

## بررسی مشخصات مخلوط‌های آسفالتی مقاوم در برابر شکست مود III خالص

پگاه جعفری حقیقت‌پور، دانش‌پذیر دکترای راه و ترابری، گروه عمران، دانشگاه پیام نور، تهران  
محمودرضا کی‌منش\*، استادیار، گروه عمران، دانشگاه پیام نور، تهران  
محمدرضا محمد علیها، استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران،  
تهران

Email: mrkeymanesh@pnu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۶/۰۸/۰۵ - پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۰۳

### چکیده

با بررسی تحقیقات پیرامون رفتار چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی این طور استنباط می‌شود که قطعات متعددی جهت تست چقرمگی شکست مود I (K<sub>IC</sub>) مواد آسفالتی پیشنهاد شده است. اما تاکنون قطعه استاندارد برای تست چقرمگی شکست مود III (K<sub>IIIc</sub>) مخلوط‌های آسفالتی ارائه نشده است. چنین قطعه‌ای باید شرایط هندسی و بارگذاری مناسبی داشته باشد که علاوه بر بیشترین سازگاری با خصوصیات عادی، در شرایط ذاتی ماده مورد آزمایش بتواند داده‌های تکرارپذیر، قابل اعتماد و درستی از مقاومت در برابر شکست مخلوط آسفالتی ارائه نماید. یکی از قطعاتی که این موارد را برای محاسبه K<sub>IIIc</sub> مواد آسفالتی ارائه می‌کند، قطعه ترک‌دار دیسک خمشی (ENDB) است که به سبب مزایایی چون سهولت ساخت و ایجاد ترک، در مقایسه با سایر نمونه‌ها، و امکان شبیه‌سازی مود بارگذاری III برای بررسی رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی، گزینه مناسبی به نظر می‌رسد. با وجود این، تحقیقات کمی در گذشته در مورد این قطعه برای دستیابی به داده‌های معتبر K<sub>IIIc</sub> انجام شده است. لذا، در این تحقیق، با هدف مطالعه دقیق‌تر این موضوعات، اثر هندسه و مشخصات مخلوط‌های آسفالتی بر رفتار چقرمگی شکست قطعه ENDB، با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس، بررسی شده است. نتایج این تحقیق می‌تواند در انتخاب و معرفی قطعه استاندارد مناسب و مشخصات مناسب مخلوط‌های آسفالتی، جهت تعیین مقدار K<sub>IIIc</sub> مخلوط‌های آسفالتی، کمک به‌سزایی به محققین نماید. از نتایج مهم این تحقیق می‌توان به اثر ضخامت برش بر میزان چقرمگی شکست در مود بارگذاری ذکر شده اشاره نمود. به طوری که میزان چقرمگی شکست در نمونه با ضخامت برش بیشتر، افزایش یافته و با کاهش میزان درصد فضای خالی و دمای آزمایش، میزان چقرمگی شکست نیز افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: مخلوط‌های آسفالتی، رفتار شکست، تحلیل‌های عددی و آزمایشگاهی

### ۱. مقدمه

روسازی در مناطق سردسیر در معرض بارگذاری‌های شدید ناشی از آب و هوا هستند که باعث کاهش ظرفیت روسازی در بلندمدت می‌شود. این عوامل باعث تشدید خرابی‌های ناشی از بارگذاری‌های سنگین بر سازه روسازی

ترک‌های ناشی از دمای کم محیط، به عنوان یکی از مهم‌ترین خرابی‌های روسازی آسفالتی شناخته می‌شوند.

Edge Notched Disc Bend (ENDB)

مهمترین نکات در انجام آزمایش‌های چقرمگی شکست است. در تحقیقات پیشین صورت‌گرفته روی مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی، از نمونه‌های آزمایشگاهی مختلفی استفاده شده است، که هر یک دارای مزایا و معایب منحصر به فرد خود می‌باشند. از مهمترین نمونه‌ها می‌توان به نمونه‌های تیرچه مستطیلی با ترک ثابت یا متغیر در وسط نمونه<sup>۵</sup> (براهام و همکاران، ۲۰۱۰؛ کیم و همکاران، ۲۰۰۹؛ واگونر و همکاران، ۲۰۰۵ b؛ ادواردز و هسپ، ۲۰۰۶؛ بهنیا و همکاران، ۲۰۱۱؛ واگونر و همکاران، ۲۰۰۵ a)، نمونه‌های دیسک شکل<sup>۶</sup> (لنکستر و همکاران، ۲۰۱۳؛ مولنار و همکاران، ۲۰۰۲؛ عامری و همکاران، ۲۰۱۱؛ محمد و همکاران، ۲۰۱۲) و نمونه‌های نیم‌دایره ترک‌دار<sup>۷</sup> (لی و ماراستینو، ۲۰۱۰ a؛ لی و ماراستینو، ۲۰۱۰ b؛ حسن و خالد، ۲۰۱۰؛ محمد علیها، ۲۰۱۵؛ بانک و همکاران، ۲۰۱۱) با بارگذاری سه‌نقطه‌ای اشاره نمود.

در میان این نمونه‌ها، قطعه ENDB (نمونه ترک‌دار دیسک خمشی) اولین بار توسط محمد علیها و همکاران (۲۰۱۵) در مقاله‌ای جهت بررسی رفتار شکست و ترک‌های بالا به پایین مخلوط‌های آسفالتی تحت مود ترکیبی I/III توسط نمونه ENDB ارائه گردید. در انجام این پژوهش، از نمونه‌های ENDB تحت بارگذاری سه‌نقطه‌ای یکنواخت به منظور انجام آزمایش شکست با هدف تعیین ضریب شدت تنش<sup>۸</sup> و چقرمگی شکست<sup>۹</sup> نمونه‌های آسفالتی استفاده شده است. همان‌طور که ذکر گردید، تا کنون محققین کمی به طور خاص به بررسی مود III خالص پرداخته‌اند و به صورت ترکیبی مود III/I با نمونه‌های اندک، چقرمگی شکست را بررسی کرده‌اند. پیرمحمد و بیات (۲۰۱۶) مقاله‌ای تحت عنوان بررسی چقرمگی شکست مخلوط‌های بتن آسفالتی با استفاده از نمونه<sup>۱۰</sup> ADB تحت مود بارگذاری ترکیبی I/III ارائه نمودند. نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها نشان داد که

می‌شوند. مکانیزم اصلی شکست برای روسازی در آب و هوای سرد نیز می‌تواند به دو گروه تقسیم شود: عواملی که بر آسفالت اصلاح شده اثر می‌کنند و عواملی که بر لایه‌های اصلاح نشده و بستر اثر می‌کنند. بنابراین، دمای کم می‌تواند یکی از موارد مهم در ایجاد ترک در روسازی‌های بتن آسفالتی باشد. براساس مفهوم چقرمگی شکست، رشد ترک هنگامی رخ می‌دهد که تنش‌ها در نوک ترک به اندازه‌ای زیاد شوند که ماده نتواند آن‌ها را تحمل کند. بنابراین، حداکثر مقدار K که ماده می‌تواند تحمل کند را چقرمگی شکست آن ماده می‌گویند. برای تعیین فاکتورهای شدت تنش بحرانی حالت‌های متفاوت، یعنی به ترتیب چقرمگی شکست حالت  $(K_{Ic})I$ ،  $(K_{Ic})II$  و  $(K_{Ic})III$ ، روش‌های آزمایشگاهی متنوعی توسعه داده شده‌اند. در اکثر تحقیقاتی که تاکنون به منظور بررسی رشد ترک در مخلوط‌های آسفالتی صورت گرفته است، صرفاً به بررسی مود کشش خالص<sup>۱</sup> (Mode I) و یا برش خالص<sup>۲</sup> (Mode II) و مودهای ترکیبی<sup>۳</sup> (Mode I&II) پرداخته شده است و توجهی به مود لغزش خارج صفحه‌ای لبه‌های ترک<sup>۴</sup> (Mode III) نشده است. این مود از بارگذاری در مواردی نظیر ترک‌های لبه جاده و روسازی‌های آسفالتی، خصوصاً در دماهای کم، می‌تواند مود غالب رشد ترک رویه آسفالتی باشد. لذا، بررسی تجربی و تئوری رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی تحت بارگذاری مود III برای طراحی مخلوط‌های آسفالتی حائز اهمیت است. بنابراین، لازم است که میزان مقاومت در برابر رشد ترک خارج صفحه‌ای (و یا چقرمگی شکست مود III) مخلوط‌های آسفالتی از طریق روش‌های مناسب آزمایشگاهی تعیین گردد.

## ۲. پیشینه تحقیق

انتخاب شکل هندسی مناسب نمونه آزمایشگاهی، با هدف شبیه‌سازی هر یک از مودهای بارگذاری، یکی از

Ⓐ Disk shape compact tension specimen  
 Ⓛ Semicircular bend (SCB)  
 Ⓔ Stress Intensity Factor (SIF)  
 Ⓜ Fracture toughness  
 Ⓝ Asymmetric Disk Bend

Ⓣ Tensile Mode (Pure Mode I)  
 Ⓢ Shear Mode (Pure Mode II)  
 Ⓜ Mixed Mode  
 Ⓣ Tearing Mode (Pure Mode III)  
 Ⓛ Single-edge notched beam subjected to three or four point bonding (SENB)

ترکیب کاملی از مود ترکیبی I/III، اعم از مود بازشدگی خالص (مود I خالص) تا مود پارگی خالص (مود III خالص) می‌باشد. همچنین نشان داده شده است که با افزایش سهم مود III بارگذاری در سازه ترک‌دار، مقاومت شکست مخلوط آسفالتی گرم به طور محسوس کاهش می‌یابد.

### ۳. ضرورت و روش تحقیق

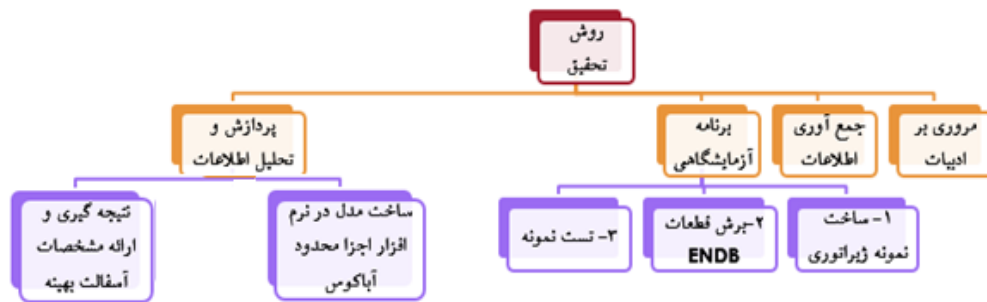
هنگامی که یک روسازی انعطاف‌پذیر تحت تأثیر بارهای ناشی از وسایل نقلیه قرار می‌گیرد، لایه روسازی به صورت یک تیر خمشی عمل نموده و در زیر بار چرخ و در سطح روسازی تنش‌های فشاری و در پایین‌ترین لایه آسفالتی تنش‌ها و یا کرنش‌های کششی به‌وجود می‌آید. به طور کلی، با توجه به اهمیت ترک در روسازی راه‌ها در مکان‌هایی که برش قوی از جمله شیب‌ها، پیچ‌ها و کناره‌های جاده اتفاق می‌افتد، که این حالت از بارگذاری مود III نشأت می‌گیرد، و با بررسی تحقیقات تا کنون که مکانیک شکست آسفالت تحت بارگذاری مود III خالص مطالعه نشده و تحقیقات تنها به بررسی مود I و مود II و ترکیبی از مودها پرداخته‌اند، ضرورت ایجاد نمود که مشخصات آسفالت توسط نمونه ENDB در دمای کم، که خود عامل مهمی در ترک است، به صورت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری مطالعه شود. از جمله اهداف کاربردی در این پژوهش می‌توان به ارائه مشخصات یک مخلوط آسفالتی بهینه مقاوم در برابر بارگذاری مود III خالص و رفع مشکلات ترک‌های حرارتی کناره‌های روسازی راه‌ها، پیچ‌ها و شیب‌ها اشاره نمود.

در این پژوهش، با استفاده از اصول مکانیک شکست، چقرمگی شکست مود III ( $K_{IIIc}$ ) مخلوط‌های متنوع آسفالتی در شرایط دمای کم به طریق آزمایشگاهی و با استفاده از نمونه دیسک خمشی ترک‌دار تعیین شده است. در ساخت نمونه‌های آسفالتی می‌توان به قیر خالص با درجه نفوذ ۶۰-۷۰ که معمولاً در دماهای معتدل استفاده می‌شود، مصالح سنگی کوهی با بزرگترین اندازه

مقاومت در برابر ترک خوردگی در نمونه بتن آسفالتی به‌طور قابل ملاحظه‌ای در دماهای آزمایش شده زیر صفر درجه با تغییر مود ترکیبی III به مود I در بخش جلوی ترک خوردگی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، با کاهش دما، مقاومت در برابر ترک خوردگی نمونه در آغاز افزایش می‌یابد تا این که به نقطه اوج خود، یعنی در دمای ۲۰- درجه سلسیوس می‌رسد و پس از آن کاهش می‌یابد. محمد علیها و سرببیجان (۲۰۱۶) در مقاله‌ای، به تعیین رفتار چقرمگی شکست تحت مود III با استفاده از مواد مختلف و روش جدید آزمایش پرداختند. در این مقاله، یک نمونه ساده به نام دیسک خمشی با ترک گوشه (ENDB) برای تعیین تجربی  $K_{IIIc}$  پیشنهاد شده است. این نمونه، یک دیسک دایره‌ای حاوی یک ترک لبه ایجاد شده در طول قطر است که تحت بارگذاری خمشی سه نقطه قرار گرفته است. هر دو مود خالص I و III شرایط بارگیری را می‌توان به راحتی توسط نمونه ENDB برای جهت‌گیری ترک در جهت مناسب نسبت به بارگذاری اعمال شده استفاده نمود. لذا، در این مقاله، به منظور بررسی شرایط و توانایی عملی نمونه پیشنهاد شده، تعدادی از نمونه‌های ENDB که از مواد مختلف از جمله PMMA، بتن آسفالت، گرافیت و سنگ مرمر ساخته شده مورد آزمایش قرار گرفته است. به طور کلی، مشاهده شد که تحت هر دو حالت مود I و III، برای هر ماده، مقدار چقرمگی شکست مود III کمتر از مود I است. پایان‌نامه‌ای با عنوان مطالعه تأثیر دما در رفتار شکست بتن‌های آسفالتی تحت بارگذاری مود ترکیبی I/III توسط بیات (۱۳۹۴) ارائه شد. در این پایان‌نامه، تأثیر دماهای زیر صفر بر چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی گرم (HMA) تحت بارگذاری مود ترکیبی I/III بررسی شد. نمونه‌های آسفالت ساده دیسکی، به‌وسیله دستگاه تراکم ژیراتوری و نمونه‌های آسفالت اصلاح شده دیسکی، به وسیله دستگاه تراکم برش زیاد تولید شد. همچنین، از فیکسچر خمش سه نقطه‌ای برای اعمال بارگذاری نمونه‌ها بهره گرفته شد. ضرایب شدت تنش بحرانی نیز با استفاده از بار بحرانی شکست ثبت شده از تست‌های شکست، محاسبه شدند. نتایج نشان داد که این نمونه پیشنهادی، قادر به معرفی

کننده مشخصات مخلوط آسفالتی و میزان ضخامت برش نمونه‌های آسفالتی، شرایط بارگذاری، تکرار و دما به عنوان متغیرهای تأثیرگذار در انجام آزمایش شکست مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، آزمایش شکست در شرایط بارگذاری یکنواخت<sup>۱</sup> با در نظر گرفتن تمام متغیرهای نامبرده انجام شد. شکل ۱ فلوجارت مراحل انجام تحقیق را نشان می‌دهد.

۱۹ میلی‌متر، اختلاط قیر و سنگدانه‌ها در دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس، فضای خالی (۳، ۵ و ۷ درصد)، سه ضخامت برش (۳/۵، ۵ و ۶/۵ سانتی‌متر)، سه مرتبه تکرار و سه دمای آزمایش (صفر، ۱۲- و ۲۴- درجه سلسیوس) اشاره نمود. همچنین، مود بارگذاری (III خالص) در انجام آزمایش‌ها لحاظ می‌گردد. لذا، با توجه به در نظر گرفتن پارامترهای فوق، ۸۱ نمونه آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفت. پارامتر درصد فضای خالی به عنوان متغیر تعیین



شکل ۱. مراحل تحقیق

سری از نمونه‌ها با درصد‌های مختلف قیر ساخته و مورد آزمایش قرار می‌گیرند تا بهترین نمونه‌ای که با مشخصات و معیارهای طرح هماهنگی داشته باشد انتخاب شود. برای این منظور، حداقل سه نمونه برای هر درصد قیر تهیه گردید و هر سری نمونه با افزایش ۰/۵ درصد قیر به گونه‌ای تهیه گردید که حداقل دو سری نمونه مخلوط آسفالتی با درصد قیر بیشتر و دو سری نمونه مخلوط آسفالتی با قیر کمتر نسبت به مخلوط آسفالتی بهینه به دست آید. بنابراین، برای تهیه طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی به روش مارشال معمولاً ۶ سری نمونه با درصد‌های مختلف قیر که جمعاً ۱۸ سری می‌باشد، تهیه می‌شود.

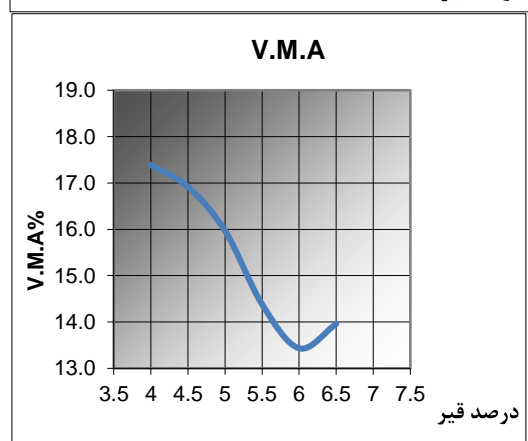
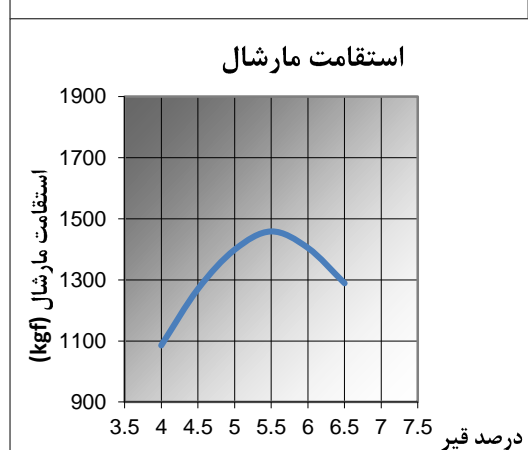
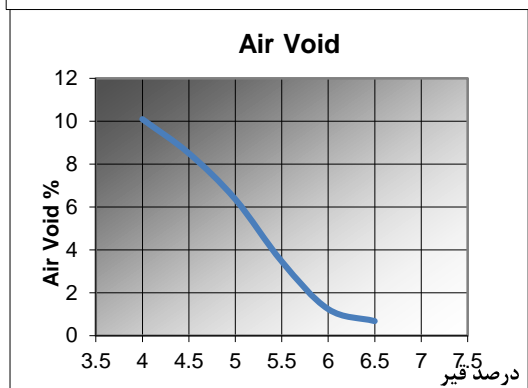
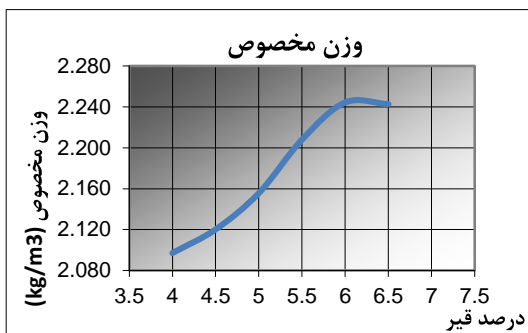
پس از تعیین وزن مخصوص مخلوط آسفالتی متراکم شده، نمونه‌ها به مدت ۳۰ تا ۴۰ دقیقه در دمای ۶۰ درجه سلسیوس قرار گرفته و بعد از آن بلافاصله مقدار مقاومت و روانی آن به وسیله دستگاه جک مارشال براساس روش استاندارد ASTM-D1559 تعیین می‌گردد. بار تا رسیدن به مقدار ماکزیمم افزایش و سپس کاهش

#### ۴. مطالعه آزمایشگاهی نمونه دیسک خمشی ترک‌دار (ENDB)

به منظور دانه‌بندی مصالح سنگی جهت ساخت نمونه‌های آسفالتی، از حد وسط دانه‌بندی‌های شماره ۴ آیین‌نامه راه‌های آسفالتی (نشریه ۲۳۴ سازمان برنامه و بودجه) که اولین ستون انتخابی برای استفاده در لایه رویه (توپکا) با بزرگترین اندازه مصالح سنگی ۱۹ میلی‌متر به عنوان دانه‌بندی مورد استفاده در لایه‌های روکش آسفالتی (توپکا) در ساخت نمونه‌های آسفالتی استفاده شده است. نکته مهم در طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی با درصد فضای خالی مختلف، مقدار قیر مورد استفاده یا همان قیر بهینه است که در این تحقیق، این مقدار بهینه لحاظ گردیده است.

به منظور تعیین قیر هر یک از مخلوط‌های آسفالتی از روش طرح اختلاط مارشال استفاده شده است. در طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی به روش مارشال معمولاً چند

Monotonic



می‌یابد و مقدار بار ماکزیمم توسط دستگاه به عنوان مقاومت مارشال بر حسب کیلوگرم ثبت می‌گردد و مقدار تغییرشکل نمونه در بازه ۰/۲۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شده و مقدار تغییرشکل در بار ماکزیمم با عنوان روانی بر حسب میلی‌متر ثبت می‌گردد. سایر پارامترهای مورد نیاز مانند درصد فضای خالی، وزن مخصوص ماکزیمم، درصد فضای خالی مصالح سنگی و درصد فضای خالی پر شده با قیر، براساس روابط موجود در استاندارد ASTM-D1559 قابل محاسبه خواهد بود. با رسم نمودارهایی شامل پارامترهای فوق در مقابل درصدهای مختلف قیر، درصد قیر بهینه با به دست آوردن میانگین درصد قیری که در آن استحکام مارشال و وزن واحد حجم مخلوط آسفالتی ماکزیمم گردد و درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی در محدوده مجاز آیین‌نامه باشد، تعیین می‌گردد.

حداکثر وزن مخصوص تئوری مخلوط‌های آسفالتی ( $G_{mm}$ ) به ازای درصدهای مختلف قیر محاسبه گردید که نتایج آن در جدول ۱ مشاهده می‌گردد. مقدار درصد قیر بهینه مخلوط آسفالت رویه با توجه به منحنی‌های مربوط به تغییرات کمیت‌ها بر اساس مندرجات بند ۲۰-۷-۳ نشریه شماره ۱۰۱ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور (مشخصات فنی عمومی راه، ۱۳۹۲) و با توجه به درصد قیر نظیر فضای خالی ۴ درصد در شکل ۲ برابر با ۵/۳ درصد نسبت به وزن مخلوط آسفالتی به دست می‌آید.

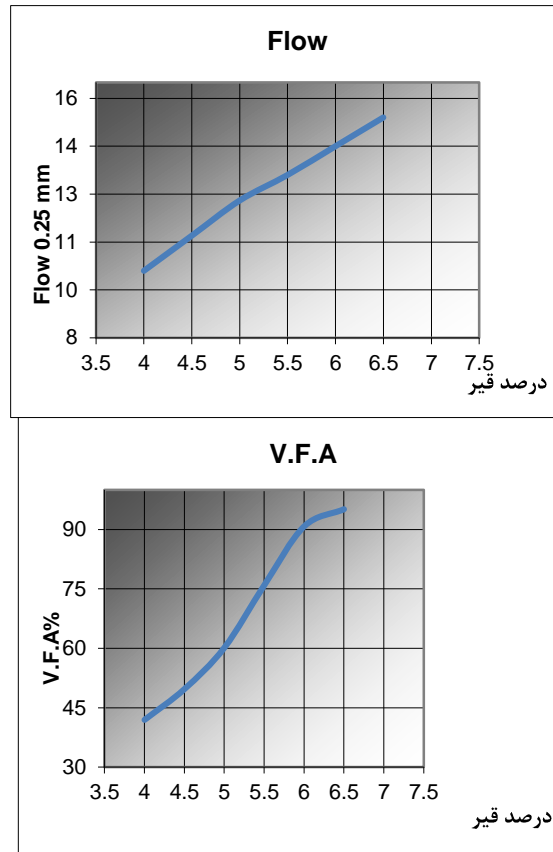
جدول ۱. حداکثر وزن مخصوص تئوری مخلوط آسفالتی ( $G_{mm}$ ) به ازای درصدهای مختلف قیر

درصد قیر	حداکثر وزن مخصوص تئوری مخلوط آسفالتی ( $G_{mm}$ ) ( $gr/cm^3$ )
۴	۲/۳۳
۴/۵	۲/۳۱۱
۵	۲/۲۹۲
۵/۵	۲/۲۷۴
۶	۲/۲۵۵
۶/۵	۲/۲۳۸

صورت گرفت. بدین منظور، نمونه‌های استوانه‌ای آسفالتی به قطر ۱۵ سانتی‌متر و ارتفاع تقریبی ۱۲ الی ۱۳ سانتی-متر با وزن تقریبی ۴۷۰۰ گرم ساخته شد و با برش هر نمونه استوانه‌ای، نمونه‌های ENDB استخراج گردید.

درصد فضای خالی آسفالت به عنوان یکی از پارامترهای تأثیرگذار در رشد ترک همواره مورد مطالعه محققین قرار داشته است. در این پژوهش نیز اثر تغییرات درصد فضای خالی بر مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، سه محدوده فضای خالی مختلف ۳، ۵ و ۷ درصد با دقت  $\pm 0.5$  درصد مورد استفاده قرار گرفت. به منظور دستیابی به این مقادیر فضای خالی، از دستگاه متراکم‌کننده ژیراتوری با میزان چگالی‌های مشخص و مختلف استفاده شد.

برش هر نمونه ساخته شده به منظور رسیدن به ضخامت‌های ۳۵، ۵۰ و ۶۵ میلی‌متر انجام گردید. در نهایت، ترک مورد نظر با اره نازک الماسی به شعاع ۱۰۰ و ضخامت ۰/۴ میلی‌متر، به طول ۲ سانتی‌متر و قطر کمتر از ۰/۵ میلی‌متر در هر یک از دیسک‌ها ایجاد شد. آماده‌سازی نمونه‌های دیسک خمشی ترک‌دار در شکل ۳ نشان داده شده است.

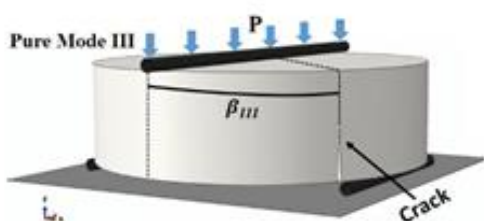


شکل ۲. منحنی تغییرات کمیت‌های مخلوط‌های آسفالتی

پس از تعیین قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی مختلف، ساخت نمونه‌ها با درصد‌های فضای خالی مختلف با استفاده از دستگاه متراکم‌کننده چرخشی (ژیراتوری)



شکل ۳. آماده‌سازی نمونه‌ها



شکل ۴. هندسه و شرایط بارگذاری نمونه ENDB

#### ۴-۱. هندسه قطعه و مدل سازی نمونه ها توسط

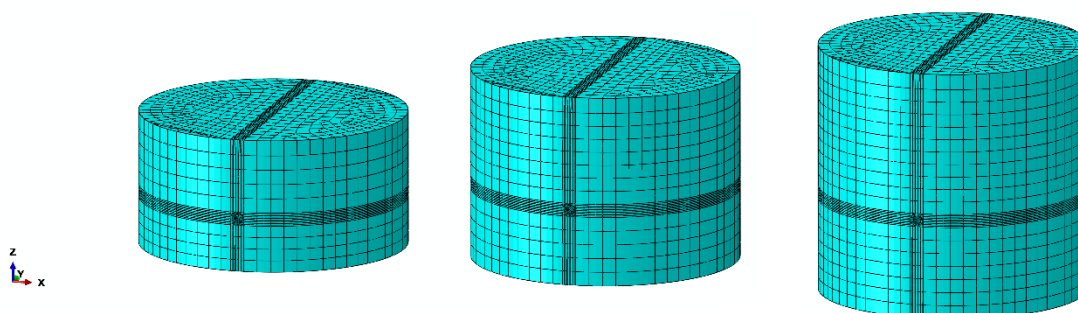
##### نرم افزار آباکوس

انتخاب شکل هندسی مناسب نمونه آزمایشگاهی، با هدف شبیه سازی مود بارگذاری در ضخامت های مختلف برش نمونه، یکی از مهمترین نکات در انجام این پژوهش بوده است. در این پژوهش، با استفاده از روش المان محدود، بر مبنای مکانیک شکست الاستیک خطی و شبیه سازی نمونه مورد نظر با ابعاد مشخص، موقعیت تکیه گاهی در شرایط بارگذاری III تعیین شد که از آنالیز المان محدود نمونه های با مشخصات هندسی مذکور حاصل شده است. جهت محاسبه ضریب شدت تنش بحرانی (چقرمگی شکست)، نیاز به استفاده از یک ضریب هندسه داریم. این ضریب، به هندسه نمونه و شکل بارگذاری وابسته است. لذا، بهترین روش برای محاسبه آن، استفاده از نرم افزارهای مدل سازی مانند آباکوس است. شکل ۵، هندسه نمونه های مورد نظر با ضخامت های مختلف، توسط تحلیل المان محدود را نشان می دهد.

همان طور که در شکل ۴ مشاهده می شود، قطعه ENDB دیسک دایره ای با شعاع R و ضخامت t است. ترک گوشه با عمق a در طول قطر دیسک از یک جهت به وجود می آید. شدت تنش نمونه دیسکی شکل با استفاده از تحلیل های عددی توسط نرم افزار آباکوس انجام خواهد شد. با افزایش شدت بار اعمالی، مقدار بحرانی ضریب شدت تنش مود I که می تواند  $K_{IIIc}$  نامیده شود به شکل زیر خواهد بود:

$$K_{IIIc} = \frac{6PS\sqrt{\pi a}}{RB^2} Y_{III} \left( \frac{a}{B}, \frac{S}{R} \right) \quad (1)$$

که در آن P بار اعمالی شکست، پارامتر  $Y_{III}$  ضریب هندسه با توجه به مود I، شعاع دیسک، B ضخامت دیسک، a طول ترک و S محور تا مرکز تکیه گاه بارگذاری دیسک (دهانه بارگذاری) است. در نهایت، با به دست آوردن پارامترها در آباکوس از نمونه ENDB مشخصات بهینه آسفالت تحت بارگذاری مود III برای چقرمگی شکست ارائه می شود.

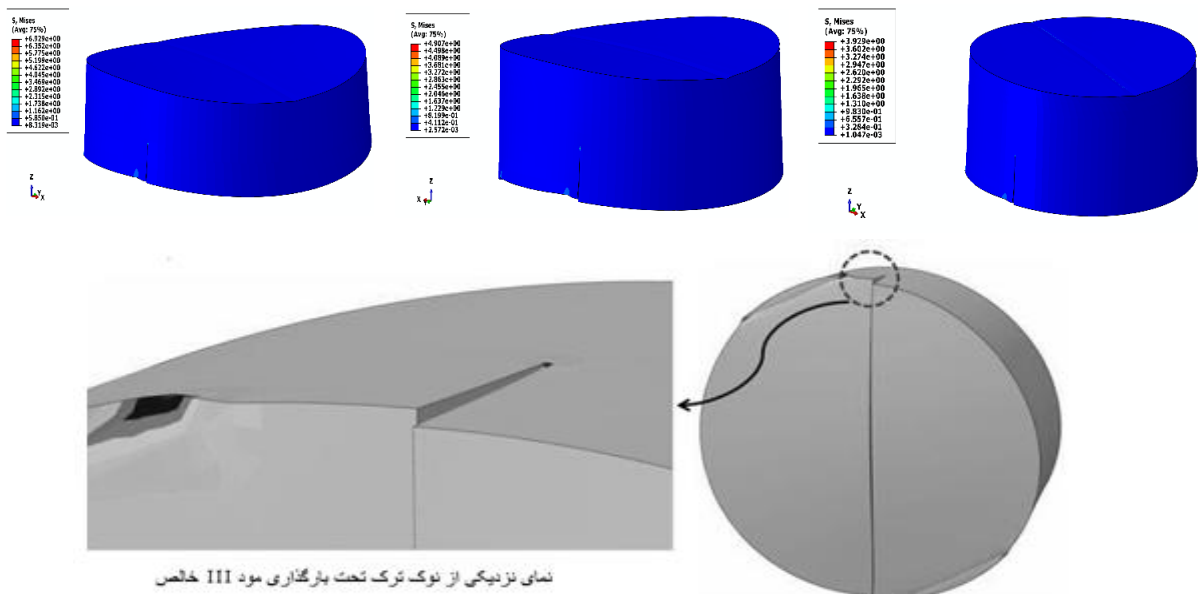


شکل ۵. نمونه ای از المان بندی کل مدل با ضخامت های مختلف

Geometric factor

سینگولار می‌باشند. نمونه‌ای از المان‌بندی کل مدل و نوک ترک در شکل ۶ نشان داده شده است. بارگذاری نیز به صورت یک بار متمرکز که به صورت استاتیک و به مقدار  $P=1000N$  از بالا بر قطعه وارد می‌شود، در نظر گرفته شده است. به دلیل اینکه هدف، محاسبه ضرایب هندسه است، از یک بار رفرنس استفاده می‌شود. معمولاً، با در نظر گرفتن یک بار رفرنس  $K$  معادل توسط نرم‌افزار آباکوس ارائه می‌شود و سپس در فرمول مربوطه قرار گرفته و  $Y$  محاسبه می‌شود. لذا، با در نظر گرفتن هر بار رفرنسی می‌توان ضرایب هندسه را محاسبه نمود. در نهایت، پس از پایان تحلیل‌های عددی در نرم‌افزار ABAQUS مقادیر ضرایب شدت تنش با استفاده از تکنیک J-integral محاسبه و استخراج می‌شود. به طور کلی، در تحلیل‌های خطی با استفاده از روش حل انتگرال  $J$  که در نرم‌افزار آباکوس تعبیه شده، می‌توان به طور مستقیم مقادیر ضرایب تنش،  $K_I$  و  $K_{III}$  در خروجی را استخراج نمود. جدول ۲، مقادیر  $Y_{III}$  برای حالت‌های مختلف استفاده شده در این تحقیق، براساس تحلیل المان محدود نمونه مورد آزمایش، را نشان می‌دهد.

مقدار ضرایب شدت تنش مربوط به ۱۰ کانتور متفاوت نزدیک نوک ترک از نرم‌افزار گرفته شد. معمولاً نتایج کانتور اول به دلیل دور بودن از سایر نتایج حذف و برای کانتورهای باقیمانده مقادیر ضرایب شدت تنش به یک عدد میل می‌کند. این مقدار به عنوان ضریب شدت تنش نوک ترک در نظر گرفته می‌شود. در یک مدل‌سازی عددی، اگر جواب کانتورها به یک عدد همگرا نباشد، نتایج حاصل نادرست می‌باشد. اما همگرایی نتایج نیز لزوماً به معنای درستی آنها نخواهد بود. از آنجایی که هدف از مدل‌سازی قطعه، استخراج ضرایب شدت تنش مود III می‌باشد، از مدل سه‌بعدی این قطعه جهت تحلیل‌های اجزای محدود استفاده شده است. در مدل‌سازی، ضخامت‌های این دیسک‌ها ۳۵، ۵۰ و ۶۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. همچنین، با در نظر گرفتن مقادیر  $E=2760$  Mpa و  $\nu=0.35$  برای ماده آسفالتی، از تحلیل الاستیک خطی استفاده شده است. برای حل عددی مسائل مختلف به روش اجزای محدود نیاز است تا هندسه مسئله، المان‌بندی شود. در المان‌بندی رویه آسفالتی مورد نظر، از ۳۶۷۳۲ المان استفاده شده که همه آنها به شکل چهارضلعی بوده تا نتایج به‌دست آمده از دقت بیشتری برخوردار باشد. این المان‌ها در نوک ترک به صورت



نمای نزدیکی از نوک ترک تحت بارگذاری مود III خالص

شکل ۶. المان‌بندی نوک ترک و اعمال بار روی نمونه‌ها



جدول ۲. مقادیر ضریب شکل هندسی در حالت مود III بارگذاری برای ضخامت‌های مختلف

ضخامت، t (mm)	طول ترک، a (mm)	شعاع دیسک، R (mm)	a/R	S/R	Y <sub>III</sub> (ضریب هندسه)
۳۵	۱۴	۷۵	۰/۱۸۶	۰/۹۲	۰/۰۶۹۸
۵۰	۲۰	۷۵	۰/۲۶۶	۰/۹۲	۰/۰۸۱۲
۶۵	۲۶	۷۵	۰/۳۴۶	۰/۹۲	۰/۰۹۲۵

آزمایش شکست ناچیز بوده است. فواصل تکیه‌گاهی در شرایط تنظیم و نمونه در محل مورد نظر تحت بارگذاری با نرخ ثابت ۵ mm/s در مود III با زاویه ۶۳ درجه قرار داده شد. محمد علیها و همکاران (۲۰۱۵) در تحقیقی، نشان دادند که در قطعه دیسک خمشی ترک‌دار، هنگامی که بارگذاری متقارن است، یعنی زاویه  $\alpha$  صفر درجه است، مود I خالص قابل بررسی است و اندکی که زاویه چرخانده می‌شود اثر مود III نیز افزایش می‌یابد. یعنی با اضافه نمودن زاویه، اثر مود I کاهش یافته و در نتیجه K<sub>III</sub> افزایش می‌یابد. بنابراین، در یک زاویه مشخص که به ابعاد نمونه، طول ترک و موقعیت تکیه‌گاه‌ها وابسته است می‌توان زاویه‌ای که متناظر با K<sub>III</sub> باشد، فقط اثر مود III را نشان بدهد، ارائه نمود. به این ترتیب، زاویه مورد نظر با تحلیل‌های اجزا در این مورد خاص که نسبت a/B به میزان ۰/۴ و نسبت S/R به میزان ۰/۹۲ بود در حدود ۶۳ درجه به دست آمد. شکل ۷، چگونگی تنظیم تکیه‌گاه‌های فیکسچر دستگاه و انجام آزمایش شکست برای مود III بارگذاری را نشان می‌دهد.



شکل ۷. انجام آزمایش شکست در بارگذاری مود III در نمونه تا لحظه گسیخته شدن

ضخامت‌های مختلف برش، از معادلات زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$K_{III} = 0.0698 \frac{6PS\sqrt{\pi a}}{RB^2} \quad (2)$$

$$K_{III} = 0.0812 \frac{6PS\sqrt{\pi a}}{RB^2} \quad (3)$$

$$K_{III} = 0.0925 \frac{6PS\sqrt{\pi a}}{RB^2} \quad (4)$$

#### ۲-۴. آزمایش چقرمگی شکست

انجام آزمایش شکست با استفاده از دستگاه GALDABINI با ظرفیت ۱۵ کیلونیوتن و تحت بارگذاری منوتیک با نرخ ثابت بارگذاری صورت پذیرفت. این دستگاه، قابلیت ترسیم منحنی بار-جابجایی، اندازه‌گیری بار بحرانی شکست مخلوط‌های آسفالتی و در نتیجه تعیین میزان چقرمگی شکست هر یک از مخلوط‌های آسفالتی را داراست. قبل از شروع آزمایش، هر یک از مخلوط‌های آسفالتی مورد نظر به مدت ۶ ساعت در سه دمای صفر، ۱۲- و ۲۴- درجه سلسیوس قرار داده شد تا تمام جسم نمونه از نظر دمایی شرایط یکسانی داشته باشد. پس از گذشت زمان لازم، نمونه‌ها به ترتیب از یخچال خارج شده و سریعاً در داخل دستگاه تست فشار، تنظیم شده و بارگذاری شدند. با توجه به اینکه فاصله تکیه‌گاه‌ها و موقعیت فک بالایی دستگاه از قبل تنظیم می‌شد، فاصله زمانی خروج نمونه‌ها از فریزر و شروع بارگذاری آنها بسیار کوتاه بود. به طوری که تغییر دمای احتمالی آنها در طول

## ۵. نتایج و بحث

جدول ۳، نتایج کلی چقرمگی شکست مود III شامل بار شکست و چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی با شرایط مختلف را نشان می‌دهد. نمونه‌ها با نمادهای X/Y/Z در جدول ۳ ارائه شده‌اند که نماد X نشان‌دهنده درصد فضای خالی (۳، ۵ و ۷ درصد)، نماد Y ضخامت برش نمونه (۳۵، ۵۰ و ۶۵ میلی‌متر)، نماد Z دمای آزمایش (صفر، ۱۲- و ۲۴-) و نماد R نیز تکرار آزمایش است.

به طور کلی، در آزمایش انجام شده در مود III، با افزایش میزان جابجایی، نیروی مورد نیاز افزایش یافته و پس از آن به سرعت کاهش می‌یابد. بار ماکزیمم به عنوان بار بحرانی شکست قرائت و یادداشت می‌شود. شکل ۸ مسیر رشد ترک در مقطع برش خورده آسفالت تحت مود III بارگذاری را نشان می‌دهد.



شکل ۸. مسیر رشد ترک در مقطع برش خورده آسفالت تحت مود III بارگذاری

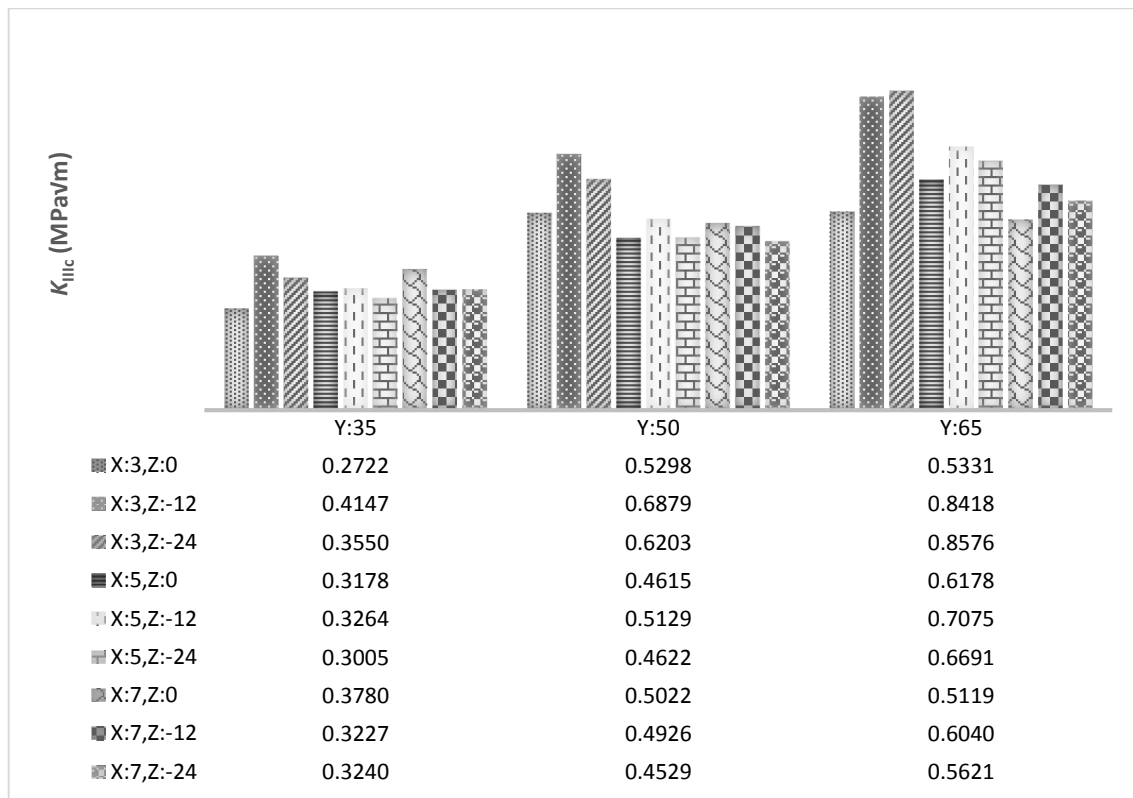
جدول ۳. نتایج کلی چقرمگی شکست ( $K_{IIIc}$ ) مخلوط‌های آسفالتی

X/Y/Z/R	AVE ( $K_{IIIc}$ )	SD	X/Y/Z/R	AVE ( $K_{IIIc}$ )	SD
3/35/0/1			5/50/-24/1		
3/35/0/2	0.272215	0.027605	5/50/-24/2	0.462186	0.040203
3/35/0/3			5/50/-24/3		
3/35/-12/1			5/65/0/1		
3/35/-12/2	0.41471	0.024196	5/65/0/2	0.617815	0.001713
3/35/-12/3			5/65/0/3		
3/35/-24/1			5/65/-12/1		
3/35/-24/2	0.355039	0.032911	5/65/-12/2	0.707523	0.145296
3/35/-24/3			5/65/-12/3		
3/50/0/1			5/65/-24/1		
3/50/0/2	0.529797	0.073019	5/65/-24/2	0.669058	0.076194
3/50/0/3			5/65/-24/3		
3/50/-12/1			7/35/0/1		
3/50/-12/2	0.687931	0.023664	7/35/0/2	0.37797	0.017535
3/50/-12/3			7/35/0/3		
3/50/-24/1			7/45/-12/1		
3/50/-24/2	0.620298	0.051547	7/35/-12/2	0.322696	0.023181
3/50/-24/3			7/35/-12/3		
3/65/0/1			7/35/-24/1		

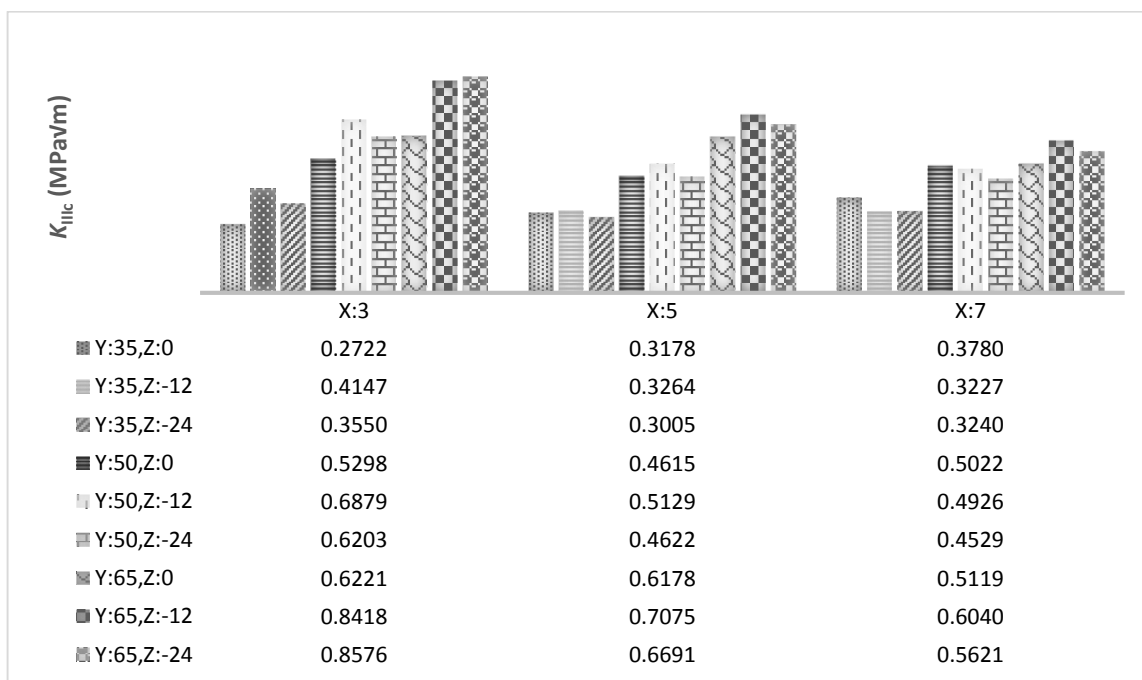
3/65/0/2	0.512123	0.092647	7/35/-24/2	0.32401	0.016705
3/65/0/3			7/35/-24/3		
3/65/-12/1			7/50/0/1		
3/65/-12/2	0.841766	0.041862	7/50/0/2	0.502182	0.007224
3/65/-12/3			7/50/0/3		
3/65/-24/1			7/50/-12/1		
3/65/-24/2	0.857642	0.037649	7/50/-12/2	0.492625	0.097279
3/65/-24/3			7/50/-12/3		
5/35/0/1			7/50/-24/1		
5/35/0/2	0.317815	0.044089	7/50/-24/2	0.452872	0.144133
5/35/0/3			7/50/-24/3		
5/35/-12/1			7/65/0/1		
5/35/-12/2	0.32639	0.032542	7/65/0/2	0.511882	0.022552
5/35/-12/3			7/65/0/3		
5/35/-24/1			7/65/-12/1		
5/35/-24/2	0.30049	0.048509	7/65/-12/2	0.604044	0.045098
5/35/-24/3			7/65/-12/3		
5/50/0/1			7/65/-24/1		
5/50/0/2	0.461493	0.118813	7/65/-24/2	0.562137	0.087733
5/50/0/3			7/65/-24/3		
5/50/-12/1					
5/50/-12/2	0.512923	0.091261			
5/50/-12/3					

(۳۵ میلی‌متر)، تفاوت چندانی بین دمای آزمایش صفر و ۱۲- درجه وجود ندارد. اما هنگامی که دمای آزمایش به ۲۴- درجه سلسیوس تغییر می‌کند، قیر درون بافت مخلوط آسفالتی چسبنده می‌شود و ویسکوزیته آن بالا می‌رود. شکل‌های ۹ تا ۱۱ متوسط چقرمگی شکست برای هر کدام از شرایط آزمایش را نشان می‌دهند. به طور کلی، مقدار چقرمگی شکست ( $K_{IIIc}$ ) مخلوط‌های آسفالتی بین مقادیر  $0.2 \text{ Mpa}\sqrt{m}$  و  $0.8 \text{ Mpa}\sqrt{m}$  متغیر است که با مقایسه نتایج در مود I در سایر تحقیقات نشان می‌دهد رفتار شکست آسفالت در مود III نسبت به مود I ضعیف‌تر عمل می‌نماید. SD میزان انحراف معیار استاندارد را نشان می‌دهد و همان طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، در محدوده  $0.01$  تا  $0.1$  قرار دارد. بنابراین، خطای استاندارد در مود III مقدار مناسبی را نشان می‌دهد و در نتیجه می‌توان گفت نمونه ENDB می‌تواند گزینه مناسبی در آزمایش نمونه‌های بتن آسفالتی در برابر شکست تحت بارگذاری مود III باشد.

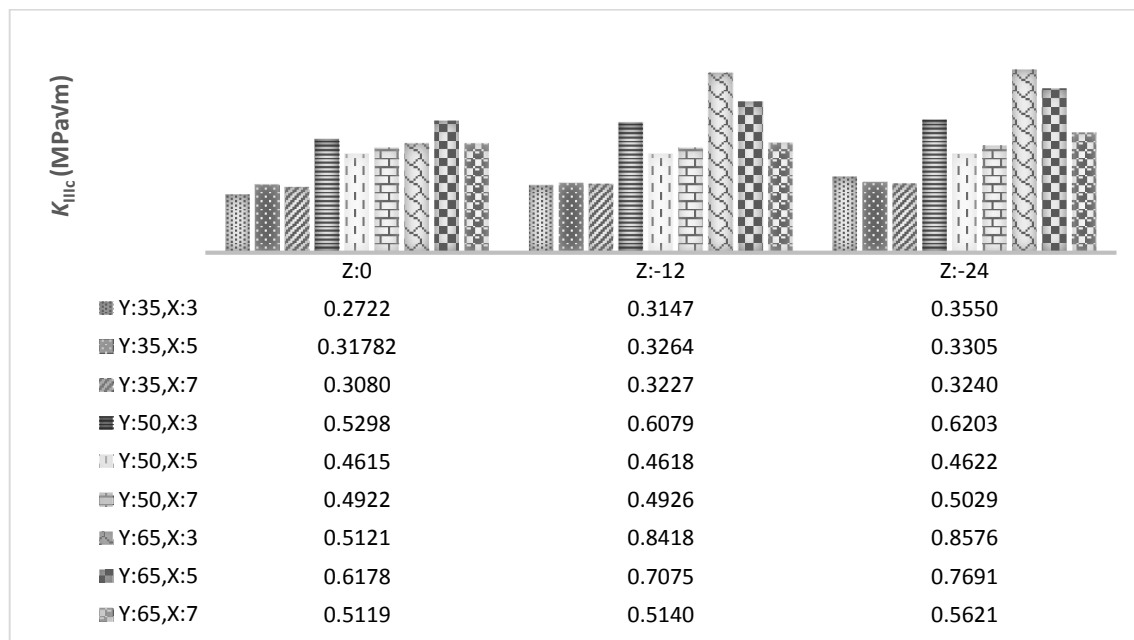
نتایج ارائه شده در جدول ۳ بیانگر آن است که شرایط محیطی و هندسی و میزان درصد فضای خالی تأثیر قابل توجهی بر میزان چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی دارد. نتایج نشان داد که با افزایش ضخامت برش، میزان چقرمگی شکست نیز افزایش می‌یابد. به طور کلی، هنگامی که ضخامت برش از ۳۵ به ۶۵ میلی‌متر تغییر می‌یابد، متوسط چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی به میزان ۲ برابر افزایش یافته است. این نتایج، بیانگر اثر قابل توجه ضخامت برش بر چقرمگی شکست تحت اثر مود کشش خالص می‌باشد. از آنجایی که اندازه بزرگترین سنگدانه مورد استفاده در مخلوط‌های آسفالتی ۱۹ میلی‌متر است، بنابراین پیشنهاد می‌شود که کمترین مقدار ارتفاع نمونه‌های ENDB با نسبت  $a/B = 0.4$  باید حداقل ۵۰ میلی‌متر باشد تا بتواند طول کافی و سطح شکست خوبی را برای مخلوط‌های مورد بررسی ارائه دهد. همچنین، میزان چقرمگی شکست با افزایش درصد فضای خالی کاهش و با کاهش دمای آزمایش به طور کلی افزایش می‌یابد. هنگامی که ضخامت برش کوچک است



شکل ۹. اثر ضخامت برش نمونه بر  $K_{IIIc}$



شکل ۱۰. اثر درصد فضای خالی بر  $K_{IIIc}$



شکل ۱۱. اثر دمای آزمایش بر  $K_{IIIc}$

یافته و هر چه دمای نمونه کمتر بوده، میزان چقرمگی افزایش می‌یابد.

مقدار چقرمگی شکست ( $K_{IIIc}$ ) مخلوط‌های آسفالتی بین مقادیر  $0.2 \text{ Mpa}\sqrt{m}$  و  $0.8 \text{ Mpa}\sqrt{m}$  متغیر است که با بررسی این تغییرات نسبت به مود I بارگذاری، نشان می‌دهد که رفتار شکست آسفالت در مود III نسبت به مود I ضعیف‌تر عمل می‌کند. میزان انحراف معیار استاندارد در محدوده  $0.001$  تا  $0.1$  قرار دارد. بنابراین، خطای استاندارد در مود III مقدار مناسبی را نشان می‌دهد و در نتیجه می‌توان گفت که نمونه ENDB می‌تواند گزینه مناسبی در آزمایش نمونه‌های بتن آسفالتی در برابر شکست تحت بارگذاری مود III باشد.

از آنجایی که مقدار چقرمگی شکست تأثیرپذیری زیادی از ضخامت و ارتفاع نمونه دارد، بسیار ضروری است که ضخامت و ارتفاع معتبری از مخلوط‌های بتن آسفالتی مورد بررسی قرار گیرد. بنابراین، با توجه به نتایج این تحقیق، حداقل ارتفاع نمونه مورد بررسی ENDB باید  $50$  میلی‌متر باشد.

بررسی مود III بارگذاری می‌تواند جهت تحلیل ترک‌های حرارتی که بیشتر در لبه‌های راه‌ها، قوس‌ها و شیب‌ها نمایان می‌شوند و عامل آنها مود بازشونده (لغزش خارج صفحه‌ای) است مورد استفاده قرار گیرد.

## ۶. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، پارامتر درصد فضای خالی به عنوان متغیر تعیین کننده مشخصات مخلوط آسفالتی و میزان ضخامت برش نمونه‌های آسفالتی، شرایط بارگذاری، تکرار و دما به عنوان متغیرهای تأثیرگذار در انجام آزمایش شکست مورد بررسی قرار گرفتند. نمونه ENDB قطعه مناسبی جهت انجام آزمایش‌های شکست، تحت بارگذاری کشش خالص، معرفی گردید.

ساخت نمونه‌های استوانه‌ای با دستگاه ژیراتوری انجام یافت و برش نمونه‌ها به ضخامت‌های  $3/5$ ،  $5$  و  $6/5$  سانتی‌متر صورت گرفت. همچنین، آزمایش شکست در بخش منوتنیک با در نظر گرفتن تمام متغیرهای نامبرده انجام شد.

در شرایط مود بارگذاری III، ضخامت، درصد فضای خالی و دما رابطه معنی‌دار خوبی با چقرمگی شکست داشته و به ترتیب بیشترین تأثیر را در چقرمگی شکست داشتند.

به طور کلی، از تحلیل‌ها مشاهده شد که هرچه نمونه ضخامت برش بیشتری داشته باشد، میزان چقرمگی شکست در این مود نیز افزایش یافته و هرچه میزان درصد فضای خالی کمتر بوده، میزان چقرمگی شکست افزایش

در اکثر تحقیقات انجام شده، اثر نوع قیر، دانه‌بندی، فضای خالی و دما بر چقرمگی شکست مورد آزمایش قرار گرفته و توجهی به اثر شکل هندسه، ضخامت و شکل بارگذاری در چقرمگی شکست آسفالت تحت مود III نشده است. برای بررسی مود III بارگذاری در روسازی، حداقل ضخامت مورد بررسی باید ۵۰ میلی‌متر باشد.

## ۷. مراجع

بیات، ع. ۱۳۹۴. مطالعه تأثیر دما در رفتار شکست بتن‌های آسفالتی تحت بارگذاری مود ترکیبی I/III. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی.

نشریه ۱۰۱ (مشخصات فنی عمومی راه)، ۱۳۹۲. معاونت نظارت راهبردی و امور نظام فنی.

- Ameri, M., Mansourian, A., Heidary Khavas, M., Aliha, M. A. M. and Ayatollahi, M. R. 2011. "Cracked asphalt pavement under traffic loading-A 3D finite element analysis". Eng. Fract. Mech., 78(8): 1817-1826.
- Baek, S. H., Hong, J. P., Kim, S., Choi, J. S. and Kim, K. W. 2011. "Evaluation of fracture toughness of semirigid asphalt concretes at low temperatures". Transport. Res. Rec.: J. Transport. Res. Board, 2210: 30-36.
- Behnia, B., Dave, E., Ahmed, S., Buttlar, W. and Reis, H. 2011. "Effects of recycled asphalt pavement amounts on low-temperature cracking performance of asphalt mixtures using acoustic emissions". Transport. Res. Rec.: J. Transport. Res. Board, 2208: 64-71.
- Braham, A., Buttlar, W. and Ni, F. 2010. "Laboratory mixed-mode cracking of asphalt concrete using the single-edge notch beam". Road Mater. Pavement Design, 11(4): 947-968.
- Edwards, M. and Hesp, S. "Compact tension testing of asphalt binders at low temperatures". Transport. Res. Rec.: J. Transport. Res. Board, 1962: 36-43.
- Hassan, M. and Khalid, H. "Fracture characteristics of asphalt mixtures containing incinerator bottom ash aggregate". Transport. Res. Rec.: J. Transport. Res. Board, 2180: 1-8.
- Kim, H. W., Wagoner, M. P. and Buttlar, W. G. 2009. "Micromechanical fracture modeling of asphalt concrete using a single-edge notched beam test". Mater. Struct. 42(5): 677.
- Lancaster, I. M., Khalid, H. A. and Kougioumtzoglou, I. A. 2013. "Extended FEM modelling of crack propagation using the semi-circular bending test". Constr. Build. Mater., 48: 270-277.
- Li, X. J. and Marasteanu, I. A. 2010. "Using semi circular bending test to evaluate low temperature fracture resistance for asphalt concrete". Exp. Mech., 50(7): 867-876.
- Li, X. J. and Marasteanu, M. 2010. "The fracture process zone in asphalt mixture at low temperature". Eng. Fract. Mech., 77(7): 1175-1190.
- Mohammad, L. N., Kim, M. Y. and Elseifi, M. 2012. "Characterization of asphalt mixture's fracture resistance using the semi-circular bending (SCB) test". 7<sup>th</sup> RILEM International Conference on Cracking in Pavements, The Netherlands.
- Molammad Aliha, M. R., Bahmani, A. and Akhondi, Sh. 2015. "Determination of mode III fracture toughness for different materials using a new designed test configuration". Mater. Design, 86: 863-871.
- Mohammad Aliha, M. R. and Sarbijan, M. J. 2016. "Effects of loading, geometry and material properties on fracture parameters of a pavement containing top-down and bottom-up cracks". Eng. Fract. Mech., 166: 182-197.
- Molenaar, A. A. A., Scarpas, A. A., Liu, X. and Erkens, S. 2002. "Semi-circular bending test; simple but useful?" J. Assoc. Asphalt Paving Technol. 71: 794-815.
- Pirmohammad, S. and Bayat, A. 2016. "Characterizing mixed mode I/III fracture toughness of asphalt concrete using asymmetric disc bend (ADB) specimen." Constr. Build. Mater. 120: 571-580.
- Wagoner, M., Buttlar, W., Paulino, G. and Blankenship, P. 2005a. "Investigation of the fracture resistance of hot-mix asphalt concrete using a disk-shaped compact tension test". Transport. Res. Rec.: J. Transport. Res. Board, 1929: 183-192.
- Wagoner, M. P., Buttlar, W. G. and Paulino, G. H. 2005b. "Development of a single-edge notched beam test for asphalt concrete mixtures." J. Test. Eval. 33(6): 452-460.

Yoo, M. Y., Jeong, S. H., Park, J. Y., Kim, N. H. and Kim, K. W. 2011. "Low-temperature fracture characteristics of selected warm-mix asphalt concretes". *Transport. Res. Rec.: J. Transport. Res. Board*, 2208: 40-47.

