

ارزیابی خصوصیات عملکردی میان‌لایه‌ی جاذب تنش ماسه آسفالتی

معین بیگلری، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران و محیط‌زیست،

دانشگاه تربیت مدرس، تهران

سید محمد اصغرزاده*، استادیار، دانشکده عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

امیر کاووسی، استاد، دانشکده عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

Email: sm.asgharzadeh@modares.ac.ir

دریافت: ۹۵/۱۱/۲۷ - پذیرش: ۹۶/۰۵/۰۸

چکیده

بهسازی روسازی‌های استهلاک‌یافته با اجرای روکش یکی از روش‌های متداول تقویت و احیاء راه‌ها به شمار می‌رود. ترک انعکاسی یکی از خرابی‌های اصلی روکش‌های آسفالتی می‌باشد که سالانه باعث ایجاد خرابی در راه‌ها و مستهلک شدن آن‌ها می‌شود. ترک‌های انعکاسی معمولاً از زیر لایه‌ی روکش شروع شده و به سمت رویه‌ی راه ادامه پیدا می‌کند. ترک‌خوردگی در سطح روسازی همچنین باعث نفوذ آب، نمک و دیگر مواد مضر به درون روسازی می‌شود که به نوبه‌ی خود منجر به افزایش سرعت رشد خرابی‌ها می‌گردد. استفاده از میان‌لایه‌ی جاذب تنش (SAMI) یکی از روش‌هایی است که به منظور جلوگیری از انعکاس ترک به لایه‌ی روکش به کار می‌رود. یکی از انواع میان‌لایه‌های جاذب تنش، میان‌لایه‌ی ماسه آسفالتی است که استفاده از آن در سال‌های اخیر مرسوم شده است. در این پژوهش، خواص عملکردی میان‌لایه‌ی ماسه آسفالت و همچنین میان‌لایه‌ی ماسه آسفالت اصلاح‌شده با پودر لاستیک مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، از آزمایش کشش غیرمستقیم، به منظور تعیین مقاومت لایه‌های آسفالتی در برابر ترک‌خوردگی، استفاده گردید. همچنین، با استفاده از آزمایش فوق، انرژی شکست میان‌لایه ماسه آسفالت تعیین و با لایه‌ی روکش آسفالت داغ مقایسه گردید. آزمایش لاتمن اصلاح‌شده و آزمایش کیفی آب جوشان تگ‌زاش نیز به منظور حساسیت رطوبتی میان‌لایه‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. برای تعیین خصوصیات شیارشدگی میان‌لایه‌ها از آزمایش شیارشدگی چرخ استفاده گردید. نتایج این آزمایش‌ها نشان داد که میان‌لایه ماسه آسفالت تا حدود زیادی می‌تواند انرژی موجود برای ایجاد ترک انعکاسی را مستهلک کند. همچنین، با افزودن پودر لاستیک و تقویت خواص الاستیک لایه‌ی آسفالتی، استهلاک انرژی افزایش یافته و نهایتاً مقاومت میان‌لایه در برابر نفوذ آب و عریان‌شدگی نیز بهبود یافت. آزمایش شیارشدگی نشان داد که هرچند مقدار شیارشدگی در روسازی دارای میان‌لایه ماسه آسفالت به مراتب بیشتر از روسازی فاقد آن می‌باشد، اما با افزودن پودر لاستیک می‌توان تا حدود زیادی مقدار شیارشدگی را کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالتی داغ، میان‌لایه‌ی جاذب تنش، پودر لاستیک، ترک انعکاسی، انرژی شکست

نگهداری روسازی‌ها، لازم است روش‌های علمی و

۱. مقدمه

اجرایی که در این راستا به کار گرفته می‌شوند مورد ارزیابی و بازبینی قرار گیرند. بازسازی روسازی یکی از

با توجه به سرمایه‌گذاری عظیم اداره‌ها و سازمان‌های راهداری کشورهای مختلف در خصوص ترمیم و

با استهلاک انرژی موجود، می‌تواند ایجاد ترک‌های انعکاسی در لایه‌ی روکش را تا چندسال به تعویق بیندازد. می‌توان گفت اولین استفاده از میان‌لایه‌ی جاذب تنش به سال ۱۹۶۰ برمی‌گردد که یکی از مهندسين شرکت نفت و قير ساهارو در ايالت آريزوناى کشور ايالات متحده آمريکا با افزودن ۳۳٪ وزنی پودر لاستیک به مخلوط آسفالتی، نوعی آسفالت سطحی اصلاح شده را ابداع نمود که در برابر رشد و گسترش ترک‌های انعکاسی مقاومت خوبی از خود نشان می‌داد (مولنار و همکاران، ۱۹۸۶). در سال ۱۹۷۹ برای اولین بار از روش‌های تحلیلی به منظور بررسی عملکرد میان‌لایه‌ی جاذب تنش حاوی پودر لاستیک استفاده شد (وست و همکاران، ۱۹۹۸). در سال ۱۹۸۲ از میان‌لایه‌ی اصلاح شده با ۲۵٪ وزنی پودر لاستیک در ساخت روسازی بزرگراه پادشاهان شماره ۷۷ ایالت اونتاریو کانادا استفاده شد. میان‌لایه‌های جاذب تنش انواع متنوعی دارند که یکی از آنها میان‌لایه‌ی ماسه آسفالت است. میان‌لایه‌ی ماسه آسفالت جاذب تنش^۳ که بین لایه‌ی آسفالتی و لایه‌ی بتنی زیرین و یا بین لایه‌ی روکش آسفالتی و لایه‌ی آسفالتی فرسوده استفاده می‌شود، یک لایه آسفالتی با دانه‌بندی ریز می‌باشد. به‌منظور دستیابی به آسفالتی که این قابلیت را داشته باشد از سنگ‌دانه‌هایی با حداکثر ابعاد ۹/۵ میلی‌متر استفاده می‌شود که با مقادیر زیاد قیر مخلوط شده‌اند. دانه‌بندی ریز، استفاده از مقدار زیاد قیر، درصد هوای کم، مقدار زیاد VFA و چسبندگی خوب بین فیلر و قیر باعث می‌گردد که پیوند خوبی بین میان‌لایه و لایه‌های زیرین و روی آن به وجود آید (یانگ و همکاران، ۲۰۰۸). نتایج به‌دست‌آمده توسط این محققین نشان داد زمانی که ضخامت این میان‌لایه‌ها بین ۲-۳ سانتی‌متر باشد، میان‌لایه بهترین عملکرد را از خود نشان می‌دهد. میان‌لایه ماسه آسفالتی در سال‌های اخیر رواج یافته است،

معضلاتی است که کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه با آن روبرو هستند. روسازی‌های موجود، به علت رسیدن به شرایط بحرانی، نیاز به بازسازی و یا بهسازی دارند. یکی از انواع خرابی موجود در روسازی، ترک خوردگی می‌باشد که می‌تواند از نوع ترک‌های خستگی، ترک‌های حرارتی یا سایر انواع آن باشد. ترک‌هایی که بر اثر گسیختگی در لایه‌ی زیرین روسازی به سطح روکش انتقال پیدا می‌کنند ترک انعکاسی نام دارند (مالیک و الکورچی، ۲۰۰۹). برخی از محققین به ایجاد ترک در موقعیت و جهتی که ترک‌های قبلی وجود داشته‌اند ترک انعکاسی گفته‌اند (شلابی و فرشت، ۲۰۰۰). همچنین، به گسترش ترک‌ها از لایه‌ی قدیمی به لایه‌ی روکش ترک انعکاسی گفته شده است (کالتابیانو و برونون، ۱۹۹۰). سرعت گسترش ترک به تغییرات آب و هوایی و عوامل ترافیکی بستگی دارد. تجربیات قبلی نشان داده که ترک‌های انعکاسی تقریباً با سرعت ۲/۵ سانتی‌متر در سال رشد می‌کنند (داکال و همکاران، ۲۰۱۶). زمانی که ترک انعکاسی به سطح رویه می‌رسد مسیری را ایجاد می‌کند که می‌تواند باعث نفوذ آب به لایه‌های زیرین شود. بی‌توجهی به این نکته می‌تواند باعث رشد خرابی و کاهش مدت زمان بهره‌برداری گردد (پنمن و هوک، ۲۰۰۸). روش‌های گوناگونی توسط محققین مختلف به‌منظور به‌تعویق انداختن زمان بروز ترک انعکاسی ارائه شده است که این روش‌ها شامل افزایش ضخامت لایه‌ی روکش، اصلاح مخلوط آسفالتی، استفاده از آسفالت تقویت‌شده^۱ و یا اصلاح شده، استفاده از لایه‌ی جاذب تنش و کرنش^۲ و لایه‌ی مسلح‌کننده می‌باشد.

میان‌لایه‌ی جاذب تنش به لایه‌ای گفته می‌شود که با خاصیت جذب انرژی زیاد می‌تواند در برابر نیروی وارده از لایه‌های زیرین مقاومت نماید. این لایه،

¹- Reinforced pavement

²- Stress and strain absorbing membrane interlayer

³- Asphalt sand stress absorbing interlayer

به میزان زیادی افزایش می‌یابد. وانگ و همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند که استفاده از قیر حاوی پودر لاستیک می‌تواند رشد ترک در آسفالت را به تعویق بیندازد و عمر آن را افزایش دهد. این در حالی است که برخی دیگر از محققین بیان کرده‌اند که هرچند استفاده از پودر لاستیک می‌تواند عمر خستگی آسفالت را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد، اما باعث می‌شود که مخلوط آسفالتی در برابر رطوبت عملکرد ضعیفی را از خود نشان دهد (کیم و همکاران، ۲۰۱۴). همچنین، بانگ و همکاران (۲۰۱۰) برای بهبود خواص قیر در میان‌لایه‌ی ماسه آسفالت از قیر PG76-28 اصلاح‌شده پلیمری به میزان ۸/۶ درصد وزنی آسفالت استفاده نمودند.

برای ارزیابی مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر ترک‌خوردگی می‌توان از آزمایش‌های مختلفی استفاده کرد. یکی از این آزمایش‌ها، آزمایش کشش غیرمستقیم می‌باشد که با استفاده از آن می‌توان مقاومت کششی نمونه‌های آسفالتی را تعیین نمود. از آنجایی‌که مود اول شکست در کشش اتفاق می‌افتد و مود غالب شکست در لایه‌ی روکش می‌باشد، می‌توان خصوصیات کششی آسفالت را به‌عنوان عاملی مهم در ترک‌خوردگی قلمداد نمود (بهادری و همکاران، ۲۰۱۴). همچنین، از آزمایش کشش غیرمستقیم به‌منظور ارزیابی پتانسیل عریان‌شدگی و خصوصیات شکست نمونه‌های آسفالتی استفاده می‌گردد. انرژی شکست و مقاومت کششی به‌عنوان عواملی که در عمر مفید روسازی تأثیرگذار می‌باشند شناخته شده‌اند (حسن و همکاران، ۲۰۱۳). استفاده از افزودنی‌های مختلف می‌تواند خواص ترک‌خوردگی آسفالت را بهبود بخشد. به این منظور می‌توان از پلیمر SBS، پودر لاستیک و پودر شیشه در آسفالت استفاده نمود (پورعباس و همکاران، ۱۳۹۰).

با ایجاد ترک انعکاسی، رواناب موجود در سطح روسازی می‌تواند به لایه‌های زیرین نفوذ کند. مهر‌آرا و

به‌نحوی که ۲۰٪ از محققین و کارشناسان، این میان‌لایه را به‌عنوان پرکاربردترین میان‌لایه معرفی کرده‌اند و ۶۰٪ از آن‌ها استفاده از این میان‌لایه را به‌عنوان مؤثرترین روش کاهش ترک‌های انعکاسی پیشنهاد داده‌اند (داکال و همکاران، ۲۰۱۶). بانگ و همکاران (۲۰۱۰) برای بررسی میان‌لایه‌ی ماسه آسفالتی از دانه‌بندی با حداکثر اندازه اسمی ۴/۷۵ میلی‌متر استفاده نمودند. اوگان‌دپ (۲۰۱۲) طی تحقیقات خود، ماسه آسفالتی را به‌عنوان یکی از انواع میان‌لایه‌ها در نظر گرفت. میان‌لایه‌ی ماسه آسفالت ساخته شده توسط وی حاوی ۸۴٪ ماسه و ۱۶٪ فیلر بود و از قیر ۲۲۰/۱۶۰ به مقدار ۱۰/۳ درصد استفاده شد.

خواص قیر موجود در ماسه آسفالت می‌تواند به‌طور کلی بسیاری از عملکردهای ماسه آسفالت، مانند مقاومت آن در برابر ترک‌خوردگی ناشی از خستگی، را تحت تأثیر خود قرار دهد. قیر مورد استفاده باید به‌گونه‌ای انتخاب گردد تا بتواند خواص ماسه آسفالت، مانند انعطاف‌پذیری و خواص الاستیک، را تأمین نماید (یانگ و همکاران، ۲۰۰۸). محققین نشان داده‌اند که با افزودن پودر لاستیک به قیر می‌توان بسیاری از خواص عملکردی آن را بهبود بخشید. به‌طور کلی، قیرهای اصلاح‌شده با درصد مناسب پودر لاستیک دارای انعطاف‌پذیری بیشتر و حساسیت حرارتی کمتری می‌باشند. قیرهای لاستیکی نه تنها خصوصیات الاستیک قیر را ارتقا می‌بخشند، بلکه با توجه به دارا بودن مقادیر زیادی آنتی‌اکسیدان در لاستیک (کربن سیاه) باعث کاهش پیرشدگی قیر می‌شوند (امیرخانیان و همکاران، ۲۰۱۵). بازگشت‌پذیری الاستیک یکی از خصوصیات مهم برای ارزیابی میان‌لایه‌های جاذب تنش می‌باشد که می‌تواند با مستهلک نمودن انرژی از گسترش ترک به لایه‌های بالایی جلوگیری نماید. آقاجانی و مقدس‌نژاد (۱۳۹۰) نشان دادند که با افزایش پودر لاستیک به میزان ۱۵ الی ۲۰ درصد، میزان بازگشت‌پذیری الاستیک قیر

همکاران، ۲۰۰۸). در تحقیقاتی که توسط اداره حمل و نقل فلوریدا به وسیله ی دستگاه آزمایش سریع روسازی^۱ انجام شد، روسازی به منظور بررسی میزان شیارشدگی، به همراه میان لایه حاوی پودر لاستیک، مورد آزمایش قرار گرفت. به طور میانگین، در خطوطی که در آنها از میان لایه ی حاوی پودر لاستیک استفاده شده بود، پس از ۱۵۰۰۰ مرتبه عبور چرخ، شیارشدگی به مقدار ۰/۵ اینچ (۱/۲ سانتی متر) ثبت گردید. در حالی که در خطوط معمولی، پس از ۲۵۰۰۰۰ عبور چرخ، شیارشدگی مقدار ۰/۵ اینچ (۱/۲ سانتی متر) را ثبت نمود (گرین و همکاران، ۲۰۱۲). هرچند بر اساس تحقیقات اداره حمل و نقل فلوریدا، استفاده از میان لایه ی جاذب تنش اصلاح شده با پودر لاستیک می تواند مقدار شیارشدگی را افزایش دهد، اما شفافیت و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند که افزودن پودر لاستیک به مخلوط آسفالتی می تواند با افزایش سختی و برگشت پذیری الاستیک، مقدار شیارشدگی را کاهش دهد.

۲. مواد و روش ها

۲-۱. مصالح

قیر مورد استفاده در این تحقیق از شرکت ماکادام شرق و از منابع قیر پالایشگاه تهران تهیه گردید. مشخصات این قیر در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین، مصالح سنگی مورد استفاده از معادن شن و ماسه واقع در غرب تهران تهیه شد. مشخصات مصالح سنگی مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۲ و ترکیب شیمیایی مصالح سنگی با استفاده از دستگاه XRF موجود در دانشگاه تربیت مدرس به دست آمده که در جدول ۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، مصالح عمدتاً از نوع سیلیسی می باشد. سه نوع مخلوط آسفالتی شامل یک مخلوط آسفالتی با دانه بندی پیوسته

خدایی (۲۰۱۳) نشان دادند که اثرهای مخرب رطوبت می تواند منجر به کاهش مدول آسفالت تا حدود ۲۱٪، افزایش شیارشدگی تا حدود ۶۴٪ و نیز افزایش خرابی های ناشی از خستگی تا حدود ۹۴٪ شود. نتایج پژوهش تارفدار و زمان (۲۰۰۹) نشان داد که ضعف در مقابل رطوبت می تواند به دو دلیل اتفاق بیفتد: (۱) از بین رفتن چسبندگی بین قیر و سنگ دانه، که می تواند به دلیل قرار گرفتن آب بین لایه ی قیر و سنگ دانه اتفاق بیفتد و (۲) وقوع گسیختگی در مخلوط قیر-فیلر. عامل اول را می توان با آزمایش آب جوش تگزاس مورد ارزیابی قرار داد و عامل دوم را می توان تا حدودی با آزمایش لاتمن اصلاح شده بررسی نمود. آزمایش های حساسیت رطوبتی به دو دسته کمی و کیفی تقسیم بندی می شوند. دسته ی کمی شامل آزمایش هایی می باشند که میزان آسیب پذیری آسفالت در برابر رطوبت به وسیله ی آزمایش سنجیده و به صورت یک عدد و به طور دقیق تعیین می گردد. آزمایش های کیفی که برای ارزیابی حساسیت رطوبتی آسفالت استفاده می گردند شامل آزمایش هایی می باشند که در آنها از ارزیابی چشمی به عنوان عامل سنجش کیفیت آسفالت استفاده می گردد. هرچند این روش ها از دقت بسیار بالایی برخوردار نمی باشند اما به دلیل سادگی و عدم نیاز به دستگاه های پیشرفته و همچنین هزینه ی اندک، رایج می باشند.

مقدار زیاد شیارشدگی یکی از نقاط ضعف ماسه آسفالت محسوب می شود. علت این امر را می توان مقادیر بالای ریزدانه، قیر و فیلر عنوان نمود. در تحقیقاتی که یانگ و همکاران (۲۰۰۸) روی نمونه های آسفالتی به همراه میان لایه ماسه آسفالت حاوی پودر لاستیک (در مجموع به ارتفاع ۱۸ سانتی متر) انجام دادند، دستگاه عبور چرخ هامبورگ به منظور بررسی مقاومت شیارشدگی میان لایه ی ماسه آسفالت به کار گرفته شد. میزان عمق شیارشدگی پس از عبور چرخ به میزان ۸۶۵۰ مرتبه، ۱۰ میلی متر اندازه گرفته شد (یانگ و

¹ - Accelerated pavement test

(۲۰۰۸) با دانه‌بندی شماره ۶ نشریه ۲۳۴ که به‌عنوان دانه‌بندی ماسه آسفالت شناخته می‌شود، از دانه‌بندی شماره ۶ این نشریه استفاده شد. حدود بالا و پایین و مقادیر استفاده شده از هر الک در جدول ۵ نشان داده شده است. برای ساخت نمونه‌های ماسه آسفالت اصلاح شده با پودر لاستیک، از پودر لاستیک رد شده از الک شماره ۴۰ به میزان ۱۵٪ وزنی قیر استفاده گردید. قیر اصلاح شده با پودر لاستیک در دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس به مدت ۱ ساعت با سرعت ۵۰۰۰ دور در دقیقه توسط دستگاه هم زن با سرعت بالای موجود در دانشگاه تربیت مدرس تهیه شد (کاووسی و همکاران، ۱۳۹۵).

به‌عنوان لایه روکش، یک نوع مخلوط ماسه آسفالتی به‌عنوان میان‌لایه و مخلوط ماسه آسفالتی اصلاح شده با پودر لاستیک نیز به‌عنوان میان‌لایه در این پژوهش ساخته شد. برای طراحی مخلوط آسفالتی که به‌عنوان روکش به‌کار گرفته شد، از دانه‌بندی شماره ۵ نشریه ۲۳۴ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی که مناسب اجرای لایه‌ی آستر و رویه می‌باشد، استفاده گردید. در جدول ۴ مشخصات دانه‌بندی و همچنین حدود بالا و پایین دانه‌بندی شماره ۵ نشان داده شده‌اند. برای ساخت میان‌لایه‌ی ماسه آسفالت، دانه‌بندی‌های مختلفی که محققین قبلی استفاده کرده بودند بررسی گردید و به دلیل شباهت دانه‌بندی استفاده شده توسط یانگ و همکاران

جدول ۱. نتایج آزمایش‌های انجام شده روی قیر ۶۰-۷۰ مورد استفاده

نتیجه	حدود مشخصات		روش آزمایش	نوع آزمایش
	حداقل	حداکثر		
۶۳/۵	۶۰	۷۰	ASTM D5	درجه نفوذ در ۲۵ درجه سلسیوس (۱۰۰ گرم - ۵ ثانیه)
۴۹/۳	۴۹	۵۶	ASTM D36	نقطه نرمی (گلوله - حلقه) بر حسب سلسیوس
۱۰۷	۱۰۰	-	ASTM D113	مقدار کشش در ۲۵ درجه سلسیوس (سانتی‌متر)
۱/۰۱۴	۱/۰۱۳	۱/۰۱۷	ASTM D3289	وزن مخصوص قیر (گرم بر سانتی‌متر مربع)

جدول ۲. نتایج آزمایش‌های انجام شده روی مصالح سنگی

نتیجه	محدوده مجاز آیین‌نامه		استاندارد آزمایش	آزمایش
	حداقل	حداکثر		
۹۱	۶۰	-	ASTM D 5821	میزان شکستگی (%)
۱/۴	-	۸	ASTM C 88	افت وزنی ناشی از سولفات سدیم (%)
۱۳	-	۲۵	ASTM C 131	سایش لس آنجلس (%)
۱۵	-	۱۵	ASTM D 4791	مقدار سنگ‌دانه‌های سوزنی و پولکی (%)

جدول ۳. مقدار عناصر موجود در مصالح سنگی (آزمایش XRF)

Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Sr	Zr
۲/۴	۱/۹	۱۱/۸	۵۳/۹	۰/۱	۲/۴	۱۲/۲	۰/۳۷	۲/۹	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۱۸

جدول ۴. حدود دانه بندی مصالح سنگی شماره ۵ مطابق جدول ۱-۹ نشریه ۲۳۴

اندازه الک	۱۲/۵	۹/۵	۴/۷۵	۲/۳۶	۰/۳	۰/۰۷۵
محدوده درصد عبوری مجاز	۱۰۰-۱۰۰	۹۰-۱۰۰	۵۵-۸۵	۳۲-۶۷	۷-۲۳	۲-۱۰
درصد وزنی عبوری از هر الک	۱۰۰	۹۵	۷۰	۴۹/۵	۱۵	۶

جدول ۵. حدود دانه بندی مصالح سنگی ماسه آسفالت مطابق نشریه ۲۳۴

اندازه الک	۹/۵	۴/۷۵	۲/۳۶	۱/۱۸	۰/۶	۰/۳	۰/۱۵	۰/۰۷۵
محدوده درصد عبوری مجاز	۱۰۰-۱۰۰	۸۰-۱۰۰	۶۵-۱۰۰	۴۰-۸۰	۲۵-۶۵	۷-۴۰	۳-۲۰	۲-۱۰
درصد وزنی عبوری از هر الک	۱۰۰	۹۰	۸۲/۵	۶۰	۴۵	۲۳/۵	۱۱/۵	۵/۵

۲-۲. آزمایش ها

هدف از انجام این پژوهش، بررسی میزان تأثیر میان-لایه ی جاذب تنش از نوع ماسه آسفالت می باشد. طبق تعریف، میان لایه ی جاذب تنش لایه ای می باشد که با جذب انرژی بیشتر، دیرتر به حد گسیختگی می رسد و می تواند در برابر بازشدگی و رشد ترک مقاومت نماید. همچنین، می تواند با مقاومت در برابر نفوذ رواناب به لایه های زیرین روسازی، از تخریب بیشتر آن جلوگیری به عمل آورد. بر این اساس، در این پژوهش، از آزمایش کشش غیرمستقیم به منظور ارزیابی مقاومت کششی میان لایه ماسه آسفالت و لایه روکش استفاده گردید. با اندازه گیری انرژی شکست، میزان جذب انرژی هر کدام از میان لایه ها و لایه روکش اندازه گیری گردید و به عنوان پارامتری که خصوصیات مکانیک شکست لایه آسفالتی را نشان می دهد در نظر گرفته شد. با استفاده از آزمایش لاتمن اصلاح شده و آزمایش آب جوشان تگراس، حساسیت رطوبتی و مقاومت میان لایه در برابر نفوذ رواناب مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین، از

آزمایش شیارشدگی به منظور بررسی خصوصیات شیارشدگی میان لایه ی ماسه آسفالت و میان لایه ی ماسه آسفالت حاوی پودر لاستیک استفاده گردید. برای تعیین درصد قیر بهینه برای لایه روکش و میان لایه ی ماسه آسفالت از روش طرح اختلاط مارشال استفاده گردید. برای تعیین میزان قیر بهینه، ابتدا نمودارهای مربوط به استقامت، روانی، وزن مخصوص واقعی، فضای خالی بین مصالح سنگی و فضای خالی نمونه های متراکم شده در درصدهای مختلف قیر ترسیم می شوند. از آنجا که درصد قیری که سبب بیشترین مقدار استقامت مارشال می شود ممکن است همان درصد قیری نباشد که بیشترین وزن مخصوص را سبب می شود و یا به ازای آن مقدار فضای خالی بتن آسفالتی مناسب ترین نباشد، بنابراین بر اساس روش معمول مقدار قیری که برای ساختن مخلوط آسفالتی به کار می رود میانگین مقادیری است که بیشترین استقامت مارشال، بیشترین وزن مخصوص و مناسب ترین مقدار فضای خالی را در آسفالت سبب می شود.

مورد آزمایش قرار گرفتند. مقدار جابجایی نمونه در حین بارگذاری با استفاده از جابجایی سنج خطی¹ (LVDT) نصب شده روی فک بارگذاری اندازه-گیری گردید. انرژی شکست را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه نمود:

$$F_E = \int_0^{\delta_{Max}} P(\delta)d\delta / (HD) \quad (1)$$

که در این رابطه F_E انرژی شکست نهایی تا نقطه‌ی گسیختگی (J/m^2)، P مقدار بار (N)، δ جابجایی (mm)، H ضخامت نمونه (mm) و D قطر نمونه (mm) می‌باشد.

آزمایش لاتمن اصلاح‌شده یکی از انواع آزمایش-های کمی ارزیابی حساسیت رطوبتی می‌باشد. برای انجام این آزمایش، از هر کدام از مخلوط‌های آسفالتی (لایه‌ی روکش، میان‌لایه‌ی ماسه آسفالت، میان‌لایه‌ی ماسه آسفالت حاوی پودر لاستیک) ۶ نمونه با درصد قیر بهینه‌ی آزمایش مارشال ساخته شد. در این آزمایش، مقاومت کششی غیرمستقیم برای سه نمونه در حالت خشک و برای سه نمونه در حالت مرطوب طبق استاندارد AASHTO T-283 (AASHTO، ۲۰۱۴) تعیین می‌گردد. بر اساس این استاندارد، نمونه‌های مرطوب ابتدا توسط پمپ خلأ به صورت نسبی اشباع می‌شوند و پس از آن به مدت ۲۴ ساعت در حمام آب گرم با دمای ۶۰ درجه سلسیوس قرار می‌گیرند. پس از خروج از حمام آب، درون آب با دمای ۲۵ درجه سلسیوس قرار گرفته و پس از آنکه دمای نمونه به ۲۵ درجه سلسیوس رسید از درون آب خارج شده و درون دستگاه بارگذاری قرار می‌گیرند. با تقسیم مقادیر به‌دست‌آمده در حالت مرطوب به مقادیر به‌دست‌آمده در حالت خشک، نسبت TSR به‌دست می‌آید که شاخص

آزمایش کشش غیر مستقیم بر اساس استاندارد ASTM D6931 (ASTM، ۲۰۱۲) روی درصد‌های قیر متفاوت انجام گرفت. برای بررسی تأثیر درصد قیرهای مختلف بر کشش غیر مستقیم مخلوط‌های آسفالتی، مطابق استاندارد از هر درصد قیر سه نمونه ساخته شد و پس از خارج کردن نمونه‌ها از قالب به مدت ۱۲ ساعت در دمای ۲۵ درجه نگهداری شدند. سپس، درون دستگاه قرار گرفتند و بارگذاری با سرعت ۵۱ میلی‌متر در دقیقه تا زمان شکست نمونه‌ها ادامه پیدا کرد و حداکثر نیروی ثبت شده که نشان‌دهنده مقاومت کششی غیر مستقیم مخلوط آسفالتی بود ثبت گردید. هرچند با انجام آزمایش مارشال قیر بهینه‌ی مخلوط‌های آسفالتی لایه‌ی روکش و میان‌لایه‌ی ماسه آسفالت تعیین شد. اما با انجام آزمایش کشش غیر مستقیم برای نمونه‌هایی با درصد‌های متفاوت قیر می‌توان مقدار قیر نمونه‌هایی که بیشترین مقاومت کششی و در نتیجه بیشترین مقاومت در برابر ترک خوردگی مود اول را دارا می‌باشد تعیین نمود.

برای تعیین عملکرد نمونه‌ها در برابر ترک‌خوردگی، می‌توان پارامترهای مختلفی مانند مقاومت کششی غیرمستقیم، انرژی شکست نهایی و مقدار انرژی شکست تا نقطه‌ی گسیختگی را تعیین نمود. انرژی شکست به‌عنوان مقدار کاری است که برای ایجاد سطح واحد ترک‌خوردگی باید انجام شود و برابر با سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی تا لحظه‌ی رسیدن به حداکثر نیرو (نیروی گسیختگی) می‌باشد. انرژی شکست نهایی برابر با کل مساحت زیر منحنی نیرو-جابجایی می‌باشد. در این پژوهش، انرژی شکست میان‌لایه‌ی ماسه آسفالت و میان‌لایه‌ی ماسه آسفالت اصلاح‌شده با پودر لاستیک تعیین گردید و با انرژی شکست نمونه‌های آسفالتی لایه‌ی روکش مقایسه گردید. به این منظور، از هر نمونه سه عدد و با میزان قیر بهینه ساخته شد. سپس، با استفاده از فک آزمایش کشش غیر مستقیم

¹ - Linear variable differential transformer

با ابعاد ۴۴۰×۳۰۰×۵۰ میلی متر ساخته شد و توسط دستگاه شیارشدگی چرخ موجود در آزمایشگاه راه و ترابری دانشگاه تربیت مدرس مورد آزمایش قرار گرفت. نمونه های مورد آزمایش شامل نمونه ی فاقد میان لایه، نمونه ی دارای میان لایه ی ماسه آسفالت به ضخامت ۲۵ میلی متر و نمونه ی دارای میان لایه ی ماسه آسفالت اصلاح شده با پودر لاستیک به ضخامت ۲۵ میلی متر بود. تصویری از نمونه ی دارای میان لایه ی ماسه آسفالت در شکل ۱ نشان داده شده است. مشخصات دال های آسفالتی مورد آزمایش مطابق جدول ۶ بود. میزان تراکم در روسازی آسفالتی بسیار حائز اهمیت می باشد. به همین دلیل، پس از ساخت نمونه های دال آسفالتی از آنها نمونه گیری - مغزه گیری - گردید و به وسیله ی آزمایش تعیین وزن مخصوص و آزمایش تعیین درصد فضای خالی، تراکم نمونه و میزان فضای خالی نمونه به گونه ای تعیین شد که شرایط مخلوط آسفالتی همانند شرایط مخلوط آسفالتی حاوی قیر بهینه باشد. با توجه به اینکه اصولاً لایه های روسازی در دماهای زیاد با مشکل ایجاد شیارشدگی مواجه می گردند، این آزمایش در دمای ۴۵ درجه سلسیوس صورت گرفت. مقدار بار وارده از سوی چرخ ۶۵۰ نیوتن و تعداد دفعات بارگذاری ۸۰۰۰ سیکل تعیین شد.

مؤثری برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط های آسفالتی می باشد:

$$(2) \quad TSR = \frac{ITS_{\text{مرطوب}}}{ITS_{\text{خشک}}} \times 100$$

در آزمایش آب جوشان تگراس، حساسیت رطوبتی و میزان عریان شدگی مخلوط آسفالتی به صورت کیفی و بصری مورد ارزیابی قرار می گیرد. در این آزمایش، پس از اختلاط کامل سنگ دانه ها با قیر تا حدی که تمامی سطح سنگ دانه ها به طور کامل به قیر آغشته گردد، مخلوط آسفالتی در فضای باز قرار می گیرد تا کاملاً سرد گردد. پس از اینکه سنگ دانه ها کاملاً سرد و به صورت ذرات جدای از هم درآمدند، مخلوط آسفالتی به مدت ۱۰ دقیقه در آب جوش قرار داده می شود و سپس از آن خارج می گردد. با مشاهده ی بصری مخلوط آسفالتی ماسه آسفالت و ماسه آسفالت حاوی پودر لاستیک، مقدار عریان شدگی به طور تقریبی تعیین می شود. در این تحقیق، از هر کدام از مخلوط های ماسه آسفالتی سه نمونه ساخته شد و مورد آزمایش آب جوشان قرار گرفت.

از آزمایش شیارشدگی چرخ به منظور تعیین خصوصیات شیارشدگی لایه ی روکش آسفالتی و لایه های میان لایه آسفالتی و میان لایه آسفالتی حاوی پودر لاستیک استفاده گردید. به همین دلیل، دال های آسفالتی



شکل ۱. نمونه ی دارای میان لایه ی ماسه آسفالت

جدول ۶. مشخصات دال‌های ساخته شده برای آزمایش شیارشدگی چرخ

دمای آزمایش	ابعاد			لایه‌ی آسفالتی	
	ارتفاع	عرض	طول		
					میان‌لایه
۴۵	۰	۵۰	۳۰۰	۴۴۰	لایه روکش (شاهد)
۴۵	۲۵	۲۵	۳۰۰	۴۴۰	میان‌لایه ماسه آسفالت
۴۵	۲۵	۲۵	۳۰۰	۴۴۰	میان‌لایه ماسه آسفالت حاوی قیر اصلاح‌شده با پودر لاستیک

۳. نتایج و تحلیل

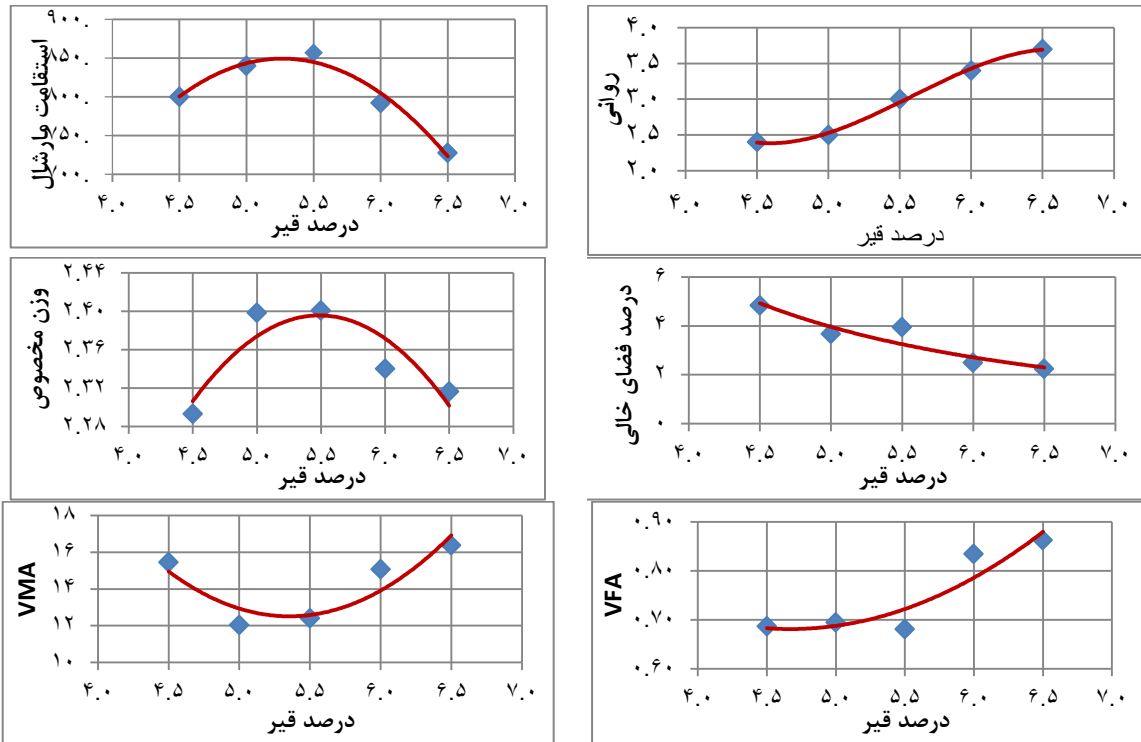
هرچند یکی از رویکردهای اصلی در تحقیقات، بررسی عملکرد قیرهای اصلاح شده در مقایسه با قیر بهینه آن‌ها می‌باشد ولی با توجه به اینکه یکی از اهداف این تحقیق صرفاً مقایسه‌ی عملکرد میان‌لایه‌ی ماسه آسفالت و ماسه آسفالت حاوی پودر لاستیک بود، سعی گردید تا تمام شرایط آزمایش برای هر دو مخلوط آسفالتی یکسان باشد. به همین دلیل، برای ساخت نمونه‌های ماسه آسفالت حاوی پودر لاستیک از درصد قیر مشابه نمونه‌های ماسه آسفالتی فاقد پودر لاستیک استفاده شد.

۳-۱. آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

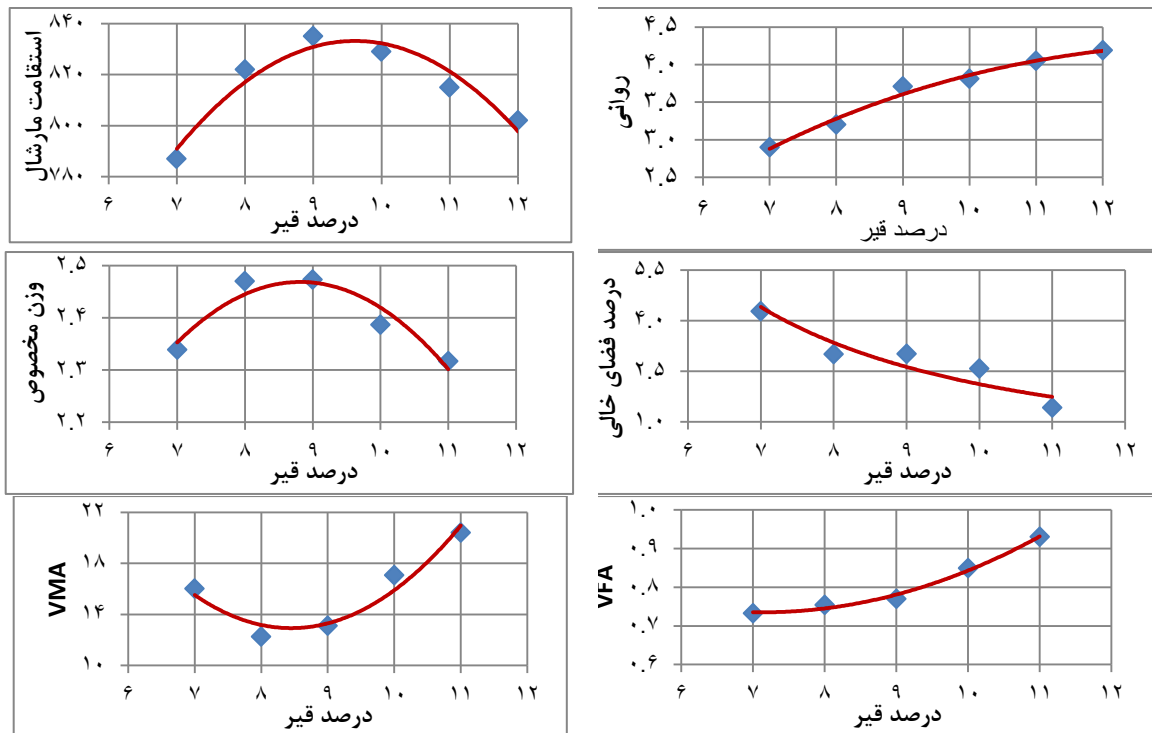
نتایج آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم برای لایه‌ی روکش و لایه‌ی ماسه آسفالتی به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. همان‌گونه که از این شکل‌ها مشخص است، مقاومت کششی غیرمستقیم برای نمونه‌های میان‌لایه ماسه آسفالت به مراتب بیشتر از نمونه‌های لایه روکش می‌باشد که علت این امر را می‌توان به مقدار زیاد فیلر موجود در مخلوط ماسه آسفالت نسبت داد.

جهت تعیین درصد قیر بهینه برای لایه روکش و میان‌لایه‌ی ماسه آسفالت، از روش طرح اختلاط مارشال استفاده گردید. نمودارهای شش‌گانه‌ی مربوط به آزمایش مارشال مخلوط آسفالتی لایه‌ی روکش و مخلوط آسفالتی ماسه آسفالت در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. برای لایه‌ی روکش نمونه‌های مارشال با مقادیر قیر ۴/۵، ۵، ۵/۵، ۶ و ۶/۵ درصد ساخته شد. با توجه به نمودارهای شش‌گانه‌ی مارشال، مقدار بهینه‌ی قیر مورد استفاده در این مخلوط آسفالتی ۵/۲۵ درصد تعیین گردید. همچنین، برای تعیین قیر بهینه‌ی میان‌لایه‌ی ماسه آسفالتی، نمونه‌های مارشال با مقدار قیر ۷، ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱ درصد ساخته شد و مشخصات آن‌ها مطابق بند ۹-۷-۸ نشریه ۲۳۴ سازمان برنامه و بودجه تعیین گردید. بر اساس این بند، مشخصات ماسه آسفالت باید همانند دیگر مخلوط‌های آسفالتی ملزومات جدول ۹-۱۳ این نشریه را رعایت کند. با استفاده از نمودارهای مذکور، مقدار بهینه‌ی قیر برای مخلوط آسفالتی میان‌لایه ۸/۴ درصد تعیین گردید.

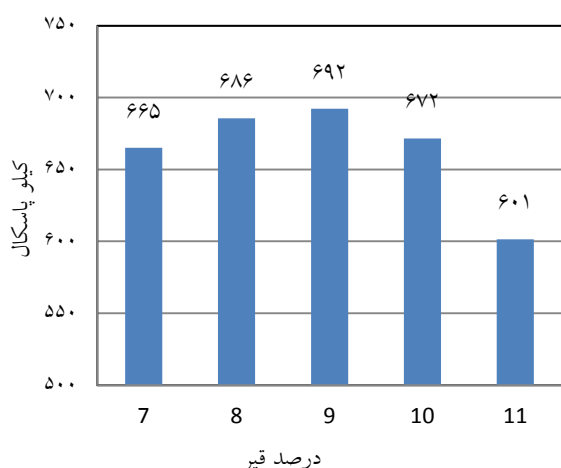
ارزیابی خصوصیات عملکردی میان لایه ی جاذب تنش ماسه آسفالتی



شکل ۲. نتایج آزمایش مارشال برای لایه ی روکش

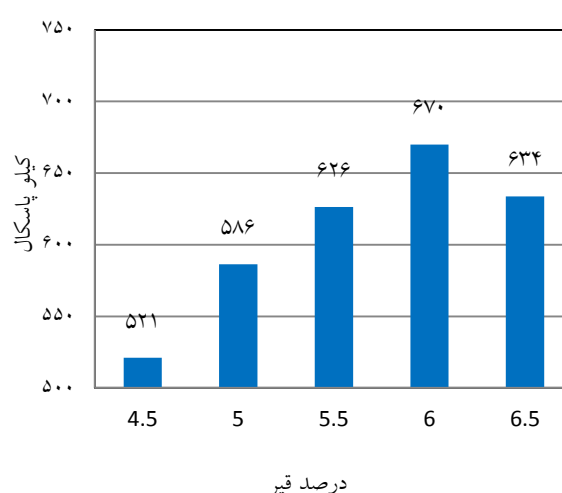


شکل ۳. نتایج آزمایش مارشال برای میان لایه ی ماسه آسفالت



شکل ۵. مقاومت کششی میان لایه

شکست برای نمونه‌های لایه روکش و میان‌لایه‌ها به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۶ می‌توان گفت هرچند مخلوط آسفالتی لایه روکش و میان‌لایه ماسه آسفالتی هنگام گسیختگی جابجایی یکسانی را تجربه نموده‌اند، اما با توجه به جذب نیروی بیشتر مخلوط ماسه آسفالت در مقدار جابجایی‌های ثابت، مساحت زیر منحنی برای مخلوط ماسه آسفالت بیشتر می‌باشد. همچنین، مخلوط ماسه آسفالت حاوی پودر لاستیک در مقایسه با لایه‌ی روکش جابجایی‌های بیشتری را قبل از رسیدن به حد گسیختگی از خود نشان می‌دهد که این عامل باعث افزایش مساحت زیر منحنی ماسه آسفالت نسبت به لایه‌ی روکش می‌گردد. از طرفی، با مقایسه منحنی‌های ماسه آسفالت و ماسه آسفالت حاوی پودر لاستیک می‌توان گفت هرچند در مقدار جابجایی ثابت، ماسه آسفالت نیروی بیشتری را تحمل نموده است، اما در جابجایی کمتری به گسیختگی رسیده است. در واقع، ماسه آسفالت حاوی پودر لاستیک می‌تواند نسبت به ماسه آسفالت جابجایی‌های بیشتری را تحمل نماید

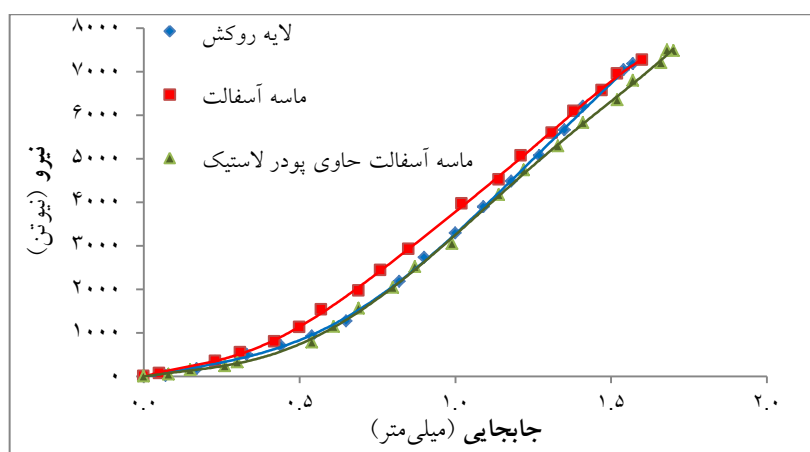


شکل ۴. مقاومت کششی لایه روکش

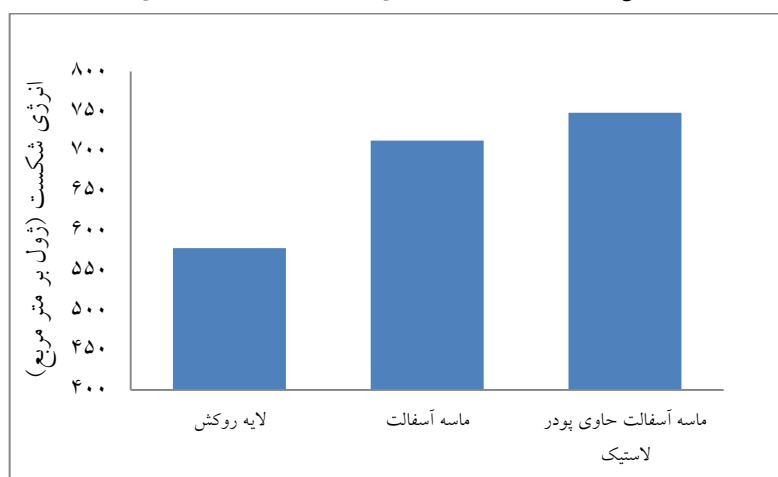
بیشترین مقاومت کششی غیرمستقیم برای نمونه‌های میان‌لایه‌ی ماسه آسفالت برای مقدار قیر ۹٪ به دست آمده است. قیر ۹٪ بیشترین مقاومت مارشال را نیز از آن خود کرده بود. این در حالی است که درصد قیر بهینه بر اساس روش مارشال برابر ۸/۴ درصد تعیین شده است. همچنین، بیشترین مقاومت کششی غیرمستقیم برای نمونه‌های لایه‌ی روکش برای ۶٪ قیر به دست آمد. بیشترین مقاومت مارشال و قیر بهینه برای این لایه آسفالتی به ترتیب در مقادیر قیرهای ۵/۵ و ۵/۲ حاصل شد. این نتایج در حالی افزایش مقاومت کششی غیر مستقیم میان‌لایه‌ی ماسه آسفالت را نشان می‌دهد که برون و باست (۱۹۸۹) نشان دادند مقدار فیلر موجود در مخلوط آسفالتی است که رابطه‌ی مستقیمی با مقاومت کششی غیر مستقیم مخلوط آسفالتی دارد. با توجه به مقدار بالای فیلر موجود در مخلوط میان‌لایه ماسه آسفالت، می‌توان مقاومت کششی غیرمستقیم بالای این میان‌لایه را به این عامل نسبت داد.

۲-۳. تعیین انرژی شکست

نمودارهای نیرو- جابجایی و نمودار میزان انرژی



شکل ۶. نمودار نیرو- جابجایی برای مخلوط‌های آسفالتی



شکل ۷. انرژی شکست برای نمونه‌های مختلف

نسبی استفاده از پودر لاستیک در میان لایه‌ها باشد. افزایش خصوصیات الاستیک و برگشت‌پذیری مخلوط آسفالتی حاوی پودر لاستیک را می‌توان دلیل این امر دانست (اصغرزاده و همکاران، ۲۰۱۳).

۳-۳. آزمایش لاتمن اصلاح شده

مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های خشک و تر و همچنین نسبت TSR برای مخلوط‌های آسفالتی لایه‌ی روکش، میان لایه‌ی ماسه آسفالت و میان لایه‌ی ماسه آسفالت حاوی پودر لاستیک در جدول ۷ نشان داده شده است.

همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، انرژی شکست مخلوط ماسه آسفالتی بیشتر از مخلوط‌های آسفالتی لایه‌ی روکش است که این مطلب می‌تواند نشانگر تأثیر مثبت استفاده از این میان لایه در برابر رشد ترک در روسازی‌ها باشد. عامل اصلی جذب انرژی زیاد توسط مخلوط ماسه آسفالت، دانه‌بندی مخصوص و مقدار زیاد قیر آن می‌باشد که باعث افزایش انرژی شکست این مخلوط آسفالتی نسبت به مخلوط آسفالتی لایه‌ی روکش می‌گردد.

همچنین، ماسه آسفالت حاوی پودر لاستیک انرژی شکست بیشتری در مقایسه با مخلوط‌های آسفالتی فاقد پودر لاستیک دارد که باز هم می‌تواند بیانگر مزیت

نسبت TSR (%)	مقاومت کششی غیرمستقیم (کیلوپاسکال)		نوع مخلوط آسفالتی
	حالت تر	حالت خشک	
۷۱/۱	۴۵۴	۶۳۸	لایه روکش
۸۹/۰	۶۱۵	۶۹۱	میان‌لایه ماسه آسفالت
۸۹/۶	۶۲۰	۶۹۲	میان‌لایه ماسه آسفالت حاوی پودر لاستیک

مراتب بیشتر از مقادیر آیین‌نامه‌ی ایران می‌باشد. حساسیت رطوبتی کمتر لایه ماسه آسفالت و مقاومت بیشتر این لایه در برابر نفوذ جریان‌های آب که به دلیل درصد زیاد قیر این لایه رخ می‌دهد را می‌توان دلیلی بر استفاده از این نوع میان‌لایه به عنوان لایه‌ی آب‌بند یا مقاوم در برابر نفوذ آب دانست.

۳-۴. آزمایش آب جوشان تگراس

در شکل‌های ۸ و ۹ تصاویر مخلوط‌های آسفالتی پس از انجام آزمایش آب جوشان تگراس نشان داده شده است. همچنین، مقادیر درصد پوشش قیر اطراف مصالح سنگی، قبل و بعد از انجام این آزمایش در جدول ۸ بیان شده است.

میان‌لایه‌ی ماسه آسفالت و ماسه آسفالت حاوی پودر لاستیک مقادیر مقاومت کششی خشک و مرطوب نزدیک به هم و همچنین نسبت TSR مشابهی را دارا هستند. این مطلب نشان می‌دهد که استفاده از پودر لاستیک تأثیر مثبت (یا منفی) بر مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط ماسه آسفالت نداشته است. همچنین، مقاومت کششی غیرمستقیم (خشک و مرطوب) لایه‌ی روکش در مقایسه با میان‌لایه ماسه آسفالت کمتر بوده و نیز نسبت TSR برای آسفالت لایه‌ی روکش کمتر از میان‌لایه‌های ماسه آسفالت می‌باشد. با مقایسه‌ی این اعداد با حداقل مقدار مجاز نسبت TSR که طبق بند ۹-۷-۶-۷ نشریه ۲۳۴ برابر ۷۵٪ می‌باشد، می‌توان گفت هرچند نسبت TSR برای لایه‌ی روکش مقادیر آیین-نامه‌ای را ارضا نمی‌کند اما این نسبت برای مخلوط ماسه آسفالت و ماسه آسفالت حاوی پودر لاستیک به



شکل ۹. مخلوط ماسه آسفالت بدون افزودنی



شکل ۸. مخلوط ماسه آسفالت حاوی پودر لاستیک

جدول ۸. نتایج مربوط به آزمایش آب جوشان برای مخلوط میان لایه ماسه آسفالتی

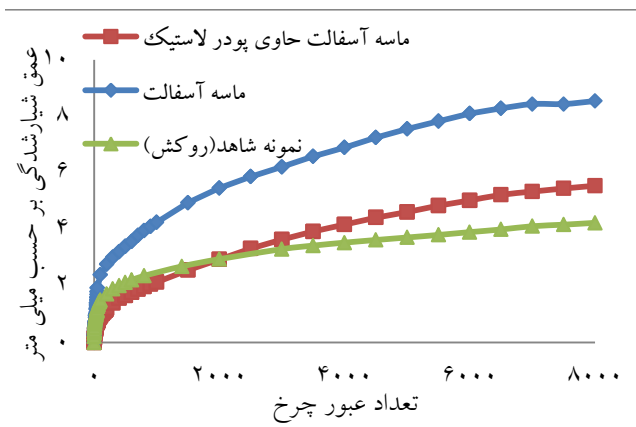
نوع مخلوط آسفالتی	درصد پوشش قیر اطراف مصالح سنگی قبل از آزمایش	درصد پوشش قیر اطراف مصالح سنگی بعد از آزمایش
ماسه آسفالت بدون پودر لاستیک	۱۰۰	۰-۱۰
ماسه آسفالت حاوی ۱۵ درصد پودر لاستیک	۱۰۰	۹۰-۱۰۰

پودر لاستیک و افزایش ضخامت لایه ی قیر اطراف سنگدانه نسبت داد (اندرتون و همکاران، ۱۹۹۲). نتایج این آزمایش با نتایج تحقیقات اداره حمل و نقل ایالت ویرجینیا (مائوپین، ۱۹۹۱) و داوچیک و همکاران (۲۰۱۱) مطابقت داشت.

۳-۵. آزمایش شیارشدگی چرخ

دال آسفالتی پس از بارگذاری در شکل ۱۰ و نمودارهای رسم شده که نشان دهنده ی میزان شیارشدگی هر یک از نمونه ها پس از عبور ۸۰۰۰ سیکل بارگذاری می باشند در شکل ۱۱ نشان داده شده است. می توان گفت نمونه ای که دارای میان لایه ی ماسه آسفالت بود در مقایسه با نمونه ای که فاقد آن بود دارای عمق شیار بزرگتری بود که این عامل را می توان به مقدار درصد قیر زیاد ماسه آسفالت و نرم تر بودن این لایه نسبت داد. همچنین، نمونه های ماسه آسفالت حاوی پودر لاستیک، دچار شیارشدگی کمتری نسبت به نمونه های فاقد پودر لاستیک شدند که این عامل به دلیل استفاده از پودر لاستیک در میان لایه ی ماسه آسفالتی می باشد. به طوری که میزان شیار شدگی این نمونه، تنها اندکی بیشتر از نمونه ی شاهد بود. نتایج آزمایش های اداره ی حمل و نقل ایالت فلوریدا نیز مؤید این موضوع می باشد.

همانطور که از شکل های ۷ و ۸ و نتایج جدول ۸ برداشت می شود، نمونه حاوی پودر لاستیک در مقایسه با نمونه فاقد پودر لاستیک، مقاومت بسیار خوبی را در برابر عریان شدگی از خود نشان داده است. باید دانست که با توجه به اینکه مخلوط آسفالتی ماسه آسفالت با استفاده از سنگدانه ی سیلیسی ساخته شده بود نتوانست بدون حضور ماده ی افزودنی مقاومت مناسبی از خود در برابر عریان شدگی نشان دهد. با در نظر گرفتن درصد زیاد SiO_2 و همچنین فلزات حد واسط Al_2O_3 و Fe_2O_3 می توان گفت که حضور مؤلفه های قلیایی (K_2O + Na_2O + MgO + CaO) به مقدار ناچیز نمی تواند تأثیر محسوسی در بهبود خواص عریان شدگی داشته باشد (خانی سانچ و همکاران، ۲۰۱۶). از آنجایی که سنگدانه های سیلیسی در سطح خود دارای بار منفی قوی تری هستند، تمایل به جذب بار الکتریکی مثبت دارند. از طرف دیگر ملکول های آب قطبی هستند و می توانند بار الکتریکی منفی موجود در سطح مصالح سیلیسی را خنثی کرده و جانشین قیر شوند که این مسئله باعث ایجاد پدیده ی عریان شدگی در مصالح سیلیسی می شود؛ هرچند، با حضور پودر لاستیک به عنوان ماده افزودنی، مقاومت ماسه آسفالت در برابر عریان شدگی به طور چشمگیری افزایش یافت. علت این امر را می توان به ویسکوزیته ی زیاد قیر اصلاح شده با



شکل ۱۱. میزان شیارشدگی برای نمونه‌های آسفالتی ساخته شده



شکل ۱۰. نمونه‌ی شاهد پس از آزمایش شیارشدگی چرخ

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، عملکرد میان‌لایه‌ی ماسه آسفالت به‌عنوان یکی از انواع میان‌لایه‌های جاذب تنش مورد بررسی قرار گرفت. هدف اصلی، استفاده از میان‌لایه‌ی جاذب تنش و کاهش ترک‌های انعکاسی در لایه روکش آسفالتی می‌باشد. هرچند جلوگیری از نفوذ رواناب به سازه‌ی روسازی و جلوگیری از تخریب آن نیز یکی دیگر از مزایای وجود میان‌لایه‌ی جاذب تنش است. در این پژوهش، با استفاده از آزمایش‌هایی مانند کشش غیرمستقیم، تعیین انرژی شکست، لاتمن اصلاح‌شده، آب جوشان و شیارشدگی چرخ، خصوصیات میان‌لایه ماسه آسفالت حاوی پودر لاستیک و فاقد آن و لایه‌ی روکش آسفالتی مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین، تأثیر افزودنی پودر لاستیک بر خصوصیات میان‌لایه‌ی ماسه آسفالت بررسی گردید و نتایج زیر حاصل شد:

مربع نسبت به لایه‌ی روکش که دارای انرژی شکست ۵۷۸ ژول بر متر مربع بود، توانایی بیشتری در جذب و مستهلک نمودن انرژی داشتند.

- با انجام آزمایش لاتمن اصلاح‌شده مشخص گردید که نسبت TSR برای ماسه آسفالت و ماسه آسفالت اصلاح‌شده با ۱۵٪ پودر لاستیک برابر با ۸۹ و ۸۹/۶۳ درصد بود. در حالی که همین نسبت برای لایه‌ی روکش برابر با ۷۱/۱۶ درصد اندازه‌گیری گردید. این مقادیر نشان‌دهنده‌ی مقاومت بیشتر ماسه آسفالت در برابر حساسیت رطوبتی می‌باشد. همچنین، آزمایش آب جوشان تگراس نشان داد که با افزودن ۱۵٪ پودر لاستیک به مخلوط آسفالتی ماسه آسفالت می‌توان مقاومت این میان‌لایه در برابر عریان‌شدگی را تا ۹۰٪ به طور چشمگیری افزایش داد.

- آزمایش شیارشدگی چرخ نشان داد که با استفاده از میان‌لایه ماسه آسفالت در روسازی، مقدار شیارشدگی افزایش می‌یابد. اما با افزودن پودر لاستیک به آن می‌توان تا حدود زیادی مقدار شیارشدگی را کنترل نمود. به‌طوری که مقدار شیارشدگی برای نمونه‌های دارای میان‌لایه‌ی حاوی پودر لاستیک تقریباً برابر با مقدار شیارشدگی نمونه‌های بدون میان‌لایه بود.

- با توجه به بیشتر بودن مقاومت کششی غیرمستقیم میان‌لایه‌ی ماسه آسفالت می‌توان گفت که این لایه می‌تواند در جلوگیری از ایجاد ترک‌های مود اول (ترک‌های ناشی از کشش) مؤثر باشد. همچنین، با توجه به خصوصیات جذب انرژی میان‌لایه‌ها می‌توان گفت که میان‌لایه‌های ماسه آسفالت و ماسه آسفالت اصلاح‌شده با پودر لاستیک به ترتیب با دارا بودن انرژی شکست ۷۱۳ و ۷۴۸ ژول بر متر

فوق، با کاهش پتانسیل شیارشدگی این مخلوط، در نهایت می‌تواند گزینه نهایی پیشنهادی برای میان‌لایه جاذب تنش را ارائه دهد که استفاده از میان‌لایه ماسه آسفالتی اصلاح شده با پودر لاستیک به میزان ۱۵٪ خواهد بود. ارزیابی توان کاهش ترک‌های آسفالتی این مخلوط آسفالتی با استفاده از آزمایش‌های مناسب در تحقیقات دیگر پیشنهاد می‌شود.

در نهایت، می‌توان گفت که مخلوط ماسه آسفالت، با توجه به احراز مشخصات ذکر شده در این تحقیق مانند مقاومت کششی زیاد، قابلیت جذب انرژی مناسب، نفوذپذیری کم و مقاومت خوبا در مقابل تأثیرات رطوبت می‌تواند گزینه مناسبی برای استفاده به عنوان میان‌لایه جاذب تنش باشد. افزودن پودر لاستیک به مخلوط ماسه آسفالتی نیز علاوه بر داشتن مشخصات

۵. مراجع

- آقاجانی، پ. و مقدس نژاد، ف. ۱۳۹۰. "اصلاح مشخصات قیر با استفاده از افزودنی پودر لاستیک". ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.
- پورعباس، م.، مرندي، م. و جبال بارزی، م. ۱۳۹۰. "تأثیر استفاده از قیرهای اصلاح شده با پودر لاستیک ضایعاتی در کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی و افزایش عمر آسفالت". پنجمین همایش تخصصی مهندسی محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران.
- خانی سانج، ح.، خبیری، ر. اسمعیلی، م. ۱۳۹۵. "ارزیابی آزمایشگاهی روشهای مقابله با پدیده عریان شدگی در مخلوط‌های آسفالتی گرم". فصلنامه علمی - پژوهشی مهندسی حمل و نقل، ۷(۴): ۶۷۹-۶۸۸.
- کاووسی، ا.، تقوی زواره، ح. و آذرینیا، م. ۲۰۱۶. ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی حاوی گوگرد پلیمری با بکارگیری قیر لاستیکی. مهندسی حمل و نقل، ۷(۳): ۵۵۷-۵۶۷.
- AASHTO T-283. 2014. "Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage". American Association of State and Highway Transportation Officials.
- Amirkhanian, S. N., Xiao, F. and Sockwell, K. 2015. "Performance properties of polymer modified pelletized asphalt mixtures". ASCE, Airfield and Highway Pavements, pp. 120-130, <http://dx.doi.org/10.1061/9780784479216.012>.
- Anderton, G. L., Cooper, G. L., Epps, J. A., Hansen, K. R., Jimenez, R. A., Krutz, N. C. and Stroup-Gardiner, M. 1992. "Construction productivity advancement research (CPAR) program". No. CPAR-GL-92-2.
- Asgharzadeh, S. M., Tabatabaee, N., Naderi, K. and Partl, M. 2013. "An empirical model for modified bituminous binder master curves". Mater. Struc., 46(9): 1459-1471.
- ASTM D6931. 2012. "Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Bituminous Mixtures". American Society for Testing and Material.
- Baek, J., Al-Qadi, I. 2011. "Sand mix interlayer to control reflective cracking in hot-mix asphalt overlay". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (2227), 53-60.
- Bahadori, A. M., Mansourkhaki, A. and Ameri, M. 2014. "A phenomenological fatigue performance model of asphalt mixtures based on fracture energy density". J. Testing Eval., 43(1): 133-139.
- Brown, E. R. and Bassett, C. E. 1989. "The effects of maximum aggregate size on properties of asphalt aggregate mixes". Highway Research Center, Harbart Engineering Centre, Auburn University, Alabama, Sponsored by National Stone Association, Washington, DC.
- Caltabiano, M. A. and Brunton, J. M. 1991. "Reflection cracking in asphalt overlays (with discussion)". Asphalt Paving Technology Conference, Seattle, WA.
- Daučík, P., Hadvinová, M. and Višňovský, J. 2011. "Methods for determination of affinity between aggregate and bitumen". 45th International Petroleum Conference, Bratislava, Slovak Republic.
- Dhokal, N., Elseifi, M. A. and Zhang, Z. 2016. "Mitigation strategies for reflection cracking in rehabilitated pavements-A synthesis". Int. J. Pave. Res. Technol., 9(3): 228-239.

- Greene, J., Choubane, B., Chun, S. and Kim, S. 2012. "Effect of asphalt rubber membrane interlayer (ARMI) on instability rutting and reflection cracking of asphalt mixture". Report No. FL/DOT/SMO/12-552, Florida Department of Transportation.
- Hasan, Z., Hamid, B., Amir, I. and Danial, N. 2013. "Long term performance of warm mix asphalt versus hot mix asphalt". *J. Central South Univ.*, 20(1); 256-266.
- Kim, S., Lee, S. J., Yun, Y. B. and Kim, K. W. 2014. "The use of CRM-modified asphalt mixtures in Korea: Evaluation of high and ambient temperature performance". *Constr. Build. Mater.*, 67: 244-248.
- Mallick, R. B. and El-Korchi, T. 2009. "Pavement Engineering: Principles and Practices". CRC Press.
- Maupin, G. W. 1991. "Installation and early performance of a field test section of asphalt rubber concrete". No. VTRC 92-IR1.
- Mehrara, A. and Khodaii, A. 2013. "A review of state of the art on stripping phenomenon in asphalt concrete". *Constr. Build. Mater.*, 38: 423-442.
- Molenaar, A., Heerkens, J. and Verhoeven, J. 1986. "Effects of stress absorbing membrane interlayers". *Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists*.
- Ogundipe, O. M. 2012. *Mechanical behaviour of stress absorbing membrane interlayers*. Doctoral Dissertation, University of Nottingham, UK.
- Penman, J. and Hook, K. D. 2008. "The use of geogrids to retard reflective cracking on airport runways, taxiways and aprons". *RILEM International Conference on Cracking in Pavements*, Chicago, IL.
- Shafabakhsh, G., Sadeghnejad, M. and Sajed, Y. 2014. "Case study of rutting performance of HMA modified with waste rubber powder. *Case Studies Constr. Mater.*, 1: 69-76.
- Shalaby, A. and L. Fréchet. 2000. "Reflective cracking on C-SHRP long term pavement performance sites. in reflective cracking in pavement research in practice". *Proceeding Of The 4th International Rilem Conference*, 26-30 March ,Ottawa, Canada.
- Tarefder, R. A. and Zaman, A. M. 2009. "Nanoscale evaluation of moisture damage in polymer modified asphalts". *J. Mater. Civ. Eng.*, 22(7): 714-725.
- Wang, H., Dang, Z., Li, L. and You, Z. 2013. "Analysis on fatigue crack growth laws for crumb rubber modified (CRM) asphalt mixing". *J. Constr. Build. Mater.*, 47: 1342-1349.
- West, R., Page, G., Veilleux, J., Choubane, B. 1998. "Effect of tire rubber grinding method on asphalt-rubber binder characteristics". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1638): p. 134-140
- Yang, J., Dai, P., Yu, B. and Yang, Y. 2008. "Asphalt sand stress absorbing interlayer used in asphalt pavement with semi-rigid base". *6th RILEM International Conference on Cracking in Pavement*, pp. 229-238.

