



دانشکده‌ی فنی و مهندسی

گروه آموزشی مکانیک

پایان‌نامه برای دریافت درجه‌ی کارشناسی ارشد  
در رشته‌ی مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

### عنوان:

**بررسی تاثیر نوسانات دما بر روی رفتار شکست بتن آسفالتی نیمه گرم تقویت شده با الیاف طبیعی تحت بارگذاری مود I/II با استفاده از یک نمونه جدید آزمایشگاهی**

استاد راهنما:

دکتر سجاد پیرمحمد

پژوهشگر:

محمد حجتی منقاری

زمستان ۱۳۹۶

نام خانوادگی دانشجو: حجتی منقارپی	نام: محمد
عنوان پایان نامه: بررسی تاثیر نوسانات دما بر روی رفتار شکست بتن آسفالتی نیمه گرم تقویت شده با الیاف طبیعی تحت بارگذاری مود I/II با استفاده از یک نمونه جدید آزمایشگاهی	
استاد راهنما: دکتر سجاد پیرمحمد	
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد	رشته: مهندسی مکانیک
گرایش: طراحی کاربردی	دانشگاه: محقق اردبیلی
دانشکده: فنی و مهندسی	تاریخ دفاع: ۹۶/۱۱/۹
	تعداد صفحات: ۹۰
چکیده:	
<p>در این پژوهش پس از مطالعه منابع موجود و مروری بر تحقیقات انجام شده قبلی، به بررسی تاثیر الیافهای طبیعی کف و بازالت و نقش نوسانات دمایی بر روی رفتار شکست بتنهای آسفالتی نیمه گرم پرداخته شده است. به این صورت که ابتدا تحلیل‌های اجزاء محدود بر روی قطعه دیسک شکل ترکدار انجام گرفت و نمونه آزمایشگاهی با طرح جدید جهت انجام آزمایش‌های شکست معرفی گردید. پس از طراحی نمونه جدید آزمایشگاهی و ساختن آنها که از جنس بتن‌های آسفالتی نیمه گرم ساده و تقویت شده با الیاف طبیعی کف و بازالت می‌باشد، با استفاده از دستگاه برش ترک بر روی نمونه‌ها ایجاد گردید. در ادامه نمونه‌های تهیه شده در دستگاه فریزر تحت تاثیر نوسانات دمایی با دامنه مشخص متناسب با شرایط محیطی قرار داده شد و نهایتاً آزمایش‌های شکست با استفاده از دستگاه تست یونیورسال تحت بارگذاری کششی- برشی انجام گرفت. به منظور ارزیابی نتایج آزمایشگاهی، کارهای عددی با استفاده از نرم افزار اجزای محدود جهت محاسبه ضرایب شکل نمونه آزمایشگاهی طراحی شده انجام پذیرفت. نتایج نشان داد هر دو تقویت کننده کف و بازالت مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. با این حال، مخلوط آسفالتی نیمه گرم تقویت شده با الیاف بازالت مقاومت شکست بالاتری را نسبت به مخلوط آسفالتی نیمه گرم اصلاح شده با الیاف کف در اکثر مودهای بارگذاری از خود نشان داد. همچنین نتایج نشان داد که شرایط بحرانی بتن‌های آسفالتی تحت بارگذاری مود I خالص نبوده بلکه تحت مود ترکیبی I/II اتفاق می‌افتد.</p>	
کلید واژه‌ها: الیاف طبیعی کف و بازالت، بتن آسفالتی نیمه گرم (WMA)، شکست ترد، مقاومت شکست، مود ترکیبی I/II، نمونه جدید آزمایشگاهی	

## فهرست مطالب

شماره و عنوان	صفحه
---------------	------

### فصل اول: کلیات پژوهش

۱-۱- مقدمه.....	۲
۱-۲-۱- مکانیک شکست.....	۴
۱-۲-۱-۱- تئوری مکانیک شکست الاستیک خطی.....	۴
۱-۲-۱-۲- انواع مدهای بارگذاری در اجسام ترک‌دار.....	۵
۱-۲-۱-۲-۱- مود I بارگذاری یا مود باز شونده.....	۵
۱-۲-۱-۲-۲- مود II بارگذاری یا مود باز شونده.....	۵
۱-۲-۱-۲-۳- مود III بارگذاری یا مود باز شونده.....	۵
۱-۲-۳- محاسبه ضرایب شدت تنش.....	۶
۱-۲-۴- تنش‌های الاستیک اطراف نوک ترک.....	۶
۱-۳- پیشینه‌ی پژوهش.....	۸
۱-۴- بیان هدف و چارچوب پایان‌نامه.....	۱۵

### فصل دوم: تحلیل المان محدود و انتخاب نمونه هندسی مناسب

۱-۲- مقدمه.....	۱۷
۱-۲-۲- قطعه جدید آزمایشگاهی ترک‌دار برای مطالعه شکست مود ترکیبی I و II.....	۱۷
۱-۲-۲-۱- مدل‌سازی اجزا محدود نمونه پیشنهادی.....	۱۹
۱-۲-۲-۲- نتایج عددی و بحث بر روی نتایج.....	۲۰
۱-۲-۳- صحت‌سنجی نمونه پیشنهادی.....	۲۷
۱-۳-۲- آزمایشات چقرمگی شکست مود I و II.....	۲۷
۱-۳-۲-۲- بحث و نتیجه‌گیری.....	۳۰

۳۵..... GMTS معیار شکست ۱-۲-۳-۲

۳۶..... GMTS برای نمونه دیسکی مطالعه مود ترکیبی شکست معیار ۲-۲-۳-۲

### فصل سوم: مواد و روش پژوهش

۴۴..... ۱-۳-۱ مقدمه

۴۴..... ۲-۳-۲ خصوصیات مصالح مصرفی

۴۴..... ۱-۲-۳-۱ مصالح سنگی

۴۵..... ۲-۲-۳-۲ فیلر

۴۵..... ۳-۲-۳-۳ قیر

۴۵..... ۴-۲-۳-۴ ساسویت

۴۶..... ۵-۲-۳-۵ الیاف طبیعی (معدنی) بازالت

۴۶..... ۱-۵-۲-۳ مقدمه

۴۸..... ۲-۵-۲-۳ الیاف معدنی بازالت و خصوصیات آن

۵۰..... ۳-۵-۲-۳ فرآیند تولید الیاف بازالت

۵۱..... ۴-۵-۲-۳ ظرفیت ایران

۵۱..... ۵-۵-۲-۳ سرمایه‌گذاری مورد نیاز

۵۲..... ۶-۲-۳-۶ الیاف طبیعی (گیاهی) کنف

۵۲..... ۱-۶-۲-۳ مقدمه

۵۳..... ۲-۶-۲-۳ الیاف گیاهی کنف و خصوصیات آن

۵۵..... ۳-۳-۳ تهیه نمونه‌ها

۵۵..... ۱-۳-۳ مقدمه

۵۵..... ۲-۳-۳ دانه‌بندی مصالح سنگی

۵۶..... ۳-۳-۳ شرایط مخلوط کردن قیر با ماده افزودنی ساسویت و مقدار آن

۵۷..... ۴-۳-۳ شرایط ساخت و تراکم مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم شاهد

۵۸..... ۵-۳-۳ شرایط ساخت و تراکم مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم تقویت شده با الیاف گیاهی کنف و الیاف معدنی بازالت

۶۰..... ۶-۳-۳ تعیین درصد قیر بهینه

- ۶۲.....۳-۳-۷- تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی ترک‌دار از بتن آسفالتی.....
- ۶۳.....۳-۴- آزمایش چقرمگی شکست.....
- ۶۵.....۳-۴-۱- شرایط دمایی تست‌های آزمایشگاهی.....
- ۶۷.....۳-۴-۲- نحوه‌ی انجام تست‌های آزمایشگاهی.....

### فصل چهارم: نتایج و بحث بر روی نتایج

- ۷۰.....۴-۱- مقدمه.....
- ۷۰.....۴-۲- نتایج آزمایش‌های تجربی بر روی نمونه‌های دیسکی.....
- ۷۴.....۴-۲-۱- اثر دمای نوسانی بر روی چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی.....
- ۷۵.....۴-۲-۱- اثر نوع افزودنی‌ها و درصد آن‌ها بر روی چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی.....
- ۷۷.....۴-۲-۳- اثر مودهای بارگذاری بر روی چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی.....

### فصل پنجم: نتیجه‌گیری

- ۸۴.....۵-۱- نتایج حاصل از تحقیق حاضر.....
- ۸۵.....۵-۲- پیشنهادات برای کارهای آتی.....
- ۸۶..... فهرست منابع و مآخذ.....

## فهرست جدول‌ها

شماره و عنوان جدول	صفحه
جدول ۱ - ۱: خواص الیاف طبیعی گوناگون.....	۱۵.....
جدول ۱ - ۲: هندسه و خواص مواد داده شده برای مدل‌سازی عددی نمونه.....	۱۹.....
جدول ۲ - ۲: مقادیر $L$ برای ایجاد مود $II$ خالص در نمونه دیسکی با ابعاد $R$ و $B$ مختلف و نسبت‌های مختلف $S/R$ و $a/t$ .....	۲۱.....
جدول ۲ - ۳: ابعاد نمونه‌های تهیه شده و محل قرارگیری تکیه‌گاه.....	۲۷.....
جدول ۲ - ۴: نتایج آزمایشگاهی (از جمله بارهای شکست و ضرایب شدت تنش بحرانی مود $I$ و $II$ ) برای $PMMA$ و سنگ‌های دیسکی آزمایش شده تحت مودهای ترکیبی مختلف.....	۲۸.....
جدول ۲ - ۵: مقایسه چقرمگی شکست مود یک ( $KIC$ ) مواد مورد آزمایش با استفاده از نمونه دیسکی و دیگر نمونه‌های آزمایش شده.....	۳۰.....
جدول ۱ - ۳: خواص فیزیکی مصالح سنگ آهک.....	۴۴.....
جدول ۲ - ۳: خواص فیزیکی قیر پایه.....	۴۵.....
جدول ۳ - ۳: مشخصات ساسوییت استفاده شده در این بررسی.....	۴۶.....
جدول ۳ - ۴: مشخصات الیاف بازالت استفاده شده در این بررسی.....	۵۰.....
جدول ۳ - ۵: مشخصات الیاف کف استفاده شده در این بررسی.....	۵۴.....
جدول ۳ - ۶: درجه‌بندی مصالح.....	۵۵.....
جدول ۱ - ۴: مقادیر بار بحرانی بدست آمده از آزمایش‌های شکست نمونه‌های آسفالتی در سه درصد مختلف الیاف و دو نوع الیاف گوناگون برحسب کیلو نیوتن.....	۷۲.....
جدول ۲ - ۴: متوسط بار بحرانی بدست آمده از آزمایش‌های شکست نمونه‌های آسفالتی در سه درصد مختلف الیاف و دو نوع الیاف گوناگون و $SIF$ بحرانی محاسبه شده.....	۷۳.....

## فهرست شکل‌ها

شماره و عنوان شکل	صفحه
شکل ۱ - ۱: خرابی‌های رایج روسازی‌های آسفالت، (الف) شیارشدگی (ب) عریان شدگی (ج) ترک خوردگی.....	۳
شکل ۱ - ۲: رفتار خطی مصالح آسفالتی در شرایط دمایی پایین.....	۴
شکل ۱ - ۳: انواع مودهای بارگذاری، (الف) مود III بارگذاری (ب) مود II بارگذاری (ج) مود I بارگذاری.....	۵
شکل ۱ - ۴: تنش‌های الاستیک یک المان سه بعدی در اطراف نوک ترک.....	۷
شکل ۱ - ۵: نمایش آسفالت ترک‌دار تحت بار ترافیکی.....	۱۰
شکل ۱ - ۶: نمونه‌های استفاده شده برای بارگذاری نامتقارن سه نقطه‌ای توسط پیرمحمد و آیت‌اللهی (۲۰۱۴).....	۱۱
شکل ۱ - ۷: نمونه SENB بعد از شکست مود I و مود ترکیبی (ب) نمونه SCB بعد از شکست مود I و مود ترکیبی.....	۱۲
شکل ۱ - ۸: الیاف استفاده شده در پژوهش لواسانی و همکاران (۲۰۱۵).....	۱۳
شکل ۱ - ۹: الیاف شیشه و (ب) ساسویت مورد استفاده در پژوهش فخری و حسینی (۲۰۱۷).....	۱۴
شکل ۲ - ۱: (الف) دیسک برزیلی با شکاف مستقیم (ب) نیم دیسک با ترک مستقیم تحت خمش سه نقطه‌ای (ج) ورق مربعی ترک‌دار با ترک مرکزی مایل تحت بارگذاری نقطه‌ای در راستای قطر (د) صفحه مثلثی با ترک لبه‌ای تحت بارگذاری خمش سه نقطه‌ای.....	۱۸
شکل ۲ - ۲: نمونه دیسکی با ترک لبه‌ای تحت بارگذاری خمش سه نقطه‌ای.....	۱۹
شکل ۲ - ۳: (الف) مش‌بندی نمونه دیسکی مورد مطالعه (ب) مش‌بندی اطراف نوک ترک.....	۲۰
شکل ۲ - ۴: تغییرات ضریب شدت تنش در طول جبهه‌ی ترک نمونه دیسکی برای حالت $a/B = 0.4$ و $S/R=0.8$	
(a) for $L=0$ (pure mode I- $Me=1$ ), (b) and (c) for $L=0.029, L=0.036$ (mixed mode- $Me=0.79, 0.35$ ) and (d) for $L=0.038$ (pure mode II- $Me=0$ ).....	۲۲
شکل ۲ - ۵: تغییرات $Y_I, Y_{II}$ با $L$ در نمونه دیسکی برای مقدار ثابت $a/t$ و برای مقادیر مختلف $S/R$ .....	۲۴
شکل ۲ - ۶: تغییرات $Y_I, Y_{II}$ با $L$ در نمونه برای مقدار ثابت $S/R$ و برای مقادیر مختلف $a/B$ .....	۲۶
شکل ۲ - ۷: نمودار میله‌ای میانگین مقدار چقرمگی شکست پلگسی گلس.....	۲۹

- شکل ۲ - ۸: نمودار میله‌ای میانگین مقدار چقرمگی شکست سنگ مرمریت..... ۲۹
- شکل ۲ - ۹: نتایج آزمایشات چقرمگی شکست مود ترکیبی بدست آمده از پلگسی گلس در نمونه دیسکی..... ۳۲
- شکل ۲ - ۱۰: نتایج آزمایشات چقرمگی شکست مود ترکیبی بدست آمده از سنگ مرمریت در نمونه دیسکی..... ۳۲
- شکل ۲ - ۱۱: مسیر شکست نمونه‌های پلگسی زیر موده‌های مختلف، الف) مود  $I$  خالص (ب) مود  $I$  غالب
- (ج) مود  $II$  غالب (د) مود  $II$  خالص..... ۳۳
- شکل ۲ - ۱۲: مسیر شکست نمونه‌های سنگی زیر موده‌های مختلف، الف) مود  $I$  خالص (ب) مود  $I$  غالب
- (ج) مود  $II$  غالب (د) مود  $II$  خالص..... ۳۴
- شکل ۲ - ۱۳: تغییرات  $T^*$  با  $L$  در نمونه برای مقدار ثابت  $S/R$  و برای سه مقدار مختلف  $a/B$ ..... ۳۷
- شکل ۲ - ۱۴: منحنی شکست  $GMTS$  بدست آمده برای نمونه دیسکی پلگسی گلس در شعاع‌های بحرانی
- متفاوت..... ۳۹
- شکل ۲ - ۱۵: منحنی شکست  $GMTS$  بدست آمده برای نمونه دیسکی سنگ مرمریت در شعاع‌های بحرانی
- متفاوت..... ۳۹
- شکل ۳ - ۱: ساسوبیت استفاده شده در این پژوهش..... ۴۶
- شکل ۳ - ۲: نمونه‌ای از معدن بازالت، ایران-بیرجند..... ۴۸
- شکل ۳ - ۳: سنگ بازالت..... ۴۸
- شکل ۳ - ۴: الیاف معدنی کوتاه شده بازالت با طول ۸ میلی‌متر..... ۵۱
- شکل ۳ - ۵: نمونه‌ای از مزرعه کنف..... ۵۳
- شکل ۳ - ۶: نمونه‌ای از دسته الیاف کنف..... ۵۳
- شکل ۳ - ۷: الیاف گیاهی کوتاه شده کنف با طول ۸ میلی‌متر..... ۵۴
- شکل ۳ - ۸: الف) دستگاه شیکر (ب) شست‌وشو مصالح پس از الک با دستگاه شیکر..... ۵۶
- شکل ۳ - ۹: دانه‌بندی مصالح..... ۵۶
- شکل ۳ - ۱۰: الف) دستگاه همزن (ب) تراکم مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم شاهد..... ۵۷
- شکل ۳ - ۱۱: الف) افزودن قیر اصلاح شده به مصالح سنگی (ب) فرایند اختلاط قیر با مصالح با همزن دور
- پایین..... ۵۸
- شکل ۳ - ۱۲: الف) روغن کاری قالب مارشال (ب) دستگاه تراکم چکش مارشال (ج) فرایند تراکم..... ۵۸



- شکل ۳ - ۱۳: الف) دستگاه همزن دور پایین (ب) فرایند اختلاط الیاف با مصالح و قیر..... ۵۹
- شکل ۳ - ۱۴: اختلاط یکنواخت و مناسب الیاف با مصالح و قیر..... ۵۹
- شکل ۳ - ۱۵: نمونه‌های مارشال ساخته شده..... ۶۰
- شکل ۳ - ۱۶: نمودارهای تعیین درصد قیر بهینه..... ۶۱
- شکل ۳ - ۱۷: الف) دستگاه برش (ب) فیکسچر نگهدارنده..... ۶۲
- شکل ۳ - ۱۸: فرایند برش نمونه‌های مارشال..... ۶۲
- شکل ۳ - ۱۹: نمونه‌های دیسکی پس از برش با دستگاه برش..... ۶۳
- شکل ۳ - ۲۰: دستگاه ایجاد ترک..... ۶۴
- شکل ۳ - ۲۱: نمونه‌های دیسکی ترک‌دار..... ۶۴
- شکل ۳ - ۲۲: پروفایل دمایی نوسانی استفاده شده در این پژوهش..... ۶۶
- شکل ۳ - ۲۳: دستگاه فریزر..... ۶۷
- شکل ۳ - ۲۴: الف) دستگاه *Universal* (ب) فیکسچر خمش سه نقطه‌ای برای اعمال بار..... ۶۸
- شکل ۳ - ۲۵: نمونه‌ای از آزمایش‌های شکست انجام شده و مسیرهای رشد ترک بر روی مخلوط‌های آسفالتی مختلف در ۴ حالت بارگذاری در نظر گرفته شده در این آزمایش، الف) مود I خالص (ب) مود I غالب (ج) مود II غالب (د) مود II خالص..... ۶۹
- شکل ۳ - ۲۶: نمونه‌ای از منحنی بار-جابجایی..... ۷۰
- شکل ۴ - ۱: نمودار ستونی چقرمگی شکست بحرانی مود I خالص شکست برای سه مخلوط آسفالتی مختلف تحت شرایط دمایی نوسانی..... ۷۵
- شکل ۴ - ۲: نمودار ستونی چقرمگی شکست بحرانی مود ترکیبی I و II ( $Me=0.79$ ) برای سه مخلوط آسفالتی مختلف تحت شرایط دمایی نوسانی..... ۷۶
- شکل ۴ - ۳: نمودار ستونی چقرمگی شکست بحرانی مود ترکیبی I و II ( $Me=0.35$ ) برای سه مخلوط آسفالتی مختلف تحت شرایط دمایی نوسانی..... ۷۶
- شکل ۴ - ۴: نمودار ستونی چقرمگی شکست بحرانی مود II خالص شکست برای سه مخلوط آسفالتی مختلف تحت شرایط دمایی نوسانی..... ۷۶
- شکل ۴ - ۵: تغییرات چقرمگی شکست مخلوط آسفالتی اصلاح نشده..... ۷۸

- شکل ۴ - ۶: تغییرات چقرمگی شکست بتن‌های آسفالتی تقویت شده با فیبر کنف در سه درصد مختلف.....۷۸
- شکل ۴ - ۷: تغییرات چقرمگی شکست بتن‌های آسفالتی تقویت شده با فیبر بازالت در سه درصد مختلف.....۷۹
- شکل ۴ - ۸: مقایسه تغییرات چقرمگی شکست بتن‌های آسفالتی حاوی ۰/۱ درصد فیبر کنف و بازالت با مخلوط کنترل.....۷۹
- شکل ۴ - ۹: مقایسه تغییرات چقرمگی شکست بتن‌های آسفالتی حاوی ۰/۳ درصد فیبر کنف و بازالت با مخلوط کنترل.....۸۰
- شکل ۴ - ۱۰: مقایسه تغییرات چقرمگی شکست بتن‌های آسفالتی حاوی ۰/۵ درصد فیبر کنف و بازالت با مخلوط کنترل.....۸۰
- شکل ۴ - ۱۱: مسیر شکست نمونه‌های آسفالتی، الف) مود I خالص (ب) مود I غالب (ج) مود II غالب (د) مود II خالص.....۸۱

## فهرست علائم اختصاری

Nomenclature	
$a$	Crack depth
$a/t$	Crack depth to thickness ratio
$t$	Disc thickness
$E$	Elastic modulus
$k_I$	Mode I stress intensity factor
$k_{II}$	Mode II stress intensity factor
$k_{III}$	Mode III stress intensity factor
$k_{Im}$	Mode I stress intensity factor at the mid-section of specimen
$P$	Applied load
$R$	Disc radius
$2S$	Distance between the bottom supports in the specimen
SIF	Stress Intensity Factor
$S/R$	Loading span to radius ratio
$T$	T-stress
$T^*$	Non-dimensional $T$ -stress
$Y_I$	Mode I geometry factor
$Y_{II}$	Mode II geometry factor
$Y_{III}$	Mode III geometry factor
$Z$	Parameter showing the location of crack front relative to the mid-section
$Z/R$	Normalized $Z$

# فصل اول: کلیات پژوهش

حفظ محیط زیست و استفاده مؤثر از انرژی، کشورهای توسعه یافته را به استفاده از تکنولوژی‌های جدید برای کاهش آلودگی ترغیب کرده است. یکی از مهمترین اقدامات برای حل این مسئله، کاهش دمای اختلاط و تراکم مخلوط‌های آسفالتی بدون کاهش قابل توجه در عملکرد مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد (Fakhri & Hosseini, 2017).

فناوری آسفالت نیمه گرم (WMA) با کاهش ویسکوزیته‌ی آسفالت امکان کاهش دمای اختلاط و تراکم ۱۰-۳۸ درجه‌ی سانتیگراد در مقایسه با مخلوط آسفالتی گرم فراهم می‌کند (Zhao et al, 2013). مکانیزم‌های تولید آسفالت گرم عبارتند از ایجاد کف، افزودنی‌های شیمیایی و افزودنی ارگانیک می‌باشد. به طور کلی روش‌های ایجاد کف، بر اساس افزایش حجم قیر و کاهش ویسکوزیته هستند. بخار آب با قیر مخلوط می‌شود و به وسیله کف قیری حاصل، ویسکوزیته قیر کاهش یافته و ساخت آسفالت در دمای پایین‌تر امکان‌پذیر می‌شود. مدل سازی کف قیر در آزمایشگاه‌ها مشکل است زیرا فاکتور زمان در ساخت این نوع آسفالت نقش تعیین کننده‌ای دارد و نیازمند تجهیزات مختلف آزمایشگاهی است. ولی تولید آسفالت گرم با افزودنی ارگانیک نظیر ساسوبیت در شرایط معمول امکان‌پذیر است (Kristjansdottir, 2006).

از طرفی، رفتار ویسکوالاستیک قیر موجب شده است مخلوط‌های آسفالتی خرابی‌های مختلفی را در شرایط آب و هوایی مختلف تجربه کنند، در دماهای بالا قیر رفتاری ویسکوز از خود نشان می‌دهد که در نتیجه باعث خرابی‌هایی نظیر قیرزدگی، شیارشدگی و تغییر شکل دائمی بتن آسفالتی می‌گردد. در دماهای پایین نیز مخلوط آسفالتی رفتاری ترد از خود بروز می‌دهد، که در نتیجه‌ی این رفتار الاستیک قیر، در مخلوط آسفالتی می‌تواند منجر به ترک‌های دمایی و شتاب دادن به رشد ترک‌های خستگی زیر بار ترافیکی شود. بنابراین استفاده از افزودنی‌هایی نظیر الیاف مصنوعی یا طبیعی برای پیشرفت رفتار ویسکوالاستیک مخلوط‌های آسفالتی به عنوان راه حلی مناسب پیشنهاد می‌شود (Polacco et al, 2015; Jasso et al, 2015; Rodriguez-Alloza, 2014; Fazaeli, 2012). در شکل (۱-۱) خرابی‌های رایج و عمده روسازی‌های آسفالتی را می‌توان مشاهده کرد.

الیاف‌ها برای بهبود خواص مخلوط آسفالتی در بسیاری از کشورها در سال‌های گذشته مورد استفاده قرار گرفته است (Tapkin et al, 2009; Chen et al, 2008). در این میان در سال‌های اخیر استفاده از الیاف‌های طبیعی به خاطر در دسترس بودن، پایین بودن قیمت، چگالی پایین، داشتن مقاومت مناسب و سازگاری با محیط زیست، به عنوان جایگزینی مناسب برای الیاف‌های مصنوعی مطرح شده است (Ramalingam et al, 2017; Lavasani et al, 2015).

در مناطق آب و هوایی سرد ترک‌های دمای پایین به عنوان یکی از مودهای اصلی تخریب در روسازی آسفالت می‌باشد، به دلیل اینکه ترمیم آسفالت ترک خورده یا انجام یک لایه بتن آسفالتی جدید، هزینه‌بر و زمان‌بر می‌باشد، معرفی مکانیزم شکست به منظور کم کردن توسعه ترک در طول روسازی آسفالت امری ضروری می‌باشد. ایجاد و گسترش ترک در روسازی آسفالتی معمولاً به واسطه عوامل مکانیکی (نظیر بار چرخ وسایل نقلیه) و یا محیطی (نظیر سیکل‌های دمایی سرمایش و گرمایش حاصل از تغییرات فصل) ایجاد می‌گردد. در واقع می‌توان این پدیده را ناشی از ضعف مخلوط آسفالتی در برابر تنش‌های عمدتاً کششی و برشی ایجاد شده توسط این دو عامل دانست. این پدیده و قوانین مربوط به آن‌ها، جهت بررسی عمر روسازی و مسیرهای رشد ترک، در شناخت بهتر رفتار مخلوط‌های آسفالتی تاثیرگذار خواهد بود.

مخلوط‌های آسفالتی در دماهای پایین همانند مواد شکننده عمل می‌کنند، مکانیزم شکست الاستیک خطی ( $LEFM$ ) یک روش معتبر برای معرفی رفتار شکست مواد ترد می‌باشد. در روش  $LEFM$  ضریب شدت تنش ( $K$ )، به عنوان یک پارامتر اساسی برای توصیف پدیده شکست در نوک ترک می‌باشد (Li & Marasteanu, 2004).



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱-۱: خرابی‌های رایج روسازی‌های آسفالت، (الف) شیارشدگی (ب) عریان شدگی (ج) ترک خوردگی

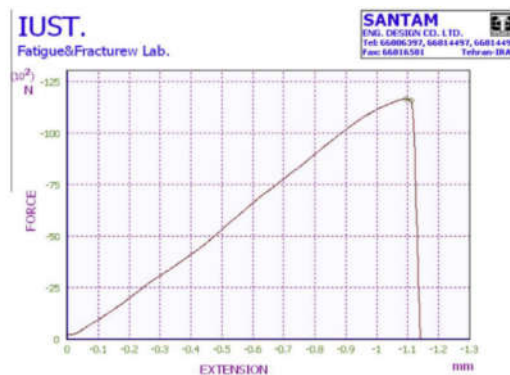
## ۲-۱- مکانیک شکست

بی تردید، یکی از شاخه‌های مهم علوم مهندسی مکانیک شکست می‌باشد. این شاخه از علم مکانیک به طراحان کمک می‌کند تا بتوانند طول عمر و همچنین زمان کارکرد یک قطعه ترکدار را تعیین نمایند. در واقع مکانیک شکست علم تحلیل رفتار قطعات ترکدار می‌باشد و مقاومت قطعات ترکدار را بررسی می‌کند. در برخی سازه‌ها، شکست قطعه در باری کمتر از بار بحرانی قطعه اتفاق می‌افتد که پس از تحقیق و بررسی مشخص شد که عامل ایجاد شکست در قطعه وجود ترک و نواقصی از این دسته می‌باشد و همین امر باعث شد تا طراحان در طراحی قطعات وجود ترک‌ها را در نظر بگیرند. ترک یک تمرکز تنش بسیار شدید در قطعه ایجاد کرده و باعث شکست قطعه در باری کمتر از بار پیش‌بینی شده می‌شود. دو معیار اصلی در مکانیک شکست وجود دارد، یکی بر پایه ضرایب شدت تنش و دیگری بر پایه‌ی مفهوم انرژی است، که در ادامه به توضیح معیار اول پرداخته می‌شود.

### ۱-۲-۱- تئوری مکانیک شکست الاستیک خطی

بسیاری از محققین فرض کردن آسفالت در هنگام انتشار ترک دارای رفتار شکننده می‌باشد از این رو به منظور بررسی رفتار گسترش ترک از تئوری مکانیک شکست الاستیک خطی استفاده کردند. در مصالح شکننده اندازه ناحیه شکست (ناحیه‌ای که در آن ترک‌های مویی ایجاد می‌شود) بسیار کوچک می‌باشد. در این تئوری به منظور بررسی رفتار گسترش ترک از فاکتور ضریب شدت تنش استفاده می‌شود.

تحقیقات بسیاری از محققین نیز نشان می‌دهد که رفتار آسفالت در دمای پایین بصورت خطی می‌باشد. نمودار بار-جابجایی ارائه شده توسط لی و همکارانش بیانگر رفتار شکست خطی مصالح آسفالتی در دمای پایین می‌باشد. همچنین تحقیقات کیم و همکارانش نشان می‌دهد که رفتار آسفالت در برابر ماکزیمم بار وارده در دمای بسیار پایین بصورت خطی بوده، لذا کاربرد تئوری مکانیک شکست الاستیک خطی در این شرایط دمایی بسیار مناسب می‌باشد (Akbulut & Aslantas, 2004; Li & Marasteanu, 2010; Kim et al, 2009). به عنوان مثال نمودار بار-تغییر مکان بار برای نمونه آزمایشگاهی SCB تحت بارگذاری مود کششی در شرایط دما ۱۰- درجه‌ی سانتی‌گراد در شکل (۲-۱) بیانگر رفتار خطی مصالح آسفالتی در این شرایط دمایی می‌باشد (Ameri et al, 2012).



شکل ۲-۱: رفتار خطی مصالح آسفالتی در شرایط دمایی پایین

در نتیجه در دماهای بسیار پایین به دلیل کوچک بودن ناحیه شکست در اطراف نوک ترک و رفتار شکننده مخلوط‌های آسفالتی استفاده از تئوری مکانیک شکست الاستیک خطی در بررسی رفتار گسترش ترک مناسب می‌باشد.

## ۲-۲-۱- انواع مودهای بارگذاری در اجسام ترک‌دار

### ۱-۲-۲-۱- مود I بارگذاری یا مود باز شونده

اگر قطعه ترک‌دار به گونه‌ای تحت بارگذاری قرار گیرد که سطوح تحت کشش عمود بر صفحه ترک قرار گیرند که نتیجه آن باز شدن دهانه ترک می‌باشد، مود I بارگذاری اتفاق می‌افتد.

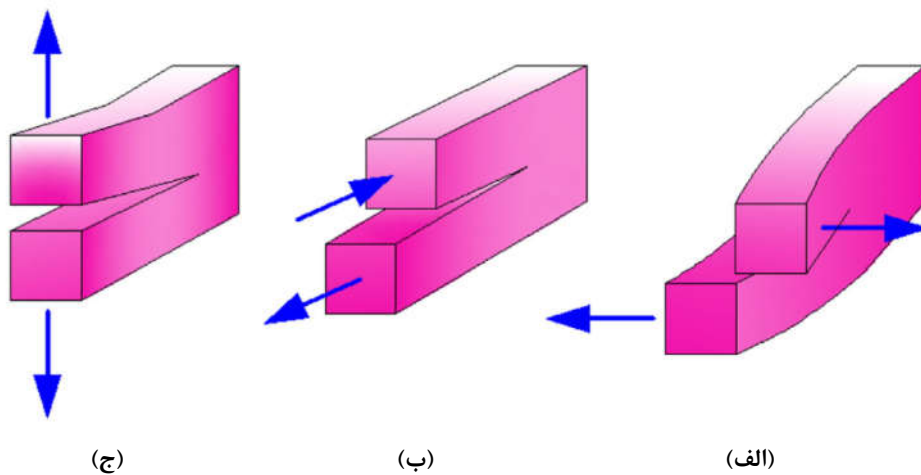
### ۲-۲-۲-۱- مود II بارگذاری یا مود باز شونده

در مود II بارگذاری، لغزش وجوه ترک در راستای موازی با صفحه وجوه ترک اتفاق می‌افتد.

### ۳-۲-۲-۱- مود III بارگذاری یا مود باز شونده

در مود III بارگذاری، لغزش وجوه ترک در راستای موازی با صفحه ترک و خارج از صفحه وجوه ترک اتفاق می‌افتد.

مود شکست چگونگی رشد ترک، طرز و شکل جدا شدن و از هم گسیختگی هندسی عضو می‌باشد. اگر بارگذاری به صورت ترکیبی از ۲ یا ۳ حالت بارگذاری باشد، بارگذاری مرکب نامیده می‌شود. در شکل (۳-۱) انواع مختلف بارگذاری ارائه شده است.



شکل ۳-۱: انواع مودهای بارگذاری، (الف) مود III بارگذاری (ب) مود II بارگذاری (ج) مود I بارگذاری



### ۱-۲-۳- محاسبه ضرایب شدت تنش

ضریب شدت تنش یکی از پارامترهای مهم مکانیک شکست است. در معیار بر پایه ضریب شدت تنش فرض می‌شود که رشد ترک زمانی رخ می‌دهد که ضریب شدت تنش به مقدار بحرانی خود برسد. به عبارتی در مصالح آسفالتی همیشه مقداری تخلخل وجود دارد و لذا هنگام برخورد با فضای خالی، ترک با سرعتی بیشتر از حالت قبل پیش می‌رود، این پیشروی پایدار همچنان ادامه پیدا می‌کند تا اینکه ترک به طول بحرانی خود برسد. در این هنگام ترک به طور ناگهانی پیشروی کرده و موجب گسیختگی کامل لایه می‌شود. عوامل موثر در سرعت پیشروی ترک عبارتند از بزرگی تنش، تغییر شکل ایجاد شده و اندازه ترک‌های موجود در مصالح که میزان تمرکز تنش را در رأس ترک کنترل می‌کنند. معیار پیش‌بینی شروع و ایجاد ترک در بدنه روکش آسفالتی، ضریب شدت تنش ( $K$ ) می‌باشد که شدت تنش‌ها را در مجاورت نوک تیز در یک ماده الاستیک خطی مشخص می‌کند.

برای محاسبه ضریب شدت تنش روش‌های تحلیلی، آزمایشگاهی و عددی وجود دارد. روش‌های تحلیلی فقط محدود به هندسه و بارگذاری‌های ساده بوده و اگر کمی این شرایط پیچیده‌تر باشند، بدست آوردن ضرایب شدت تنش تحلیلی کار ساده‌ای نخواهد بود. در سال‌های قبل نیز روش آزمایشگاهی برای محاسبه ضرایب شدت تنش در یک روسازی آسفالتی ترک خورده بکار گرفته شده است. اما این روش نیز نیازمند امکانات آزمایشگاهی و نیز وقت و هزینه بسیار می‌باشد.

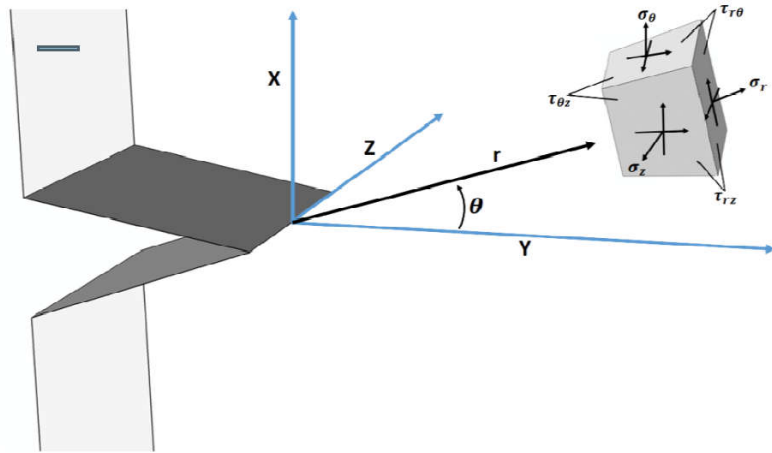
در سال‌های اخیر تکنیک‌های اجزای محدود برای بدست آوردن پارامترهای شکست به طور قابل توجهی بکار گرفته شده‌اند. از مزایای این روش این است که اولاً برای محدوده بسیار وسیعی از شرایط هندسی و بارگذاری قابل استفاده بوده و نیاز به امکانات آزمایشگاهی نیز ندارد و با رعایت نکات اجزای محدود مربوط به مکانیک شکست نیز می‌توان به نتایج قابل قبولی دست یافت.

چقرمگی شکست از آنجایی که یک خاصیت وابسته به جنس ماده است، هر چه بیشتر باشد، قابلیت لایه آسفالتی در برابر رشد ترک را افزایش داده و بهتر می‌تواند در برابر عوامل وارده مثل بارهای ترافیکی در برابر گسیختگی کامل مقاومت نماید، می‌توان با تغییر دادن درصد مصالح آن و یا جنس آن‌ها، استفاده از افزودنی‌ها، لیاف‌ها و ... راهی برای افزایش این خاصیت مخلوط‌های آسفالتی پیدا کرد.

### ۱-۲-۴- تنش‌های الاستیک اطراف نوک ترک

به موجب مطالعاتی که توسط ویلیام<sup>۲</sup> (۱۹۵۷) در مورد نحوه توزیع تنش در اطراف نوک ترک انجام شده است، مشخص شده است که می‌توان تنش‌های الاستیک اطراف نوک ترک را توسط سری‌هایی بیان نمود. چنانچه موقعیت یک المان از قطعه ترک‌دار در نزدیکی نوک ترک مطابق شکل (۱-۴) تعریف شود، معادلات تنش را در نزدیکی نوک ترک به قرار زیر می‌باشند:

<sup>2</sup> - Williams



شکل ۱-۴: تنش‌های الاستیک یک المان سه بعدی در اطراف نوک ترک

$$\sigma_r = \frac{1}{4\sqrt{2\pi r}} \left[ K_I \left( 5 \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \right) + K_{II} \left( -5 \cos \frac{\theta}{2} + 3 \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right] + T \cos^2 \theta + H.O.T \quad (۱-۱)$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{4\sqrt{2\pi r}} \left[ K_I \left( 3 \cos \frac{\theta}{2} + \cos \frac{3\theta}{2} \right) - K_{II} \left( 3 \sin \frac{\theta}{2} + 3 \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right] + T \sin^2 \theta + H.O.T \quad (۲-۱)$$

$$\sigma_z = \begin{cases} \frac{1}{4\sqrt{2\pi r}} \left[ K_I \cos \frac{\theta}{2} - K_{II} \sin \frac{\theta}{2} \right] + T + H.O.T & \text{(plane strain)} \\ 0 & \text{(plane stress)} \end{cases} \quad (۳-۱)$$

$$\sigma_{r\theta} = \frac{1}{4\sqrt{2\pi r}} \left[ K_I \left( \sin \frac{\theta}{2} + \sin \frac{3\theta}{2} \right) + K_{II} \left( \cos \frac{\theta}{2} + 3 \cos \frac{3\theta}{2} \right) \right] - T \sin \theta \cos \theta + H.O.T \quad (۴-۱)$$

$$\sigma_{z\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} K_{III} \cos \frac{\theta}{2} + H.O.T \quad (۵-۱)$$

$$\sigma_{rz} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} K_{III} \sin \frac{\theta}{2} + H.O.T \quad (۶-۱)$$

در معادلات فوق، ضرایب  $K_I$ ،  $K_{II}$  و  $K_{III}$  به ترتیب ضریب شدت تنش مودهای  $I$ ،  $II$ ،  $III$  می‌باشد، که بستگی به بار و هندسه‌ی قطعه ترک‌دار دارد.  $\sigma_r$ ،  $\sigma_\theta$ ،  $\sigma_z$ ،  $\sigma_{r\theta}$ ،  $\sigma_{z\theta}$ ،  $\sigma_{rz}$ ، نیز مختصات

نوک ترک برای یک المان در اطراف نوک ترک می‌باشد،  $T$  نیز ترم کششی است که مستقل از  $\theta$  و  $r$  می‌باشد. بر اساس مطالعات شکست قبلی، در نظر گرفتن ترم  $T$  می‌تواند به صورت مناسب و موثری میدان تنش در نوک ترک را شرح دهد (Aliha & Ayatollahi, 2008 ; Smith et al, 2001).

در فصل دوم شرح خواهد داده شد که مؤلفه ضریب شدت تنش مود  $III$  در نمونه پیشنهادی خیلی کوچک و مقدار آن قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد، بنابراین میدان تنش در این نمونه را می‌توان به وسیله سه پارامتر  $K_I$ ،  $K_{II}$  و  $T$  بیان نمود، در نتیجه این سه پارامتر، به عنوان پارامترهای شکست مود ترکیبی در نظر گرفته می‌شود.

استفاده از کدهای المان محدود یک ابزار معتبر و روشی مناسب برای تحلیل رفتار شکست مواد ترک‌دار می‌باشد، از اینرو به منظور بدست آوردن پارامترهای شکست نمونه پیشنهادی، چندین مدل المان محدود سه بعدی برای نمونه دیسکی با هندسه‌های مختلف و بارگذاری‌های گوناگون در نرم افزار اباکوس مورد تحلیل قرار گرفت که جزئیات و نتایج آن در فصل دوم مورد بحث قرار گرفته است. پارامترهای نوک ترک در نمونه دیسکی تابعی از عمق ترک ( $a$ )، هندسه دیسک ( $R$  و  $t$ )، فاصله تکیه‌گاهی ( $2S$ ) و جابجایی ترک ( $L$ ) می‌باشد و به فرم کلی زیر نوشته می‌شود:

$$K_i = \sigma \sqrt{\pi a} Y_i(a/R, S/R, L) \quad (7-1)$$

که در آن  $\sigma$  تنش اعمالی بر روی قطعه و  $Y_i$  ضریب هندسی و  $a$  عمق ترک لبه‌ای می‌باشد. واحد  $K_i$  (ضریب شدت تنش) در سیستم بین‌المللی ( $IS$ ) به صورت  $MPa\sqrt{m}$  می‌باشد.

### ۳-۱- پیشینه پژوهش

آسفالت ماده‌ای سیاه و بسیار چسبنده یا شبه جامد می‌باشد و یک ماده‌ای ترکیبی است که از مخلوط کردن شن، ماسه و قیر ساخته می‌شود. از انواع آن می‌توان به آسفالت گرم، نیمه گرم، آسفالت سرد و حفاظتی اشاره کرد. بررسی رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی ناشی از دمای پایین محیط و دمای محیط، به عنوان یکی از مهمترین خرابی‌های روسازی آسفالتی شناخته می‌شود. ایجاد ترک و باز شدن آن در مخلوط‌های آسفالتی معمولاً به واسطه‌ی عوامل مکانیکی (نظیر بار چرخ وسیله‌های نقلیه) و یا محیطی (نظیر سیکل‌های دمایی سرمایش و گرمایش حاصل از تغییرات روزانه یا فصلی دما) ایجاد می‌گردد. در واقع می‌توان این پدیده را ناشی از ضعف مخلوط‌های آسفالتی در برابر تنش‌های عمدتاً کششی و برشی ایجاد شده توسط این دو عامل دانست.

روش مرسوم در بررسی رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی عمدتاً با هدف معیار مکانیک شکست الاستیک خطی  $LEFM$  می‌باشد که این معیار روند ترک خوردگی در مخلوط‌های آسفالتی را از تشکیل ترک تا پخش ترک و شکست نهایی توصیف می‌کند.

از دغدغه‌هایی که سالیان بسیار دور نظر مهندسين این حوزه را به خود جلب کرده بررسی رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی است، که در تلاش اند روز به روز با حل این موضوع روندی صعودی و تاثیرگذار داشته باشند.

در تحقیقات اولیه انجام شده برای بررسی رفتار رشد ترک مواد قیری یا آسفالتی، عموماً از قطعات پیشنهاد شده برای آزمایش شکست سایر مواد مهندسی مانند فلزات استفاده می‌شد. حال آنکه قطعات مذکور لزوماً قطعات مناسبی برای بررسی آزمایشگاهی رفتار شکست و مقاومت در برابر رشد ترک مخلوط‌های آسفالتی نمی‌باشند. مروری بر منابع و مقالات موجود در خصوص آزمایش‌های شکست مخلوط‌های آسفالتی نشان می‌دهد که هندسه قطعات مورد آزمایش شکست مخلوط‌های آسفالتی دو دسته کلی تقسیم می‌شوند:

۱- قطعات مکعب مستطیل ترک‌دار لبه‌ای یک طرفه و دو طرفه تحت بارگذاری خمشی سه و چهار نقطه‌ای که به صورت معمول و متداول تولید می‌شوند.

۲- قطعات دیسک شکل ایجاد شده توسط دستگاه تراکم ژیراتوری مانند قطعه دیسک برزبلی، قطعه ترک‌دار نیم دایره‌ای خمشی و قطعه کششی فشرده دیسک شکل.

در کار تحقیقاتی برهام و همکاران در دانشگاه *Illinois*، رفتار شکست مود ترکیبی یک مخلوط آسفالتی با مقطع مستطیل شکل دارای ترک لبه‌ای و تحت بارگذاری خمشی سه نقطه‌ای نامتقارن به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس مشاهدات و یافته‌های آن‌ها، با حرکت از مود یک خالص به سمت مود ترکیبی *I* و *II* و افزایش تاثیر مود *II* در تغییر فرم ترک، مقدار بار لازم برای شروع رشد ترک افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. به عبارت دیگر، نیروی لازم برای شروع رشد ترک تحت مود *I* حدود ۱۱ درصد کمتر از نیروی لازم برای رشد مود ترکیبی کششی-برشی است.

بهبهانی و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۱۳) اثر افزودنی‌های مختلف شامل استیرن بوتادینس استیرن (*SBS*)، پلی فسفریک اسید (*PPA*)، ساسوبیت و کروم رابر را بر روی مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی با درصد‌های مختلف از افزودنی‌های مذکور دردمای ۱۵- درجه‌ی سانتیگراد با استفاده از نمونه *SCB* مورد بررسی قرار دادند، نتایج تست‌ها نشان داد زمانی که کروم رابر و ساسوبیت مورد استفاده قرار گیرند، ماکزیمم افزایش در مقدار  $K_{Ic}$  رخ خواهد داد.

منصوریان و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۱۶) مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم (*WMA*) تقویت شده با الیاف گیاهی جوت با درصد‌های مختلف از این افزودنی را با استفاده از نمونه *SCB* در دماهای مختلف مورد ارزیابی قرار دادند، آن‌ها در مطالعات خود نشان دادند در یک دمای ثابت، اضافه کردن الیاف جوت می‌تواند مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم در مود *I* خالص و ترکیبی *I/II* را افزایش دهد اما پیشرفتی در مود *II* خالص مشاهده نشد. آن‌ها مقدار بهینه الیاف جوت در مخلوط (*WMA*) را ۰/۳ درصد وزنی کل مخلوط بدست آوردند.

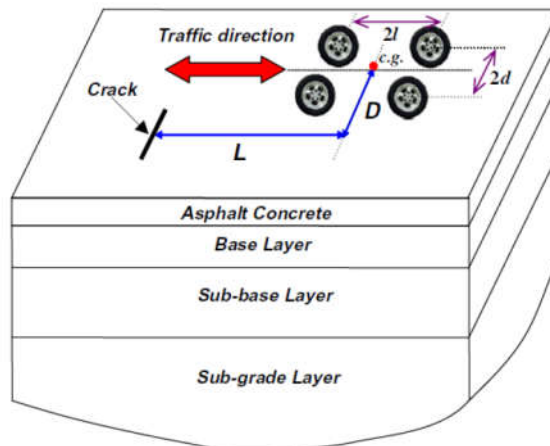
عامری و همکارانش<sup>۵</sup> (۲۰۱۱) با استفاده از روش المان محدود و تحلیل سه بعدی یک ترک از بالا به پایین عرضی در دمای پایین رفتار ترک در هر یک از مودهای سه‌گانه را تحت ترافیک عبوری مورد بررسی قرار دادند. ترک‌های بالا به پایین در اثر چرخه روزانه تغییرات دما در طول فصول سال ایجاد می‌شوند (شکل ۱-۵). آن‌ها

<sup>3</sup>-Behbahani et al

<sup>4</sup>-Mansourian et al

<sup>5</sup>-Ameri et al

برای این منظور از مدل سه بعدی الاستیک در نرم افزار آباکوس با فرض همگن، الاستیک و ایزوتروپیک تمام لایه‌ها استفاده کردند. همچنین بارگذاری بار چرخ با سطح مستطیلی در مدل خود به کار بردند. آن‌ها نشان دادند مود غالب در رشد ترک می‌تواند تابعی از وزن وسیله نقلیه و موقعیت قرارگیری آن نسبت به ترک باشد. برای بررسی ترکیبات مختلف تغییر شکل برشی و کششی بار چرخ‌ها نسبت به محل قرارگیری ترک را جابه‌جا می‌کنند، برای این منظور پارامترهای  $L$  و  $D$  را تغییر دادند و تغییرات  $K_I$ ،  $K_{II}$  و  $K_{III}$  و همچنین  $K_{shear}$  را در مقابل تغییرات این پارامترها بدست آوردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که با تغییرات محل قرارگیری بار نسبت به ترک در ضرایب شدت تنش در موده‌های مختلف تغییرات زیادی رخ می‌دهد. به طور مثال وقتی که وسیله نقلیه در طرف چپ ترک از فاصله خیلی دور به سمت ترک نزدیک می‌شود ابتدا مقدار  $K_I$  افزایش داشته و با بیشتر نزدیک شدن وسیله نقلیه به ترک مقدار  $K_I$  به طور ناگهانی از مقدار مثبت به منفی تغییر می‌کند که این مطلب بیانگر آن است که دهانه ترک از باز شدن به سمت بسته شدن تغییر شکل می‌دهد. وقتی که چرخ‌های جلو در نزدیکی ترک قرار دارند دهانه ترک تمایل دارد بسته شود و وقتی که ترک مرکز ثقل وسیله نقلیه قرار می‌گیرد  $K_I$  به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد.



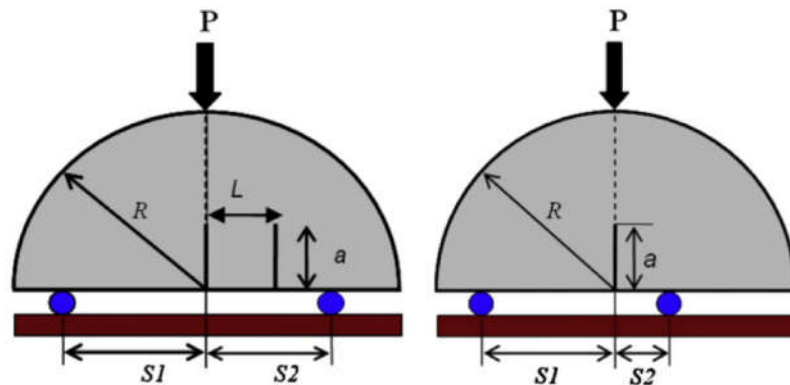
شکل ۱-۵: نمایش آسفالت ترک‌دار تحت بار ترافیکی

مطالعه دیگری بر روی قطعه نیم دیسک توسط پیرمحمد و آیت‌اللهی<sup>۶</sup> (۲۰۱۳) انجام شده است و آن در نظر گرفتن ترک لبه‌ای قائم در قطعه  $SCB$ <sup>۷</sup> و بارگذاری نامتقارن سه نقطه‌ای می‌باشد. مطابق شکل (۱-۶)، وقتی که محل تکیه‌گاه‌های پایینی بارگذاری نسبت به حالت متقارن، تغییر کند، حالت تنش‌های اعمالی به ترک از مود  $I$  خالص ( $S_1 = S_2$ ) به بارگذاری مود ترکیبی کششی- برشی تبدیل می‌شود. در نتیجه، هر دو عامل مود  $I$  و مود  $II$  می‌توانند در تغییر شکل ترک مشارکت داشته باشند. برای ایجاد بارگذاری نامتقارن در قطعه  $SCB$  با ترک عرضی عمودی، علاوه بر جابجایی محل تکیه‌گاه‌های بارگذاری، محل قرارگیری ترک نسبت به خط تقارن

<sup>6</sup>-Pirmohammad & Ayatollahi

<sup>7</sup>-Semi-circular bend

قطعه (فاصله  $L$ ) نیز می‌تواند متغیر باشد. آن‌ها با گذاشتن نمونه‌ها در دماهای مختلف زیر صفر، مقادیر چقرمگی شکست آسفالت را در نسبت‌های متفاوت  $M^e$  (mode mixity)، که سهم مودهای شکست را در هر نمونه مشخص می‌کند، بدست آورده‌اند و نشان داده‌اند که این طراحی جدید قابلیت ایجاد مودهای I و II و مود ترکیبی را دارا می‌باشد. آن‌ها همچنین نشان داده‌اند که چقرمگی شکست آسفالت، در حالت مود II بیشتر از مود I می‌باشد.



شکل ۱-۶: نمونه‌های استفاده شده برای بارگذاری نامتقارن سه نقطه‌ای توسط پیرمحمد و آیت‌الهی (۲۰۱۴)

مطالعه دیگری که در زمینه لایه‌های بتن آسفالتی، اهمیت شبیه‌سازی سه بعدی را نشان می‌دهد، تحقیق آیت‌الهی و همکاران<sup>۸</sup> (۲۰۱۴) می‌باشد. آن‌ها با انجام تحلیل‌های المان محدود بسیار زیاد سه بعدی بر روی سازه راه، اثرات بار ترافیکی روی تغییر شکل ترک عرضی که در لایه بالایی بتن آسفالتی قرار گرفته است را مطالعه کرده‌اند. آن‌ها یک سازه راه چهار لایه‌ای شامل یک ترک عرضی لبه‌ای را با استفاده از روش المان محدود سه بعدی برای دستیابی به تاثیر بار چرخ تک محوره در رشد ترک و در امتداد لایه آسفالتی شبیه‌سازی کرده‌اند. حالت‌های مختلف بار نقلیه مربوط به ناحیه ترک، در لایه‌ها را مورد توجه قرار داده و همچنین روش  $LEFM$  را برای مطالعه اثر بارهای ترافیکی بر رفتار رشد ترک در بتن آسفالتی مورد استفاده قرار داده‌اند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که نوک ترک، هر سه مود شکست را تجربه می‌کند و ضرایب شدت تنش در ارتباط متقابل با هندسه ترک و محل وسیله نقلیه هستند. همچنین آن‌ها نشان داده‌اند که برای موقعیت‌های بسیار زیادی، سهم مودهای برشی قابل توجه می‌باشد.

آرتمندی و همکاران<sup>۹</sup> (۲۰۰۶) از هر دو تست  $SCB$  و  $SENB$  برای بررسی رفتار شکست آسفالت تحت مودهای ترکیبی استفاده کردند. ایشان در تحقیق خود از چقرمگی شکست به عنوان بیان رفتار شکست در شرایط الاستیک خطی استفاده کردند. در شکل (۷-۱)، نمونه  $SCB$  و  $SENB$  بعد از شکست مود I و مود ترکیبی II - I نشان داده شده است. یکی از مزایای مهم تست  $SCB$  کرگیری میدانی است که مستقیماً از رویه‌های آسفالتی تهیه می‌گردد. این نکته بسیار مهم است که رویه‌های آسفالتی تحت تاثیر هر دو مود می‌باشند مود

<sup>8</sup>- Ayatollahi et al

<sup>9</sup>- Artamendi et al

کششی ناشی از بارگذاری حرارتی و مود کششی و برشی ناشی از بارگذاری چرخ. مقایسه انجام شده توسط آرتمندی بر اساس دو پارامتر شکست بود که عبارتند از:

۱- ضریب شدت تنش

۲- انرژی شکست

آن‌ها از این دو پارامتر شکست برای بیان رفتار آسفالت تحت مود  $I$  و  $II$  ترکیبی برای دو نوع آسفالت متراکم و همچنین آسفالت با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای استفاده کردند. آن‌ها از فرضیه آیروین برای توزیع تنش در نوک ترک استفاده کردند و ضریب شدت تنش را به عنوان پارامتر واحد برای تنش‌های محلی نوک ترک معرفی کردند. در صورتیکه اندازه نمونه به قدری بزرگ باشد که ناحیه غیر الاستیک در مقایسه با ابعاد نمونه کوچک باشد بنابراین تنش الاستیک حاکم بوده و رفتار قبل از شکست به صورت الاستیک می‌باشد.



شکل ۱-۷: الف) نمونه  $SENB$  بعد از شکست مود  $I$  و مود ترکیبی (ب) نمونه  $SCB$  بعد از شکست مود  $I$  و مود ترکیبی

عامری و همکاران<sup>۱۰</sup> (۲۰۱۲) دریافتند که مقاومت شکست مخلوط آسفالتی گرم  $HMA$  یک پارامتر مهم برای عملکرد احتمالی آسفالت در هوای سرد است. در مطالعه این تحقیق دو نمونه آزمایش شامل شکاف عمودی لبه استفاده شده و در معرض بار خمشی سه نقطه نامتقارن قرار گرفته که جهت محاسبه مقاومت شکست اندازه بار بحرانی نیاز است. نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهند که قطعه تست معرفی شده قابلیت اندازه‌گیری بار بحرانی را برای بازشدگی ترک در مود ترکیبی کامل  $II - I$  از مود  $I$  خالص تا مود  $II$  خالص را دارد. از اینرو، این قطعه می‌تواند به عنوان یک قطعه تست مناسب به منظور بررسی بازشدگی ترک برای مخلوط‌های آسفالتی دما پایین مورد استفاده قرار گیرد.

آیت‌اللهی و پیرمحمد<sup>۱۱</sup> (۲۰۱۲) از نمونه  $SCB$  برای بررسی تاثیر اندازه دانه‌ها بر مقاومت ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی استفاده کردند. پایه و اساس کار آن‌ها تئوری مکانیک شکست الاستیک خطی بود. آن‌ها برای این منظور چقرمگی شکست را برای سه نوع دانه‌بندی شماره ۱، شماره ۴ و شماره ۶ آیین نامه روسازی

<sup>10</sup> -Ameri et al

<sup>11</sup> - Pirmohammad & Ayatollahi

ایران را بدست آوردند. اندازه بزرگترین سائز دانه‌بندی آن‌ها با آنچه در مقالات انرژی شکست مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد، متناقض بود و همچنین درصد فضای خالی برای این نوع مخلوط ۸/۵ درصد بود که با درصد فضای خالی دانه‌بندی شماره ۴ و شماره ۶ متفاوت بود. آن‌ها نتیجه گرفتند که در مود II چقرمگی شکست دانه‌بندی شماره ۴ و ۱ افزایش یافته و لیکن مقدار آن در دانه‌بندی شماره ۶ کاهش می‌یابد و همچنین نتیجه گرفتند با افزایش سائز دانه‌ها چقرمگی شکست افزایش پیدا می‌کند.

آیت‌اللهی و پیرمحمد (۲۰۱۴) به بررسی اثر پارامترهای مود بارگذاری و دما بر مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که پایین‌ترین مقادیر چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی در شرایط مود بارگذاری ترکیبی با سهم کشش بیشتر رخ می‌دهد. همچنین استفاده از اصلاح‌کننده SBS باعث افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر شکست خواهد شد.

پیرمحمد و همکاران<sup>۱۲</sup> (۲۰۱۴) تاثیر اصلی مشخصه‌های بتن آسفالتی شامل نوع چسب و درصد حفره هوا روی پارامترهای مدل ناحیه چسبناک را مورد مطالعه قرار دادند و تست‌های آزمایشگاهی روی نمونه‌های SBS ساخته شده از بتن آسفالتی را انجام داده و رفتار شکست مخلوط‌ها را با استفاده از مدل ناحیه چسبناک شبیه‌سازی نمودند. همچنین برای بررسی تاثیر نوع چسب و درصد حفره هوا روی پارامترهای، پنج نوع از مخلوط‌های مورد تست و شبیه‌سازی قرار گرفت. نتایج نشان داد که قیر مورد استفاده در مخلوط‌های آسفالتی هر چه نرم‌تر باشد یا در دمای بالاتر باشد استحکام انرژی ناحیه چسبناک افزایش می‌یابد. این در حالی است که درصد تخلخل یا همان فضای خالی هر چه بیشتر افزایش یابد استحکام انرژی ناحیه چسبناک کاهش پیدا می‌کند.

محمد لواسانی و همکاران<sup>۱۳</sup> (۲۰۱۵) به بررسی آزمایشگاهی اثر افزودن الیاف‌های معدنی و ارگانیک با درصد‌های مختلف در آسفالت پرداختند. آن‌ها در این پژوهش از الیاف معدنی پشم کوهی<sup>۱۴</sup> و الیاف پلی‌استر (شکل ۱-۸) برای بررسی رفتار خزش دینامیکی و مدول برجهنگی در سه دمای مختلف استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند الیاف‌ها علاوه بر کاهش چشم‌گیر شیارشدگی باعث افزایش عملکرد خواص مکانیکی مخلوط آسفالتی نیز می‌گردند.



شکل ۱-۸: الیاف استفاده شده در پژوهش لواسانی و همکاران (۲۰۱۵)

<sup>12</sup> - Pirmohammad et al

<sup>13</sup> - Lavasani et al

<sup>14</sup> - Rockwool



منصور فخری و سید علی حسینی<sup>۱۵</sup> (۲۰۱۷) در یک تلاش آزمایشگاهی به بررسی عملکرد الیاف شیشه در مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم حاوی ۰، ۲۰، ۴۰ و ۵۰ درصد آسفالت‌های بازیافتی (*RAP*) به منظور ارزیابی حساسیت رطوبتی و مقاومت شیارشدگی پرداختند. نتایج اثر بهبود فیبر شیشه‌ای و *RAP* در عملکرد مخلوط *WMA* نشان داد. ترکیبی از *RAP* و فیبر شیشه‌ای می‌تواند منجر به مخلوط‌هایی شود که دارای مقاومت بالا در برابر شیارشدگی و حساسیت به رطوبت باشند. در تصویر (۱-۹) الیاف شیشه و ساسوبیت مورد استفاده در این پژوهش نشان داده شده است. در این مقاله از الیاف شیشه با طول ۱۲ میلی‌متر و ساسوبیت به مقدار ۱/۵ درصد وزنی قیر استفاده شده است.



(ب)

(الف)

شکل ۹-۱: الف) الیاف شیشه و ب) ساسوبیت مورد استفاده در پژوهش فخری و حسینی (۲۰۱۷)

رامالینگام و همکاران<sup>۱۶</sup> (۲۰۱۷) در یک پژوهش آزمایشگاهی به ارزیابی عملکرد الیاف طبیعی (گیاهی) سیسال<sup>۱۷</sup> در رفتار مخلوط‌های آسفالتی پرداخت. در این مطالعه الیاف سیسال در چهار طول مختلف ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر و در درصدهای مختلف ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ (درصد وزنی سنگدانه) مورد مطالعه قرار گرفت تا درصد بهینه آن مشخص شود. در نهایت بر اساس آزمایشات طول و درصد بهینه الیاف سیسال در بتن‌های آسفالتی به ترتیب برابر ۱۵ میلی‌متر و ۰/۰۵ درصدوزنی سنگدانه بدست آمد.

دن<sup>۱۸</sup> (۲۰۱۲) در پروژه‌ای به بررسی قابلیت سازگاری الیاف نارگیل به عنوان تقویت کننده در آسفالت به صورت آزمایشگاهی پرداخت. ایشان از طرح مارشال برای ساختن نمونه‌های خود استفاده کرد. در این پژوهش ابتدا سنگدانه در ظرفی گرم شده و فیبر به آن اضافه می‌شود و به صورت یکنواخت پخش می‌شود، دمای اختلاط در حدود ۱۵۰-۱۶۰ درجه‌ی سانتیگراد می‌باشد. در نهایت نیز قیر به آن اضافه می‌شود. محتوای قیر بهینه ۵٪،

<sup>15</sup> - Fakhri & Hosseini

<sup>16</sup> - Ramalingam et al

<sup>17</sup> - Sisal

<sup>18</sup> - Dean

فیبر بهینه ۰/۴۶٪ (درصد وزنی کل مخلوط) و طول فیبر بهینه ۱۷/۲۵ میلی‌متر پس از تجزیه و تحلیل به دست آمد.

آبی‌اولا و همکاران<sup>۱۹</sup> (۲۰۱۴) مقاله‌ای تحت عنوان مروری بر استفاده از الیاف طبیعی به عنوان تقویت کننده در بتن‌های آسفالتی فراهم نمودند. الیاف‌های طبیعی (*coir, sisal, hemp, jute, palm, flax*) و الیاف‌های مصنوعی (*PP, PE, nylon, glass, steel*) که به عنوان تقویت کننده در مخلوط‌های آسفالتی *SMA* مورد استفاده قرار می‌گیرند به صورت خلاصه در این مقاله مرور شد. جدول (۱-۱) خلاصه‌ای از خواص مکانیکی الیاف طبیعی را نشان می‌دهد.<sup>۲۰</sup> بر اساس بسیاری از گزارشات الیاف‌های طبیعی می‌توانند جایگزین الیاف مصنوعی به علت ایجاد چسبندگی خوب الیاف با آسفالت در مخلوط‌های *SMA* شوند. همچنین الیاف‌های طبیعی پتانسیل بهبود مقاومت ساختاری در روسازی‌های انعطاف‌پذیر تحت تنش در اثر بارهای ترافیکی را نیز دارند.

جدول ۱-۱: خواص الیاف طبیعی گوناگون

Plant fibre	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Specific modulus (GPa)	Failure strain (%)	Length of ultimate <i>l</i> (mm)	Diameter of ultimate ( $\mu\text{m}$ )	Aspect ratio, <i>l/d</i>	Microfilb, $\theta$ ( $^{\circ}$ )	Density ( $\text{kg m}^{-3}$ )	Moisture content (eq. (%))
Cotton	300-700	6-10	4-6.5	6-8	20-64	11.5-17	2752	20-30	1550	8.5
Kapok	93.3	4	12.9	1.2	8-32	15-35	724	-	311-384	10.9
Bamboo	575	27	18	-	2.7	10-40	9259	-	1500	-
Flax	500-900	50-70	34-48	1.3-3.3	27-36	17.8-21.6	1258	5	1400-1500	12
Hemp	310-750	30-60	20-41	2-4	8.3-14	17-23	549	6.2	1400-1500	12
Jute	200-450	20-55	14-39	2-3	1.9-3.2	15.9-20.7	157	8.1	1300-1500	12
Kenaf	295-1191	22-60	-	-	2-61	17.7-21.9	119	-	1220-1400	17
Ramie	915	23	15	3.7	60-250	28.1-35	4639	-	1550	8.5
Abaca	12	41	-	3.4	4.6-5.2	17-21.4	257	-	1500	14
Banana	529-914	27-32	20-24	1-3	2-3.8	-	-	11-12	1300-1350	-
Pineapple	413-1627	60-82	42-57	0-1.6	-	20-80	-	6-14	1440-1560	-
Sisal	80-840	9-22	6-15	2-14	1.8-3.1	18.3-23.7	115	10-22	1300-1500	11
Coir	106-175	6	5.2	15-40	0.9-1.2	16.2-19.5	64	39-49	1150-1250	13

#### ۱-۴- بیان هدف و چارچوب پایان‌نامه

هدف از این پژوهش بررسی مقاومت شکست نمونه‌های آسفالتی نیمه گرم تقویت شده با الیاف طبیعی کنف و بازالت در دماهای پایین می‌باشد، برای این کار تعدادی نمونه دیسکی ترکدار، حاوی الیاف طبیعی کنف و بازالت برای محاسبه مقاومت شکست مخلوط آسفالتی نیمه گرم در دمای نوسانی آماده شد و با استفاده از دستگاه تست کشش تک محوره تحت بارگذاری با یک نرخ ثابت جابجایی بر روی نمونه‌ها اعمال و در مود کششی خالص، برش خالص و مود ترکیبی کشش-برش مورد بررسی قرار گرفت.

<sup>19</sup> - Abiola

<sup>20</sup> - [www.naturalfibres20009.org/en/fibres/hemp.htm](http://www.naturalfibres20009.org/en/fibres/hemp.htm)

پایان نامه حاضر از پنج فصل تشکیل شده است در فصل اول ابتدا به تعریف علم مکانیک شکست پرداخته شد. سپس به توضیح تئوری مکانیک شکست الاستیک خطی برای مصالحی با رفتار ترد پرداخته شد. در ادامه انواع مودهای بارگذاری در اجسام ترکدار و ضریب شدت تنش که از پارامترهای اساسی مکانیک شکست در بررسی رفتار ترک است پرداخته شد و تنش‌های الاستیک در اطراف نوک ترک توضیح داده شد. در انتها خلاصه‌ای از تحقیقات انجام شده توسط پژوهشگران برای بررسی رفتار ترک در مخلوط‌های آسفالتی با عنوان پیشینه پژوهش ارائه شد. در فصل دوم این پژوهش، نحوه بدست آوردن پارامترهای مدل الاستیک خطی و انجام مدل‌سازی قطعات دیسکی با طراحی جدید و تحلیل آن‌ها با استفاده از نرم افزار آباکوس و بدست آوردن نمودار ضریب شدت تنش و ضریب شکل هندسی در مودهای مختلف پرداخته شد. در فصل سوم، مشروح مراحل پژوهش شامل آماده‌سازی نمونه‌های دیسکی و بارگذاری آن‌ها در مودهای مختلف کشش خالص، برش خالص و مود ترکیبی پرداخته شد و نتایج حاصل از هر کدام در فصل چهارم مورد بحث قرار گرفت. نهایتاً در فصل پنجم این پژوهش به جمع‌بندی نتایج و ارائه پیشنهادات برای ادامه پژوهش پرداخته شد.

Name: Mohammad	Family name: Hojjati
Title of Thesis: Investigating the effect of temperature cycling on fracture behavior of warm mix asphalt (WMA) concretes reinforced with natural fibers under mixed mode I/II loading using a new test specimen	
Supervisor(s): Dr. Sajad Pirmohammad	
Graduate Degree: <b>M.Sc</b>	
Major: Mechanical Engineering	Specialty: Applied Design
University: <b>Mohaghegh Ardabili</b>	Faculty: Technical and Engineering
Graduation data: 29/1/2018	Number of pages: 90
<p>Abstract:</p> <p>In the present research, after studying the available resources and reviewing the previous researches, the effects of natural fibers, including kenaf and basalt, and temperature fluctuations on the failure behavior of warm mixed asphalt composites were investigated. First, the finite element analysis was performed on a cracked disc-shaped substrate, and a specimen with a new laboratory design has been introduced to carry out the failure test. After designing new specimens and fabricating them from reinforced asphalt concrete with kenaf and basalt natural fibers, cracks are produced on the samples using a cutting machine. In the following, the samples prepared in the freezer are exposed to the temperature fluctuations with the specified range, according to the environmental conditions. In the end, by using a universal test machine, the specimens were subjected to tensile-shear loading and the failure tests were carried out. Then, the fracture resistance of asphalt concrete under the temperature fluctuations shall be evaluated. In order to evaluate the experimental results, a numerical study employing a finite element software to calculate the shape factor of the laboratory designed samples were carried out. The results revealed that both of the reinforcing kenaf fiber and basalt fiber, significantly increase fracture resistance of the asphalt mixture, however, the warm mixed asphalt mixture reinforced with basalt fiber fracture showed a higher resistance in most of the loading modes, than the warm mixed asphalt mixture modified with the kenaf fibers. The results also showed that, in critical conditions, asphalt concrete is not just under the loading mode (I), places under a mixed mode I / II.</p>	
Keywords: brittle fracture, fracture resistance, natural fibers Kenaf and Basalt, new laboratory sample, mixed mode I / II, Warm mixed asphalt concrete (WMA)	



**University of Mohagheh Ardabili**

**Faculty of Technical and Engineering  
Department of Mechanical Engineering**

**Thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for degree of M.Sc. in  
Mechanical Engineering-Applied Design**

Title:

**Investigating the effect of temperature cycling on fracture behavior of warm mix  
asphalt (WMA) concretes reinforced with natural fibers under mixed mode I/II  
loading using a new test specimen**

Advisor:

**Sadjad Pirmohammad (Ph. D)**

By:

**Mohammad Hojjati**

**Feb-2018**

