

بررسی و مقایسه شاخص نفوذ، حساسیت حرارتی، ویسکوزیته و پارامترهای عملکردی در قیرهای لاستیکی با فناوری پلیمریزاسیون (SPB) نسبت به قیرهای اصلاح شده با پودر لاستیک (CRMB) و قیرهای خالص و سپس ارزیابی عملکرد مخلوط آسفالتی حاوی این نوع قیر بر اساس بررسی‌های آزمایشگاهی و میدانی

مطالعه موردی: کلانشهر مشهد

مسعود علیزاده^۱، حسن نوری^۲، سید علی صحاف^۳، سعید پرویزی^۴، مجتبی زمانیان وحیدی^۵، بهنام خیاط^۶

خلاصه

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. تغییر نحوه اختلاط پودر لاستیک با قیر، در نسل جدید قیرهای لاستیکی با فناوری پلیمریزاسیون (SPB) نسبت به روش‌های معمول که در تولید قیرهای اصلاح شده با پودر لاستیک (CRMB) بکار می‌رود، باعث بهبود بسیاری از پارامترهای کیفیتی از جمله شاخص نفوذ و حساسیت حرارتی، ویسکوزیته و پارامترهای عملکردی محصول گردیده که شناخت این مهم می‌تواند تاثیر زیادی در بکارگیری این محصول جدید در تولید انواع آسفالت با کاربری‌های متفاوت گردد. هدف از این تحقیق بررسی تغییرات شاخص نفوذ و حساسیت حرارتی، ویسکوزیته و پارامتر عملکردی $G^*/\sin\delta$ نسل جدید قیرهای لاستیکی (SPB) در طی فرایند پلیمریزاسیون و مقایسه آن با قیرهای اصلاح شده با پودر لاستیک (CRMB) می‌باشد. همچنین در این مطالعه به ارزیابی عملکردی این قیر و مخلوط‌های آسفالتی حاوی این نوع قیر در آزمایشگاه و نیز بررسی میدانی آسفالت‌های تولید شده با این قیر اصلاح شده در طی دوره زمانی ۷ ساله در کلانشهر مشهد پرداخته شده 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 پذیرفته است. نتایج نشان‌دهنده عملکرد نسبتاً مطلوب آسفالت حاوی قیر لاستیکی (SPB) در مقایسه با مخلوط‌های آسفالتی شاهد خصوصاً در مورد عمق شیارشدگی است. بررسی‌های میدانی نیز نشان‌دهنده بهبود شرایط راه است به‌طوری‌که خرابی شیارشدگی در پروژه‌های انجام گرفته با عمر ۷ سال مشاهده نگردید و فقط تعداد محدودی ترک‌های خستگی و برودتی ایجاد شده است. در مجموع استفاده از قیر لاستیکی با فناوری پلیمریزاسیون (SPB) می‌تواند موجب بهبود دوام مخلوط‌های آسفالتی خصوصاً در محل‌های دارای بارمحوری سنگین و یا ایستا شود.

کلمات کلیدی: قیر اصلاح شده، پودر لاستیک، پلیمریزاسیون، قیر لاستیکی (SPB)، آزمایش‌های عملکردی، شاخص نفوذ، حساسیت حرارتی، ویسکوزیته.

^۱ کارشناسی ارشد شیمی، مدیر تحقیق و توسعه مجموعه پالایشگاهی قیر زرین، مخترع فناوری

^۲ کارشناس عمران شهرداری مشهد

^۳ استادیار گروه مهندسی عمران، گرایش راه و ترابری، دانشگاه فردوسی مشهد

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

^۵ مدیر کل نظارت بر اجرای طرح‌های عمرانی شهرداری مشهد

^۶ مدیر کل نظارت بر نگهداری و تعمیرات شهرداری مشهد

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]. 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 تأثیر 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 [۳۴-۳۶].

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 به طور 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 نیز کاهش می‌یابد، که باعث کاهش اتلاف قیر در مرحله ساخت و ساز می‌شود. استحکام کششی غیرمستقیم (IDT) و مدول برجهندگی نیز افزایش یافته 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، همچنین تجزیه و تحلیل مکانیسم اصلاح آسفالت خرده لاستیک و مخلوط‌های آن انجام شده است [۱۳، ۳۵، ۶].

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^۸ (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 منحصر به فرد 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

^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

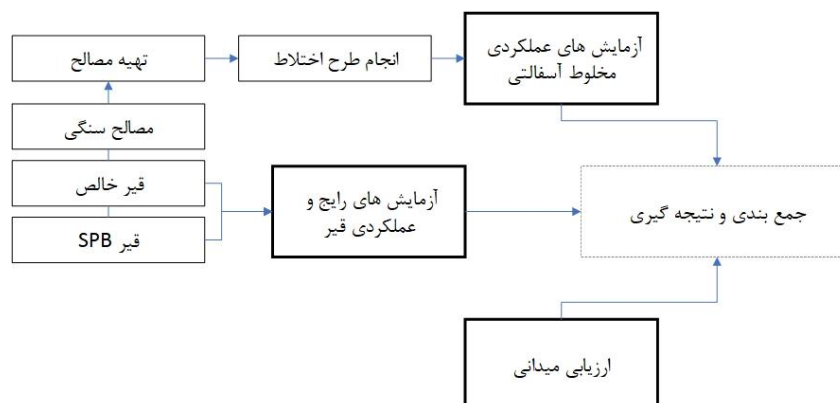
ترافیک عبوری، ارتباط مؤثرتری بین قیر و مصالح سنگی ایجاد گردد و به مرور استحکام و انعطاف پذیری آسفالت بهبود یابد. در تکنولوژی تولید نسل جدید قیر لاستیکی (SPB)، خواص رئولوژیکی قیر در آسفالت تغییر کرده و آسفالت های تولید شده از عملکردی بهتر و ویژگی های منحصر به فردی برخوردار خواهند بود. با عنایت به اینکه فرآیند تولید این نوع قیر یک ترکیب شیمیایی است لذا با توجه به افزودنی های که در این فرآیند افزوده می شود می توان فرایند پلیمریزاسیون را تسریع یا کند کرد و خواص رئولوژیکی قیر را کنترل نمود. در این نسل جدید از قیر لاستیکی با واکنش شیمیایی و پلیمریزاسیون پودر لاستیک در قیر، باعث بهبود بسیاری از پارامترهای کیفیتی قیر لاستیکی SPB تولید شده نسبت به قیرهای لاستیکی CRMB متداول شده است. علاوه بر مواردی که در این تحقیق به آن پرداخته میشود سایر مزایای قیر لاستیکی SPB عبارتند از:

-قابلیت پلیمریزه شدن قیر لاستیکی SPB که انجام این فرایند باعث تغییر رئولوژیکی قیر شده و آسفالت های تولید شده با این قیر استحکام و دوام بیشتری دارند، همچنین بعد از تکمیل فرایند پلیمریزاسیون، آسفالت حساسیت کمتری نسبت به تنش های حرارتی دارد.

-چسبندگی خوب قیر لاستیکی SPB به مصالح و بهبود خاصیت ضد جریان شدگی باعث شده است که این قیر در برابر حلال های شیمیایی و نفتی مقاوم تر باشد.

-در تولید قیر لاستیکی SPB امکان اختلاط حجم بیشتری از پودر لاستیک با قیر وجود دارد که خود صرفه اقتصادی استفاده از این روش را باعث میگردد.

با توجه 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: فرآیند ارزیابی آزمایشگاهی و میدانی آسفالت حاوی قیر لاستیکی (SPB)

۱-۱ تاریخچه موضوع تحقیق:

اضافه کردن خرده لاستیک بازیافتی به مخلوط آسفالت به روش تر به اوایل دهه ۱۹۶۰ بر میگردد، جاییکه چالز مکدونالد بعنوان سرپرست مهندس مواد در شهر فینیکس ایالت اریزونا دریافت که پس از اختلاط خرده لاستیک با قیر در دمای بالا به مدت ۴۵ تا ۶۰ دقیقه، ماده ای ژله ای گونه جدیدی با ویسکوزیته بالاتر و چسبندگی بیشتر نسبت به قیر پایه اولیه حاصل میگردد[۹].

معایب استفاده از خرده لاستیک باعث گردیده افراد زیادی در کشورهای مختلف بر روی بهینه سازی افزودن این ماده به قیر کار کنند و مقالات زیادی در این زمینه نوشته شود. در کشور ما هم بر روی قیرهای پودر لاستیک مقالات زیادی تولید شده است. بطور مثال در سال ۱۳۸۷ نادر طباطبایی و همکاران در دانشگاه شریف گزارشی کامل با عنوان "بررسی فرایند افزودن پودر لاستیک بر قیر و تاثیر آن بر خواص و رده عملکردی قیر" به رشته تحریر در آوردند. مقدس نژاد، راهی و آقاجانی در سال ۱۳۹۳ در مقاله ای "بررسی رئولوژیکی اثرات پودر لاستیک بر خواص و عملکرد قیر" را بررسی کردند. همچنین در همین سال زاهدی، بهاروند و نوری در مقاله ای "بررسی آزمایشگاهی تاثیر درصدهای مختلف پودر لاستیک بر حساسیت حرارتی قیر خالص" را منتشر کردند. در سالهای اخیر هم محققان بیشتر بر روی افزودنی هایی که میتوانند اثر بخشی افزودن پودر لاستیک به قیر را افزایش دهد، مقالات متعددی منتشر کرده اند، که از آن جمله میتوان به مقاله بنفشه فرمانبردار و بابک فرمانبردار با عنوان "بهبود خواص قیر با استفاده از افزودنی های SBS، پودر لاستیک و ساسویت" سال ۱۴۰۱ و یا مقاله راهی، آقاجانی و منیعی با عنوان "اصلاح قیر با دو افزودنی پلیمر SBR و پودر لاستیک" سال ۱۳۹۸ اشاره کرد.

۲-۱ روش تولید قیر لاستیکی SPB

روش تولید قیر لاستیکی SPB با روش تولید معمول قیرهای لاستیکی CRMB متفاوت است، به این دلیل که در این روش از تغییرات شیمیایی برای رسیدن به نتیجه بهتر کمک گرفته شده است. در این روش واکنشگر شیمیایی همراه با پودر لاستیک در دمای ۱۷۰ درجه سانتیگراد به قیر اضافه شده و بوسیله یک میکسر معمولی با دور حداکثر 50rpm، مخلوط میگردد. قیر لاستیکی SPB تولید شده تا زمانیکه به مصالح سنگی نرسیده است، خواص یک قیر پلیمری معمولی با ویسکوزیته کم را از خود نشان میدهد اما به محض رسیدن به مصالح، شبکه پلیمری پودر لاستیک و قیر شروع به شکل گیری میکنند که باعث ایجاد بهبود در آسفالت تولید شده می گردد. محقق برای آن که بتواند آنچه که قیر لاستیکی SPB پس از رسیدن به مصالح سنگی از خود نشان می دهد را شبیه سازی کند، به محصول تولیدی ماده شیمیایی دیگری به نام شتابدهنده اضافه کرده و نتایج محصول نهایی را در ساعات مختلف رصد کرده است و بنا بر آزمایشات متعدد دریافته است که پس از ۶ ساعت، شبکه پلیمری قیر و پودر لاستیک به ۸۰٪ ساختار حداکثر ممکن خود می رسد و تقریباً شرایط رسیدن قیر به مصالح شبیه سازی می گردد.

لذا در این تحقیق ما دو نمونه قیر لاستیکی SPB را با قیر لاستیکی CRMB و قیر پایه معمولی مقایسه میکنیم اولی قیر لاستیکی SPB تولید اولیه که با نام SPB Base آورده شده است و دومی قیر لاستیکی SPB که به آن شتابدهنده اضافه شده است و پس از ۶ ساعت مورد آزمایش قرار گرفته است که بنام SPB+ 6H Accelerator ذکر گردیده است.

۲- مواد اولیه آزمایشات قیر و روش ساخت نمونه ها

در این تحقیق، ۳ نوع قیر لاستیکی مورد مطالعه با استفاده از یک قیر پایه ثابت تولید شدند که مشخصات قیر پایه در جدول ۱ ذکر گردیده است. همچنین پودر لاستیک استفاده شده در این تحقیق، پودر لاستیک شرکت زیست همیار وابسته به سازمان مدیریت پسماند شهرداری مشهد بوده است که منش بندی آن در آزمایشگاه بنا به نوع قیر لاستیکی ساخته شده تعیین گردید.

نمونه های ساخته شده جهت آزمایشات نهایی، همگی در آزمایشگاه مجهز شرکت قیر زرین ساخته شدند. نحوه ساخت هر ۳ نمونه که با یکدیگر مقایسه گردیدند در جدول ۲ ذکر گردیده است. شایان ذکر است که پودر لاستیک مصرفی برای تولید قیر لاستیکی SPB در اشل صنعتی، مخلوطی از پودر لاستیک باسایز حدود ۴۰ میکرون تا سایز ۱۲۰۰ میکرون میباشد.

تعداد صفحه: ۱۳	گزارش نتایج آزمون	 شرکت فن آوری پالایش فیروزین
-------------------	--------------------------	--

گزارش نتایج آزمون قیر خالص					
ردیف	ویژگی / شرح آزمون	واحد اندازه گیری	۶۰-۷۰		۴۰-۵۰
			استاندارد INSO	حد استاندارد	نتیجه آزمون
۱	درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتیگراد (۱۰۰ گرم در ۵ ثانیه)	دهم میلیمتر	۲۹۵۰	۶۰	۶۴/۵
۲	نقطه نرمی	درجه سانتیگراد	۳۸۶۸	۴۶	۴۸/۸
۳	مقدار کشش (خاصیت انکمی) در ۲۵ درجه سانتیگراد	سانتیمتر	۳۸۶۶	۱۰۰	+۱۵۰
۴	حلالیت تری کلرور اتیلن (تترا کلرور کرین)	درصد	۲۹۵۳	۹۹/۰	۹۹/۸
۵	درجه اشتعال (روبار کلوند)	درجه سانتیگراد	۱۱۷۵	۲۳۰	۲۲۰
۶	لعاب نازک قیر (۱۶۳ درجه سانتیگراد-پنج ساعت) درصد افت جرم	درصد	۲۹۵۷	۰/۸	۰/۰۳
۷	درجه نفوذ بعد از آزمایش لعاب نازک (۱۰۰ گرم در ۵ ثانیه)	دهم میلیمتر	—	—	—
۸	نسبت درجه نفوذ بعد از آزمایش لعاب نازک به درجه نفوذ اولیه	درصد	۲۹۵۰	۵۲	۶۱
۹	مقدار کشش بعد از آزمایش لعاب نازک قیردر ۲۵ درجه سانتیگراد	سانتیمتر	۳۸۶۶	۵۰	۱۲۰
۱۰	حساسیت حرارتی قیر PI	—	—	—	-۰/۹

جدول ۱ مشخصات قیر 60-70 پایه

شرایط ساخت	فیرلاستیکی CRMB	فیرلاستیکی SPB	فیرلاستیکی SPB با شتابدهنده
۱ دمای اختلاط °C	۱۷۰	۱۷۰	۱۷۰
۲ زمان اختلاط min	۸۰	۱۸۰	۱۸۰
۳ سرعت اختلاط RPM	۷۰۰	۵۰	۵۰
۴ دانه بندی پودر لاستیک	رد شده از الک ۴۰	رد شده از الک ۱۶/۱۰۰	رد شده از الک ۱۶/۱۰۰
		روی الک ۳۰ ۱۶,۵٪	روی الک ۳۰ ۱۶,۵٪
		روی الک ۵۰ ۴۷,۷٪	روی الک ۵۰ ۴۷,۷٪
		زیر الک ۵۰ ۳۵,۸٪	زیر الک ۵۰ ۳۵,۸٪
۵ درصد پودر لاستیک %	۱۵	۲۰	۲۰
۶ زمان عمل آوری hr	-	-	۶

جدول ۲ مشخصات روش تولید نمونه های آزمایشگاهی

۱. تشریح آزمایشات قیر و نتایج آنها

به منظور بررسی دقیقتر میزان کارایی و اثر بخشی محصول تولیدی، سعی گردید در این تحقیق از روشهای ارزشیابی قیرها در زمانهای دورتر و نیز روشهای جدید ارزشیابی قیر که هم اکنون در دسترس آزمایشگاههای قیر است، استفاده گردد و نمونه قیر لاستیکی تولیدی با فن آوری جدید پلیمریزاسیون (SPB) با قیر لاستیکی ساخته شده با روشهای متداول کنونی (CRMB) مقایسه گردد. لذا تصمیم بر آن گردید آزمایشات درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد، نقطه نرمی، ویسکوزیته چرخشی در دو دمای ۱۳۵ و ۱۷۵ درجه سانتیگراد و آزمون DSR برای قیر اولیه و سپس قیر پیر شده در RTFOT بر روی نمونه ها بانجام برسد و نتایج آنها تحلیل گردد. درجه نفوذ و یا ویسکوزیته قیر صرفنظر از نوع و کیفیت و خواص فیزیکی شیمیایی منابع نفت خام و فرایندهای متنوع پالایش، با کاهش و یا افزایش درجه حرارت نیز تغییر میکند. در دمای بالا قیر رفتار یک سیال نیوتنی را از خود به نمایش میگذارد ولی با کاهش درجه حرارت قیر رفتار کشسان و یا الاستیک و در صورت کاهش بیشتر دما رفتار شکننده از خود نشان می دهد. [۷]. بطور کلی تغییرات خواص فیزیکی قیر مانند ویسکوزیته و درجه نفوذ با دما، حساسیت حرارتی قیر نامیده می شود، که برای قیرهای مختلف متفاوت است. هر چه حساسیت قیر کمتر باشد کیفیت قیر برای راهسازی بالاتر است. آسفالت‌های ساخته شده با قیرهایی با حساسیت بالا، نه تنها کیفیت را بشدت کاهش میدهد بلکه مشکلات زیادی را ایجاد می کنند که از آن جمله، دیرگیر بودن قیر و در نتیجه ایجاد تاخیر در غلنگ زنی، جاری شدن قیر از آسفالت در دمای بالای تولید آسفالت، تمایل شدید به قیر زدگی، تمایل زیاد به بروز ترکهای عرضی و انقباضی در زمستان و چندین عیب دیگر که همگی کاهش کیفیت آسفالت ساخته شده را بدنبال دارد. حساسیت حرارتی قیر را میتوان از طریق شاخص نفوذ PI و یا عدد درجه نفوذ-ویسکوزیته PVN و یا عدد دما-ویسکوزیته VTS تعیین نمود.

۴-۱ شاخص نفوذ PI و حساسیت حرارتی A

یکی از بهترین معادله هایی که برای شاخص نفوذ PI ارائه شده توسط Pfeiffer و Van Doormaal بیان شده است، که با اندازه گیری دو درجه نفوذ در دو دمای متفاوت میتواند بصورت زیر محاسبه گردد:

$$1) PI = (20(1 - 25A)) / (1 + 50A)$$

$$2) A = (\log Pen \text{ at } T1 - \log Pen \text{ at } T2) / (T1 - T2)$$

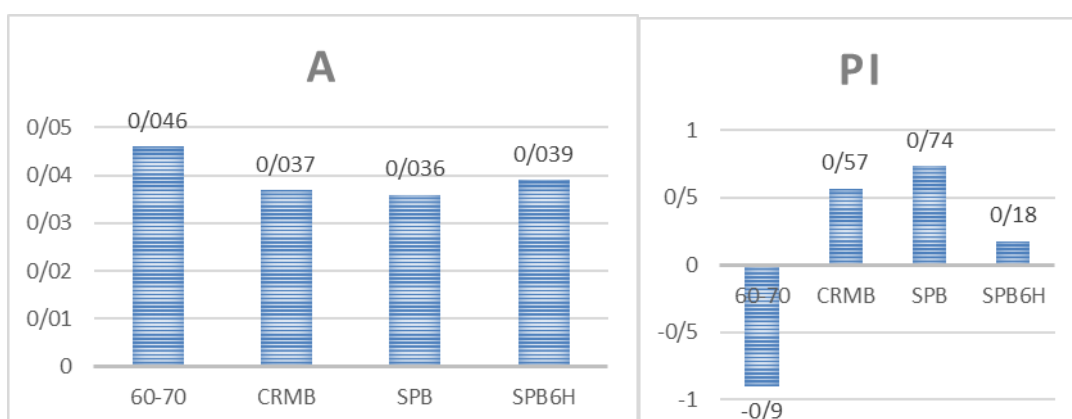
A حساسیت حرارتی قیر است که بین 0.0015 تا 0.06 تغییر میکند که نشان دهنده اختلاف قابل توجه در میزان حساسیت قیرهاست. همچنین مقدار شاخص نفوذ از حدود ۳- برای قیرهای بشدت حساس تا حدود ۷+ برای قیرهای بسیار دمیده با حساسیت بسیار کم متغیر است. Pfeiffer و Van Doormaal همچنین دریافته اند که بیشتر قیرها در دمای نقطه نرمی، درجه نفوذی برابر 800dmm دارند لذا با این وصف میتوان شاخص نفوذ را با داشتن درجه نفوذ و نقطه نرمی یک قیر بصورت زیر محاسبه کرد [۷]:

$$3) A = (\log Pen - \log 800) / (T1 - \text{Softening Point})$$

نتایج بدست آمده از آزمایشات که در فرمولهای ۱ و ۳ گذاشته شده، در جدول ۳ و مقایسه آنها در نمودار ۱ ارائه گردیده است.

	Softening Point	Penetration@25 °C	A	PI
	°C	dmm ,100g,5S	Pen25, Soft.	
60 - 70	48.8	64.5	0.046	-0.90
CRMB	62.2	34.3	0.037	0.57
SPB Base	60.2	43.8	0.036	0.74
SPB+ 6H Accelerator	62.8	27.0	0.039	0.18

جدول ۳ نتایج شاخص نفوذ PI و حساسیت حرارتی A



نمودار ۱ نتایج شاخص نفوذ PI و حساسیت حرارتی A

۴-۲ عدد درجه نفوذ ویسکوزیته PVN

عدد درجه نفوذ ویسکوزیته براساس درجه نفوذ در 25°C و ویسکوزیته در 135°C از طریق فرمول زیر محاسبه میگردد [۷]:

$$5) PVN = -1.5((\log L - \log X)/(\log L - \log M))$$

$$L = 4.25800 - 0.79670 \log Pen$$

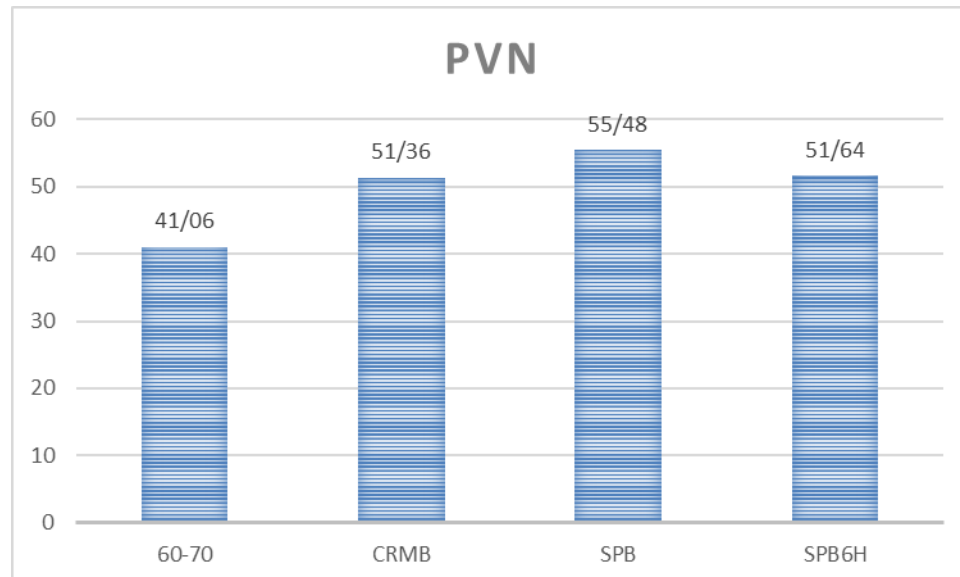
$$M = 3.46289 - 0.61094 \log Pen$$

$$X = \text{Viscosity at } 135^\circ\text{C}$$

هر چه میزان PVN قیری کمتر باشد، حساسیت حرارتی اش بیشتر خواهد بود. نتایج بدست آمده از آزمایشات در فرمول ۵ گذاشته شده و نتایج بدست آمده در جدول ۴ و مقایسه آنها در نمودار ۲ ارائه گردیده است.

	RV135	Penetration@25 °C	PVN
	30rpm,Sp.21,Cp	dmm ,100g,5S	
60 - 70	367	64.5	41.06
CRMB	1650	34.3	51.36
SPB Base	2447	43.8	55.48
SPB+ 6H Accelerator	1884	27.0	51.64

جدول ۴ نتایج عدد درجه نفوذ ویسکوزیته PVN



نمودار ۲ نتایج عدد درجه نفوذ ویسکوزیته PVN

۴-۳ حساسیت دما ویسکوزیته VTS

حساسیت دما ویسکوزیته براساس ویسکوزیته قیر در دو دمای مختلف از فرمول زیر بدست میاید[۷]:

$$6) VTS = (\log \log \eta_2 - \log \log \eta_1) / (\log T1 - \log T2)$$

که در آن η_1 و η_2 ویسکوزیته قیر در دماهای $T1$ و $T2$ بر حسب Poise میباشد. دماها بر حسب °C است.

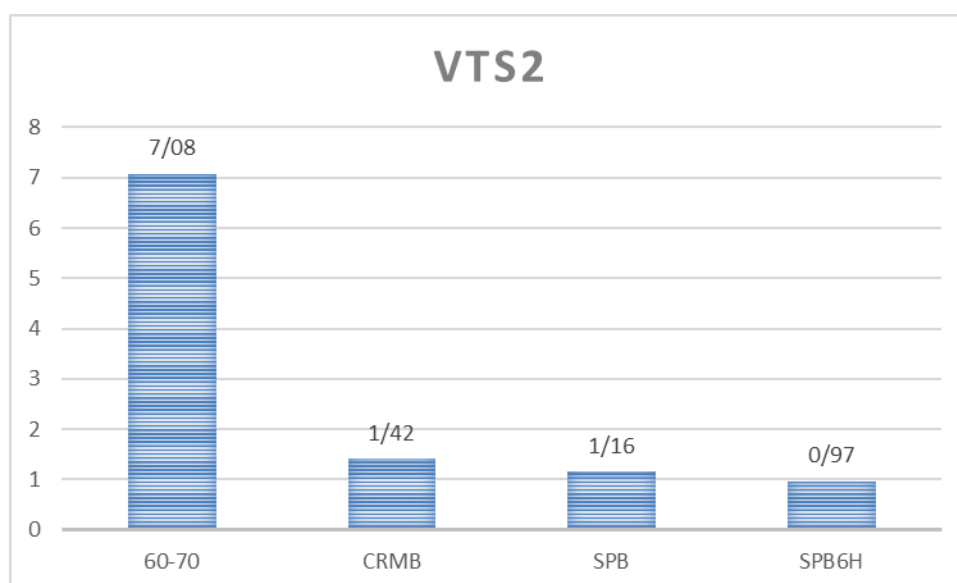
هر چه حساسیت دما ویسکوزیته VTS بزرگتر باشد ، حساسیت حرارتی هم بیشتر است. نتایج بدست آمده از آزمایشات در فرمول ۶ گذاشته شده و نتایج بدست آمده در جدول ۵ و مقایسه آنها در نمودار ۳ ارائه گردیده است.

۵ نتایج
درجه

	RV135	RV1v5	VTs
	30rpm, Sp.21, Poise	۱۰0rpm, Sp.21, Poise	
60 - 70	3.67	1.23	41.06
CRMB	16.50	6.95	51.36
SPB Base	24.47	10.6	55.48
SPB+ 6H Accelerator	18.84	9.81	51.64

جدول
عدد
نفوذ

ویسکوزیته PVN



نمودار ۳ نتایج عدد درجه نفوذ ویسکوزیته PVN

۴-۴ تعیین پارامتر عملکردی $G^*/\sin\delta$ در DSR

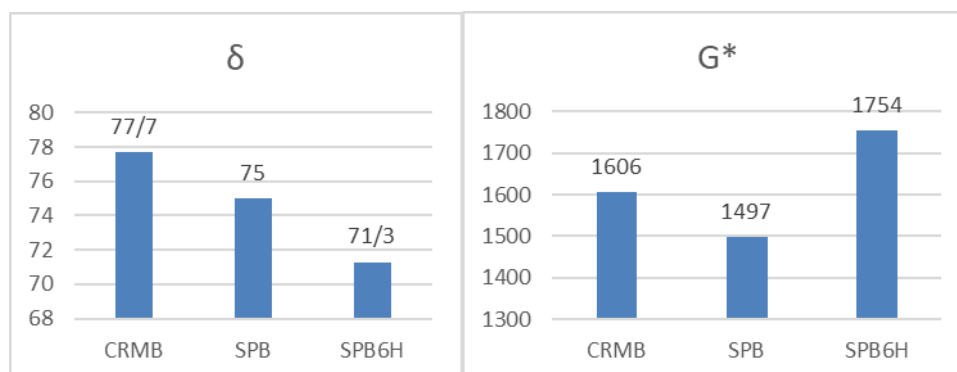
شیارشدهگی بعنوان تجمعی از تغییر شکل‌های دائمی در هر یک از لایه های روسازی تحت بارگذاری مکرر میباشد [۳]. قیر با G^* بالاتر پایداری بهتری در برابر شیار شدگی دارد. همچنین اگر قیر در دمای بالا الاستیک تر باشد پایداری آن در برابر شیارشدگی بیشتر میشود [۴]. δ نشان دهنده نسبت بین تغییر شکل‌های بازگشت پذیر و بازگشت ناپذیر است [۶]. اگر δ نزدیک به صفر باشد رفتار الاستیک تر و اگر نزدیک به ۹۰ درجه باشد از خاصیت ویسکوز بیشتری برخوردار است. لذا پارامتر عملکردی $G^*/\sin\delta$ بعنوان شاخص سفتی در دمای بالا برای ارزیابی مقاومت در برابر شیارشدگی هردو قیر لاستیکی و اصلاح نشده مشخص شده است [۵].

در دستگاه رئومتر برش دینامیکی DSR با اندازه گیری G^* و δ میتوان رفتار قیر را در مواد آسفالتی در شرایط مختلف اندازه گیری کرد و تاثیر دما، زمان بارگذاری و میزان بارگذاری را با دقت بالایی مورد بررسی قرار داد [۸]. برای قیرهای معمولی، جهت آزمایش در دمای بالا از نمونه استوانه ای با قطر ۲۵ میلی‌متر و ارتفاع ۱ میلی‌متر استفاده میشود [۲] اما در مورد قیرهای لاستیکی چون احتمال وجود ذرات لاستیک در نمونه وجود دارد توصیه می‌گردد از نمونه با قطر ۲۵ میلی‌متر و ارتفاع ۲ میلی‌متر استفاده شود. بر همین اساس در این تحقیق برای تست تمامی نمونه های قیر لاستیکی از نمونه با قطر ۲۵ میلی‌متر و ارتفاع ۲ میلی‌متر استفاده شده است.

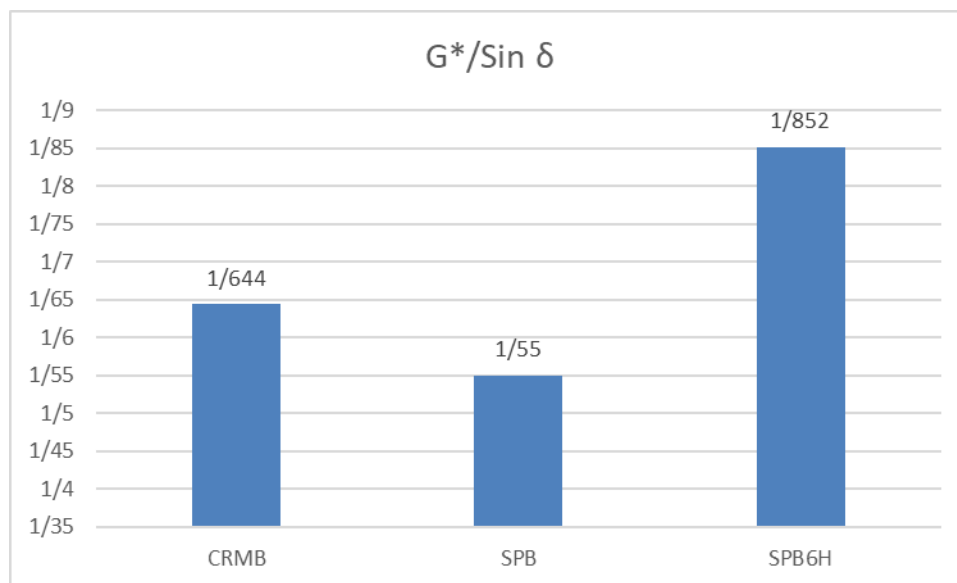
در این آزمایش بارگذاری های متناوب یا بصورت تنش کنترل شده و یا کرنش کنترل شده انجام میشود. δ میزان تاخیر فاز پاسخ قیر به تنش اعمالی است که برای مواد الاستیک برابر صفر و برای مواد ویسکوز برابر ۹۰ درجه است. این شاخص برای مواد ویسکو الاستیک بین ۹۰ و ۰ می باشد و نشان میدهد که رفتار ماده مورد مطالعه در شرایط آزمایش تا چه میزان کشسان یا ویسکوز است [۱]. پارامتر مهم دیگر در این آزمایش مدول برش دینامیکی G^* که طبق تعریف برابر است با نسبت حداکثر تنش اعمالی به حداکثر کرنش. این پارامتر بیانگر مدول سختی قیر است. در روش دسته بندی قیرها براساس عملکرد، با استفاده از پارامتر $G^*/\sin\delta$ شاخص شیارشدگی در دمای بالای قیر تحلیل میگردد. نتایج بدست آمده از نمونه های ساخته شده در جدول ۶ و مقایسه آنها در نمودارهای ۴ و ۵ ارائه گردیده است.

	DSR ORG (2mm)				
	T °C	G^* Pa	δ	$G^*/\sin \delta$ KPa	Fail Temp. °C
60-70 (1mm)	58	1918	82.8	1.934	62.9
CRMB	76	1606	77.7	1.644	80.6
SPB	76	1497	75.0	1.550	80.6
SPB 6H Accelerator	76	1754	71.3	1.852	82.1

جدول ۶ نتایج تعیین پارامترهای عملکردی در DSR



نمودار ۴ نتایج تعیین پارامترهای عملکردی در DSR



نمودار ۵ نتایج تعیین پارامترهای عملکردی در DSR

۳- آزمایشات آسفالت و طرح اختلاط

۳-۱- دانه بندی و نسبت های 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 ASTM C136 و AASHTO T 27 و دانه بندی فیلر به روش استاندارد ASTM D546 و AASHTO T 37 تعیین شد. با توجه به دانه بندی مصالح سنگی با اندازه های مختلف و فیلر اضافی به منظور دستیابی به محدوده مشخصات دانه بندی با اندازی اسمی ۱۲/۵ میلی متر (رده ۴) از جدول ۲۰-۱ نشریه ۱۰۱، نسبت های اختلاط مصالح سنگی و فیلر در جدول ۷ 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.

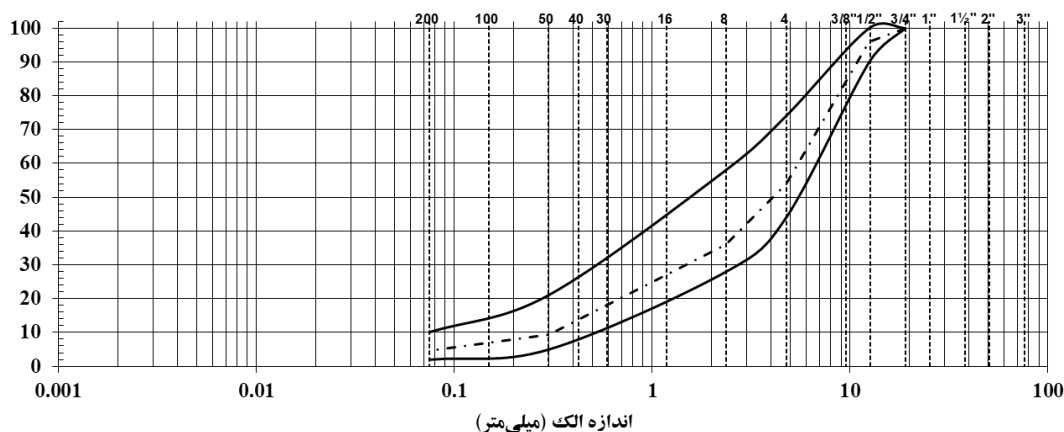
اندازه الک (میلی متر)	مشخصه و دانه بندی مصالح سنگی (درصد عبوری از الک ها)				دانه بندی مخلوط (درصد)	دانه بندی کارگاهی (درصد)	حدود مشخصات دانه بندی
	شن متوسط ۱۲-۱۹	شن ریز ۶-۱۲	ماسه ۰-۶	فیلر			
۱۹	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۱۲/۵	۶۴	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۶	۹۵	۹۰-۱۰۰
۴/۷۵	۰	۲۴	۱۰۰	۱۰۰	۵۴	۵۵	۴۴-۷۴
۲/۳۶	۰	۱	۸۰	۱۰۰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

جدول ۷: دانه بندی و نسبت های اختلاط مصالح سنگی

^۱ Gap graded

^۲ Open graded

^۳ Dense graded



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

۲-۳- محدوده دماهای اختلاط و تراکم

مطابق روش استاندارد ASTM D6926 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 170 ± 20 و 280 ± 20 میلی پاسکال ثانیه باشد. این دماها با ترسیم خط تغییرات کندروانی برحسب دما در نمودار دما کندروانی مطابق با استاندارد ASTM D2493 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 D2493 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.

۳-۳- 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 به‌دست آمده 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. 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 قیرلاستیکی با فناوری پلیمریزاسیون (SPB) به مطابق جدول ۸ تعیین گردید. نکته مهم در تعیین درصد قیر حاصل از اکستراکشن در مخلوط‌های حاوی قیرلاستیکی (SPB) این است که پودر لاستیک استفاده شده در این فرآیند استحصال نمی‌شود و صرفاً درصد قیر خالص مصرفی محاسبه می‌گردد؛ لذا باتوجه به مصرف ۲۰ درصد پودر لاستیک در این نوع قیرها، می‌بایست درصد قیر حاصل از اکستراکشن را در ۱/۲۵ ضرب کرد تا درصد قیرلاستیکی (SPB) مصرفی محاسبه گردد.

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 kg/m^3 (G_{mb})	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

جدول ۸: مشخصات بهینه مخلوط‌های آسفالتی شاهد و مخلوط حاوی قیر لاستیکی (SPB)

۳-۴- آزمایش‌های قیر برای مخلوط‌های آسفالتی

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 ۹ ارائه شده است.

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

جدول ۹: نتایج آزمون‌های 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 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 به‌منظور رفتار ارتجاعی مناسب، قیر اصلاح شده می‌بایست دارای بازگشت الاستیک بیش از ۶۰ درصد باشد. بررسی نتایج آزمون جداسازی در جدول ۳ نشان‌دهنده قابلیت انبارش ضعیف قیر پودر لاستیکی به دلیل فرآیند ته‌نشینی می‌باشد. بر اساس مشخصات استاندارد EN14023 به‌منظور انبارش 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. 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 زرین به‌جای قیر خالص مورد مطالعه، دو درجه به رده بالای عملکردی قیر افزوده شده و رده پایین عملکردی تغییری نمی‌کند. نتایج عملکردی در جداول ۱۰ و ۱۱ ارائه گردیده است.

درجه عملکردی		PG64					PG70						
		-۱۰	-۱۶	-۲۲	-۲۸	-۳۴	-۴۰	-۱۰	-۱۶	-۲۲	-۲۸	-۳۴	-۴۰
میانگین حداکثر دمای هفت‌روزه طرح روسازی (درجه سانتی گراد)		<۶۴					<۷۰						
حداقل دمای طرح روسازی (درجه سانتی گراد)		-۱۰	-۱۶	>-۲۲	-۲۸	-۳۴	-۴۰	-۱۰	-۱۶	-۲۲	-۲۸	-۳۴	-۴۰
		>	>		>	>	>	>	>	>	>	>	>
قیر اصلی													
دمای اشتعال (درجه سانتی گراد) ASTM D92		۳۰۵											
آزمایش ویسکوزیته چرخشی RV ASTM D4409	دمای آزمایش (درجه سانتی گراد)	۱۳۵											
	ویسکوزیته (پاسکال-ثانیه)	۰/۳۲۲											
آزمایش رئومتر برشی دینامیکی DSR ASTM D7175	دمای آزمایش (درجه سانتی گراد)	۶۴					۷۰						
	$G^*/\sin \delta$ (کیلوپاسکال)	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 سانتی گراد)	۶۴					۷۰						
	$G^*/\sin \delta$ (کیلوپاسکال)	۲/۶۱۰					-						
قیر باقی‌مانده آزمایش PAV تسریع پیرشدگی قیر ASTM D6521													
دمای پیرشدگی (درجه سانتی گراد)		۱۰۰					۱۰۰						
آزمایش رئومتر برشی دینامیکی DSR ASTM D7175	دمای آزمایش (درجه سانتی گراد)	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 سانتی گراد)	۰	-۶	-۱۲	-۱۸	-۲۴	-۳۰	۰	-۶	-۱۲	-۱۸	-۲۴	-۳۰
	سختی خزش S (مگاپاسکال)			۱۳۸									
	ضریب m			۰/۳۰۰									

جدول ۱۰: نتایج آزمایش‌های عملکردی قیر خالص

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
		>	>			>	>	>	>	>	
فیر اصلی											
دمای اشتعال (درجه سانتی‌گراد) ASTM D92		۲۹۵									
آزمایش ویسکوزیته چرخشی RV ASTM D4409	دمای آزمایش (درجه سانتی‌گراد)	۱۳۵									
	ویسکوزیته (پاسکال-ثانیه)	۱/۸۵۰									
آزمایش رئومتر برشی دینامیکی DSR ASTM D7175	دمای آزمایش (درجه سانتی‌گراد)	۷۶					۸۲				
	$G^*/\sin \delta$ (کیلوپاسکال)	۱/۸۸۰					۰/۶۰۰				
فیر باقی‌مانده آزمایش RTFO پیرشدگی لایه نازک متحرک فیر ASTM D2872											
تغییر جرم در آزمایش پیرشدگی RTFO (درصد)		۰/۱۰									
آزمایش رئومتر برشی دینامیکی DSR ASTM D7175	دمای آزمایش (درجه سانتی‌گراد)	۷۶					۸۲				
	$G^*/\sin \delta$ (کیلوپاسکال)	۳/۲۳					۱/۷۲				
فیر باقی‌مانده آزمایش PAV تسریع پیرشدگی فیر 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 خزش S (مگاپاسکال)			۱۰۴	۲۱۱						
	ضریب m			۰/۳۱۰	۰/۲۷۲						

جدول ۱۱: نتایج آزمایش‌های عملکردی فیر لاستیکی (SPB)

۴- 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^۱، آزمایش خستگی تیرچه خمشی^۲، آزمایش شیارافتادگی^۳ و آزمایش دوام رطوبتی^۴ است.

۴-۱- آزمایش مدول برجهندگی

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

مدول برجهندگی برای تخمین سفتی مخلوط استفاده می شود [۲۳]. آزمایش مدول برجهندگی در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد 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. نمونه های مورد استفاده در این آزمایش به روش تراکم چرخشی مطابق استاندارد ASTM D6925 با قطر و ارتفاع، به ترتیب ۱۰۰ و ۶۴ میلی متر و فضای خالی ۴ درصد ساخته و متراکم شدند. نتایج آزمایش مدول برجهندگی نمونه های آسفالتی آزمایش شده در جدول ۱۲ ارائه شده است.



شکل ۴: آزمایش مدول برجهندگی

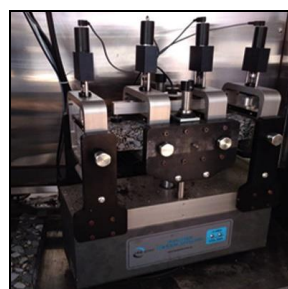
مشخصه نمونه	مدول برجهندگی (مگاپاسکال)
مخلوط آسفالتی شاهد	۳۰۵۳
مخلوط اصلاح شده با SPB	۳۲۶۳

جدول ۱۲: نتایج آزمون مدول برجهندگی مخلوط های آسفالتی

مقایسه مخلوط آسفالتی شاهد و مخلوط آسفالتی با استفاده از قیر لاستیکی (SPB) نشان می دهد که مدول برجهندگی نمونه های 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.

۴-۲- آزمایش خستگی تیرچه خمشی

این آزمایش برای ارزیابی سختی خمشی و عمر خستگی آسفالت استفاده می شود. 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 اره برقی برش داده شده و تیرچه های 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 سانتی گراد با بارگذاری نیمه سینوسی و کرنش ثابت ۸۰۰ میکرواسترین برای مخلوط های آسفالتی انجام پذیرفت که نتایج در جدول ۱۳ و ۱۴ 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

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 ۱۳: 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
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		

جدول ۱۴: نتایج آزمون خستگی تیرچه خمشی برای مخلوط آسفالت حاوی قیر لاستیکی (SPB)

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

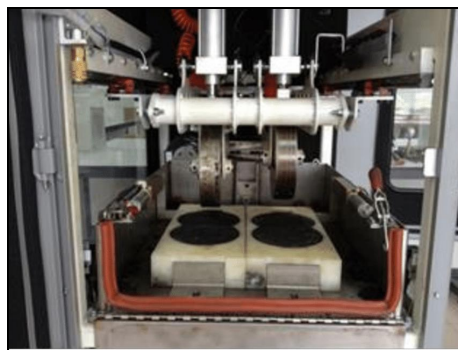
مقایسه عمر شکست مخلوط‌های آسفالتی شاهد و اصلاح شده در آزمایش خستگی تیرچه خمشی ۴ نقطه‌ای نشان می‌دهد که در سطح کرنش ۶۰۰ میکرواسترین، عمر خستگی نمونه اصلاح شده تقریباً ۱۰٪ بیشتر از نمونه شاهد در سطح کرنش مشابه است. همچنین عمر خستگی نمونه اصلاح شده در سطح کرنش ۸۰۰ و ۱۰۰۰ تقریباً ۲۰٪ و ۲۵٪ بیشتر از عمر خستگی نمونه شاهد در سطوح کرنش مشابه می‌باشد. 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.

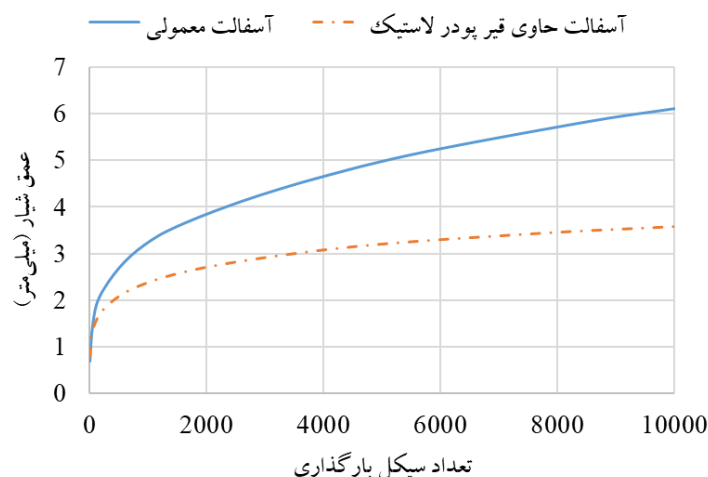
۳-۴- آزمایش شیار افتادگی

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 $300 \times 300 \times 50$ 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 $54/4$ درجه سانتی گراد، بار چرخ 700 نیوتن و سرعت حرکت رفت و برگشتی 50 عبور در دقیقه، تحت 10000 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 جدول ۱۵ 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)

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

جدول ۱۵: عمق نهایی شیار نمونه‌ها پس از ۱۰۰۰۰ رفت و برگشت چرخ بارگذاری برای مخلوط‌های آسفالتی

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.

۴-۴- آزمایش خمش ۳ نقطه‌ای

تست خمش سه نقطه‌ای یکی از متداول ترین روش های 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 ۱۶ ارائه شده است.



شکل ۸: قاب بارگذاری آزمایش شکست و نمونه آزمایش

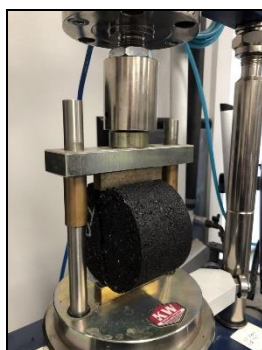
مشخصه مخلوط آسفالتی	حداکثر نیرو قابل تحمل (کیلو نیوتن)
آسفالت شاهد	۴/۰۸۱
مخلوط اصلاح شده با قیرلاستیکی (SPB)	۴/۱۱۲

جدول ۱۶: نتایج آزمایش شکست ترک نمونه‌های آسفالتی در دمای ۱۰- درجه سانتی گراد

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 این طور 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.

۴-۵- 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 ۱۷ درج گردیده است. مطابق استاندارد، نمونه‌های اشباع به مدت حداقل ۱۶ ساعت درون فریزر با دمای ۳- تا 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 غیر مستقیم (TSR)

مخلوط آسفالتی	حالت نمونه	وزن مخصوص	فضای خالی (درصد)	اشباع‌شدگی (درصد)	مقاومت کششی (کیلوپاسکال)	نسبت مقاومت کششی 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	

جدول ۱۷: نتایج آزمایش تعیین نسبت مقاومت کششی نمونه‌های اشباع به معمولی

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.

۵- 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 پروژه‌های خطوط BRT مشهد، پایانه ترمینال مسافربری و عوارضی ابتدای باغچه - مشهد بازدید به عمل آمد. بر اساس گزارش‌های کارشناسان اداره کل نظارت بر نگهداری و تعمیرات شهرداری مشهد، پروژه‌های خطوط BRT مشهد، پایانه ترمینال مسافربری و عوارضی ابتدای باغچه - مشهد به ترتیب ۵ سال، ۴ سال و ۱۴ ماه از عمر بهره‌برداری 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 جمع‌آوری و مجدداً روکش صورت می‌گیرد؛ اما با استفاده از آسفالت حاوی قیر لاستیکی با فناوری پلیمریزاسیون (SPB)، این مشکل رفع شده است. تعداد کمی ترک‌های عرضی، برودتی، خستگی و بلوکی در مسیرهای اجرای شده مشاهده گردید. در بازدید انجام شده هیچ‌گونه قیر زدگی 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

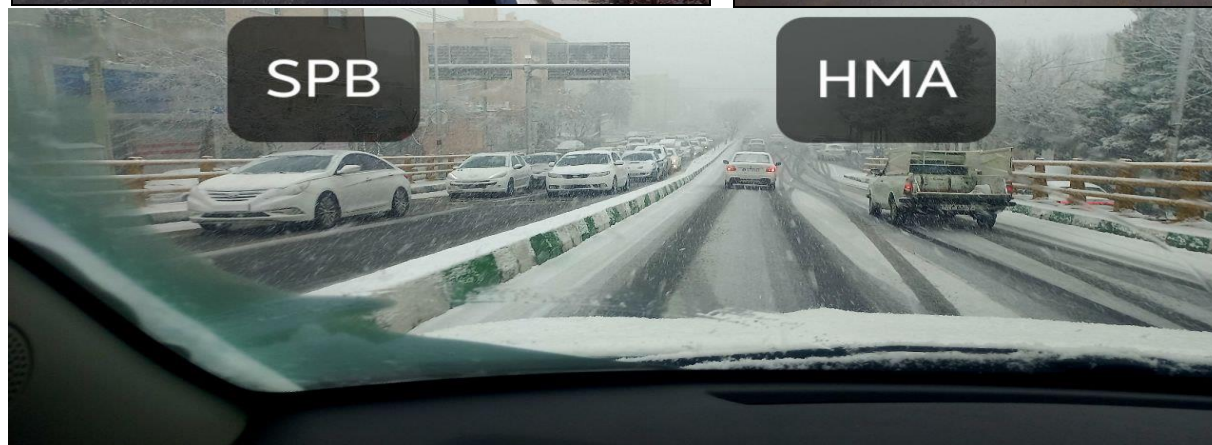




شکل ۱۱: خط ۱ BRT مشهد دارای آسفالت حاوی قیر لاستیکی (SPB) اجرا شده در سال ۱۳۹۷ بدون خرابی شیارافتادگی

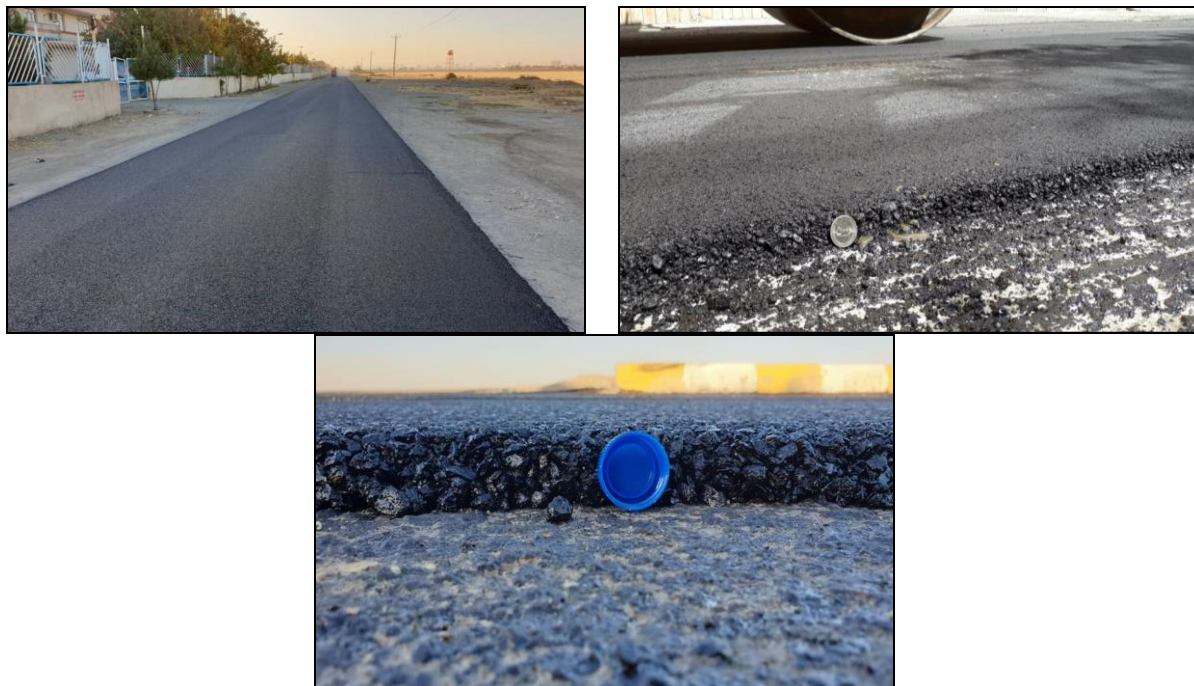
با عنایت به اجرای پروژه‌های متعدد در سطح شهر مشهد بدون تغییر در زیرسازی پروژه‌ها و عملکرد این نوع آسفالت تحت بارمحوری ایستا و سنگین، نتایج میدانی عملکرد مطلوب این آسفالت‌های تولید شده با قیر لاستیکی (SPB) را در مقایسه با نتایج آزمایش‌های نشان می‌دهد. در خصوص ترک‌های طولی و عرضی، ترک‌های برودتی، ترک‌های 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.



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 دانه بندی باز نیز در بلوار فرامرز عباسی و خیابان عمار یاسر نیز در سال ۱۳۹۸ اجرا شده است که طی عمر بهره برداری خرابی قابل توجهی مشاهده نگردیده است (شکل ۱۳)؛ لذا نشان دهنده مطلوب عملکرد این نوع قیر در آسفالت لایه نازک است که می بایست در پروژه های دیگر اجرا مورد ارزیابی قرار گیرد.



شکل ۱۳: اجرای آسفالت لایه نازک حاوی قیر لاستیکی (SPB) با دانه بندی باز در سال ۱۳۹۸، مشهد

۶- جمع بندی و نتیجه گیری:

۶-۱ تحلیل نتایج آزمایشات

نتایج آزمایشات در قسمت شاخص نفوذ PI و حساسیت حرارتی A ، قیر لاستیکی SPB بهترین نتیجه را داده است. به نظر می رسد قیر لاستیکی SPB همراه با شتاب دهنده بدلیل پلیمریزه شدن این قیر پس از رسیدن به مصالح کمی در زمینه این دوشاخه افت میکند اما کماکان اثرات بهبود در آن کاملاً مشهود است. از نتایج آزمایشات در قسمت عدد درجه نفوذ و اسکوزیته PVN بازهم مشاهده میگردد، قیر لاستیکی SPB بهترین نتیجه را داده است. از نتایج آزمایشات در قسمت حساسیت دما و اسکوزیته VTS مشاهده میگردد، قیر لاستیکی SPB اینبار هم بهترین نتیجه را داده است همچنین در این قسمت قیر لاستیکی SPB همراه با شتاب دهنده هم نتیجه خوبی دارد که نشان دهنده اثرات بهبود در حوزه و اسکوزیته می باشد. اما چالشی ترین قسمت نتایج مربوط به نتایج آزمایشات تعیین پارامتر عملکردی $G^*/\sin\delta$ در DSR میباشد. در تعیین هر سه پارامتر G^* ، δ و $G^*/\sin\delta$ بهترین نتیجه مربوط به قیر لاستیکی SPB با شتاب دهنده است که این فرضیه نویسنده را تایید میکند: "محصول تولیدی نه تنها خاصیت الاستیکی بهتری دارد بلکه خاصیت مقاومت در برابر شیار شدگی در دمای بالای ایده ال تری نسبت به سایر قیرهای لاستیکی CRMB ایجاد مینماید". در قسمت پارامتر G^* و $G^*/\sin\delta$ قیر لاستیکی SPB پایه دارای بهبود کمتری میباشد که این مورد هم گویای این مطلب است محصول تولیدی قبل وبعد از رسیدن به مصالح دارای شرایط متفاوتی است و در هر زمان بنا به مقتضای زمانی که قیر باید در آن قرار گیرد دارای بهترین حالت است.

۶-۲- 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 زائدی 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 و میدانی 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 باعث افزایش شاخص نفوذ PI قیر حتی بعد از تکمیل فرایند پلیمریزاسیون می‌شود که خود سبب کاهش حساسیت حرارتی محصول، نسبت به قیرهای لاستیکی CRMB می‌گردد.
۲. کاهش ویسکوزیته قیر لاستیکی SPB نسبت به قیرهای CRMB متداول و همچنین حساسیت حرارتی وابسته به پارامتر ویسکوزیته قیر، باعث انتقال راحت‌تر این محصول در لوله‌ها می‌شود و نیز امکان اختلاط قیر با مصالح سنگی راحت‌تر می‌گردد.
۳. بهبود پارامتر عملکردی $G^*/\sin\delta$ برای قیر لاستیکی SPB، باعث بهبود مقاومت آسفالت ساخته شده در برابر شیارشدگی در دمای بالا نسبت به قیرهای CRMB متداول می‌گردد.
۴. قابلیت پلیمریزه شدن قیر لاستیکی SPB پس از تماس با مصالح که انجام این فرایند باعث تغییر رئولوژیکی قیر شده (افزایش G^*) و آسفالت‌های تولید شده با این قیر استحکام و دوام بیشتری دارند.
۵. نشان داده شد با کاهش δ خصوصیات الاستیک قیر در قیر لاستیکی SPB افزایش و در نتیجه آسفالت تولیدی قابلیت برگشت‌پذیری به شکل اولیه بیشتری از خود نشان می‌دهد.
۶. بعد از تکمیل فرایند پلیمریزاسیون، آسفالت حساسیت کمتری نسبت به تنش‌های حرارتی دارد.
۷. چسبندگی خوب قیر لاستیکی SPB به مصالح باعث شده است که این قیر در برابر حلال‌های شیمیایی و نفتی مقاوم‌تر باشد.
۸. 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.
۹. باتوجه به نتایج به‌دست 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.
۱۰. بر اساس مشاهدات میدانی به نظر می‌رسد در پروژه‌هایی که خرابی غالب آن‌ها شیارشدگی است نظیر عوارضی و ورودی شهرها، خطوط BRT، پایانه مسافربری اتوبوس‌های درون و برون‌شهری و روسازی پل‌های روگذر بهتر است از قیر لاستیکی (SPB) استفاده شود. در خصوص سایر خرابی‌ها می‌بایست هم به صورت آزمایشگاهی و هم میدانی در قشرهای مختلف ارزیابی صورت گیرد.

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.

نتیجه گیری از این تحقیق نشانگر این موضوع است که برتری قیر لاستیکی با فناوری پلیمریزاسیون (SPB) نسبت به سایر قیرهای لاستیکی (CRMB) به این خاطر است که، محقق توانسته است با دو مرحله ای کردن فرایند بهبود قیر از طریق واکنش شیمیایی نه تنها معضلات استفاده از قیرهای لاستیکی را کاهش دهد بلکه بهبود بهتری هم به خواص آسفالت تهیه شده از این محصول بدهد. آزمایشات کلیدی مطرح شده در این تحقیق شامل شاخص نفوذ و حساسیت حرارتی، ویسکوزیته و پارامترهای عملکردی میتواند برتری یک محصول قیر پلیمری را در حوزه قیر مورد سنجش قرار دهد. در حوزه عملکرد این محصول در آسفالت و همچنین بازخورد استفاده از آن در پروژه های راهسازی هم مطالب زیادی قابل عرضه است که در مقالات آتی خدمت جامعه فرهیخته حوزه راهسازی تقدیم خواهد گردید.

تقدیر و تشکر

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

۲. فهرست منابع و مآخذ

- 1- Motamed, A., Bhasin, A., and Liechti, K. M. Constitutive modeling of the nonlinear viscoelastic response in asphalt
- 2- Motamed, A., and Bahia, H. U. Influence of Test Geometry, Temperature, Stress Level, and Loading Duration on Binder Properties Measured Using DSR. *Journal of Materials in Civil Engineering* (ASCE), Vol. 23 (10), 2011, pp.1422-1432.
- 3- Tayfur, S. Ozen, H. and Aksoy, A. (2007), "Investigation of Rutting Performance of Asphalt Mixtures Containing Polymer Modifiers", 21, 328--337.
- 4- Bennert, T. Maher, A. and Smith, J. (2004), "Evaluation of Crumb Rubber in Hot Mix Asphalt", U.S.D.O.T, Research and Special Programs, 1, 335-340.
- 5- Wong, W.G. Han, H. He, G. Wang, K. and Lu, W. (2004), "Rutting Response of Hot Mix Asphalt to Generalized Dynamic Shear Moduli of Asphalt Binder", *Construction and Building Materials*, 18, 399-408.
- 6- Uddin, W. (2003), "Viscoelastic Characterization of Polymer Modified Asphalt Binders of Pavement Applications", *Applied Rheology*, 13, 191-199.
- 7- Investigating and comparing penetration index, thermal sensitivity, viscosity and performance parameters in rubber bitumen with polymerization technology (SPB) compared to Crumb Rubber Modified Bitumen (CRMB) and pure bitumen[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.
- 8- J. Wei *et al.*, "Research on performance of SBS-PPA and SBR-PPA compound modified asphalts," *Materials*, vol. 15, no. 6, p. 2112, 2022.
- 9- 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.
- 10- 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.
- 11- 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.
- 12- 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.
- 13- 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.
- 14- 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.
- 15- F. Aslani, "Mechanical properties of waste tire rubber concrete," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 28, no. 3, p. 04015152, 2016.

- 16- 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.
- 17- 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.
- 18- 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.
- 19- 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.
- 20- 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.
- 21- 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.
- 22- 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. 225, pp. 82-89, 2019.
- 23- 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.
- 24- 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.
- 25- 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.
- 26- 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.
- 27- 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.
- 28- 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.
- 29- 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.
- 30- 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.
- 31- 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 3-point bend type configurations," *Construction and Building Materials*, vol. 314, p. 125590, 2022.
- 32- 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.
- 33- 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.

۳۴- شرکت نفت پاسارگاد، کارشناسان ارشد شرکت نفت پاسارگاد، "قیر و آسفالت پاسارگاد"، واحد انتشارات نفت پاسارگاد، ۱۳۹۰

۳۵- آرش معتمد، سعید پرویزی، امیر تقی خانی، "ساخت و نگهداری راه با قیرهای امولسیون و کنترل کیفیتهای لازم"، انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف، ۱۴۰۰

۳۶- سید محمد ضیا علوی، خشایار صادقی، "اصلاح کننده های لاستیکی و پلیمری قیر و مخلوط آسفالتی"، انتشارات سازمان جهاد دانشگاهی تهران، ۱۴۰۱