

## شبیه‌سازی رفتار ترک خوردگی مخلوط آسفالتی با بکارگیری مدلسازی غیرهمگن

### مبتنی بر الگوریتم تولید و توزیع تصادفی سنگدانه‌ها

#### مقاله علمی-پژوهشی

مجید جبالبارزی\*، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جیرفت، جیرفت، 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](mailto:m.jebalbarez@gmail.com)

دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۲ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۵

صفحه ۵۲۰-۵۰۱

#### چکیده

مخلوط آسفالتی یک ماده کامپوزیت و متشکل از فضای خالی، قیر و سنگدانه می‌باشد. خواص مکانیکی هر یک از این اجزا بر رفتار ترک خوردگی مخلوط آسفالتی تاثیر می‌گذارند. در این تحقیق سعی شده تا با استفاده از مدلسازی غیرهمگن رفتار ترک خوردگی مخلوط آسفالتی بررسی گردد. بدین منظور ابتدا با استفاده از الگوریتم تولید و توزیع تصادفی سنگدانه‌ها، نمونه‌های عددی ایجاد می‌گردند. سپس، با بکارگیری روش المان محدود، تاثیر عوامل مختلف از جمله مدول الاستیسیته سنگدانه‌ها و ماستیک، نسبت پواسون سنگدانه‌ها و ماستیک، توزیع سنگدانه‌ها؛ شکل سنگدانه‌ها، فضای خالی و موقعیت نوک ترک بر ضرایب شدت تنش بررسی می‌گردند. نتایج نشان می‌دهند ضرایب شدت تنش بدست آمده از مدلسازی غیرهمگن به مقدار قابل توجهی با ضرایب شدت تنش بدست آمده از مدلسازی همگن متفاوت می‌باشند. هنگامیکه نوک ترک درون سنگدانه‌ها می‌باشد، ضرایب شدت تنش بدست آمده از مدلسازی غیرهمگن بیشتر از ضرایب شدت تنش بدست آمده از مدلسازی همگن می‌باشند. درحالی‌که اگر نوک ترک درون ماستیک باشد، مقادیر ضرایب شدت تنش بدست آمده از مدلسازی همگن بیشتر می‌باشند. همچنین نتایج نشان می‌دهد که موقعیت نوک ترک، مدول الاستیسیته ماستیک و سنگدانه‌ها تاثیر بسزایی بر ضرایب شدت تنش دارند. علاوه بر این مسیر رشد ترک با استفاده از معیار حداکثر تنش کششی پیش‌بینی گردید. براساس نتایج مسیر کلی رشد ترک برای نمونه‌های همگن و غیرهمگن یکسان می‌باشد. در صورتیکه به صورت محلی، مسیر رشد ترک متفاوت می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: غیرهمگن، الگوریتم تولید و توزیع تصادفی سنگدانه‌ها، مسیر رشد ترک، ضرایب شدت تنش، تاثیر خواص مکانیکی

#### ۱-مقدمه

است (Aliha et al. 2014; Fakhri, Kharrazi and Aliha, 2018; Ziari et al. 2019; Aliha et al. 2015). در این شرایط می‌توان از مکانیک شکست الاستیک خطی به عنوان ابزاری قدرتمند جهت بررسی رفتار ترک خوردگی مخلوط آسفالتی

هر ساله هزینه‌های هنگفتی صرف تعمیر و نگهداری راهها می‌شود. ترک خوردگی یکی از شکل‌های رایج خرابی در روسازی‌های می‌باشد. این خرابی بیشتر در مناطق سردسیر که آسفالت به صورت الاستیک و شکننده رفتار می‌کند، شایع

شده‌اند. این جنبه‌های غیرهمگن مخلوط آسفالتی بر ضرایب شدت تنش و رفتار ترک‌خوردگی مخلوط آسفالتی تاثیر گذارند. اخیراً تحقیقات زیادی بمنظور تخمین ضرایب شدت تنش بحرانی انجام گرفته است (Artamendi and Khalid, 2006; Li and Marasteanu, 2010; Mull, Stuart and Yehia, 2002; Saha, and Biligiri, 2016; Stewart, Oputa and Garcia, 2018; Somé, Feeser and Pavoine, 2018) در اکثر این تحقیقات از قطعه‌ی نیم دیسک با ترک لبه‌ای تحت بار خمشی سه نقطه‌ای (SCB) جهت تخمین چقرمگی شکست مخلوط آسفالتی استفاده شده است. در این تحقیقات از رابطه‌ی زیر بمنظور تعیین ضرایب شدت تنش بحرانی استفاده گردیده است:

$$K_{Ic} = \sigma_0 Y_I \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

$$K_{IIc} = \sigma_0 Y_{II} \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

$$\sigma_0 = \frac{P_c}{2Rt} \quad (3)$$

هستند. ضرایب شکل در یک قطعه‌ی SCB به هندسه و شرایط بارگذاری وابسته می‌باشند. استاندارد آشتو بمنظور تخمین مقادیر  $Y_I$  رابطه‌ی زیر را پیشنهاد می‌دهد.

$$Y_I = 4.782 + 1.219 \left(\frac{a}{R}\right) + 0.063 \exp(7.045 \left(\frac{a}{R}\right))$$

(Wagoner and Buttlar, 2009; Kim, Buttlar, 2009) ابتدا با استفاده از روش پردازش تصویر، هندسه نمونه آسفالتی را ایجاد کردند، سپس با بکارگیری روش اجزا گسسته، مدل ناحیه چسپناک ترک، چگونگی ایجاد و رشد ترک را در قطعه‌های آسفالتی پیش‌بینی کردند و نشان دادند که بار حداکثر در قطعات آزمایشگاهی و مدلسازی عددی به خوبی با یکدیگر هم‌خوانی دارند. ژائو و همکارانش (Zhao et al. 2019) با بکارگیری روش پردازش تصویر و مدلسازی المان محدود، مقاومت مخلوط آسفالتی را تخمین زدند. آنها بمنظور شبیه‌سازی رفتار ترک‌خوردگی از روش ناحیه چسپناک استفاده کردند و نشان دادند که نتایج آزمایشگاهی به خوبی با نتایج مدلسازی سازگار است. ژائو و همکارانش (Zhao et al. 2016) از تصاویر سی تی اسکن و مدل ناحیه چسپناک جهت مدلسازی ۳ بعدی غیرهمگن مخلوط آسفالتی بازیافتی استفاده کردند. آنها رفتار رشد ترک‌خوردگی مخلوط آسفالتی را با ۳ پارامتر بار-خط جابجایی، بار-جابجایی بازشدگی دهانه ترک و بار-جابجایی بازشدگی نوک ترک بررسی

استفاده نمود. در مکانیک شکست از ضرایب شدت تنش بمنظور توصیف میدان تنش نوک ترک استفاده می‌گردد. این ضرایب به خواص مصالح، هندسه قطعه آزمایشگاهی، طول و زاویه ترک بستگی دارد. مخلوط آسفالتی یک ماده کامپوزیت و متشکل از سنگدانه‌ها، فضای خالی و قیر می‌باشد. خواص مکانیکی اجزا مختلف مخلوط آسفالتی کاملاً با یکدیگر متفاوت می‌باشند. سنگدانه‌ها به صورت الاستیک رفتار می‌کنند، در حالیکه قیر در دمای بالا بصورت ویسکوالاستیک و در دمای زیر صفر به صورت الاستیک رفتار می‌کند. همچنین، سنگدانه‌ها و فضای خالی با اشکال مختلف و به صورت تصادفی درون نمونه آسفالتی پخش

که در این روابط  $K_{Ic}$  و  $K_{IIc}$  به ترتیب ضرایب شدت تنش بحرانی مود I و II می‌باشند.  $R$  شعاع و  $t$  ضخامت قطعه‌ی SCB و  $a$  طول ترک قائم می‌باشند.  $P_c$  حداکثر بار تحمل شده توسط نمونه آسفالتی است.  $Y_I$  و  $Y_{II}$  ضرایب شکل مودهای I, II

تاکون در تحقیقات بسیاری از مدلسازی غیرهمگن جهت ارزیابی رفتار ترک‌خوردگی مخلوط آسفالتی استفاده شده است. ۲ روش مختلف جهت مدلسازی غیرهمگن مخلوط آسفالتی وجود دارد. در روش اول، محققان از روش پردازش تصویر بمنظور تعیین نحوه پخش‌شدگی سنگدانه‌ها استفاده می‌کنند. سپس، با استفاده از روش المان محدود یا اجزا گسسته، رفتار ترک‌خوردگی مورد مطالعه قرار می‌دهند. برای مثال آراگو و همکارانش (Aragão et al. 2011) جهت بررسی رفتار ترک‌خوردگی و چگونگی ایجاد و گسترش ترک‌های مویی از مدلسازی غیرهمگن استفاده نمودند. آنها ابتدا با روش‌های پردازش تصویر، شکل و موقعیت قرارگیری سنگدانه‌ها را مشخص نمودند. سپس، با استفاده از روش المان محدود و بکارگیری مدل ناحیه چسپناک، تاثیر چگونگی پخش‌شدگی سنگدانه‌ها، انرژی شکست و مقاومت سنگدانه‌ها را بر رفتار ترک‌خوردگی بررسی کردند. آنها نشان دادند نتایج مدلسازی به خوبی با نتایج آزمایشگاهی منطبق هستند. کیم و همکارانش (Kim, Wagoner and Buttlar, 2008; Aragão et al. 2011; Kim,

سنگدانه‌ها، نمونه‌های عددی آسفالتی ایجاد کردند. سپس، با استفاده از روش‌های المان محدود توسعه یافته و ناحیه چسپناک نوک ترک، رفتار ترک‌خوردگی مخلوط آسفالتی را بررسی کردند. آنها نشان دادند، افزایش شکستگی سنگدانه‌ها، احتمال ایجاد و رشد ترک بیشتر می‌شود، هرچند مخلوط آسفالتی ساخته شده با این نوع سنگدانه‌ها مقاومت بهتری در برابر شیارشدگی دارد. ژو و همکارانش (Xue et al. 2020) با بکارگیری مدل‌سازی غیرهمگن به این نتیجه رسیدند که اندازه سنگدانه‌ها، دما و مقاومت سنگدانه‌ها تاثیر بسزایی بر مسیر رشد ترک و همچنین رفتار سخت‌شوندگی و نرم‌شوندگی مخلوط آسفالتی دارد. آنها بدین منظور نمونه‌های آسفالتی غیرهمگن را با استفاده از الگوریتم توزیع و تولید سنگدانه‌ها ایجاد و سپس با بکارگیری مدل ناحیه چسپناک، رفتار ترک‌خوردگی مخلوط آسفالتی را بررسی کردند. یین و همکارانش (Yin et al. 2011) ابتدا با استفاده از الگوریتم تولید و توزیع سنگدانه‌ها، نمونه‌های آسفالتی را ایجاد کردند. آنها سنگدانه‌ها را دایره‌ای شکل در نظر گرفتند و نشان دادند زمانیکه نوک ترک به سنگدانه‌ها نزدیک می‌شود، تمرکز تنش نزدیک ترک سبب می‌شود، تا ترک به سمت مرز مشترک سنگدانه-ماستیک تغییر جهت می‌دهد. رن و سان (Ren and Sun 2017) جهت بررسی تاثیر مشخصات فضای خالی (شامل تخلخل، اندازه و توزیع حباب‌ها) بر رفتار رشد ترک در مخلوط‌های آسفالتی از مدل‌سازی دو بعدی اجزا گسسته کمک گرفتند. براساس نتایج پژوهش آنها، با افزایش تخلخل و اندازه حباب‌ها، چقرمگی شکست مخلوط آسفالتی کاهش می‌یابد. در تحقیق دیگریکه توسط یین و همکارانش (Yin et al. 2015) انجام شد، تاثیر دما بر رفتار ترک‌خوردگی مخلوط آسفالتی مورد بررسی قرار گرفت. آنها نشان دادند، که در دمای زیر صفر ممکن است ترک از میان سنگدانه‌ها عبور کند. ما و همکارانش تاثیر مقدار، توزیع، اندازه و جهت فضای خالی را بر عمر خستگی مخلوط آسفالتی با مدل‌سازی مدل‌سازی سه بعدی المان محدود بررسی کردند. آنها نشان دادند که با افزایش مقدار و اندازه فضای خالی، عمر خستگی مخلوط آسفالتی کاهش می‌یابد. تنگ و همکارانش (Teng et al. 2021) به منظور بررسی پدیده ترک‌خوردگی مخلوط آسفالتی در دمای پایین، یک تیر با ترک لبه‌ای را به صورت عددی مورد تحلیل قرار دادند. بدین منظور ابتدا یک نمونه آسفالتی را با کمک الگوریتم‌های تولید و

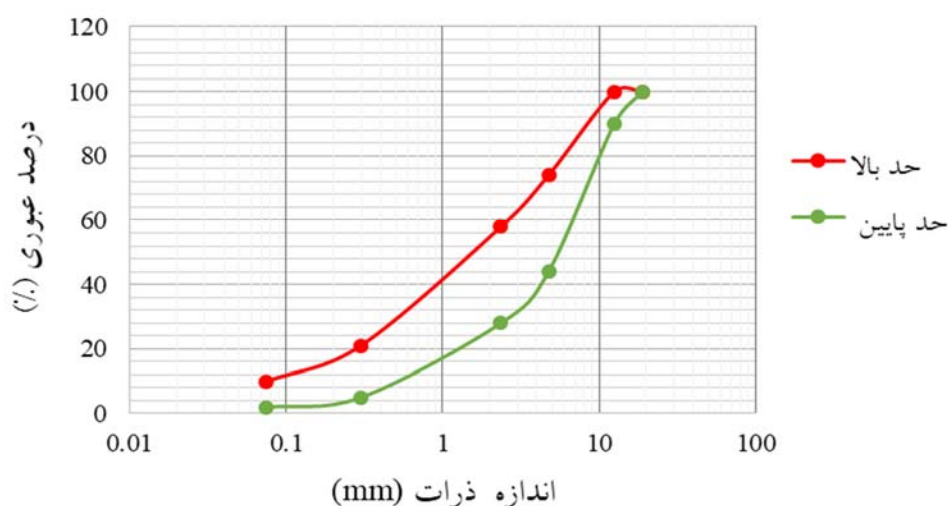
کردند. گائو و همکارانش (Gao, Yang and Zhang 2015) با بکارگیری روش اجزا گسسته، چگونگی رشد ترک در نمونه‌های آسفالتی تحت خمش ۳ نقطه‌ای را بررسی کردند. آنها تاثیر پخش‌شدگی سنگدانه‌ها و همچنین موقعیت ترک اولیه را بررسی کردند و نشان دادند که ترک تمایل دارد تا درون ماستیک و یا مرز مشترک ماستیک-سنگدانه رشد نماید. کولمن و همکارانش (Kollmann et al. 2019; Kollmann et al. 2019) استفاده از روش‌های مبتنی بر پردازش تصویر و بکارگیری روش المان محدود و مدل ناحیه چسپناک ترک، مخلوط آسفالتی را به صورت غیرهمگن مدل‌سازی نمودند. آنها تاثیر دما و شرایط تکیه‌گاهی را بررسی کرده و نشان دادند که با استفاده از مدل‌سازی المان محدود به خوبی می‌توان رفتار ترک‌خوردگی مخلوط آسفالتی را پیش‌بینی نمود. سان و همکارانش (Sun et al. 2019) بمنظور مطالعه ترک‌های بالا-پایین قسمتی از یک روسازی آسفالتی را با بکارگیری مدل ناحیه چسپناک، به صورت غیرهمگن مدل‌سازی کرد. روسازی‌های مدل‌سازی شده دارای ۲ نوع اساس تثبیت شده با سیمان و اساس شنی بودند. آنها نشان دادند، تنش کششی عرضی در لبه تایر و نزدیکی سطح روسازی عامل اصلی ایجاد ترک‌های بالا-پایین است. در روسازی آسفالتی دارای اساس تثبیت شده با سیمان ترک‌های خستگی بیشتر در سطح روسازی شکل گرفته و به سمت پایین رشد می‌نمایند. در حالیکه، در روسازی آسفالتی با اساس شنی ترک‌های خستگی بیشتر در پایین لایه آسفالتی تشکیل شده و به سمت بالا گسترش پیدا می‌کنند. دوو و همکارانش (Du et al. 2020) با مدل‌سازی المان محدود و بکارگیری مدل ناحیه چسپناک، مخلوط آسفالتی را به صورت غیرهمگن مدل‌سازی کردند. آنها نشان دادند که طبیعت غیرهمگن مخلوط آسفالتی، سبب تمرکز تنش قابل توجه در اثر بارگذاری می‌شود که ممکن است یکی از پارامترها اصلی تاثیرگذار بر رفتار ترک‌خوردگی مخلوط آسفالتی باشد. در حالیکه در روش دوم جهت مدل‌سازی غیرهمگن مخلوط آسفالتی، ابتدا سنگدانه‌ها به طور تصادفی تولید و توزیع می‌شوند. سپس با مدل‌سازی المان محدود یا اجزا گسسته نمونه آسفالتی، رفتار ترک‌خوردگی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. برای مثال، وانگ و همکارانش (Wang, Wang and Chen 2014) بمنظور پیش‌بینی چگونگی ایجاد و گسترش ترک در مخلوط آسفالتی غیرهمگن، ابتدا با استفاده از الگوریتم‌های تولید و توزیع

تنش کششی پیش‌بینی و با مسیر رشد ترک بدست آمده از مدل‌سازی همگن مقایسه شد.

### الگوریتم توزیع و تولید سنگدانه‌ها

اندازه سنگدانه‌ها در مخلوط آسفالتی بسیار متفاوت است. اندازه این سنگدانه‌ها در بازه کوچکتر از نانومیلیمتر تا بزرگتر از چند سانتیمتر می‌باشد. شکل ۱ نمودار دانه‌بندی شماره ۴ آیین‌نامه روسازی روسازی ایران را نشان می‌دهد که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. تعداد سنگدانه‌های ریزدانه در این جدول بسیار بیشتر از سنگدانه‌های درشت‌دانه می‌باشد. مدل‌سازی همه‌ی سنگدانه‌ها باعث افزایش هزینه و زمان محاسبات می‌شود و در عمل غیرممکن می‌باشد. بمنظور حل این مشکل، محققان تنها سنگدانه‌های درشت و ماستیک (که شامل ریزدانه‌ها، فضای خالی و قیر است) را مدل‌سازی می‌کنند. در تحقیقات مختلف برای مثال لی و همکارانش (Li and Metcalf 2005) سنگدانه‌های کوچکتر از ۴/۷۵ میلیمتر را به عنوان درشت‌دانه در نظر گرفتند، در حالیکه کیم و همکارانش (Kim, Wagoner and Buttler, 2009; Kim, Buttler, 2009) ۲/۳۶ میلیمتر را به عنوان درشت‌دانه در نظر گرفتند. در این تحقیق سنگدانه‌های بزرگتر از ۲/۳۶ میلیمتر به عنوان درشت‌دانه در نظر گرفته شده و مدل‌سازی شدند.

توزیع سنگدانه‌ها به صورت عددی تهیه کردند. سپس، با استفاده از روش المان محدود پدیده گسترش ترک را در این نمونه‌ها مورد مطالعه قرار دادند. آنها نشان دادند که با کاهش دما ترک تمایل بیشتری دارد تا به صورت عمودی رشد و گسترش پیدا کند. از طرف دیگر، با کاهش دما، سرعت رشد ترک در ماستیک افزایش می‌یابد. دوو و همکارانش (Du et al. 2021) پدیده ایجاد و گسترش ترک در ۳ نوع مخلوط آسفالتی با دانه‌بندی پیوسته، باز و متخلخل را مورد بررسی قرار دادند. آنها بدین منظور از مدل‌سازی ناهمگن و روش اجزا گسسته استفاده کرده و نشان دادند که تعداد ترک‌های مویی ایجاد شده در مخلوط آسفالتی با دانه‌بندی پیوسته نسبت به سایر انواع مخلوط‌های آسفالتی بیشتر می‌باشد. هدف این تحقیق تعیین پارامترهای شکست مخلوط آسفالتی با بکارگیری مدل‌سازی غیرهمگن می‌باشد. بدین منظور ابتدا با استفاده از الگوریتم تولید و توزیع تصادفی سنگدانه‌ها، نمونه‌های عددی ایجاد می‌گردند. سپس، این نمونه‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس<sup>۱</sup> مورد تحلیل قرار گرفته و پارامترهای شکست مخلوط آسفالتی تخمین زده می‌شوند. تاثیر عوامل مختلفی از جمله مدول الاستیسیته ماستیک و سنگدانه‌ها، نسبت پواسون ماستیک و سنگدانه‌ها، توزیع سنگدانه‌ها، شکل سنگدانه‌ها، فضای خالی و زاویه ترک بر ضرایب شدت تنش مود I, II مورد ارزیابی قرار گرفت. در مرحله‌ی بعد مسیر رشد ترک با استفاده از معیار حداکثر



شکل ۱. نمودار دانه بندی سنگدانه‌ها

قطعه‌ی آسفالتی (در اینجا قطعه‌ی SCB) قرار داشته باشد و از طرفی با سنگدانه‌های دیگر تلاقی نداشته باشد. این دو شرط توسط معادلات زیر بررسی می‌شود.

$$\sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2} \geq R_i + R_j \quad (5)$$

$$\sqrt{X_i^2 + Y_i^2} + R_i \leq R \quad (6)$$

در صورتیکه هر کدام از شرایط بالا برقرار نباشد، سنگدانه حذف شده و سنگدانه‌ی جدید تولید می‌شود. این روش تا تا جایی که نامعادله زیر برقرار گردد، تکرار می‌گردد.

$$A_{i \min} \leq \sum_{j=1}^{N_i} A_{ij} \leq A_{i \max} \quad (7)$$

(Wang, Wang and Chen 2014). در این تحقیق نیز سنگدانه‌ها به صورت دایره‌ای در نظر گرفته شدند، هرچند در ادامه تاثیر شکل سنگدانه‌ها نیز بر پارامترهای شکست مورد بررسی قرار گرفت.

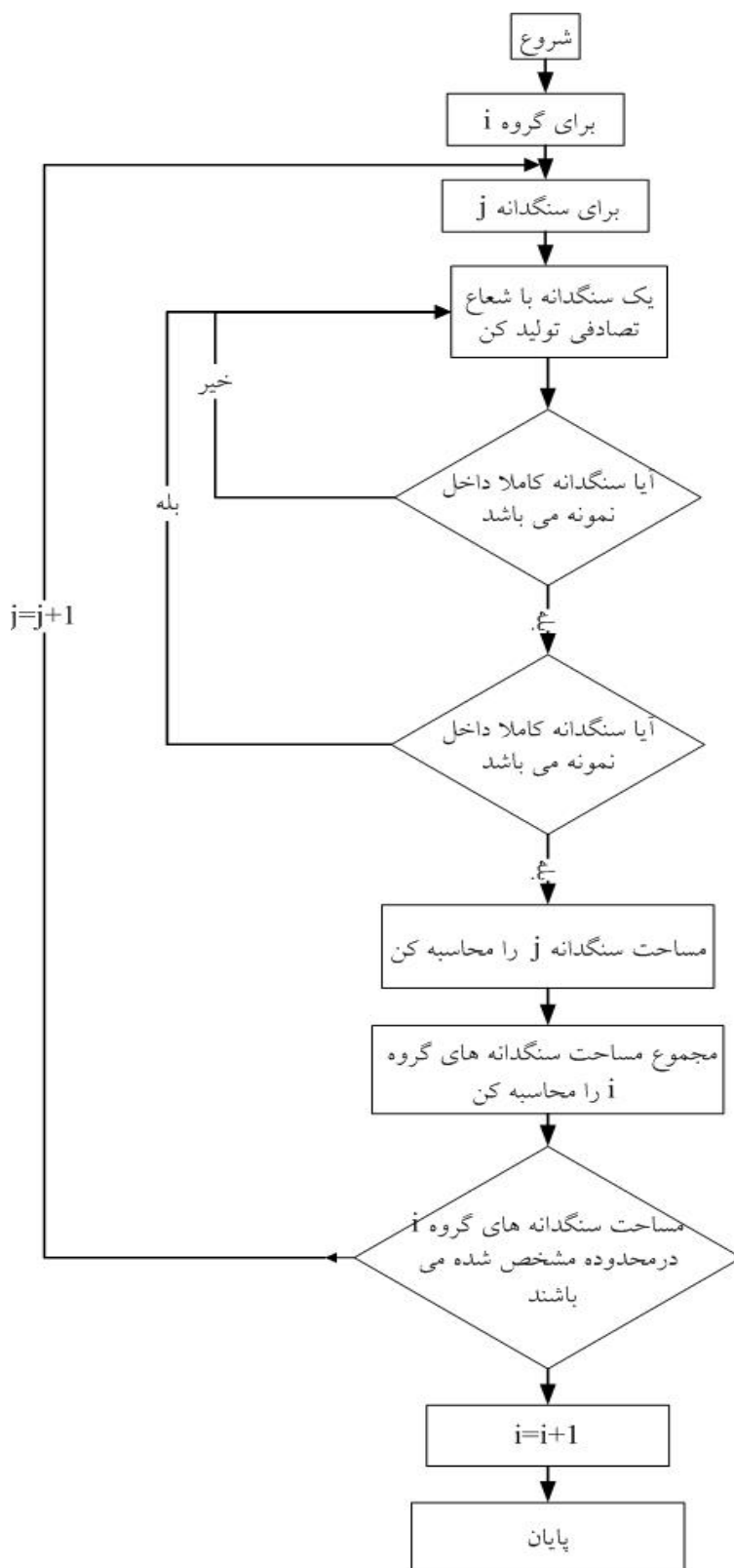
توانایی ایجاد موده‌های ترکیبی I/II بسیار رایج است. شکل ۳ هندسه و شرایط بارگذاری قطعه‌ی SCB را نشان می‌دهد. قطعه SCB یک نیم دایره به شعاع  $R$  و ضخامت  $t$  می‌باشد که دارای ترکیبی به طول  $a$  و با زاویه  $\alpha$  نسبت به راستای قائم می‌باشد. این قطعه تحت بار خمشی سه نقطه‌ای قرار می‌گیرد. فاصله ۲ تکیه‌گاه زیرین برابر با  $2S$  می‌باشد. در یک قطعه‌ی همگن، زمانیکه ترک به صورت قائم می‌باشد، ترک تحت مود I بارگذاری می‌باشد. با تغییر زاویه ترک نسبت به راستای قائم، ترک تحت مود ترکیبی I/II قرار می‌گیرد. همچنین به ازای یک زاویه خاص، ترک تحت مود II خالص قرار می‌گیرد. در این تحقیق، ضخامت و فاصله‌ی ۲ تکیه‌گاه زیرین، ثابت و برابر با  $2S=45\text{mm}$  و  $t=15\text{mm}$  در نظر گرفته شد.

شکل ۲ الگوریتم تولید و توزیع سنگدانه‌ها را نشان می‌دهد. هر بازه دانه‌بندی (شکل ۱)، در این الگوریتم به عنوان یک گروه در نظر گرفته شده است. این الگوریتم یک سنگدانه با شعاع و موقعیت تصادفی تولید می‌کند، این سنگدانه باید درون مرزهای

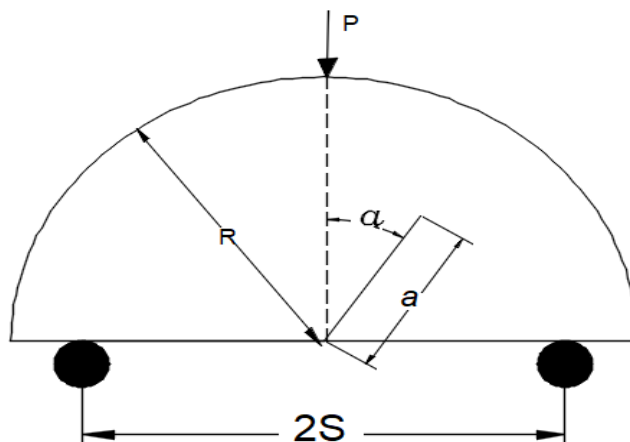
در این رابطه  $A_{i \min}$  و  $A_{i \max}$  به ترتیب کمترین و بیشترین مساحت تجمعی سنگدانه‌ها با توجه به دانه‌بندی شکل (۱) و  $A_{ij}$  مساحت سنگدانه  $j$  در گروه  $i$  می‌باشد. در بسیاری از تحقیقات با ساده سازی هندسه سنگدانه‌ها، آنها را به صورت دایره‌ای و یا چند ضلعی مدلسازی شدند (Yin et al. 2015; Yin et al. 2011).

#### هندسه قطعه‌ی آسفالتی و مدلسازی المان محدود

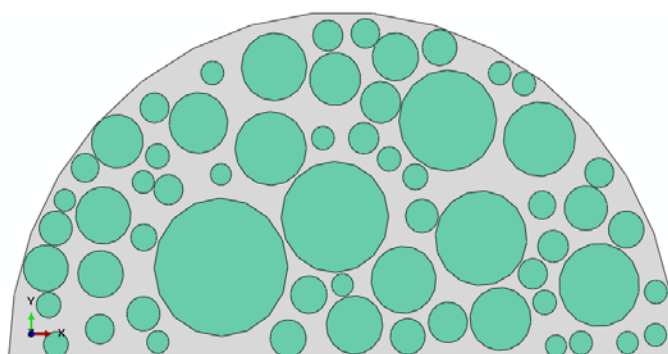
محققان از روش‌ها و قطعات آزمایشگاهی متفاوتی متعددی جهت بررسی رفتار شکست مخلوط آسفالتی استفاده کردند که از جمله آنها می‌توان به تیر با ترک لبه‌ای و تحت بار خمشی سه و چهار نقطه‌ای<sup>۲</sup> (Artamendi and Khalid, 2006; Wills, Caro, Braham, 2019). قطعه‌ی نیم دیسک با ترک لبه‌ای تحت بار خمشی سه نقطه‌ای<sup>۳</sup> (Wang, Wang and Chen 2018). آزمایش کشش غیرمستقیم<sup>۴</sup> (Kollmann et al. 2019). آزمایش نمونه متراکم دیسک شکل کششی<sup>۵</sup> (Kim, Wagoner and Buttlar, 2009; Kim, Buttlar, 2009). قطعه ترکدار دیسک خمشی<sup>۶</sup> (Aliha, Sarbijan and Bahmani 2017) اشاره کرد. در این میان این میان بکارگیری قطعه‌ی SCB به دلیل شرایط راحتی ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی و میدانی، بارگذاری ساده و همچنین



شکل ۲. الگوریتم تولید و توزیع تصادفی سنگدانه‌ها



شکل ۳. هندسه قطعه SCB



شکل ۴. قطعه‌ی غیرهمگن تولید شده توسط الگوریتم تولید و توزیع تصادفی سنگدانه‌ها

بررسی رفتار ترک‌خوردگی مخلوط آسفالتی در دمای زیر صفر می‌باشد فرض شد، سنگدانه‌ها و ماستیک به صورت الاستیک رفتار می‌کنند. شایان ذکر است که این فرضیه در تحقیقات زیادی از جمله استاندارد آشتو<sup>۷</sup> جهت تخمین ضرایب شدت تنش بحرانی مورد استفاده قرار گرفته است. جدول ۱ خواص مکانیکی ماستیک و سنگدانه‌ها را نشان می‌دهد، این مقادیر از تحقیقات پیشین استخراج گردیده است. (Eissa and Kazi 1988; Gercek 2007; Kassem, Grasley and Masad 2017)

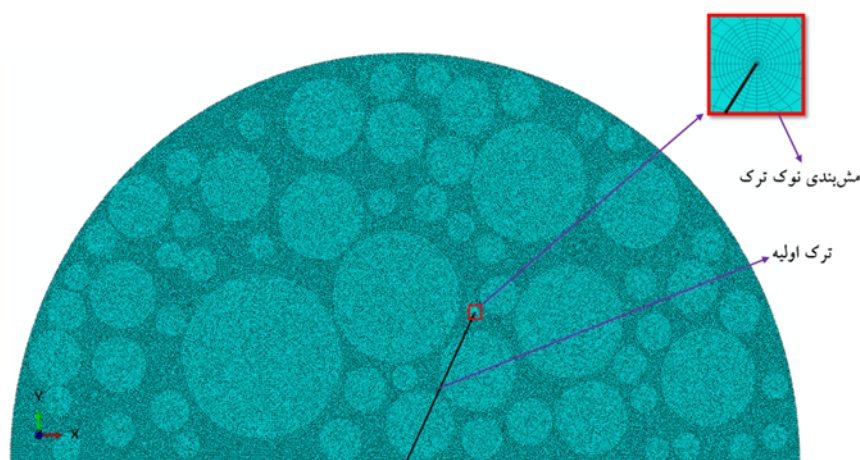
شکل ۴ یک مدل غیرهمگن مخلوط آسفالتی را نشان می‌دهد. چگونگی پخش سنگدانه‌ها در این نمونه به کمک الگوریتم توضیح داده شده در قسمت قبل تعیین شده است. در مدلسازی فرض شد که سنگدانه‌ها و ماستیک کاملاً به یکدیگر چسبیده‌اند. همچنین همان‌گونه که قبلاً ذکر شد، سنگدانه‌ها و ماستیک خواص مکانیکی متفاوتی دارند، سنگدانه‌ها الاستیک هستند، در صورتیکه رفتار ماستیک به دما وابسته است. ماستیک در دمای بالای صفر، به صورت ویسکوالاستیک و در دمای زیر صفر به صورت الاستیک رفتار می‌کند. از آنجا که هدف این تحقیق

جدول ۱. خواص مکانیکی مصالح مخلوط آسفالتی

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

تکین استفاده شد. همچنین از تعداد بسیار بیشتری المان ریز در اطراف نوک ترک استفاده گردید. شکل ۵ مدل مش بندی شده و یک تصویر بزرگنمایی شده از المان های از المان های ریز اطراف نوک ترک را نمایش می دهد.

بمنظور بررسی اثرات جنبه ها غیر همگن مخلوط آسفالتی بر مقادیر ضرایب شدت تنش، مدل های المان محدود دوبعدی در نرم افزار المان محدود آباکوس ایجاد گردید. در مدلسازی انجام شده از ۲۵۰۰۰۰ المان CPE8R استفاده شد. برای مدلسازی شرایط تکینگی تنش در اطراف ترک از المان های سینگولار یا



شکل ۵. قطعه مش بندی شده

#### پارامترهای شکست و تعیین مسیر رشد ترک

ویلیامز از سری نامتناهی زیر متناهی زیر بمنظور توصیف میدان تنش و کرنش نوک ترک استفاده کرد (Williams 2015).

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

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{2\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ K_I \sin \theta + K_{II} (3\cos \theta - 1) \right] \quad (9)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \right] \quad (10)$$

آسفالتی به خواص مکانیکی ماستیک و سنگدانه ها، چگونگی توزیع سنگدانه ها (D)، موقعیت نوک ترک (O) (در ماستیک و یا سنگدانه ها)، زاویه ترک ( $\alpha$ )، طول ترک ( $a$ )، فضای خالی (V) و شکل سنگدانه ها (X) بستگی دارد. بنابراین می توان نوشت.

که در آن با توجه به شکل ۶،  $\theta$  و  $r$  مختصات نوک ترک در سیستم مختصات قطبی  $\sigma_{\theta\theta}$ ،  $\tau_{r\theta}$  و  $\sigma_{\theta\theta}$  تنش در راستاهای مختلف می باشد.  $K_I$  و  $K_{II}$  ضرایب شدت تنش مودهای I و II بارگذاری می باشند. مقادیر ضرایب شدت تنش در یک قطعه ی غیر همگن

$$K_I = \sigma_0 Y_I (E_{agg}, \nu_{agg}, E_{mastic}, \nu_{mastic}, D, O, \alpha, \alpha, V, X) \sqrt{\pi a} \quad (11)$$

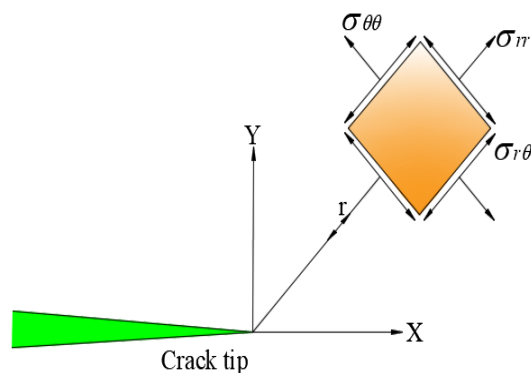
$$K_{II} = \sigma_0 Y_{II} (E_{agg}, \nu_{agg}, E_{mastic}, \nu_{mastic}, D, O, \alpha, \alpha, V, X) \sqrt{\pi a} \quad (12)$$

$$\sigma_0 = \frac{P}{2RT} \quad (13)$$

از آنجا که روش المان محدود یک راهکار مناسب جهت تخمین ضرایب شدت تنش و ضرایب هندسی می‌باشد، لذا در ادامه با مدلسازی المان محدود یک نمونه آسفالتی ترکدار، تاثیر متغیرهایی که در بالا ذکر شده بر پارامترهای شکست مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

تخمین زد. با استفاده از رابطه‌ی (14) در هر مرحله با بدست آوردن ضرایب شدت تنش مود I, II مربوط به ترک موجود، با استفاده از تحلیل اجزا محدود، زاویه رشد ترک به دست می‌آید، سپس ترک به اندازه کوچکی در این راستا رشد می‌کند. سپس مجدداً ترک جدید مدلسازی و ضرایب شدت تنش  $K_I$  و  $K_{II}$  تعیین می‌گردد و مراحل فوق مجدداً تکرار می‌شود.

$$\theta_0 = \tan^{-1} \left\{ \frac{-3 \left( \sqrt{8K_{II}^2 + K_I^2} + K_I \right) K_{II}}{3K_{II}^2 + K_I \sqrt{8K_{II}^2 + K_I^2}} \right\} \quad (14)$$

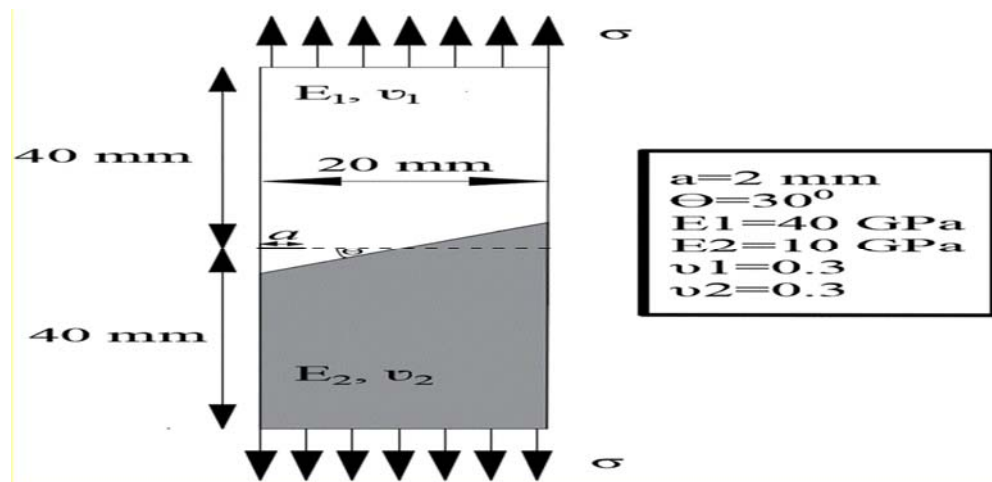


شکل ۶. تنش‌های الاستیک در اطراف نوک ترک در مختصات کارتزین

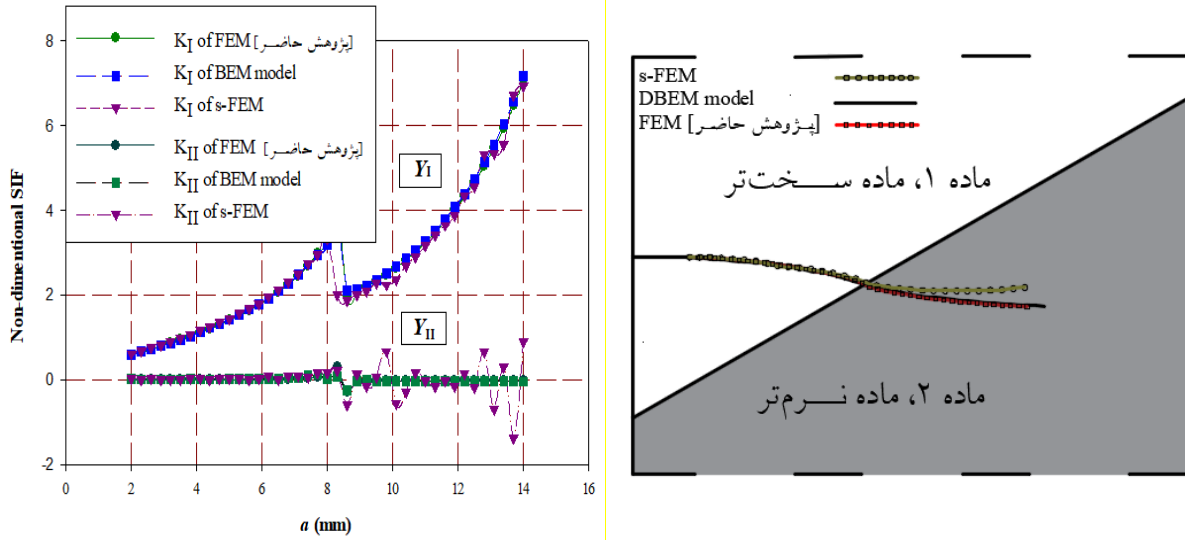
### صحت‌سنجی

رشد را با استفاده از روش حداکثر تنش کششی تعیین کردند. آنها در هر مرحله ترک را به اندازه ۰/۳ میلی‌متر افزایش دادند. نتایج عددی در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود تحت این شرایط مقادیر ضرایب شدت تنش مود II به مقدار چشمگیری از ضرایب شدت تنش مود I کمتر می‌باشد. با افزایش طول ترک از ۲ تا ۸/۳ میلی‌متر، ضرایب شدت تنش مود II، دارای مقادیر کوچک و مثبت می‌باشند. این امر سبب می‌شود تا ترک به سمت مرز مشترک دو ماده متمایل شود (شکل ۸ الف را ببینید). با رشد بیشتر ترک (بیش از ۸/۶ میلی‌متر) نوک ترک وارد ماده نرم‌تر می‌شود. در این هنگام، مقادیر مود I ضرایب شدت تنش به صورت ناگهانی کاهش یافته و علامت ضرایب شدت تنش مود II از مثبت به منفی تغییر علامت می‌دهند. در نتیجه ترک در ادامه به صورت مستقیم و افقی رشد می‌کند. شکل ۸ نتایج تحلیل‌های انجام شده تحقیق جاری که توسط نرم‌افزار آباکوس تخمین زده شده را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، نتایج بدست آمده از روش DBEM و S-FEM به خوبی با نتایج بدست آمده از نرم‌افزار تجاری آباکوس همخوانی دارند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با روش المان محدود بکار رفته در این تحقیق می‌توان به خوبی رفتار مکانیکی مخلوط آسفالتی ناهمگن را پیش‌بینی کرد.

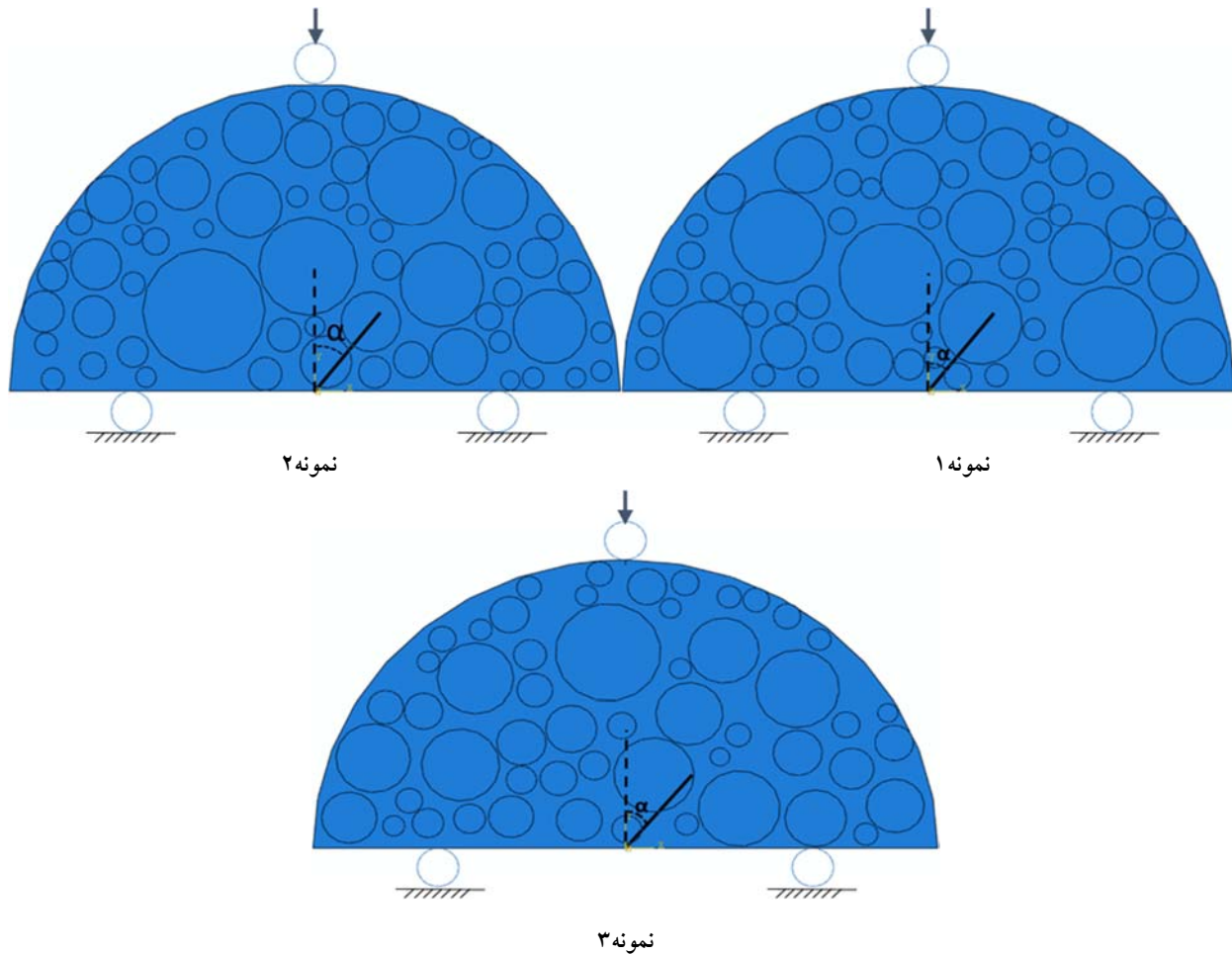
مقادیر ضرایب شدت تنش با بکارگیری روش انتگرال-J و توسط نرم افزار آباکوس محاسبه شدند. بدین منظور از حلگر استاندارد<sup>۱</sup> این نرم افزار استفاده شد. با استفاده از این روش مقادیر  $K_I$ ،  $K_{II}$  و مسیر رشد ترک در نمونه‌های SCB همگن و غیرهمگن آسفالتی تخمین زده شد. هرچند بمنظور ارزیابی دقت و اعتبار روش استفاده شده برای تحلیل (مخصوصاً مدل‌های غیرهمگن) یک ورق که متشکل از دو ماده و دارای یک ترک لبه‌ای تحلیل شد. این ورق قبلاً که توسط آندره و همکارانش (Andrade and Leonel 2019) و کیکوچی و همکارانش (Kikuchi et al. 2014) تحلیل شده، مجدداً آنالیز شده و نتایج این تحقیقات در ادامه مقایسه شدند. آندره و همکارانش (Andrade and Leonel 2019) و کیکوچی و همکارانش (Kikuchi et al. 2014) به ترتیب از روش‌های المان مرزی دوگانه<sup>۲</sup> و نسخه‌ی S روش المان محدود<sup>۱</sup> استفاده کردند. هندسه و شرایط بارگذاری استفاده شده در این دو تحقیق در شکل ۷ نشان داده شده است. با در نظر گرفتن یک ترک اولیه برابر با ۲ میلیمتر در ماده سخت‌تر، آندره و همکارانش (Andrade and Leonel 2019) و کیکوچی و همکارانش (Kikuchi et al. 2014) مقادیر ضرایب شدت تنش بدون بعد و مسیر



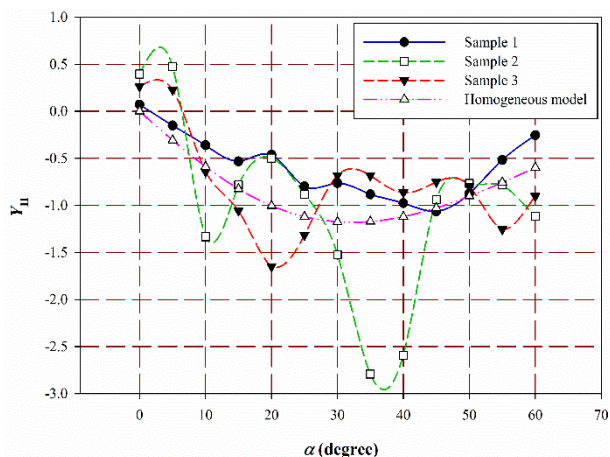
شکل ۷. قطعه‌ی ۲ فازی تحلیل شده توسط آندره و همکارانش (Andrade and Leonel 2019) و کیکوچی و همکارانش (Kikuchi et al. 2014)



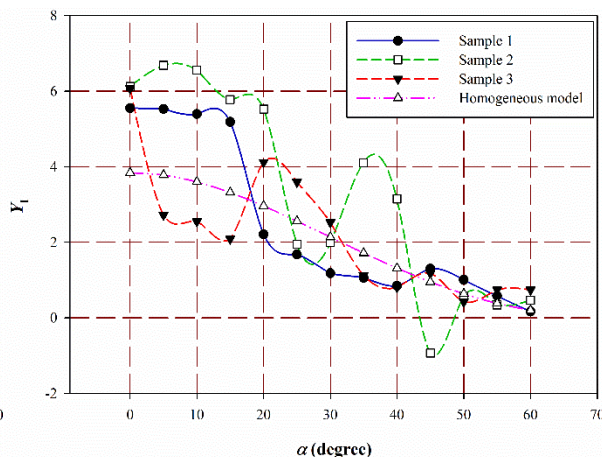
شکل ۸. مقایسه بین (الف) مسیر رشد ترک (ب) ضرایب شدت تنش بدست آمده از تحقیق‌های مختلف



شکل ۹. توزیع سنگدانه‌ها در نمونه‌های مختلف آسفالتی



(ب)



(الف)

شکل ۱۰. تاثیر پخش شدگی سنگدانه‌ها بر ضریب شدت تنش مود الف) I (ب) II

### بررسی تاثیر خصوصیات مکانیکی سنگدانه‌ها و ماستیک بر ضرایب شدت تنش

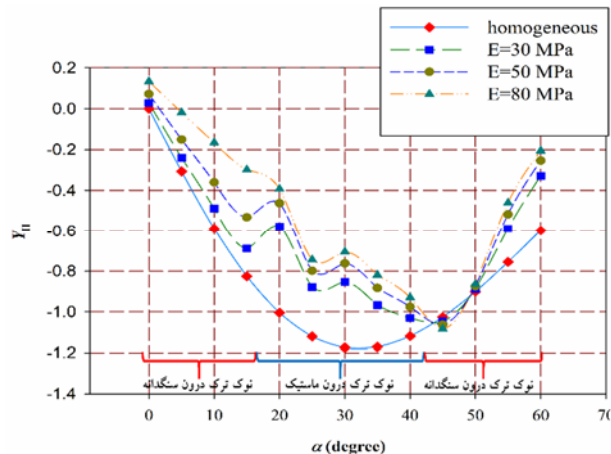
باشد، با افزایش مدول الاستیسیته سنگدانه‌ها، ضرایب شدت تنش مود I کاهش می‌یابد. شکل ۱۱ ب تغییرات ضرایب شدت تنش مود II در برابر زاویه انحراف ترک را به ازای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته سنگدانه‌ها نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌گردد، برخلاف ضرایب شدت تنش مود I، مقادیر ضرایب شدت تنش مود II با تغییر موقعیت نوک ترک از سنگدانه به ماستیک و بالعکس به صورت ناگهانی تغییر نمی‌کنند. از طرفی با افزایش مدول الاستیسیته سنگدانه‌ها، مقادیر ضرایب شدت تنش مود II کاهش می‌یابد. شکل ۱۲ تغییرات ضرایب شدت تنش در برابر زاویه انحراف ترک را به ازای مدول‌های مختلف مدول الاستیسیته ماستیک نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌گردد زمانیکه نوک ترک درون سنگدانه‌ها قرار دارد،

با افزایش مدول الاستیسیته ماستیک، ضرایب شدت تنش مود I کاهش می‌یابد. دلیل این امر می‌تواند افزایش بار تحمل شده توسط سنگدانه‌ها با کاهش مدول الاستیسیته ماستیک باشد. همچنین هنگامیکه نوک ترک درون ماستیک قرار دارد با افزایش مدول الاستیسیته ماستیک، ضرایب شدت تنش مود I افزایش می‌یابد. شکل ۱۲ ب تغییرات ضرایب شدت تنش مود II در برابر زاویه انحراف ترک به ازای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته

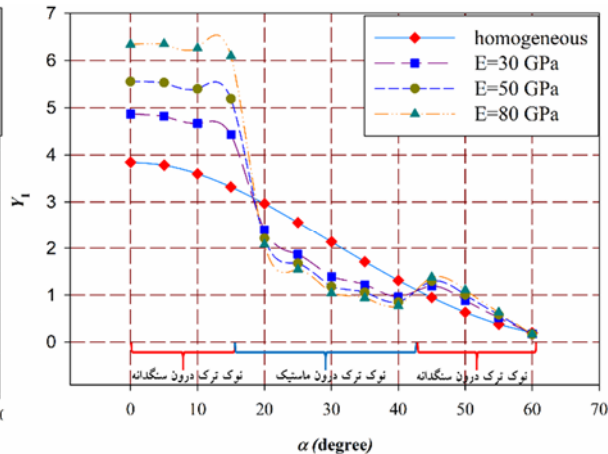
در این قسمت سعی می‌گردد تا تاثیر خصوصیات مکانیکی اجزای مختلف مخلوط آسفالتی بر ضرایب شدت تنش تعیین گردد. بدین منظور نمونه‌ی ۲ انتخاب گردید (شکل ۹ را ببینید) و در حالت‌های مختلف مورد تحلیل قرار گرفت. شکل ۱۱ تاثیر مدول الاستیسیته سنگدانه‌ها بر ضرایب شدت تنش را نشان می‌دهد. بدین منظور مدول الاستیسیته و نسبت پواسون ماستیک و نسبت پواسون سنگدانه‌ها ثابت و برابر با  $E_{mastic}=10 \text{ GPa}$ ،  $\nu_{mastic}=0.25$ ،  $\nu_{agg}=0.25$ ، الاستیسیته سنگدانه‌ها بین ۳۰ تا ۸۰ گیگاپاسکال تغییر پیدا کرد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌کنید زمانیکه نوک ترک درون سنگدانه‌ها ( $0^0 < \alpha < 15^0$  یا  $45^0 < \alpha < 60^0$ ) قرار دارد، ضرایب شدت تنش مود I مدلسازی غیرهمگن بیشتر از ضرایب شدت تنش در مدلسازی همگن می‌باشند. دلیل این امر می‌تواند سختی بیشتر سنگدانه‌ها نسبت به ماستیک باشد. این امر باعث می‌شود بار بی‌شتری توسط سنگدانه‌ها تحمل گردد در نتیجه، میدان شدت تنش و ضرایب شدت تنش زمانیکه ترک درون سنگدانه قرار دارد نسبت به زمانیکه درون ماستیک قرار دارد بیشتر می‌باشد. از طرفی هنگامیکه نوک ترک درون سنگدانه باشد با افزایش مدول سنگدانه‌ها، ضرایب شدت تنش مود I بیشتر می‌شود. در حالیکه اگر نوک ترک درون ماستیک

همانطور که در این اشکال ملاحظه می‌کنید نسبت‌های پواسون ماستیک و سنگدانه تاثیر بسزایی بر ضرایب شدت تنش مود I, II در مخلوط آسفالتی ندارند.

ماستیک را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش مدول الاستیسیته ماستیک ضرایب شدت تنش مود II کاهش می‌یابد. تاثیر نسبت پواسون سنگدانه و ماستیک بر ضرایب شدت تنش در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است.

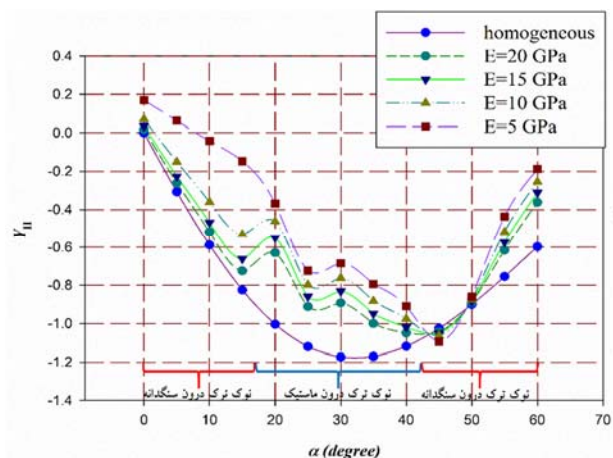


(ب)

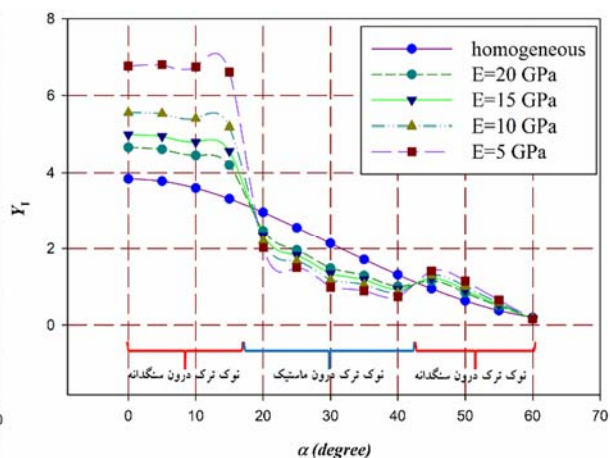


(الف)

شکل ۱۱. تاثیر مدول الاستیسیته سنگدانه‌ها بر ضرایب شدت تنش مود الف) I (ب) II

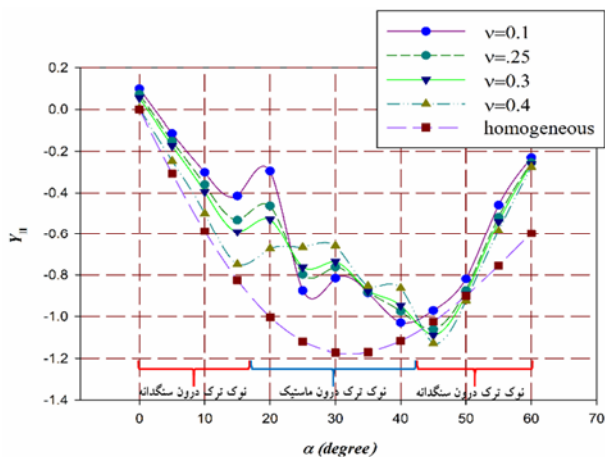


(ب)

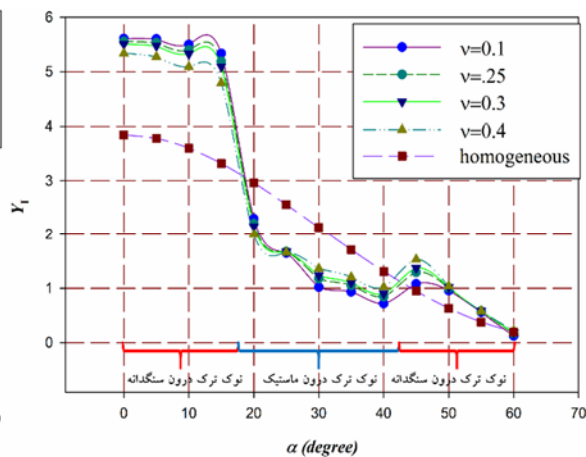


(الف)

شکل ۱۲. تاثیر مدول الاستیسیته ماستیک بر ضرایب شدت تنش مود الف) I (ب) II

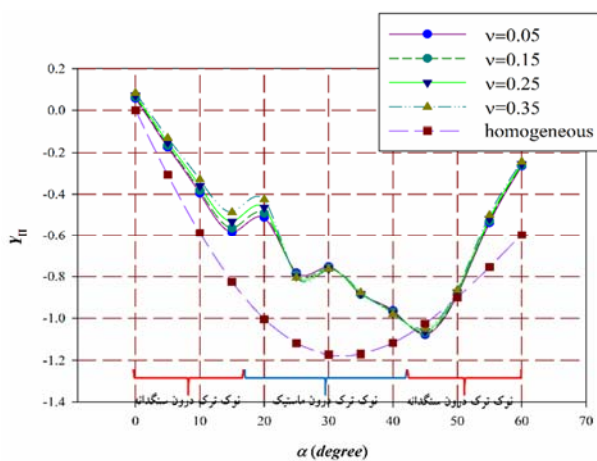


(ب)

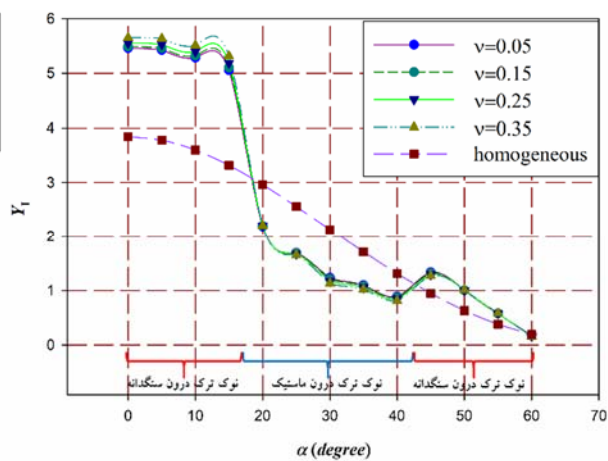


(الف)

شکل ۱۳. تاثیر نسبت پواسون سنگدانه‌ها بر ضریب شدت تنش مود الف (I ب) II



(ب)



(الف)

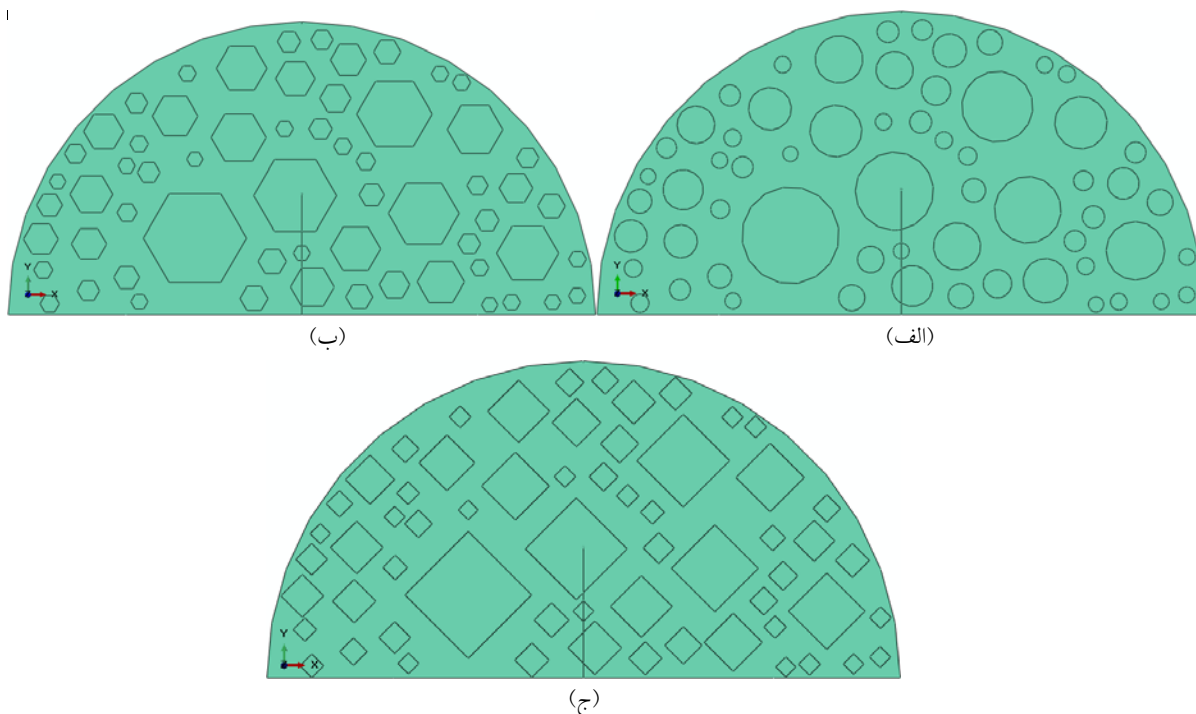
شکل ۱۴. تاثیر نسبت پواسون ماستیک بر ضریب شدت تنش مود الف (I ب) II

شکل‌های دیگر، تاثیر شکل سنگدانه‌ها بر ضرایب شدت تنش بررسی گردد. شکل ۱۵ نمونه‌های عددی آسفالتی دارای سنگدانه‌هایی به شکل دایره، شش ضلعی و لوزی شکل را نشان می‌دهد. توزیع و مساحت سنگدانه‌ها در این قطعات مشابه بود و تنها تفاوت میان این ۳ نمونه عددی (دارای سنگدانه‌های دایره‌ای،

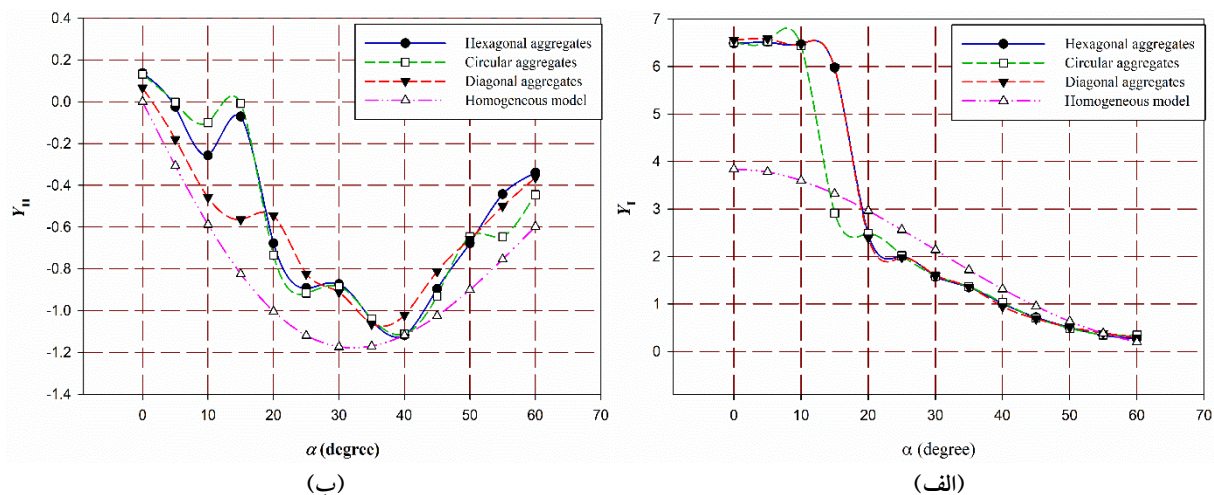
در واقعیت سنگدانه‌ها دارای اشکال مختلفی می‌باشند. در قسمت قبل این تحقیق بمنظور ساده‌سازی مدل‌سازی فرض گردید که سنگدانه‌ها دایروی شکل می‌باشند. از آنجا که شکل سنگدانه‌ها ممکن است نتایج مدل‌سازی را تحت تاثیر قرار دهد، در این قسمت سعی می‌گردد تا با مدل‌سازی سنگدانه‌ها دارای

لوزی و شش ضلعی در این محدوده، نوک ترک درون سنگدانه قرار دارد. در حالی که در نمونه‌های دارای سنگدانه‌های دایره‌ای در این محدوده نوک ترک درون ماستیک قرار دارد. بنابراین این تغییر بدلیل موقعیت نوک ترک و تفاوت خصوصیات مکانیکی اجزا آسفالت در این محدوده می‌باشد.

لوزی و شش ضلعی) شکل سنگدانه‌ها می‌باشد. شکل ۱۶ تغییرات ضرایب شدت تنش در برابر زاویه انحراف ترک را برای نمونه‌های آسفالتی نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، شکل قطعه تاثیر بسزایی بر ضرایب شدت تنش در قطعه‌ی SCB ندارد. اختلافی که بین نتایج در محدوده  $20^\circ < \alpha < 15^\circ$  مشاهده می‌گردد به این دلیل می‌باشد که در نمونه‌های دارای سنگدانه‌های



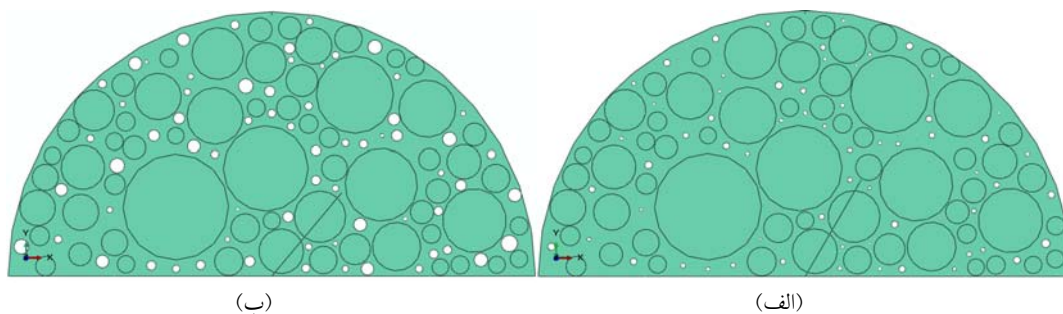
شکل ۱۵. نمونه‌های عددی آسفالتی دارای سنگدانه‌هایی به شکل الف) دایره، ب) شش ضلعی و ج) لوزی شکل



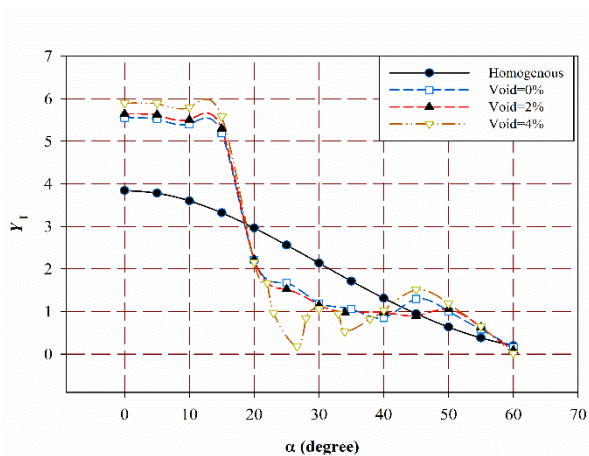
شکل ۱۶. تاثیر شکل سنگدانه‌ها بر ضرایب شدت تنش مود الف) I (ب) II

تاثیر بگذارد. شکل ۱۷ نمونه‌های آسفالتی تحلیل شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۸ ملاحظه می‌کنید مقادیر ضرایب شدت تنش بدست آمده از تحلیل این ۳ قطعه تقریباً یکسان می‌باشند. تنها در محدوده‌هایی که نوک ترک نزدیک فضای خالی قرار دارد، شاهد تغییرات ناگهانی ضرایب شدت تنش مود I,II می‌باشیم.

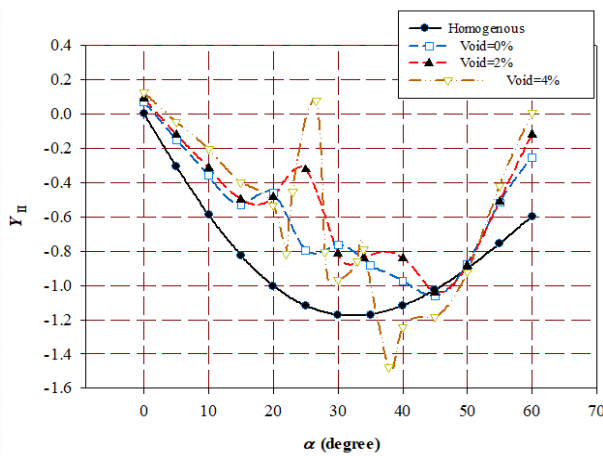
شکل ۱۸ تاثیر فضای خالی بر ضرایب شدت تنش را نشان می‌دهد. بدین منظور نمونه‌های آسفالتی دارای ۰، ۲ و ۴ درصد فضای خالی مورد تحلیل قرار گرفتند. در نمونه‌های آسفالتی دارای فضای خالی برابر با ۴ درصد، میانگین اندازه حفرات با توجه به تحقیق مساد و همکارانش (Masad et al. 2002) برابر با ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شد. برای ایجاد نمونه‌های دارای ۲ درصد فضای خالی، اندازه حفرات موجود در نمونه دارای ۴ درصد فضای خالی به همان نسبت کوچک شد تا موقعیت فضای خالی در نمونه‌ها ثابت باشد و تنها مقدار فضای خالی بر مقادیر



شکل ۱۷. نمونه‌های آسفالتی دارای الف) ۲٪ ب) ۴٪ فضای خالی

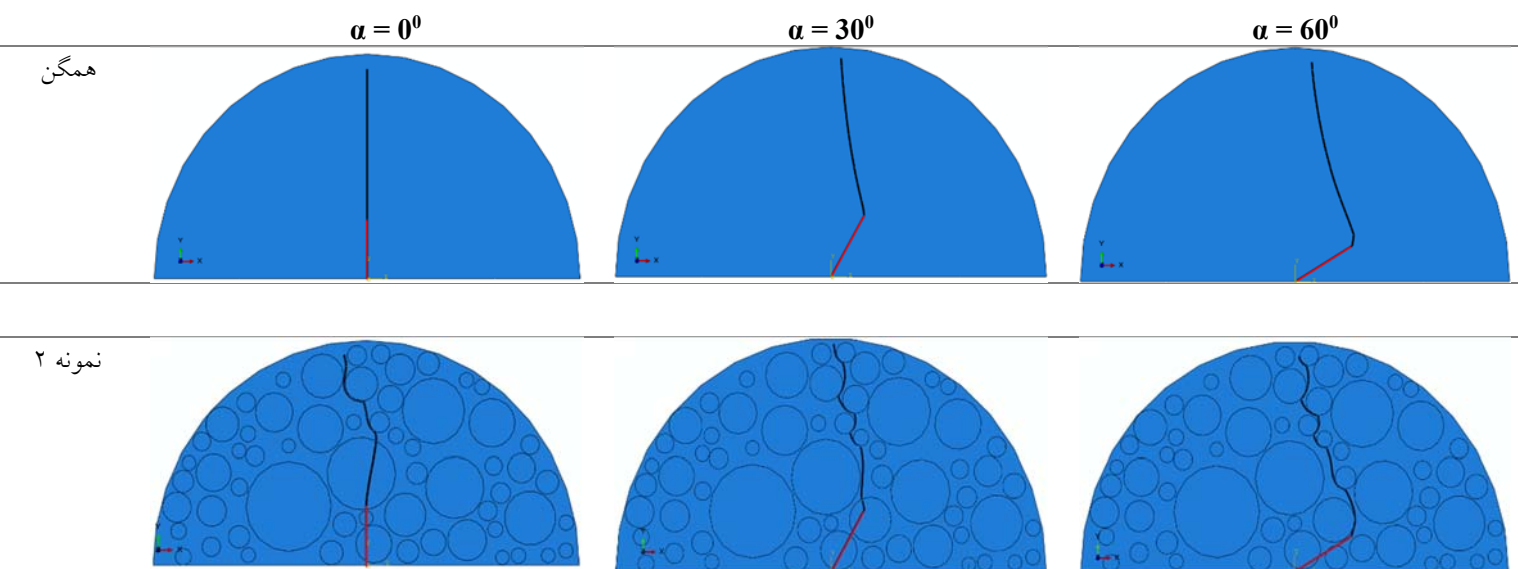


(ب)



(الف)

شکل ۱۸. تاثیر فضای خالی بر ضرایب شدت تنش مود الف) I ب) II



شکل ۱۹. مسیر رشد ترک در نمونه‌های همگن و غیرهمگن به ازای زوایای انحراف مختلف

#### تعیین مسیر رشد ترک

زوایای انحراف ترک نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌گردد مسیر رشد ترک کلی ترک در نمونه‌های همگن و غیرهمگن یکسان می‌باشد. هرچند به صورت محلی مسیر رشد ترک در نمونه‌های همگن و غیرهمگن متفاوت است. در نمونه‌های غیرهمگن ترک تمایل دارد تا در ماده نرمتر (ماستیک) رشد نماید. بنابراین زمانیکه ترک با سنگدانه‌ها برخورد می‌کند آنها را دور می‌زند و به مسیر خود ادامه می‌دهد.

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، مخلوط آسفالتی یک ماده غیرهمگن بوده و خواص اجزا مختلف آن تفاوت زیادی با یکدیگر دارند. این امر سبب می‌شود تا مسیر رشد ترک بدست آمده از مدلسازی همگن و غیرهمگن متفاوت باشند. در این قسمت سعی می‌گردد تا با استفاده از ضوابط شکست تاثیر جنبه‌های غیرهمگن بر مسیر رشد ترک در مخلوط آسفالتی بررسی گردد. بدین منظور از معیار حداکثر تنش کششی استفاده گردید. شکل ۱۹ مسیر رشد ترک را در قطعات همگن و غیرهمگن (قطعه‌ی ۲) به ازای مقادیر مختلف

#### ۵- نتیجه‌گیری

سنگدانه‌ها به صورت عددی ایجاد شدند. سپس، با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس این نمونه‌های عددی مورد تحلیل قرار گرفته، ضرایب شدت تنش مود I/II و همچنین مسیر رشد ترک تعیین گردید. براساس نتایج مدلسازی المان محدود انجام گرفته، نتایج زیر حاصل شدند.

۲- موقعیت نوک ترک تاثیر زیادی بر ضرایب شدت تنش دارد. هنگامی که نوک ترک درون سنگدانه‌ها قرار دارد، ضرایب شدت در مدلسازی همگن از ضرایب شدت بدست آمده از مدلسازی غیرهمگن کمتر می‌باشند. درحالی‌که اگر نوک ترک درون ماستیک باشد، عکس این موضوع رخ می‌دهد.

در این تحقیق، مخلوط آسفالتی به صورت یک ماده چند فازی (متشکل از سنگدانه، ماستیک و فضای خالی) مدل شده و رفتار ترک‌خوردگی با بکارگیری تعداد زیادی مدل ۲ بعدی المان محدود مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور ابتدا نمونه‌های غیرهمگن آسفالتی توسط الگوریتم تولید و توزیع تصادفی ۱- تاثیر خصوصیات مکانیکی اجزا مخلوط آسفالتی (شامل...) بر ضرایب شدت تنش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهند مدول الاستیسیته سنگدانه و ماستیک، نسبت به نسبت پواسون ۱- ماستیک و سنگدانه تاثیر بیشتری بر ضرایب شدت تنش مود I/II دارند.

(ماسستیک) رشد کند. همچنین مسیر رشد کلی رشد ترک در نمونه‌های همگن و غیرهمگن مشابه هست. هر چند سنگدانه‌ها به صورت محلی می‌توانند مسیر رشد ترک را تغییر دهند.

۳- فضای خالی و شکل سنگدانه‌ها تاثیر زیادی بر ضرایب شدت تنش ندارند. هرچند، هنگامی که نوک ترک نزدیک فضای خالی باشد، ضرایب شدت تنش به صورت ناگهانی تغییر می‌کنند.

۴- مسیر رشد ترک به کمک معیار حداکثر تنش کششی تعیین گردید. نتایج نشان می‌دهند، ترک تمایل دارد تا در ماده نرمتر

## ۶- پی‌نوشت‌ها

- 1-Abaqus
- 2-Single-Edge Notched Bending (SENB)
- 3-Semi-Circular Bend (SCB)
- 4-Indirect Tension Test (IDT)
- 5-Disk-shaped Compact Tension (DCT)
- 6- Edge Notch Disc Bend (ENDB)
- 7- AASHTO TP 105- 13
- 8-ABAQUS/Standard
- 9-Dual Boundary Element Method (DBEM)
- 10-s-version Finite Element Method (s-FEM)

## ۷-مراجع

- Ren J, Sun L. (2017). Characterizing air void effect on fracture of asphalt concrete at low-temperature using discrete element method. *Engineering Fracture Mechanics*. Feb. 1; 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*. July 1; 114:423-33.
- 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*. Apr. 30; 169: 34-46.
- 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*. Jan. 30;160: 487-96.
- Yin A, Yang X, Yang S, Jiang W. (2011). Multiscale fracture simulation of three-point bending asphalt mixture beam considering material heterogeneity. *Engineering Fracture Mechanics*. Aug. 1; 78(12): 2414-28.
- 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*. July 1; 86: 21-32.
- Zhao Y, Jiang L, Zhou L, Jiang J. Heterogeneous fracture simulation of asphalt mixture under beam bending test with cohesive zone modeling. In Transportation Research Congress 2017: Sustainable, Smart, and Resilient Transportation 2019 Oct 3 (pp. 102-116). Reston, VA. *American Society of Civil Engineers*.
- Aliha MM, Behbahani H, Fazaeli H, Rezaifar MH. (2014). Study of characteristic specification on mixed mode fracture toughness of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*. Mar 15, 54: 623-35.
- Aliha MR, Fazaeli H, Aghajani S, Nejad FM. (2015). Effect of temperature and air void on mixed mode fracture toughness of modified asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*. Oct 1; 95, 545-55.
- Artamendi I, Khalid HA. A. (2006). Comparison between beam and semi-circular bending fracture tests for asphalt. *Road Materials and Pavement Design*. Jan 1; 7(sup1):163-80.
- Fakhri M, Kharrazi EH, Aliha MR. (2018). Mixed mode tensile-In plane shear fracture energy determination for hot mix asphalt mixtures under intermediate temperature conditions. *Engineering Fracture Mechanics*. Apr 1; 192: 98-113.
- Gao H, Yang X, Zhang C. (2015). Experimental and numerical analysis of three-point bending fracture of pre-notched asphalt mixture beam. *Construction and Building Materials*. Aug. 15; 90:1-0.
- Li XJ, Marasteanu MO. (2010). Using semi circular bending test to evaluate low temperature fracture resistance for asphalt concrete. *Experimental mechanics*. Sep. 1; 50(7):867-76.
- Li Y, Metcalf JB. (2005). Two-step approach to prediction of asphalt concrete modulus from two-phase micromechanical models. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Aug. 17(4):407-15.
- Mull MA, Stuart K, Yehia A. (2002). Fracture resistance characterization of chemically modified crumb rubber asphalt pavement. *Journal of Materials Science*. Feb. 1; 37(3):557-66.

- concrete using a single-edge notched beam test. *Materials and Structures*. Jun 1; 42(5):677.
- Kim H, Wagoner MP, Buttlar WG. (2008). Simulation of fracture behavior in asphalt concrete using a heterogeneous cohesive zone discrete element model. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Aug. 20(8):552-63.
- Kollmann J, Liu P, Lu G, Wang D, Oeser M, Leischner S. (2019). Investigation of the microstructural fracture behaviour of asphalt mixtures using the finite element method. *Construction and Building Materials*. Dec. 10; 227:117078.
- Kollmann J, Lu G, Liu P, Xing Q, Wang D, Oeser M, Leischner S. (2019). Parameter optimization of a 2D finite element model to investigate the microstructural fracture behaviour of asphalt mixtures. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. Oct.1; 103:102319.
- Masad E, Jandhyala VK, Dasgupta N, Somadevan N, Shashidhar N. (2002). Characterization of air void distribution in asphalt mixes using X-ray computed tomography. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Apr. 14(2):122-9.
- Sun Y, Du C, Zhou C, Zhu X, Chen J. (2019). Analysis of load-induced top-down cracking initiation in asphalt pavements using a two-dimensional microstructure-based multiscale finite element method. *Engineering Fracture Mechanics*. Jul. 1; 216:106497.
- Teng G, Zheng C, Chen X, Lan X, Zhu Y, Shan C. (2021). Numerical fracture investigation of single-edge notched asphalt concrete beam based on random heterogeneous FEM model. *Construction and Building Materials*. Oct 18; 304:124581.
- TP105 AA. (2013). Standard Method of Test for Determining the Fracture Energy of Asphalt Mixtures Using the Semicircular Bend Geometry (SCB). *American Association of State Highway and Transportation Officials*, Washington, DC.
- Wang H, Wang J, Chen J. (2018). Fracture simulation of asphalt concrete with randomly generated aggregate microstructure. *Road Materials and Pavement Design*. Oct 3; 19(7):1674-91.
- Wang H, Wang J, Chen J. (2014). Micromechanical analysis of asphalt mixture fracture with adhesive and cohesive failure. *Engineering Fracture Mechanics*. Dec 1; 132:104-19.
- Williams ML. (2015). On the stress distribution at the base of a stationary crack.
- Wills J, Caro S, Braham A. (2019). Influence of material heterogeneity in the fracture of asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*. Jul 3; 20(7):747-60.
- Xue B, Pei J, Zhou B, Zhang J, Li R, Guo F. (2020). Using random heterogeneous DEM model to simulate the SCB fracture behavior of asphalt concrete. *Construction and Building Materials*. 2020 Mar. 10; 236:117580.
- Zhao Y, Ni F, Zhou L, Gao L. (2016). Three-dimensional fracture simulation of cold in-place recycling mixture using cohesive zone model. *Construction and Building Materials*. Sep. 1; 120:19-28.
- Ziari H, Aliha MR, Mojaradi B, Jebalbarez Sarbijan M. (2019). Investigating the effects of loading, mechanical properties and layers geometry on fatigue life of asphalt pavements. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. July 42(7), 1563-77.
- Aliha MR, Sarbijan MJ, Bahmani A. (2017). Fracture toughness determination of modified HMA mixtures with two novel disc shape configurations. *Construction and Building Materials*. Nov. 30; 155:789-99.
- Aragão FT, Kim YR, Lee J, Allen DH. (2011). Micromechanical model for heterogeneous asphalt concrete mixtures subjected to fracture failure. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Jan. 23(1):30-8.
- Du C, Sun Y, Chen J, Gong H, Wei X, Zhang Z. (2020). Analysis of cohesive and adhesive damage initiations of asphalt pavement using a microstructure-based finite element model. *Construction and Building Materials*. Nov. 20; 261:119973.
- Du J, Ren D, Ai C, Zhang J, Qiu Y. (2021). Effect of aggregate gradation on crack propagation in asphalt mixtures at low temperatures based on the Eshelby equivalent inclusion theory. *Construction and Building Materials*. Jul 5; 290:123181.
- E Andrade HD, Leonel ED. (2019). The multiple fatigue crack propagation modelling in nonhomogeneous structures using the DBEM. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. Jan. 1; 98:296-309.
- Eissa EA, Kazi A. (1988). Relation between static and dynamic Young's moduli of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining & Geomechanics Abstracts*. Dec. 25(6).
- Gercek H. (2007). Poisson's ratio values for rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Jan. 1;44(1):1-3.
- Kassem E, Grasley ZC, Masad E. (2013). Viscoelastic Poisson's ratio of asphalt mixtures. *International Journal of Geomechanics*. Apr. 1;13(2):162-9.
- Kikuchi M, Wada Y, Shintaku Y, Suga K, Li Y. (2014). Fatigue crack growth simulation in heterogeneous material using s-version FEM. *International Journal of Fatigue*. Jan. 1; 58:47-55.
- Kim H, Buttlar WG. (2009). Multi-scale fracture modeling of asphalt composite structures. *Composites Science and Technology*. Dec. 1; 69(15-16):2716-23.
- Kim H, Wagoner MP, Buttlar WG. (2009). Micromechanical fracture modeling of asphalt

# Simulating the Cracking Growth Behavior of Asphalt Mixture Using Heterogeneous Modeling Based on the Generation and Packing Algorithm

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

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

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

Received: June 2024- Accepted: September 2024

## **ABSTRACT**

Asphalt mixture is a composite material which contains aggregates, binder, and air voids. The mechanical properties of these subsets affect the cracking growth behavior of asphalt mixture. In the present paper, heterogeneous modeling is used to study cracking growth behavior of asphalt mixture. To reach this goal, at first, numerical samples were created using the aggregate generation and packing algorithm. Then, these samples were simulated using finite element software and the effect of elastic modulus and Poisson's ratios of both aggregates and mastic parts, shape and distribution pattern of aggregates, crack tip location, and air void distribution on stress intensity factors were evaluated. It was observed that stress intensity factors obtained from heterogeneous modeling are completely different in comparison with those of homogeneous modeling. When the crack tip was located inside the aggregates, stress intensity factor was greater than those obtained from homogeneous model. On the other hand, if the crack tip was located inside the mastic part, the stress intensity factors was smaller than the homogeneous SCB model. Moreover, the results showed that the crack tip location and elastic modulus of aggregates and mastic parts had significant effects on the magnitude and sign of stress intensity factors. Further, the crack growth path was predicted using the maximum tensile stress criterion. It was observed the aggregates could change the crack growth path locally; however, the general direction of crack growth in heterogeneous and homogeneous modeling was the same.

**Keywords:** Heterogeneous, Aggregate Generation and Packing Algorithm, Crack Trajectory, Stress Intensity Factors, Mechanical Property Effects