بررسی آزمایشگاهی اثر افزودنی‌های استایرن–اتیلن/پروپیلن–استایرن و نانوسیلیس بر ویژگی‌های رئولوژیکی و مقاومت شیارشدگی قیر

مقاله علمی-پژوهشی

*علیرضا عسکری (نویسنده مسئول)، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
رضا سپاس پور، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلیتکنیک تهران)، تهران، ایران
فریدون مقدس نژاد، استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلیتکنیک تهران)، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: alirezaasgari272@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۲۰- پذیرش: ۱۴۰۵/۰۸/۰۵
صفحه ۲۳۴-۲۱۹

چکیده

قیر به‌عنوان یک ماده ویسکوالاستیک، رفتار مکانیکی وابسته به دما و نرخ بارگذاری دارد و شناخت دقیق ویژگی‌های رئولوژیکی آن برای پیش‌بینی خرابی‌های روسازی آسفالتی مانند شیارشدگی ضروری است. در این پژوهش، تأثیر افزودن نانوسیلیس و پلیمر استایرن–اتیلن/پروپیلن–استایرن (SEPS) بر عملکرد قیر خالص ۸۵/۱۰۰ بررسی شده است. برای تحلیل رفتار ویسکوالاستیک، منحنی‌های جامع مدول برشی پیچیده با استفاده از اصل برهم‌نهی زمان–دما و همچنین روش مبتنی بر داده‌های جاروب دما ترسیم و مقایسه گردید. به‌منظور ارزیابی مقاومت در برابر شیارشدگی، دو شاخص $G^*/\sin\delta$ و ویسکوزیته در برش صفر (ZSV) مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که نانوسیلیس به‌تنهایی تأثیر قابل‌توجهی بر بهبود مقاومت شیارشدگی ندارد، اما افزودن SEPS و ترکیب آن با نانوسیلیس موجب افزایش سختی، بهبود رفتار ویسکوالاستیک و ارتقای مقاومت قیر در برابر تغییر شکل دائمی در دماهای بالا می‌شود. همچنین مقایسه منحنی‌های جامع نشان داد که روش مبتنی بر داده‌های جاروب دما تطابق بسیار خوبی با روش کلاسیک داشته و می‌تواند در شرایط محدودیت آزمایش جاروب فرکانس به‌عنوان روشی معتبر مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: استایرن–اتیلن/پروپیلن–استایرن، قیر، منحنی جامع، مقاومت شیارشدگی، نانوسیلیس

۱- مقدمه

خصوصیات رئولوژی قیر به زمان، نرخ بارگذاری و دما وابسته است و این سه عامل به‌صورت هم‌زمان رفتار مکانیکی و ویسکوالاستیک آن را کنترل می‌کنند. قیر به‌عنوان یک ماده ویسکوالاستیک، در برابر شرایط مختلف بارگذاری پاسخ‌های متفاوتی از خود نشان می‌دهد؛ به‌گونه‌ای که در بارگذاری‌های سریع و کوتاه‌مدت رفتاری مشابه مواد الاستیک دارد، اما در بارگذاری‌های طولانی‌مدت و در دماهای بالا، رفتار آن به سمت ویسکوز بودن میل می‌کند. این ویژگی پیچیده موجب می‌شود تحلیل رفتار قیر تنها با یک پارامتر امکان‌پذیر نباشد و بررسی هم‌زمان اثر دما و زمان بارگذاری ضرورت یابد. ارتباط متقابل میان فرکانس بارگذاری و دما در مواد ویسکوالاستیک با رفتار ترمورئولوژیکی ساده، امکان دستیابی به خصوصیات مکانیکی و رئولوژی مشابه را در شرایط آزمایشگاهی متفاوت فراهم می‌سازد(Ferry, 1980; Goodrich, 1988). به عبارت دیگر، ویژگی‌هایی که در زمان بارگذاری طولانی (فرکانس کم) مشاهده می‌شوند، در دماهای بالا نیز قابل مشاهده‌اند و بالعکس.

این اصل بنیادی یکی از مهم‌ترین مفاهیم در تحلیل رفتار مواد ویسکوالاستیک است و مبنای بسیاری از مدل‌های پیش‌بینی رفتار قیر در شرایط واقعی ترافیکی و محیطی محسوب می‌شود.

در موادی که از نظر رفتار ترمورئولوژی ساده هستند، تعادل میان زمان و دما امکان ساخت منحنی جامع را از داده‌های ویسکوالاستیک خطی فراهم می‌کند. در این روش، مقادیر اندازه‌گیری‌شده در دماهای مختلف با استفاده از ضرایب جابه‌جایی مناسب به یک دمای مرجع منتقل می‌شوند (Chailleux et al., 2006; Z. Wang et al., 2024) . منحنی جامع یکی از ابزارهای کلیدی در تحلیل رفتار قیر است و به پژوهشگران اجازه می‌دهد رفتار ماده را در بازه‌ای بسیار گسترده‌تر از بازه آزمایشگاهی مشاهده کنند. این منحنی قادر است رفتار قیر را در فرکانس‌هایی که امکان آزمایش مستقیم آن‌ها وجود ندارد پیش‌بینی کند و از این رو نقش مهمی در طراحی روسازی‌های مقاوم در برابر شرایط محیطی و بارگذاری‌های مختلف دارد.

روش مبتنی بر اصل برهم‌نهی زمان–دما که معمولاً برای پلیمرها استفاده می‌شود (Ferry, 1980)، برای مواد قیری نیز کاربرد دارد (Dobson et al., 1969; Goodrich, 1988). در صورتی که امکان استفاده از این اصل وجود داشته باشد، ترسیم منحنی جامع از پارامترهای ویسکوالاستیک مانند مدول برشی مختلط (G^*) و زاویه فاز (δ)، این امکان را فراهم می‌کند که رفتار ماده در یک دمای مرجع در مقیاس فرکانسی یا زمانی بسیار وسیع‌تر از بازه اندازه‌گیری‌شده مشاهده شود. این موضوع اهمیت زیادی دارد، زیرا در بسیاری از پروژه‌های روسازی، امکان انجام آزمایش در فرکانس‌های بسیار پایین یا بسیار بالا وجود ندارد و منحنی جامع می‌تواند این محدودیت را برطرف کند.

برای ترسیم منحنی جامع مدول برشی مختلط قیر، (Chailleux et al., 2006) روشی مبتنی بر روابط ریاضی ارائه کردند که نقطه‌عطفی در تحلیل رفتار رئولوژیکی قیر به شمار می‌آید. در این روش، برخلاف روش‌های متداول که نیازمند انجام آزمایش جاروب فرکانس در بازه گسترده‌ای از فرکانس‌ها هستند، از داده‌های حاصل از آزمایش جاروب دما استفاده می‌شود. این موضوع اهمیت زیادی دارد، زیرا انجام آزمایش جاروب فرکانس در فرکانس‌های بسیار پایین یا بسیار بالا معمولاً با محدودیت‌های فنی، زمانی و حتی هزینه‌ای همراه است. در مقابل، آزمایش جاروب دما به‌مراتب ساده‌تر، سریع‌تر و قابل‌اعتمادتر است و امکان پوشش بازه وسیع‌تری از رفتار ماده را فراهم می‌کند.

در روش (Chailleux et al., 2006)، داده‌های حاصل از آزمایش جاروب دما با استفاده از روابط ریاضی و تبدیل‌های مناسب به داده‌های معادل در حوزه فرکانس تبدیل می‌شوند. این روش در سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته و در مطالعات جدید نیز کارایی آن تأیید شده است (Sharma, 2025).

در بخش نخست این مطالعه، با در اختیار داشتن داده‌های هر دو نوع آزمایش جاروب فرکانس و جاروب دما که توسط دستگاه رئومتر برش دینامیکی (DSR) انجام شده‌اند، منحنی جامع مدول برشی پیچیده قیر به هر دو روش ترسیم گردیده است. دستگاه DSR یکی از مهم‌ترین ابزارهای آزمایشگاهی برای بررسی رفتار ویسکوالاستیک قیر است و قادر است پارامترهایی مانند مدول برشی مختلط (G^*)، زاویه فاز (δ)، مدول ذخیره (G') و مدول اتلاف (G'') را در شرایط مختلف دمایی و فرکانسی اندازه‌گیری کند. این دستگاه با اعمال بارهای سینوسی در دامنه‌های مختلف، امکان شبیه‌سازی شرایط واقعی بارگذاری ترافیکی را فراهم می‌کند.

در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی در زمینه توسعه منحنی جامع و کاهش نیاز به انجام آزمایش‌های گسترده دما–فرکانس انجام شده است. یکی از پژوهش‌های مهم در این حوزه، مطالعه (Gholami et al., 2024) است که در آن تأثیر کاهش تعداد دماها و فرکانس‌های مورد استفاده در آزمایش DSR بر دقت منحنی جامع پارامترهای ویسکوالاستیک بررسی شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که با انتخاب بهینه تعداد محدودی از دماها و فرکانس‌ها، می‌توان منحنی جامع قابل‌اعتماد و سازگار با داده‌های کامل آزمایشگاهی به دست آورد. این یافته‌ها اهمیت توسعه روش‌های جایگزین برای ساده‌سازی فرآیند ترسیم منحنی جامع را برجسته می‌کند. در ادامه همین رویکرد، پژوهش حاضر با بهره‌گیری هم‌زمان از داده‌های جاروب دما و جاروب فرکانس، به ارزیابی دقت روش (Chailleux et al., 2006) در مقایسه با روش کلاسیک برهم‌نهی زمان–دما پرداخته و نقش این روش را در کاهش محدودیت‌های آزمایشگاهی بررسی می‌کند.

کرنش دائمی یا شیارشدگی یکی از مهم‌ترین و رایج‌ترین خرابی‌های روسازی‌های انعطاف‌پذیر است و به‌عنوان یک معیار کلیدی در طراحی و ارزیابی عملکرد روسازی‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد (Parker & Brown, 1990). شیارشدگی معمولاً در مسیر چرخ وسایل نقلیه به‌صورت فرورفتگی‌های طولی ظاهر می‌شود و این پدیده نه‌تنها موجب کاهش کیفیت خدمت‌دهی روسازی می‌شود، بلکه می‌تواند ایمنی کاربران جاده را نیز به‌شدت تحت تأثیر قرار دهد. وجود شیارشدگی در سطح روسازی، به‌ویژه در مسیرهای پرتردد، موجب جمع شدن آب، افزایش احتمال لغزندگی و کاهش کنترل خودرو می‌شود؛ عواملی که در نهایت خطر بروز تصادفات را افزایش می‌دهند (Golalipour, 2011).

بروز شیارشدگی در روسازی تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل ساختاری و مصالح قرار دارد. اسکلت سنگدانه‌ها، نحوه قفل و بست سنگدانه‌ها، نسبت فضای خالی در مصالح سنگی و میزان چسبندگی میان سنگدانه‌ها و قیر از جمله عواملی هستند که رفتار مخلوط آسفالتی را در برابر تغییر شکل دائمی تعیین می‌کنند. با این حال، خصوصیات قیر و به‌ویژه قیرهای اصلاح‌شده نقش بسیار مهمی در افزایش مقاومت روسازی در برابر شیارشدگی دارند. قیر اصلاح‌شده معمولاً دارای ساختار شبکه‌ای پایدارتر، مقاومت بیشتر در برابر تغییر شکل و حساسیت کمتر نسبت به دما است و همین ویژگی‌ها موجب بهبود عملکرد روسازی در دماهای بالا می‌شود (Mashaan et al., 2025; Rahi et al., 2015).

از جمله مهم‌ترین پلیمرهای مورد استفاده برای اصلاح خواص قیر در دماهای بالا، پلیمر استایرن–بوتادین–استایرن (SBS) است که به دلیل ساختار بلوکی خود توانایی بالایی در افزایش مدول قیر و کاهش حساسیت دمایی آن دارد (Sengoz & Isikyakar, 2008). علاوه بر SBS، دو محصول مهم دیگر از خانواده پلیمرهای استایرن شامل استایرن–اتیلن/بوتیلن–استایرن (SEBS) و استایرن–اتیلن/پروپیلن–استایرن (SEPS) هستند. این پلیمرها به دلیل ساختار ترموپلاستیک و رفتار الاستیک–ویسکوز خود می‌توانند شبکه‌ای پایدار در ماتریس قیر ایجاد کرده و مقاومت آن را در برابر تغییر شکل دائمی افزایش دهند. مرور ادبیات نشان می‌دهد که اثر پلیمر SEPS برای اصلاح خواص قیر کمتر مورد بررسی قرار گرفته است (Karakas, 2026; Rahi et al., 2015). این موضوع اهمیت بررسی دقیق‌تر عملکرد SEPS را در شرایط دمایی بالا و تحت بارگذاری‌های سنگین افزایش می‌دهد. پلیمر SEPS به دلیل ساختار مولکولی متفاوت نسبت به SBS و SEBS، می‌تواند رفتار رئولوژی ویژه‌ای در قیر ایجاد کرده و بهبود قابل‌توجهی در مقاومت در برابر شیارشدگی فراهم آورد.

علاوه بر بررسی اثر درصدهای مختلف پلیمر SEPS، تأثیر درصدهای مختلف نانوسیلیس نیز مورد آزمایش قرار گرفته است. نانوسیلیس به‌عنوان یکی از نانومواد پرکاربرد در اصلاح قیر، به دلیل سطح ویژه بالا و قابلیت ایجاد پیوندهای قوی با ماتریس قیر، می‌تواند ساختار قیر را تقویت کرده و مقاومت آن را در برابر تغییر شکل دائمی افزایش دهد (Taheri et al., 2026). ترکیب هم‌زمان پلیمر SEPS و نانوسیلیس نیز می‌تواند اثرات هم‌افزایی ایجاد کرده و موجب بهبود قابل‌توجه خواص رئولوژی و عملکردی قیر شود.

در این مطالعه، اثر جداگانه و هم‌زمان این دو اصلاح‌کننده بر نمونه‌های قیری بررسی شده و میزان بهبود مقاومت در برابر شیارشدگی تعیین شده است.

خواص مرتبط با خرابی شیارشدگی باید در دماهای بالای عملکردی روسازی مورد بررسی قرار گیرند، زیرا شیارشدگی اغلب در دماهای بالا و تحت بارگذاری‌های سنگین ترافیکی رخ می‌دهد (Petersen et al., 1994). در چنین شرایطی، قیر به دلیل کاهش مدول و افزایش رفتار ویسکوز، توانایی خود را در تحمل تنش‌های مکرر از دست می‌دهد و در نتیجه تغییر شکل دائمی در مخلوط آسفالتی ایجاد می‌شود. از این رو، ارزیابی دقیق رفتار قیر در دماهای بالا یکی از مهم‌ترین مراحل طراحی روسازی‌های آسفالتی است و انتخاب شاخص‌های مناسب برای سنجش مقاومت در برابر شیارشدگی اهمیت ویژه‌ای دارد.

مطالعات گسترده‌ای برای تعیین پارامترهایی که بتوانند مشخصات قیر را در برابر خرابی شیارشدگی به‌خوبی نمایش دهند انجام شده است. در این پژوهش، مقاومت در برابر شیارشدگی نمونه‌های اصلاح‌شده با پلیمر SEPS و نانوسیلیس در مقایسه با قیر خالص، با استفاده از دو پارامتر متفاوت یعنی مشخصه سوپرپیو ($G^*/\sin\delta$) و ویسکوزیته در برش صفر (ZSV) ارزیابی شده است. این دو شاخص از مهم‌ترین معیارهای تحلیل رفتار رئولوژی قیر در دماهای بالا هستند و هرکدام جنبه متفاوتی

از عملکرد قیر را نشان می‌دهند. پارامتر مشخصه سوپرپیو ($G^*/\sin\delta$) برای سالیان متمادی به‌عنوان معیار اصلی مقاومت در برابر شیارشدگی مورد استفاده قرار گرفته است (Anderson et al., 1994). این پارامتر از ترکیب مدول برشی مختلط (G^*) و زاویه فاز (δ) به دست می‌آید و نشان‌دهنده توانایی قیر در تحمل تنش‌های وارده بدون ایجاد تغییر شکل دائمی است. هرچه مقدار $G^*/\sin\delta$ بیشتر باشد، قیر در برابر شیارشدگی مقاوم‌تر خواهد بود. با این حال، تحقیقات انجام‌شده در سال‌های اخیر نشان می‌دهد که ارتباط این پارامتر با مقاومت واقعی روسازی در برابر شیارشدگی و نرخ کرنش تجمعی چندان قوی نیست (Bahia et al., 2001). دلیل این موضوع آن است که $G^*/\sin\delta$ تنها بخشی از رفتار ویسکوالاستیک قیر را نمایش می‌دهد و نمی‌تواند رفتار ماده را در نرخ‌های کرنش بسیار پایین یا شرایط بارگذاری طولانی‌مدت به‌طور کامل پیش‌بینی کند.

در مقابل، ویسکوزیته در برش صفر (ZSV) به‌عنوان شاخصی معرفی شده است که توانایی بیشتری در نمایش رفتار واقعی قیر در برابر شیارشدگی دارد. ZSV به‌عنوان مقدار ویسکوزیته‌ای تعریف می‌شود که در یک نرخ ثابت کرنش، تنش به سمت صفر میل کند (D'Angelo et al., 2007). این ویژگی باعث می‌شود ZSV بتواند مقاومت قیر در برابر تغییر شکل دائمی را بهتر نشان دهد، زیرا رفتار قیر در نرخ‌های کرنش بسیار پایین که مشابه شرایط واقعی ترافیکی است را منعکس می‌کند. (Anderson et al., 1994) نیز تأکید کرده‌اند که ZSV شاخصی دقیق‌تر برای پیش‌بینی عملکرد قیر در برابر شیارشدگی است و می‌تواند جایگزین مناسبی برای $G^*/\sin\delta$ در تحلیل‌های پیشرفته باشد.

برای تخمین ZSV روش‌های مختلفی وجود دارد که یکی از مهم‌ترین آن‌ها استفاده از مدل کراس برای اندازه‌گیری ویسکوزیته دینامیکی است. مدل کراس که توسط (Cross, 1965) ارائه شده است، امکان برآورد رفتار ویسکوالاستیک قیر را در نرخ‌های کرنش مختلف فراهم می‌کند. در سال‌های اخیر، مطالعات جدید نیز نشان داده‌اند که ترکیب داده‌های DSR با مدل‌های پیشرفته مانند مدل کراس می‌تواند دقت محاسبه ZSV را افزایش دهد (Nouali et al., 2026; Wu et al., 2024).

در این پژوهش، منحنی جامع پارامترهای ویسکوالاستیک قیر با استفاده از داده‌های جاروب دما و جاروب فرکانس استخراج شده و در ادامه، از این نتایج برای ارزیابی رفتار قیر در برابر شیارشدگی استفاده شده است.

در بخش دوم این مطالعه نیز، با بهره‌گیری از نتایج آزمایشگاهی حاصل از رئومتر برش دینامیکی (DSR) و منحنی جامع ترسیم‌شده در بخش نخست، مقاومت در برابر شیارشدگی قیر خالص و قیرهای اصلاح‌شده با پلیمر SEPS و نانوسیلیس با استفاده از دو پارامتر مهم مشخصه سوپرپیو ($G^*/\sin\delta$) و ویسکوزیته در برش صفر (ZSV)، مورد بررسی قرار گرفته است. این دو شاخص هرکدام از زاویه‌ای متفاوت رفتار قیر را در برابر تغییر شکل دائمی نشان می‌دهند و مقایسه آن‌ها می‌تواند دیدگاه جامع‌تری درباره عملکرد اصلاح‌کننده‌ها ارائه دهد.

در این پژوهش با استفاده از داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش DSR، دو شاخص مقاومت در برابر شیارشدگی برای نمونه قیر خالص و نمونه‌های اصلاح‌شده محاسبه شده و تأثیر افزودنی‌ها بر عملکرد قیر در برابر این خرابی مورد ارزیابی قرار گرفته است. با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در توسعه منحنی جامع و همچنین بررسی عملکرد قیرهای اصلاح‌شده، دو خلأ مهم در ادبیات موضوع همچنان پابرجاست. نخست، اگرچه روش‌های مختلفی برای کاهش تعداد دماها و فرکانس‌های مورد نیاز در آزمایش‌های DSR پیشنهاد شده‌اند، ارزیابی هم‌زمان داده‌های جاروب دما و جاروب فرکانس و استفاده از آن‌ها در استخراج منحنی جامع و تحلیل‌های عملکردی قیر کمتر مورد توجه قرار گرفته است. دوم، اثر هم‌زمان پلیمر SEPS و نانوسیلیس بر رفتار رئولوژیکی قیر و ارتباط این تغییرات با شاخص‌های پیشرفته مقاومت در برابر شیارشدگی، به‌ویژه ZSV، به‌صورت جامع بررسی نشده است. بر این اساس، اهداف این پژوهش شامل استخراج منحنی جامع پارامترهای ویسکوالاستیک قیر با استفاده از داده‌های آزمایش DSR، ارزیابی اثر پلیمر SEPS و نانوسیلیس بر رفتار رئولوژیکی قیر، و تحلیل مقاومت در برابر شیارشدگی قیر خالص و قیرهای اصلاح‌شده با استفاده از دو شاخص $G^*/\sin\delta$ و ZSV می‌باشد.

۲- مصالح و روش‌های آزمایش

قیر پایه مورد استفاده در این مطالعه، قیر ۸۵/۱۰۰ تولیدشده در کارخانه تهران شرکت نفت پاسارگاد است. برای اصلاح قیر پایه و بررسی اثر افزودنی‌ها بر رفتار رئولوژیکی و مقاومت در برابر شیارشدگی، از دو نوع اصلاح‌کننده شامل پلیمر SEPS و نانوسیلیس استفاده شده است. مشخصات این دو ماده در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات پلیمر SEPS مصرفی

ویژگی	مقدار / توضیح
نوع پلیمر	استایرن–اتیلن/پروپیلن–استایرن (SEPS)
ساختار	ترموپلاستیک با بلوک‌های الاستومری
درصد استایرن	۳۵٪
چگالی	۰/۹ (g/cm³)
نقطه ذوب	۱۷۰ (°C)
شکل ظاهری	گرانول سفید

جدول ۲. مشخصات نانوسیلیس مصرفی

ویژگی	مقدار / توضیح
نوع نانوسیلیس	SiO_2 با خلوص بالا
اندازه ذرات	۱۰–۲۰ (nm)
سطح ویژه (BET)	۲۰۰ (m²/g)
چگالی	۲,۲ (g/cm³)
ساختار	آمورف
شکل ظاهری	پودر سفید

پلیمر SEPS به‌عنوان یک پلیمر ترموپلاستیک با ساختار بلوکی، توانایی ایجاد شبکه‌ای پایدار در ماتریس قیر را دارد و می‌تواند مدول قیر را در دماهای بالا افزایش دهد. نانوسیلیس نیز به دلیل اندازه بسیار کوچک ذرات و سطح ویژه بالا، قادر است ساختار قیر را تقویت کرده و رفتار ویسکوالاستیک آن را بهبود بخشد (Yaqueen et al., 2025).

با توجه به ترکیب‌های مختلف این دو اصلاح‌کننده، در مجموع یک نمونه قیر خالص و هفت نمونه قیر اصلاح‌شده با درصدهای متفاوت تهیه شده است. این ترکیبات در جدول ۳ ارائه شده‌اند. هدف از انتخاب این درصدها، بررسی رفتار قیر در شرایط مختلف اصلاح و تعیین بهترین ترکیب برای افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی بوده است.

نمونه‌ها شامل قیرهای اصلاح‌شده با درصدهای ۲، ٤ و ٦ درصد SEPS، نمونه‌های حاوی ۲ و ٤ درصد نانوسیلیس، و همچنین نمونه‌های ترکیبی شامل ٤ درصد SEPS همراه با ۲ و ٤ درصد نانوسیلیس هستند. این تنوع در ترکیب‌ها امکان تحلیل دقیق اثرات جداگانه و هم‌افزایی اصلاح‌کننده‌ها را فراهم می‌کند.

جدول ۳. انواع قیرهای مورد آزمایش

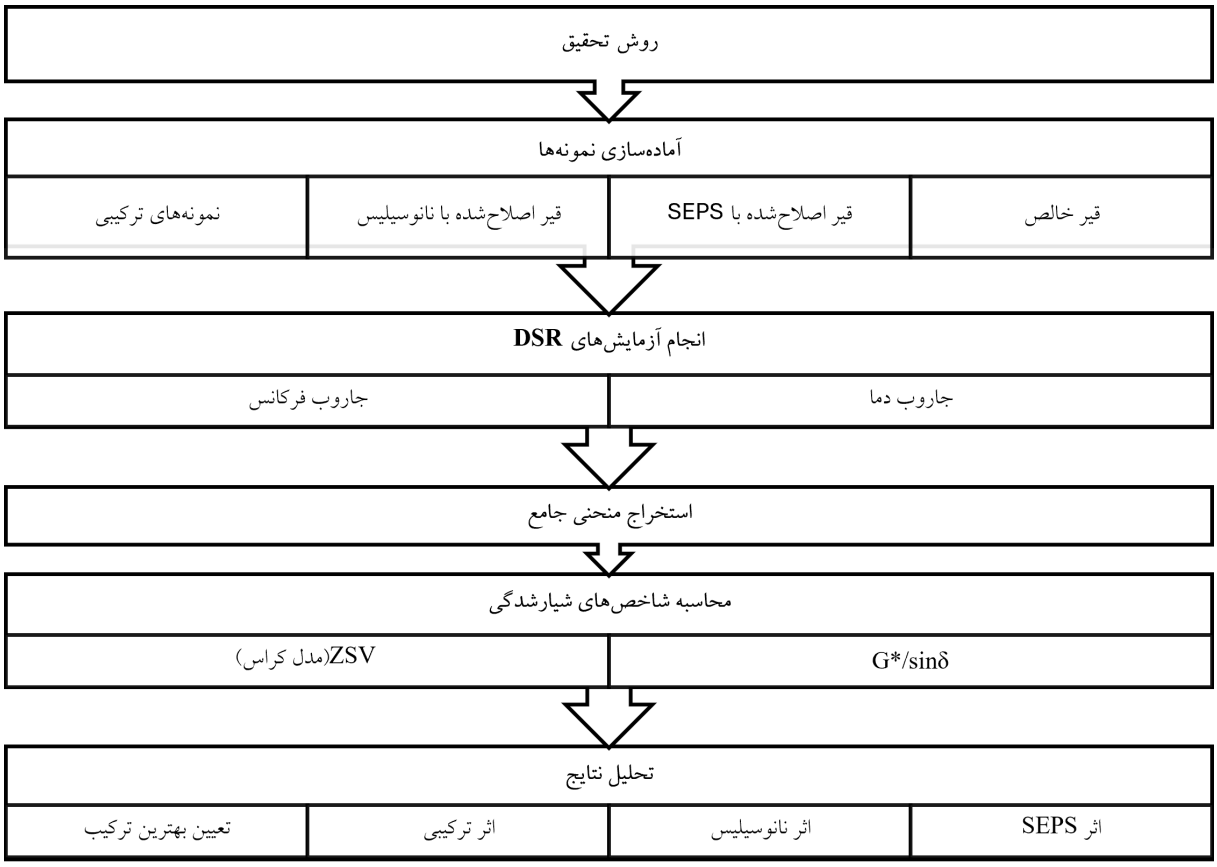
نوع قیر	درصد SEPS	درصد نانوسیلیس
قیر خالص	–	–
قیر اصلاح شده	۲	–
	٤	–
	٦	–
	–	۲
	–	٤
	٤	۲
	٤	٤

برای توسعه منحنی جامع به دو روش متفاوت و اندازه‌گیری خصوصیات قیر خالص و اصلاح‌شده در دماهای بالا، دو آزمایش اصلی شامل جاروب دما و جاروب فرکانس انجام شده است. آزمایش جاروب دما در فرکانس ثابت ۱,۵۹ هرتز و در بازه دمایی ۱۰ تا ٦۰ درجه سانتی‌گراد با گام‌های ۱۰ درجه انجام شده است. این آزمایش امکان بررسی تغییرات مدول برشی مختلط (G^*) و زاویه فاز (δ) را در دماهای مختلف فراهم می‌کند و داده‌های آن برای توسعه منحنی جامع به روش (Chailleux et al., 2006) مورد استفاده قرار گرفته است.

آزمایش جاروب فرکانس نیز در بازه فرکانسی ۰٫۱ تا ۱۰۰ هرتز و در دماهای ۱۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد انجام شده است. این آزمایش داده‌های لازم برای توسعه منحنی جامع به روش کلاسیک اصل برهم‌نهی زمان–دما را فراهم می‌کند. از میان داده‌های به‌دست‌آمده، نتایج مربوط به دماهای ۴۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد برای تحلیل رفتار قیر در محدوده دماهای بالا مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این بازه دمایی شامل شروع کاهش مدول قیر (در حدود C°۴۰) و دماهای بحرانی مرتبط با بروز شیارشدگی (C°۶۰–۵۰) است و بیشترین تطابق را با شرایط عملکردی روسازی در مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری دارد(Sharma, 2025).

تمام آزمایش‌ها مطابق با استاندارد ASTM D7175-05 و با دو تکرار انجام شده‌اند. در هر مرحله، شرایط پذیرش آزمایش شامل تکرارپذیری داده‌ها، پایداری نمونه‌ها و صحت عملکرد دستگاه رئومتر برش دینامیکی (DSR) مورد بررسی قرار گرفته است.

روند کلی روش تحقیق، شامل مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش‌های رئولوژی و تحلیل نتایج، در شکل ۱ به‌صورت یک دیاگرام شماتیک نمایش داده شده است. این دیاگرام مسیر پژوهش را از مرحله انتخاب مصالح تا تحلیل نهایی نتایج نشان می‌دهد و نقش مهمی در درک ساختار کلی مطالعه دارد.



شکل ۱. دیاگرام روش تحقیق

۳- پیشینه تحقیق

۳-۱- ترسیم منحنی جامع با استفاده از داده‌های آزمایش جاروب دما

برای توسعه منحنی جامع با استفاده از داده‌های آزمایش جاروب دما، روش ارائه‌شده توسط (Chailleux et al., 2006) نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش، از داده‌های حاصل از آزمایش جاروب دما در یک فرکانس ثابت استفاده می‌شود.

این ویژگی باعث می‌شود روش Chailleux در شرایطی که انجام آزمایش جاروب فرکانس در فرکانس‌های بسیار پایین یا بسیار بالا امکان‌پذیر نیست، بسیار کاربردی و قابل‌اعتماد باشد. مطالعات جدید نیز نشان داده‌اند که استفاده از داده‌های جاروب دما برای توسعه منحنی جامع، به‌ویژه در قیرهای اصلاح‌شده، دقت بالایی دارد و می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش‌های کلاسیک باشد (Gao et al., 2018).

در این مطالعه، به‌منظور مقایسه دقیق میان دو روش، دمای مرجع یکسانی برای هر دو روش انتخاب شده است.

در روش Chailleux، محاسبه ضریب جابه‌جایی a_T بر اساس تغییرات مدول برشی پیچیده و زاویه فاز در دماهای مختلف انجام می‌شود. ابتدا ضریب جابه‌جایی بین دو دمای متوالی از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\log(a_{(T_i,T_{ref})}) = \sum_{j=i}^{j=ref} \frac{\log(|G^*(T_j,\omega| - \log(|G^*(T_{j+1},\omega|}{\delta_{avg}^{(T_j,T_{j+1})}(\omega)} \cdot \frac{\pi}{2} \quad (۱)$$

در این رابطه، $G^*(T_j,\omega)$ و $G^*(T_{j+1},\omega)$ به‌ترتیب مدول برشی مختلط در دماهای T_j و T_{j+1} هستند و $\delta_{avg}^{(T_j,T_{j+1})}$ میانگین زاویه فاز در فرکانس ثابت آزمایش است. این رابطه نشان می‌دهد که ضریب جابه‌جایی تنها تابع دما نیست، بلکه تابع رفتار واقعی رئولوژی ماده است. به همین دلیل، روشChailleux در بسیاری از مواد ویسکوالاستیک از جمله قیر، دقت بالایی دارد. پژوهش‌های اخیر نیز تأیید کرده‌اند که استفاده هم‌زمان از G* و δ در تعیین ضرایب جابه‌جایی، دقت منحنی جامع را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد(Y. Wang, 2020) .

پس از محاسبه ضرایب جابه‌جایی بین دماهای متوالی، ضریب جابه‌جایی بین هر دمای دلخواه و دمای مرجع از رابطه تجمعی زیر به‌دست می‌آید.

$$\log(a_{(T_i,T_{ref})}) = \sum_{j=i}^{j=ref} \log(a_{(T_j,T_{j+1})}) \quad (۲)$$

این رابطه بیان می‌کند که جابه‌جایی از یک دمای پایین به دمای مرجع به‌صورت مرحله‌به‌مرحله و تجمعی انجام می‌شود و مجموع لگاریتمی ضرایب جابه‌جایی بین دماهای مجاور، ضریب جابه‌جایی نهایی را تشکیل می‌دهد. مطالعات جدید نشان داده‌اند که استفاده از روابط تجمعی در روش Chailleux، به‌ویژه در قیرهای اصلاح‌شده با پلیمر و نانوذرات، باعث افزایش دقت منحنی جامع می‌شود (Y. Wang, 2020).

پس از تعیین ضرایب جابه‌جایی برای تمام دماها، فرکانس کاهش‌یافته از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$f_{\text{Redused}} = f/a_T \quad (۳)$$

در این رابطه، f فرکانس واقعی آزمایش (۱,۵۹ هرتز) و a_T ضریب جابه‌جایی محاسبه‌شده است. فرکانس کاهش‌یافته اثر دما را از داده‌ها حذف می‌کند و امکان مقایسه رفتار ماده در دماهای مختلف را فراهم می‌سازد. مطالعات گذشته نیز نشان داده‌اند که استفاده از فرکانس کاهش‌یافته در تحلیل رفتار قیر، امکان بررسی دقیق‌تر رفتار ویسکوالاستیک در بازه‌های گسترده‌تر را فراهم می‌کند (Booshehrian et al., 2013).

در نهایت، با استفاده از فرکانس‌های کاهش‌یافته و مقادیر مدول برشی پیچیده، منحنی جامع مدول برشی پیچیده بر حسب فرکانس کاهش‌یافته ترسیم می‌شود. این منحنی امکان مشاهده رفتار قیر را در بازه‌ای بسیار گسترده‌تر از بازه آزمایشگاهی فراهم می‌کند و یکی از مزیت‌های اصلی روش Chailleux همین است. این روش به‌ویژه زمانی اهمیت دارد که داده‌های جاروب فرکانس محدود باشند و پژوهشگر تنها به داده‌های جاروب دما دسترسی داشته باشد. مطالعات جدید نیز نشان داده‌اند که روش Chailleux در قیرهای اصلاح‌شده با پلیمر و نانوذرات، منحنی‌های جامع دقیق‌تر و هموارتری نسبت به روش‌های کلاسیک ارائه می‌دهد (Dong et al., 2024).

۳-۲- شاخص‌های مقاومت در برابر شیارشدگی

۳-۲-۱- پارامتر مشخصه سوپرپیو (G*/sinδ)

در دماهای بالا، هنگامی که قیر تحت بارگذاری قرار می‌گیرد، رفتار ویسکوالاستیک آن موجب می‌شود بخشی از انرژی اعمال‌شده توسط جزء الاستیک ماده ذخیره و سپس بازیابی شود، در حالی که بخش دیگری از انرژی توسط جزء ویسکوز تلف شده و به‌صورت گرما آزاد می‌شود. این اتلاف انرژی که در هر چرخه بارگذاری رخ می‌دهد، نقش مهمی در ایجاد تغییر شکل دائمی و در نهایت بروز شیارشدگی دارد. (Anderson et al., 1994) فرض کردند که شیارشدگی در اثر مجموع انرژی هدررفته در هر چرخه بارگذاری ایجاد می‌شود؛ بنابراین از میزان انرژی تلف‌شده می‌توان به‌عنوان شاخصی برای ارزیابی حساسیت قیر نسبت به این خرابی استفاده کرد. مطالعات گذشته

نیز این فرضیه را تأیید کرده‌اند و نشان داده‌اند که انرژی اتلافی در چرخه‌های بارگذاری یکی از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده پایداری قیر در دماهای بالا است (Pouget et al., 2014).

برای بارگذاری سینوسی، مقدار انرژی هدررفته در هر چرخه بارگذاری از رابطه (۵) قابل محاسبه است.

$$\Delta U = \pi \tau_{max}^2 \frac{1}{\frac{|G^*|}{\sin\delta}} \qquad (۴)$$

که در این رابطه ΔU مقدار انرژی هدر رفته در هر چرخه بارگذاری یا انرژی تلف شده، τ_{max} بیشینه تنش برشی و $G^*/\sin\delta$ پارامتر مشخصه سوپرپیو است.

این رابطه نشان می‌دهد که پارامتر $G^*/\sin\delta$ با مقدار انرژی تلف‌شده رابطه معکوس دارد. به عبارت دیگر، هرچه مقدار $G^*/\sin\delta$ بیشتر باشد، انرژی کمتری در هر چرخه بارگذاری تلف می‌شود و ماده رفتار الاستیک‌تری از خود نشان می‌دهد. کاهش انرژی تلف‌شده به معنای کاهش تمایل قیر به تغییر شکل دائمی است؛ بنابراین افزایش مقدار $G^*/\sin\delta$ نشان‌دهنده افزایش مقاومت قیر در برابر شیارشدگی است. پژوهش‌های اخیر نیز نشان داده‌اند که افزایش این پارامتر در قیرهای اصلاح‌شده با پلیمرهای SBS، SEBS و نانوذرات، موجب بهبود قابل‌توجه مقاومت شیارشدگی می‌شود (Brasil et al., 2024).

بر همین اساس، پارامتر مشخصه سوپرپیو به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی عملکرد قیر در دماهای بالا معرفی شده است و در سیستم رده‌بندی عملکردی (PG) نیز برای رتبه‌بندی قیرها در برابر خرابی شیارشدگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. قیری که مقدار $G^*/\sin\delta$ آن در دمای عملکردی بالا بیشتر باشد، مقاومت بیشتری در برابر تغییر شکل دائمی دارد و برای استفاده در مناطق گرمسیری یا مسیرهای پرترافیک مناسب‌تر است. مطالعات جدید نیز نشان داده‌اند که این پارامتر همچنان یکی از شاخص‌های معتبر برای ارزیابی عملکرد دمای بالا است، هرچند برخی پژوهش‌ها پیشنهاد کرده‌اند که ترکیب آن با شاخص‌هایی مانند ZSV یا $G^*/(1-\sin\delta)$ می‌تواند پیش‌بینی دقیق‌تری از شیارشدگی ارائه دهد (Hu et al., 2025).

۳-۲-۲- ویسکوزیته در برش صفر

قیرهای خالص یا اصلاح‌نشده در دماهای بالا معمولاً رفتار نیوتنی از خود نشان می‌دهند؛ به این معنا که ویسکوزیته آن‌ها مستقل از نرخ برش است و با افزایش دما، سهم رفتار ویسکوز در آن‌ها غالب می‌شود. در چنین شرایطی، ماده توانایی خود را در تحمل تنش‌های مکرر از دست داده و احتمال وقوع خرابی شیارشدگی افزایش می‌یابد. در مقابل، بسیاری از قیرهای اصلاح‌شده با پلیمرها یا نانومواد رفتار شبه‌خمیری از خود نشان می‌دهند. در این نوع سیالات، با افزایش نرخ برش، ویسکوزیته کاهش می‌یابد و ماده رفتار برشی نرم‌شونده پیدا می‌کند. با این حال، در نرخ‌های بسیار کم برش، حتی سیالات شبه‌خمیری نیز همانند سیالات نیوتنی رفتار می‌کنند و ویسکوزیته آن‌ها مستقل از نرخ برش و فرکانس است. این مقدار ویسکوزیته، «ویسکوزیته در برش صفر» نامیده می‌شود (Yildirim et al., 2000). مطالعات جدید نیز این رفتار را تأیید کرده‌اند و نشان داده‌اند که قیرهای اصلاح‌شده با پلیمرهای SEBS، SBS و SEPS در نرخ‌های پایین برش، رفتار نیوتنی‌مانند دارند و مقدار ZSV آن‌ها به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد (A. Kumar & Choudhary, 2024).

اهمیت ZSV در تحلیل رفتار قیر از آن جهت است که این پارامتر نشان‌دهنده مقاومت ماده در برابر تغییر شکل دائمی در شرایط بارگذاری طولانی‌مدت و نرخ‌های بسیار پایین کرنش است؛ شرایطی که مشابه رفتار واقعی روسازی تحت بار ترافیک سنگین و مداوم است. (Anderson et al., 1994; Wu et al., 2024) نشان دادند که مقاومت در برابر شیارشدگی در مخلوط‌های آسفالتی با مقدار ویسکوزیته در برش صفر قیر رابطه مستقیم دارد. پژوهش‌های جدید نیز این نتیجه را تأیید کرده‌اند و نشان داده‌اند که ZSV شاخصی بسیار قابل‌اعتمادتر از $G^*/\sin\delta$ برای پیش‌بینی شیارشدگی، به‌ویژه در قیرهای اصلاح‌شده با نانوذرات و پلیمرها است (Abdollahi et al., 2026).

برای اندازه‌گیری ZSV روش‌های مختلفی ارائه شده است، اما در این مطالعه از داده‌های آزمایش جاروب فرکانس و مدل کراس استفاده شده است. مدل کراس یکی از شناخته‌شده‌ترین مدل‌های رئولوژی برای توصیف رفتار سیالات شبه‌خمیری است و منحنی جریان این سیالات را با چهار پارامتر توصیف می‌کند. رابطه کلی مدل کراس به‌صورت زیر بیان می‌شود.

$$\frac{\eta^* - \eta_\infty^*}{\eta_0^* - \eta_\infty^*} = \frac{1}{1+(K\omega)^m} \quad (۵)$$

که در این رابطه، η^* ویسکوزیته، η_0^* ویسکوزیته در برش صفر (ZSV)، η_∞^* ویسکوزیته حدی در ناحیه دوم نیوتنی، ω فرکانس زاویه‌ای (رادیان بر ثانیه) و K و m پارامترهای ثابت هستند. از آنجا که آزمایش جاروب فرکانس در دستگاه DSR معمولاً در بازه فرکانس زاویه‌ای ۰٫۱ تا ۱۰۰ رادیان بر ثانیه انجام می‌شود، در این دامنه می‌توان فرض کرد که η_∞^* بسیار کوچک بوده و قابل صرف‌نظر کردن است (Anderson et al., 2002). با اعمال این فرض، مدل کراس به شکل ساده‌شده زیر بازنویسی می‌شود.

$$\eta^* = \frac{\eta_0^*}{1+(K\omega)^m} \quad (۶)$$

که در آن η^* ویسکوزیته پیچیده و ω فرکانس زاویه‌ای است. با ترسیم منحنی ویسکوزیته پیچیده بر حسب فرکانس زاویه‌ای و برازش رابطه مذکور به داده‌های آزمایشگاهی، می‌توان مقدار ویسکوزیته در برش صفر و همچنین پارامترهای ثابت مدل کراس را با دقت بالایی استخراج کرد. یافته‌های پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که مدل کراس، در مقایسه با مدل‌های Carreau–Yasuda و Williamson، توانایی بیشتری در تخمین ZSV قیرهای اصلاح‌شده داشته و برای قیرهای حاوی پلیمرها و نانومواد بهترین برازش رئولوژیکی را ارائه می‌دهد (R. Kumar, 2022; Taheri et al., 2026).

مقدار ZSV به‌عنوان یکی از شاخص‌های اساسی برای ارزیابی مقاومت قیر در برابر شیارشدگی شناخته می‌شود. افزایش این پارامتر بیانگر توانایی بیشتر قیر در مقابله با تغییر شکل دائمی بوده و عملکرد مطلوب‌تری را در دماهای بالا و تحت بارگذاری‌های سنگین تضمین می‌کند.

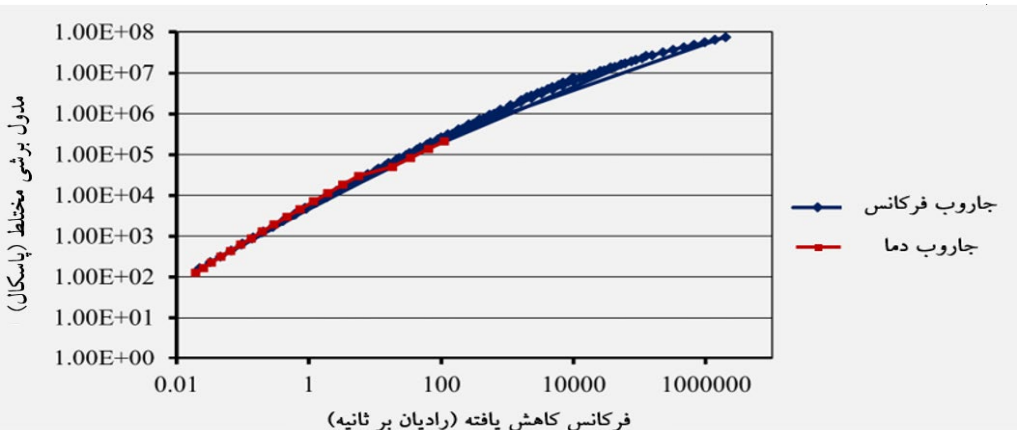
نتایج پژوهش‌های اخیر نیز نشان می‌دهد که افزایش ZSV در قیرهای اصلاح‌شده با نانوسیلیس، نانورس و پلیمرهای ترموپلاستیک، بهبود قابل‌توجهی در مقاومت شیارشدگی ایجاد می‌کند(Abdollahi et al., 2026) .

٤- نتایج و بحث

در این مطالعه، با استفاده از داده‌های حاصل از آزمایش‌های جاروب دما و جاروب فرکانس، ابتدا منحنی جامع مدول برشی دینامیکی قیر برای نمونه‌های مختلف به دو روش متفاوت توسعه داده شد. در ادامه نیز مقاومت قیرهای اصلاح‌شده با پلیمر SEPS و نانوسیلیس به کمک دو معیار «پارامتر مشخصه سوپرپیو» و «ویسکوزیته در برش صفر» مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مربوط به این تحلیل‌ها در این بخش ارائه شده است.

٤-١- مقایسه دو روش توسعه منحنی جامع

در شکل ۲، منحنی جامع حاصل از دو روش «جاروب فرکانس» و «جاروب دما» برای نمونه قیر اصلاح‌شده با ۲ درصد SEPS به‌صورت مقایسه‌ای ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در بازه فرکانس‌های پایین و بخشی از فرکانس‌های میانی، دو منحنی روندی مشابه دارند و روش مبتنی بر داده‌های جاروب دما قادر است تغییرات کلی مدول برشی پیچیده را بازتاب دهد. با این حال، در ناحیه فرکانس‌های بالا، به دلیل محدودیت داده‌های آزمایش جاروب دما ـ که تنها در یک فرکانس ثابت انجام می‌شود. این روش توانایی بازسازی رفتار رئولوژیکی را از دست می‌دهد و منحنی آن از منحنی حاصل از جاروب فرکانس فاصله می‌گیرد. این اختلاف نشان می‌دهد که روش Chailleux تنها در بازه محدودی از فرکانس‌ها قابل اتکا است و برای تحلیل رفتار در فرکانس‌های بالا، استفاده از داده‌های جاروب فرکانس ضروری است.



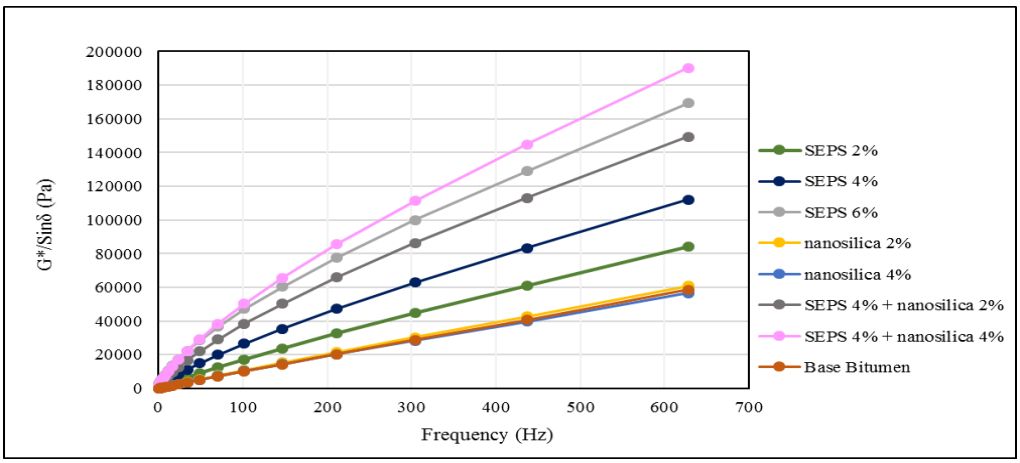
شکل ۲. مقایسه منحنی‌های جامع توسعه‌یافته به دو روش «جاروب فرکانس» و «جاروب دما» برای نمونه قیر اصلاح‌شده با ۲ درصد SEPS

٤-٢- مقایسه مقاومت در برابر شیارشدگی قیرهای اصلاح شده

٤-٢-١- پارامتر مشخصه سوپرپیو ($G^*/\sin\delta$)

برای مقایسه عملکرد قیر خالص و قیرهای اصلاح‌شده با افزودنی‌های SEPS و نانوسیلیس، پارامتر مشخصه سوپرپیو ($G^*/\sin\delta$) در دماهای ٤٠، ٥٠ و ٦٠ درجه سانتی‌گراد محاسبه شد. از آنجا که روند تغییرات این پارامتر در هر سه دما مشابه است و ترتیب عملکرد نمونه‌ها تفاوت معناداری ندارد، تنها نتایج مربوط به دمای ٦٠ درجه سانتی‌گراد ـ که بیشترین حساسیت به شیارشدگی دارد، در شکل ٣ ارائه شده است. همان‌طور که از نتایج دمای ٦٠ درجه مشاهده می‌شود، افزایش درصد SEPS از ٢ تا ٦ درصد موجب افزایش مقدار پارامتر $G^*/\sin\delta$ نسبت به قیر خالص شده و در نتیجه عملکرد بهتری در برابر شیارشدگی ایجاد کرده است. در مقابل، افزودن نانوسیلیس به‌تنهایی تغییر قابل‌توجهی در مقدار این پارامتر ایجاد نکرده و حتی در برخی موارد کاهش جزئی نیز مشاهده شده است. با این حال، استفاده همزمان از SEPS و نانوسیلیس باعث بهبود عملکرد قیر شده و نمونه حاوی ٤ درصد SEPS و ٤ درصد نانوسیلیس بیشترین مقدار $G/\sin\delta$ را نشان داده است.

بر اساس این نتایج می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از SEPS ـ به‌صورت تنها یا در ترکیب با نانوسیلیس ـ تأثیر مثبت و قابل‌توجهی بر افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی نسبت به قیر خالص دارد.



شکل ٣. مقایسه مقدار مشخصه سوپرپیو برای تمامی نمونه‌ها در دمای ٦٠ درجه سانتی‌گراد

همچنین بر اساس برنامه تحقیقاتی استراتژیک بزرگراه‌های آمریکا، برای ارزیابی میزان بهبود مقاومت در برابر شیارشدگی، مقدار پارامتر مشخصه سوپرپیو در فرکانس ١,٥٩ هرتز (١٠ رادیان بر ثانیه) ملاک قرار می‌گیرد. با تقسیم این مقدار در نمونه‌های اصلاح‌شده بر مقدار متناظر در قیر خالص، میزان بهبود این پارامتر محاسبه می‌شود. در این مطالعه، این نسبت برای تمامی نمونه‌ها در سه دمای ٤٠، ٥٠ و ٦٠ درجه سانتی‌گراد در جدول ٤ ارائه شده است.

همان‌طور که از نتایج جدول مشخص است، مقاومت در برابر شیارشدگی برای نمونه‌های اصلاح‌شده با SEPS و همچنین نمونه‌های اصلاح‌شده با ترکیب SEPS و نانوسیلیس افزایش یافته است، در حالی که این مقدار برای نمونه‌های اصلاح‌شده تنها با نانوسیلیس کاهش نشان می‌دهد.

علاوه بر این، میزان بهبود عملکرد در برابر شیارشدگی در دماهای بالاتر نسبت به دماهای پایین‌تر قابل‌توجه‌تر است.

جدول ٤. نسبت بهبود مقاومت در برابر شیارشدگی برای قیرهای اصلاح شده بر مبنای مقدار مشخصه سوپرپیو

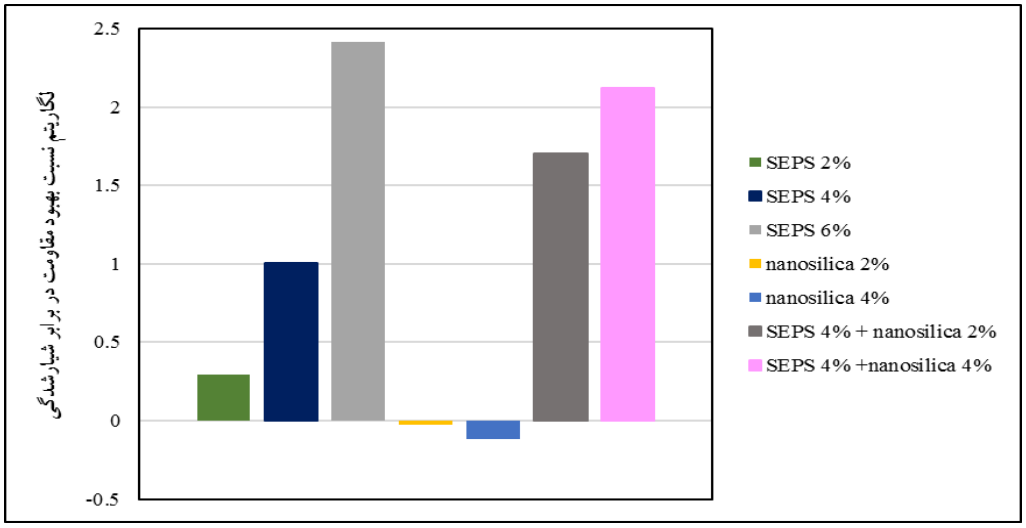
دما (درجه سانتی‌گراد)	SEPS 2%	SEPS 4%	SEPS 6%	nanosilica 2%	nanosilica 4%	SEPS 4% + nanosilica 2%	SEPS 4% + nanosilica 4%
٤۰	۱/۵۹	۳/۱۵	٦/۸۷	۰/۸۵	۰/٦۵	۵/۰۷	۷/۱۹
۵۰	۱/۸٦	٤/۵۱	۱۰/۹۰	۱/۰۰	۰/۹۱	۷/٦۱	۱۰/۲۷
٦۰	۲/۱۸	۷/۸٦	۱۷/۷۱	۰/۹۳	۱/۱۱	۱۱/٦۵	۱٤/۲۹

٤-۲-۲- ویسکوزیته در برش صفر (ZSV)

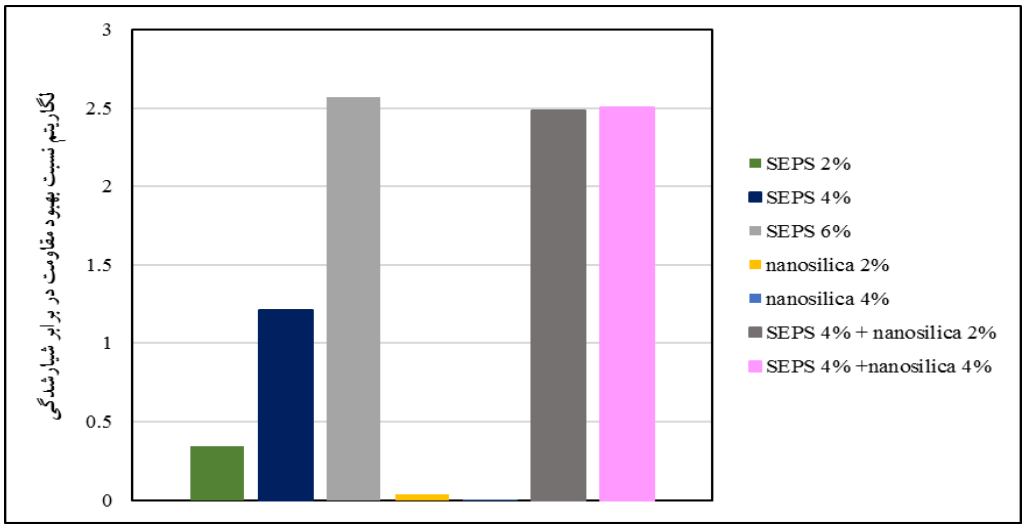
همان‌طور که در بخش‌های قبلی اشاره شد، برای تعیین ویسکوزیته در برش صفر از مدل کِراس استفاده شده است. مدل کِراس شامل سه پارامتر است: ویسکوزیته در برش صفر و دو پارامتر ثابت. در این مطالعه، با استفاده از بخش CFTOOL در نرم‌افزارMATLAB ، مقادیر مناسب این پارامترها از طریق برازش رابطه (٦) به منحنی‌های ویسکوزیته بر حسب فرکانس زاویه‌ای تعیین شده‌اند.

پس از تعیین مقدار ZSV برای هر یک از قیرهای اصلاح‌شده، این مقدار بر مقدار متناظر در قیر خالص تقسیم شده تا شاخصی برای ارزیابی میزان بهبود مقاومت در برابر شیارشدگی به دست آید. همان‌طور که در شکل‌های ٤ تا ٦ مشاهده می‌شود، تأثیر افزودنی‌ها در دمای ٦۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به دو دمای دیگر بیشتر است.

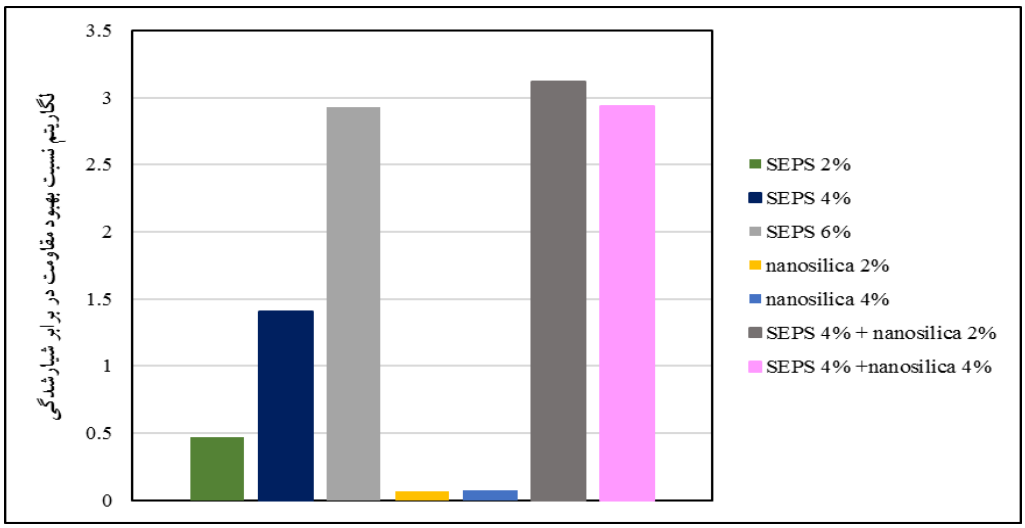
همچنین، برخلاف نتایج به‌دست‌آمده از مقایسه بر مبنای پارامتر مشخصه سوپرپیو، در دمای ٦۰ درجه سانتی‌گراد، تأثیر ٤ درصد SEPS به همراه ۲ درصد نانوسیلیس بیش از سایر افزودنی‌ها بوده است. با این حال، با در نظر گرفتن هر دو معیار مقایسه مقاومت در برابر شیارشدگی، می‌توان نتیجه گرفت که افزودنی SEPS و همچنین ترکیب SEPS + نانوسیلیس تأثیر قابل‌توجهی در بهبود عملکرد قیر دارند؛ در حالی که نانوسیلیس به‌تنهایی تأثیر مثبتی بر بهبود خواص مقاومتی قیر در برابر خرابی شیارشدگی نشان نمی‌دهد.



شکل ٤. نسبت بهبود مقاومت در برابر شیارشدگی بر مبنا ZSV برای تمامی نمونه‌ها در دمای ٤۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۵. نسبت بهبود مقاومت در برابر شیارشدگی بر مبنا ZSV برای تمامی نمونه‌ها در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ٦. نسبت بهبود مقاومت در برابر شیارشدگی بر مبنا ZSV برای تمامی نمونه‌ها در دمای ٦٠ درجه سانتی‌گراد

۵- نتیجه‌گیری

آگاهی از خصوصیات قیر در بازه‌ای گسترده‌تر از شرایط قابل دستیابی در آزمایشگاه برای تحلیل رفتار مخلوط‌های آسفالتی ضروری است. ازاین‌رو، ترسیم منحنی جامع خصوصیات ویسکوالاستیک قیرها، از جمله مدول برشی دینامیکی، اهمیت ویژه‌ای دارد. در این مطالعه، علاوه بر توسعه منحنی جامع بر پایه اصل برهم‌نهی زمان–دما و با استفاده از داده‌های آزمایش جاروب فرکانس، منحنی جامع به کمک داده‌های آزمایش جاروب دما نیز ترسیم شد تا امکان ارزیابی دقیق‌تر فراهم شود. همچنین با توجه به اینکه شیارشدگی یکی از اصلی‌ترین خرابی‌های روسازی آسفالتی است، عملکرد قیرهای اصلاح‌شده با افزودنی‌های SEPS و نانوسیلیس(Nanosilica) به کمک داده‌های آزمایش جاروب فرکانس و دو شاخص پارامتر مشخصه سوپرپیو ($G^*/\sin\delta$) و ویسکوزیته در برش صفر (ZSV) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که منحنی‌های جامع توسعه‌یافته به روش Chailleux برای سه نمونه قیر شامل قیر خالص، قیر اصلاح‌شده با ۲ درصد SEPS و قیر اصلاح‌شده با ٤ درصد SEPS به همراه ۲ درصد Nanosilica، تطابق بسیار خوبی با منحنی‌های جامع ترسیم‌شده بر اساس روش معمول و اصل برهم‌نهی زمان–دما دارند. این موضوع بیانگر دقت و قابلیت اعتماد بالای روش Chailleux در توسعه منحنی جامع است. همچنین بررسی مقاومت در برابر شیارشدگی با استفاده از دو شاخص $G^*/\sin\delta$ و ZSV نشان داد که افزودن Nanosilica به قیر خالص تأثیر قابل‌توجهی در بهبود عملکرد قیر ندارد، در حالی که افزودن پلیمر SEPS و نیز ترکیب

SEPS + Nanosilica موجب افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی شده است. بر اساس شاخص سوپرپیو، در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد بیشترین بهبود عملکرد مربوط به نمونه اصلاح‌شده با ٤ درصد SEPS به همراه ٤ درصد Nanosilica است، در حالی که در دماهای ۵۰ و ٦۰ درجه سانتی‌گراد نمونه اصلاح‌شده با ٦ درصد SEPS بهترین عملکرد را نشان می‌دهد. از سوی دیگر، بر اساس شاخص ZSV، در دماهای ۴۰ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد نمونه اصلاح‌شده با ٦ درصد SEPS عملکرد بهتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارد، اما در دمای ٦۰ درجه سانتی‌گراد بیشترین بهبود عملکرد مربوط به نمونه اصلاح‌شده با ٤ درصد SEPS و ۲ درصد Nanosilica است.

به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که افزودنی SEPS، چه به‌صورت منفرد و چه در ترکیب با Nanosilica، نقش اصلی را در بهبود مقاومت قیر در برابر شیارشدگی ایفا می‌کند، در حالی که Nanosilica به‌تنهایی تأثیر قابل‌توجهی در بهبود رفتار مقاومتی قیر ندارد. این موضوع اهمیت استفاده از پلیمر SEPS و همچنین ترکیب آن با Nanosilica را در بهبود عملکرد قیرهای آسفالتی برجسته می‌سازد.

٦- مراجع

–Abdollahi, S. F., Jahangiri, B., Leavitt, A., & Andriescu, A. (2026). Laboratory evaluation of the rutting performance of different lanes at the pavement testing facility at asphalt binder level. *Transportation Research Record*.

-Anderson, D. A., Christensen, D. W., Bahia, H. U., Dongre, R., Sharma, M. G., Antle, C. E., & Button, J. (1994). Binder characterization and evaluation, volume 3: Physical characterization. *Strategic Highway Research Program, National Research Council.*

-Anderson, D. A., Le Hir, Y. M., Planche, J. P., Martin, D., & Shenoy, A. (2002). Zero shear viscosity of asphalt binders. *Transportation Research Record*, *1810*(1), 54–62.

-Bahia, H. U., Hanson, D. I., Zeng, M., Zhai, H., Khatri, M. A., & Anderson, R. M. (2001). Characterization of modified asphalt binders in Superpave mix design.

-Booshehrian, A., Mogawer, W. S., & Bonaquist, R. (2013). How to construct an asphalt binder master curve and assess the degree of blending between RAP and virgin binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *25*(12), 1813–1821.

-Brasil, M. A. D. C., Leite, L. F. M., Aragão, F. T. S., Osmari, P. H., Chinelatto Júnior, L. S., Nascimento, L. A. H. D., & Araujo, J. R. D. (2024). Performance evaluation of asphalt binder modified with lignin-derived nanocarbon. *Matéria (Rio de Janeiro)*, *29*.

-Chailleux, E., Ramond, G., Such, C., & de La Roche, C. (2006). A mathematical-based master-curve construction method applied to complex modulus of bituminous materials. *Road Materials and Pavement Design*, *7*(sup1), 75–92.

-Cross, M. M. (1965). Rheology of non-Newtonian fluids: A new flow equation for pseudoplastic systems. *Journal of Colloid Science*, *20*(5), 417–437.
doi.org/10.1016/0095-8522(65)90022-X

-D'Angelo, J., Kluttz, R., Dongre, R. N., Stephens, K., & Zanzotto, L. (2007). Revision of the Superpave high temperature binder specification: The multiple stress creep recovery test. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists,* 76.

-Dobson, G. R., Monismith, C. L., Puzinauskas, V. P., & Busching, H. W. (1969). The dynamic mechanical properties of bitumen. *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings.*

-Dong, W., Ma, F., Fu, Z., Qin, W., Qi, C., He, J., & Li, C. (2024). Construction and examination of temperature master curve for asphalt with different aging extents. *Fuel*, *370*.

-Ferry, J. D. (1980). Viscoelastic properties of polymers. *John Wiley & Sons.*

-Gao, J., Wang, H., You, Z., & Hasan, M. R. M. (2018). Research on properties of bio-asphalt binders based on time and frequency sweep test. *Construction and Building Materials*, *160*, 786–793.

-Gholami, M., Khodadadi, M., Hajikarimi, P., & Khodaii, A. (2024). Investigating the effects of reducing the number of temperatures and frequencies on the development of master curves for viscoelastic properties of bituminous composite. *Measurement*, *230*, 114503.

-Golalipour, A. (2011). Modification of multiple stress creep and recovery test procedure and usage in specification.

-Goodrich, J. L. (1988). Asphalt and polymer modified asphalt properties related to the performance of asphalt concrete mixes. 57.

-Sengoz, B., & Isikyakar, G. (2008). Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen. *Construction and Building Materials*, *22*(9), 1897–1905.
-Sharma, A. (2025). Chemo-rheological characterization of asphalt binders using different aging processes.
-Taheri, A., Khodaii, A., & Hajikarimi, P. (2026). Correlations among chemical and rheological aging indices of asphalt binder at high temperatures. *Scientific Reports*.
-Undugoda, P. M. (2024). Evaluation of rheological master curve parameters for the practical specification grading of Canadian asphalt binders.
-Wang, Y. (2020). Combining Numerical and Image Data for Pavement Performance Modeling. *Journal of Infrastructure Systems*.
-Wang, Z., Ding, H., Ma, X., Yang, W., & Ma, X. (2024). Predicting dynamic properties and fatigue performance of aged and regenerated asphalt. *Coatings*, *14*(12), 1486.
-Wu, W., Jiang, W., Fu, Z., Xiao, J., Yuan, D., & Xing, C. (2024). Comparison of dynamic and steady viscosity in high-viscosity modified asphalt binder and analysis of its zero shear viscosity test methods. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *36*(2), 04023574.
-Yaqueen, M. N., Kuity, A., & Ahmed, M. A. (2025). Sustainable nano silica production from agricultural residues. *International Journal of Pavement Research and Technology*.
-Yildirim, Y., Solaimanian, M., & Kennedy, T. W. (2000). Mixing and compaction temperatures for hot mix asphalt concrete. *69*, 131–170.
-Yurdakul, H., & Özdemir, A. M. (2025). Optimizing high-temperature performance of asphalt binder using aromatic thermoplastic resin. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*.
-Zhan, Q., Cheng, Z., Cao, X., Liu, Q., Yuan, Y., He, L., & Gao, J. (2026). Multiscale rheological properties of pavement asphalt. *Coatings*, *16*(3), 355.
-Hu, Y., Cheng, X., Sreeram, A., Si, W., Li, B., Pipintakos, G., & Airey, G. D. (2025). Enhancing fatigue resistance and low-temperature performance of asphalt pavements using antioxidant additives.
-Karakas, A. S. (2026). Evaluation of Aging Effects on Asphalt Binders and Pavements: Rheological Responses to Rejuvenators and Numerical Analysis of Polymer Modification. *Polymers*, *18*(6), 759.
doi.org/10.3390/polym18060759
-Kumar, A., & Choudhary, R. (2024). A study on steady and dynamic viscosity evaluation of bio-rubberized asphalt binders. *1326*(1), 012110.
-Kumar, R. (2022). Deep Neural Networks for Pavement Distress Prediction Using LCMS and Image Data. *Journal of Transportation Engineering*.
-Martinez-Arguelles, G., Casas, D., Peñabaena-Niebles, R., Guerrero-Bustamante, O., & Polo-Mendoza, R. (2025). A novel master curve formulation with explicitly incorporated temperature dependence for asphalt mixtures. *Infrastructures*, *10*(9), 227.
-Mashaan, N. S., Oguntayo, D. O., & Dassanayake, C. (2025). Waste By-Products in Asphalt Concrete Pavement Construction: A Review. *Materials*, *18*(17), 4092. **doi.org/10.3390/ma18174092**
-Nouali, M., Derriche, Z., & Ghorbel, E. (2026). Effect of High-Temperature Storage on the Rheological and Non-Newtonian Behaviors of Used Engine Oil: Plastic Bag Waste Modified Bitumen. *International Journal of Pavement Research and Technology*, *19*(6), 1586–1604. **doi.org/10.1007/s42947-025-00536-1**
-Parker, F., & Brown, E. R. (1990). *A study of rutting of Alabama asphalt pavements*. Highway Research Center, Auburn University.
-Petersen, J. C., Robertson, R. E., Branthaver, J. F., Harnsberger, P. M., Duvall, J. J., Kim, S. S., & Bahia, H. U. (1994). Binder characterization and evaluation: Vol. 1.
-Pouget, S., Sauzéat, C., Di Benedetto, H., & Olard, F. (2014). Calculation of viscous energy dissipation in asphalt pavements. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, *9*(2), 123–130.
-Rahi, M., Fini, E. H., Hajikarimi, P., & Nejad, F. M. (2015). Rutting characteristics of styrene-ethylene/propylene-styrene polymer modified asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *27*(4), 04014154.

Experimental Evaluation of the Effects of Styrene–Ethylene/Propylene–Styrene (SEPS) Polymer and Nanosilica Additives on the Rheological Properties and Rutting Resistance of Asphalt Binder

Alireza Askari, *Ph.D., Student, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.*

Reza Sepaspour, Ph.D., Student, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.

Fereydoun Maghaddas-Nejad, Professor, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.

E-mail: alirezaasgari272@gmail.com

Received: May 2026- Accepted: November 2026

ABSTRACT

Bitumen, as a viscoelastic material, exhibits mechanical behavior that depends on temperature and loading rate; therefore, accurate characterization of its rheological properties is essential for predicting asphalt pavement distresses such as rutting. In this study, the effects of adding nanosilica and styrene–ethylene/propylene–styrene (SEPS) polymer on the performance of 85/100 penetration grade bitumen were investigated. To analyze the viscoelastic behavior, master curves of the complex shear modulus were constructed and compared using both the time–temperature superposition principle and the method based on temperature sweep data. To evaluate rutting resistance, two indicators—Superpave rutting parameter (G*/sinδ) and zero-shear viscosity (ZSV)—were employed. The results showed that nanosilica alone does not significantly improve rutting resistance, whereas the addition of SEPS, either individually or in combination with nanosilica, increases stiffness, enhances viscoelastic behavior, and improves the bitumen's resistance to permanent deformation at high temperatures. Furthermore, comparison of the master curves demonstrated that the method based on temperature sweep data exhibits good agreement with the classical approach and can be considered a reliable alternative when frequency sweep testing is limited.

Keywords: Styrene–Ethylene/Propylene–Styrene (SEPS), Asphalt Binder, Master Curve, Rutting Resistance, Nanosilica