

بررسی تاثیر مشخصات هندسی و مکانیکی لایه‌ها بر سرعت شکست روکش آسفالتی

حسن زیاری (نویسنده مسئول)، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

برات مجردی، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

محمد رضا محمد علیها، دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

مجید جبالبارزی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

E-mail: h.ziari@iust.ac.ir

پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۰۷

دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۰۶

چکیده

مهم‌ترین خرابی روکش‌های آسفالتی، ترک انعکاسی است به طوری که هر ساله هزینه‌های هنگفتی صرف تعمیر و نگهداری روسازی‌ها در اثر وقوع این نوع ترک شود. مهم‌ترین عامل ایجاد ترک‌های انعکاسی، بارگذاری موده‌های کششی-برشی ناشی از عبور وسایل نقلیه است. در این نوشتار، یک رویه آسفالتی چند لایه که دارای یک ترک انعکاسی است، به صورت عددی مورد تحلیل قرار گرفته و عمر خستگی، مسیر رشد ترک و ضریب شدت تنش مؤثر آن تعیین می‌شوند. تأثیر مدول الاستیسیته روکش، ضخامت روکش، مدول الاستیسیته آسفالت اولیه و ضخامت آسفالت اولیه مورد برر سی قرار گرفته است. برر سی مقادیر عمر خستگی رو سازی به ازای مقادیر مختلف ضخامت روکش نشان می‌دهد با افزایش ضخامت از یک مقدار مشخص، عمر خستگی رو سازی به صورت ناگهانی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش مدول الاستیسیته آسفالت اولیه، سرعت گسترش ترک انعکاسی در مراحل اولیه افزایش می‌یابد ولی با افزایش طول ترک انعکاسی، سرعت رشد ترک کاهش می‌یابد. بعلاوه نشان داده شد که مدول الاستیسیته روکش آسفالتی، بیشترین تاثیر را بر عمر خستگی روسازی دارد.

واژه‌های کلیدی: ترک انعکاسی، روکش آسفالتی، ضرایب شدت تنش، سرعت شکست

۱. مقدمه

منظور از رابطه (۱) که به نام قانون پاریس معروف است می‌توان استفاده کرد [Paris, Erdogan, 1963]:

$$\frac{da}{dN} = A[\Delta K(a)]^n \quad (1)$$

که a طول ترک، N تعداد سیکل‌های بارگذاری، و ΔK برابر با تغییرات ضرایب شدت تنش مؤثر نوک ترک برای تعداد سیکل‌ها و A و n ثابت‌های ماده هستند.

در گذشته تحقیقات زیادی به منظور تعیین عمر خستگی و ضرایب شدت تنش روسازی‌های آسفالتی با استفاده از روش‌های عددی و نرم‌افزارهای اجزا محدود صورت گرفته که در زیر به تعدادی از آن‌ها اشاره می‌شود. عامری و همکارانش با استفاده از روش المان محدود و آنالیز سه‌بعدی یک ترک عرضی بالا-پایین، تأثیرپذیری ترک از هر یک از محورهای سه گانه از ترافیک را مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند که مود غالب در رشد ترک تابعی از موقعیت قرارگیری و سیله نقلیه نسبت به محل ترک در روسازی است [Ameri et al. 2011]. لو و همکارانش یک لایه روسازی دارای ترک بالا-پایین را با استفاده از المان‌های گالرکین مدل کردند و نشان دادند که با افزایش ضخامت لایه‌های رویه و اساس سرعت رشد ترک کاهش می‌یابد [Luo et al. 2010]. فخری و همکارانش یک روسازی ترک‌خورده را به صورت دوبعدی مدل‌سازی کردند. آن‌ها تأثیر موقعیت ماشین نسبت به ترک بالا-پایین را بر ضرایب شدت تنش مورد بررسی قرار دادند [Fakhri, Farokhi and Kheiry, 2009]. یانگ و همکارانش تأثیر سرعت بر ضرایب شدت تنش دینامیکی ترک انعکاسی را مورد بررسی قرار دادند [Yang et al., 2011]. ژاو و همکارانش ضرایب شدت تنش را برای یک روسازی آسفالتی دارای ترک انعکاسی و تحت بارگذاری دینامیکی و سایل نقلیه به فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال دوازدهم / شماره سوم (۴۸) / بهار ۱۴۰۰

استفاده از روش‌های آسفالتی یکی از اقتصادی‌ترین روش‌های روسازی روسازی‌های معیوب و ترک‌خورده است. اما ترک موجود در آسفالت اولیه، معمولاً در اثر عبور وسایل نقلیه و تغییرات درجه حرارت هوا، در روش آسفالتی رشد می‌نماید. این نوع ترک که در روسازی‌های آسفالتی بسیار شایع است، به عنوان ترک انعکاسی شناخته می‌شود. با ظهور و گسترش این ترک‌ها، ظرفیت روسازی کاهش یافته و لایه‌های زیرین روسازی در معرض رطوبت قرار می‌گیرند.

آگاهی از فرایند رشد ترک و عمر خستگی رویه‌های آسفالتی به محققان و مهندسان در تعیین زمان به‌سازی و نو سازی راه کمک می‌نماید، چراکه بعد از سپری شدن عمر خستگی راه، روسازی باید به کلی حذف و روسازی جدید جایگزین شود. عمر خستگی روسازی‌های آسفالتی به خصوصیات هندسی و مکانیکی لایه‌های روسازی و همچنین شرایط بارگذاری وابسته است [Ling et al. 2018, Solaimanian, Chehab and Medeiros 2016] و تعیین آن در آزمایشگاه همراه با صرف هزینه و وقت زیادی است.

در مناطق سردسیر که آسفالت به صورت الاستیک و شکننده رفتار می‌کند، احتمال ایجاد و گسترش ترک بیشتر می‌شود، در چنین شرایطی می‌توان از اصول مکانیک شکست الاستیک خطی به منظور توصیف رفتار رشد ترک در روسازی استفاده نمود [et Aliha et al. 2015; Ameri et al. 2016]. مهم‌ترین پارامتر مورد استفاده در مکانیک شکست الاستیک خطی، ضرایب شدت تنش می‌باشند. با این ضرایب می‌توان مقدار تنش، کرنش نوک ترک [Williams, 1957] و نرخ رشد ترک را تعیین کرد. بدین

مدلسازی عددی و معیارهای شکست، مسیر شکست تخمین زده می‌شود. سپس، با بکارگیری قانون پاريس، عمر خستگی روسازی محاسبه می‌گردد.

۲. مدل‌سازی

یک روسازی آسفالتی مرمت‌شده معمولاً از ۵ لایه به نام‌های (روکش، رویه اولیه، اساس، زیراساس و بستر) تشکیل شده است. هرچند انواع مختلفی از ترک‌ها ممکن است در روسازی به وجود آیند، هدف این تحقیق بررسی مشخصات مکانیکی و هندسی لایه‌ها بر عمر خستگی روسازی آسفالتی دارای ترک انعکاسی است، ترک انعکاسی از شکاف موجود در لایه آسفالت اولیه (به ضخامت ۶ میلی‌متر) شروع و گسترش می‌یابد. شکل ۱ نمای شماتیکی از لایه‌های مختلف روسازی به همراه ترک انعکاسی را نشان می‌دهد. طول اولیه ترک برابر با ۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شده که رفته‌رفته با عبور وسایل نقلیه، به سمت بالا رشد می‌کند. برای تعیین مقادیر ضرایب شدت تنش در اثر تغییرات طول ترک و مشخصات مکانیکی و هندسی لایه‌ها، از نرم‌افزار المان محدود اباکوس (ABAQUS 6.14) استفاده شد. در مدل‌سازی ۵۰ متر از طول جاده و ۵ متر از بستر روسازی در نظر گرفته شده است. جهت تحلیل المان محدود از ۱۱۳۰۰۰۰ المان

CPE8R استفاده شد. اندازه مش به اندازه ای کوچک در نظر گرفته شد که بر مقدار نتایج تاثیری نداشته باشد. همچنین برای مدل‌سازی شرایط تکیکی تنش در اطراف ترک از المان‌های تکیین (که مخصوص مدل‌سازی ترک است) و همچنین از تعداد بسیار بیشتری المان ریز در اطراف نوک ترک استفاده شد. همچنین از آنجاکه در دمای زیر صفر آسفالت به صورت الاستیک و شکننده رفتار می‌کند [Kim, Wagoner and Buttlar, 2009; Li

دست آوردند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش سرعت وسایل نقلیه و یا ضریب دمپینگ روسازی، مقادیر حداکثر ضرایب شدت تنش کاهش می‌یابد [Zhao, Ni and Zhou, 2011]. اسکارپاس و همکارانش با تحلیل المان محدود روسازی و با استفاده از قانون پاريس، عمر خستگی یک روسازی را در هلند تعیین نمودند [Scarpas et al. 1996]. فخری و فرخی پارامترهای شکست یک ترک پایین-بالا را در سه دمای کم، متوسط و زیاد با استفاده از اجزا محدود تعیین کردند و نشان دادند که ضرایب شدت تنش ترک پایین-بالا در روسازی با اساس دانه‌ای از روسازی با اساس سیمانی بیشتر است [Fakhri and Farokhi, 2015]. علیها و همکارانش، با استفاده از مدل‌های ۲ بعدی المان محدود، تأثیر ضخامت و سختی لایه‌های رویه و اساس، طول ترک و موقعیت خودرو نسبت به ترک را بر ضرایب شدت تنش پایین-بالا بررسی کردند [Aliha and Jebalbarez, 2016]. طاهرخانی و خالقی با مدلسازی سه بعدی روسازی ترک نخورده و ترک خورده (دارای ترک بالا-پایین و پایین-بالا)، تاثیر فشار لاستیک و وزن خودرو را بر مقادیر کرنش و همچنین ضرایب شدت تنش ترک بررسی کردند. آنها نشان دادند که پاسخ‌های روسازی دارای ترک بالا به پایین بحرانی تر از ترک‌های پایین به بالا است [Taherkhani and Khaleghi, 2016]. از آنجا که تخمین سرعت شکست روسازی‌های آسفالتی در آزمایشگاه وقت‌گیر و هزینه‌بر است، این پدیده کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. (تحقیقات زیادی بر روی رفتار رشد ترک در مخلوط‌های آسفالتی انجام گرفته است، اما بررسی رفتار ترک‌خوردگی روسازی آسفالتی کمتر مورد توجه قرار گرفته است). در این راستا، هدف این مقاله بررسی تاثیر مشخصات مکانیکی و هندسی لایه‌ها بر سرعت شکست روسازی و مسیر ترک انعکاسی است. بدین منظور ابتدا با استفاده از فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال دوازدهم / شماره سوم (۴۸) / بهار ۱۴۰۰

در رابطه با K_I و K_{II} به ترتیب ضرایب شدت تنش مود I و II بارگذاری و θ_0 زاویه رشد ترک می باشد.

در ادامه ترک به اندازه ۵ میلی متر در امتداد تعیین شده گسترش داده می شود و مرحله بالا مجدداً تکرار می شود. این فرایند تا زمانی که ترک به طول نهایی (طول نهایی ترک، ۲ سانتی متر کمتر از ضخامت روکش در نظر گرفته شد) خود برسد، ادامه پیدا می کند.

۳. تعیین عمر خستگی

پاریس و اردوگان نشان دادند که نرخ رشد ترک خستگی را می توان طبق رابطه زیر به دست آورد [Huang, Shu and, Zuo, 2013]

$$\frac{da}{dN} = A[\Delta K(a)]^n \quad (3)$$

که a طول ترک، N تعداد سیکل های بارگذاری، و ΔK برابر با تغییرات ضرایب شدت تنش مؤثر نوک ترک برای تعداد سیکل ها، n ، A ثابت های ماده هستند. ضریب شدت تنش مؤثر، ترکیبی از ضرایب شدت تنش مود I و II و به صورت زیر تعریف شده است .

$$K = \sqrt{K_I + K_{II}} \quad (4)$$

با انتگرال گیری از قانون پاریس، عمر خستگی را می توان به شکل زیر به دست آورد.

$$N_f = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{A[\Delta K(a)]^n} \quad (5)$$

که a_i طول ترک اولیه، a_f طول نهایی ترک و N_f تعداد سیکل های بارگذاری می باشند.

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال دوازدهم / شماره سوم (۴۸) / بهار ۱۴۰۰

[and Marasteanu, 2010] در این تحقیق لایه های روسازی به صورت همگن و الاستیک در نظر گرفته شده اند، جدول ۱ مشخصات هندسی و مکانیکی لایه های روسازی را نشان می دهد. به منظور اعمال شرایط مرزی، تمام گره های واقع در قسمت زیرین لایه ی زیراساس در تمامی جهات و همچنین گره های واقع در وجوه جانبی مدل در جهت عمود بر مقطع مقید شده اند. شکل ۲ شرایط مرزی و یک تصویر بزرگنمایی شده از المان های اطراف نوک ترک را نشان می دهند.

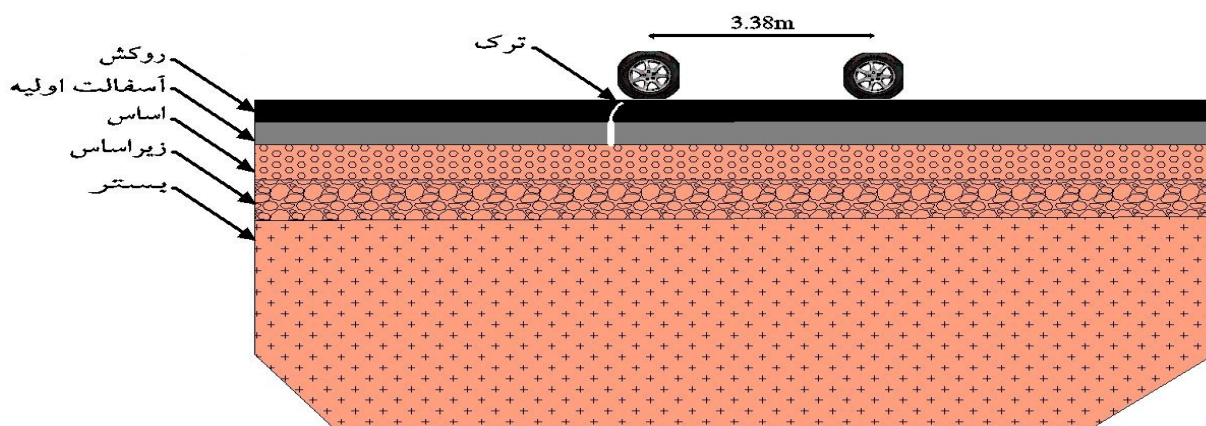
برخلاف بسیاری از تحقیقات که تنها یک چرخ و سیله نقلیه را در نظر می گیرند، در اینجا هر دو چرخ جلو و عقب و سیله نقلیه مدل سازی شدند. بدین منظور محورهای جلو و عقب خودرو از

نوع منفرد و وزن هر محور یک تن (وزن خوردوی سواری) در نظر گرفته شد. فاصله چرخ جلو و عقب برابر با ۳/۳۸ متر و طول بارگذاری هر تایر برابر با ۲۶ سانتی متر در نظر گرفته شد و تنش فشاری برابر با ۱۲۳/۸ کیلو پاسکال بر هر سطح اعمال شد. همچنین موقعیت تایرهای و سیله نقلیه بر اساس تحقیق هو و همکاران (بحرانی ترین مکان بارگذاری ترک های انعکاسی، زمانی اتفاق می افتد که تایر و سیله نقلیه دقیقاً قبل از ترک باشد)، چسبیده به ترک در نظر گرفته می شوند [Hu et.al, 2008] (شکل ۱).

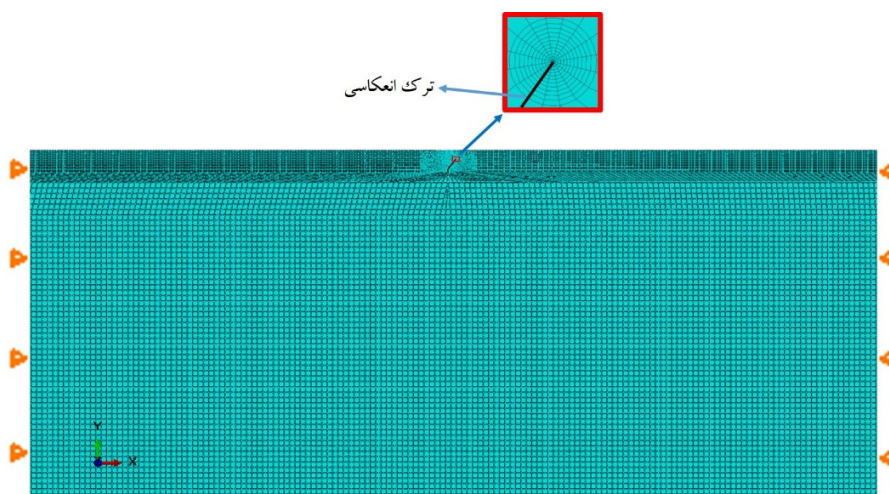
به منظور تعیین عمر خستگی روسازی، طول اولیه ترک برابر با ۲ سانتی متر و ترک به صورت قائم در نظر گرفته شده سپس با استفاده از تحلیل های المان محدود ۲ بعدی (که در بالا توضیح داده شد)، ضرایب شدت تنش تعیین شده و طبق معیار حداکثر تنش کششی [Erdogan and Sih, 1963] و به صورت زیر زاویه رشد ترک تعیین می شود:

$$K_I \sin \theta_0 + K_{II} (3 \cos \theta_0 - 1) = 0 \quad (2)$$

بررسی تاثیر مشخصات هندسی و مکانیکی لایه‌ها بر سرعت شکست روکش آسفالتی



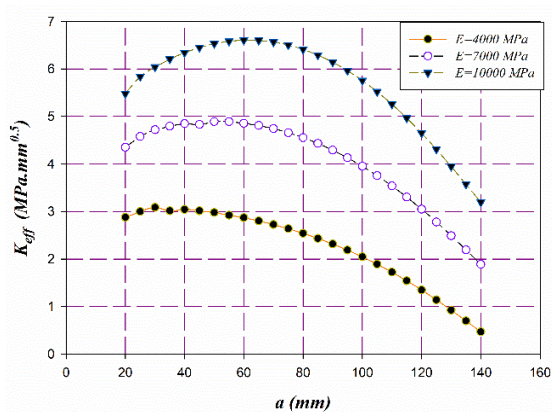
شکل ۱. نمای شماتیکی از لایه‌های مختلف روسازی به همراه بارگذاری ناشی از عبور وسایط نقلیه و یک ترک پایین به بالا



جدول ۱. مشخصات مکانیکی و هندسی لایه‌های مختلف

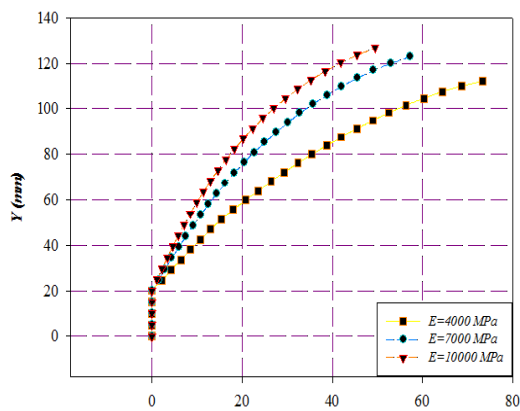
لایه	مدول الاستیسیته (MPa)	ضریب پواسون	ضخامت (cm)
روکش آسفالتی	4000, 7000, 10000	0.35	12, 16, 20
آسفالت اولیه	1000, 2000, 3000	0.35	8, 10, 12
اساس	200	0.35	20
زیراساس	60	0.35	25
بستر	34.5	0.45	200

جدول ۲ نشان داده شده است عمر خستگی رویه، به مقدار قابل توجهی کاهش می یابد. دلیل این امر می تواند افزایش سهم روکش در تحمل بار وارد شده توسط وسیله نقلیه باشد. شکل ۴ مسیر رشد ترک را به ازای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته آسفالت جدید نشان می دهد. در این شکل X, Y مختصات نوک ترک در دستگاه مختصات دکارتی است همان گونه که در این شکل مشاهده می شود، به دلیل بارگذاری ترک تحت مود ترکیبی I/II، مسیر رشد ترک منحنی شکل است. همچنین با توجه به این شکل، با افزایش مدول الاستیسیته آسفالت جدید، مسیر رشد ترک، انحراف بیشتری نسبت با راستای قائم خواهد داشت.



شکل ۳. منحنی تغییرات ضریب شدت تنش مؤثر در برابر طول

ترک به ازای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته روکش



جهت تعیین عمر خستگی روسازی، ابتدا ضرایب شدت تنش برای طول های مختلف ترک با استفاده از نرم افزار المان محدود تعیین می شوند. سپس با استفاده از رابطه (۴)، ضریب شدت تنش مؤثر (k) محاسبه می گردد. در نهایت با به کارگیری رابطه ی (۵) عمر خستگی تخمین زده می شود. شایان ذکر است در این مطالعه، ثابت های A و n آسفالت، مطابق تحقیق هوانگ و همکاران [Huang, Shu and Zuo, 2013] به ترتیب برابر با 2.101×10^{-5} و 6.209 در نظر گرفته شده و ضرایب شدت تنش، با مدل سازی المان محدود با نرم افزار آباکوس به دست آمدند.

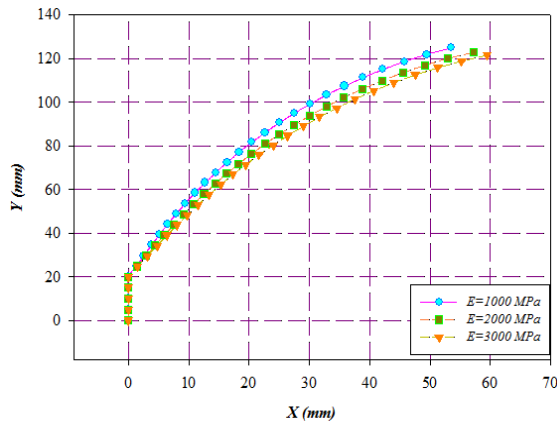
باید بدین نکته توجه داشت که عمر خستگی روسازی در این مطالعه با فرض قرار داشتن وسیله نقلیه در یک مکان مشخص (جایی که حداقل عمر روسازی ایجاد می گردد) محاسبه شده است. همچنین در این مقاله تاثیر پیرشدگی، تغییرات درجه حرارت، خطاهای حین ساخت و... در نظر گرفته نشده است. بنابراین عمر خستگی محاسبه شده، از عمر خستگی روسازی در واقعیت بیشتر است.

۴. نتایج

شکل ۳ نمودار تغییرات ضریب شدت تنش مؤثر را در برابر طول های مختلف ترک برای مدول الاستیسیته های مختلف آسفالت جدید را نشان می دهد. بدین منظور مقدار مدول الاستیسیته آسفالت اولیه، ضخامت آسفالت اولیه و روکش برابر با $t_{(Old)}=10$ cm $t_{(Overlay)}=16$ cm $E_{(Old)}=2000$ MPa در نظر گرفته شد و مدول الاستیسیته روکش از ۴۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ مگاپاسکال تغییر داده شد. در این شکل مشاهده می شود که با افزایش مدول الاستیسیته آسفالت جدید، ضرایب شدت تنش به مقدار قابل توجهی افزایش می یابند و در نتیجه همان طور که در

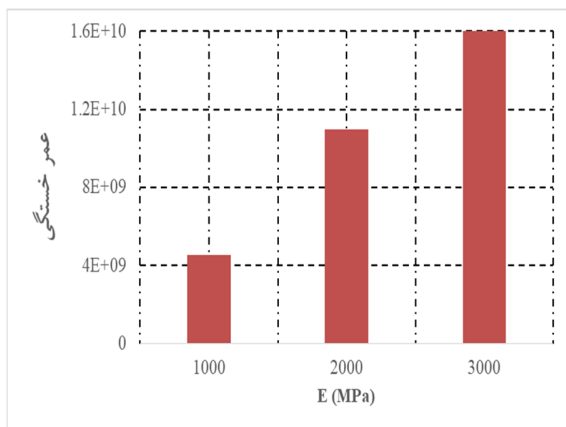
بررسی تاثیر مشخصات هندسی و مکانیکی لایه‌ها بر سرعت شکست روکش آسفالتی

شکل ۶ مسیر رشد ترک را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که مسیر رشد ترک با سخت‌تر شدن آسفالت قدیمی، انحراف بیشتری نسبت به راستای قائم پیدا خواهد کرد. از طرفی با افزایش مدول الاستیسیته لایه آسفالت قدیمی، عمر خستگی روسازی



شکل ۶. منحنی تغییرات مسیر رشد ترک به ازای مقادیر مختلف مدول آسفالت اولیه

افزایش می‌یابد (شکل ۷).

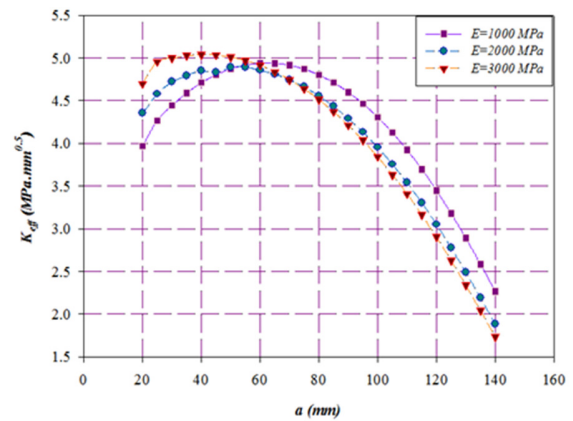


شکل ۷. تغییرات عمر خستگی به ازای مقادیر مختلف مدول آسفالت اولیه

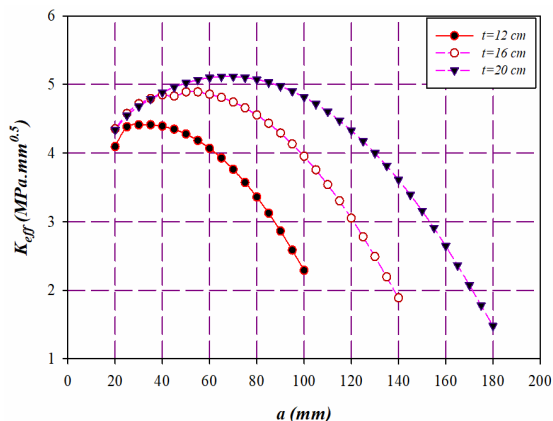
شکل ۴، منحنی تغییرات مسیر رشد ترک به ازای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته روکش جدول ۲. تأثیر مدول الاستیسیته روکش بر عمر خستگی روسازی دارای ترک انعکاسی

مدول الاستیسیته رویه (مگاپاسکال)	4000	7000	10000
عمر خستگی	1.05E+13	1.1E+10	6.4E+8

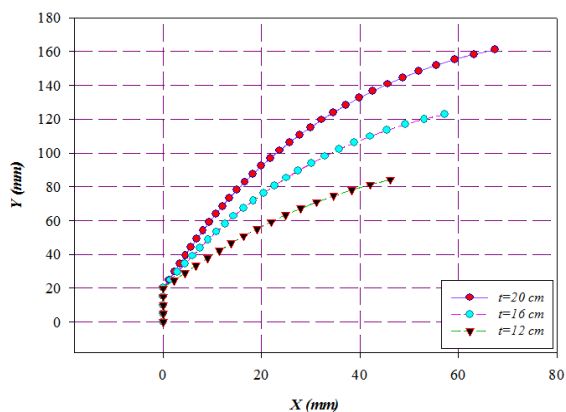
در شکل ۵ نمودار تغییرات ضریب شدت تنش برای مدول لایه آسفالت قدیم، نشان داده شده است، همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود برای ترک‌های کوچک (کمتر از ۵۵ میلی‌متر در این مورد)، با افزایش مدول سختی لایه آسفالت قدیمی، ضریب شدت تنش افزایش می‌یابد، اما با بزرگ‌تر شدن ترک، با افزایش مدول سختی آسفالت قدیمی، ضریب شدت تنش کاهش می‌یابد.



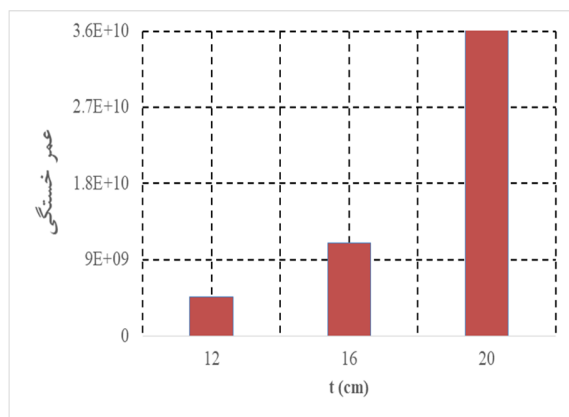
شکل ۸. منحنی تغییرات ضریب شدت تنش موثر در برابر طول ترک به ازای مقادیر مختلف مدول آسفالت اولیه



شکل ۸. منحنی تغییرات ضریب شدت تنش موثر در برابر طول ترک به ازای مقادیر مختلف مدول آسفالت اولیه



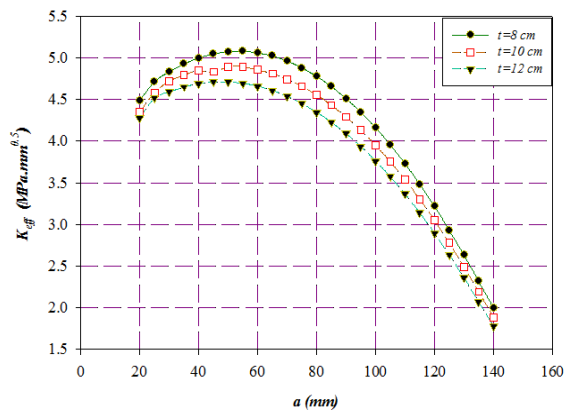
شکل ۹. منحنی تغییرات مسیر رشد ترک به ازای مقادیر مختلف ضخامت روکش



فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال دوازدهم / شماره سوم (۴۸) / بهار ۱۴۰۰

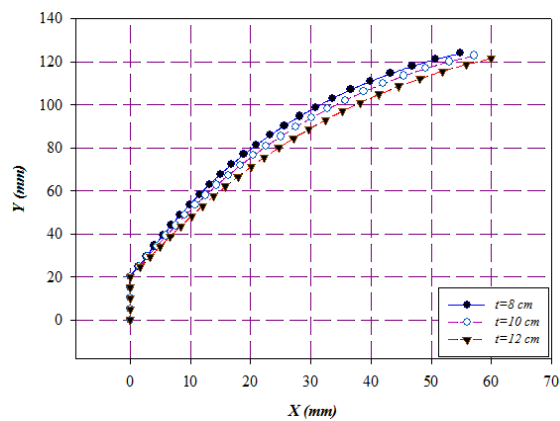
جهت بررسی تأثیر ضخامت روکش بر عمر خستگی، ضرایب شدت و مسیر رشد ترک پایین به بالا، مقادیر مدول الاستیسیته روکش و آسفالت اولیه به ترتیب برابر با ۲۰۰۰ و ۷۰۰۰ مگا پاسکال و ضخامت آسفالت اولیه برابر با ۱۰ سانتی متر در نظر گرفته شدند و ضخامت رویه آسفالتی جدید بین ۱۲ تا ۲۰ سانتی متر تغییر می‌کند. شکل ۸ نمودار تغییرات ضریب شدت تنش را به ازای ضخامت‌های مختلف آسفالت جدید نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که برای طول ترک یکسان، ضرایب شدت تنش روسازی با آسفالت جدید ضخیم‌تر، بیشتر است. و در نتیجه تعداد دفعات بارگذاری در صورتی که طول ترک برابر فرض شود (برای مثال تا ۱۰۰ میلی متر)، روسازی ضخیم‌تر عمر خستگی کمتر و در نتیجه سرعت رشد ترک پایین به بالا (da/dN) در ابتدای عمر روسازی بیشتری خواهد داشت. اما چنانچه عمر خستگی تا طول نهایی ترک (عمر خستگی جهت رشد ترک تا ۲۰ میلی متر کمتر از ضخامت روسازی جدید) محاسبه شود، روسازی های ضخیم‌تر دارای عمر خستگی بیشتری می‌باشند. این امر در شکل ۸ و ۱۰ قابل مشاهده است. همچنین در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، در حالی که با افزایش ضخامت لایه از ۱۲ به ۱۶ عمر خستگی، تغییر فراوانی نمی‌کند، اما با افزایش ضخامت از ۱۶ به ۲۰ سانتی متر، عمر خستگی به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است. شکل ۹، مسیر رشد ترک به ازای مقادیر مختلف ضخامت روکش را نمایش می‌دهد، همان گونه که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت روکش، انحراف ترک از راستای قائم (محور Y) کمتر خواهد شد.

لو و همکارانش نشان نیز دادند که با افزایش ضخامت روسازی از ۱۴ به ۱۶ سانتی متر، عمر خستگی روسازی بصورت ناگهانی افزایش می‌یابد [Luo et al. 2010].



شکل ۱۰. تغییرات عمر خستگی به ازای مقادیر مختلف ضخامت روکش

شکل ۱۱ تغییرات ضریب شدت تنش مؤثر در برابر طول ترک به ازای مقادیر مختلف ضخامت آسفالت اولیه را نشان می‌دهد. بدین منظور ضخامت روکش برابر با ۱۶ سانتی متر و مدول الاستیسیته رویه و اساس به ترتیب برابر با ۷۰۰۰ و ۲۰۰۰ مگا پاسکال در نظر گرفته شدند. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، به ازای طول مشخص ترک، با افزایش ضخامت لایه آسفالت اولیه، ضرایب شدت تنش کاهش می‌یابد. این امر می‌تواند به این دلیل باشد که با افزایش ضخامت لایه آسفالت قدیمی لایه آسفالت جدید بار کمتری را تحمل کرده و دچار تغییر شکل کمتری می‌شود.



شکل ۱۱. منحنی تغییرات ضریب شدت تنش مؤثر در برابر طول ترک به ازای مقادیر مختلف ضخامت آسفالت اولیه

شکل ۱۲ منحنی تغییرات مسیر رشد ترک به ازای مقادیر مختلف ضخامت آسفالت اولیه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود با توجه به کاهش ضرایب شدت تنش با افزایش ضخامت لایه آسفالت قدیم، عمر خستگی روسازی افزایش می‌یابد. همچنین شکل ۱۲ نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت آسفالت قدیم، مسیر رشد ترک، نسبت به راستای قائم، انحراف بیشتری خواهد داشت.

شکل ۱۲. منحنی تغییرات مسیر رشد ترک به ازای مقادیر مختلف ضخامت آسفالت اولیه

ترک دارد، به گونه ای که با افزایش ضخامت روکش، زاویه انحراف ترک نسبت به راستای قائم کاهش می یابد.

۶. مراجع

-Aliha, M. R. M., Fazaeli, H., Aghajani, S. and Nejad, F. M. (2015) "Effect of temperature and air void on mixed mode fracture toughness of modified asphalt mixtures", Construction and Building Materials, Vol. 95, pp. 545-555.

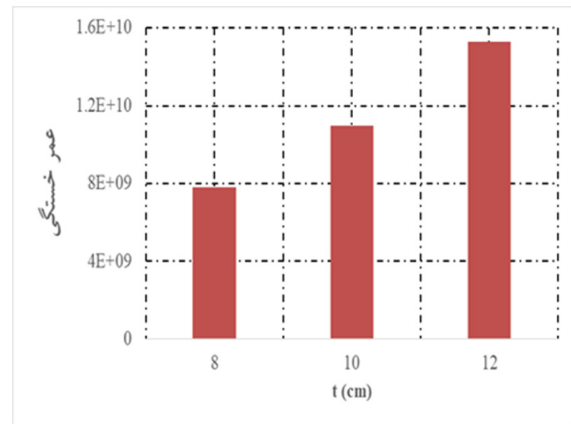
-Ameri, M., Mansourian, A., Khavas, M. H., Aliha, M. R. M. and Ayatollahi, M. R. (2011) "Cracked asphalt pavement under traffic loading-A 3D finite element analysis", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 78, No.8, pp.1817-1826.

-Ameri, M., Nowbakht, S., Molayem, M. and Aliha, M. R. M. (2016) "Investigation of fatigue and fracture properties of asphalt mixtures modified with carbon nanotubes", Fatigue & Fracture of Engineering Materials & structures, Vol. 39 No.7, pp. 896-906.

-Erdogan, F. and Sih, G. C. (1963) "On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear", Journal of basic engineering, Vol.85, No.4, pp.519-527.

-Fakhri, M., Farokhi, M. and Kheiry, P. T. (2009) "Modeling of top-down cracking (TDC) propagation in asphalt concrete pavements using fracture mechanics theory", Adv Test Charact Bituminous Mater II, pp. 681-692. (Book article)

-Huang, B., Shu, X. and Zuo, G. (2013) "Using notched semi-circular bending fatigue test to characterize fracture resistance of



شکل ۱۳. تغییرات عمر خستگی به ازای مقادیر مختلف ضخامت آسفالت اولیه

۵. نتایج

۱- عمر خستگی روسازی دارای ترک انعکاسی برحسب مقادیر مختلف مدول الاستیسیته و ضخامت لایه های روکش و آسفالت اولیه، با تحلیل اجزا محدود به دست آمده است.

۲- با افزایش مدول الاستیسیته رویه، عمر خستگی کاهش می یابد.

۳- با افزایش مدول الاستیسیته آسفالت اولیه، سرعت رشد ترک انعکاسی در ابتدا افزایش می یابد ولی با افزایش طول ترک، شاهد کاهش سرعت رشد ترک و در نتیجه افزایش عمر خستگی روسازی خواهیم بود.

۴- با افزایش ضخامت روکش، عمر خستگی روسازی افزایش می یابد، به گونه ای که با افزایش ضخامت از یک مقدار مشخص، عمر خستگی روسازی به صورت ناگهانی افزایش می یابد.

۵- در میان مشخصات مکانیکی و هندسی لایه ها، ضخامت روکش بیشترین تاثیر را بر مسیر رشد

In The Roles of Accelerated Pavement Testing in Pavement Sustainability, Cham: 16 September 2016.

-Williams, M. L. (1957) "On the stress distribution at the base of a stationary crack. I. appl. Corpus ID: 5624103

-Yang, B., Huang, Q. S., Xiong, B. and Xu, H. (2011) "Analysis on the Effect of Parameters Variation on Dynamic Stress Intensity Factor of Asphalt Overlay Reflective Crack", Applied Mechanics and Materials Vol. 52, pp. 1092-1096. Trans Tech Publications.

-Zhao, Y., Ni, F. and Zhou, L. (2011) "Viscoelastic response of reflective cracking under dynamic vehicle loading in asphalt concrete pavements", In ICCTP 2011: Towards Sustainable Transportation Systems, pp. 3278-3297.

- طاهرخانی، حسن و خالقی، حسین (۱۳۹۵) "بررسی تاثیر فشار باد لاستیک و وزن محور بر روی پاسخ روسازی ترک خورده با استفاده از روش اجزا محدود"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل سال ۸، شماره اول، پاییز ۹۵، ص ۱۹۴-۱۷۵

- فخری، منصور و کریمی ابیانه، پیمان (۱۳۹۴) "بررسی نحوه گسترش ترک های خستگی در روسازی آسفالتی در اثر تغییر دما، با استفاده از فرضیه مکانیک شکست" مهندسی زیرساخت های حمل و نقل، سال اول، شماره دوم، ص ۶۲-۵۵

- محمدعلیها، محمد رضا، بهبهانی، حمید و جبالبارزی مجید، (۱۳۹۵) "بررسی عددی پارامترهای شکست ترک انعکاسی در روسازی آسفالتی تحت بار ترافیکی" مهندسی عمران شریف، دوره ۲-۳۲، شماره ۱/۱، ص ۱۳۰-۱۲۳

asphalt mixtures", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 109, pp.78-88.

-Hu, S., Hu, X., Zhou, F. and Walubita, L. (2008) "SA-CrackPro: New finite element analysis tool for pavement crack propagation", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol.2068, pp. 10-19.

-Kim, H., Wagoner, M. P. and Buttlar, W. G. (2009) "Numerical fracture analysis on the specimen size dependency of asphalt concrete using a cohesive softening model", Construction and Building Materials, Vol.23, No.5, pp.2112-2120.

-Li, X. and Marasteanu, M. (2010) "The fracture process zone in asphalt mixture at low temperature", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 77, No.7, pp.1175-1190.

Ling, J., Tao, Z., Qian, J. and Fu, W. (2018) "Investigation the influences of geotextile on reducing the thermal reflective cracking using XFEM", International Journal of Pavement Engineering, Vol.19, No.5, pp.391-398.

-Luo, H., Zhu, H. P., Miao, Y. and Chen, C. Y. (2010) "Simulation of top-down crack propagation in asphalt pavements", Journal of Zhejiang University-Science A, Vol.11, No.3, pp. 223-230.

- Paris, P. and Erdogan, F. (1963) "A critical analysis of crack propagation laws", Journal of Basic Engineering, Vol. 85, No.4, pp.528-533.

-Scarpas, A., De Bondt, A. H., Molenaar, A. A. and Gaarkeuken, G. (1996, September) "Finite elements modelling of cracking in pavements", In RILEM proceedings, pp. 82-91. Chapman & Hall.

Solaimanian, M., Chehab, G. and Medeiros, M. (2016) "Evaluating resistance of hot mix asphalt overlays to reflective cracking using geocomposites and accelerated loading.

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال دوازدهم / شماره سوم (۴۸) / بهار ۱۴۰۰

حسن زیاری، درجه کارشناسی و کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران را در سال‌های ۱۳۶۵ و ۱۳۶۷ از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. در سال ۱۳۷۹ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی عمران-راه و ترابری از دانشگاه علم و صنعت ایران گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مدیریت نگهداری روسازی، طراحی روسازی، تکنولوژی قیر و آسفالت بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استاد در دانشگاه علم و صنعت ایران است.



محمد رضا محمد علیها، درجه کارشناسی در رشته مهندسی مکانیک را در سال ۱۳۸۰ از دانشگاه علم و صنعت ایران و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک- هوا فضا در سال ۱۳۸۲ را از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. در سال ۱۳۸۸ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی مکانیک- طراحی کاربردی از دانشگاه علم و صنعت ایران گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مکانیک شکست، ارزیابی مقاومت ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی و مدلسازی رویه‌های آسفالتی بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه دانشیار در دانشگاه علم و صنعت ایران است.



بررسی تاثیر مشخصات هندسی و مکانیکی لایه‌ها بر سرعت شکست روکش آسفالتی

برات مجردی، درجه کارشناسی در رشته عمران-نقشه برداری را در سال ۱۳۷۷ از دانشگاه تبریز و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی نقشه برداری - سنجش از دور در سال ۱۳۷۹ را از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی اخذ نمود. در سال ۱۳۸۸ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی نقشه برداری-سنجش از دور از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان توسعه الگوریتم‌های پردازش تصویر برای داده‌های نوری چند طیفی و ابرطیفی، توسعه مدل‌های سطح زمین بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه علم و صنعت ایران است.



مجید جبالبارزی، درجه کارشناسی در رشته عمران را در سال ۱۳۹۰ از دانشگاه شهید باهنر کرمان و درجه کارشناسی ارشد در رشته عمران-راه و ترابری در سال ۱۳۹۲ را از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. و در حال حاضر دانشجوی دکتری مهندسی عمران-راه و ترابری در دانشگاه علم و صنعت ایران است. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مدلسازی عددی روسازی راه و بررسی رفتار ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی است.

