

# بررسی نحوه‌ی گسترش ترک‌های بالا به پایین<sup>۱</sup> (TDC) در روسازی‌های آسفالتی، با استفاده از فرضیه‌ی مکانیک شکست

منصور فخری<sup>۱</sup>، مهدی فرخی<sup>۲\*</sup>

۱- استادیار دانشکده‌ی عمران دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

۲- دانشجوی دوره‌ی دکتری راه و ترابری، دانشگاه تربیت مدرس

fakhri@kntu.ac.ir

(دریافت مقاله: خرداد ۱۳۸۵، دریافت پذیرش: مهر ۱۳۸۶)

**چکیده**- خستگی عبارت است از پدیده‌ی شکست بر اثر تکرار بار، که تنش ایجاد شده توسط این بار ممکن است حتی به مراتب کوچک‌تر از مقاومت نهایی مصالح باشد. ترک‌های ناشی از خستگی، در مقاطع آسفالتی، با توجه به مکان پیدایش و نحوه‌ی گسترش آنها دو دسته است. دسته‌ی اول ترک‌هایی است 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. دسته دوم که در روسازی‌های ضخیم امکان پیدایش بیش‌تری دارند، از سطح روسازی، شروع شده و به سمت پایین گسترش می‌یابند. این دسته از ترک‌ها، نسبت به دسته‌ی اول تاکنون کم‌تر مورد توجه و مطالعه قرار گرفته‌اند. یکی از روش‌های متداول تحلیل و بررسی ترک‌های ناشی از خستگی، روش مکانیک شکست است که در آن، گسیختگی حاصل از خستگی آسفالت، از آغاز ترک و پیشروی آن در ضخامت آسفالت، به تعداد دفعات بارگذاری ارتباط داده می‌شود. در این پژوهش، برای شناخت بهتر و درک بیش‌تر نحوه‌ی گسترش ترک‌های روبه پایین و پارامترهای مؤثر در آن، از روش مکانیک شکست استفاده شده و پدیده‌ی ترک و نحوه پیشروی آن در روسازی، تحلیل نظری می‌شود و نمودارهایی که نشانگر طول ترک بر حسب تعداد دفعات تکرار بار است برای حالات مختلف مشخصات مصالح و بارگذاری، استخراج شده است. نتایج نشان داد که با افزایش فاصله‌ی بار از محل ابتدایی ترک ایجاد شده، مقادیر ضریب شدت تنش در مد I و مد II افزایش می‌یابد. همچنین افزایش شیب سختی بتن آسفالتی ناشی از اختلاف دمایی سطح پایینی و بالایی و یا افزایش اختلاف سختی لایه‌ی بتن آسفالتی و لایه‌ی اساس، باعث افزایش ضریب شدت تنش می‌شود.

**کلید واژگان:** روسازی، آسفالت، ترک‌های Top Down، رشد ترک، مکانیک شکست

**۱- مقدمه**

استفاده نکردن از روسازی‌های مناسب، باعث پیدایش شکست‌های برشی، تغییر شکل‌های بیش از اندازه، و در نتیجه ناهمواری سطحی در روسازی می‌شود. برای جلوگیری از این مشکلات، لازم است تنش‌های ناشی از بار متمرکز زیر چرخ‌های وسایل نقلیه، با قرار دادن لایه‌هایی از مصالح مرغوب با مقاومت زیاد، تا رسیدن به حد تحمل خاک بستر روسازی، کاسته شود. جنس این لایه‌ها باید طوری باشد که اولاً انتقال بار و کاهش تنش و ثانیاً تحمل تنش‌ها در خود لایه را تأمین کند. شدت تنش‌های فشاری قائم که در اثر بارگذاری در یک توده‌ی خاک بوجود می‌آید، در نقاط مختلف متفاوت است.

در اثر بارگذاری روسازی، لایه‌ها تغییر شکل داده و در آن‌ها تنش‌های کششی و فشاری به‌وجود می‌آید. هر گاه شدت تنش‌های ایجاد شده در یک لایه‌ی روسازی، از میزان استقامت مصالح آن لایه بیش‌ترشود، سبب شکست و ترک‌خوردگی آن لایه می‌شود. بنابراین جنس و ضخامت لایه‌های روسازی که از مصالح قیری و یا سیمانی ساخته می‌شود باید طوری انتخاب شوند که در برابر تنش‌های بوجود آمده در آن‌ها مقاومت کنند [۱].

**۲- عوامل پیدایش ترک‌های سطحی**

تحقیقات نشان می‌دهد که ترک‌های متعدد طولی در سطح روسازی وجود دارد که عمق آن‌ها کم‌تر از ضخامت لایه‌ی آسفالتی است و می‌تواند مؤید این واقعیت باشد که ترک‌ها می‌توانند از سطح آغاز شوند [۲]. ترک‌های سطحی به صورت خیلی آشکار، به موازات مسیر چرخ‌ها در روسازی بتن آسفالتی ایجاد می‌شود و محل آن‌ها معمولاً خارج از مسیر چرخ و به موازات لبه‌ی آن است.

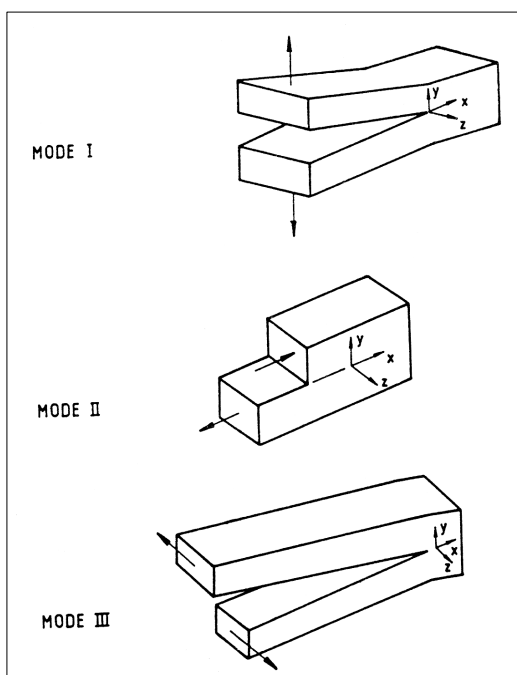
بازدید از نمونه‌ای مغزه‌ای گرفته شده، نشان می‌دهد که بر خلاف ترک‌های خستگی که از کف لایه‌ی آسفالت شروع می‌شود، این ترک‌ها به ندرت به انتهای لایه‌ی آسفالت می‌رسند. در گروه تحقیقاتی راه مینسوتا Mn/Road مشاهده شده است که ترک‌های طولی عمود بر لبه ترک‌های عرضی روسازی و در مسیر چرخ‌ها تشکیل می‌شود و گسترش پیدا می‌کند تا ترک‌ها ناگهان به هم می‌رسند و به صورت یک سلول کامل ترک در می‌آیند [۳]. برای بررسی این نوع ترک‌ها، مطالعات جامع و کاملی انجام شده است و محققان نتیجه گرفته‌اند که روش‌های موجود که برای آنالیز روسازی وجود دارد، نمی‌تواند ترک‌های سطحی را توجیه کند [۳] بنابراین فرضیات مختلفی برای تشریح آن مطرح شده است. یکی از فرضیاتی که بسیار موردانتظار است این است که ممکن است پیدایش این ترک‌ها به‌واسطه بار چرخ وسایل نقلیه‌ی عبوری باشد. ابزار تحلیل موجود برای طرح روسازی، و بررسی عملکرد آن بر این اساس استوار است که توزیع تنش‌ها بین چرخ و روسازی، یکنواخت است. تحقیقات اخیر روی تنش‌های نزدیک به سطح بارگذاری، نشان می‌دهد که چرخ‌های کامیون‌ها می‌تواند نیروهای مماسی قابل ملاحظه‌ای در سطح روسازی ایجاد کند [۳]. بررسی بزرگی این نیروها نشان می‌دهد که این نیروها عامل مهمی در پیدایش تنش‌های برشی، کشش سطحی است و گسستگی‌های موضعی را نزدیک سطح روسازی ایجاد می‌کنند که منجر به رشد ترک‌های بالابه پایین (TDC) می‌شود [۳].

جدا می‌شوند و به شکل قراردادی با I نشان داده می‌شود، نوع (II) روش سُر خوردن یا برش در صفحه که در آن سطوح ترک روی یک‌دیگر در راستای عمود بر لبه‌ی جلویی ترک، سُر می‌خورند و (III) روش پارگی یا برش خلاف صفحه‌ای که در آن سطوح ترک نسبت به یک-دیگر به شکل موازی با لبه‌ی جلویی ترک حرکت می‌کنند، است. برهم‌گذاری این سه روش برای توصیف بیش‌تر حالات عمومی و کلی تغییر سطح ترک، کافی است [۶].



شکل ۱ ترک‌خوردگی از بالا به پایین در یک نمونه‌ی

آسفالت [۴]



شکل ۲ روش‌های اصلی بارگذاری و جابه‌جایی‌های

مربوطه‌ی سطوح ترک [۶]

#### ۴- ساز و کار ترک‌ها در روسازی

باتوجه به تحقیقاتی که تاکنون بر روی روسازی‌های مختلف با دیدگاه مکانیک شکست انجام شده است، سه سازوکار مختلف برای انواع ترک‌هایی که در روسازی‌ها به وجود می‌آیند، م تصور شده‌اند.

یکی دیگر از عوامل مهم مربوط به TDC پدیده‌ی جدا شدگی<sup>۱</sup> است [۲].

از مطالب ذکر شده می‌توان عوامل مؤثر بر پیدایش TDC را به چهار دسته طبقه‌بندی کرد؛ اندرکنش سه بعدی چرخ و روسازی، نیروی اصطکاک، تغییرات درجه-ی حرارت و جداشدگی.

#### ۳- انواع تغییر شکل نوک ترک

اختلاف بین یک قطعه ترک دار با قطعه‌ی دیگر، در میزان پارامتر میدان تنش  $K$  است، که ضریب شدت تنش نامیده می‌شود. اصولاً  $K$  به‌عنوان ضریب درجه‌بندی به کار می‌رود که میزان شدت تنش رأس ترک را تعریف می‌کند [۵].

$K_I$ ،  $K_{II}$  و  $K_{III}$  ضرایب شدت تنش<sup>۲</sup> است که مربوط به سه نوع پایه‌ی تغییر مکان سطح ترک است. این سه نوع، در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. نوع (I) نوع کششی یا باز شدن، که در آن سطوح ترک به طور مستقیم از هم

1. Segregation  
2. Stress intensity factors

می‌شوند که این پارامترها در مورد آسفالت به درصد قیر، درصد فضای خالی مخلوط، درصد فیلر، نوع قیر، درجه ی حرارت آزمایش و... وابسته است. عموماً برای به‌دست آوردن مقادیر عددی  $A$  و  $n$  گسترش ترک در یک تیر آسفالتی تحت بارگذاری و باربرداری، بررسی می‌شود. اما روابط ساده‌ای نیز برای پرهیز از آزمایشات وقت‌گیر و پرهزینه توسط محققین ارائه شده است [6].

$$n = \frac{2}{m}$$

$$n = 1,558 - 0,401 \log A$$

در این روابط که توسط Lytton پیشنهاد شده،  $m$  برابر با شیب منحنی لگاریتم مدول الاستیسیته، در مقابل لگاریتم زمان بارگذاری است. با انتگرال‌گیری از رابطه ی (1)، تعداد دفعات بارگذاری که باعث افزایش طول ترک از  $C_0$  به  $C_1$  می‌شود، به‌دست می‌آید.

$$N = \int_{C_0}^{C_1} \frac{dc}{A(k_{(c)})^n} \quad (2)$$

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، محاسبه ی انتگرال بالا بستگی به به‌دست آوردن تابع فاکتور تشدید تنش بر حسب طول ترک دارد. روش‌های گوناگونی برای محاسبه ی  $K$  وجود دارد که از میان آنها، نتایج به‌دست آمده از روش اجزاء محدود، دقیق‌تر از سایر روش‌ها است. به همین خاطر در این پژوهش از این روش برای محاسبه ی  $K$  استفاده شده است.

حالت اول: در این حالت، ترک در اثر تغییرات درجه ی حرارت، انبساط و انقباض مصالح، ایجاد و سپس در اثر خمش ناشی از بارگذاری و عبور ترافیک، در لایه گسترش می‌یابد.

حالت دوم: در این حالت، ترک در اثر تنش‌های نیروهای برشی حاصل از بارگذاری و عبور ترافیک ایجاد و سپس در لایه گسترش می‌یابد.

حالت سوم: در این حالت، ترک در اثر تنش‌های سطحی افقی بین چرخ و سطح روسازی حاصل از بارگذاری و عبور ترافیک، ایجاد و سپس در لایه گسترش می‌یابد.

با توجه به مطالب بالا چنین استنباط می‌شود که ترک در هر یک از حالات بالا تحت تأثیر طیف خاصی از تنش‌ها و یا کرنش‌ها که در اثر عوامل خارجی در روسازی به‌وجود می‌آید، ایجاد و گسترش یافته و در بین این حالات، ترک‌های ناشی از حالات I و II در روسازی بیش‌تر ملاحظه می‌شوند [7].

## ۵- قوانین گسترش ترک در مصالح

در سال ۱۹۶۳ میلادی، آقایان پاریس و اردوگان پس از انجام آزمایشات متعدد، روی مصالح به این نتیجه رسیدند که سرعت گسترش ترک در سازه را می‌توان برحسب ضریب شدت تنش و خصوصیات فنی مصالح با رابطه ی (1) توصیف کرد [8].

$$\frac{dc}{dN} = AK^n \quad (1)$$

در رابطه ی (1)  $\frac{dc}{dN}$  نسبت افزایش طول ترک در هر سیکل بارگذاری،  $K$  ضریب شدت تنش و  $A$  و  $N$  ثابت‌های مربوط به مصالح هستند که از طریق آزمایش تعیین

## ۶- مدل سازی عددی

### ۶-۱- مقدمه

در این بخش با استفاده از روش اجزاء محدود و نرم افزار ABAQUS یک روسازی ترک خورده که تحت بارگذاری ناشی از چرخ قرار دارد، بررسی می شود. با توجه به این که هدف از این پژوهش بررسی سازوکار ترک در عمق لایه-ی آسفالتی است، مسئله به صورت دوبعدی مدل می شود و در مدل سازی، از المان های دو بعدی چهارگره ای (C2D4)<sup>۱</sup> از خانواده ی Solid استفاده می شود. این المان، یکی از المان های رایج است که در بیش تر مدل سازی ها و تحقیقات از آن استفاده می شود.

شبهه سازی شرایط مرزی و بارگذاری ها با توجه به توصیه های موجود در این زمینه انجام می شود تا بهترین تطابق را با شرایط واقعی داشته باشد.

تمرکز تنش در اطراف ترک ایجاد می کند که از تعداد المان ها و گره های بیش تری در اطراف ترک استفاده شود، بدیهی است که این موضوع سبب افزایش زمان محاسباتی توسط کامپیوتر می شود، پس ابعاد المان های بهینه با روش سعی و خطا، در نظر گرفته شده اند. در مدل سازی با استفاده از نرم افزار ABAQUS با زون بندی مدل و تقسیم آن به نواحی مختلف و استفاده از مش با ابعاد متفاوت، در هریک از این نواحی، سعی شده علاوه بر حفظ دقت محاسبات، زمان محاسبات کم تر شود.

### ۶-۲- مدل ساختمانی روسازی

ابعاد مدل به گونه ای انتخاب شده است که مقطع عرضی چرخ به طور کامل و جامع در آن جا بگیرد و امکان جابه جایی عرضی آن نیز با توجه به نوع تحلیل های مورد نظر، موجود باشد.

سیستم ساختمانی روسازی به صورت چهار لایه الاستیک خطی کاملاً چسبیده در نظر گرفته شد:

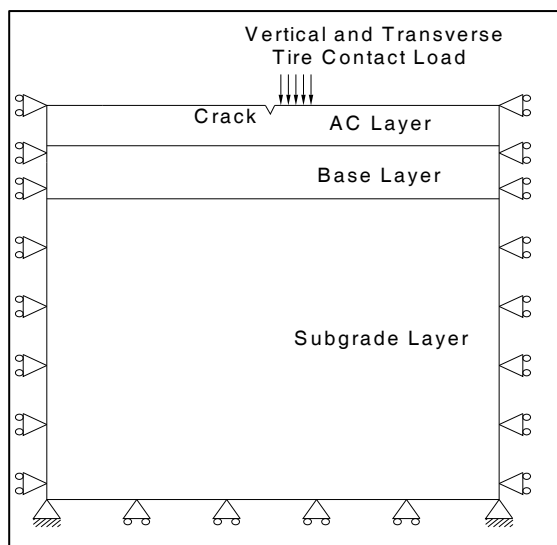
(الف) ضخامت بتن آسفالتی متغیر (۲۰، ۱۰ و ۲۵ سانتی متر)

(ب) اساس ۳۰ سانتی متر

(ج) لایه های خاکریز به ضخامت ۲/۵ متر

### ۶-۳- مدل سازی شرایط مرزی

همان طور که اشاره شد، مدلسازی به صورت دوبعدی انجام شده است. در تمام مدل های ساخته شده، کف لایه سابگرید به صورت کامل بسته شد تا از هر گونه حرکت قائم و افقی آن جلوگیری شود. گره های محیط پیرامون مدل در مقابل حرکت افقی بسته شده و حرکت قائم آن میسر است.



شکل ۳ مدل سازی شرایط مرزی

### ۶-۴- مشخصات مصالح

با توجه به این که از روش تحلیل الاستیک خطی برای مقطع ترک خورده استفاده شده، پارامترهای الاستیک مصالح مد نظر

1. Continuum 2 Dimension 4 Nodes

سانتی متر از ترک قرار گیرند. برای مدل سازی، ضخامت لایه ی بتن آسفالتی ۲۰ سانتی متر در نظر گرفته شده است. شکل های شماره ۴ و ۵، تغییرات ضریب شدت تنش مد یک  $K_I$  را بر اساس طول ترک، برای هر یک از این موقعیت ها نشان می دهد.

قرار گرفته و مقادیر مدول الاستیسیته و ضریب پواسون مصالح، مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شده اند. در ضمن با توجه به مقادیری که برای مدول الاستیسیته آسفالت در نظر گرفته شده، مقادیر پارامترهای  $n$  و  $A$  که در قانون پاریس برای تعیین تعداد تکرار بار بدست می آید، از نتایج آزمایشات انجام شده که توسط اداره حمل و نقل ایالت فلوریدا انجام شده [۱۰] برداشت شده است.

جدول ۱ مشخصات مصالح مورد استفاده

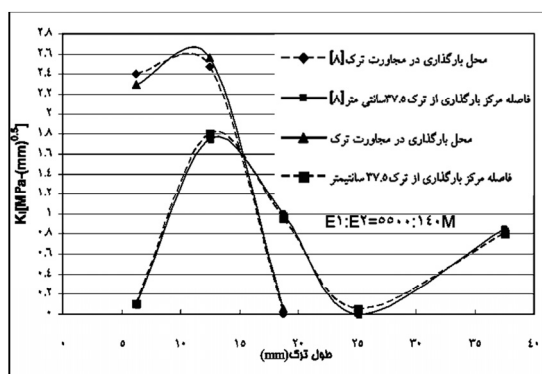
مصالح	آسفالت (۱)	آسفالت (۲)	اساس (۱)	اساس (۲)	لایه های خاگریز
نوع مصالح در نظر گرفته شده	الاستیک	الاستیک	الاستیک	الاستیک	الاستیک
مدول الاستیسیته E(MPa)	۵۵۰۰	۸۲۷۵	۱۴۰	۳۰۰	۱۰۰
ضریب پواسون، $\nu$	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۴	۰/۴	۰/۴۵
پارامترهای شکست مصالح	A	$۸۲/۳ * 10^{-6}$			
	n	۳/۷۹			

## ۷- نتایج مدل سازی

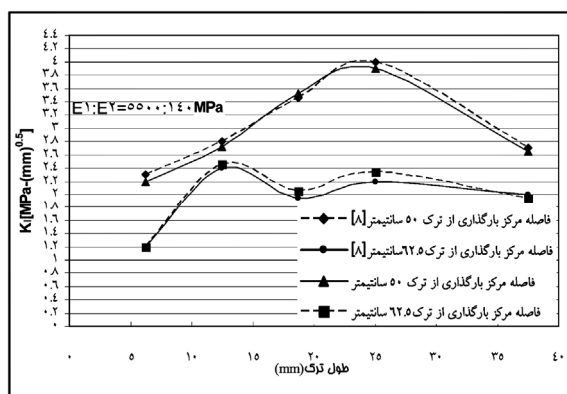
### ۷-۱- آنالیز مدل برای تعیین تأثیر موقعیت بارگذاری روی تنش های اطراف نوک ترک و اعتبار سنجی مدل

با بررسی نتایج مشخص می شود که با توجه به انتخاب ابعاد مناسب مدل و المانها، نتایج بدست آمده تطابق نسبتاً مناسبی با نتایج ارائه شده در مرجع [۹] دارد.

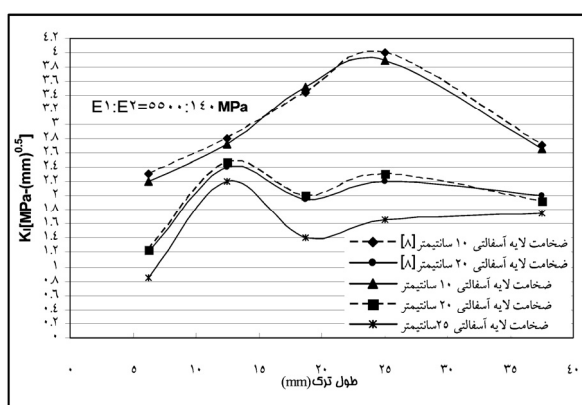
روی مدل طرح شده، آنالیزی برای تعیین اثر موقعیت بارگذاری روی مقادیر تنش، در اطراف نوک ترک اعمال شده است، بنابراین محل اعمال بار در مدل، در چهار موقعیت مختلف قرار داده شده، که یکی از آنها در مجاورت ترک و بقیه آنها به گونه ای در نظر گرفته شده اند که محل مرکز بارگذاری به فواصل ۳۷/۵، ۵۰، ۶۲/۵



شکل ۴ تأثیر موقعیت بارگذاری، بر روی تنش‌های اطراف نوک ترک (ضخامت لایه‌ی بتن آسفالتی، ۲۰ سانتی‌متر،  $E_1$  مدول الاستیسیته‌ی آسفالت و  $E_2$  مدول الاستیسیته‌ی اساس)



شکل ۵ تأثیر موقعیت بارگذاری، بر روی تنش‌های اطراف نوک ترک (ضخامت لایه‌ی بتن آسفالتی، ۲۰ سانتی متر)



شکل ۶ تأثیر ضخامت لایه‌ی بتن آسفالتی روی تنش‌های اطراف نوک ترک (فاصله‌ی مرکز بار از ترک ۶۲٫۵ سانتی‌متر است)

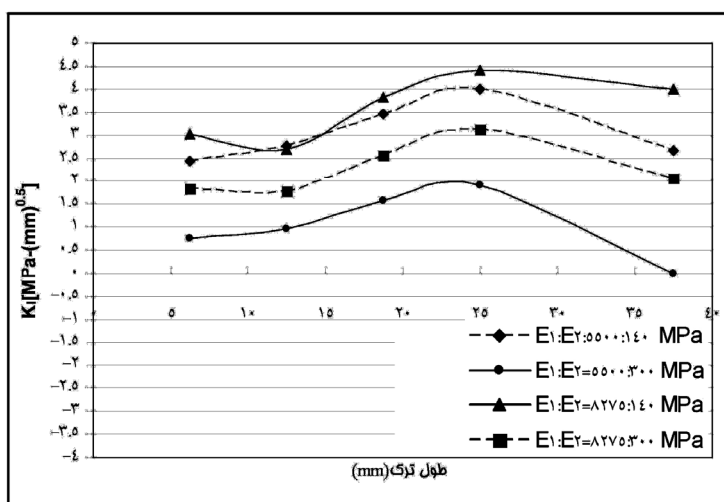
## ۲-۷- آنالیز مدل برای تعیین تأثیر ضخامت لایه ی بتن آسفالتی روی تنش های اطراف نوک ترک و اعتبارسنجی مدل

روی مدل، آنالیزی برای تعیین اثر ضخامت لایه ی بتن آسفالتی روی مقادیر تنش در اطراف نوک ترک انجام شده است، بنابراین سه عدد ۲۰، ۲۵ و ۳۰ سانتی متر برای ضخامت روسازی انتخاب شده است. در شکل شماره ی ۶ تغییرات ضریب شدت تنش مد یک  $-K_I-$  بر اساس طول ترک، برای هر یک از این ضخامت ها نشان داده شده است. در ضمن نتایج به دست آمده برای ضخامت های ۲۰ و ۳۰ سانتی متر با نتایج بدست آمده توسط سایر محققین، مقایسه شده است. همان طور که شکل ۶ نشان می دهد، با افزایش ضخامت لایه ی بتن آسفالتی مقدار ضریب شدت تنش کاهش می یابد.

## ۳-۷- آنالیز مدل برای تعیین اثر شیب دما در لایه ی بتن آسفالتی، روی تنش های اطراف نوک ترک

برای تعیین اثر تغییرات دما روی مدل، دو حالت مختلف در نظر گرفته شده است، در حالت اول، پخش دما در ضخامت لایه ی بتن آسفالتی ثابت است و در حالت دوم فرض می شود، سطح روسازی به سرعت گرم شده است. این حالت در ساعت ابتدایی طلوع آفتاب، بروز می کند. در این حالت اختلاف دمایی تارهای بالایی و پایینی لایه ی آسفالتی، ۲۵ درجه ی سانتی گراد در نظر گرفته شده است. در هر دو حالت، موقعیت مرکز بارگذاری در فاصله ی ۷۵ سانتی متری ترک قرار دارد. در شکل ۷، تغییرات ضریب شدت تنش مد یک  $-K_I-$  بر اساس طول ترک برای هر یک از این حالت ها نشان داده شده است.

همان طور که از شکل ۷ مشخص است، شیب دما در ضخامت لایه ی بتن آسفالتی باعث افزایش مقدار ضریب شدت تنش می ود



شکل ۸ تأثیر ضریب الاستیسته ی لایه ی اساس روی تنش های اطراف نوکترک (ضخامت لایه ی بتن آسفالتی، ۱۰ سانتی متر و فاصله ی مرکز بارگذاری از ترک، ۶۲/۵ سانتی متر) است



## ۷-۶- آنالیز مدل برای تعیین اثر ضریب الاستیسیته‌ی لایه‌ی اساس روی تنش‌های اطراف نوک ترک

برای تعیین اثر نسبت ضریب الاستیسیته‌ی لایه‌ی آسفالتی به لایه‌ی اساس، چهار نسبت مختلف در نظر گرفته شده و برای هر یک از آن‌ها آنالیز انجام شده، که در شکل ۸ خلاصه‌ی نتایج به‌دست آمده نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل ۸ مشخص است، با افزایش اختلاف سختی لایه‌ی آسفالتی و لایه‌ی اساس، ضریب شدت تنش  $K_I$  افزایش می‌یابد.

## ۷-۵- آنالیز مدل برای تعیین مقدار $K_{II}$ و اعتبارسنجی مدل

در هر کدام از آنالیزهای انجام شده، ضریب  $K_{II}$  نیز محاسبه شده است. از نتایج به‌دست آمده مشخص می‌شود که در بیش‌تر مواقع، مقدار این ضریب از ضریب  $K_I$  بسیار کم‌تر و حدود ۰/۱ آن است و با افزایش فاصله‌ی مرکز بارگذاری از ترک، مقدار آن افزایش می‌یابد. در ادامه، با محاسبه‌ی ضریب  $K$  معادل برای هر دو مد، نشان داده می‌شود که اثر آن در محاسبه‌ی تعداد تکرار بار ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن است.

در شکل ۹ تغییرات ضریب شدت تنش مد دو  $K_{II}$  بر اساس طول ترک برای دو نسبت مختلف ضریب الاستیسیته‌ی لایه‌ی آسفالتی و لایه‌ی اساس نشان داده شده است. در ضمن، مقادیر به‌دست آمده با نتایج به‌دست آمده توسط سایر محققین مقایسه شده است. همان‌طور که از شکل ۹ مشخص است، با افزایش طول ترک، مقدار ضریب شدت تنش مد دوم به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد.

## ۸- محاسبه‌ی ضریب $K$ معادل

با توجه به این‌که سازوکار ترک، ترکیبی از مدهای یک و دو است، برای استفاده از رابطه‌ی قانون گسترش ترک پاریس، باید مقدار  $K$  معادل را که ترکیبی از این دو مد است، محاسبه کرده و در رابطه‌ی مذکور قرار داد. برای محاسبه‌ی  $K$  معادل، از رابطه‌ی زیر استفاده شده است.

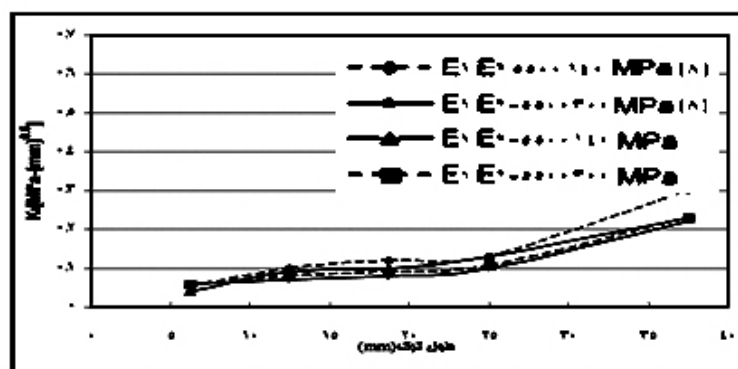
$$K = \sqrt{JE} \quad (3)$$

مقدار انتگرال  $J$  را می‌توان از رابطه‌ی زیر محاسبه

کرد:

$$J = \frac{(K_I^2 + K_{II}^2)(1 - \nu^2)}{E} \quad (4)$$

که در آن:



شکل ۹ تعیین مقدار ضریب  $K_{II}$  برای نسبت‌های مختلف مدول الاستیسیته‌ی لایه‌ی آسفالتی به لایه‌ی اساس (ضخامت لایه‌ی بتن آسفالتی ۲۰۰ سانتی متر است)

این شکلها مشخص است، با افزایش طول ترک، تعداد دفعات تکرار بار برای گسترش ترک، کمتر می شود. به عبارت دیگر سرعت رشد ترک با افزایش طول ترک به صورت معنی داری افزایش می یابد.

### ۹- محاسبه ی تعداد تکرار بار N برای رشد ترک

پس از محاسبه ی K معادل، تعداد تکرار بار N را برای این که طول ترک در هریک از موارد ذکر شده در جدول ۲، از ۶ میلی متر به ۳۸ میلی متر برسد، می توان از رابطه ی (۲) به دست آورد.

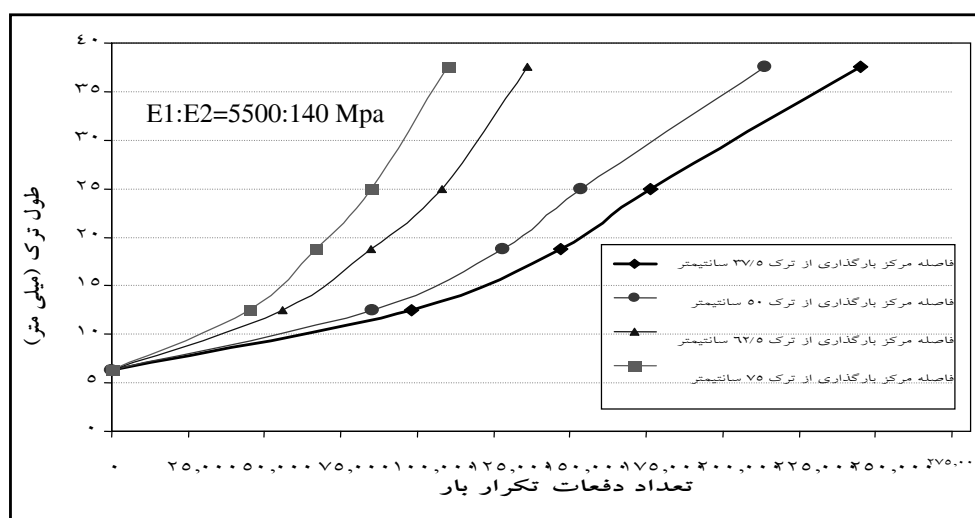
برای به دست آوردن تعداد دفعات بارگذاری، از انتگرال رابطه ی (۲)، در هر یک از بازه های ۱۲/۵-۶/۲۵، ۱۲/۵-۱۸/۷۵، ۱۸/۷۵-۲۵ و ۲۵-۳۷/۵ میلی متر، استفاده می شود.

V: ضریب پواسون و E ضریب الاستیسیته است. با توجه به موارد بالا برای محاسبه ی K معادل، می توان ابتدا مقادیر  $K_I$  و  $K_{II}$  که به صورت توابعی از طول ترک است را به دست آورد. برای این کار یک تابع چند جمله ای درجه چهار به نقاط به دست آمده از تحلیل، برازش داده می شود. سپس از روابط (۳) و (۴) مقدار K معادل محاسبه می شود. خلاصه ی نتایج در جدول ۲ ارائه شده است.

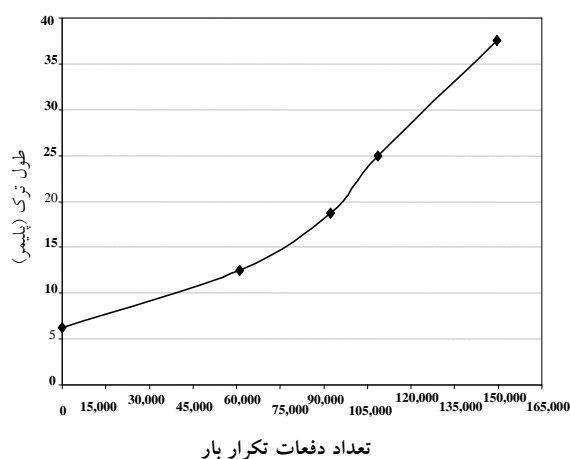
انتگرال مذکور با استفاده از روش عددی سیمپسون محاسبه شده است. با توجه به موارد بالا تعداد تکرار بار برای حالت های ذکر شده در جدول ۲، محاسبه شده و در شکل های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. همان طور که از

جدول ۲ محاسبه ی K معادل برای حالت های مختلف ( $x =$  طول ترک به میلی متر)، مدول الاستیسیته اساس و آسفالت به ترتیب ۱۴۰ و ۵۵۰۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است.

ضخامت لایه آسفالتی (cm)	فاصله مرکز بارگذاری از ترک (cm)	K معادل براساس طول ترک $[MPa \cdot (mm)^{0.5}]$
۲۰	۳۷/۵	$K = (-4 \cdot 10^{-5}x^4 + 0,0042x^3 - 0,1505x^2 + 2,094x - 8,06) / (1 - \nu^2)$
۲۰	۵۰	$K = (2 \cdot 10^{-6}x^4 + 0,0001x^3 - 0,0143x^2 + 0,305x - 0,53) / (1 - \nu^2)$
۲۰	۶۲/۵	$K = (-7 \cdot 10^{-5}x^4 + 0,0062x^3 - 0,183x^2 + 2,201x - 6,782) / (1 - \nu^2)$
۲۰	۷۵	$K = (-5 \cdot 10^{-5}x^4 + 0,0046x^3 - 0,139x^2 + 1,716x - 5,14) / (1 - \nu^2)$
۲۵	۶۲/۵	$K = (-9 \cdot 10^{-5}x^4 + 0,0078x^3 - 0,2315x^2 + 2,76x - 9,12) / (1 - \nu^2)$



شکل ۱۰ تعداد تکرار بار برای رشد ترک از ۶/۲۵ تا ۳۷/۵ میلی متر (ضخامت لایه‌ی آسفالتی، ۲۰ سانتی متر است)



شکل ۱۱ تعداد تکرار بار برای رشد ترک از ۶/۲۵ تا ۳۷/۵

میلی متر (ضخامت لایه‌ی آسفالتی، ۲۵ سانتی متر و فاصله‌ی مرکز بارگذاری از ترک، ۶۲/۵ سانتی متر است)

این شکلها مشخص است، با افزایش طول ترک، تعداد دفعات تکرار بار برای گسترش ترک، کمتر می‌شود. به عبارت دیگر سرعت رشد ترک با افزایش طول ترک به صورت معنی‌داری افزایش می‌یابد.

انتگرال مذکور با استفاده از روش عددی سیمپسون محاسبه شده است. با توجه به موارد بالا تعداد تکرار بار برای حالت‌های ذکر شده در جدول ۲، محاسبه شده و در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که از

## ۱۰- نتیجه گیری

نتایج حاصل از آنالیزهای انجام شده عبارتند از:

۱- با توجه به تفاوت معنی دار مقدار ضریب شدت تنش در مد I و مد II، مشخص می شود که مد II که سازوکار برشی دارد، قابل صرف نظر کردن است.

۲- شیب سختی بتن آسفالتی که ناشی از اختلاف دمای سطح بالایی و پایینی آن است، باعث افزایش ضریب شدت تنش می شود.

۳- با افزایش فاصله ی محل اعمال بار از ترک ابتدایی ایجاد شده، مقادیر ضریب شدت تنش در مد I و مد II افزایش می یابد به عبارت دیگر، موقعیت بحرانی اعمال بار، برخلاف انتظار، در مجاورت ترک واقع نشده است.

۴- مقدار ضریب شدت تنش مد II، با افزایش فاصله ی محل اعمال بار از ترک، افزایش می یابد و مقدار آن به ۰/۱ مقدار ضریب شدت تنش مد I می رسد.

۵- افزایش اختلاف سختی لایه ی بتن آسفالتی و لایه ی اساس باعث افزایش ضریب شدت تنش  $K_I$  می شود.

۶- افزایش مدول الاستیسیته مقطع بتن آسفالتی باعث افزایش ضریب شدت تنش در نوک ترک می شود در نتیجه، سرعت پیشروی ترک در روسازی، افزایش می یابد.

۷- روش های طراحی روسازی موجود، باید بهبود یابند، به گونه ای که بتوانند اثر وجود ترک در روسازی و شیب سختی مقطع بتن آسفالتی را با توجه به نقش ۲ آن ها در افزایش مقدار تنش ها در طراحی مدنظر قرار دهند.

## ۱۱- منابع

[۱] طباطبائی، امیر محمد، "روسازی راه"، مرکز نشر دانشگاهی،

۱۳۷۷

[2] Schorsh, M. and Chang.C.M. and Baladi.G.Y., "Effect of Segregation on the Initiation and Propagation of Top-Down Cracks", proc.82 th Transportation Research Board Annual Meeting Washington D.C., January 2003.

[3] Holeyvinsky,J.M., Soon,S.C. and Stolarsky,H., "Investigation of Factor Related to Surface Initiated Cracks In Flexible Pavement", Department of Civil Engineering, University of Minnesota, USA, 2000

[4] Donna Harmelink, and Tim Aschenbrener, "Extent of Top-Down Cracking in Colorado", Colorado Department of Transportation Research Branch, July 2003

[۵] اکرامی، علی اکبر؛ "تغییر شکل و مکانیک شکست مواد و آلیاژهای مهندسی"، انتشارات دانشگاه صنعتی شریف، چاپ اول، ۱۳۸۲

[۶] فرهی، غلامحسین؛ "مکانیک شکست"، انتشارات دانشگاه بوعلی سینا، چاپ اول، ۱۳۶۷

[۷] عامری، محمود؛ "مکانیزم ترک و گسترش آن در روسازی، طرح مخلوط و ضخامت روکش برای جلوگیری از انعکاس ترک"، مجموعه ی مقالات چهارمین کنفرانس بین المللی عمران، جلد سوم، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۶۷.

[8] Paris, P. and Erdogan, F., "A critical analysis of crack propagation laws", Journal of Basic Engineering, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, December 1963, pp. 528-534.

[9] Leslie A. M., Reynaldo R., "Evaluation of Top-Down Cracking in Thick Asphalt Pavements and the Implications for Pavement Design", TRB Committee on General Issues in Asphalt Technology, December. 2001

[10] "Implementation of Shrp Indirect Tension Tester to Mitigate Cracking in Asphalt Pavements And Verlays", Research Center Florida Department of Transportation, Reynaldo Roque, May 2002.