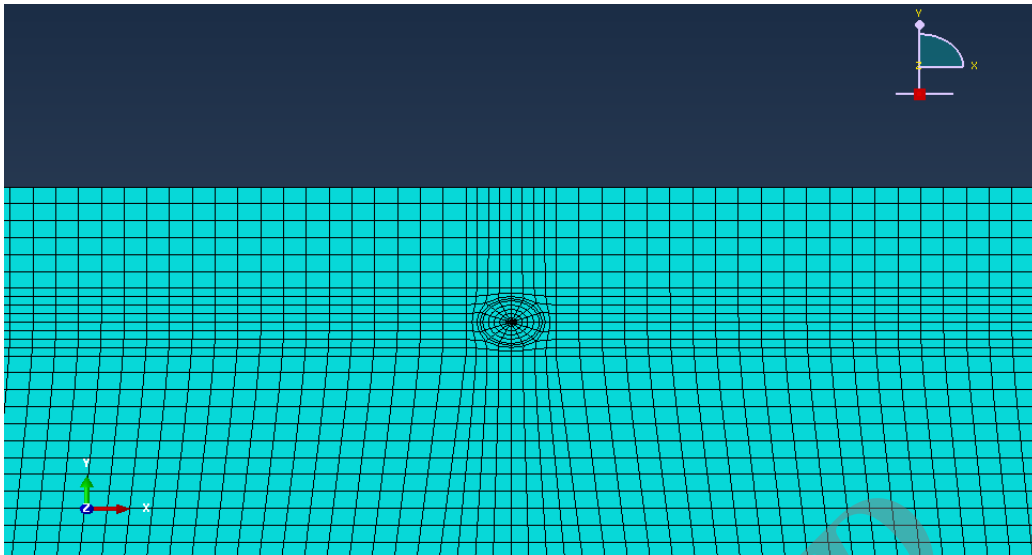
تصویری از مش‌بندی لایه‌ی آسفالتی روسازی، نحوه مش‌بندی کل روسازی، مش‌بندی اطراف ترک و نحوه المان‌بندی ترک مدل شده به ترتیب در شکل‌های ۱ تا ۵ نشان داده شده است.

الاستیک در اطراف نوک ترک را توسط بسط سری بیان نمود. البته محققین دیگری با استفاده از روش‌های دیگر نیز این حوزه تنش را محاسبه نموده‌اند. به عنوان مثال، وسترگارد (۱۹۳۹)، با استفاده از روابط الاستیسیته (موسخلی شیویلی، ۱۹۷۷) حل دقیق حوزه تنش اطراف ترک را محاسبه نمود که با تقریب به همان سری ویلیامز (۱۹۵۷) ختم می‌شود.

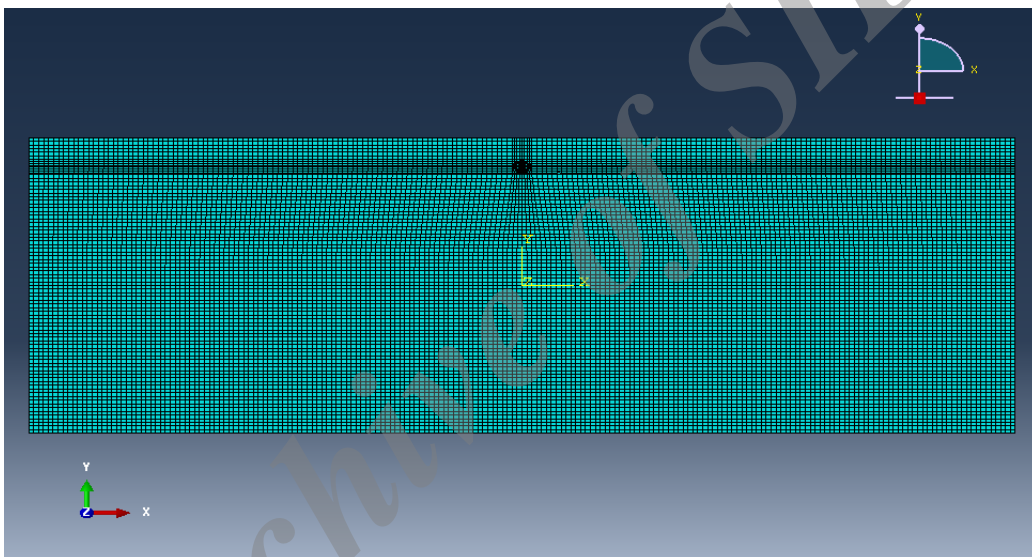
محمد و الشمس (۲۰۰۵) مقاومت در مقابل شکست مخلوط‌های آسفالتی را با استفاده از رویکرد انتگرال J مورد بررسی قرار داده‌اند. این رویکرد برای توصیف مواد غیر همگن، از جمله مخلوط‌های آسفالتی، مقبولیت دارد. در تحقیق دیگری، یک معیار با دو پارامتر K و J توسط کیم و همکاران (۱۹۹۹) ارائه شده است. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که بتن آسفالتی اپوکسی، خواص شکست الاستیک-پلاستیک در دمای ۵- تا ۲۵ درجه سلسیوس داشته و برای دمای ۱۵- تا ۵ درجه سلسیوس خاصیت شکست تردی دارد.

کیم و همکاران (۱۹۹۹) با انجام مطالعه‌ای روی رفتار شکست مواد آسفالتی مشاهده کردند که استحکام کششی بتن آسفالتی، ابتدا تا یک دمای معینی افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد.

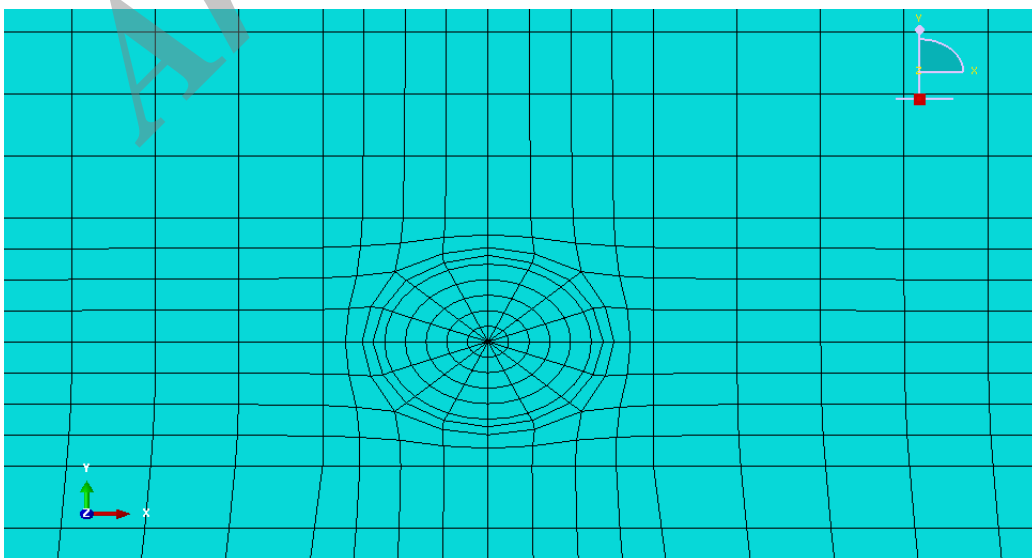
رفتار نوک ترک بر اثر جابجایی بار نسبت به آن تغییر پیدا می‌کند. برای بررسی این تغییر رفتار، از ضرایب شدت تنش استفاده شده و تغییرات ضریب شدت تنش K_I مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در همین راستا، در این پژوهش، با استفاده از تحلیل اجزای محدود و با کمک نرم‌افزار آباکوس (ABAQUS) که نرم‌افزاری بسیار کاربردی در تحلیل مکانیک شکست می‌باشد به مدل‌سازی روسازی در سه ضخامت کم، متوسط و زیاد پرداخته شده و رفتار ترک خستگی ایجاد شده در لایه آسفالتی تحت اثر بارگذاری وسیله‌ی نقلیه در سه بازه‌ی دمایی مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. بر اساس روابطی که برای محاسبه‌ی ضرایب C_i ، B_i ، A_i و f در



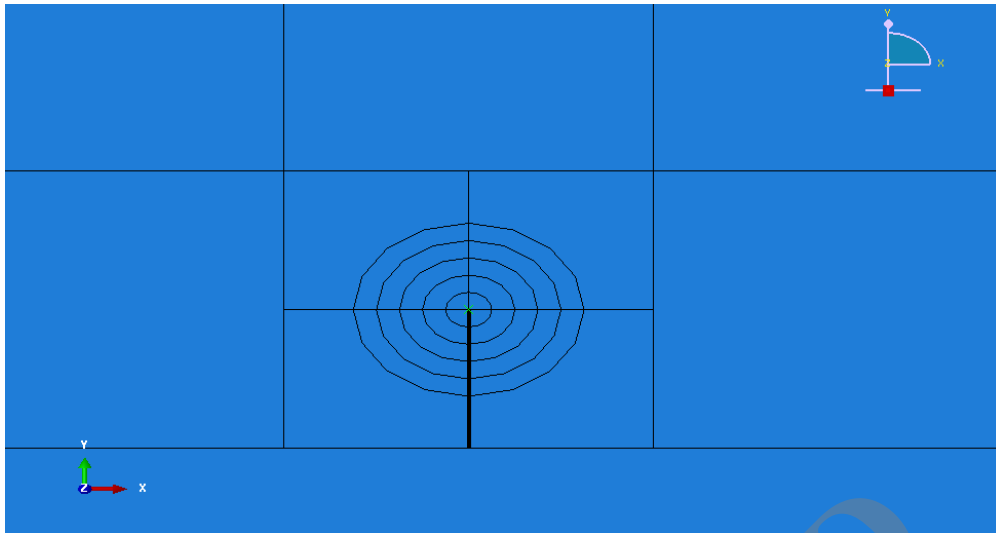
شکل ۱. تصویری از مش بندی روسازی



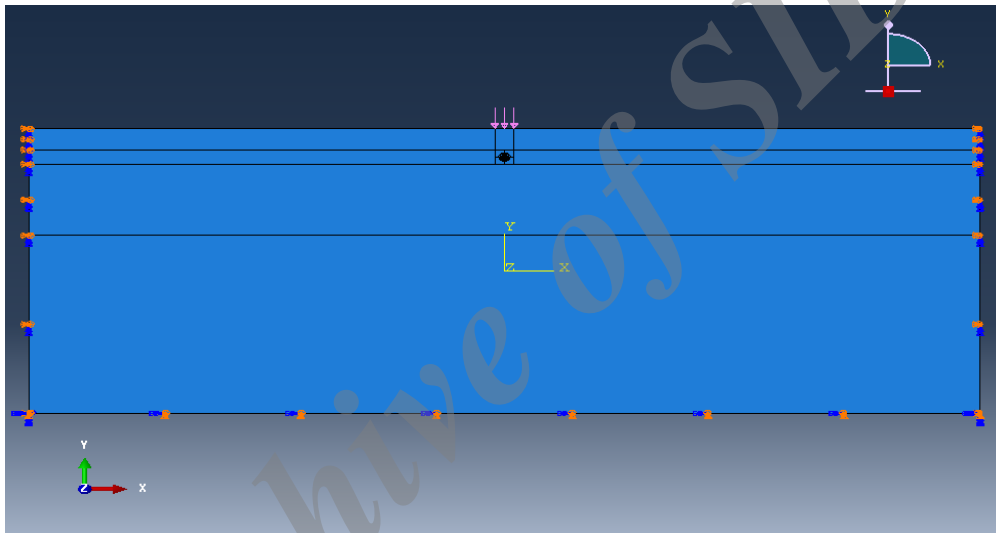
شکل ۲. تصویری از مش بندی کل روسازی



شکل ۳. نحوه مش بندی اطراف ترک



شکل ۴. ترک مدل شده و نحوه‌ی المان‌بندی



شکل ۵. شرایط مرزی و بارگذاری در نظر گرفته شده

۳. خصوصیات روسازی مدل سازی شده

همانطور که در جدول ۱ نشان داده شده است جهت تحلیل روسازی سه ضخامت کم، متوسط و زیاد به صورت زیر در نظر گرفته شد:

- روسازی با ضخامت کم شامل: ضخامت لایه‌ی آسفالتی ۵ سانتی‌متر، ضخامت لایه‌ی اساس ۱۰ سانتی‌متر و ضخامت لایه‌ی زیرین (زیراساس و خاک بستر) ۱۰۰ سانتی‌متر.
- روسازی با ضخامت متوسط شامل: ضخامت لایه‌ی آسفالتی ۱۰ سانتی‌متر، ضخامت لایه‌ی اساس ۲۰ سانتی‌متر و لایه‌ی زیرین (زیراساس و خاک بستر) ۱۰۰ سانتی‌متر.

- روسازی با ضخامت زیاد شامل: ضخامت لایه‌ی آسفالتی ۲۵ سانتی‌متر، ضخامت لایه‌ی اساس ۳۰ سانتی‌متر و لایه‌ی زیرین (زیراساس و خاک بستر) ۱۰۰ سانتی‌متر.

روسازی در هر سه ضخامت و در سه دمای کم، متوسط و زیاد و دو نوع اساس دانه‌ای و سیمانی و همچنین سه نوع زیراساس رس نرم، رس متوسط و زیراساس معمولی مورد تحلیل قرار گرفت. همچنین، بار وسیله‌ی نقلیه در فواصل مختلف نسبت به ترک قرار گرفت. جدول ۱ خصوصیات مصالح به کار برده شده در مدل‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۱. خصوصیات و ابعاد مصالح به کار برده شده در مدل‌ها

E(Mpa)			ضریب پواسون ν	ضخامت مدل (cm)			لایه‌ی روسازی
دمای کم	دمای متوسط	دمای بالا		مدل ۱	مدل ۲	مدل ۳	
۱۰۰۰۰	۳۱۰۰	۶۹۰	۰/۳۵	۵	۱۰	۲۵	لایه‌ی آسفالتی
۶۹۰۰	۶۹۰۰	۶۹۰۰	۰/۳۵	۱۰	۲۰	۳۰	اساس سیمانی
۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۰/۳۵	۱۰	۲۰	۳۰	اساس دانه‌ای
۲۰	۲۰	۲۰	۰/۴	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	زیراساس رس نرم
۴۸۳	۴۸۳	۴۸۳	۰/۴	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	زیراساس رس متوسط
۱۰۳	۱۰۳	۱۰۳	۰/۴	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	زیر اساس معمولی

در این پژوهش نیز مطابق پژوهش‌های مشابه انجام شده جهت صحت‌سنجی مدل‌های ایجاد شده، هر سه ضخامت روسازی هم به‌وسیله‌ی روش المان محدود و هم به کمک نرم‌افزار Ken layer مورد تحلیل قرار گرفته شد. همانطور که در جدول ۲ نشان داده شده نتایج حاصل از تحلیل در هر دو نرم‌افزار تقریباً به هم نزدیک بوده و مقادیر تقریباً مشابهی را نشان می‌دهد.

۴. صحت‌سنجی مدل‌سازی

صدرنژاد و همکاران (۲۰۱۱) در پژوهشی برای صحت‌سنجی مدل اجزای محدود ایجاد شده تحت اثر بارگذاری یکسان به مقایسه رفتار روسازی در روش اجزای محدود و نرم‌افزار Ken layer پرداخته‌اند.

جدول ۲. مقایسه نتایج در دو روش المان محدود و نرم‌افزار ken layer

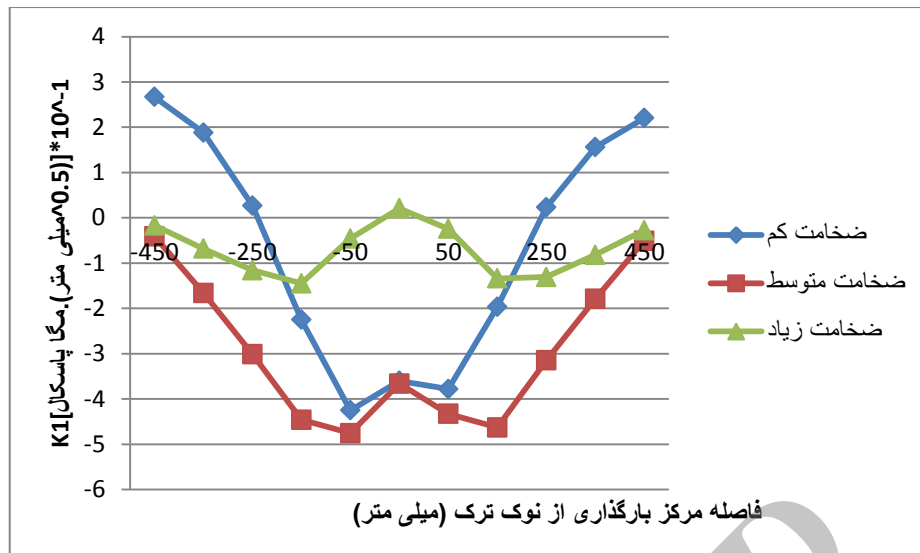
ضخامت کم			ضخامت متوسط			ضخامت زیاد			واکنش‌های روسازی
FEM	KEN LAYER	درصد اختلاف	FEM	KEN LAYER	درصد اختلاف	FEM	KEN LAYER	درصد اختلاف	
۰/۴۲۱	۰/۴۷۵	۱۳	۰/۲۵۶	۰/۲۴۵	۴/۴۸	۰/۰۱۳	۰/۰۱	۲۴	جابجایی سطح روسازی δ (mm)
۱/۱۳۳	۱/۱۲۹	۰/۳۵	۰/۶۵۵	۰/۶۵۱	۰/۶۱	۰/۲۵۴	۰/۲۶	۲/۵	تنش افقی پایین لایه‌ی آسفالتی σh (Mpa)
۲۸۹/۳۵	۲۸۸/۶۸	۰/۲۳	۱۳۶/۸۵	۱۳۶/۱	۰/۵۵	۶۴/۲۳	۶۵/۴۵	۱/۹	کرنش افقی پایین لایه‌ی آسفالتی εh (μE)
-۰/۰۳۶۵	-۰/۰۳۷۴	۲/۴۶	-۰/۰۱۲۲	-۰/۰۱۲۴	۱/۶۳	-۰/۰۰۲۸	-۰/۰۰۲۵	۱۲	تنش قائم بالای خاک بستر σv (Mpa)
-۸۵۶/۲۵	-۸۵۹/۴۱	۰/۳۷	-۱۵۴/۴۹	-۱۴۶/۲۵	۵/۶۳	-۸۹/۴۵	-۸۷/۷۵	۱/۹۳	کرنش قائم بالای خاک بستر εv (μE)

سیمانی و دانه‌ای آنالیزی جهت تعیین مقادیر ضریب شدت تنش KI در نوک ترک انجام شده است، بارگذاری به این صورت انجام گرفته که بار به ترک نزدیک شده، روی ترک قرار گرفته و از آن دور می‌شود. در شکل‌های ۶ و ۷ مقایسه ضرایب شدت تنش در دمای کم و ضخامت‌های مختلف آورده شده است.

۵. تحلیل اطلاعات

آنالیزی روی مدل طرح شده برای تعیین اثر دمای لایه‌ی آسفالتی روی مقادیر تنش، در اطراف نوک ترک، اعمال شده است. بنابراین، برای لایه‌ی آسفالتی سه ضخامت کم (۵ سانتی‌متر)، متوسط (۱۰ سانتی‌متر) و زیاد (۲۵ سانتی‌متر) در نظر گرفته شده و برای دو نوع اساس

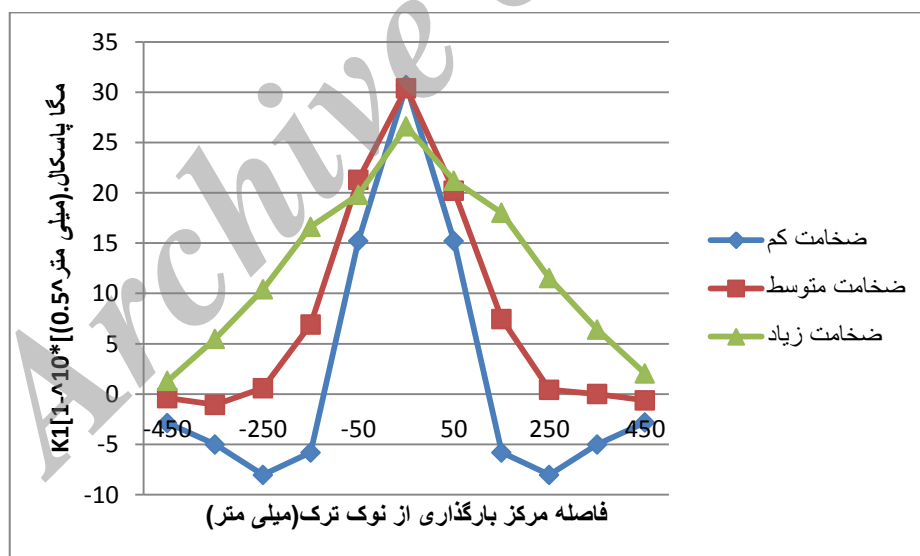
بررسی نحوه گسترش ترک‌های خستگی در روسازی آسفالتی در اثر تغییر دما، با استفاده از فرضیه مکانیک شکست



شکل ۶. تأثیر ضخامت لایه‌ی آسفالت بر مقدار مود اول ضریب شدت تنش در دمای کم (اساس سیمانی)

مشابهی را نشان می‌دهند. در حالی که در ضخامت زیاد، مقدار ضریب شدت تنش تا حدی کاهش و سپس افزایش پیدا می‌کند.

همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، در دمای کم و اساس سیمانی در حالی که ضخامت لایه‌ی آسفالتی کم و متوسط می‌باشد مقدار مود اول ضریب شدت تنش با افزایش فاصله از مرکز بارگذاری و نوک ترک روند



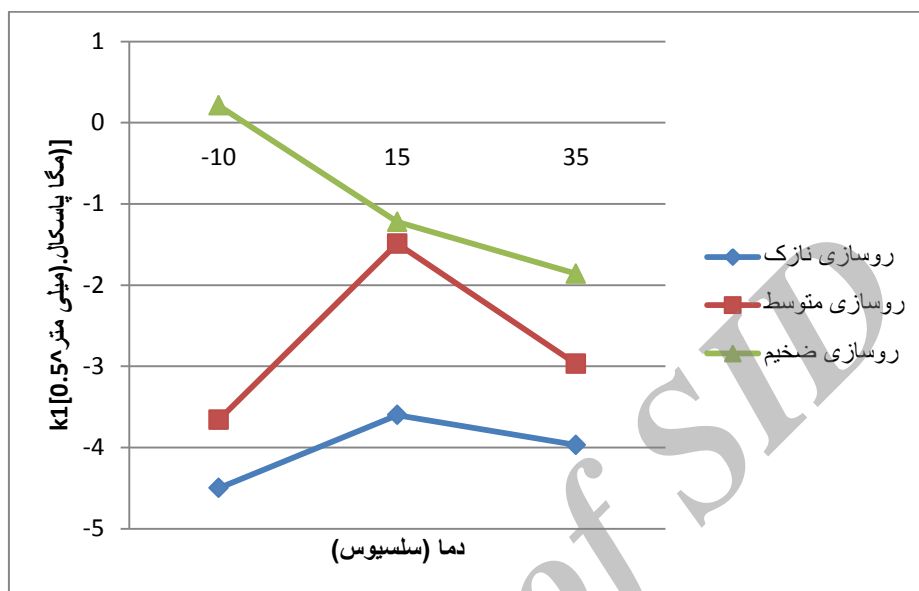
شکل ۷. تأثیر ضخامت لایه‌ی آسفالت بر مقدار مود اول ضریب شدت تنش در دمای کم (اساس دانه‌ای)

ترک ضریب شدت تنش ابتدا با شدت زیادی کاهش و سپس به مقدار کمی افزایش می‌یابد. با توجه به شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود که در حالت اساس دانه‌ای مقدار ضریب شدت تنش در حالتی که بار در نزدیکی ترک قرار دارد افزایش بیشتری را نسبت به

مطابق شکل ۷، در شرایط دمای کم و اساس دانه‌ای، مقدار مود اول ضریب شدت تنش در نزدیکی ترک افزایش چشمگیری را نشان می‌دهد که این افزایش در هر سه ضخامت کم، متوسط و زیاد به طور مشابهی مشاهده می‌شود. ولی با فاصله گرفتن از مرکز بارگذاری و نوک

همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، در حالی که بار در نزدیکی ترک قرار می‌گیرد و در روسازی ضخیم و در دمای کم مقدار ضریب شدت تنش نسبت به دو ضخامت دیگر رفتار متفاوتی را نشان می‌دهد.

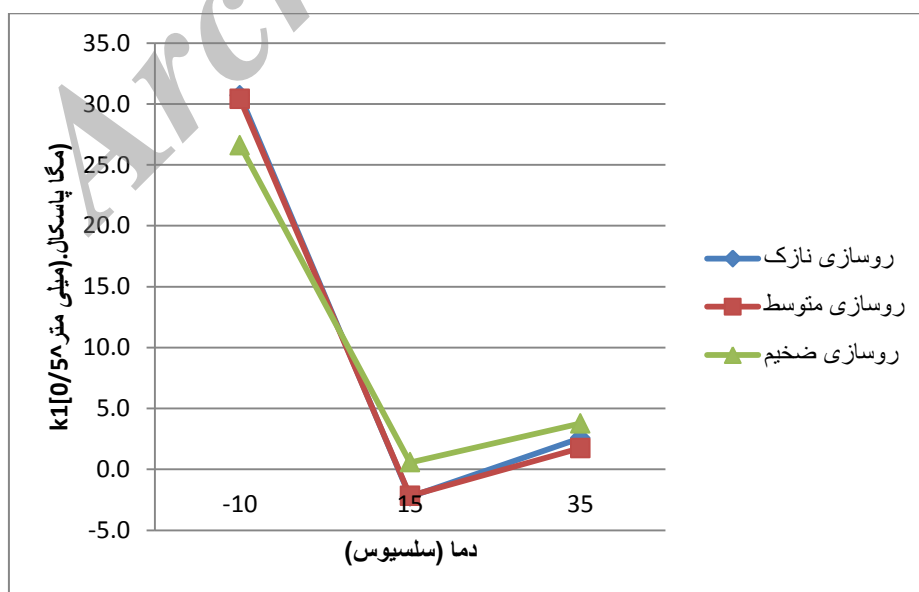
حالت اساس سیمانی نشان می‌دهد که این مسئله تأثیر زیاد نوع اساس، علی‌الخصوص اساس دانه‌ای را بر تغییرات ضریب شدت تنش نشان می‌دهد.



شکل ۸. مقایسه‌ی تأثیر دما بر مقدار مود اول ضریب شدت تنش، در حالت بار نزدیک ترک (اساس سیمانی)

اندازه‌ای را نسبت به دو دمای دیگر نشان می‌دهد که این حالت در هر سه ضخامت کم، متوسط و زیاد مشاهده می‌شود.

با توجه به شکل ۹ مشاهده می‌شود که در حالی که بار در نزدیکی ترک قرار می‌گیرد، در دمای کم، مقدار مود اول ضریب شدت تنش در اساس دانه‌ای افزایش بیش از



شکل ۹. مقایسه‌ی تأثیر دما بر مقدار مود اول ضریب شدت تنش، در حالت بار نزدیک ترک (اساس دانه‌ای)

۶. نتیجه‌گیری

ضرایب شدت تنش بیشتری را در مود اول نسبت به دو ضخامت متوسط و زیاد نشان می‌دهد.

- در حالتی که دما متوسط بوده و اساس استفاده شده دانه‌ای می‌باشد لایه‌ی آسفالتی با ضخامت زیاد مقدار ضرایب شدت تنش کمتری را در مود اول نسبت به دو ضخامت کم و متوسط نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج به دست آمده ملاحظه شد که تغییرات دما و همچنین تغییرات ضخامت لایه‌ی آسفالتی تأثیر به‌سزایی را در مقدار ضرایب شدت تنش در ترک‌های ایجاد شده در پایین لایه‌ی آسفالتی و در مرز بین لایه‌ی آسفالتی و لایه‌ی اساس دارد. همچنین، نوع مصالح لایه‌ی اساس استفاده شده که در این پژوهش شامل اساس سیمانی و اساس دانه‌ای بود نیز در مقادیر ضرایب شدت تنش تأثیر قابل توجهی دارد که البته این افزایش تنش در مصالح اساس دانه‌ای نسبت به اساس سیمانی قابل توجه‌تر بود. همچنین، تأثیر محل قرارگیری وسیله‌ی نقلیه نسبت به ترک بر مقادیر ضرایب شدت تنش نیز مقدار قابل ملاحظه‌ای بود که در بخش قبل ملاحظه گردید.

- در حالت دمای کم و اساس دانه‌ای، در هر سه ضخامت آسفالتی کم، متوسط و زیاد، مقدار مود اول ضریب شدت تنش (K_I) افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد که این مسئله تأثیر کاهش دما و استفاده از اساس دانه‌ای را در افزایش مقدار ضریب شدت تنش نشان می‌دهد.

- در حالت دمای کم و اساس سیمانی، در ضخامت آسفالتی کم و متوسط، مقدار مود اول ضریب شدت تنش (K_I) افزایش می‌یابد. ولی در ضخامت آسفالتی زیاد، رفتاری متفاوت مشاهده شده و این مقدار کاهش می‌یابد.

- در حالتی که دما کم بوده و اساس استفاده شده سیمانی می‌باشد لایه‌ی آسفالتی با ضخامت زیاد مقدار ضرایب شدت تنش کمتری را در مود اول نسبت به دو ضخامت کم و متوسط نشان می‌دهد.

- در حالتی که دما متوسط بوده و اساس استفاده شده سیمانی می‌باشد لایه‌ی آسفالتی با ضخامت کم مقدار

۷. مراجع

کریمی ایبانه، پ. سال ۱۳۹۲. "تحلیل ترک‌های بوجود آمده در روسازی تحت اثر بارگذاری وسایل نقلیه". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده تحصیلات تکمیلی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب.

- Kim, H. and Buttlar, W. G. 2009. "Finite element cohesive fracture modeling of airport pavements at low temperatures". Cold Reg. Sci. Technol. 57: 123-130.
- Labuz, J. F. and Dai, S. 1994. "Cracking of Asphalt Concrete at Low Temperatures". Research Report, Center for Transportation Studies, University of Minnesota.
- Kim, K. W., Doh, Y. S. and Lim, S. 1999. "Mode 1 reflection cracking resistance of strengthened asphalt concretes". Constr. Build. Mater. 13(5): 243-251.
- Li, X. J. and Marasteanu, M. O. 2010. "Using semi circular bending test to evaluate low temperature fracture resistance for asphalt concrete". Exp. Mech. 50: 867-876.
- Lugmayr, R., Jamek, M. and Tschegg, E. K. 2009. "Mechanism of fatigue crack growth and fracture behavior in bituminous roads". Adv. Test Charact. Bituminous Mater. II: 807-816.
- Mohammad, L. N. and Alshams, L. B. 2005. "Fracture resistance characterization of superpave mixtures using the semi-circular bending test". J. ASTM Intl. 2(3): 135-149.
- Muskhelishvili, N. J. "Some Basic Problems of the Mathematical Theory of Elasticity".
- Sadrnejad, S. A., Ghanizadeh, A. R. and Fakhri, M. 2011. "Evaluation of three constitutive models to characterize granular base for pavement analysis using finite element method". Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 5(7): 778-786.
- Westengaard, H. M. 1939. "Bearing pressure and cracks". J. Appl. Mech. 6(2): 49-53
- Williams, M. L. 1957. "On the stress distribution at the base of a stationary crack". J. Appl. Mech. 24: 109-114.