

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی عمران

گروه مهندسی راه و ترابری

بررسی آزمایشگاهی سختی شکست مخلوط‌های آسفالتی مغزه‌گیری شده با استفاده از
آزمون خمش نیم‌دایره

دانشجو

هادی سعیدی

استاد راهنما

دکتر ایمان آقایان

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ۱۳۹۴

تقدیر و تشکر

شکر شایان نثار ایزد منان که توفیق را رفیق راهم ساخت تا این پایان نامه را به پایان برسانم. از استاد فاضل و اندیشمند جناب آقای دکتر ایمان آقایان به عنوان استاد راهنما که همواره اینجانب را مورد لطف و محبت خود قرار داده اند، کمال تشکر را دارم.

این پایان نامه را ضمن تشکر و سپاس بیکران و در کمال افتخار و امتنان تقدیم می نمایم به

محضر ارزشمند پدر و مادر عزیزم به خاطر همه تلاشهای محبت آمیزی که در دوران مختلف زندگی ام انجام داده اند و بامهربانی چگونه زیستن را به من آموخته اند.

به استادان فرزانه و فرهیخته ای که در راه کسب علم و معرفت مرا یاری نمودند.

به آنان که در راه کسب دانش راهنمایم بودند.

به آنان که نفس خیرشان و دعای روح پرورشان بدرقه راهم بود.

بارالها به من کمک کن تا بتوانم ادای دین کنم و به خواسته ی آنان جامه ی عمل بپوشانم.

پروردگارا حسن عاقبت، سلامت و سعادت را برای آنان مقدر نما.

خدایا توفیق خدمتی سرشار از شور و نشاط و همراه و همسو با علم و دانش و پژوهش جهت رشد و شکوفایی ایران کهنسال عنایت بفرما.

با تشکر فراوان

تعهد نامه

اینجانب هادی سعیدی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران-راه و ترابری دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه "بررسی آزمایشگاهی سختی شکست مخلوط های آسفالتی مغزه گیری شده با استفاده از آزمون خمش نیم دایره" تحت راهنمایی دکتر ایمان آقایان به عنوان استاد راهنمای اول متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه / رساله توسط اینجانب انجام شده و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه / رساله تا کنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرکی یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام "دانشگاه صنعتی شاهرود" و یا "Shahrood University of Technology" به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افراد که در به دست آوردن نتایج اصلی پایان نامه / رساله تاثیر گذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه / رساله رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه / رساله ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه / رساله ، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ:

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق و نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحوی مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه / رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه / رساله وجود داشته باشد.

چکیده

ترک خوردگی رویه‌های ساخته شده از مخلوط آسفالت گرم در شرایط دمایی پایین، یکی از دلایل اصلی خرابی روسازی‌های آسفالتی است که باعث کاهش کیفیت سواری و عمر مفید روسازی می‌شود. بارگذاری ترافیکی و چرخه‌های آب‌وهوایی باعث بوجود آمدن تنش‌های کششی در سطح زیرین لایه آسفالت شده، و تکرار این عوامل منجر به پیدایش و گسترش ترک در رویه آسفالت می‌گردد. عدم ترمیم و نگهداری به موقع از روسازی ترک خورده هزینه‌های زیادی را برای ترمیم و بازسازی روسازی در پی خواهد داشت. از این رو شناخت دقیق رفتار و عملکرد قیر و مخلوط آسفالت در دمای پایین و تعیین علل و مکانیزم‌های ترک خوردگی در آن مهم و ضروری است. به علت ماهیت ویسکوالاستیک آسفالت، عوامل مختلف از جمله دما و سرعت بارگذاری تاثیر زیادی روی رفتار آسفالت خواهند داشت. کارهای انجام شده در این پژوهش را می‌توان به دو بخش اصلی، شامل کارهای آزمایشگاهی و مدل سازی عددی تقسیم کرد. در این پژوهش به منظور بررسی مقاومت ترک خوردگی آسفالت در دمای ۱۵- درجه سانتی گراد، تحت مود ۱ بارگذاری، از آزمون خمش نیم دایره استفاده شده است. پارامترهای اصلی شکست از جمله فاکتور شدت تنش، انرژی شکست و مقدار بحرانی نرخ رها سازی انرژی کرنشی برای نمونه‌های آسفالت تعیین شد. در قسمت اول کار آزمایشگاهی، به منظور بررسی تاثیر پیرشدگی قیر بر مقاومت ترک خوردگی آسفالت، سه نمونه آسفالت با شرایط یکسان (از نظر طرح اختلاط، حجم بارگذاری ترافیکی و شرایط آب‌وهوایی) ولی با سه عمر بهره‌برداری مختلف (آسفالت تازه اجرا شده، آسفالت با عمر بهره‌برداری دو سال و آسفالت با عمر بهره‌برداری شش سال) از طریق مغزه‌گیری از روسازی جاده شاهرود-میاندشت تهیه شد. در قسمت دوم کار آزمایشگاهی و به منظور بررسی تاثیر سرعت بارگذاری بر پارامترهای شکست آسفالت، آزمون خمش نیم دایره با دو سرعت ۵ و ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه بر روی نمونه‌های آسفالت با عمر بهره‌برداری دو سال انجام گرفت. در بخش دوم این پژوهش و به منظور مدل سازی رشد ترک در نمونه‌های نیم دایره آسفالت با استفاده از نرم افزار آباکوس، از روش اجزاء محدود گسترش یافته استفاده شده است. بررسی نمودارهای بدست آمده از آزمایش‌ها نشان داد، رفتار آسفالت در دمای ۱۵- درجه سانتی گراد تقریباً خطی است. با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها، با افزایش عمر روسازی تغییر شکل گسیختگی و انرژی شکست نمونه‌ها به شکل محسوسی کاهش یافت. با افزایش عمر روسازی، مقدار بحرانی نرخ رها سازی انرژی کرنشی (که آن را انتگرال جی نیز می‌نامند) کاهش یافت. همچنین، با افزایش سرعت بارگذاری، نیروی شکست نمونه‌ها افزایش و انرژی شکست و تغییر شکل گسیختگی نمونه‌ها کاهش یافت. مقایسه نتایج بدست آمده از کارهای آزمایشگاهی و مدل سازی عددی نشان داد از روش اجزاء محدود گسترش یافته می‌توان به شکل موفقیت آمیزی برای مدل سازی رشد و گسترش ترک استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: اجزاء محدود گسترش یافته، آزمون خمش نیم دایره، پارامترهای شکست، ترک خوردگی آسفالت.

لیست مقالات

Saeidi, H., & Aghayan, I. (2015). Investigating the effects of aging and loading rate on low-temperature cracking resistance of core-based asphalt samples using semi-circular bending test. Submitted to *Construction & building materials*.

سعیدی. ه، آقایان. ا، "بررسی آزمایشگاهی سختی شکست مخلوط آسفالتی با استفاده از آزمون خمش نیم دایره"، سومین کنگره بین المللی عمران معماری و توسعه شهری، تهران ۸ الی ۱۰ دی ماه ۱۳۹۴.

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۱-۲- ضرورت انجام تحقیق	۳
۱-۳- کارهای انجام شده در این تحقیق	۴
۱-۴- اهداف تحقیق	۵
۱-۵- نوآوری	۵
۱-۶- ساختار تحقیق	۶
فصل دوم: مروری بر کارهای گذشته	۹
۲-۱- مقدمه	۱۰
۲-۲- مروری بر کارهای گذشته	۱۰
فصل سوم: تئوری‌ها و روش‌ها	۱۹
۳-۱- مقدمه	۲۰
۳-۲- مودهای مختلف بارگذاری	۲۱
۳-۳- بررسی شکست از نقطه نظر انرژی	۲۲
۳-۳-۱- تئوری ترک گیریفیث	۲۲
۳-۳-۲- نرخ رهاسازی انرژی کرنشی	۲۴
۳-۴- رشد ترک از منظر فاکتور شدت تنش	۲۶
۳-۵- تئوری آزمون خمش نیم دایره	۲۷
فصل چهارم: کارهای آزمایشگاهی	۳۱

۳۲.....	۱-۴ - مقدمه
۳۲.....	۲-۴ - مشخصات مصالح سنگی
۳۳.....	۱-۲-۴ - دانه بندی مصالح سنگی
۳۵.....	۲-۲-۴ - مرغوبیت مصالح سنگی
۳۶.....	۳-۲-۴ - وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی
۳۶.....	۳-۴ - آزمایش های قیر
۳۸.....	۴-۴ - طرح اختلاط آسفالت
۴۰.....	۵-۴ - تهیه نمونه های SCB آسفالت
۴۱.....	۶-۴ - دستگاه بارگذاری
۴۱.....	۷-۴ - تهیه فیکسچر مناسب برای آزمون SCB
۴۲.....	۸-۴ - شرح آزمایش
۴۷.....	فصل پنجم: نتایج کار آزمایشگاهی
۴۸.....	۱-۵ - مقدمه
۴۸.....	۲-۵ - بررسی تاثیر پیرشدگی بر پارامترهای شکست نمونه های آسفالت با عمر بهره برداری مختلف
۵۰.....	۱-۲-۵ - مقدار بحرانی مود ۱ فاکتور شدت تنش
۵۳.....	۲-۲-۵ - انرژی شکست
۵۴.....	۳-۲-۵ - نرخ رهاسازی انرژی کرنشی (انتگرال جی)
۵۶.....	۳-۵ - بررسی تاثیر سرعت بارگذاری بر پارامترهای شکست نمونه های آسفالت با عمر بهره برداری مختلف
۵۷.....	۱-۳-۵ - مقدار بحرانی مود ۱ فاکتور شدت تنش

۵۹.....	۵-۳-۲- انرژی شکست
۵۹.....	۵-۳-۳- نرخ رهاسازی انرژی کرنشی (انتگرال جی)
۶۰.....	۵-۳-۴- بررسی تاثیر سرعت بارگذاری بر نیروی شکست و تغییرشکل گسیختگی نمونه‌ها
۶۳.....	فصل ششم: مدل سازی
۶۴.....	۶-۱- مقدمه
۶۴.....	۶-۲- گام‌های مورد نیاز برای ایجاد و تحلیل یک مدل در آباکوس
۶۵.....	۶-۳- روش اجزاء محدود گسترش یافته (<i>XFEM</i>)
۶۶.....	۶-۳-۱- مفهوم تقسیم‌بندی واحد
۶۸.....	۶-۴- مدل سازی ورق آلومینیومی تحت مود ۱ بارگذاری به روش <i>XFEM-LEFM</i> در آباکوس
۷۰.....	۶-۵- مدل سازی رشد ترک در نمونه <i>SCB</i> به روش <i>XFEM-LEFM</i>
۷۵.....	فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۷۶.....	۷-۱- نتیجه‌گیری
۷۸.....	۷-۲- پیشنهادات
۷۹.....	فصل هشتم: منابع
۸۵.....	پیوست ۱: نتایج آزمایشگاه مکانیک خاک

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: ساختار کلی کارهای انجام شده در این تحقیق..... ۷
- شکل ۱-۳: مودهای مختلف بارگذاری..... ۲۱
- شکل ۲-۳: حفره بیضوی..... ۲۲
- شکل ۳-۳: تنش در نواحی اطراف نوک ترک در یک جسم الاستیک خطی..... ۲۶
- شکل ۴-۳: اجزاء مختلف آزمون SCB..... ۲۷
- شکل ۵-۳: مسیر منحنی شکل اطراف نوک ترک برای تعیین انتگرال جی..... ۲۹
- شکل ۱-۴: نمودار دانه‌بندی مخلوط مصالح سنگی آسفالت لایه بیندر..... ۳۴
- شکل ۲-۴: نمودارهای تعیین درصد قیر بهینه به روش مارشال..... ۳۹
- شکل ۳-۴: مراحل تهیه نمونه‌های نیم دایره‌ای شکل آسفالت..... ۴۰
- شکل ۴-۴: نمای کلی از دستگاه بارگذاری خمش سه نقطه‌ای..... ۴۱
- شکل ۵-۴: فیکسچر ساخته شده برای بارگذاری خمش سه نقطه‌ای..... ۴۲
- شکل ۶-۴: آماده سازی نمونه‌های نیم دایره برای آزمون SCB..... ۴۳
- شکل ۷-۴: اندازه‌گیری ابعاد نمونه‌ها با استفاده از کولیس..... ۴۳
- شکل ۸-۴: کدگذاری نمونه‌ها قبل از قرار دادن آنها درون فریزر..... ۴۴
- شکل ۹-۴: قرار دادن نمونه‌ها درون فریزر با دمای ۱۵- درجه سانتی‌گراد..... ۴۴
- شکل ۱-۵: نمودار نیرو-تغییر مکان بدست آمده از آزمایش SCB بر روی یکی از نمونه‌ها..... ۵۱
- شکل ۲-۵: مسیر رشد ترک در یکی از نمونه‌ها تحت مود ۱ بارگذاری..... ۵۱
- شکل ۳-۵: انرژی شکست نمونه‌های SCB با عمر بهره‌برداری مختلف به ازای طول‌های مختلف ترک..... ۵۴

- شکل ۵-۴: نرخ رهاسازی انرژی کرنشی برای نمونه آسفالت شش ساله ۵۵
- شکل ۵-۵: نرخ رهاسازی انرژی کرنشی برای نمونه آسفالت دو ساله ۵۶
- شکل ۵-۶: نرخ رهاسازی انرژی کرنشی برای نمونه آسفالت تازه ۵۶
- شکل ۵-۷: تغییرات انرژی شکست به ازای افزایش سرعت بارگذاری ۵۹
- شکل ۵-۸: تغییرات انتگرال جی به ازای افزایش سرعت بارگذاری ۶۰
- شکل ۵-۹: تاثیر سرعت بارگذاری بر نیروی گسیختگی نمونه‌های آسفالت دو ساله ۶۱
- شکل ۵-۱۰: تاثیر سرعت بارگذاری بر تغییر شکل گسیختگی نمونه‌های آسفالت دو ساله ۶۱
- شکل ۶-۱: نحوه غنی‌سازی گره‌ای در نواحی اطراف ترک به روش *XFEM* ۶۶
- شکل ۶-۲: هندسه و نحوه مش‌بندی ورق آلومینیومی ۶۹
- شکل ۶-۳: توزیع تنش نواحی اطراف ترک در مراحل مختلف رشد ترک ۶۹
- شکل ۶-۴: هندسه نمونه *SCB* و نحوه مش‌بندی آن در مدل‌سازی ۷۰
- شکل ۶-۵: توزیع تنش در مراحل مختلف رشد ترک در نمونه *SCB* ۷۲
- شکل ۶-۶: نمودار نیرو-تعییر مکان بدست آمده از کار آزمایشگاهی و مدل‌سازی ۷۳

فهرست جداول

جدول ۱-۲: مروری بر کارهای گذشته.....	۱۶
جدول ۱-۴: نسبت‌های اختلاط مصالح سنگی مورد استفاده در ساخت آسفالت.....	۳۴
جدول ۲-۴: دانه‌بندی مخلوط مصالح سنگی مورد استفاده در ساخت آسفالت.....	۳۴
جدول ۳-۴: نتایج آزمایش‌های مرغوبیت مصالح سنگی.....	۳۵
جدول ۴-۴: وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی.....	۳۶
جدول ۵-۴: مشخصات فیزیکی قیر خالص مورد استفاده در این پژوهش.....	۳۷
جدول ۶-۴: حداکثر وزن مخصوص تئوری آسفالت به ازای درصد‌های مختلف قیر.....	۳۹
جدول ۷-۴: پارامترهای اساسی مورد استفاده برای انجام آزمون <i>SCB</i> در این پژوهش.....	۴۵
جدول ۱-۵: مشخصات هندسی، نیرو و تغییر مکان گسیختگی نمونه‌های <i>SCB</i> تحت بارگذاری با سرعت یکنواخت ۵ میلی‌متر بر دقیقه.....	۴۹
جدول ۲-۵: مود ۱ فاکتور شدت تنش برای نمونه‌های آسفالت با عمر بهره‌برداری مختلف تحت بارگذاری با سرعت یکنواخت ۵ میلی‌متر بر دقیقه.....	۵۲
جدول ۳-۵: نیرو و تغییر مکان گسیختگی نمونه‌های <i>SCB</i> برای آسفالت با عمر بهره‌برداری دو سال.....	۵۷
جدول ۴-۵: فاکتور شدت تنش به ازای سرعت‌های بارگذاری مختلف برای آسفالت با عمر بهره‌برداری دو سال.....	۵۸
جدول ۱-۶: مشخصات و داده‌های مورد استفاده در ورودی نرم‌افزار.....	۶۸

فصل اول : مقدمه

۱-۱- مقدمه

ترک^۱ در روسازی‌های آسفالتی یکی از اصلی‌ترین مکانیزم‌های خرابی به شمار می‌رود. علت این امر تاثیر مستقیم این نوع خرابی بر کیفیت سواری^۲ و دوام درازمدت^۳ روسازی آسفالتی است. ترک‌ها را بر اساس محل پیدایش به دو دسته کلی تقسیم بندی می‌کنند.

۱- ترک‌هایی که محل پیدایش آنها سطح زیرین لایه آسفالت است و به سمت سطح بالایی لایه آسفالت گسترش می‌یابند^۴.

۲- ترک‌هایی که محل پیدایش آنها سطح بالایی لایه آسفالت است و به سمت سطح پایین لایه آسفالت گسترش می‌یابند^۵.

چنانچه ترک در لایه‌های زیرین سازه روسازی بوقوع بپیوندد، نیازمند صرف هزینه‌های بسیار زیاد برای ترمیم و تعمیر روسازی می‌باشد. ترک‌های برودتی (ترک‌های دمای پایین) در مناطق سردسیر، یکی از شایع‌ترین انواع ترک در روسازی‌های آسفالتی است. در دماهای پایین، سطح بالایی لایه آسفالت دچار انقباض شده و اختلاف دمای بین سطح بالا و پایین لایه آسفالت باعث بوجود آمدن تنش‌های کششی در لایه آسفالت می‌شود. این تنش‌های کششی به مرور زمان و با کاهش بیشتر دما افزایش یافته و با رسیدن مقدار این تنش‌ها به مقاومت کششی آسفالت، باعث ایجاد ترک در سطح بالایی لایه آسفالت می‌شوند. بر اثر چرخه‌های متوالی آب و هوا و همچنین تکرار بارگذاری ترافیکی، بر شدت این ترک‌ها افزوده شده و این عامل موجب نفوذ آسان آب و رطوبت به بدنه اصلی روسازی می‌شود. این امر به نوبه خود باعث تسریع خرابی روسازی می‌گردد. در کشور ما سالانه هزینه‌های زیادی صرف ساخت، ترمیم و نگهداری روسازی‌های آسفالتی می‌شود. در نتیجه درک کاملی از رفتار و مشخصات قیر و مصالح آسفالتی،

۱- Crack

۲- Ride quality

۳- Long-term durability

۴- Bottom-up crack

۵- Downward crack

همچنین علل و مکانیزم‌های خرابی در روسازی آسفالتی می‌تواند باعث صرفه‌جویی زیادی در بودجه کشور شود. از این‌رو محققان زیادی به بررسی دقیق رفتار و عملکرد روسازی‌های آسفالتی در شرایط بهره‌برداری پرداخته‌اند. محققان با استفاده از مفهوم مکانیک شکست^۱ به بررسی علل و مکانیزم‌های پیدایش و رشد ترک در روسازی‌های آسفالتی پرداخته‌اند. مکانیک شکست شاخه‌ای از علم مکانیک است که به مطالعه پیدایش و گسترش ترک در مواد گوناگون می‌پردازد. آزمون‌های آزمایشگاهی زیادی به منظور بررسی و ارزیابی ویژگی‌های شکست در مخلوط‌های آسفالتی وجود دارد که از میان آنها می‌توان به آزمون خمش سه و چهار نقطه‌ای تیر آسفالتی^۲ (*SENB*)، آزمون کشش نمونه متراکم دایره‌ای^۳ (*DCT*)، آزمون کشش غیر مستقیم^۴ (*IDT*) و آزمون خمش نیم‌دایره^۵ (*SCB*) اشاره کرد. از میان آزمون‌های فوق، آزمون *SCB* به دلیل امکان تهیه نمونه‌ها هم به صورت آزمایشگاهی و هم از طریق مغزه‌گیری، راحتی انجام آزمایش و همچنین در دسترس بودن امکانات و تجهیزات مورد نیاز برای انجام آزمایش، نسبت به سایر آزمون‌ها از اقبال بیشتری برخوردار بوده است. در مقایسه با سایر روش‌های ذکر شده، آزمون *SCB* دارای دهانه بارگذاری کوتاه تر، هندسه پیچیده‌تر و همچنین الگوی بارگذاری مناسب‌تری است. به گونه‌ای که به شرایط بارگذاری واقعی نزدیک‌تر است.

۲-۱- ضرورت انجام تحقیق

در کشور ما همه ساله هزینه‌های زیادی صرف ساخت، ترمیم و نگهداری روسازی‌های آسفالتی می‌شود. در نتیجه درک کاملی از رفتار و مشخصات قیر و مخلوط آسفالت، همچنین تعیین علل و مکانیزم‌های خرابی در روسازی آسفالتی می‌تواند باعث صرفه‌جویی زیادی در بودجه کشور شود. با توجه به اینکه یکی از شایع‌ترین خرابی‌ها در روسازی‌های آسفالتی، وقوع ترک‌های برودتی است، در این پژوهش سعی

۱-Fracture mechanic

۲-Three and four point bending single edge notched beam test

۳-Disk-shaped compact tension test

۴-Indirect tension test

۵-Semi-circular bending test

شده تا به بررسی سختی شکست مخلوط‌های آسفالتی در دمای پایین پرداخته شود. به منظور بررسی دقیق‌تر و بهتر پارامترهای شکست مخلوط آسفالت و همچنین نزدیک‌تر شدن نتایج بدست آمده با شرایط واقعی، تمامی نمونه‌های آسفالت استفاده شده در این پژوهش از طریق مغزه‌گیری از آسفالت اجرا شده در شرایط واقعی با عمرهای بهره‌برداری مختلف بدست آمده است.

۱-۳- کارهای انجام شده در این تحقیق

کارهای انجام شده در این تحقیق را می‌توان به دو بخش کلی شامل کارهای آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی تقسیم بندی کرد. در قسمت اول کار آزمایشگاهی، به منظور بررسی تاثیر پیرشدگی^۱ آسفالت بر پارامترهای شکست آن (شامل انرژی شکست، فاکتور شدت تنش، مقدار بحرانی نرخ رها سازی انرژی)، سه نوع آسفالت با شرایط یکسان (از نظر طرح اختلاط، حجم ترافیک مسیر و شرایط آب و هوایی) ولی با سه عمر بهره‌برداری مختلف (آسفالت تازه اجرا شده، آسفالت با عمر بهره‌برداری ۲ سال و آسفالت با عمر بهره‌برداری ۶ سال) با استفاده از آزمون SCB مورد آزمایش شکست قرار گرفتند. آزمون SCB تحت مود ۱ بارگذاری و با سرعت یکنواخت ۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفت. در قسمت دوم کار آزمایشگاهی، به منظور بررسی تاثیر سرعت بارگذاری بر مقاومت ترک‌خوردگی آسفالت، نمونه‌های آسفالت با عمر بهره‌برداری دو سال، تحت بارگذاری یکنواخت با دو سرعت مختلف (۵ mm/min و ۵۰ mm/min) قرار گرفتند. دمای انجام آزمایش SCB در هر دو قسمت کار آزمایشگاهی، ۱۵ °C- در نظر گرفته شد. تمامی نمونه‌های آسفالت استفاده شده در این تحقیق از طریق مغزه‌گیری از آسفالت اجرا شده در جاده محور میاندشت- شاهرود تهیه شده است.

بخش دوم این تحقیق عبارتست از مدل‌سازی ترک به روش اجزاء محدود توسعه یافته^۲ (XFEM) در نرم افزار آباکوس^۳. از نتایج و خروجی‌های بدست آمده از بخش آزمایشگاهی این پژوهش به عنوان داده

۱ - Aging

۲- Extended finite element method

۳- Abaqus

های ورودی مورد نیاز برای مدل سازی ترک در نرم افزار اجزاء محدود آباکوس استفاده شده است. در انتها به بررسی و مقایسه نتایج بدست آمده از آزمون های آزمایشگاهی و مدل سازی عددی پرداخته شده است.

۱-۴- اهداف پایان نامه

اهداف این پایان نامه به ترتیب عبارتست از

- ۱ - تعیین آزمایشگاهی پارامترهای شکست آسفالت شامل انرژی شکست، فاکتور شدت تنش و مقدار بحرانی نرخ رهاسازی انرژی کرنشی تحت مود ۱ بارگذاری در دمای ۱۵- درجه سانتی گراد.
- ۲ - بررسی تاثیر سرعت بارگذاری و پیرشدگی بر سختی شکست نمونه های آسفالت.
- ۳ - مدل سازی ترک به روش *XFEM* بر اساس فرضیات مکانیک شکست الاستیک خطی^۱ (*LEFM*) در نرم افزار آباکوس انجام گرفت.
- ۴ - مقایسه نتایج بدست آمده از خروجی های آزمایشگاهی با نتایج حاصل از مدل سازی عددی.

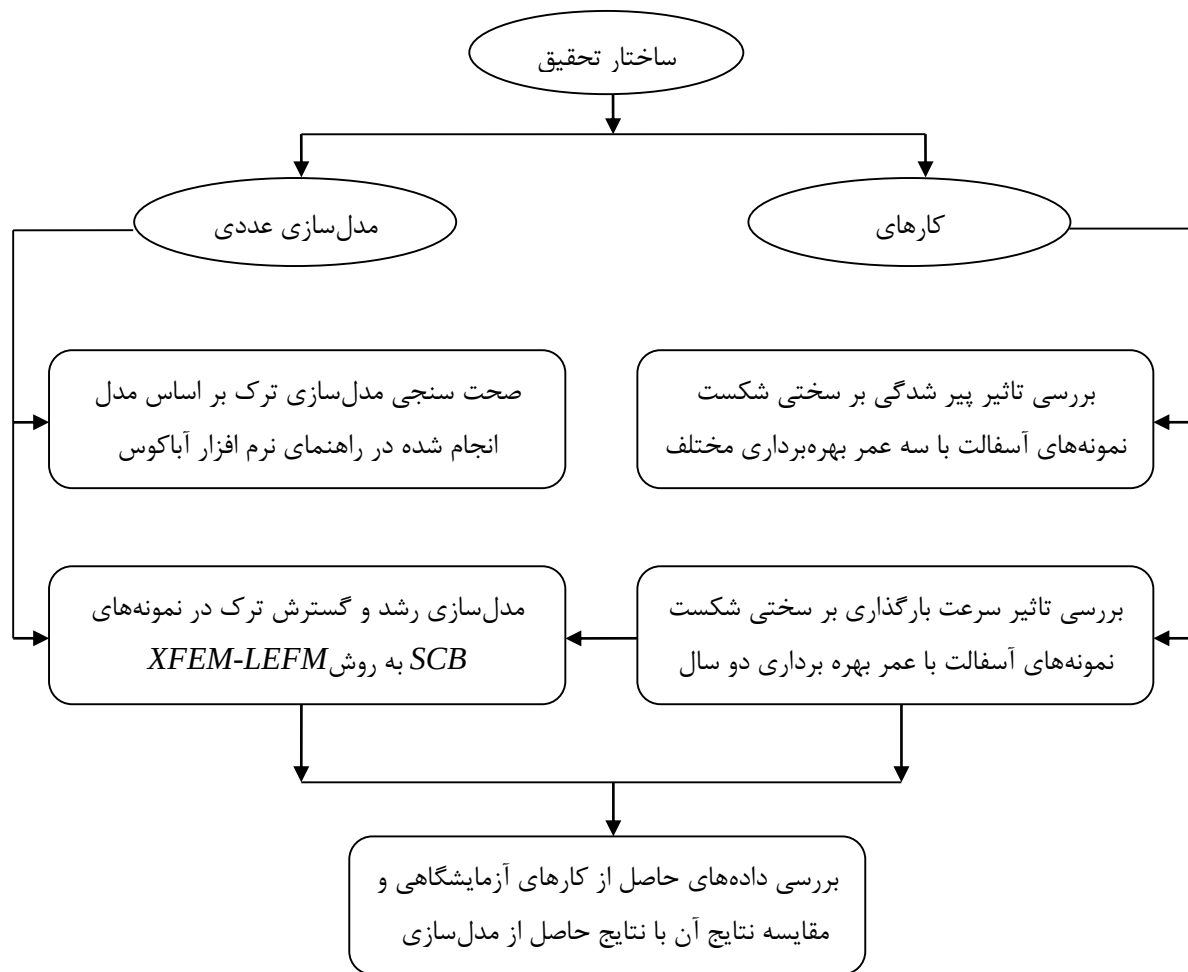
۱-۵- نوآوری

با مروری بر کارهای انجام گرفته تاکنون، می توان گفت که تاکنون تحقیق جامعی در زمینه بررسی تاثیر سرعت بارگذاری و پیرشدگی بر روی مقاومت ترک خوردگی مخلوط های آسفالتی مغزه گیری شده انجام نشده است. به منظور بررسی تاثیر پیرشدگی بر سختی شکست مخلوط های آسفالت، از نمونه های مغزه گیری شده آسفالت استفاده شده است. برای این منظور از سه نوع آسفالت با شرایط یکسان (از نظر طرح اختلاط، حجم ترافیک و شرایط آب و هوا) ولی با سه عمر بهره برداری مختلف، برای تعیین پارامتر های شکست مخلوط های آسفالت استفاده شده است. سال اجرای نمونه های آسفالت مورد استفاده در این تحقیق به ترتیب عبارتند از آسفالت سال های ۱۳۸۸ و ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴.

۱- Linear elastic fracture mechanic

۱-۶- ساختار تحقیق

در فصل اول این تحقیق به طور خلاصه مقدمه‌ای از کارهای انجام شده، ضرورت انجام تحقیق و اهداف و نوآوری‌های بکار رفته در این پژوهش ذکر شده است. در فصل دوم به بررسی و مروری بر کارهای مرتبط انجام شده توسط سایر محققین در زمینه ترک‌خوردگی در روسازی آسفالتی و نتایج و دستاوردهای آنها پرداخته شده است. در فصل سوم تئوری‌ها و روش‌های به‌کار رفته در این پژوهش بطور کامل ذکر شده و فرضیات و فرمول‌های مورد نیاز در فصل‌های بعدی به تفصیل شرح داده شده است. در فصل چهارم خروجی‌های بدست آمده از کارهای آزمایشگاهی انجام شده در این تحقیق به طور کامل ذکر شده و مراحل انجام آزمایش‌ها شرح داده شده است. در فصل پنجم به بررسی و آنالیز داده‌های حاصل از کار آزمایشگاهی پرداخته شده است و نتایج آن به صورت جداول و نمودارهای متعدد نشان داده شده است. در فصل ششم این تحقیق، یک مدل عددی از رشد ترک در نمونه‌های نیم دایره آسفالت با استفاده از روش اجزاء محدود گسترش یافته و بر پایه فرضیات مکانیک شکست الاستیک خطی انجام شده است. در فصل هفتم به بررسی و مقایسه نتایج کار آزمایشگاهی و مدل سازی عددی پرداخته شده است. به‌طور کلی کارهای انجام شده در این تحقیق را می‌توان به دو بخش اصلی تقسیم بندی کرد. شکل ۱-۱ ساختار کلی کارهای انجام شده در این تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱ : ساختار کلی کارهای انجام شده در این تحقیق

فصل دوم : مروری بر کارهای گذشته

یافتن یک آزمون آزمایشگاهی مناسب برای تعیین سختی شکست مخلوط‌های آسفالتی، که در عین سهولت، نتایج منطقی، قابل قبول و تکرارپذیری داشته باشد کار دشواری است. در طول سال‌های گذشته محققان از آزمون‌های آزمایشگاهی مختلفی برای بررسی سختی شکست مخلوط‌های آسفالتی استفاده کرده اند. هر یک از این روش‌ها با محدودیت‌ها و مشکلاتی روبرو بوده اند. از این میان می‌توان به آزمون خمش سه و چهار نقطه‌ای تیر آسفالتی، آزمون کشش نمونه متراکم استوانه‌ای، آزمون کشش غیر مستقیم، آزمون کشش برزلی و آزمون خمش نیم‌دایره اشاره کرد. آزمون SCB به دلیل امکان تهیه نمونه‌ها هم بصورت آزمایشگاهی و هم از طریق مغزه‌گیری میدانی، سهولت در ایجاد ترک بر روی لبه صاف نمونه‌ها، راحتی انجام آزمایش، در دسترس بودن امکانات و تجهیزات مورد نیاز و همچنین هزینه کمتر این روش نسبت به سایر روش‌ها از اقبال بیشتری برخوردار بوده است.

۲-۲- مروری بر کارهای گذشته

آزمون SCB برای اولین بار توسط چانک و کروپو^۱ (۱۹۸۴) برای تعیین سختی شکست نمونه‌های سنگ پیشنهاد شد. تا قبل از این پژوهش، تهیه نمونه‌های مورد نیاز برای تعیین سختی شکست مصالح فلزی بر اساس استانداردهای مربوطه، امری دشوار و پرهزینه بود. از سوی دیگر به دلیل ضعف مصالحی مانند سنگ، بتن، سرامیک و ... در برابر کشش، برای انجام آزمایش سختی شکست، نیاز بود تا این مصالح از طریق بارگذاری فشاری دچار شکست کششی شوند. از این رو چانک و همکارش برای حل این مشکل پیشنهاد کردند تا برای تعیین سختی شکست این مصالح، از نمونه‌های نیم دایره‌ای شکل که در لبه صاف آن دارای یک ترک از قبل تعبیه شده می‌باشد تحت بارگذاری خمش سه نقطه‌ای استفاده شود. به دلیل هندسه پیچیده نمونه‌های نیم دایره، ارائه یک راه‌حل تحلیلی برای تعیین فاکتور شدت تنش در آنها کار

۱- Chong & Kuruppu

دشواری است. از این رو چانگ و همکارش یک راه حل عددی را برای بازه محدودی از متغیرها، شامل ابعاد نمونه و طول ترک ارائه کردند.

پس از آن لیم و جانستون^۱ (۱۹۹۳) راه حل های عددی ارائه شده توسط چانگ را برای بازه وسیع تری از نسبت طول ترک به شعاع نمونه نیم دایره (a/R) و همچنین نسبت دهانه بارگذاری به شعاع نمونه نیم دایره (s/R) بررسی کردند. آنها فاکتور شدت تنش را برای حالت های مختلفی از a/R و s/R به صورت جدول ارائه کردند. همچنین توانستند فاکتور شدت تنش نمونه های نیم دایره ای را برای حالت های مختلف دهانه بارگذاری و مودهای ترکیبی بارگذاری تعیین کنند.

ون دون و همکارانش^۲ (۱۹۹۷)، استفاده از آزمون خمشی سه نقطه ای بر روی نمونه های نیم دایره ای شکل آسفالت را به جای آزمون IDT مورد بررسی قرار دادند. مقایسه نتایج بدست آمده برای مقاومت کششی تحت آزمون SCB و آزمون IDT ، نشان دهنده رابطه منطقی بین نتایج این دو آزمون بود. هوانگ و همکارانش^۳ (۲۰۰۵) در پژوهش خود به مقایسه مقاومت کششی بدست آمده از آزمون IDT و آزمون SCB پرداختند. آزمون IDT به عنوان آزمون استاندارد مورد استفاده برای تعیین مقاومت کششی نمونه های آسفالت بطور گسترده مورد استفاده قرار می گیرد. علیرغم مزیت های بسیار زیاد این روش، تغییر شکل های ماندگار بوجود آمده بر روی نمونه آسفالت، در زیر میله های بارگذاری دستگاه آزمایش، نامطلوب بوده و در بعضی موارد نتایج آن برای ارزیابی پتانسیل ایجاد ترک در مخلوط های آسفالتی مناسب نیست. آزمون SCB می تواند تا حد زیادی تغییر شکل های ماندگار ایجاد شده در زیر میله بارگذاری را کاهش داده و در نتیجه به عنوان گزینه مناسب تری برای تعیین مقاومت کششی نمونه های آسفالت نسبت به آزمون کشش غیر مستقیم در نظر گرفته شود.

۱- Lim & Johnston.

۲- Van de ven et al.

۳- Huang et al.

عربانی و فردوسی^۱ (۲۰۰۷) در تحقیق آزمایشگاهی خود به بررسی آزمون *SCB* در دو دمای 0°C و 25°C و تحت بارگذاری یکنواخت با سرعت ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد آزمون *SCB* می‌تواند به عنوان گزینه مناسبی برای تعیین مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالت در نظر گرفته شود. پژوهش آنها همچنین نشان داد، مقاومت کششی بدست آمده از آزمون *SCB*، قابل مقایسه و قابل تبدیل به نتایج بدست آمده از آزمون کشش *IDT* است. آنها در تحقیق خود از آزمایش‌های استاتیکی و دینامیکی، شامل آزمون *SCB*، آزمایش‌های دستگاه تست نائینگهام، آزمون *IDT* و آزمایش سه محوری ویم بر روی بتن آسفالتی با درصد‌های مختلف قیر و فیلر و با استفاده از دو دانه‌بندی استاندارد استفاده کردند. مقایسه نتایج حاصل از آزمایش‌های رایج و نتایج آزمایش‌های استاتیکی و دینامیکی انجام شده بر روی نمونه‌های *SCB*، دقت و صحت نتایج آزمایش *SCB* به منظور تعیین ویژگی‌های رفتاری کوتاه مدت و بلند مدت مخلوط آسفالتی را تایید می‌کند. از دیگر برتری‌های این روش نسبت به آزمون *IDT* الگوی بهتر شکست نمونه‌ها است. الگوی شکست نمونه‌ها در آزمون *SCB* نشان می‌دهد دلیل اصلی خرابی کشش است. بارگذاری اعمال شده به نمونه‌ها در روش خمش نیم دایره ۰/۱ تا ۰/۲ بارگذاری اعمال شده در روش کشش غیر مستقیم است.

ژانگ و همکارانش^۲ (۲۰۰۵) در یک تحقیق آزمایشگاهی به منظور بررسی مقاومت شکست مخلوط آسفالت با استفاده از آزمون *SCB*، سیزده مخلوط آسفالتی مختلف متشکل از چهار نوع قیر و با چهار سطح تراکم مختلف را با استفاده از دستگاه تراکم چرخشی سوپرپیو تهیه کردند. آنها مقاومت ترک‌خوردگی نمونه‌های آسفالت را در دمای 25°C از طریق تعیین آزمایشگاهی مقدار بحرانی انتگرال جی بررسی کردند. نتایج تحقیق آنها نشان دهنده تغییر مقاومت ترک‌خوردگی آسفالت به ازای تغییر نوع قیر و اندازه اسمی بزرگترین سنگدانه بود.

۱- Arabani & Ferdowsi

۲- Zhong Wu et al.

لنکستر و خالد^۱ (۲۰۱۱) در یک تحقیق آزمایشگاهی به بررسی تاثیر سرعت بارگذاری بر پارامترهای شکست مخلوط‌های آسفالتی پرداختند. آنها همچنین تاثیر استفاده از افزودنی استایرن-بوتادین-استارین^۲ (SBS) را بر مقاومت ترک‌خوردگی مخلوط آسفالتی بررسی کرده و نتایج بدست آمده از مخلوط اصلاح شده با درصد‌های وزنی مختلف را با مخلوط اصلاح نشده مقایسه کردند. در این تحقیق بارگذاری اعمال شده به صورت یکنواخت و با دو سرعت ۵ و ۵/۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفت. نتایج بدست آمده از تحقیق آنها نشان داد استفاده از پلیمر SBS، باعث بهبود مقاومت چسبندگی و افزایش مقاومت ترک‌خوردگی در نمونه‌های آسفالت گردیده است. آنها دریافتند که با کاهش سرعت بارگذاری، نرخ رها سازی انرژی در نمونه‌هایی با مشخصات یکسان کاهش می‌یابد که این امر نشان دهنده جذب انرژی کمتر نمونه‌ها تا لحظه شکست می‌باشد. در سرعت‌های بارگذاری بالاتر، رفتار ماده به رفتار الاستیک نزدیک‌تر می‌شود.

لنکستر و همکارانش^۳ (۲۰۱۳) در ادامه پژوهش قبلی خود به مدل‌سازی ترک به روش XFEM با استفاده از نرم افزار آباکوس پرداختند. آنها از نتایج بدست آمده از کار آزمایشگاهی خود به عنوان پارامترهای مورد نیاز در مدل‌سازی ترک به روش XFEM استفاده کردند. آنها با استفاده از مدل ناحیه چسبنده^۴ (CZM)، رشد ترک در نمونه‌های SCB آسفالت را مورد بررسی قرار دادند. نتایج مدل‌سازی آنها نشان داد از روش XFEM به شکل موفقیت آمیزی می‌توان در مدل‌سازی پیدایش و رشد ترک در آسفالت استفاده کرد.

بیلیگری و همکارانش^۵ (۲۰۱۲) به منظور ارزیابی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر ترک‌خوردگی از آزمون SCB استفاده کردند. آنها در بخش اول کار خود به بررسی مقاومت ترک‌خوردگی دو نوع آسفالت ساخته شده در آزمایشگاه با درصد‌های مختلف قیر و در دماهای ۰ °C و ۱۰ °C و ۱۰ °C- و با

۱- Lancaster & Khalid.

۲- Styren-butadiene-styren

۳-Lancaster et al.

۴-Cohesive zone model

۵- Biligiri et al.

سرعت یک میلی‌متر بر دقیقه پرداختند. برای این منظور آزمون *SCB* را بر روی دوازده نمونه نیم دایره‌ای آسفالت انجام دادند (چهار تکرار به ازای هر نمونه). نتایج تحقیق آنها نشان داد با افزایش درصد قیر، فاکتور شدت تنش نمونه‌ها کاهش می‌یابد. همچنین با کاهش دمای آزمایش، مقدار فاکتور شدت تنش نمونه‌ها افزایش یافت. این امر نشان‌دهنده تاثیر دما بر روی مقاومت ترک‌خوردگی نمونه‌های آسفالت است. آنها در بخش دوم کار خود به بررسی مقاومت ترک‌خوردگی نمونه‌های آسفالت مغزه‌گیری شده از روسازی پرداختند.

مصطفی و همکارانش^۱ (۲۰۱۲) در مقاله خود به بررسی آزمایشگاهی مقاومت ترک‌خوردگی نمونه‌های آسفالت در دمای 25°C با استفاده از آزمون *SCB* پرداختند. در بخش دوم کار خود با استفاده از داده‌های حاصل از نتایج بخش آزمایشگاهی، به مدل‌سازی رشد ترک با استفاده از روش *XFEM* پرداختند. آنها در مدل‌سازی خود از المان‌های ناحیه چسبنده استفاده کردند. به منظور تعیین پارامترهای مورد نیاز برای مدل‌سازی، از آزمون و خطا و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی استفاده شد.

بهبهانی و همکارانش^۲ (۲۰۱۳) در یک تحقیق آزمایشگاهی به بررسی تاثیر مشخصات آسفالت بر روی مقاومت ترک‌خوردگی آن با استفاده از آزمون *SCB* پرداختند. آنها در پژوهش خود به بررسی تاثیر عوامل مختلف از جمله اندازه سنگدانه‌ها، نوع سنگدانه، درصد قیر و فضای خالی بر مقاومت ترک‌خوردگی آسفالت در دمای 15°C پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان‌دهنده تاثیر زیاد عوامل ذکر شده بر مقاومت شکست آسفالت بود. به طور کلی مقدار فاکتور شدت تنش برای مصالح با دانه‌بندی ریزتر کمتر از مقدار متناظر آن در مصالح با دانه‌بندی درشت‌تر بود. همچنین با افزایش درصد قیر، فاکتور شدت تنش در نمونه‌ها کاهش یافت.

وَنگ و همکارانش^۳ (۲۰۱۳) در پژوهش خود به مدل‌سازی رشد ترک با استفاده از روش *XFEM* پرداختند. آنها همچنین تاثیر پودر لاستیک بر مقاومت ترک‌خوردگی آسفالت در دمای پایین را مورد

۱- Mostafa et al.

۲- Behbahani et al.

۳-Wang et al.

ارزیابی قرار دادند. نتایج تحقیق آنها نشان دهنده موفقیت روش *XFEM* در مدل سازی رشد ترک در نمونه های نیم دایره ای آسفالت بود.

جدول ۱-۲ برخی دیگر از کارهای انجام شده توسط محققان را به منظور بررسی عوامل مختلف بر سختی شکست مخلوط های آسفالتی نشان می دهد.

جدول ۲-۱: مروری بر کارهای گذشته

نویسنده (نویسندگان)	نوع آزمون و خروجی‌ها	شرایط آزمون	توضیحات
محمد علیها و همکاران ^۱ (۲۰۱۵)	SCB فاکتور شدت تنش	بررسی مود ترکیبی شکست تحت دماهای 30°C - 22°C و 15°C ، سرعت بارگذاری 3 mm/min	بررسی تاثیر دما و فضای خالی بر سختی شکست مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با پنج نوع پلیمر مختلف. بررسی آنها نشان داد عوامل مورد بررسی تاثیر قابل توجهی بر مقاومت نمونه‌ها دارد.
پیر محمد و آیت اللهی ^۲ (۲۰۱۵)	SCB فاکتور شدت تنش	بررسی مود ترکیبی شکست، دمای 10°C -، سرعت بارگذاری 3 mm/min	بررسی تاثیر نوع قیر، دانه‌بندی و فضای خالی آسفالت بر سختی شکست آسفالت تحت موده‌های ترکیبی شکست در دمای پایین. نتایج بررسی آنها نشان داد با نرم‌تر شدن قیر مورد استفاده، سختی شکست نمونه‌ها در دمای پایین افزایش می‌یابد. همچنین دانه‌بندی درشت‌تر منجر به افزایش مقاومت شکست نمونه‌ها شد. با افزایش درصد فضای خالی، مقاومت ترک‌خوردگی نمونه‌ها کاهش یافت.
بهنیا و همکاران ^۳ (۲۰۱۴)	DCT, IDT انرژی شکست	بررسی تاثیر چرخه دمایی بر سختی شکست مخلوط آسفالت، بررسی تاثیر پیر شدگی بر مقاومت نمونه‌های آسفالت با استفاده از آزمون DCT در دمای 12°C - و آزمون IDT در دماهای 0°C و 10°C - و 20°C -.	تاثیر چرخه دما بر مقاومت ترک‌خوردگی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از مغزه‌گیری از آسفالت با عمر چند ساله، تاثیر پیر شدگی ناشی از هوازدگی قیر مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج آن با نمونه‌های ساخته شده در آزمایشگاه مقایسه شد. نتایج بدست آمده حاکی از کاهش مقاومت نمونه‌ها ناشی از پدیده پیر شدگی بود.

^۱-Mohammad aliha et al.

^۲- Pirmohammad et al.

^۳- Behnia et al.

بررسی تاثیر نوع قیر، جنس و دانه بندی مصالح سنگی و میزان تراکم سوپرپیو بر مقاومت ترک خوردگی نمونه های آسفالت. تعیین فاکتور شدت تنش برای نمونه های <i>SCB</i> با استفاده از بار بحرانی شکست. نتایج آزمایش ها نشان دهنده تاثیر قابل توجه عوامل ذکر شده بر مقاومت ترک خوردگی نمونه های آسفالت بود.	بررسی مود ترکیبی شکست، دمای 15°C، سرعت بارگذاری 3 mm/min	<i>SCB</i> فاکتور شدت تنش	محمد علیها و همکاران^۱ (۲۰۱۴)
بررسی شکست نمونه های <i>SCB</i> ساخته شده از آسفالت ریزدانه تحت مود ۱ و ۲ بارگذاری. نتایج تحقیق آنها نشان داد مقادیر مقاومت شکست نمونه ها تحت مود ۲ بارگذاری به طور قابل توجهی (سه برابر) بیشتر از مقاومت شکست تحت مود ۱ بارگذاری است. آنها همچنین با استفاده از روش <i>CZM</i> و با در نظر گرفتن آسفالت به صورت یک ماده همگن با مدول الاستیسیته و ضریب یانگ مشخص به بررسی رشد ترک در نمونه های <i>SCB</i> پرداختند.	بررسی مود ۱ و مود ۲ شکست، دمای 21°C، سرعت بارگذاری 10 mm/min	<i>SCB</i> تعیین نمودار نیرو-تغییر مکان و مقایسه آن با نتایج مدل سازی به روش اجزاء محدود	ایم و همکاران^۲ (۲۰۱۴)
بررسی مقاومت ترک خوردگی هفت نمونه آسفالت مختلف تحت مود ۱ بارگذاری و مقایسه آن با نتایج مدل سازی به روش <i>XFEM-CZM</i>، مقادیر فاکتور شدت تنش و اتنگرال جی برای نمونه های مورد آزمایش تعیین شد. نتایج مدل سازی نشان داد عامل اصلی رشد ترک در نمونه ها، تنش های کششی (مود ۱) است.	بررسی مود ۱ شکست، دمای 20°C، سرعت بارگذاری 0.508 mm/min	<i>SCB</i> فاکتور شدت تنش و انتگرال جی، مدل سازی رشد ترک به روش اجزاء محدود گسترش یافته و مقایسه آن با نتایج کار آزمایشگاهی	محمود و همکاران^۳ (۲۰۱۴)

۱-Mohammad aliha et al.

۲- Im et al.

۳-Mahmoud et al.

بررسی مودهای ترکیبی شکست تحت دماهای مختلف زیر صفر و تعیین فاکتور شدت تنش نمونه‌های آسفالت. دو نوع آسفالت مختلف به منظور ساخت نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. استفاده از پلیمر بوتادین-استایرن-بوتادین به عنوان افزودنی و استفاده از دو نوع قیر با درجه نفوذ مختلف به منظور ساخت مخلوط‌های آسفالت. بر اساس نتایج بدست آمده مخلوط‌های اصلاح شده با افزودنی نسبت به مخلوط اصلاح نشده مقاومت بهتری در برابر ترک خوردگی از خود نشان دادند.	بررسی مودهای ترکیبی شکست تحت دماهای 0°C و -10°C و -20°C و -35°C، سرعت بارگذاری 3 mm/min	<i>SCB</i> تعیین فاکتور شدت تنش	پیر محمد و آیت اللهی^۱ (۲۰۱۴)
استفاده از دو جنس مصالح سنگی، دو دانه‌بندی و دو نوع قیر با درجه نفوذ مختلف تحت دوران‌های ۳۵، ۷۰ و ۹۰ دور چرخش دستگاه تراکم چرخشی به منظور ساخت نمونه‌های آسفالت.	بررسی مودهای ترکیبی شکست تحت دمای -15°C، سرعت بارگذاری 3 mm/min	<i>SCB</i> تعیین فاکتور شدت تنش	محمد علیها و همکاران^۲ (۱۳۹۴)

۱- Pirmohammad & Ayatollahi

۲- Mohammad aliha et al.

فصل سوم : تئوری‌ها و روش‌ها

از زمان ساخت سازه‌ها توسط بشر، شکست همواره به عنوان یک مشکل اساسی وجود داشته است. قبل از وقوع انقلاب صنعتی، مصالح اصلی در ساخت سازه‌ها سنگ و ملات بوده است. به دلیل ضعف این مصالح در کشش، مهندسان در گذشته سازه‌ها را طوری طراحی می‌کردند که تحت فشار باشند. به همین دلیل در گذشته از سازه‌های گنبدی شکل بطور وسیعی استفاده می‌شد. زیرا در این سازه‌ها نیروی وارد به اعضا بصورت فشاری است. با وقوع انقلاب صنعتی در اروپا، استفاده از مصالحی مانند آهن و فولاد به دلیل مقاومت زیاد و همچنین توانایی آنها در تحمل کشش، رواج یافت. با وجود استفاده از مصالحی مانند آهن و فولاد، باز هم سازه‌های ساخته شده، از پدیده شکست در امان نبودند. یکی از مهم‌ترین مثال‌هایی که در این زمینه وجود دارد شکست کشتی‌های آزادی در جنگ جهانی دوم است. این امر محققان را بر آن داشت که با جزئیات بیشتری به مطالعه در مورد شکست بپردازند و این امر موجب شکل‌گیری مفهومی شد که امروزه آن را علم مکانیک شکست^۱ می‌نامند (برک^۲ در سال ۲۰۱۱). این کشتی‌ها برای حمل نیرو و کالا در طول اقیانوس اطلس ساخته شده بودند. وجود ترک‌های بسیار زیاد در بدنه این کشتی‌ها موجب شکسته شدن این کشتی‌ها شد. خرابی‌هایی که با چشم قابل دیدن نیستند به تدریج باعث ظهور ترک‌های ماکروسکوپیک شده و گسترش این ترک‌ها منجر به شکست می‌شود. شکست ناگهانی قسمت‌ها و اجزاء مختلف ماشین‌ها گاهی اوقات پیامدهای بسیار جدی و ناگواری برای ایمنی و سلامت افراد در پی دارد. در سال ۱۹۹۸ یک تصادف تاسف بار قطار در آلمان رخ داد که عامل اصلی آن، پیدایش و سپس گسترش ترک‌های خستگی در چرخ قطار بود. این امر باعث شکسته شدن چرخ قطار در سرعت بالا گردید و کشته شدن تعداد زیادی از مسافران قطار را در پی داشت (پامیر و همکاران^۳ در سال ۲۰۱۱).

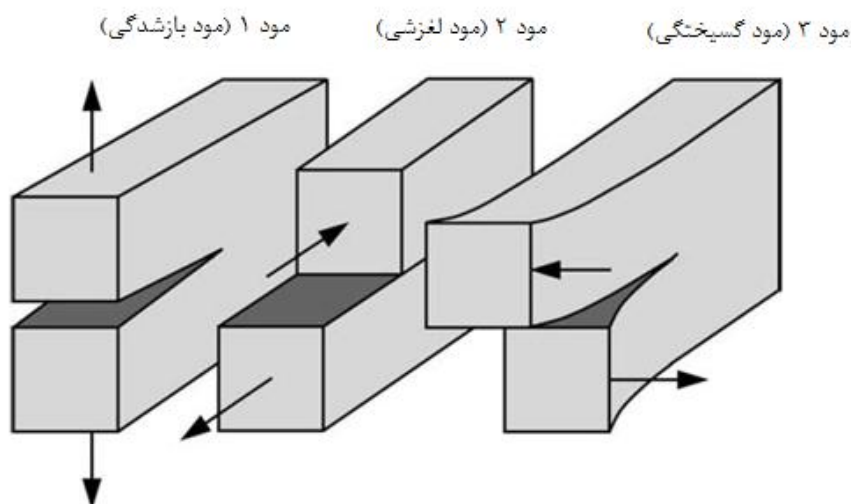
۱ - Fracture mechanic

۲- Burke

۳- Pommier

۲-۳- مودهای مختلف بارگذاری

مطابق شکل ۱-۳ بطور کلی سه مود بارگذاری مختلف برای ایجاد ترک در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱-۳: مودهای مختلف بارگذاری

مود ۱ یا مود بازشدگی^۱ که در آن بارگذاری وارد بر جسم بر صفحه حاوی ترک عمود است.

مود ۲ یا مود لغزشی^۲ که در آن بارگذاری وارد بر جسم موازی صفحه و موازی راستای گسترش ترک می‌باشد و تمایل دارد دو لبه ترک را بر روی یکدیگر بلغزاند.

مود ۳ یا مود گسیختگی^۳ که در آن بارگذاری وارد بر جسم موازی با صفحه حاوی ترک و بر راستای گسترش ترک عمود است.

شکل‌گیری یک ترک می‌تواند ناشی از هر یک از حالت‌های بارگذاری و یا ترکیب آنها باشد (اندرسون^۴ در

سال ۲۰۰۵).

۱- Opening mode

۲- Shear mode

۳ - Tearing mode

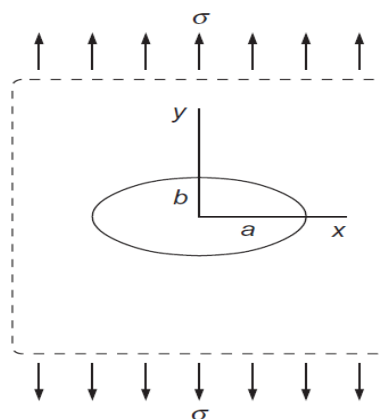
۴- T. L. Anderson

۳-۳- بررسی شکست از نقطه نظر انرژی

بر اساس این رویکرد، رشد ترک زمانی رخ می‌دهد که انرژی در دسترس برای رشد ترک، برای غلبه بر مقاومت مصالح کافی باشد. مقاومت مصالح می‌تواند شامل انرژی سطحی، کار پلاستیک و یا انواع دیگر اتلاف انرژی باشد که در نتیجه رشد ترک به وقوع می‌پیوندد. گریفیث اولین فردی بود که معیار انرژی را برای شکست پیشنهاد کرد، در حالیکه نظریات اروین را عامل اصلی توسعه امروزی این رویکرد یعنی نرخ رها سازی انرژی می‌دانند. نرخ رها سازی انرژی برای مصالح الاستیک عبارتست از نرخ تغییر انرژی پتانسیل نسبت به مساحت ترک. مقدار بحرانی این پارامتر را سختی شکست می‌نامند و مقدار این پارامتر جزء مشخصات مصالح به شمار می‌رود.

۳-۳-۱- تئوری ترک گریفیث^۱

گریفیث در سال ۱۹۲۱ دریافت که با ایجاد ترک در یک صفحه ساخته شده از مصالح الاستیک، انرژی پتانسیل آن کاهش یافته و انرژی سطحی آن افزایش می‌یابد. او در مطالعات خود به بررسی یک حفره بیضوی^۲، مطابق شکل ۳-۲ پرداخته است.



شکل ۳-۲: حفره بیضوی

۱- Griffith crack theory

۲ - Elliptical hole

انرژی پتانسیل^۱ کلی یک سیستم بر اساس روابط زیر قابل محاسبه است

$$U = U_0 - U_a + U_\gamma \quad (۱-۳)$$

$$U = U_0 - \frac{\pi\beta a^2 \sigma^2 B}{E} + 2(2aB\gamma_s) \quad (۲-۳)$$

که در آن داریم

U = انرژی پتانسیل جسم ترک خورده، U_0 = انرژی پتانسیل جسم ترک نخورده، U_a = انرژی الاستیک سطحی ناشی از ترک، U_γ = انرژی الاستیک سطحی ناشی از شکل‌گیری ترک‌های سطحی، a = نصف طول ترک، $4ab = 2(2ab)$ = سطح ترک‌خوردگی (دو سطح ترک‌خوردگی داریم)، γ_s = انرژی ویژه سطح، E = مدول الاستیسیته، $\beta=1$ برای تنش صفحه‌ای و برای کرنش صفحه‌ای برابر است با $\beta = 1 - v^2$.

با مشتق‌گیری از رابطه ۲-۳ و برابر صفر قرار دادن آن داریم

$$a = \frac{(2\gamma_s)E}{\pi\beta\sigma^2} \quad (۳-۳)$$

$$2\gamma_s = \frac{\pi\beta a\sigma^2}{E} \quad (۴-۳)$$

از رابطه ۳-۳ داریم

$$\sigma\sqrt{\pi a} = \sqrt{\frac{(2\gamma_s)E}{\beta}} \quad (۵-۳)$$

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (۶-۳)$$

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{(2\gamma_s)E}{\pi a\beta}} \quad (۷-۳)$$

^۱ - Potential energy

پارامتر k_I را مود ۱ فاکتور شدت تنش^۱ می‌نامند. مقدار بحرانی آن یکی از ویژگی‌های مصالح است که به آن سختی شکست^۲ می‌گویند و با نیروی مقاوم در برابر گسترش ترک برابر است. فاکتور شدت تنش برای یک ترک مشخص تابع مقدار تنش، شکل ترک و شکل نمونه ترک‌خورده است. در علم مکانیک شکست برای بررسی خرابی مواد، به جای مقایسه مقدار حداکثر تنش با تنش بحرانی، مقادیر فاکتور شدت تنش (k_{III} ، k_{II} ، k_I) را با مقدار بحرانی آن (k_c) مقایسه می‌کنند.

۳-۳-۲- نرخ رهاسازی انرژی کرنشی^۳

رابطه ارائه شده توسط گریفیث (رابطه ۳-۷) تنها برای مصالح کاملاً ترد قابل قبول است. گریفیث تطابق بسیار خوبی بین رابطه پیشنهادی خود و شواهد آزمایشگاهی مشاهده شده برای مقاومت شکست شیشه مشاهده کرد، اما نتوانست رفتار مصالحی مانند فلزات را بر اساس رابطه خود به درستی پیش‌بینی کند. اروین^۴ و اروان^۵ رابطه انرژی الاستیک سطحی ارائه شده توسط گریفیث را به شکل زیر اصلاح کردند (پرز^۶ در سال ۲۰۰۴).

$$G_I = 2 (\gamma_S + \gamma_P) \quad (۸-۳)$$

$$G_I = \frac{\pi a \sigma^2}{E'} \quad (۹-۳)$$

که در آن داریم $E' = \frac{E}{\beta}$ و با حل رابطه ۳-۹ برای بدست آوردن تنش داریم

$$\sigma = \sqrt{\frac{E' G_I}{\pi a}} \quad (۱۰-۳)$$

از ترکیب روابط ۳-۶ و ۳-۹ داریم

۱- Mode I stress intensity factor

۲- Fracture toughness

۳- Strain energy release rate

۴- Irwin

۵- orowan

۶- Nestor Perez

$$G_I = \frac{k_I^2}{E'} \quad (11-3)$$

که در آن

$$E' = E \text{ (Mpa)} \quad \text{برای تنش صفحه‌ای}$$

$$E' = \frac{E}{(1 - \nu^2)} \text{ (Mpa)} \quad \text{برای کرنش صفحه‌ای}$$

فرمول ۱۱-۳ یکی از مهم‌ترین روابط موجود در زمینه مکانیک شکست خطی است.

$$\sigma_C = \sqrt{\frac{E' G_{IC}}{\pi a}} \quad (12-3)$$

رابطه بین نرخ رهاسازی انرژی کرنشی و فاکتور شدت تنش به صورت زیر است.

$$G = \alpha \frac{K_I^2}{E} \quad (13-3)$$

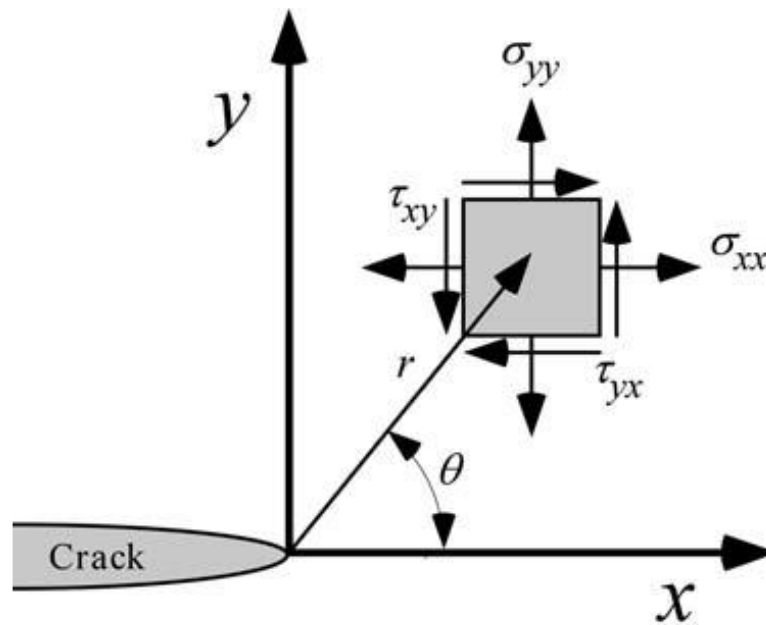
که در آن داریم

$$\alpha = 1 \quad \text{برای تنش صفحه‌ای}$$

$$\alpha = (1 - \nu^2) \quad \text{برای کرنش صفحه‌ای}$$

۳-۴- رشد ترک از منظر فاکتور شدت تنش

شکل ۳-۳ بصورت شماتیک المانی را در نزدیکی نوک ترک در یک ماده الاستیک نشان می‌دهد. همانطور که در روابط زیر نشان داده شده است هر یک از مولفه‌های تنش با یک پارامتر ثابت (K_I) مرتبط هستند. چنانچه این ثابت شناخته شود، توزیع تنش در نواحی اطراف نوک ترک را می‌توان بطور کامل بر اساس روابط ۱۴-۳ الی ۱۶-۳ محاسبه کرد. این پارامتر ثابت که آن را فاکتور شدت تنش می‌نامند بطور کامل مقادیر تنش در نواحی اطراف نوک ترک در یک ماده الاستیک را توصیف می‌کند (اندرسون در سال ۲۰۰۵).



شکل ۳-۳: تنش در نواحی اطراف نوک ترک در یک جسم الاستیک خطی

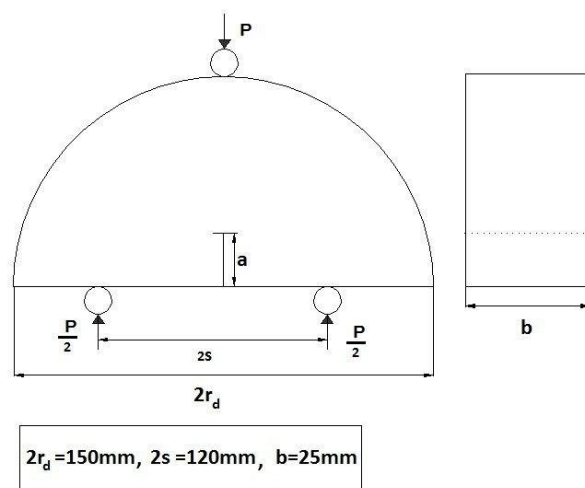
$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right] \quad (۱۴-۳)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right] \quad (۱۵-۳)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \quad (۱۶-۳)$$

۳-۵- تئوری آزمون خمش نیم دایره^۱ (SCB)

آزمون خمش نیم دایره عبارتست از بارگذاری خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌های نیم استوانه‌ای شکل آسفالت تحت بارگذاری با سرعت یکنواخت. به منظور تعیین سختی شکست آسفالت با استفاده از آزمون SCB، یک ترک با طول مشخص بر روی لبه صاف نمونه SCB ایجاد می‌شود. موقعیت ترک ایجاد شده بسته به مود بارگذاری مورد نظر متغیر است. در بارگذاری مود ۱ (بارگذاری مورد استفاده در این تحقیق) موقعیت ترک اولیه دقیقاً در وسط لبه صاف نمونه SCB قرار دارد بطوریکه فاصله آن از دو تکیه‌گاه بارگذاری به یک اندازه است. شکل ۳-۴ به صورت شماتیک هندسه نمونه SCB، موقعیت تکیه‌گاه‌ها و محل اعمال بار را جهت انجام آزمایش سختی شکست آسفالت نشان می‌دهد.



شکل ۳-۴: اجزاء مختلف آزمون SCB

مقدار تنش در هر یک از روابط ۳-۱۴ الی ۳-۱۶، با یک مقدار ثابت (K_I) متناسب است. در صورت تعیین این مقدار ثابت، که آن را فاکتور شدت تنش می‌نامند، می‌توان مقادیر تنش در نواحی اطراف ترک در یک جسم الاستیک را تعیین نمود. بر اساس رابطه ارائه شده توسط لیم و جانستون در سال ۱۹۹۳، فاکتور شدت تنش بر اساس رابطه ۳-۱۷ قابل محاسبه است

۱- Semi-circular bending test

$$\frac{K_I}{\sigma_0 \sqrt{\pi a}} = Y_{I(0.8)} \quad (۱۷-۳)$$

$$Y_{I(0.8)} = 4.782 - 1.219 \left(\frac{a}{r} \right) + 0.063 \exp(7.045 \left(\frac{a}{r} \right)) \quad (۱۸-۳)$$

$$\sigma_0 = \frac{P_{cr}}{2rt} \quad (۱۹-۳)$$

که در آن P_{cr} بار بحرانی بر حسب نیوتون، r شعاع نمونه بر حسب متر، t ضخامت نمونه بر حسب متر، a طول ترک بر حسب متر و $Y_{I(0.8)}$ پارامتر بدون بعدی است که از تحلیل اجزا محدود بدست آمده و وابسته به طول ترک و شعاع نمونه می‌باشد.

انرژی شکست نمونه‌های آسفالت، بر اساس استاندارد *AASHTO TP 105-13* تعیین شد. طبق تعریف، انرژی شکست نمونه *SCB* عبارتست از کار ناشی از شکست (سطح زیر نمودار نیرو-تغییر مکان تا لحظه گسیختگی) تقسیم بر مساحت قسمت ترک نخورده^۱ قبل از اعمال بارگذاری و بر اساس رابطه ۲۰-۳ محاسبه می‌شود.

$$G_f = \frac{W_f}{A_{lig}} \quad (۲۰-۳)$$

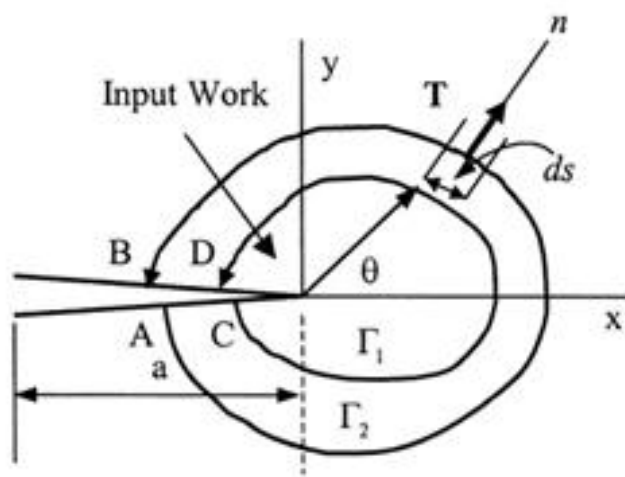
که در آن G_f انرژی شکست بر حسب ژول بر متر مربع، W_f کار ناشی از شکست بر حسب ژول و A_{lig} مساحت قسمت ترک نخورده بر حسب متر مربع می‌باشد.

جیمز رابرت رایس^۲ استاد دانشگاه هاروارد در سال ۱۹۶۸ در مقاله خود با عنوان "انتگرال مستقل از مسیر و آنالیز تقریبی تمرکز تنش در ترک‌ها" به معرفی مفهومی بر پایه انتگرال‌گیری روی مسیر دلخواه پرداخت و آن را انتگرال جی نامید. او این انتگرال‌گیری مستقل از مسیر را برای آنالیز ترک‌ها ارائه کرد و نشان داد که مقدار این انتگرال برای یک جسم الاستیک غیر خطی حاوی ترک با نرخ رها سازی انرژی برابر است.

۱- Ligament area

۲- Rice

رایس با فرض تغییر شکل‌های الاستوپلاستیک به صورت تغییر شکل‌های الاستیک غیر خطی موجب رشد و توسعه تئوری مکانیک شکست الاستیک خطی گشت. او برای تعیین کمیت انرژی، انتگرال روی مسیر دلخواه منحنی شکل (مطابق شکل) را به صورت زیر تعریف کرد (پرز در سال ۲۰۰۴).



شکل ۳-۵: مسیر منحنی شکل اطراف نوک ترک برای تعیین انتگرال جی

$$J = \oint_{\Gamma} (W dy - \vec{T} \frac{\partial \vec{u}}{\partial x} ds) \quad (۳-۲۱)$$

که در آن

J = نرخ رها سازی انرژی (بر حسب $Mpa.m$ و یا MN/m)

W = چگالی انرژی کرنشی الاستیک (بر حسب J/m^3)

$\vec{u}$ = بردار تغییر مکان در جزء دیفرانسیلی ds .

ds = جزء دیفرانسیلی در طول مسیر انتگرال گیری.

n = بردار عمود بر مسیر Γ و در جهت بیرون از مسیر.

T = بردار کشش روی جسم محصور شده توسط منحنی Γ .

Γ = یک مسیر دلخواه منحنی شکل پادساعتگرد که دربرگیرنده نوک ترک باشد.

با توجه به فرمول ۲۱-۳ داریم

$$\vec{T} = \sigma_{ij} \cdot n \quad (22-3)$$

$$W = \int \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \quad (23-3)$$

که در روابط ۲۲-۳ و ۲۳-۳ تنش‌های الاستیک به صورت ماتریسی و به شکل زیر می‌باشد.

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (24-3)$$

همچنین چگالی انرژی کرنشی الاستیک را می‌توان بصورت زیر نوشت

$$W = \frac{1}{E} (\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2) - \nu (\sigma_{xx} \cdot \sigma_{yy} + \sigma_{yy} \cdot \sigma_{zz} + \sigma_{zz} \cdot \sigma_{xx}) + (1 + \nu)(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \quad (25-3)$$

با توجه به این که در حالت تنش صفحه‌ای $\sigma_{zz} = \tau_{zx} = \tau_{zy} = 0$ و همچنین $E' = E$ بنابراین رابطه

۲۵-۳ را می‌توان به شکل زیر ساده نمود.

$$W = \frac{1}{2E} (\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 - 2\nu \cdot \sigma_{xx} \cdot \sigma_{yy} + 2(1 + \nu)\tau_{xy}^2) \quad (26-3)$$

و در حالت کشش خالص خواهیم داشت

$$W = \frac{\sigma_{yy}^2}{2E} \quad (27-3)$$

فصل چهارم : کارهای آزمایشگاهی

۴-۱- مقدمه

آسفالت به عنوان یک ماده مرکب، از چهار جزء اصلی شامل قیر، مصالح سنگی، فیلر و فضای خالی تشکیل شده است. خواص و ویژگی‌های هر یک از این اجزاء تاثیر زیادی بر رفتار و عملکرد آسفالت ساخته شده خواهد داشت. به همین دلیل، تعیین دقیق مشخصات مصالح مورد استفاده در ساخت آسفالت بسیار حائز اهمیت است. با توجه به اینکه روسازی مورد استفاده در اکثر راه‌های ایران روسازی آسفالتی است و یکی از اصلی‌ترین علل خرابی در روسازی‌های آسفالتی، ترک‌خوردگی رویه آسفالت در دمای پایین می‌باشد در نتیجه درک کامل و دقیقی از رفتار و مشخصات قیر و آسفالت، همچنین تعیین علل و مکانیزم‌های ترک‌خوردگی امری ضروری است. عدم ترمیم و نگهداری بموقع از روسازی ترک‌خورده، نیازمند صرف هزینه‌های بسیار زیاد برای ترمیم و تعمیر روسازی است. در این فصل از تحقیق، ابتدا روش‌ها و آزمون‌های مورد استفاده در تعیین سختی شکست آسفالت به طور خلاصه شرح داده شده است. سپس تاثیر دو عامل (پیر شدگی ناشی از افزایش عمر روسازی و سرعت بارگذاری) بر مقاومت ترک‌خوردگی نمونه‌های آسفالت در دمای 15°C - مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور نمونه‌های آسفالت مورد نیاز از طریق مغزه‌گیری از سه روسازی با شرایط یکسان (از نظر طرح اختلاط، حجم ترافیک مسیر و شرایط آب و هوا) ولی با سه عمر بهره‌برداری مختلف (آسفالت تازه، آسفالت با عمر بهره‌برداری دو سال و آسفالت با عمر بهره‌برداری ۶ سال) تهیه شده است.

۴-۲- مشخصات مصالح سنگی

مصالح سنگی معمولاً یا به صورت طبیعی در طبیعت یافت می‌شود و یا به طور مصنوعی و به شکل غیر مستقیم به صورت تفاله برخی از کارخانجات ذوب فلزات تولید می‌شود. مصالح سنگی طبیعی یا به صورت آماده، از بستر رودخانه‌ها و معادن شن و ماسه‌ای که در طول مسیر راه‌ها وجود دارند به دست می‌آیند، یا از طریق شکستن سنگ‌های موجود در معادن سنگ تهیه می‌شوند. مصالح سنگی شکسته شده، ظرفیت باربری

و استقامت بیشتری نسبت به مصالح گرد گوشه دارند. مصالح شکسته دارای لبه‌های تیز و سطحی زبر بوده و بهتر در یکدیگر قفل و بست می‌شوند. مصالح سنگی که برای ساختن انواع آسفالت بکار می‌رود باید دارای مشخصات ویژه‌ای باشند که برخی از آنها عبارتند از دانه‌بندی، سختی، دوام، تمیزی، شکل دانه‌ها و کیفیت سطح دانه‌ها.

۴-۲-۱- دانه‌بندی مصالح سنگی

دانه‌بندی مصالح سنگی یکی از مهم‌ترین عواملی است که بر روی استقامت و ظرفیت باربری آسفالت تاثیر می‌گذارد. دانه‌بندی مناسب مصالح سنگی بر اساس عوامل زیادی از جمله نوع روسازی، نوع و محل قرار گرفتن لایه مورد نظر در سیستم روسازی، ضخامت لایه آسفالت و اندازه اسمی بزرگترین سنگدانه انتخاب می‌شود. حدود دانه‌بندی مناسب در هر مورد، توسط آیین‌نامه‌های فنی کشور مشخص می‌شوند که معمولاً به صورت دو منحنی حدی هستند. منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی، باید بین این دو منحنی حدی و حتی الامکان در وسط و به موازات آنها قرار گیرد. مصالح سنگی را می‌توان از نقطه نظر دانه‌بندی به سه دسته توپر، توخالی (باز) و یک اندازه تقسیم بندی کرد. معمولاً در طرح اختلاط آسفالت لازم است دو یا چند نوع مصالح سنگی که هیچ کدام به تنهایی دارای دانه‌بندی مطلوب نیستند با نسبت‌های مشخص با یکدیگر مخلوط شوند تا مخلوط بدست آمده دارای دانه‌بندی ارائه شده توسط آیین نامه باشد. جدول ۴-۱، درصد اختلاط مصالح سنگی با اندازه‌های مختلف، برای رسیدن به دانه‌بندی مطلوب ارائه شده در نشریه ۱۰۱ را نشان می‌دهد. جدول ۴-۲ دانه‌بندی مصالح سنگی استفاده شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. آزمایش دانه‌بندی بر اساس استاندارد *AASHTO-T27* و همچنین با روش شستشو برای مصالح سنگی ریزدانه انجام شده است. آزمایش دانه‌بندی و هیدرومتری، برای فیلر مورد استفاده در ساخت آسفالت بر اساس استاندارد *AASHTO-T88* صورت گرفته است. شکل ۴-۱ نمودار دانه‌بندی مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق، همچنین مقادیر مجاز ارائه شده در نشریه ۱۰۱ را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۱: نسبت‌های اختلاط مصالح سنگی مورد استفاده در ساخت آسفالت*

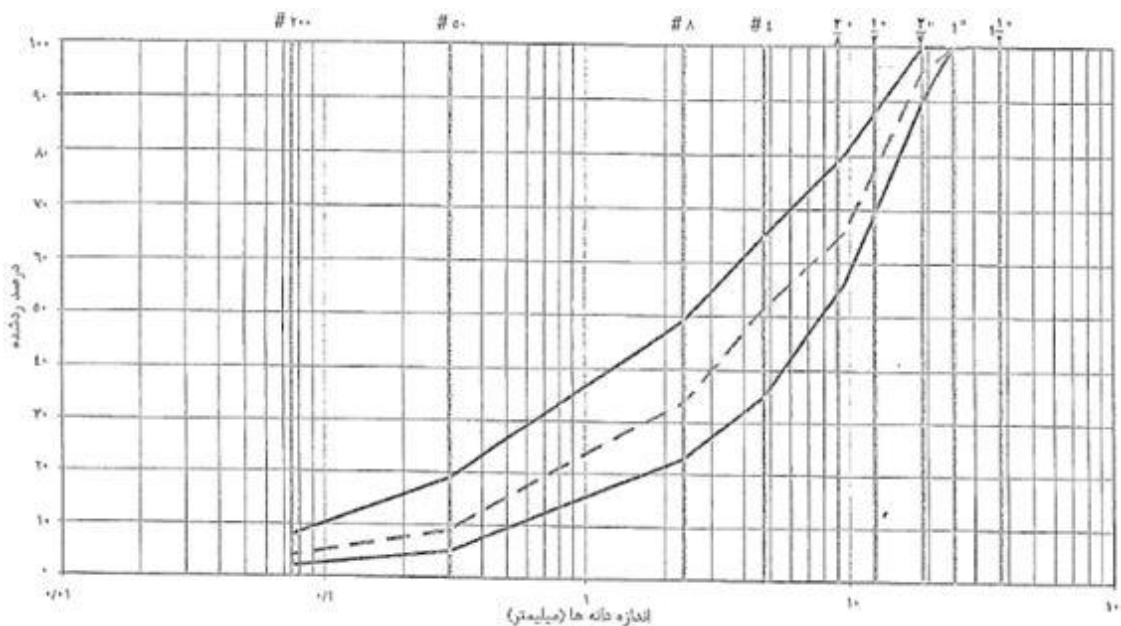
مشخصات مصالح (میلی‌متر)	درصد اختلاط مصالح سنگی
شن ۱۹-۲۵	۹
شن ۱۲-۱۹	۲۳
شن ۶-۱۲	۲۱
شن ۰-۶	۳۷
فیلر	۱۰

*تمامی نتایج این جدول بر اساس گزارش آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه مکانیک خاک استان سمنان می‌باشد.

جدول ۴-۲: دانه‌بندی مخلوط مصالح سنگی مورد استفاده در ساخت آسفالت*

اندازه الک (میلی‌متر)	حدود دانه‌بندی مجاز بر اساس نشریه ۱۰۱ سازمان مدیریت و برنامه ریزی	درصد وزنی رد شده حاصل از اختلاط با نسبت‌های جدول ۱
۲۵ (۱ اینچ)	۱۰۰	۱۰۰
۱۹ (۳/۴ اینچ)	۹۰-۱۰۰	۹۵
۹/۵ (۳/۸ اینچ)	۵۶-۸۰	۶۴
۳/۷۵ (الک شماره ۴)	۳۵-۶۵	۵۱
۲/۳۶ (الک شماره ۸)	۲۳-۴۹	۳۴
۰/۳ (الک شماره ۵۰)	۵-۱۹	۹
۰/۷۵ (الک شماره ۲۰۰)	۲-۸	۴

*تمامی نتایج این جدول بر اساس گزارش آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه مکانیک خاک استان سمنان می‌باشد.



شکل ۴-۱: نمودار دانه‌بندی مخلوط مصالح سنگی آسفالت لایه بیندر

۴-۲-۲- مرغوبیت مصالح سنگی

آزمایش‌های لازم برای تعیین حدود اتربرگ، ارزش ماسه‌ای، شاخص تطویل و تورق، درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لس آنجلس، افت وزنی در مقابل سولفات سدیم، درصد شکستگی در یک جبهه و دو جبهه و تعیین درصد اندود قیر به مصالح سنگی انجام شد و نتایج آن در جدول ۳-۴ نشان داده شده‌است.

جدول ۳-۴ : نتایج آزمایش‌های مرغوبیت مصالح سنگی

نتایج آزمایش			مشخصه
فیلر	ماسه ۰-۶ (میلی متر)	مخلوط درشت دانه	
-	۹۳	-	AASHTO-T176 ارزش ماسه‌ای
-	-	B	نوع دانه بندی
-	-	۵۰۰	تعداد دور
-	-	۲۳	درصد سایش
N.P	N.P	-	دامنه خمیری PI
-	-	-	حد خمیری PL
غیر قابل تعیین	غیر قابل تعیین	-	حد روانی LL
-	-	-	در یک جبهه
-	-	۸۸	در دو جبهه
-	-	بیش از ۹۵	AASHTO-T182 درصد اندود قیر به مصالح سنگی
-	-	۱۱	تطویل
-	-	۷	تورق
-	۰/۲۲	-	ریز دانه
-	-	۰/۶۱	درشت دانه

۴-۲-۳- وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی

آزمایش‌های تعیین وزن مخصوص حقیقی، وزن مخصوص ظاهری و درصد جذب آب مخلوط مصالح سنگی مانده روی الک شماره ۸، بر اساس استاندارد *AASHTO-T85* و مصالح رد شده از الک شماره ۸ و مانده روی الک شماره ۲۰۰، بر اساس استاندارد *AASHTO-T84* انجام گرفت. وزن مخصوص مصالح رد شده از الک شماره ۲۰۰ نیز بر اساس استاندارد *AASHTO-T100* تعیین شد و نتایج آن در جدول ۴-۴ نشان داده شده است.

جدول ۴-۴: وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی*

درصد جذب آب	وزن مخصوص (gr/cm^3)		مشخصه
	حقیقی	ظاهری	
۱/۱٪	۲/۷۶۰	۲/۸۴۵	مصالح سنگی مانده روی الک شماره ۸
۱/۵٪	۲/۷۴۰	۲/۸۵۷	مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۸ و مانده روی الک ۲۰۰
-	۲/۷۹۰		مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۲۰۰
	۲/۷۵۶		وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی (G_{sb})

* تمامی نتایج این جدول بر اساس گزارش آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه مکانیک خاک استان سمنان می‌باشد.

۴-۳- آزمایش‌های قیر

آزمایش‌های رایج قیر، بر روی قیر مصرفی برای ساخت آسفالت مورد استفاده در این تحقیق انجام شد و نتایج آن در جدول ۴-۵ نشان داده شده است. قیر مصرفی در این پژوهش قیر خالص با درجه نفوذ ۶۰-۷۰ و رده عملکردی *PG 64-22* است که بطور متداول برای ساخت آسفالت در ایران بکار می‌رود. طبق بند ۱۴-۳-۱ نشریه شماره ۱۰۱ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، مشخصات فنی قیرهای خالص مورد استفاده در راهسازی که بر اساس درجه نفوذ تقسیم بندی شده‌اند باید با مشخصات استاندارد جدول شماره ۱۴-۱ این دستور العمل مطابقت داشته باشد.

جدول ۴-۵: مشخصات فیزیکی قیر خالص مورد استفاده در این پژوهش*

شرح آزمایش	روش آزمایش		نتایج		مشخصات استاندارد AASHTO-M20	
	ASTM	AASHTO	حداقل	حداکثر		
۱ وزن مخصوص در دمای ۲۵ °C	D-70	T-228	۱/۰۱۵	-	-	-
۲ درجه نفوذ در دمای ۲۵ °C	D-5	T-49	۶۵	۶۰	۷۰	-
۳ نقطه نرمی (گلوله و حلقه) بر حسب درجه سانتی گراد	D-36	T-53	۵۱/۷	۴۹	۵۶	-
۴ مقدار کشش در دمای ۲۵ °C بر حسب سانتی متر	D-113	T-51	۱۰۰ <	۱۰۰	-	-
۵ حلالیت در تترا کلرواتیلن بر حسب درصد	D-2042	T-44	۹۹/۳	۹۹	-	-
۶ درجه اشتعال (روباژ-کلوند) بر حسب درجه سانتی گراد	D-92	T-48	۳۰۲	۲۳۲	-	-
۷ ویسکوزیته بر حسب سانتی استوکس در دمای ۱۲۰ °C	D-2170	T-201	۷۵۰	-	-	-
۸ ویسکوزیته بر حسب سانتی استوکس در دمای ۱۳۵ °C	D-2170	T-201	۳۵۴	-	-	-
۹ ویسکوزیته بر حسب سانتی استوکس در دمای ۱۶۰ °C	D-2170	T-201	۱۳۴	-	-	-
لعب نازک قیر (دمای ۱۶۳ درجه سانتی گراد به مدت ۵ ساعت)						
۱۰ افت حرارتی بر حسب درصد	D-1756	T-179	۰/۰۲	-	۰/۸	-
۱۱ درجه نفوذ (بعد از افت حرارتی)			۴۱	-	-	-
۱۲ نسبت درصد درجه نفوذ بعد از آزمایش به درجه نفوذ اولیه			۶۳/۱	۵۴	-	-
۱۳ مقدار کشش قیر بعد از آزمایش در ۲۵ °C			۵۰ <	۵۰	-	-
حساسیت حرارتی قیر						
۱۴ PI بر حسب درجه نفوذ در ۲۵ °C و نقطه نرمی			-۰/۱۴	-۲	+۲	-
۱۵ PVN بر حسب درجه نفوذ در ۲۵ °C و ویسکوزیته بر حسب سانتی استوکس در ۱۳۵ °C			-۰/۸۷	-	-	-

*تمامی نتایج این جدول بر اساس گزارش آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه مکانیک خاک استان سمنان می‌باشد.

۴-۴- طرح اختلاط آسفالت

روش‌های مختلفی برای تعیین طرح اختلاط بهینه آسفالت وجود دارد. هدف اصلی تمامی این روش‌ها تعیین مناسب‌ترین درصد اختلاط اجزا تشکیل دهنده آسفالت است، به گونه‌ای که آسفالت تهیه شده دارای استحکام و مقاومت کافی در برابر بارهای وارده، تغییر شکل‌های دائمی و ترک‌خوردگی باشد. طرح اختلاط آسفالت معمولاً شامل مراحل زیر است (طباطبایی در سال ۱۳۸۹).

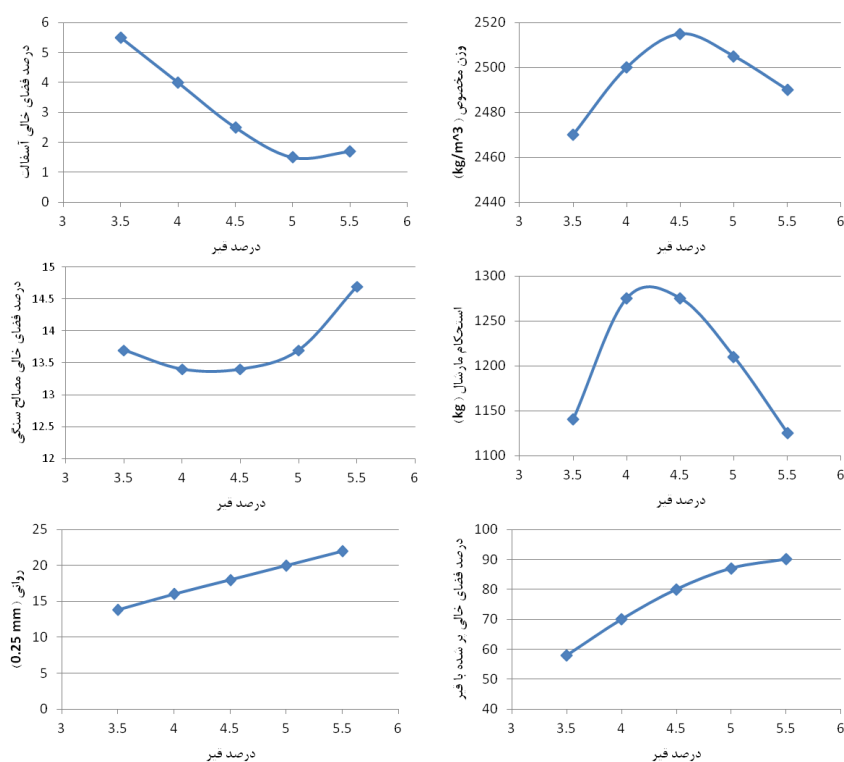
- ۱- انتخاب مصالح سنگی درشت‌دانه و ریزدانه و فیلر.
 - ۲- انتخاب حدود دانه‌بندی مطلوب.
 - ۳- تعیین نسبت درصدهایی که مصالح سنگی درشت‌دانه و ریزدانه و فیلر باید با هم مخلوط شوند.
 - ۴- تعیین چگالی مصالح سنگی و قیر.
 - ۵- تهیه نمونه‌های آسفالت با استفاده از مصالح سنگی و درصد‌های مختلف قیر.
 - ۶- تعیین چگالی نمونه‌های آسفالت تهیه شده.
 - ۷- انجام آزمایش استقامت بر روی نمونه‌های آسفالت ساخته شده.
 - ۸- محاسبه درصد فضای خالی مصالح سنگی و درصد فضای خالی نمونه‌های آسفالت ساخته شده.
 - ۹- رسم منحنی‌های تعیین درصد قیر بهینه.
 - ۱۰- تعیین درصد قیر بهینه با توجه به نمودارهای بدست آمده در مرحله قبل.
 - ۱۱- کنترل و تصحیح درصد قیر بهینه.
- طرح اختلاط نمونه‌های آسفالت بکار رفته در این تحقیق بر اساس روش مارشال صورت گرفته است. وزن مخصوص نمونه‌های آسفالت متراکم شده، بر اساس استاندارد *AASHTO-T166* و مقدار استحکام و روانی نمونه‌ها با استناد به استاندارد *ASTM-D1559* تعیین شد. جدول ۴-۶ حداکثر وزن مخصوص تئوری آسفالت را به ازای درصد‌های مختلف قیر نشان می‌دهد.

جدول ۴-۶ : حداکثر وزن مخصوص تئوری آسفالت به ازای درصدهای مختلف قیر*

درصد قیر	حداکثر وزن مخصوص تئوری مخلوط آسفالتی
۳/۵	۲/۶۰۰
۴	۲/۵۷۹
۴/۵	۲/۵۵۹
۵	۲/۵۳۸
۵/۵	۲/۵۱۸

* تمامی نتایج این جدول بر اساس گزارش آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه مکانیک خاک استان سمنان می‌باشد.

درصد فضای خالی آسفالت متراکم (*Air voids*)، درصد فضای خالی مخلوط مصالح سنگی (*VMA*) و درصد فضای خالی مخلوط مصالح سنگی پر شده با قیر (*VFA*)، با استناد به محاسبات مندرج در نشریه MS-2 انستیتو آسفالت محاسبه گردید. منحنی تغییرات کمیت‌های فوق با درصدهای مختلف قیر در شکل ۴-۲ ترسیم شده است. با توجه به شکل ۴-۲ درصد قیر بهینه برابر چهار درصد در نظر گرفته شده است.

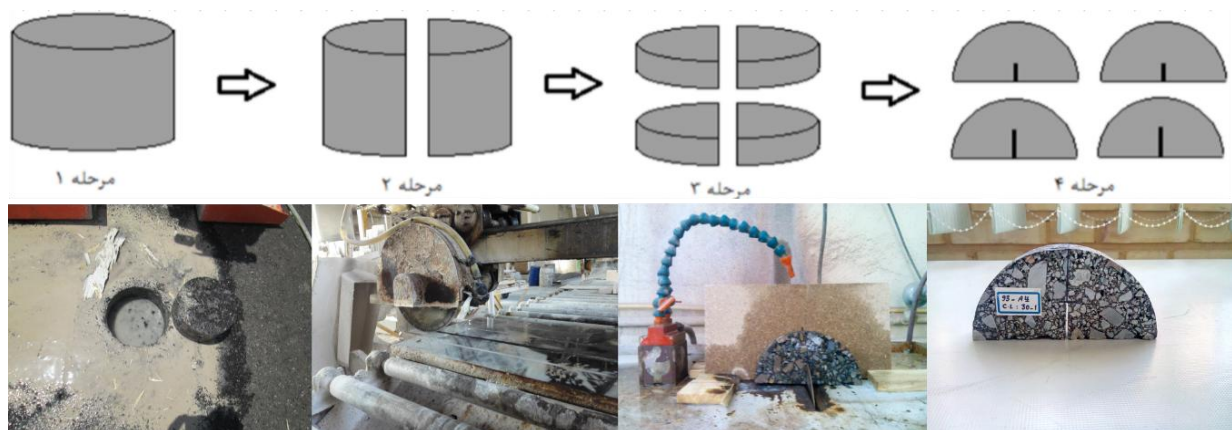


شکل ۴-۲ : نمودارهای تعیین درصد قیر بهینه به روش مارشال

۴-۵- تهیه نمونه‌های SCB آسفالت

به منظور تهیه نمونه‌های آسفالت، برای انجام آزمایش SCB، مراحل زیر به ترتیب انجام گرفت

- ۱- ابتدا با استفاده از یک دستگاه مغزه‌گیر با مته چرخشی، ۱۵ عدد مغزه استوانه‌ای به قطر ۱۵ سانتی‌متر و ارتفاع تقریبی ۷ سانتی‌متر از آسفالت اجرا شده در قسمت‌های مختلف جاده شاهرود-میانداشت تهیه شد.
- ۲- مغزه‌های بدست‌آمده، با استفاده از یک اره مخصوص سنگبری به دو نیم استوانه مساوی برش داده شد.
- ۳- به منظور ایجاد سطحی صاف و هموار، یک سانتی‌متر از ابتدا و انتهای هریک از نیم استوانه‌ها بریده و سپس نیم استوانه‌های بدست آمده به دو نیم استوانه با ضخامت تقریبی ۲۵ میلی‌متر بریده شد.
- ۴- سپس بر روی لبه صاف نمونه‌های نیم دایره، با استفاده از یک اره مخصوص با تیغه بسیار نازک به ضخامت ۱/۵ میلی‌متر، یک ترک با طول مشخص ایجاد شد. برای برش دقیق‌تر و بهتر نمونه‌ها، یک قطعه ورق نئوپان روی دستگاه برش نصب شد. با تکیه دادن نمونه به نئوپان نصب شده، نمونه‌ها با دقت برش داده شد. شکل ۳-۴ مراحل مختلف تهیه نمونه‌های نیم دایره آسفالت را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۴: مراحل تهیه نمونه‌های نیم دایره‌ای شکل آسفالت

۴-۶- دستگاه بارگذاری

برای انجام آزمون خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌های SCB، مطابق شکل ۴-۴، از یک دستگاه بارگذاری خمشی از نوع قاب صلب بسته^۱، ساخت شرکت Zwick/Roell آلمان، با حداکثر ظرفیت ۱۵ تن استفاده شد. به منظور جمع‌آوری داده‌های بدست آمده از دستگاه، از رایانه متصل به دستگاه استفاده شد. نیرو و تغییر مکان نمونه‌ها در حین آزمایش توسط نیرو سنج (Load Cell) و تغییر مکان سنج‌های (LVDT) نصب شده بر روی دستگاه بارگذاری تعیین شد.



شکل ۴-۴: نمای کلی از دستگاه بارگذاری خمش سه نقطه‌ای

۴-۷- تهیه فیکسچر مناسب برای آزمون SCB

با توجه به ارتفاع کم نمونه‌های نیم‌دایره آسفالت و محدودیت پایین آمدن بازوی دستگاه بارگذاری، یک فیکسچر خمش سه نقطه‌ای، بر اساس مشخصات ارائه شده در استاندارد AASHTO-TP 105-13 ساخته شد و بر روی دستگاه بارگذاری نصب گردید. به منظور تنظیم راحت و سریع دهانه بارگذاری، فیکسچر مورد

۱ - Universal test machine

نظر طوری ساخته شده است تا بتوان در کوتاه‌ترین زمان و به راحتی، دهانه بارگذاری مورد نیاز برای انجام آزمایش را تنظیم کرد. تکیه‌گاه‌های تعبیه شده در این فیکسچر قادر به دوران حول محور خود هستند. شکل ۴-۵ فیکسچر مورد استفاده برای بارگذاری خمش سه نقطه‌ای را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۵: فیکسچر ساخته شده برای بارگذاری خمش سه نقطه‌ای

۴-۸- شرح آزمایش

در این تحقیق، به منظور تعیین پارامترهای شکست نمونه‌های آسفالت در دمای ۱۵- درجه سانتی‌گراد تحت مود ۱ بارگذاری، از استاندارد *AASHTO-TP 105-13* و استاندارد اروپا به شماره *EN 12697-44* استفاده شده است. پس از آماده شدن، نمونه‌ها به مدت سه ساعت درون فریزر با دمای 15°C قرار گرفتند. به علت در دسترس نبودن محفظه کنترل دما، برای ثابت نگه داشتن دمای نمونه‌ها در حین آزمایش، بلافاصله پس از خارج کردن آنها از فریزر، تحت بارگذاری خمشی قرار گرفتند. با توجه به سرعت بارگذاری و زمان بسیار کوتاه شکستن نمونه‌ها و همچنین شرایط کاملاً یکسان برای تمامی نمونه‌ها، می‌توان با دقت مناسبی از اثرات تغییر دما بر روی نمونه‌ها صرف‌نظر کرد. تمامی نمونه‌ها، قبل از قرار گرفتن درون فریزر، کدگذاری شده و ارتفاع، ضخامت متوسط و قطر آنها اندازه‌گیری شد. شکل‌های ۴-۶ تا ۴-۹ مراحل آماده سازی نمونه‌ها را نشان می‌دهند.



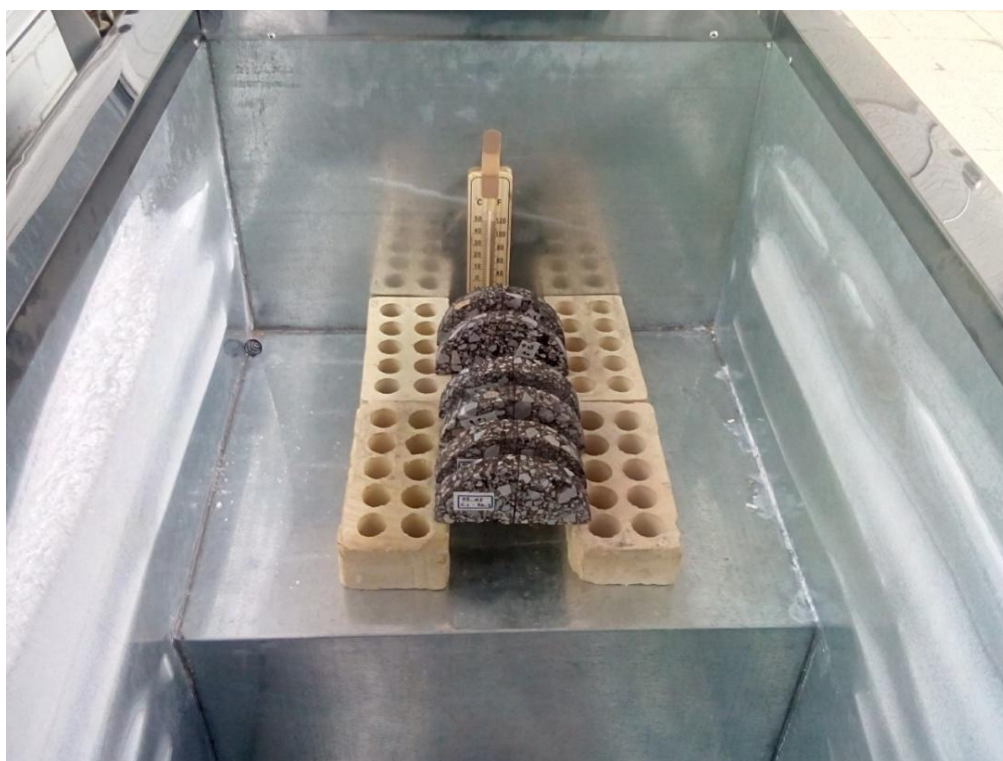
شکل ۴-۶: آماده‌سازی نمونه‌های نیم دایره برای آزمون SCB



شکل ۴-۷: اندازه‌گیری ابعاد نمونه‌ها با استفاده از کولیس



شکل ۴-۸ : کدگذاری نمونه‌ها قبل از قرار دادن آنها درون فریزر



شکل ۴-۹ : قرار دادن نمونه‌ها درون فریزر با دمای ۱۵- درجه سانتی‌گراد

با توجه به این که هدف این تحقیق، بررسی پارامترهای شکست نمونه‌های آسفالت تحت مود ۱ بارگذاری است، ترک تعبیه شده در وسط لبه صاف نمونه‌های نیم‌دایره قرار دارد و بارگذاری آن به صورت کاملاً متقارن است. فاصله تکیه‌گاه‌ها از ترک واقع در وسط نمونه برابر است و بارگذاری اعمال شده به صورت یکنواخت با نرخ بارگذاری ثابت می‌باشد. برای بررسی تاثیر سرعت بارگذاری بر روی سختی شکست مخلوط‌های آسفالت، از دو نرخ بارگذاری با سرعت ۵ و ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه استفاده شد. جدول ۴-۷ به اختصار شرایط انجام آزمون خمش نیم دایره در این تحقیق را نشان می‌دهد

جدول ۴-۷: پارامترهای اساسی مورد استفاده برای انجام آزمون SCB در این پژوهش

نوع بارگذاری	بارگذاری مود ۱
فاصله تکیه‌گاه‌ها	$D^* / 8$
سرعت بارگذاری	۵ و ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه
طول ترک	۱۰ و ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر
دفعات تکرار به ازای هر ترک با طول مشخص	۴ بار
دمای آزمایش	۱۵- درجه سانتی‌گراد
مدت زمان قرار دادن نمونه‌ها درون فریزر	۳ ساعت

* قطر نمونه‌های نیم دایره

پس از انجام آزمون SCB بر روی هر یک از نمونه‌ها، اطلاعات بدست آمده، در رایانه متصل به دستگاه بارگذاری ذخیره شد. تعداد دفعات تکرار آزمون SCB، به ازای هر یک از ترک‌ها با طول مشخص، چهار بار بوده و سپس با میانگین گرفتن از نتایج بدست آمده، پارامترهای شکست نمونه‌های آسفالت تعیین شد. نتایج و بحث و بررسی بر روی داده‌های بدست آمده از کارهای آزمایشگاهی در فصل پنجم به طور کامل شرح داده شده است.

فصل پنجم : نتایج کار آزمایشگاهی

۵-۱- مقدمه

در این فصل، نتایج کارهای آزمایشگاهی انجام شده در این تحقیق بطور کامل ذکر شده است. کارهای آزمایشگاهی انجام شده در این پژوهش را می‌توان به دو بخش کلی تقسیم بندی کرد. در بخش اول، به منظور بررسی تاثیر پیرشدگی ناشی از افزایش عمر روسازی بر سختی شکست مخلوط‌های آسفالتی، سه نوع آسفالت با شرایط کاملاً یکسان (از نظر طرح اختلاط و حجم ترافیک و شرایط آب و هوایی) ولی با سه عمر بهره‌برداری مختلف (آسفالت تازه اجرا شده، آسفالت با عمر بهره‌برداری دوسال و آسفالت با عمر بهره‌برداری شش سال) با مغزه‌گیری از آسفالت اجرا شده در جاده شاهرود-میاندهشت تهیه شد. تمامی مشخصات مخلوط‌های آسفالتی مغزه‌گیری شده، در زمان اجرای آسفالت، توسط آزمایشگاه مکانیک خاک اداره راه استان سمنان تعیین شده و نتایج آن بطور کامل در فصل چهارم ارائه شده است. در بخش دوم، به منظور بررسی تاثیر سرعت بارگذاری بر مقاومت ترک‌خوردگی آسفالت، نمونه‌های آسفالت با عمر بهره‌برداری دو سال، تحت بارگذاری با دو نرخ یکنواخت ۵ و ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه قرار گرفتند. نتایج بدست آمده از کارهای آزمایشگاهی در ادامه این فصل به طور کامل شرح داده شده است.

۵-۲- بررسی تاثیر پیر شدگی بر پارامترهای شکست مخلوط‌های آسفالت با عمر مختلف

به منظور بررسی تاثیر پیرشدگی بر پارامترهای شکست آسفالت تحت مود ۱ بارگذاری، آزمون خمش سه نقطه‌ای در دمای 15°C ، بر روی نمونه‌های نیم استوانه آسفالت با سه عمر بهره‌برداری مختلف و با نرخ بارگذاری یکنواخت ۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفت. جدول ۵-۱ ابعاد، نیرو و تغییر مکان گسیختگی نمونه‌های مورد آزمایش در این بخش را نشان می‌دهد. هر یک از نمونه‌ها به صورت $X-Y-Z-P$ کدگذاری شده است که به ترتیب، سال ساخت نمونه، کد مغزه تهیه شده، طول ترک ایجاد شده بر روی نمونه و شماره تکرار را نشان می‌دهند. چهار نمونه نیم استوانه تهیه شده از یک مغزه مشخص، دارای کد یکسان ولی با پسوند ۱ تا ۴ می‌باشند.

جدول ۵-۱: مشخصات هندسی، نیرو و تغییر مکان گسیختگی نمونه‌ها تحت بارگذاری با سرعت یکنواخت 5 mm/min

تغییر مکان گسیختگی (mm)	نیروی گسیختگی (N)	ارتفاع نمونه*	ضخامت متوسط نمونه*	طول ترک*	کد نمونه	شماره
۰/۳۴۲	۱۵۶۳/۵۷۷	۷۱	۲۲	۱۲	88-D1-10-1	۱
۰/۲۸۵	۱۴۵۷/۹۳۲	۷۱	۲۳/۷	۱۱/۵	88-D2-10-2	۲
۰/۲۹۷	۱۷۸۵/۱۸۸	۶۹	۲۲/۴	۱۱	88-D4-10-3	۳
۱/۱	۱۶۵۵/۲۷۳	۶۹/۵	۲۳/۴	۱۲	88-E4-10-4	۴
۰/۱۷۰	۸۱۰	۶۹	۲۳/۵	۲۱	88-A1-20-1	۱
۰/۶۳۹	۱۶۰۱/۰۱۵	۷۱/۵	۲۴/۶	۲۱	88-B4-20-3	۲
۰/۴۹۹	۱۵۲۲/۸	۷۱	۲۴/۵	۲۱	88-C4-20-4	۳
۰/۸۶۵	۸۷۲/۸۰۹	۷۰	۲۴/۵	۳۰/۵	88-B1-30-1	۱
۰/۶۶۹	۷۳۳/۲۷۱	۶۸/۵	۲۳/۸	۳۱/۵	88-B2-30-2	۲
۰/۲۷۲	۷۶۳/۳۰۲	۷۲	۲۵/۵	۳۰/۵	88-B3-30-3	۳
۰/۳۸۳	۷۲۶/۳۷۰	۶۹	۲۴/۵	۳۲/۵	88-E2-30-4	۴
۱/۰۶۹	۱۷۵۳/۴۰۵	۷۰	۲۲	۱۰	93-B1-10-1	۱
۰/۹۷۳	۲۶۲۰/۷۰۶	۷۰	۲۳/۷	۱۰	93-B3-10-2	۲
۱/۲۰۳	۲۱۹۳/۱۶۵	۷۰	۲۲/۴	۱۰	93-C1-10-3	۳
۰/۹۵۸	۱۶۹۹/۵۲۷	۷۰	۲۲/۷	۲۰	93-B4-20-1	۱
۰/۸۳۹	۱۲۸۲/۷۹۲	۷۰	۲۴/۶	۲۰	93-A1-20-2	۲
۰/۴۷۶	۱۶۶۸/۲۵۲	۷۰	۲۳/۲	۲۰	93-C2-20-3	۳
۰/۵۰۳	۱۱۲۴/۲۸۱	۶۹/۵	۲۴/۶	۳۰	93-A4-30-1	۱
۰/۶۹۶	۵۰۷/۶۹۳	۶۹	۲۲/۵	۳۰	93-A3-30-2	۲
۰/۲۵۳	۶۹۷/۸۱۷	۷۰	۲۳/۵	۳۰	93-C3-30-3	۳
۰/۹۱۰	۱۹۷۳/۰۳۲	۶۹	۲۵/۲	۱۱	94-D1-10-1	۱
۰/۶۹۳	۲۲۱۴/۵۶۴	۶۹/۵	۲۴/۴	۱۲	94-D2-10-2	۲
۰/۸۲۳	۲۱۱۹/۳۶۵	۷۰	۲۴/۲	۱۲	94-D3-10-3	۳
۰/۳۴۸	۹۸۵/۷۵۶	۷۰	۲۴/۶	۲۲	94-A1-20-1	۱
۰/۲۶۱	۱۰۴۱/۰۲۷	۷۰/۵	۲۵/۴	۲۳	94-A2-20-2	۲
۰/۱۷۴	۹۲۲/۹۰۹	۶۹/۵	۲۳/۸	۲۴	94-A3-20-3	۳
۰/۳۰۹	۷۰۰/۰۹۶	۶۹/۵	۲۴/۴	۳۱/۵	94-C1-30-1	۱
۰/۱۸۹	۶۱۲/۳۴۶	۷۱	۲۵	۳۰	94-D4-30-2	۲
۰/۲۷۹	۷۷۸/۶۲۳	۶۹/۵	۲۵/۱	۳۲	94-A4-30-3	۳

* تمامی ابعاد بر حسب میلی‌متر می‌باشند.

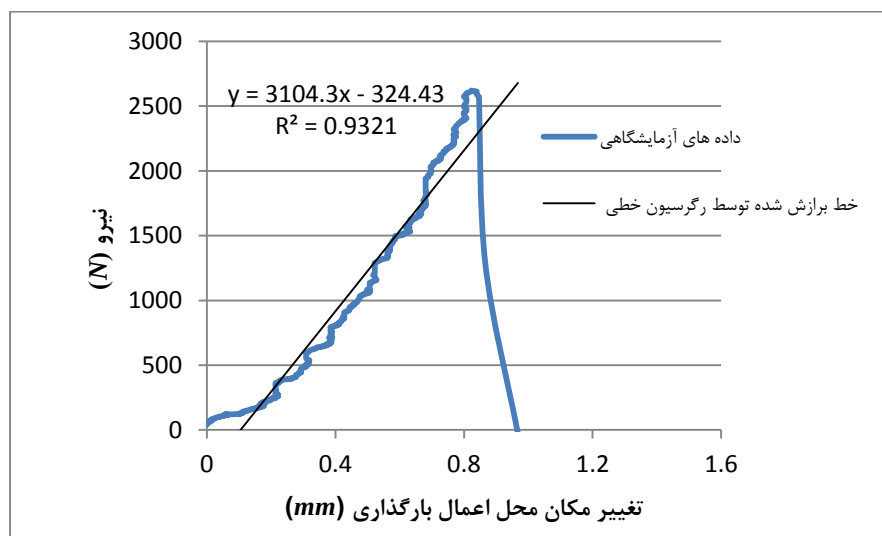
۵-۲-۱- مقدار بحرانی مود ۱ فاکتور شدت تنش^۱

بر اساس تئوری مکانیک شکست الاستیک خطی، فاکتور شدت تنش به عنوان پارامتر اصلی در بررسی سختی شکست^۲ مخلوط‌های آسفالتی در نظر گرفته می‌شود. با توجه به بررسی نمودار نیرو-تغییر مکان بدست آمده از آزمایشات، می‌توان با تقریب مناسبی رفتار آسفالت در دمای 15°C را خطی دانست. شکل ۵-۱ نمودار نیرو-تغییر مکان یکی از نمونه‌ها را نشان می‌دهد. بر اساس رابطه ۳-۱۷ و با توجه به نیروی شکست بدست آمده از نتایج آزمایش، مقدار بحرانی فاکتور شدت تنش برای تمامی نمونه‌ها تعیین شد. مقادیر بحرانی فاکتور شدت تنش، تحت مود ۱ بارگذاری برای نمونه‌های آسفالت با عمر بهره‌برداری مختلف و به ازای ترک به طول ۱۰ میلی‌متر در جدول ۵-۲ نشان داده شده است. همانطور که در جدول ۵-۲ نشان داده شده است، با افزایش عمر روسازی از دو سال به شش سال، مقدار فاکتور شدت تنش به شکل قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. این امر نشان‌دهنده کاهش مقاومت ترک‌خوردگی آسفالت است. با افزایش عمر روسازی و به علت پدیده پیرشدگی، سختی قیر که ماده اصلی چسباننده اجزاء آسفالت به یکدیگر می‌باشد افزایش یافته که در نتیجه آن قیر سخت تر و شکننده‌تر می‌شود و این امر موجب کاهش مقاومت ترک‌خوردگی نمونه‌ها می‌گردد. بر اثر پدیده هوازدگی به مرور زمان بخش زیادی از مواد فرار موجود در قیر تبخیر شده و آسفالتین موجود در قیر بر جای می‌ماند. این امر موجب کاهش خاصیت چسبندگی و شکل‌پذیری قیر می‌گردد. مقدار متوسط فاکتور شدت تنش، در نمونه‌های آسفالت تازه اجرا شده به میزان ناچیزی از مقادیر متناظر در آسفالت دو ساله کمتر بود. یکی از علل این موضوع را می‌توان عدم تراکم کافی و همچنین عدم گیرش مناسب نمونه‌های آسفالت تازه اجرا شده نسبت به آسفالت دو ساله دانست. بر این اساس بعضی از نمونه‌های استوانه‌ای مغزه‌گیری شده از آسفالت تازه، قبل از بارگذاری و به دلیل حذف

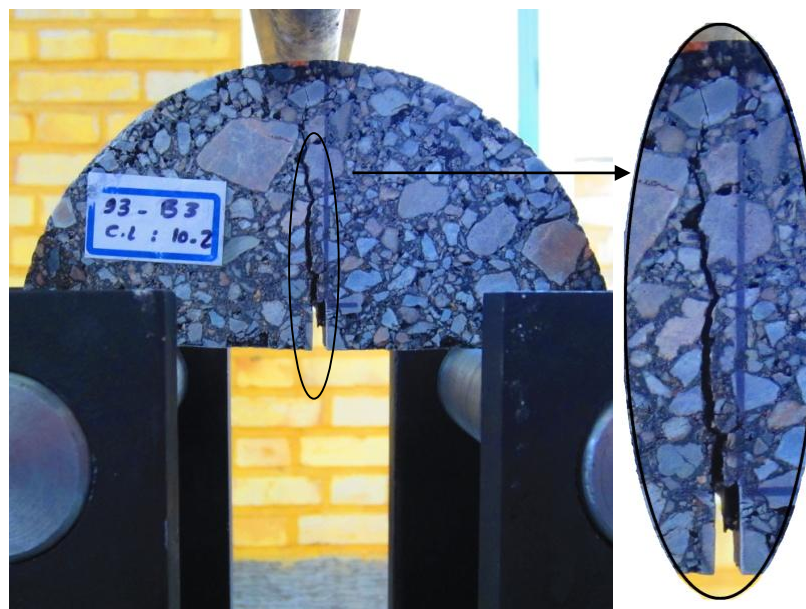
۱ - Mode I critical stress intensity factor

۲ - Fracture Toughness

تنش‌های جانبی موجود در اطراف نمونه قبل از مغزه‌گیری، دچار گسیختگی شدند که ناچار به مغزه‌گیری مجدد از روسازی شدیم. شکل ۵-۲ چگونگی شکست و مسیر رشد ترک در یکی از نمونه‌های آسفالت تحت بارگذاری خمشی سه نقطه‌ای را نشان می‌دهد. بر اساس آن و همانطور که انتظار می‌رفت (با توجه به مود ۱ بارگذاری) ترک‌خوردگی از نوک ترک اولیه (محلی که از نظر تئوری بیشترین مقادیر تنش کششی در آن واقع است) آغاز شده و به صورت قائم و در راستای ترک اولیه امتداد یافت.



شکل ۵-۱: نمودار نیرو-تغییر مکان بدست آمده از آزمایش SCB بر روی یکی از نمونه‌ها



شکل ۵-۲: مسیر رشد ترک در یکی از نمونه‌ها تحت مود ۱ بارگذاری

جدول ۵-۲: مود ۱ فاکتور شدت تنش برای نمونه‌های آسفالت با عمر بهره‌برداری مختلف تحت بارگذاری با سرعت یکنواخت 5 mm/min

عمر نمونه	تکرار	طول ترک	ضخامت متوسط نمونه	شعاع نمونه	نیروی گسیختگی	$Y_{(0.8)}$	مقدار بحرانی فاکتور شدت تنش	میانگین مقدار بحرانی فاکتور شدت تنش ($N/mm^{1.5}$)
نمونه ۶ ساله (۱۳۸۸)	۱	۱۲	۲۲	۷۱	۱۵۶۳/۶	۴/۷۶۳	۱۴/۶۴	۱۴/۵۲
	۲	۱۱/۵	۲۳/۷	۷۱	۱۴۵۷/۹	۴/۷۶۲	۱۲/۴	
	۳	۱۱	۲۲/۴	۶۹	۱۷۸۵/۲	۴/۷۶۱	۱۶/۱۶	
	۴	۱۲	۲۳/۴	۶۹/۵	۱۶۵۵/۳	۴/۷۶۴	۱۴/۸۹	
نمونه ۲ ساله (۱۳۹۳)	۱	۱۰	۲۲	۷۰	۱۷۵۳/۴	۴/۷۶	۱۵/۱۹	۱۸/۳۱
	۳	۱۰	۲۳/۷	۷۰	۲۶۲۰/۷	۴/۷۶	۲۱/۰۷	
	۳	۱۰	۲۲/۴	۷۰	۲۱۹۳/۲	۴/۷۶	۱۸/۶۶	
نمونه تازه (۱۳۹۴)	۱	۱۱	۲۵/۲	۶۹	۱۹۷۳	۴/۷۶۱	۱۵/۸۸	۱۷/۷۶
	۲	۱۲	۲۴/۴	۶۹/۵	۲۲۱۴/۶	۴/۷۶۴	۱۹/۱	
	۳	۱۲	۲۴/۲	۷۰	۲۱۱۹/۴	۴/۷۶۴	۱۸/۳	

* تمامی ابعاد و مقادیر ذکر شده در جدول بر اساس نیوتون و میلی‌متر است.

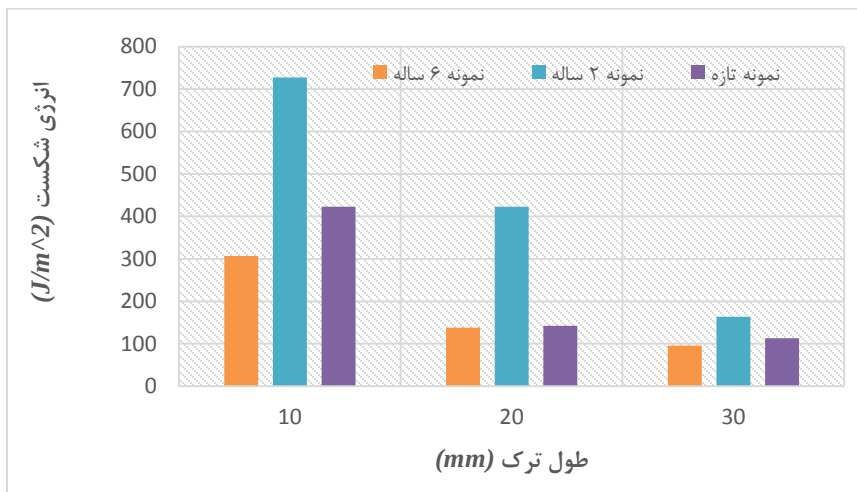
۵-۲-۲- انرژی شکست^۱

به منظور بررسی بهتر و دقیق‌تر مقاومت آسفالت در برابر ترک‌خوردگی، انرژی شکست نمونه‌ها بر اساس رابطه ۳-۲۰ و با توجه به نمودار نیرو-تغییر مکان بدست آمده از آزمایشات تعیین شد. فاکتور شدت تنش، تنها نیروی بحرانی شکست نمونه‌ها را در نظر گرفته و تغییر شکل گسیختگی آنها را نادیده می‌گیرد. با توجه به تحقیق انجام شده توسط تنگ^۲ در سال ۲۰۱۴ مقدار فاکتور شدت تنش به عوامل زیادی از جمله شکل نوک ترک (میزان تیز بودن نوک ترک) و محل قرارگیری ترک (داخل سنگ یا قیر) بستگی دارد و نمی‌تواند به تنهایی معیار مناسبی برای مقایسه و ارزیابی مقاومت ترک‌خوردگی نمونه‌های آسفالت در نظر گرفته شود. از این‌رو به منظور در نظر گرفتن همزمان نیرو و تغییر مکان نمونه‌ها در لحظه گسیختگی، انرژی شکست آنها محاسبه شد. شکل ۵-۳ مقادیر انرژی شکست نمونه‌های آسفالت با عمر بهره‌برداری مختلف را نشان می‌دهد. اعداد نشان داده شده در شکل ۵-۳ میانگین سه بار تکرار آزمون SCB بر روی هر یک از نمونه‌ها می‌باشد. بر اساس شکل ۵-۳ و همانطور که انتظار می‌رفت، انرژی شکست هر یک از نمونه‌ها با عمر بهره‌برداری مشخص، با افزایش طول ترک کاهش یافته است. با افزایش عمر روسازی از دو سال به شش سال، مقدار انرژی شکست به شکل قابل توجهی کاهش یافته است. این امر نشان می‌دهد با افزایش عمر بهره‌برداری روسازی، توانایی نمونه‌ها در جذب انرژی، تا قبل از لحظه گسیختگی کاهش یافته که باعث کاهش انرژی شکست نمونه‌ها شده است. همچنین افزایش عمر بهره‌برداری از دو سال به شش سال، باعث کاهش محسوس در مقادیر تغییر شکل گسیختگی نمونه‌های شش ساله نسبت به نمونه‌های دو ساله شده است. با توجه به شکل ۵-۳، انرژی شکست نمونه‌های تازه به شکل محسوسی از انرژی شکست آسفالت دو ساله کمتر است. یکی از دلایل این موضوع را می‌توان به خاطر عدم تراکم کافی و گیرش مناسب نمونه‌ها

۱- Fracture energy

۲- Tang

دانست. بارگذاری ترافیکی باعث تراکم بیشتر نمونه‌ها شده و با کاهش فضای خالی آسفالت موجب افزایش انرژی شکست می‌شود.



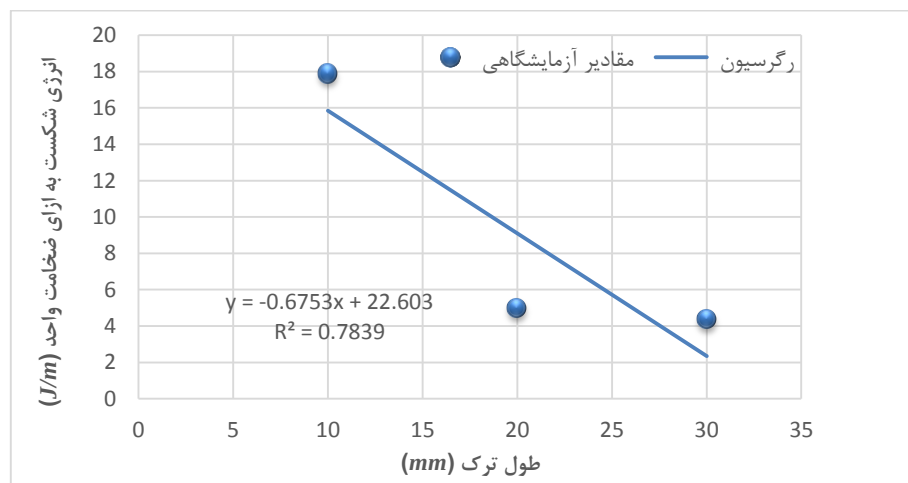
شکل ۵-۳: انرژی شکست نمونه‌های SCB با عمر بهره‌برداری مختلف به ازاء طول‌های مختلف ترک

۵-۲-۳- نرخ رهاسازی انرژی کرنشی (انتگرال جی)^۱

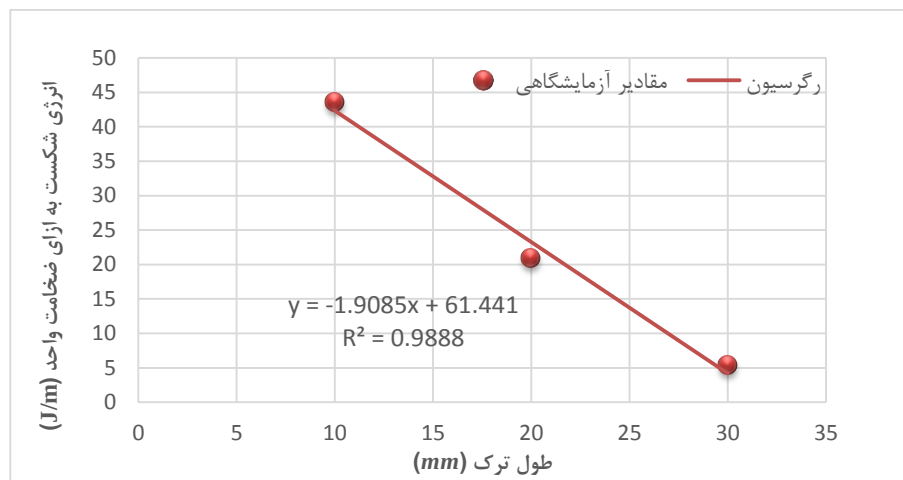
به منظور بررسی بهتر مقاومت ترک‌خوردگی نمونه‌های آسفالت، همچنین درنظر گرفتن رفتار الاستوپلاستیک آسفالت، مقدار بحرانی نرخ رهاسازی انرژی کرنشی (که آن را انتگرال جی نیز می‌نامند) برای سه نمونه آسفالت با عمرهای مختلف بر اساس رابطه ۳-۲۱ تعیین شد. برای این منظور سه ترک با طول‌های ۱۰ و ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر بر روی نمونه‌های آسفالت با عمر بهره‌برداری مختلف ایجاد شد. سپس هر یک از نمونه‌ها در دمای ۱۵- درجه سانتی‌گراد تحت بارگذاری با سرعت یکنواخت ۵ میلی‌متر بر دقیقه قرار گرفتند. شکل‌های ۴-۵ تا ۶-۵ مقادیر نرخ رهاسازی انرژی کرنشی (شیب خط برازش شده برابر است با مقدار بحرانی نرخ رهاسازی انرژی کرنشی) را برای آسفالت با عمرهای بهره‌برداری مختلف نشان می‌دهند. هر چقدر که مقدار بحرانی نرخ رهاسازی انرژی کرنشی برای یک ماده مشخص بیشتر باشد، بیانگر مقاومت بهتر این ماده در برابر ترک‌خوردگی است. در واقع نرخ رهاسازی انرژی کرنشی عبارتست از مقدار انرژی

^۱ - Energy release rate

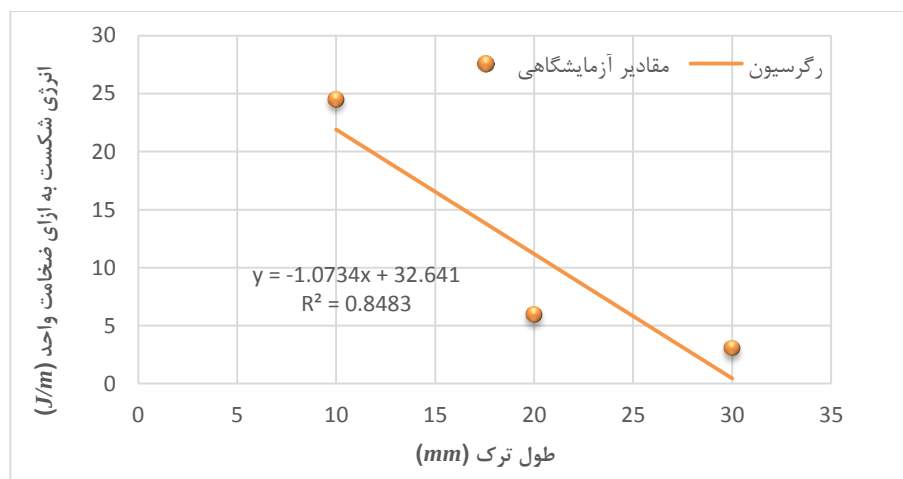
کرنشی مورد نیاز برای ایجاد یک ترک با سطح واحد. با توجه به شکل‌های ۴-۵ تا ۶-۵، به طور کلی با افزایش عمر روسازی، مقدار انتگرال جی کاهش یافته است. این امر نشان دهنده کاهش مقاومت ترک خوردگی نمونه‌ها بر اثر افزایش عمر روسازی است. مقایسه مقادیر بدست آمده برای انتگرال جی، در شکل‌های ۴-۵ الی ۶-۵ نشان داد، مقاومت ترک خوردگی آسفالت برای نمونه‌های با عمر شش سال به شکل محسوسی کمتر از مقادیر متناظر آن در نمونه‌های آسفالت دو ساله و جدید می‌باشد. بر اساس نتایج بدست آمده از آزمایشات، با افزایش عمر روسازی، مقاومت نمونه‌های آسفالت در برابر ترک خوردگی کاهش یافته است. علت این امر را می‌توان به دلیل فرسودگی و هوازگی قیر موجود در نمونه‌های قدیمی‌تر نسبت به نمونه‌های جدیدتر دانست. هوازگی و پیر شدگی قیر موجود در آسفالت، باعث کاهش توانایی جذب انرژی تا قبل از گسیختگی، کاهش خاصیت چسبندگی و کاهش توانایی تغییر شکل نمونه‌ها شده است. این امر باعث شکننده‌تر شدن نمونه‌های آسفالت قدیمی‌تر، و در نتیجه آن افزایش احتمال ترک خوردگی در آن شده است.



شکل ۴-۵ : نرخ رهاسازی انرژی کرنشی برای نمونه آسفالت ۶ ساله



شکل ۵-۵: نرخ رهاسازی انرژی کرنشی برای نمونه آسفالت ۲ ساله



شکل ۵-۶: نرخ رهاسازی انرژی کرنشی برای نمونه آسفالت جدید

۵-۳- بررسی تاثیر سرعت بارگذاری بر پارامترهای شکست نمونه‌های آسفالت با عمر مختلف

در این بخش به منظور بررسی تاثیر سرعت بارگذاری بر پارامترهای شکست مخلوط‌های آسفالتی، آزمون خمشی نیم‌دایره تحت دو سرعت بارگذاری یکنواخت ۵ و ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه، فقط بر روی نمونه‌های آسفالت با عمر بهره برداری دو سال انجام گرفت. تمامی آزمون‌ها در دمای ۱۵- درجه سانتی‌گراد انجام شده است. پارامترهای شکست مخلوط‌های آسفالتی از جمله فاکتور شدت تنش، انرژی شکست و نرخ رهاسازی انرژی کرنشی برای هر دو سرعت بارگذاری تعیین و نتایج آن با یکدیگر مقایسه شدند.

۵-۳-۱- مقدار بحرانی مود ۱ فاکتور شدت تنش

در این بخش، آزمون SCB با دو سرعت بارگذاری مختلف با نرخ‌های ۵ و ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفت. جدول ۵-۳ مقادیر نیرو و تغییر شکل گسیختگی نمونه‌های آسفالت را به ازای دو سرعت بارگذاری مختلف برای نمونه‌های آسفالت دو ساله نشان می‌دهد. با داشتن نیرو گسیختگی نمونه‌ها و با توجه به رابطه ۳-۱۷، مقدار فاکتور شدت تنش به ازای دو سرعت بارگذاری مختلف برای نمونه‌های آسفالت با طول ترک ۱۰ میلی‌متر تعیین شد و مقادیر آن در جدول ۵-۴ نشان داده شده است.

جدول ۵-۳: نیرو و تغییر مکان گسیختگی نمونه‌های SCB برای آسفالت با عمر بهره‌برداری دو سال							
تغییر شکل گسیختگی*	نیرو گسیختگی (N)	ارتفاع نمونه*	ضخامت*	طول ترک*	کد نمونه	شماره	سرعت بارگذاری
۰/۵۵۵	۲۵۰۴/۳۴	۷۲/۵	۲۴/۵	۱۱	93-D3-10-1	۱	۵۰
۰/۶۱۷	۲۲۶۹/۱	۷۲	۲۴/۶	۱۴	93-D4-10-2	۲	
۰/۴۱۹	۲۲۱۶	۶۹	۲۳/۷	۱۱	93-E4-10-3	۳	
۰/۲۰۶	۱۳۰۸/۵	۶۸/۵	۲۳/۴	۲۱	93-D1-20-1	۱	
۰/۳۶۰	۱۶۶۲/۳۶	۷۱	۲۳/۸	۲۰/۵	93-E1-20-2	۲	
۰/۷۲۹	۲۲۷۱/۸	۷۱	۲۴/۵	۲۲/۵	93-E2-20-3	۳	
۰/۷۶۰	۱۱۸۱/۱	۷۰/۵	۲۳/۵	۳۱/۵	93-F2-30-1	۱	
۰/۶۵۰	۱۰۱۶	۶۹	۲۳/۵	۳۲/۵	93-F3-30-2	۲	
۰/۴۷۵	۱۳۹۱/۸۳	۶۹/۵	۲۵	۳۱	93-G1-30-3	۳	
۱/۰۷۰	۱۷۵۳/۴۱	۷۰	۲۲	۱۰	93-B1-10-1	۱	۵
۰/۹۷۳	۲۶۲۰/۷۱	۷۰	۲۳/۷	۱۰	93-B3-10-2	۲	
۱/۲۰۳	۲۱۹۳/۱۷	۷۰	۲۲/۴	۱۰	93-C1-10-3	۳	
۰/۹۵۸	۱۶۹۹/۵۳	۷۰	۲۲/۷	۲۰	93-B4-20-1	۱	
۰/۸۳۹	۱۲۸۲/۷۹	۷۰	۲۴/۶	۲۰	93-A1-20-2	۲	
۰/۴۷۶	۱۶۶۸/۲۵	۷۰	۲۳/۲	۲۰	93-C2-20-3	۳	
۰/۵۰۳	۱۱۲۴/۲۸	۶۹/۵	۲۴/۶	۳۰	93-A4-30-1	۱	
۰/۶۹۶	۵۰۷/۶۹	۶۹	۲۲/۵	۳۰	93-A3-30-2	۲	
۰/۲۵۳	۶۹۷/۸۲	۷۰	۲۳/۵	۳۰	93-C3-30-3	۳	

* مقادیر ذکر شده بر حسب میلی‌متر می‌باشند.

جدول ۴-۵: فاکتور شدت تنش به ازای سرعت‌های بارگذاری مختلف برای آسفالت با عمر بهره‌برداری دو سال

سرعت بارگذاری	تکرار	طول ترک*	ضخامت*	ارتفاع نمونه*	نیروی گسیختگی (N)	$\gamma(0.8)$	فاکتور شدت تنش (N/mm ^{1.5})	میانگین فاکتور شدت تنش (N/mm ^{1.5})
۵ mm/min	۱	۱۰	۲۲	۷۰	۱۷۵۳/۴۱	۴/۷۶	۱۵/۱۹	۱۸/۳۱
	۲	۱۰	۲۳/۷	۷۰	۲۶۲۰/۷۱	۴/۷۶	۲۱/۰۷	
	۳	۱۰	۲۲/۴	۷۰	۲۱۹۳/۱۷	۴/۷۶	۱۸/۶۶	
۵۰ mm/min	۱	۱۱	۲۴/۵	۷۲/۵	۲۵۰۴/۳۴	۴/۷۶	۱۹/۷۳	۱۹/۶۶
	۲	۱۴	۲۴/۶	۷۲	۲۲۶۹/۱	۴/۷۷	۲۰/۲۸	
	۳	۱۱	۲۳/۷	۶۹	۲۲۱۶	۴/۷۶	۱۸/۹۶	

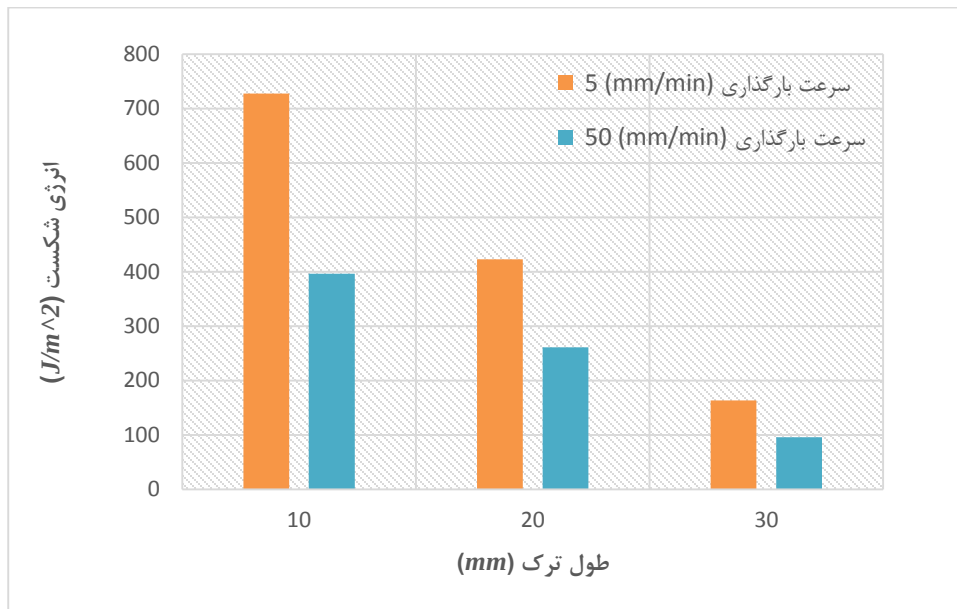
*مقادیر ذکر شده بر حسب میلی‌متر می‌باشند.

به دلیل ماهیت ویسکوالاستیک آسفالت، انتظار می‌رود سرعت بارگذاری تاثیر زیادی بر رفتار آن داشته باشد. به‌طور کلی با افزایش سرعت بارگذاری، سهم بخش الاستیک ماده افزایش می‌یابد. بر این اساس و با توجه به نتایج آزمایش‌ها، با افزایش سرعت بارگذاری، نیروی گسیختگی نمونه‌ها افزایش یافته است. بر اساس جدول ۴-۵، با افزایش سرعت بارگذاری، مقدار میانگین مود ۱ فاکتور شدت تنش به میزان ناچیزی افزایش یافته است. این امر نشان دهنده افزایش ناچیز مقاومت ترک‌خوردگی نمونه‌ها بر اثر افزایش سرعت بارگذاری در دمای 15°C است. حال آنکه در پژوهش انجام گرفته توسط لنکستر و همکارانش^۱ در سال ۲۰۱۱ به منظور بررسی تاثیر سرعت بارگذاری بر مقاومت ترک‌خوردگی آسفالت در دمای 20°C ، آزمون خمشی نیم‌دایره با دو سرعت ۰/۵ و ۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفت. بر اساس نتایج بدست آمده در پژوهش انجام شده توسط لنکستر، با افزایش سرعت بارگذاری، مقدار فاکتور شدت تنش به شکل محسوسی افزایش یافت. علت این امر را می‌توان به دلیل نقش بیشتر سهم بخش الاستیک آسفالت، در دمای پایین دانست. حال آنکه در دماهای بالاتر تاثیر بخش ویسکوز ماده در رفتار آسفالت بیشتر بوده و این امر باعث تاثیر بیشتر افزایش سرعت بارگذاری بر رفتار ماده شده است.

۱- Lancaster et al.

۵-۳-۲- انرژی شکست

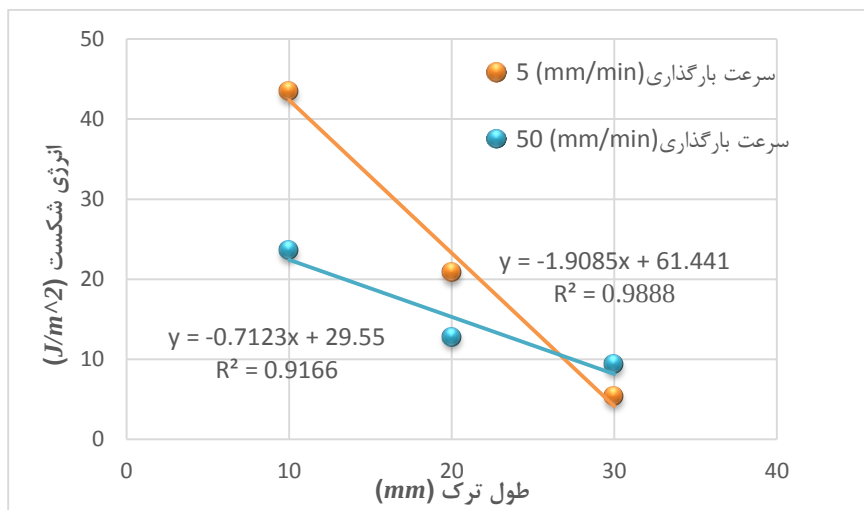
شکل ۵-۷ مقادیر انرژی شکست نمونه‌های دو ساله آسفالت را به ازاء دو سرعت بارگذاری مختلف نشان می‌دهد. بر اساس نتایج آزمایش‌ها، با افزایش سرعت بارگذاری، انرژی شکست نمونه‌ها کاهش یافته است. علت این امر را می‌توان به دلیل کاهش توانایی جذب انرژی نمونه‌ها بر اثر افزایش سرعت بارگذاری دانست.



شکل ۵-۷: تغییرات انرژی شکست به ازای افزایش سرعت بارگذاری

۵-۳-۳- نرخ رهاسازی انرژی کرنشی (انتگرال جی)

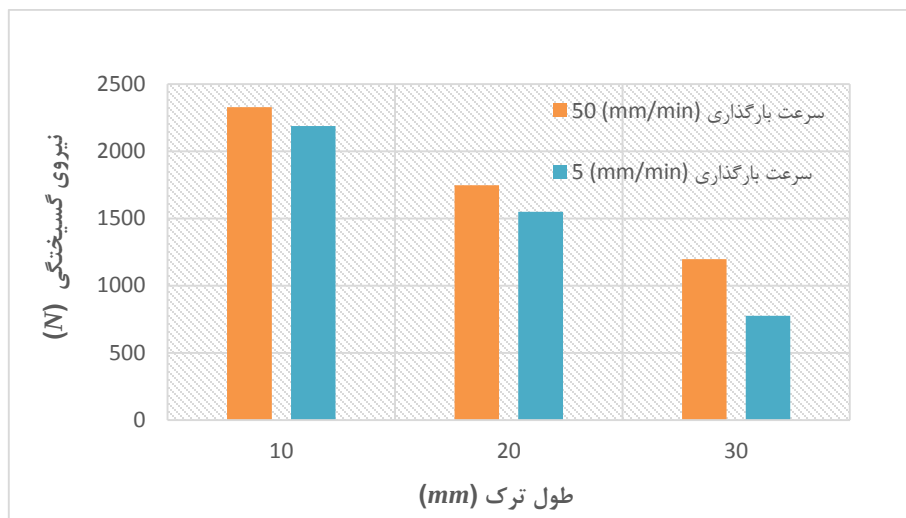
به منظور بررسی بهتر و دقیق تر تاثیر سرعت بارگذاری بر مقاومت ترک‌خوردگی نمونه‌های آسفالت، نرخ رهاسازی انرژی کرنشی به ازاء دو سرعت بارگذاری ۵ و ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفت. شکل ۵-۸ نتایج بدست آمده از آزمایشات را به ازاء سرعت‌های مختلف بارگذاری نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش سرعت بارگذاری، مقدار انتگرال جی کاهش یافته است. این امر نشان می‌دهد با افزایش سرعت بارگذاری، مقاومت آسفالت در برابر ترک‌خوردگی کاهش یافته است. نرخ رهاسازی انرژی، با بررسی تاثیر همزمان نیرو و تغییر مکان گسیختگی و همچنین تاثیر تغییرات طول ترک، بهترین گزینه برای بررسی مقاومت نمونه‌های آسفالت در برابر ترک‌خوردگی است.



شکل ۵-۸: تغییرات انتگرال جی به ازای افزایش سرعت بارگذاری

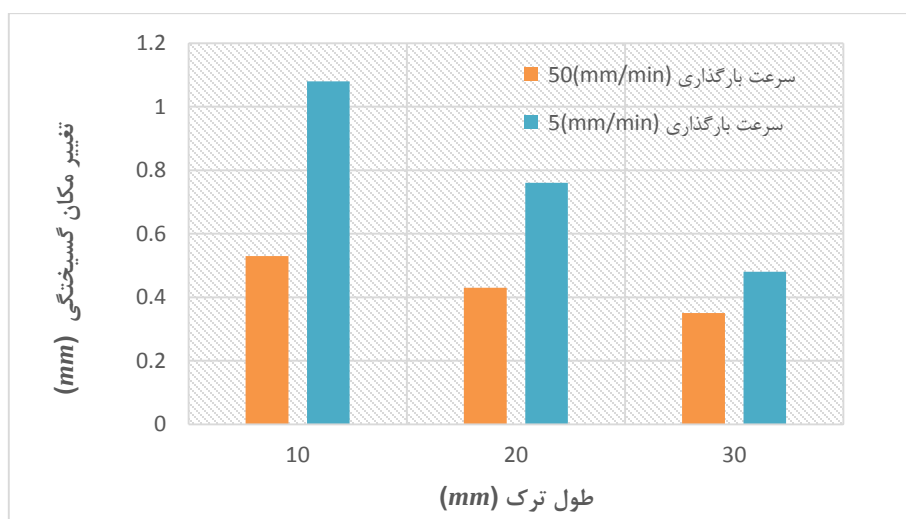
۵-۳-۴- بررسی تاثیر سرعت بارگذاری بر نیروی شکست و تغییر مکان گسیختگی نمونه‌ها

همانطور که قبلاً اشاره شد، آسفالت یک ماده ویسکوالاستیک است و عوامل مختلف از جمله سرعت بارگذاری تاثیر زیادی بر رفتار آن دارد. بدین منظور نیروی شکست و تغییر مکان گسیختگی نمونه‌های آسفالت دو ساله تحت بارگذاری با دو سرعت مختلف ۵ و ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه در دمای ۱۵- درجه سانتی‌گراد تعیین شد که نتایج آن به شرح زیر است. همانطور که در شکل ۵-۹ نشان داده شده است، با افزایش سرعت بارگذاری نیروی شکست نمونه‌های آسفالت افزایش یافته است. نتایج نشان داده شده در شکل ۵-۹ بر اساس میانگین بدست آمده از چهار بار آزمایش بر روی هریک از نمونه‌ها با طول ترک مشخص می‌باشد. با توجه به شکل با افزایش سرعت بارگذاری، نیروی گسیختگی نمونه‌ها برای ترک‌های ۱۰ و ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر به طور میانگین به ترتیب ۶/۴۳ و ۱۲/۷۳ و ۵۴ درصد افزایش یافته است. با افزایش سرعت بارگذاری، سهم بخش الاستیک آسفالت در رفتار آن تاثیر بیشتری می‌گذارد و بر این اساس با افزایش سرعت بارگذاری، نیروی گسیختگی نمونه‌ها افزایش یافته است.



شکل ۵-۹: تاثیر سرعت بارگذاری بر نیروی گسیختگی نمونه‌های آسفالت دو ساله

شکل ۵-۱۰ تغییر مکان گسیختگی نمونه‌ها را به ازاء بارگذاری با دو سرعت مختلف نشان می‌دهد. همانطور که در شکل نشان داده شده است، با افزایش سرعت بارگذاری تغییر مکان گسیختگی نمونه‌ها به شکل قابل توجهی کاهش یافته است. علت این امر را نیز می‌توان ناشی از ماهیت ویسکوالاستیک آسفالت دانست. در سرعت‌های پایین‌تر، تغییر شکل‌های بلند مدت ناشی از رفتار بخش ویسکوز ماده باعث افزایش تغییر شکل تا لحظه گسیختگی نمونه‌ها می‌گردد. این امر باعث افزایش تغییر شکل گسیختگی نمونه در سرعت‌های بارگذاری پایین‌تر نسبت به سرعت‌های بارگذاری بالاتر می‌گردد.



شکل ۵-۱۰: تاثیر سرعت بارگذاری بر تغییر شکل گسیختگی نمونه‌های آسفالت دو ساله

فصل ششم : مدل سازی

۶-۱ مقدمه

یکی از پرکاربردترین نرم‌افزارها در زمینه انجام آنالیز اجزاء محدود، نرم‌افزار آباکوس است. این نرم‌افزار در سال ۱۹۷۸ توسط *Paul Sorensen*، *Bengt Karlsson* و *David Hibbitt* ایجاد شد. ایده اصلی نرم‌افزار در پایان‌نامه دکترای دیوید هبیت در سال ۱۹۷۲ میلادی، تحت عنوان ”مکانیک محاسباتی بر پایه روش اجزاء محدود“ در دانشگاه براون ارائه شد. از آنجا که این نرم‌افزار بر اساس مسائل غیر خطی بنا گذاری شده، توانایی بالایی جهت شبیه سازی مسائل واقعی دارد. با توجه به اینکه آباکوس یک ابزار مدل سازی عمومی و گسترده است، استفاده از آن تنها محدود به تحلیل‌های مکانیک جامدات و سازه (تنش - تغییر مکان) نمی‌شود. با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان مسایل مختلفی نظیر انتقال حرارت، نفوذ جرم، تحلیل حرارتی اجزاء الکتریکی، اکوستیک، مکانیک خاک و پیزو الکتریک را مورد مطالعه قرار داد.

به طور کلی هر تحلیل اجزاء محدود در آباکوس شامل سه مرحله است

- پیش پردازش

- حل مسئله

- پس پردازش

۶-۲ گام‌های مورد نیاز برای ایجاد و تحلیل یک مدل در آباکوس

نرم افزار *Abaqus/CAE* به محیط‌های ده گانه‌ای تقسیم شده است که این محیط‌ها عبارتند از

- محیط *Part*: در این قسمت، مدلسازی هندسی قطعات انجام می‌گیرد.

- محیط *Property*: در این قسمت، تعریف خصوصیات مواد مورد تحلیل، تعریف پروفیل سطح مقطع،

نسبت دادن خواص تعریف شده به قطعات و.... انجام می‌گیرد.

- محیط *Assembly*: در این قسمت، مونتاژ قطعات مختلف (در صورت وجود) انجام می‌گیرد.

- محیط *Step*: در این قسمت، روش حل مورد نظر برای حل مساله انتخاب می‌شود.

- محیط *Interaction*: در این قسمت، خاصیت فیزیکی تماس بین سطوح تعیین می‌شود.
- محیط *Load*: در این قسمت، بارگذاری و شرایط مرزی تعیین می‌گردد.
- محیط *Mesh*: در این قسمت، تقسیم‌بندی مدل به المان‌های کوچک، تعیین نوع المان و انتخاب روش مش‌بندی انجام می‌شود.
- محیط *Job*: در این قسمت، کاربر شروع حل مسئله را به پردازشگر اعلام می‌کند.
- محیط *Visualization*: در این قسمت کاربر نتایج حل را مشاهده می‌کند.

۳-۶- روش اجزاء محدود گسترش یافته^۱ (*XFEM*)

روش اجزاء محدود گسترش یافته از جمله روش‌های جدیدی است که در مدل‌سازی شکست مواد ترد با تغییر شکل‌های کوچک، با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است. در شکست ترد تغییر شکل پلاستیک بسیار اندکی در نوک ترک روی می‌دهد و فرضیات تئوری *LEFM* برقرار می‌باشد. اما در شکست شکل پذیر، پیش از وقوع مرحله نهایی شکست، تغییر شکل پلاستیک زیادی روی داده و انرژی زیادی جذب می‌شود. بنابراین نمی‌توان از ترم‌های انرژی پلاستیک صرف نظر نمود و تئوری *LEFM* دیگر قابل استفاده نمی‌باشد (خویی و برومند، ۱۳۸۹).

روش‌های سنتی اجزاء محدود که مبتنی بر بکارگیری توابع شکل پیوسته برای مدل‌سازی میدان جابجایی هستند، با دو مشکل نیاز به تغییر هندسه شبکه مش‌بندی در هنگام گسترش ترک و وابستگی نتایج تجزیه و تحلیل به هندسه شبکه‌بندی مواجه‌اند. روش‌های نوین اجزاء محدود از جمله روش *XFEM* امکان مدل‌سازی ترک در داخل اجزاء را مهیا می‌کند و بدین ترتیب نیازی به تغییر شبکه‌بندی در فرآیند گسترش ترک نیست (کاظمی و همکاران، ۱۳۸۶).

^۱ - Extended finite element method

۱-۳-۶ مفهوم تقسیم بندی واحد^۱

روش اجزاء محدود گسترش یافته در واقع حالت توسعه یافته روش اجزاء محدود است که بر پایه مفهوم تقسیم بندی واحد استوار است. این مفهوم با استفاده از غنی سازی درجات آزادی گره‌ای، اجازه ایجاد گسستگی را در مدل‌های اجزا محدود می‌دهد و به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\sum_{I \in N} N_I(x) = 1 \quad (۱-۶)$$

با انتخاب تابع دلخواه $Y(x)$ داریم

$$\sum_{I \in N} N_I(x) \cdot Y(x) = Y(x) \quad (۲-۶)$$

بر این اساس تابع تغییر مکان بدست آمده در $XFEM$ به شکل زیر خواهد بود

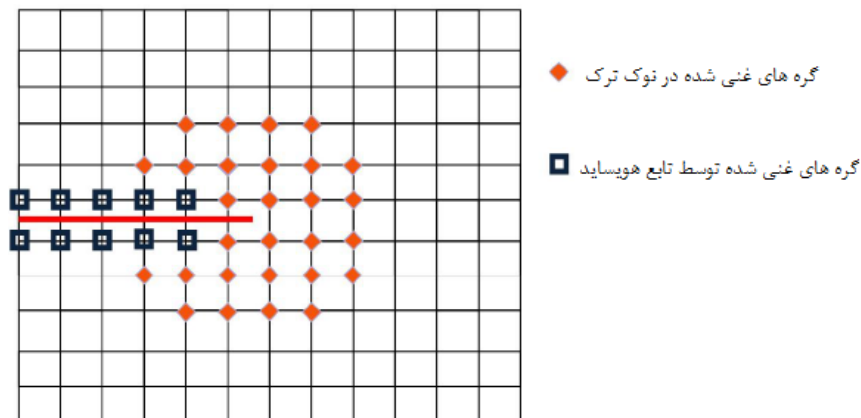
$$u^h(x) = \underbrace{\sum_{I \in N} N_I(x)}_1 [u_I + \underbrace{H(x)a_j}_2 + \underbrace{\sum_{\alpha=1}^4 \phi_{\alpha}(x)b_k^{\alpha}}_3] \quad (۳-۶)$$

۱- برای تمامی گره‌های موجود در مدل بکار می‌رود.

۲- برای گره‌هایی که ترک از آنها عبور کرده بکار می‌رود.

۳- برای گره‌هایی که نوک ترک در آنها قرار می‌گیرد بکار می‌رود.

شکل ۱-۶ نحوه غنی سازی گره‌ها در نواحی اطراف ترک را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۶ : نحوه غنی سازی گره‌ای در نواحی اطراف ترک به روش $XFEM$

^۱ - Partition of unity

پارامترهای موجود در فرمول (۳-۶) عبارتند از

$$N_I = \text{تابع شکل}^1$$

$$u_I = \text{بردار تغییر مکان گره‌ای}^2$$

$$H(x) = \text{تابع هویساید}^3$$

$$a_I = \text{بردار غنی سازی درجه آزادی گره‌ای}^4$$

$$\Phi_\alpha(x) = \text{تابع تقریبی نوک ترک}^5$$

با توجه به فرمول ۳ خواهیم داشت

$$H(x) = \begin{cases} +1 & \text{به ازای یک سمت ترک} \\ -1 & \text{به ازای سمت دیگر ترک} \end{cases} \quad (4-6)$$

$$[\Phi_\alpha(x), \alpha = 4 - 1] = \left[\sqrt{r} \sin \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \cos \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \sin \frac{\theta}{2} \sin \theta, \sqrt{r} \cos \frac{\theta}{2} \sin \theta \right] \quad (5-6)$$

به طور کلی برای مدل سازی ترک در نرم افزار آباکوس با استفاده از روش *XFEM* دو رویکرد کلی وجود دارد

۱- مدل سازی ترک ثابت^۶ به روش انتگرال گیری^۷ (رشد ترک قابل مدل سازی نیست)

۲- مدل سازی ترک متحرک^۸ که به دو روش زیر قابل انجام است

- مدل سازی رشد ترک به روش مدل ناحیه چسبنده (*CZM*)

- مدل سازی رشد ترک به روش مکانیک شکست الاستیک خطی (*LEFM*)

۱- Shape function

۲- Nodal displacement vector

۳ - Heaviside function

۴- Nodal enriched degree of freedom vector

۵- Asymptotic crack-tip functions

۶- Stationary crack

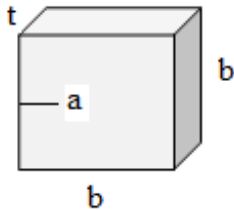
۷ - Contour integral

۸- Propagation crack

۴-۶- مدل سازی ورق آلومینیومی تحت مود ۱ باگذاری به روش XFEM-LEFM در آباکوس

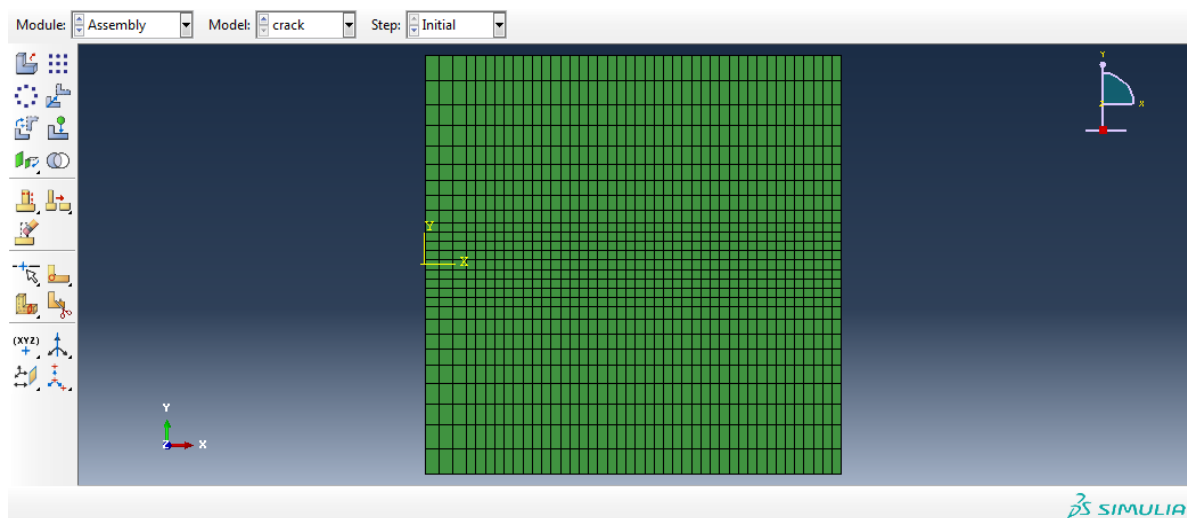
در این بخش از پژوهش به بررسی و مدل سازی رشد ترک در یک ورق آلومینیومی مستطیلی بر اساس داده های موجود در جدول ۱-۶ پرداخته شده است. به منظور بررسی صحت نتایج بدست آمده از مدل سازی، نتایج با نتایج موجود در راهنمای نرم افزار آباکوس مقایسه شده است.

جدول ۱-۶: مشخصات و داده های مورد استفاده در ورودی نرم افزار

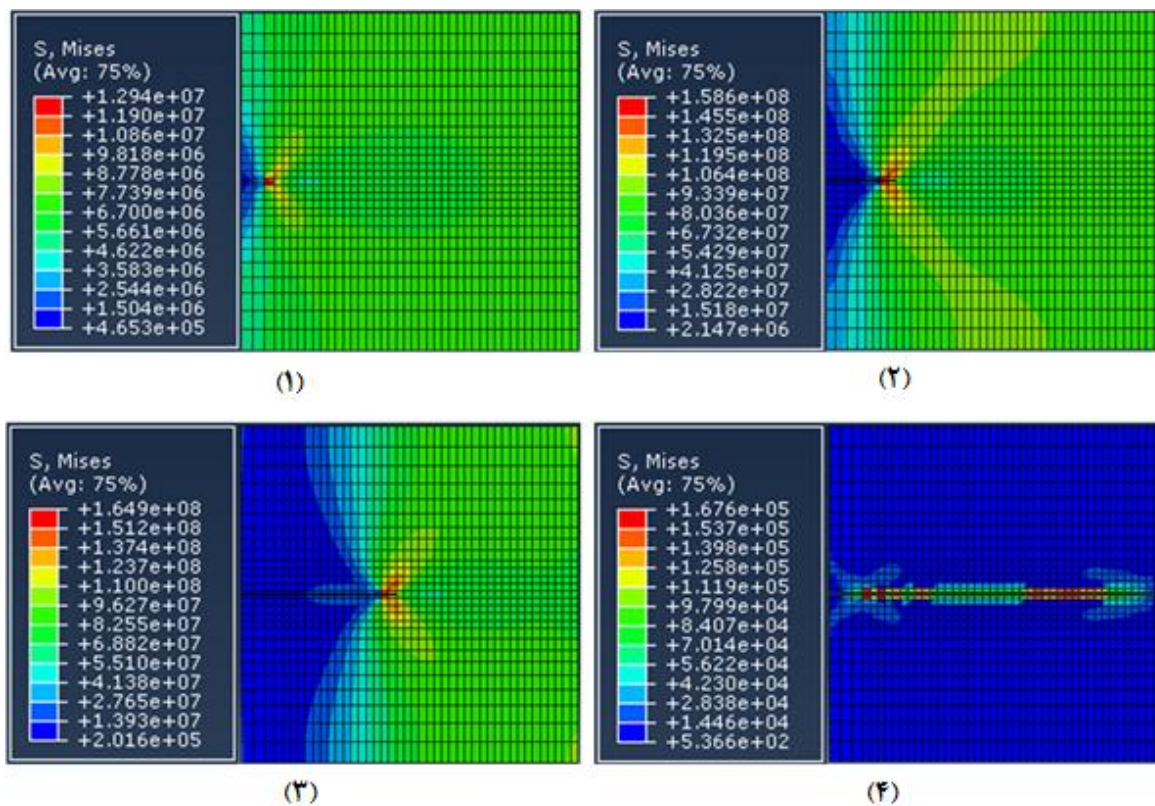
$E \text{ (MPa)}$	۲۱۰
ν	۰/۳
$G_{IC} \text{ (N/m)}$	۴۲۲۰۰
	$a = ۰/۳ M$
	$b = ۳ m$
	$t = ۱ m$

بارگذاری اعمال شده به نمونه به منظور مود ۱ شکست، عبارتست از یک تغییر مکان به میزان ۰/۰۰۱ متر که به طور همزمان به لبه بالایی و پایینی ورق مستطیلی و در جهت خلاف هم اعمال شده است. شکل ۲-۶ هندسه و نحوه مش بندی ورق آلومینیومی مدل شده در آباکوس را نشان می دهد. شکل ۳-۶ تمرکز تنش در نواحی اطراف نوک ترک و مراحل مختلف رشد ترک را نشان می دهد. همانطور که در شکل قابل مشاهده است، وجود ترک در صفحه آلومینیومی باعث تمرکز تنش در نواحی اطراف نوک ترک شده است. با رسیدن مقدار انتگرال جی (پارامتری که به منظور معیار رشد ترک در روش $VCCT^1$ بکار می رود) در نوک ترک به مقدار بحرانی آن، ترک شروع به رشد در صفحه آلومینیومی می کند.

^۱- Virtual crack closure technique



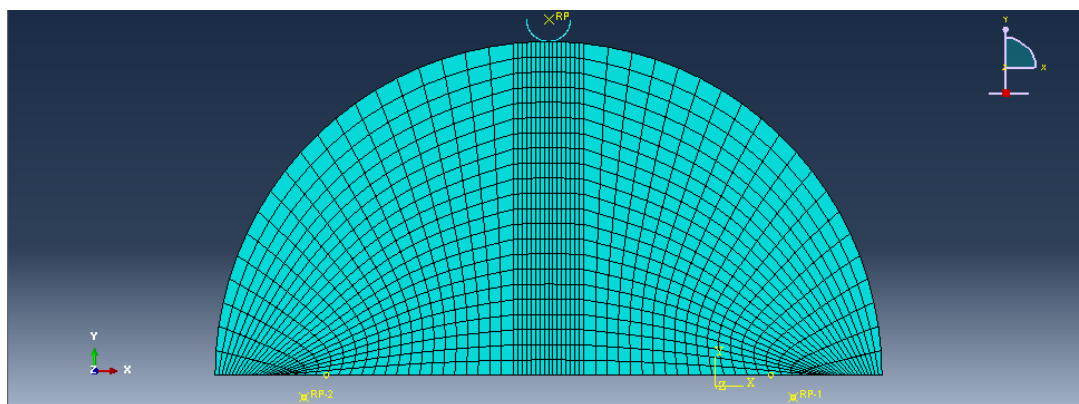
شکل ۶-۲: هندسه و مش‌بندی ورق آلومینیومی



شکل ۶-۳: توزیع تنش در نواحی اطراف ترک در طول مراحل مختلف رشد ترک

۵-۶- مدل سازی رشد ترک در نمونه SCB به روش XFEM-LEFM

به منظور درک و بررسی بهتر رفتار شکست آسفالت در دمای پایین، همچنین تعیین توزیع تنش در نمونه SCB، با در نظر گرفتن رفتار آسفالت به صورت یک ماده همگن و الاستیک، به مدل سازی رشد ترک با استفاده از روش XFEM پرداخته شده است. تمامی مشخصات مورد نیاز به منظور مدل سازی نمونه SCB شامل ابعاد و هندسه نمونه، نوع بارگذاری و نوع تکیه گاه ها طبق نمونه واقعی مورد آزمایش می باشد. در روش XFEM به منظور بررسی رشد ترک از روش VCCT استفاده شده است. بر اساس این روش که بر پایه فرضیات LEFM استوار است، رشد ترک در نمونه زمانی رخ می دهد که مقدار انتگرال جی در نوک ترک به میزان بحرانی آن (توسط کاربر و از طریق آزمایش تعیین می شود) برسد. مقدار بحرانی انتگرال جی مطابق کارهای انجام شده در فصل پنجم برای نمونه های آسفالت با عمر بهره برداری مختلف تعیین شد و مقدار آن (در این مدل سازی مقدار انتگرال جی برای نمونه های آسفالت با عمر بهره برداری دو سال به عنوان ورودی نرم افزار مورد استفاده قرار گرفت) به عنوان پارامتر ورودی در مدل سازی وارد شد. بر اساس نتایج بدست آمده توسط سایر محققین، به دلیل تاثیر ناچیز مقدار ضریب پواسون در نتایج مدل سازی مقدار آن برابر ۰/۳ در نظر گرفته شد. مدول الاستیسیته آسفالت از طریق آزمون و خطا و از طریق مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان بدست آمده از مدل سازی با نمودار نیرو-تغییر مکان حاصل از کار آزمایشگاهی تعیین شد. شکل ۴-۶ هندسه نمونه SCB و نحوه مش بندی آن را آباکوس نشان می دهد.



شکل ۴-۶: هندسه نمونه SCB و نحوه مش بندی آن در مدل سازی

المان مورد استفاده برای تحلیل نمونه *SCB* از نوع المان چهار گره‌ای پیوسته کرنش صفحه ای^۱ (*CPE4*) در نظر گرفته شد. مش‌بندی نمونه *SCB* با استفاده از تکنیک مش‌بندی سازه‌ای^۲ انجام شد. حلگر مورد استفاده در این مدل‌سازی از نوع استاتیکی عمومی^۳ در نظر گرفته شد. مدل‌سازی ترک در نمونه *SCB* مطابق زیر انجام گرفت

Interaction module → *special* → *crack* → *create* → *XFEM crack*

در مدل‌سازی ترک به روش *XFEM-LEFM* با استفاده از تئوری *VCCT*، معیار رشد ترک بر اساس مسیر زیر انجام می‌شود

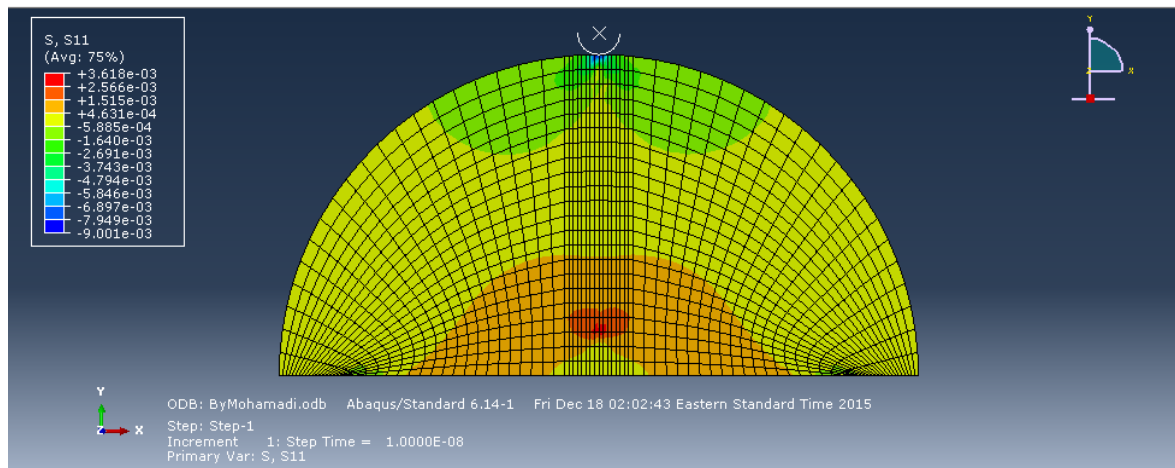
Interaction module → *create interaction property* → *contact* → *fracture criterion* → *VCCT*

شکل ۵-۶ تمرکز تنش در نواحی اطراف نوک ترک و مراحل رشد ترک در نمونه *SCB* را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، تمرکز تنش در نواحی اطراف نوک ترک به وضوح قابل مشاهده است. همانطور که انتظار می‌رفت رشد ترک در نمونه به صورت کاملاً متقارن در راستای ترک اولیه و به صورت قائم صورت گرفته است. با توجه به عوامل مختلف از جمله توزیع غیر متقارن سنگدانه‌ها، قرارگیری نوک ترک داخل قیر و یا سنگدانه و همچنین وجود فضای خالی در مخلوط آسفالت، رشد ترک در نمونه‌های واقعی به صورت کاملاً مستقیم نبوده و مسیر رشد ترک بسته به محل قرارگیری سنگدانه‌ها و فضای خالی موجود در مخلوط گاهی اوقات از مسیر مستقیم خود خارج می‌شود.

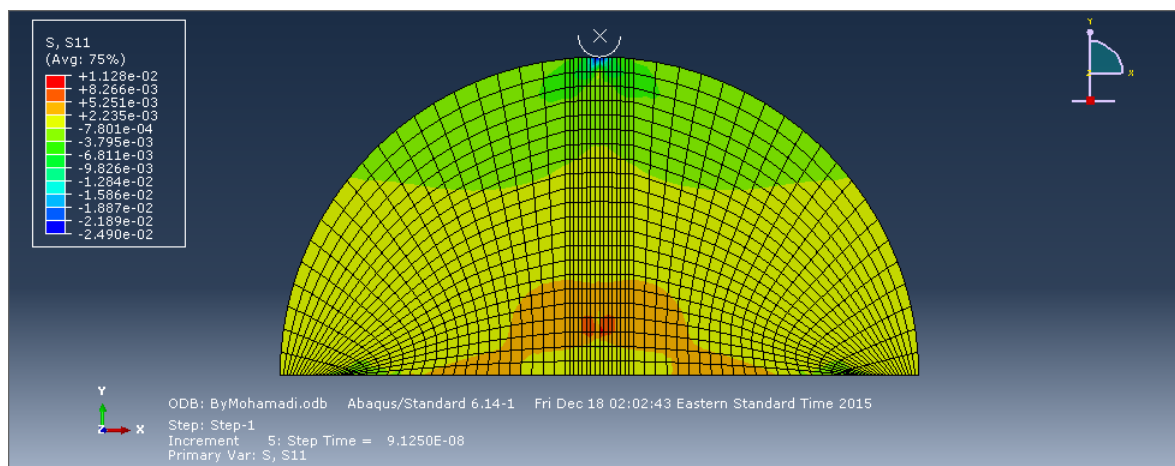
۱- 4 node continue plane strain element

۲- Structure

۳- Static general



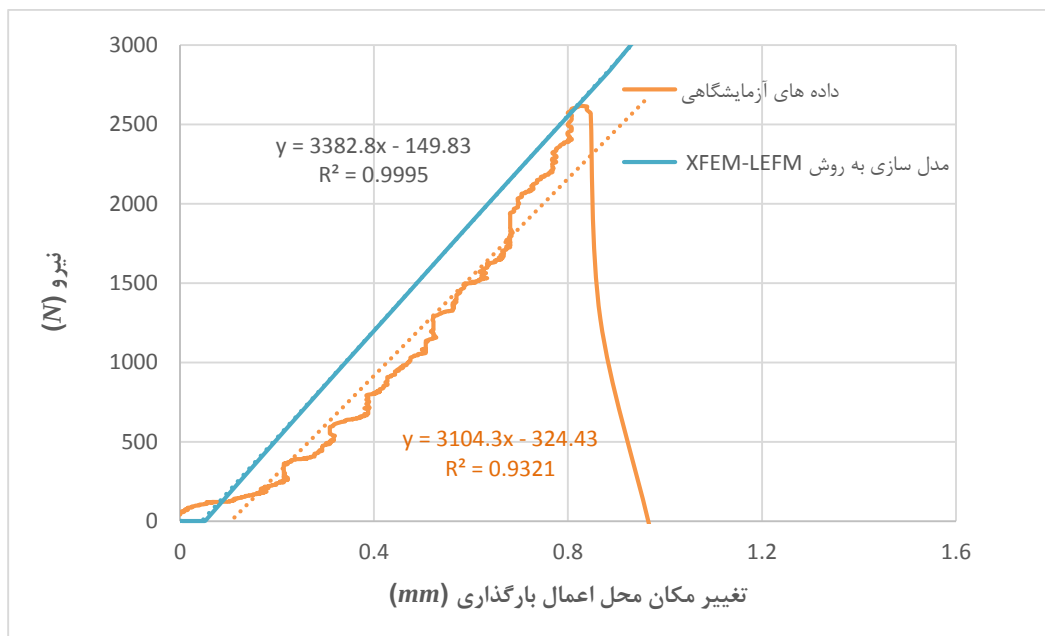
(۱)



(۲)

شکل ۵-۶: توزیع تنش در مراحل مختلف رشد ترک

به منظور کالیبره کردن مدل، مدول الاستیسیته آسفالت با آزمون و خطا و از طریق مقایسه نمودار بدست آمده از مدل سازی با نمودار حاصل از کار آزمایشگاهی تعیین شد. شکل ۶-۶ نمودار نیرو-تغییر مکان بدست آمده از نتایج کار آزمایشگاهی و نمودار حاصل از نتایج مدل سازی را نشان می دهد. بر اساس شکل ۶-۶، همانطور که ملاحظه می شود تطابق بسیار مناسبی بین نتایج بدست آمده از کار آزمایشگاهی و مدل سازی عددی وجود دارد. این لمر نشان می دهد از روش اجزاء محدود گسترش یافته می توان با دقت مناسبی برای مدل سازی رشد ترک استفاده کرد.



شکل ۶-۶: مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان بدست آمده از کار آزمایشگاهی و مدل سازی

فصل هفتم : نتیجه گیری و پیشنهادات

۷-۱- نتیجه‌گیری

ترک‌خوردگی دمای پایین یکی از شایع‌ترین علل خرابی در روسازی‌های آسفالتی است. عدم ترمیم به موقع روسازی ترک‌خورده می‌تواند باعث گسترش ترک و بوجود آمدن سایر خرابی‌ها در لایه آسفالت گردد. با توجه به این که روسازی مورد استفاده در اکثر راه‌های ایران روسازی آسفالتی است، از این‌رو تعیین دقیق علل و مکانیزم‌های ترک‌خوردگی و یافتن راه‌حلی برای افزایش مقاومت آسفالت در برابر ترک‌خوردگی ضروری است. در بخش اول این تحقیق سعی شده تا با استفاده از آزمون *SCB*، مقاومت ترک‌خوردگی نمونه‌های آسفالت را در دمای ۱۵- درجه سانتی‌گراد مورد ارزیابی قرار دهیم. همچنین تاثیر پیر شدگی و سرعت بارگذاری بر مقاومت ترک‌خوردگی آسفالت مورد بررسی قرار گرفت. تمامی نمونه‌های آسفالت مورد نیاز برای انجام آزمون *SCB* در این پژوهش از طریق مغزه‌گیری از روسازی اجرا شده در جاده شاهرود- میاندشت تهیه شده است. در بخش دوم این تحقیق به مدل‌سازی رشد ترک در نمونه *SCB* به روش اجزاء محدود گسترش یافته پرداخته شده است. جزئیات و خروجی‌های بدست آمده از هر دو بخش این پژوهش (کارهای آزمایشگاهی و عددی) در فصل‌های قبل به طور کامل ذکر شده است. نتایج حاصل از این پژوهش به اختصار به شرح زیر است.

۱- با افزایش عمر روسازی از دو سال به شش سال، مقدار بحرانی مود ۱ فاکتور شدت تنش به شکل محسوسی کاهش یافته است.

۲- مقدار بحرانی مود ۱ فاکتور شدت تنش در نمونه‌های آسفالت تازه به میزان ناچیزی از مقدار متناظر آن در نمونه‌های آسفالت با عمر بهره‌برداری دو ساله کمتر است.

۳- مقدار فاکتور شدت تنش به عوامل مختلف از جمله شکل ترک (تیز بودن نوک ترک) و محل قرارگیری نوک ترک (داخل سنگدانه و یا داخل قیر) بسیار وابسته است. از این رو نمی‌تواند به تنهایی به عنوان معیار مناسب برای مقایسه سختی شکست نمونه‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

۳- به‌طور کلی با افزایش طول ترک، انرژی شکست برای تمامی نمونه‌های آسفالت با عمر بهره‌برداری مختلف کاهش یافته است.

۴- با افزایش عمر روسازی از دو سال به شش سال، انرژی شکست نمونه‌ها کاهش یافته است.

۵- انرژی شکست نمونه‌های آسفالت تازه به ازای طول ترک‌های مختلف، کمتر از مقدار متناظر آن در نمونه‌های با عمر دو سال بود.

۶- با افزایش عمر روسازی از دو سال به شش سال مقدار بحرانی نرخ رهاسازی انرژی کرنشی (انتگرال جی) به شکل محسوسی کاهش یافته است.

۷- با افزایش سرعت بارگذاری، مقدار بحرانی مود ۱ فاکتور شدت تنش در نمونه‌های آسفالت با عمر بهره‌برداری دو سال به میزان کمی افزایش یافته است.

۸- با افزایش سرعت بارگذاری، انرژی شکست در نمونه‌های آسفالت با عمر بهره‌برداری دو سال کاهش یافته است.

۹- با افزایش سرعت بارگذاری، مقدار بحرانی نرخ رهاسازی انرژی کرنشی (انتگرال جی) کاهش یافته است.

۱۰- با افزایش سرعت بارگذاری، نیروی گسیختگی نمونه‌های آسفالت با عمر بهره‌برداری دو سال افزایش یافته است.

۱۱- با افزایش سرعت بارگذاری، تغییرمکان گسیختگی نمونه‌های آسفالت با عمر بهره‌برداری دو سال کاهش یافته است.

۱۲- از روش *XFEM-LEFM* به شکل موفقیت‌آمیزی می‌توان در مدل‌سازی ترک در آسفالت استفاده کرد.

۷-۲- پیشنهادات

- ۱- بررسی سایر عوامل تاثیر گذار بر مقاومت ترک خوردگی آسفالت از جمله میزان تراکم، نوع دانه بندی، نوع قیر، نوع فیلر و سنگدانه.
- ۲- در نظر گرفتن رفتار ویسکوالاستیک آسفالت.
- ۳- در نظر گرفتن رفتار غیر خطی آسفالت در مدل سازی اجزاء محدود.
- ۴- در نظر گرفتن آرایش سنگدانه‌ها در مدل سازی اجزاء محدود.

فصل هشتم : منابع

منابع فارسی

- آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه شماره ۱۰۱- تجدید نظر دوم)، دفتر امور فنی و تدوین معیارهای سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۹۲.
- خویی ا. ر.، برومند پ.، (۱۳۸۹)، "مدلسازی شکست شکل‌پذیر به کمک روش $XFEM$ با در نظر گرفتن اثر خرابی"، پنجمین گنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.
- طباطبایی ا. م.، (۱۳۸۹) "روسازی راه" جلد اول، چاپ هفدهم، مرکز نشر دانشگاهی، تهران، ص ۲۰۲.
- کاظمی م. ت.، فرقانی ع. و خویی ا. ر.، (۱۳۸۶)، "کاربرد روش اجزاء محدود بسط یافته در مدل سازی ترک چسبنده"، فصلنامه علمی و پژوهشی شریف، شماره ۳۷، ص ۵۷-۶۳.
- محمدعلیها م. ر.، رضایی فر م. ح. و فضائی ح.، (۱۳۹۴)، "بررسی آزمایشگاهی چقرمگی شکست بتن‌های آسفالتی تحت مودهای ترکیبی کششی-برشی"، مجله علمی-پژوهشی عمران مدرس، شماره ۱، دوره پانزدهم، تهران.

منابع لاتین

- AASHTO T 100-06 (2010), "Standard Method of Test for Specific Gravity of Soils". AASHTO Provisional Standards, American Association of State Highway and Transportation Officials, June 2013 Edition.
- AASHTO T 166-13, "Standard Method of Test for Bulk Specific Gravity (Gmb) of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) Using Saturated Surface-Dry Specimens". AASHTO Provisional Standards, American Association of State Highway and Transportation Officials, June 2013 Edition.
- AASHTO T 27-11, "Standard Method of Test for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates". AASHTO Provisional Standards, American Association of State Highway and Transportation Officials, June 2013 Edition.
- AASHTO T 84-13, "Standard Method of Test for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate". AASHTO Provisional Standards, American Association of State Highway and Transportation Officials, June 2013 Edition.

AASHTO T 85-13, "Standard Method of Test for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate". AASHTO Provisional Standards, American Association of State Highway and Transportation Officials, June 2013 Edition.

AASHTO T 88-13, "Standard Method of Test for Particle Size Analysis of Soils". AASHTO Provisional Standards, American Association of State Highway and Transportation Officials, June 2013 Edition.

AASHTO TP 105-13, "Standard Method of Test for Determining the Fracture Energy of Asphalt Mixtures Using the Semicircular Bend Geometry (SCB)". AASHTO Provisional Standards, American Association of State Highway and Transportation Officials, June 2013 Edition.

Anderson, T. L. (2005). *Fracture mechanics fundamentals and applications*. Taylor & Francis.

Arabani, M., & Ferdowsi, B. (2009). Evaluating the semi-circular bending test for HMA mixtures. *International Journal of Engineering*, 22(1):47-58.

ASTM D-1559, "Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus". AASHTO Provisional Standards, American Association of State Highway and Transportation Officials, June 2013 Edition.

Behbahani, H., MohammadAliha, M. R., Fazaeli, H., & Rezaifar, M. H. (2011). Effect of characteristic specifications on fracture toughness of asphalt concrete materials. In: *Proceedings of the 13th International Conference on fracture*, China, Beijing, 16-21.

Behnia, B., Buttlar, W. G., & Reis, H. (2014). Cooling cycle effects on low temperature cracking characteristics of asphalt concrete mixture. *Materials and Structures*, 47(8):1359-1371.

Biligiri, K. P., Said, S., & Hakim, H. (2012). Asphalt mixtures' crack propagation assessment using semi-circular bending tests. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 5(4):209-217.

Burke, Benjamin A., "Measurement of ultra-thin film fracture by nano-indentation: a numerical study" (2011). Graduate Theses and Dissertations. Paper 12241.

Chong, K. P., & Kuruppu, M. D. (1984). New specimen for fracture toughness determination for rock and other materials. *International Journal of Fracture*, 26:59-62.

EN 12697-26 Bituminous mixtures, Test methods for hot mix asphalt, Part 26: Stiffness, British Standards Institution, 2004

- Im, S., Ban, H., & Kim, Y. R. (2014). Mode-dependent fracture behavior of asphalt mixtures with semicircular bend test. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2447:23-31.
- Lancaster, I. M., & Khalid, H. (2011). Crack growth analysis of polymer modified asphalt using linear and non linear fracture mechanics. *Fifth International Conference on Bituminous Mixtures and Pavements*, (pp. 612-623). Thessaloniki.
- Lancaster, I. M., Khalid, H. A., & Kougioumtzoglou, I. A. (2013). Extended FEM modelling of crack propagation using the semi-circular bending test. *Construction and Building Materials*, 48:270-277.
- Lim, I. L., & Johnston, I. W. (1993). Stress intensity factors for semi-circular specimens under three-point bending. *Engineering Fracture Mechanics*, 44(3):363-382.
- Mahmoud, E., Saadeh, S., Hakimelahi, H., & Harvey, J. (2014). Extended finite-element modelling of asphalt mixtures fracture properties using the semi-circular bending test. *Road Materials and Pavement Design*, 15(1):153-166.
- Mohammad Aliha, M. R., Behbahani, H., Fazaeli, H., & Rezaifar, M. H. (2014). Study of characteristic specification on mixed mode fracture toughness of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 54:623-635.
- MohammadAliha, M. R., Fazaeli, H., Aghajani, S., & Moghadas Nejad, F. (2015). Effect of temperature and air void on mixed mode fracture toughness of modified asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 95:545-555.
- Mostafa A. Elseifi , Louay N. Mohammad , Hao Ying & Samuel Cooper III (2012). Modeling and evaluation of the cracking resistance of asphalt mixtures using the semi-circular bending test at intermediate temperatures. *Road Materials and Pavement Design*, 13:sup1, 124-139.
- Perez, N. (2004). *Fracture mechanics*. Kluwer academic publisher.
- Pirmohammad, S., & Ayatollahi, M. R. (2014). Fracture resistance of asphalt concrete under different loading modes and temperature conditions. *Construction and Building Materials*, 53:235-242.
- Pirmohammad, S., & Ayatollahi, M. R. (2015). Asphalt concrete resistance against fracture at low temperatures under different modes of loading. *Cold Regions Science and Technology*, 110:149-159.
- Pommier, S., Gravouil, A., Combescure, A., & Moes, N. (2011). *Extended finite element method for crack propagation*. John Wiley & Sons.

- Rice, J. R. A Path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and crack, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 35, 1968, pp.379–386.
- Tang, Sheng, "Evaluate the fracture and fatigue resistances of hot mix asphalt containing high percentage reclaimed asphalt pavement (RAP) materials at low and intermediate temperatures" (2014). Graduate Theses and Dissertations. Paper 13782.
- Van de Ven, M., Smit, A. d., & Krams, R. L. (1997). Possibilities of a semi-circular bending test. *Eighth International Conference on Asphalt Pavements*. Seattle, Washington, 2:939-950
- Wang, H., Zhang, C., Yang, L., & You, Z. (2013). Study on the rubber-modified asphalt mixtures' cracking propagation using the extended finite element method. *Construction and Building Materials*, 47:223-230.
- Wu, Z., Louay, M. N., Wang, L. B., & Mull, M. A. (2005). Fracture resistance characterization of superpave mixtures using the semi-circular bending test. *Journal of ASTM International*, 2(3):129-143.

پیوست ۱

نتایج آزمایشگاه مکانیک خاک

حائز مقام ملی

اولی کیفیت سازدها



وزارت راه و ترابری
معاونت فنی و مهندسی راهی
سازمان سبزی

طرح اختلاط آسفالت

معاونت فنی و مهندسی راهی

معاونت فنی و مهندسی راهی

تاریخ آزمایش: مرداد ۱۳۸۸



طرح اختلاط آسفالت قشر بیند ر محور شاهرود-میاندشت

ردیف	توضیحات
۱	مقدمه
۱	۱- مشخصات مصالح سنگی
۱	۱-۱- دانه بندی مصالح سنگی
۷	۱-۲- آزمایشهای بررسی مرغوبیت مصالح سنگی
۸	۲- آزمایشهای قشر
۱۰	۳- مشخصات مخلوط مصالح سنگی
۱۰	۳-۱- تعیین نسبتهای اختلاط و تهیه مخلوط مصالح سنگی
۱۲	۳-۲- تعیین وزن مخصوص مخلوط مصالح سنگی
۱۳	۴- مشخصات مخلوط آسفالتی
۱۵	۵- تعیین میزان قشر نهشته



مقدمه

گزارش حاضر بر اساس درخواست شماره ۲۴۷۲۵/۷۶/۱ مورخ ۸۸/۳/۲ مجری طرح بهسازی تهران مشید و طی آزمایشات اولیه فرمول کارگاهی ارائه شده توسط پیمانکار با فرمول بدست آمده توسط آزمایشگاه مطابقت نداشت که در مورخ ۸۸/۵/۵ فرمول کارگاهی جدید اعلام گردید که شرح حاضر بر مبنای فرمول ارائه شده می باشد در خصوص ارائه طرح اختلاط آسفالت قشر بیشتر و با استفاده از مصالح آرسالی شن ۱۹-۲۵ میلیمتر، شن ۱۲-۱۹ میلیمتر، شن ۶-۱۲ میلیمتر، ماسه ۰-۶ میلیمتر، و فیبر مصالح سنگی و فیبر ۶۰-۷۰ تهیه گردیده است.

۱- مشخصات مصالح سنگی

مشخصات مصالح سنگی آرسالی طبق اظهار نظر مقامی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات مصالح سنگی

شماره آزمایشگاهی نمونه	مشخصات مصالح سنگی
۸۸۲۴	شن ۱۹-۲۵ میلیمتر
۸۸۲۵	شن ۱۲/۵-۱۹ میلیمتر
۸۸۲۶	شن ۶-۱۲/۵ میلیمتر
۸۸۲۷	ماسه ۰-۶ میلیمتر
۸۸۲۸	فیبر

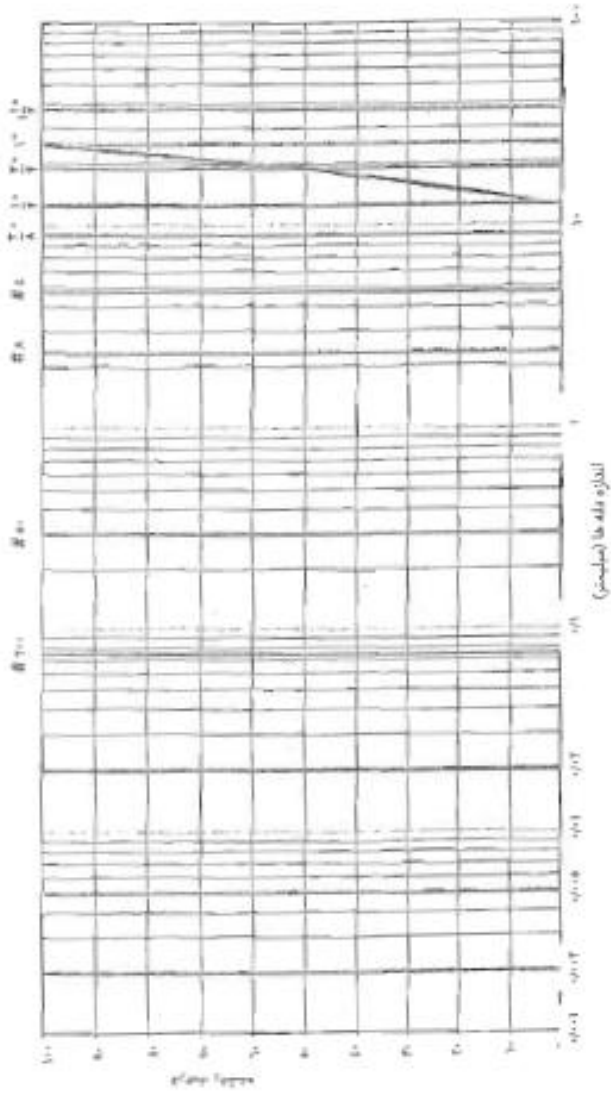
۱-۱- دانه بندی مصالح سنگی

آزمایش دانه بندی مصالح سنگی بر اساس استاندارد AASHTO-T۲۷ و همچنین با روش شستشو برای مصالح سنگی ریزدانه انجام پذیرفته علاوه بر این بر روی نمونه فیبر آرسالی، آزمایش دانه بندی و هیدرومتری به روش AASHTO-T۸۸ انجام شد. نتایج حاصل از دانه بندی مصالح سنگی در شکل های ۱ تا ۵ ترسیم گردیده است.



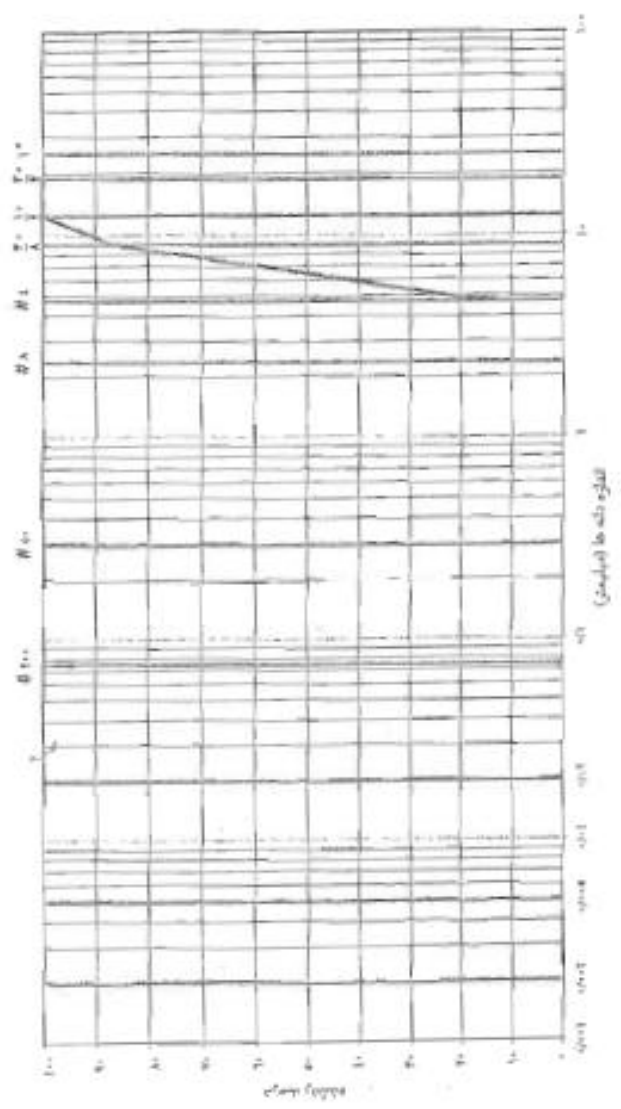


Flugtvejledning til brug for de tekniske og luftmekaniske laboratorier
 Teknisk og Luft Mekonisk Lab. A/S



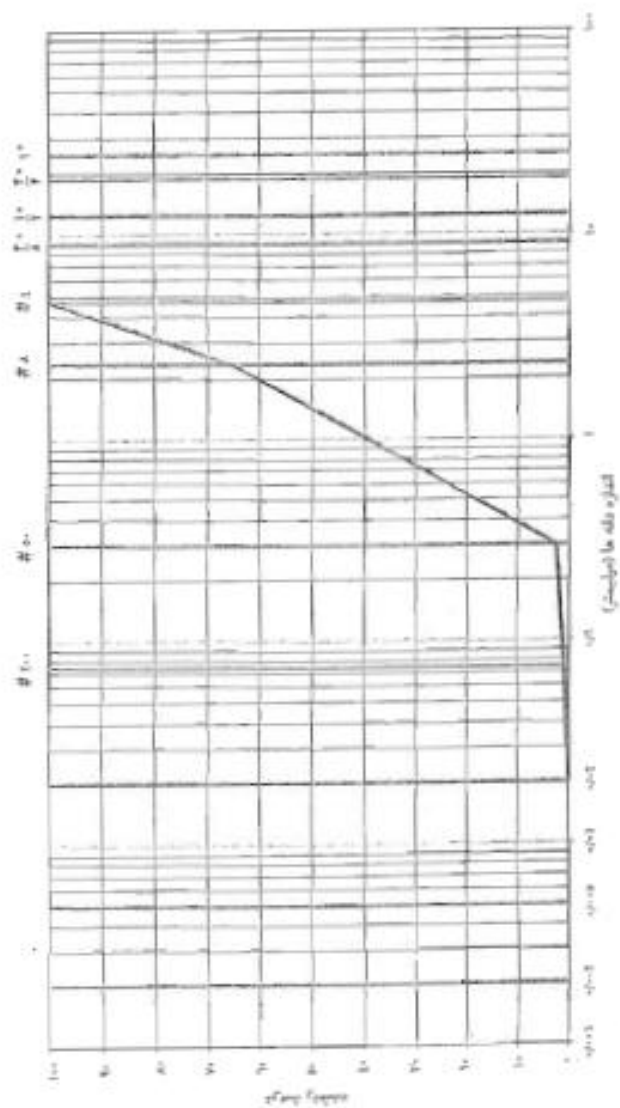
Skema 1 - Flugtvejledning til brug for de tekniske og luftmekaniske laboratorier

عنوان مقاله: تحلیل و طراحی سیستم‌های انتقال بار در ساختمان‌های فولاد-بتن
 شماره مجله: ۱، شماره ۲۰، سال ۲۰۰۸



شکل ۳- نمودار بار-جابجایی برای سیستم ۲-۱۲ میلیمتر به شماره ۸۸۲۶

شماره پانزدهم، فصل دوم، شماره یک

$$-1 \dots -1 \dots -1 : \int_0^T \sigma_j \, ds$$


شکل ۴- نمودار دانه بندی ماسه ۴-۶ میلیمتر به شماره ۸۸۲۷



المصادر:

نتایج آزمایش های زیر خلاصه

$P = 1.4 \times 10^{-10}$

مطابق معادله (۱۰) و (۱۱) می توان نوشت:

[illegible]



۲-۱- آزمایشهای بررسی مرغوبیت مصالح سنگی

آزمایش‌های تعیین حدود اتربرگ (AASHTO-T99, T100)، تعیین ارزش ماسه‌ای (AASHTO-T100)، تعیین شاخص تطویل و توری (BS-812)، تعیین درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لوس آنجلس (AASHTO-T96)، تعیین افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (AASHTO-T104)، تعیین درصد شکستگی در یک جبهه و دو جبهه (ASTM-D5821) و تعیین درصد انفوذ قیر به مصالح سنگی (AASHTO-T182)، بر روی مصالح سنگی ارسالی انجام پذیرفت که نتایج در جدول ۲ درج گردیده است.

جدول ۲- نتایج آزمایشهای مرغوبیت مصالح سنگی

نتایج آزمایش			مشخصه	
قبشر مصالح	مقیاسه ۰-۶ میلیمتر	مخلوط درشت‌دانه		
-	۹۲	-	ارزش ماسه‌ای (AASHTO-T99)	
-	-	B	توع دانه‌بندی	درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لوس آنجلس (AASHTO-T96)
-	-	۵۰۰	تعداد دور	
-	-	۲۲	درصد سایش	
N.P	N.P	-	نامنه خمیری (PI)	حدود اتربرگ (AASHTO-T99, T100)
-	-	-	حد خمیری (PL)	
شیر قابل تعیین	شیر قابل تعیین	-	حد روانی (LL)	
-	-	-	در یک جبهه	درصد شکستگی مصالح سنگی روی الک شماره ۴ (ASTM-D5821)
-	-	۸۸	در دو جبهه	
-	-	۹۵	بیش از	درصد انفوذ قیر به مصالح سنگی (AASHTO-T182)
-	-	۱۱	تطویل	درصد تطویل و توری (BS-812)
-	-	۷	تورق	
-	۰/۲۲	-	ریزدانه	درصد افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (AASHTO-T104)
-	-	-/۶۱	درشت دانه	



۲- آزمایشهای قیر

آزمایشهای رایج قیر بر روی نمونه قیر خالص ۶۰-۷۰ ارسالی (طبق اظهار نظر متقاضی) به شماره آزمایشگاهی ۸۸۲۹ انجام پذیرفت که نتایج آن در جدول ۳ درج گردیده است.

طبق بند ۱۴-۱-۳ نشریه شماره ۱۰۱ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور با عنوان مشخصات قی عمومی راه، مشخصات قی قیرهای خالص مورد استفاده در راهسازی که بر اساس درجه نفوذ تقسیم‌بندی شده‌اند، باقی با مشخصات استاندارد جدول شماره ۱-۱۴ این دستورالعمل مطابقت داشته باشد. نتایج حاصل از آزمایش‌های صورت گرفته بر روی قیر خالص ارسالی با مشخصات استاندارد مذکور در این جدول مطابقت دارد. در بند ۲۰-۲-۲ این نشریه تأکید گردیده در حین اجرای عملیات آسفالتی در کارگاه نیز کارگاه دستگاه نظارت تشخیص دهد، باید از قیرهای مخازن کارگاه نمونه‌برداری شده و مجدداً مورد آزمایش قرار گیرد.

همچنین طبق مندرجات بند ۹-۱۱ نشریه شماره ۲۲۴ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور با عنوان آشن‌نامه رومیزی آسفالتی راه‌های ایران و استاندارد ASTM-D۱۵۵۹، نمای تراکم و اختلاط مخلوط‌های آسفالتی با توجه به کنترولی قیر تعیین می‌گردد. بدین منظور کنترولی قیر خالص ارسالی در سه دمای متفاوت ۱۲۰، ۱۲۵ و ۱۶۰ درجه سانتیگراد تعیین شد و با رسم منحنی تغییرات کنترولی قیر بر حسب دما (شکل ۴) محدوده دمای تراکم و اختلاط مخلوط آسفالتی مشخص شده و نمونه‌های مخلوط آسفالتی جهت انجام آزمایشهای طرح اختلاط، در آن دماها مخلوط و متراکم گردید.





۳- مشخصات مخلوط مصالح سنگی

۳-۱- تعیین نسبتهای اختلاط و تهیه مخلوط مصالح سنگی لایه پهن درشتدانه

با توجه به نتایج حاصل از دانه‌بندی مصالح سنگی و به منظور دستیابی به فرمول کارگاهی پیشنهادی پیمانکار، نسبتهای اختلاط مصالح سنگی ارسالی مقاضی به شرح جدول ۴ تعیین گردید:

جدول ۴- نسبتهای اختلاط مصالح سنگی مخلوط آسفالتی

مشخصات مصالح سنگی ارسالی طبق اظهار نظر مقاضی	شماره آزمایشگاهی نمونه	درصد اختلاط مصالح سنگی
شن ۲۵-۱۹ میلیمتر	۸۸۲۴	۹
شن ۱۹-۱۲ میلیمتر	۸۸۲۵	۲۳
شن ۱۲-۶ میلیمتر	۸۸۲۶	۳۱
شن ۶-۰ میلیمتر	۸۸۲۷	۳۷
فیلر	۸۸۲۸	۱۰

با احتساب نسبتهای اختلاط مذکور در جدول ۴، درصد وزنی رد شده مخلوط مصالح سنگی از الکهای مورد نظر فرمول کارگاهی پیشنهادی پیمانکار، به شرح جدول ۵ بدست آمده است:

جدول ۵- دانه‌بندی مخلوط مصالح سنگی در مقایسه با فرمول کارگاهی پیشنهادی و حدود مشخصات

انمازه الک	حدود مشخصات دانه‌بندی II جدول ۱۰-۱ ویرایش اول نشریه ۱۰۱ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور	فرمول کارگاهی پیشنهادی پیمانکار (استفاده شده در طرح)	درصد وزنی رد شده حاصل از اختلاط با نسبتهای فوق
۱ اینچ	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۳/۴ اینچ	۹۰-۱۰۰	۹۵	۹۵
۳/۸ اینچ	۸۰-۵۶	۶۶	۶۴
شماره ۴	۳۵-۶۵	۵۱	۵۱
شماره ۸	۲۳-۴۹	۲۴	۲۴
شماره ۵۰	۵-۱۹	۹	۹
شماره ۲۰۰	۲-۸	۰.۶	۰.۶

نمونه‌ها بر اساس فرمول کارگاهی پیشنهادی پیمانکار، با استفاده از مخلوط مصالح سنگی تهیه و ساخته شد.

* ردیف سوم بصورت دستی ساخته شد

منحنی مخلوط مصالح سنگی به کار رفته در طرح، با توجه به محدوده دانه‌بندی شماره II جدول ۱۰-۱ نشریه شماره ۱۰۱ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی، تر شکل ۶ ترسیم شده است.



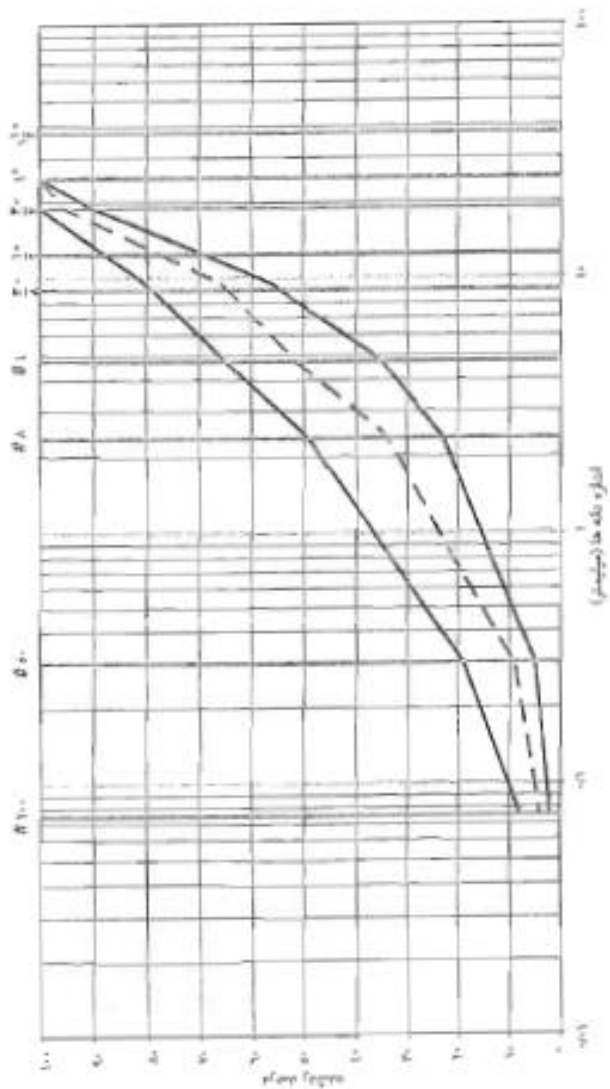
۳-۲- وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی

آزمایش‌های تعیین وزن مخصوص حقیقی، وزن مخصوص ظاهری و درصد جذب آب مخلوط مصالح سنگی مانده روی الک ۸، بر اساس استاندارد AASHTO-T85 و مصالح رد شده از الک شماره ۸ و مانده روی الک شماره ۲۰۰، بر اساس استاندارد AASHTO-T84 انجام پذیرفت. وزن مخصوص مصالح رد شده از الک شماره ۲۰۰ نیز بر اساس استاندارد AASHTO-T1۰۰ تعیین گردید. نتایج حاصل از این آزمایشها به ضمیمه مقدار وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی در جدول ۶ درج گردیده است.

جدول ۶- وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی

درصد جذب آب	وزن مخصوص		مشخصه
	حقیقی	ظاهری	
۱/۱	۲/۷۶۰	۲/۸۹۵	مصالح سنگی مانده روی الک شماره ۸
۱/۵	۲/۷۴۰	۲/۸۵۷	مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۸ و مانده روی الک شماره ۲۰۰
-	۲/۷۹۰		مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۲۰۰
	۲/۷۵۶		وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی: Gtb

فهرست منابع و مآخذ : ۱- طرح اختلاط آسفالت به نام شرکت پیمان
شماره ۲۰۴ : ۳۰۰ + ۱۰۰۰



شکل ۷- نمودار دانه بندی مخلوط مصالح سنگی مطابق استاندارد ۸۴۰۰ دانه نام آورده شده





۵- تعیین میزان قیر بهینه

مقدار درصد قیر بهینه مخلوط آسفالتی لایه پهن در درشت‌خانه با توجه به منحنی‌های شکل ۸، بر اساس مندرجات بند ۲۰-۷-۲ نشریه شماره ۱۰۱ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور و پیشنهادات نشریه MS-۲ استیتو آسفالت با توجه به درصد قیر نظیر فضای خالی ۴/۰ درصد برابر ۴/۰ درصد نسبت به وزن مخلوط آسفالتی بدست می‌آید. شایان ذکر است که سایر پارامترهای مخلوط آسفالتی به ازای این درصد قیر کنترل گردیده و در محدوده مجاز مشخصات می‌باشد. بدیهی است هرگونه تغییر در جنس و دانه‌بندی مصالح سنگی و نسبتهای اختلاط کنترل و تعیین مجدد پارامترهای مخلوط آسفالتی از جمله درصد قیر بهینه را الزامی می‌نماید.



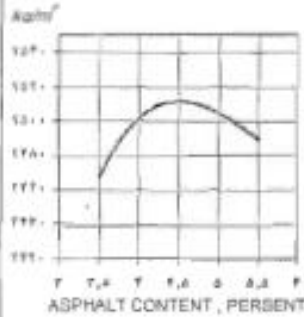


شرکت ملی استاندارد ملی و معیارات خداداد وزارت راه و ترابری

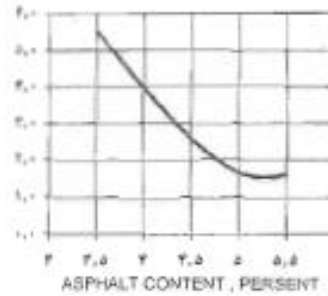
نوع کشتی: بندر
نوع قیر: ۷۰-۶۰
اعداد سرعت: ۷۵

شماره کار: ۱۰۰۱۰۰۰۳

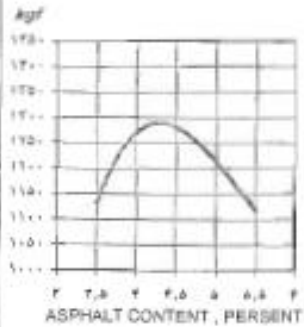
طرح گسالت بندر شاهرود - سیاهکل



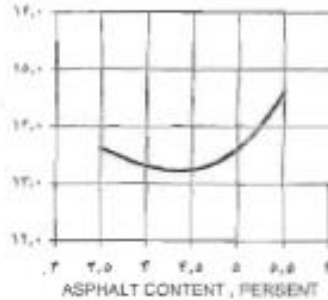
UNIT
WEIGHT



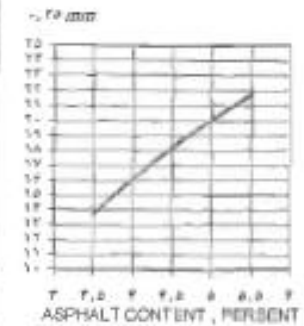
% AIR
VOID



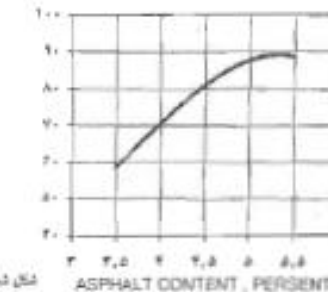
STABILITY



% VMA



FLOW



% VFA



وزارت راه و ترابری
شرکت مادر تخصصی آزمایشگاه ملی و سازه های خف
استان مینان

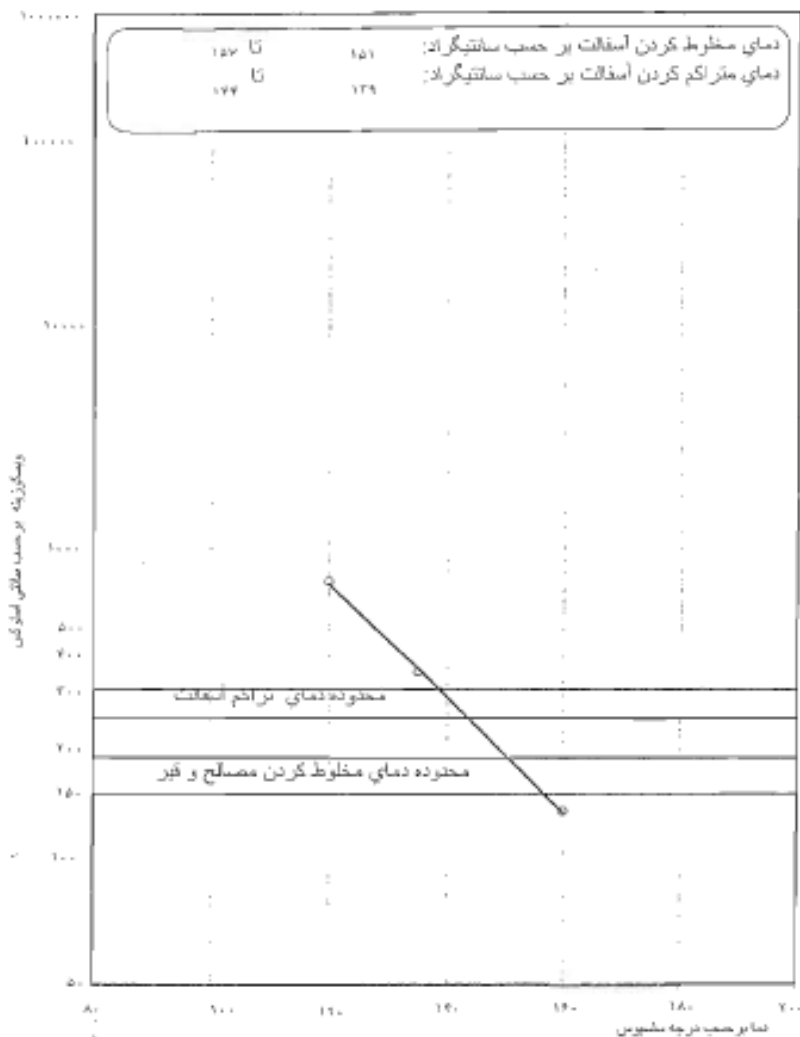
تعیین دمای مخلوط کردن و تراکم نمودن آسفالت

شماره کار: ۱۰۰۱۰۰۰۴

پروژه: طرح آسفالت شرکت نام اوران

شماره نمونه: ۸۸۲۹

مشخصات نمونه آسفالت: ۶۰-۷۰



Abstract

Cracking of hot mix asphalt (HMA) pavements at low temperature condition is one of the most common HMA pavements' distresses that leads to the reduction of ride quality and the long-term durability of pavement. The traffic loading and weather cycles causes tensile stresses at the bottom of asphalt layer and the repetition of these factors lead to the initiation and propagation of cracks at the asphalt pavement. Thus, it is important and necessary to have the precise and accurate knowledge of the behavior of binder and asphalt mix at low temperature, and determining the causes and mechanisms of its cracking. Due to the viscoelastic nature of asphalt, various factors including temperature and loading time will have a significant impact on the asphalt behavior. In this study, in order to examine the asphalt cracking resistance at -15°C , under mode I loading, semi-circular bending test (SCB) has been used. Fracture parameters including stress intensity factor, fracture energy and the critical value of strain energy release rate were determined for asphalt samples. In the first section of this study, to evaluate the effects of asphalt aging on its cracking resistance, three asphalt samples with same conditions (in terms of mix design, traffic loading volume and weather conditions), and with three different service life of zero, two and six years were prepared through pavement coring. In the second section of laboratory work and in order to examine the effect of loading speed on fracture parameters of semi-circular asphalt samples with the service life of two years, the semi-circular bending test with two different speeds was conducted (5 and 50mm/min). Evaluating the diagrams obtained from tests showed that asphalt behavior at -15°C is quite linear. According to test results, by increasing the pavement life, breaking deformation and fracture energy of samples significantly reduced. By increasing the pavement life, the critical value of strain energy release rate (which is called J integral) reduced. Based on test results, by increasing loading speed, failure force of samples increased and fracture energy and breaking deformation reduced. Finally extended finite element modelling of crack propagation using linear elastic fracture mechanic approach was done according to the experimental test results.

Keywords: Extended finite element method, Fracture parameters, Low temperature asphalt cracking, Semi-circular bending test.



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

**Evaluating the fracture resistance of core based asphalt samples using
semi-circular bending test**

Hadi Saeidi

Supervisor:

Dr. Iman Aghyan

January 2016