

## بررسی رفتار شکست و گسترش ترک مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با پلی فسفریک اسید (PPA) بر اساس آزمایش خمش دیسک نیم‌استوانه (SCB)

محمدعلی زیاری، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران  
پوریا حاجی کریمی\*، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین  
آفرین خیراتی کازرونی، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران  
فریدون مقدس‌نژاد، استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

E-mail: phajikarimi@qiau.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۲۸ - پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۰۲

### چکیده

یکی از روش‌های رایج جهت بهبود عملکرد قیر و متعاقب آن مخلوط‌های آسفالتی، استفاده از افزودنی‌های پلیمری و معدنی می‌باشد. پلی فسفریک اسید یکی از افزودنی‌های اصلاح‌کننده ویژگی‌های قیر است که کاربرد آن طی دو دهه اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته است. به منظور بررسی تأثیر این ماده بر رفتار شکست و گسترش ترک مخلوط‌های آسفالتی، نمونه‌های مخلوط آسفالتی با قیرهای اصلاح شده با سه درصد مختلف (۰/۵، ۱/۰ و ۱/۵ درصد) پلی فسفریک اسید تهیه و در پنج دما (۱۰-، صفر، ۱۰، ۲۵ و ۴۰ درجه سلسیوس) تحت آزمایش خمش دیسک نیم‌استوانه قرار گرفتند. مهمترین خروجی این آزمایش، نمودار نیرو - تغییر مکان بود که به کمک آن پیشینه نیروی قابل تحمل، شکل‌پذیری، انرژی شکست و چقرمگی برای نمونه‌ها به دست آمد. در هنگام آزمایش، به صورت همزمان و به وسیله عکس‌برداری، میزان بازشدگی دهانه ترک اندازه‌گیری شد. در انتها، به منظور مقایسه مخلوط‌های آسفالتی، حاصل تقسیم انرژی شکست بر بازشدگی دهانه ترک بررسی شد. به این صورت که در دمای ثابت هرچه میزان این پارامتر بزرگ‌تر باشد، نشان‌دهنده عملکرد بهتر مخلوط آسفالتی در برابر بارگذاری می‌باشد: انرژی جذب شده بیشتر با بازشدگی دهانه کمتر. نتایج نشان داد که افزودن پلی فسفریک اسید در دمای کم برای بهبود رفتار شکست مخلوط آسفالتی سودمند نمی‌باشد. اما با افزایش دما، تأثیر این افزودنی بر بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی بهتر بود. میزان بهینه استفاده از افزودنی پلی فسفریک اسید در دماهای میانی و زیاد، ۰/۵ تا ۱/۰ درصد برآورد گردیده است.

واژه‌های کلیدی: پلی فسفریک اسید، انرژی شکست، بازشدگی دهانه ترک، آزمایش خمش دیسک نیم‌استوانه

### ۱. مقدمه

در مخلوط‌های آسفالتی موضوع اصلی برای بهبود عملکرد مخلوط است که وابسته به طراحی آن می‌باشد. ترک‌ها به دلیل دو عامل محیطی و بارگذاری ترافیکی، و

ترک‌ها یکی از رایج‌ترین انواع خرابی‌ها در روسازی‌های آسفالتی می‌باشند. ویژگی‌های مقاومت در برابر شکست

۱/۵ درصد) به قیر خالص، بر رفتار شکست و گسترش ترک مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از آزمایش خمش دیسک نیم‌استوانه (SCB) مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. به این منظور، علاوه بر پارامترهای متعارف خروجی آزمایش شامل بیشینه نیرو و شکل‌پذیری، بازشدگی دهانه ترک در نمونه‌ها با استفاده از پردازش تصویر اندازه‌گیری شده و تغییرات آن نسبت به زمان، بحث و بررسی شده است. در ادامه، مرور ادبیات موضوع شامل دو بخش مطالعات مربوط به رفتار شکست مخلوط آسفالتی با رویکرد آزمون SCB و مطالعات مربوط به استفاده از پلی‌فسفریک اسید در قیر و مخلوط آسفالتی ارائه گردیده است.

## ۲. مرور ادبیات موضوع

### ۲-۱. رفتار شکست مخلوط آسفالتی با رویکرد

#### آزمون SCB

آزمون خمش نیم‌استوانه برای پیش‌بینی مقاومت در برابر شکست در مخلوط‌های آسفالتی گرم توسعه داده شده است. نمونه‌های این آزمایش به صورت نیم‌دیسک با قطر ۴ تا ۶ اینچ (۱۰۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر) بوده و ضخامتی معادل ۱/۵ تا ۲ اینچ (۳۸ تا ۵۰ میلی‌متر) دارند (ASTM D8044، ۲۰۱۶). نمونه SCB که برای آزمایش مصالح سنگی شکننده توسعه یافته، در دهه گذشته به طور گسترده‌ای برای تعیین ویژگی‌های شکست آسفالت شامل چقرمگی شکست، انرژی شکست و مقاومت خستگی مورد استفاده قرار گرفته است (کوروپو و چانگ، ۲۰۱۲).

السیفی و همکاران (۲۰۱۲) مقاومت شکست و ترک‌خوردگی برخی مخلوط‌های آسفالتی را با استفاده از آزمایش SCB مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آزمایش SCB عملکرد شکست مخلوط‌ها را به درستی تعیین کرده و آن‌ها را با توجه به مقاومت ترک خوردگی‌شان با

یا ترکیبی از هر دو، به وجود آمده و گسترش می‌یابند و متعاقباً هزینه‌های تعمیر و نگهداری را افزایش می‌دهند. ترک‌ها تعیین‌کننده عمر خدمت‌دهی سازه‌ای روسازی می‌باشند. خواص مربوط به ترک‌خوردگی‌ها باید در آزمایشگاه اندازه‌گیری شود. با توجه به اینکه مخلوط آسفالتی یک ماده ویسکوالاستیک است (کیم، ۲۰۰۸)، مشخصه مقاومت شکست در آن به دما، زمان و نرخ بارگذاری وابسته می‌باشد (گوانگلی، ۲۰۱۰). علی‌رغم این تأثیر قابل توجه، ویژگی‌های اصلی شکست مخلوط آسفالتی در روند متداول تحلیل و طراحی روسازی آسفالتی وارد نشده‌اند. پیش‌بینی و کنترل ترک‌خوردگی یکی از چالش‌برانگیزترین موضوعات در مورد روسازی‌های آسفالتی است که به ویژگی‌های هندسی پیچیده و رفتار غیرالاستیک مخلوط آسفالتی مربوط می‌شود (حاجی کریمی، ۱۳۹۷).

هنگامی که خرابی در مخلوط آسفالتی اتفاق می‌افتد، مسیر ترک اغلب در لایه‌ی فیری بین سنگدانه‌ها مشاهده می‌شود. بنابراین، ویژگی‌های مکانیکی قیر مستقیماً با شروع و رشد ترک در ارتباط است. آزمایش‌های شکست زیادی به منظور بررسی رفتار شکست مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که از آن جمله می‌توان به آزمایش‌های تیر با ترک گوشه<sup>۱</sup> (هوار و هسپ، ۲۰۰۰)، کشش دیسک‌شکل<sup>۲</sup> (واگونر و همکاران، ۲۰۰۵)، کشش با دو ترک گوشه<sup>۳</sup> (سنو، ۲۰۰۳) و خمش نیم‌استوانه<sup>۴</sup> (لی و ماراستینو، ۲۰۰۴) اشاره کرد. از میان روش‌های مختلف آزمایش‌های شکست، آزمایش خمش دیسک نیم‌استوانه به دلیل نتایج مطلوب و هزینه آزمایشگاهی کم، در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه محققین قرار گرفته است.

در این پژوهش، با توجه به نقش قابل توجه افزودنی‌ها در کنترل شکست و گسترش ترک مخلوط‌های آسفالتی، تأثیر افزودنی پلی‌فسفریک اسید (PPA) با اضافه کردن سه درصد وزنی مختلف از آن (۰/۵، ۱ و

<sup>۲</sup>- Double-edged Notched Tension (DENT)

<sup>۴</sup>- Semi-circular Bending (SCB) Test

<sup>۱</sup>- Single-edge Notched Beam (SEB)

<sup>۲</sup>- Disc-shaped Compact Tension (DCT)

بررسی رفتار شکست و گسترش ترک مخلوط های آسفالتی اصلاح شده با پلی فسفریک اسید (PPA) بر اساس آزمایش خمش دیسک نیم استوانه (SCB)

گردید. با افزایش نرخ بارگذاری، مقاومت ابتدا سریعاً افزایش یافته و سپس از نرخ افزایش آن کاسته می شود. ساها و بیلگیری (۲۰۱۷) رابطه ای میان شکست استاتیک و دینامیک مخلوط های آسفالتی به منظور پیش بینی عملکرد مکانیکی آنها ارائه کردند و پدیده گسترش ترک را جهت توجیه فرایند ترک خوردن پیشنهاد نمودند. نتایج آزمایش های SCB نشان داد که نوع رده بندی قیر تأثیر قابل توجهی بر مقاومت شکست و عمر خستگی مخلوط های آسفالتی دارد. ایشان با مقایسه بازشدگی دهانه ترک نمونه های مخلوط های اصلاح شده با پلیمر و پودر لاستیک و مخلوط های معمولی، نتیجه گرفتند که اصلاح قیر با پلیمر و پودر لاستیک موجب افزایش مقاومت نمونه های مخلوط آسفالتی در برابر رشد ترک شده است. در حقیقت، رشد ترک در مخلوط های اصلاح شده، دوره زمانی طولانی تر را تجربه می کند. این در حالی است که مخلوط های معمولی تردشکن هستند. بنابراین، بازشدگی دهانه ترک مؤلفه ای ارزشمند برای تعیین عملکرد مکانیکی مخلوط های آسفالتی معمولی و اصلاح شده به شمار می رود.

## ۲-۲. استفاده از پلی فسفریک اسید (PPA) در قیر و مخلوط آسفالتی

یکی از روش های متداول و شناخته شده جهت بهبود مقاومت شکست مخلوط های آسفالتی، استفاده از مواد افزودنی اصلاح کننده نظیر پودر لاستیک (حاجی کریمی و همکاران، ۲۰۱۵)، استایرن - بوتادین - استایرن (SBS) (مقدس نژاد و همکاران، ۲۰۱۷) و پلی فسفریک اسید است. پلی فسفریک اسید، پلیمر معدنی مایع با فرمول عمومی  $H_{n+2}P_nO_{3n+1}$  است. در سال ۱۹۷۲، شرکت نفت شیل<sup>۱</sup> (TOSCO) پلی فسفریک اسید را به عنوان اصلاح کننده ویژگی های قیر معرفی نمود. در ثبت اختراعی که

موفقیت تمیز داد. همچنین، یک مدل سه بعدی اجزای محدود به منظور تفسیر و تحلیل مکانیزم شکست در آزمایش ها با استفاده از نتایج آزمایش SCB اعتبارسنجی شد. این مدل، با نتایج آزمایش های تمام نمونه ها مطابقت داشته و روند آزمایش SCB و رشد خرابی را با موفقیت شبیه سازی نمود. مدل، ترکیبی از تنش های افقی و عمودی در نمونه ها را به عنوان عامل اصلی رشد خرابی در مجاورت ترک شناسایی نموده و نشان داد که تأثیر برش در این فرایند ناچیز است.

هسلت (۲۰۱۸) تأثیر پنج شاخص شکست مختلف شامل انرژی شکست، شاخص انعطاف پذیری ایلینویز، شاخص چقرمگی، تحمل کرنش شکست و شاخص مقاومت ترک خوردگی را جهت شناسایی و رتبه بندی مخلوط های آسفالتی و تغییرات آن ها با دمای آزمایش و تغییرات نرخ بارگذاری بررسی کرد. به این منظور، نتایج آزمایش های SCB برای پنج مخلوط آسفالتی مختلف، حاوی مقادیر متفاوت آسفالت بازیافتی و قیر با درجات عملکردی مختلف، در چهار دمای متفاوت و ترکیبات گوناگون نرخ بارگذاری مورد ارزیابی قرار گرفتند. محاسبه شاخص شکست بر اساس جابجایی های بازشدگی دهانه ترک به عنوان راهکاری مناسب برای تمایز عملکرد ترک خوردگی مخلوط ها پیشنهاد گردید.

جیانگ و همکاران (۲۰۱۸) مقاومت مخلوط های آسفالتی در برابر مشخصات زمان - دما را بر اساس نتایج آزمایش خمش نیم استوانه مورد مطالعه قرار دادند و از خروجی های آزمایش خستگی SCB به منظور بررسی ویژگی های عملکردی خستگی مخلوط ها بر اساس توسعه جابجایی ها و مصرف انرژی در فازهای بارگذاری سیکلیک استفاده کردند. در تحقیق ایشان، نتایج تأثیر نرخ بارگذاری و دما بر مقاومت آسفالت نشان داده شد و همچنین ارتباط واضح میان نرخ بارگذاری و مقاومت بیان

<sup>۱</sup> - Oil Shale Company

وسيله پلی فسفریک اسید از مخلوط‌های ساخته شده با قیر اصلاح شده با ساسوبیت، استایرن بوتادین استایرن یا پودر لاستیک کمتر می‌باشد.

### ۳. برنامه آزمایشگاهی

در این بخش، ابتدا مواد و مصالح مورد استفاده شامل قیر خالص، سنگدانه‌ها و پلی فسفریک اسید به عنوان ماده افزودنی مورد استفاده معرفی شده‌اند. سپس، نحوه اصلاح قیر با استفاده از پلی فسفریک اسید و آماده‌سازی نمونه‌های آسفالتی جهت آزمایش‌های مربوطه تشریح شده است. در انتها، روش انجام آزمایش خمش شبه‌استوانه (SCB) به عنوان آزمایش اصلی مورد استفاده در این تحقیق ارائه گردیده است.

#### ۳-۱. مواد و مصالح

در این پژوهش، از قیر خالص با درجه نفوذ ۸۵/۱۰۰ (PG58-22) استفاده شده است. این قیر خالص که توسط کارخانه تهران شرکت نفت پاسارگاد تأمین شده، بر اساس پروتکل سوپرپیو<sup>۱</sup> دارای رده‌بندی عملکردی<sup>۲</sup> PG58-22 است. جدول ۱ مشخصات متعارف قیر خالص شامل چگالی، درجه نفوذ، نقطه نرمی، خاصیت کشسانی و درجه اشتعال را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مشخصات متعارف قیر خالص

ویژگی	مقدار	استاندارد انجام آزمایش
چگالی (گرم بر سانتی‌متر مکعب) در ۲۵ درجه سلسیوس	۱/۰۳	ASTM D7
درجه نفوذ (۰/۱ میلی‌متر) در ۲۵ درجه سلسیوس	۸۹	ASTM D5
نقطه نرمی (درجه سلسیوس)	۴۹	ASTM D36
خاصیت کشسانی در ۲۵ درجه سلسیوس	۱۰۰	ASTM D113
	>	
درجه اشتعال (سلسیوس)	۲۵۰	ASTM D92
	>	

به این منظور انجام شده اشاره گردیده که اضافه کردن PPA به قیر خالص، بدون اضافه کردن درجه نفوذ، موجب افزایش ویسکوزیته می‌گردد (الکساندر، ۱۹۷۳). پیش از معرفی پروتکل سوپرپیو، PPA به منظور بهبود درجه نفوذ و نقطه نرمی قیر مورد استفاده قرار می‌گرفت و پس از معرفی این پروتکل به طور گسترده در جهت ارتقای رده‌بندی عملکردی قیر (افزایش بازه میان دمای زیاد و دمای کم بهره‌برداری) مورد استفاده قرار گرفته است.

اخیراً، تحقیقات متعددی به بررسی تأثیر اضافه کردن PPA بر ویژگی‌های رئولوژیک و مکانیکی قیر خالص اختصاص یافته است. این تحقیقات نشان داده‌اند که اصلاح قیر خالص با اضافه کردن پلی فسفریک اسید موجب بهبود رفتار قیر در دمای زیاد می‌گردد (افلاکی و طباطبایی، ۲۰۰۹). افلاکی و حاجی کریمی (۲۰۱۲) نشان دادند که اصلاح قیر با PPA (با درصدهای وزنی ۰/۵، ۱، ۱/۳ و ۱/۶) بر رفتار آن در دمای کم تأثیر منفی دارد. با این حال، زگیه و همکاران (۲۰۱۲) تأثیر مثبت اضافه کردن PPA بر ویژگی‌های شکست دمای کم مخلوط آسفالتی اصلاح شده را گزارش نموده‌اند. ایشان به این نتیجه رسیدند که به کارگیری ۰/۷ درصد وزنی پلی فسفریک اسید، میزان بهینه جهت استفاده در مخلوط‌های آسفالتی است. بهبهانی و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از آزمایش SCB، تأثیر اضافه کردن پلی فسفریک اسید، استایرن بوتادین استایرن، مواد ضدعریان‌شدگی، ساسوبیت و پودر لاستیک را در دمای ۱۵- درجه سلسیوس بر مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی (در مڈ اول) مورد بررسی قرار دادند. ایشان مشاهده کردند که اضافه کردن ۱٪ وزنی پلی فسفریک اسید (نسبت به وزن قیر خالص) موجب افزایش ضریب شدت تنش بحرانی (چقرمگی شکست) نسبت به نمونه شاهد شده است. این در حالی است که ضریب شدت تنش بحرانی مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با قیر اصلاح شده به

<sup>۲</sup> - Performance Grading

<sup>۱</sup> - SuperPAVE protocol

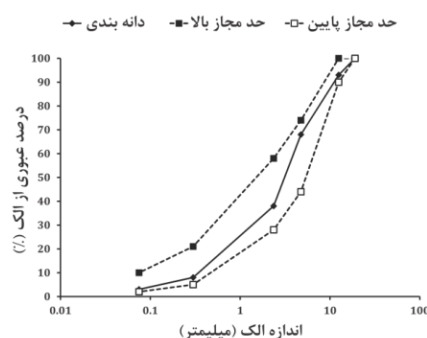
بررسی رفتار شکست و گسترش ترک مخلوط های آسفالتی اصلاح شده با پلی فسفریک اسید (PPA) بر اساس آزمایش خمش دیسک نیم استوانه (SCB)

شکل ۱. منحنی دانه بندی سنگدانه های مورد استفاده

ویسکوزیته (cst) در ۲۵ درجه ۳۲۰  
ASTM D2170  
سلسیوس

در این تحقیق، از PPA تولید شرکت مرک استفاده شده است. مشخصات PPA استفاده شده در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به تحقیقات پیشین (حاجی کریمی و همکاران، ۲۰۱۸)، پلی فسفریک اسید در سه درصد وزنی (۰/۵، ۱ و ۱/۵ بر اساس وزن قیر خالص) به منظور اصلاح رفتار قیر پایه مورد استفاده قرار گرفته است. امتزاج PPA با قیر توسط همزن دور کند (۵۰ دور در دقیقه) در دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس و به مدت ۴۵ دقیقه صورت پذیرفته است. با انجام آزمایش رده بندی عملکردی بر اساس پروتکل سوپریو، اضافه کردن ۰/۵ و ۱ درصد وزنی PPA به قیر خالص موجب تغییر رده بندی عملکردی قیر خالص (-PG58) 22) به PG64-16 و اضافه کردن ۱/۵ درصد وزنی PPA به قیر خالص موجب تغییر رده بندی عملکردی به PG70-10 گردیده است. لذا، مشاهده می شود که افزودن PPA به قیر موجب بهبود رفتار دمای زیاد و تخریب دمای کم گردیده است.

دانه بندی سنگدانه ها با اندازه ذرات بزرگتر از ۷۵ میکرون به نحوی انتخاب شده که از منحنی دانه بندی شکل ۱ تبعیت نماید. محدوده بالا و پایین دانه بندی بر اساس نشریه فنی ۲۳۴ آیین نامه طرح روسازی آسفالتی راه های ایران انتخاب شده است. به این منظور، سنگدانه های تأمین شده از معدن شرکت عمران بهسازان واقع در آبیگ با استفاده از لرزاننده مکانیکی الک شده اند. لازم به ذکر است که سنگدانه های مورد استفاده در این تحقیق از جنس آهکی و از نقطه نظر محل برداشت مصالح در دسته مصالح کوهی می باشند.



جدول ۲. ویژگی های پلی فسفریک اسید مورد استفاده

توضیحات	مقدار	ویژگی
در فشار ۱۰۱۳۰۰ پاسکال	۵۳۰	نقطه جوش (درجه سلسیوس)
در دمای ۲۰ درجه سلسیوس	۲/۰۶	جرم حجمی (گرم بر سانتی متر مکعب)
-	-۲۰	نقطه ذوب (درجه سلسیوس)
در دمای ۲۰ درجه سلسیوس	۲۰۰	فشار بخار (پاسکال)
بر حسب P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۸۷ - ۸۳ درصد	عیار اسیدی

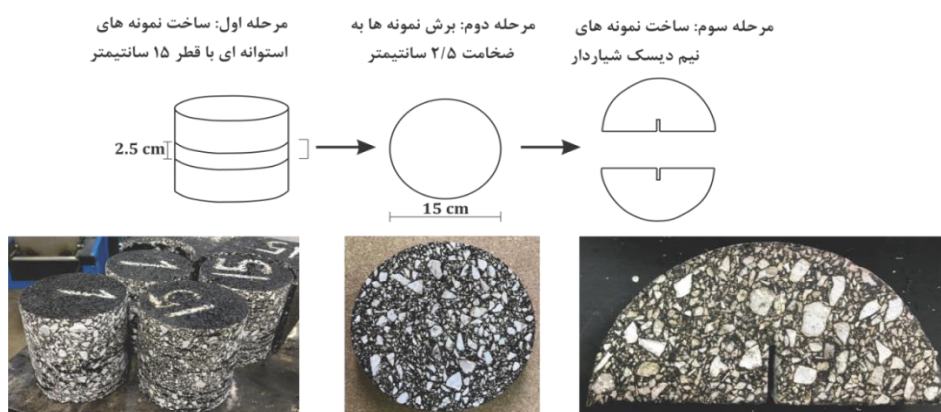
به منظور تعیین درصد قیر بهینه برای ساخت نمونه های مخلوط آسفالتی، روش طرح اختلاط مارشال مورد استفاده قرار گرفته و درصد بهینه ۴/۷ برای کلیه نمونه ها انتخاب شده است. پس از محاسبه درصد قیر بهینه، با استفاده از دستگاه پرس باکس آزمایشگاه روسازی دانشگاه صنعتی امیرکبیر (ساخت شرکت IPC)،

در ادامه، روش ساخت نمونه های مخلوط آسفالتی و همچنین نمونه های مورد استفاده در آزمایش خمش شبه- استوانه ارائه شده است.

## ۲-۳. آماده سازی نمونه ها

نحوه طراحی برنامه آزمایشگاهی در این تحقیق، شکاف<sup>۱</sup> عمودی (با زاویه ۹۰ درجه) مطابق شکل ۲ روی نمونه‌ها ایجاد شده است. ارتفاع این شکاف ۲۵ میلی‌متر و عرض آن ۳ میلی‌متر می‌باشد. نمونه‌های با شکاف عمودی به منظور انجام آزمایش شکست در مد اول مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با هدف حذف تأثیر عوامل مرتبط با بارگذاری (نوع و نحوه اعمال بار) بر رفتار گسترش ترک مخلوط‌های آسفالتی مورد نظر این تحقیق، مد ترکیبی<sup>۲</sup> شکست در این پژوهش بررسی نشده و تنها به مد اول شکست و گسترش ترک تحت تأثیر کشش ناشی از خمش اکتفا گردیده است. شکل ۲، نمونه آماده شده جهت انجام آزمایش SCB را در آخرین مرحله نشان داده است.

نمونه‌های مخلوط آسفالتی از ترکیب قیرهای NEAT، PPA-0.5%، PPA-1% و PPA-1.5% و سنگدانه‌های آهکی با در نظر گرفتن ۴/۵ درصد هوا برای کلبه نمونه‌ها ساخته شده است. نمونه‌های ساخته شده توسط دستگاه پرس باکس به شکل دال مخلوط آسفالتی با ابعاد ۱۵×۱۷/۵×۴۵ سانتی‌متر می‌باشد. به منظور ساخت نمونه‌های آزمایش خمش شبه‌استوانه بر اساس استاندارد AASHTO TP 105-13 (۲۰۱۹)، ابتدا با استفاده از مغزه‌گیر با قطر ۱۵ سانتی‌متر، نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۵ و ارتفاع ۱۷/۵ سانتی‌متر تولید شده است. پس از برش بخش بالایی و پایینی، این نمونه‌ها به پنج دیسک به قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۲۵ میلی‌متر تقسیم شده و هر یک از دیسک‌های به دست آمده نصف گردیده‌اند. با توجه به ماهیت آزمایش SCB و



شکل ۲. روند ساخت نمونه‌های آزمایش خمش دیسک نیم‌استوانه (SCB)

۱۰، ۲۵ و ۴۰ درجه سلسیوس صورت پذیرفته و سه تکرار برای هر آزمایش در نظر گرفته شده است. در این پژوهش، انجام آزمایش SCB در دماهای کم بر اساس استاندارد AASHTO TP105-13 (۲۰۱۹) و در دماهای متوسط بر اساس ASTM D8044 (۲۰۱۶) صورت پذیرفته است.

خروجی اصلی آزمایش SCB نمودار نیرو - تغییر مکان می‌باشد که توسط دستگاه UTM ثبت می‌گردد. علاوه بر این، به منظور ایجاد امکان دنبال کردن

### ۳-۳. روش انجام آزمایش SCB

به منظور انجام آزمایش خمش نیم‌دایره، نمونه‌هایی که از طریق روش ارائه شده در بخش قبل آماده شده‌اند، به صورتی که در شکل ۳ نشان داده شده، در دستگاه کشش یونیورسال (UTM) تحت بارگذاری قرار گرفته‌اند. بارگذاری نمونه‌های SCB به صورت کرنش کنترل بوده و با نرخ یک میلی‌متر بر دقیقه صورت پذیرفته است. آزمایش SCB با کنترل دمایی در دماهای ۱۰-، صفر،

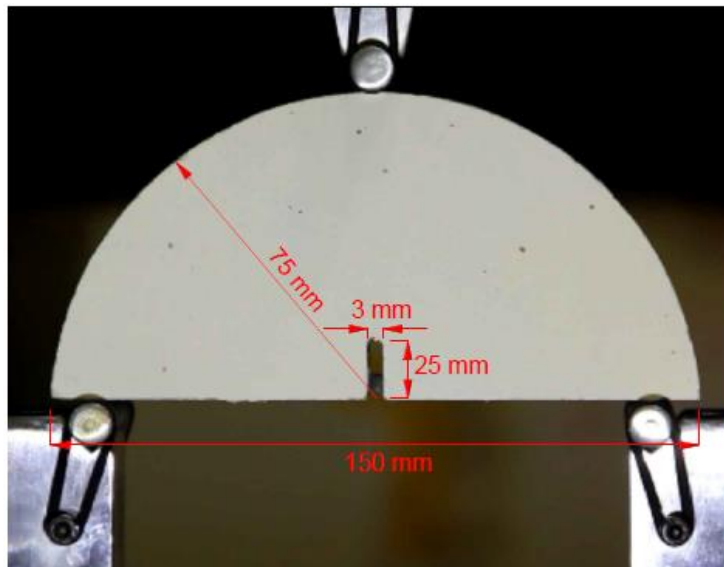
<sup>۲</sup>- Mixed Mode

<sup>۱</sup>- Notch

بررسی رفتار شکست و گسترش ترک مخلوط های آسفالتی اصلاح شده با پلی فسفریک اسید (PPA) بر اساس آزمایش خمش دیسک نیم استوانه (SCB)

نگاه کنید). عکس برداری از نمونه‌ها با فواصل زمانی یک ثانیه در سراسر طول انجام آزمایش صورت پذیرفته است.

مسیر گسترش ترک و اندازه‌گیری بازشدگی دهانه ترک سطح نمونه‌های SCB با رنگ سفید پوشیده شده و نقاط مشکی رنگی روی آن پراکنده گردیده است (به شکل ۸



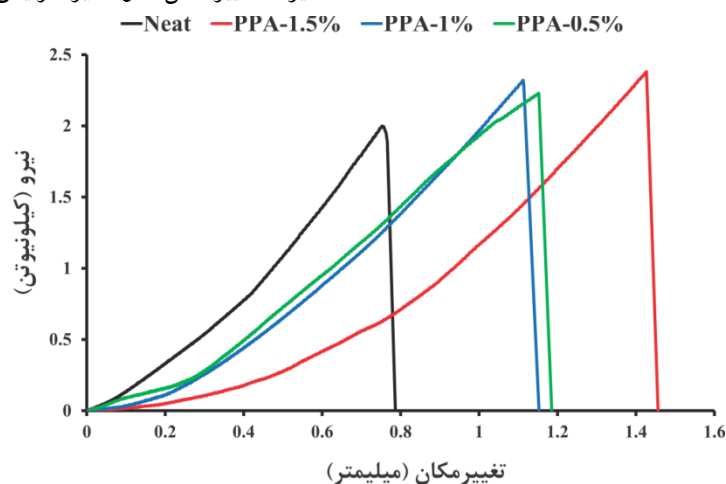
شکل ۳. نحوه بارگذاری نمونه‌های SCB در دستگاه UTM

ناگهانی و با شیب زیاد پس از نقطه بیشینه بار به نقطه‌ی صفر می‌رسند. نتایج آزمایش در این دما نشان می‌دهد که افزایش درصد استفاده از PPA موجب افزایش مقاومت شکست مخلوط آسفالتی گردیده است. با اضافه کردن PPA و افزایش درصد مصرف آن، نه تنها مقدار بیشینه نیروی قابل تحمل توسط نمونه‌ها افزایش پیدا کرده بلکه میزان تغییر شکل نمونه نیز افزایش یافته است.

#### ۴. نتایج و بحث

##### ۴-۱. تحلیل اولیه نمودار نیرو- تغییر مکان

نمودار نیرو- تغییر مکان نمونه‌های آسفالتی در دمای ۱۰- درجه سلسیوس در شکل ۴ نشان داده است. با توجه به رفتار شکننده مخلوط آسفالتی در دماهای کم و قابلیت شکل‌پذیری کم، مطابق انتظار نمودارها به صورت



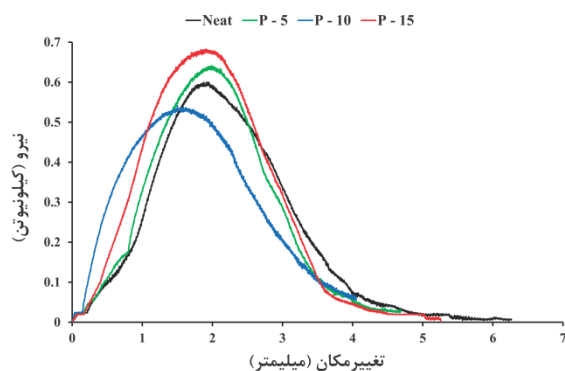
شکل ۴. نمودار نیرو- تغییر مکان نمونه‌های ساخته شده با قیر خالص و قیر اصلاح شده با پلی فسفریک اسید در دمای ۱۰-

درجه سلسیوس

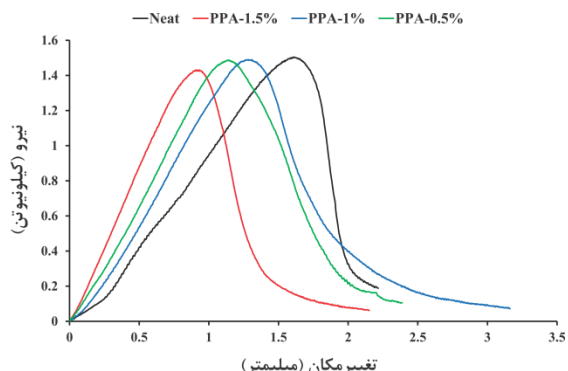
PPA به قیر موجب تغییر رفتار شکست نمونه‌های مخلوط آسفالتی شده است. همان‌طور که در شکل ۵-د مشاهده می‌شود، نمودار نیرو- تغییر مکان نمونه آسفالتی ساخته شده با قیر خالص از نمودارهای مربوط به نمونه‌های ساخته شده با قیرهای اصلاح شده با PPA کاملاً متمایز است. افزودن PPA موجب افزایش بیشینه نیروی قابل تحمل و نیز افزایش شکل پذیری نمونه‌ها گردیده است.

شکل ۶، بیشینه نیروی تحمل شده<sup>۱</sup> توسط هر نمونه در دماهای مختلف آزمایش را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش دما، بیشینه بار قابل تحمل توسط هر نمونه به دلیل تغییر ماهیت ویسکوالاستیک قیر کاهش یافته است.

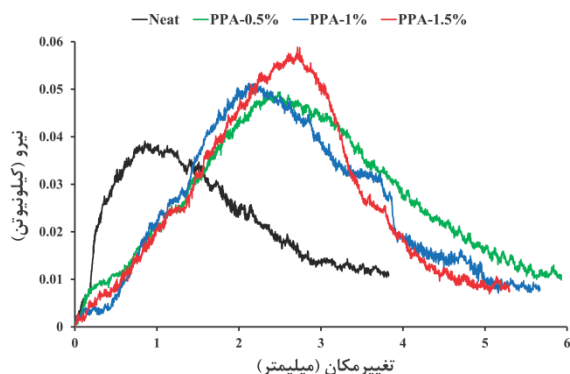
همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، افزایش دمای انجام آزمایش موجب کاهش بیشینه نیروی قابل تحمل و افزایش شکل پذیری نمونه‌ها شده است. همان‌طور که در شکل ۵-الف مشاهده می‌شود، شکست نمونه‌ها در این دما نیز به صورت ناگهانی رخ داده است؛ اما شیب قسمت انتهایی نمودار نسبت به دمای ۱۰- درجه سلسیوس کمتر است. با توجه به شکل ۵-ب، اضافه کردن PPA به میزان ۱/۵ درصد وزنی به قیر و ساخت مخلوط آسفالتی با قیر به دست آمده موجب افزایش بیشینه نیروی قابل تحمل توسط نمونه‌ها در دمای ۱۰ درجه سلسیوس گردیده است. بیشترین میزان تأثیر استفاده از PPA در شکل ۵-د (نتایج آزمایش در دمای ۴۰ درجه سلسیوس) قابل مشاهده است که اضافه کردن



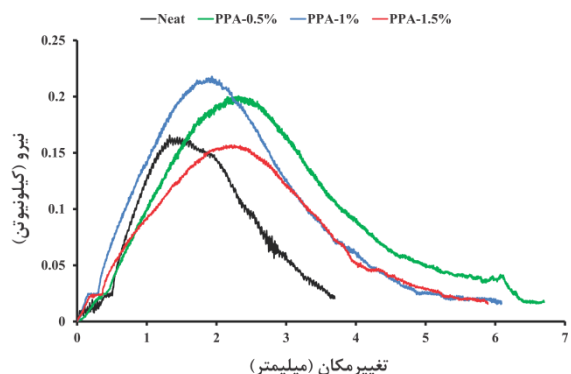
(ب)



(الف)



(د)



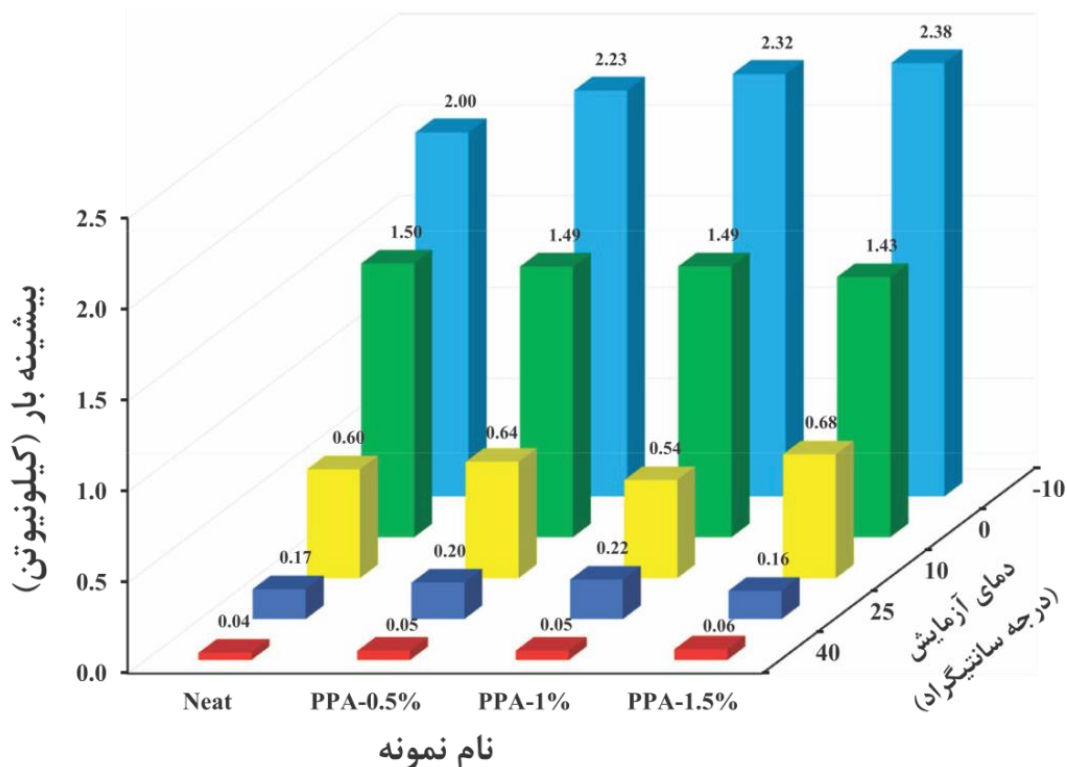
(ج)

<sup>۱</sup>- Peak Load



بررسی رفتار شکست و گسترش ترک مخلوط های آسفالتی اصلاح شده با پلی فسفریک اسید (PPA) بر اساس آزمایش خمش دیسک نیم استوانه (SCB)

شکل ۵. نمودار نیرو- تغییر مکان نمونه های ساخته شده با قیر خالص و قیر اصلاح شده با پلی فسفریک اسید در دماهای: (الف) صفر، (ب) ۱۰، (ج) ۲۵ و (د) ۴۰ درجه سلسیوس



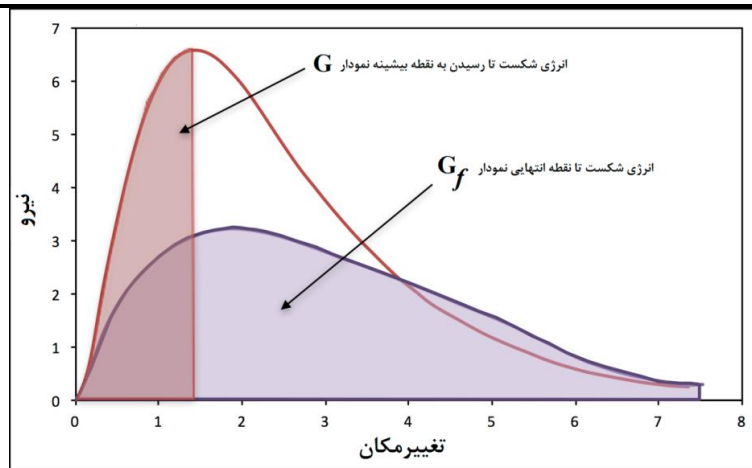
شکل ۶. بیشینه نیروی تحمل شده توسط نمونه های ساخته شده با قیر خالص و قیر اصلاح شده با پلی فسفریک اسید در دماهای مختلف آزمایش

و  $G_f$  انرژی شکست تا نقطه انتهایی نمودار است که در شکل ۷ نشان داده شده است. اضافه کردن پلی فسفریک اسید در دمای ۱۰- درجه سلسیوس موجب افزایش مقادیر  $G$  و  $G_f$  گردیده و این افزایش در خصوص مقدار  $G$  با افزایش درصد PPA مورد استفاده تشدید شده است. برای نمونه های آزمایش شده در دماهای ۱۰، ۲۵ و ۴۰ درجه سلسیوس نیز افزودن PPA به قیر موجب افزایش مقدار  $G$  و  $G_f$  نسبت به نمونه حاوی قیر خالص شده است.

یکی از پارامترهای پُرکاربرد برای مشخص کردن خواص شکست جامدات، انرژی شکست می باشد که از محاسبه سطح زیر نمودار نیرو- تغییر مکان به دست می آید. با افزایش مقدار بیشینه نیروی قابل تحمل و تغییر شکل نهایی نمونه، انرژی شکست دستخوش تغییر می شود. جدول ۳، انرژی شکست را برای کلیه نمونه های مورد استفاده در این تحقیق در دماهای مختلف نشان داده است. لازم به ذکر است که مقادیر انرژی شکست با استفاده از انتگرال گیری به روش دوزنقه ای محاسبه شده اند. مقدار  $G$  انرژی شکست تا رسیدن به نقطه بیشینه نیرو

جدول ۳. مقادیر انرژی شکست برای نمونه‌های ساخته شده با قیر خالص و قیر اصلاح شده با پلی فسفریک اسید در دماهای مختلف آزمایش

مقادیر انرژی شکست بر حسب $J/m^2$ در دماهای مختلف آزمایش										کد نمونه
۴۰		۲۵		۱۰		صفر		-۱۰		
$G_f$	$G$	$G_f$	$G$	$G_f$	$G$	$G_f$	$G$	$G_f$	$G$	
۶۹/۸	۱۶/۴	۲۵۷/۰	۷۷/۰	۱۰۵۳/۶	۴۴۵/۹	۱۳۳۱/۲	۹۵۷/۴	۵۳۰/۱	۴۹۴/۲	Neat
۱۲۷/۵	۵۲/۹	۵۰۴/۰	۲۰۴/۰	۹۹۹/۰	۵۱۵/۵	۱۳۴۳/۳	۷۰۵/۱	۹۲۰/۱	۸۹۰/۸	PPA-0.5%
۱۱۳/۸	۴۰/۶	۴۶۸/۰	۱۹۸/۰	۱۰۱۶/۹	۴۱۰/۱	۱۴۵۶/۲	۷۹۹/۲	۸۳۱/۵	۷۹۲/۵	PPA-1%
۱۱۲/۲	۶۳/۲	۳۷۳/۰	۱۷۰/۰	۱۱۷۵/۷	۵۷۶/۹	۹۸۲/۱	۵۸۸/۹	۹۲۸/۰	۸۹۹/۲	PPA-1.5%



شکل ۷. معرفی پارامترهای انرژی شکست ( $G$  و  $G_f$ ) روی نمودار نیرو - تغییر مکان

به طور محسوسی نسبت به نمونه ساخته شده با قیر خالص افزایش یافته است. این افزایش با اضافه شدن درصد PPA مصرفی تشدید شده است. به طوری که شاخص شکل پذیری نمونه ساخته شده با قیر اصلاح شده با ۱/۵ درصد PPA به ترتیب در دماهای ۱۰، ۲۵ و ۴۰ درجه سلسیوس ۱/۱۶، ۱/۵۳ و ۲/۳۹ برابر نمونه مخلوط آسفالتی ساخته شده با قیر خالص شده است. اگرچه مقدار شاخص شکل پذیری در دمای ۱۰- درجه سلسیوس در حضور PPA افزایش یافته، ولی این روند در خصوص دمای صفر درجه معکوس بوده است. با توجه به نتایج مربوط به انرژی شکست و شاخص شکل-پذیری، به نظر می‌رسد که رفتار PPA در دمای صفر درجه در حالت انتقالی بوده و لذا رفتار آن با دماهای کمتر و زیادتر متفاوت است.

با افزایش دما، میزان تغییر مکان نهایی نمونه‌های آسفالتی در محور افقی نمودار نیرو- تغییر مکان همواره رو به افزایش بوده است که این پدیده نشان‌دهنده‌ی افزایش زمان بارگذاری و شکل‌پذیری مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد که به سبب تاثیر دما بر خواص قیر استفاده شده در مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد. از نمودارهای به دست آمده از آزمایش نیرو- تغییر مکان نیز اینگونه نتیجه می‌شود که شکست ناگهانی نمونه‌های مخلوط آسفالتی با افزایش دما همواره کاهش می‌یابد و در دماهای زیاد، شکست ترد و ناگهانی اتفاق نخواهد رخ داد. شاخص شکل‌پذیری (FI) که برای همه انواع نمونه‌ها محاسبه شده و در جدول ۴ ارائه شده است نیز نشان-دهنده‌ی همین موضوع می‌باشد. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، شاخص شکل‌پذیری در نمونه‌های ساخته شده با پلی فسفریک اسید در دماهای آزمایش زیاد

بررسی رفتار شکست و گسترش ترک مخلوط های آسفالتی اصلاح شده با پلی فسفریک اسید (PPA) بر اساس آزمایش خمش دیسک نیم استوانه (SCB)

جدول ۴. مقادیر شاخص شکل پذیری (FI) برای نمونه های ساخته شده با قیر خالص و قیر اصلاح شده با PPA در دماهای مختلف آزمایش

مقادیر شاخص شکل پذیری (FI) در دماهای مختلف آزمایش					کد نمونه
۴۰	۲۵	۱۰	صفر	-۱۰	
۰/۲۳۶	۰/۳۰۰	۰/۴۲۳	۰/۷۱۹	۰/۹۲۳	Neat
۰/۴۱۴	۰/۴۰۰	۰/۵۱۶	۰/۵۲۵	۰/۹۶۸	PPA-0.5%
۰/۳۵۷	۰/۴۲۰	۰/۴۰۳	۰/۵۴۹	۰/۹۵۳	PPA-1%
۰/۵۶۴	۰/۴۶۰	۰/۴۹۱	۰/۶۰۰	۰/۹۶۹	PPA-1.5%

تعیین می شود و  $a$  طول شکاف معادل ۲۵ میلی متر است. همچنین،  $Y_I$  نیز تابعی بدون بعد بر حسب  $a$  و  $R$  است که از طریق رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$Y_I = 4.782 + 1.219 \left( \frac{a}{R} \right) + 0.063 \exp \left( 7.045 \left( \frac{a}{R} \right) \right) \quad (۲)$$

جدول ۵، مقادیر چقرمگی شکست مُد اول را برای نمونه مخلوط آسفالتی ساخته شده با قیر خالص و مخلوط های آسفالتی ساخته شده با درصد های مختلف پلی فسفریک اسید نشان داده است.

علاوه بر محاسبه انرژی شکست و شکل پذیری با استفاده از نمودار نیرو- تغییر مکان، چقرمگی شکست نمونه های مخلوط آسفالتی نیز با استفاده از رابطه زیر برای مُد اول شکست محاسبه شده است:

$$K_{Ic} = \frac{Y_I}{\sqrt{\pi a}} \frac{P_{cr}}{2Rt} \quad (۱)$$

که در آن  $K_{Ic}$  چقرمگی شکست در مُد اول شکست،  $R$  شعاع نمونه معادل ۷۵ میلی متر،  $t$  ضخامت نمونه معادل ۲۵ میلی متر،  $P_{cr}$  بیشینه بار است که از طریق آزمایش

جدول ۵. مقادیر چقرمگی شکست ( $K_{Ic}$ ) برای نمونه های ساخته شده با قیر خالص و قیر اصلاح شده با PPA در دماهای مختلف آزمایش

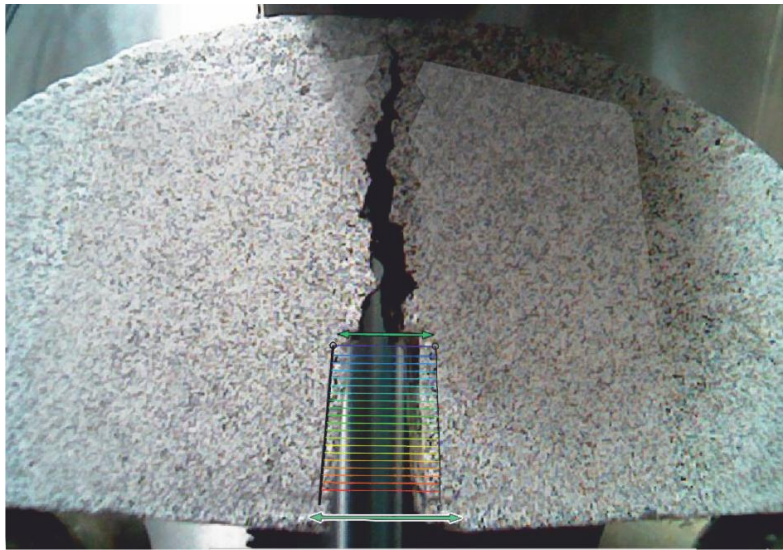
مقادیر شاخص شکل پذیری (FI)، بر حسب $\text{MPa.m}^{0.5}$ در دماهای مختلف آزمایش					کد نمونه
۴۰	۲۵	۱۰	صفر	-۱۰	
۰/۰۱۷	۰/۰۷۴	۰/۲۶۲	۰/۶۵۵	۰/۸۷۴	Neat
۰/۰۲۲	۰/۰۸۷	۰/۲۷۹	۰/۶۵۱	۰/۹۷۴	PPA-0.5%
۰/۰۲۲	۰/۰۹۶	۰/۲۳۶	۰/۶۵۱	۱/۰۱۴	PPA-1%
۰/۰۲۶	۰/۰۶۹	۰/۲۹۷	۰/۶۲۵	۱/۰۴۰	PPA-1.5%

مطابق انتظار کاهش یافته و افزایش مقدار پلی فسفریک اسید در دمای -۱۰ درجه سلسیوس موجب افزایش چقرمگی شکست مخلوط آسفالتی گردیده است. در دمای صفر درجه سلسیوس تفاوتی بین چقرمگی شکست نمونه ساخته شده با قیر خالص و نمونه های ساخته شده

با توجه به رابطه (۱) و ارتباط مستقیم چقرمگی شکست با مقدار بیشینه بار، روند نتایج ارائه شده در جدول ۵ منطبق بر روند تغییرات بیشینه بار در شکل ۶ می باشد. در واقع، با افزایش دما، مقدار چقرمگی شکست

## ۴-۲. نتایج گسترش ترک

به منظور تحلیل بازشدگی ترک، در طول انجام آزمایش از نمونه‌ها با فواصل زمانی یک ثانیه عکس برداری شده و تصاویر با استفاده از نرم‌افزار پردازش تصویر GOM تحلیل گردیده‌اند. شکل ۸ تصویری از تحلیل بازشدگی ترک در این نرم‌افزار را نشان داده است. در ادامه، پارامترهایی که در این راستا مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند ارائه شده است.



شکل ۸. تحلیل بازشدگی ترک در طول انجام آزمایش خمش دیسک نیم‌استوانه با استفاده از نرم‌افزار GOM

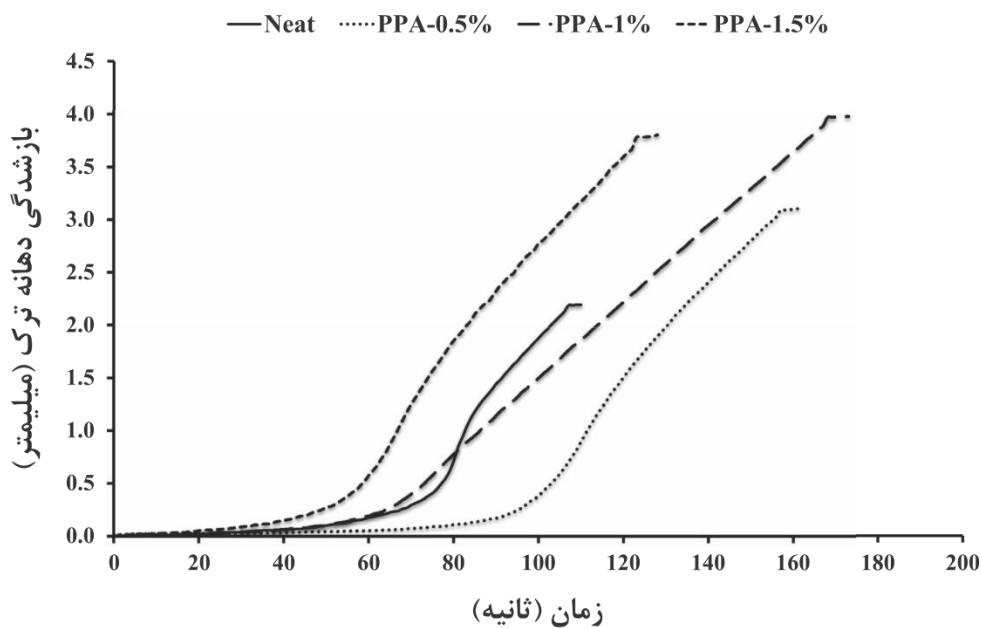
در دمای صفر درجه سلسیوس، نمونه‌ها در زمان بسیار کوتاهی در مقایسه با دیگر نمونه‌ها به نقطه‌ی انتهایی میزان بازشدگی در طی آزمایش رسیده‌اند. اگر چه در ابتدای آزمایش، میزان بازشدگی دهانه ترک در این دما از دیگر نمونه‌ها کمتر می‌باشد، که نشان از سختی بیشتر نمونه‌ها در این دما دارد، اما به صورت ناگهانی سرعت بازشدگی آنها طی انجام آزمایش افزایش قابل توجهی پیدا کرده و از سرعت بازشدگی دیگر نمونه‌ها نیز پیشی گرفته است و در زمان کوتاهی به پایان آزمایش رسیده‌اند. در واقع، این مشاهده میزان شکنندگی زیاد یا همان تردشکنندگی نمونه‌ها را در دمای کم نشان می‌دهد و با نتایج حاصل از جدول شکل‌پذیری نیز مطابقت دارد.

با قیر اصلاح‌شده با PPA وجود ندارد. افزایش مقدار مصرف پلی‌فسفریک اسید در دماهای آزمایش ۱۰، ۲۵ و ۴۰ درجه سلسیوس موجب افزایش مقدار چقرمگی شکست گردیده است. با این حال، این افزایش برای نمونه‌های اصلاح‌شده با ۱/۵ درصد پلی‌فسفریک اسید یا ناچیز بوده و یا اتفاق نیفتاده است.

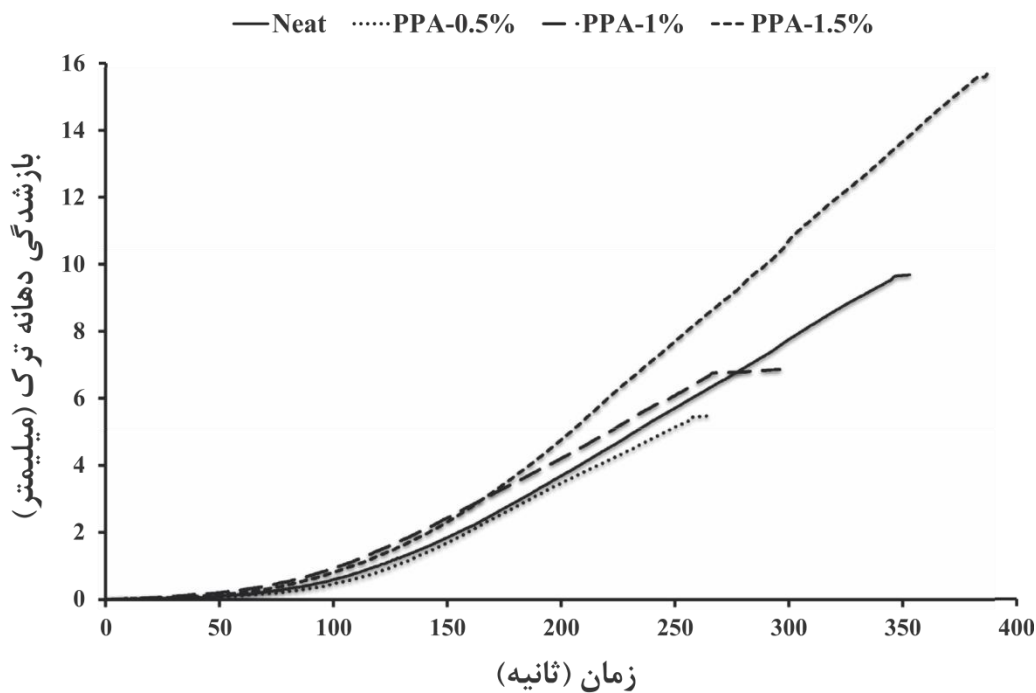
### ۴-۲-۱. سرعت بازشدگی ترک

شکل‌های ۹ تا ۱۲ بازشدگی دهانه ترک (شیار ایجاد شده در نمونه) را بر حسب زمان برای کلیه نمونه‌هایی که مورد آزمایش قرار گرفته‌اند به ترتیب در دماهای صفر، ۱۰، ۲۵ و ۴۰ درجه سلسیوس نشان داده‌اند. شیب خط حاصل، نشان دهنده‌ی سرعت بازشدگی دهانه ترک می‌باشد. با توجه به روند تغییرات بر حسب دما، ملاحظه می‌شود که سرعت بازشدگی دهانه ترک با دمای آزمایش رابطه‌ی مستقیم دارد و با توجه به نتایج حاصله از نمودارهای نیرو- تغییرمکان که کاهش دما موجب سخت‌تر شدن و کاهش میزان تغییر شکل نمونه‌ها می‌شود، سرعت بازشدگی دهانه‌ی ترک در ابتدای آزمایش نیز می‌تواند معیاری برای تشخیص میزان سختی باشد.

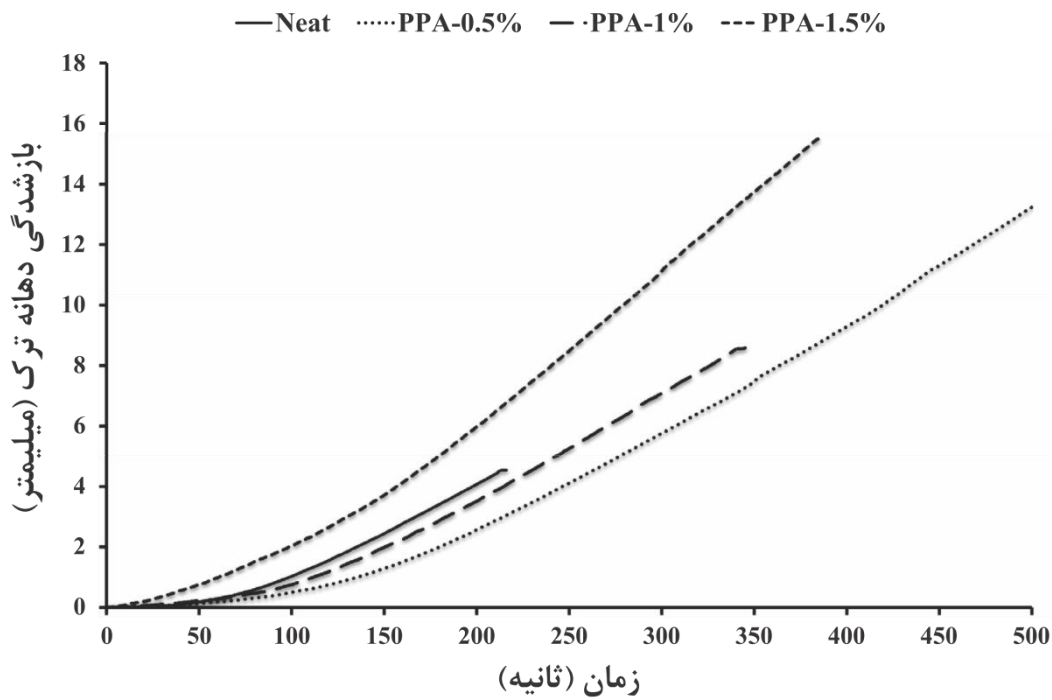
بررسی رفتار شکست و گسترش ترک مخلوط های آسفالتی اصلاح شده با پلی فسفریک اسید (PPA) بر اساس آزمایش خمش دیسک نیم استوانه (SCB)



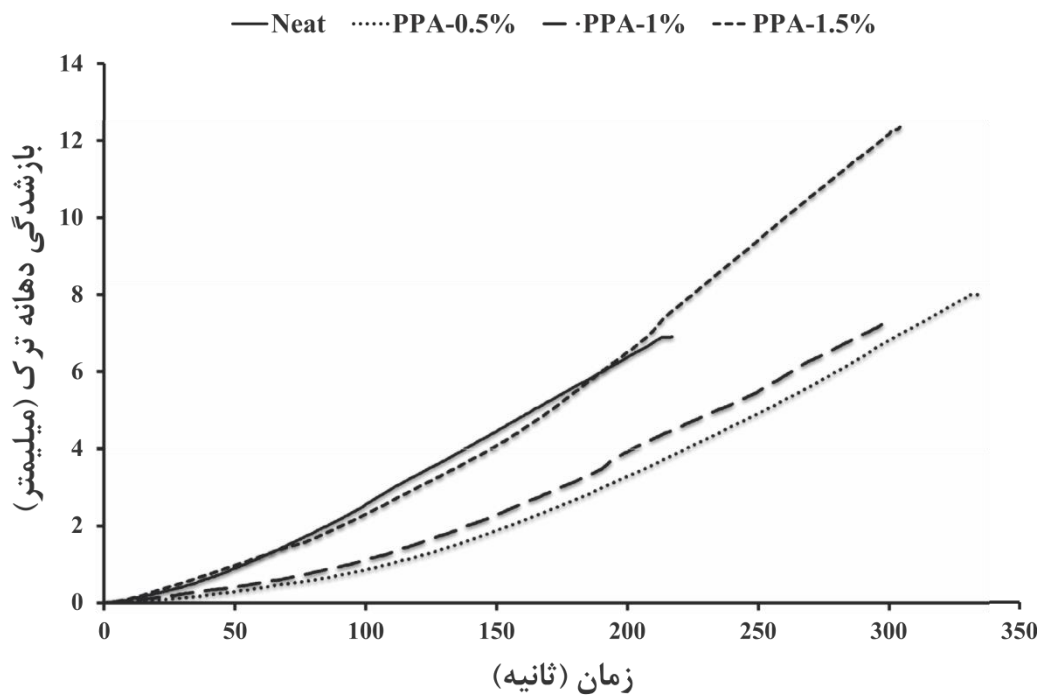
شکل ۹. بازشدگی دهانه ترک، بر حسب زمان در دمای صفر درجه سلسیوس، برای نمونه ساخته شده با قیر خالص و نمونه های ساخت شده با قیر اصلاح شده با PPA



شکل ۱۰. بازشدگی دهانه ترک، بر حسب زمان در دمای ۱۰ درجه سلسیوس، برای نمونه ساخته شده با قیر خالص و نمونه های ساخت شده با قیر اصلاح شده با PPA



شکل ۱۱. بازشدگی دهانه ترک بر حسب زمان در دمای ۲۵ درجه سلسیوس برای نمونه ساخته شده با قیر خالص و نمونه‌های ساخت شده با قیر اصلاح شده با PPA



شکل ۱۲. بازشدگی دهانه ترک بر حسب زمان در دمای ۴۰ درجه سلسیوس برای نمونه ساخته شده با قیر خالص و نمونه‌های ساخت شده با قیر اصلاح شده با PPA

بررسی رفتار شکست و گسترش ترک مخلوط های آسفالتی اصلاح شده با پلی فسفریک اسید (PPA) بر اساس آزمایش خمش دیسک نیم استوانه (SCB)

نمونه‌های آزمایش شده در دماهای میانی داشته‌اند. برای توجیه این پدیده باید به خواص ویسکوالاستیک قیر توجه کرد. کمترین میزان بازشدگی دهانه ترک برای نمونه‌های آزمایش شده در دمای صفر درجه، کاملاً منطقی و قابل انتظار است و برای توجیه آن می‌توان به این نکته اشاره کرد که در دمای کم با علم به اینکه قیر مورد استفاده در مخلوط آسفالتی سفت و سخت شده است و بیشتر خواص الاستیک از خود نشان می‌دهد و شکل‌پذیری نمونه‌ها کاهش می‌یابد، در نتیجه، طبیعتاً میزان بازشدگی کمتری برای دهانه‌ی ترک مشاهده شده است. اما در ارتباط با این موضوع که بازشدگی دهانه‌ی ترک برای نمونه‌های آزمایش شده در دمای ۴۰ درجه سلسیوس از نمونه‌های آزمایش شده در دماهای میانی کمتر است، باید به این اصل توجه نمود که در دمای زیاد، ضمن آنکه شکل‌پذیری قیر افزایش یافته و خواص آن از حالت الاستیک فاصله می‌گیرد، اما میزان باربری قیر نیز توأمأ کاهش می‌یابد و منطقی است که پیش از آنکه دهانه ترک تغییرشکل زیادی پیدا کند آزمایش به انتهای خود رسیده باشد.

جدول ۵. مقادیر بازشدگی نهایی دهانه ترک در انتهای

آزمایش برای نمونه‌های ساخته شده با قیر خالص و قیر اصلاح شده با پلی فسفریک اسید در دماهای آزمایش صفر،

۱۰، ۲۵ و ۴۰ درجه سلسیوس

کد نمونه	مقادیر نهایی بازشدگی دهانه ترک (میلی متر)			
	صفر	۱۰	۲۵	۴۰
Neat	۲/۱۹	۹/۶۹	۴/۵۵	۶/۹۰
PPA-0.5%	۳/۱۱	۵/۴۹	۱۴/۲۹	۸/۰۱
PPA-1%	۳/۹۸	۶/۸۶	۸/۵۹	۷/۲۸
PPA-1.5%	۳/۸۱	۱۵/۶۸	۱۵/۵۱	۱۲/۳۶

افزودن پلی فسفریک اسید در این دما باعث افزایش بازشدگی دهانه ترک شده است. با توجه به شکل ۹، افزودن ۰/۵ و ۱ درصد پلی فسفریک اسید روند رشد بازشدگی ترک را بهبود بخشیده است و همچنین سرعت بازشدگی دهانه ترک (شیب خطوط در شکل بازشدگی ترک) با کاهش همراه بوده است. اما برای ۱/۵ درصد پلی فسفریک اسید، بازشدگی دهانه ترک در زمان کوتاه-تری آغاز شده است و در ابتدای آزمایش سرعت بازشدگی دهانه ترک نیز بیشتر می‌باشد. در دمای آزمایش ۱۰ درجه سلسیوس، با توجه به شکل عملکرد مخلوط آسفالتی ساخته شده با قیر خالص و مخلوط آسفالتی حاوی قیرهای اصلاح شده با پلی فسفریک اسید به یکدیگر نزدیک می‌باشد. در دماهای آزمایش ۲۵ و ۴۰ درجه سلسیوس، افزودن ۰/۵ و ۱ درصد پلی فسفریک اسید بازشدگی دهانه ترک را بهبود بخشیده و با سرعت کمتری پیشروی ترک صورت پذیرفته است. با این حال مخلوط حاوی ۱/۵ درصد پلی فسفریک اسید رفتاری مشابه نمونه ساخته شده با قیر خالص و یا بدتر از آن داشته است. لذا، به نظر می‌رسد محدود کردن استفاده از PPA به یک درصد امری ضروری است.

۲-۲-۴. تأثیر دما و اضافه کردن پلی فسفریک اسید بر

میزان بازشدگی نهایی دهانه ترک

با توجه به شکل‌های ۹ تا ۱۲ و همچنین جدول ۵ (که بازشدگی نهایی دهانه ترک را نشان داده است)، اینگونه مشاهده می‌شود که به صورت کلی، افزایش PPA تا ۱/۵ درصد وزنی قیر باعث افزایش میزان بازشدگی نهایی دهانه ترک می‌شود و همچنین افزایش دما از دمای صفر درجه باعث افزایش میزان بازشدگی نهایی دهانه ترک بوده است. با این حال، نمونه‌های آزمایش شده در دمای ۴۰ درجه سلسیوس میزان بازشدگی کمتری در مقایسه با

### ۳-۲-۴. بررسی توأم انرژی شکست و بازشدگی

#### دهانه ترک

بازشدگی دهانه‌ی ترک یک معیار مناسب برای میزان خرابی ایجاد شده در طول آزمایش خمش دیسک نیم-استوانه می‌باشد. بدیهی است هر چه این پارامتر مقدار بیشتری داشته باشد، میزان خرابی وارد شده به نمونه مخلوط آسفالتی بر اثر بارگذاری اعمال شده بیشتر می‌باشد و همچنین کاهش این پارامتر در یک بارگذاری مشخص با دمای یکسان نشان‌دهنده عملکرد بهتر مصالح خواهد بود. همچنین، انرژی شکست نیز معیاری شناخته شده و مناسب برای اندازه‌گیری تاب‌آوری مخلوط آسفالتی در برابر شکست بوده و افزایش این مقدار نشان‌دهنده‌ی افزایش مقاومت در برابر ترک‌خوردگی می‌باشد. در نتیجه، با در نظر گرفتن دیدگاه سازه‌ای - عملکردی، در یک دمای یکسان هرچه میزان انرژی شکست بیشتر بوده و بازشدگی دهانه ترک کمتر باشد، مقاومت نمونه‌ها در برابر شکست بیشتر خواهد بود. لذا، شاخص ترکیبی انرژی شکست - بازشدگی (حاصل تقسیم مقدار انرژی شکست تقسیم بر بازشدگی دهانه ترک) می‌تواند به عنوان معیاری مناسب جهت بررسی تأثیر درصد‌های مختلف افزودنی پلی‌فسفریک اسید بر رفتار شکست مخلوط آسفالتی لحاظ شود. شکل ۱۳ این پارامتر را برای کلیه نمونه‌ها در دماهای مختلف آزمایش نشان داده است. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، در دمای صفر درجه سلسیوس، افزایش مقدار استفاده از PPA موجب کاهش این شاخص و در دمای ۱۰ درجه سلسیوس، افزایش مقدار مصرف پلی‌فسفریک اسید تا حداکثر ۱٪ موجب بهبود شاخص موردنظر نسبت به نمونه ساخته شده با قیر خالص می‌شود. در مورد دماهای ۲۵ و ۴۰ درجه سلسیوس، شرایط مشابه دمای ۱۰ درجه سلسیوس بوده و افزایش مقدار مصرف پلی‌فسفریک اسید تا ۱٪ موجب بهبود شاخص انرژی شکست - بازشدگی گردیده است. بنابراین، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که درصد بهینه

مصرف PPA برای دماهای میانی ۱٪ وزنی قیر خالص می‌باشد.

#### ۵. نتیجه‌گیری

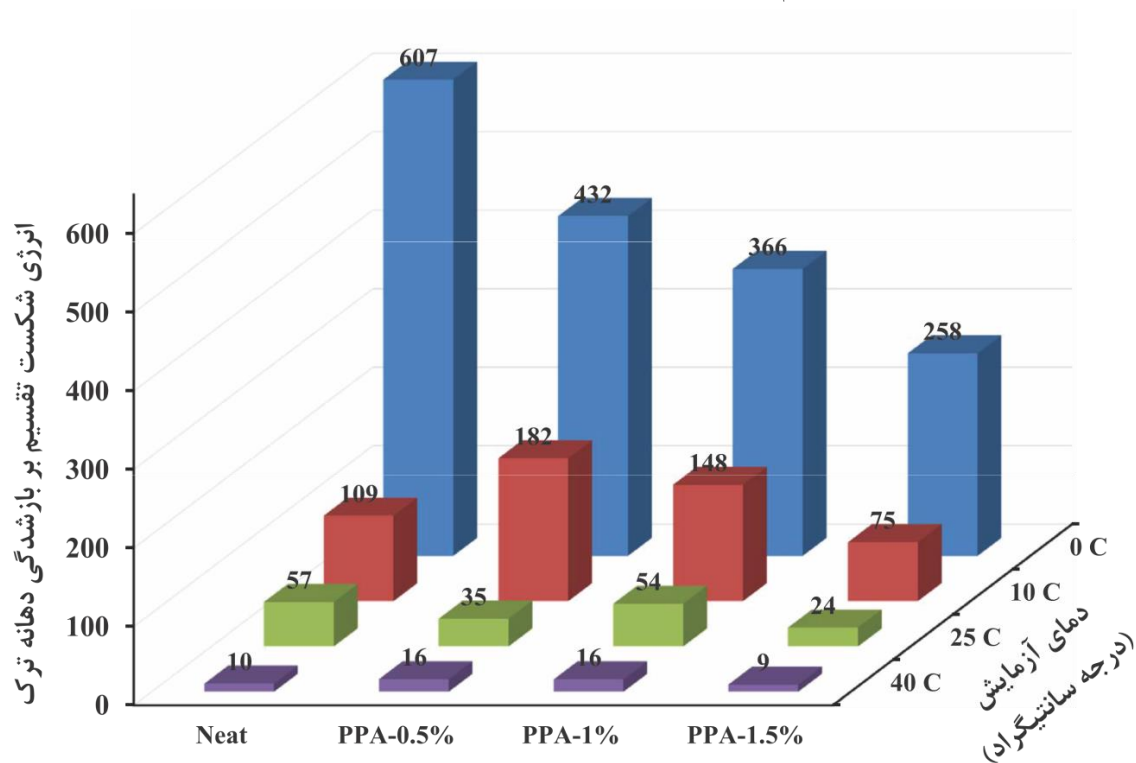
در این پژوهش، تأثیر اضافه کردن افزودنی پلی‌فسفریک اسید بر رفتار شکست و گسترش ترک در مخلوط‌های آسفالتی گرم متداول مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور، با تکیه بر تحقیقات پیشین، سه مقدار مختلف (۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد وزنی) برای افزودن پلی‌فسفریک اسید به قیر انتخاب شده و پس از اصلاح قیر مخلوط‌های آسفالتی مورد نظر با استفاده از دستگاه پرس‌باکس ساخته شده است. سپس نمونه‌های آزمایشگاهی لازم جهت انجام آزمایش خمش دیسک نیم‌استوانه ساخته شده و این نمونه‌ها در پنج دمای مختلف (۱۰-، صفر، ۱۰، ۲۵ و ۴۰ درجه سلسیوس) مورد آزمایش قرار گرفتند. خروجی اصلی آزمایش نمودار نیرو- تغییر مکان بوده است. در زمان انجام آزمایش خمش دیسک نیم‌استوانه (SCB)، در فواصل زمانی یک ثانیه، از نمونه‌ها عکس‌برداری شده تا بازشدگی ترک در طول انجام آزمایش قابل ارزیابی باشد. سپس، با استفاده از روش پردازش تصویر بازشدگی ترک اندازه‌گیری شده است. بر اساس تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی به دست آمده، یافته‌های زیر قابل ارائه می‌باشد:

- افزایش درصد استفاده از پلی‌فسفریک اسید موجب افزایش مقاومت شکست مخلوط آسفالتی در دمای ۱۰- درجه سلسیوس گردیده است.
- شکست ناگهانی نمونه‌های مخلوط آسفالتی با افزایش دما همواره کاهش می‌یابد و در دماهای زیاد، شکست ترد و ناگهانی اتفاق نخواهد رخ داد.
- شیب خط نمودار بازشدگی ترک بر حسب زمان، نشان‌دهنده‌ی سرعت بازشدگی دهانه



بررسی رفتار شکست و گسترش ترک مخلوط های آسفالتی اصلاح شده با پلی فسفریک اسید (PPA) بر اساس آزمایش خمش دیسک نیم استوانه (SCB)

ترک می باشد. سرعت بازشدگی دهانه ترک با دمای آزمایش رابطه‌ی مستقیم دارد.



شکل ۱۳. پارامتر انرژی شکست - بازشدگی دهانه ترک برای دماهای صفر، ۱۰، ۲۵ و ۴۰ درجه سلسیوس برای نمونه ساخته شده با قیر خالص و کلیه نمونه‌های ساخته شده با پلی فسفریک اسید

- بر اساس شاخص انرژی شکست - بازشدگی، مصرف PPA در دماهای میانی ۱۰، ۲۵ و ۴۰ درجه سلسیوس تا ۱٪ وزنی قیر خالص موجب بهبود قابل توجه رفتار شکست و گسترش ترک مخلوط آسفالتی می شود. لذا، این درصد می-تواند به عنوان درصد قیر بهینه در نظر گرفته شود.
- افزایش PPA تا ۱/۵ درصد وزنی قیر باعث افزایش میزان بازشدگی نهایی دهانه ترک و همچنین افزایش دما از دمای صفر درجه باعث افزایش میزان بازشدگی نهایی دهانه ترک می-شود.
- شاخص ترکیبی انرژی شکست - بازشدگی (حاصل تقسیم مقدار انرژی شکست تقسیم بر بازشدگی دهانه ترک) می تواند به عنوان معیاری مناسب جهت بررسی تأثیر افزودنی پلی فسفریک اسید با درصدهای مختلف بر رفتار شکست مخلوط آسفالتی لحاظ شود.

## ۶. مراجع

- Aflaki, S. and Hajikarimi, P. 2012. "Implementing viscoelastic rheological methods to evaluate low temperature performance of modified asphalt binders". *Constr. Build. Mater.*, 36: 110-118.
- Aflaki, S. and Tabatabaee, N. 2009. "Proposals for modification of Iranian bitumen to meet the climatic requirements of Iran". *Constr. Build. Mater.*, 23(6): 2141-2150.
- Alexander, S. H. 1973. "Method of treating asphalt". US Patent.
- ASTM D8044-16. 2016. "Standard test method for evaluation of asphalt mixture cracking resistance using the semi-circular bend test (SCB) at intermediate temperatures". ASTM International, West Conshohocken, PA.
- AASHTO TP105-13. 2019. "Standard method of test for determining the fracture energy of asphalt mixtures using the semicircular bend geometry (SCB)".
- Du, G. 2010. "Implementation of the SuperPave IDT analysis procedure". Master of Science Thesis, KTH Architecture and the Built Environment, Stockholm, Sweden.
- Elseifi, M. A., Mohammad, L. N., Ying, H. and Cooper III, S. 2012. "Modeling and evaluation of the cracking resistance of asphalt mixtures using the semi-circular bending test at intermediate temperatures. *Road Mater. Pavement Design*, 13(S1): 124-139.
- Hajikarimi, P. 2018. "Numerical modeling of crack propagation of modified asphalt mixtures based on viscoelasticity theorem". PhD Dissertation, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran. (In Persian)
- Hajikarimi, P., Fakhari Tehrani, F., Moghadas Nejad, F., Abasi, J., Rahi, M., Khodaii, A. and Petit, C. 2018. "Generalized fractional viscoelastic modeling of low temperature characteristics of asphalt binders modified with polyphosphoric acid and distillate aromatic extracts oil". *J. Mater. Civ. Eng.*, 30(7): 04018147.
- Hajikarimi, P., Rahi, M. and Moghadas Nejad, F. 2015. "Comparing different rutting specification parameters using high temperature characteristics of rubber-modified asphalt binders. *Road Mater. Pavement Design*, 16(4): 751-766.
- Haslett, K. E. 2018. "Evaluation of cracking indices for asphalt mixtures using SCB tests at different temperatures and loading rates". Master Thesis, University of New Hampshire, Durham.
- Hoare, T. R. and Hesp, S. A. 2000. "Low-temperature fracture testing of asphalt binders: regular and modified systems". *Transport. Res. Record*, 1728(1): 36-42.
- Jiang, J., Ni, F., Dong, Q., Wu, F. and Dai, Y. 2018. "Research on the fatigue equation of asphalt mixtures based on actual stress ratio using semi-circular bending test. *Constr. Build. Mater.*, 158: 996-1002.
- Kim, Y. R. 2008. "Modeling of asphalt concrete". McGraw-Hill, N. Y.
- Kuruppu, M. D. and Chong, K. P. 2012. "Fracture toughness testing of brittle materials using semi-circular bend (SCB) specimen". *Eng. Fract. Mech.*, 91: 133-150.
- Li, X. and Marasteanu, M. 2004. "Evaluation of the low temperature fracture resistance of asphalt mixtures using the semi circular bend test (with discussion)". *J. Assoc. Asphalt Paving Technol.*, 73: 401-426.
- Moghadas Nejad, F., Shahabi, M., Rahi, M., Hajikarimi, P. and Kazemifard, S. 2017. "An investigation on the effect of SBS+ vacuum bottoms residue modification on rheological characteristics of asphalt binder". *Petrol. Sci. Technol.*, 35(22): 2115-2120.
- Saha, G. and Biligiri, K. P. 2017. "Stato-dynamic response analyses through semi-circular bending test: Fatigue life prediction of asphalt mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 150: 664-672.
- Seo, Y. 2003. "A comprehensive study of crack growth in asphalt concrete using fracture mechanics". PhD Dissertation, North Carolina State University, USA.
- Wagnoner, M. P., Buttlar, W. and Paulino, G. H. 2005. "Disk-shaped compact tension test for asphalt concrete fracture". *Exp. Mech.*, 45(3): 270-277.
- Zegeye, E. T., Moon, K. H., Turos, M., Clyne, T. R. and Marasteanu, M. O. 2012. "Low temperature fracture properties of polyphosphoric acid modified asphalt mixtures". *J. Mater. Civ. Eng.*, 24(8): 1089-1096.