

ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر پودر لاستیک ضایعاتی و پودر ضایعاتی پلی اتیلن بازیافتی بر خواص عملکردی قیر و مخلوط آسفالتی با رویکرد زیست محیطی

مقاله علمی - پژوهشی

آذین چیت سازان*، گروه ارزیابی و آمایش سرزمین، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Chitsazan.az@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۰۱ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۵

صفحه ۴۸-۳۵

چکیده

با توجه به افزایش چشمگیر حجم ترافیک، روسازی‌های آسفالتی به تدریج دچار خرابی می‌شوند و دو حالت خرابی اصلی آن‌ها عبارتند از شیب‌شدگی در دمای بالا و ترک خوردگی حرارتی در دمای پایین. این مقاله بر اصلاح قیر و مخلوط‌های آسفالتی با هدف بهبود عملکرد روسازی آسفالت به صورت همزمان در دماهای خدمت بالا و پایین تمرکز دارد. برای اصلاح خواص قیر، لاستیک خرد شده بازیافتی (CR^۱) و پلی اتیلن (PE)^۲ به عنوان عامل‌های پلیمری انتخاب شدند. تحلیل عملکرد خصوصیات رئولوژیکی قیر اصلاح شده نشان داد که افزودن CR سفتی خزشی قیر در دمای پایین را کاهش داد که در نتیجه شکست و خطر ترک خوردگی را کاهش داد. در همین حال، افزودن PE سفتی بیتومن در دمای بالا را افزایش داد که منجر به بهبود مقاومت در برابر زبری شد. در مورد بیتومن یکپارچه اصلاح شده، افزودن CR و PE به طور همزمان خواص قیر را در دو دمای بالا و پایین بهبود می‌بخشد. از نظر مخلوط آسفالتی، PE مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی در دمای خدمت بالا را افزایش می‌دهد در حالی که CR انعطاف‌پذیری در دمای خدمت پایین را افزایش می‌دهد. مخلوط یکپارچه اصلاح شده با CR و PE عملکرد بهبود یافته قابل توجهی در دو دمای خدمت بالا و پایین داشت. بنابراین، استفاده از این دو ماده بازیافتی قادر است خواص روسازی را به حد یا حتی بهتر از آن‌هایی که با استفاده از قیر اصلاح شده با استایرن-بوتادی-استایرن تهیه می‌شود، بهبود بخشد.

واژه‌های کلیدی: قیر اصلاح شده، پودر لاستیک، خواص عملکردی، پلی اتیلن، تغییر شکل دائمی، مخلوط آسفالتی

۱-مقدمه

حرارتی رخ می‌دهد. وجود ترک خوردگی حرارتی باعث نفوذ آب به ساختار روسازی می‌شود و فرایند خرابی را شتاب می‌بخشد. با افزایش دمای محیط، مدول الاستیسیته آسفالت کاهش می‌یابد و در نتیجه تحت بارگذاری ترافیک تکراری تغییر شکل دائمی رخ می‌دهد. وجود تغییر شکل دائمی نه تنها فرایند خرابی را شتاب می‌دهد بلکه ایمنی ترافیک را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین، بهبود خواص فنی قیر و مخلوط آسفالتی در دماهای پایین و بالا اهمیت دارد تا از ترک خوردگی حرارتی و تغییر شکل دائمی

در زمینه ساخت روسازی، مخلوط آسفالتی به عنوان ماده اصلی برای لایه پوشش سطحی استفاده می‌شود. به دلیل افزایش چشمگیر حجم ترافیک، روسازی‌ها باید بارهای ترافیکی را به طور فزاینده‌ای تحمل کنند، به خصوص بارهای ترافیکی ناشی از کامیون‌های باربری. بنابراین، این بارهای ترافیکی به همراه شرایط محیطی نامساعد منجر به خرابی سریع روسازی می‌شوند. در دمای پایین، تنش حرارتی در لایه آسفالتی افزایش می‌یابد و در صورتی که تنش حرارتی از مقاومت آسفالتی فراتر رود، ترک خوردگی

استرن-بوتیل آکریلات (EBA)^۸ هستند. گزارش شده است که مقاومت در برابر شیارشدگی روسازی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با PE به طور قابل توجهی نسبت به مخلوط کنترل بهبود یافته است. با این حال، اضافه شدن PE قادر به بهبود بازیابی الاستیک قیر نیست که به نوبه خود باعث شکستگی در دماهای پایین مخلوط‌های آسفالتی می‌شود (Presti et al, 2013; Qiao et al, 2015; Zhang et al, 2015; Zhu et al, 2014). برای رفع این محدودیت‌های روش معمولی تغییر یافته و تهیه مخلوط آسفالتی با عمر خدمت بیشتر، در این مقاله از روش یکپارچه سازی برای اصلاح قیر و تهیه مخلوط آسفالتی تغییر یافته با استفاده از عوامل الاستومرهای ترموپلاستیک و پلاستومرها استفاده شد. به دلیل قیمت کم و کیفیت خوب، CR بازیافتی و PE به عنوان عوامل اصلاح شده در این پژوهش انتخاب شدند. در ابتدا، قیر اصلاح شده ترکیبی با ترکیب قیر پایه و دو عامل تهیه شد. سپس آزمایشهای تجربی مانند رئومتر برش دینامیکی (DSR)^۹ و رئومتر تیرچه خمشی (BBR)^{۱۰} برای تحلیل عملکرد مکانیکی قیر در دماهای پایین و بالا استفاده شدند. پس از آن، مخلوط آسفالتی اصلاح شده با استفاده از قیر اصلاح شده ترکیبی تهیه شد و سپس با استفاده از آزمون مقاومت غیرمستقیم تنش، آزمون شیار جای چرخ (WTT)^{۱۱} و آزمون خمش سه نقطه، عملکرد مخلوط آسفالتی در دماهای پایین و بالا ارزیابی شد. به منظور انجام ارزیابی جامع، قیر پایه و قیر اصلاح شده با SBS به عنوان مرجع برای مقایسه خواص با قیر و مخلوط آسفالتی اصلاح شده انتخاب شدند.

۲- مواد و آماده سازی نمونه

۲-۱- مصالح سنگی و قیر

در این پژوهش از مصالح سنگی و فیلر آهکی استفاده شد. خصوصیات مصالح سنگی مورد استفاده در جدول ۱ آمده است. قیر بکارگرفته شده در این پژوهش از نوع قیر خالص ۷۰-۶۰ بود که از شرکت نفت پاسارگاد تهیه شد و مشخصات فیزیکی آن در جدول ۲ آمده است. افزودنی به کاررفته نیز نانورس و گیلسونایت و پلیمر SBS می‌باشد که مشخصات آنها در جداول ۱ آورده شده است.

جلوگیری شود (Aflaki et al, 2012; Chen et al, 2010; Galooyak et al, 2010). با هدف بهبود خواص قیر و مخلوط آسفالتی، اصلاحات پلیمری با استفاده از ادغام مواد پلیمری در قیر از طریق مخلوط کردن فیزیکی یا واکنش شیمیایی، به طرز گسترده‌ای استفاده شده است. اضافه کردن این پلیمرها خواص قیر را در جنبه‌های مختلف بهبود می‌بخشد، مانند سفتی بالاتر در دماهای خدمت بالا، مقاومت بهتر در برابر ترک خوردگی در دماهای خدمت پایین، عمر خستگی بهتر یا مقاومت به رطوبت. به طور کلی، این عوامل پلیمری را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: الاستومرهای ترموپلاستیک و پلاستومرها (Ameri et al, 2013; Islam et al, 2015; Jahanian et al, 2014; Moghaddam et al, 2017). در حوزه مهندسی راهسازی، چندین الاستومر ترموپلاستیک وجود دارد که به عنوان اصلاح‌کننده‌های بیتومن با موفقیت استفاده شده‌اند، مانند استیرن-بوتادین-استیرن (SBS)^۳، استیرن-ایزوپرن-استیرن (SIS)^۴ و استیرن-اتیلن/بوتیلن-استیرن (SEBS)^۵. اگرچه این افزودنی‌های پلیمری می‌توانند به میزانی مقدار مدول پیچیده و ویسکوزیته قیر را افزایش دهند، اما هزینه آنها به شدت بالاتر از قیر معمولی است. لاستیک خرد شده (CR) به عنوان یک الاستومر ترموپلاستیک، از دهه ۱۹۶۰ به عنوان راه حلی برای مشکلات کیفیت مختلف در مخلوط‌های آسفالت استفاده شده است. پژوهشگران کشف کرده‌اند که قیر اصلاح شده با CR نسبت به قیر پایه، مدول پیچیده بالاتری و زاویه فاز کمتری دارد که نشان دهنده بهبود خواص رئولوژیکی است. با اضافه شدن CR به مخلوط آسفالتی، خواص مکانیکی روسازی آسفالت بهبود یافته و ترک خوردگی خستگی و ترک خوردگی حرارتی کاهش یافت. با این حال، CR قادر به بهبود مدول الاستیسیته مخلوط آسفالتی در دمای خدمت بالا نیست که به معنای مشارکت محدود در مقاومت در برابر شکستگی روسازی است (Moon et al, 2014; Nejad et al, 2012; Polacco et al, 2006). پلاستومرها که خصوصیات الاستومرها و پلاستیک‌ها را ترکیب می‌کنند، به طور معمول منجر به بهبود تغییر شکل دائمی در دماهای بالا می‌شوند. پلاستومرهای معمول برای اصلاح قیر شامل پلی اتیلن (PE)، پلی پروپیلن (PP)^۶، استرن-وینیل استت (EVA)^۷ و

جدول ۱. خصوصیات مصالح سنگی مورد استفاده

استاندارد آزمایش		حدود مجاز طبق نشریه ۲۳۴		نتایج آزمایش	شرح
ASTM	AASHTO	رویه	آستر		
-	T96	۳۰	۴۰	۲۲/۳	حداکثر ساییش به روش لوس آنجلس (درصد)
-	-	۲۵	۳۰	۹	حداکثر ضریب تورق با روش BS812 (درصد)
D5821	-	۹۰	۸۰	۹۴	حداقل درصد شکستگی در دو وجه روی الک شماره ۴
-	T85	۲/۵	۲/۵	۲/۲	حداکثر درصد جذب آب (مصالح درشت دانه)
-	T84	۲/۵	۲/۸	۲/۴	حداکثر درصد جذب آب (مصالح ریزدانه)

جدول ۲. مشخصات فیزیکی قیر

نتیجه آزمایش	استاندارد	نوع آزمایش
۴۷ درجه سانتی گراد	ASTM D36	نقطه نرمی
۶۷ دسی میلیمتر	ASTM D5	درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه
۳۰۴ درجه سانتی گراد	ASTM D92	درجه اشتعال
بیش از ۱۰۰ سانتیمتر	ASTM D113	شکل پذیری در دمای ۲۵
۱/۰۴۵ گرم بر سانتی متر مکعب	ASTM D70	چگالی
۰/۰۵ درصد	ASTM D6	افت حرارتی
۹۹/۵ درصد	ASTM D4	قابلیت حل

۱ (الف) نشان داده شده است. PE بازیافتی از فیلم پلاستیکی گلخانه ای بازیافت شده تولید شد. فیلم پلاستیکی بازیافت شده تحت فرآیندهای تمیز کردن، خشک کردن، استحصال و پودر شدن قرار گرفت تا ذرات PE با اندازه ۰،۲-۰،۳ میلی متر به دست آید، همانطور که در شکل ۱ (ب) نشان داده شده است.

مواد پلیمری استفاده شده در این تحقیق شامل CR بازیافتی و PE بازیافتی هستند. برای تولید CR، ابتدا لاستیک تایر خودرو با استفاده از ماشین آلات بزرگ خرد و خرده لاستیک‌ها به دست آمد (پرستی، ۲۰۱۳). علاوه بر این، فرآیند آسیاب کردن در دمای محیط برای کاهش اندازه ذرات در بازه ۰،۴-۰،۸ میلی متر استفاده شد، همانطور که در شکل



ب



الف

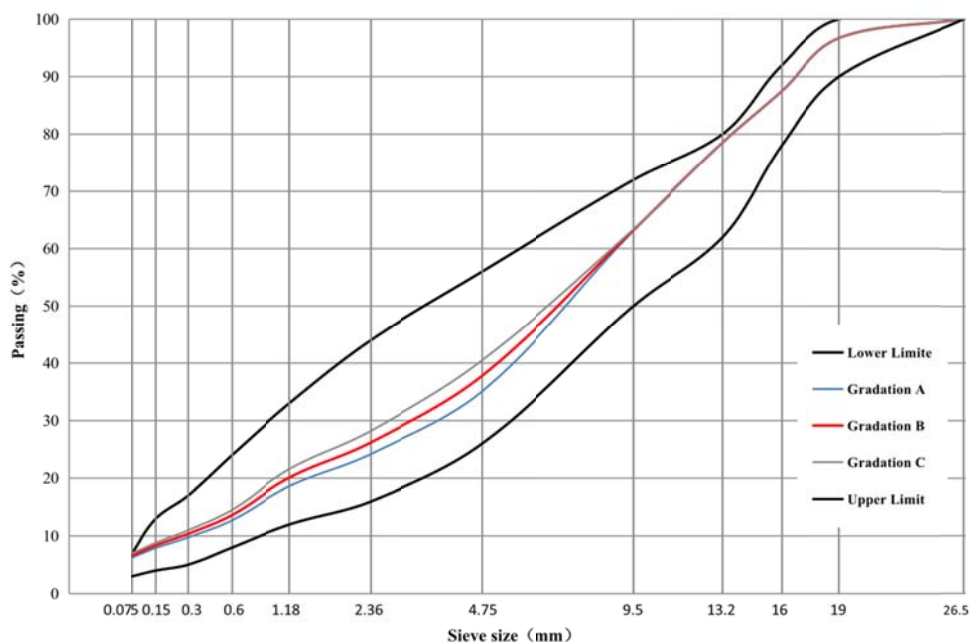
شکل ۱. مواد افزودنی مورد استفاده: (الف) پودر لاستیک (ب) پلی اتیلن بازیافتی

۲-۲- روش ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

هدف اصلی این تحقیق، توسعه یک بیتومن تغییر یافته و مخلوط آسفالتی تغییر یافته است که در دماهای خدمت بالا و پایین عملکرد خوبی داشته باشد. قبل از تهیه مخلوط آسفالتی تغییر یافته، ویژگی‌های بیتومن تغییر یافته یکپارچه باید ارزیابی شود. مراحل دقیق برای تغییر قیر به شرح زیر است: قیر به دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد گرم شده تا آب شوند. مواد پلیمری با درصد ۱۵ برای CR و ۷ برای PE به ترتیب نسبت به وزن قیر اضافه شدند. قیر با مواد پلیمری به مدت ۱ ساعت در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد تا عوامل پلیمری متورم شوند. مخلوط‌کن سرعت بالا با سرعت ۵۰۰۰ دور در دقیقه برای ۱ ساعت استفاده شد تا قیر اصلاح شده یکپارچه و همگن تولید شود. قیرهای اصلاح شده به درجه حرارت اتاق نگهداری شدند و برای ارزیابی‌های بیشتر آماده شدند.

۲-۳- دانه‌بندی و طرح اختلاط

مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از پنج نوع قیر (قیر پایه، قیر اصلاح شده با SBS، قیر اصلاح شده با CR، قیر اصلاح شده با PE و قیر اصلاح شده ترکیبی) با همان دانه بندی سنگدانه و درصد پرکننده تهیه شد. در این تحقیق، دانه بندی مترکم با حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلی‌متر انتخاب شد. ابتدا سه منحنی دانه بندی مصالح سنگی طراحی شد که در شکل ۲ نشان داده شده است. سپس نمونه‌های مارشال با استفاده از پنج درصد قیر مختلف (۱، ۳، ۶، ۱۰، ۱۴، ۱۶، ۲۰٪) با ۷۵ ضربه بر روی هر طرف تهیه شد. بهترین دانه بندی مصالح سنگی و درصد بهینه قیر با ارزیابی ویژگی‌های حجمی و استقامت مارشال نمونه‌های مارشال تعیین شد. در نهایت، دانه‌بندی B به عنوان بهترین دانه‌بندی انتخاب شد و درصد بهینه قیر برابر با ۱۴٪ تعیین شد.



شکل ۲. دانه‌بندی مصالح سنگی

۳- روش کار آزمایش

۳-۱- رنومتر برش دینامیکی

به منظور مشخص کردن ویژگی‌های اساسی رینولوژیکی قیر، تست DSR انجام شد. این تست می‌تواند به درستی رفتار الاستیک و ویسکوز قیر را در دماهای متوسط تا دماهای بالا توصیف کند. مدول مرکب (*G) و زاویه فاز (δ) پارامترهای

اصلی ویسکوالاستیک هستند که در این تست اندازه‌گیری می‌شوند. پارامتر G اطلاعاتی را در مورد مقاومت قیر به تغییر شکل هنگامی که در معرض بار برشی قرار می‌گیرد، فراهم می‌کند. پارامتر d تاخیر زمانی بین تنش‌های برشی

اعمال شده و پاسخ‌های کرنش برشی را نشان می‌دهد. تحلیل این دو پارامتر می‌تواند رفتار قیر مانند پتانسیل شیارشدگی را پیش‌بینی کند. پارامتر $G^* / \sin \delta$ که پارامتر شیارشدگی نامیده می‌شود مقاومت شیارشدگی قیر را نشان می‌دهد. نمونه‌های قیر با ضخامت ۱ میلی‌متر و قطر ۲۵ میلی‌متر با فرکانس ۱۰ rad / s و در دمای ۴۶، ۵۲، ۵۸، ۶۴، ۷۰ و ۷۶ درجه سانتی‌گراد با توجه به روش آزمون استاندارد ASTM D-۷۱۷۵، تست شدند. مقدار $G^* / \sin \delta$ برای قیرهای پیرنشده توصیه می‌شود که با توجه به استاندارد، ASTM - D۷۱۷۵ بیش از ۱ کیلو پاسکال باشد.

۲-۳- رنومتر تیرچه خمشی

از آنجایی که قیر در دماهای پایین بسیار سفت و سخت است، خصوصیات قیر در آن دماها را نمی‌توان با استفاده از رنومتر دینامیکی برشی بدست آورد. بدین منظور از آزمایش جدیدی که در آن رفتار خزشی بدست می‌آید استفاده می‌شود. در رنومتر تیرچه خمشی، تیرچه ساخته شده از قیر در سردترین دمایی که قیر مورد نظر در دوره عمرش تحمل می‌کند، مورد آزمایش قرار می‌گیرد. اساس این آزمایش بر این اساس استوار است که در دمای پایین، قیر عمدتاً رفتار الاستیک دارد. تیرچه قیری به مدت ۴ دقیقه تحت بار ثابت قرار می‌گیرد و مقدار افت و خیز حاصله در وسط تیرچه در تمام این مدت اندازه‌گیری می‌شود. از این آزمایش که در

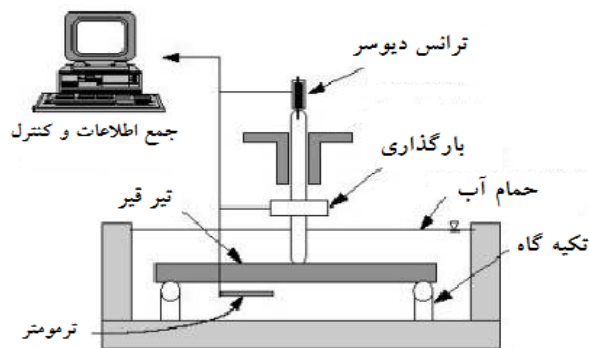
دمای پایین، مطابق با آب و هوای منطقه مورد نظر انجام می‌شود، سختی خزشی که بیانگر مقاومت آسفالت تحت اثر بار ثابت است و شیب یا نرخ خزش (میلی‌متر) که بیانگر تغییر سختی با تغییرات بار اعمال شده می‌باشد، به دست می‌آید. آزمایش بدین صورت انجام می‌گیرد که تیرچه قیری با ریختن قیر داغ در قالب‌های مکعب مستطیل ساخته می‌شود. پس از حدود ۴۵ الی ۶۰ دقیقه قیر اضافی را با یک کاردک داغ تراشیده و نمونه را همراه قالب به مدت ۵ الی ۱۰ دقیقه بایستی در داخل فریزر قرار داد. پس از جداسازی نمونه از قالب آن را به مدت ۶۰ دقیقه در داخل حمام رنومتر قرار داده تا دما به وضعیت تعادل برسد. پس از این مدت تیرچه قیری بر روی تکیه‌گاه‌ها گذاشته شده و باری حدود ۳ تا ۴ گرم بر آن وارد می‌شود. سپس بار ۱۰۰ گرمی بصورت اتوماتیک به مدت ۱ ثانیه توسط دستگاه وارد می‌شود و به مدت ۲۰ ثانیه برداشته می‌شود. پس از این مدت بار ۱۰۰ گرمی به مدت ۲۴۰ ثانیه اعمال می‌شود و افت و خیز حاصله نیز همزمان اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۳ و ۴). از منحنی تغییر شکل (افت و خیز) بر زمان بارگذاری می‌توان سختی خزش و مقدار میلی متر را بدست آورد.

بر اساس آئین نامه شارپ مقدار میلی متر در زمان ۶۰ ثانیه بایستی برابر یا بیش از ۰,۳ باشد.

شکل ۳. رنومتر تیرچه خمشی (BBR)



شکل ۳. رنومتر تیرچه خمشی (BBR)



شکل ۴. شمای آزمایش رئومتر تیرچه خمشی (BBR)

۳-۳- آزمایش تست کشش غیرمستقیم

استوانه‌ای در دو نوار بارگذاری قرار گرفتند و بار فشاری یکنواخت به سرعت ۵۰ میلی‌متر در دقیقه تا شکست اعمال شد. در این فرآیند، بار فشاری عمودی را به تنش کششی افقی یکنواخت تبدیل می‌کند. بارگذاری حداکثر اعمال شده برای محاسبه مقادیر ITS استفاده شد که در آن، ITS مقاومت کششی غیرمستقیم (مگاپاسکال)؛ P_{max} بارگذاری حداکثر اعمال شده (نیوتن)؛ t ضخامت نمونه (میلی‌متر) و d قطر نمونه (میلی‌متر) است.

$$ITS = \frac{2P_{max}}{\pi dt}$$

آزمون، این نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در آب به دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد غوطه‌ور شدند. حساسیت رطوبتی مخلوط‌های مختلف با استفاده از مقادیر نسبت مقاومت کششی (TSR)^{۱۴} می‌تواند مقایسه شود که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$TSR = \frac{TS_1}{TS_0}$$

که در آن TS_1 و TS_0 به ترتیب مقاومت کششی غیرمستقیم قبل و بعد از چرخه یخ‌زدایی هستند.



شکل ۵. شکل شماتیک آزمایش کشش غیرمستقیم

آزمون مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS)^{۱۴} یک آزمون رایج برای مخلوط آسفالت است که نتایج آن با ویژگی‌های خرابی و ترک خوردگی در مخلوط آسفالت مرتبط می‌شود (اسلام، حسین و تارفدر، ۲۰۱۵). قبل از آزمون، حداقل چهار نمونه آسفالت مارشال با ضخامت 63.5 ± 1.3 میلی‌متر و قطر 101.6 میلی‌متر برای هر دسته آماده شد. در این آزمون از دستگاه آزمایش تست یونیورسال (UTM)^{۱۳} استفاده شد و دمای آن در ۲۵ درجه سانتی‌گراد کنترل شد، همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است. در طول آزمون، نمونه‌های

با ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالت، مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های مخلوط آسفالت پس از چرخه یخ‌زدایی ارزیابی شد. نمونه‌های مارشال رطوبت ابتدا در یخچال در دمای منفی ۱۸ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۶ ساعت قرار گرفتند و سپس در آب به دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خیساندن شدند. قبل از

۳-۴- شیار جای چرخ

این آزمایش توسط دستگاه شیار جای چرخ موجود در آزمایشگاه قیر و آسفالت دانشگاه علم و صنعت ایران انجام شد. برای هر نوع مخلوط سه نمونه مارشال در دستگاه قرار می‌گیرد و توسط دو چرخ که حول مرکزشان دوران می‌کنند با فشار حدود ۱۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع مورد بارگذاری فرار می‌گیرند. فرکانس بارگذاری برای هر نمونه ۱ هرتز و دمای آزمایش ۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. در مجموع نمونه‌ها تحت ۸۰۰ سیکل بارگذاری قرار گرفتند و پس از آن ماکزیمم عمق شیار بوجود آمده در هر نمونه اندازه‌گیری و میانگین سه نمونه به عنوان عمق شیار هر مخلوط به دست آمد.

۳-۵- آزمایش خمش سه نقطه‌ای

آزمون خمش سه نقطه‌ای آزمونی پرکاربرد است که برای ارزیابی پارامتر ترک خوردگی نمونه‌های ملات و بتن، و همچنین مخلوط‌های آسفالت استفاده می‌شود (بیرگیسون، مونتیارا، رومئو و تبالدی، ۲۰۱۱). در این پژوهش، آزمایش

خمش سه نقطه‌ای برای ارزیابی مقاومت ترک خوردگی در دمای پایین مخلوط‌های آسفالت استفاده شد. ابتدا تیرهای مخلوط آسفالت با ابعاد $300 \times 300 \times 50$ میلی‌متر متراکم شدند.

سپس تیرها به تیرهای پریماتیک با ابعاد $250 \times 30 \times 35$ میلی‌متر تقسیم شدند. قبل از آزمایش، این تیرهای پریماتیک حداقل به مدت ۱٫۵ ساعت در یخچال در دمای منفی ۱۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند تا توزیع یکنواخت دما مطمئن شود (چن، قیان و کینگ لو، ۲۰۱۴). در طول آزمون، نمونه با استفاده از دو رولر با طول طراحی شده ۲۰۰ میلی‌متر پشتیبانی شد و بارگذاری تمرکز شده با سرعت ۵۰ میلی‌متر در دقیقه در مرکز نمونه اعمال شد، همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است. منحنی تنش-کرنش در طول فرآیند بارگذاری ثبت شد و حداکثر کرنش خمشی بر اساس معادله زیر محاسبه شد.

که در آن ϵ_B کرنش خمشی حداکثر (میکرومتر)؛ h ارتفاع نمونه (میلی‌متر)؛ d انحراف نمونه در میانه بخش متقاطع (میلی‌متر) و L فاصله بین دو تکیه دوار (میلی‌متر) است.

$$\epsilon_B = \frac{6 \times h \times d}{L^2}$$



شکل ۶. آزمایش خمش سه نقطه‌ای

۴- تحلیل نتایج آزمایشات

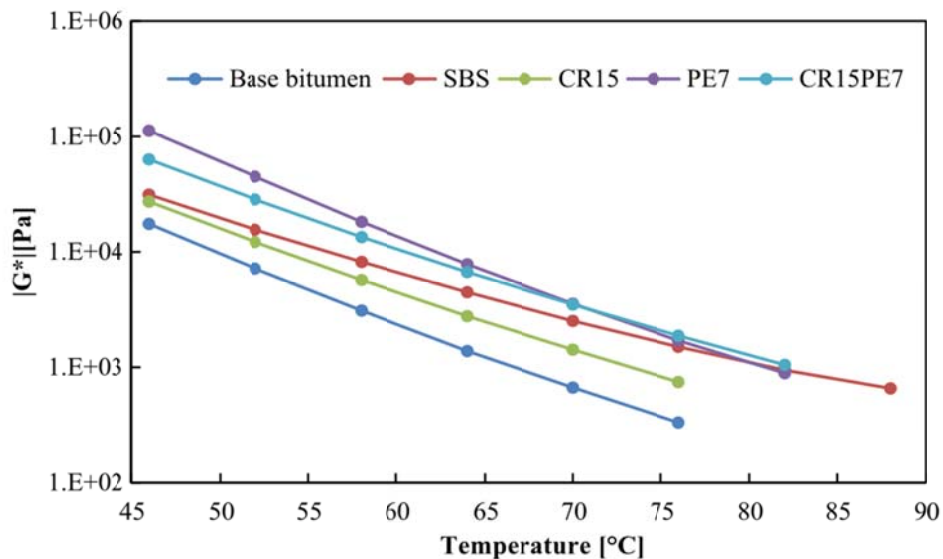
۴-۱- نتایج آزمایش رئومتر برش دینامیکی

(CR15PE7) بالاترین مدول مختلط را نشان می‌دهند، در حالی که قیر پایه کمترین مقدار را نشان می‌دهد. از نظر قیر اصلاح شده با CR (CR15)، مدول مختلط تنها کمی

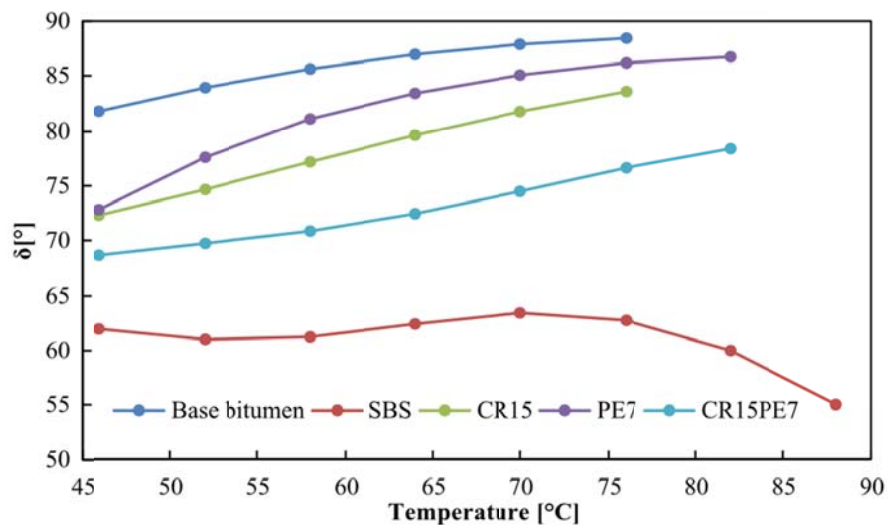
آزمون‌های تغییر دما با فرکانس ۱۰ راد در ثانیه با منحنی‌های مدول مختلط (G^*) و زاویه فاز (δ) در تصاویر ۷ و ۸ به ترتیب ارائه شده‌اند. مشاهده می‌شود که قیر اصلاح شده با پلی‌اتیلن (PE7) و قیر اصلاح شده ترکیبی

مقدار را نشان می‌دهد. به طور کلی در نظر گرفته می‌شود که زاویه فاز حساسیت بیشتری نسبت به تغییر ساختار شیمیایی دارد در مقایسه با مدول مختلط. با افزودن PE و CR، زاویه فاز قیر تجربه کاهش قابل توجهی می‌کند که نشان دهنده افزایش رفتار الاستیک قیر است. این پدیده نشان می‌دهد که اصلاح یکنواخت منجر به افزایش جزء الاستیک قیر و موجب انعطاف‌پذیری روسازی آسفالت می‌شود.

بالتر از قیر پایه است ولی به طور قابل توجهی کمتر از قیر اصلاح شده با PE است. بنابراین، PE به عنوان عامل اصلی افزایش مدول مختلط در نظر گرفته می‌شود. نشان داده شده است که افزودن PE مدول مختلط قیر را افزایش می‌دهد که در نتیجه مقاومت به تغییر شکل دائمی در دماهای بالا را بهبود می‌بخشد. از نظر منحنی‌های زاویه فاز در شکل ۸ قیر پایه بیشترین مقدار را و قیر اصلاح شده با SBS کمترین



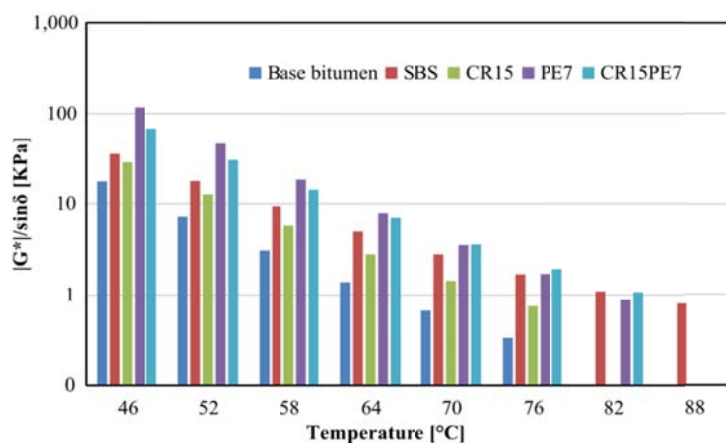
شکل ۷. نتایج مدول مختلط نمونه‌ها



شکل ۸. نتایج زاویه فاز نمونه‌ها

شیارشدهگی برای PE7 و CR15PE7 بالاترین مقادیر $G^*/\sin \delta$ را دارند و انتظار می‌رود که بیشترین مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی را داشته باشند. علاوه بر این، با افزایش دما، پارامترهای شیارشدهگی برای تمام نمونه‌ها کاهش می‌یابد که نشان دهنده کاهش مقاومت در برابر شیارشدهگی است.

پارامتر شیارشدهگی $G^*/\sin \delta$ با فرکانس ۱۰ راد در ثانیه به عنوان یک معیار مهم در توصیف مقاومت شیارشدهگی قیر (نژاد، آقاجانی، مدرس و فیروزی‌فر، ۲۰۱۲) مورد ارزیابی قرار گرفت. اگر مقدار پارامتر شیارشدهگی در فرکانس ۱۰ راد در ثانیه بیشتر از ۱ کیلوپاسکال باشد، قیر به عنوان مقاومت به شیارشدهگی بهتر شناخته می‌شود (چن، هوانگ، چو و لین، ۲۰۰۷). همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، پارامترهای



شکل ۹. نتایج پارامتر شیارشدهگی نمونه‌ها

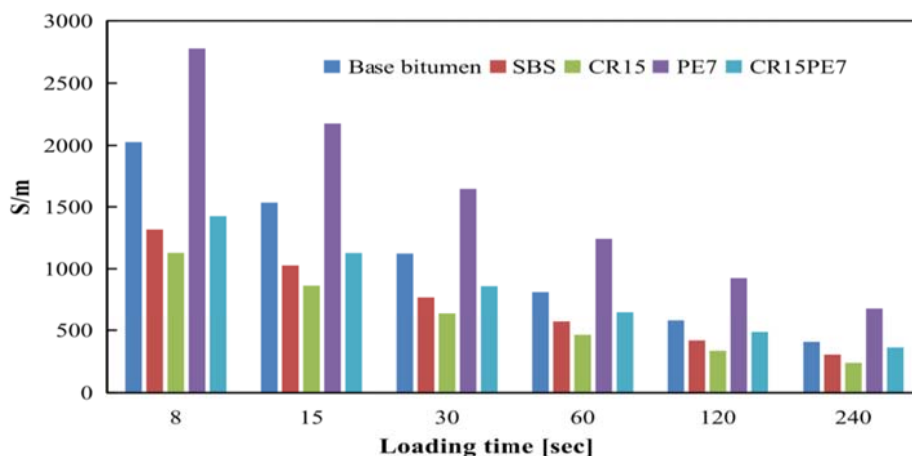
۴-۲- نتایج آزمایش رئومتر تیرچه خمشی

نشان داده شده است. نشان داده شده است که CR می‌تواند انعطاف‌پذیری قیر را بهبود بخشد و عملکرد بهتری در دمای پایین داشته باشد. در عوض، PE بازیابی تنش قیر را کاهش می‌دهد که نشان دهنده احتمال ترک‌های حرارتی در دماهای پایین است. زیرا قیر با سختی خزشی قیر کمتر و مقادیر بزرگتر m به عنوان مقاومت مناسب در دماهای پایین در نظر گرفته می‌شود، نسبت سختی خمشی به پارامتر S/m (m) محاسبه و در مقابل زمان بارگذاری رسم می‌شود، همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که PE7 بالاترین مقدار S/m را دارد در حالی که CR15 کمترین مقدار را دارد. علاوه بر این، مقدار S/m قیر اصلاح شده ترکیبی CR15PE7 به طور مشخصی کمتر از قیر پایه و کمی بیشتر از قیر اصلاح شده با SBS است. نتایج نشان می‌دهد که عملکرد در دماهای پایین قیر اصلاح شده ترکیبی قادر است به همان سطح قیر اصلاح شده با SBS برسد.

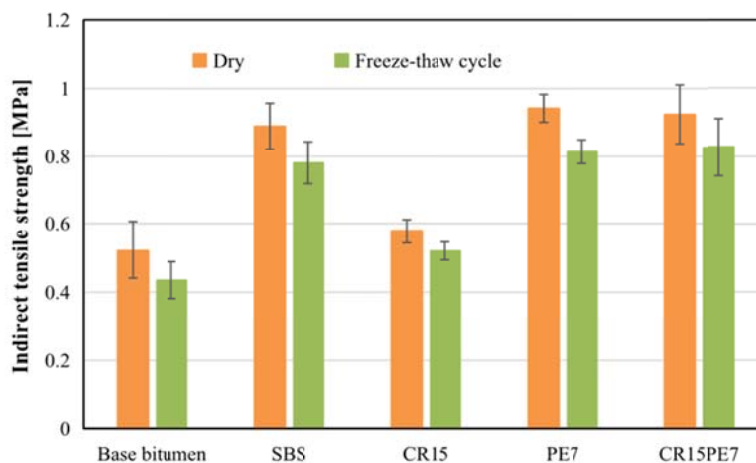
آزمون BBR در دمای منفی ۱۸ درجه سلسیوس برای ارزیابی عملکرد در دمای پایین قیر انجام شد و نتایج سختی خزشی (S) و مقادیر m در جدول ۳ نمایش داده شده است. مقدار S مقاومت قیر در برابر بار مداوم را اندازه‌گیری می‌کند و m تغییرات سختی قیر تحت بار را نمایش می‌دهد. قیر با مقادیر کمتری از سختی خزشی و/یا مقادیر بزرگتری از m به عنوان عملکرد بهتر در دمای پایین شناخته می‌شود. از جدول قابل مشاهده است که افزودن PE به طور قابل توجهی سختی خزشی قیر را افزایش می‌دهد در حالی که CR سختی خزشی قیر را کاهش می‌دهد. این نشان می‌دهد که PE ویژگی‌های دمای پایین مخلوط آسفالت را کاهش می‌دهد که نشان دهنده احتمال ترک‌های حرارتی در دماهای پایین است. در مورد قیر اصلاح شده ترکیبی، تأثیر ترکیبی CR و PE باعث می‌شود که مقدار سختی خزشی قیر به همان سطح قیر اصلاح شده با SBS برسد. مقادیر m یک روند معکوس را نشان می‌دهد، همانطور که در جدول ۳

جدول ۳. نتایج پارامتر s و m

CR15PE7	PE7	CR15	SBS	قیر پایه	خصوصیت
۲۰۴	۳۶۴	۱۶۴	۱۹۲	۲۸۲	پارامتر S
۰.۳۱۴	۰.۲۹۳	۰.۳۵۱	۰.۳۳۶	۰.۳۳۱	پارامتر m



شکل ۱۰. نسبت S/m نمونه‌ها



شکل ۱۱. نتایج کشش غیرمستقیم نمونه‌ها

۳-۴- نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم

مقادیر ITS نمونه‌ها قبل و بعد از عمل آوری رطوبتی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. قبل از عمل آوری رطوبتی، نمونه‌های تهیه شده با قیر پایه کمترین مقاومت کششی را نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که CR به طور کمی مقدار ITS نسبت به قیر پایه بهبود می‌بخشد. در مورد مخلوط اصلاح شده با PE، مقدار ITS روند افزایشی دارد و حتی بالاتر از مخلوط آسفالت اصلاح شده با SBS است.

مقادیر ITS تقریباً همان مقدار ITS مخلوط اصلاح شده با SBS و مخلوط اصلاح شده با PE را نشان می‌دهد. این نشان می‌دهد که روش اصلاح ترکیبی با استفاده از CR و PE به طور قابل توجهی مقاومت برشی مخلوط آسفالت را بهبود داده است که ممکن است به مقاومت در برابر شیارشدگی و ترک‌های جاده آسفالت کمک کند. بعد از دوره یخبندان و اشباع، مقدار ITS تمام نمونه‌ها به دلیل رطوبت،

است، که نشان‌دهنده مقاومت بهتر در برابر خرابی ناشی از رطوبت است. این موضوع با این توضیح که افزودن CR و PE چسبندگی رابطه سنگدانه- قیر را بهبود بخشیده است و در نتیجه مقاومت در برابر رطوبت را بهبود داده است توجیه می‌شود.

کاهش قابل مشاهده‌ای را تجربه می‌کنند، همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مقادیر TSR تمام نمونه‌ها پس از عمل آوری رطوبتی در جدول ۴ نشان داده شده‌اند. همانطور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، مقدار TSR مخلوط اصلاح‌شده ترکیبی با CR و PE بیشتر از مخلوط‌های آسفالت با قیر پایه و قیر اصلاح شده با SBS

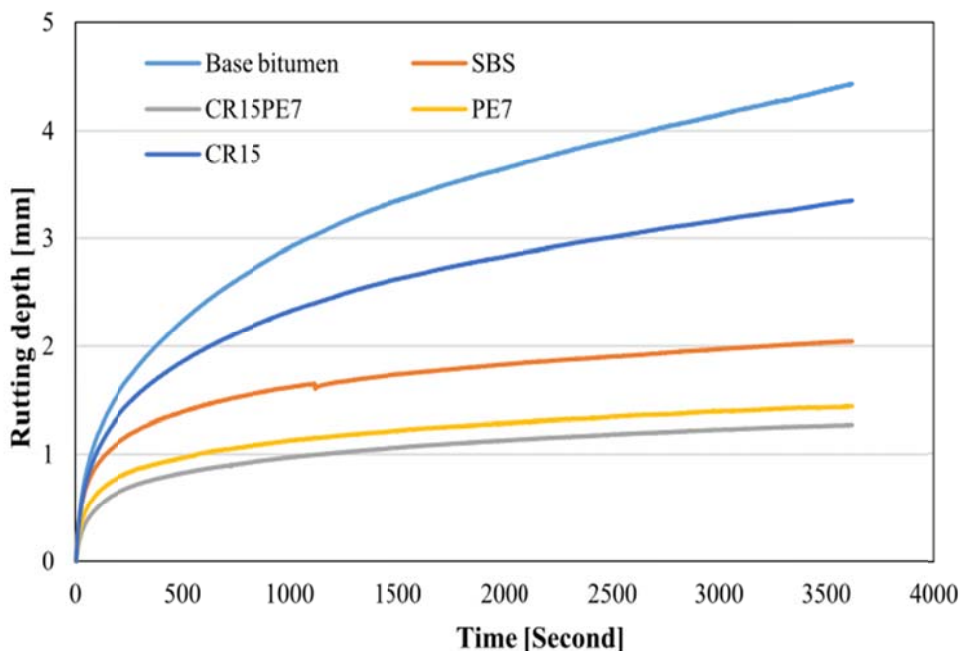
جدول ۴. نتایج نسبت مقاومت کششی نمونه‌ها

CR15PE7	PE7	CR15	SBS	قیر پایه	خصوصیت
۸۹.۲	۸۷.۱	۹۱	۸۷.۹	۸۳.۴	TSR (%)

۴-۴- نتایج عمق شیار شدگی نمونه‌ها

اصلاح شده با PE کاهش قابل توجهی در عمق شیار دارد و حتی کمتر از مخلوط اصلاح شده با SBS است. مخلوط اصلاح شده ترکیبی کمترین تغییر شکل را نشان می‌دهد که به معنای مقاومت بسیار بالا در برابر تغییر شکل دائمی در دمای عملکرد بالا می‌باشد.

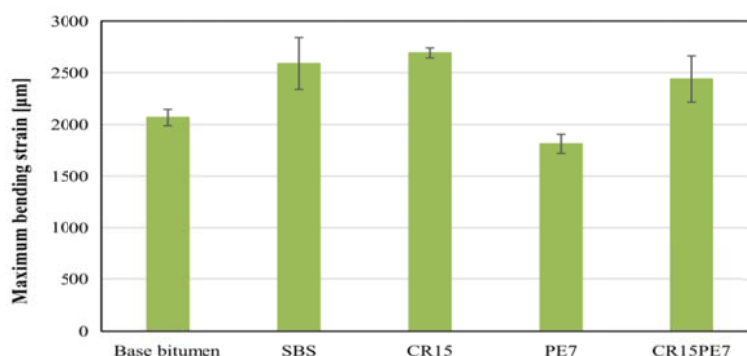
شیارشدگی تمام نمونه‌ها نسبت به زمان بارگذاری در طول آزمون WTT در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، عمق شیار مخلوط‌های آسفالت با افزایش زمان به تدریج افزایش می‌یابد. افزودن CR و PE می‌تواند بهبودی در مقاومت شیارشدگی به دست آورد. مشاهده می‌شود که مخلوط



شکل ۱۱. نتایج عمق شیار شدگی نمونه‌ها

۴-۵- نتایج تست خمش سه نقطه‌ای

دارد که به معنای تأثیر منفی PE بر عملکرد در دمای پایین مخلوط آسفالت است. بالاترین مقدار تنش خمشی مخلوط تغییر یافته با CR نشان دهنده مشارکت CR در مقاومت در برابر ترک خوردگی مخلوط آسفالت در دمای پایین است. با استفاده از مخلوط اصلاح شده ترکیبی، مقدار حداکثر تنش خمشی کمی کمتر از مخلوط آسفالت تهیه شده با قیر اصلاح شده با SBS است، اما به طور قابل توجهی بیشتر از نمونه‌هایی است که با قیر پایه تهیه شده‌اند. می‌توان نتیجه گرفت که با افزودن CR و PE، ویژگی‌های در دمای پایین مخلوط آسفالت بهبود یافته و به سطح مشابه مخلوط آسفالت تهیه شده با قیر اصلاح شده با SBS رسیده است.



شکل ۱۲. حداکثر کرنش خمشی نمونه‌ها

- در خصوص مخلوط آسفالت اصلاح شده ترکیبی، PE عامل مهمی برای بهبود مقدار ITS است. مخلوط آسفالت تغاصلاح شده ترکیبی قادر است مقدار مشابهی از ITS را نسبت به مخلوط آسفالت اصلاح شده با SBS بدست آورد. مقاومت بهتر در برابر رطوبت هم با استفاده از اصلاح ترکیبی با افزودن CR و PE به دست آمده است.

- افزودن CR و PE هر دو می‌تواند عمق شیار مخلوط‌های آسفالت را کاهش دهد و در نتیجه مقاومت در برابر شیارشدگی را افزایش دهد. مخلوط اصلاح شده با PE حتی عمق کمتری از مخلوط اصلاح شده با SBS دارد.

- از نظر خواص در دمای پایین، PE تأثیر منفی و CR تأثیر مثبتی بر ترک خوردگی حرارتی مخلوط‌های آسفالت دارد. اصلاح ترکیبی با افزودن CR و PE ویژگی‌های در دمای پایین مخلوط آسفالت را بهبود داده و به سطح مشابه مخلوط آسفالت تهیه شده با قیر اصلاح شده با SBS رسید.

آزمون خمش سه نقطه‌ای در دمای ۱۰- درجه سانتی‌گراد برای مشخص کردن مقاومت در برابر ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالت انجام شد. با پیشروی آزمایش، بارگذاری اعمال شده به تدریج با افزایش تغییر شکل افزایش می‌یابد و پس از رسیدن به بار بیشینه، به طور پایدار کاهش می‌یابد، همانطور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است. مقدار تغییر شکل در مرکز مقطع در لحظه بارگذاری بیشینه برای محاسبه حداکثر تنش خمشی استفاده شد. حداکثر تنش خمشی نشانگر انعطاف‌پذیری در دمای پایین مخلوط آسفالت است و مقدار بالاتر به معنای انعطاف‌پذیری بهتر است. همانطور که مشاهده می‌شود، PE7 کمترین تنش خمشی را

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه، روش اصلاح ترکیبی با استفاده از CR بازیافتی و PE به عنوان مواد افزودنی برای تهیه قیر و مخلوط آسفالت مورد بررسی قرار گرفته است. خواص قیر و مخلوط‌های آسفالت در دو دمای بالا و پایین مورد ارزیابی قرار گرفت. تعدادی از نتایج اصلی به شرح زیر است:

- با افزودن CR و PE، مدول مختلط افزایش قابل توجهی می‌یابد. زاویه فاز کاهش قابل مشاهده‌ای می‌کند که نشان دهنده افزایش رفتار الاستیک است. پارامتر شیارشدگی به طور قابل توجهی افزایش یافته است که نشان دهنده بهبود عملکرد در دمای بالا پس از اصلاح ترکیبی است.

- با استناد به آزمون CR، BBR، عامل اصلی برای کاهش سفتی خمشی و افزایش مقدار m قیر در دمای پایین است. قیر اصلاح شده ترکیبی تهیه شده در این تحقیق عملکرد در دمای پایین مشابهی با قیر اصلاح شده با SBS تجاری داشت.

۷-پی نوشتها

- 1- Crumb Rubber
- 2- Polyethylene
- 3- Styrene-Butadiene-Styrene
- 4- Styrene- Isoprene-Styrene
- 5- Styrene-Ethylene/Butylene-Styrene
- 6- Polypropylene
- 7- Ethylene-Vinyl Acetate
- 8- Ethylene-Butyl Acrylate
- 9- Dynamic Shear Rheometer
- 10- Bending Beam Rheometer
- 11- Wheel Tracking Test
- 12- Indirect Tensile Strength
- 13- Universal Testing Machine
- 14- Tensile Strength Ratio

۸-مراجع

- terephthalate modified asphalt mixtures using dynamic creep test. *Materials and Design*, 53, 317–324 .
- Moon, K. H., Falchetto, A. C., & Hu, J. W. (2014). Investigation of asphalt binder and asphalt mixture low temperature creep properties using semi mechanical and analogical models. *Construction and Building Materials*, 53, 568–583 .
- Nejad, F. M., Aghajani, P., Modarres, A., & Firoozifar, H. (2012). Investigating the properties of crumb rubber modified bitumen using classic and SHRP testing methods. *Construction and Building Materials*, 26, 481–489 .
- Presti, D. L. (2013). Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixtures: A literature review. *Construction and Building Materials*, 49, 863–881 .
- Qiao, Y. N., Dawson, A., Huvstig, A., & Korkiala-Tanttu, L. (2015). Calculating rutting of some thin flexible pavements from repeated load triaxial test data. *International Journal of Pavement Engineering*, 16(6), 467–476 .
- Zhang, J., Apeagyei, A. K., Airey, G. D., & Grenfell, J. R. A. (2015). Influence of aggregate mineralogical composition on water resistance of aggregate-bitumen adhesion. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 62, 45–54 .
- Zhu, J. Q., Birgisson, B., & Kringos, N. (2014). Polymer modification of bitumen: Advances and challenges. *European Polymer Journal*, 54, 18–38 .
- Aflaki, S., & Hajikarimi, P. (2012). Implementing viscoelastic rheological methods to evaluate low temperature performance of modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 36, 110–118 .
- Ameri, M., Mansourian, A., & Sheikhmotevali, A. H. (2013). Laboratory evaluation of ethylene vinyl acetate modified bitumens and mixtures based upon performance related parameters. *Construction and Building Materials*, 40, 438–447 .
- Chen, J. S., Huang, C. C., Chu, P. Y., & Lin, K. Y. (2007). Engineering characterization of recycled asphalt concrete and aged bitumen mixed recycling agent. *Journal of Materials Science*, 42(23), 9867–9876 .
- Galooyak, S. S., Dabir, B., Nazarbeygi, A. E., & Moeini, A. (2010). Rheological properties and storage stability of bitumen/SBS/montmorillonite composites. *Construction and Building Materials*, 24, 300–307 .
- Islam, M. R., Hossain, M. I., & Tarefder, R. A. (2015). A study of asphalt aging using indirect tensile strength test. *Construction and Building Materials*, 95, 218–223 .
- Jahanian, H. R., Shafabakhsh, G., & Divandari, H. (2017). Performance evaluation of hot mix asphalt (HMA) containing bitumen modified with Gilsonite. *Construction and Building Materials*, 131, 156–164 .
- Moghaddam, T. B., Soltani, M., & Karim, M. R. (2014a). Evaluation of permanent deformation characteristics of unmodified and polyethylene

Laboratory Evaluation of the Effect of Waste Rubber Powder and Recycled Polyethylene Waste Powder on the Functional Properties of Bitumen and Asphalt Mixture with an Environmental Approach

Azin Chitsazan, Department of Land Use Planning and Assessment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Email: Chitsazan.az@gmail.com

Received: June 2023- Accepted: November 2023

ABSTRACT

Due to the significant increase in traffic volume, asphalt pavements gradually deteriorate and their two main failure modes are delamination at high temperature and thermal cracking at low temperature. This paper focuses on the modification of bitumen and asphalt mixtures with the aim of improving the performance of asphalt pavement simultaneously at high and low service temperatures. To modify the properties of bitumen, shredded recycled rubber (CR1) and polyethylene (PE) 2 were selected as polymer agents. The performance analysis of the rheological properties of the modified bitumen showed that the addition of CR reduced the creep stiffness of the bitumen at low temperature, thereby reducing the risk of failure and cracking. Meanwhile, the addition of PE increased the high temperature stiffness of bitumen, which resulted in improved roughness resistance. In the case of modified integrated bitumen, the addition of CR and PE simultaneously improves bitumen properties at both high and low temperatures. In terms of asphalt mixture, PE increases the resistance to permanent deformation at high service temperature while CR increases ductility at low service temperature. The integrated mixture modified with CR and PE had significantly improved performance at both high and low service temperatures. Therefore, the use of these two recycled materials is able to improve the pavement properties to the extent or even better than those obtained by using bitumen modified with styrene-butadiene-styrene.

Keywords: Modified Asphalt Binder, Crumb Rubber, Performance Characteristics, Polyethylene, Mechanical Properties, Asphalt Mixture