

ارزیابی عملکرد مخلوط آسفالتی حاوی قیر لاستیکی با فناوری پلیمریزاسیون (SPB) بر اساس بررسی های 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 خدمت دهی به راه ها و ویژگی های محیط زیستی توجه زیادی را به خود جلب کرده است. مطالعات زیادی روی تاثیر پودر لاستیک بر بهبود عملکرد مخلوط های 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 می باشد. این مطالعه به ارزیابی عملکردی این قیر و مخلوط های آسفالتی حاوی این نوع قیر در آزمایشگاه و نیز بررسی میدانی آسفالت های تولید شده با این قیر اصلاح شده در طی دوره زمانی ۷ ساله در کلانشهر مشهد پرداخته است. بدین منظور ابتدا طرح اختلاط آسفالت برای قشر توپکا ۱۹-۰ مطابق با روش مارشال انجام گرفته است. در این پروژه آزمایش های دوام رطوبتی و عملکردی آسفالت های تهیه شده با قیر خالص و قیر لاستیکی (SPB) (آزمایش مدول برجهنگی، تیرچه خمشی، شیارافتادگی) و همچنین آزمایش های تعیین رده عملکردی و آزمایش های رایج قیر انجام پذیرفت. نتایج نشان دهنده عملکرد نسبتاً مطلوب آسفالت حاوی قیر لاستیکی (SPB) در مقایسه با مخلوط های آسفالتی شاهد خصوصاً در مورد عمق شیارشدگی است. در مورد آزمایش های 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. بررسی های میدانی نیز نشان دهنده بهبود شرایط راه است به طوری که خرابی شیارشدگی در پروژه های انجام گرفته با عمر ۷ سال مشاهده نگردید و فقط تعداد محدودی ترک های خستگی و برودتی ایجاد شده است. در مجموع استفاده از قیر لاستیکی با فناوری پلیمریزاسیون (SPB) می تواند موجب بهبود دوام مخلوط های آسفالتی خصوصاً در محل های دارای بارمحوری سنگین و یا ایستا شود.

واژه های کلیدی: قیر اصلاح شده، پودر لاستیک، پلیمریزاسیون، قیر لاستیکی (SPB)، آزمایش های 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

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

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، ترک‌خوردگی 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]. SBR و SBS کوپلیمرهای تجاری هستند که هزینه‌های اولیه ساخت روسازی یا روکش را گران تر 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

^۱ Styrene Butadiene Rubber

^۲ Styrene-butadiene-styrene

^۳ Ethylene vinyl acetate

^۴ Crumb rubber

^۵ Crumb Rubber Modified Bitumen

^۶ Toughness

^۷ 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

متعددی روی آسفالت‌های اصلاح‌شده 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].

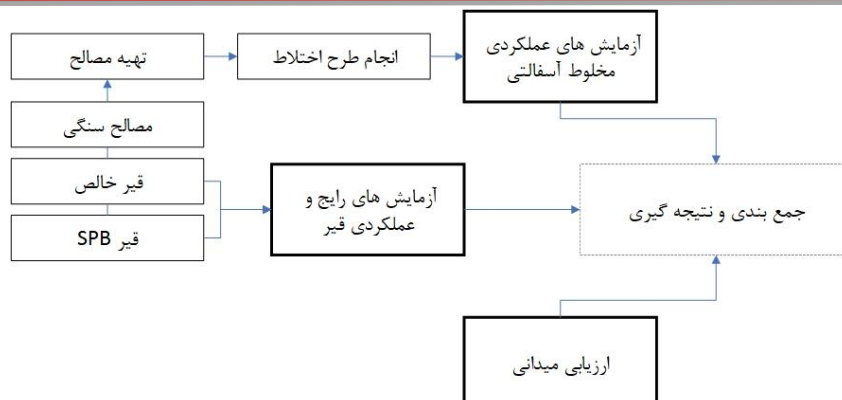
یک شرکت دانش بنیان با فناوری منحصر بفرد و آسان و با استفاده از پودر لاستیک‌های مستعمل اقدام به تولید نوعی قیر اصلاح شده به روش شیمیایی نموده است. قیرهای لاستیکی به روش پلیمریزاسیون (SPB)، نسل جدید از قیرهای پودر لاستیکی (CRMB) در جهان بوده و تفاوت این محصول پیشرفته با انواع قدیمی آن، در نحوه اختلاط قیر با لاستیک و بنابراین استحصال تمام خواص مورد انتظار از لاستیک در قیر و آسفالت می‌باشد. فناوری منحصربه‌فرد بکار رفته در این محصول باعث می‌گردد 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 انعطاف‌پذیری آسفالت بهبود یابد. در تکنولوژی تولید نسل جدید قیر لاستیکی (SPB)، خواص رئولوژیکی قیر در آسفالت تغییر کرده و آسفالت‌های تولید شده از عملکردی بهتر و ویژگی‌های منحصربه‌فردی برخوردار خواهند بود. با عنایت به اینکه فرایند تولید این نوع قیر یک ترکیب شیمیایی است لذا با توجه به افزودنی‌های که در این فرایند افزوده می‌شود می‌توان فرایند پلیمریزاسیون را تسریع یا کند کرد و خواص رئولوژیکی قیر را کنترل نمود.

باتوجه به جدید بودن فناوری استفاده شده در ساخت قیرلاستیکی (SPB)، در این مطالعه به ارزیابی عملکرد آسفالت‌های 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 طرح‌های اختلاط آسفالت با قیر خالص (مخلوط شاهد) و آسفالت اصلاح شده با قیر لاستیکی (SPB) برای قشر رویه و آستر با دانه‌بندی پیوسته ارائه شده است. پس از ارائه طرح اختلاط، نتایج آزمایش‌های قیرهای مورد مطالعه و نیز نتایج آزمایش‌های عملکردی آسفالتی حاصل از طرح اختلاط نیز بیان می‌شود. با انجام آزمایش‌های 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 می‌گردد. همچنین با انجام آزمایش‌های عملکردی بر روی مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با درصد قیرهای ساخته شده با درصد قیر بهینه، امکان مقایسه سختی، مقاومت شیارشدگی، مقاومت خستگی، مقاومت در برابر ترک‌های برودتی مخلوط‌های آسفالتی شاهد و اصلاح شده با قیرلاستیکی (SPB) فراهم می‌آید. در نهایت پس از انجام آزمایش‌های عملکردی بر قیر و مخلوط‌های آسفالتی، پروژه‌های انجام شده با قیرلاستیکی (SPB) مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل ۱، فرایند مطالعه را نشان می‌دهد.

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



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

۲- طرح اختلاط

۲-۱- دانه بندی و نسبت های اختلاط مصالح سنگی

به طور معمول از دو دانه بندی میان تهی^۱ و دانه بندی باز^۲ برای ساخت مخلوط های آسفالتی پودر لاستیکی استفاده می شود. در این مطالعه از قیرلاستیکی (SPB) برای ساخت و ارزیابی مخلوط آسفالتی با دانه بندی متراکم^۳ استفاده شده است. دانه بندی مصالح سنگی ریزدانه و درشت دانه به روش استاندارد AASHTO T ۲۷ و ASTM C ۱۳۶ و دانه بندی فیلر به روش استاندارد AASHTO T ۳۷ و ASTM D ۵۴۶ تعیین شد. باتوجه به دانه بندی مصالح سنگی با اندازه های مختلف و فیلر اضافی به منظور دستیابی به محدوده مشخصات دانه بندی با اندازه ای اسمی ۱۲/۵ میلی متر (رده ۴) از جدول ۱-۲۰ نشریه ۱۰۱، نسبت های اختلاط مصالح سنگی و فیلر در جدول ۱ ارائه شده است. منحنی دانه بندی مخلوط مصالح سنگی آسفالت به همراه منحنی های حد بالا و پایین مشخصات دانه بندی در شکل ۲ ارائه و ترسیم شده است.

جدول ۱: دانه بندی و نسبت های اختلاط مصالح سنگی

اندازه الک (میلی متر)	مشخصه و دانه بندی مصالح سنگی (درصد عبوری از الک ها)				دانه بندی مخلوط (درصد)	دانه بندی کارگاهی (درصد)	حدود مشخصات دانه بندی
	شن متوسط ۱۹-۱۲	شن ریز ۱۲-۶	ماسه ۶-۰	فیلر			
۱۹	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۱۲/۵	۶۴	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۶	۹۵	۱۰۰-۹۰
۴/۷۵	۰	۲۴	۱۰۰	۱۰۰	۵۴	۵۵	۷۴-۴۴
۲/۳۶	۰	۱	۸۰	۱۰۰	۳۶	۳۵	۵۸-۲۸
۰/۳	۰	۰	۱۴	۱۰۰	۹/۸	۱۰	۲۱-۵
۰/۰۷۵	۰	۰	۴/۴	۸۶	۴/۵	۵	۱۰-۲
نسبت اختلاط	۱۲	۴۵	۴۰	۳	۱۰۰ (مجموع نسبت های اختلاط)		

^۱ Gap graded

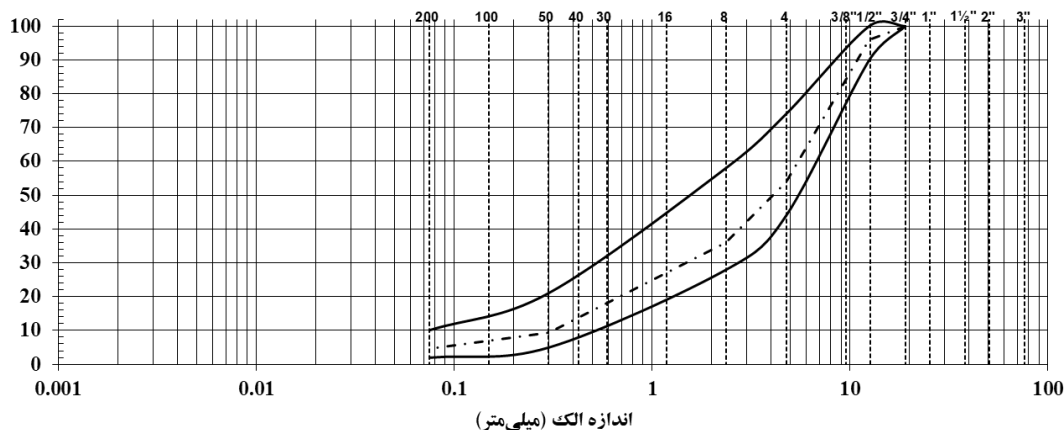
^۲ Open graded

^۳ Dense graded

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



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

۲-۲- محدوده دماهای اختلاط و تراکم

مطابق روش استاندارد ASTM D۶۹۲۶ محدوده دمای اختلاط و تراکم آسفالت شاهد باتوجه به کندروانی قیر تعیین می‌شود. 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 ثانیه باشد. این دماها با ترسیم خط تغییرات کندروانی برحسب دما در نمودار دما کندروانی مطابق با استاندارد ASTM D۲۴۹۳ تعیین می‌شوند. 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 D۲۴۹۳ به دلیل رفتار غیرخطی معتبر نیست؛ لذا این دماها به دلیل افزایش ویسکوزیته به ترتیب ۱۷۰ تا ۱۷۵ و ۱۵۵ تا ۱۶۵ درجه سلسیوس اعمال شد.

۲-۳- ساخت نمونه و آزمون‌های مخلوط آسفالتی

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

باتوجه به مشخصات طرح اختلاط آسفالت به روش مارشال، نمونه‌های آسفالتی با مقادیر مختلف قیر و مصالح سنگی با دانه‌بندی به‌دست‌آمده و با ۷۵ ضربه چکش مارشال به هر طرف نمونه ساخته و متراکم شدند به‌ازای 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 توصیه‌های استاندارد، نمونه‌های آسفالتی شاهد قبل از تراکم با چکش مارشال به مدت ۲ ساعت درون آون در دمای ۱۴۰ درجه سلسیوس قرار داده شده و هم دما شدند. نمونه‌های 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.

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

وزن مخصوص حقیقی و چگالی نمونه‌های 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 نمونه‌های ساخته شده انجام شد.

پس از رسم منحنی‌های کمیت‌های 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 مخلوط‌های حاوی قیر لاستیکی (SPB) این است که پودر لاستیک استفاده شده در این فرآیند استحصال نمی‌شود و صرفاً درصد قیر خالص مصرفی محاسبه می‌گردد؛ لذا با توجه به مصرف ۲۰ درصد پودر لاستیک در این نوع قیرها، می‌بایست درصد قیر حاصل از اکستراکشن را در ۱/۲۵ ضرب کرد تا درصد قیر لاستیکی (SPB) مصرفی محاسبه گردد.

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 ^۳	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 خالص	مقدار برای قیر لاستیکی SPB
	ASTM	AASHTO		
آزمون قیر اولیه				
درجه نفوذ (۰/۱ میلی‌متر)، در ۲۵ °C، ۱۰۰ گرم، ۵ ثانیه	T۴۹	D۵	۶۴	۵۵
نقطه نرمی (درجه سلسیوس)، در آب مقطر	T۵۳	D۳۶	۵۰/۴	۶۳/۶
چگالی (گرم بر سانتی‌متر مکعب) در ۲۵ °C درجه	T۲۲۸		۱/۰۱۸	۱/۰۴۲
بازگشت الاستیک قیر اصلاح‌شده (درصد) در ۲۵ °C درجه، ۵		D۶۰۸۴	-	۷۰

سانتی متر بر دقیقه

۱۲/۶	-	D۷۱۷۳	جداشدگی قیر اصلاح شده (تفاوت نقطه نرمی °C)
۰/۸۵۰	۰/۱۱۳	D۴۴۰۲	کندروانی چرخشی (پاسکال ثانیه) در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد
PG ۷۶-۲۲	PG ۶۴-۲۲	D۶۳۷۳	M۳۲۰ رده عملکردی قیر

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 لاستیک، (SPB) نسبت به قیر خالص مورد مطالعه می‌باشد.

نتایج آزمون بازگشت الاستیک قیر لاستیکی (SPB) نیز نشان‌دهنده رفتار ارتجاعی قابل‌قبول (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 EN۱۴۰۲۳ به‌منظور رفتار ارتجاعی مناسب، قیر اصلاح شده می‌بایست دارای بازگشت الاستیک بیش از ۶۰ درصد باشد. بررسی نتایج آزمون جداشدگی در جدول ۳ نشان‌دهنده قابلیت انبارش ضعیف قیر پودر لاستیکی به دلیل فرآیند ته‌نشینی می‌باشد. بر اساس مشخصات استاندارد EN۱۴۰۲۳ به‌منظور انبارش مناسب، قیر اصلاح شده می‌بایست دارای جداشدگی (تفاوت نقطه نرمی) کمتر از ۵ درجه سانتی‌گراد باشد. با توجه به نتایج جداشدگی 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.

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 D۶۱۱۴ را در برآورده‌ساختن 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 زرین به‌جای قیر خالص مورد مطالعه، دو درجه به رده‌بالای عملکردی قیر افزوده شده و رده‌پایین عملکردی تغیری نمی‌کند. نتایج عملکردی در جدول ۴ و ۵ ارائه گردیده است.

جدول ۴: نتایج آزمایش‌های عملکردی قیر خالص

درجه عملکردی	PG۶۴						PG۷۰					
	-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
فیر اصلی												
دمای اشتعال (درجه سانتی‌گراد) ASTM D۹۲							۳۰۵					

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

RV آزمایش ویسکوزیته چرخشی ASTM D۴۴۰۹	دمای آزمایش (درجه سانتی‌گراد)	۱۳۵											
	ویسکوزیته (پاسکال-ثانیه)	۰/۳۲۲											
DSR آزمایش رئومتر برشی دینامیکی ASTM D۷۱۷۵	دمای آزمایش (درجه سانتی‌گراد)	۶۴						۷۰					
	$G^*/\sin \delta$ (کیلوپاسکال)	۱/۲۰۰						-					
قیر باقی‌مانده آزمایش RTFO پیرشدگی لایه نازک متحرک قیر ASTM D۲۸۷۲													
تغییر جرم در آزمایش پیرشدگی RTFO (درصد)		۰/۱۰											
DSR آزمایش رئومتر برشی دینامیکی ASTM D۷۱۷۵	دمای آزمایش (درجه سانتی‌گراد)	۶۴						۷۰					
	$G^*/\sin \delta$ (کیلوپاسکال)	۲/۶۱۰						-					
قیر باقی‌مانده آزمایش PAV تسریع پیرشدگی قیر ASTM D۶۵۲۱													
دمای پیرشدگی (درجه سانتی‌گراد)		۱۰۰						۱۰۰					
DSR آزمایش رئومتر برشی دینامیکی ASTM D۷۱۷۵	دمای آزمایش (درجه سانتی‌گراد)	۳۱	۲۸	۲۵	۲۲	۱۹	۱۶	۳۶	۳۱	۲۸	۲۵	۲۲	۱۹
	$G^*/\sin \delta$ (کیلوپاسکال)			۳۱۲۶									
BBR آزمایش رئومتر تیرچه خمشی ASTM D۶۶۴۸	دمای آزمایش (درجه سانتی‌گراد)	۰	-۶	-۱۲	-۱۸	-۲۴	-۳۰	۰	-۶	-۱۲	-۱۸	-۲۴	-۳۰
	سختی خزش S (مگاپاسکال)			۱۳۸									
	ضریب m			۰/۳۰۰									

جدول ۵: نتایج آزمایش های عملکردی قیر لاستیکی (SPB)

درجه عملکردی		PG۷۶						PG۸۲					
		-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 D۹۲		۲۹۵											
آزمایش ویسکوزیته چرخشی RV ASTM D۴۰۹	دمای آزمایش (درجه سانتی‌گراد)	۱۳۵											
	ویسکوزیته (پاسکال-ثانیه)	۱/۸۵۰											
آزمایش رئومتر برشی دینامیکی DSR ASTM D۷۱۷۵	دمای آزمایش (درجه سانتی‌گراد)	۷۶						۸۲					
	$G^*/\sin \delta$ (کیلوپاسکال)	۱/۸۸۰						۰/۶۰۰					
قیر باقی‌مانده آزمایش RTFO پیرشدگی لایه نازک متحرک قیر ASTM D۲۸۷۲													
تغییر جرم در آزمایش پیرشدگی RTFO (درصد)		۰/۱۰											
آزمایش رئومتر برشی دینامیکی DSR ASTM D۷۱۷۵	دمای آزمایش (درجه سانتی‌گراد)	۷۶						۸۲					
	$G^*/\sin \delta$ (کیلوپاسکال)	۳/۲۳						۱/۷۲					
قیر باقی‌مانده آزمایش PAV تسریع پیرشدگی قیر ASTM D۶۵۲۱													
دمای پیرشدگی (درجه سانتی‌گراد)		۱۰۰						۱۰۰					
آزمایش رئومتر برشی دینامیکی DSR ASTM D۷۱۷۵	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 D۶۶۴۸	دمای آزمایش (درجه سانتی‌گراد)	۰	-۶	-۱۲	-۱۸	-۲۴		۰	-۶	-۱۲	-۱۸	-۲۴	
	سختی خزش S (مگاپاسکال)			۱۰۴	۲۱۱								
	ضریب m			۰/۳۱۰	۰/۲۷۲								

۳- آزمایش های عملکردی مخلوط های آسفالتی

ساخت مخلوط های آسفالتی جهت انجام آزمایش های عملکردی بر اساس طرح اختلاط صورت گرفته است. آزمایش عملکردی رایج نمونه های آسفالتی، آزمایش مدول برجهندگی^۱، آزمایش خستگی تیرچه خمشی^۲، آزمایش شیارافتادگی^۳ و آزمایش دوام رطوبتی^۴ است.

۳-۱- آزمایش مدول برجهندگی

^۱ Modulus of resilience
^۲ Fatigue of bending beam
^۳ Ruttings
^۴ 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

مدول برجهدگی برای تخمین سفتی مخلوط استفاده می‌شود [۲۳]. آزمایش مدول برجهدگی در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد براساس روش استاندارد ASTM D۴۱۲۳ 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. نمونه های مورد استفاده در این آزمایش به روش تراکم چرخشی مطابق استاندارد ASTM D۶۹۲۵ با قطر و ارتفاع، به ترتیب ۱۰۰ و ۶۴ میلی متر و فضای خالی ۴ درصد ساخته و متراکم شدند. نتایج آزمایش مدول برجهدگی نمونه های آسفالتی آزمایش شده در جدول ۶ ارائه شده است.



شکل ۴: آزمایش مدول برجهدگی

جدول ۶: نتایج آزمون مدول برجهدگی مخلوط های آسفالتی

مشخصه نمونه	مدول برجهدگی (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 می دهد که مدول برجهدگی نمونه های شاهد و اصلاح شده به هم نزدیک بوده، به طوری که مدول برجهدگی نمونه اصلاح شده تنها حدود ۷٪ از مدول برجهدگی نمونه شاهد بیشتر است.

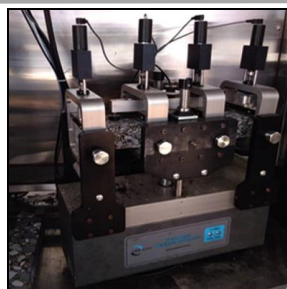
۲-۳- آزمایش خستگی تیرچه خمشی

این آزمایش برای ارزیابی سختی خمشی و عمر خستگی آسفالت استفاده می‌شود. به منظور انجام آزمایش خستگی تیرچه خمشی، نمونه های تخته ای شکل مخلوط آسفالتی با استفاده از دستگاه تراکم غلتکی با فضای خالی ۴ درصد ساخته و متراکم شدند. نمونه های مذکور توسط اهر برقی برش داده شده و تیرچه های آسفالتی با ابعاد مندرج در استاندارد AASHTO T۳۲۱ آماده شد. آزمایش خستگی تیرچه خمشی (شکل ۵) بر اساس استاندارد AASHTO T۳۲۱ در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد با بارگذاری نیمه سینوسی و کرنش ثابت ۸۰۰ میکرواسترین برای مخلوط های 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.

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



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 (مگاپاسکال)	سفتی نهایی (مگاپاسکال)	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		
	۸۰۰	۱	۲۷۵۹	۱۳۸۰	۲۴۶۷۰	۴/۳۹	۲۲۷۷۰	۰/۰۵۱
	۸۰۰	۲	۳۱۸۲	۱۵۹۱	۲۰۸۷۰	۴/۳۲		
	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 (مگاپاسکال)	سفتی نهایی (مگاپاسکال)	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		
	۸۰۰	۱	۲۸۰۴	۱۴۰۲	۲۴۸۶۰	۴/۴۰	۲۷۱۵۵	۰/۰۵۲
	۸۰۰	۲	۲۷۹۶	۱۳۹۸	۲۹۴۵۰	۴/۴۷		
	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 D۷۴۶۰ 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.

پانزدهمین همایش ملی و نمایشگاه قیر، آسفالت و ماشین آلات

The 15th Bitumen, Asphalt & Machinery Conference & Exhibition

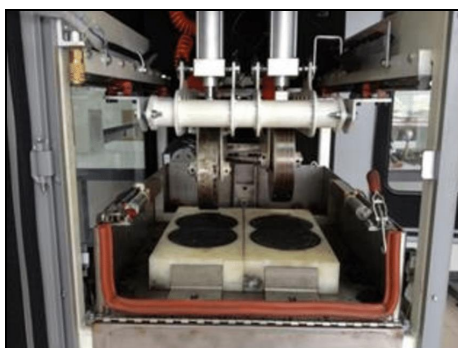
۹ الی ۱۱ آبان ماه ۱۴۰۲ - مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

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 برروی نمونه های استوانه ای انجام پذیرفت. در این دستگاه، چرخ بارگذاری با بار ثابت برروی 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.

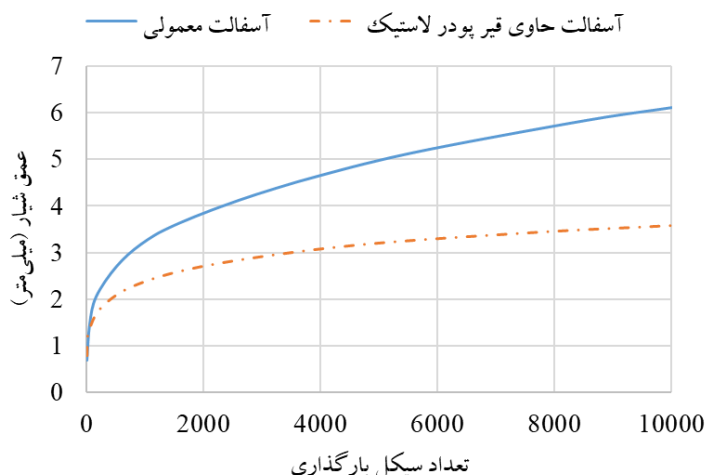


شکل ۶: آزمایش شیارافتادگی

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



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 (میلی‌متر)	مشخصه مخلوط آسفالتی
۵/۸۷	مخلوط شاهد
۴/۵۱	مخلوط اصلاح شده با قیر لاستیکی (SPB)

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که تکرار پذیری قابل قبولی بین نتایج آزمایش شیارافتادگی برای نمونه‌های تکراری مخلوط آسفالت شاهد و اصلاح شده وجود دارد، به طوریکه اختلاف عمر نهایی شیار نمونه‌های تکراری برای مخلوط‌های آسفالتی شاهد و اصلاح شده به ترتیب ۱۶٪ و ۲۴٪ است. همچنین مقایسه مخلوط‌های شاهد و اصلاح شده نشان می‌دهد که عمق نهایی شیار نمونه‌های شاهد کمی (حدود ۳۰٪) بیشتر از عمیق نهایی شیار نمونه‌های 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 متداول‌ترین روش‌های تست برای ارزیابی شکستگی است [۲۵]. آزمایش شکست نمونه نیم دایره در بارگذاری برای نمونه‌های آسفالتی مختلف در دمای ۱۰- درجه سانتی گراد انجام شد. در این آزمایش نمونه‌های نیم دایره‌ای 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. نمونه‌های مورد استفاده

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

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

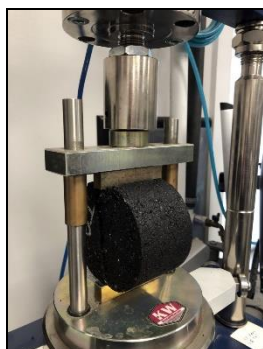
آسیب رطوبت یکی از اشکال خرابی‌های روسازی آسفالتی است که به دلیل وجود آب و تأثیر آن بر خواص مکانیکی مخلوط آسفالتی رخ می‌دهد [۲۶]. زیان‌های ناشی از رطوبت منجر به کاهش چسبندگی قیر به مصالح سنگی در آسفالت و اضمحلال و زوال ویژگی‌های مقاومتی آن می‌شود و در نتیجه خرابی‌های روسازی آسفالتی تسریع می‌یابد [۲۷]. 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

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

درون حمام آب ۲۵ درجه سانتی گراد، مقاومت کششی غیر مستقیم آن ها اندازه گیری شد. مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه های خشک نیز پس از ۲ ساعت قرار گرفتن در حمام آب ۲۵ درجه سانتی گراد اندازه گیری 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 (کیلو پاسکال)	نسبت مقاومت کششی حالت اشباع به حالت معمولی (درصد)
مخلوط شاهد	معمولی	۲/۳۳۲	۶/۶	-	۶۷۵	۹۵
	اشباع	۲/۳۳۶	۶/۵	۷۸	۶۴۳	
مخلوط اصلاح شده با SPB	معمولی	۲/۳۱۶	۶/۹	-	۷۴۰	۹۶
	اشباع	۲/۳۲۳	۶/۶	۷۸	۷۰۷	

مقایسه مخلوط های شاهد و اصلاح شده با قیر لاستیکی (SPB) ساخته شده از مصالح سنگی آهکی نشان می دهد که نسبت مقاومت کششی نمونه های شاهد و اصلاح شده مشابه یکدیگر است.

۴- گزارش بازدید میدانی عملکرد آسفالت پودر لاستیکی با قابلیت پلیمریزه شدن (SPB)

به منظور ارزیابی میدانی از عملکرد آسفالت تولید شده با قیر پودر لاستیکی با قابلیت پلیمریزه شدن (SPB) از پروژه های خطوط BRT مشهد، پایانه ترمینال مسافربری و عوارضی ابتدای باغچه - مشهد بازدید به عمل آمد. بر اساس گزارش های کارشناسان اداره کل نگهداری و تعمیرات زیرساخت های شهری شهرداری مشهد، پروژه های خطوط BRT مشهد، پایانه ترمینال مسافربری و عوارضی ابتدای باغچه - مشهد به ترتیب ۵ سال، ۴ سال و ۱۱ ماه از عمر بهره برداری در زمان بازدید گذشته است. پس از ۵ سال از اجرای آسفالت پودر لاستیکی به روش پلیمریزاسیون (SPB) در مسیر BRT، خرابی شیارشدگی مشاهده نشده است. این در حالی است که معمولاً در مسیرهای خطوط ویژه، آسفالت معمولی عملکرد مناسبی نداشته و عمر کوتاهی دارد. در شهر مشهد در خطوط BRT معمولاً هر شش ماه یکبار آسفالت معمولی جمع آوری و مجدداً روکش صورت می گرفت؛ اما با استفاده از آسفالت حاوی قیر لاستیکی با فناوری پلیمریزاسیون (SPB)، این مشکل رفع شده است. تعداد کمی ترک های عرضی، برودتی، خستگی و بلوکی در مسیرهای اجرای شده مشاهده گردید. در بازدید انجام شده هیچ گونه قیر زدگی

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



در پروژه‌های اجرا شده طی زمان بهره‌برداری اتفاق نیفتاده است. شکل ۱۰ خرابی شیارافتادگی در خط BRT مشهد که آسفالت معمولی در آن اجرا شده است را نشان می‌دهد. شکل ۱۱ خط ۱ BRT مشهد است که پس از ۵ سال از بهره‌برداری، فقط تعداد کمی ترک خستگی و برودتی در آن مشاهده می‌شود و خرابی شیارافتادگی و قیر زدگی اصلاً در این مسیر دیده نمی‌شود. نکته قابل توجه این است که در هنگام اجرای آسفالت هیچ تغییری در زیرسازی داده نشده است.



شکل ۱۰: شیارافتادگی ایجاد شده در خطوط BRT دارای آسفالت معمولی

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



شکل ۱۱: خط ۱ BRT مشهد دارای آسفالت حاوی قیر لاستیکی (SPB) اجرا شده در سال ۱۳۹۷ بدون خرابی شیارافتادگی

با عنایت به اجرای پروژه‌های متعدد در سطح شهر مشهد بدون تغییر در زیرسازی پروژه‌ها و عملکرد این نوع آسفالت تحت بارمحوری ایستا و سنگین، نتایج میدانی عملکرد مطلوب این آسفالت‌های تولید شده با قیر لاستیکی (SPB) را در مقایسه با نتایج آزمایش‌های نشان می‌دهد. در خصوص ترک‌های طولی و عرضی، ترک‌های برودتی، ترک‌های خستگی و غیره می‌بایست ارزیابی بیشتری انجام گردد تا بتوان به طور دقیق اظهار نظر کرد.

طی بررسی‌های انجام شده برای مخلوط‌های آسفالتی حاوی قیر لاستیکی (SPB)، به‌خوبی نشان داده است که در مسیرهای اجرا شده، طی عمر بهره‌برداری، عملکرد مطلوب این نوع آسفالت در مواجهه با پوشیده شدن با برف یا یخ‌زدگی بوده است. به دلیل این ویژگی در شهر مشهد از این نوع قیر در روکش پل‌ها استفاده شده است که در هنگام برف و یخ‌زدگی موجب پاشش کمتر نمک یا عوامل دیگر یخ‌زدا روی سطح روکش شده که باعث آسیب کمتر به سازه‌های بتنی نیز می‌گردد. هرچند نیاز به ارزیابی بیشتر این موضوع است. شکل ۱۲ تعدادی تصاویر مربوط به این موضوع را نشان می‌دهد.



پانزدهمین همایش ملی و نمایشگاه قیر، آسفالت و ماشین آلات

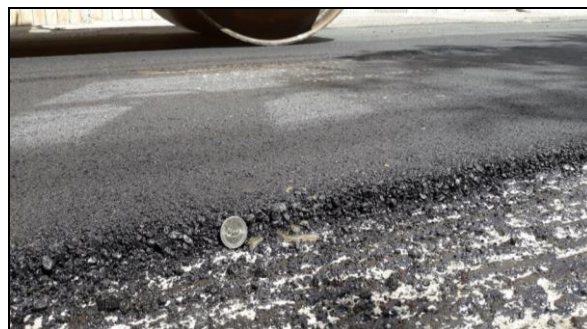
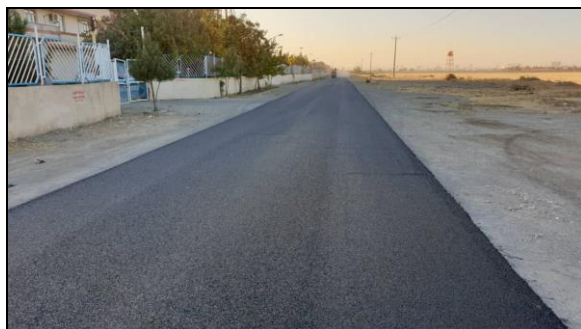
The 15th Bitumen, Asphalt & Machinery Conference & Exhibition

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



شکل ۱۲: عملکرد مثبت آسفالت لاستیکی (SPB) در شرایط یخزدگی احتمالی

همچنین در سطح شهر مشهد از آسفالت لایه نازک حاوی قیر لاستیکی (SPB) با دانه‌بندی باز نیز در بلوار فرامرز عباسی و خیابان عمار یاسر نیز در سال ۱۳۹۸ اجرا شده است که طی عمر بهره‌برداری خرابی قابل توجهی مشاهده نگردیده است (شکل ۱۳)؛ لذا نشان‌دهنده مطلوب عملکرد این نوع قیر در آسفالت لایه‌نازک است که می‌بایست در پروژه‌های دیگر اجرا مورد ارزیابی قرار گیرد.



شکل ۱۳: اجرای آسفالت لایه‌نازک حاوی قیر لاستیکی (SPB) با دانه‌بندی باز در سال ۱۳۹۸، مشهد

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

۵- جمع بندی و نتیجه گیری:

باتوجه به افزایش بارهای ترافیکی و محوری، نیاز به اصلاح مصالح برای بهبود عملکرد درازمدت روسازی جاده ها مشخص می شود. هزینه بالای ساخت و ساز راه ها باعث می شود 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 زائدی که در حجم بالا تولید می شود لاستیک های ضایعاتی است. محققان به این نتیجه رسیدند که افزودن خرده لاستیک (CR) تولید شده از لاستیک قراضه نه تنها می تواند مشکلات زیست محیطی را کاهش دهد، بلکه می تواند عملکرد مخلوط آسفالت مانند مقاومت در برابر شیار، ترک در دمای پایین و انعطاف پذیری مخلوط آسفالت را بهبود بخشد. جدیدترین نوع قیر اصلاح شده پودر لاستیک، قیر لاستیکی (SPB) است که در این مطالعه به ارزیابی عملکردی و میدانی مخلوط آسفالتی ساخته شده با این نوع قیر هم برای قشر رویه و هم آستر و مقایسه با مخلوط های آسفالتی شاهد با قیر خالص اقدام شده است. نتایج حاصل به شرح ذیل می باشد.

۱. قیر لاستیکی (SPB) در مقایسه با قیر خالص رده عملکردی بسیار مناسب تری دارد. اختلاف دمای بالا و پائین رده عملکردی قیر لاستیکی برابر با ۹۸ درجه سانتی گراد است که این محدوده برای قیرهای خالص عموماً کمتر از ۹۰ درجه سانتی گراد است. همچنین وجود ۲۰ درصد پودر لاستیک در قیر باعث افزایش دو درجه ای رده بالای عملکردی می شود؛ ولی بر رده پایین عملکردی تأثیری ندارد.
۲. باتوجه به نتایج به دست آمده از آزمون های عملکردی مخلوط های آسفالتی دارای دانه بندی پیوسته حاوی قیر خالص و قیر لاستیکی (SPB) این طور استنباط می شود که استفاده از قیر لاستیکی (SPB) مذکور به جای قیر خالص PG ۶۴-۲۲ 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.
۳. بر اساس مشاهدات میدانی به نظر می رسد در پروژه هایی که خرابی غالب آن ها شیارشدگی است نظیر عوارضی و ورودی شهرها، خطوط BRT، پایانه مسافری اتوبوس های درون و برون شهری و روسازی پل های روگذر بهتر است از قیر لاستیکی (SPB) استفاده شود. در خصوص سایر خرابی ها می بایست هم به صورت آزمایشگاهی و هم میدانی در قشرهای مختلف ارزیابی صورت گیرد.

باتوجه به نتایج حاصل از آزمایش های عملکردی قیر و آسفالت و بازدیدهای میدانی صورت گرفته، در مجموع آسفالت حاوی قیر لاستیکی (SPB) دارای عملکرد مطلوبی در مقابله با خرابی های احتمالی دارد. برای اظهار نظر دقیق در خصوص بررسی عملکرد آسفالت حاوی قیر لاستیکی (SPB) نیاز به انجام آزمایش های متنوع تر و گسترده تری بر روی لایه های مختلف روسازی در محل و در آزمایشگاه است. همچنین به نظر می رسد برای تولید آسفالت با دانه بندی باز بدون افزودن پلیمر و برای جلوگیری از ریزش قیر استفاده از قیر لاستیکی (SPB) می تواند موثر باشد. لذا جهت مطالعات آتی پیشنهاد می گردد 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.

Refrencess

- [۱] 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. ۴, no. ۲, pp. ۱۰۵-۱۱۹, ۲۰۰۳.
- [۲] J. Wei *et al.*, "Research on performance of SBS-PPA and SBR-PPA compound modified asphalts," *Materials*, vol. ۱۵, no. ۶, p. ۲۱۱۲, ۲۰۲۲.
- [۳] 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. ۲۲, no. ۴, pp. ۷۵۷-۷۷۸, ۲۰۲۱.
- [۴] 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. ۹, no. ۴, p. ۷۴۲, ۲۰۱۹.
- [۵] 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. ۲۰, no. ۲, pp. ۳۸۹-۳۹۸, ۲۰۲۲.
- [۶] 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. ۷, no. ۲, pp. ۱۶۶-۱۷۰, ۲۰۱۲.
- [۷] 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. ۶, no. ۴, pp. ۶۸۴-۶۹۰, ۲۰۱۱.
- [۸] 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. ۲۰۱۳, ۲۰۱۳.
- [۹] F. Aslani, "Mechanical properties of waste tire rubber concrete," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. ۲۸, no. ۳, p. ۰۴۰۱۵۱۵۲, ۲۰۱۶.
- [۱۰] 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-۹۲-۱۴۷, ۱۹۹۳.
- [۱۱] L. P. Fontes, G. Trichês, J. C. Pais, and P. A. Pereira, "Evaluating permanent deformation in asphalt rubber mixtures," *Construction and Building Materials*, vol. ۲۴, no. ۷, pp. ۱۱۹۳-۱۲۰۰, ۲۰۱۰.
- [۱۲] R. Y. Liang and S. Lee, "Short-term and long-term aging behavior of rubber modified asphalt paving mixture," *Transportation research record*, vol. ۱۵۳۰, no. ۱, pp. ۱۱-۱۷, ۱۹۹۶.
- [۱۳] 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. ۲۷, no. ۱۱, p. ۰۴۰۱۵۰۱۱, ۲۰۱۵.
- [۱۴] 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. ۳۶۱, p. ۱۲۹۶۸۷, ۲۰۲۲.
- [۱۵] 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. ۲۹۹, p. ۱۲۴۲۸۲, ۲۰۲۱.
- [۱۶] S. Hosseinneshad, 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. ۲۲۵, pp. ۸۲-۸۹, ۲۰۱۹.



- [۱۷] 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. ۱۵۱, pp. ۶۸۲-۶۹۱, ۲۰۱۷.
- [۱۸] 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)*, ۲۰۲۲.
- [۱۹] 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. ۲۴, no. ۵, pp. ۱۶۷۹-۱۶۹۲, ۲۰۲۲.
- [۲۰] 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," ۲۰۲۳.
- [۲۱] F. L. Roberts, P. S. Kandhal, E. R. Brown, D.-Y. Lee, and T. W. Kennedy, "Hot mix asphalt materials, mixture design and construction," ۱۹۹۱.
- [۲۲] 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. ۱۴, no. ۴, pp. ۲۷۹-۲۹۳, ۲۰۰۲.
- [۲۳] 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. ۱۲, no. ۲۰, p. ۸۵۵۱, ۲۰۲۰.
- [۲۴] 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. ۳۴, no. ۵, pp. ۴۴۹-۴۵۳, ۲۰۱۶.
- [۲۵] S. A. Saed, H. R. Karimi, S. M. Rad, M. Aliha, X. Shi, and P. J. Haghighatpour, "Full range I/II fracture behavior of asphalt mixtures containing RAP and rejuvenating agent using two different ۳-point bend type configurations," *Construction and Building Materials*, vol. ۳۱۴, p. ۱۲۵۵۹۰, ۲۰۲۲.
- [۲۶] 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. ۵۴, no. ۸, pp. ۲۸۳۱-۲۸۵۰, ۲۰۲۲.
- [۲۷] 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. ۳۶۶, p. ۱۳۰۱۷۷, ۲۰۲۳.