

بررسی تاثیر درصدهای مختلف پلی اتیلن سنگین بر خواص مکانیکی قیر و پتانسیل شیارشدگی مخلوط آسفالتی گرم (HMA)

مقاله علمی - پژوهشی

محسن زاهدی، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
*یاسین حسونند (نویسنده مسئول)، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Yasinhasanvand1324@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۱۸ - پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۵

صفحه ۵۰۴-۴۸۳

چکیده

اگرچه قیر سهم نسبتاً اندکی در مخلوط‌های آسفالتی گرم دارد، نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد و دوام روسازی ایفا می‌کند و ضعف در ویژگی‌های آن می‌تواند زمینه‌ساز بروز خرابی‌هایی نظیر شیارشدگی، ترک خوردگی و خستگی شود. هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر پلی‌اتیلن سنگین گرید ۵۲۱۸ بر خواص فیزیکی و رئولوژیکی قیر و نیز عملکرد مخلوط آسفالتی گرم در برابر تغییر شکل دائمی بود. بدین منظور، پلی‌اتیلن سنگین در مقادیر ۳، ۵، ۶ و ۷ درصد وزنی قیر به قیر پایه ۷۰/۶۰ افزوده شد و ویژگی‌های قیر اصلاح‌شده و مخلوط‌های آسفالتی حاصل مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش درصد پلی‌اتیلن سنگین، قیر سخت‌تر شده و مقاومت آن در برابر تغییر شکل در دماهای بالا بهبود یافته است؛ به گونه‌ای که در نمونه حاوی ۷ درصد پلی‌اتیلن سنگین، درجه نفوذ از ۶۴ به ۳۸ دسی‌میلی‌متر رسید، نقطه نرمی از ۵۱٫۴ به ۶۹٫۵ درجه سلسیوس افزایش یافت و ویسکوزیته چرخشی از ۳۷۴ به ۱۵۱۷ پاسکال‌ثانیه رسید. همچنین، نتایج آزمایش مارشال نشان داد که استحکام مخلوط آسفالتی ساخته‌شده با قیر اصلاح‌شده حاوی ۷ درصد پلی‌اتیلن سنگین، از ۱۰۵۶ به ۱۸۲۸ کیلوگرم افزایش یافت، در حالی که روانی مارشال تغییر معناداری نشان نداد. در آزمون خزش دینامیکی نیز، کرنش دائمی مخلوط حاوی ۷ درصد پلی‌اتیلن سنگین نسبت به نمونه شاهد در دماهای ۴۰ و ۵۰ درجه سلسیوس، به ترتیب ۴۶ و ۴۶ درصد کمتر بود. نتایج تحلیل واریانس یک‌طرفه نشان داد که درصد پلی‌اتیلن سنگین اثر معناداری بر درجه نفوذ، نقطه نرمی، انکمی، ویسکوزیته چرخشی، استحکام مارشال و تغییر شکل دائمی دارد ($P < 0.001$)، حال آنکه تأثیر آن بر روانی مارشال از نظر آماری معنادار نبود ($P = 0.356$). بر اساس نتایج این پژوهش، استفاده از ۷ درصد پلی‌اتیلن سنگین، در محدوده درصدهای برر سی شده، می‌تواند موجب بهبود سختی قیر، افزایش استحکام مخلوط آسفالتی و ارتقای مقاومت آن در برابر شیارشدگی در شرایط آزمایشگاهی شود؛ هرچند کاهش انکمی در درصدهای بالاتر، ضرورت ارزیابی رفتار در دماهای پایین و نیز پتانسیل ترک‌خوردگی را در مطالعات تکمیلی نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: قیر اصلاح‌شده، پلی‌اتیلن سنگین، مخلوط آسفالتی گرم، شیارشدگی، خزش دینامیکی

۱- مقدمه

کیفیت بهره‌برداری از روسازی، می‌تواند ایمنی تردد را نیز تحت تأثیر قرار دهد. شیارشدگی معمولاً در اثر تجمع تغییر شکل‌های دائمی ناشی از بارهای ترافیکی و شرایط محیطی ایجاد می‌شود

شیارشدگی یکی از مهم‌ترین خرابی‌های دائمی در روسازی‌های آسفالتی است که به‌صورت فرورفتگی‌های طولی در مسیر عبور چرخ وسایل نقلیه ظاهر می‌شود. این نوع خرابی علاوه بر کاهش

و از مهم‌ترین عوامل کاهش عمر خدمت‌دهی روسازی‌های آسفالتی به شمار می‌رود. به‌طور کلی، شیارشدگی را می‌توان به دو دسته اصلی شامل: شیارشدگی سازه‌ای و شیارشدگی ناشی از تغییر شکل مخلوط آسفالتی تقسیم کرد. شیارشدگی سازه‌ای عمدتاً در اثر ضعف لایه‌های زیرین روسازی و کاهش ظرفیت باربری آن‌ها ایجاد می‌شود، در حالی که شیارشدگی مخلوط آسفالتی، تغییر شکل ماندگار در لایه آسفالتی است که در اثر بارگذاری تکراری چرخ و وسایل نقلیه و تجمع کرنش‌های ماندگار ناشی از تنش‌های فشاری و برشی ایجاد می‌شود. در میان عوامل مؤثر بر ایجاد شیارشدگی مخلوط آسفالتی، ویژگی‌های رئولوژیکی قیر نقش تعیین‌کننده‌ای دارند. کاهش سختی قیر در دماهای بالا موجب افزایش رفتار ویسکوز مخلوط آسفالتی و در نتیجه افزایش پتانسیل شیارشدگی می‌شود. از این‌رو، اصلاح قیر با استفاده از افزودنی‌های پلیمری به‌عنوان یکی از راهکارهای مؤثر برای بهبود عملکرد روسازی‌های آسفالتی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. استفاده از پلیمرها می‌تواند با افزایش سختی، بهبود رفتار ویسکوالاستیک و کاهش حساسیت حرارتی قیر، مقاومت مخلوط آسفالتی را در برابر شیارشدگی افزایش دهد. شیارشدگی در روسازی علاوه بر کاهش آسایش رانندگی، پیامدهای ایمنی قابل‌توجهی نیز به همراه دارد. تجمع آب در شیارهای ایجادشده می‌تواند احتمال وقوع پدیده آبلغزشی (هیدروپلنینگ) را افزایش داده و موجب کاهش اصطکاک بین لاستیک و سطح روسازی شود. همچنین انتخاب مناسب نوع قیر، مصالح سنگی و طرح اختلاط متناسب با شرایط اقلیمی و ترافیکی نقش مهمی در کنترل این خرابی ایفا می‌کند. مطالعات متعددی اثر افزودنی‌های پلیمری را بر عملکرد قیر و مخلوط آسفالتی بررسی کرده‌اند. نتایج این پژوهش‌ها نشان داده است که استفاده از پلیمرها می‌تواند موجب افزایش نقطه نرمی، کاهش درجه نفوذ، بهبود خواص رئولوژیکی قیر در دماهای بالا و افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر شیارشدگی شود. با وجود این، عملکرد پلی‌اتیلن سنگین به نوع پلیمر، درصد مصرف، مشخصات قیر پایه و شرایط بهره‌برداری وابسته است و همچنان نیاز به مطالعات تکمیلی برای تعیین درصد مناسب و ارزیابی عملکرد آن در شرایط مختلف وجود دارد. بر این اساس، هدف از این پژوهش بررسی تأثیر درصد‌های مختلف پلی‌اتیلن سنگین گرید ۵۲۱۸ (مقادیر ۳، ۵، ۶ و ۷ درصد وزنی قیر) بر ویژگی‌های فیزیکی و رئولوژیکی قیر خالص ۶۰/۷۰ و ارزیابی

مقاومت مخلوط آسفالتی گرم در برابر شیارشدگی است. برای این منظور، آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی، انگمی و کندروانی بر روی قیر اصلاح‌شده و همچنین آزمایش‌های پایداری و روانی مارشال و خزش دینامیکی بر روی مخلوط‌های آسفالتی انجام شد تا میزان تأثیر این افزودنی بر عملکرد روسازی آسفالتی مورد ارزیابی قرار گیرد.

در این پژوهش ارزیابی هم‌زمان اثر پلی‌اتیلن سنگین گرید ۵۲۱۸ بر ویژگی‌های فیزیکی و رئولوژیکی قیرهای خالص و همچنین عملکرد مخلوط آسفالتی گرم در برابر شیارشدگی مورد توجه قرار گرفته، درحالی که در بسیاری از مطالعات پیشین که صرفاً بر بررسی خواص قیر یا عملکرد مخلوط آسفالتی متمرکز بوده‌اند، در این پژوهش ارتباط میان تغییرات خواص قیر اصلاح‌شده و چگونگی تغییر شکل دائمی مخلوط آسفالتی از طریق آزمون خزش دینامیکی در دو سطح دمایی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. و در ادامه مناسبترین میزان پلی‌اتیلن سنگین در محدوده ۳ تا ۷ درصد بر اساس مجموعه‌ای از شاخص‌های عملکردی قیر و مخلوط آسفالتی تعیین شده است.

۲-پیشینه تحقیق

استفاده از پلیمرها به‌عنوان اصلاح‌کننده قیر طی دهه‌های اخیر به یکی از راهکارهای مؤثر برای بهبود عملکرد روسازی‌های آسفالتی تبدیل شده است. در میان انواع پلیمرهای مورد استفاده، پلی‌اتیلن سنگین به دلیل فراوانی، هزینه نسبتاً پایین، پایداری حرارتی مناسب و توانایی بهبود خواص مکانیکی و رئولوژیکی قیر، مورد توجه گسترده پژوهشگران قرار گرفته است. احمدزاده و همکاران (۲۰۱۷) تأثیر پلی‌اتیلن سنگین را بر خواص فیزیکی و رئولوژیکی قیر بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که افزودن پلی‌اتیلن سنگین موجب کاهش درجه نفوذ، افزایش نقطه نرمی و بهبود رفتار الاستیک قیر می‌شود. همچنین نتایج آزمایش رئومتر برش دینامیکی بیانگر افزایش مدول برشی پیچیده و بهبود مقاومت قیر در برابر شیارشدگی بود. با این حال، پژوهشگران گزارش کردند که استفاده از مقادیر زیاد پلیمر می‌تواند عملکرد قیر را در دماهای پایین تحت تأثیر قرار داده و احتمال ترک‌خوردگی حرارتی را افزایش دهد. پونیت و ویراراگاو (۲۰۰۷) با بررسی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با پلی‌اتیلن نشان دادند که استفاده از این افزودنی موجب کاهش حساسیت دمایی و افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل‌های

دائمی می‌شود. نتایج پژوهش آن‌ها بیانگر عملکرد بهتر مخلوط‌های اصلاح‌شده در مقایسه با مخلوط‌های آسفالتی متداول بود. موتاسم و ال‌حدیدی (۲۰۱۱) پلی‌اتیلن سنگین را به‌عنوان اصلاح‌کننده قیر و مخلوط آسفالتی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آزمایش‌های مقاومت کششی، مقاومت خمشی و مدول انعطاف‌پذیری نشان داد که افزودن پلی‌اتیلن سنگین موجب بهبود رفتار خستگی و افزایش عملکرد مکانیکی مخلوط آسفالتی می‌شود و مقدار ۵ درصد پلی‌اتیلن سنگین بهترین عملکرد را در بین درصد‌های بررسی‌شده ارائه می‌کند. هینیشوخلو و آقار (۲۰۰۴) اثر درصد‌های مختلف پلی‌اتیلن سنگین و شرایط اختلاط را بر عملکرد مخلوط آسفالتی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزودن پلی‌اتیلن سنگین موجب افزایش قابل توجه پایداری مارشال و نسبت پایداری به روانی می‌شود. همچنین دمای ۱۶۵ درجه سلسیوس و زمان اختلاط ۳۰ دقیقه به‌عنوان شرایط بهینه اختلاط معرفی شد.

جئونگ و کیم (۲۰۱۱) با استفاده از پلی‌اتیلن ضایعاتی در مخلوط آسفالتی و انجام آزمایش‌های پایداری مارشال، مقاومت کششی غیرمستقیم و ردیابی چرخ گزارش کردند که مقاومت مخلوط‌های اصلاح‌شده در برابر شیارشدگی به‌طور محسوس بیشتری از مخلوط‌های متداول است.

عواد و شیبب (۲۰۱۸) عملکرد پلی‌اتیلن سنگین و پلی‌اتیلن سبک را در مخلوط آسفالتی گرم مورد مقایسه قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که هر دو نوع پلیمر موجب افزایش استقامت مارشال و بهبود تراکم‌پذیری مخلوط آسفالتی می‌شوند، اما پلی‌اتیلن سنگین در درصد‌های بالاتر عملکرد مطلوب‌تری از خود نشان می‌دهد. گلوکرت و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند که استفاده از پلی‌اتیلن سنگین در مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم تأثیر منفی محسوس بر مقاومت ترک‌خوردگی در دماهای پایین ندارد و در عین حال مقاومت خستگی مخلوط آسفالتی را بهبود می‌بخشد. مقدسی‌نژاد و همکاران (۲۰۱۴) اثر ۵ درصد پلی‌اتیلن سنگین را بر عملکرد مخلوط آسفالتی گرم حاوی مصالح گرانیی در شرایط خشک و مرطوب بررسی کردند. نتایج آزمایش خزش دینامیکی نشان داد که استفاده از این افزودنی موجب کاهش کرنش دائمی و افزایش چشمگیر مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر شیارشدگی می‌شود. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های جدید نیز اثربخشی پلی‌اتیلن سنگین در بهبود عملکرد روسازی‌های آسفالتی را تأیید کرده‌اند.

عبدالرحیم و همکاران (۲۰۲۳) با بررسی قیرهای اصلاح‌شده با پلی‌اتیلن سنگین و نانو رس نشان دادند که افزایش درصد HDPE موجب بهبود مقاومت شیارشدگی، افزایش سختی قیر و کاهش تغییر شکل دائمی مخلوط آسفالتی در دماهای بالا می‌شود. آرشدی و طاهرخانی (۲۰۲۴) اثر پلی‌اتیلن سنگین سبک را همراه با نانوسیلیس بر خواص فیزیکی و رئولوژیکی قیر بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که پلی‌اتیلن سنگین موجب افزایش بازیابی الاستیک، کاهش حساسیت دمایی و بهبود پایداری ذخیره‌سازی قیر می‌شود و تأثیر معنی‌داری بر پارامترهای مقاومت شیارشدگی دارد. جوانید و همکاران (۲۰۲۴) با ارزیابی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با پلی‌اتیلن سنگین و پلی‌اتیلن سبک گزارش کردند که استفاده از پلی‌اتیلن موجب بهبود عملکرد مکانیکی مخلوط و افزایش مقاومت آن در برابر تغییر شکل‌های دائمی می‌شود. همچنین پژوهش‌های جدید نشان داده‌اند که استفاده از پلیمرهای بازیافتی مبتنی بر پلی‌اتیلن علاوه بر افزایش مقاومت شیارشدگی و بهبود عملکرد مکانیکی مخلوط آسفالتی، می‌تواند به کاهش آثار زیست‌محیطی ناشی از پسماندهای پلاستیکی نیز کمک کند. مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که پلی‌اتیلن سنگین توانایی قابل توجهی در بهبود خواص فیزیکی و رئولوژیکی قیر و افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر شیارشدگی و تغییر شکل‌های دائمی دارد. با این وجود، نتایج پژوهش‌های مختلف درباره درصد بهینه مصرف پلی‌اتیلن سنگین یکسان نیست و هنوز درباره میزان تأثیر مقادیر مختلف این افزودنی بر عملکرد هم‌زمان قیر و مخلوط آسفالتی اجماع مشخصی وجود ندارد. همچنین مطالعات محدودی به بررسی توان و ویژگی‌های فیزیکی و رئولوژیکی قیر اصلاح‌شده و رفتار شیارشدگی مخلوط آسفالتی از طریق آزمایش خزش دینامیکی پرداخته‌اند. از این رو، در پژوهش حاضر تأثیر مقادیر مختلف پلی‌اتیلن سنگین گرید ۵۲۱۸ بر خواص قیر و مقاومت شیارشدگی مخلوط آسفالتی گرم به‌صورت جامع مورد ارزیابی قرار گرفته است. با وجود مطالعات متعدد درباره کاربرد پلی‌اتیلن سنگین در اصلاح قیر، هنوز اجماع مشخصی درباره درصد بهینه مصرف HDPE و تأثیر هم‌زمان آن بر ویژگی‌های رئولوژیکی قیر و عملکرد شیارشدگی مخلوط آسفالتی وجود ندارد. بسیاری از پژوهش‌های پیشین تنها بر خواص قیر یا آزمون‌های مکانیکی محدود تمرکز داشته‌اند و تعداد محدودی از مطالعات رفتار مخلوط‌های اصلاح‌شده را تحت بارگذاری تکراری و در شرایط دمایی مختلف بررسی کرده‌اند. از این رو، بررسی جامع ارتباط بین خواص قیر اصلاح‌شده و مقاومت شیارشدگی مخلوط آسفالتی

با استفاده از آزمون خزش دینامیکی می‌تواند بخشی از این خلأ پژوهشی را پوشش دهد.

۳- اهداف پژوهش

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که استفاده از پلی‌اتیلن سنگین به‌عنوان اصلاح‌کننده قیر می‌تواند موجب بهبود خواص فیزیکی و رئولوژیکی قیر و افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر شیارشدگی شود. به‌عنوان نمونه، مقدسی‌نژاد و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند که افزودن ۵ درصد پلی‌اتیلن سنگین به قیر موجب کاهش حساسیت دمایی و افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر تغییر شکل‌های دائمی می‌شود. با این حال، اطلاعات محدودی درباره عملکرد مقادیر بالاتر پلی‌اتیلن سنگین و تأثیر آن بر رفتار هم‌زمان قیر و مخلوط آسفالتی وجود دارد. بر این اساس، هدف اصلی پژوهش حاضر، بررسی اثر مقادیر مختلف پلی‌اتیلن سنگین گرید ۵۲۱۸، شامل ۳، ۵، ۶ و ۷ درصد وزنی، بر ویژگی‌های فیزیکی و رئولوژیکی قیر خالص ۶۰/۷۰ و همچنین عملکرد مخلوط آسفالتی گرم در برابر شیارشدگی است. همچنین، در این پژوهش درصد بهینه افزودنی که بیشترین مقاومت در برابر تغییر شکل ماندگار را ایجاد می‌کند، تعیین می‌شود.

اهداف اختصاصی این پژوهش عبارت‌اند از:

- بررسی اثر درصدهای مختلف پلی‌اتیلن سنگین بر خواص فیزیکی و رئولوژیکی قیر پایه با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ و مقایسه آن با قیر شاهد.

- ارزیابی عملکرد مخلوط آسفالتی گرم حاوی قیر اصلاح‌شده با پلی‌اتیلن سنگین، با استفاده از پارامترهای مارشال.

- بررسی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده در برابر تغییر شکل دائمی و شیارشدگی با استفاده از آزمایش خزش دینامیکی.

۴- مصالح مصرفی

۴-۱- قیر پایه

در این پژوهش از قیر خالص با درجه نفوذ ۶۰-۷۰ و رده عملکردی (PG 64-22) به‌عنوان قیر پایه استفاده شد. این نوع قیر از متداول‌ترین قیرهای مورد استفاده در روسازی‌های آسفالتی کشور بوده و به دلیل عملکرد مناسب در شرایط اقلیمی مختلف، در بسیاری از پروژه‌های راه‌سازی کاربرد دارد. به‌منظور اطمینان از انطباق مشخصات قیر با الزامات فنی، آزمایش‌های متداول فیزیکی مطابق استانداردهای ASTM انجام شد. نتایج مشخصات فیزیکی قیر پایه در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات قیر پایه مصرفی

خصوصیات	قیر ۶۰/۷۰	روش آزمایش
وزن مخصوص در ۲۵ درجه سانتی‌گراد	۱/۰۱۷	ASTM D-70
درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی‌گراد	۶۰	ASTM D-5
نقطه نرمی (درجه سانتی‌گراد)	۵۱/۴	ASTM D-36
انگمی در ۲۵ درجه سانتی‌گراد	+۱۰۰	ASTM D-113
نقطه اشتغال	۳۲۶	ASTM D-92
نقطه احتراق	۳۳۹	ASTM D-70

۴-۲- مصالح سنگی

مصالح سنگی مورد استفاده در این پژوهش از نوع مصالح متداول روسازی آسفالتی بوده و پس از انجام آزمایش‌های کنترل کیفیت انتخاب شدند. از آنجا که بخش عمده حجم و وزن مخلوط آسفالتی را سنگدانه‌ها تشکیل می‌دهند، کیفیت و ویژگی‌های فیزیکی آن‌ها تأثیر مستقیمی بر مقاومت مکانیکی،

دوام و عملکرد مخلوط آسفالتی دارد. به‌منظور ارزیابی کیفیت مصالح، آزمایش‌های مختلفی شامل سایش لس‌آنجلس، مقاومت در برابر سولفات سدیم، درصد شکستگی، شاخص تورق و گوشه‌داری مطابق استانداردهای ASTM انجام شد. نتایج این آزمایش‌ها در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است.

جدول ۲. نتایج آزمایش‌های کنترل کیفیت مصالح سنگی درشت‌دانه

مشخصه	استاندارد	نتیجه آزمایش
مصالح سنگی درشت‌دانه		
افت وزنی در مقابل سایش به روش لس آنجلس (درصد)	ASTM-C131	۲۰
افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (درصد)	ASTM-C88	۰/۶
سنگدانه‌های پهن و دراز (درصد)	ASTM-D4791	۰/۴
حداکثر ضریب تورق (درصد)	ASTM-BS812	۱۶
شکستگی مصالح سنگی روی الک شماره ۴ (درصد)	ASTM-D5821	۹۸

جدول ۳. نتایج آزمایش‌های کنترل کیفیت مصالح سنگی ریزدانه

مشخصه	استاندارد	نتیجه آزمایش
مصالح سنگی ریزدانه		
حدود اتربرگ	ASTM-D4318	دامنه خمیری (PI)
		حد خمیری (PL)
		حد روانی (LL)
افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (درصد)	ASTM-C88	۰/۹
گوشه‌داری مصالح سنگی ریزدانه - روش A (درصد)	ASTM-C1252	۴۵/۴

محدوده میانی مشخصات فنی قرار گرفت. منحنی دانه‌بندی و درصد عبوری از الک‌های مختلف در جدول ۴ ارائه شده است.

دانه‌بندی مصالح سنگی مطابق محدوده مجاز دانه‌بندی شماره ۴ نشریه ۲۳۴ سازمان برنامه و بودجه انتخاب شد. به‌منظور دستیابی به یک طرح اختلاط مناسب، دانه‌بندی مخلوط در

جدول ۴. دانه‌بندی مخلوط مصالح سنگی

اندازه الک (میلی‌متر)	حدود مشخصات دانه‌بندی شماره ۴ (درصد)	دانه‌بندی پیشنهادی (استفاده شده در طرح)	دانه‌بندی مخلوط حاصل از نسبت‌های فوق (درصد)
۱۹	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۱۲/۵	۹۰-۱۰۰	۹۵	۹۵
۴/۷۵	۷۴-۸۴	۵۶	۵۸
۲/۳۶	۵۸-۲۸	۳۵	۳۴
۰/۳	۲۱-۵	۱۱	۱۲
۰/۰۷۵	۱۰-۲	۵	۵

۴-۳- پلی‌اتیلن سنگین

پایداری حرارتی مطلوب، مقاومت شیمیایی بالا و قابلیت اختلاط با قیر، در سال‌های اخیر توجه زیادی را در حوزه اصلاح قیر و آسفالت به خود جلب کرده است. در این پژوهش از پلی‌اتیلن سنگین گرید ۵۲۱۸ استفاده شد. این گرید دارای دانسیته نسبتاً

به‌منظور اصلاح خواص قیر و بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر شیارشدگی، از پلی‌اتیلن سنگین به‌عنوان افزودنی پلیمری استفاده شد. پلی‌اتیلن سنگین یکی از پرکاربردترین پلیمرهای ترموپلاستیک است که به دلیل مقاومت مکانیکی مناسب،

در مقادیر ۳، ۵، ۶ و ۷ درصد وزنی قیر به قیر پایه افزوده شد و نمونه‌های اصلاح‌شده برای انجام آزمایش‌های مختلف آماده گردیدند. مشخصات فیزیکی و فنی پلی‌اتیلن سنگین گرید ۵۲۱۸ در جدول ۵ ارائه شده است.

بالا، استحکام مکانیکی مناسب و قابلیت فرآیندپذیری مطلوب بوده و در صنایع مختلف از جمله تولید ظروف پلاستیکی، قطعات تزریقی و محصولات قالب‌گیری‌شده کاربرد دارد. بر اساس مطالعات پیشین، این نوع پلیمر می‌تواند با افزایش سختی قیر و کاهش حساسیت حرارتی آن، مقاومت مخلوط آسفالتی را در برابر تغییر شکل‌های دائمی و شیارشدگی بهبود بخشد. به‌منظور بررسی تأثیر میزان افزودنی، پلی‌اتیلن سنگین

جدول ۵. مشخصات پلی‌اتیلن سنگین گرید ۵۲۱۸

نام و فرمول شیمیایی	مشخصات
M.F.I (190°C/2.16 kg)	۱۸ (gr/10 min)
نقطه نرمی	۱۱۵ °C
شکل ظاهری	جامد-سفید-گرانول
دمای انتقال شیشه ای	۱۰۳-۱۳۷ °C
کشیدگی در شکستن (MD)	۴۰۰ دقیقه
کشش در حالت استراحت (TD)	۹۰۰ دقیقه
دمای ذوب	۱۲۰-۱۲۵ °C
دانسیته	۰/۹۵۲ (gr/cm ³)
درصد کریستالی	۳۳٪ تا ۵۳٪



شکل ۱. پلی‌اتیلن سنگین مورد استفاده در پژوهش

سپس پلی‌اتیلن سنگین (HDPE) گرید ۵۲۱۸ در مقادیر ۳، ۵، ۶ و ۷ درصد وزنی نسبت به وزن قیر به نمونه‌ها افزوده شد. اختلاط قیر و پلی‌اتیلن با استفاده از همزن دوربالا و با سرعت

۴-۴-شیوه اختلاط و روش آزمایش

به‌منظور تهیه قیرهای اصلاح‌شده، ابتدا قیر پایه ۷۰-۶۰ تا دمای ۱۸۵ درجه سلسیوس گرم شد تا به حالت کاملاً روان برسد.

۵- روش انجام آزمایش‌ها

۵-۱- آزمایش‌های انجام‌شده بر روی قیر

به‌منظور ارزیابی تأثیر پلی‌اتیلن سنگین بر خواص فیزیکی و رئولوژیکی قیر، آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی، انکمی و ویسکوزیته چرخشی بر روی قیر پایه و قیرهای اصلاح‌شده انجام شد.

۵-۱-۱- آزمایش درجه نفوذ

آزمایش درجه نفوذ به‌منظور ارزیابی سختی نسبی قیر و میزان نفوذ سوزن استاندارد در شرایط مشخص انجام شد. این آزمایش مطابق استاندارد ASTM D5 و در دمای ۲۵ درجه سلسیوس صورت گرفت. کاهش مقدار درجه نفوذ نشان‌دهنده افزایش سختی و بهبود مقاومت قیر در برابر تغییر شکل‌های دائمی است (Aashto, 1993).

۵-۱-۲- آزمایش نقطه نرمی

به‌منظور بررسی حساسیت حرارتی قیرها، آزمایش نقطه نرمی به روش حلقه و گلوله مطابق استاندارد ASTM D36 انجام شد. افزایش نقطه نرمی بیانگر بهبود عملکرد قیر در دماهای بالا و افزایش مقاومت آن در برابر روان‌شدگی و شیارشدگی است (Aashto, 1993).

۵-۱-۳- آزمایش انکمی

آزمایش انکمی به‌منظور ارزیابی توانایی قیر در تحمل تغییر شکل کششی پیش از گسیختگی انجام شد. این آزمایش مطابق استاندارد ASTM D113 و در دمای ۲۵ درجه سلسیوس صورت گرفت. نتایج این آزمون می‌تواند شاخصی از انعطاف‌پذیری و چسبندگی قیر باشد (Hunter, 2004).

۵-۱-۴- آزمایش ویسکوزیته چرخشی

ویسکوزیته چرخشی به‌منظور ارزیابی رفتار جریان‌یافتگی قیر در دماهای بالا اندازه‌گیری شد. این آزمایش با استفاده از ویسکومتر چرخشی مطابق استاندارد ASTM D4402 در دمای ۱۳۵ درجه سلسیوس و سرعت دوران ۲۰ دور بر دقیقه انجام شد. افزایش ویسکوزیته نشان‌دهنده افزایش مقاومت قیر در برابر تغییر شکل و بهبود عملکرد آن در شرایط بهره‌برداری است (Hunter, 2004).

۳۰۰۰ دور بر دقیقه در دمای ۱۸۵ درجه سلسیوس انجام شد. مدت زمان اختلاط برای هر نمونه ۶۰ دقیقه در نظر گرفته شد تا توزیع یکنواخت پلیمر در قیر حاصل شود و از تشکیل توده‌های پلیمری جلوگیری گردد (کبریتچی، جلالی و روغن‌زاده، ۲۰۱۱). پس از تهیه قیرهای اصلاح‌شده، آزمایش‌های متداول فیزیکی شامل درجه نفوذ، نقطه نرمی و انکمی مطابق استانداردهای ASTM بر روی قیر پایه و قیرهای اصلاح‌شده انجام شد. همچنین به‌منظور ارزیابی رفتار رئولوژیکی قیر، آزمایش ویسکوزیته چرخشی بر روی تمامی نمونه‌ها صورت گرفت. در مرحله بعد، طرح اختلاط مخلوط آسفالتی به روش مارشال مطابق نشریه ۲۳۴ و استاندارد ASTM D6927 انجام شد. برای هر درصد پلی‌اتیلن، نمونه‌های مارشال تهیه و پارامترهای پایداری، روانی، درصد فضای خالی، فضای خالی پرشده با قیر و وزن مخصوص حجمی تعیین گردید. بر اساس نتایج حاصل از طرح اختلاط، درصد قیر بهینه برابر ۴٫۵ درصد وزن کل مخلوط آسفالتی تعیین شد و در ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور ارزیابی مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر تغییر شکل‌های دائمی و شیارشدگی، آزمایش خزش دینامیکی بر روی نمونه‌های شاهد و اصلاح‌شده انجام شد. این آزمایش در شرایط بارگذاری تکراری و دمای ۴۰ درجه سلسیوس اجرا گردید تا رفتار مخلوط آسفالتی در شرایط نزدیک به بهره‌برداری واقعی مورد بررسی قرار گیرد. کرنش تجمعی و میزان تغییر شکل دائمی نمونه‌ها در طول چرخه‌های بارگذاری ثبت و تحلیل شد. به‌منظور افزایش قابلیت اعتماد نتایج، تمامی آزمایش‌ها حداقل در سه تکرار انجام شد و میانگین نتایج به‌عنوان مقدار نهایی گزارش گردید. همچنین برای مقایسه عملکرد نمونه‌های مختلف، درصد تغییرات پارامترهای اندازه‌گیری‌شده نسبت به نمونه شاهد محاسبه و مورد تحلیل قرار گرفت.

تحلیل آماری داده‌ها به‌منظور بررسی معنی‌داری اثر پلی‌اتیلن سنگین بر ویژگی‌های قیر و مخلوط آسفالتی، داده‌های حاصل از آزمایش‌ها با استفاده از روش‌های آماری توصیفی شامل میانگین، انحراف معیار و درصد تغییرات مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین برای مقایسه نتایج نمونه‌های مختلف و تعیین اثر معنی‌دار درصد پلی‌اتیلن سنگین بر پارامترهای مورد بررسی، از تحلیل واریانس یک‌طرفه (One-Way ANOVA) در سطح اطمینان ۹۵ درصد استفاده شد.

۵-۲-۲- آزمایش‌های انجام‌شده بر روی مخلوط آسفالتی

به‌منظور ارزیابی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی حاوی پلی‌اتیلن سنگین، آزمایش‌های پایداری و روانی مارشال و همچنین آزمایش خزش دینامیکی انجام شد.

۵-۲-۱- آزمایش پایداری و روانی مارشال

طرح اختلاط و ارزیابی عملکرد اولیه مخلوط‌های آسفالتی به روش مارشال و مطابق استاندارد ASTM D6927 انجام شد. نمونه‌های استوانه‌ای مارشال با وزن تقریبی ۱۲۰۰ گرم تهیه و

پس از عمل‌آوری در حمام آب با دمای استاندارد، تحت بارگذاری فشاری قرار گرفتند.

در این آزمایش دو پارامتر اصلی اندازه‌گیری شد:

پایداری مارشال (Marshall Stability): حداکثر نیروی قابل تحمل توسط نمونه پیش از گسیختگی.

روانی مارشال (Marshall Flow): میزان تغییر شکل نمونه در لحظه دستیابی به بار حداکثر.

علاوه بر این، نتایج آزمایش مارشال برای تعیین درصد قیر بهینه مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۲. چیدمان دستگاه آزمایش مارشال



شکل ۳. نمونه‌های مارشال قبل و بعد از آزمایش

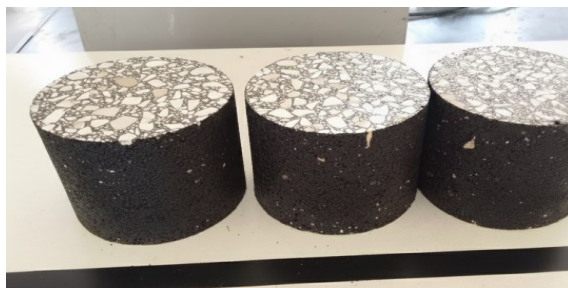
۵-۲-۲- آزمایش خزش دینامیکی

به‌منظور ارزیابی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر تغییر شکل‌های دائمی و شیارشدگی، آزمایش خزش دینامیکی بر روی نمونه‌های شاهد و اصلاح‌شده انجام شد. این آزمایش یکی از متداول‌ترین روش‌های ارزیابی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در دماهای بالا بوده و توانایی مخلوط در تحمل بارهای تکراری ناشی از عبور وسایل نقلیه را بررسی می‌کند. نمونه‌های مورد

استفاده در این آزمایش با دستگاه تراکم چرخشی سوپرپیو (Superpave Gyratory Compactor-SGC) ساخته شدند. استفاده از دستگاه SGC به دلیل ایجاد شرایط تراکم نزدیک به شرایط واقعی روسازی، در بسیاری از آیین‌نامه‌های بین‌المللی توصیه شده است. نمونه‌ها به‌صورت استوانه‌ای تهیه شده و پیش از انجام آزمایش به دمای موردنظر رسانده شدند.

در آزمایش خزش دینامیکی، تنش فشاری تکراری تک‌محوره به نمونه اعمال و کرنش تجمعی ایجاد شده در طول بارگذاری ثبت گردید. آزمایش تحت تنش ۲۰۰ کیلوپاسکال و در ۱۰۰۰۰ چرخه بارگذاری انجام شد. زمان اعمال بار و زمان استراحت به ترتیب ۰/۱ و ۰/۹ ثانیه در نظر گرفته شد. همچنین آزمایش در دماهای ۴۰ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد اجرا شد تا رفتار مخلوط آسفالتی در شرایط دمایی مختلف مورد ارزیابی قرار گیرد.

در آزمایش خزش دینامیکی، تنش فشاری تکراری تک‌محوره به نمونه اعمال و کرنش تجمعی ایجاد شده در طول بارگذاری ثبت گردید. آزمایش تحت تنش ۲۰۰ کیلوپاسکال و در ۱۰۰۰۰ چرخه بارگذاری انجام شد. زمان اعمال بار و زمان استراحت به ترتیب ۰/۱ و ۰/۹ ثانیه در نظر گرفته شد. همچنین آزمایش در دماهای ۴۰ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد اجرا شد تا رفتار مخلوط آسفالتی در شرایط دمایی مختلف مورد ارزیابی قرار گیرد.



شکل ۴. نمونه‌های متراکم‌شده با دستگاه تراکم چرخشی (SGC) آماده‌شده برای انجام آزمایش خزش دینامیکی

مهم‌ترین خروجی این آزمایش، نمودار کرنش تجمعی برحسب تعداد چرخه‌های بارگذاری است. کاهش کرنش تجمعی و نرخ تغییر شکل دائمی نشان‌دهنده افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر شیارشدگی و بهبود عملکرد آن تحت بارگذاری‌های تکراری است. بر این اساس، عملکرد نمونه‌های اصلاح‌شده با پلی‌اتیلن سنگین با نمونه شاهد مقایسه شد. به‌منظور افزایش قابلیت اعتماد نتایج، برای هر طرح اختلاط حداقل سه نمونه آزمایشگاهی تهیه و میانگین نتایج گزارش شد. همچنین تمامی نمونه‌ها پیش از انجام آزمایش از نظر یکنواختی تراکم و کیفیت ساخت کنترل شدند. ابعاد نمونه‌های مورد استفاده مطابق مشخصات متداول آزمایش خزش دینامیکی و الزامات دستگاه آزمایش انتخاب شد.

مهم‌ترین خروجی این آزمایش، نمودار کرنش تجمعی برحسب تعداد چرخه‌های بارگذاری است. کاهش کرنش تجمعی و نرخ تغییر شکل دائمی نشان‌دهنده افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر شیارشدگی و بهبود عملکرد آن تحت بارگذاری‌های تکراری است. بر این اساس، عملکرد نمونه‌های اصلاح‌شده با پلی‌اتیلن سنگین با نمونه شاهد مقایسه شد. به‌منظور افزایش قابلیت اعتماد نتایج، برای هر طرح اختلاط حداقل سه نمونه آزمایشگاهی تهیه و میانگین نتایج گزارش شد. همچنین تمامی نمونه‌ها پیش از انجام آزمایش از نظر یکنواختی تراکم و کیفیت ساخت کنترل شدند. ابعاد نمونه‌های مورد استفاده مطابق مشخصات متداول آزمایش خزش دینامیکی و الزامات دستگاه آزمایش انتخاب شد.



شکل ۵. چیدمان و نحوه استقرار نمونه در دستگاه آزمایش خزش دینامیکی تحت بارگذاری تکراری اکتباس و بازطراحی از (Bara' W. Al-Mistarehi et al, 2024)

داده‌ها، انحراف معیار و ضریب تغییرات محاسبه شد. در مرحله نخست، از آمار توصیفی شامل میانگین، حداقل، حداکثر، انحراف معیار و درصد تغییرات نسبت به نمونه شاهد برای توصیف داده‌ها استفاده شد.

۳-۵- روش تحلیل آماری داده‌ها

به‌منظور افزایش قابلیت اعتماد نتایج و ارزیابی تأثیر پلی‌اتیلن سنگین بر ویژگی‌های قیر و مخلوط آسفالتی، تمامی آزمایش‌ها حداقل در سه تکرار انجام شد و میانگین نتایج به‌عنوان مقدار نهایی گزارش گردید. همچنین برای بررسی میزان پراکندگی

۶- نتایج و بحث

۶-۱- نتایج آزمایش‌های قیر

۶-۱-۱- نتایج آزمایش درجه نفوذ

نتایج آزمایش درجه نفوذ در جدول ۶ ارائه شده است. مطابق نتایج، با افزایش درصد پلی‌اتیلن سنگین، مقدار درجه نفوذ قیر به‌طور پیوسته کاهش یافت. درجه نفوذ قیر پایه از ۶۴ دسی‌میلی‌متر به ۴۸، ۴۳، ۴۱ و ۳۸ دسی‌میلی‌متر به‌ترتیب برای مقادیر ۳، ۵، ۶ و ۷ درصد پلی‌اتیلن سنگین کاهش یافت. این نتایج نشان می‌دهد که افزودن پلی‌اتیلن سنگین موجب افزایش سختی قیر و کاهش حساسیت آن به بارگذاری در دماهای بالا می‌شود. در مقایسه با قیر پایه، استفاده از ۷ درصد پلی‌اتیلن سنگین موجب کاهش حدود ۴۱ درصدی درجه نفوذ شد که بیانگر افزایش قابل توجه مقاومت قیر در برابر تغییر شکل‌های دائمی است. کاهش درجه نفوذ را می‌توان به تشکیل شبکه پلیمری در ساختار قیر و افزایش پیوستگی بین اجزای قیر و پلیمر نسبت داد.

این رفتار با نتایج مطالعات احمدزاده و همکاران (2017)، Punith and Awwad and Shbeeb (2018) و Veeraragavan (2007) همخوانی دارد که افزایش سختی و بهبود مقاومت شیارشدگی قیرهای اصلاح‌شده با پلی‌اتیلن را گزارش کرده‌اند. کاهش پیوسته درجه نفوذ نشان‌دهنده افزایش سختی قیر و کاهش حساسیت آن به تغییر شکل‌های دائمی است. بیشترین کاهش مربوط به نمونه حاوی ۷ درصد پلی‌اتیلن سنگین است.

سپس به‌منظور مقایسه عملکرد نمونه‌های مختلف و بررسی تأثیر درصد پلی‌اتیلن سنگین بر پارامترهای مورد مطالعه، از تحلیل واریانس یک‌طرفه (One-Way ANOVA) در سطح اطمینان ۹۵ درصد استفاده شد.

در مواردی که نتایج تحلیل واریانس وجود اختلاف معنی‌دار بین گروه‌ها را نشان داد ($0.05 > p$)، از آزمون مقایسه چندگانه توکی (Tukey Post Hoc Test) برای تعیین گروه‌های دارای اختلاف معنی‌دار استفاده شد. همچنین برای بررسی ارتباط بین درصد پلی‌اتیلن سنگین و پارامترهای عملکردی از جمله درجه نفوذ، نقطه نرمی، ویسکوزیته، پایداری مارشال و کرنش تجمعی حاصل از آزمایش خزش دینامیکی، ضریب همبستگی پیرسون محاسبه شد. به‌منظور ارزیابی میزان تأثیر پلی‌اتیلن سنگین بر بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی، درصد بهبود هر پارامتر نسبت به نمونه شاهد از رابطه زیر محاسبه شد:

$$\text{درصد بهبود} = ((\text{مقدار اصلاح‌شده} - \text{مقدار شاهد}) \div \text{مقدار شاهد}) \times 100$$

نتایج تحلیل‌های آماری برای تفسیر یافته‌ها و تعیین درصد بهینه پلی‌اتیلن سنگین مورد استفاده قرار گرفت. پیش از انجام تحلیل واریانس، نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک (Shapiro-Wilk) و همگنی واریانس‌ها با استفاده از آزمون لون (Levene's Test) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که داده‌ها از توزیع نرمال پیروی کرده و شرط همگنی واریانس‌ها برقرار است ($P > 0.05$). بنابراین استفاده از تحلیل واریانس یک‌طرفه برای مقایسه گروه‌ها مناسب تشخیص داده شد. علاوه بر سطح معنی‌داری، اندازه اثر نیز با استفاده از شاخص مجذور اتا (η^2) محاسبه شد تا میزان تأثیر پلی‌اتیلن سنگین بر متغیرهای مورد بررسی مشخص شود.

جدول ۶. نتایج آزمایش درجه نفوذ

نمونه	درجه نفوذ (dmm)	درصد تغییر نسبت به قیر خالص
قیر خالص	64	-
HDPE +3% قیر خالص	48	25% کاهش
HDPE +5% قیر خالص	43	32.8% کاهش
HDPE +6% قیر خالص	41	35.9% کاهش
HDPE +7% قیر خالص	38	40.6% کاهش

جدول ۷. نتایج آزمایش نقطه نرمی

نمونه	نقطه نرمی (°C)	درصد تغییر نسبت به قیر خالص
قیر خالص	51.4	-
HDPE +3% قیر خالص	55.3	7.6% افزایش
HDPE +5% قیر خالص	60.8	18.3% افزایش
HDPE +6% قیر خالص	63.2	22.9% افزایش
HDPE +7% قیر خالص	69.5	35.2% افزایش

۶-۱-۲- نتایج آزمایش نقطه نرمی

نتایج جدول ۷ نشان می‌دهد که با افزایش درصد پلی‌اتیلن سنگین، نقطه نرمی قیر به‌طور مستمر افزایش یافته است. نقطه نرمی از ۵۱/۴ درجه سانتی‌گراد در قیر پایه به ۶۹/۵ درجه سانتی‌گراد در نمونه حاوی ۷ درصد پلی‌اتیلن سنگین رسید که معادل افزایش حدود ۳۵ درصدی است. افزایش نقطه نرمی نشان‌دهنده کاهش حساسیت حرارتی قیر و بهبود پایداری آن در دماهای بالا است. از دیدگاه عملکرد روسازی، این موضوع اهمیت زیادی دارد؛ زیرا در مناطق گرمسیر یا مسیرهای پرترافیک، افزایش نقطه نرمی موجب کاهش احتمال روان‌شدگی

قیر و ایجاد شیارشدگی می‌شود. نتایج حاضر با یافته‌های Jeong Moatasim and Al-Hadidy, and Kim (2011) و پژوهش‌های اخیر حوزه قیرهای پلیمری مطابقت دارد که افزایش نقطه نرمی را یکی از مهم‌ترین مزایای استفاده از پلی‌اتیلن سنگین معرفی کرده‌اند. افزایش نقطه نرمی نشان می‌دهد که قیر اصلاح‌شده در دماهای بالا پایداری بیشتری داشته و مقاومت بیشتری در برابر روان‌شدگی و شیارشدگی خواهد داشت.

۶-۱-۳- نتایج آزمایش انگمی

نتایج جدول ۸ نشان می‌دهد که افزودن پلی‌اتیلن سنگین موجب کاهش قابل توجه انگمی قیر شده است. مقدار انگمی از بیش از ۱۰۰ سانتی‌متر در قیر پایه به ۱۵ سانتی‌متر در نمونه حاوی ۷ درصد پلی‌اتیلن سنگین کاهش یافت. این کاهش بیانگر افزایش سختی و کاهش انعطاف‌پذیری قیر در اثر حضور پلیمر است. به عبارت دیگر، پلی‌اتیلن سنگین اگرچه مقاومت قیر را در برابر تغییر شکل‌های دائمی افزایش می‌دهد، اما می‌تواند باعث کاهش

شکل‌پذیری و افزایش احتمال رفتار ترد در دماهای پایین شود. کاهش انگمی در قیرهای اصلاح‌شده با پلی‌اتیلن در مطالعات پیشین نیز گزارش شده است. بنابراین انتخاب درصد بهینه افزودنی باید به گونه‌ای باشد که ضمن افزایش مقاومت شیارشدگی، افت شدید انعطاف‌پذیری رخ ندهد. هرچند افزایش HDPE موجب بهبود مقاومت شیارشدگی می‌شود، اما کاهش انگمی بیانگر افزایش سختی و کاهش انعطاف‌پذیری قیر است.

جدول ۸. نتایج آزمایش انگمی

نمونه	ویسکوزیته (Pa.s)	درصد تغییر نسبت به قیر خالص
قیر خالص	0.374	-
HDPE +3% قیر خالص	0.565	51.1% افزایش
HDPE +5% قیر خالص	0.769	105.6% افزایش
HDPE +6% قیر خالص	1.261	237.2% افزایش
HDPE +7% قیر خالص	1.517	305.6% افزایش

جدول ۹. نتایج آزمایش ویسکوزیته چرخشی

نمونه	کشش پذیری (cm)	درصد تغییر نسبت به قیر خالص
قیر خالص	100+	-
HDPE +3% قیر خالص	43	57% کاهش
HDPE +5% قیر خالص	31.5	68.5% کاهش
HDPE +6% قیر خالص	22.1	77.9% کاهش
HDPE +7% قیر خالص	15	85% کاهش

۶-۱-۴- نتایج آزمایش ویسکوزیته چرخشی

نتایج جدول ۹ نشان می‌دهد که ویسکوزیته چرخشی تمامی نمونه‌های اصلاح‌شده نسبت به قیر پایه افزایش یافته است. ویسکوزیته قیر پایه از ۳۷۴/۰ پاسکال‌ثانیه به ۵۱۷/۱ پاسکال‌ثانیه در نمونه حاوی ۷ درصد پلی‌اتیلن سنگین افزایش یافت که معادل بیش از چهار برابر مقدار اولیه است. افزایش ویسکوزیته نشان‌دهنده افزایش مقاومت قیر در برابر جریان‌یافتگی در دماهای بالا است. با وجود این افزایش، تمامی نمونه‌ها مقدار کمتر از حد مجاز ۳ پاسکال‌ثانیه تعیین‌شده در مشخصات Superpave را حفظ کردند؛ بنابراین استفاده از پلی‌اتیلن سنگین موجب ایجاد مشکل اجرایی در فرآیند اختلاط و تراکم مخلوط آسفالتی نخواهد شد. در مجموع، نتایج آزمایش‌های قیر نشان می‌دهد که

افزودن پلی‌اتیلن سنگین موجب افزایش سختی، افزایش نقطه نرمی و افزایش ویسکوزیته شده و در نتیجه مقاومت قیر در برابر شیارشدگی را بهبود می‌بخشد. افزایش ویسکوزیته نشان‌دهنده افزایش مقاومت قیر در برابر جریان‌یافتگی در دماهای بالا است. این موضوع ارتباط مستقیمی با بهبود مقاومت شیارشدگی دارد. افزایش ویسکوزیته و کاهش درجه نفوذ را می‌توان به تشکیل ساختارهای پلیمری در فاز قیر نسبت داد. حضور ذرات پلی‌اتیلن سنگین موجب محدود شدن حرکت اجزای سبک قیر و افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل می‌شود. در نتیجه، مدول برشی مخلوط افزایش یافته و حساسیت حرارتی قیر کاهش می‌یابد. این مکانیسم سبب کاهش جریان پلاستیک در دماهای بالا و

افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر شیارشدگی می‌شود. نتایج حاصل با گزارش‌های (Liu et al., Wang et al. (2022) و (2023) و Zhou et al. (2024) مطابقت دارد.

۶-۲-۲- نتایج آزمایش‌های مخلوط آسفالتی

۶-۲-۱- نتایج آزمایش پایداری و روانی مارشال

مطابق نتایج جدول ۱۰، پایداری مارشال با افزایش درصد پلی‌اتیلن سنگین روندی صعودی داشته است. مقدار پایداری از ۱۰۵۶ کیلوگرم در مخلوط شاهد به ۱۸۲۸ کیلوگرم در مخلوط حاوی ۷ درصد پلی‌اتیلن سنگین افزایش یافت که بیانگر رشد حدود ۷۳ درصدی مقاومت باربری مخلوط آسفالتی است. افزایش پایداری مارشال را می‌توان ناشی از افزایش سختی قیر، بهبود پیوند قیر و سنگدانه و افزایش مقاومت مخلوط در برابر

تغییر شکل‌های پلاستیک دانست. این نتایج با یافته‌های Jeong and Kim، Hinislioglu and Agar (2004) (2011) و Awwad and Shbeeb (2018) مطابقت دارد.

در مقابل، روانی مارشال تغییر محسوسی نداشت و در محدوده ۶/۲ تا ۷/۲ میلی‌متر باقی ماند. این موضوع نشان می‌دهد که افزودن پلی‌اتیلن سنگین بدون ایجاد تغییر نامطلوب در قابلیت تغییر شکل مخلوط، موجب افزایش مقاومت آن شده است. پایداری مارشال با افزایش درصد پلی‌اتیلن سنگین روند افزایشی داشته است، درحالی‌که روانی تقریباً ثابت باقی مانده است. این موضوع نشان می‌دهد که افزایش مقاومت مخلوط بدون افت معنی‌دار در قابلیت تغییر شکل حاصل شده است.

جدول ۱۰. نتایج آزمایش پایداری و روانی مارشال

نمونه	پایداری مارشال (کیلوگرم)	درصد تغییر نسبت به شاهد	روان (میلی متر)	درصد تغییر نسبت به شاهد
قیر خالص	1056	-	2.7	-
3% HDPE	1630	54.4% افزایش	2.6	3.7% کاهش
5% HDPE	1721	63.0% افزایش	2.6	3.7% کاهش
6% HDPE	1792	69.7% افزایش	2.7	بدون تغییر
7% HDPE	1828	73.1% افزایش	2.7	بدون تغییر

ارائه کند. نتایج حاصل از آزمایش خزش دینامیکی در شکل‌های ۶ و ۷ و همچنین خلاصه مقادیر آن در جدول ۱۱ ارائه شده است. مطابق نتایج، افزایش دما از ۴۰ به ۵۰ درجه سانتی‌گراد باعث افزایش کرنش تجمعی در تمام نمونه‌ها شد. این موضوع نشان می‌دهد که با بالا رفتن دما، مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر تغییر شکل دائمی کاهش یافته و نمونه‌ها مستعد کرنش بیشتری می‌شوند. با این حال، افزودن پلی‌اتیلن سنگین باعث کاهش کرنش تجمعی نسبت به نمونه شاهد شد و این روند در هر دو دمای آزمایش مشاهده گردید.

۶-۲-۲- نتایج آزمایش خزش دینامیکی

به‌منظور بررسی رفتار مخلوط‌های آسفالتی در برابر تغییر شکل دائمی، آزمایش خزش دینامیکی در دو دمای ۴۰ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. انتخاب این دو دما با توجه به شرایط عملکردی روسازی در فصول گرم سال صورت گرفت؛ زیرا در بسیاری از مناطق، به‌ویژه در شرایط تابش مستقیم خورشید، دمای لایه آسفالتی می‌تواند به چنین محدوده‌ای برسد. از این نظر، بررسی عملکرد مخلوط‌ها در این بازه دمایی می‌تواند دید مناسبی از میزان حساسیت آن‌ها نسبت به شیارشدگی و کرنش ماندگار

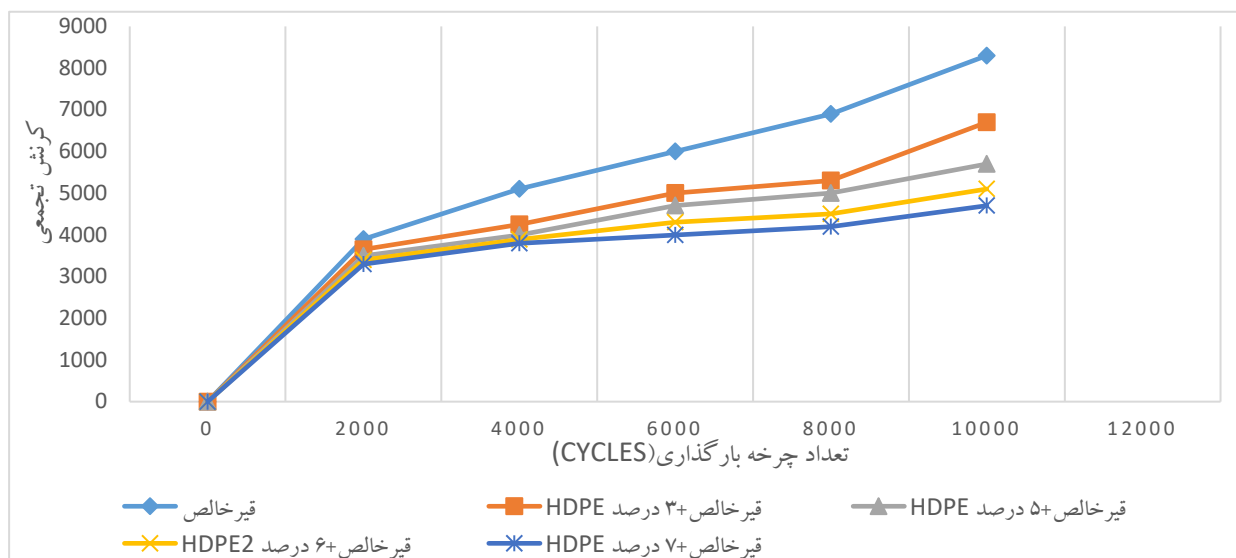
افزودن پلی اتیلن سنگین با افزایش سختی و ویسکوزیته قیر، موجب کاهش حساسیت حرارتی مخلوط شده و در نتیجه از رشد سریع کرنش ماندگار تحت بارگذاری تکراری جلوگیری می‌کند. همچنین بهبود پیوستگی میان قیر و مصالح سنگی می‌تواند در افزایش مقاومت برشی مخلوط و کاهش تغییر شکل‌های دائمی مؤثر باشد.

به‌طور کلی، نتایج آزمایش خزش دینامیکی نشان داد که با افزایش درصد پلی اتیلن سنگین تا ۷ درصد، کرنش تجمعی نمونه‌ها کاهش یافته و مقاومت آن‌ها در برابر تغییر شکل دائمی بهبود پیدا کرده است. بنابراین، در محدوده درصدهای بررسی شده و بر اساس نتایج این آزمایش، مخلوط حاوی ۷ درصد پلی اتیلن سنگین بهترین عملکرد را از نظر کنترل کرنش ماندگار و افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی نشان داده است.

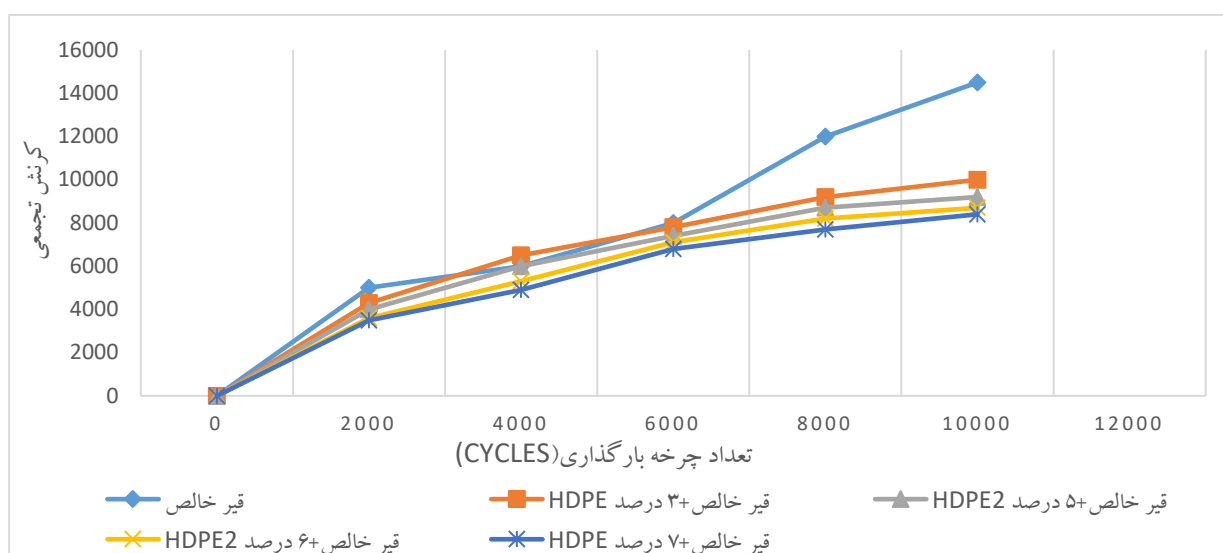
در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد، کرنش تجمعی نمونه شاهد پس از ۱۰۰۰۰ چرخه بارگذاری برابر با ۸۰۰۰ میکرواسترین به‌دست آمد. این مقدار در نمونه حاوی ۷ درصد پلی اتیلن سنگین به ۴۳۰۰ میکرواسترین کاهش یافت که معادل کاهش حدود ۴۶٫۳ درصدی نسبت به نمونه شاهد است. در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد نیز روند مشابهی مشاهده شد؛ به‌طوری‌که کرنش تجمعی از ۱۵۰۰۰ میکرواسترین در نمونه شاهد به ۸۱۰۰ میکرواسترین در نمونه دارای ۷ درصد پلی اتیلن سنگین رسید. این کاهش، حدود ۴۶ درصد بوده و نشان می‌دهد که اثر اصلاح‌کنندگی پلی اتیلن سنگین تنها محدود به دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد نبوده و در دمای بالاتر نیز قابل مشاهده است. کاهش کرنش تجمعی در نمونه‌های اصلاح‌شده را می‌توان به تغییر در رفتار رئولوژیکی قیر و افزایش مقاومت مخلوط در برابر جریان پلاستیک نسبت داد.

جدول ۱۱. خلاصه‌ای از مهمترین نتایج آزمایش خزش دینامیکی

درصد کاهش نسبت به شاهد	کرنش تجمعی در ۵۰ °C (μϵ)	درصد کاهش نسبت به شاهد	کرنش تجمعی در ۴۰ °C (μϵ)	نمونه
-	15000	-	8000	قیر خالص
24.0% کاهش	11400	23.8% کاهش	6100	3% HDPE
37.3% کاهش	9400	37.5% کاهش	5000	5% HDPE
42.7% کاهش	8600	42.5% کاهش	4600	6% HDPE
46.0% کاهش	8100	46.3% کاهش	4300	7% HDPE



شکل ۶. تغییرات کرنش تجمعی (μE) بر حسب تعداد چرخه بارگذاری در آزمون خزش دینامیکی در دمای ۴۰ °C



شکل ۷. تغییرات کرنش تجمعی (μE) بر حسب تعداد چرخه بارگذاری در آزمون خزش دینامیکی در دمای ۵۰ °C

۳-۶- ارزیابی عملکرد و تحلیل تغییرات ویژگی‌های فنی (آمار توصیفی)

در این بخش، اثر افزودن ۷ درصد پلی‌اتیلن سنگین به عنوان درصد منتخب اصلاح‌کننده بر ویژگی‌های اصلی قیر و مخلوط آسفالتی ارزیابی شد. بدین منظور، مقادیر به‌دست‌آمده برای نمونه اصلاح‌شده با HDPE با نمونه شاهد مقایسه گردید و درصد تغییرات هر یک از شاخص‌ها در جدول ۱۲ ارائه شد. مطابق نتایج، اصلاح قیر با HDPE موجب افزایش قابل ملاحظه ویسکوزیته چرخشی، نقطه نرمی و استقامت مارشال شد.

بر اساس داده‌های ارائه‌شده در جداول ۶ تا ۱۱، افزایش درصد پلی‌اتیلن سنگین، ویسکوزیته و پایداری مارشال روند افزایشی، و درجه نفوذ، انگمی و کرنش تجمعی ناشی از خزش دینامیکی روند کاهشی نشان دادند. این نتایج حاکی از افزایش سختی قیر اصلاح‌شده و بهبود مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر تغییر شکل دائمی است.

درصد انجام شد. در این تحلیل، درصد افزودنی HDPE به عنوان متغیر مستقل و شاخص های فیزیکی، رئولوژیکی و مکانیکی به عنوان متغیرهای وابسته در نظر گرفته شدند. نتایج آزمون ANOVA در جدول ۱۳ ارائه شده است.

مطابق نتایج، اثر افزودن HDPE بر بیشتر شاخص های مورد بررسی از نظر آماری معنادار بود. مقادیر احتمال برای شاخص هایی مانند انگمی، نقطه نرمی، ویسکوزیته چرخشی، استقامت مارشال و کرنش دائمی کمتر از ۰,۰۰۱ بدست آمد. این موضوع نشان می دهد که تغییرات مشاهده شده در این پارامترها را می توان با سطح اطمینان مناسبی به تغییر درصد افزودنی HDPE نسبت داد.

مقادیر آماره F برای انگمی، نقطه نرمی و ویسکوزیته چرخشی به ترتیب برابر با ۵۶,۹۳، ۴۲,۱۷ و ۳۸,۶۵ بود. این مقادیر بیانگر اثر قابل توجه HDPE بر رفتار فیزیکی و رئولوژیکی قیر است. از سوی دیگر، معناداری آماری کرنش دائمی در دماهای ۴۰ و ۵۰ درجه سلسیوس، با مقدار احتمال کمتر از ۰,۰۰۰۱ نشان می دهد که افزودن این پلیمر بر مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر تغییر شکل های ماندگار مؤثر بوده است. این نتیجه با روند کاهش کرنش جمعی در آزمون خزش دینامیکی هم خوانی دارد.

در مقابل، تغییرات روانی مارشال از نظر آماری معنادار نبود. مقدار احتمال این شاخص برابر با ۰,۳۵۶ و مقدار آماره F برابر با ۱,۱۷ به دست آمد. بنابراین، در محدوده درصدهای بررسی شده، نمی توان اثر افزودن HDPE بر روانی مارشال را از نظر آماری معنادار دانست. این در حالی است که سایر شاخص های عملکردی، به ویژه استقامت مارشال و کرنش دائمی، بطور معناداری تحت تأثیر افزودنی قرار گرفتند.

به طور کلی، نتایج تحلیل آماری با یافته های توصیفی پژوهش هم راستا است و نشان می دهد که افزودن HDPE موجب بهبود تعدادی از شاخص های اصلی عملکرد قیر و مخلوط آسفالتی شده است. بر اساس این نتایج، در محدوده درصدهای بررسی شده، نمونه حاوی ۷ درصد HDPE عملکرد مناسب تری از نظر پایداری حرارتی، مقاومت مکانیکی و کنترل تغییر شکل دائمی نشان داد. البته کاهش کشش پذیری قیر بیانگر آن است که استفاده از این اصلاح کننده باید با توجه به شرایط اقلیمی و الزامات عملکردی روسازی انجام شود.

بیشترین تغییر در میان شاخص های بررسی شده مربوط به ویسکوزیته چرخشی بود که نسبت به نمونه شاهد ۳۰۵,۶ درصد افزایش یافت. این افزایش نشان می دهد که قیر اصلاح شده در دماهای بالا مقاومت بیشتری در برابر جریان از خود نشان می دهد. کاهش جریان پذیری قیر که می تواند در محدود شدن تغییر شکل های ماندگار مؤثر باشد، حاکی از بهبود عملکرد مخلوط در برابر شیارشدگی است.

استقامت مارشال نیز با افزایش ۷۳,۱ درصدی همراه بود که بیانگر افزایش استحکام و پایداری مخلوط اصلاح شده است. علاوه بر این، نقطه نرمی قیر با ۳۵,۲ درصد افزایش به ۶۹,۵ درجه سلسیوس رسید. افزایش نقطه نرمی نشان می دهد که قیر اصلاح شده در برابر افزایش دما پایداری بیشتری داشته و در دماهای بالا کمتر مستعد نرم شدن و تغییر شکل ماندگار است.

با وجود این، نتایج انگمی نشان داد که افزودن HDPE موجب کاهش محسوس شکل پذیری قیر شده است. مقدار انگمی از بیش از ۱۰۰ سانتی متر در نمونه شاهد به ۱۵ سانتی متر در نمونه اصلاح شده کاهش یافت که معادل افتی حدود ۸۵ درصد است. این موضوع نشان می دهد که افزایش سختی قیر اصلاح شده با کاهش انعطاف پذیری همراه بوده و می تواند در شرایط دمایی پایین، به ویژه در مناطق سردسیر، از نظر احتمال ترک خوردگی حرارتی قابل توجه باشد. در مخلوط آسفالتی نیز کرنش دائمی در دمای ۴۰ درجه سلسیوس پس از افزودن ۷ درصد HDPE به میزان ۳/۴۶ درصد کاهش یافت. این کاهش نشان دهنده بهبود مقاومت مخلوط در برابر تغییر شکل دائمی و شیارشدگی است. بر این اساس، می توان گفت که استفاده از ۷ درصد HDPE در محدوده نتایج این پژوهش، موجب بهبود شاخص های مرتبط با پایداری حرارتی و مقاومت مکانیکی قیر و مخلوط آسفالتی شده است. با این حال، کاهش قابل توجه انگمی نشان می دهد که ارزیابی عملکرد این اصلاح کننده باید با در نظر گرفتن هم زمان مقاومت در برابر شیارشدگی و احتمال کاهش انعطاف پذیری انجام گیرد.

۶-۴- تحلیل آماری نتایج (تحلیل واریانس یک طرفه)

برای ارزیابی معناداری تغییرات ایجاد شده در ویژگی های قیر و مخلوط آسفالتی، تحلیل واریانس یک طرفه در سطح اطمینان ۹۵

جدول ۱۲. تحلیل درصد تغییرات و ارزیابی عملکرد قیر و مخلوط آسفالتی حاوی ۷ درصد پلی اتیلن سنگین نسبت به نمونه شاهد

درصد تغییر	7% HDPE	قیر خالص	مشخصه
- 40.6%	38	64	درجه نفوذ (dmm)
+ 35.2%	69.5	51.4	نقطه نرمی (°C)
+ 305.6%	1.517	0.374	ویسکوزیته (Pa.s)
- 85%	15	100+	انگمی (cm)
+ 73.1%	1828	1056	استقامت مارشال (kg)
- 46.3%	4300	8000	με C کرنش دائمی در ۴۰

جدول ۱۳. نتایج تحلیل واریانس یک طرفه (ANOVA) برای بررسی اثر درصدهای مختلف پلی اتیلن سنگین بر ویژگی های قیر و عملکرد مخلوط آسفالتی

نتیجه آماری	سطح معنی داری (Sig.)	آماره F	متغیر مورد بررسی
معنی دار	<0.001	31.84	درجه نفوذ
معنی دار	<0.001	42.17	نقطه نرمی
معنی دار	<0.001	56.93	انگمی
معنی دار	<0.001	38.65	ویسکوزیته چرخشی
معنی دار	<0.001	29.42	استحکام مارشال
غیر معنی دار	0.356	1.17	روانی مارشال
معنی دار	<0.001	34.58	تغییر شکل دائمی (40°C)
معنی دار	<0.001	36.91	تغییر شکل دائمی (50°C)

۷- نتیجه گیری

-نتایج این پژوهش نشان داد که اصلاح قیر با پلی اتیلن سنگین (HDPE) گرید ۵۲۱۸ تأثیر معناداری بر ویژگی های فیزیکی قیر و عملکرد مخلوط آسفالتی گرم دارد. ارزیابی خواص قیر پایه و قیرهای اصلاح شده بیانگر آن بود که با افزایش درصد HDPE، درجه نفوذ کاهش و نقطه نرمی افزایش یافت؛ به طوری که درجه نفوذ از ۶۴ به ۳۸ دسی میلی متر و نقطه نرمی از ۵۱٫۴ به ۶۹٫۵ درجه سانتی گراد رسید. همچنین، ویسکوزیته چرخشی روندی افزایشی نشان داد که حاکی از افزایش سختی قیر و کاهش حساسیت حرارتی آن است. این تغییرات به طور کلی بیانگر بهبود رفتار قیر در دماهای بالا و افزایش مقاومت آن در برابر تغییر شکل هستند. در مقابل، کاهش مقدار انگمی از بیش از ۱۰۰ سانتی متر در قیر پایه به ۱۵ سانتی متر در نمونه حاوی ۷ درصد HDPE نشان می دهد که هرچند اصلاح قیر با این پلیمر موجب بهبود برخی ویژگی های عملکردی شده است، اما هم زمان از انعطاف پذیری آن کاسته و می تواند در دماهای پایین، زمینه ساز افزایش احتمال ترک خوردگی باشد.

-نتایج آزمون مارشال نیز مؤید تأثیر مثبت HDPE بر عملکرد مکانیکی مخلوط آسفالتی بود. به گونه ای که مقدار پایداری مارشال از ۱۰۵۶ کیلوگرم در نمونه شاهد به ۱۸۲۸ کیلوگرم در نمونه حاوی ۷ درصد HDPE افزایش یافت که معادل رشد ۷۳ درصدی است. این افزایش را می توان نشان دهنده بهبود ظرفیت باربری و ارتقای مقاومت مخلوط در برابر بارگذاری دانست. در عین حال، مقادیر روانی مارشال در میان نمونه های مختلف تغییر محسوسی نداشت و در محدوده مجاز آیین نامه ای باقی ماند. بنابراین، در شرایط این پژوهش، افزایش پایداری مخلوط آسفالتی بدون تغییر معنادار در شاخص روانی حاصل شد.

-بررسی رفتار خزش دینامیکی نیز نشان داد که افزودن HDPE نقش مؤثری در کاهش تغییر شکل دائمی مخلوط آسفالتی دارد. در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد و پس از ۱۰۰۰۰ چرخه بارگذاری، کرنش تجمعی از ۸۰۰۰ میکرواسترین در نمونه شاهد به ۴۳۰۰ میکرواسترین در نمونه حاوی ۷ درصد HDPE کاهش یافت. در دمای ۵۰ درجه سانتی گراد نیز مقدار این شاخص از ۱۵۰۰۰ به ۸۱۰۰ میکرواسترین رسید. کاهش حدود ۴۶ درصدی کرنش تجمعی در هر دو دما نشان می دهد که اصلاح قیر با پلی اتیلن سنگین می تواند مقاومت مخلوط آسفالتی را در برابر شیارشدگی به طور قابل توجهی افزایش دهد. این یافته با روند افزایش

ویسکوزیته قیر و رشد پایداری مارشال نیز هم خوانی دارد و بیانگر بهبود عملکرد مخلوط در شرایط بارگذاری و دمایی شدیدتر است.

-در مجموع، می توان نتیجه گرفت که استفاده از HDPE تا سطح ۷ درصد، در محدوده شرایط آزمایشگاهی این پژوهش، موجب بهبود هم زمان برخی از مهم ترین شاخص های عملکردی قیر و مخلوط آسفالتی گرم شده است. در میان درصدهای مورد بررسی، نمونه حاوی ۷ درصد HDPE از نظر افزایش سختی قیر، بهبود پایداری حرارتی، رشد استقامت مارشال و کاهش کرنش دائمی، عملکرد مناسب تری نسبت به سایر نمونه ها نشان داد و از این رو می توان آن را به عنوان درصد بهینه در چارچوب این مطالعه معرفی کرد. با این حال، با توجه به کاهش انگمی و احتمال افت عملکرد در دماهای پایین، انجام مطالعات تکمیلی درباره رفتار خستگی، ترک خوردگی حرارتی و دوام بلندمدت این مخلوط ها ضروری است.

محدودیت های پژوهش

پژوهش حاضر در مقیاس آزمایشگاهی انجام شده است؛ از این رو، تعمیم نتایج آن به شرایط واقعی روسازی باید با احتیاط صورت گیرد. در این مطالعه، تمرکز اصلی بر بررسی اثر پلی اتیلن سنگین بر برخی خواص فیزیکی قیر و عملکرد مکانیکی مخلوط آسفالتی در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی بوده و برخی عوامل مؤثر بر رفتار بلندمدت مخلوط ها، از جمله پیرشدگی کوتاه مدت و بلندمدت، حساسیت رطوبتی، چرخه های یخبندان - ذوب، مقاومت خستگی و عملکرد در دماهای پایین، مورد ارزیابی قرار نگرفتند. همچنین، دامنه درصدهای مورد بررسی به مقادیر تا ۷ درصد HDPE محدود بود و مقایسه ای میان این اصلاح کننده و سایر پلیمرهای متداول انجام نشد.

پیشنهاد برای تحقیقات آینده

با توجه به محدودیت های پژوهش حاضر، پیشنهاد می شود در مطالعات آینده محورهای زیر مورد بررسی قرار گیرد:

- بررسی عملکرد قیر و مخلوط آسفالتی اصلاح شده با HDPE در شرایط واقعی روسازی و تحت بارگذاری میدانی.
- ارزیابی رفتار قیر و مخلوط آسفالتی حاوی HDPE در دماهای پایین، به ویژه از منظر ترک خوردگی حرارتی.

- مقایسه عملکرد HDPE با سایر اصلاح‌کننده‌های پلیمری متداول مانند SBS و EVA.
- استفاده از روش‌های آماری پیشرفته و مدل‌های پیش‌بینی داده‌محور، از جمله رویکردهای مبتنی بر یادگیری ماشین، برای تحلیل رابطه میان درصد HDPE و شاخص‌های عملکردی قیر و مخلوط آسفالتی، تعیین درصد بهینه افزودنی و پیش‌بینی عملکرد بلندمدت مخلوط‌های اصلاح‌شده.

- بررسی اثر پیرشدگی کوتاه‌مدت و بلندمدت بر خواص قیر و عملکرد مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با HDPE.
- ارزیابی مقاومت خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی HDPE تحت شرایط مختلف بارگذاری.
- بررسی حساسیت رطوبتی، خرابی عریان‌شدگی و اثر چرخه‌های یخبندان - ذوب بر دوام مخلوط‌های اصلاح‌شده.
- مطالعه درصد‌های بالاتر از ۷ درصد HDPE به‌منظور تعیین محدوده مؤثر و امکان بهینه‌سازی مقدار افزودنی.

۸- پی‌نوشت‌ها

- 1.HMA: Hot Mix Asphalt (آسفالت گرم)
- 2.HDPE: High-Density Polyethylene (پلی‌اتیلن سنگین)
- 3.DPE: Low-Density Polyethylene (پلی‌اتیلن سبک)
- 4.WMA: Warm Mix Asphalt (آسفالت نیمه‌گرم)
- 5.LDPE: Linear Low-Density Polyethylene (پلی‌اتیلن سبک خطی)

۹-مراجع

asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 14(1), 79–91.
-Cardone, F., Ferrotti, G., Frigio, F., & Canestrari, F. (2014). Influence of polymer modification on asphalt binder dynamic and steady flow viscosities. *Construction and Building Materials*, 71, 435–443.
-Goh, S. W., & You, Z. (2009). A simple stepwise method to determine and evaluate the initiation of tertiary flow for asphalt mixtures under dynamic creep test. *Construction and Building Materials*, 23(11), 3398–3405.
-Gokhale, S., Choubane, B., Byron, T., & Tia, M. (2005). Rut initiation mechanisms in asphalt mixtures as generated under accelerated pavement testing. *Transportation Research Record*, 1940(1), 136–145.
-Hınıslıoğlu, S., & Açar, E. (2004). Use of waste high-density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix. *Materials Letters*, 58(3–4), 267–271.
-Jeong, K. D., Lee, S. J., & Kim, K. W. (2011). Laboratory evaluation of flexible pavement materials containing waste polyethylene film. *Construction and Building Materials*, 25(4), 1890–1894.

-AASHTO. (2007). Standard method of test for resistance of compacted hot mix asphalt (HMA) to moisture-induced damage (T283). *American Association of State Highway and Transportation Officials*.
-Akbari, M., Shahryari, E., Hamedipour, A., & Shafabakhsh, G. (2023). Laboratory investigation on the rutting and fracture resistance of hot-mix asphalt containing nanographene oxide. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(3), 04022483.
-Al-Hadidy, A. I., & Yi-Qiu, T. (2009). Effect of polyethylene on life of flexible pavements. *Construction and Building Materials*, 23(3), 1456–1464.
-Al-Mistarehi, B. W., Ghuzlan, K. A., & Lafi, S. O. (2024). Investigating the dynamic creep and indirect tensile performance of modified warm asphalt mixtures. *Case Studies in Construction Materials*, 21, e03652.
-Awwad, M. T., & Shbeeb, L. (2007). The use of polyethylene in hot asphalt mixtures. *American Journal of Applied Sciences*, 4(6), 390–396.
Azari, H., & Mohseni, A. (2013). Effect of short-term conditioning and long-term ageing on permanent deformation characteristics of

- environmental assessment. *Sustainability*, 17(2), 811.
- Saboo, N., & Kumar, P. (2016). Analysis of different test methods for quantifying rutting susceptibility of asphalt binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(7), 04016024.
- Santagata, E., Baglieri, O., Dalmazzo, D., & Tsantilis, L. (2013). Evaluation of the anti-rutting potential of polymer-modified binders by means of creep-recovery shear tests. *Materials and Structures*, 46(10), 1673–1682.
- Subhy, A., Lo Presti, D., & Airey, G. (2015). An investigation on using pre-treated tyre rubber as a replacement of synthetic polymers for bitumen modification. *Road Materials and Pavement Design*, 16(2), 245–264.
- Wang, H., Zhang, Y., Li, X., & Chen, M. (2022). Performance evaluation of high-density polyethylene modified asphalt binders under high-temperature conditions. *Construction and Building Materials*, 347, 128512.
- Willis, J. R., Taylor, A., Tran, N. H., Kluttz, B., & Timm, D. H. (2012). Laboratory evaluation of high polymer plant-produced mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 13(2), 260–280.
- Xie, J., Wu, S., Pang, L., Lin, J., & Zhu, Z. (2012). Influence of surface-treated fly ash with coupling agent on asphalt mixture moisture damage. *Construction and Building Materials*, 42, 340–346.
- Zhang, R., Wang, H., Gao, J., You, Z., & Yang, X. (2017). High-temperature performance of SBS modified bio-asphalt. *Construction and Building Materials*, 144, 99–105.
- Zhou, L., Chen, X., Li, J., & Wang, Q. (2024). Effect of HDPE on permanent deformation behavior of asphalt mixtures under cyclic loading. *Materials*, 17(3), 685.
- Kebritchi, A., Jalali-Arani, A., & Roghanizad, A. A. (2011). Rheological behavior and properties of bitumen modified with polymeric coated precipitated calcium carbonate. *Construction and Building Materials*, 25(6), 2875–2882.
- Kumar, A., Singh, D., & Sharma, V. (2023). Recent advances in polymer-modified asphalt binders: A review. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(9), 03123002.
- Kumar, R., Saboo, N., Kumar, P., & Chandra, S. (2017). Effect of warm mix additives on creep and recovery response of conventional and polymer modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 138, 352–362.
- Liu, Y., Zhao, P., Wang, T., & Xu, J. (2023). Rutting resistance of asphalt mixtures modified with recycled high-density polyethylene. *Road Materials and Pavement Design*, 24(6), 1452–1468.
- Moatasim, A., Cheng, P. F., & Al-Hadidy, A. I. (2011). Laboratory evaluation of hot mix asphalt with high-density polyethylene as a modifier. *Construction and Building Materials*, 25(6), 2764–2770.
- Moghadas Nejad, F., Azarhoosh, A., & Hamed, H. (2014). Effect of high-density polyethylene on the fatigue and rutting performance of hot mix asphalt: A laboratory study. *Road Materials and Pavement Design*, 15(3), 746–756.
- Punith, V. S., & Veeraragavan, A. (2007). Behavior of asphalt concrete mixtures with reclaimed polyethylene as additive. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(6), 500–507.
- Rahman, M. M., Islam, M. S., & Hossain, M. (2025). Sustainable utilization of waste plastics in asphalt pavements: Performance and

Investigation of the Effect of Different Percentages of High Density Polyethylene on the Mechanical Properties of Bitumen and the Rutting Potential of Hot Mix Asphalt (HMA)

Mohsen Zahedi, Assistant Professor, Civil Engineering, Road and Transportation Department, Faculty of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.

Yasin Hasanvand, M.Sc., Grad., Civil Engineering, Road and Transportation Department, Faculty of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.

E-mail: yasinhasanvand1324@gmail.com

Received: March 2026- Accepted: August 2026

ABSTRACT

Although bitumen constitutes only a small proportion of hot mix asphalt (HMA), it plays a critical role in determining pavement performance and durability. Deficiencies in bitumen properties can lead to various pavement distresses, including rutting, cracking, and fatigue failure. This study investigates the effect of high-density polyethylene (HDPE, Grade 5218) on the physical, rheological, and performance characteristics of bitumen and its influence on the rutting resistance of HMA. HDPE was incorporated into the base bitumen at concentrations of 3%, 5%, 6%, and 7% by weight of binder. The modified binders were evaluated through penetration, softening point, ductility, and rotational viscosity tests, while the performance of the corresponding asphalt mixtures was assessed using Marshall stability and dynamic creep tests. The results demonstrated that increasing HDPE content significantly enhanced the stiffness and deformation resistance of the binder. The penetration value decreased from 64 to 38 dmm, whereas the softening point increased from 51.4°C to 69.5°C for the mixture containing 7% HDPE. In addition, the rotational viscosity increased from 0.374 to 1.517 Pa·s, indicating improved resistance to flow and permanent deformation at elevated temperatures. Marshall test results revealed a substantial increase in stability from 1056 kg to 1828 kg, while flow values remained nearly unchanged. Dynamic creep testing showed that the cumulative permanent strain of the mixture containing 7% HDPE decreased by 46.3% and 46.0% at 40°C and 50°C, respectively, compared with the control mixture, demonstrating a significant improvement in rutting resistance. One-way analysis of variance (ANOVA) confirmed that HDPE content had a statistically significant effect on penetration, softening point, rotational viscosity, Marshall stability, and permanent deformation characteristics ($P < 0.001$). Based on the experimental findings, the incorporation of 7% HDPE was identified as the optimum dosage for enhancing binder properties and improving the rutting resistance of asphalt mixtures.

Keywords: High-Density Polyethylene (HDPE), Modified Bitumen, Hot Mix Asphalt, Rutting Resistance, Dynamic Creep, Permanent Deformation