

ارزیابی عملکرد مخلوط آسفالتی حاوی قیر لاستیکی با فناوری پلیمریزاسیون (SPB) بر اساس بررسی‌های آزمایشگاهی و میدانی مطالعه موردی: کلانشهر مشهد

حسن نوری^۱، سید علی صحاف^۲، حسن حسین زاده^۳، سعید پرویزی^۴، عطا عصاره زادگان دزفولی^۵، مسعود علیزاده^۶

چکیده

آسفالت اصلاح شده با پودر لاستیک به دلیل عملکرد عالی در خدمت‌دهی به راه‌ها و ویژگی‌های محیط زیستی توجه زیادی را به خود جلب کرده است. مطالعات زیادی روی تاثیر پودر لاستیک بر بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی، همچون افزایش عمر خستگی، مقاومت شیارشدگی و کاهش حساسیت رطوبتی انجام گردیده است. قیرهای لاستیکی با فناوری پلیمریزاسیون (SPB)، نسل جدیدی از قیرهای پودر لاستیکی (CRMB) بوده و تفاوت این محصول پیشرفته با انواع قدیمی آن، در نحوه اختلاط قیر با لاستیک و بنابراین استحصال تمام خواص مورد انتظار از لاستیک در قیر و آسفالت می‌باشد. این مطالعه به ارزیابی عملکردی این قیر و مخلوط‌های آسفالتی حاوی این نوع قیر در آزمایشگاه پرداخته است. بدین منظور ابتدا طرح اختلاط آسفالت برای قشر توپکا ۱۹-۰ مطابق با روش مارشال انجام گرفته است. در این پروژه آزمایش‌های دوام رطوبتی و عملکردی آسفالت‌های تهیه شده با قیر خالص و قیر لاستیکی (SPB) (آزمایش مدول برجهندگی، تیرچه خمشی، شیارافتادگی) و همچنین آزمایش‌های تعیین رده عملکردی و آزمایش‌های رایج قیر انجام پذیرفت. نتایج نشان‌دهنده عملکرد نسبتاً مطلوب آسفالت حاوی قیر لاستیکی (SPB) در مقایسه با مخلوط‌های آسفالتی شاهد خصوصاً در مورد عمق شیارشدگی است. در مورد آزمایش‌های مربوط به قیر نیز، قیر لاستیکی (SPB) به جز در خصوص پایداری در انبارش، در تمامی موارد نتایج بهتری را نسبت به قیر خالص دارد. استفاده از قیر لاستیکی با فناوری پلیمریزاسیون (SPB) می‌تواند موجب بهبود دوام مخلوط‌های آسفالتی خصوصاً در محل‌های دارای بارمحوری سنگین و یا ایستا شود.

واژه‌های کلیدی: قیر اصلاح شده، پودر لاستیک، پلیمریزاسیون، قیر لاستیکی (SPB)، آزمایش‌های عملکردی.

^۱ کارشناس عمران شهرداری مشهد

^۲ استادیار گروه مهندسی عمران، گرایش راه و ترابری، دانشگاه فردوسی مشهد

^۳ کارشناسی ارشد مهندسی عمران، مسئول امور تحقیق و توسعه سازمان عمران شهرداری مشهد

^۴ کارشناسی ارشد راه و ترابری، مشاور قیرهای امولسیون و پلیمری

^۵ مسئول امور تولید آسفالت سازمان عمران شهرداری مشهد

^۶ کارشناسی ارشد شیمی، مدیر تحقیق و توسعه مجموعه پالایشگاهی قیر زرین، مخترع فناوری

۱- مقدمه

امروزه با افزایش روز افزون وسایل نقلیه عبوری از جاده‌ها و راه‌ها و نیز افزایش بار محوری آن‌ها، طراحی روسازی راه‌ها جهت جلوگیری از ایجاد انواع خرابی‌ها در آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱]. فرسودگی روسازی‌ها را می‌توان تا حد زیادی به بارهای محوری سنگین، شرایط آب و هوایی شدید و شرایط ضعیف زیرسازی نسبت داد. برای به حداقل رساندن تخریب روسازی (با کاهش وسعت یا شدت شیارها، ترک خوردگی و سایر آسیب‌ها)، در نتیجه افزایش طول عمر روسازی، اغلب لازم است مصالحی که لایه سطحی را تشکیل می‌دهند به گونه‌ای اصلاح شوند که در برابر عوامل فرسودگی مقاوم‌تر باشند. به طور خاص، چنین اصلاحاتی خواص مکانیکی قیر مانند مقاومت آن در برابر شیار و ترک خوردگی و در نهایت افزایش عملکرد (وضعیت و طول عمر) روسازی را افزایش می‌دهد. به منظور بهبود مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر خرابی‌ها، بکارگیری قیرهای اصلاح شده در روسازی‌ها پیشنهاد می‌شود. یکی از مهم‌ترین گروه افزودنی‌هایی که سبب بهبود خصوصیات قیر و مخلوط‌های آسفالتی می‌شود، پلیمرها هستند. از دیگر افزودنی‌های بسیار متداول مورد استفاده در صنعت روسازی که سبب انطباق پذیری بیشتر مخلوط‌های آسفالتی با شرایط آب و هوایی می‌شود، پودر لاستیک‌ها می‌باشند. مطالعات گذشته به دسته‌های مختلفی از اصلاح‌کننده‌ها، از جمله لاستیک استایرن-بوتادین^۱ (SBR)، استایرن-بوتادین-استایرن^۲ (SBS)، اتیلن-وینیل استات^۳ (EVA) و خرده لاستیک^۴ (CR) پرداخته است [۲-۵]. SBS و SBR کopolymerهای تجاری هستند که هزینه‌های اولیه ساخت روسازی یا روکش را گران‌تر می‌کنند. از سوی دیگر، CR کم‌هزینه‌تر است، زیرا از لاستیک‌های ضایعاتی ساخته می‌شود، که همچنین به کاهش مشکل فراگیر زباله جامد دفع زباله تایلر کمک می‌کند [۶]. همچنین، CR فاقد الیاف و فولاد است و فقط از لاستیک مصنوعی، لاستیک طبیعی، کربن سیاه، آنتی اکسیدان‌ها، پرکننده‌ها و روغن‌های نوع اکستندر تشکیل شده است که در محیط‌های روسازی داغ نامحلول هستند [۷-۹].

آسفالت اصلاح شده با خرده لاستیک^۵ (CRMB) می‌تواند به طور قابل توجهی پایداری در دمای بالا و چقرمگی^۶ آسفالت در دمای پایین را بهبود بخشد، دوام و عمر مفید روسازی را بهبود بخشد، به طور موثر مواد زباله را بازیافت کند [۴-۶] و هزینه ساخت روسازی آسفالت را کاهش دهد. در این راستا، آسفالت اصلاح شده با خرده لاستیک در سال‌های اخیر به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است. هنگامی که CR با قیر و سنگدانه مخلوط می‌شود، محصولی به دست می‌آید که به طور کلی آسفالت پودر لاستیکی^۷ (AR) نامیده می‌شود. AR با استفاده از (الف) فرآیند مرطوب، که در آن CR قبل از افزودن سنگدانه به قیر اضافه می‌شود، یا (ب) فرآیند خشک، که در آن CR و سنگدانه به‌طور همزمان به قیر اضافه می‌شوند، به دست می‌آید [۱۰، ۱۱]. CR روی پیری قیر هم در کوتاه مدت و هم در بلندمدت تأثیر می‌گذارد. از دست دادن جرم در پیری کوتاه مدت کاهش می‌یابد، که باعث کاهش اتلاف قیر در مرحله ساخت و ساز می‌شود. استحکام کششی غیرمستقیم (IDT) و مدول برجهنگی نیز افزایش می‌یابد که منجر به مقاومت بالا در برابر ترک خوردگی و تغییر شکل دائمی می‌شود [۱۲]. مطالعات متعددی روی آسفالت‌های اصلاح شده با خرده لاستیک و مخلوط‌های آن‌ها عمدتاً برای بهینه‌سازی فناوری پردازش آسفالت خرده لاستیک، ارزیابی عملکرد و تجزیه و تحلیل مکانیسم اصلاح آسفالت خرده لاستیک و مخلوط‌های آن انجام شده است [۶، ۸، ۱۳-۲۰].

¹ Styrene Butadiene Rubber

² Styrene-butadiene-styrene

³ Ethylene vinyl acetate

⁴ Crumb rubber

⁵ Crumb Rubber Modified Bitumen

⁶ Toughness

⁷ Asphalt rubber

پانزدهمین همایش ملی و نمایشگاه قیر، آسفالت و ماشین آلات

The 15th Bitumen, Asphalt & Machinery Conference & Exhibition

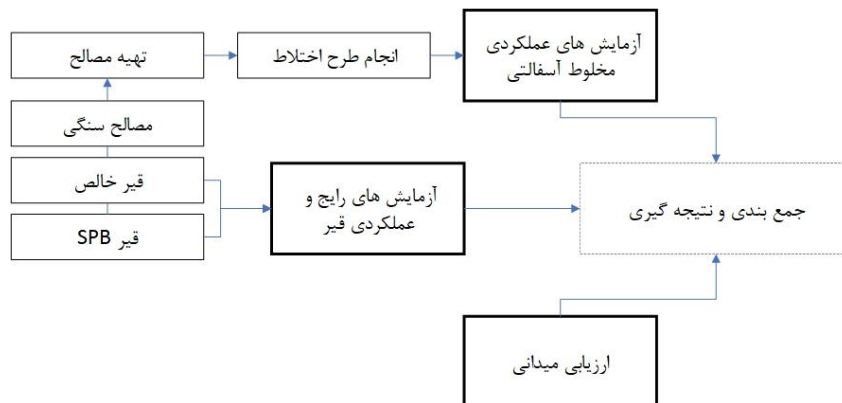
۹ الی ۱۱ آبان ماه ۱۴۰۲ - مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

31 October-2 November 2023 - Roads, Housing & Urban Development Research Center



یک شرکت دانش بنیان با فناوری منحصر بفرد و آسان و با استفاده از پودر لاستیکهای مستعمل اقدام به تولید نوعی قیر اصلاح شده به روش شیمیایی نموده است. قیرهای لاستیکی به روش پلیمریزاسیون (SPB)، نسل جدید از قیرهای پودر لاستیکی (CRMB) در جهان بوده و تفاوت این محصول پیشرفته با انواع قدیمی آن، در نحوه اختلاط قیر با لاستیک و بنابراین استحصال تمام خواص مورد انتظار از لاستیک در قیر و آسفالت می باشد. فناوری منحصر به فرد بکار رفته در این محصول باعث می گردد که فرایند پلیمری شدن قیر، بعد از اجرا و پخش آسفالت کامل شود و متناسب با میزان و حجم ترافیک عبوری، ارتباط مؤثرتری بین قیر و مصالح سنگی ایجاد گردد و به مرور استحکام و انعطاف پذیری آسفالت بهبود یابد. در تکنولوژی تولید نسل جدید قیر لاستیکی (SPB)، خواص رئولوژیکی قیر در آسفالت تغییر کرده و آسفالت های تولید شده از عملکردی بهتر و ویژگی های منحصر به فردی برخوردار خواهند بود. با عنایت به اینکه فرایند تولید این نوع قیر یک ترکیب شیمیایی است لذا با توجه به افزودنی های که در این فرایند افزوده می شود می توان فرایند پلیمریزاسیون را تسریع یا کند کرد و خواص رئولوژیکی قیر را کنترل نمود.

باتوجه به جدید بودن فناوری استفاده شده در ساخت قیر لاستیکی (SPB)، در این مطالعه به ارزیابی عملکرد آسفالت های تولید شده با این نوع از قیر اصلاح شده در آزمایشگاه و نیز بررسی نتایج عملکرد میدانی مخلوط آسفالتی با این قیر در کلانشهر مشهد و نیز شهرهای نیشابور، فریمان و جاده های شریانی استان خراسان رضوی از اولین اجرای میدانی (سال ۱۳۹۵) تا کنون پرداخته شده است. ابتدا طرح های اختلاط آسفالت با قیر خالص (مخلوط شاهد) و آسفالت اصلاح شده با قیر لاستیکی (SPB) برای قشر رویه و آستر با دانه بندی پیوسته ارائه شده است. پس از ارائه طرح اختلاط، نتایج آزمایش های قیرهای مورد مطالعه و نیز نتایج آزمایش های عملکردی مخلوط های آسفالتی حاصل از طرح اختلاط نیز بیان می شود. با انجام آزمایش های قیر امکان مقایسه سختی، خاصیت ارتجاعی، پایداری، کارپذیری و نیز مقایسه درجه عملکردی قیر خالص و قیر لاستیکی با فناوری جدید بر مبنای آزمایش شارپ فراهم می گردد. همچنین با انجام آزمایش های عملکردی بر روی مخلوط های آسفالتی ساخته شده با درصد قیرهای ساخته شده با درصد قیر بهینه، امکان مقایسه سختی، مقاومت شیارشدگی، مقاومت خستگی، مقاومت در برابر ترک های برودتی مخلوط های آسفالتی شاهد و اصلاح شده با قیر لاستیکی (SPB) فراهم می آید. در نهایت پس از انجام آزمایش های عملکردی بر قیر و مخلوط های آسفالتی، پروژه های انجام شده با قیر لاستیکی (SPB) مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل ۱، فرایند مطالعه را نشان می دهد.



شکل ۱: فرایند ارزیابی آزمایشگاهی و میدانی آسفالت حاوی قیر لاستیکی (SPB)

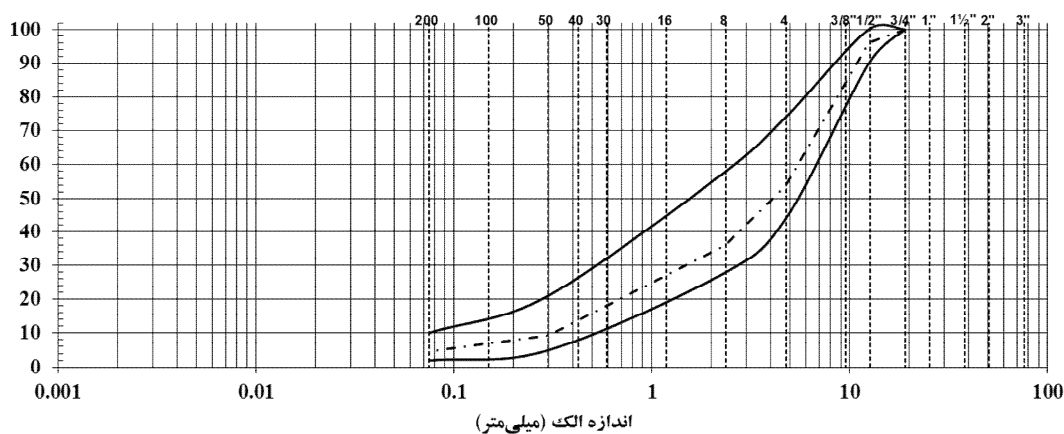
۲- طرح اختلاط

۲-۱- دانه‌بندی و نسبت‌های اختلاط مصالح سنگی

به طور معمول از دو دانه‌بندی میان‌تهی^۱ و دانه‌بندی باز^۲ برای ساخت مخلوط‌های آسفالتی پودر لاستیکی استفاده می‌شود. در این مطالعه از قیرلاستیکی (SPB) برای ساخت و ارزیابی مخلوط آسفالتی با دانه‌بندی متراکم^۳ استفاده شده است. دانه بندی مصالح سنگی ریزدانه و درشت دانه به روش استاندارد ASTM C136 و AASHTO T 27 و دانه بندی فیلر به روش استاندارد ASTM D546 و AASHTO T 37 تعیین شد. باتوجه به دانه‌بندی مصالح سنگی با اندازه‌های مختلف و فیلر اضافی به منظور دستیابی به محدوده مشخصات دانه‌بندی با اندازه‌های مختلف و فیلر نسبت‌های اختلاط مصالح سنگی و فیلر در جدول ۱ ارائه شده است. منحنی دانه‌بندی مخلوط مصالح سنگی آسفالت به همراه منحنی‌های حد بالا و پایین مشخصات دانه‌بندی در شکل ۲ ارائه و ترسیم شده است.

جدول ۱: دانه‌بندی و نسبت‌های اختلاط مصالح سنگی

حدود مشخصات دانه‌بندی	دانه‌بندی کارگاهی (درصد)	دانه‌بندی مخلوط (درصد)	مشخصه و دانه‌بندی مصالح سنگی (درصد عبوری از الک‌ها)			اندازه الک (میلی‌متر)	
			شن متوسط	شن ریز	ماسه		
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۹	
۱۰۰-۹۰	۹۵	۹۶	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۲/۵	
۷۴-۴۴	۵۵	۵۴	۱۰۰	۱۰۰	۲۴	۴/۷۵	
۵۸-۲۸	۳۵	۳۶	۱۰۰	۸۰	۱	۲/۳۶	
۲۱-۵	۱۰	۹/۸	۱۰۰	۱۴	۰	۰/۳	
۱۰-۲	۵	۴/۵	۸۶	۴/۴	۰	۰/۰۷۵	
۱۰۰ (مجموع نسبت‌های اختلاط)			۳	۴۰	۴۵	۱۲	نسبت اختلاط



شکل ۲: منحنی دانه‌بندی مخلوط آسفالتی و حدود مشخصات رده ۴ جدول ۱-۲۰ نشریه ۱۰۱

¹ Gap graded

² Open graded

³ Dense graded

۲-۲- محدوده دماهای اختلاط و تراکم

مطابق روش استاندارد ASTM D6926 محدوده دمای اختلاط و تراکم آسفالت شاهد باتوجه به کندروانی قیر تعیین می شود. محدوده دمای اختلاط و دمای تراکم، دماهایی هستند که کندروانی قیر شاهد در آن دماها، به ترتیب، در محدوده 20 ± 170 و 20 ± 280 میلی پاسکال ثابته باشد. این دماها با ترسیم خط تغییرات کندروانی برحسب دما در نمودار دما کندروانی مطابق با استاندارد ASTM D2493 تعیین می شوند. باتوجه به مقدار کندروانی قیر شاهد در سه دمای ۱۲۰، ۱۳۵ و ۱۶۰ درجه سلسیوس، منحنی دما کندروانی برای قیر مورد آزمون ترسیم شده و محدوده دماهای اختلاط قیر و تراکم آزمایشگاهی، به ترتیب برابر با ۱۴۸ تا ۱۵۳ درجه سلسیوس و ۱۳۸ تا ۱۴۲ درجه سلسیوس تعیین گردید. تعیین دمای اختلاط و تراکم برای قیرهای پودر لاستیکی و پلیمری مطابق استاندارد ASTM D2493 به دلیل رفتار غیرخطی معتبر نیست؛ لذا این دماها به دلیل افزایش ویسکوزیته به ترتیب ۱۷۰ تا ۱۷۵ و ۱۶۵ تا ۱۵۵ درجه سلسیوس اعمال شد.

۲-۳- ساخت نمونه و آزمون های مخلوط آسفالتی

روش های طرح اختلاط آسفالت به ۶ دسته، روش مارشال، روش مارشال اصلاح شده، روش ویم، روش ژیراتوری، روش روسازی ممتاز و روش هابرد فیلد تقسیم می شوند [۲۱].

باتوجه به مشخصات طرح اختلاط آسفالت به روش مارشال، نمونه های آسفالتی با مقادیر مختلف قیر و مصالح سنگی با دانه بندی به دست آمده و با ۷۵ ضربه چکش مارشال به هر طرف نمونه ساخته و متراکم شدند به ازای هر ترکیب قیر و مخلوط مصالح سنگی، تعداد سه نمونه آسفالتی تهیه شد. باتوجه به دمای تراکم تعیین شده در بخش ۲-۲ و با در نظر گرفتن توصیه های استاندارد، نمونه های آسفالتی شاهد قبل از تراکم با چکش مارشال به مدت ۲ ساعت درون آن در دمای ۱۴۰ درجه سلسیوس قرار داده شده و هم دما شدند. نمونه های آسفالتی اصلاح شده با قیرلاستیکی (SPB) نیز قبل از تراکم با چکش مارشال به مدت ۲ ساعت در دمای ۱۴۰ درجه سلسیوس قرار داده شده و هم دما شدند.

وزن مخصوص حقیقی و چگالی نمونه های متراکم به روش اشباع با سطح خشک به روش استاندارد AASHTO T166 و ASTM D2726 تعیین شد. آزمون استحکام و روانی مارشال نیز به روش استاندارد AASHTO T245 و ASTM D6927 بر روی نمونه های ساخته شده انجام شد.

پس از رسم منحنی های کمیت های حجمی و مقاومتی آسفالت بر اساس مندرجات بند ۲۰-۷-۲ نشریه ۱۰۱ و با در نظر گرفتن مقدار متناظر با ۴ درصد فضای خالی، مقدار قیر بهینه برای آسفالت شاهد و اصلاح شده با قیر لاستیکی با فناوری پلیمریزاسیون (SPB) به مطابق جدول ۲ تعیین گردید.

نکته مهم در تعیین درصد قیر حاصل از اکستراکشن در مخلوط های حاوی قیرلاستیکی (SPB) این است که پودر لاستیک استفاده شده در این فرآیند استحصال نمی شود و صرفاً درصد قیر خالص مصرفی محاسبه می گردد؛ لذا باتوجه به مصرف ۲۰ درصد پودر لاستیک در این نوع قیرها، می بایست درصد قیر حاصل از اکستراکشن را در ۱/۲۵ ضرب کرد تا درصد قیر لاستیکی (SPB) مصرفی محاسبه گردد.

پانزدهمین همایش ملی و نمایشگاه قیر، آسفالت و ماشین آلات

The 15th Bitumen, Asphalt & Machinery Conference & Exhibition

۹ الی ۱۱ آبان ماه ۱۴۰۲ - مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

31 October-2 November 2023 - Roads, Housing & Urban Development Research Center



جدول ۲: مشخصات بهینه مخلوط‌های آسفالتی شاهد و مخلوط حاوی قیر لاستیکی (SPB)

شرح	مخلوط شاهد	مخلوط اصلاح شده	شرح	مخلوط شاهد	مخلوط اصلاح شده
قیر بهینه، %	۷/۴	۵/۳	قیر مؤثر، %	۴/۵	۵/۱
چگالی آسفالت متراکم (G _{mb})، kg/m ³	۲۳۵۹	۲۳۹۰	نسبت فیلر به قیر مؤثر	۱/۱۱	۰/۹۸
حداکثر وزن مخصوص تئوری (G _{mm})	۲/۴۹۸	۲/۴۸۷	استحکام مارشال، Kg	۱۴۷۰	۱۴۷۰
فضای خالی مخلوط آسفالتی متراکم (V _a)، %	۴/۰	۴/۰	روانی، mm	۲/۱	۲/۳
فضای خالی مخلوط مصالح سنگی (VMA)، %	۱۴/۵	۱۵/۵	نسبت استحکام مارشال	۸۲	۸۶
فضای خالی پر شده با قیر (VFA)، %	۷۱	۷۴	وزن مخصوص مؤثر (G _{se})	۲/۶۹۱	۲/۶۹۳

۴-۲-آزمایش‌های قیر

از قیر خالص ۶۰-۷۰ و قیر لاستیکی با فناوری پلیمریزاسیون (SPB) حاوی ۲۰ درصد پودر لاستیک در این مطالعه استفاده شده است. نتایج آزمایش‌های رایج (درجه نفوذ، نقطه نرمی و چگالی)، کندروانی چرخشی، رده عملکردی بازگشت الاستیک، و جداسازی پودر لاستیکی قیرهای مورد استفاده از این تحقیق در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳: نتایج آزمون‌های قیر

مشخصه	روش استاندارد		مقدار برای قیر لاستیکی SPB	مقدار برای قیر خالص
	ASTM	AASHTO		
آزمون قیر اولیه				
درجه نفوذ (۰/۱ میلی‌متر)، در ۲۵ °C، ۱۰۰ گرم، ۵ ثانیه	D5	T49	۵۵	۶۴
نقطه نرمی (درجه سلسیوس)، در آب مقطر	D36	T53	۶۳/۶	۵۰/۴
چگالی (گرم بر سانتی‌متر مکعب) در ۲۵ °C درجه		T228	۱/۰۴۲	۱/۰۱۸
بازگشت الاستیک قیر اصلاح شده (درصد) در ۲۵ °C درجه، ۵ سانتی‌متر بر دقیقه	D6084		۷۰	-
جداسازی قیر اصلاح شده (تفاوت نقطه نرمی °C)	D7173		۱۲/۶	-
کندروانی چرخشی (پاسکال ثانیه) در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد	D4402		۰/۸۵۰	۰/۱۱۳
رده عملکردی قیر	D6373	M320	PG 76-22	PG 64-22

باتوجه به نتایج جدول ۳ می‌توان دریافت که قیر لاستیکی (SPB) حاوی ۲۰ درصد پودر لاستیک نسبت به قیر خالص مورد مطالعه (۶۰/۷۰) دارای درجه نفوذ کمتر، نقطه نرمی بالاتر و چگالی بیشتر می‌باشد. نتایج نیز نشان‌دهنده بالابودن سختی و چگالی قیر لاستیکی (SPB) نسبت به قیر خالص مورد مطالعه می‌باشد.

نتایج آزمون بازگشت الاستیک قیر لاستیکی (SPB) نیز نشان‌دهنده رفتار ارتجاعی قابل قبول (میانگین بازگشت الاستیک ۷۰٪) و در نتیجه باقی‌ماندن کرنش ماندگار کم بر روی قیر پودر لاستیکی به دلیل وجود پودر لاستیک می‌باشد. بر اساس مشخصات استاندارد EN14023 به منظور رفتار ارتجاعی مناسب، قیر اصلاح شده می‌بایست دارای بازگشت الاستیک بیش از ۶۰ درصد باشد. بررسی نتایج آزمون جداسازی در جدول ۳ نشان‌دهنده قابلیت انباشت ضعیف قیر پودر لاستیکی به دلیل فرآیند ته نشینی می‌باشد. بر اساس مشخصات استاندارد EN14023 به منظور انباشت مناسب، قیر اصلاح شده می‌بایست دارای جداسازی (تفاوت نقطه نرمی) کمتر از ۵ درجه سانتی‌گراد باشد. باتوجه به نتایج جداسازی قیر پودر لاستیکی (۱۲/۶ درجه سانتی‌گراد) می‌بایست محل مصرف و تولید قیر نزدیک بوده یا از تجهیزات دارای هم‌زن با دور پایین استفاده گردد.

پانزدهمین همایش ملی و نمایشگاه قیر، آسفالت و ماشین آلات

The 15th Bitumen, Asphalt & Machinery Conference & Exhibition

۹ الی ۱۱ آبان ماه ۱۴۰۲ - مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

31 October-2 November 2023 - Roads, Housing & Urban Development Research Center



مقایسه آزمایش کندروانی چرخشی قیر خالص مورد مطالعه و قیر لاستیکی (SPB) در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد نیز نشان‌دهنده افزایش حدود ۶/۵ برابری کندروانی در صورت استفاده از قیرلاستیکی (SPB) است. اگرچه چه مقدار کندروانی قیرلاستیکی (SPB) معیار استاندارد ASTM D6114 را در برآورده ساختن حداقل کندروانی برآورده نمی‌سازد. همچنین نتایج آزمایش‌های مربوط به رده عملکردی قیر (PG) نشان می‌دهد که در صورت استفاده از قیرلاستیکی (SPB) مجموعه پالایشگاهی قیر زین به جای قیر خالص مورد مطالعه، دو درجه به رده بالای عملکردی قیر افزوده شده و رده پایین عملکردی تغییری نمی‌کند. نتایج عملکردی در جداول ۴ و ۵ ارائه گردیده است.

جدول ۴: نتایج آزمایش‌های عملکردی قیر خالص

درجه عملکردی	PG64						PG70						
	-۱۰	-۱۶	-۲۲	-۲۸	-۳۴	-۴۰	-۱۰	-۱۶	-۲۲	-۲۸	-۳۴	-۴۰	
میانگین حداکثر دمای هفت‌روزه طرح روسازی (درجه سانتی‌گراد)	<۶۴						<۷۰						
حداقل دمای طرح روسازی (درجه سانتی‌گراد)	>-۱۰	>-۱۶	>-۲۲	>-۲۸	>-۳۴	>-۴۰	>-۱۰	>-۱۶	>-۲۲	>-۲۸	>-۳۴	>-۴۰	
قیر اصلی													
دمای اشتعال (درجه سانتی‌گراد) ASTM D92	۳۰۵												
آزمایش ویسکوزیته چرخشی RV ASTM D4409	دمای آزمایش (درجه سانتی‌گراد) ویسکوزیته (پاسکال-ثانیه)						۱۳۵ ۰/۳۲۲						
آزمایش رئومتر برشی دینامیکی DSR ASTM D7175	دمای آزمایش (درجه سانتی‌گراد) $G^*/\sin \delta$ (کیلوپاسکال)						۶۴ ۱/۲۰۰						
قیر باقی‌مانده آزمایش RTFO پیرشدگی لایه نازک متحرک قیر ASTM D2872													
تغییر جرم در آزمایش پیرشدگی RTFO (درصد)	۰/۱۰												
آزمایش رئومتر برشی دینامیکی DSR ASTM D7175	دمای آزمایش (درجه سانتی‌گراد) $G^*/\sin \delta$ (کیلوپاسکال)						۶۴ ۲/۶۱۰						
قیر باقی‌مانده آزمایش PAV تسریع پیرشدگی قیر ASTM D6521													
دمای پیرشدگی (درجه سانتی‌گراد)	۱۰۰						۱۰۰						
آزمایش رئومتر برشی دینامیکی DSR ASTM D7175	دمای آزمایش (درجه سانتی‌گراد)	۳۱	۲۸	۲۵	۲۲	۱۹	۱۶	۳۶	۳۱	۲۸	۲۵	۲۲	۱۹
	$G^*/\sin \delta$ (کیلوپاسکال)			۳۱۲۶									
آزمایش رئومتر تیرچه خمشی BBR ASTM D6648	دمای آزمایش (درجه سانتی‌گراد)	۰	-۶	-۱۲	-۱۸	-۲۴	-۳۰	۰	-۶	-۱۲	-۱۸	-۲۴	-۳۰
	سختی خز S (مگاپاسکال)			۱۳۸									
	ضریب m			۰/۳۰۰									

جدول ۵: نتایج آزمایش‌های عملکردی قیرلاستیکی (SPB)

درجه عملکردی	PG76					PG82					
	-۱۰	-۱۶	-۲۲	-۲۸	-۳۴	-۱۰	-۱۶	-۲۲	-۲۸	-۳۴	
میانگین حداکثر دمای هفت‌روزه طرح روسازی (درجه سانتی‌گراد)	<۷۶					<۸۲					
حداقل دمای طرح روسازی (درجه سانتی‌گراد)	>-۱۰	>-۱۶	>-۲۲	>-۲۸	>-۳۴	>-۱۰	>-۱۶	>-۲۲	>-۲۸	>-۳۴	
قیر اصلی											
دمای اشتعال (درجه سانتی‌گراد) ASTM D92	۲۹۵										
آزمایش ویسکوزیته چرخشی RV ASTM D4409	دمای آزمایش (درجه سانتی‌گراد) ویسکوزیته (پاسکال-ثانیه)					۱۳۵ ۱/۸۵۰					
آزمایش رئومتر برشی دینامیکی DSR ASTM D7175	دمای آزمایش (درجه سانتی‌گراد) $G^*/\sin \delta$ (کیلوپاسکال)					۷۶ ۱/۸۸۰					
قیر باقی‌مانده آزمایش RTFO پیرشدگی لایه نازک متحرک قیر ASTM D2872											
تغییر جرم در آزمایش پیرشدگی RTFO (درصد)	۰/۱۰										
آزمایش رئومتر برشی دینامیکی DSR ASTM D7175	دمای آزمایش (درجه سانتی‌گراد) $G^*/\sin \delta$ (کیلوپاسکال)					۷۶ ۳/۲۳					
قیر باقی‌مانده آزمایش PAV تسریع پیرشدگی قیر ASTM D6521											
دمای پیرشدگی (درجه سانتی‌گراد)	۱۰۰					۱۰۰					
آزمایش رئومتر برشی دینامیکی DSR ASTM D7175	دمای آزمایش (درجه سانتی‌گراد)	۳۷	۳۴	۳۱	۲۸	۲۵	۴۰	۳۷	۳۴	۳۱	۲۸
	$G^*/\sin \delta$ (کیلوپاسکال)			۹۴۱							
آزمایش رئومتر تیرچه خمشی BBR ASTM D6648	دمای آزمایش (درجه سانتی‌گراد)	۰	-۶	-۱۲	-۱۸	-۲۴	۰	-۶	-۱۲	-۱۸	-۲۴
	سختی خز S (مگاپاسکال)			۱۰۴	۲۱۱						
	ضریب m			۰/۳۱۰	۰/۲۷۲						

۳- آزمایش‌های عملکردی مخلوط‌های آسفالتی

ساخت مخلوط‌های آسفالتی جهت انجام آزمایش‌های عملکردی بر اساس طرح اختلاط صورت گرفته است. آزمایش عملکردی رایج نمونه‌های آسفالتی، آزمایش مدول برجهندگی^۴، آزمایش خستگی تیرچه خمشی^۵، آزمایش شیارافتادگی^۶ و آزمایش دوام رطوبتی^۷ است.

۳-۱- آزمایش مدول برجهندگی

مدول برجهندگی برای تخمین سفتی مخلوط استفاده می‌شود [۲۳]. آزمایش مدول برجهندگی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد براساس روش استاندارد ASTM D4123 مطابق شکل ۴ انجام شد. مطابق استاندارد، در این آزمایش از شکل بارگذاری نیمه سینوسی با فرکانس یک هرتز، سیکل بارگذاری یک ثانیه، مدت زمان اعمال بار ۰/۱ ثانیه، مدت استراحت ۰/۹ ثانیه و ضریب پواسون ۰/۳۵ استفاده گردید. نمونه‌های مورد استفاده در این آزمایش به روش تراکم چرخشی مطابق استاندارد ASTM D6925 با قطر و ارتفاع، به ترتیب ۱۰۰ و ۶۴ میلی‌متر و فضای خالی ۴ درصد ساخته و متراکم شدند. نتایج آزمایش مدول برجهندگی نمونه‌های آسفالتی آزمایش شده در جدول ۶ ارائه شده است.



شکل ۴: آزمایش مدول برجهندگی

جدول ۶: نتایج آزمون مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی

مشخصه نمونه	مدول برجهندگی (مگاپاسکال)
مخلوط آسفالتی شاهد	۳۰۵۳
مخلوط اصلاح شده با SPB	۳۲۶۳

مقایسه مخلوط آسفالتی شاهد و مخلوط آسفالتی با استفاده از قیر لاستیکی (SPB) نشان می‌دهد که مدول برجهندگی نمونه‌های شاهد و اصلاح شده به هم نزدیک بوده، به طوری که مدول برجهندگی نمونه اصلاح شده تنها حدود ۷٪ از مدول برجهندگی نمونه شاهد بیشتر است.

۳-۲- آزمایش خستگی تیرچه خمشی

⁴ Modulus of resilience

⁵ Fatigue of bending beam

⁶ Ruttings

⁷ Moisture durability

پانزدهمین همایش ملی و نمایشگاه قیر، آسفالت و ماشین آلات

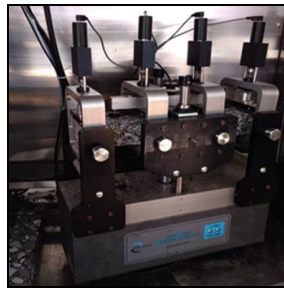
The 15th Bitumen, Asphalt & Machinery Conference & Exhibition

۹ الی ۱۱ آبان ماه ۱۴۰۲ - مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

31 October-2 November 2023 -Roads, Housing & Urban Development Research Center



این آزمایش برای ارزیابی سختی خمشی و عمر خستگی آسفالت استفاده می‌شود. به منظور انجام آزمایش خستگی تیرچه خمشی، نمونه‌های تخته‌ای شکل مخلوط آسفالتی با استفاده از دستگاه تراکم غلتکی با فضای خالی ۴ درصد ساخته و متراکم شدند. نمونه‌های مذکور توسط اهر برقی برش داده شده و تیرچه‌های آسفالتی با ابعاد مندرج در استاندارد AASHTO T321 آماده شد. آزمایش خستگی تیرچه خمشی (شکل ۵) بر اساس استاندارد AASHTO T321 در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد با بارگذاری نیمه سینوسی و کرنش ثابت ۸۰۰ میکرواسترین برای مخلوط‌های آسفالتی انجام پذیرفت که نتایج در جدول ۷ ارائه شده است. عمر خستگی مخلوط آسفالتی در این آزمایش برابر با تعداد سیکل بارگذاری متناظر با سفتی معادل ۵۰٪ سفتی اولیه تعریف گردیده است.



شکل ۵: آزمایش خستگی تیرچه خمشی

جدول ۷: نتایج آزمون خستگی تیرچه خمشی برای مخلوط آسفالت شاهد

مشخصه مخلوط آسفالتی	سطح کرنش (میکرواسترین)	شماره نمونه	سفتی اولیه (مگا پاسکال)	سفتی نهایی (مگا پاسکال)	تعداد سیکل گسیختگی (سیکل)	لگاریتم عمر شکست	میانگین عمر شکست نمونه‌های تکراری (سیکل)	انحراف استاندارد لگاریتم عمر شکست نمونه‌های تکراری
آسفالت شاهد	۶۰۰	۱	۲۹۹۵	۱۴۹۸	۹۸۹۸۰	۵/۰۰	۹۲۲۶۵	۰/۰۴۵
	۶۰۰	۲	۳۴۲۹	۱۷۱۵	۸۵۵۵۰	۴/۹۳		
آسفالت شاهد	۸۰۰	۱	۲۷۵۹	۱۳۸۰	۲۴۶۷۰	۴/۳۹	۲۲۷۷۰	۰/۰۵۱
	۸۰۰	۲	۳۱۸۲	۱۵۹۱	۲۰۸۷۰	۴/۳۲		
آسفالت شاهد	۱۰۰۰	۱	۲۴۹۲	۱۲۴۴	۱۱۴۸۰	۴/۰۶	۱۰۰۱۰	۰/۰۹۱
	۱۰۰۰	۲	۲۸۷۴	۱۴۳۷	۸۵۴۰	۳/۹۳		

جدول ۸: نتایج آزمون خستگی تیرچه خمشی برای مخلوط آسفالت حاوی قیر لاستیکی (SPB)

مشخصه مخلوط آسفالتی	سطح کرنش (میکرواسترین)	شماره نمونه	سفتی اولیه (مگا پاسکال)	سفتی نهایی (مگا پاسکال)	تعداد سیکل گسیختگی (سیکل)	لگاریتم عمر شکست	میانگین عمر شکست نمونه‌های تکراری (سیکل)	انحراف استاندارد لگاریتم عمر شکست نمونه‌های تکراری
مخلوط اصلاح شده با SPB	۶۰۰	۱	۲۸۳۵	۱۴۱۸	۹۹۵۸۰	۵/۰۰	۱۰۱۲۹۰	۰/۰۱۰
	۶۰۰	۲	۳۰۳۳	۱۵۱۷	۱۰۳۰۰۰	۵/۰۱		
مخلوط اصلاح شده با SPB	۸۰۰	۱	۲۸۰۴	۱۴۰۲	۲۴۸۶۰	۴/۴۰	۲۷۱۵۵	۰/۰۵۲
	۸۰۰	۲	۲۷۹۶	۱۳۹۸	۲۹۴۵۰	۴/۴۷		
مخلوط اصلاح شده با SPB	۱۰۰۰	۱	۲۷۹۸	۱۳۹۹	۱۴۷۹۰	۴/۱۷	۱۲۷۰۰	۰/۱۰۲
	۱۰۰۰	۲	۲۷۰۴	۱۳۵۲	۱۰۶۱۰	۴/۰۳		

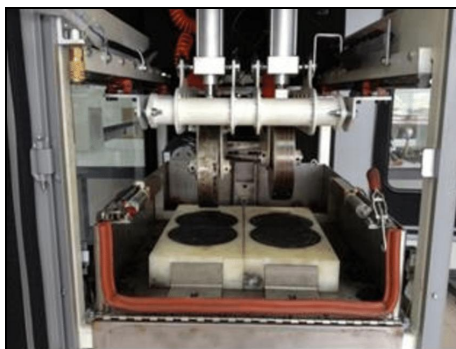
جداول فوق نشان می دهد که در تمامی سطح کرنش مورد مطالعه انحراف استاندارد لگاریتم عمر شکست برای نمونه های تکراری مخلوط های شاهد و اصلاح شده کمتر از ۰/۱ است. براساس استاندارد ASTM D7460 به منظور تکرارپذیری خوب آزمایش خستگی تیرچه خمشی نقطه ای، این عدد می بایست کمتر از ۰/۲۷۸ باشد. با توجه به اعداد جدول فوق می توان دریافت که در تمامی سطوح کرنش مورد مطالعه تکرارپذیری بسیار قابل قبولی بین عمر شکست برای نمونه های تکراری مخلوط آسفالت شاهد و اصلاح شده وجود دارد.

مقایسه عمر شکست مخلوط های آسفالتی شاهد و اصلاح شده در آزمایش خستگی تیرچه خمشی ۴ نقطه ای نشان می دهد که در سطح کرنش ۶۰۰ میکرواسترین، عمر خستگی نمونه اصلاح شده تقریباً ۱۰٪ بیشتر از نمونه شاهد در سطح کرنش مشابه است. همچنین عمر خستگی نمونه اصلاح شده در سطح کرنش ۸۰۰ و ۱۰۰۰ تقریباً ۲۰٪ و ۲۵٪ بیشتر از عمر خستگی نمونه شاهد در سطوح کرنش مشابه می باشد. با توجه به نزدیکی بسیار زیاد لگاریتم عمر شکست نمونه های شاهد و اصلاح شده در یک سطح کرنش یکسان می تواند دریافت که اختلاف عمر خستگی نمونه های شاهد و اصلاح شده کمتر از خطای آزمایش است.

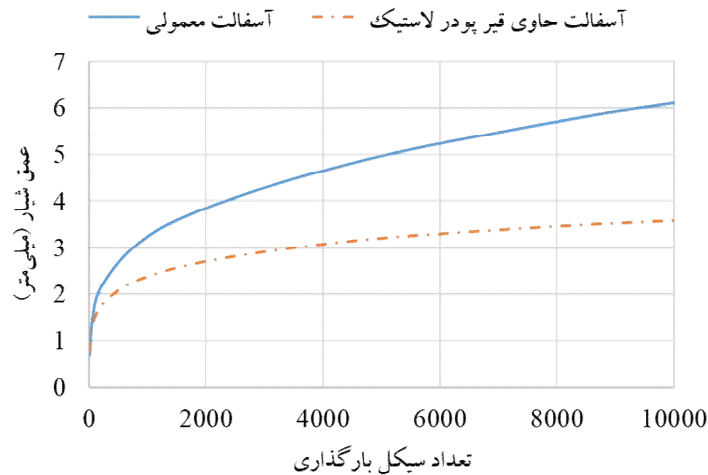
۳-۳- آزمایش شیار افتادگی

شیارافتادگی به تغییر شکل های ماندگار در مسیر چرخ وسایل نقلیه اطلاق می شود که ناشی از تکرار بارگذاری وسایل نقلیه سنگین، ضعف مقاومت برشی مخلوط آسفالتی و عدم تراکم کافی آن است [۲۴]. آزمایش شیار افتادگی نمونه های آسفالتی توسط دستگاه شیارافتادگی ویلتراک هامبورگ مطابق شکل ۶ و براساس روش استاندارد AASHTO T324 بر روی نمونه های استوانه ای انجام پذیرفت. در این دستگاه، چرخ بارگذاری با بار ثابت بر روی سطوح نمونه به صورت رفت و برگشتی حرکت می کند و نمونه در شرایط خشک یا غرقاب مورد آزمایش قرار می گیرد. نمونه های مورد استفاده در این دستگاه به شکل نمونه استوانه ای با قطر و ارتفاع به ترتیب، ۱۵ و ۶ سانتی متر و یا دال مکعبی به ابعاد ۳۰*۳۰*۵ سانتی متر است. چرخ بارگذاری دستگاه نیز به قطر ۲۰ سانتی متر و پهنای ۵ سانتی متر است. نمونه های استوانه ای مورد استفاده در آزمایش شیارافتادگی به روش تراکم چرخشی مطابق استاندارد ASTM S6925 با قطر و ارتفاع به ترتیب، ۱۵ و ۶ سانتی متر و فضای خالی ۸ درصد ساخته و متراکم شدند.

برای انجام آزمایش، نمونه های آسفالتی در شرایط خشک، دمای ۵۴/۴ درجه سانتی گراد، بار چرخ ۷۰۰ نیوتن و سرعت حرکت رفت و برگشتی ۵۰ عبور در دقیقه، تحت ۱۰۰۰۰ رفت و برگشت چرخ بارگذاری دستگاه شیارافتادگی قرار گرفت. منحنی عمق شیار در مقابل سیکل بارگذاری برای مخلوط های آسفالتی مختلف در شکل های ۷ و ۸ ترسیم شده و عمق نهایی شیار نمونه های مورد آزمایش نیز در جدول ۸ ارائه شده است.



شکل ۶: آزمایش شیارافتادگی



شکل ۷: منحنی عمیق شیار در مقابل سیکل بارگذاری برای آسفالت معمولی و آسفالت حاوی قیر (SPB) (توپکا ۱۹-۰)

جدول ۸: عمق نهایی شیار نمونه‌ها پس از ۱۰۰۰۰ رفت و برگشت چرخ بارگذاری برای مخلوط‌های آسفالتی

عمق نهایی شیار (میلی متر)	مشخصه مخلوط آسفالتی
۵/۸۷	مخلوط شاهد
۴/۵۱	مخلوط اصلاح شده با قیر لاستیکی (SPB)

نتایج بدست آمده نشان می دهد که تکرار پذیری قابل قبولی بین نتایج آزمایش شیارافتادگی برای نمونه های تکراری مخلوط آسفالت شاهد و اصلاح شده وجود دارد، به طوریکه اختلاف عمر نهایی شیار نمونه های تکراری برای مخلوط های آسفالتی شاهد و اصلاح شده به ترتیب ۱۶٪ و ۲۴٪ است. همچنین مقایسه مخلوط های شاهد و اصلاح شده نشان می دهد که عمق نهایی شیار نمونه های شاهد کمی (حدود ۳۰٪) بیشتر از عمیق نهایی شیار نمونه های اصلاح شده است. بنابراین استفاده از قیرلاستیکی (SPB) به جای قیر خالص مودر مطالعه تا حدودی در بهبود عملکرد شیارشدگی مخلوط آسفالتی دارای دانه بندی پیوسته موثر است.

۴-۳- آزمایش خمش ۳ نقطه‌ای

تست خمش سه نقطه‌ای یکی از متداول ترین روش‌های تست برای ارزیابی شکستگی است [۲۵]. آزمایش شکست نمونه نیم دایره در بارگذاری برای نمونه های آسفالتی مختلف در دمای ۱۰- درجه سانتی گراد انجام شد. در این آزمایش نمونه های نیم دایره ای به قطر ۱۵ سانتی متر و ضخامت ۳/۰ سانتیمتر و با ترک مصنوعی به عمق ۱۵ میلیمتر با نرخ بارگذاری ۵ میلیمتر بر دقیقه مطابق شکل ۸ مورد آزمایش قرار گرفت و حداکثر بار تحمل شده توسط نمونه به دست آمد. نمونه های مورد استفاده

در این آزمایش به روش تراکم چرخشی مطابق استاندارد ASTM D6925 با قطر و ارتفاع به ترتیب، ۱۵۰ و ۱۰۰ میلی متر و فضای خالی ۴ درصد ساخته، متراکم و سپس برشکاری شد. نتایج آزمایش در جدول ۱۰ ارائه شده است.



شکل ۸: قاب بارگذاری آزمایش شکست و نمونه آزمایش

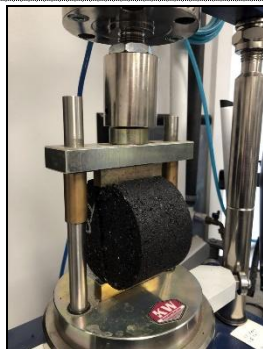
جدول ۱۰: نتایج آزمایش شکست ترک نمونه‌های آسفالتی در دمای ۱۰- درجه سانتی‌گراد

مشخصه مخلوط آسفالتی	حداکثر نیرو قابل تحمل (کیلو نیوتن)
آسفالت شاهد	۴/۰۸۱
مخلوط اصلاح شده با قیر لاستیکی (SPB)	۴/۱۱۲

مقایسه مخلوط شاهد و اصلاح شده با قیر لاستیکی (SPB) نشان می‌دهد که حداکثر نیروی قابل تحمل شده نمونه‌های شاهد و اصلاح شده با قیر لاستیکی (SPB) بسیار به هم نزدیک بوده، به طوری که حداکثر نیروی نمونه شاهد تنها حدود ۱٪ از حداکثر نمونه اصلاح شده بیشتر است؛ بنابراین می‌توان این‌طور نتیجه‌گیری کرد که استفاده از قیر لاستیکی (SPB) به جای قیر خالص تأثیری در بهبود یا کاهش مقاومت مخلوط آسفالت دارای دانه‌بندی پیوسته در برابر ترک برودتی ندارد.

۵-۳- آزمایش دوام رطوبتی

آسیب رطوبت یکی از اشکال خرابی‌های روسازی آسفالتی است که به دلیل وجود آب و تأثیر آن بر خواص مکانیکی مخلوط آسفالتی رخ می‌دهد [۲۶]. زیان‌های ناشی از رطوبت منجر به کاهش چسبندگی قیر به مصالح سنگی در آسفالت و اضمحلال و زوال ویژگی‌های مقاومتی آن می‌شود و در نتیجه خرابی‌های روسازی آسفالتی تسریع می‌یابد [۲۷]. به منظور تعیین نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم اشباع به معمولی، مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با نمونه آسفالت اخذ شده مطابق روش استاندارد AASHTO T283 مورد آزمایش قرار گرفتند (شکل ۹) و مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های خشک و نمونه‌های عمل‌آوری شده اندازه‌گیری شده و نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم اشباع به خشک محاسبه گردید که نتایج در جدول ۱۱ درج گردیده است. مطابق استاندارد، نمونه‌های اشباع به مدت حداقل ۱۶ ساعت درون فریزر با دمای ۳+/-۱۸- درجه سانتی‌گراد و سپس ۲۴ ساعت درون حمام آب ۶۰ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شده و سپس با قرارگیری به مدت ۲ ساعت درون حمام آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد، مقاومت کششی غیر مستقیم آن‌ها اندازه‌گیری شد. مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های خشک نیز پس از ۲ ساعت قرار گرفتن در حمام آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری گردید.



شکل ۹: آزمایش تعیین نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (TSR)

جدول ۱۱: نتایج آزمایش تعیین نسبت مقاومت کششی نمونه های اشباع به معمولی

مخلوط آسفالتی	حالت نمونه	وزن مخصوص	فضای خالی (درصد)	اشباع شدگی (درصد)	مقاومت کششی (کیلوپاسکال)	نسبت مقاومت کششی حالت اشباع به حالت معمولی (درصد)
مخلوط شاهد	معمولی	۲/۳۳۲	۶/۶	-	۶۷۵	۹۵
مخلوط اصلاح شده با SPB	اشباع	۲/۳۳۶	۶/۵	۷۸	۶۴۳	
مخلوط اصلاح شده با SPB	معمولی	۲/۳۱۶	۶/۹	-	۷۴۰	۹۶
مخلوط اصلاح شده با SPB	اشباع	۲/۳۲۳	۶/۶	۷۸	۷۰۷	

مقایسه مخلوط‌های شاهد و اصلاح شده با قیر لاستیکی (SPB) ساخته شده از مصالح سنگی آهکی نشان می‌دهد که نسبت مقاومت کششی نمونه‌های شاهد و اصلاح شده مشابه یکدیگر است.

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری:

باتوجه به افزایش بارهای ترافیکی و محوری، نیاز به اصلاح مصالح برای بهبود عملکرد درازمدت روسازی جاده‌ها مشخص می‌شود. هزینه بالای ساخت و ساز راه‌ها باعث می‌شود که محققان طرح مناسب و مصالح باکیفیت را برای افزایش عمر روسازی بیابند. تحقیقات در مورد استفاده از مواد زائد در روسازی آسفالتی باید توسعه یابد و خواص مخلوط آسفالتی ساخته شده با مواد زائد بررسی شود. یکی از مواد زایدی که در حجم بالا تولید می‌شود لاستیک‌های ضایعاتی است. محققان به این نتیجه رسیدند که افزودن خرده لاستیک (CR) تولید شده از لاستیک قراضه نه تنها می‌تواند مشکلات زیست‌محیطی را کاهش دهد، بلکه می‌تواند عملکرد مخلوط آسفالت مانند مقاومت در برابر شیار، ترک در دمای پایین و انعطاف‌پذیری مخلوط آسفالت را بهبود بخشد. جدیدترین نوع قیر اصلاح شده پودر لاستیک، قیر لاستیکی (SPB) است که در این مطالعه به ارزیابی عملکردی مخلوط آسفالتی ساخته شده با این نوع قیر هم برای قشر رویه و هم آستر و مقایسه با مخلوط‌های آسفالتی شاهد با قیر خالص اقدام شده است. نتایج حاصل به شرح ذیل می‌باشد.

۱. قیر لاستیکی (SPB) در مقایسه با قیر خالص رده عملکردی بسیار مناسب‌تری دارد. اختلاف دمای بالا و پائین رده عملکردی قیر لاستیکی برابر با ۹۸ درجه سانتی‌گراد است که این محدوده برای قیرهای خالص عموماً کمتر از ۹۰ درجه سانتی‌گراد است. همچنین وجود ۲۰ درصد پودر لاستیک در قیر باعث افزایش دو درجه‌ای رده بالای عملکردی می‌شود؛ ولی بر رده پایین عملکردی تأثیری ندارد.



۲. باتوجه به نتایج به دست آمده از آزمون‌های عملکردی مخلوط‌های آسفالتی دارای دانه‌بندی پیوسته حاوی قیر خالص و قیر لاستیکی (SPB) این طور استنباط می‌شود که استفاده از قیر لاستیکی (SPB) مذکور به جای قیر خالص PG 64-22 در مخلوط آسفالتی سبب کاهش ۳۰ درصدی عمق شیار شده و تأثیر محدودی در بهبود سختی، عمر خستگی و مقاومت دمای پایین و حساسیت رطوبتی دارد.

باتوجه به نتایج حاصل از آزمایش‌های عملکردی قیر و آسفالت و بازدیدهای میدانی صورت گرفته، در مجموع آسفالت حاوی قیر لاستیکی (SPB) دارای عملکرد مطلوبی در مقابله با خرابی‌های احتمالی دارد. برای اظهار نظر دقیق در خصوص بررسی عملکرد آسفالت حاوی قیر لاستیکی (SPB) نیاز به انجام آزمایش‌های متنوع‌تر و گسترده‌تری بر روی لایه‌های مختلف روسازی در محل و در آزمایشگاه است. همچنین به نظر می‌رسد برای تولید آسفالت با دانه‌بندی باز بدون افزودن پلیمر و برای جلوگیری از ریزش قیر استفاده از قیر لاستیکی (SPB) می‌تواند موثر باشد. لذا جهت مطالعات آتی پیشنهاد می‌گردد این موضوع ارزیابی شود.

تقدیر و تشکر

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی و آزمایش فنی و مکانیک خاک که در انجام آزمایش‌های صورت گرفته در این پژوهش همکاری کردند تشکر نمایند. همچنین از مجموعه پالایشگاهی قیر زرین و اداره کل نظارت بر نگهداری و تعمیرات و بهره‌برداری تأسیسات شهرداری مشهد به جهت حمایت از این کار مطالعاتی کمال تشکر را داریم.

References

- [1] G. D. Airey, M. M. Rahman, and A. C. Collop, "Absorption of bitumen into crumb rubber using the basket drainage method," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 105-119, 2003.
- [2] J. Wei *et al.*, "Research on performance of SBS-PPA and SBR-PPA compound modified asphalts," *Materials*, vol. 15, no. 6, p. 2112, 2022.
- [3] J. Zhu, R. Balieu, and H. Wang, "The use of solubility parameters and free energy theory for phase behaviour of polymer-modified bitumen: A review," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 22, no. 4, pp. 757-778, 2021.
- [4] M. Porto, P. Caputo, V. Loise, S. Eskandarsefat, B. Teltayev, and C. Oliviero Rossi, "Bitumen and bitumen modification: A review on latest advances," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 4, p. 742, 2019.
- [5] A. Mansourian, M. Ameri, M. H. Mirabi Moghaddam, E. Riahi, H. Shaker, and A. H. Ameri, "Behavioural mechanism of SBR, LDPE, and SBS modified bituminous mixtures," *Australian Journal of Civil Engineering*, vol. 20, no. 2, pp. 389-398, 2022.
- [6] N. S. Mashaan, A. H. Ali, M. R. Karim, and M. Abdelaziz, "An overview of crumb rubber modified asphalt," *International Journal of Physical Sciences*, vol. 7, no. 2, pp. 166-170, 2012.
- [7] N. S. Mashaan, A. H. Ali, M. R. Karim, and M. Abdelaziz, "Effect of crumb rubber concentration on the physical and rheological properties of rubberised bitumen binders," *International journal of the physical sciences*, vol. 6, no. 4, pp. 684-690, 2011.
- [8] N. S. Mashaan, A. H. Ali, S. Koting, and M. R. Karim, "Performance evaluation of crumb rubber modified stone mastic asphalt pavement in Malaysia," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2013, 2013.
- [9] F. Aslani, "Mechanical properties of waste tire rubber concrete," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 28, no. 3, p. 04015152, 2016.



- [10] U. DOT, "A Study of the Use of Recycled Paving Material: Report to Congress," *US Department of Transportation (US DOT) and Federal Highway Administration (FHWA), Report No. FHWA-RD-93-147*, 1993.
- [11] L. P. Fontes, G. Trichês, J. C. Pais, and P. A. Pereira, "Evaluating permanent deformation in asphalt rubber mixtures," *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 7, pp. 1193-1200, 2010.
- [12] R. Y. Liang and S. Lee, "Short-term and long-term aging behavior of rubber modified asphalt paving mixture," *Transportation research record*, vol. 1530, no. 1, pp. 11-17, 1996.
- [13] H. H. Kim, K.-D. Jeong, M. S. Lee, and S.-J. Lee, "Effect of ft paraffin wax contents on performance properties of crumb rubber-modified asphalt binders," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 27, no. 11, p. 04015011, 2015.
- [14] K. Duan, C. Wang, J. Liu, L. Song, Q. Chen, and Y. Chen, "Research progress and performance evaluation of crumb-rubber-modified asphalts and their mixtures," *Construction and Building Materials*, vol. 361, p. 129687, 2022.
- [15] L. Lyu, J. Pei, D. Hu, and E. H. Fini, "Durability of rubberized asphalt binders containing waste cooking oil under thermal and ultraviolet aging," *Construction and Building Materials*, vol. 299, p. 124282, 2021.
- [16] S. Hosseinezhad, S. F. Kabir, D. Oldham, M. Mousavi, and E. H. Fini, "Surface functionalization of rubber particles to reduce phase separation in rubberized asphalt for sustainable construction," *Journal of cleaner production*, vol. 225, pp. 82-89, 2019.
- [17] N. Fiore, S. Caro, A. D'Andrea, and M. Scarsella, "Evaluation of bitumen modification with crumb rubber obtained through a high pressure water jet (HPWJ) process," *Construction and Building Materials*, vol. 151, pp. 682-691, 2017.
- [18] H. Li, C. Cui, A. A. Temitope, Z. Feng, G. Zhao, and P. Guo, "Effect of SBS and crumb rubber on asphalt modification: A review of the properties and practical application," *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2022.
- [19] A. Badughaish, J. Wang, C. Hettiarachchi, and F. Xiao, "A review on the crumb rubber-modified asphalt in the Middle East," *Journal of Material Cycles and Waste Management*, vol. 24, no. 5, pp. 1679-1692, 2022.
- [20] S. O. OLOPADE, B. KEHINDE, O. OLAWALE, and A. A. OLAREWAJU, "Laboratory Study of Polymer-Modified Bitumen in Road Construction: A Review on Crumb Rubber Application," 2023.
- [21] F. L. Roberts, P. S. Kandhal, E. R. Brown, D.-Y. Lee, and T. W. Kennedy, "Hot mix asphalt materials, mixture design and construction," 1991.
- [22] F. L. Roberts, L. N. Mohammad, and L. Wang, "History of hot mix asphalt mixture design in the United States," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 14, no. 4, pp. 279-293, 2002.
- [23] J. J. Galan, L. M. Silva, A. R. Pasandín, and I. Pérez, "Evaluation of the resilient modulus of hot-mix asphalt made with recycled concrete aggregates from construction and demolition waste," *Sustainability*, vol. 12, no. 20, p. 8551, 2020.
- [24] A. Ameli, R. Babagoli, and M. Aghapour, "Laboratory evaluation of the effect of reclaimed asphalt pavement on rutting performance of rubberized asphalt mixtures," *Petroleum Science and Technology*, vol. 34, no. 5, pp. 449-453, 2016.
- [25] S. A. Saed, H. R. Karimi, S. M. Rad, M. Aliha, X. Shi, and P. J. Haghightpour, "Full range I/II fracture behavior of asphalt mixtures containing RAP and rejuvenating agent using two different 3-point bend type configurations," *Construction and Building Materials*, vol. 314, p. 125590, 2022.
- [26] A. Mahpour, M. Khodadadi, M. Shahraki, and F. M. Nejad, "Evaluation of Moisture Durability of Modified Asphalt Mixture with Nano-Titanium Dioxide Using Surface Free Energy Method," *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, vol. 54, no. 8, pp. 2831-2850, 2022.
- [27] X. Chen, D. Ren, G. Tian, J. Xu, R. Ali, and C. Ai, "Investigation on moisture damage resistance of asphalt pavement in salt and acid erosion environments based on Multi-scale analysis," *Construction and Building Materials*, vol. 366, p. 130177, 2023.