

## بررسی رفتار ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی با به کارگیری مدل‌سازی ناهمگن

حسن زیاری، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

بهروز قبادی پور، دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت

ایران، تهران

مجید جبالبارزی سرپیشن\*، دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و

صنعت ایران، تهران

Email: m.jebalbarez@gmail.com

دریافت: ۱۳۹۷/۰۸/۲۵ - پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۱۹

### چکیده

در این مطالعه، با مدل‌سازی غیرهمگن، رفتار رشد ترک خوردگی مخلوط آسفالتی بررسی می‌گردد. بدین منظور، ابتدا نمونه‌های آسفالتی با استفاده از الگوریتم تولید و توزیع تصادفی سنگدانه‌ها ایجاد می‌شوند. سپس، این نمونه‌های آسفالتی به صورت عددی مورد تحلیل قرار گرفته و پارامترهای شکست مخلوط آسفالتی محاسبه می‌گردند. در ادامه، تأثیر توزیع سنگدانه‌ها، مدول الاستیسیته سنگدانه‌ها، ضریب پواسون سنگدانه‌ها، مدول الاستیسیته ماسستیک، ضریب پواسون ماسستیک و بارگذاری تحت مودهای ترکیبی بر پارامترهای شکست مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که مدل‌سازی غیرهمگن به صورت محسوسی پاسخ‌های مکانیکی مخلوط آسفالتی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. موقعیت نوک ترک تأثیر به‌سزایی بر مقدار و علامت ضرایب شدت تنش دارد. به طوری که اگر نوک ترک در ناحیه ماسستیک قرار داشته باشد، ضریب شدت تنش مود I در مدل‌سازی همگن کمتر از مدل‌سازی غیرهمگن خواهد بود. در حالی که اگر نوک ترک در سنگدانه‌ها قرار داشته باشد، مقدار ضریب شدت تنش مدل‌سازی غیرهمگن بیشتر از مدل‌سازی همگن می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل اجزای محدود، مدل‌سازی غیرهمگن، مکانیک شکست، ضرایب شدت تنش، الگوریتم تولید و توزیع تصادفی سنگدانه‌ها

### ۱. مقدمه

خرابی‌های مخلوط آسفالتی می‌باشند (زیاری و همکاران، ۲۰۱۵؛ روح‌الامینی و همکاران، ۲۰۱۷؛ شیرینی و ایمانی نسب، ۲۰۱۶). به دلیل کاهش ظرفیت سازه‌ای روسازی، افزایش نفوذپذیری و ورود رطوبت به لایه‌های زیرین

راه‌ها، سرمایه ملی هر کشوری هستند و هر ساله هزینه‌های هنگفتی صرف تعمیر، بهسازی و بازسازی آنها می‌شود. ترک خوردگی و شیارشدگی مهم‌ترین

پردازش تصویر و یا الگوریتم‌های تولید و توزیع تصادفی سنگدانه تعیین شده و سپس با به‌کارگیری نرم‌افزارهای المان محدود، پاسخ‌های مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی تخمین زده می‌شوند. تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده است. برای مثال، آراگو و همکاران (۲۰۱۰) با به‌کارگیری تکنیک‌های پردازش تصویر و مدل ناحیه چسبناک (CZM<sup>۳</sup>) مخلوط آسفالتی را به صورت ماده‌ای غیرهمگن مدل‌سازی کرده و تأثیر انرژی شکست و مقاومت کششی ماستیک را بر رفتار ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی بررسی کردند. در تحقیق دیگری، دایی و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از روش پردازش تصویر، بیضی‌هایی را بر سنگدانه‌ها برازش نموده و مسیر رشد ترک را در نمونه‌های آسفالتی به دست آوردند. بدین منظور، آن‌ها از روش مکانیک خرابی محیط‌های پیوسته استفاده کردند و نشان دادند که نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی به خوبی با نتایج آزمایشگاهی مطابقت دارند. محمود و همکاران (۲۰۰۹)، به منظور ارزیابی تأثیر دانه‌بندی، مقاومت، شکل و سختی سنگدانه‌ها بر مقاومت ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی از روش المان مجزا<sup>۴</sup> و پردازش تصویر استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که تنش‌های ایجاد شده در مخلوط‌های متخلخل بیشتر از سایر انواع مخلوط‌ها می‌باشند. به همین دلیل، سنگدانه‌های استفاده شده در مخلوط‌های متخلخل باید مقاومت بیشتری نسبت به دیگر انواع مخلوط‌ها داشته باشند. کیم و باتلر (۲۰۰۹) و کیم و همکاران (۲۰۰۸)، (۲۰۰۹) با استفاده از روش‌های المان مجزا و پردازش تصویر، رفتار رشد ترک در مخلوط‌های آسفالتی را بررسی کردند. آن‌ها به منظور پیش‌بینی چگونگی شروع و رشد ترک‌ها از مدل CZM استفاده نمودند و نشان دادند که نتایج شبیه‌سازی به خوبی با نتایج آزمایشگاهی مطابقت دارند.

روسازی، بررسی رفتار رشد ترک در روسازی‌های آسفالتی از اهمیت زیادی برخوردار است. یکی از روش‌های متداول مطالعه رفتار ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی، اصول مکانیک شکست خطی می‌باشد (علیها و همکاران، ۲۰۱۴؛ عامری و همکاران، ۲۰۱۶؛ بهبهانی و همکاران، ۲۰۱۳). مهم‌ترین پارامتر مورد استفاده در مکانیک شکست الاستیک خطی جهت توصیف میدان تنش و کرنش در نوک ترک، ضرایب شدت تنش است. این پارامترها به خواص مکانیکی و هندسه قطعه مورد نظر وابسته می‌باشند.

جهت مطالعه رفتار رشد ترک در مخلوط‌های آسفالتی، سه رویه جداگانه استفاده می‌گردد که عبارتند از: تحقیقات آزمایشگاهی، مدل‌سازی‌های همگن<sup>۱</sup> و غیرهمگن<sup>۲</sup>. با بررسی‌های آزمایشگاهی می‌توان رفتار و خصوصیات مصالح را توصیف نمود. ولی نتایج ممکن است تحت تأثیر شرایط آزمایش مانند اندازه نمونه، هندسه و تجهیزات آزمایشگاهی قرار گیرند. در مدل‌سازی‌های همگن، کل نمونه دارای خواص یکسان و مشابه می‌باشد. در این حالت، اندرکنش بین مصالح منطبق با شرایط واقعی نمی‌باشد و در نهایت مدل‌سازی-های غیرهمگن مورد استفاده قرار گرفتند که نسبت به مدل‌سازی‌های همگن واقع‌گرایانه‌تر می‌باشند و می‌توان اندرکنش بین مصالح مختلف را تعریف کرد.

مخلوط آسفالتی، یک ماده کامپوزیت و متشکل از سنگدانه‌ها، قیر و فضای خالی می‌باشد. مصالح سنگی (که حدود ۸۵٪ حجم آسفالت را تشکیل می‌دهند) در اندازه و شکل‌های مختلف، به صورت تصادفی درون مخلوط آسفالتی پخش می‌شوند. به همین دلیل، پیش‌بینی پاسخ‌های مکانیکی مخلوط آسفالتی دشوار می‌باشد. محققان بدین منظور از مدل‌سازی میکرومکانیک مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌کنند. در این روش، چگونگی پخش سنگدانه‌ها با استفاده از تکنیک‌هایی نظیر

<sup>3</sup>- Cohesive Zone Model

<sup>4</sup>- Discrete Element Method

<sup>1</sup>- Homogeneous

<sup>2</sup>- Heterogeneous

پخش‌شدگی سنگدانه‌ها، بارگذاری تحت مودهای ترکیبی، خصوصیات مکانیکی ماستیک و سنگدانه‌ها بر ضرایب شدت تنش ترک با استفاده از مدل‌سازی غیرهمگن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بدین منظور، ابتدا با استفاده از "الگوریتم تولید و توزیع تصادفی سنگدانه‌ها" نمونه‌های آسفالتی ایجاد می‌شوند. سپس، این نمونه‌ها در نرم‌افزار المان محدود ABAQUS شبیه‌سازی شده و ضرایب شدت تنش محاسبه می‌گردند.

## ۲. الگوریتم تولید و توزیع تصادفی سنگدانه‌ها

هرچند سنگدانه‌ها در واقعیت چندضلعی‌هایی نامنظم می‌باشند، اما مدل‌سازی و مش‌بندی این چندضلعی‌های نامنظم دشوار می‌باشد. به همین منظور، در این تحقیق فرض شده که سنگدانه‌ها دایره‌ای شکل می‌باشند. جدول ۱، وضعیت دانه‌بندی مصالح سنگی استفاده شده در ساخت نمونه‌های آسفالتی را نشان می‌دهد. هرچند درصد ریزدانه‌ها کمتر از درشت‌دانه‌ها می‌باشد اما باید به این نکته توجه کرد که تعداد سنگدانه‌های ریزدانه خیلی بیشتر از تعداد سنگدانه‌های درشت‌دانه می‌باشد. به همین دلیل، مدل‌سازی همه سنگدانه‌ها غیرممکن می‌باشد. به‌منظور حل این مشکل، محققان تنها ماستیک (شامل سنگدانه‌های ریزدانه، قیر و فضای خالی) و سنگدانه‌های درشت‌دانه را مدل‌سازی می‌کنند. برای مثال، بین و همکاران (۲۰۱۱)، کیم و باتلر (۲۰۰۹) و باندیوپدهیایا و همکاران (۲۰۰۸) سنگدانه‌های بزرگ‌تر از ۲/۳۶ میلی‌متر را درشت‌دانه در نظر گرفته‌اند. در حالی که لی و متکف (۲۰۰۵) ذرات کوچک‌تر از ۴/۷۵ میلی‌متر را به‌عنوان ریزدانه در نظر گرفتند. در این تحقیق، سنگدانه‌های بزرگ‌تر از ۲/۳۶ میلی‌متر به‌عنوان درشت‌دانه در نظر گرفته شدند.

مدل‌سازی میکرومکانیک مخلوط‌های آسفالتی (دارای سنگدانه‌های با شکل‌های نامنظم که به‌صورت تصادفی توزیع شده‌اند) با استفاده از روش پردازش تصویر پیچیده می‌باشد. به همین دلیل، تعدادی از محققان از الگوریتم‌های تولید و توزیع تصادفی سنگدانه‌ها به‌منظور مدل‌سازی میکرومکانیک مخلوط‌های آسفالتی استفاده کرده‌اند. برای مثال، بین و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از الگوریتم تولید و توزیع تصادفی سنگدانه‌ها، تأثیر موقعیت ترک و پخش‌شدگی سنگدانه‌ها را بر رفتار ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی ارزیابی کردند. بر مبنای نتایج تحقیق آن‌ها، پخش‌شدگی سنگدانه‌ها می‌تواند مسیر رشد ترک را به‌صورت محلی تغییر دهد. اما مسیر کلی رشد ترک برای نمونه‌های آسفالتی مشابه می‌باشد. در تحقیق دیگری که توسط بین و همکاران (۲۰۱۴) انجام شد، از المان‌های چسبنده<sup>۱</sup> به‌منظور مدل‌سازی ماستیک و لایه مرزی ماستیک-سنگدانه استفاده شد. بر مبنای نتایج این تحقیق، پخش‌شدگی سنگدانه‌ها و مقاومت لایه مرزی سنگدانه-ماستیک تأثیر قابل توجهی بر مقاومت ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی دارد. وانگ و همکاران (۲۰۱۴) به‌منظور پیش‌بینی چگونگی ایجاد و رشد ترک در مخلوط آسفالتی از مدل‌های XFEM<sup>۲</sup> و CZM استفاده کردند و نشان دادند که نمونه‌های آسفالتی ساخته شده با سنگدانه‌های تیز گوشه دارای مقاومت ترک‌خوردگی کمتری هستند.

هرچند در تحقیقات گذشته به‌وفور از مدل‌سازی غیرهمگن به‌منظور بررسی رفتار ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی استفاده گردیده است، اما تأثیر جنبه‌های غیرهمگن مخلوط آسفالتی بر میدان تنش و کرنش نوک ترک تا کنون مورد ارزیابی قرار نگرفته است. در این راستا، جهت تکمیل مطالعات گذشته پیرامون رفتار رشد ترک در مخلوط‌های آسفالتی، در این تحقیق، تأثیر

<sup>2</sup>- Extended Finite Element Method

<sup>1</sup>- Cohesive Element

جدول ۱. دانه‌بندی مصالح سنگی

حد پایین	حد بالا	اندازه روزه الک (mm)	
۱۰۰	۱۰۰	۱۹	سنگدانه‌های درشت‌دانه
۹۰	۱۰۰	۱۲/۵	
۴۴	۷۴	۴/۷۵	
۲۸	۵۸	۲/۳۶	
۵	۲۱	۰/۳	سنگدانه‌های ریزدانه
۲	۱۰	۰/۰۷۵	

می‌باشند. از طرفی، به‌منظور تلاقی نداشتن سنگدانه‌ها با یکدیگر، رابطه زیر کنترل می‌گردد:

$$\geq \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2} \quad (4)$$

$$(R_1 + R_2)$$

که  $X_1, Y_1, R_1$  و  $X_2, Y_2, R_2$  شعاع سنگدانه و مختصات مرکز هر دو سنگدانه دلخواه می‌باشند.

اگر هر یک از این شرایط ارضا نگردد، سنگدانه حذف می‌گردد و سنگدانه‌ای جدید تعریف می‌شود. این مراحل تا زمانی که رابطه (۵) برای همه گروه‌ها ارضا گردد، تکرار می‌شود.

$$\sum_{j=1}^{N_i} A_{ij} \geq A_i \quad (5)$$

که  $A_i$  حد بالای نمودار دانه‌بندی (مطابق جدول ۱) و  $A_{ij}$  مجموع مساحت سنگدانه‌های هر گروه است.

جهت تولید و پخش سنگدانه‌ها از نرم‌افزار متلب استفاده شد. شکل ۱، الگوریتم تولید و توزیع تصادفی سنگدانه‌ها را نشان می‌دهد. هر محدوده جدول دانه‌بندی سنگدانه‌ها در این الگوریتم به‌عنوان یک گروه تعریف شده است. براساس کد نوشته شده در این نرم‌افزار، ابتدا یک سنگدانه دایره‌ای شکل با شعاع تصادفی تولید می‌کند. سپس این سنگدانه به‌منظور نداشتن تلاقی با سایر سنگدانه‌ها و قرارگیری کامل در محدوده قطعه  $SEN_B^1$  کنترل می‌گردد.

به‌منظور قرار داشتن سنگدانه‌ها در قطعه  $SEN_B$  روابط زیر باید برقرار باشند:

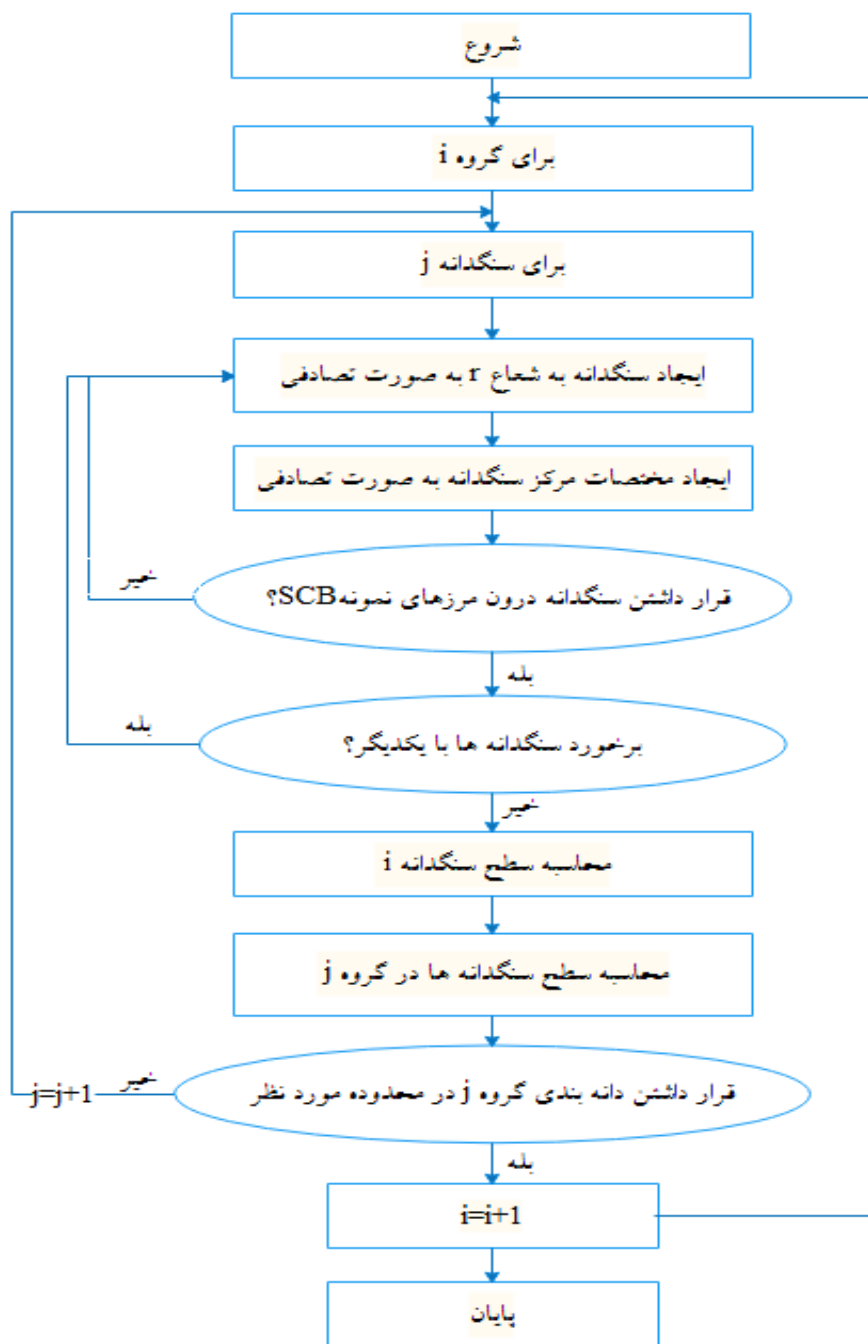
$$\frac{-L}{2} < X \pm R < \frac{L}{2} \quad (1)$$

$$R < Y \quad (2)$$

$$Y + R < H \quad (3)$$

که  $L$  و  $H$  طول و ارتفاع نمونه  $SEN_B$  و  $R, Y$  و  $X$  به ترتیب شعاع و مختصات مرکز سنگدانه تولید شده

<sup>1</sup>- Single Edge Notched Bend



شکل ۱. الگوریتم تولید و توزیع تصادفی سنگدانه‌ها

نیم‌دایره شکل تحت بار خمشی سه نقطه‌ای (SCB) اشاره کرد. در این مقاله، به منظور تعیین پارامترهای شکست مخلوط آسفالتی از قطعه SENB استفاده شد. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌گردد، این قطعه تیری به طول  $L$  و ارتفاع  $H$  می‌باشد که روی دو تکیه‌گاه به فاصله  $S$  قرار دارد و باری به اندازه  $P$  به میان آن اعمال می‌شود. این قطعه دارای ترکی به طول  $a$  می‌باشد. زمانی

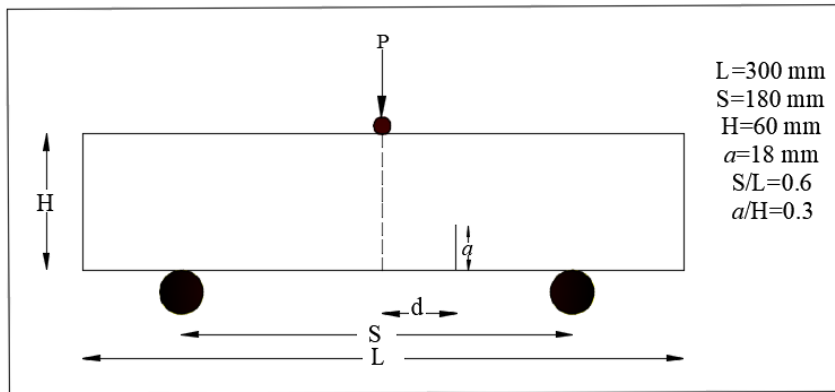
### ۳. مدل‌سازی المان محدود

جهت بررسی رفتار ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی می‌توان به قطعات مختلفی از قبیل آزمایش تیر با ترک لبه‌ای و تحت بار سه و یا چهار نقطه‌ای (قطعه‌ی SENB)، آزمایش کشش غیرمستقیم اصلاح‌شده ( $ITT^1$ )، نمونه متراکم دیسک شکل کششی ( $DCT^2$ ) و قطعه

<sup>2</sup>- Disk-Shaped Compact Tension

<sup>1</sup>- Indirect Tensile Test

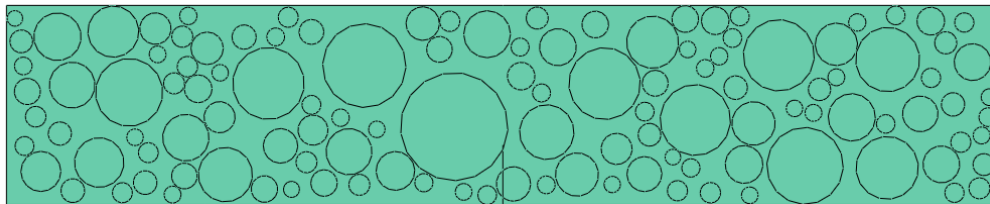
که این ترک در وسط قطعه است ( $d=0$ ) ترک تحت تأثیر بارگذاری ترکیبی قرار دارد. با جابجایی ترک به سمت تکیه‌گاه ( $d \neq 0$ ) ترک تحت تأثیر بارگذاری ترکیبی قرار می‌گیرد.



شکل ۲. نمونه SENB تحت بارگذاری سه‌نقطه‌ای

ترک خوردگی مود غالب خرابی رویه‌های آسفالتی می‌باشد. از آنجا که هدف این تحقیق مطالعه رفتار ترک خوردگی می‌باشد، ماستیک و سنگدانه‌ها به صورت الاستیک مدل شدند. جدول ۲، فرضیات و خواص مکانیکی اجزای مخلوط آسفالتی را نشان می‌دهد (ایسا و کازی، ۱۹۸۸؛ کاسم و همکاران، ۲۰۱۱؛ گرچک، ۲۰۰۷). همچنین، به منظور پیاده‌سازی شرایط مرزی، از جابجایی تکیه‌گاه‌ها در راستای قائم جلوگیری می‌شود.

شکل ۳، یک قطعه SENB غیرهمگن را نشان می‌دهد. جهت مدل‌سازی فرض می‌شود که سنگدانه‌ها و ماستیک کاملاً به همدیگر چسبیده باشند. ماستیک و سنگدانه‌ها دارای خواص مکانیکی متفاوتی می‌باشند. سنگدانه‌ها مانند یک ماده الاستیک رفتار می‌کنند. در حالی که خواص مکانیکی ماستیک به دما وابسته می‌باشد. ماستیک در دمای زیاد به صورت ویسکوالاستیک رفتار می‌کند و شیارشدگی شایع می‌باشد. در حالی که در دمای کم، ماستیک به صورت الاستیک خطی رفتار می‌کند و



شکل ۳. مدل المان محدود نمونه آسفالتی

جدول ۲. فرضیات و خواص مکانیکی اجزای مخلوط آسفالتی

مقدار	متغیر
۱۰۰	مقدار بار (N)
۲۵۰۰۰۰	تعداد مش
استاتیکی	نوع بارگذاری
۸۰۰۰۰، ۵۰۰۰۰، ۳۰۰۰۰، ۱۰۰۰۰	مدول الاستیسیته سنگدانه‌ها (MPa)
۲۰۰۰۰، ۱۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۵۰۰۰	مدول الاستیسیته ماستیک (MPa)
۰/۴، ۰/۲۵، ۰/۱۵	ضریب پواسون سنگدانه‌ها
۰/۳۵، ۰/۲۵، ۰/۱۵	ضریب پواسون ماستیک

#### ۴. پارامترهای شکست

بر مبنای اصول مکانیک شکست، میدان تنش و کرنش نوک ترک را می‌توان با استفاده از روابط زیر به دست آورد (ویلیامز، ۱۹۹۷):

از الگوریتم تولید و توزیع تصادفی سنگدانه‌ها ایجاد شد (شکل ۵). جهت تخمین ضرایب شدت تنش فرض شد که مدول الاستیسیته ماستیک، مدول الاستیسیته سنگدانه‌ها، ضریب پواسون ماستیک، ضریب پواسون سنگدانه‌ها و طول ترک برابر با  $v_{agg}=0.25$ ،  $E_{agg}=50$

$$\sigma_{rr} = \frac{10 \text{ GPa} \cdot \text{GPa}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ K_I \left( 1 + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) + \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta - 2K_{III} \tan \frac{\theta}{2} \right] \quad (6)$$

صفر تا ۹۰ میلی‌متر تغییر یابد. شکل ۶، تغییرات ضرایب شدت تنش مود I و II ترک در برابر d را برای چند

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \right] \quad (7)$$

پخش‌شدگی متفاوت سنگدانه‌ها نمایش می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، اختلاف

$$\sigma_{r\theta} = \frac{1}{2\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ K_I \sin \theta + K_{II} (3 \cos \theta - 1) \right] \quad (8)$$

معنی‌داری میان ضرایب شدت تنش ترک در مدل‌سازی همگن و غیرهمگن وجود دارد. به‌گونه‌ای که مقادیر ضریب شدت تنش مدل‌سازی غیرهمگن می‌تواند بیش

از ۵۰٪ با ضرایب شدت تنش مدل‌سازی همگن اختلاف داشته باشد. از طرفی، هرچند مقادیر ضرایب شدت تنش

مود I و II برای یک مقدار مشخص d متفاوت است، اما

روند کلی تغییرات ضرایب شدت تنش برای مدل‌سازی همگن و غیرهمگن مشابه می‌باشد. همچنین، باید بدین

نکته توجه داشت که با افزایش مقدار d، اختلاف بین

ضرایب شدت تنش مدل‌سازی همگن و غیرهمگن کمتر می‌شود.

در روابط (۲) تا (۴) و با توجه به شکل ۴،  $r$  و  $\theta$

مختصات نوک ترک در سیستم مختصات قطبی،  $\sigma_{\theta\theta}$ ،  $\sigma_{rr}$

و  $\sigma_{r\theta}$  اجزای تنش در سیستم مختصات قطبی و  $K_I$  و  $K_{II}$

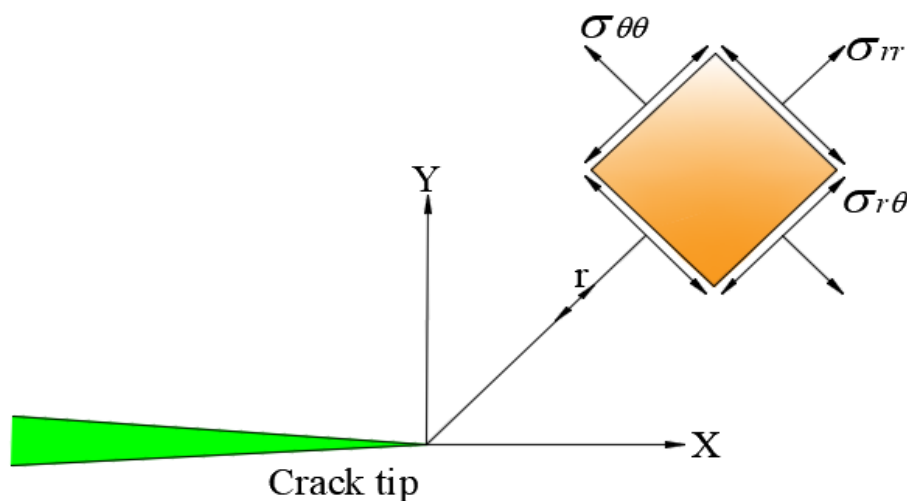
ضرایب شدت تنش موده‌های I و II بارگذاری بوده که

مرتبط با جملات تکین بسط سری تنش می‌باشند.

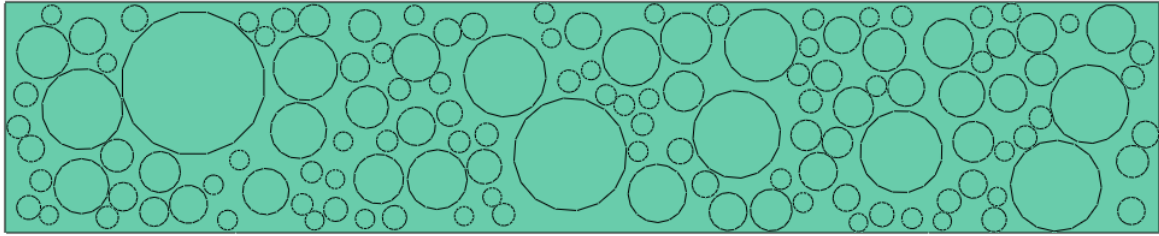
#### ۵. نتایج

به‌منظور ارزیابی تأثیر پخش‌شدگی مصالح سنگی بر

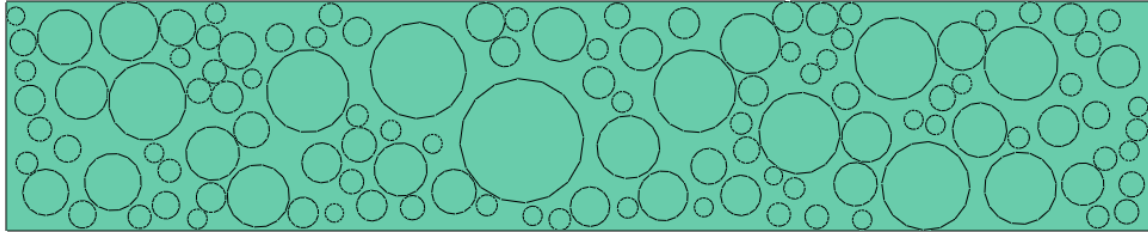
مقادیر ضرایب شدت تنش، دو نمونه آسفالتی با استفاده



شکل ۴. تنش‌های الاستیک در اطراف نوک ترک در مختصات قطبی

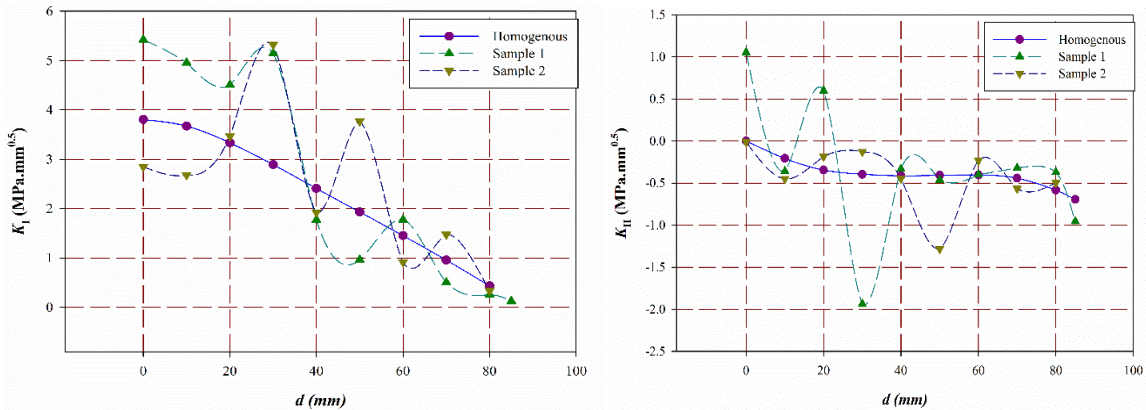


الف



ب

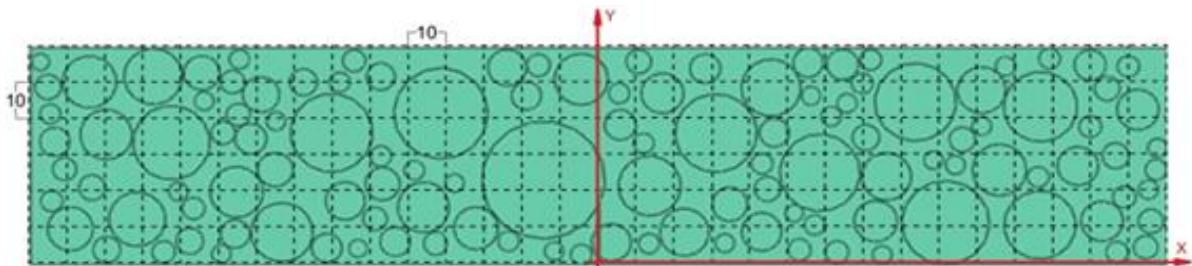
شکل ۵. نمونه‌های آسفالتی: الف) شماره ۱ و ب) شماره ۲



شکل ۶. منحنی تغییرات ضرایب شدت تنش مود I/II با فاصله  $d$  برای چند پخش شدگی سنگدانه

درودن ماستیک و یا سنگدانه) برای مقادیر مختلف  $d$  را نشان می‌دهد. برای مثال، هنگامی که طول ترک و مقدار  $d$  به ترتیب برابر با ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر باشد، نوک ترک درون سنگدانه می‌باشد.

در ادامه، به‌منظور بررسی تأثیر مشخصات مکانیکی سنگدانه‌ها و ماستیک بر رفتار رشد ترک در مخلوط‌های آسفالتی، نمونه ۱ مدل‌سازی شده و نتایج ارائه می‌شوند. شکل ۷ نمونه شماره ۱ و محل قرارگیری نوک ترک



شکل ۷. وضعیت نوک ترک در نمونه SENB

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، زمانی که نوک ترک درون سنگدانه‌ها قرار دارد، ضریب شدت تنش مود I مدل‌سازی غیرهمگن از ضریب شدت تنش مود I

در شکل ۸، تغییرات KI به‌دست‌آمده از تحلیل‌های اجزای محدود برای مقادیر مختلف  $d$  و به ازای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته‌ی سنگدانه‌ها آورده شده است.

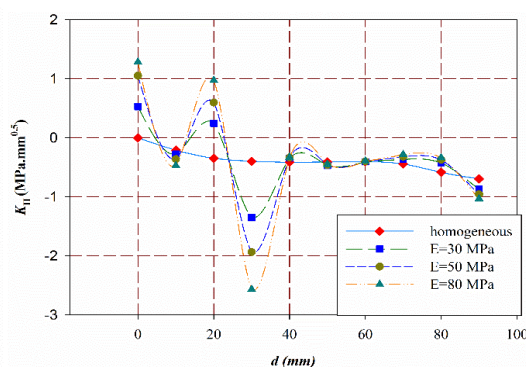
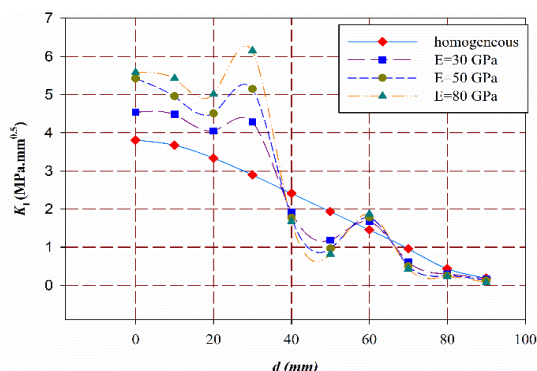


همگن و غیرهمگن نیز به مقدار قابل توجهی متفاوت می‌باشند. همچنین، حداکثر مقادیر ضریب شدت تنش مود II با افزایش مدول الاستیسیته سنگدانه‌ها افزایش می‌یابد.

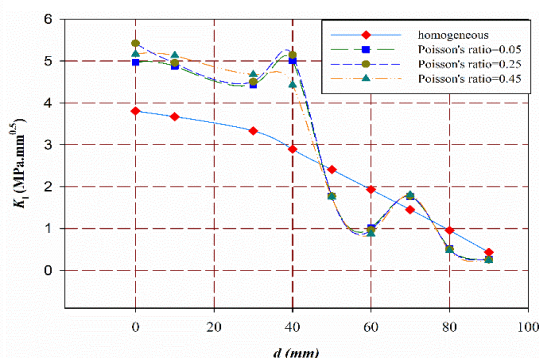
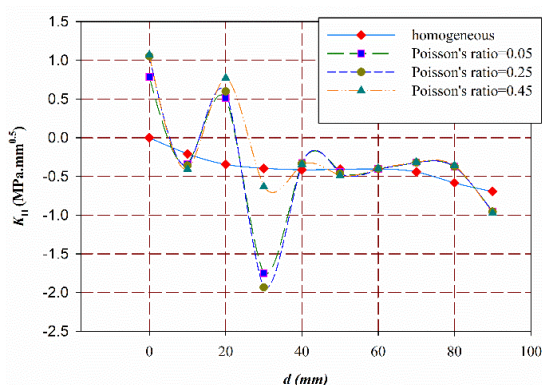
شکل ۹، تغییرات ضرایب شدت تنش ترک برای مقادیر مختلف  $d$  و به ازای مقادیر مختلف ضریب پواسون سنگدانه‌ها را نشان می‌دهد. بدین منظور، مدول الاستیسیته ماستیک، مدول الاستیسیته سنگدانه‌ها، ضریب پواسون سنگدانه‌ها برابر با  $E_{mastic}=10$  GPa،  $E_{agg}=50$  GPa،  $\nu_{mastic}=0.25$  در نظر گرفته شدند و ضریب پواسون سنگدانه‌ها از  $0.05$  تا  $0.45$  تغییر می‌یابد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، ضریب پواسون سنگدانه‌ها تأثیر قابل توجهی بر مقادیر ضرایب شدت تنش مود I و II ندارد.

مدلسازی همگن بیشتر است. در حالی که اگر نوک ترک درون ماستیک قرار داشته باشد، ضریب شدت تنش مود I مدلسازی غیرهمگن کمتر از مدلسازی همگن می‌باشد. دلیل این امر می‌تواند سهم بیشتر سنگدانه در تحمل بار نسبت به ماستیک و در نتیجه افزایش شدت میدان تنش نوک ترک در این حالت باشد. از طرفی، با افزایش مدول الاستیسیته سنگدانه‌ها، در صورتی که نوک ترک در سنگدانه‌ها قرار داشته باشد، ضریب شدت تنش مود I افزایش می‌یابد. در صورتی که اگر نوک ترک در ماستیک قرار داشته باشد با افزایش مدول الاستیسیته سنگدانه‌ها، ضریب شدت تنش مود I کاهش می‌یابد.

شکل ۸، تغییرات ضرایب شدت تنش مود II را در برابر  $d$  برای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته سنگدانه‌ها نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، مقادیر ضریب شدت تنش مود II مدلسازی



شکل ۸. منحنی تغییرات ضرایب شدت تنش مود I/II با فاصله  $d$  برای مقادیر مختلف ضریب الاستیسیته سنگدانه‌ها

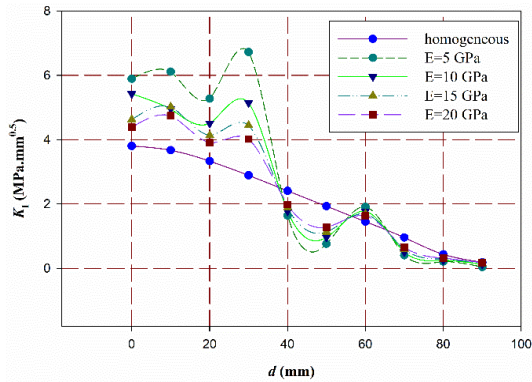


شکل ۹. منحنی تغییرات ضرایب شدت تنش مود I/II با فاصله  $d$  برای مقادیر مختلف ضریب پواسون سنگدانه‌ها

الاستیسیته ماستیک را نشان می‌دهد. به منظور ترسیم این نمودار، مقادیر مدول الاستیسیته سنگدانه‌ها، ضریب

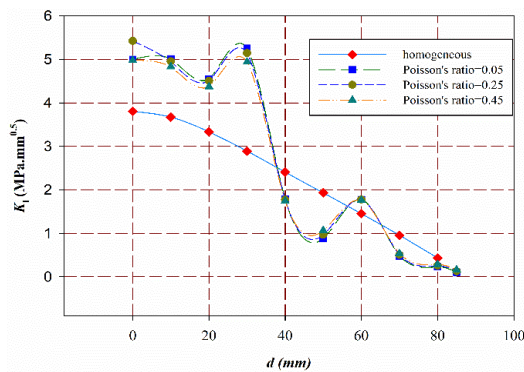
شکل ۱۰، تغییرات ضرایب شدت تنش مود I و II برای مقادیر مختلف  $d$  و به ازای مقادیر مختلف مدول

قرار داشته باشد، با افزایش مدول الاستیسیته ماستیک، ضریب شدت تنش مود I افزایش می‌یابد. همچنین، باید توجه کرد که با افزایش مقدار  $d$ ، اختلاف ضرایب شدت تنش مدل‌سازی همگن و غیرهمگن کاهش می‌یابد. شکل ۱۰ تغییرات ضریب شدت تنش مود II را نشان می‌دهد همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش مدول الاستیسیته ماستیک، ضرایب شدت تنش مود II ترک کاهش می‌یابد.



شکل ۱۰. منحنی تغییرات ضرایب شدت تنش مود I/II با فاصله  $d$  برای مقادیر مختلف ضریب الاستیسیته ماستیک

قابل توجهی بر ضریب شدت تنش مود I ندارد. در حالی که ضریب شدت تنش مود II به ضریب پواسون ماستیک وابسته است و با افزایش مقدار ضریب پواسون، مقادیر ضریب شدت تنش مود II کاهش می‌یابد.



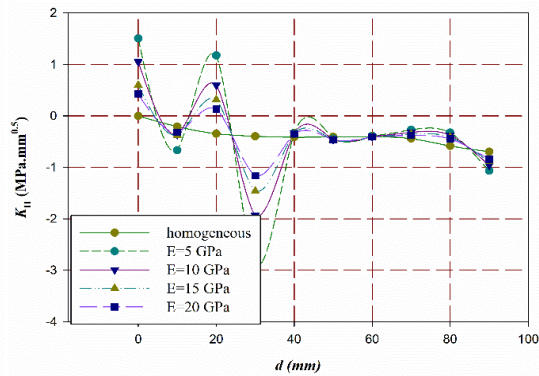
شکل ۱۱. منحنی تغییرات ضرایب شدت تنش مود I/II با فاصله  $d$  برای مقادیر مختلف ضریب پواسون ماستیک

شدند. سپس، این نمونه‌های آسفالتی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس شبیه‌سازی شدند. بر اساس تحلیل‌های المان محدود انجام‌گرفته، نتایج زیر حاصل شد:

## ۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله، به‌منظور بررسی رفتار رشد ترک در نمونه‌های غیرهمگن آسفالتی با استفاده از "الگوریتم تولید و توزیع سنگدانه‌ها" نمونه‌های آسفالتی ایجاد

پواسون سنگدانه‌ها و ضریب پواسون ماستیک برابر  $v_{mastic}=0.25$ ,  $E_{agg}=50$  GPa,  $v_{agg}=0.25$  شده‌اند و مدول الاستیسیته ماستیک از ۵ تا ۲۰ گیگاپاسکال تغییر داده شد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، چنانچه نوک ترک در سنگدانه‌ها قرار داشته باشد، با افزایش مدول الاستیسیته ماستیک، مقادیر ضرایب شدت تنش مود I و در نتیجه مقدار تنش کششی کاهش پیدا می‌کند. در حالی که اگر نوک ترک در ماستیک



- ضرایب شدت تنش مدل‌سازی غیرهمگن می‌توانند تا بیش از ۵۰۵ با نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی همگن تفاوت داشته باشند.
- بر اساس نتایج به‌دست آمده، در میان مشخصات مکانیکی مصالح، مدول الاستیسیته سنگدانه‌ها و ماستیک بیشترین تأثیر را بر ضرایب شدت تنش دارند. در صورتی که ضریب پواسون سنگدانه‌ها تأثیر قابل توجهی بر ضرایب شدت تنش ندارند.
- موقعیت نوک ترک تأثیر زیادی بر مقدار و علامت ضرایب شدت تنش ترک می‌گذارد. به‌طوری که اگر نوک ترک در سنگدانه‌ها باشد، مقدار ضریب شدت تنش مود I مدل‌سازی غیرهمگن بیشتر از مدل‌سازی همگن است. در صورتی که اگر نوک ترک در ماستیک باشد، مقدار ضریب شدت تنش مود I مدل‌سازی همگن بیشتر از مدل‌سازی غیر همگن می‌باشد.

## ۷. مراجع

- Aliha, M. M., Behbahani, H., Fazaeli, H. and Rezaifar, M. H. 2014. "Study of characteristic specification on mixed mode fracture toughness of asphalt mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 54: 623-635.
- 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 Fract. Eng. Mater. Struct.*, 39(7): 896-906.
- Aragão, F. T. S., Kim, Y. R., Lee, J. and Allen, D. H. 2010. "Micromechanical model for heterogeneous asphalt concrete mixtures subjected to fracture failure". *J. Mater. Civ. Eng.*, 23(1): 30-38.
- Bandyopadhyaya, R., Das, A. and Basu, S. 2008. "Numerical simulation of mechanical behaviour of asphalt mix". *Constr. Build. Mater.*, 22(6): 1051-1058.
- Behbahani, H., Aliha, M., Reza, M., Fazaeli, H. and Aghajani, S. 2013. "Experimental fracture toughness study for some modified asphalt mixtures". *Adv. Mater. Res.*, 723: 337-344.
- Dai, Q., Sadd, M. H., Parameswaran, V. and Shukla, A. 2005. "Prediction of damage behaviors in asphalt materials using a micromechanical finite-element model and image analysis". *J. Eng. Mech.*, 131(7): 668-677.
- Eissa, E. A. and Kazi, A. 1988. "Relation between static and dynamic Young's moduli of rocks". *Int. J. Rock Mech. Min. Geomech. Abstr.*, 25(6).
- Gercek, H. 2007. "Poisson's ratio values for rocks". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 44(1): 1-13.
- Kassem, E., Grasley, Z. C. and Masad, E. 2011. "Viscoelastic Poisson's ratio of asphalt mixtures". *Int. J. Geomech.*, 13(2): 162-169.
- Kim, H. and Buttlar, W. G. 2009. "Discrete fracture modeling of asphalt concrete". *Int. J. Solids Struct.*, 46(13), 2593-2604.
- Kim, H., Wagoner, M. P. and Buttlar, W. G. 2008. "Simulation of fracture behavior in asphalt concrete using a heterogeneous cohesive zone discrete element model". *J. Mater. Civ. Eng.*, 20(8): 552-563.
- 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". *Constr. Build. Mater.*, 23(5): 2112-2120.
- Li, Y. and Metcalf, J. B. 2005. "Two-step approach to prediction of asphalt concrete modulus from two-phase micromechanical models". *J. Mater. Civ. Eng.*, 17(4): 407-415.
- Mahmoud, E., Masad, E. and Nazarian, S. 2009. "Discrete element analysis of the influences of aggregate properties and internal structure on fracture in asphalt mixtures". *J. Mater. Civ. Eng.*, 22(1): 10-20.
- Rooholamini, H., Imaninasab, R. and Vamegh, M. 2017. "Experimental analysis of the influence of SBS/nanoclay addition on asphalt fatigue and thermal performance". *Int. J. Pavement Eng.*, 20(6): 1-10.
- Shirini, B. and Imaninasab, R. 2016. "Performance evaluation of rubberized and SBS modified porous asphalt mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 107: 165-171.
- Wang, H., Wang, J. and Chen, J. 2014. "Micromechanical analysis of asphalt mixture fracture with adhesive and cohesive failure". *Eng. Fract. Mech.*, 132: 104-119.
- Yin, A., Yang, X., Yang, S. and Jiang, W. 2011. "Multiscale fracture simulation of three-point bending asphalt mixture beam considering material heterogeneity". *Eng. Fract. Mech.*, 78(12): 2414-2428.
- Yin, A., Yang, X., Zeng, G. and Gao, H. 2014. "Fracture simulation of pre-cracked heterogeneous asphalt mixture beam with movable three-point bending load". *Constr. Build. Mater.*, 65: 232-242.

بررسی رفتار ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی با به‌کارگیری مدل‌سازی ناهمگن

Ziari, H., Shirini, B. and Imaninasab, R. 2015. "Rutting evaluation of rubberized and SBS modified porous asphalt mixtures". Eng. Solid Mech., 3(4): 225-262.