

## مدلسازی غیرهمگن مخلوط آسفالتی با بکارگیری الگوریتم تولید و توزیع تصادفی سنگدانه‌ها

مقاله علمی - پژوهشی

مجید جبالبارزی\*، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران  
احسان سبحانی فرد، دانشجوی دکتری، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
حسن زیاری، استاد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m.jebalbarez@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۲۲ - پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۰۱

صفحه ۲۷۴-۲۵۷

### چکیده

در این تحقیق، رفتار رشد ترک در قطعات غیرهمگن آسفالتی (متشکل از سنگدانه، ماستیک و فضای خالی) به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور ابتدا نمونه‌های آسفالتی با استفاده از الگوریتم تولید و توزیع سنگدانه‌ها به صورت عددی ساخته شدند. سپس، با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود نمونه‌های آسفالتی، تاثیر طول ترک، مدول الاستیسیته و نسبت پواسون ماستیک، مدول الاستیسیته و نسبت پواسون سنگدانه‌ها، توزیع سنگدانه‌ها و موقعیت قرارگیری نوک ترک بر ضرایب شدت تنش (که نشان‌دهنده میدان شدت تنش نوک ترک می‌باشند) تعیین گردید. نتایج نشان می‌دهند، ضرایب شدت تنش بدست آمده از مدلسازی غیرهمگن، می‌توانند بیش از ۵۰ درصد با ضرایب شدت تنش بدست آمده از مدلسازی همگن متفاوت باشند. در میان عوامل بررسی شده، موقعیت نوک ترک، مدول الاستیسیته ماستیک و سنگدانه‌ها بیشترین تاثیر بر ضرایب شدت تنش را دارند. در حالیکه، نسبت پواسون ماستیک و سنگدانه‌ها تاثیر چندانی بر ضرایب شدت تنش ندارند. از طرفی، هنگامیکه نوک ترک درون ماستیک قرار داشته باشد، ضرایب شدت تنش مود I در مدلسازی همگن، بیشتر از مقادیر متناظر ضرایب شدت تنش در مدلسازی غیرهمگن می‌باشند. در حالیکه اگر نوک ترک درون سنگدانه‌ها قرار داشته باشد، ضرایب شدت تنش در مدلسازی غیرهمگن بیشتر از ضرایب شدت تنش مدلسازی همگن می‌باشند. علاوه بر این مسیر رشد ترک با استفاده از معیار حداکثر تنش مماسی تعیین گردید. نتایج نشان می‌دهند، سنگدانه‌ها می‌توانند مسیر رشد ترک را به صورت محلی تغییر دهند، اما مسیر کلی رشد ترک در نمونه‌های همگن و غیرهمگن مشابه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ضرایب شدت تنش، مدلسازی غیرهمگن، مسیر رشد ترک، خواص مکانیکی آسفالت

### ۱- مقدمه

خطی استفاده کرد. ضرایب شدت تنش اصلی‌ترین پارامتر مورد استفاده در مکانیک شکست جهت توصیف میدان تنش و کرنش نوک ترک می‌باشد. ضرایب شدت تنش به خواص مکانیکی، شرایط بارگذاری و هندسه قطعه جسم بستگی دارد. مخلوط آسفالتی متشکل از سنگدانه، قیر و حفرات هوا می‌باشد. هر یک از این اجزا خواص مکانیکی متفاوتی دارند. سنگدانه‌ها

ترک‌خوردگی و شیارشدگی از جمله مهمترین خرابی‌های رویه‌های آسفالتی می‌باشد (Aliha and Sarbijan, 2016; Sarbijan and Bahmani, 2017). Aliha, ترک‌خوردگی اغلب در نواحی سردسیر که آسفالت بصورت الاستیک خطی رفتار می‌کند، اتفاق می‌افتد. بنابراین می‌توان برای مطالعه رفتار ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی از مکانیک شکست الاستیک

گسسته، مسیر رشد ترک و چگونگی توزیع تنش را پیش‌بینی کردند. دای و همکاران (Dai et al. 2005) نیز با استفاده از روش پردازش تصویر و المان محدود سعی کردند ترک‌های مویی ایجاد شده در نمونه‌های آسفالتی تحت فشار و کشش غیرمستقیم پیش‌بینی کنند. آنها از مکانیک خرابی محیط‌های پیوسته جهت تخمین رفتار غیرالاستیک اجزای تشکیل دهنده مخلوط آسفالتی استفاده کردند و نشان دادند نتایج حاصله از مدلسازی انجام شده با نتایج آزمایشگاهی سازگاری قابل قبولی داشته است.

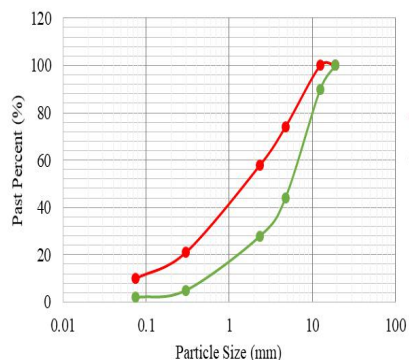
در روش دوم جهت بررسی تاثیرات جنبه‌های ناهمگن بر رفتار رشد ترک در مخلوط‌های آسفالتی، سنگدانه‌هایی با شکل و دانه‌بندی خاص به صورت تصادفی درون نمونه توزیع شده و یک نمونه آسفالتی بصورت عددی (غیر واقعی) ساخته می‌شود. سپس مانند روش اول، این قطعات با استفاده از روش اجزا محدود یا اجزا گسسته مورد تحلیل قرار گرفته و رفتار رشد ترک مورد مطالعه قرار می‌گیرد. برای مثال ین و همکاران با استفاده از الگوریتم تولید و توزیع سنگدانه‌ها، تاثیر محل ترک و توزیع سنگدانه‌ها بر رفتار ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی را بررسی کردند. آنها سنگدانه‌ها را بصورت دایره‌هایی با شعاع دلخواه مدلسازی کردند و نشان دادند هر چند توزیع سنگدانه‌ها می‌تواند مسیر رشد ترک را بصورت محلی تغییر دهد اما جهت کلی شکست نمونه‌ها یکسان است. ین و همکاران با استفاده از الگوریتم تولید و توزیع تصادفی سنگدانه‌ها اقدام به ساخت مدل‌های دو بعدی مخلوط‌های آسفالتی کردند. آنها با بکار بردن المان‌های چسبنده در ماستیک و مرز مشترک ماستیک و سنگدانه نشان دادند ترک‌های ریز اغلب در مرز مشترک ماستیک و سنگدانه ایجاد می‌گردد. وانگ و همکاران (Wang, Wang and Chen, 2014) منظور بررسی رفتار رشد ترک از مدل ناحیه چسبنده و اجزا محدود توسعه یافته استفاده کردند و نشان دادند که ترک‌ها در محل‌هایی ایجاد می‌شوند که گوشه‌های سنگدانه در نزدیکی سنگدانه دیگر و یا در مجاورت مرز نمونه قرار داشته باشد. ین و همکاران (Yin et al. 2015) برای مدلسازی رفتار ترک خوردگی ناشی از مود I و مودهای ترکیبی I/II مخلوط‌های آسفالتی از نمونه‌های (SENB) استفاده کردند. آنها بمنظور مدلسازی ماستیک و همچنین مرز ماستیک و سنگدانه، از المان‌های ناحیه چسبنده استفاده کردند. نتایج تحقیق آنها

با اشکال مختلف تحت شرایط محیطی و بارگذاری مختلف بصورت الاستیک خطی رفتار می‌کنند. اما قیر در دمای بالا بصورت ویسکوالاستیک رفتار کرده و شیارشدگی خرابی شایع است، اما در دمای پایین بصورت الاستیک رفتار کرده و ترک‌خوردگی شایع می‌باشد. هر چند مقادیر ضرایب شدت تنش در یک مخلوط آسفالتی ناهمگن به خصوصیات مکانیکی اجزا مخلوط آسفالتی بستگی دارد، اما در تحقیقات انجام گرفته در این زمینه، مخلوط آسفالتی به صورت همگن در نظر گرفته شده است (Somé, Feeser and Pavoine 2018; Li and Marasteanu, 2010) بنابراین در این تحقیق سعی شده تا بکارگیری روش المان محدود، تاثیر جنبه‌های غیرهمگن مخلوط آسفالتی بر ضرایب شدت تنش مورد مطالعه و ارزیابی قرار گیرد. روش کلی جهت بررسی تاثیرات جنبه‌های غیرهمگنی بر رفتار رشد ترک در مخلوط آسفالتی وجود دارد. در روش اول با بکارگیری روش‌های پردازش تصویر، شکل و موقعیت قرارگیری سنگدانه‌ها استخراج شده سپس با استفاده از روش اجزا محدود یا اجزا گسسته، مخلوط آسفالتی به صورت غیرهمگن مدلسازی می‌شود. برای مثال، آرگاو و همکاران (Aragão et al. 2010) برای پیش‌بینی رفتار ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی از روش اجزا محدود به‌مراه پردازش تصویر استفاده کردند. آنها با مدلسازی دو بعدی مخلوط آسفالتی، ترک‌های مویی ناشی از بارگذاری تحت نیروی کششی را پیش‌بینی کردند. ان جی و همکاران (Ng and Dai, 2011) به بررسی رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی پرداختند. آنها مسیر شکست را در نمونه‌های SENB و ST تعیین کردند و نشان دادند نتایج حاصل از شبیه‌سازی سازگاری قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی دارد. محمود و همکاران (Mahmoud, Masad and Nazarian, 2009) با استفاده از روش المان‌گسسته و پردازش تصویر به بررسی تاثیر دانه‌بندی، شکل و سختی سنگدانه‌ها بر مقاومت شکست مخلوط آسفالتی پرداختند. آنها نشان دادند تنش داخلی در نمونه‌های آسفالتی با دانه‌بندی باز به مراتب بزرگتر از مخلوط‌های آسفالتی با دانه‌بندی متراکم می‌باشد. کیم و همکاران (Kim, Wagoner and Buttlar, 2009; Kim, Wagoner and Buttlar, 2008) با ساخت مدل‌های دو بعدی اجزا محدود و پردازش تصویر، تاثیر بزرگترین اندازه اسمی سنگدانه، اندازه نمونه و دما را بر مکانیزم شکست مخلوط‌های آسفالتی گرم مورد بررسی قرار دادند. آنها با مدلسازی ناهمگن و بکارگیری روش اجزا

هدف از پژوهش حاضر، مقایسه پارامترهای شکست در حالت مدلسازی همگن و ناهمگن مخلوط آسفالتی می‌باشد. در پژوهش حاضر، تاثیر خواص مکانیکی اجزاء آسفالت (مدول الاستیسیته سنگدانه و ماستیک، ضریب پواسون سنگدانه و ماستیک و طول ترک)، موقعیت نوک ترک و چگونگی پخش سنگدانه‌ها بر رفتار ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا نخست با استفاده از الگوریتم تولید و توزیع تصادفی سنگدانه‌ها، نمونه‌های عددی آسفالتی ساخته شدند. سپس این نمونه‌های آسفالتی با نرم‌افزار آباکوس مدلسازی و تحلیل شدند و ضرایب شدت تنش مود I, II تعیین گردید. همچنین مسیر رشد ترک در نمونه‌های همگن و غیرهمگن با استفاده از معیار حداکثر تنش کششی پیش‌بینی شد.

## ۲- الگوریتم تولید و توزیع سنگدانه‌ها

در این پژوهش از حدود دانه‌بندی نشان داده شده در شکل (۱) استفاده شده است. از آنجایی که مدلسازی همه سنگدانه‌های موجود در نمونه‌های آسفالتی زمان محاسبات اجزا محدود را طولانی می‌کند، لذا در مدل‌های ساخته شده سنگدانه‌ها به دو قسمت درشت‌دانه و ریزدانه تقسیم شده است. ریزدانه‌ها و قیر بصورت یک جزء واحد با خواص یکسان مدلسازی شده‌اند که به آنها ماستیک گفته می‌شود و درشت‌دانه‌ها نیز درون ماستیک مدلسازی شده‌اند. در پژوهش حاضر سنگدانه‌های با اندازه بزرگتر از ۳۶.۲ بعنوان درشت‌دانه در نظر گرفته شده است. همچنین بدلیل ساده سازی مدل ساخته شده، سنگدانه‌ها بصورت دایره با شعاع متفاوت شبیه‌سازی شده‌اند.



شکل ۱. نمودار دانه بندی سنگدانه‌ها

حاکی از تاثیر قابل ملاحظه دما بر رفتار ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی بود. سلامی و همکاران (Salemi and Wang, 2018) سنگدانه‌ها را به صورت تصادفی درون قطعه آسفالتی تولید و توزیع کردند. آنها با استفاده از آنالیز دو بعدی اجزا محدود، مدول دینامیکی و زاویه اختلاف فاز مخلوط آسفالتی را تعیین کردند و نشان دادند شکل سنگدانه تاثیر بسزایی بر مدول دینامیکی مخلوط آسفالتی ندارد. رن و همکاران (Ren and Sun, 2017) با استفاده از مدلسازی دو بعدی تاثیر توزیع و اندازه حفرات هوا و تخلخل را روی سختی مخلوط‌های آسفالتی بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد توزیع، اندازه حفرات و تخلخل تاثیر قابل ملاحظه روی رفتار رشد ترک در مخلوط‌های آسفالتی دارد. لی و همکاران (Li and Guo, 2018) نیز برای بررسی رفتار رشد ترک از مدل‌های ناهمگن استفاده کردند. آنها با در نظر گرفتن سنگدانه‌ها بصورت دایره نشان دادند با افزایش مقدار شکستگی سنگدانه‌ها، مخلوط آسفالتی نیروی بیشتری را می‌تواند تحمل نماید. چن و همکاران (Chen, Wang and Li, 2017) از مدلسازی دو بعدی و سه بعدی برای تعیین مدول دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی استفاده کردند. آنها در پژوهش خود سنگدانه‌ها را به شکل چند ضلعی و بیضی در نظر گرفتند. نتایج این پژوهش نشان دادند، اختلاف کمی بین نتایج مدلسازی دو بعدی و مدلسازی سه بعدی وجود دارد. وانگ و همکاران (Wang, Wang and Chen, 2018) و همچنین ژانگ و همکاران (Zhang et al. 2016) با استفاده از الگوریتم توزیع سنگدانه‌ها و مدل ناحیه چسبیده، مخلوط آسفالتی را بصورت ناهمگن مدلسازی کردند. آنها سنگدانه‌ها را بصورت چند ضلعی در نظر گرفتند و برای بررسی رفتار رشد ترک از نمونه‌های SCB و تیر خمشی سه نقطه استفاده کردند.

اثر سنگدانه‌های موجود در مخلوط آسفالتی بر رفتار شکست روسازی‌های دارای ترک بالا به پایین (Aliha et al. 2021) و همچنین ترک پایین به بالا (ziari et al. 2022) نیز در حالتی که قسمتی از سازه روسازی چند لایه مدلسازی شده نیز بررسی شده است. در این مدلسازی‌ها با شبیه‌سازی حرکت وسیله نقلیه و عبور آن از روسازی دارای ترک اثر عواملی همچون ضخامت لایه‌ها، خواص مکانیکی سنگدانه و ماستیک و غیره بررسی گردید.

برابر باشد مود I و چنانچه فواصل مذکور برابر نباشد مود ترکیبی I/II ایجاد می‌شود.

#### ۴- مدل اجزا محدود و مدلسازی عددی

در این پژوهش جهت بررسی تاثیر خواص مکانیکی سنگدانه‌ها و ماستیک روی پارامترهای شکست نوک ترک، از مدلسازی دو بعدی در نرم افزار آباکوس استفاده شده است. در مدلسازی اجزا محدود ۲۵۰۰۰۰ المان دو بعدی CPE8R برای مدلسازی سنگدانه‌ها و ماستیک بکار برده شده است. در شکل‌های (۴) و (۵) به ترتیب مدل المان محدود نمونه آسفالتی و مدل مش‌بندی شده به همراه یک تصویر بزرگنمایی شده از المان‌های اطراف نوک ترک را نشان داده شده‌اند. در این مدلسازی حرکت قائم تکیه گاه‌ها جهت مطابقت با واقعیت محدود شده و بارگذاری بصورت عمودی بر نمونه وارد شده است. مخلوط آسفالتی متشکل از سنگدانه‌ها و ماستیک می‌باشد. سنگدانه‌ها دارای خواص الاستیک بوده اما خواص مکانیکی ماستیک به دما وابسته است بطوریکه در دماهای زیر صفر دارای خواص الاستیک بوده و شکننده می‌باشد. که در این شرایط خرابی شایع روسازی آسفالتی، ترک خوردگی می‌باشد. از آنجا که در پژوهش حاضر رفتار ترک خوردگی مخلوط آسفالتی در دماهای پایین مورد مطالعه قرار می‌گیرد، لذا خواص سنگدانه‌ها و ماستیک بصورت الاستیک خطی در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است که این فرضیه در پژوهش‌های دیگر (از جمله AASHTO TP 105-13) برای تعیین ضرایب شدت تنش مورد استفاده قرار گرفته است (Mull, Stuart and Yehia, 2002; Saha and Biligiri, 2016; Stewart, Oputa and Garcia, 2018; Somé, Feeser and Pavoine, 2018; AASHTO TP 105-13, 2013).

در شکل (۲) الگوریتم تولید و توزیع تصادفی سنگدانه‌ها نشان داده شده است. در این الگوریتم با توجه به دانه‌بندی شماره ۴ موجود در نشریه ۲۳۴، حدود اندازه سنگدانه‌ها در گروه‌هایی دسته‌بندی شده است. موقعیت قرارگیری و شعاع سنگدانه‌ها توسط الگوریتم به شکلی محاسبه می‌شود که سنگدانه‌های تولید شده تداخلی با یکدیگر نداشته و بطور کامل درون مرزهای قطعه‌ی SCB قرار گیرند. شرط عدم تداخل سنگدانه‌های جدید و قرار گرفتن آنها در محدوده مورد نظر با روابط (۱) و (۲) کنترل شده است.

$$\sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2} \geq R_i + R_j \quad (1)$$

$$\sqrt{X_i^2 + Y_i^2} + R_i \leq R \quad (2)$$

روند فوق تا زمانی که رابطه (۳) برقرار شود، ادامه می‌یابد.

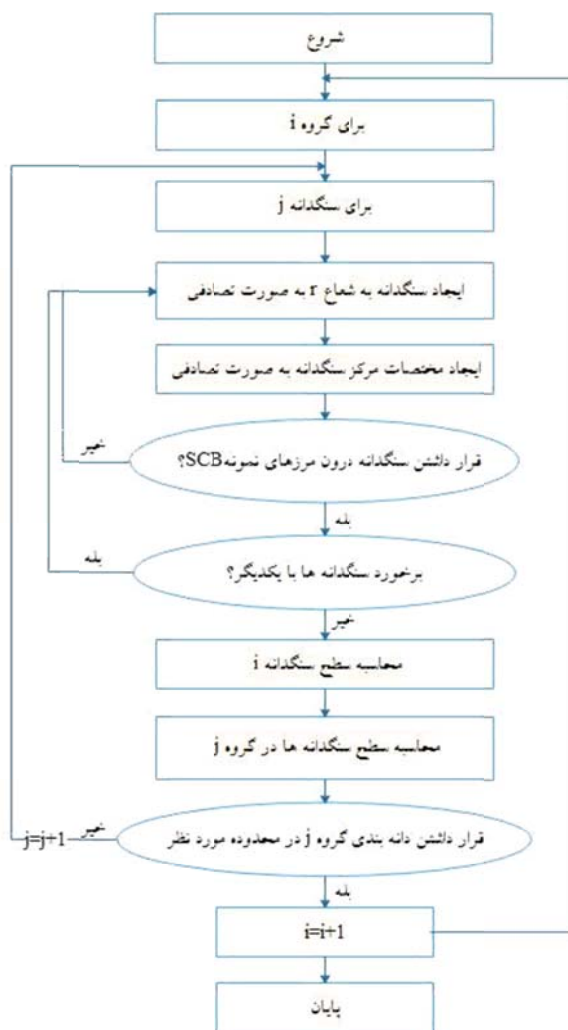
$$A_{i \min} \leq \sum_{j=1}^{N_i} A_{ij} \leq A_{i \max} \quad (3)$$

در این رابطه  $A_{i \min}$  و  $A_{i \max}$  به ترتیب کمترین و بیشترین مساحت تجمعی سنگدانه‌ها با توجه به دانه‌بندی شکل (۱) و  $A_{ij}$  مساحت سنگدانه  $j$  در گروه  $i$  می‌باشد.

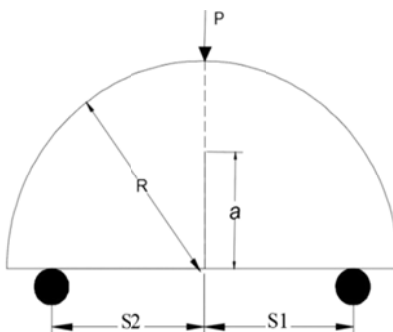
#### ۳- نمونه‌های آزمایشگاهی جهت تعیین

##### پارامترهای شکست

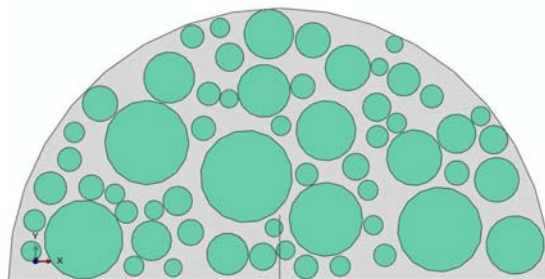
محققان از نمونه‌های آزمایشگاهی متعدد با شکل و هندسه متفاوت جهت تخمین پارامترهای شکست استفاده کرده‌اند (Artamendiand Khalid, 2006; Rooholamini, Hassani, and Aliha, 2018; Mansourian, Hashemi and Aliha, 2018; Mubarak, Abd-Elhady and Sallam, 2013). در این میان نمونه‌های ASCB بدلیل هندسه مناسب جهت ساخت و سهولت بارگذاری، یکی از مناسبترین نمونه‌ها جهت تخمین پارامترهای شکست مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد. در شکل (۳) نمونه ASCB دارای ترک با عمق  $a$  تحت بارگذاری خمشی سه نقطه با نیروی عمودی  $P$  نشان داده شده است. چنانچه در این بارگذاری فاصله تکیه‌گاه‌ها از ترک



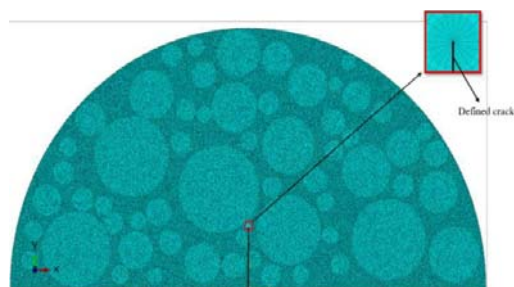
شکل ۲. الگوریتم تولید و توزیع تصادفی سنگدانه‌ها



شکل ۳. مشخصات هندسی نمونه ASCB



شکل ۴. سنگدانه‌ها و ماستیک



شکل ۵. مش بندی مدل اجزا محدود

خواص مکانیکی سنگدانه‌ها و ماستیک استفاده شده در این شده فرض شده است سنگدانه‌ها و ماستیک کاملاً بهم چسبیده تحقیق در جدول (۱) آورده شده است. در مدل‌های ساخته می‌باشند.

جدول ۱. مشخصات مکانیکی مصالح سنگی و ماستیک

نسبت پواسون (ν)	مدول الاستیسته گیگاپاسکال (E)	نوع مصالح
۰٫۴ ، ۰٫۲۵ ، ۰٫۰۵	۱۰٫۳۰٫۵۰٫۸۰	سنگدانه
۰٫۲۵ ، ۰٫۱۵ ۰٫۳۵	۲۰٫۱۵٫۱۰٫۵	ماستیک

### پارامترهای نوک ترک

تنش اطراف نوک ترک در حالت مود ترکیبی بارگذاری توسط سری ویلیامز و به شکل زیر قابل محاسبه می‌باشد (Williams, 1997).

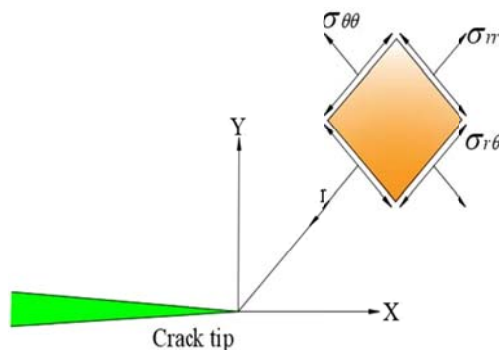
$$\sigma_r = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ K_I \left( 1 + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) + \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta - 2K_{III} \tan \frac{\theta}{2} \right] + \text{higher order terms} \quad (4)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \right] + \text{higher order terms} \quad (5)$$

$$\sigma_{r\theta} = \frac{1}{2\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ K_I \sin \theta + K_{II} (3 \cos \theta - 1) \right] + \text{higher order terms} \quad (6)$$

راستاهای مختلف می‌باشند.

که در آن با توجه به شکل (۶)،  $r, \theta$  مختصات نوک ترک در سیستم مختصات قطبی و  $r\theta, \theta\theta$  تنش در



شکل ۶. تنش‌های الاستیک در اطراف نوک ترک در مختصات کارترین

نوک ترک، طول ترک و شرایط بارگذاری بستگی دارند، بنابراین می‌توان نوشت:

$$K_I = f(E_{agg}, \nu_{agg}, E_{mastic}, \nu_{mastic}, D, P, S1/R, S2/R, a) \quad (7)$$

$$K_{II} = f(E_{agg}, \nu_{agg}, E_{mastic}, \nu_{mastic}, D, P, S1/R, S2/R, a) \quad (8)$$

در این پژوهش از تئوری ماکزیمم تنش مماسی جهت پیش بینی مسیر رشد ترک براساس مکانیک شکست الاستیک خطی استفاده شده است. براساس این تئوری، انتشار ترک در جهت ماکزیمم تنش مماسی در اطراف نوک ترک اتفاق می‌افتد (Erdogan and Sih, 1963). جهت انتشار ترک از رابطه (۱۳) قابل محاسبه و اندازه‌گیری می‌باشد.

$$K_I \sin(\theta_0) + K_{II} (3 \cos(\theta_0) - 1) = 0 \quad (9)$$

مقایسه نتایج حاصل از در نظر گرفتن نمونه‌های مخلوط آسفالتی بصورت ناهمگن و همگن از نسبت ضرایب شدت تنش در حالت ناهمگن به ضرایب شدت تنش در حالت همگن مطابق رابطه زیر استفاده شده است.

$$\frac{SIFs_{Het}}{SIFs_{Hom}}$$

می‌کند. همچنین در نمونه‌های ساخته شده طول ترک ۰.۲۲، مدول الاستیسیته ماستیک و سنگدانه‌ها بترتیب ۱۰ و ۵۰ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ماستیک و سنگدانه‌ها نیز ۰.۲۵، در نظر گرفته شده است. در شکل (۸) روند تغییرات

ضرایب شدت تنش ترک در قطعه‌ی SCB به خواص مکانیکی اجزا مخلوط‌های آسفالتی، توزیع سنگدانه‌ها، محل قرارگیری

در این روابط،  $K_I$  و  $K_{II}$  ضرایب شدت تنش،  $a$  و  $D$ ،  $t$ ،  $R$ ، بترتیب بیانگر شعاع نیم‌دایره، ضخامت نمونه، پخش شدگی سنگدانه‌ها و طول ترک در نمونه‌های SCB می‌باشند.  $E_{agg}$ ،  $\nu_{agg}$ ،  $E_{mastic}$ ،  $\nu_{mastic}$  مدول الاستیسیته ماستیک، ضریب پواسون ماستیک، مدول الاستیسیته سنگدانه‌ها و ضریب پواسون سنگدانه‌ها می‌باشد.  $S_1$  و  $S_2$  نیز فاصله دو تکیه‌گاه تا مرکز قطعه SCB است.

### تاثیر توزیع سنگدانه بر ضرایب شدت تنش

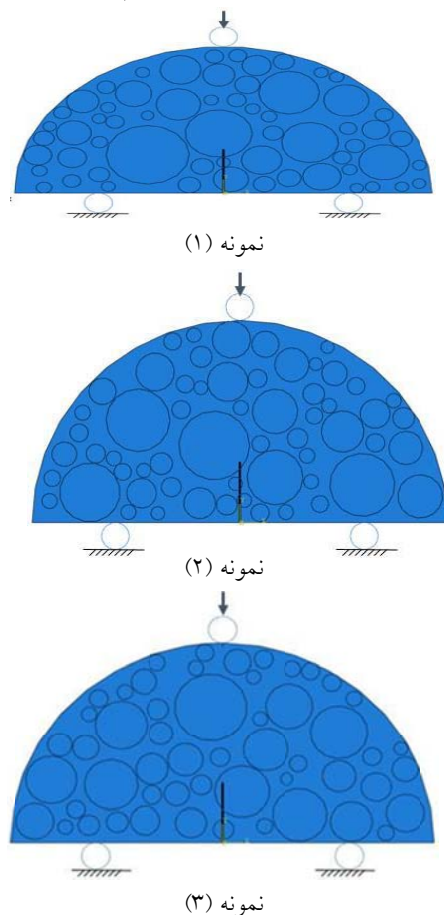
جهت بررسی تاثیر پخش شدگی سنگدانه در نمونه آسفالتی بر ضرایب شدت تنش نوک ترک، با استفاده از الگوریتم استفاده شده در شکل (۷)، سه نوع توزیع و پخش شدگی متفاوت سنگدانه‌ها مدلسازی شده است (شکل (۷) را ببینید). بمنظور

(۱۰)

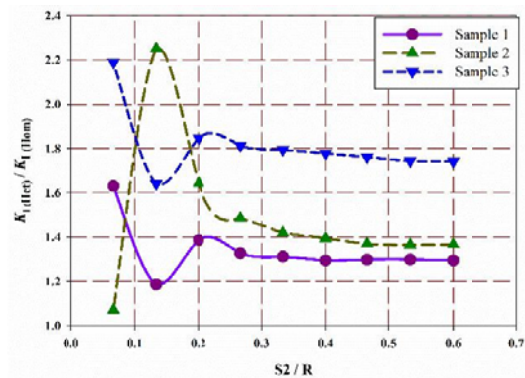
$SIFs_{Het}$  ضرایب شدت تنش در حالت ناهمگن و  $SIFs_{Hom}$  ضرایب شدت تنش در حالت همگن است. در نمودار نشان داده شده در شکل (۸) و  $R$  و  $S_1$  بترتیب ثابت و برابر با ۷۵ و ۴۵ در نظر گرفته شد و  $S_2$  از ۴۵ تا ۵ میلی متر تغییر

از سنگدانه جلوی ترک و دو لبه‌ی ترک راحتتر می‌توانند از هم فاصله بگیرند) دارند. در شکل (۹) نیز تغییرات نسبت ضریب شدت تنش در حالت ناهمگن به حالت همگن برای مود دوم شکست نشان داده شده است. در این حالت با افزایش  $S_2/R$  نسبت ضرایب شدت تنش در حالت ناهمگن به حالت همگن  $(K_{II(Het)}/K_{II(Hom)})$  بطور قابل ملاحظه‌ای تغییر کرده و با کاهش  $S_2/R$ ، نسبت فوق به یک مقدار مشخصی برای هر سه نمونه همگرا شده است. مجدداً دلیل تفاوت بین ضرایب شدت تنش این ۳ نمونه به دلیل متفاوت بودن توزیع سنگدانه‌ها می‌باشد. در نمونه‌های ۲ و ۳ نوک ترک به مرز سنگدانه نزدیک است بنابراین ترک تمایل دارد تا به سمت قسمت نرمتر (ماستیک) رشد نماید. بنابراین ضرایب شدت تنش مود II در این نمونه‌ها نسبت به نمونه ۳ (نوک ترک وسط سنگدانه قرار دارد و ترک تمایل دارد تا بصورت مستقیم رشد نماید) بیشتر می‌باشد.

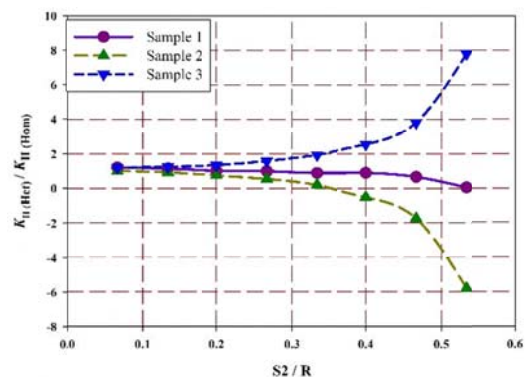
نسبت ضرایب شدت تنش در حالت ناهمگن به حالت همگن مربوط به مود اول نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با کاهش  $S_2/R$  از ۶۰ به ۳۰ پارامتر تعریف شده برای هر سه نمونه تقریباً روند ثابتی داشته است. در حالی که با کاهش بیشتر  $S_2$  (به عبارتی برای  $S_2/R < 0.3$ ) پارامتر ضرایب شدت تنش بصورت ناگهانی تغییر کرده است. از آنجا که طول ترک و موقعیت قرارگیری نوک ترک (در هر ۳ نمونه نوک ترک درون سنگدانه قرار دارد) در هر ۳ نمونه یکسان است، بنابراین اختلاف مشاهده شده بین نسبت ضرایب شدت تنش در شکل ۳ بدلیل تفاوت توزیع سنگدانه‌ها درون این ۳ نمونه می‌باشد. از آنجا که موقعیت قرارگیری نوک ترک در نمونه ۱ و ۲ به گونه‌ای است که تقریباً کل یک سنگدانه جلوی ترک قرار گرفته، این سنگدانه اجازه بازشدگی به ترک نمی‌دهد و ضرایب شدت تنش مقادیر کمتری نسبت به نمونه ۳ (که قسمت کوچکی



شکل ۷. توزیع سنگدانه‌ها برای نمونه‌های مختلف



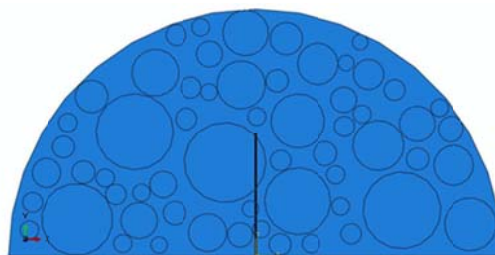
شکل ۸. تاثیر پخش شدگی سنگدانه‌ها بر ضریب شدت تنش مود اول



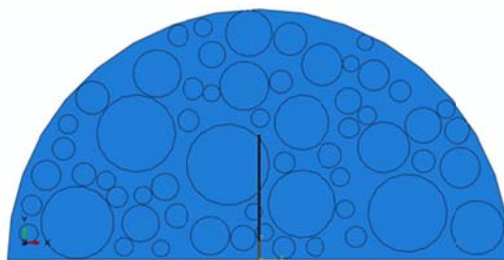
شکل ۹. تاثیر پخش شدگی سنگدانه‌ها بر ضریب شدت تنش مود دوم

دارد ضریب شدت تنش مود اول در حالت همگن از ضریب شدت تنش متناظر در حالت ناهمگن بزرگتر می‌باشد ( $K_{I(Het)}/K_{I(Hom)} < 1$ ) اما هنگامی که نوک ترک درون سنگدانه (طول ترک برابر با ۰.۲۲ و ۰.۵۲ میلی‌متر) واقع شده است، ضریب شدت تنش مود اول در حالت ناهمگن از ضریب شدت تنش متناظر در حالت همگن بزرگتر شده است.  $K_{I(Het)}/K_{I(Hom)} > 1$  دلیل این امر می‌تواند سهم بیشتر سنگدانه‌ها در تحمل بار وارد شده باشد. بنابراین هنگامیکه نوک ترک در سنگدانه قرار دارد میدان تنش نوک ترک و ضرایب شدت تنش نسبت به مدل همگن بزرگتر می‌باشد. شکل (۱۲) نیز روند تغییرات ضرایب شدت تنش مود دوم برای مدل‌های همگن و ناهمگن را نشان داده است. در این حالت چه نوک ترک درون سنگدانه قرار گرفته باشد یا درون ماستیک، افزایش  $S_2/R$  سبب کاهش  $K_{II(Het)}/K_{II(Hom)}$  شده است.

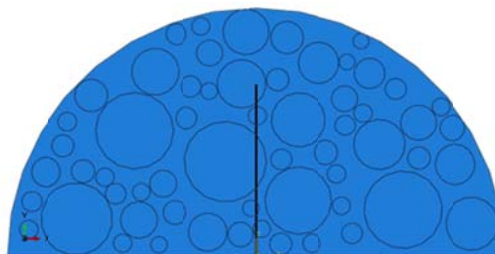
با توجه به دوفازی در نظر گرفتن مخلوط آسفالتی، محل قرارگیری نوک ترک در آن می‌تواند بر مقدار ضرایب شدت تنش تاثیر گذار باشد. برای بررسی اثر موقعیت نوک ترک، نمونه ۲ با ترک‌هایی با طول مختلف مورد تحلیل قرار گرفت بطوریکه نوک ترک هم درون سنگدانه و هم درون ماستیک قرار داشته باشد. در شکل (۱۰) موقعیت نوک ترک در نمونه ۲ برای طول ترک‌هایی برابر ۰.۲۲ میلی‌متر، ۰.۳۷ میلی‌متر و ۰.۵۲ میلی‌متر نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود، هنگامیکه طول ترک برابر با ۰.۲۲ و ۰.۵۲ میلی‌متر است، نوک ترک درون سنگدانه و هنگامیکه برابر با ۰.۳۷ میلی‌متر است، درون ماستیک قرار دارد. در شکل (۱۱) نیز تغییرات ضرایب شدت تنش مود اول و دوم برای مخلوط‌های همگن و نمونه ۲ در مقابل نسبت  $S_2/R$  نشان داده شده است. با توجه به نتایج حاصله در نمودار (۱۶) هنگامی که نوک ترک در ماستیک (طول ترک برابر با ۰.۳۷ میلی‌متر) قرار



(الف)

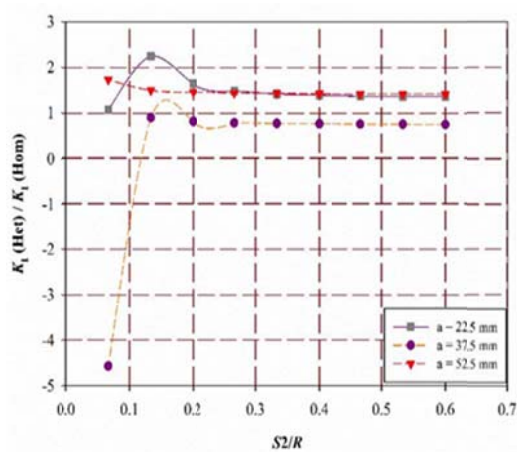


(ب)

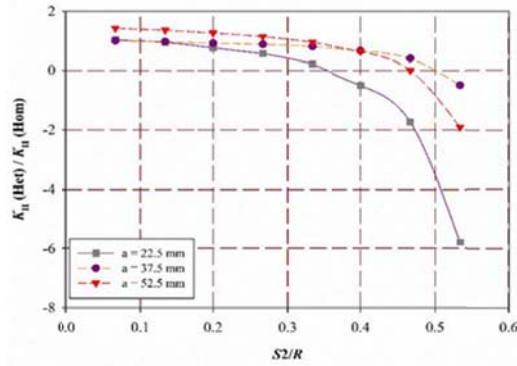


(پ)

شکل ۱۰. موقعیت قرارگیری نوک ترک به ازای طول ترک برابر (الف)  $a=۰,۲۲mm$  (ب)  $a=۰,۳۷mm$  (پ)  $a=۰,۵۲mm$



شکل ۱۱. تاثیر طول ترک و محل قرارگیری آن بر ضرایب شدت تنش مود اول

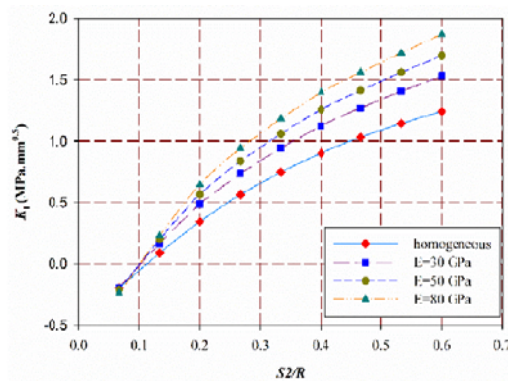


شکل ۱۲. تاثیر طول ترک و محل قرارگیری آن بر ضرایب شدت تنش مود دوم

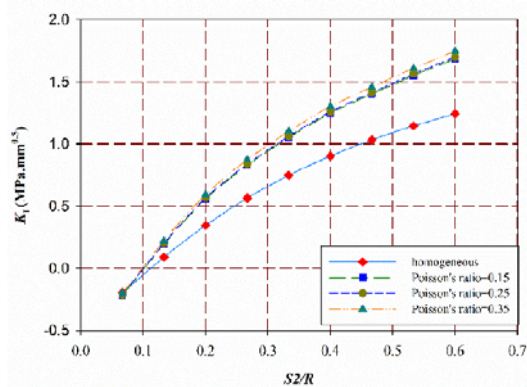
### تاثیر خواص مکانیکی سنگدانه‌ها بر ضرایب شدت تنش

شدت تنش مود دوم و در شکل (۱۵) تاثیر تغییر مدول الاستیسیته سنگدانه‌ها بر ضریب شدت تنش مود اول نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش مدول الاستیسیته سنگدانه‌ها، ضرایب شدت تنش هم در مود اول و هم مود دوم افزایش می‌یابند. دلیل این امر می‌تواند افزایش سهم سنگدانه‌ها در تحمل بار اعمالی با افزایش مدول آنها باشد. تاثیر افزایش نسبت پوآسون بر ضرایب شدت تنش در مود اول و دوم بترتیب در شکل‌های (۱۶) و (۱۷) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در هر دو حالت افزایش ضریب پوآسون، تاثیر قابل توجهی بر مقادیر ضرایب شدت تنش نوک ترک ندارد.

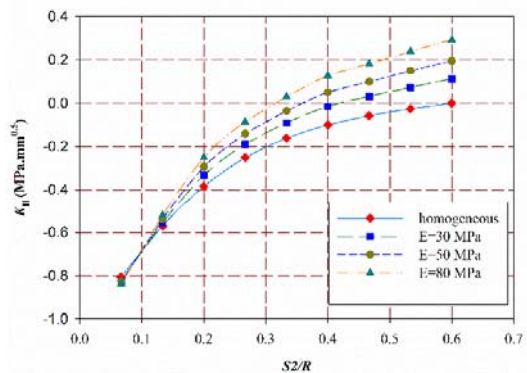
به منظور بررسی خواص مکانیکی سنگدانه‌ها و ماستیک بر ضرایب شدت تنش، نمونه ۲ انتخاب و مورد تحلیل قرار گرفت. این امر سبب می‌شود تا توزیع سنگدانه‌ها در حالت‌های مختلف یکسان باشد. جهت بررسی تاثیر مدول الاستیسیته سنگدانه‌ها بر ضرایب شدت تنش طول ترک، مدول الاستیسیته ماستیک، ضریب پوآسون ماستیک و ضریب پوآسون سنگدانه‌ها ثابت و برابر با  $a = 22.5 \text{ mm}$ ,  $E_{\text{mastic}} = 10 \text{ GPa}$ ,  $\nu_{\text{mastic}} = 0.25$  و  $\nu_{\text{agg}} = 0.25$  در نظر گرفته شده و مدول الاستیسیته سنگدانه‌ها بین ۳۰ تا ۸۰ گیگا پاسکال تغییر کرده است. لازم به ذکر است، زمانیکه طول ترک برابر با ۵.۲۲ میلی‌متر است، نوک ترک درون سنگدانه قرار دارد (شکل ۱۰ را ببینید). در شکل (۱۴) تاثیر تغییرات مدول الاستیسیته سنگدانه‌ها بر ضریب



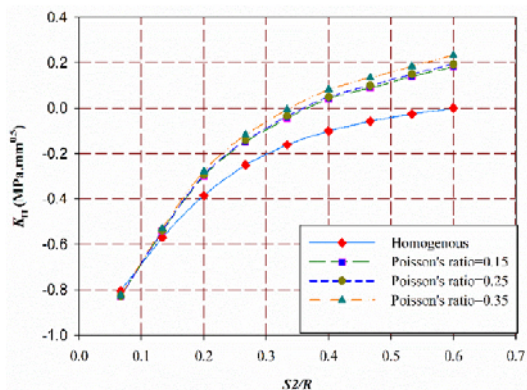
شکل ۱۳. تغییرات ضرایب شدت تنش مود اول با تغییر مدول الاستیسیته سنگدانه‌ها



شکل ۱۴. تغییرات ضریب شدت تنش مود اول با تغییر ضریب پواسون سنگدانه‌ها



شکل ۱۵. تغییرات ضریب شدت تنش مود دوم با تغییر مدول الاستیسیته سنگدانه‌ها

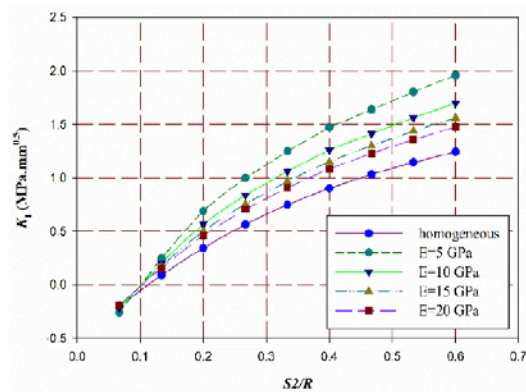


شکل ۱۶. تغییرات ضریب شدت تنش مود دوم با تغییر ضریب پواسون سنگدانه‌ها

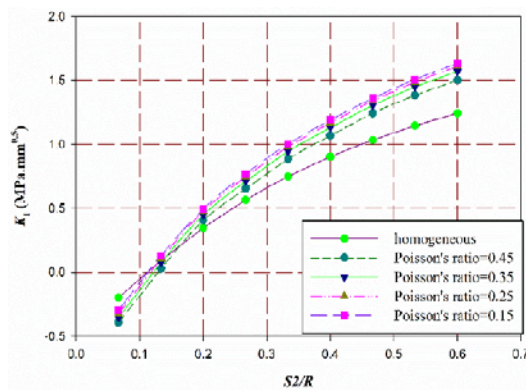
#### تأثیر خواص مکانیکی ماستیک بر ضرایب شدت تنش

همچنین با افزایش مدول الاستیسیته ماستیک، ضریب شدت تنش مود دوم متناظر نیز کاهش می‌یابد که علت آن ممکن است، تحمل بار کمتر توسط سنگدانه‌ها با افزایش مدول الاستیسیته ماستیک باشد.

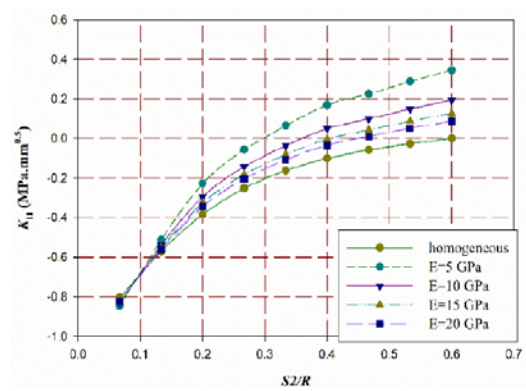
در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) تأثیر مدول الاستیک ماستیک بر ضرایب شدت تنش در مود اول و دوم نشان داده شده است. در اینجا نیز نمونه ۲ مورد تحلیل قرار گرفته است. با توجه به شکل با افزایش مدول الاستیسیته ماستیک، ضرایب شدت تنش مود I به ازای یک مقدار مشخص  $S_2/R$  کاهش یافته است.



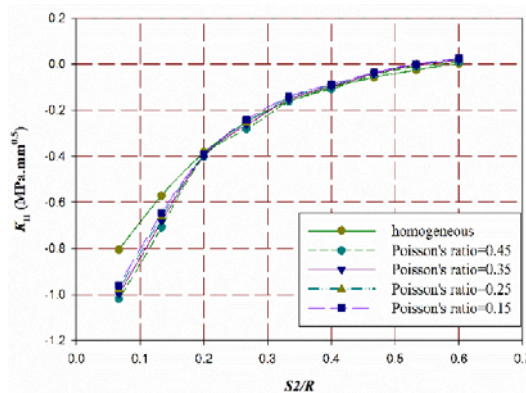
شکل ۱۷. تغییرات ضریب شدت تنش مود اول با تغییر مدول الاستیسیته ماستیک



شکل ۱۸. تغییرات ضریب شدت تنش مود اول با تغییر ضریب پواسون ماستیک



شکل ۱۹. تغییرات ضریب شدت تنش مود دوم با تغییر مدول الاستیسیته ماستیک



شکل ۲۰. تغییرات ضریب شدت تنش مود دوم با تغییر ضریب پواسون ماستیک

SCB ساخته شده در آزمایشگاه را نشان داده است. برخلاف مدلسازی همگن که در آن مسیر رشد ترک بصورت مستقیم است، در واقعیت ترک می‌تواند از مسیر منحرف شود. با مدلسازی ناهمگن مسیر انتشار ترک را می‌توان بصورت واقع بینانه‌تری پیش‌بینی کرد. در شکل (۲۲) مسیر انتشار ترک در سه نمونه با توزیع سنگدانه‌های متفاوت و همچنین در یک نمونه همگن آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، محل قرارگرفتن نوک ترک و توزیع سنگدانه‌ها در نمونه‌های SCB بر مسیر پیش بینی رشد ترک موثر بوده‌اند. علاوه بر این با توجه به مسیرهای رشد ترک بدست آمده از مدلسازی اجزا محدود می‌توان گفت که هرچند به صورت محلی مسیر رشد ترک در مدلسازی غیرهمگن و همگن متفاوت می‌باشد اما مسیر رشد کلی ترک در مدلسازی همگن و غیرهمگن مشابه می‌باشد. همچنین در مدلسازی غیرهمگن، ترک تمایل دارد تا سنگدانه‌ها را دور زند و درون مرز مشترک سنگدانه-ماستیک و همچنین ماستیک رشد نماید.

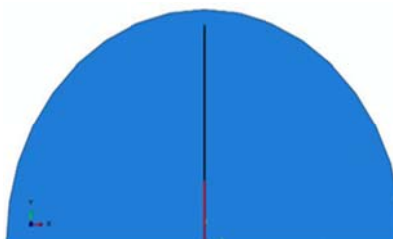
در شکل‌های (۱۹) و (۲۰) نیز تاثیر تغییر نسبت پواسون ماستیک بر ضرایب شدت تنش در مود اول و دوم در نمونه‌های ASCB نشان داده شده است. با توجه به شکل مشخص است که تغییرات نسبت پواسون ماستیک اثر قابل توجهی بر ضرایب شدت تنش مود اول و دوم نمونه‌ها نداشته است.

#### پیش بینی مسیر رشد ترک

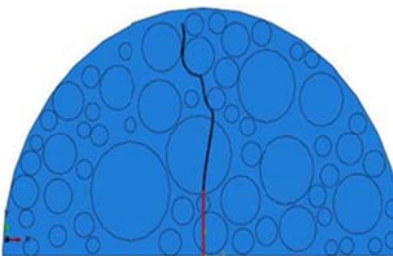
با توجه به آنکه ضرایب شدت تنش بدست آمده در مدلسازی ناهمگن مخلوط آسفالتی با مدلسازی همگن آن متفاوت است، مدلسازی ناهمگن مخلوط آسفالتی بر مسیر رشد و انتشار ترک نیز می‌تواند تاثیر بسزایی داشته باشد. در حالت مدلسازی مخلوط آسفالتی بصورت دو فازی (سنگدانه و ماستیک) با بکارگیری روش‌های تخمین و پیش بینی رشد ترک از قبیل معیار شکست بیشترین تنش محیطی (MTS)، می‌توان مسیر رشد ترک و میزان انحراف مسیر انتشار ترک را تخمین زد. شکل (۲۱) مسیر رشد ترک مود اول شکست در نمونه‌های



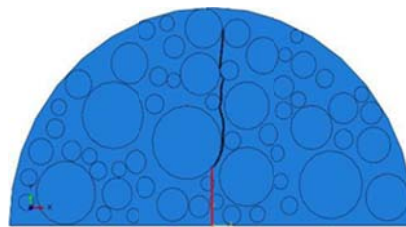
شکل ۲۱. مسیر رشد ترک آزمایشگاهی در نمونه‌های SCB تحت مود اول شکست



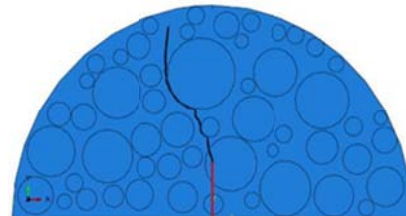
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۲۲. مسیر رشد ترک پیش‌بینی شده توسط معیار حداکثر تنش کششی در الف) نمونه همگن ب) نمونه ۱ ج) نمونه ۲ و د) نمونه ۳ تحت مود اول بارگذاری

## ۵- نتیجه‌گیری

-خواص مکانیکی مخلوط آسفالتی (از قبیل مدول الاستیته سنگدانه‌ها و مدول الاستیته ماستیک) و همچنین موقعیت قرارگیری نوک ترک، بیشترین تاثیر را بر ضرایب شدت تنش مود I/II دارند.

- ضریب پواسون سنگدانه‌ها و ماستیک تاثیر بسزایی بر رفتار ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی ندارد.

- مسیر رشد ترک با روش اجزا محدود و با کمک معیار حداکثر تنش کششی پیش‌بینی شد. نتایج نشان دادند ترک تمایل دارد تا درون مرز مشترک سنگدانه-ماستیک و ماستیک رشد نماید.

در این مقاله، به منظور بررسی رفتار رشد ترک در نمونه‌های غیر همگن آسفالتی با استفاده از "الگوریتم تولید و توزیع سنگ‌دانه‌ها" نمونه‌های آسفالتی ایجاد شدند. سپس این نمونه‌های آسفالتی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس شبیه‌سازی شدند. بر اساس تحلیل‌های المان محدود انجام‌گرفته، نتایج زیر حاصل شدند:

-ضرایب شدت تنش مدل‌سازی غیر همگن می‌توانند تا بیش از ۵۰ درصد با نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی همگن تفاوت داشته باشند.

## ۶- مراجع

-Aliha, M. R. M., Ziari, H., Sobhani Fard, E., & Jebalbarez Sarbijan, M. (2021). Heterogeneity effect on fracture parameters of a multilayer asphalt pavement structure containing a top-down crack and subjected to moving traffic loading. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 44(5), 1349-1371.

-Artamendi I, Khalid HA. A. (2006). comparison between beam and semi-circular bending fracture tests for asphalt. *Road Materials and Pavement Design*. 7(sup1),163-80.

-Aragão FT, Kim YR, Lee J, Allen DH. (2010). Micromechanical model for heterogeneous asphalt concrete mixtures subjected to fracture failure. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 23(1):30-8.

-Chen J, Wang H, Li L. (2017). Virtual testing of asphalt mixture with two-dimensional and three-

-AASHTO, T. (2013). Standard method of test for determining the fracture energy of asphalt mixtures using the semicircular bend geometry (SCB). *American Association of State and Highway Transportation Officials*, Washington 105-113.

-Aliha MR, Sarbijan MJ. (2016). Effects of loading, geometry and material properties on fracture parameters of a pavement containing top-down and bottom-up cracks. *Engineering Fracture Mechanics*. 166:182-97.

-Aliha MR, Sarbijan MJ, Bahmani A. (2017). Fracture toughness determination of modified HMA mixtures with two novel disc shape configurations. *Construction and Building Materials*. 155:789-99.

- using a heterogeneous cohesive zone discrete element model. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 20(8):552-63.
- Li XJ, Marasteanu MO. (2010). Using semi circular bending test to evaluate low temperature fracture resistance for asphalt concrete. *Experimental mechanics*. 50(7):867-76.
- Li W, Guo L. (2018). Meso-fracture simulation of cracking process in concrete incorporating three-phase characteristics by peridynamic method. *Construction and Building Materials*. 161:665-75.
- Mansourian, Ahmad, Shabnam Hashemi, and Mohammad Reza Mohammad Aliha. (2018). Evaluation of pure and mixed modes (I/III) fracture toughness of Portland cement concrete mixtures containing reclaimed asphalt pavement. *Construction and Building Materials* 178, 10-18.
- Mubaraki M, Abd-Elhady AA, Sallam HE. (2013). Mixed mode fracture toughness of recycled tire rubber-filled concrete for airfield rigid pavements. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 6(1):8-14.
- Mull MA, Stuart K, Yehia A. (2002). Fracture resistance characterization of chemically modified crumb rubber asphalt pavement. *Journal of Materials Science*. 37(3):557-66.
- Mahmoud E, Masad E, Nazarian S. (2009). Discrete element analysis of the influences of aggregate properties and internal structure on fracture in asphalt mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 22(1):10-20.
- Wang H, Wang J, Chen J. (2014). Micromechanical analysis of asphalt mixture fracture with adhesive and cohesive failure. *Engineering Fracture Mechanics*, 104-132.
- Wang H, Wang J, Chen J. (2018). Fracture simulation of asphalt concrete with randomly generated aggregate microstructure. *Road Materials and Pavement Design*. 19(7):1674-1691.
- Williams, M. L. (1997). On the stress distribution at the base of a stationary crack.
- Yin A, Yang X, Zeng G, Gao H. (2015). Experimental and numerical investigation of fracture behavior of asphalt mixture under direct shear loading. *Construction and Building Materials* 86, 21-32.
- Zhang C, Yang X, Gao H, Zhu H. (2016). Heterogeneous fracture simulation of three-point bending plain-concrete beam with double notches. *Acta Mechanica Sinica*. 29(3):232-44.
- Ziari, H., Aliha, M. R. M., Fard, E. S., & Sarbijan, M. J. (2022). Mixed mode I+ II fracture parameters and cracking trajectory of heterogeneous multilayer pavement structure containing reflective crack. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 45(10), 2958-2977.
- dimensional random aggregate structures. *International Journal of Pavement Engineering*. 18(9):824-36.
- Dai Q, Sadd MH, Parameswaran V., (2005). Shukla A. Prediction of damage behaviors in asphalt materials using a micromechanical finite-element model and image analysis. *Journal of Engineering Mechanics*. 131(7):668-77.
- Erdogan F, Sih GC. (1963). On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear. *Journal of Basic Engineering*, 85,4, 519-525.
- Kim H, Wagoner MP, Buttlar WG. (2009). Numerical the specimen size on fracture analysis concrete using a asphalt dependency of cohesive softening model. *Construction and Building Materials*. 23(5), 2112-2120 .
- Ng K, Dai Q. (2011). Investigation of fracture behavior of heterogeneous infrastructure materials with extended-finite-element method and image analysis. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 23(12):1662-71.
- Pirmohammad S, Kiani A. (2016). Effect of temperature variations on fracture resistance of HMA mixtures under different loading modes. *Materials and Structures*. 49(9):3773-84.
- Rooholamini, H., A. Hassani, and M. R. M. Aliha (2018). Fracture properties of hybrid fibre-reinforced roller-compacted concrete in mode I with consideration of possible kinked crack. *Construction and Building Materials* 187, 248-256.
- Ren J, Sun L. (2017). Characterizing air void effect on fracture of asphalt concrete at low-temperature using discrete element method. *Engineering Fracture Mechanics* .170, 23-43.
- Saha G, Biligiri KP. (2016). Homothetic behaviour investigation on fracture toughness of asphalt mixtures using semicircular bending test. *Construction and Building Materials*. 114, 423-433.
- Stewart CM, Oputa CW, Garcia E. (2018). Effect of specimen thickness on the fracture resistance of hot mix asphalt in the disk-shaped compact tension (DCT) configuration. *Construction and Building Materials*. 160:487-496.
- Somé SC, Feeser A, Pavoine A. (2018). Numerical and experimental investigation of mode I cracking of asphalt concrete using semi-circular bending test. *Construction and Building Materials*. 169:34-46.
- Salemi M, Wang H. (2018). Image-aided random aggregate packing for computational modeling of asphalt concrete microstructure. *Construction and Building Materials*. 177, 467-477.
- Kim H, Wagoner MP, Buttlar WG. (2008). Simulation of fracture behavior in asphalt concrete

# Simulation of Heterogeneous Asphalt Mixture Using Random Aggregate Generation and Packing Algorithm

*Majid Jebalbarezi, Assistant Professor, Department of Civil Engineering,  
University of Jiroft, Jiroft, Iran.*

*Ehsan Sobhani Fard, Ph.D., Student, School of Civil Engineering, Iran University  
of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.*

*Hassan Ziari, Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science  
and Technology (IUST), Tehran, Iran.*

*E-mail: m.jebalbarezi@gmail.com*

Received: February 2024- Accepted: June 2024

## **ABSTRACT**

In this study, the cracking growth behavior of heterogeneous asphalt mixture was investigated numerically. To reach this goal, at first, a numerical asphalt mixture sample was created using the random aggregate generation and packing algorithm. Then using extensive two-dimensional finite element analyses, the effects of crack length, elastic modulus and Poisson's ratios of aggregates and mastic parts, distribution of aggregates, and crack tip location on stress intensity factors (KI and KII) was investigated. The results show that crack tip location, the elastic modulus of aggregates and mastic parts has a significant effect on the magnitude and sign of stress intensity factors while their Poisson's ratios had no sound influence on stress intensity factors of modes I and II. When the crack tip is located inside the aggregates, the mode I stress intensity factor of crack will be greater than that of homogeneous case. Conversely, if the crack tip is located in the mastic part, the mode I geometry factor of heterogeneous models will be less than that of the homogenous model. The crack growth path was also predicted using the maximum tensile stress criterion. The results show that the aggregates could change the crack growth path locally; however, the general direction of crack growth in heterogeneous and homogeneous modeling is the same.

**Keywords:** Mixed Mode I/II Stress Intensity Factors, Two-Phase Aggregate/Mastic Asphalt Mixtures, Crack Trajectory, Mechanical Property Effects