بررسی اثر هم‌افزایی نانوزایکوترم و پلی‌اتیلن سبک بر رفتار رئولوژیکی قیر و مقاومت خستگی مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم(WMA)

مقاله علمی – پژوهشی

*یاسین حسنوند (نویسنده مسئول)، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Yasinhasanvand1324@gmail.com

دریافت:۱۴۰۵/۰۳/۰۴- پذیرش: ۱۴۰۵/۰۸/۱۵

صفحه ۴۰۸-۳۸۵

چکیده

افزایش هزینه‌های انرژی و الزامات زیست‌محیطی، توسعه فناوری آسفالت نیمه‌گرم را به‌عنوان رویکردی پایدار برای کاهش مصرف انرژی و انتشار آلاینده‌ها در صنعت روسازی تسریع کرده است. با این حال، کاهش دمای تولید و اختلاط می‌تواند خواص رئولوژیکی قیر و عملکرد مکانیکی و خستگی مخلوط‌های آسفالتی را تحت تأثیر قرار دهد. هدف این پژوهش، بررسی اثر هم‌افزایی نانوزایکوترم و پلی‌اتیلن سبک بازیافتی بر رفتار رئولوژیکی قیر و عملکرد مکانیکی، شکست و خستگی مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم است. در این راستا، نانوزایکوترم با مقدار ثابت ۰٫۱۰ درصد وزنی قیر و پلی‌اتیلن سبک بازیافتی در مقادیر ۱، ۳، ۵ و ۷ درصد وزنی قیر به نمونه‌ها افزوده شد. خواص قیر اصلاح‌شده با آزمون‌های فیزیکی، ویسکوزیته دورانی و رئومتر برشی دینامیکی و عملکرد مخلوط‌ها با آزمون‌های مارشال، مقاومت کششی غیرمستقیم، مدول برجهندگی، حساسیت رطوبتی، شکست نیم‌دایره‌ای و خستگی تیر خمشی چهارنقطه‌ای ارزیابی شد. معنی‌داری نتایج با آزمون‌های شاپیرو–ویلک، لون و تحلیل واریانس یک‌طرفه در سطح اطمینان ۹۵درصد بررسی گردید. نتایج نشان داد نانوزایکوترم با کاهش ویسکوزیته، کارپذیری قیر را بهبود داد، در حالی که پلی‌اتیلن سبک بازیافتی موجب افزایش سختی، رفتار الاستیک و مقاومت مکانیکی مخلوط شد. نمونه حاوی ۷ درصد پلی‌اتیلن سبک بازیافتی بیشترین مدول برجهندگی ۲۵۴۹ مگاپاسکال، مقاومت کششی غیرمستقیم ۱٫۲۹۰ MPa و عمر خستگی $۱٫۹۸ \times ۱۰^{۵}$ سیکل را ثبت کرد. همچنین، بیشترین انرژی شکست در دمای $C۲۵^{\circ}$ برای نمونه‌های حاوی ۵ و ۷ درصد پلیمر به‌ترتیب ۱۴٫۸ و ۱۲٫۶ $kJ/m^{۲}$ به دست آمد. افزایش درصد پلیمر، با وجود ارتقای مقاومت، موجب کاهش کشش‌پذیری قیر و افزایش حساسیت به شکنندگی شد. در نهایت، نمونه حاوی ۵ درصد پلی‌اتیلن سبک بازیافتی بهترین تعادل میان مقاومت شکست، دوام خستگی و عملکرد مکانیکی را ارائه داد و می‌تواند گزینه‌ای مناسب برای توسعه روسازی‌های نیمه‌گرم پایدار باشد.

واژه‌های کلیدی: آسفالت نیمه‌گرم، نانوزایکوترم، پلی‌اتیلن سبک، مقاومت خستگی، انرژی شکست

۱-مقدمه

افزایش مصرف انرژی، محدودیت منابع طبیعی و الزامات زیست‌محیطی، توسعه فناوری‌های پایدار در صنعت روسازی را به یکی از اولویت‌های مهم پژوهشی تبدیل کرده است. در این میان، فناوری آسفالت نیمه‌گرم (Warm Mix Asphalt, WMA) به دلیل کاهش دمای اختلاط و تراکم، مصرف انرژی و انتشار آلاینده‌ها، به‌عنوان یکی از فناوری‌های مهم روسازی پایدار شناخته می‌شود. این فناوری همچنین شرایط اجرایی را بهبود داده و امکان تولید مخلوط‌های آسفالتی در دماهای پایین‌تر را فراهم می‌کند.

بااین‌حال، کاهش دمای تولید ممکن است رفتار ویسکوالاستیک قیر، کیفیت پوشش‌دهی سنگدانه‌ها و استحکام پیوند قیر□سنگدانه را تحت تأثیر قرار داده و در نهایت مقاومت مخلوط در برابر تغییرشکل دائمی، شکست و خستگی را کاهش دهد. ازاین‌رو، استفاده از اصلاح‌کننده‌هایی که ضمن حفظ مزایای آسفالت نیمه گرم، قابلیت بهبود عملکرد مکانیکی آن را داشته باشند، به یکی از محورهای اصلی پژوهش‌های اخیر تبدیل شده است.

در میان اصلاح‌کننده‌های پلیمری، پلی‌اتیلن سبک (Low-Density Polyethylene, LDPE) به دلیل دسترسی مناسب، قابلیت بازیافت، هزینه اقتصادی و توانایی افزایش سختی و مؤلفه الاستیک قیر، گزینه‌ای قابل‌توجه برای اصلاح قیر محسوب می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که افزودن LDPE موجب افزایش مدول پیچیده(G*)، بهبود مقاومت در برابر تغییرشکل دائمی و افزایش دوام روسازی می‌شود. بااین‌حال، مقدار زیاد پلیمر ممکن است با کاهش کشش‌پذیری، افزایش شکنندگی و افت عملکرد در دماهای پایین همراه باشد. بنابراین، تعیین مقدار بهینه LDPE باید بر اساس ایجاد تعادل میان سختی، مقاومت خستگی، انرژی شکست و انعطاف‌پذیری انجام شود. در فناوری آسفالت نیمه گرم، افزودنی‌های شیمیایی مانند نانوزایکوترم با کاهش اصطکاک داخلی، بهبود ترشوندگی سنگدانه‌ها و افزایش قابلیت اختلاط، امکان تولید مخلوط در دماهای پایین‌تر را فراهم می‌سازند. در این پژوهش، مقدار ۰٫۱۰ درصد وزنی نانوزایکوترم بر اساس مطالعات پیشین و توصیه فنی سازنده انتخاب شد تا اثر هم‌افزایی آن با LDPE بر عملکرد قیر و مخلوط آسفالتی ارزیابی شود .اگرچه اثر این دو اصلاح‌کننده به‌صورت جداگانه در مطالعات مختلف بررسی شده است، اطلاعات محدودی درباره عملکرد هم‌زمان آن‌ها در سامانه آسفالت نیمه گرم، و سازوکار انتقال اثرات از مقیاس قیر به عملکرد نهایی مخلوط وجود دارد. رفتار رئولوژیکی قیر با استفاده از آزمون رئومتر برش دینامیکی (DSR) و پارامترهایی نظیر مدول پیچیده(G*) ، زاویه فازی (δ) و شاخص خستگی (G*×sinδ)ارزیابی می‌شود. با وجود اهمیت این شاخص‌ها، در بسیاری از مطالعات، ارتباط کمی میان ویژگی‌های رئولوژیکی قیر و شاخص‌های عملکردی مخلوط، شامل مقاومت کششی غیرمستقیم، مدول برجهندگی، انرژی شکست و عمر خستگی، به‌صورت جامع بررسی نشده است. همچنین، نقش دانه‌بندی در انتقال این اثرات کمتر مورد توجه قرار گرفته است. انتخاب دانه‌بندی میانی با ایجاد تعادل میان قفل‌وبست سنگدانه‌ها، ضخامت فیلم قیر و توزیع یکنواخت تنش، می‌تواند عملکرد خستگی و مقاومت در برابر رشد ترک را بهبود دهد. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی اثر هم‌افزایی نانوزایکوترم و مقادیر مختلف LDPE بر رفتار رئولوژیکی قیر و عملکرد مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم انجام شد. علاوه بر ارزیابی ویژگی‌های قیر و مخلوط، ارتباط میان شاخص‌های رئولوژیکی و عملکردی با استفاده از تحلیل‌های آماری بررسی شد تا سازوکار بهبود عملکرد و مقدار مناسب LDPE برای کاربردهای روسازی تعیین شود.

نوآوری اصلی این پژوهش، ارائه یک رویکرد چندمقیاسی برای ارزیابی اثر ترکیبی نانوزایکوترم و پلی‌اتیلن سبک بازیافتی (LDPE) در سامانه آسفالت نیمه‌گرم است. برخلاف مطالعاتی که اثر این اصلاح‌کننده‌ها را به‌صورت مستقل بررسی کرده‌اند، در این پژوهش ارتباط میان تغییرات رئولوژیکی قیر حاصل از آزمون DSR و شاخص‌های عملکردی مخلوط شامل مقاومت مکانیکی، انرژی شکست و عمر خستگی به‌صورت یکپارچه تحلیل شده است .همچنین، مقدار بهینه LDPE با درنظرگرفتن تعادل میان افزایش سختی، بهبود مقاومت خستگی، ظرفیت جذب انرژی و حفظ انعطاف‌پذیری تعیین شده است. این رویکرد امکان تبیین سازوکار انتقال اثر اصلاح‌کننده‌ها از مقیاس قیر به عملکرد نهایی مخلوط آسفالتی را فراهم می‌کند.

۲-پیشینه تحقیق

پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که فناوری آسفالت نیمه گرم، می‌تواند با کاهش دمای تولید و تراکم، مصرف انرژی و انتشار آلاینده‌ها را کاهش دهد؛ با این حال، افت دمای اختلاط ممکن است بر رفتار رئولوژیکی قیر و عملکرد بلندمدت مخلوط تأثیر منفی بگذارد. Zhuang و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که افزودنی‌های آسفالت نیمه گرم، ضمن بهبود قابلیت اجرا، موجب تغییر رفتار ویسکوالاستیک قیر می‌شوند، اما ارتباط این تغییرات با عملکرد خستگی مخلوط به‌طور کامل تبیین نشده است. در میان افزودنی‌های شیمیایی، نانوزایکوترم به دلیل بهبود ترشوندگی

سنگدانه‌ها، افزایش چسبندگی قیر–سنگدانه و کاهش دمای اختلاط مورد توجه قرار گرفته است. Al-Khateeb و همکاران (۲۰۲٤) گزارش کردند که این افزودنی مقاومت رطوبتی و کیفیت پوشش‌دهی را بهبود می‌بخشد، اما اطلاعات محدودی درباره عملکرد آن در کنار اصلاح‌کننده‌های پلیمری وجود دارد. از سوی دیگر، LDPE یکی از متداول‌ترین پلیمرهای بازیافتی برای اصلاح قیر است. لی و همکاران (۲۰۲٤) نشان دادند که افزایش مقدار LDPE موجب افزایش G*، بهبود مقاومت تغییرشکل دائمی و افزایش سختی قیر می‌شود، ولی مقادیر زیاد آن می‌تواند انعطاف‌پذیری را کاهش داده و خطر ترک‌خوردگی در دماهای پایین را افزایش دهد. همچنین یانگ و همکاران (۲۰۲٤) گزارش کردند که ترکیب فناوری آسفالت نیمه گرم، با اصلاح‌کننده‌های پلیمری قادر است عملکرد مکانیکی و عمر خستگی مخلوط را بهبود دهد، هرچند رابطه کمی بین شاخص‌های رئولوژیکی قیر و عملکرد مخلوط ارائه نشده است.اگرچه آزمون DSR ابزار اصلی ارزیابی رفتار ویسکوالاستیک قیر محسوب می‌شود، بیشتر مطالعات به تحلیل مستقل پارامترهای G*، δ و G*×sinδ محدود شده‌اند و ارتباط آن‌ها با شاخص‌های عملکردی مخلوط، مانند مقاومت کششی غیرمستقیم، مدول برجهندگی، انرژی شکست و عمر خستگی، کمتر بررسی شده است. این موضوع مانع از تبیین مکانیزم انتقال اثر اصلاح‌کننده‌ها از مقیاس قیر به عملکرد روسازی می‌شود. بررسی مطالعات پیشین **سه** خلأ اصلی را نشان می‌دهد.

–کمبود مطالعات در باره اثر همزمان نانوزایکوترم و LDPE در سامانه WMA

–فقدان مدل‌سازی و تحلیل کمی ارتباط بین پارامترهای رئولوژیکی قیر و شاخص‌های عملکردی مخلوط،

–نبود معیار جامعی برای تعیین مقدار بهینه LDPE بر پایه تعادل میان سختی، مقاومت خستگی، انرژی شکست و انعطاف‌پذیری.

پژوهش حاضر با تمرکز بر این خلأها، تلاش می‌کند ارتباط چندمقیاسی میان رفتار رئولوژیکی قیر و عملکرد مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم را تبیین کند.

جدول ۱. مقایسه مطالعات پیشین مرتبط با اصلاح قیر و مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از پلیمرها و افزودنی‌های آسفالت نیمه‌گرم

نویسنده	سال	افزودنی / فناوری	آزمون‌ها	مهم‌ترین نتایج	محدودیت
Zhuang et al.	2023	افزودنیWMA	DSR، آزمون خستگی	کاهش دمای تولید و تغییر رفتار ویسکوالاستیک قیر گزارش شد.	بررسی هم‌زمان پلیمر و WMA انجام نشد.
Liu et al.	2023	افزودنی شیمیایی WMA	ITS، عملکرد مخلوط	بهبود کارپذیری و کاهش دمای تولید مشاهده شد.	تحلیل ارتباط رئولوژی قیر و خستگی محدود بود.
Al-Khateeb et al.	2024	Zycotherm	TSR ،DSR	بهبود چسبندگی قیر–سنگدانه و مقاومت رطوبتی گزارش شد.	استفاده از پلیمر بازیافتی بررسی نشد.
Li et al.	2024	پلی‌اتیلن بازیافتی	رئولوژی قیر، خواص مکانیکی	افزایش سختی و مقاومت تغییرشکل دائمی، همراه با احتمال کاهش انعطاف‌پذیری در مقادیر بالا.	عملکرد سیستم WMA–LDPE بررسی نشد.
Yang et al.	2024	پلیمرWMA +	آزمون خستگی و مکانیکی	بهبود عمر خستگی و عملکرد مخلوط در سیستم ترکیبی گزارش شد.	ارتباط کمی بین DSR و عملکرد مخلوط ارائه نشد.
پژوهش حاضر	2026	LDPE + نانوزایکوترم	DSR، ITS، ITSM، SCB، ٤PB	تحلیل چندمقیاسی اثر هم‌زمان پلیمر و WMA بر رئولوژی قیر، شکست و خستگی مخلوط.	—

۲-اهداف و فرضیات پژوهش

هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی اثر هم‌افزایی نانوزایکوترم و پلی‌اتیلن سبک بازیافتی (LDPE) بر رفتار رئولوژیکی قیر و عملکرد مکانیکی، شکست و خستگی مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم است. همچنین، مقدار بهینه LDPE بر اساس تعادل میان سختی، مقاومت خستگی، ظرفیت جذب انرژی و انعطاف‌پذیری تعیین می شود. برای دستیابی به این هدف، اهداف اختصاصی زیر دنبال شد:

-ارزیابی اثر مقادیر مختلف LDPE بر ویژگی های رئولوژیکی قیر اصلاح‌شده با نانوزایکوترم، شامل پارامترهای G*، δ، مقاومت شیارشدگی و حساسیت خستگی.

-بررسی تأثیر اصلاح‌کننده ترکیبی Nano-ZycoTherm– LDPE بر ویژگی‌های مکانیکی، مقاومت شکست و عملکرد خستگی مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم.

-تعیین ارتباط میان شاخص‌های رئولوژیکی قیر و پارامترهای عملکردی مخلوط با استفاده از تحلیل‌های آماری و مدل‌سازی ارتباطی.

-تعیین مقدار مناسب LDPE با هدف دستیابی به تعادل مطلوب میان افزایش مقاومت مکانیکی و جلوگیری از کاهش انعطاف‌پذیری مخلوط

فرضیه‌های اصلی این پژوهش عبارت‌اند از:

-افزودن LDPE به قیر اصلاح‌شده با نانوزایکوترم، موجب تغییر رفتار ویسکوالاستیک قیر و بهبود مقاومت آن در برابر تغییر شکل دائمی و بارگذاری‌های تکراری می‌شود.

-افزایش مقدار LDPE تا یک محدوده بهینه، موجب ارتقای شاخص‌های مکانیکی و مقاومت خستگی مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم خواهد شد؛ بااین‌حال، مقادیر بیش از حد پلیمر ممکن است کاهش انعطاف‌پذیری و افزایش شکنندگی را به همراه داشته باشد.

-میان پارامترهای رئولوژیکی قیر شامل G*، δ و G*×sinδ و شاخص‌های عملکردی مخلوط شامل ITS، ITSM، انرژی شکست و عمر خستگی، رابطه آماری معنی‌داری وجود دارد.

-مقدار بهینه LDPE با ایجاد تعادل میان افزایش سختی، بهبود مقاومت خستگی و حفظ ظرفیت جذب انرژی مخلوط قابل تعیین است.

۳-مصالح و مواد مورد استفاده

۳-۱-قیر مصرفی

در این پژوهش، از قیر خالص با درجه نفوذ ۷۰/۶۰ به‌عنوان قیر پایه استفاده شد. انتخاب این نوع قیر به‌دلیل کاربرد گسترده آن در روسازی‌های آسفالتی مناطق با شرایط اقلیمی متوسط و امکان مقایسه نتایج با مطالعات اصلاح قیر پلیمری انجام شد.

مشخصات اولیه قیر شامل درجه نفوذ، نقطه نرمی، کشش‌پذیری، وزن مخصوص، نقطه اشتعال و نقطه احتراق مطابق استانداردهای ASTMتعیین شد. نتایج آزمون‌های شناسایی اولیه در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. ویژگی‌های فیزیکی قیر پایه و نتایج آزمون‌های شناسایی اولیه مطابق استانداردهای ASTM

روش آزمایش	مقدار	مشخصه
ASTM D70	1.017	وزن مخصوص در ۲۵°C
ASTM D5	60	درجه نفوذ در ۲۵°C (0.1 mm)
ASTM D36	51.4	نقطه نرمی(°C)
ASTM D113	بیش از ۱۰۰	کشش‌پذیری در ۲۵°C (cm)
ASTM D92	326	نقطه اشتعال(°C)
ASTM D92	339	نقطه احتراق(°C)

نتایج نشان داد که قیر پایه دارای ویژگی‌های متداول قیر نفوذی ۷۰/۶۰ بوده و سختی و قابلیت تغییر شکل مناسبی برای اصلاح پلیمری دارد.

۳-۲-مصالح سنگی

مصالح سنگی مورد استفاده از نوع سنگ آهک شکسته بوده و حدود ۹۰ تا ۹۵ درصد وزن مخلوط آسفالتی را تشکیل می‌دهد. این مصالح به‌دلیل مقاومت مکانیکی مناسب، زبری سطح و قابلیت ایجاد قفل‌وبست داخلی انتخاب شد. ویژگی‌های مهندسی مصالح مطابق استانداردهای ASTM و BS ارزیابی شد.

جدول ۳. نتایج آزمون‌های کیفیت و مشخصات مهندسی مصالح سنگی درشت‌دانه

نتیجه	استاندارد	مشخصه
20	ASTM C131	افت وزنی لوس‌آنجلس(٪)
0.6	ASTM C88	افت وزنی سولفات سدیم(٪)
0.4	ASTM D4791	ذرات پهن و دراز (٪)
16	BS812	ضریب تورق (٪)
98	ASTM D5821	درصد شکستگی روی الک شماره ٤ (٪)

نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که مصالح درشت‌دانه دارای کیفیت مناسب برای استفاده در مخلوط آسفالتی است. مقدار افت لوس‌آنجلس برابر با ۲۰ درصد و افت سولفات سدیم برابر با ۰,٦ درصد، مقاومت مناسب مصالح در برابر سایش و عوامل محیطی را نشان می‌دهد. همچنین، درصد بالای شکستگی (۹۸ درصد) و مقدار محدود ذرات پهن و دراز (۰,٤ درصد) موجب تقویت اسکلت سنگدانه‌ای و بهبود انتقال بار در مخلوط آسفالتی می‌شود. مصالح ریزدانه مورد استفاده، غیرخمیری بوده و مقدار پایین افت سولفات سدیم، دوام مناسب آن را نشان می‌دهد. همچنین، مقدار گوشه‌داری ٤٥,٤ درصد، قابلیت ایجاد اصطکاک داخلی مناسب و پایداری ساختار سنگدانه‌ای را تأیید می‌کند.

دانه‌بندی مصالح بر اساس استاندارد ASTM D3515 و با حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلی‌متر انتخاب شد. در این پژوهش، دانه‌بندی میانی به‌دلیل ایجاد تعادل میان اسکلت سنگدانه‌ای، فضای خالی، مقدار قیر موردنیاز و ضخامت فیلم قیر انتخاب شد. اگرچه افزایش مقدار ریزدانه‌ها می‌تواند با افزایش سطح ویژه سنگدانه‌ها موجب بهبود تماس قیر–سنگدانه شود، مقدار بیش از حد آن باعث افزایش سطح موردنیاز برای پوشش قیری، کاهش ضخامت مؤثر فیلم قیر و افزایش احتمال ترک‌خوردگی خستگی خواهد شد. ازاین‌رو، دانه‌بندی انتخاب‌شده با هدف دستیابی هم‌زمان به موارد اشاره شده در ادامه تعیین شد.

جدول٤. نتایج آزمون‌های کیفیت و مشخصات مهندسی مصالح سنگی ریزدانه

نتیجه	استاندارد	مشخصه
غیرخمیری(NP)	ASTM D4318	حدود اتربرگ
0.9	ASTM C88	افت وزنی سولفات سدیم(٪)
45.4	ASTM C1252	گوشه‌داری مصالح ریزدانه(٪)

جدول ۵. دانه‌بندی انتخابی مصالح سنگی و محدوده استاندارد

دانه‌بندی نهایی مخلوط (٪)	دانه‌بندی انتخابی (٪)	محدوده استاندارد	اندازه الک (میلی متر)
100	100	100	19
95	95	90–100	12.5
58	56	44–74	4.75
34	35	28–58	2.36
12	11	5–21	0.30
5	5	2–10	0.075

-پایداری مناسب اسکلت سنگدانه‌ای؛
-قابلیت تراکم مناسب؛
-ضخامت کافی فیلم قیر؛
-مقاومت مطلوب در برابر رشد ترک‌های خستگی.

نتایج آزمون‌های عملکردی نشان داد که این ساختار دانه‌بندی در ترکیب با اصلاح‌کننده LDPE، قابلیت مناسبی برای بهبود رفتار مکانیکی و مقاومت خستگی مخلوط ایجاد می‌کند. این انتخاب با هدف کاهش تمرکز تنش در ناحیه خمیر آسفالتی و افزایش مقاومت در برابر شروع و توسعه ترک‌های خستگی انجام شد.

جدول ٦. مشخصات فیزیکی نانوزایکوترم

مقدار	مشخصه
مایع	**حالت فیزیکی**
زرد کم‌رنگ تا قهوه‌ای روشن	**رنگ**
بدون بو	**بو**
0.97 g/cm³	**وزن مخصوص**
8–9	**pH**
قابل اختلاط	**قابلیت انحلال در آب**
بیش از ۸۰°C	**دمای اشتعال**

۳-۳- افزودنی‌ها

۳-۳-۱- نانو زایکوترم

نانوزایکوترم (Nano-ZycoTherm) یک افزودنی شیمیایی کاهنده دما در فناوری آسفالت نیمه‌گرم است که با بهبود ترشوندگی سطح سنگدانه‌ها، افزایش چسبندگی قیر–سنگدانه و کاهش اصطکاک داخلی، شرایط اختلاط و پوشش‌دهی مصالح را بهبود می‌دهد. در این پژوهش، از محصول شرکت Zydex Industries استفاده شد. مقدار مصرف Nano-ZycoTherm بر اساس مطالعات مقدماتی شامل ارزیابی کارپذیری، کیفیت پوشش‌دهی سنگدانه‌ها و پایداری مارشال تعیین شد. بر اساس نتایج این بررسی‌ها، مقدار ۰٫۱۰ درصد وزنی نسبت به وزن قیر به‌عنوان مقدار بهینه انتخاب و در تمامی ترکیبات ثابت نگه داشته شد.

۳-۳-۲- پلی‌اتیلن سبک (LDPE)

در این پژوهش، از پلی‌اتیلن سبک بازیافتی (LDPE) گرید LF0200 به‌صورت گرانول استفاده شد. انتخاب این پلیمر به‌دلیل قابلیت بازیافت، دسترسی مناسب و توانایی آن در اصلاح رفتار ویسکوالاستیک قیر انجام شد. افزودن LDPE می‌تواند موجب افزایش مدول پیچیده (G^*)، افزایش مؤلفه الاستیک قیر و بهبود مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی شود. بااین‌حال، افزایش بیش از حد مقدار پلیمر ممکن است موجب کاهش کشش‌پذیری و افزایش احتمال شکست ترد در دماهای پایین شود. ازاین‌رو، ارزیابی هم‌زمان سختی، انعطاف‌پذیری و مقاومت خستگی برای تعیین عملکرد واقعی آن ضروری است. در این پژوهش، LDPE در مقادیر ۱، ۳، ۵ و ۷ درصد وزنی قیر بررسی شد. به‌منظور کاهش اثر متغیرهای فرآیندی، شرایط اختلاط شامل دما، زمان و سرعت برش برای تمامی نمونه‌ها ثابت نگه داشته شد. اثر احتمالی پیر شدگی ناشی از فرآیند اختلاط به صورت مستقیم با آزمون RTFOT ارزیابی نشد و این موضوع به‌عنوان یکی از محدودیت‌های پژوهش در نظر گرفته شد. دمای اختلاط ۱۸۵ °C انتخاب شد. این دما در محدوده متداول اصلاح قیر با پلی‌اتیلن (170 تا ۱۹۰ °C) قرار دارد و با هدف دستیابی به پراکنش یکنواخت پلیمر، بدون ایجاد تخریب حرارتی قابل‌توجه، انتخاب شد. اگرچه دمای ذوب LDPE در محدوده ۱۰۵ تا ۱۱۵ °C قرار دارد، فرآیند اصلاح قیر پلیمری تنها به ذوب پلیمر محدود نمی‌شود و نیازمند توزیع مناسب زنجیره‌های پلیمری در ماتریس قیری است. ازاین‌رو، دمای فرآیند معمولاً بالاتر از دمای ذوب پلیمر انتخاب می شود تا تماس مؤثر پلیمر–قیر و جلوگیری از تشکیل تجمعات موضعی امکان‌پذیر شود.

ارزیابی مستقیم تخریب زنجیره های پلیمری در این پژوهش انجام نشد؛ بنابراین، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده از روش‌هایی مانند FTIR، GPC و TGA برای بررسی تغییرات ساختاری پلیمر استفاده شود.

جدول ۷. مشخصات فیزیکی LDPE گرید LF0200

مقدار	مشخصه
$(C_2H_4)n$	**فرمول شیمیایی**
2 g/10 min	**شاخص جریان مذاب(MFI)**
94°C	**نقطه نرمی**
105–115°C	**دمای ذوب**
0.92 g/cm³	**دانسیته**
≥330%	**کشیدگی در شکست(MD)**
≥600%	**کشیدگی در شکست(TD)**
جامد، گرانولی	**شکل ظاهری**



شکل۱. پلی اتیلن سبک LF0200 مصرفی در پژوهش حاضر

٤-روش آزمایش و آماده‌سازی

٤-١- نمونه‌هاآماده‌سازی قیر اصلاح‌شده

برای تهیه قیرهای ا صلاح شده، ابتدا قیر پایه با درجه نفوذ ۷۰/٦۰ در آون آزمایشگاهی تا دمای ۱۲۰ °C گرم شد. این دما با هدف کاهش ویسکوزیته اولیه قیر و فراهم سازی شرایط منا سب برای پراکنش یکنواخت افزودنی انتخاب شد؛ به‌گونه‌ای که از اعمال حرارت طولانی‌مدت و تغییرات غیرکنترل‌شده در ساختار قیر جلوگیری شود. پس از رسیدن قیر به شرایط یکنواخت، Nano-ZycoTherm به مقدار ۰,۱۰ درصد وزنی نسبت به وزن قیر افزوده شد. فرآیند اختلاط این افزودنی با استفاده از همزن مکانیکی، به مدت ۱۵ دقیقه و با سرعت ۱۰۰۰ rpm انجام شد تا توزیع یکنواخت آن در ماتریس قیری حاصل شود.

برای تعیین مقدار مناسب Nano-ZycoTherm ، مطالعه مقدماتی در چهار سطح مصرف ۰,۰۵، ۰,۱۰، ۰,۱۵ و ۰,۲۰ درصد وزنی قیر انجام شد. معیارهای ارزیابی شامل یکنواختی اختلاط، کیفیت پوشش‌دهی سنگدانه‌ها، کارپذیری مخلوط و پایداری مارشال بود. نتایج نشان داد که افزایش مقدار Nano-ZycoTherm از ۰,۰۵ به ۰,۱۰ در صد، موجب بهبود قابل‌توجه کارپذیری و کیفیت پوشش‌دهی بدون کاهش معنی‌دار پایداری مارشال شد. در مقابل، مقادیر ۰,۱۵ و ۰,۲۰ درصد بهبود عملکردی اضافی ایجاد نکردند. بنابراین، مقدار ۰,۱۰ درصد به‌عنوان مقدار بهینه و ثابت Nano-ZycoTherm انتخاب شد.

جدول ۸. نتایج مطالعه مقدماتی برای تعیین مقدار بهینه نانوزایکوترم

نتیجه	پایداری مارشال	کار پذیری مخلوط	کیفیت پوشش سنگدانه	مقدار نانوزایکوترم
مقدار افزودنی ناکافی	بدون تغییر محسوس	متوسط	متوسط	**0.05**
مقدار بهینه انتخاب شد	**حفظ پایداری مکانیکی**	**بسیار مناسب**	**بسیار مناسب**	**0.10**
افزایش مصرف بدون مزیت عملکردی	تغییر معنی‌دار مشاهده نشد	بسیار خوب	بسیار مناسب	**0.15**
از نظر اقتصادی و عملکردی توصیه نمی‌شود	بهبود معنی‌دار مشاهده نشد	بسیار خوب	بسیار مناسب	**0.20**

در مرحله بعد، قیر حاوی Nano-ZycoTherm تا دمای ۱۸۵ درجه سانتی گراد گرم شد و LDPE بازیافتی در مقادیر ۱، ۳، ۵ و ۷ درصد وزنی قیر به نمونه‌ها افزوده شد. فرآیند اختلاط پلیمر با استفاده از همزن برشی پرسرعت در دمای ۱۸۵ درجه سانتی گراد، به مدت ۶۰ دقیقه و با سرعت ۳۰۰۰ rpm انجام گرفت. شرایط اختلاط برای تمامی نمونه‌ها ثابت نگه داشته شد تا اثر متغیرهای فرآیندی بر نتایج کاهش یابد و امکان مقایسه معتبر میان گروه‌ها فراهم شود. با توجه به احتمال تخریب حرارتی پلیمر یا پیر شدگی اکسایشی قیر، کنترل شرایط اختلاط اهمیت ویژه‌ای دارد. تغییرات احتمالی ناشی از فرآیند اختلاط از طریق مقایسه پارامترهای رئولوژیکی شامل G^*، δ و $G^*\times\sin\delta$ بررسی شد. بااین‌حال، اثر مستقیم پیر شدگی حرارتی ناشی از اختلاط با آزمون‌هایی مانند RTFOT در این مرحله ارزیابی نشد و به‌عنوان محدودیت پژوهش در نظر گرفته شد. پس از پایان فرآیند اختلاط، نمونه‌های قیر اصلاح‌شده در ظروف فلزی دربسته مقاوم به حرارت نگهداری شدند تا تماس اضافی با هوا و عوامل محیطی به حداقل برسد. برای افزایش قابلیت اعتماد نتایج، از هر ترکیب حداقل سه نمونه مستقل تهیه و تمامی آزمون‌ها در سه تکرار انجام شد.

٤-٢- ارزیابی رئولوژیکی قیر اصلاح‌شده

خواص رئولوژیکی قیرهای اصلاح شده با استفاده از رئومتر برش دینامیکی مطابق ASTM D7175 بررسی شد. پارامترهای مورد ارزیابی شامل:

-مدول پیچیده (G^*)

-زاویه فازی (δ)

-پارامتر شیارشدگی ($G^*/\sin\delta$)

-شاخص خستگی ($G^*\times\sin\delta$)

بودند. برای بررسی ارتباط رفتار قیر و عملکرد مخلوط، تحلیل همبستگی پیرسون و مدل‌های رگرسیونی بین پارامترهای رئولوژیکی و شاخص‌های عملکردی انجام شد.

٤-٣-طراحی مخلوط و ساخت نمونه‌های آسفالتی

طراحی مخلوط آسفالتی بر اساس روش مارشال انجام شد. درصد قیر بهینه با توجه به معیارهای پایداری، روانی، درصد فضای خالی مخلوط، فضای خالی مصالح سنگی و فضای خالی پرشده با قیر تعیین گردید. در تمامی نمونه‌ها در صد قیر بهینه ثابت نگه داشته شد تا اثر اصلاح‌کننده‌ها مستقل از تغییر مقدار قیر بررسی شود. ارزیابی عملکرد نمونه‌ها در سه مقیاس انجام شد. در مقیاس قیر، آزمون DSR برای تعیین پارامترهای مدول پیچیده(G^*)، زاویه فازی(δ)، مقاومت شیارشدگی ($G^*/\sin\delta$) و شاخص حساسیت خستگی ($G^*\cdot\sin\delta$) انجام گرفت. در مقیاس مخلوط آسفالتی، ویژگی های مکانیکی شامل مدول برجهندگی غیرمستقیم (ITSM)، مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) و انرژی شکست آزمون نیم‌دایره‌ای (SCB) ارزیابی شد. همچنین، عملکرد خستگی نمونه‌ها با استفاده از آزمون تیر خمشی چهار نقطه‌ای (4PB) مطابق استاندارد AASHTO T321 بررسی گردید. معیار شکست اولیه، کاهش ۵۰ در صدی مدول سختی اولیه در نظر گرفته شد و برای بررسی حساسیت نتایج، تحلیل تکمیلی با معیار کاهش ٤٠ درصدی نیز انجام گرفت.

٤-٤- تحلیل آماری

تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ٢٦ انجام شد. تمامی نتایج به صورت میانگین ± انحراف معیار ارائه گردید و سطح معنی‌داری ۰,۰۵ در نظر گرفته شد. ابتدا آزمون‌های Shapiro–Wilk و Levene به‌ترتیب برای بررسی نرمال بودن داده‌ها و همگنی واریانس‌ها انجام شد. سپس تحلیل واریانس یک‌طرفه (One-way ANOVA) برای بررسی اثر مقدار LDPE بر شاخص‌های عملکردی انجام گرفت. در موارد دارای اختلاف معنی‌دار، آزمون Tukey HSD برای مقایسه زوجی گروه‌ها استفاده شد. علاوه بر این، به‌منظور بررسی ارتباط بین رفتار قیر و عملکرد مخلوط، تحلیل همبستگی پیرسون و مدل‌های رگرسیونی بین پارامترهای رئولوژیکی قیر و شاخص‌های مکانیکی و خستگی مخلوط توسعه داده شد.

٥-آزمایش‌های انجام‌شده

٥-١-آزمایش‌های قیر

٥-١-١- درجه نفوذ

آزمایش درجه نفوذ مطابق استاندارد ASTM D5 به‌منظور ارزیابی سختی نسبی قیر پایه و قیرهای اصلاح‌شده انجام شد. این آزمون به‌عنوان یک شاخص سنتی برای برآورد مقاومت قیر در برابر تغییرشکل در دمای سرویس مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۵-۱-۲-نقطه نرمی

آزمایش نقطه نرمی مطابق ASTM D36 برای بررسی حساسیت حرارتی قیر انجام شد. افزایش نقطه نرمی نشان‌دهنده بهبود مقاومت در برابر تغییرشکل دائمی در دماهای بالا است و با شاخص عملکردی G*/sinδ در آزمون DSR ارتباط مستقیم دارد.

۵-۱-۳- کشش‌پذیری

آزمایش کشش پذیری مطابق ASTM D113 برای ارزیابی توانایی تغییرشکل پلاستیک قیر تحت بارگذاری کششی انجام شد. این ویژگی نقش مهمی در کنترل رشد ترک‌های خستگی دارد و می‌تواند شاخصی اولیه از ظرفیت تغییرشکل قبل از شکست باشد.

۵-۱-٤ - ویسکوزیته چرخشی

ویسکوزیته چرخشی مطابق ASTM D4402 در دمای ۱۳۵ °C اندازه‌گیری شد. این پارامتر نشان‌دهنده قابلیت پمپاژ، اختلاط و تراکم قیر بوده و نقش مهمی در ارزیابی رفتار اجرایی مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم ایفا می‌کند.

۵-۱-۵ رئومتر برش دینامیکی(DSR)

آزمایش رئومتر برش دینامیکی مطابق استاندارد ASTM D7175برای ارزیابی رفتار ویسکوالاستیک قیر انجام شد. نمونه‌ها پیش از آزمایش تحت پیرشدگی کوتاه‌مدت (RTFOT) و بلندمدت (PAV) قرار گرفتند تا شرایط واقعی بهره‌برداری شبیه‌سازی شود. در این آزمون، پارامترهای مدول برشی مختلط (G*)و زاویه فاز (δ) اندازه‌گیری شد. زاویه فاز بیانگر نسبت رفتار ویسکوز به الاستیک در قیر بوده و نقش مهمی در تعیین مقاومت خستگی دارد. دو شاخص عملکردی اصلی شامل:

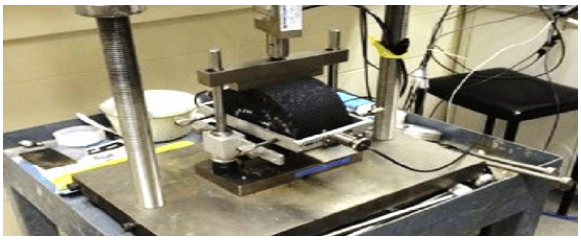
- G*/sinδمقاومت در برابر تغییرشکل دائمی (rutting resistance)
- G*·sinδشاخص حساسیت به خستگی (fatigue susceptibility)

آزمون DSR در دامنه دمایی ٤٦ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد و پارامترهای رئولوژیکی در دمای متناظر با شرایط عملکردی قیر استخراج گردید. برای تحلیل خستگی، مقدار G*·sinδ مطابق معیار Superpave در دمای سرویس متوسط ارزیابی شد. بر اساس چارچوب Superpave، این پارامترها برای پیش‌بینی عملکرد قیر در شرایط بارگذاری تکراری مورد استفاده قرار گرفتند.

۵-۲-آزمایش‌های انجام‌شده بر روی مخلوط آسفالتی

۵-۲-۱-آزمایش مدول برجهندگی

آزمایش ITSM مطابق استاندارد BS EN 12697-26 در دمای ۲۵ °Cانجام شد. این دما به‌عنوان نماینده شرایط عملکردی متوسط روسازی در نظر گرفته می‌شود. مدول برجهندگی به‌عنوان شاخص سختی الاستیک–ویسکوالاستیک مخلوط، ارتباط مستقیمی با مقاومت خستگی و نتایج رئولوژیکی قیر دارد.



شکل ۲. چیدمان دستگاه آزمایش مدول برجهندگی

۵-۲-۲-آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

آزمون ITS مطابق ASTM D6931 در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد. علاوه بر مقاومت کششی، انرژی شکست از سطح زیر منحنی بار–تغییرمکان استخراج شد و به‌عنوان شاخص توانایی مخلوط در جذب انرژی پیش از شکست مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۳. چیدمان دستگاه آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

۵-۲-۳ -آزمایش خستگی تیر خمشی چهارنقطه‌ای(4PB)

آزمون خستگی چهار نقطه‌ای مطابق AASHTO T321 تحت شرایط کنترل کرنش، فرکانس ۱۰ هرتز و دمای ۲۵ در جه سانتی‌گراد انجام شد. سطح کرنش ۸۰۰ میکروکرنش انتخاب گردید. اگر چه معیار کاهش ۵۰ درصد مدول اولیه مطابق AASHTO T321 در بسیاری از مطالعات مورد استفاده قرار می‌گیرد، این معیار ممکن است برای برخی شرایط ترافیکی سنگین مقدار عمر خستگی را بیش‌برآورد کند.

ازاین‌رو، در این پژوهش تحلیل تکمیلی با معیار کاهش ۴۰ درصدی مدول نیز انجام شد تا حساسیت نتایج نسبت به تعریف شکست بررسی شود.



شکل ٤. چیدمان دستگاه آزمایش تیر خمشی چهارنقطه‌ای(4PB)

۵-۳ -ارتباط بین سطوح آزمایش

به‌منظور بررسی انتقال اثر اصلاح‌کننده‌ها از مقیاس قیر به عملکرد مخلوط، نتایج آزمون‌های رئولوژیکی و مکانیکی به‌صورت یک چارچوب چندمقیاسی تحلیل شدند و در سه سطح مختلف شامل رفتار رئولوژیکی قیر(DSR) ، عملکرد مکانیکی مخلوط (ITS و ITSM)و رفتار سازه‌ای (4PB) به‌صورت یک زنجیره تحلیلی یکپارچه مورد بررسی قرار گرفت. این رویکرد چندمقیاسی امکان ارتباط مستقیم بین تغییرات ساختار قیر اصلاح‌شده و عملکرد خستگی مخلوط آسفالتی را فراهم می‌سازد.

ارزیابی اثر نانوزایکوترم و پلی‌اتیلن سبک بر خواص فیزیکی قیر

به‌منظور ارزیابی تغییرات اولیه ناشی از اصلاح قیر، آزمون‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی، کشش‌پذیری و ویسکوزیته چرخشی بر روی قیر پایه و نمونه‌های اصلاح‌شده انجام شد. اگرچه این آزمون‌ها قادر به توصیف کامل رفتار ویسکوالاستیک قیر نیستند، اما شاخص‌های مناسبی برای بررسی تغییرات سختی، حساسیت حرارتی و قابلیت فرآیندپذیری قیر فراهم می‌کنند.

نتایج آزمایش درجه نفوذ، نقطه نرمی، کشش پذیری و ویسکوزیته چرخشی

نتایج درجه نفوذ (جدول ۹) نشان داد افزودن ۰,۱۰ درصد Nano-ZycoTherm موجب افزایش نفوذ قیر از ٦٠ به ٦٧ dmm شد که معادل افزایش ۱۱,۷ درصدی نسبت به قیر پایه است. این افزایش بیانگر کاهش محدود سختی اولیه و افزایش تحرک اجزای قیری است. عملکرد مذکور با نقش اصلی افزودنی‌های شیمیایی WMA سازگار است، زیرا این مواد عمدتاً از طریق کاهش اصطکاک داخلی و بهبود ترشوندگی سطح سنگدانه‌ها، قابلیت اختلاط و تراکم در دماهای پایین‌تر را افزایش می‌دهند. در مقابل، حضورLDPE موجب کاهش تدریجی درجه نفوذ شد. نمونه حاوی ۷ در صد LDPE مقدار نفوذ ٤٠ dmm را نشان داد که نسبت به قیر پایه ۳۳,۳ درصد کاهش داشت. این کاهش ناشی از افزایش مقاومت داخلی سیستم قیر–پلیمر و محدود شدن حرکت مولکولی فاز قیری است. در نتیجه، سختی قیر افزایش یافته و انتظار می‌رود مقاومت آن در برابر تغییرشکل دائمی بهبود یابد. با این حال، کاهش بیش از حد نفوذ می‌تواند نشان‌دهنده افزایش حساسیت به رفتار شکننده در شرایط دمای پایین باشد.

جدول ۹. نتایج آزمایش درجه نفوذ قیرهای خالص و اصلاح‌شده

نمونه	درجه نفوذ (dmm)	درصد تغییر نسبت به قیر خالص (٪)
قیر خالص	60	0
۰٫۱ درصد نانوزایکوترم + قیر خالص	67	+11.7
۰٫۱ درصد نانوزایکوترم+ ۱ درصد LDPE	67	+11.7
۰٫۱ درصد نانوزایکوترم+ ۳ درصد LDPE	52	-13.3
۰٫۱ درصد نانوزایکوترم+ ۵ درصد LDPE	45	-25.0
۰٫۱ درصد نانوزایکوترم+ ۷ درصد LDPE	40	-33.3

روند مشابهی در نتایج نقطه نرمی مشاهده شد Nano-ZycoTherm باعث کاهش جزئی نقطه نرمی از ٥١,٤ به ٤٩ درجه سانتی‌گراد شد، در حالی که افزایش مقدار LDPE موجب افزایش پیوسته این شاخص گردید. بیشترین مقدار نقطه نرمی مربوط به نمونه حاوی ۷ درصد LDPE با مقدار ٦٢,٢ درجه سانتی‌گراد بود که افزایش ۲۱ درصدی نسبت به قیر پایه را نشان داد. افزایش نقطه نرمی بیانگر افزایش مقاومت حرارتی قیر اصلاح‌شده و کاهش حساسیت آن در برابر تغییرشکل‌های ناشی از دمای بالا است. این نتیجه با کاهش درجه نفوذ و افزایش سختی مشاهده‌شده در نمونه‌های دارای LDPE همخوانی دارد. کشش‌پذیری یکی از شاخص‌های مهم برای ارزیابی قابلیت تغییرشکل قیر قبل از شکست است. مطابق جدول ۱۰، نانوزایکوترم اثر قابل توجهی بر این ویژگی نداشت و مقدار کشش‌پذیری در حدود مقدار قیر پایه باقی ماند. در مقابل، LDPEموجب کاهش شدید کشش‌پذیری شد؛ به‌طوری‌که مقدار این پارامتر از بیش از ۱۰۰ سانتی‌متر در قیر پایه به ٤,٥ سانتی‌متر در نمونه دارای ۷ درصد LDPE کاهش یافت. این کاهش ۹۵,۵ درصدی نشان‌دهنده افزایش سهم فاز سخت پلیمری و محدود شدن قابلیت تغییرشکل پلاستیک سیستم است. اگرچه این رفتار می‌تواند مقاومت در برابر شیارشدگی و تغییرشکل دائمی را افزایش دهد، اما کاهش شدید کشش‌پذیری بیانگر ضرورت کنترل مقدار پلیمر برای جلوگیری از افزایش حساسیت ترک‌خوردگی دمای پایین است. بنابراین، نتایج کشش‌پذیری نشان می‌دهد که افزایش درصد LDPE باید هم‌زمان با شاخص‌های مقاومت خستگی و انرژی شکست تفسیر شود و صرفاً افزایش سختی معیار مناسبی برای انتخاب مقدار بهینه پلیمر نیست.

جدول ۱۰. نتایج آزمایش نقطه نرمی قیرهای خالص و اصلاح‌شده

نمونه	نقطه نرمی (°C)	درصد تغییر نسبت به قیر خالص (٪)
قیر خالص	51.4	0
۰٫۱ درصد نانوزایکوترم + قیر خالص	49.0	-4.7
۰٫۱ درصد نانوزایکوترم+ ۱ درصد LDPE	52.3	+1.8
۰٫۱ درصد نانوزایکوترم+ ۳ درصد LDPE	54.6	+6.2
۰٫۱ درصد نانوزایکوترم+ ۵ درصد LDPE	58.2	+13.2
۰٫۱ درصد نانوزایکوترم+ ۷ درصد LDPE	62.2	+21.0

جدول ۱۱. نتایج آزمایش کشش‌پذیری قیرهای خالص و اصلاح‌شده

نمونه	کشش پذیری (cm)	درصد تغییر نسبت به قیر خالص(%)
قیر خالص	100	0
۰٫۱ درصد نانوزایکوترم + قیر خالص	100	0
۰٫۱ درصد نانوزایکوترم+ ۱ درصد LDPE	87	-13.0
۰٫۱ درصد نانوزایکوترم+ ۳ درصد LDPE	59.3	-40.7
۰٫۱ درصد نانوزایکوترم+ ۵ درصد LDPE	33	-67.0
۰٫۱ درصد نانوزایکوترم+ ۷ درصد LDPE	4.5	-95.5

نتایج ویسکوزیته چرخشی نشان داد که نانوزایکوترم موجب کاهش جزئی ویسکوزیته از ۰٫۳۵۳ به ۰٫۳٤۸ پاسکال‌ثانیه شد. این تغییر محدود نشان می‌دهد که افزودنی مذکور عمدتاً نقش بهبود فرآیند پذیری را ایفا کرده و اثر قابل توجهی بر افزایش سختی قیر ندارد. در مقابل، افزودنLDPE موجب افزایش تدریجی ویسکوزیته شد. مقدار ویسکوزیته نمونه دارای ۷ درصد LDPE برابر ۱٫۵۵۹ Pa.s بود که افزایش ۳٤۱٫٦ درصدی نسبت به قیر پایه را نشان داد. افزایش ویسکوزیته ناشی از برهم‌کنش زنجیره های پلیمر با اجزای قیر و افزایش مقاومت داخلی سیستم است. با وجود این افزایش تمامی مقادیر ویسکوزیته کمتر از حد توصیه شده ۳Pa.s در دمای ۱۳۵درجه سانتی‌گراد مطابق معیارSuperpave باقی ماندند؛ بنابراین فرآیند تولید مخلوط همچنان امکان‌پذیر بود.

در مجموع، نتایج آزمون‌های فیزیکی نشان داد که نانوزایکوترم و LDPEنقش مکمل اما متفاوتی در اصلاح قیر دارند. نانوزایکوترم عمدتاً موجب بهبود فرآیندپذیری و کاهش جزئی سختی اولیه شد، در حالی‌که LDPE با افزایش سختی، نقطه نرمی و ویسکوزیته، مقاومت قیر در برابر تغییرشکل دائمی را افزایش داد. با این حال، کاهش شدید کشش‌پذیری در درصدهای بالای LDPE نشان می‌دهد که افزایش مقدار پلیمر بدون توجه به انعطاف‌پذیری می‌تواند موجب ایجاد رفتار شکننده شود. بنابراین ارزیابی مقدار بهینه LDPE باید بر اساس تعادل میان سختی، مقاومت شکست، رفتار رئولوژیکی و عملکرد خستگی انجام شود.

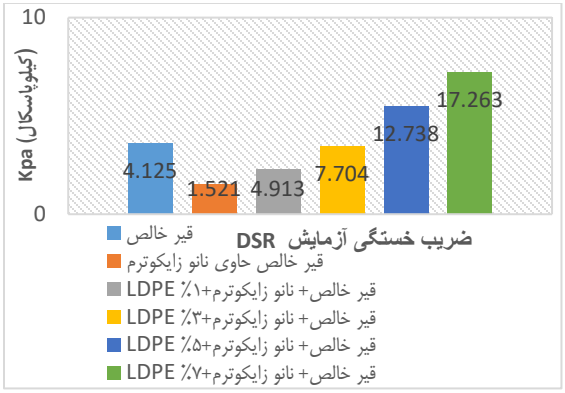
جدول ۱۲. نتایج آزمایش ویسکوزیته چرخشی قیرهای خالص و اصلاح‌شده

نمونه	ویسکوزیته (Pa.s)	درصد تغییر (%) نسبت به قیر پایه
قیر خالص	0.353	0
۰٫۱ درصد نانوزایکوترم + قیر خالص	0.348	-1.4
۰٫۱ درصد نانوزایکوترم+ ۱ درصد LDPE	0.439	+24.4
۰٫۱ درصد نانوزایکوترم+ ۳ درصد LDPE	0.757	+114.4
۰٫۱ درصد نانوزایکوترم+ ۵ درصد LDPE	1.044	+195.8
۰٫۱ درصد نانوزایکوترم+ ۷ درصد LDPE	1.559	+341.6

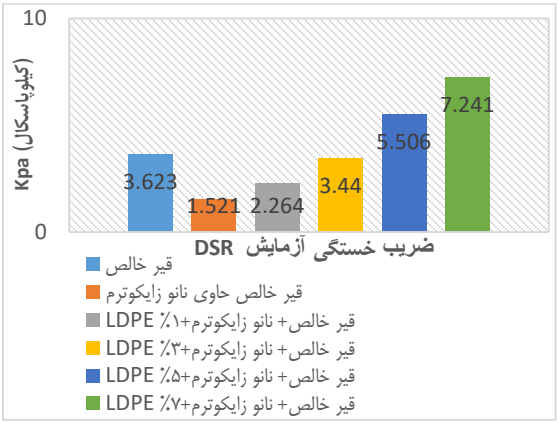
نتایج آزمایش رئومتر برش دینامیکی(DSR)

به‌منظور بررسی رفتار ویسکوالاستیک قیرهای اصلاح‌شده، آزمون رئومتر برش دینامیکی (DSR) مطابق ASTM D7175 بر روی نمونه‌های پیرنشده و کوتاه‌مدت پیرشده انجام شد. پارامترهای مدول پیچیده(G*) ، زاویه فازی(δ)، شاخص مقاومت در برابر شیارشدگی (G*/sinδ) و شاخص خستگی (G*·sinδ) در دماهای ۵۸ و ٦٤ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شدند تا اثر دما بر عملکرد رئولوژیکی قیر و محدودیت نا شی از ارز یابی تکدمایی برطرف شود. نتایج نشان داد افزودن ۰٫۱ درصد نانوزایکوترم موجب کاهش جزئی G* و افزایش زاویه فازی نسبت به قیر پایه شد که بیانگر افزایش سهم رفتار ویسکوز و کاهش سختی اولیه قیر است. این رفتار با عملکرد

افزودنی‌های شیمیایی مورد استفاده در فناوری آسفالت نیمه‌گرم سازگار بوده و نشان می‌دهد نانوزایکوترم عمدتاً با کاهش تنش بین‌سطحی و بهبود ترشوندگی سنگدانه‌ها، قابلیت اختلاط و تراکم را در دماهای پایین‌تر افزایش می‌دهد، بدون آنکه تغییر چشمگیری در ساختار الاستیک قیر ایجاد کند. در مقابل، افزایش درصد LDPE موجب افزایش تدریجی G^* و کاهش زاویه فازی شد که نشان‌دهنده رشد مؤلفه الاستیک و تشکیل شبکه پلیمری در ماتریس قیر است. این ساختار باعث افزایش ظرفیت ذخیره انرژی الاستیک و محدود شدن تغییرشکل‌های ویسکوز تحت بارگذاری تکراری شده و در نتیجه مقدار $G^*\cdot\sin\delta$ در تمامی نمونه‌های حاوی LDPE افزایش یافت. این روند، بهبود مقاومت در برابر شیارشدگی را تأیید کرده و با نتایج آزمون‌های نقطه نرمی، ویسکوزیته و درجه نفوذ سازگار است.



شکل۵. ضریب $G^*\sin\delta$ برای قیر خالص و اصلاح شده در دمای ۵۸ درجه سلسیوس



شکل۶. ضریب $G^*\sin\delta$ برای قیر خالص و اصلاح شده در دمای ۶۴ درجه سلسیوس

تحلیل شاخص خستگی ($G^*\cdot\sin\delta$) و ارتباط آن با عملکرد مخلوط

به‌منظور بررسی حساسیت دمایی رفتار خستگی، شاخص $G^*\cdot\sin\delta$ در دماهای ۵۸ و ۶۴ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد با افزایش درصد LDPE، مقدار $G^*\cdot\sin\delta$ افزایش یافت که بیانگر افزایش سختی قیر است، با این حال مقادیر به‌دست‌آمده همچنان در محدوده قابل قبول معیار Superpave قرار داشتند. با وجود این، $G^*\cdot\sin\delta$ به‌تنهایی نمی‌تواند عملکرد خستگی مخلوط را پیش‌بینی کند، زیرا رفتار خستگی علاوه بر ویژگی های رئولوژیکی قیر، به ساختار سنگدانه‌ای، کیفیت پیوند قیر□سنگدانه و نحوه توزیع تنش نیز وابسته است. به همین منظور، ارتباط بین پارامترهای رئولوژیکی قیر و شاخص‌های عملکردی مخلوط بررسی شد. تحلیل همبستگی پیرسون نشان داد G^* با مدول برجهندگی (ITSM) همبستگی مثبت قوی ($r\approx0.90$)، $G^*\cdot\sin\delta$ با مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) همبستگی مثبت معنی‌دار ($r\approx0.88$) و $G^*\cdot\sin\delta$ با عمر خستگی (Nf) همبستگی معکوس قابل توجهی ($r\approx-0.84$) دارد ($P<0.05$). این نتایج نشان می‌دهد افزایش سختی قیر تا محدوده بهینه موجب بهبود عملکرد مکانیکی مخلوط می‌شود، اما افزایش بیش از حد آن می‌تواند ظرفیت تغییرشکل و مقاومت در برابر ترک‌خوردگی را کاهش دهد. برای کمی‌سازی این ارتباط، مدل رگرسیونی زیر توسعه داده شد.

$$N_f=a-b(G^*\sin\delta)$$

که در آن N_f عمر خستگی و a و b ضرایب رگرسیون هستند. این مدل با ضریب تعیین $R^2\approx0.89$ نشان داد بخش عمده تغییرات عمر خستگی از طریق پارامترهای رئولوژیکی قیر قابل تبیین است و ارتباط چندمقیاسی بین رفتار ویسکوالاستیک قیر و عملکرد مخلوط آسفالتی را تأیید می‌کند.

جمع‌بندی نتایج DSR

نتایج آزمون DSR نشان داد نانوزایکوترم و LDPE عملکرد مکملی در اصلاح قیر دارند. نانوزایکوترم عمدتاً موجب افزایش کارپذیری و کاهش سختی اولیه شده، در حالی که LDPE با افزایش G^* و کاهش δ مقاومت در برابر شیارشدگی

را بهبود می‌بخشد. با این وجود، افزایش بیش از حد درصد LDPEاگرچه باعث افزایش سختی قیر می‌شود، اما با کاهش کشش‌پذیری همراه است؛ بنابراین تعیین مقدار بهینه پلیمر باید بر پایه تحلیل هم‌زمان شاخص‌های رئولوژیکی، مقاومت شکست و عملکرد خستگی انجام گیرد، نه صرفاً بر اساس افزایش G* یا G*/sinδ.

ارزیابی اثر نانوزایکوترم و پلی‌اتیلن سبک بر خواص فیزیکی مخلوط آسفالتی

نتایج آزمایش مدول برجهندگی(ITSM)

نتایج آزمون ITSM (جدول ۱۳) نشان داد افزودن نانوزایکوترم به‌تنهایی موجب کاهش جزئی مدول برجهندگی (۵,۷٪) شد که ناشی از نرم‌تر شدن نسبی فاز قیری و افزایش قابلیت تغییر شکل الاستیک در دماهای بهره‌برداری است. در مقابل، افزودن LDPE موجب افزایش تدریجی مدول شد و بیشترین مقدار در نمونه حاوی ۷ درصد LDPE برابر MPa ٦٦٢٤ به‌دست آمد که نسبت به نمونه شاهد ۵۳,٤ درصد افزایش نشان داد.

اگرچه افزایش ITSM بیانگر بهبود ظرفیت تحمل بار و انتقال مؤثرتر تنش در مخلوط است، اما این شاخص به‌تنهایی نمی‌تواند معیار مناسبی برای انتخاب ترکیب بهینه باشد. افزایش زیاد مدول معمولاً با کاهش قابلیت تغییرشکل و افزایش احتمال ترک‌خوردگی حرارتی همراه است. این موضوع با نتایج آزمون کشش پذیری نیز همخوانی دارد؛ به‌طوری که نمونه حاوی ۷ درصد LDPE هم‌زمان بیشترین مدول و کمترین کشش‌پذیری را نشان داد. بنابراین، هرچند افزایش مدول برای مقاومت در برابر تغییرشکل دائمی مطلوب است، در مناطق سردسیر یا روسازی‌های تحت بارگذاری حرارتی شدید، استفاده از درصدهای بالای LDPEممکن است حساسیت مخلوط به ترک‌خوردگی دمای پایین را افزایش دهد. ازاین‌رو نتایج ITSM در کنار آزمون‌های ITS، انرژی شکست و خستگی تفسیر شدند.

جدول ۱۳. نتایج آزمون مدول برجهندگی غیرمستقیم (ITSM) مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم اصلاح‌شده با نانوزایکوترم وLDPE

تغییر نسبت به شاهد	مدول برجهندگی (MPa)	نمونه
—	4319.5	شاهد
-5.7%	4075	۰,۱ درصد نانوزایکوترم + شاهد
-1.8%	4240	۰,۱ درصد نانوزایکوترم+ ۱ درصد LDPE
+12.7%	4866	۰,۱ درصد نانوزایکوترم+ ۳ درصد LDPE
+33.1%	5751	۰,۱ درصد نانوزایکوترم+ ۵ درصد LDPE
+53.4%	6624	۰,۱ درصد نانوزایکوترم+ ۷ درصد LDPE

نتایج آزمایش خستگی تیر خمشی چهارنقطه‌ای(4PB)

آزمون خستگی مطابق AASHTO T321 انجام شد و معیار اصلی شکست، کاهش ۵۰ درصدی مدول اولیه در نظر گرفته شد تا امکان مقایسه مستقیم با مطالعات پیشین فراهم شود. با توجه به گزارش برخی مطالعات اخیر مبنی بر محافظه‌کارانه‌تر بودن معیار ٤٠ درصد کاهش مدول برای روسازی‌های پرترافیک، تحلیل حساسیت نیز بر مبنای این معیار انجام شد. نتایج نشان داد اگرچه مقادیر مطلق عمر خستگی کاهش یافت، اما ترتیب عملکرد نمونه‌ها تغییری نکرد و نمونه‌های حاوی ۵و ۷ درصد LDPE همچنان بهترین عملکرد را نشان دادند. بنابراین نتیجه‌گیری اصلی پژوهش مستقل از معیار انتخاب‌شده باقی ماند.

جدول۱۴. نتایج آزمایش خستگی تیر خمشی چهارنقطه‌ای (4PB) مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم

نمونه	انرژی تلف‌شده تجمعی (%)	تغییر نسبت به شاهد	عمر خستگی (سیکل)	تغییر نسبت به شاهد
شاهد	10.0	—	38,000	—
۰٫۱ درصد نانوزایکوترم + شاهد	9.7	-3.0%	37,000	-2.6%
۰٫۱ درصد نانوزایکوترم+ ۵ درصد LDPE	14.6	+46.0 %	188,000	+394.7 %
۰٫۱ درصد نانوزایکوترم+ ۷ درصد LDPE	16.3	+63.0 %	235,000	+518.4 %

نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

افزودن نانوزایکوترم به‌تنهایی موجب کاهش جزئی مقاومت کششی شد، اما ترکیب آن با LDPE باعث افزایش معنی‌دار ITSو انرژی شکست گردید. بیشترین مقدار ITS مربوط به نمونه حاوی ۷ درصد LDPE بود که نسبت به نمونه شاهد ۷۷٫۶۹ درصد افزایش نشان داد. با وجود این، تحلیل هم‌زمان نتایج ITS، DSR و آزمون کشش‌پذیری نشان می‌دهد که افزایش مقاومت افزودن LDPE موجب افزایش قابل توجه عمر خستگی شد؛ به‌طوری‌که نمونه‌های دارای ۵ و ۷ درصد LDPE به‌ترتیب ۱۸۸۰۰۰ و ۲۳۵۰۰۰ سیکل را تحمل کردند. این بهبود را می‌توان به تشکیل شبکه پلیمری، افزایش ظرفیت ذخیره انرژی الاستیک و توزیع یکنواخت‌تر تنش در ماتریس آسفالتی نسبت داد. علاوه بر این، افزایش انرژی تلف شده تجمعی نشان می‌دهد مخلوط‌های اصلاح‌شده توانایی بیشتری در جذب و استهلاک انرژی ناشی از بارگذاری چرخه‌ای قبل از گسترش ترک دارند. مکانیکی الزاماً به معنای بهبود همه‌جانبه عملکرد روسازی نیست. نمونه حاوی ۷ در صد LDPE اگرچه بیشترین مقاومت کششی غیرمستقیم، بیشترین مدول و بیشترین عمر خستگی را نشان داد، اما کاهش ۹۵٫۵ درصدی کشش‌پذیری قیر بیانگر افزایش شکنندگی سیستم است. این موضوع می‌تواند در شرایط دمای پایین، احتمال شروع و گسترش ترک‌های حرارتی را افزایش دهد. ازاین‌رو، انتخاب درصد بهینه LDPE باید بر مبنای تعادل میان مقاومت در برابر شیارشدگی، دوام خستگی، چقرمگی شکست و انعطاف‌پذیری انجام شود. برای روسازی‌های مناطق گرم و پرترافیک، استفاده از ۷ درصد LDPE می‌تواند گزینه مناسبی باشد، در حالی که برای مناطق سرد سیر یا اقلیم‌هایی با نوسان دمایی زیاد، ۵ درصد LDPE به دلیل ایجاد تعادل بهتر میان سختی و انعطاف‌پذیری، انتخاب محافظه‌کارانه‌تر و قابل‌اعتمادتری خواهد بود.

جدول ۱۵. نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم و انرژی شکست مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم

نمونه	ITS (MPa)	تغییر نسبت به شاهد(%)	انرژی شکست تا تسلیم(MPa)	تغییر نسبت به شاهد(%)	انرژی شکست کل(MPa)	تغییر نسبت به شاهد(%)
مخلوط آسفالتی شاهد	0.726	–	22.5	–	30.0	–
۰٫۱ درصد نانوزایکوترم + شاهد	0.692	-4.68	21.2	-5.78	28.4	-5.33
۰٫۱ درصد نانوزایکوترم+ ۵ درصد LDPE	1.210	+66.67	32.3	+43.56	38.0	+26.67
۰٫۱ درصد نانوزایکوترم+ ۷ درصد LDPE	1.290	+77.69	36.0	+60.00	41.0	+36.67

تحلیل آماری نتایج آزمایش‌ها و مدل‌سازی ارتباط بین رفتار رئولوژیکی قیر و عملکرد مخلوط آسفالتی

به‌منظور تعیین میزان معنی‌داری تغییرات ایجادشده ناشی از افزودن Nano-Zycotherm و پلی‌اتیلن سبک (LDPE) و همچنین ایجاد ارتباط کمی میان رفتار رئولوژیکی قیر اصلاح شده و عملکرد نهایی مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم، تحلیل آماری و مدل‌سازی چندمقیاسی بر روی نتایج آزمایش‌های انجام‌شده صورت گرفت. برخلاف تحلیل‌های صرفاً توصیفی، در این مطالعه تلاش شد تا ارتباط بین تغییرات ایجادشده در مقیاس قیر (Binder scale) و پاسخ عملکردی مخلوط آسفالتی (Mixture scale)با استفاده از روش‌های آماری استنباطی و مدل‌های رگرسیونی بررسی شود. تمامی تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS Statistics 26انجام شد.

ابتدا پیش‌فرض‌های لازم برای استفاده از آزمون‌های پارامتریک شامل نرمال بودن توزیع داده‌ها و همگنی واریانس گروه‌ها بررسی گردید. سپس تحلیل واریانس یک‌طرفه همراه با آزمون تعقیبی Tukey HSDبرای تعیین اختلاف معنی‌دار میان گروه‌های آزمایشی مورد استفاده قرار گرفت. علاوه بر مقدار احتمال (P-value)، اندازه اثر آماری (η^2) نیز محاسبه شد تا میزان اهمیت واقعی تغییرات ناشی از اصلاح‌کننده‌ها مشخص شود. در تحلیل حاضر، عامل مستقل شامل نوع اصلاح‌کننده و درصد LDPE بود، در حالی که پارامترهای وابسته شامل ویژگی‌های فیزیکی قیر (درجه نفوذ، نقطه نرمی و کشش‌پذیری)، ویژگی‌های رئولوژیکی(G^* ، δ، $G^*/\sin\delta$و $G\cdot\sin\delta$) و شاخص های عملکردی مخلوط(ITSM ، ITS، انرژی شکست و عمر خستگی آزمون تیر خمشی چهار نقطه‌ای (در نظر گرفته شدند. سطح معنی‌داری تمامی آزمون‌ها برابر ۰,۰۵ انتخاب شد.

بررسی پیش‌فرض‌های آماری و اعتبار داده‌ها

پیش از انجام تحلیل های استنباطی، آزمون هایShapiro–Wilk و Levene به‌ترتیب برای بررسی نرمال بودن داده‌ها و همگنی واریانس گروه‌های آزمایشی انجام شد. نتایج نشان داد که مقدار احتمال آزمون Shapiro–Wilk برای تمامی پارامترهای بررسی‌شده بزرگ‌تر از ۰,۰۵ بوده است؛ بنابراین فرض نرمال بودن توزیع داده‌ها پذیرفته شد. همچنین نتایج آزمون Levene نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین واریانس گروه‌ها وجود ندارد ($P>0.05$). این یافته نشان می‌دهد که پراکندگی داده‌ها در گروه‌های مختلف آزمایشی مشابه بوده و استفاده از آزمون‌های پارامتریک برای مقایسه میانگین‌ها از نظر آماری قابل قبول است. جدول ۱۵ نتایج آزمون های آماری مربوط به پیش‌فرض های تحلیل را ارائه می‌کند.

جدول ۱۶. نتایج آزمون‌های Shapiro–Wilk و Levene برای بررسی پیش‌فرض‌های آماری

پارامتر	Shapiro–Wilk	P-value	Levene	P-value
ITS	0.972	0.314	0.84	0.548
ITSM	0.965	0.271	1.02	0.432
عمر خستگی PB۴	0.957	0.186	0.91	0.486
G*	0.969	0.285	0.93	0.461
G·sinδ	0.961	0.226	1.15	0.398

تحلیل واریانس یک‌طرفه (One-Way ANOVA) و اندازه اثر

به‌منظور تعیین اینکه آیا تغییر نوع اصلاح‌کننده و مقدار LDPE موجب ایجاد اختلاف معنی‌دار در خواص قیر و عملکرد مخلوط آسفالتی شده است یا خیر، آزمون ANOVA یک‌طرفه انجام شد. نتایج نشان داد که اثر ترکیبی تیمار اصلاح‌کننده شامل حضور Nano-Zycotherm و سطوح مختلف LDPE بر تمامی پارامترهای مورد بررسی معنی‌دار بوده است ($P<0.001$). این نتیجه نشان می‌دهد که تغییرات مشاهده شده در نمونه‌های اصلاح‌شده، از نظر آماری قابل انتساب به تغییر ترکیب اصلاح‌کننده‌ها بوده و صرفاً ناشی از پراکندگی تصادفی داده‌های آزمایشگاهی نیست. بیشترین مقدار آماره F مربوط به عمر خستگی آزمون PB۴ با مقدار ۱۳۲,۷۰ مشاهده شد. این نتیجه نشان می‌دهد که رفتار خستگی مخلوط بیشترین حساسیت را نسبت به تغییر ساختار قیر اصلاح شده داشته است. افزایش مقدار LDPE موجب تشکیل شبکه پلیمری در فاز قیری، افزایش قابلیت انتقال تنش و کاهش سرعت تجمع آسیب ناشی از بارگذاری تکراری شده است. برای بررسی اهمیت مهندسی این اختلاف‌ها، اندازه اثر η^2 محاسبه گردید. مقادیر به‌دست‌آمده نشان داد که تمامی پارامترها دارای اندازه اثر بزرگ ($\eta^2>0.80$) هستند. این موضوع بیانگر آن است که بخش قابل توجهی از تغییرات عملکردی مشاهده‌شده توسط تغییر نوع و مقدار اصلاح‌کننده توضیح داده می‌شود. با این حال، اندازه اثر بالا به معنی مطلوب بودن نامحدود افزایش LDPE نیست، زیرا افزایش بیش از حد سختی می‌تواند با کاهش انعطاف‌پذیری همراه شود. بنابراین، تفسیر نتایج باید بر اساس تعادل میان سختی، مقاومت در برابر آسیب و قابلیت تغییر شکل انجام شود.

جدول ۱۷. نتایج تحلیل واریانس و اندازه اثر اصلاح‌کننده‌ها

پارامتر	F-value	P-value	η^2	شدت اثر
درجه نفوذ	42.31	<0.001	0.87	قوی
نقطه نرمی	56.80	<0.001	0.82	قوی
کشش‌پذیری	89.50	<0.001	0.91	بسیار قوی
ویسکوزیته چرخشی	110.20	<0.001	0.95	بسیار قوی
ITSM	74.60	<0.001	0.91	بسیار قوی
ITS	97.35	<0.001	0.94	بسیار قوی
عمر خستگی PB۴	132.70	<0.001	0.97	بسیار قوی

آزمون تعقیبی Tukey HSD

اگرچه آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه وجود اختلاف معنی‌دار میان گروه‌های آزمایشی را مشخص می‌کند، اما این آزمون قادر به تعیین محل دقیق اختلاف میان گروه‌ها نیست. ازاین‌رو، به‌منظور شناسایی تفاوت بین زوج‌های مختلف آزمایشی، آزمون تعقیبی Tukey HSD انجام شد. نتایج این آزمون نشان داد که نمونه شاهد و نمونه حاوی ۰,۱ درصد Nano-Zycotherm در اغلب

پارامترهای مورد بررسی در یک گروه آماری قرار گرفتند. این نتیجه بیانگر آن است که استفاده مستقل از Nano-Zycotherm در مقدار انتخاب‌شده، اگرچه موجب بهبود قابلیت فرآیندپذیری، کاهش مقاومت جریان داخلی و افزایش کارایی اختلاط در دمای پایین‌تر می شود، اما تغییر قابل توجهی در ساختار مکانیکی قیر و مقاومت عملکردی مخلوط ایجاد نمی‌کند. در مقابل، افزایش مقدار LDPE موجب جدایش تدریجی گروه‌های آماری شد. نمونه‌های حاوی ۵ و ۷ درصد LDPE بیشترین فاصله آماری را نسبت به نمونه شاهد نشان دادند که بیانگر تأثیر قابل توجه اصلاح پلیمری بر رفتار رئولوژیکی قیر و عملکرد مکانیکی مخلوط است. تشکیل شبکه پلیمری ناشی از حضور LDPE موجب محدود شدن حرکت نسبی اجزای قیر، افزایش مؤلفه الاستیک رفتار بایندر و بهبود انتقال تنش در ساختار مخلوط گردید. بااین‌حال، افزایش فاصله آماری نمونه‌های LDPE7% نسبت به سایر گروه ها باید همراه با بررسی اثر آن بر انعطاف‌پذیری تفسیر شود.

جدول ۱۸. نتایج آزمونTukey HSD

پارامتر	شاهد	Nano-ZycoTherm	LDPE1%	LDPE3%	LDPE5%	LDPE7%
ITS	a	a	b	c	d	e
ITSM	a	a	a/b	b	c	d
4PB	a	a	b	c	d	e
ویسکوزیته	a	a	b	c	d	e
G·sinδ	a	a	b	c	d	e

حروف مشابه نشان‌دهنده نبود اختلاف آماری معنی‌دار و حروف متفاوت بیانگر وجود اختلاف معنی‌دار بین گروه ها هستند. بر اساس نتایج Tukey HSD می‌توان نتیجه گرفت که Nano-Zycothermدر ترکیب حاضر عمدتاً نقش یک افزودنی بهبوددهنده فرآیند تولید آسفالت نیمه‌گرم را ایفا کرده است، در حالی که LDPE عامل اصلی تغییرات ساختاری و افزایش ویژگی‌های مکانیکی سیستم بوده است.

تحلیل چندمقیاسی ارتباط بین رفتار رئولوژیکی قیر و عملکرد مخلوط آسفالتی

یکی از محدودیت‌های مطالعات پیشین در زمینه اصلاح قیر با پلیمر، بررسی جداگانه رفتار بایندر و عملکرد مخلوط بدون ایجاد ارتباط کمی بین این دو مقیاس است. به‌منظور رفع این محدودیت، در این پژوهش یک تحلیل چندمقیاسی برای ارتباط‌دهی ویژگی های رئولوژیکی قیر اصلاح‌شده با عملکرد مکانیکی مخلوط آسفالتی انجام شد. در این چارچوب، پارامترهای حاصل از آزمون رئومتر برش دینامیکی (DSR) شامل:

-مدول برشی مرکب (G*)

-زاویه فاز (δ)

-شاخص مقاومت شیارشدگی (G*/sinδ)

-شاخص اتلاف انرژی ویسکوالاستیک (G*·sinδ)

به‌عنوان شاخص‌های رفتار بایندر در نظر گرفته شدند.

در مقابل، پارامترهای عملکردی مخلوط شامل:

-مدول برجهندگی غیرمستقیم (ITSM)

-مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS)

-انرژی شکست

-عمر خستگی آزمون تیر خمشی چهار نقطه‌ای (4PB)

به‌عنوان پاسخ‌های عملکردی انتخاب شدند. این رویکرد بر این فرض استوار است که اصلاح قیر با LDPE صرفاً باعث افزایش سختی نمی‌شود، بلکه موجب تغییر تعادل بین مؤلفه‌های الاستیک و ویسکوز رفتار بایندر می‌گردد. افزایش G^* بیانگر افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل بوده، در حالی که کاهش δ نشان‌دهنده افزایش سهم رفتار الاستیک و قابلیت بازیابی انرژی است. بنابراین، ارزیابی هم‌زمان این پارامترها امکان تحلیل مکانیزم واقعی بهبود عملکرد مخلوط را فراهم می‌کند. لازم به ذکر است که شاخص $G^*\cdot\sin\delta$ در این پژوهش به‌عنوان یک شاخص مقایسه‌ای حساسیت خستگی بایندر استفاده شده و به‌عنوان جایگزین مستقیم عمر خستگی مخلوط تفسیر نمی‌شود. زیرا عملکرد خستگی مخلوط تابع عوامل متعددی شامل ساختار سنگدانه، حجم فضای خالی، چسبندگی قیر–سنگدانه و ویژگی‌های مکانیکی مخلوط است.

تحلیل همبستگی بین پارامترهای DSR و شاخص‌های عملکرد مخلوط

به‌منظور تعیین شدت ارتباط میان رفتار رئولوژیکی قیر و عملکرد مخلوط، ضریب همبستگی پیرسون محاسبه شد. نتایج جدول ۱۸ نشان می‌دهد که تمامی پارامترهای DSR دارای ارتباط معنی‌دار با شاخص‌های عملکردی مخلوط هستند.($P<0.01$)

جدول ۱۹. ضرایب همبستگی پیرسون بین پارامترهای رئولوژیکی قیر و عملکرد مخلوط آسفالتی

پارامتر رئولوژیکی	ITSM	ITS	عمر خستگی PB٤
G*	0.91**	0.88**	0.86**
δ	-0.76**	-0.71**	-0.82**
G·sinδ	-0.83**	-0.79**	-0.90**

(P<0.01)**

رابطه بین شاخص رئولوژیکی $G^*\cdot\sin\delta$ و عمر خستگی مخلوط (N_f) با استفاده از رگرسیون خطی برازش شد و معادله زیر به‌دست آمد.

$$N_f = 268000 - 41200(G^*\sin\delta)$$

که در آن N_f بر حسب سیکل و $G^*\cdot\sin\delta$ بر حسب kPa است. ضریب تعیین مدل برابر $R^2 = 0.89$ بود که نشان می‌دهد بخش عمده تغییرات عمر خستگی از طریق پارامترهای رئولوژیکی قیر قابل تبیین است. نتایج نشان داد که افزایش G^* دارای رابطه مثبت قوی با شاخص‌های عملکردی مخلوط است. به‌عنوان مثال، ضریب همبستگی بین G^* و ITSM برابر ۰,۹۱ به‌دست آمد. این نتیجه نشان می‌دهد که در محدوده مورد بررسی، افزایش مدول قیر ناشی از حضور LDPE موجب افزایش سختی مؤثر و ظرفیت تحمل بار مخلوط شده است. بااین‌حال، افزایش G^* به‌تنهایی نمی‌تواند معیار کافی برای ارزیابی عملکرد باشد؛ زیرا افزایش بیش از حد سختی ممکن است موجب کاهش مقاومت ترک‌خوردگی شود. در نمونه‌های مورد بررسی، افزایش G^* هم‌زمان با کاهش زاویه فاز δ و افزایش مؤلفه الاستیک رخ داده است که نشان‌دهنده تغییر مطلوب در ساختار ویسکوالاستیک سیستم است. همچنین رابطه معکوس معنی‌داری بین δ و عمر خستگی مشاهده شد .($r=-0.82$) کاهش زاویه فاز در نمونه‌های دارای LDPE نشان‌دهنده افزایش سهم رفتار الاستیک بوده که می‌تواند موجب بهبود توانایی ذخیره و بازگشت انرژی پس از بارگذاری‌های تکراری شود. قوی‌ترین ارتباط مربوط به شاخص $G^*\cdot\sin\delta$ بود. این پارامتر با عمر خستگی مخلوط رابطه معکوس بسیار قوی نشان داد .($r=-0.90$) افزایش $G^*\cdot\sin\delta$ بیانگر افزایش میزان انرژی تلف‌شده در هر چرخه بارگذاری است که می‌تواند فرآیند شروع و رشد ترک را تسریع کند. بنابراین، کاهش این شاخص در نمونه‌های اصلاح شده با LDPE با افزایش عمر خستگی همراه بوده است.

تحلیل ارتباط شاخص شیارشدگی و مقاومت تغییرشکل دائمی

نتایج آزمون DSR نشـان داد که افزایش مقدار LDPE موجب افزایش شاخص $G^*/\sin\delta$ در دماهای ۵۸ و ٦٤ درجه سانتی‌گراد گردیـد. افزایش این شـــاخص بیـانگر افزایش مقـاومـت قیر اصـلاح‌شـده در برابر تغییر شـکل دائمی تحت شـرایط دمای بالا است. این رفتار با نتایج آزمون‌های فیزیکی شامل:

-کاهش درجه نفوذ،

-افزایش نقطه نرمی،

-افزایش ویسکوزیته چرخشی،

همخوانی دارد. مکانیزم اصـلی این افزایش عملکرد را می‌توان به تشکیل شبکه پلیمری LDPE نسبت داد که موجب محدود شدن حرکت مولکولی اجزای قیر و افزایش مقاومت جریان می‌شـــود. بااین‌حال، نتایج کشـش‌پذیری نشـان داد که نمونه LDPE7% کاهش شـــدیدی در انعطاف‌پذیری اولیه دارد. بنابراین، افزایش مقاومت شـــیارشـــدگی باید همراه با ارزیابی احتمال افزایش حسـاسـیت به ترک حرارتی انجام شـود. بر این اسـاس، عملکرد نمونه LDPE7% نشان‌دهنده یک وضعیت بهینه مطلق نیست، بلکه بیانگر ایجاد یک تعادل بین مقاومت در برابر تغییر شـــکل و کاهش انعطاف‌پذیری است.

توسـعه مدل رگرسـیون برای پیش‌بینی عمر خسـتگی بر اساس پارامترهای DSR

یکی از اهداف اصلی تحلیل چندمتغیره سی این پژوهش، ایجاد یک رابطه کمی میان ویژگی‌های رئولوژیکی قیر اصلاح‌شده و عملکرد خستگی مخلوط آسفالتی بود. اگرچه پارامترهای حاصل از آزمون DSR در مقیاس بایندر اندازه‌گیری می‌شـوند، اما تغییرات آن‌ها می‌تواند بر رفتار تجمع آسـیب و فرآیند رشـد ترک در مقیاس مخلوط اثرگذار باشـد. ازاین‌رو، به‌منظور کمی‌سـازی این ارتباط، مدل رگرسـیون چندمتغیره با اسـتفاده از پارامترهای رئولوژیکی منتخب توسـعه داده شـد. در انتخاب متغیرهای مسـتقل، از دو پارامتر G^* و $G\cdot\sin\delta$ استفاده شد. دلیل انتخاب این دو پارامتر آن است که G^* نمایانگر مقاومت کلی بایندر در برابر تغییر شکل بوده، در حالی‌که $G\cdot\sin\delta$ میزان مؤلفه اتلاف انرژی ناشـی از رفتار ویسـکوز را نشـان می‌دهد. بنابراین، ترکیب این دو پارامتر امکان ارزیابی هم‌زمان اثر سـختی و قابلیت اتلاف انرژی در رفتار خسـتگی را فراهم می‌کند. به دلیل محدود بودن تعداد ترکیبات آزمایشی، مدل حاضر به‌عنوان یک مدل اکتشافی ارائه شده و برای کاربرد طراحی روسـازی نیازمند اعتبارسـنجی با مجموعه داده مستقل است. مدل پیشنهادی به صورت زیر توسعه یافت:

$$N_f=285400+41.6(G^*)-52.8(G\cdot\sin\delta)$$

که در آن:

- N_f عمر خستگی مخلوط آسفالتی (Cycle)
- G^* مدول برشی مرکب قیر (kPa)
- $G\cdot\sin\delta$ شاخص اتلاف انرژی بایندر (kPa)

نتایج ارزیابی آماری مدل در جدول ۱۹ ارائه شده است.

جدول ۲۰. شاخص‌های آماری مدل پیش‌بینی عمر خستگی

شاخص	مقدار
R^2	0.91
Adjusted R^2	0.88
RMSE	18400 Cycle
P-valueمدل	<0.001
Durbin–Watson	1.94

ضریب تعیین مدل برابر ۰,۹۱ به‌دست آمد که نشان می‌دهد حدود ۹۱ درصد از تغییرات عمر خستگی نمونه‌های مورد مطالعه توسط پارامترهای رئولوژیکی منتخب قابل توضیح است. همچنین مقدار ضریب تعیین اصلاح شده (۰,۸۸) نشان می‌دهد که مدل پس از درنظر گرفتن تعداد متغیرهای مسـتقل همچنان توانایی پیش‌بینی مناسبی دارد. مقدار آماره Durbin–Watson برابر ۱,۹٤ نشان داد که خودهمبسـتگی معنی‌داری در خطاهای مدل وجود ندارد. همچنین معنی‌داری کلی مدل ($P<0.001$) بیانگر آن اسـت که رابطه ایجاد شده از نظر آماری معتبر است. بررسی ضرایب مدل نشـان داد کـه افزایش G^* موجـب افزایش عمر خسـتگی پیش‌بینی شده شده است؛ زیرا در محدوده مورد بررسی، افزایش مدول قیر ناشی از تشکیل شبکه پلیمری LDPE همراه با افزایش ظرفیت انتقال تنش و کاهش تغییر شـکل تجمعی بوده اسـت. در مقابل، افزایش $G\cdot\sin\delta$ اثر کاهنده بر عمر خسـتگی داشـته

است، زیرا افزایش انرژی تلف‌شده در هر چرخه بارگذاری می‌تواند موجب تسریع فرآیند آسیب و رشد ترک شود.
با وجود عملکرد مناسب مدل، باید توجه داشت که این رابطه یک مدل تجربی محدود به شرایط آزمایش حاضر است. این مدل بر اساس یک نوع قیر پایه، یک نوع سنگدانه، شرایط آزمایشگاهی ثابت و محدوده ۱ تا ۷ درصد LDPE توسعه یافته است. بنابراین، استفاده از آن در شرایط واقعی روسازی نیازمند اعتبارسنجی مستقل با داده‌های حاصل از پروژه‌های میدانی و شرایط اقلیمی متفاوت خواهد بود.

تحلیل تعادل سختی، انعطاف‌پذیری و خطر شکنندگی

یکی از نکات مهم در ارزیابی عملکرد قیرهای اصلاح‌شده با پلیمر، ایجاد تعادل میان افزایش سختی و حفظ قابلیت تغییر شکل است. افزایش سختی به‌تنهایی نمی‌تواند نشان‌دهنده بهبود عملکرد بلندمدت باشد؛ زیرا افزایش بیش از حد سختی ممکن است موجب کاهش ظرفیت جذب انرژی و افزایش حساسیت به ترک‌خوردگی شود. در پژوهش حاضر، نمونه حاوی ۷ درصد LDPE بالاترین مقادیر عملکرد مکانیکی را نشان داد، به‌گونه‌ای که:

- ITSM برابر ٦٦٢٤ MPa
- ITS برابر ۱,۲۹ MPa
- انرژی شکست برابر مقدار بیشینه ثبت‌شده،
- عمر خستگی برابر ۲۳۵۰۰۰ سیکل

در مقایسه با نمونه شاهد، این نمونه موجب افزایش:
۵۳,٤درصدی مدول برجهندگی(ITSM)،
۷۷,٦۹ درصدی مقاومت کششی غیرمستقیم(ITS)،
۳٦,٦۷ درصدی انرژی شکست،
۵۱۸,٤ درصدی عمر خستگی
شد. این نتایج نشان می‌دهد که افزایش مقدار LDPE تا سطح ۷ درصد، اگرچه موجب افزایش قابل توجه سختی و مقاومت مکانیکی شده، اما الزاماً منجر به کاهش مقاومت شکست نشده است. دلیل این رفتار را می‌توان به تشکیل ساختار پلیمری پیوسته و افزایش قابلیت انتقال تنش در شبکه قیر–پلیمر نسبت داد. بااین‌حال، کاهش شدید کشش‌پذیری قیر اصلاح‌شده با LDPE7% (کاهش حدود ۹۵,۵ درصد نسبت به قیر پایه) نشان‌دهنده کاهش انعطاف‌پذیری اولیه سیستم است. بنابراین، استفاده از مقادیر بالاتر LDPE ممکن است موجب افزایش خطر ترک‌خوردگی حرارتی، به‌ویژه در شرایط اقلیمی سرد، شود. بر اساس نتایج حاصل، محدوده ۵ تا ۷ درصد LDPE به‌عنوان محدوده عملکردی مناسب پیشنهاد می‌شود: نمونه حاوی ۵ درصد LDPE به دلیل ایجاد تعادل مناسب‌تر میان افزایش سختی، مقاومت خستگی و حفظ نسبی انعطاف‌پذیری، گزینه مناسب‌تری برای شرایط اقلیمی با نوسان دمایی بالا است. در مقابل، نمونه ۷ درصد LDPE بیشترین مقاومت مکانیکی و تغییرشکل دائمی را فراهم می‌کند، اما به دلیل کاهش شدید شکل‌پذیری باید در شرایطی با احتمال ترک حرارتی بالا با احتیاط استفاده شود. این نتیجه نشان می‌دهد که انتخاب مقدار پلیمر باید بر اساس مفهوم تعادل عملکردی (Performance Balance) و نه صرفاً بیشینه‌سازی سختی انجام شود.

جمع‌بندی تحلیل آماری و مدل‌سازی

نتایج تحلیل‌های آماری نشان داد که ترکیب Nano-Zycotherm و LDPE موجب تغییرات قابل اندازه‌گیری در ساختار و عملکرد سیستم آسفالتی نیمه‌گرم شده است. آزمون ANOVA نشان داد که نوع و مقدار اصلاح‌کننده اثر معنی‌داری بر ویژگی‌های فیزیکی، رئولوژیکی و مکانیکی نمونه‌ها دارد، در حالی‌که نتایج اندازه اثر، اهمیت مهندسی این تغییرات را تأیید کرد. نتایج Tukey HSD مشخص کرد که Nano-Zycotherm در مقدار ۰,۱ درصد عمدتاً موجب بهبود فرآیندپذیری و کاهش مقاومت جریان داخلی می‌شود، در حالی که LDPE عامل اصلی تغییر رفتار مکانیکی و رئولوژیکی سیستم است. تحلیل همبستگی بین مقیاس بایندر و مخلوط نشان داد که پارامترهای DSR ارتباط معنی‌داری با شاخص‌های عملکردی دارند؛ به‌طور ویژه، $G\cdot\sin\delta$ بیشترین ارتباط را با عمر خستگی نشان داد که اهمیت کنترل اتلاف انرژی ویسکوز در فرآیند آسیب خستگی را نشان می‌دهد. همچنین، مدل رگرسیونی توسعه‌یافته نشان داد که ترکیب پارامترهای G^* و $G\cdot\sin\delta$ قابلیت پیش‌بینی قابل توجهی برای عمر خستگی دارد.
عملکرد بهبودیافته مخلوط‌های اصلاح‌شده ناشی از مکانیزم چندعاملی شامل افزایش مقاومت الاستیک ناشی از LDPE،

کاهش انرژی تلف‌شـــده در چرخه‌های بارگذاری، بهبود قابلیت فرآیند تولید ناشـــی از Nano-Zycotherm و ایجاد تعادل میان سختی و انعطاف‌پذیری ا ست. اگرچه نمونه LDPE7% بهترین عملکرد مکانیکی را ارائه کرد، کاهش کشش‌پذیری نشان می‌دهد که استفاده از درصدهای بالاتر پلیمر باید متناسب با شرایط اقلیمی و الزامات طراحی روسازی انجام شود.

٦-نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج این پژوهش، مهم‌ترین یافته‌ها به شرح زیر است:

-نانوزایکوترم با کاهش ویســـکوزیته قیر، فرآیند اختلاط و تراکم مخلوط آســـفالتی نیمه‌گرم را بهبود داد، اما تأثیر محدودی بر افزایش سختی و مقاومت مکانیکی قیر دا شت. مقدار ۰,۱ در صد وزنی بر اســاس مطالعات پیشــین و ارزیابی‌های مقدماتی انتخاب شـــد، هرچند تعیین مقدار بهینه آن در حضـــور هم‌زمان LDPE نیازمند مطالعات تکمیلی است.

-افزودن LDPE موجب کاهش نفوذپذیری، افزایش نقطه نرمی و بهبود رفتار الاستیک قیر شد که نشان‌دهنده افزایش مقاومت در برابر تغییرشکل دائمی و بهبود عملکرد در دماهای بالا است.

-نتایج آزمون DSR نشـــان داد که نانوزایکوترم با کاهش G* و افزایش δ، قابلیت فرآوری قیر را بهبود می‌د هد، در حالی که LDPE با افزایش G* و کاهش δ، ســـهم رفتار الاســـتیک قیر را افزایش داده و مقاومت سازه‌ای آن را تقویت می‌کند.

-اگرچه ارتباط آماری معنی‌داری بین G·sinδ و عمر خســـتگی مشـــاهده شـــد، این رابطه باید به‌عنوان یک همبســـتگی تجربی در محدوده مواد و شرایط آزمایش حاضر تفسیر شود و نه یک رابطه علّی مستقیم، زیرا عملکرد خستگی مخلوط تحت تأثیر متغیرهای ســـاختاری مانند ضـــخامت فیلم قیر، حجم فضـــای خالی، هندســـه سنگدانه‌ها و کیفیت پیوند قیر– سنگدانه قرار دارد. همچنین مدل رگرســـیونی توســـعه‌یافته ($R^2 = 0.91$) بیانگر آن اســـت که شاخص‌های رئولوژیکی قیر می‌توانند برای پیش‌بینی اولیه عملکرد خستگی مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار گیرند.

-نتـایج آزمون‌هـای ITSM، ITS و خســـتگی تیر خمشـــی چهارنقطه‌ای نشان داد که افزایش درصد LDPE موجب افزایش سختی، مقاومت مکانیکی و عمر خستگی مخلوط شد، به‌طوری‌که نمونه حاوی ۷ درصد LDPE بیشترین مقادیر این شاخص‌ها را ثبت کرد.

-در مقابل، افزایش درصـــد LDPE باعث کاهش قابل‌توجه کشش‌پذیری و انرژی شکست شد؛ به‌گونه‌ای که کشش‌پذیری نمونه حاوی ۷ درصـد LDPE به ٤,٥ سـانتی‌متر کاهش یافت و انرژی شکست آن کمتر از نمونه ۵ درصد LDPE بود. این نتایج نشـــان می‌دهد که افزایش بیش از حد ســـختی می‌تواند خطر ترک‌خوردگی در دماهای پایین را افزایش دهد و ارزیابی عملکرد باید بر پایه مجموعه‌ای از شـــاخص‌های مکانیکی و رئولوژیکی انجام شود.

-اگرچه نمونه حاوی ۷ درصـــد LDPE بیشـــترین مقاومت مکانیکی را نشـــان داد، اما با در نظر گرفتن هم‌زمان ســـختی، مقاومت خستگی، انرژی شکست و انعطاف‌پذیری، نمونه حاوی ۵ درصـــد LDPE متعادل‌ترین عملکرد را ارائه داد و به‌عنوان ترکیب مناســـب‌تر برای کاربرد در مخلوط‌های آســـفالتی نیمه‌گرم پیشنهاد می‌شود.

-از محدودیت‌های پژوهش حاضـــر می‌توان به بررســـی تنها یک مقدار نانوزایکوترم، اندازه‌گیری شـــاخص G·sinδ در یک دمای آزمون، ا ستفاده از معیار ۵۰ در صد کاهش مدول اولیه برای تعیین عمر خستگی و عدم ارزیابی مستقیم اثر پیر شدگی حرارتی نا شی از فرآیند اختلاط اشـــاره کرد. پیشـــنهاد می‌شـــود در پژوهش‌های آینده این موارد برر سی شده و مدل‌های پیش‌بینی جامع‌تری برای ارتباط بین ویژگی‌های رئولوژیکی قیر و عملکرد مخلوط توســـعه یابد.

پیامدهای کاربردی

نتایج این پژوهش نشـــان می‌د هد که ترکیب ۰,۱ درصـــد نانوزایکوترم و حدود ۵ درصـــد LDPE باز یافتی می‌تو اند راهکاری مؤثر برای تولید آســـفا لت های نیمه‌گرم با عملکرد مکانیکی مطلوب و مصرف انرژی کمتر با شد. نانوزایکوترم امکان کاهش دمای تولید و تراکم را فراهم می‌کند، در حالی که LDPE مقاومت در برابر شیارشدگی و خستگی را بهبود می‌بخشد. علاوه بر ارتقای عملکرد رو سازی، ا ستفاده از LDPE بازیافتی می‌تواند به کاهش پ سماندهای پلا ستیکی و تو سعه اقت صاد چرخ شی در صنعت راهسازی کمک کند. با این حال، پیش از کاربرد گسترده،

ارزیابی عملکرد بلندمدت، پیرشـــدگی و تحلیل چرخه عمر ضروری است.

پیشنهادات برای تحقیقات آینده

مطالعات آینده می‌توانند بر موارد زیر متمرکز شوند:

-بررسی رفتار ترک‌خوردگی دمای پایین با استفاده از آزمون‌های BBR و TSRST.

-ارزیابی اثر پیرشـــدگی کوتاه‌مدت و بلندمدت (RTFOT و PAV) بر عملکرد قیرهای اصلاح‌شده.

-بررسی اثر شرایط اختلاط بر پایداری حرارتی و تخریب احتمالی LDPE.

-مطالعه ریزساختار و مکانیزم برهم‌کنش اجزای سیستم با استفاده از FTIR، SEM و DSC.

-اعتبارســـنجی مدل پیش‌بینی عمر خســـتگی و انجام تحلیل‌های اقتصادی و زیست‌محیطی (LCA و LCCA) در مقیاس میدانی.

محدودیت‌های پژوهش

مهم‌ترین محدودیت‌های این مطالعه عبارت‌اند از:

-استفاده از تنها یک مقدار نانوزایکوترم (۰٫۱ در صد) و یک نوع LDPE و قیر پایه؛

-ارزیابی‌نشدن مستقیم ترک‌خوردگی دمای پایین؛

-بررسی‌نشدن مستقل اثر شرایط اختلاط بر پیرشدگی و تخریب احتمالی پلیمر؛

-توسعه مدل رگرسیونی بر اساس داده‌های آزمایشگاهی که برای تعمیم به شرایط واقعی، نیازمند اعتبارسنجی میدانی است.

۷-مراجع

-AASHTO. (2020). Standard specifications for transportation materials and methods of sampling and testing. *American Association of State Highway and Transportation Officials.*

-ASTM International. (2023). ASTM D5: Standard test method for penetration of bituminous materials.

-ASTM International. (2023). ASTM D36: Standard test method for softening point of bitumen (Ring-and-Ball apparatus).

-ASTM International. (2023). ASTM D92: Standard test method for flash and fire points by Cleveland open cup tester.

-ASTM International. (2023). ASTM D113: Standard test method for ductility of asphalt materials.

-ASTM International. (2023). ASTM D4402: Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotational viscometer.

-Li, H., Han, Y., Sun, Y., Wang, L., Liu, X., Ren, J., & Lin, Z. (2024). Recycling of waste polyethylene in asphalt and its performance enhancement methods: A critical review. *Journal of Cleaner Production,* 442, 142072.
doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142072

-Liu, N., Liu, L., Li, M., & Sun, L. (2024). A comprehensive review of warm mix asphalt mixtures: Materials, technologies, performance and sustainability. *Road Materials and Pavement Design,* 25(7), 1381–1425.
doi.org/10.1080/14680629.2023.2282948

-Lakshmi Roja, K., Masad, E., Krishnamoorthy, S. K., & Ouederni, M. (2023). Ageing characteristics of polyethylene-modified asphalt binders. *Road Materials and Pavement Design,* 24(4), 672–689.
doi.org/10.1080/14680629.2023.2181123

-Al-Khateeb, G. G., Sukkari, A., Ezzat, H., Nasr, E., & Zeiada, W. (2024). Rheological characterization and fatigue performance of modified warm mix asphalt binders. *Polymers,* 16(7), 906.
doi.org/10.3390/polym16070906

-Schuster, S. L., et al. (2024). High-density polyethylene modified asphalt binder: Rheological modeling and damage characterization. *International Journal of Pavement Engineering*, 25, 1–15.

-Yang, J., Zhang, Y., Li, X., & Wang, H. (2024). Performance evaluation of polymer-modified warm mix asphalt mixtures under mechanical and fatigue loading conditions. Construction and Building Materials, 411, 134563.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134563

-Yang, Q., Lin, J., Wang, X., et al. (2024). Polymer-modified asphalt binders: Mechanisms and performance. *Cleaner Materials,* 12, 100255.
doi.org/10.1016/j.clema.2024.100255

-Zhuang, Y., Yue, J., Men, B., Tang, G., & Wang, R. (2023). Experimental study on mechanism, aging and fatigue performance of warm mix modified asphalt binders. *Coatings,* 13(2), 311.
doi.org/10.3390/coatings13020311

-Singh, A., & Gupta, A. (2024). Mechanical and economic feasibility of LDPE waste-modified asphalt mixtures. Scientific Reports, 14, 25311.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.11

Synergistic Effects of Nano-ZycoTherm and Recycled LDPE on Rheological Properties of Asphalt Binder and Performance Enhancement of Warm Mix Asphalt

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: July 2026- Accepted: November 2026

ABSTRACT

Warm Mix Asphalt (WMA) technology has emerged as a sustainable alternative to conventional hot-mix asphalt due to its ability to reduce production temperatures, energy consumption, and environmental emissions. However, lower mixing temperatures may adversely affect the binder rheology, mixture stiffness, and long-term pavement durability. Moreover, the interaction between chemical warm-mix additives and recycled polymers to simultaneously enhance the workability and mechanical performance remains insufficiently understood. This study investigated the synergistic effects of Nano-ZycoTherm and recycled low-density polyethylene (LDPE) on the rheology of asphalt binder and warm mix asphalt (WMA) mixture performance. A penetration-grade 60/70 asphalt binder was modified with 0.10 wt. % Nano-ZycoTherm, while recycled LDPE was incorporated at 1, 3, 5, and 7 wt. % of binder content. The modified binders were evaluated using conventional tests, rotational viscosity, and Dynamic Shear Rheometer (DSR) analysis. WMA mixtures were assessed using Marshall Stability, indirect tensile strength (ITS), indirect tensile stiffness modulus (ITSM), moisture susceptibility, semi-circular bend (SCB), and four-point bending fatigue tests. Statistical analyses, including Shapiro–Wilk, Levene's, and one-way ANOVA, confirmed significant differences among the mixtures ($p < 0.001$). Nano-ZycoTherm reduced the binder viscosity and improved the workability, whereas LDPE increased the stiffness and elastic response. The mixture containing 7 wt. % LDPE achieved the highest mechanical performance, with an ITSM of 2.549 GPa, ITS of 1.290 MPa, and fatigue life of approximately 1.98×10^5 cycles. However, SCB results indicated that 5 wt. % LDPE provided superior fracture resistance, with fracture energy of 14.8 kJ/m² compared with 12.6 kJ/m² for 7 wt. % LDPE. Considering the stiffness, fatigue resistance, fracture performance, and practical applicability, 5 wt. % LDPE was identified as the optimum modification level. The findings demonstrate that combining Nano-ZycoTherm with recycled LDPE provides an effective hybrid strategy for developing durable and sustainable WMA pavement.

Keywords: Warm Mix Asphalt (WMA), Nano-ZycoTherm, Recycled Low-Density Polyethylene (LDPE), Binder Rheology, Fatigue Resistance