

## ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر میان‌لایه مستهلک‌کننده ترک بر مشخصات مکانیک شکست مخلوط‌های آسفالتی

هادی باغانی پور، دانشجوی کارشناسی‌ارشد راه‌وترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود

سیدعلی حسینی\*، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود  
ایمان آقایان، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود

Email: ahosseini@shahroodut.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۰۱ - پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۰۵

### چکیده

امروزه، با توجه به کمبود منابع انرژی، نقش اقتصادی و زیست‌محیطی استفاده مجدد از مصالح آسفالتی بازیافتی بر کسی پوشیده نیست. یکی از کاربردهای مصالح بازیافتی، استفاده در لایه‌های مختلف روسازی‌های آسفالتی می‌باشد. با توجه به اهمیت حفظ منابع طبیعی و محیط‌زیست و همچنین رایج بودن ترک‌های انعکاسی در روسازی‌های آسفالتی که روی روسازی‌های قدیمی اجرا می‌شوند، در این پژوهش، مشخصات مکانیک شکست تیرچه‌های آسفالتی با چهار نوع میان‌لایه مختلف (آسفالت ماسه‌ای، اساس تثبیت شده با سیمان، آسفالت بازیافتی و آسفالت بازیافتی تثبیت شده با قیر) و سه حالت قرارگیری ترک در نمونه (ترک میانی، ترک کناری و ترک دوگانه) با استفاده از آزمون خمش سه‌نقطه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته است. هدف از این تحقیق، بررسی تأثیر نوع میان‌لایه بر سرعت و نرخ رشد ترک‌های انعکاسی بوده است. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده عملکرد مناسب میان‌لایه آسفالت بازیافتی تثبیت شده با قیر نسبت به بقیه میان‌لایه‌ها می‌باشد. همچنین، نیروی گسیختگی در نمونه‌های با میان‌لایه آسفالت بازیافتی تثبیت شده با قیر نسبت به سایر نمونه‌ها بیشتر است؛ اما انرژی شکست آن، به دلیل تغییر شکل گسیختگی کمتر نسبت به میان‌لایه آسفالت ماسه‌ای، کمتر است که بدین منظور می‌توان درصد قیر لازم برای تثبیت آسفالت بازیافتی را افزایش داد و یا از مواد جوان‌ساز استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: آسفالت بازیافتی، اساس تثبیت شده با سیمان، آسفالت ماسه‌ای، مکانیک شکست

### ۱. مقدمه

روکش روی لایه روسازی قدیمی ترک‌خورده قرار می‌گیرد، پس از مدتی، ترک‌های موجود در لایه‌ی زیرین به لایه‌ی روکش منتقل می‌شوند. دلیل اصلی انتقال ترک‌های قدیمی به روکش جدید را می‌توان حرکت

اجرای لایه روکش روی روسازی‌های قدیمی یکی از پُرکاربردترین روش‌های تعمیر و نگهداری در روسازی‌های انعطاف‌پذیر می‌باشد. وقتی یک لایه

همچنین کاهش هزینه اجرای میان‌لایه، در این تحقیق، عملکرد آسفالت بازیافتی در کنار دو میان‌لایه متداول دیگر مورد ارزیابی قرار گرفته است. میان‌لایه‌های استفاده شده در این تحقیق شامل آسفالت ماسه‌ای، اساس تثبیت شده با سیمان، آسفالت بازیافتی و آسفالت بازیافتی تثبیت شده با قیر می‌باشند. نمونه‌های آسفالتی از سه لایه، متشکل از لایه ترک‌خورده زیرین، میان‌لایه و لایه روکش ساخته شده‌اند. ابتدا یک لایه آسفالتی با ایجاد انواع ترک در آن (ترک میانی، ترک دوگانه و ترک کناری) تهیه شده و سپس لایه میانی روی آن اجرا گردید و در نهایت لایه روکش روی میان‌لایه اجرا و متراکم شد. سپس، به منظور بررسی تأثیر این میان‌لایه‌ها بر رشد و انتشار ترک‌های انعکاسی، به کمک آزمون خمش سه‌نقطه‌ای، مشخصات مکانیک شکست نمونه‌ها ارزیابی شده است.

## ۲. پیشینه تحقیق

پژوهشگران متعددی به شکل عددی، تحلیلی، آزمایشگاهی و بررسی میدانی به بررسی تأثیر میان‌لایه‌ها پرداخته‌اند. لذا، در این بخش سعی شده است نتایج تحقیق افراد مختلف در این زمینه بیان گردد.

خدایی و همکاران (۲۰۰۹) اثر ژئوسنتتیک‌ها را در کاهش ترک‌های انعکاسی در روکش‌های آسفالتی بررسی کردند. هدف آن‌ها ارزیابی تأثیر استفاده از ژئوگرید و محل قرارگیری آن در لایه‌ی روکش روی شیارشدگی و ترک‌های انعکاسی بود. محل قرارگیری ژئوگرید، دما، میزان بازشدگی ترک‌ها (عرض ترک) و نوع روسازی زیرین (آسفالتی و بتنی) به عنوان متغیرهای تحقیق در نظر گرفته شده بود. نتایج بررسی‌های آنان نشان داد که قرارگیری ژئوگرید در یک‌سوم پایینی ضخامت لایه روکش بهترین نتیجه را خواهد داد و سرعت انتشار ترک‌های انعکاسی در این حالت کمتر است. وقتی میان‌لایه ژئوسنتتیک در وسط یا یک‌سوم پایینی لایه روکش باشد این کار لایه‌روکش را به

لایه روسازی قدیمی در اطراف ترک در اثر ترافیک و تغییرات دما و تولید تنش‌های کششی و برشی در لایه روکش بیان نمود.

هنگامی که مقدار این تنش‌ها از مقاومت لایه روکش بیشتر شود، ترک‌ها در این لایه گسترش می‌یابند که این امر موجب کاهش عمر روکش‌های جدید و اتلاف هزینه‌ها خواهد شد. این گسترش الگوی ترک خوردگی از روسازی ترک‌خورده زیرین به لایه روکش جدید را ترک انعکاسی<sup>۱</sup> می‌گویند (لیتون، ۱۹۸۹؛ شوکلا و همکاران، ۲۰۱۱). ترک انعکاسی پدیده‌ای پیچیده است و عوامل متعددی در وقوع آن مؤثر هستند. به همین دلیل، نمی‌توان به‌طور کامل از وقوع آن جلوگیری کرد و تنها می‌توان به کمک روش‌های مختلف آن را به تعویق انداخت که متداول‌ترین روش، قرار دادن میان‌لایه<sup>۲</sup> بین لایه روکش و روسازی قدیمی است. در اکثر تحقیقات انجام شده در مطالعه ترک‌های انعکاسی، از محصولات ژئوسنتتیک به عنوان میان‌لایه استفاده شده است. در کنار مزایای ذکر شده برای استفاده از این محصولات به عنوان میان‌لایه، هزینه این محصولات و کاهش عملکرد در دماهای زیاد، اصلی‌ترین نکات منفی قابل توجه اشاره شده در استفاده از این محصولات می‌باشد (خدایی و همکاران، ۲۰۰۹؛ کومار و همکاران، ۲۰۱۸؛ تم و همکاران، ۲۰۲۰).

به منظور کاهش هزینه‌های اجرای میان‌لایه، یکی از راهکارهای مناسب، استفاده از مصالح آسفالت بازیافتی<sup>۳</sup> به عنوان میان‌لایه است. در دنیا، حجم زیادی از آسفالت تخریب شده در محیط‌زیست رها می‌شود. در صورتی که این مصالح می‌تواند بازیافت شده و دوباره همراه با اصلاحات، یا بدون اصلاحات، به عنوان میان‌لایه در روسازی مورد استفاده قرار گیرد (دیو و همکاران، ۲۰۱۹؛ هوئی، ۲۰۲۰). با توجه به مزایای زیست‌محیطی فراوان استفاده مجدد از مصالح آسفالت بازیافتی و

<sup>1</sup> Reflection cracking

<sup>2</sup> Interlayer

<sup>3</sup> Recycled Asphalt Pavement (RAP)

تعداد سیکل عبور چرخ برای گسترش ترک تا گسیختگی نمونه‌های با و بدون میان‌لایه جاذب تنش در دماهای مختلف آزمایش (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه سلسیوس) ثبت شده است. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که پتانسیل میان‌لایه‌های جذب‌کننده‌ی تنش در جلوگیری از رشد ترک در لایه‌ی روکش به عوامل مختلفی مانند سختی و ضخامت آن‌ها، ضخامت روکش، میزان بار وارده به سطح روسازی و دما بستگی دارد. بر اساس نتایج این تحقیق، ضخامت میان‌لایه استفاده شده باید در حداقل مقدار ممکن محدود گردد تا میان‌لایه عملکرد مناسبی داشته باشد. همچنین، نیاز به میان‌لایه مستهلک‌کننده تنش در مسیرهای با بار سنگین با توجه به نتایج آزمایش برای تنش‌های ۰/۶ و ۱/۱ مگاپاسکال نشان داده شده است. بهترین عملکرد میان‌لایه‌های استفاده شده در این تحقیق در بین دماهای آزمایش، در دمای ۲۰ درجه سلسیوس مشاهده شده است.

یو و همکاران (۲۰۱۳) عملکرد چند نوع میان‌لایه جاذب تنش را برای مقابله با ترک‌های انعکاسی با استفاده از آزمایش چرخ محرک هامبورگ<sup>۶</sup> مورد مقایسه قرار دادند. این میان‌لایه‌ها شامل: بتن ماسه آسفالت لاستیکی<sup>۷</sup>، بتن ماسه آسفالتی اصلاح شده با SBS<sup>۸</sup>، کفپوش روسازی فایبرگلاس- پلی‌استر<sup>۹</sup> و غشای جاذب تنش بودند. بتن ماسه آسفالت لاستیکی با تعداد متوسط ۵۵۲۰۰ سیکل در آزمایش چرخ محرک هامبورگ عملکرد بهتری نسبت به سایرین در برابر گسترش ترک‌های انعکاسی داشته است. بعد از این میان‌لایه، کفپوش حاوی الیاف شیشه و پلی‌استر با تعداد متوسط ۳۹۰۰۰ سیکل، در رتبه دوم قرار گرفته است. در این تحقیق، نمونه کنترل بدون میان‌لایه با تعداد متوسط ۷۴۰۰ سیکل، کمترین مقاومت در برابر

دوبخش بالایی و پایینی تقسیم می‌کند. این طراحی از آن جهت بهینه است که بخش پایینی لایه روکش به عنوان لایه‌ی تسطیح‌کننده عمل کرده و در نتیجه جانمایی و چسبندگی لایه روکش را با لایه‌های روسازی تضمین می‌کند. همچنین، آن‌ها دریافتند که تأثیر ژئوگرید با افزایش عرض ترک از ۱۰ به ۲۰ میلی-متر کاهش نمی‌یابد. اما با افزایش دما از ۲۰ به ۶۰ درجه سلسیوس تأثیر ژئوگرید کاهش می‌یابد.

زامورا- بارزا و همکاران (۲۰۱۱) عملکرد سه نوع میان‌لایه ژئوستنتیک در توقف ترک‌های انعکاسی و بهبود عملکرد خستگی آسفالت روکش در روسازی انعطاف‌پذیر را مورد ارزیابی قرار دادند. در این تحقیق، از آزمایش‌های خستگی خمشی<sup>۱</sup>، مقاومت برشی، مقاومت چسبندگی و مقاومت کششی در ارزیابی عملکرد مخلوط‌های حاوی سه نوع ژئوستنتیک استفاده شده است. همچنین، از تکنیک همبستگی تصویر دیجیتال<sup>۲</sup> به منظور ارزیابی مد خرابی نمونه‌ها کمک گرفته شده است. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده کاهش گسترش ترک‌های انعکاسی در لایه روکش با استفاده از میان‌لایه ژئوستنتیک می‌باشد. هر چند به لایه لایه<sup>۳</sup> شدن روکش به عنوان نکته منفی استفاده از این میان‌لایه نیز اشاره گردیده است. نتیجه کلی به دست آمده از این تحقیق حاکی از افزایش عمر خستگی و کنترل ترک‌های انعکاسی با استفاده از میان‌لایه‌هایی با مقاومت چسبندگی و کششی زیاد می‌باشد.

در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی، آگندپ و همکاران (۲۰۱۳) مقاومت ترک خوردگی میان‌لایه‌ی جذب‌کننده‌ی تنش<sup>۴</sup> را تحت بارگذاری چرخ محرک<sup>۵</sup> مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، میزان شیارشدگی و

<sup>۱</sup>- Flexural fatigue testing

<sup>۲</sup>- Digital image correlation

<sup>۳</sup>- Delamination

<sup>۴</sup>- Stress Absorbing Membrane Interlayer (SAMI)

<sup>۵</sup>- Wheel tracking

<sup>۶</sup>- Hamburg wheel tracking tester

<sup>۷</sup>- Asphalt-rubber sand concrete

<sup>۸</sup>- Styrene-Butadiene-Styrene

<sup>۹</sup>- Fiberglass-polyester paving mat

روسازی ترک خورده قدیمی، آن را از یک جاده برداشت کرده و سپس ترک‌هایی با میزان بازشدگی (عرض) ۱۰ میلی‌متر و عمق ۲۵ و ۴۰ میلی‌متر در آن ایجاد نمودند. در مرحله‌ی بعد، پس از قرار دادن میان‌لایه‌های ژئوسنتتیک، روی آن‌ها را روکش کردند. آن‌ها با بررسی نتایج آزمایش‌های خود دریافتند که نمونه‌های دارای ترک با عمق ۲۵ میلی‌متر تعداد تکرار بار بیشتری را نسبت به نمونه‌های دارای ترک ۴۰ میلی‌متری تحمل کرده و میان‌لایه‌های ژئوسنتتیک با سختی اولیه نسبتاً کم، عملکرد بهتری نسبت به ژئوسنتتیک‌های با سختی نسبتاً زیاد داشتند. آن‌ها همچنین مشاهده کردند که در پایان عمرخستگی نمونه‌های آسفالتی، ترک‌ها در راستای افقی انتشار می‌یابند، که این انتشار افقی ترک‌ها هم اتصال لایه‌های جدید و قدیمی را کاهش می‌دهد و هم منجر به لایه‌لایه‌شدگی روسازی در ناحیه اتصال (بین لایه روسازی قدیمی و روکش) می‌شود.

عملکرد شیارشدگی، خستگی و توزیع تنش مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصد زیاد پودر لاستیک در تحقیق داسیلوا و همکاران (۲۰۱۷) مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق افزایش مقاومت شیارشدگی، خستگی و کاهش سرعت توزیع ترک در نمونه‌های حاوی پودر لاستیک نسبت به نمونه کنترل را نشان داده است. نتایج آزمایش شیارشدگی دو برابر بودن شیب شیارشدگی<sup>۱</sup> در نمونه‌های کنترل نسبت به نمونه حاوی پودر لاستیک را نشان داده است. بر اساس نتایج آزمایش خستگی که در این تحقیق در دمای ۲۰ درجه انجام شده، مقدار مدول سختی<sup>۲</sup> نمونه‌های دارای پودر لاستیک، به دلیل انعطاف‌پذیری بیشتر قیر حاوی لاستیک، کمتر از نمونه کنترل به دست آمده است. در آزمایش خستگی، تعداد سیکل بارگذاری تا رسیدن به ۵۰٪ سختی اولیه در نمونه‌های حاوی پودر لاستیک به‌طور متوسط شش برابر نمونه کنترل مشاهده

ترک‌های انعکاسی را نشان داده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده در این تحقیق، دلیل عملکرد فوق‌العاده میان‌لایه بتن ماسه آسفالت لاستیکی، توزیع تنش مؤثر توسط دانه‌های ریز و همچنین سختی کم این میان‌لایه بیان شده است.

در تحقیق انجام شده توسط دیزج و همکاران (۲۰۱۴) دلیل اصلی بیشتر خرابی‌های روسازی انعطاف‌پذیر، ترک‌خوردگی و شیارشدگی بیان شده است. همچنین، توزیع بار روی سطح بزرگتری از روسازی دلیل افزایش مقاومت باربری روسازی‌های دارای ژئوگرید بیان شده است. این تحقیق، عملکرد ژئوگریدهای دارای الیاف کربن و شیشه و همچنین تأثیر محل قرارگیری آن‌ها در روسازی آسفالتی در به تعویق انداختن رشد ترک‌های انعکاسی را با استفاده از آزمایش خستگی خمش چهارنقطه‌ای روی تیرهای آسفالتی با ابعاد mm ۵۰/۸×۶۳/۵×۳۸۱ طبق استاندارد AASHTO TP8 در چهار سطح کرنش مورد ارزیابی قرار داده است. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده کاهش قابل توجه توزیع ترک در نمونه‌های مسلح شده با ژئوگرید با الیاف کربن نسبت به نمونه‌های غیرمسلح می‌باشد. همچنین، قرارگیری ژئوگرید در یک سوم انتهایی لایه روکش، بهترین عملکرد را از خود نشان داده است. مشاهدات انجام شده در آزمایش خستگی نشان‌دهنده بیشتر بودن یکپارچگی نمونه‌های مسلح شده با ژئوگرید با الیاف کربن نسبت به ژئوگرید با الیاف شیشه و همچنین بازشدگی کمتر ترک در نمونه کربن‌دار می‌باشد. بیشترین مدول سختی خمشی در این تحقیق در نمونه‌های مسلح شده با الیاف کربن در یک سوم انتهایی لایه روکش مشاهده شده است.

در تحقیقی دیگر، سراید و کومار (۲۰۱۷) به بررسی نقش میان‌لایه‌های ژئوسنتتیک بر ترک‌های انعکاسی و همچنین بهبود عملکرد خستگی روکش‌ها در روسازی‌های آسفالتی پرداختند. آن‌ها به جای ساخت نمونه‌های آسفالتی برای شبیه‌سازی لایه

<sup>۱</sup> - wheel tracking slope

<sup>۲</sup> - Stiffness modulus

از آسفالت ریزدانه<sup>۳</sup>، اساس تثبیت شده با سیمان، آسفالت بازیافتی و آسفالت بازیافتی تثبیت شده با قیر به عنوان میان‌لایه استفاده شده است که دانه‌بندی آن‌ها بر اساس آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴، ۱۳۹۰) می‌باشد. دانه‌بندی مصالح سنگی مخلوط آسفالت گرم، آسفالت بازیافتی و آسفالت بازیافتی تثبیت شده با قیر، دانه‌بندی شماره ۵ و آسفالت ریزدانه، دانه‌بندی شماره ۶ آیین‌نامه انتخاب شده‌اند که در جدول ۳ نشان داده شده است. دانه‌بندی مصالح اساس تثبیت شده با سیمان در جدول ۴ ارائه شده است. گروه ترافیکی انتخابی نیز ترافیک سنگین در نظر گرفته شده است. آزمایش دانه‌بندی مصالح بر اساس استاندارد AASHTO T 27 (۲۰۱۴) انجام شده است. نتایج آزمایش‌های مشخصات و خصوصیات مصالح سنگی از جمله ارزش ماسه‌ای<sup>۴</sup>، درصد افت وزنی در مقابل سایش<sup>۵</sup>، درصد شکستگی<sup>۶</sup>، درصد تطویل و تورق<sup>۷</sup> و همچنین درصد افت وزنی در سولفات سدیم<sup>۸</sup> در جدول ۵ ارائه شده است.

شده است. نتایج به دست آمده در ارزیابی گسترش ترک در این تحقیق، افزایش مقاومت نمونه حاوی پودر لاستیک در برابر گسترش ترک در دمای ۴۰ درجه سلسیوس نسبت به نمونه کنترل را گزارش نموده است. وانگ و همکاران (۲۰۱۹) عملکرد چهار نوع میان‌لایه جاذب تنش<sup>۱</sup> را مورد مقایسه و بررسی قرار دادند. این میان‌لایه‌ها حاوی چهار نوع قیر: خالص، اصلاح شده با خرده لاستیک ضایعات تایر، اصلاح شده با ترکیب پلی‌آلفا آلفین آمورف<sup>۲</sup> و خرده لاستیک ضایعات تایر و اصلاح شده با SBS بودند. نتایج نشان داد که میان‌لایه‌های حاوی قیر اصلاح گردیده با SBS و قیر اصلاح شده با ترکیب پلی‌آلفا آلفین آمورف و ضایعات تایر بهترین عملکرد را در برابر ترک‌های انعکاسی نسبت به سایر میان‌لایه‌ها بروز داده‌اند.

اهمیت ارزیابی تأثیر میان‌لایه‌ها در جلوگیری از ترک‌های انعکاسی در نتایج کارهای انجام شده به خوبی نشان داده شده است. با توجه به تحقیقات و مطالعات انجام شده، می‌توان گفت که تا کنون به منظور مقابله با پدیده ترک‌های انعکاسی در روسازی‌های آسفالتی بیشتر از پارچه‌گونه‌ها و محصولات ژئوسنتتیک استفاده شده است. کاربرد این محصولات، علی‌رغم مزایای متعدد، موجب افزایش هزینه‌ها خواهد شد. در این تحقیق، از مواد ارزان‌قیمت و مصالح بازیافتی استفاده شده است، تا علاوه بر افزایش عمر روسازی، هزینه‌های اجرایی کاهش یابد.

### ۳. مواد، مصالح و روش آزمایش

#### ۳-۱. مواد و مصالح

در این تحقیق، برای تهیه‌ی نمونه‌های آسفالتی، از قیر ۶۰-۷۰ و برای اندود سطحی از قیر محلول (MC-250) شرکت نفت پاسارگاد استفاده شده که مشخصات آن‌ها در جداول ۱ و ۲ نشان داده شده است. همچنین،

<sup>۳</sup> - Sand asphalt

<sup>۴</sup> - Sand Equivalent Test (AASHTO T 176, 2008)

<sup>۵</sup> - Los Angeles Abrasion Test (AASHTO T 96, 2002)

<sup>۶</sup> - Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate (ASTM D5821, 2013)

<sup>۷</sup> - Flakiness Index and Elongation Index Tests (BS 812, 2000)

<sup>۸</sup> - Standard Method of Test for Soundness of Aggregate by Use of Sodium Sulfate (AASHTO T 104, 2011)

<sup>۱</sup> - Stress absorption interlayer

<sup>۲</sup> - Amorphous poly alpha olefin

جدول ۱. مشخصات و خصوصیات قیر خالص مصرفی

مقدار	مشخصات استاندارد		روش آزمایش		شرح آزمایش
	حداکثر	حداقل	ASTM	AASHTO	
۶۵	۷۰	۶۰	D-5	T-49	درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه (دهم میلی متر)
۰۱۵	-	-	D-70	T-228	وزن مخصوص در دمای ۲۵ درجه (گرم بر سانتی متر مکعب)
۱/۱	-	۱۰۰	D-113	T-51	مقدار کشش (سانتی متر) در دمای ۲۵ درجه
۱/۷	۵۶	۴۹	D-36	T-53	نقطه نرمی (°C)
۵۱	-	۹۹	D-2042	T-44	حلالیت در تتراکلرواتیلن (%)
۹۹	-	۲۳۲	D-92	T-48	درجه اشتعال روباز - کلوند (°C)
۳۰۲	-	-	D-2170	T-201	ویسکوزیته در دمای ۱۲۰ درجه (سانتی استوکس)
۷۵۰	-	-	D-2170	T-201	ویسکوزیته در دمای ۱۳۵ درجه (سانتی استوکس)
۳۵۴	-	-	D-2170	T-201	ویسکوزیته در دمای ۱۶۰ درجه (سانتی استوکس)
۱۳۴	-	-	D-2170	T-201	ویسکوزیته در دمای ۱۶۰ درجه (سانتی استوکس)
<b>لعاب نازک قیر (۵ ساعت در دمای ۱۶۳ °C)</b>					
۱/۰۲	۰/۸	-	D-1756	T-179	افت حرارتی (%)
۰	-	-			درجه نفوذ (بعد از افت حرارتی، دهم میلی متر)
۴۱	-	۵۴			نسبت درجه نفوذ بعد از آزمایش به درجه نفوذ اولیه (%)
۱/۱	-	۵۴			مقدار کشش قیر بعد از آزمایش در دمای ۲۵ درجه (سانتی متر)
۶۳	-	۵۰			
۵۰	-	۵۰			
<b>حساسیت حرارتی قیر</b>					
۱/۱۴					PI بر حسب درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه و نقطه نرمی
-۰					
۱/۸۷					PVN (درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه) و ویسکوزیته (سانتی استوکس در دمای ۱۳۵ درجه)
-۰					

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

جدول ۲. مشخصات و خصوصیات قیر محلول (MC-250)

روش آزمایش	حداکثر	حداقل	مشخصات
ASTM D 2170	۵۰۰	۲۵۰	ویسکوزیته کینماتیک (میلی متر مربع بر ثانیه) در ۶۰ °C
ASTM D 3143	-	۶۶	درجه اشتعال روباز (°C)

آزمون تقطیر

درصد حجمی مواد تقطیر شده در دماهای مختلف نسبت به آنچه در ۳۶۰ °C تقطیر می‌شود

ASTM D402	۲۰	-	در ۲۲۵ °C
-----------	----	---	-----------

ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر میان لایه مستهلک کننده ترک بر مشخصات مکانیک شکست مخلوط‌های آسفالتی

ASTM D402	۵۵	۵	در ۲۶۰ °C
ASTM D402	۹۰	۶۰	در ۳۱۶ °C
ASTM D402	-	۶۷	درصد حجمی مواد تقطیر شده در دماهای مختلف نسبت به آنچه در ۳۶۰ °C تقطیر می‌شود
آزمون روی پسماند تقطیر			
ASTM D5	۳۰۰	۱۲۰	درجه نفوذ در ۲۵ °C
ASTM D113	-	۱۰۰	شکل پذیری در ۲۵ °C در سانتی‌متر
ASTM D2042	-	۹۹	انحلال پذیری در تریکلرواتیلن (%)
ASTM D95	۰/۲	-	آب (%)

جدول ۳. دانه‌بندی مخلوط‌های آسفالتی (نشریه ۲۳۴، ۱۳۹۰)

درصد وزنی رد شده از هر الک		اندازه الک
دانه‌بندی شماره ۶	دانه‌بندی شماره ۵	
-	۱۰۰	۱۲/۵ میلی‌متر (اینچ ۱/۲)
۱۰۰	۹۰-۱۰۰	۹/۵ میلی‌متر (اینچ ۳/۸)
۸۰-۱۰۰	۵۵-۸۵	۴/۷۵ میلی‌متر (شماره ۴)
۶۵-۱۰۰	۳۲-۶۷	۲/۳۶ میلی‌متر (شماره ۸)
۴۰-۸۰	-	۱/۱۸ میلی‌متر (شماره ۱۶)
۲۵-۶۵	-	۰/۶ میلی‌متر (شماره ۳۰)
۷-۴۰	۷-۲۳	۰/۳ میلی‌متر (شماره ۵۰)
۳-۲۰	-	۰/۱۵ میلی‌متر (شماره ۱۰۰)
۲-۱۰	۲-۱۰	۰/۰۷۵ میلی‌متر (شماره ۲۰۰)

اندازه الک	درصد وزنی رد شده از هر الک
۲۵ میلی متر (۱/۲ اینچ)	۱۰۰
۱۹ میلی متر (۳/۸ اینچ)	-
۹/۵ میلی متر (شماره ۴)	۵۰-۸۵
۴/۷۵ میلی متر (شماره ۸)	۳۵-۶۵
۲ میلی متر (شماره ۱۶)	۲۵-۵۰
۰/۶ میلی متر (شماره ۳۰)	-
۰/۴۲۵ میلی متر (شماره ۵۰)	۱۵-۳۰
۰/۰۷۵ میلی متر (شماره ۱۰۰)	۲-۸

نتایج			
مشخصات سنگدانه ها	مخلوط درشت دانه	ماسه ۰-۶ میلی متر	فیلر
ارزش ماسه ای	-	۹۳	-
درصد افت وزنی در مقابل سایش (لس آنجلس)	۵۰۰	-	-
درصد شکستگی مصالح روی الک شماره ۴	۲۳	-	-
درصد تطویل و تورق	در یک وجه	-	-
	در دو وجه	۸۸	-
درصد افت وزنی در سولفات سدیم	تطویل	۱۱	-
	تورق	۷	-
درشت دانه	۶۱	-	-
ریزدانه	-	۲۲	-

لایه روسازی زیرین در نظر گرفته شد. جانمایی ترکها بر اساس محل اعمال بار و تکیه گاهها در آزمایش خمش سه نقطه ای است. این سه حالت عبارتند از:

- ◀ یک ترک در وسط نمونه (ترک میانی)
- ◀ دو ترک هر کدام وسط تکیه گاه و محل اعمال بار به نمونه (ترک دو گانه)

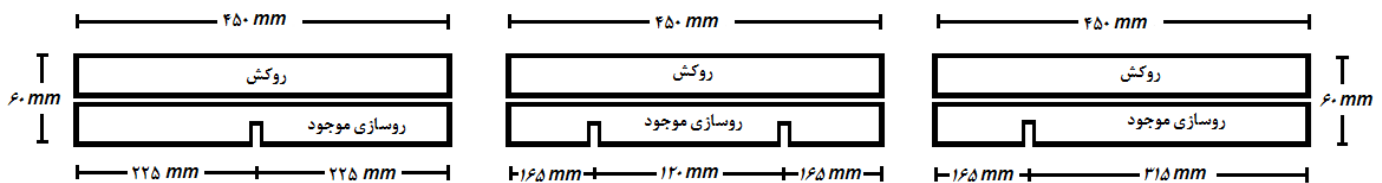
عرض (بازشدگی) و عمق ترکهای موجود در لایه روسازی زیرین به ترتیب ۲ میلی متر و ۱۵ میلی متر (نصف ضخامت لایه روسازی زیرین) بر اساس ابعاد متداول استفاده شده در مطالعات پیشین در نظر گرفته شده است. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، سه حالت برای محل قرارگیری این ترکها در



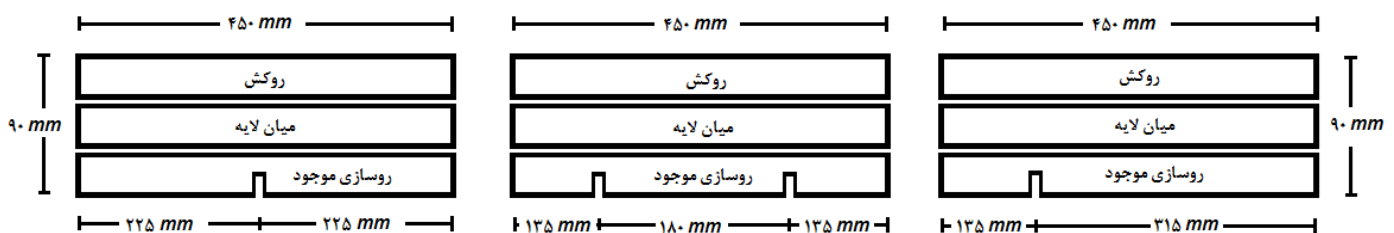
یک ترک وسط تکیه‌گاه و محل اعمال بار به نمونه (ترک کناری)

نمونه‌های دال آسفالتی تهیه شده در این تحقیق، همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، شامل نمونه‌های کنترلی و نمونه‌های دارای میان‌لایه می‌باشند. به منظور ساخت دال‌های آسفالتی از میکسر، جک هیدرولیکی و یک قالب تراکم (شکل ۲) استفاده گردید.

### ۲-۳. تهیه نمونه‌های دال آسفالتی



### الف) نمونه‌های کنترلی



### ب) نمونه‌های با میان‌لایه مستهلک کننده ترک

شکل ۱. شماتیکی از نمونه‌های آزمایش و محل قرارگیری ترک‌ها



شکل ۲. جک هیدرولیکی و قالب تراکم دال‌های آسفالتی (سمت راست) میکسر آسفالت (سمت چپ)

پیرشدگی بلندمدت روی نمونه اعمال شود. طول و عرض این لایه، همانطور که گفته شد، به ترتیب ۴۵ سانتی‌متر و ۱۵ سانتی‌متر است و ضخامت آن ۳ سانتی‌متر می‌باشد.

در مرحله دوم، پس از ساخت لایه روسازی زیرین، برای اجرای لایه‌میانی مستهلک‌کننده ترک، ابتدا اندود سطحی روی لایه زیرین اجرا شد و پس از گذشت مدت زمان لازم برای گیرش قیر محلول، لایه‌میانی روی آن اجرا گردید. ضخامت تمام این میان‌لایه‌ها نیز ۳۰ میلی‌متر است.

#### لایه‌میانی آسفالت ماسه‌ای:

پس از اختلاط مصالح سنگی دانه‌بندی شده (دانه‌بندی ۶ جدول ۳) و قیر به کمک میکسر، به منظور اعمال شرایط پیرشدگی کوتاه‌مدت، آسفالت متراکم نشده به مدت ۴ ساعت در دمای ۱۳۵ درجه سلسیوس قرار گرفته و سپس مخلوط آسفالت ماسه‌ای (آسفالت ریزدانه) داخل قالب تراکم روی لایه روسازی زیرین ریخته و متراکم شده است.

#### لایه‌میانی اساس تثبیت شده با سیمان:

برای ساخت و اجرای این میان‌لایه نیز ابتدا مصالح سنگی طبق دانه‌بندی ارائه شده در جدول ۴ دانه‌بندی شد. سپس، با مقدار مورد نیاز سیمان مخلوط گردید. مقدار سیمان مورد نیاز برای تثبیت مصالح با توجه به مقادیر متداول استفاده شده در تحقیقات پیشین و همچنین با توجه به دانه‌بندی مصالح اساس، ۵/۵ درصد انتخاب شد. سپس در مرحله بعد، آب مورد نیاز به مخلوط اضافه شد که این مقدار رطوبت با استفاده از آزمایش تراکم که در بخش ۳-۳ ارائه شده، تعیین گردید. پس از اختلاط کامل مصالح، آب و سیمان مخلوط به دست آمده روی لایه روسازی زیرین ریخته و متراکم شد (شکل ۳).

#### لایه‌میانی آسفالت بازیافتی:

برای اجرای این میان‌لایه، مصالح آسفالت بازیافتی مطابق دانه‌بندی شماره ۵ جدول ۳ دانه‌بندی و به مدت

ابعاد این قالب تراکم،  $450 \text{ mm}^L \times 150 \text{ mm}^W \times 180 \text{ mm}^H$  می‌باشد. برای تراکم مخلوط‌های آسفالتی، ابتدا یک نمونه مارشال با درصد قیر بهینه تهیه و وزن مخصوص آن اندازه‌گیری شد. سپس، مطابق با آیین‌نامه روسازی راه‌های ایران (۱۳۹۰)، ۹۷٪ وزن مخصوص نمونه مارشال به عنوان وزن مخصوص نمونه‌های دال آسفالتی در نظر گرفته شد. با داشتن وزن مخصوص دال آسفالتی مورد نیاز و مشخص بودن سطح قالب و ارتفاع لایه مورد نظر، وزن آسفالت مورد نیاز برای تراکم هر لایه محاسبه شده است. نمونه‌های کنترلی شامل دولایه (روسازی زیرین و روکش) هستند که ضخامت هر کدام از لایه‌ها ۳۰ میلی‌متر است و نمونه‌های دارای میان‌لایه نیز متشکل از سه لایه (روسازی زیرین، میان‌لایه و روکش) هستند که ضخامت هر لایه از آن‌ها نیز ۳۰ میلی‌متر می‌باشد. بدین ترتیب، ابعاد نمونه‌های کنترلی  $450 \text{ mm}^L \times 150 \text{ mm}^W \times 60 \text{ mm}^H$  است و ابعاد نمونه‌های دارای میان‌لایه نیز  $450 \text{ mm}^L \times 150 \text{ mm}^W \times 90 \text{ mm}^H$  می‌باشد.

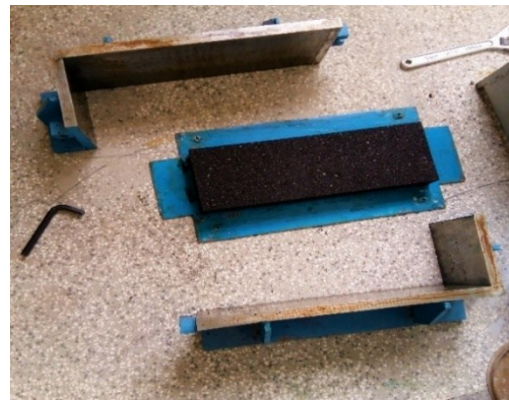
در مرحله اول، به منظور شبیه‌سازی لایه روسازی ترک‌خورده زیرین، یک صفحه فولادی، که یک تیغه فولادی نیز به صورت قائم روی آن نصب شده، در کف قالب قرار داده شد. پس از دانه‌بندی مصالح سنگی طبق دانه‌بندی ارائه شده در جدول ۳، آن‌ها به همراه قیر درون گرمخانه (آون) قرار گرفته و سپس با هم مخلوط شدند. در این قسمت، به منظور اعمال شرایط پیرشدگی بلندمدت ابتدا آسفالت متراکم نشده طبق استاندارد AASHTO R30 (۲۰۰۲) به مدت ۴ ساعت در دمای ۱۳۵ درجه سلسیوس قرار گرفته است تا شرایط پیرشدگی کوتاه‌مدت اعمال شود. در مرحله بعد، مخلوط آسفالتی کوتاه‌مدت پیر شده درون قالب تراکم ریخته شد و متراکم گردید. بعد از تراکم، به منظور جلوگیری از اعوجاج دال ساخته شده، نمونه داخل یک کمر بند فلزی قرار گرفته و به مدت ۵ روز در دمای ۸۵ درجه سلسیوس قرار داده شده است تا شرایط

این میان‌لایه نیز مشابه میان‌لایه آسفالت ریزدانه است؛ با این تفاوت که پس از قرار دادن مصالح داخل گرمخانه، قبل از تراکم، به مقدار  $1/2$  درصد وزنی کل مخلوط به آن قیر اضافه شده است.



۲ ساعت درون گرمخانه قرار گرفت. سپس، بدون افزودن ماده‌ای دیگر، با میکسر کاملاً مخلوط و روی لایه روسازی زیرین اجرا شد.

لایه میانی آسفالت بازیافتی تثبیت شده با قیر:

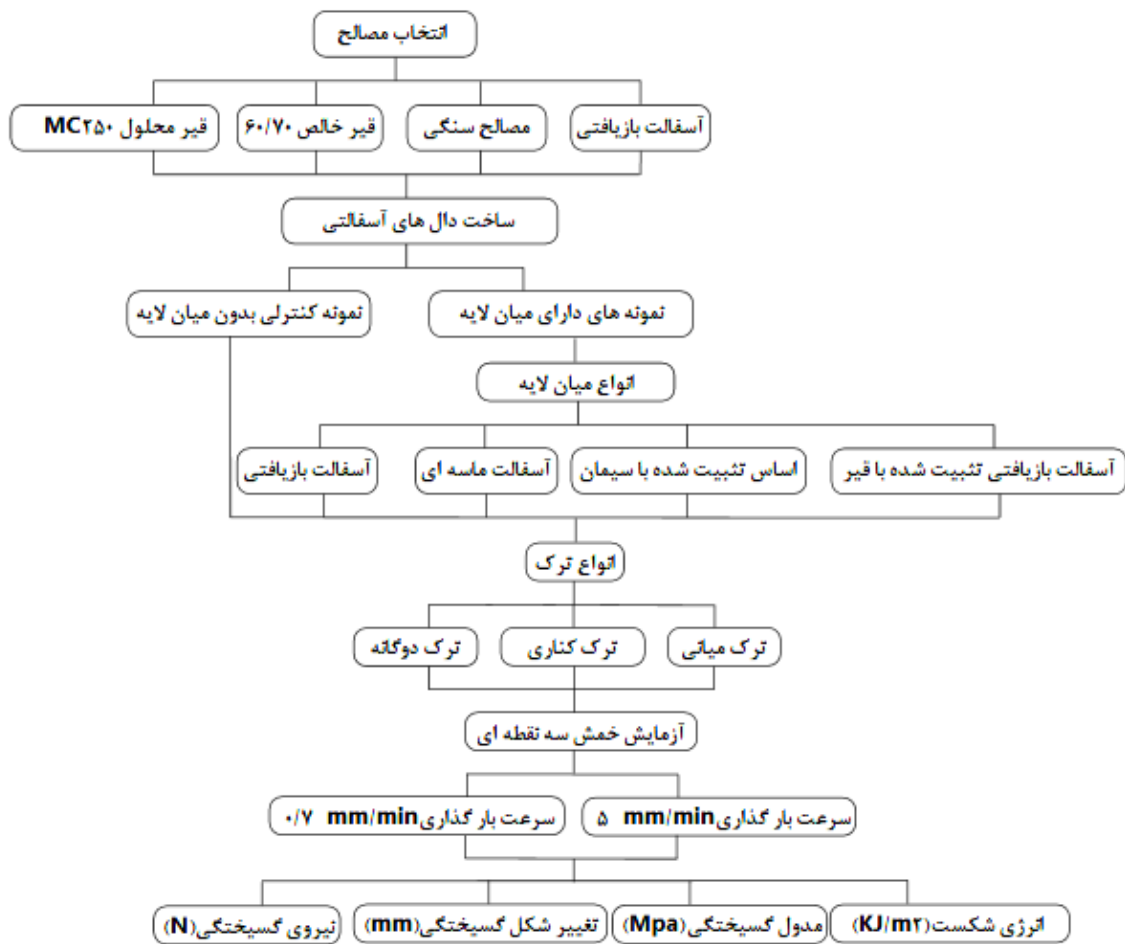


شکل ۳. دال‌های آسفالتی با میان‌لایه اساس تثبیت شده

میان‌لایه نیز  $450 \text{ mm}^L \times 150 \text{ mm}^W \times 90 \text{ mm}^H$  می‌باشد. پس از آماده‌سازی نمونه‌های آسفالتی، هر یک تحت برش قرار گرفتند و در راستای طولی به دو قسمت تقسیم شدند. در نهایت، تیرچه‌های آزمایش خمش سه-نقطه‌ای به طول ۴۵ سانتی‌متر و عرض  $7/5$  سانتی‌متر از برش دال‌های آسفالتی ساخته شده به‌دست آمد. فلوجارت آزمایشگاهی در شکل ۴ ارائه شده است.

در مرحله سوم، پس از اجرای لایه میانی، اندود سطحی روی آن ریخته شد و سپس لایه روکش آسفالتی مشابه لایه روسازی زیرین اجرا گردید. ضخامت لایه روکش آسفالتی مانند دو لایه دیگر  $30$  میلی‌متر می‌باشد.

ابعاد نمونه‌های فاقد میان‌لایه (کنترلی)،  $450 \text{ mm}^L$  است و ابعاد نمونه‌های دارای



شکل ۴. فلوجارت آزمایشگاهی

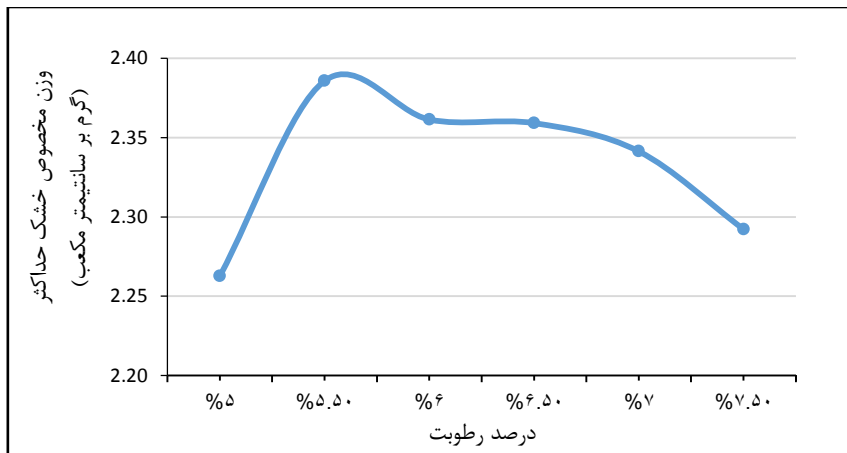
### ۳-۳. آزمایش‌ها

#### ۳-۳-۱. آزمایش مارشال

به منظور تعیین درصد قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی، از آزمون مارشال طبق استاندارد AASHTO T245 (۲۰۰۳) استفاده شده است. پس از ساخت نمونه‌ها و انجام آزمایش و رسم منحنی‌های مربوطه، درصد قیر بهینه برای دانه‌بندی لایه روکش و لایه روسازی قدیمی معادل ۵/۲ درصد و برای دانه‌بندی میان‌لایه آسفالت ریزدانه معادل ۸/۴ درصد تعیین گردید.

### ۳-۳-۲. آزمایش تراکم

به منظور تهیه اساس تثبیت شده با سیمان و استفاده از آن به عنوان میان‌لایه، این آزمون به ازای درصد‌های مختلف رطوبت انجام شد. سپس با ترسیم منحنی‌های مربوطه، حداکثر وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت بهینه تعیین گردید. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده، رطوبت بهینه، معادل ۵/۶ درصد می‌باشد.



شکل ۵. نمودار وزن مخصوص خشک - درصد رطوبت

برای محاسبه‌ی آن‌ها به ترتیب از روابط (۱) و (۲) استفاده می‌شود:

$$\sigma_F = \frac{3}{2} \times \frac{P_{ult} \times L}{b \times h^2} \quad (1)$$

که  $\sigma_F$  مدول گسیختگی (نیوتن بر سانتی متر مربع)،  $P_{ult}$  نیروی حداکثر (نیوتن)،  $L$  فاصله‌ی تکیه‌گاه‌ها (سانتی - متر)،  $b$  عرض نمونه (سانتی متر) و  $h$  ارتفاع یا ضخامت نمونه (سانتی متر) است.

$$G_F = \frac{W_F}{A_{lig}} \quad (2)$$

که  $G_F$  انرژی شکست ( $J/m^2$ )،  $W_F$  مساحت زیر نمودار بار- تغییرشکل ( $J$ ) و  $A_{lig}$  تصویر ناحیه‌ی FPZ روی یک صفحه‌ی موازی با راستای ترک ( $m^2$ ) است.

به دلیل آن‌که تعیین  $A_{lig}$  دشوار است، پارامتر دیگری برای مقاومت شکست مخلوط آسفالتی معرفی شده که چگالی انرژی شکست<sup>۳</sup> نام دارد و مقدار آن برابر با مساحت زیر نمودار تنش- کرنش است. نیروی حداکثر و تغییرمکان نمونه‌ها در حین آزمایش توسط نیروسنج<sup>۴</sup> و کرنش‌سنج‌های<sup>۵</sup> نصب شده روی دستگاه بارگذاری خمش سه‌نقطه‌ای تعیین شد. سایر پارامترهای مورد نیاز برای مقاومت ترک‌خوردگی محاسبه گردید.

### ۳-۳-۳. آزمایش خمش سه نقطه‌ای<sup>۱</sup>

در این تحقیق، به منظور تعیین پارامترهای شکست نمونه‌های آسفالتی، از آزمون خمش سه‌نقطه‌ای در دمای ۵ درجه سلسیوس استفاده شده است. فاصله‌ی تکیه‌گاه‌ها برای نمونه‌های کترلی ۲۴۰ میلی‌متر و برای نمونه‌های دارای میان‌لایه ۳۶۰ میلی‌متر (چهار برابر ضخامت نمونه‌ها) در نظر گرفته شد. پس از آماده شدن، نمونه‌ها به مدت ۱۲ ساعت درون یخچال با دمای ۵ درجه سلسیوس قرار گرفتند. بارگذاری اعمال شده به نمونه‌ها در حین آزمایش به صورت یکنواخت و با نرخ ثابت است. به منظور ارزیابی تأثیر سرعت بارگذاری روی پارامترهای شکست نمونه‌های آسفالتی، از دو نرخ بارگذاری ۰/۷ و ۵ میلی‌متر بر دقیقه استفاده گردید.

### ۴. تحلیل داده‌ها

بر اساس استاندارد های آشتو (AASHTO T P105)، ۲۰۱۳ و AASHTO T 177، (۲۰۱۳)، مدول گسیختگی ( $\sigma_F$ ) و انرژی شکست ( $G_F$ ) دو پارامتر مهم در ارزیابی مقاومت در برابر ترک‌خوردگی می‌باشند. مدول گسیختگی، حداکثر تنش کششی افقی هنگام گسیختگی است و انرژی شکست مقدار انرژی مورد نیاز برای ایجاد مساحت واحد از یک ترک می‌باشد، که

<sup>2</sup>- Fracture process zone

<sup>3</sup>- Fracture energy density

<sup>4</sup>- Load cell

<sup>5</sup>- LVDT

<sup>1</sup>- Three-point bending test (3PB)

هر یک از نمونه‌های آزمایش طبق جدول ۶ نام‌گذاری شدند.

جدول ۶. انواع نمونه‌های آزمایش و مشخصات آنها به همراه نام اختصاری (کدگذاری)

نام اختصاری	مشخصات
NI1	نمونه کنترل با ترک میانی
NI2	نمونه کنترل با ترک دوگانه
NI3	نمونه کنترل با ترک کناری
TBI1	نمونه اساس تثبیت شده با ترک میانی
TBI2	نمونه اساس تثبیت شده با ترک دوگانه
TBI3	نمونه اساس تثبیت شده با ترک کناری
SAI1	نمونه آسفالت ریزدانه با ترک میانی
SAI2	نمونه آسفالت ریزدانه با ترک دوگانه
SAI3	نمونه آسفالت ریزدانه با ترک کناری
TRI1	نمونه آسفالت بازیافتی (RAP) + قیر (۱.۲٪) با ترک میانی
TRI2	نمونه آسفالت بازیافتی (RAP) + قیر (۱.۲٪) با ترک دوگانه
TRI3	نمونه آسفالت بازیافتی (RAP) + قیر (۱.۲٪) با ترک کناری
RI1	نمونه RAP با ترک میانی
RI2	نمونه RAP با ترک دوگانه
RI3	نمونه RAP با ترک کناری

#### ۴-۱- محاسبه پارامترهای شکست مخلوط

#### آسفالتی

بازیافتی تثبیت شده با سیمان انجام شد. همچنین، به منظور بررسی تأثیر سرعت بارگذاری، این آزمون با دو نرخ بارگذاری مختلف، ۰/۷ و ۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد و نتایج آن در جدول ۷ ارائه گردید.

آزمون خمش سه‌نقطه‌ای روی نمونه‌های کنترلی و نمونه‌های دارای میان‌لایه‌های مختلف شامل آسفالت ماسه‌ای، اساس تثبیت شده، آسفالت بازیافتی و آسفالت

جدول ۷. نتایج آزمون خمش سه‌نقطه‌ای

بارگذاری		بارگذاری		نمونه	شماره
با نرخ ۵ میلی‌متر بر دقیقه		با نرخ ۰/۷ میلی‌متر بر دقیقه			
تغییر شکل	نیروی	تغییر شکل	نیروی		
گسیختگی	گسیختگی	گسیختگی	گسیختگی		
(mm)	(N)	(mm)	(N)		

ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر میان لایه مستهلک کننده ترک بر مشخصات مکانیک شکست مخلوط‌های آسفالتی

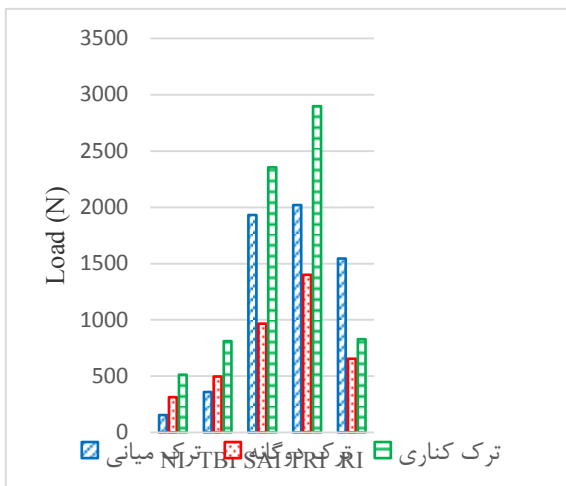
۲/۰۷	۱۵۳/۹۷	۲/۵۰	۷۸/۱۳	NI 1		۱
۷/۰۱	۳۱۳/۰۱	۸/۱۱	۱۳۷/۰۷	NI 2	NI	۲
۴/۳۰	۵۱۲/۵۵	۴/۷۶	۱۵۰/۱۱	NI 3		۳
۴/۲۹	۳۵۸/۵۳	۵/۶۵	۱۶۹/۶۱	TBI 1		۴
۲/۸۲	۴۶۹/۴۹	۳	۲۳۹/۰۶	TBI 2	TBI	۵
۳/۱۴	۸۰۹/۵۶	۵/۱۲	۲۵۱/۹۸	TBI 3		۶
۵/۷۳	۱۹۲۹/۷۹	۹/۲۴	۶۲۶/۴۰	SAI 1		۷
۶/۱۲	۹۶۵/۶۹	۹/۸۰	۵۲۸/۱۴	SAI 2	SAI	۸
۶/۳۱	۲۳۵۲/۷۱	۱۱/۲۴	۵۸۹/۱۱	SAI 3		۹
۱/۳۶	۲۰۱۹/۴۴	۱/۸۲	۷۵۴/۹۹	TRI 1		۱۰
۴/۰۴	۱۳۹۹/۵۰	۵/۰۷	۷۵۳/۵۳	TRI 2	TRI	۱۱
۴/۷۳	۲۸۹۵/۴۸	۶/۲۵	۷۵۴/۸۶	TRI 3		۱۲
۱/۵۵	۱۵۴۴/۰۴	۱/۹۴	۵۱۳/۳۷	RI 1		۱۳
۵/۰۶	۶۵۴/۳۴	۵/۴۴	۳۸۳/۶۷	RI 2	RI	۱۴
۳/۱۳	۸۲۶/۹۳	۴/۵۶	۵۳۱/۰۱	RI 3		۱۵

#### ۲-۴. بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر بر نیرو و

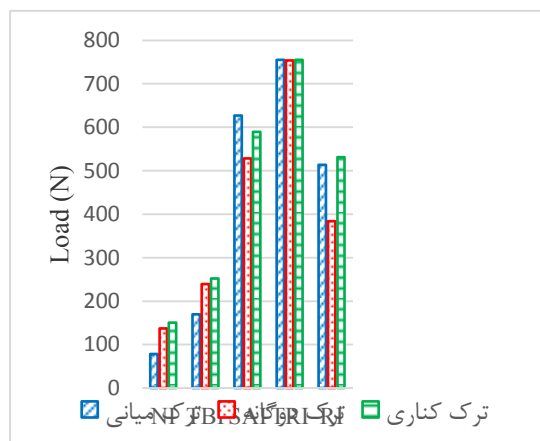
#### تغییر شکل گسیختگی

آسفالت یک ماده ویسکوالاستیک است و عوامل متعددی بر رفتار آن تأثیرگذار می‌باشند. یکی از این عوامل، سرعت بارگذاری است. همان‌طور که گفته شد، آزمون خمش سه‌نقطه‌ای در این تحقیق در دو نرخ بارگذاری متفاوت انجام گردید.

تجزیه و تحلیل داده‌ها به کمک آزمون فرضیه دو



(سرعت بارگذاری ۵ میلی متر بر دقیقه)



(سرعت بارگذاری ۰/۷ میلی متر بر دقیقه)

#### شکل ۶. نیروی گسیختگی در نمونه‌ها

به ترتیب مربوط به نمونه‌های دارای میان‌لایه آسفالت ریزدانه (SA)، آسفالت بازیافتی (RI) و اساس تثبیت شده با سیمان (TBI) می‌باشد. درصد افزایش نیروی گسیختگی در سرعت بارگذاری ۵ mm/min نسبت به

با توجه به شکل ۶، بیشترین نیروی گسیختگی در همه حالت‌های ترک و در هر دو سرعت بارگذاری، مربوط به نمونه دارای میان‌لایه آسفالت بازیافتی تثبیت شده (TRI) می‌باشد. رتبه‌های بعدی نیروی گسیختگی



گسیختگی با افزایش سرعت بارگذاری را می‌توان به تأثیر بیشتر بخش الاستیک آسفالت نسبت به بخش ویسکوز آن بر رفتار آسفالت در سرعت‌های بارگذاری بیشتر نسبت داد.

سرعت بارگذاری ۰/۷ mm/min در جدول ۹ ارائه شده است. همانطور که در این جدول نشان داده شده، بیشترین افزایش درصد افزایش نیرو در اثر افزایش سرعت بارگذاری مربوط به نمونه با میان‌لایه آسفالت ریزدانه و ترک کناری می‌باشد. دلیل افزایش نیروی

جدول ۸. نتایج تحلیل آماری نیرو و تغییرشکل گسیختگی در سرعت‌های مختلف

H <sub>0</sub> : μ <sub>difference</sub> = 0		تخمین تفاوت زوج‌ها				آمار توصیفی			
H <sub>1</sub> : μ <sub>difference</sub> ≠ 0	95% CI for μ <sub>difference</sub>	SE Mean	St Dev	Mean	SE Mean	St Dev	Mean	N	نمونه‌ها
T value = -۴/۳۷	(-۱۰۷۰; -۳۶۶)	۱۴	۶۳	۷۱۸	۶۳	۲۴۴	۴۳	۱۵	نیروی گسیختگی در سرعت ۰/۷
P value = ۰/۰۰۱		۶	۶	-	۲۱۵	۸۳۴	۱۱	۱۵	نیروی گسیختگی در سرعت ۵
T value = ۴/۱۲	(۰/۷۲۹; ۲/۳۱۶)	۳۷	۴۳	۵۳۲	۷۱۳	۸۷۶	۶۳	۱۵	تغییرشکل گسیختگی در سرعت ۰/۷
P value = ۰/۰۰۱		۰	۱/۲	۱/	۴۵۳	۷۵۵	۱۱	۱۵	تغییرشکل گسیختگی در سرعت ۵

جدول ۹. درصد افزایش نیروی گسیختگی در سرعت بارگذاری ۵ نسبت به ۰/۷

SAI2	SAI1	TBI3	TBI2	TBI1	NI3	NI2	NI1	نمونه
۸۲/۸	۲۰۸/۱	۲۲۱/۳	۱۰۷/۷	۱۱۱/۴	۲۴۱/۴	۱۲۸/۴	۹۷/۱	درصد افزایش نیروی گسیختگی
RI3	RI2	RI1	TRI3	TRI2	TRI1	SAI3	نمونه	
۵۵/۷	۷۰/۵	۲۰۰/۸	۲۸۳/۶	۸۵/۷	۱۶۷/۵	۲۹۹/۴	درصد افزایش نیروی گسیختگی	

همانطور که در این جدول نشان داده شده، میان‌لایه آسفالت بازیافتی تثبیت شده در انواع مختلف ترک بهترین عملکرد را از خود نشان داده است. بعد از این میان‌لایه، آسفالت ریزدانه و آسفالت بازیافتی قرار دارند.

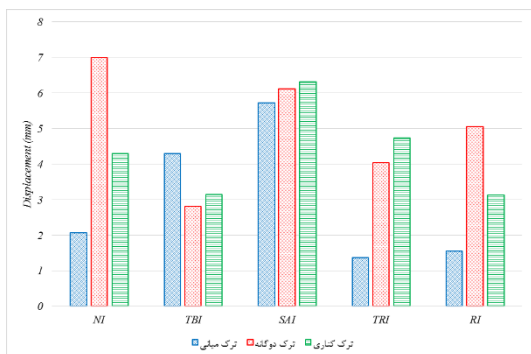
نوع میان‌لایه و ترک دو عامل دیگر مؤثر بر عملکرد نمونه‌ها می‌باشند. درصد افزایش نیروی گسیختگی در نمونه با میان‌لایه‌های مختلف نسبت به نمونه کنترل با شرایط ترک یکسان در جدول ۱۰ ارائه شده است.

جدول ۱۰. درصد افزایش نیروی گسیختگی در نمونه با میان‌لایه‌های مختلف نسبت به نمونه کنترل با شرایط

ترک یکسان

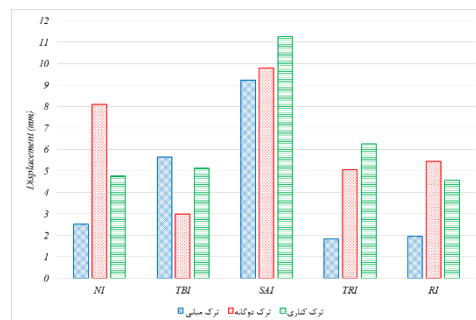
نوع ترک	درصد افزایش نیروی گسیختگی					
	ترک میانی		ترک دوپل		ترک کناری	
	سرعت بارگذاری ۰.۷	سرعت بارگذاری ۵	سرعت بارگذاری ۰.۷	سرعت بارگذاری ۵	سرعت بارگذاری ۰.۷	سرعت بارگذاری ۵
TBI	۱۱۷.۱	۱۳۲.۹	۷۴.۴	۵۸.۶	۶۷.۹	۵۷.۹
SAI	۷۰۱.۷	۱۱۵۳.۴	۲۸۵.۳	۲۰۸.۵	۲۹۲.۵	۳۵۹
TRI	۸۶۶.۳	۱۲۱۱.۶	۴۴۹.۷	۳۴۷.۱	۴۰۲.۹	۴۶۴.۹
RI	۵۵۷.۱	۹۰۲.۸	۱۷۹.۹	۱۰۹	۲۵۳.۷	۹۰۲.۸

بارگذاری می‌تواند افزایش تغییرشکل‌های ناشی از رفتار ویسکوز آسفالت در سرعت‌های کم بارگذاری باشد. درصد کاهش تغییرشکل گسیختگی در نمونه‌های مختلف در سرعت بارگذاری ۵ نسبت به سرعت بارگذاری ۰.۷ در جدول ۱۱ ارائه شده است.



ب) سرعت بارگذاری ۵ میلی متر بر دقیقه

تغییرشکل گسیختگی نمونه‌ها در سرعت‌های بارگذاری مختلف در شکل ۷ ارائه شده است. همانطور که در جدول ۸ نشان داده شده بود، افزایش سرعت بارگذاری باعث کاهش تغییرشکل گسیختگی نمونه‌ها می‌شود. دلیل کاهش تغییرشکل با افزایش سرعت



الف) سرعت بارگذاری ۰.۷ میلی متر بر دقیقه

شکل ۷. تغییرشکل گسیختگی در نمونه‌ها

جدول ۱۱. درصد کاهش تغییرشکل گسیختگی در سرعت بارگذاری ۵ نسبت به ۰.۷

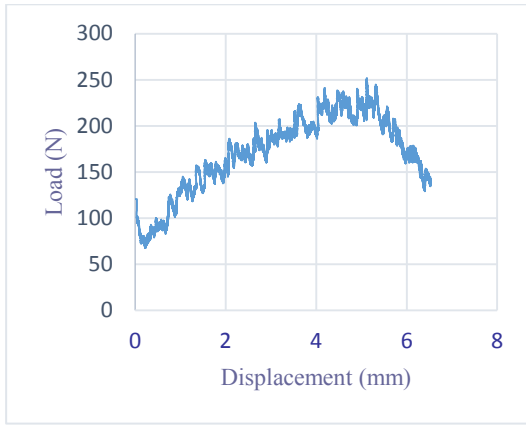
SAI2	SAI1	TBI3	TBI2	TBI1	NI3	NI2	NI1	نمونه
								درصد
۳۷/۶	۳۸	۳۸/۷	۶	۲۴/۱	۹/۷	۱۳/۶	۱۷/۲	کاهش
								تغییرشکل
								گسیختگی
RI3	RI2	RI1	TRI3	TRI2	TRI1	SAI3		نمونه
								درصد
۳۱/۴	۷	۲۰/۱	۲۴/۳	۲۰/۳	۲۵/۳	۴۳/۹		کاهش
								تغییرشکل
								گسیختگی

۴-۴. مدول گسیختگی و انرژی شکست

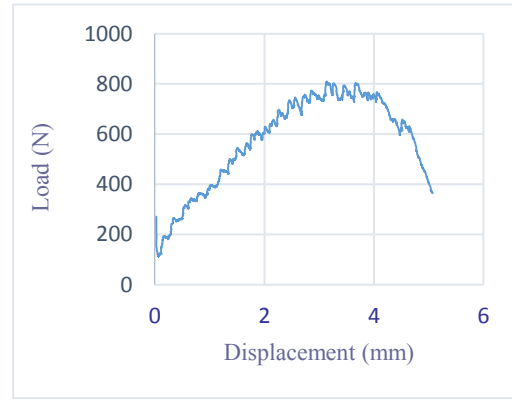
مدول گسیختگی با توجه به رابطه (۱) محاسبه می‌شود و انرژی شکست نمونه‌ها نیز برابر با مساحت زیر نمودار نیرو- تغییرشکل<sup>۱</sup> از ابتدای آزمایش تا لحظه گسیختگی می‌باشد. در شکل ۸، نمودار نیرو- تغییرشکل نمونه آسفالتی با اساس تثبیت شده با سیمان برای هر دو سرعت بارگذاری نشان داده شده است.

---

<sup>۱</sup> - Load-displacement diagram



(سرعت ۰.۷ میلی‌متر بر دقیقه)



(سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه)

شکل ۸. نمودار نیرو- تغییر شکل نمونه اساس تثبیت شده- ترک کناری

مجموع این مساحت‌ها برابر با انرژی شکست هر نمونه می‌باشد. مقادیر مدول گسیختگی و انرژی شکست در جدول ۱۲ ارائه شده است.

مقدار این پارامتر نیز به منظور در نظر گرفتن اثر همزمان نیرو و تغییر شکل نمونه‌ها در لحظه گسیختگی محاسبه می‌شود. برای محاسبه انرژی شکست، مساحت زیر نمودار نیرو- تغییر شکل از ابتدای آزمایش تا لحظه گسیختگی به مستطیل‌های کوچک تقسیم می‌شود و

جدول ۱۲. انرژی شکست و مدول گسیختگی

بارگذاری با نرخ ۵ میلی‌متر بر دقیقه		بارگذاری با نرخ ۰.۷ میلی‌متر بر دقیقه		نمونه
مدول گسیختگی $N/cm^2$	انرژی شکست $KJ/m^2$	مدول گسیختگی $N/cm^2$	انرژی شکست $KJ/m^2$	
۲۰/۵	۰/۱۳۶	۱۰/۴	۰/۰۴۲	NI1
۴۱/۷	۰/۶۰۵	۱۸/۳	۰/۱۶۷	NI2
۶۸/۳	۰/۷۰۸	۲۰	۰/۱۸۷	NI3
۳۱/۹	۰/۴۶۳	۱۵/۱	۰/۱۴۹	TBI1
۴۴/۱	۰/۶۷۴	۲۱/۲	۰/۱۷۸	TBI2
۷۲	۰/۷۵۳	۲۲/۴	۰/۲۸۴	TBI3
۱۷۱/۵	۲/۲۵۰	۵۵/۷	۱/۱۸۸	SAI1
۸۵/۸	۲/۱۸۶	۴۶/۹	۱/۸۵۱	SAI2
۲۰۹/۱	۳/۸۵۴	۵۲/۴	۱/۹۷۴	SAI3
۱۷۹/۵	۱/۰۶۲	۶۷/۱	۰/۳۲۷	TRI1

۱۲۴/۴	۱/۱۸۰	۶۷	۰/۵۱۵	TRI2	
۲۵۷/۴	۱/۶۰۴	۶۷/۱	۱/۰۵۳	TRI3	
۱۳۷/۲	۰/۶۶۲	۴۵/۶	۰/۲۳۳	RI1	
۵۸/۲	۰/۷۴۵	۳۴/۱	۰/۴۹۱	RI2	RI
۷۳/۵	۰/۸۱۰	۴۷/۲	۰/۷۱۸	RI3	

#### ۴-۵. بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر بر مدول

##### گسیختگی و انرژی شکست

با توجه به رابطه (۱) مدول گسیختگی با نیروی گسیختگی رابطه مستقیم دارد و هرچه نیروی لازم برای گسیختگی نمونه بیشتر باشد، مدول گسیختگی آن نیز بیشتر است. بنابراین، می‌توان گفت که چون با افزایش سرعت بارگذاری نیروی گسیختگی افزایش می‌یابد، به همین ترتیب مدول گسیختگی نیز زیاد می‌شود. انرژی

شکست، علاوه بر نیرو به تغییر شکل نیز وابسته است. با افزایش سرعت بارگذاری، نیروی گسیختگی افزایش می‌یابد، ولی تغییر شکل گسیختگی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. اما همانطور که در جدول ۱۲ نشان داده شده است، انرژی شکست به ازای سرعت بارگذاری ۵ میلی‌متر بر دقیقه بیشتر است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر نیروی گسیختگی روی انرژی شکست بیشتر از تغییر شکل است. تجزیه و تحلیل داده‌ها به کمک آزمون فرضیه دو میانگین با استفاده از نرم‌افزار

مینی تب نشان داد که انرژی شکست و مدول گسیختگی نمونه‌ها در سرعت بارگذاری ۵ میلی‌متر بر دقیقه نسبت به سرعت بارگذاری ۰/۷ میلی‌متر بر دقیقه به‌طور معناداری افزایش یافتند (جدول ۱۳).

جدول ۱۳. نتایج تحلیل آماری انرژی شکست و مدول گسیختگی در سرعت‌های مختلف

H <sub>0</sub> : μ <sub>difference</sub> = 0		تخمین تفاوت زوج‌ها				آمار توصیفی			
H <sub>1</sub> : μ <sub>difference</sub> ≠ 0	95% CI for μ <sub>difference</sub>	SE Me an	StD ev	Me an	SE Me an	StD ev	Me an	N	نمونه‌ها
T value = ۴/۸۸	(۰/۳۱۱	/۱۱۴	/۴۴۱	۵۵۶	۱۶۰	/۶۲۰	۶۲۴	۱	انرژی شکست در
P value = ۰/۰۰۰	۰/۸۰۰)	۰	۰	۰/	۰/	۰	۰/	۵	سرعت ۰/۷
T value = ۴/۵۹	(۳۵;	۱۴/۳	۵۵/۴	۶	۵/۲	۲۰/۳	۳۹	۵	مدول گسیختگی در
P value = ۰/۰۰۰	۹۶/۳)			۶۵	/۵	۷۱/۵	۱۰۵	۱	سرعت ۰/۷
					۱۸			۵	مدول گسیختگی در
									سرعت ۵

شکست و مدول گسیختگی نمونه با میان‌لایه‌های مختلف نسبت به نمونه کنترل با شرایط ترک یکسان به ترتیب در جداول ۱۴ و ۱۵ ارائه شده است. همانطور که در جدول ۱۴ مشاهده می‌شود، در سرعت بارگذاری ۰/۷ mm/min بیشترین افزایش انرژی شکست در ترک‌های میانی، دوگانه و کناری نسبت به نمونه کنترل به ترتیب با مقدار درصد افزایش برابر با ۲۷۲۸/۶، ۱۰۰۸/۴ و ۹۵۵/۶ درصد مربوط به نمونه با میان‌لایه آسفالت ریزدانه می‌باشد. در سرعت بارگذاری ۵ mm/min این میان‌لایه بیشترین درصد افزایش را نشان داده است. بعد از این میان‌لایه، در نمونه با میان‌لایه آسفالت بازیافتی تثبیت شده بیشترین درصد افزایش به‌دست آمده است. از نظر افزایش میزان مدول گسیختگی در سرعت‌های مختلف نمونه با میان‌لایه آسفالت بازیافتی بیشترین افزایش را در انواع مختلف ترک‌ها نسبت به نمونه کنترل نشان داده است. بعد از

با توجه به نتایج جدول ۱۲، بیشترین مدول گسیختگی مربوط به نمونه آسفالت بازیافتی تثبیت شده با قیر است. بیشترین انرژی شکست نیز مربوط به نمونه‌های با میان‌لایه آسفالت ماسه‌ای است. این میان‌لایه به دلیل این‌که تغییرشکل گسیختگی آن نسبت به سایر میان‌لایه‌ها بسیار بیشتر است، انرژی شکست بیشتری دارد. پس از میان‌لایه آسفالت ماسه‌ای، میان‌لایه آسفالت بازیافتی تثبیت شده با قیر انرژی شکست بیشتری نسبت به سایر میان‌لایه‌ها دارد. با افزایش فاصله ترک از محل اعمال بار، نیروی گسیختگی و در نتیجه مدول گسیختگی افزایش می‌یابد. انرژی شکست نیز با تغییر محل قرارگیری ترک تغییر می‌کند و بیشترین انرژی شکست مربوط به نمونه‌های با ترک کناری است. چون با افزایش فاصله محل ترک از محل اعمال بار، نیروی گسیختگی زیاد می‌شود و همانطور که گفته شد تأثیر نیرو بر انرژی شکست بیشتر است و با افزایش آن انرژی شکست نیز افزایش می‌یابد. درصد افزایش انرژی

این میان‌لایه، نمونه با میان‌لایه آسفالت ریزدانه در رتبه دوم قرار دارد (جدول ۱۵).

جدول ۱۴. درصد افزایش انرژی شکست در نمونه با میان‌لایه‌های مختلف نسبت به نمونه کنترل با شرایط ترک یکسان

نوع آزمایش	درصد افزایش انرژی شکست					
	ترک کناری		ترک دوبل		ترک میانی	
	سرعت بارگذاری ۰.۷	سرعت بارگذاری ۵	سرعت بارگذاری ۰.۷	سرعت بارگذاری ۵	سرعت بارگذاری ۰.۷	سرعت بارگذاری ۵
TBI	۶.۴	۵۱.۹	۱۱.۴	۶.۶	۲۴۰.۴	۲۵۴.۸
SAI	۴۴۴.۴	۹۵۵.۶	۳۶۱.۳	۱۰۰۸.۴	۱۵۵۴.۴	۲۷۲۸.۶
TRI	۱۳۶.۶	۴۶۳.۱	۹۵	۲۰۸.۴	۶۸۰.۹	۶۷۸.۶
RI	۱۴.۴	۲۸۴	۲۳.۱	۱۹۴	۳۸۶.۸	۴۵۴.۸

جدول ۱۵. درصد افزایش مدول گسیختگی در نمونه با میان‌لایه‌های مختلف نسبت به نمونه کنترل با شرایط ترک یکسان

نوع آزمایش	درصد افزایش مدول گسیختگی					
	ترک کناری		ترک دوبل		ترک میانی	
	سرعت بارگذاری ۰.۷	سرعت بارگذاری ۵	سرعت بارگذاری ۰.۷	سرعت بارگذاری ۵	سرعت بارگذاری ۰.۷	سرعت بارگذاری ۵
TBI	۵.۴	۱۲	۵.۸	۱۵.۸	۵۵.۶	۴۵.۲
SAI	۲۰۶.۱	۱۶۲	۱۰۵.۸	۱۵۶.۳	۷۳۶.۶	۴۳۵.۶
TRI	۲۷۶.۹	۲۳۵.۵	۱۹۸.۳	۲۶۶.۱	۷۷۵.۶	۵۴۵.۲
RI	۷.۶	۱۳۶	۳۹.۶	۸۶.۳	۵۶۹.۳	۳۳۸.۵

## ۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، با استفاده از آزمون خمش سه‌نقطه‌ای، مشخصات مکانیک شکست تیرچه‌های آسفالتی حاوی چهار نوع میان‌لایه (آسفالت ماسه‌ای، اساس تثبیت شده با سیمان، آسفالت بازیافتی و آسفالت بازیافتی تثبیت شده با قیر) و سه حالت قرار گیری ترک (ترک میانی، ترک دوگانه و ترک کناری) در روسازی زیرین ارزیابی شده است. نمونه‌ها روی دو تکیه‌گاه به فاصله چهار برابر ضخامت هر نمونه قرار گرفتند و بارگذاری با دو سرعت ۰/۷ و ۵ میلی‌متر بر دقیقه اعمال شد. نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

تثبیت شده با قیر عملکرد بهتری دارد و نیروی گسیختگی نمونه‌های تقویت شده با آن بیشتر است. بعد از آن، به ترتیب آسفالت ماسه‌ای، آسفالت بازیافتی و اساس تثبیت شده با سیمان در جایگاه‌های بعدی قرار می‌گیرند.

- سرعت بارگذاری اعمال شده به نمونه‌های آسفالتی علاوه بر نیروی گسیختگی روی تغییر شکل (کرنش) گسیختگی نیز مؤثر است. با افزایش سرعت بار وارد شده به نمونه‌ها از ۰/۷ به ۵ میلی‌متر بر دقیقه، نیروی گسیختگی آن‌ها بیشتر شده و تغییر شکل گسیختگی نمونه‌ها کاهش می‌یابد.
- سرعت بارگذاری روی انرژی شکست نیز تأثیرگذار است و با افزایش سرعت بارگذاری، انرژی شکست نیز افزایش یافت. محل قرارگیری ترک‌های موجود در لایه روسازی زیرین روی نیروی گسیختگی مؤثر است. با افزایش فاصله

- تقویت نمونه‌های آسفالتی با میان‌لایه‌های مختلف موجب افزایش نیروی گسیختگی و بهبود عملکرد آن‌ها (نسبت به نمونه کنترلی) می‌شود. اما از بین میان‌لایه‌های به‌کاررفته برای تقویت روکش‌های آسفالتی در این پژوهش، میان‌لایه آسفالت بازیافتی

موجود در روسازی بیشتر است، نمونه آسفالتی ضعیف‌تر بوده و نیروی کمتری تحمل می‌کند.

- از بین میان‌لایه‌های مستهلک کننده ترک که در این تحقیق استفاده شده است، میان‌لایه آسفالت بازیافتی تثبیت شده با قیربهرترین عملکرد را نشان داده است.

محل قرارگیری ترک از محل اعمال بار، نیروی گسیختگی نیز افزایش می‌یابد. در مورد ترک میانی، چون محل قرارگیری ترک دقیقاً زیر محل اعمال بار قرار دارد، نیروی گسیختگی نسبت به ترک کناری کمتر است. در نمونه‌های دارای ترک دوگانه، اگرچه ترک در زیر محل بارگذاری قرار ندارد، اما به دلیل این‌که تعداد خرابی‌ها و ترک‌های

## ۶. مراجع

سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور. ۱۳۹۰. "آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران". نشریه شماره ۲۳۴، وزارت راه و شهرسازی، تهران.

- AASHTO. 2002. "Standard method of test for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine". AASHTO T 96-02, Washington, DC.
- AASHTO. 2003. Standard method of test for resistance to plastic flow of asphalt mixtures using Marshall Apparatus". AASHTO T 245-03, Washington, DC.
- AASHTO. 2008. "Standard method of test for plastic fines in graded aggregates and soils by use of the sand equivalent test". AASHTO T 176-08, Washington, DC.
- AASHTO. 2011. "Standard method of test for soundness of aggregate by use of sodium sulfate or magnesium sulfate". AASHTO T 104-99, Washington, DC.
- AASHTO. 2013a. "Standard method of test for determining the fracture energy of asphalt mixtures using the semicircular bend geometry (SCB)". AASHTO T 105-13, Washington, DC.
- AASHTO. 2013b. "Standard method of test for determining the flexural strength of concrete (using simple beam with center-point loading)". AASHTO T 177A, Washington, DC.
- AASHTO. 2014. "Standard method of test for sieve analysis of fine and coarse aggregates". AASHTO T 27-14, Washington, DC.
- ASTM. 2013. "Standard test method for determining the percentage of fractured particles in coarse aggregate". ASTM D5821, West Conshohocken, PA.
- Brown, S. F., Thom, N. H. and Sanders, P. J. 2001. "A study of grid reinforced asphalt to combat reflection cracking (with discussion)". J. Assoc. Asphalt Paving Technol., 70: 543-571.
- BSI. 2000. "Method for determination of particle shape; flakiness index". British Standard 812-105.1, British Standard Institution, London, UK.
- da Silva, L., Benta, A. and Picado-Santos, L. 2018. "Asphalt rubber concrete fabricated by the dry process: Laboratory assessment of resistance against reflection cracking". Constr. Build. Mater., 160: 539-550.
- Dizaj, A. B., Ziari, H. and Ahmadi Nejjad, M. 2014. "Effects of carbon fibre geogrid reinforcement on propagation of cracking in pavement and augmentation of flexible pavement life". Adv. Mater. Res., 891: 1533-1538.
- Khodaii, A., Fallah, S. and Moghadas Nejad, F. 2009. "Effects of geosynthetics on reduction of reflection cracking in asphalt overlays". Geotextiles Geomembranes, 27(1): 1-8.
- Kumar, V. V. and Saride, S. 2018. "Evaluation of cracking resistance potential of geosynthetic reinforced asphalt overlays using direct tensile strength test". Constr. Build. Mater., 162: 37-47.
- Lytton, R. L. 1989. "Use of geotextiles for reinforcement and strain relief in asphalt concrete". Geotextiles and Geomembranes, 8(3): 217-237.
- Ma, H. and Zhang, Z. 2020. "Paving an engineered cementitious composite (ECC) overlay on concrete airfield pavement for reflective cracking resistance". Constr. Build. Mater., 252: 119048.
- Ogundipe, O. M., Thom, N. and Collop, A. 2013. "Investigation of crack resistance potential of stress absorbing membrane interlayers (SAMIs) under traffic loading". Constr. Build. Mater., 38: 658-666.
- Oshone, M., Dave, E. V. and Sias, J. E. 2019. "Asphalt mix fracture energy based reflective cracking performance criteria for overlay mix selection and design for pavements in cold climates". Constr. Build. Mater., 211: 1025-1033.



- Saride, S. and Kumar, V. V. 2017. "Influence of geosynthetic-interlayers on the performance of asphalt overlays on pre-cracked pavements". *Geotextiles Geomembranes*, 45(3): 184-196.
- Shukla, S. and Yin, J. 2004. "Functions and installation of paving geosynthetics". *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Asian Regional Conference on Geosynthetics*, Seoul, Citeseer, pp. 314-321.
- Tam, A. B., Park, D. W, Le, T. H. M. and Kim, J. S. 2020. "Evaluation on fatigue cracking resistance of fiber grid reinforced asphalt concrete with reflection cracking rate computation". *Constr. Build. Mater.*, 239: 117873.
- Wang, S., Yan, K., Ge, D. and Hong, Z. 2019. "Laboratory research on the performance of stress-absorption interlayer (SAI) of waste tire rubber and amorphous poly alpha olefin modified asphalt". *Constr. Build. Mater.*, 223: 830-840.
- Yu, B., Lu, Q. and Yang, J. 2013. "Evaluation of anti-reflective cracking measures by laboratory test". *Int. J. Pavement Eng.*, 14(6): 553-560.
- Zamora-Barraza, D., Calzada-Pérez, M. A., Castro-Fresno, D. and Vega-Zamanillo, A. 2011. "Evaluation of anti-reflective cracking systems using geosynthetics in the interlayer zone". *Geotextiles Geomembranes*, 29(2): 130-136.