ارزیابی آزمایشگاهی استفاده از ضایعات پلاستیکی خانگی بر عملکرد قیر و مخلوط آسفالتی

آذین چیت سازان*، گروه ارزیابی و آمایش سرزمین، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
*پست الکترونیک نویسنده مسئول: Chitsazan.az@gmail.com

چکیده

پلیمرهای تجاری برای اصلاح روسازی‌ها از چند دهه قبل استفاده می‌شوند؛ با این حال، یکی از نقاط ضعف اصلی این پلیمرها هزینه بالای آنهاست. پلیمرهای پلاستیکی ضایعاتی می‌توانند به عنوان افزودنی پایدار و با کارایی اقتصادی برای بهبود خواص آسفالت استفاده شوند و مزایای زیست محیطی و اقتصادی ترکیبی را به دست آورد. این مطالعه با هدف بررسی و ارزیابی اثر استفاده از ضایعات پلاستیک خانگی ، پلی‌اتیلن ترفتالات [1](PET)، در اصلاح قیر انجام شده است. ارزیابی چندین درصد قیر اصلاح شده با PET در دو مرحله، بطور مجزا در محیط آزمایشگاهی انجام شده است: ماده افزودنی قیر اصلاح شده و مخلوط آسفالت اصلاح شده. برای بررسی خواص عملکردی و رفتار ویسکوالاستیک قیر اصلاح شده با پلاستیک، از دستگاه [2]DSR و آزمون [3]RTFOT استفاده شده است. برای ارزیابی خواص عملکردی مخلوط آسفالت اصلاح شده با پلاستیک، آزمون مقاومت مارشال، روانی مارشال، نسبت مقاومت مارشال و آزمون شیارشدگی انجام شده است. نتایج نشان داد که ۶-۸ درصد پلاستیک اصلاح شده، به عنوان مقدار بهینه برای بهبود سفتی و الاستیسیته قیر مناسب است. علاوه بر این، مخلوط آسفالت اصلاح شده با ۸ درصد پلاستیک، بهبود بیشتری در مقاومت در برابر خمش نشان داد و با افزایش مقاومت مارشال، افزایش نسبت مقاومت مارشال و کاهش عمق شیار، تاثیر بیشتری داشت.

کلمات کلیدی: آسفالت، پلاستیک ضایعاتی، خواص ویسکو الاستیک، مقاومت مارشال، مقاومت در برابر شیار شدگی، اثرات زیست محیطی

۱.مقدمه

رشد اقتصادی و صنعتی سریع، تولید زباله‌های جهان را افزایش داده است. به منظور مدیریت این زباله‌ها و کاهش تاثیر آنها بر محیط زیست، پروژه‌های تحقیقاتی مختلف صورت گرفته است. این پروژه‌ها بر روی استفاده از مواد ضایعاتی برای بهبود صنعت ساختمان کار می‌کنند (Chegenizadeh et al, 2018; Chegenizadeh et al, 2017; Piromanski et al, 2020) نتایج این پروژه‌ها نشان داده‌اند که استفاده از مواد ضایعاتی در کارهای ساختمانی و به خصوص بهبود راه‌حل‌های ژئوتکنیکی و تقویت روسازی آسفالتی اهمیت زیادی دارد.

در تاریخ ۱ ژانویه ۲۰۱۸، چین ممنوعیت واردات زباله پلاستیکی را اعمال کرد که به آن ممنوعیت‌های مشابهی در دیگر کشورها از جمله هند و مالزی پیوست. این ممنوعیت‌ها تاثیر قابل توجهی بر صنعت بازیافت زباله داشته‌اند. گزارش‌ها نشان می‌دهند که مصرف سالانه پلاستیک بیش از سه میلیون تن بوده است و تنها ۹٪ از آن بازیافت می‌شود. می‌توان دید که در ۱۷ سال گذشته، دنیا با افزایش فوق‌العاده زباله‌ها به دلیل تقاضای روزافزون مردم در زندگی روزمره روبرو شده است و زباله‌های پلاستیکی تولید شده، خطرها و آلودگی را افزایش داده‌اند. بنابراین، بازیافت زباله‌های پلاستیکی به صورت دوست‌دار محیط زیست، مورد توجه قرار گرفته است.

استفاده از مواد ضایعاتی به جای مواد جدید در ساخت جاده‌ها دو مزیت مهم دارد: کاهش چشمگیر هزینه‌ها و کاهش زباله‌های دفن شده. علاوه بر اهمیت این مزایا، توسعه آینده استفاده از پلاستیک ضایعاتی در اصلاح بیتومن باید به آنچه که چگونه خواص مخلوط را بهبود می‌بخشد توجه کند (Hamedi et al, 2020; White et al, 2020).

ممکن است افزودن ضایعات پلاستیکی سبب ایجاد قیرهیا ناهمگن با خصوصیات شکنندگی و مقاومت کم در برابر ترکیدگی حرارتی و خستگی شود. مطالعات قبلی بر روی پلیمرهای پلاستیکی تازه و کمتر به بازیافت شده‌ها تمرکز داشتند. مطالعات دیگر نتایج مثبتی برای استفاده از پلاستیک در اصلاح آسفالت نشان داده‌اند؛ با این حال، کمتری به استفاده از مقدار قابل توجهی از پلاستیک‌ها مانند PET و پلی‌اتیلن با چگالی بالا [٤] (HDPE)برای بهبود خواص مکانیکی و مقاومت در برابر خستگی آسفالت اشاره کرده‌اند. مقاومت در برابر خستگی، توانایی مقاومت در برابر تغییر شکل در طول عمر خدمت آسفالت است. مطالعات نشان داده‌اند که اضافه کردن پلیمرهای پلاستیکی می‌تواند مقاومت در برابر خمش را به طور قابل توجهی بهبود بخشد. مطالعات نشان داده‌اند که اضافه کردن پلاستیک می‌تواند قابلیت کار و پایداری مخلوط را نیز بهبود بخشد. مطالعات بیشتر نیز نشان داده‌اند که استفاده از پلاستیک ضایعاتی می‌تواند مقاومت در برابر خمش در مخلوط آسفالت را بهبود بخشد (Al-Hadidy et al, 2009a; Al-Hadidy et al, 2009b; Costa et al, 2019; Hınıslıoğlu et al, 2004; Casey et al, 2008).

براساس مطالعات قبلی (Ahmad et al, 2007; Sara et al, 2017; Ameri et al, 2017)، درصد پلاستیک ضایعاتی ٤٪ به عنوان مقدار مناسب در آسفالت پیشنهاد شده است تا خواصی مانند مقاومت، پایداری، سفتی، مقاومت بهتر در برابر خستگی و شیارشدگی وجود داشته باشد. از سوی دیگر، مطالعات برای یک ماده افزودنی بهبود یافته که عمر خستگی و مقاومت در برابر ترک خوردگی آسفالت را افزایش دهد، درصد پلاستیک ضایعاتی ٦٪ را ضروری می‌دانند. استفاده از پلاستیک ضایعاتی برای بهبود خواص روسازی راه ها در کشورهای مختلفی مانند انگلستان، کانادا، هند، هلند و نیوزیلند در ۷ سال گذشته انجام شده و ارزیابی شده است. در سال ۲۰۱۲، شهر ونکوورکانادا، پلاستیک ضایعاتی را به عنوان یک ماده افزودنی جایگزین برای تقویت آسفالت استفاده کرد. به گفته گزارش، در سه قسمت آزمایش در ونکوور، پلاستیک ضایعاتی خانگی در یک روسازی سطحی ۱۹ میلی‌متری Superpave استفاده شد، که باعث کاهش اثرات گازهای گلخانه‌ای و بهبود کیفیت هوا با صرفه‌جویی ۲۰٪ انرژی مصرفی در هنگام مخلوط کردن شد. یک مثال دیگر از اهمیت استفاده از پلاستیک ضایعاتی در صنعت روسازی جاده از هلند در سال ۲۰۱۵ است. به گفته شرکت سازنده، یک جاده ساخته شده از پلاستیک بازیافتی قادر به مقاومت در برابر دمای پایین تا منفی ٤٠ درجه سانتیگراد و دمای بالا تا ۸۰ درجه سانتیگراد است و برای ۵۰ سال پس از ساخت، مقاومت در برابر خوردگی و طول عمر طولانی دارد (Saini et al, li et al, 2021; Esfandabad et al, 2020; Ghabchi et al, 2021).

بر اساس گزارشات مطالعات (Esfandabad et al, 2020; Ghabchi et al, 2021; Nizamuddin et al, 2020; Nizamuddin et al, 2021) یکی از روش‌های مؤثر در اصلاح آسفالت، استفاده از پلاستیک ضایعاتی است که همچنین یک روش حمایت از محیط زیست و اکوسیستم‌ها است. علاوه بر این، استفاده از پلیمرهای پلاستیکی در آسفالت، به‌طور بالقوه می‌تواند خصوصیات حساسیت دمایی و سفتی قیر را بهبود بخشد؛ این بهبود در قیر، باعث بهبود مقاومت در برابر پخش و ترک خستگی آسفالت می‌شود. به تازگی، از پلاستیک ضایعاتی به عنوان یک کاربرد ارزشمند در تغییر مخلوط‌های آسفالتی در نیوزیلند استفاده شده است. بر اساس گزارش آن‌ها، یک آزمایش مقیاس بزرگ آسفالت با بازیافت پلاستیک در حالی صورت گرفت که از ۲۵۰ تن ظروف پلاستیکی ضایعاتی استفاده شد. با وجود چند آزمایش در زمینه آسفالت در بریزبین، ملبورن و سیدنی از ۲۰۱۹ (White et al, 2019)، هیچ مطالعه مستندی در استرالیا گزارش نشده است. یک مطالعه اولیه توسط (White et al, 2019) با استفاده از محصولات پلاستیکی ضایعاتی تجاری انگلیسی به قیر اضافه شده بود. با این‌حال، این مطالعه تأثیر پلاستیک ضایعاتی خانگی بر الاستیسیته و خصوصیات مهندسی آسفالت با استفاده از روش

مخلوط خشک را بررسی ننموده است. بنابراین، نیاز جدی به بررسی عملکرد آسفالت ضایعاتی PET وجود دارد. هدف این مطالعه بررسی و ارزیابی تأثیر پلاستیک ضایعاتی در بهبود خصوصیات مهندسی مخلوط‌های آسفالتی است. این مطالعه به بررسی و ارزیابی تأثیر آسفالت ضایعاتی بر بهبود عملکرد سفتی پیری و مقاومت در برابر پخش مخلوط‌ها می‌پردازد.

۲. مواد و آماده سازی نمونه ها

در این مطالعه از قیر ۶۰-۷۰ شرکت نفت پاسارگاد استفاده شده است. جدول ۱ ویژگی‌های فیزیکی قیر را نشان می‌دهد. بطری‌های پلاستیکی ضایعاتی محلی (PET) جمع‌آوری، شسته شده و پس از آسیاب به اندازه ۰٫۴۵ میلی‌متر به عنوان اصلاح‌کننده قیر استفاده شدند. شکل ۱ مواد مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد. مخلوط آسفالت با دانه بندی پیوسته با حداکثر اندازه اسمی ۱۴ میلی‌متر استفاده شد. سنگ آهک به عنوان یکی از معدنی‌ترین سنگ‌های آهک طبیعی به‌کار رفته است. جدول ۲ ویژگی‌های فیزیکی سنگ آهک را نشان می‌دهد. شکل ۲ دانه بندی مصالح سنگی سنگ آهک را نشان می‌دهد.

جدول ۱. خصوصیات قیر

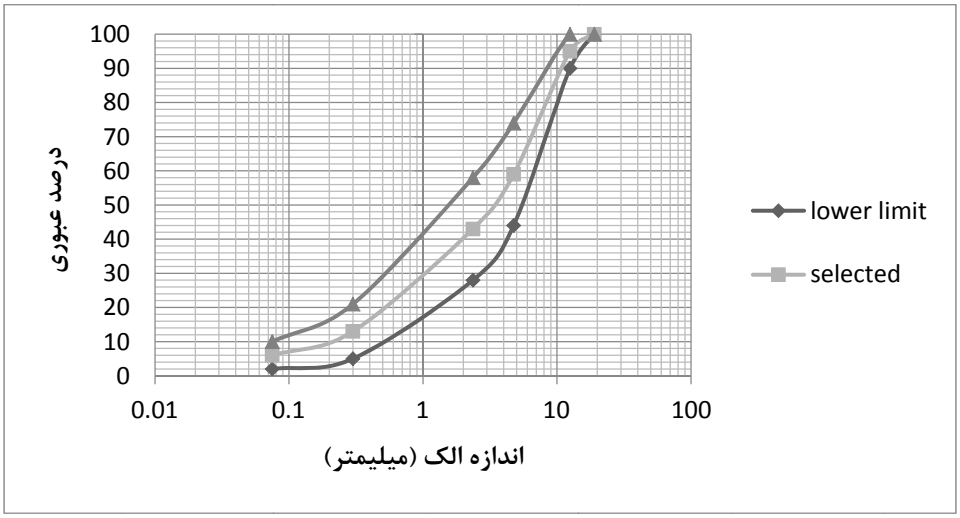
خصوصیت	نتیجه
ویسکوزیته در دمای ۶۰	۳۲۰
ویسکوزیته در دمای ۱۳۵	۰/۵
درجه نفوذ	۴۰
نقطه اشتعال	۲۵۰

جدول ۲- خصوصیات مصالح سنگی مورد استفاده

شرح	نتایج آزمایش	حدود مجازطبق نشریه ۲۳۴		استانداردآزمایش	
		آستر	رویه	AASHTO	ASTM
حداکثر سایش به روش لوس‌آنجلس (درصد)	۲۲/۳	۴۰	۳۰	T۹۶	-
حداکثر ضریب تورق با روش BS۱۲\ (درصد)	۹	۳۰	۲۵	-	-
حداقل درصد شکستگی در دو وجه روی الک شماره ۴	۹۴	۸۰	۹۰	-	D۵۸۲۱
حداکثر درصد جذب آب (مصالح درشت دانه)	۲/۲	۲/۵	۲/۵	T۸۵	-

حداکثر درصد جذب آب (مصالح ریزدانه)	۲/٤	۲/۸	۲/٥	T۸٤	-

شکل ۱. مواد و مصالح مورد استفاده در این تحقیق



شکل۲. دانه بندی مصالح سنگی

٤,۲. آماده سازی نمونه

آماده‌سازی نمونه در دو مرحله، شامل نمونه‌های قیر با اصلاح کننده پلاستیکی و نمونه‌های مخلوط آسفالت با اصلاح کننده پلاستیکی بود. در مرحله اول، برای آماده‌سازی نمونه‌های قیر با اصلاح کننده پلاستیکی حاوی ۰٪، ٤٪، ٦٪ و ۸٪ نسبت به وزن قیر، از یک مخلوط کن با شیار بالا استفاده شد. پس از چندین آزمایش در آزمایشگاه، شرایط مخلوط مناسب با دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد، زمان ٤۰ دقیقه و سرعت مخلوط کردن ۲۰۰۰ دور در دقیقه تعیین شد. آزمون‌های DSR برای قیر با اصلاح کننده پلاستیکی و قیر بدون اصلاح کننده برای تعیین رفتار ویسکوالاستیک، سفتی و الاستیسیته و بررسی مقاومت شیارشدگی قبل و بعد از پیری انجام شد. برای ارزیابی حساسیت دمایی قیر حاوی ضایعاتی پلاستیکی، دماهای ٥۰، ٥۸، ٦۰، ٦٤ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد مورد ارزیابی و ثبت قرار گرفتند.

در مرحله دوم، قیر حاوی ضایعات پلاستیکی به سنگدانه اضافه شده و با استفاده از روش مخلوط خشک و روش مارشال، مخلوط‌های آسفالت حاوی ضایعات پلاستیکی آماده شدند. در نمونه‌های آسفالت حاوی ضایعات پلاستیکی با درصد پلاستیکی ٤–٨٪ با وزن مخلوط، درصد بهینه قیر به میزان ٤,٩ استفاده شد. همچنین، ١,٥٪ آهک هیدراته به میزان وزن خشک سنگدانه به‌عنوان پرکننده به کار گرفته شد. برای بهتر فهمیدن تأثیر پلاستیک بر خصوصیات عملکردی مخلوط آسفالتی، آزمایشهای مارشال (٢٠٠٤–٢٨٩١.٥ AS)، روانی مارشال، نسبت مارشال و آزمایش شیار جای چرخ (١٥–٠٥٤-T AGP) انجام شدند.

۳. برنامه آزمایشگاهی

۱,۳. آزمایش پایه ای قیر

خواص فیزیکی متداول قیر پایه و قیر اصلاح‌شده با درصدهای مختلف PET با آزمایش‌های مختلف از جمله خاصیت انگمی، نقطه نرمی و درجه نفوذ ارزیابی شدند. نقطه نرمی قیر مطابق با٣٦ASTM- D تعیین شد. همچنین تست خاصیت انگمی مطابق با استانداردD -١١٣ASTM انجام شد. درجه نفوذ می‌تواند نشان‌دهنده سختی قیر باشد، که مطابق با d -٥ASTM انجام شد. تست ویسکوزیته
با استفاده از ویسکومتر چرخشی بروکفیلد برای اندازه‌گیری ویسکوزیته قیرهای اصلاح‌نشده و اصلاح شده در دمای ١٣٥ درجه سانتی گراد مطابق با استاندارد D -٤٤٠٢ASTM انجام شد.

۲,۳. رئومتر برش دینامیکی

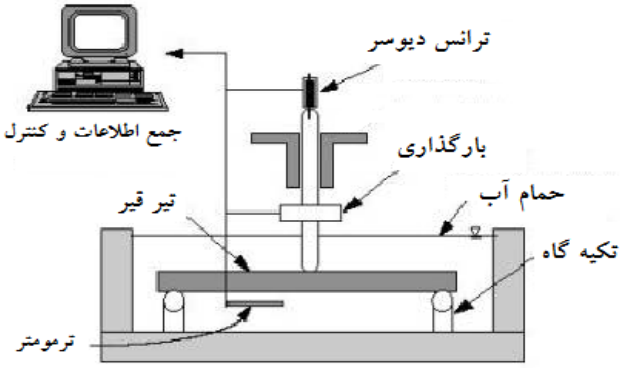
به منظور مشخص کردن ویژگی‌های اساسی ریولوژیکی قیر، تستDSR انجام شد. این تست می‌تواند به درستی رفتار الاستیک و ویسکوز قیر را در دماهای متوسط تا دماهای بالا توصیف کند. مدول مرکب G*)و زاویه فاز (δ) پارامترهای اصلی ویسکوالاستیک هستند که در این تست اندازه‌گیری می‌شوند. پارامترG اطلاعاتی را در مورد مقاومت قیر به تغییر شکل هنگامی که در معرض بار برشی قرار می‌گیرد، فراهم می‌کند. پارامتر d تاخیر زمانی بین تنش‌های برشی اعمال‌شده و پاسخ‌های کرنش برشی را نشان می‌دهد. تحلیل این دو پارامتر می‌تواند رفتار قیر مانند پتانسیل شیارشدگی را پیش‌بینی کند. پارامتر G* / Sin δ که پارامتر شیارشدگی نامیده می‌شود مقاومت شیارشدگی قیر را نشان می‌دهد. نمونه‌های قیر با ضخامت ١ میلی¬متر و قطر ٢٥ میلی¬متر با فرکانس ١٠ rad / s و در دمای ٤٦، ٥٢، ٥٨، ٦٤، ٧٠ و ٧٦ درجه سانتی گراد با توجه به روش آزمون استانداردD -٧١٧٥ASTM، تست شدند. مقدار G* / Sin δ برای قیرهای پیرنشده توصیه می‌شود که با توجه
به استانداردD -٧١٧٥ASTM، بیش از ١ کیلو پاسکال باشد.

۳,۳. رئومتر تیرچهٔ خمشی

از آنجایی که قیر در دماهای پایین بسیار سفت و سخت است، خصوصیات قیر در آن دماها را نمی¬توان با استفاده از رئومتر دینامیکی برشی بدست آورد. بدین منظور از آزمایش جدیدی که در آن رفتار خزشی بدست می¬آید استفاده می¬شود. در رئومتر تیرچهٔ خمشی، تیرچهٔ ساخته شده از قیر در سردترین دمایی که قیر مورد نظر در دورهٔ عمرش تحمل می کند، مورد آزمایش قرار می¬گیرد. اساس این آزمایش بر

این اساس استوار است که در دمای پایین، قیر عمدتاً رفتار الاستیک دارد. تیرچهٔ قیری به مدت ٤ دقیقه تحت بار ثابت قرار می گیرد و مقدار افت و خیز حاصله در وسط تیرچه در تمام این مدت اندازه-گیری می¬شود. از این آزمایش که در دمای پایین، مطابق با آب و هوای منطقهٔ مورد نظر انجام می شود، سختی خزشی که بیانگر مقاومت آسفالت تحت اثر بار ثابت است و شیب یا نرخ خزش (میلی¬متر) که بیانگر تغییر سختی با تغییرات بار اعمال شده می¬باشد، به دست می¬آید. آزمایش بدین صورت انجام می گیرد که تیرچهٔ قیری با ریختن قیر داغ در قالب¬های مکعب مستطیل ساخته می شود. پس از حدود ٤٥ الی ٦٠ دقیقه قیر اضافی را با یک کاردک داغ تراشیده و نمونه را همراه قالب به مدت ٥ الی ١٠ دقیقه بایستی در داخل فریزر قرار داد. پس از جداسازی نمونه از قالب آن را به مدت ٦٠ دقیقه در داخل حمام رئومتر قرار داده تا دما به وضعیت تعادل برسد. پس از این مدت تیرچهٔ قیری بر روی تکیه¬گاه¬ها گذاشته شده و باری حدود ٣ تا ٤ گرم بر آن وارد می شود. سپس بار ١٠٠ گرمی بصورت اتوماتیک به مدت ١ ثانیه توسط دستگاه وارد می شود و به مدت ٢٠ ثانیه برداشته می¬شود. پس از این مدت بار ١٠٠ گرمی به مدت ٢٤٠ ثانیه اعمال می¬شود و افت و خیز حاصله نیز همزمان اندازه¬گیری می¬شود (شکل ٣ و ٤). از منحنی تغییر شکل (افت و خیز) بر زمان بارگذاری می¬توان سختی خزش و مقدار میلی¬متر را بدست آورد. بر اساس آئین نامهٔ شارپ مقدار میلی¬متر در زمان ٦٠ ثانیه بایستی برابر یا بیش از ٠,٣ باشد.

شکل ٣. رئومتر تیرچه خمشی (BBR)



شکل ٤. شمای آزمایش رئومتر تیرچه خمشی (BBR)

۱،۳. مقاومت مارشال

برای بررسی تأثیر سنگدانه شیشه‌ای بر خصوصیات مقاومت و حجمی مخلوط، آزمایش های مارشال شامل پایداری مارشال[۵](MS) ، روانی، چگالی و درصد حجمی هوا، برای مخلوط اصلاح شده و نشده در هر درصد قیر بهینه [۶] (OBC)انجام شد. این آزمایش ها با استفاده از استاندارد (ASTM۲۰۱۵) ASTMD۱۹۲۷ انجام شدند. قبل از آزمون، نمونه‌های مارشال آماده شده در یک حمام آب در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد به مدت ۴۰ دقیقه خیسانده شدند.

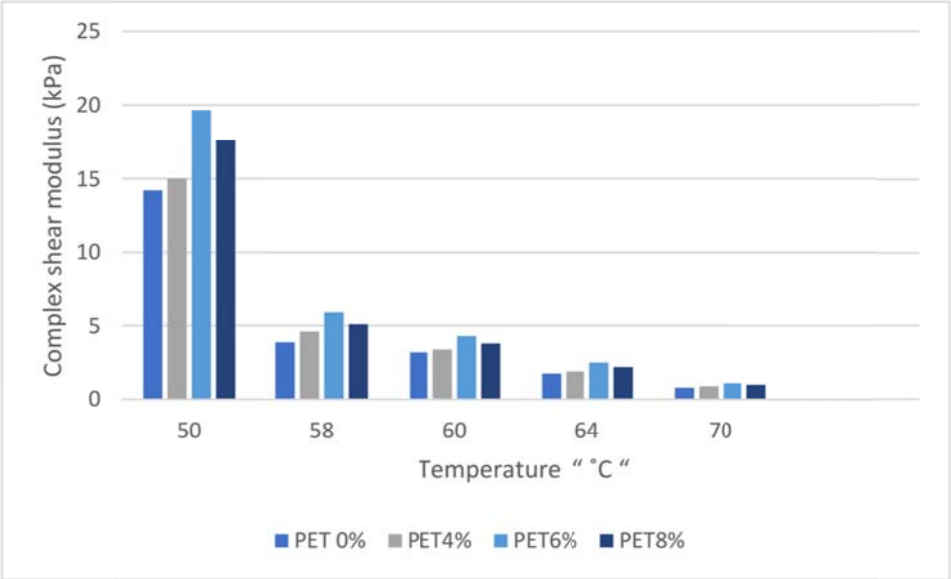
۲،۳. شیار جای چرخ

جهت تعیین مقاومت مخلوط های اسفالتی در برابر شیارشدگی آزمایش شیار جای چرخ 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 برسانتیمتر مربع مورد بارگذاری قرار می‌گیرند. فرکانس بارگذاری برای هر نمونه ۱ هرتز و دمای ازمایش ۵۰ درجه سانتیگراد است. در مجموع نمونه‌ها تحت ۸۰۰ سیکل بارگذاری قرار گرفتند و پس از ان بیشینه عمق شیار بوجود آمده در هر نمونه اندازه گیری و میانگین سه نمونه به عنوان عمق شیار هر مخلوط به دست امد.

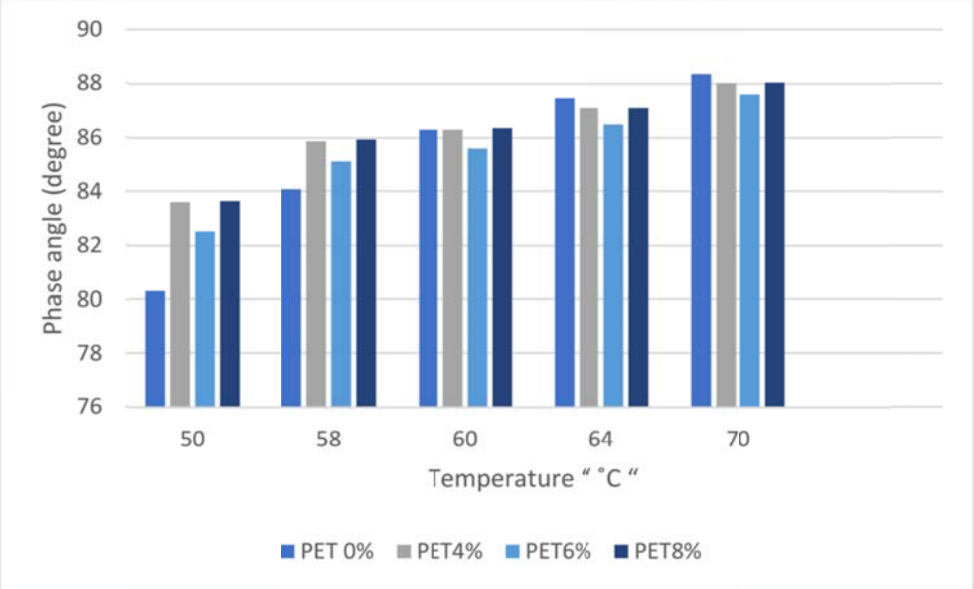
۴. بحث و نتایج

۱،۴. نتایج خصوصیات رئولوژیکی قیر حاوی ضایعات پلاستیکی (قبل از پیرشدگی)

برای ارزیابی مقاومت شیارشدگی، آزمون DSR انجام شد. براساس نتایج آزمون، تمامی نمونه‌های اصلاح شده دارای مقادیر قابل قبول و رضایت‌بخش بودند. همان‌طور که در شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود، نمونه‌های آسفالت حاوی ضایعات پلاستیکی دارای مقادیر بزرگی از زاویه فاز و مدول برش مختلط نسبت به قیر خالص هستند. در محدوده دمایی با دمای بالا تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد، نمونه‌های آسفالت حاوی ضایعات پلاستیکی به نحوی که مقاومت شیارشدگی بهبود یافت، بهبود یافتند. با افزایش مقاومت شیارشدگی، قیر اصلاح شده کمتر به تغییر شکل حساس می‌شود و به همین دلیل مقاومت شیارشدگی بهبود می‌یابد. بهبود مقاومت شیارشدگی در نمونه‌های حاوی ضایعات پلاستیکی از طریق دماهای مختلف، نشان داد که عملکرد سفتی و الاستیسیته در نمونه‌های اصلاح شده بهتر است. نتایج در شکل‌های ۵ و ۶ نشان می‌دهند که مدول برش مختلط و زاویه فاز بهتری دارند که نشان می‌دهد ذرات پلاستیکی PET در آسفالتین‌ها یکپارچه شده‌اند و این باعث بزرگ شدن حجم آسفالت اصلاح شده می‌شود؛ این در عوض باعث بهبود قابل توجه ویسکوزیته و کارآیی قیر می‌شود. این پدیده نشان می‌دهد که یکپارچه‌سازی مخلوط PET-آسفالت منجر به بهبود خواص الاستیکی می‌شود و احتمالاً با خصوصیات و بزرگ شدن حجم PET در قیر مرتبط است.



شکل ۵. نتایج مدول برشی مختلط نمونه ها در حالت پیرنشده

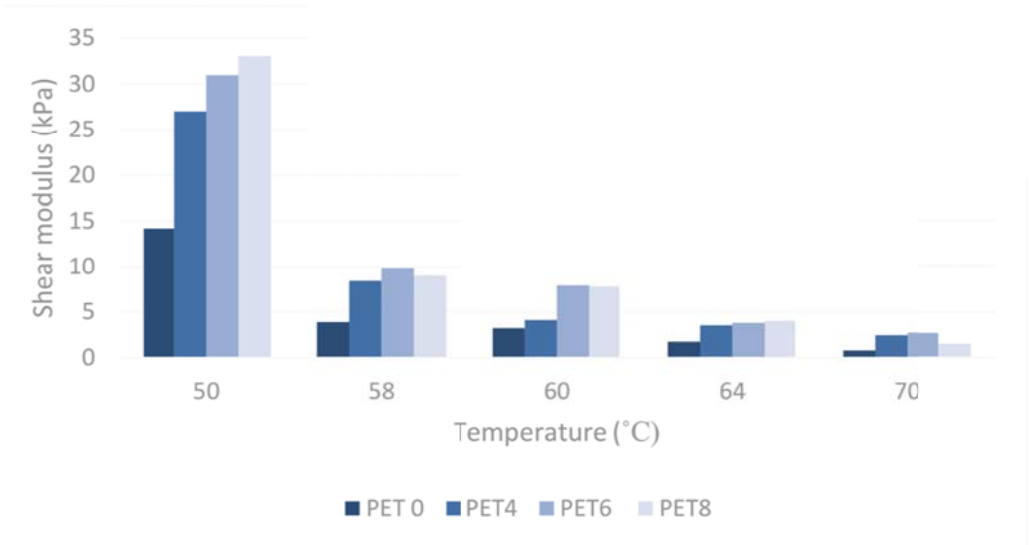


شکل ٦. نتایج زاویه فاز نمونه ها در حالت پیرنشده

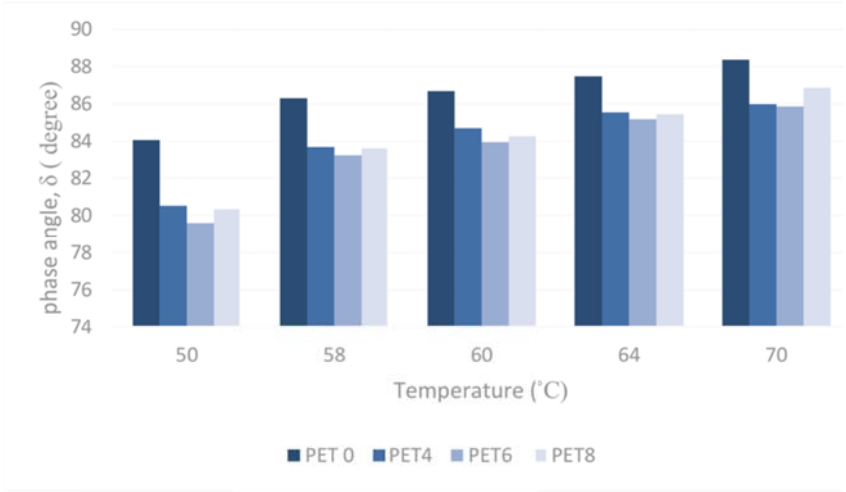
٤.٢. نتایج خصوصیات رئولوژیکی قیر حاوی ضایعات پلاستیکی (بعد از پیرشدگی)

شکل‌های ۷ و ۸ تأثیر درصدهای مختلف PET روی رفتار ویسکوالاستیک قیر پس از ایجاد شرایط RTFOT را نشان می‌دهند. آزمون DSR ویژگی‌های ویسکوالاستیکی را در قالب مدول برش مختلط و زاویه فاز با دماهای مختلف از ۵۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد ارزیابی می‌کند. در تمامی دماهای آزمایش، مقادیر مدول برش پیچشی مختلط و زاویه فاز نمونه‌ها بهبود یافتند، همان‌طور که در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که افزودن PET به آسفالت سفتی را بهبود می‌بخشد و مقاومت پیری و پایداری بیشتری به آن می‌بخشد. این

موضوع از طریق مقادیر زاویه فاز در شکل ۸ تأیید شده است. در نمونه‌های ۶–۸٪ حاوی ضایعات پلاستیکی PET، نسبت به نمونه‌های بدون اصلاح کننده، کاهش قابل توجهی در زاویه فاز مشاهده می‌شود. این نشان می‌دهد که الاستیسیته قیر اصلاح شده با موفقیت بهبود یافته است و در نتیجه مقاومت شیارشدگی نمونه‌های حاوی ضایعات پلاستیکی PET افزایش می‌یابد. همان‌طور که از شکل‌های ۷ و ۸ مشخص است، قیرهای اصلاح شده با این ترکیب کمتر پیری حرارتی از قیرهای بدون اصلاح کننده دارند. علاوه بر این، قیرهای اصلاح شده رفتار سخت شدن کمتری دارند، اتصال قیر–سنگدانه بهتری دارند و بنابراین مقاومت به تغییر شکل و ترک خوردگی بهتری دارند.



شکل ۷. نتایج مدول برشی مختلط نمونه ها در حالت پیرشده

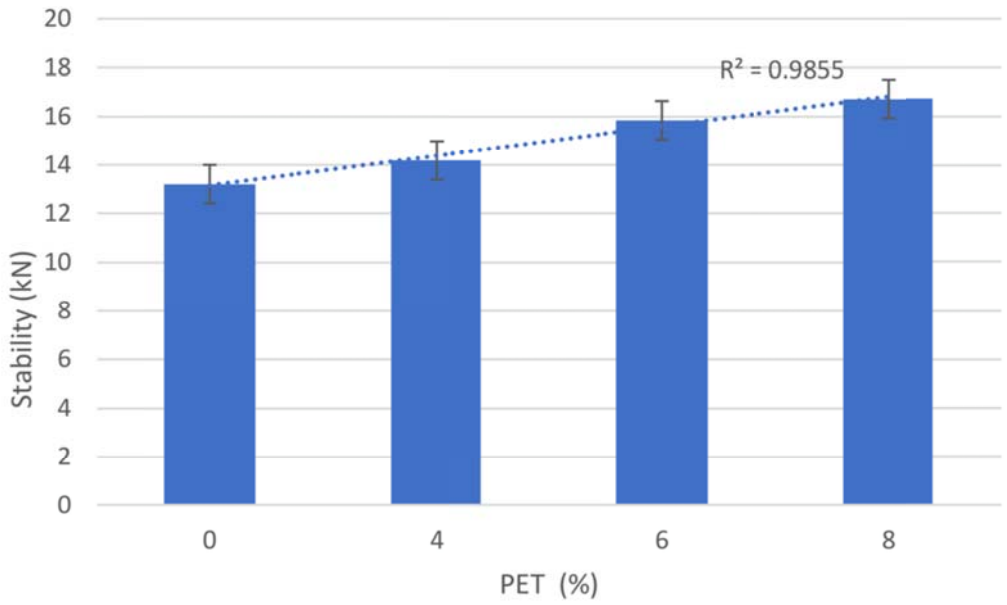


شکل ۸. نتایج زاویه فاز نمونه ها در حالت پیرشده

۳،٤. نتایج آزمایش مارشال

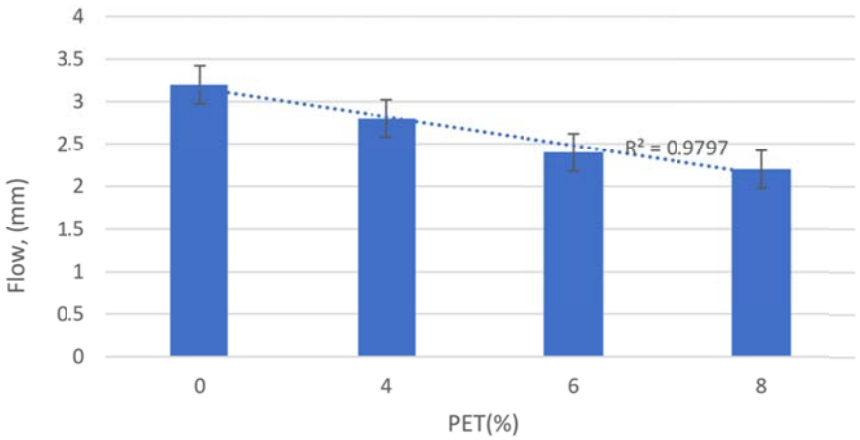
آزمایش مارشال به منظور بررسی توانائی آسفالت برای مقاومت در برابر شکست و تغییر شکل شیارشدگی تحت بار ترافیک انجام شد. مقادیر مقاومت مارشال، روانی مارشال و نسبت مارشال به ترتیب در شکل‌های ۹ تا ۱۱ نمایش داده شده‌اند. همان‌طور که از شکل ۹ مشخص است، با افزایش مقدار پلاستیک بیشتر در مخلوط، مقاومت بیشتری به دست آمده است؛ لذا مخلوط‌های آسفالت با افزودن پلاستیک مقاومت بهتری نسبت به مخلوط کنترلی داشته‌اند. آزمون مقاومت مارشال شاخص خوبی از مقاومت مواد قیر در برابر تغییرشکل، جابجایی، شیارشدگی و تغییر شکل تنش برشی است. همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، اضافه کردن پلاستیک باعث کاهش روانی مارشال شده است. نسبت مارشال که به نسبت مقاومت مارشال به روانی مارشال اشاره دارد، می‌تواند به عنوان شاخص مقاومت به شیارشدگی استفاده شود؛ نتایج نشان می‌دهند که افزودن ٦–۸٪ پلاستیک PET برای مخلوط اصلاح شده، مقاومت به تغییر شکل را بسیار افزایش می‌دهد. به عبارت دیگر، پلیمر پلاستیک ضایعاتی مقاومت پایداری مارشال آسفالت را افزایش می‌دهد؛ با این حال، این افزودنی اثر منفی قابل توجهی روی روانی مارشال دارد، که نتایج آن شبیه به یافته‌های قبلی است. همان‌طور که در شکل‌های ۹ و ۱۱ مشاهده می‌شود، افزایش پایداری مارشال و نسبت مارشال در آسفالت اصلاح شده با پلاستیک، ممکن است به گسترش بیشتر ضایعات پلاستیکی در قیر در هنگام مخلوط کردن با شرایط برش بالا، مرتبط باشد که می‌تواند سفتی بیشتری را به دست آورد و نتیجه در پایداری بیشتر باشد. مقادیر بالاتر نسبت مارشال نشان‌دهنده اصلاح بیشتر آسفالت با پلاستیک است که سفت شده و نشان‌دهنده مقاومت بیشتر به تغییر شکل دائمی است.

ویژگی‌های مارشال به عنوان نشانگرهای مستقیم عملکرد روسازی در نظر گرفته می‌شوند؛ پایداری بالاتر و روانی کمتر با عملکرد بهتر روسازی همراه هستند. با توجه به نتایج فوق، می‌توانیم انتظار داشته باشیم که مخلوط آسفالتی اصلاح شده با پلاستیک بازیافتی ویژگی‌های عملکرد بهتری داشته باشد. شکل‌های ۹ تا ۱۱ ضرایب همبستگی بالاتری با مقادیر R^2 = ۰.۹۸۵، R^2 = ۰.۹۷۹ و R^2 = ۰.۹۸۸ برای پایداری، جریان و MQ نشان می‌دهند.

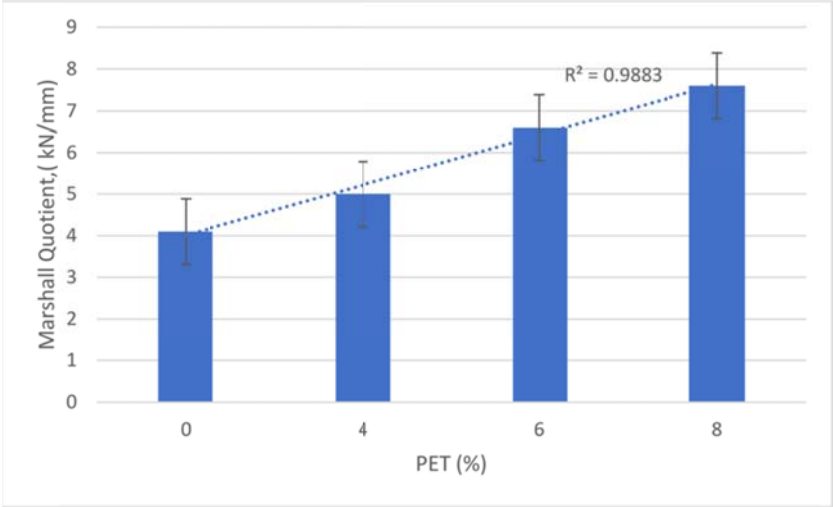


شکل ۹. نتایج مقاومت مارشال نمونه ها

روانی



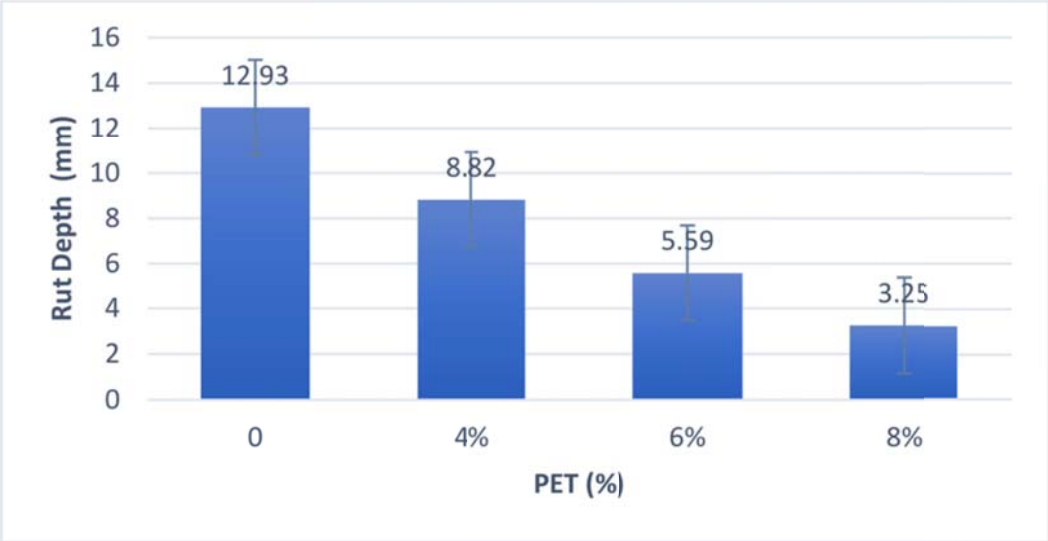
شکل ۱۰. روانی نمونه های مختلف



شکل ۱۱. نسبت مارشال نمونه ها

٤,٤. آزمون شیار جای چرخ

شیارشدگی، یکی از عیوب عمده در روسازی، به ویژه در مناطق گرمسیری است. زیرا تغییر شکل شیارشدگی به حساسیت قیر به تنش‌ها و دماها مرتبط است و هنگام استفاده از قیرهای اصلاح شده، بررسی تأثیر آسفالت اصلاح شده برای روشن شدن مقاومت در برابر شیارشدگی ضروری است. داده‌های آزمایش شیارشدگی، میانگین متوسط سه آزمایش برای هر درصد PET میباشد. همانطور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، اصلاح مخلوط‌ها با ٤-۸٪ پلاستیک PET باعث کاهش عمق شیارشدگی در مقایسه با قیرخالص اصلاح نشده (۰٪ PETشده) است. میانگین عمق شیار PET در مقادیر ٤، ٦ و ۸٪ به ترتیب ۸,۸۲ میلی‌متر، ۵,۵۹ میلی‌متر و ۳,۲۵ میلی‌متر بود. این نتایج نشان می‌دهند که پلاستیک بازیافتی ویژگی‌های مقاومت به تغییر شکل مخلوط را بهبود می‌بخشد. تنوع در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی پلاستیک PET و آسفالت قیر ممکن است نتایج شکل ۱۲ را توجیه کند. به طور خاص، در طول فرآیند مخلوط کردن پلاستیک-قیر با استفاده از مخلوط کن با شدت بالا، ویژگی‌های شیمیایی تحت تأثیر قرار می‌گیرند که به تغییر ابعاد ذرات پلاستیک-PET قیر منجر می‌شود. بنابراین ویژگی‌های فنی آسفالت اصلاح شده با PET تقویت و بهبود یافته و با افزایش الاستیسیته پایداری می‌یابند. افزایش الاستیسیته به دلیل گروه‌بندی مولکول‌ها و اتصال آنها به یکدیگر است. بدین ترتیب، قیرهای اصلاح شده با PET با توانایی بهبود مقاومت در برابر شیارشدگی در طول عمر ساخت و ساز جاده‌ها و همچنین کاهش هزینه ساخت و نگهداری می‌تواند موثر باشد.



شکل ٦. عمق شیار نمونه ها

۵. نتیجه‌گیری

روسازی با روکش آسفالتی در برابر ترک خوردن و شیارشدگی با تغییر دمایی خاص آسیب‌پذیر هستند؛ دمای پایین می‌تواند باعث ترک خوردن شود؛ دمای متوسط خستگی را تحمیل می‌کند؛ و دمای بالا مشکل شکنش را ایجاد می‌کند. بر اساس این حقایق، تغییر و اصلاح فاز ترکیب می‌تواند از طریق تزریق افزودنی‌های مختلف، ویژگی‌های فنی مخلوط آسفالتی را بهبود بخشد. در مطالعه کنونی، پلاستیک بازیافتی به

عنوان افزودنی بازیافتی برای بهبود ویژگی‌های فنی مخلوط آسفالتی با اصلاح کننده بیندر پلاستیکی در مخلوط استفاده شده است. بر اساس مطالعه کنونی، نتایج قابل توجه به شرح زیر است:

۱- این مطالعه رویکردی نوآورانه و امیدوارکننده در استفاده از پلاستیک بازیافتی PET محلی به عنوان اصلاح کننده در قیر پایه و مخلوط آسفالتی نشان می‌دهد.

۲- با توجه به نتایج DSR ، نمونه‌های آسفالت اصلاح شده با PET در کاهش حساسیت آسفالت به تغییر شکل در دمای بالا، که باعث مقاومت بهتر در برابر شیارشدگی می‌شود، عملکرد بهتری را نشان می‌دهد. مدول برشی مختلط افزایش یافته و مقادیر زاویه فاز به دلیل اضافه کردن PETبه قیر، کاهش یافته است. در دماهای آزمایشی ۵۰-۷۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت بهتری در برابر شیارشدگی به دست آمده است که می‌توان این موضوع را به الاستیسیته مواد نسبت داد.

۳- براساس نتایج پیری کوتاه‌مدت(RTFOT) ، افزودنی‌های PET کمتر پیر شدند، مدول برشی مختلط بالاتری داشتند و الاستیسیته بهتری با زاویه فاز بهتر داشتند. این نتایج نشانگر توانایی مقاومت در برابر پیری در طول ساخت و همچنین ارائه دوام بهتر در طول عمر خدمت دهی روسازی هستند.

٤- مخلوط‌های اصلاح شده با پلاستیک بازیافتی، سختی بیشتر و پایداری بالاتری دارند و تحت بارهای سنگین به مقاومت بهتری در برابر تنش برشی مقاومت نشان می‌دهند. مقادیر مقاومت مارشال برای تمام مخلوط‌های آسفالت اصلاح شده با پلاستیک بازیافتی نسبت به مخلوط کنترل بیشتر بود، با این حال، پلاستیک بازیافتی تأثیر کمتری بر روانی مارشال داشت. مقادیر بیشتر نسبت مارشال نشانگر می‌دهد که آسفالت اصلاح شده با پلاستیک، سفت‌تر شده است و نشان می‌دهد که آسفالت اصلاح شده مقاومت بهتری در برابر تغییر شکل دارد.

۵- مقدار بهینه پلاستیک بازیافتی ۸٪ بود که باعث کاهش عمق شیار و بهبود مقاومت مخلوط‌های اصلاح شده در برابر شیارشدگی شد.

٦. پی نوشت ها

1- polyethylene terephthalate
2- Dynamic shear rheometer
3- rolling thin film oven
4- high- density polyethylene
5- Marshall stability
6- optimum binder content

۷. مراجع

Ahmad, L.A. Improvement of Marshall properties of the asphalt concrete mixtures using the polyethylene as additive. Eng. Technol. 2007, 25, 383–394.

Al-Hadidy, A.; Yi-Qui, T. Effect of polyethylene on life of flexible pavements. Constr. Build. Mater. 2009, 23, 1456–1464.

Al-Hadidy, A.; Yi-Qiu, T. Mechanistic approach for polypropylene-modified flexible pavements. Mater. Des. 2009, 30, 1133–1140.

Ameri, M.; Nasri, D. Perfromance properties of devulcanized waste PET modified asphalt mixtures. Pet. Sci. Technol. 2017, 35, 99–104. [CrossRef]

Casey, D.; McNally, C.; Gibney, A.; Gilchrist, M.D. Development of a recycled polymer modified binder for use in stone mastic asphalt. Resour. Conserv. Recycl. 2008, 52, 1167–1174. [CrossRef]

Chegenizadeh, A.; Keramatikerman, M.; Panizza, S.; Nikraz, H. Effect of powder recycled tire on sulfate resistance of cemented clay. J. Mater. Civ. Eng. 2017, 29, 04017160. [CrossRef]

Chegenizadeh, A.; Keramatikerman, M.; Santa, G.D.; Nikraz, H. Influence of recycled tyre amendment on the mechanical behavior of soil-bentonite cut-off walls. J. Clean. Prod. 2018, 177, 507–515. [CrossRef]

Costa, L.M.; Silva, H.M.; Peralta, J.; Oliveira, J.R. Using waste polymers as a reliable alternative for asphalt binder modification-Performance and morphological assessment. Constr. Build. Mater. 2019, 198, 237–244. [CrossRef]

Esfandabad, A.S.; Motevalizadeh, S.M.; Sedghi, R.; Ayar, P.; Asgharzadeh, S.M. Fracture and mechanical properties of asphalt mixtures containing granular polyethylene terephthalate (PET). Constr. Build. Mater. 2020, 259, 120410. [CrossRef]

Ghabchi, R.; Dharmarathna, C.P.; Mihandoust, M. Feasibility of using micronized recycled Polyethylene Terephthalate (PET) as an asphalt binder additive: A laboratory study. Constr. Build. Mater. 2021, 292, 123377. [CrossRef]

Hamedi, G.H.; Hadizadeh Pirbasti, M.; Ranjbar Pirbasti, Z. Investigating the effect of using waste ultra-high-molecular-weight polyethylene on the fatigue life of asphalt mixture. Period. Polytech. Civ. Eng. 2020, 64, 1170–1180.

Hınıslıoğlu,S.;Ağar,E.Useofwastehighdensitypolyethyleneasbitumenmodifierinasphaltconcretemix.Mater.Lett.2004,58, 267–271. [CrossRef]

Li, R.; Leng, Z.; Yang, J.; Lu, G.; Huang, M.; Lan, J.; Zhang, H.; Bai, Y.; Dong, Z. Innovative application of waste polyethylene terephthalate (PET) derived additive as an antistripping agent for asphalt mixture: Experimental investigation and molecular dynamics simulation. Fuel 2021, 300, 121015. [CrossRef]

Piromanski, B.; Chegenizadeh, A.; Mashaan, N.; Nikraz, H. Study on HDPE effect on rutting resistance of binder. Buildings 2020, 10, 156. [CrossRef]

Sara, F.; Silva, H.M.; Oliveira, J.R. Mechanical, surface and environmental evaluation of stone mastic asphalt mixtures with advanced asphalt binders using waste materials. Road Mater. Pavement Des. 2017, 20, 316–333.

Saini, S. Forget Asphalt: A European City Is Building a Road Made Entirely out of Recycled Plastic; Business Insider: Amsterdam, The Netherlands, 2015. Available online: https://sg.finance.yahoo.com/news/forget-asphalt-european-city-building-163000280. html (accessed on 20 October 2020).

White, G. A Synthesis on the Effects of Two Commercial Recycled Plastics on the Properties of Bitumen and Asphalt. Sustainability 2020, 12, 8594. [CrossRef]

Laboratory evaluation of domestic waste plastic on performance of asphalt binder and mixture

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

*Email: Chitsazan.az@gmail.com

Abstract

Commercial polymers for pavement modification have been around for decades. However, one of the main weaknesses of these polymers is their high cost. Waste plastic polymers can be used as a sustainable and economically efficient additive to improve the properties of asphalt and obtain environmentally friendly and economical compounds. This study was conducted with the aim of investigating and evaluating the effect of using plastic waste, polyethylene terephthalate 1 (PET), in bitumen modification. The percent modified with PET was carried out in two separate steps in the laboratory environment: modified bitumen additive and modified asphalt mixture. To investigate the functional characteristics and viscoelastic behavior of bitumen modified with plastic, the DSR 2 device and the RTFOT 3 test are used. For the functional performance of asphalt mixture modified with plastic, Marshall strength test, Marshall fluidity, Marshall strength ratio and rutting test have been performed. The results showed that 6-8% of modified plastic is suitable as the optimal amount to improve the stiffness and elasticity of bitumen. In addition, the modified asphalt mixture with 8% plastic showed an increase in flexural strength and had a greater effect with increasing Marshall strength, increasing Marshall ratio and reducing rutting.
Keywords: asphalt; waste plastic; visco-elastic properties; Marshall stability; rutting resistance; environmental impact