

## ارزیابی مقاومت شیارشدگی قیر حاوی خاکستر پسماند زغال سنگ با استفاده از آزمایش رئومتر برشی دینامیکی

مقاله علمی - پژوهشی

حسن دیوانداری\*، گروه عمران، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران  
پویان نظریان، دانشجوی دکتری، گروه عمران، واحد آیت الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران  
محمدامین یوسف تبار میری، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه عمران، واحد آیت الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران  
\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: ha.divandari@iau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۳۰ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۵

صفحه ۱۲۶-۱۰۹

### چکیده

روسازی‌ها سرمایه ملی کشورها محسوب می‌شوند که سالیانه بخش عمده‌ای از بودجه عمرانی سازمان‌های ذی‌ربط صرف طراحی، ساخت، تعمیر و نگهداری آن‌ها می‌شود. شیارشدگی از جمله خرابی‌های سازه‌ای به شمار می‌آید که به صورت شیار فرورفته در مسیر چرخ وسایل نقلیه دیده می‌شود. توسعه شیارافتادگی باعث ایجاد ترک، به ویژه ترک پوست سوسماری می‌شود و نهایتاً به گسیختگی کلی روسازی منجر می‌شود. قیر مصرفی در مخلوط‌های آسفالتی، بایستی دارای سختی کافی جهت مقابله با پدیده شیارشدگی و از سوی دیگر انعطاف‌پذیری لازم جهت اجتناب از ترک‌های حرارتی در دماهای پایین باشد. با توجه به اینکه قیرهای معمولی قابلیت تأمین چنین خاصیتی را ندارند، استفاده از اصلاح‌کننده‌هایی جهت بهبود خواص عملکردی قیرها، الزامی است. از جمله موادی که می‌توان از آن به عنوان فیلر در قیر مورد استفاده و آزمایش قرارداد، خاکستر پسماند زغال سنگ (CWP) است که در حجم‌های زیادی در اطراف معادن زغال سنگ و... مشاهده می‌شود. هدف اصلی پژوهش حاضر، بررسی مقاومت شیارشدگی قیر حاوی خاکستر پسماند زغال سنگ با استفاده از دستگاه رئومتر برشی دینامیکی (DSR) است. در پژوهش حاضر، از قیر ۶۰-۷۰ به صورت خالص و همچنین قیر حاوی خاکستر پسماند زغال سنگ به میزان ۳ و ۶ درصد، استفاده شده است و مقاومت مخلوط در برابر خرابی شیارشدگی با استفاده از دستگاه رئومتر برشی دینامیکی در دماهای (۵۲، ۵۸، ۶۴ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد) و در فرکانس‌های ۲/۲۳ تا ۱۰۰ هرتز مورد بررسی و آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از خاکستر پسماند زغال سنگ به میزان ۳ و ۶ درصد، سبب افزایش قابل توجه مقاومت قیر در برابر خرابی شیارشدگی در دماهای بالا نسبت به قیر خالص می‌شود. بدین ترتیب، با استفاده بهینه از این ماده در مخلوط آسفالتی، علاوه بر کاهش عمق شیارشدگی، از انباشته شدن این مواد ضایعاتی در محیط‌زیست جلوگیری می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: خاکستر پسماند زغال سنگ، رئومتر برشی دینامیکی، شیارشدگی، قیر

### ۱- مقدمه

سال‌های اخیر، باعث اعمال نیروی بیشتری بر سیستم روسازی و لایه‌های آسفالتی شده که به تبع آن باعث کاهش عمر مفید روسازی می‌شود. در حال حاضر اکثر روسازی‌های موجود در کشور آسفالتی هستند که این روسازی‌ها به مرور زمان و

روسازی‌ها جز سرمایه ملی کشورها به حساب می‌آیند، به طوری که سالیانه بخش عمده‌ای از بودجه‌های عمرانی سازمان‌های مربوطه صرف طراحی، ساخت، تعمیر و نگهداری آن‌ها می‌شود. رشد روزافزون وسایل نقلیه و ترافیک در

از طرف دیگر با کاربرد مواد ضایعاتی، می‌توان از انباشته شدن این مواد در محیط‌زیست نیز جلوگیری به عمل آورد. باطله‌های زغال‌سنگ<sup>۴</sup> در حجم‌های زیادی در اطراف معادن زغال‌سنگ و... مشاهده می‌شود که می‌تواند یک تهدید جدی برای محیط‌زیست باشد. استفاده از باطله‌های زغال‌سنگ و خاکستر آن خواص مکانیکی را با افزایش استقامت مارشال، مقاومت کششی و مدول ارتجاعی (به‌ویژه در بلندمدت) بهبود می‌بخشد که این افزایش به علت ویژگی‌های پوزولانی بالای خاکستر زغال‌سنگ<sup>۵</sup> است (مدرس و ایار، ۲۰۱۴). از آنجایی که رفتار قیر به دو عامل دما و زمان بارگذاری بستگی دارد، آزمایشی برای چسبنده‌های قیری مطلوب است که رفتار قیر را با در نظر گرفتن هم‌زمان هر دو عامل مورد بررسی قرار دهد که این قابلیت در آزمایش رنومتر برش دینامیکی<sup>۶</sup> وجود دارد. رنومتر برش دینامیکی خواصی رنولوژیکی قیر را در دماهای متوسط و بالا اندازه‌گیری می‌نماید. بنابراین می‌تواند با اندازه‌گیری  $G^*$  و  $\delta$ ، تصویر کامل‌تری از نوع رفتار قیر در دماهای سرویس‌دهی روسازی را فراهم آورد.

از آنجا که قیر ماهیتی ویسکوالاستیک دارد، رفتار این ماده هم‌زمان به دما و نرخ بارگذاری (میزان بار وارده در واحد زمان) وابسته است. در شرایط آب و هوایی گرم مثلاً در فصل تابستان و یا تحت تأثیر بارگذاری‌های مداوم همچون عبور کامیون‌های سنگین با سرعت پایین، قیر مانند یک مایع ویسکوز عمل می‌کند. شیارشدگی روسازی مجموع تغییرشکل‌های برگشت‌ناپذیر ناشی از بارهای تکراری در دماهای بالای بهره‌برداری است. پیرشدگی قیر در مخلوط‌های آسفالتی پدیده‌ای است که از زمان ساخت مخلوط آسفالتی در کارخانه شروع می‌شود و با گذشت زمان در آسفالت پیشرفت می‌کند و در نهایت موجب تخریب و شکنندگی مخلوط می‌شود. پیرشدگی عموماً به دو فاز مشخص کوتاه‌مدت و بلندمدت تقسیم می‌شود. پیرشدگی کوتاه‌مدت، به میزان سخت شدن قیر در مرحله ساخت آسفالت (زمانی که دمای مخلوط بالا است)، مربوط می‌شود و پیرشدگی بلندمدت، به میزان سخت شدن قیر در طول عمر سرویس‌دهی مخلوط بازمی‌گردد. به دلیل آنکه قیر از مولکول‌های آلی تشکیل شده است، با اکسیژن هوا واکنش می‌دهد (اکسیداسیون قیر) و باعث می‌شود که ساختار و موقعیت مولکولی قیر تغییر کند. اکسیداسیون باعث می‌شود حالت شکننده قیر بیشتر شود که به آن سخت‌شدگی در اثر پیری و یا سخت‌شدگی در اثر اکسیداسیون می‌گویند. شکل دیگر سخت‌شدگی شامل تبخیر (حین اختلاط و اجرای مخلوط آسفالتی گرم) است. همچنین اگر قیر به مدت طولانی در دمای پایین قرار گیرد سخت‌شدگی فیزیکی اتفاق می‌افتد.

شرایط جوی و اثرات ناشی از ترافیک، دچار خرابی‌هایی می‌گردند (کاووسی و بختیاری، ۱۳۹۲). قیر ماده‌ای است که با دارا بودن دو خاصیت اصلی چسبندگی و نفوذناپذیری در صنعت راه‌سازی، جهت اندود کردن مصالح سنگی و چسباندن آن‌ها به یکدیگر و نیز غیرقابل نفوذ کردن مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. شاید چنین تصور شود که نقش قیر با توجه به اینکه از نظر درصد وزنی، سهم ناچیزی (حدود ۵ درصد) در مخلوط‌های آسفالتی دارد، در رفتار لایه‌های آسفالتی روسازی چندان با اهمیت نیست. اما باید توجه داشت که قیر و خواص آن، تأثیر بسزایی در عملکرد مطلوب و پایداری مخلوط‌های آسفالتی دارد (پژوهشکده حمل‌ونقل، ۱۳۸۷).

رفتار ویسکوز<sup>۱</sup> قیر در درجه حرارت بالا، افزایش بارهای ترافیکی و تراکم ترافیکی، از مهم‌ترین دلایل بروز شیارشدگی<sup>۲</sup> به شمار می‌روند (رشیدی، ۱۳۸۸). از جمله مهم‌ترین خرابی موجود در روسازی‌ها، شیارشدگی است که این خرابی به‌صورت شیار فرورفته همراه با برآمدگی‌هایی در اطراف آن، در طول مسیر چرخ وسایل نقلیه به وجود می‌آید. توسعه شیارشدگی باعث ایجاد ترک، به‌ویژه ترک پوست‌سوسماری<sup>۳</sup> و نهایتاً به گسیختگی کلی روسازی منجر می‌شود. این شیاهای ایجادشده با جمع‌کردن آب باران و تشکیل پدیده آب پیمایی، ایمنی عبور وسایل نقلیه را کاهش داده که در این شرایط، خطر تصادفات تا حد زیادی افزایش می‌یابد (لی و همکاران، ۲۰۱۴). چنانچه بار ترافیکی به میزان قابل‌توجهی افزایش یابد و درجه حرارت محیط نیز بالا باشد خطر ایجاد پدیده شیارشدگی بیشتر می‌شود (تانگ و همکاران، ۲۰۲۲؛ ادان و همکاران، ۲۰۲۱).

شیارشدگی یا تغییر شکل ماندگار، عملکرد کلی روسازی شامل عملکرد وظیفه‌ای و عملکرد سازه‌ای روسازی را مختل می‌سازد. این خرابی می‌تواند ناشی از استفاده از مخلوط آسفالتی ضعیف، عدم باربری بستر و خطاهای اجرایی و طراحی باشد. علاوه بر میزان بار ترافیکی و دمای محیط، استفاده بیش‌ازحد قیر، مصالح سنگی ریزدانه، مصالح سنگی رودخانه‌ای و مصالح سنگی گرد گوشه، باعث شیارشدگی در روسازی‌ها می‌شوند (جیا و همکاران، ۲۰۲۱).

این موضوع باعث شده است که در زمینه اصلاح رفتار قیر و در نتیجه اصلاح عملکرد مخلوط‌های آسفالتی، پژوهش‌هایی انجام گردد. از روش‌های اساسی برای افزایش پایداری مخلوط‌های آسفالتی در مقابل شیارشدگی، استفاده از مواد ضایعاتی است که پتانسیل بهبود خصوصیات فیزیکی و مکانیکی روسازی‌های آسفالتی را دارا می‌باشند. موادی که علاوه بر افزایش کارایی روسازی‌های آسفالتی، هزینه اولیه ساخت آن را نیز کاهش می‌دهند.

در هر زمانی از عمر سرویس روسازی می‌تواند ایجاد شود، بخش اعظمی از پدیده شیارشدگی در عمر روسازی را تشکیل می‌دهد (پاردهان، ۱۹۹۵؛ باهیوگونا، ۲۰۰۴).

در مراحل اولیه بارگذاری ترافیکی، افزایش تغییرشکل غیربازگشت در زیر لاستیک‌ها به وضوح از مناطق برآمده کناری بیشتر است. در این مرحله، روسازی با تغییرحجم متراکم می‌شود. در مرحله دوم، که از پس مرحله اول به وجود می‌آید، کاهش حجم در زیر لاستیک‌ها تقریباً برابر حجم افزایش یافته مناطق کناری است. بدین معنا که تراکم مصالح در زیر لاستیک‌ها کامل شده و شیارشدگی از این به بعد اساساً به علت جابجایی مصالح و بدون تغییرحجم رخ می‌دهد (شیا و عبدرحما، ۲۰۲۲).

در زمینه اصلاح رفتار قیر و اصلاح عملکرد مخلوط‌های آسفالتی، پژوهش‌های بسیاری انجام شده است. یکی از روش‌های اساسی برای افزایش پایداری مخلوط‌های آسفالتی در مقابل شیارشدگی، استفاده از مواد ضایعاتی مناسبی است که پتانسیل بهبود خصوصیات فیزیکی و مکانیکی روسازی آسفالتی را دارا می‌باشند. موادی که علاوه بر افزایش کارایی روسازی‌های آسفالتی، هزینه اولیه ساخت آن را نیز کاهش می‌دهند. بنابراین در سال‌های اخیر روش‌های مختلف و طیف گسترده‌ای از مواد اصلاح‌کننده و افزودنی به منظور بهبود خواص و رفتار قیر مورد بررسی قرار گرفتند که می‌توان به موادی مانند گوگرد، خرده لاستیک، الیاف و به خصوص انواع مواد پلیمری و در سال‌های اخیر به نانو ذرات اشاره نمود که میزان و نوع تاثیر این مواد کاملاً متفاوت بوده است.

حسن‌زاده‌خیز (۱۳۹۹) در مقاله‌ای به بررسی آزمایشگاهی تأثیر نانورس و پلیمر بر خصوصیات رئولوژیکی قیر و شیارشدگی مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای پرداخت. هدف از انجام پژوهش، ارزیابی اثر نانو رس به عنوان افزودنی اصلی به قیر جهت بهبود خواص قیر در کنار افزودنی‌های شایع SBS و الیاف سلولزی، به منظور افزایش مقاومت باربری آسفالت و اصلاح خصوصیات فنی آن در برابر شیارافتادگی در آسفالت SMA<sup>۹</sup> بود. بدین منظور نمونه‌هایی از مخلوط‌های آسفالتی SMA از قیر خالص ۶۰-۷۰ حاوی افزودنی ۰/۴ درصد الیاف به مخلوط آسفالتی و یا قیر اصلاح‌شده توسط ۵ درصد SBS، همراه با افزودنی نانو رس مونت موریلونیت به نسبت ۱ درصد، ۲ درصد، ۳ درصد و ۴ درصد به هر دو قیر خالص و پلیمری، توسط دستگاه ژیراتوری ساخته شد. در این پژوهش آزمایش مارشال، آزمایش‌های خزش دینامیکی و شیارشدگی برای نمونه‌های مختلف انجام شد. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها، بهبود عملکرد نمونه‌های

کاهش مواد فرار در مخلوط‌های قیری در زمان اختلاط و در هنگام پخش مخلوط در محل که دما بالا است، اتفاق می‌افتد. این مرحله پیرشدگی کوتاه‌مدت نامیده می‌شود. بخش عمده پدیده اکسیداسیون، در طول عمر روسازی انجام می‌شود. میزان پیرشدگی در قیرهای مختلف متفاوت است. اما نه تنها نوع قیر، بلکه نوع سنگ‌دانه نیز در میزان آن مؤثر است. پدیده پیرشدگی لزوماً یک پدیده منفی نیست؛ چرا که مقدار کمی پیرشدگی موجب می‌شود که خصوصیات مخلوط بهینه شود. فرسودگی قیر یک فرآیند برگشت‌ناپذیر است که آثار آن به صورت افزایش سختی و کاهش شکل‌پذیری قیر ظاهر می‌شود. فرآیند فرسودگی قیر ناشی از تغییراتی است که در نوع و اندازه مولکول‌های بسیار متنوع هیدروکربنی قیر، اتفاق می‌افتد. این فرآیند را در دو مرحله، فرسودگی کوتاه‌مدت و فرسودگی درازمدت می‌توان بررسی نمود. فرسودگی کوتاه‌مدت به دلیل گرمای آسفالت حین ساخت و پخش آن اتفاق می‌افتد و در اثر آن مقداری از حلال‌ها و روغن‌های سبک قیر تبخیر می‌شود. درعین‌حال در دمای بالا، اکسیداسیون تسریع شده نیز در قیر اتفاق می‌افتد. از جمله خرابی‌هایی که در فرسودگی کوتاه‌مدت به وجود می‌آید، شیارشدگی است. قیر مصرفی در مخلوط‌های آسفالتی بایستی دارای سفتی کافی جهت مقابله با پدیده شیارشدگی و از سوی دیگر انعطاف‌پذیری لازم جهت اجتناب از ترک‌های حرارتی در دماهای پایین باشد. با توجه به اینکه قیرهای معمولی قابلیت تأمین چنین خاصیتی را ندارند، استفاده از اصلاح‌کننده‌هایی جهت بهبود خواص عملکردی قیرها الزامی است. مقدار  $G^*$  (مدول مختلط) و  $\delta$  (زاویه فازی) برای قیر، بستگی زیادی به درجه حرارت دارد. در درجه حرارت‌های بالا، قیر مانند مایع عمل کرده و در درجه حرارت‌های خیلی پایین مانند مواد جامد الاستیک رفتار می‌کند. در دمایی که بارگذاری ترافیکی بر روی روسازی اعمال می‌شود، رفتار قیر مجموعه‌ای از رفتار ویسکوز و رفتار الاستیک است و به همین جهت رفتار آن را در گروه مواد ویسکوالاستیک طبقه‌بندی می‌کنند (حسینی و همکاران، ۲۰۲۱). خرابی شیارشدگی اساساً دارای دو سازوکار اصلی برای بروز شیارشدگی است. سازوکار اول شیارشدگی، چگالش روسازی است (کاهش حجم و افزایش چگالی). این سازوکار که به عنوان شیارشدگی اولیه نیز شناخته می‌شود در اوایل عمر روسازی و به دلیل تراکم لایه بر اثر عبور ترافیک سنگین رخ می‌دهد. سازوکار دیگر شیارشدگی، تغییرشکل برشی است. این حالت که شیارشدگی اساسی یا ثانویه نیز نامیده می‌شود، در روسازی‌هایی که دارای تراکم مناسب هستند به‌عنوان سازوکار ثانویه شیارشدگی شناخته شده است. این سازوکار، ضمن آنکه

مخلوط آسفالتی حاوی نانو ذرات با افزایش درصد نانو رس تا درصد ۳ را نشان می‌دهد، که قیر پلیمری بهترین بهبود در عملکرد را داشت.

چوبدار و همکاران (۱۴۰۱)، به ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر نانو سیلیس بر عملکرد دمای بالای قیر پرداختند. در این پژوهش، قیر PG 64-22 با استفاده از نانو سیلیس با درصد وزنی ۲، ۴ و ۶ درصد وزنی اصلاح شد و تأثیر این اصلاح‌کننده در کاهش خرابی حاصل از شیارشدگی نسبت به نمونه شاهد بررسی شد. پارامترهای شیارشدگی شامل انطباق خزش غیرقابل بازیافت و خزش بازیابی شده نیز مورد ارزیابی قرار گرفت و سپس اثر نانو سیلیس بر بهبود این پارامترها در دماهای بالا با شبیه‌سازی بارگذاری دینامیکی با استفاده از رئومتر برش دینامیکی و انجام آزمون در سه دمای ۵۸، ۶۴ و ۷۰ درجه سلسیوس مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از بررسی رفتار قیر در حالت ویسکوالاستیک غیرخطی، تأثیر قابل توجهی در پارامترهای شیارشدگی مشاهده شد. به طوری که در نتیجه افزودن نانو سیلیس، کرنش تجمعی نسبت به نمونه شاهد کاهش یافت و این کاهش با افزایش درصد اصلاح‌کننده ناشی از افزایش بازیابی خزش در پایان هر چرخه خزش بیشتر شد. همچنین نتیجه‌گیری شد که افزایش دما در تنش‌های زیاد و کم، تأثیر منفی بر کاهش درصد بازیابی تغییر شکل و انطباق خزشی غیرقابل بازیابی، در نمونه‌های قیر اصلاح‌نشده و اصلاح‌شده دارد. اما مهم این است که میزان اثر نانو سیلیس بر بهبود این پارامترها منفی بود. در ادامه، تفاوت بازیابی خزش در تنش‌های بالا و پایین و تفاوت انطباق خزشی غیرقابل بازیابی در تنش‌های بالا و پایین، به طور قابل توجهی بهبود یافت که نشان‌دهنده کاهش حساسیت نمونه‌های آسفالتی نسبت به تنش اعمال شده و همچنین افزایش قابل توجه در مقاومت نمونه‌ها در برابر شیارشدگی است. در پژوهش دیگری، فرج‌الهی و همکاران (۱۴۰۱) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر نانو کامپوزیت اتیلن وینیل استات-مونوموریلونیت بر خصوصیات شیارشدگی و خستگی مخلوط آسفالتی پرداختند. در این مطالعه، رفتار رئولوژیکی قیر حاوی VA/Nc و پلیمر EVA<sup>۱۰</sup> مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور ارزیابی رفتار دمای متوسط و بالای مخلوط، آزمایش‌های تیر خمشی چهار نقطه‌ای، خزش دینامیکی و آزمایش شیارشدگی روی مخلوط‌ها انجام شد. EVA/NC و EVA تولید شدند و با قیر مخلوط شدند. نتایج آزمون پایداری ذخیره‌سازی نشان داد که قیر اصلاح‌شده با EVA/NC نسبت به قیر اصلاح‌شده با EVA پایدارتر است. نتایج آزمون خستگی مخلوط‌ها نشان داد که مخلوط‌های آسفالتی ساخته‌شده از قیر اصلاح‌شده با نانو کامپوزیت نسبت به قیرهای اصلاح‌شده با

پلیمر EVA مقاومت بیشتری در برابر خستگی دارند. نتایج نشان داد افزودن ۶ درصد EVA/NC و ۶ درصد EVA سبب افزایش عمر خستگی به ترتیب برابر با ۴۳ درصد و ۲۰ درصد گردید. نتایج آزمایش‌های مقاومت شیارشدگی نشان داد با افزایش پلیمر EVA مقاومت شیارشدگی نمونه‌ها افزایش یافت. همچنین افزودن مونوموریلونیت نیز سبب افزایش مقاومت مخلوط‌های پلیمری در برابر شیارشدگی گردید. در تحقیقی که توسط مدرس و رحمانزاده (۲۰۱۴) بر روی قیر حاوی خاکستر پسماند زغال‌سنگ انجام دادند، مشخص شد که نمونه‌های ساخته شده با پودر زغال‌سنگ در مقایسه با پودر سنگ‌آهک، دارای مقاومت مارشال، مقاومت کششی و مدول ارتجاعی بیشتری هستند. به طوری که مخلوط حاوی این پودر دارای سفتی و جذب انرژی بیشتری نسبت به ترکیب شاهد است. بنابراین، این ماده هیچ ضرری برای روسازی انعطاف‌پذیر ندارد، بلکه یک افزودنی مناسب جهت بهبود عملکرد مخلوط در دماهای پایین و ترافیک سنگین به شمار می‌آید. استفاده از خاکستر زغال‌سنگ باعث افزایش پایداری و سختی شد. با این حال، تهیه خاکستر زغال‌سنگ برای استفاده در مخلوط آسفالتی نیاز به تجهیزات سوزاندن دارد که در کل هزینه‌های تولید آسفالت گرم را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، فرآیند سوزاندن، مصرف انرژی و میزان آلودگی محیط‌زیست را افزایش می‌دهد. شنگ و همکاران (۲۰۱۷) دریافتند که پارامتر  $(G^*/\sin\delta)$  با افزودن سرباره فسفر و پلی‌استر به قیر افزایش پیدا می‌کند، که نشان‌دهنده افزایش مقاومت شیارشدگی مخلوط است. همچنین بهترین نتیجه در استفاده از ۱ درصد فسفر و ۳ درصد پلی‌استر بدست آمد. همچنین محققین دریافتند که می‌توان به جای سنگ‌آهک از سرباره فسفر استفاده کرد که تأثیر آن به مراتب بیشتر از سنگ‌آهک است، به طوری که با انجام آزمایش در دمای ۵۸، ۶۴ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد، سرباره فسفر مقاومت شیارشدگی بیشتری را از خود نشان داد. تحقیقات انجام‌شده توسط خیونگ و همکاران (۲۰۱۸) در استفاده از کلوخه‌های زغال‌سنگ به عنوان فیلر در آسفالت و انجام آزمون DSR در دماهای (۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد) دریافتند که این مواد باعث افزایش پارامتر  $(G^*/\sin\delta)$  می‌شوند و تأثیر بسزایی در بهبود عملکرد آسفالت در دماهای بالا دارد. گائو و همکاران (۲۰۱۸) با انجام آزمایش رئومتر برشی دینامیکی بر روی قیر حاوی ساسوبیت و دیورکس<sup>۱۱</sup> در دماهای (۵۸، ۶۴، ۷۰ و ۷۶) درجه سانتی‌گراد دریافتند که افزودن این دو ماده تأثیر قابل توجهی در بهبود عملکرد الاستیک و مقاومت در برابر تغییر شکل ماندگار در دمای بالا دارد، به طوری که باعث افزایش مدول برشی و کاهش زاویه فازی

زغال سنگ بر مقاومت شیارشدگی قیر با استفاده از آزمایش رثومتر برشی دینامیکی بررسی گردید.

## ۲- مواد و آزمون‌های آزمایشگاهی

### ۲-۱- شرایط آزمایش

این آزمایش به روش جاروب فرکانس<sup>۱۱</sup> و در کرنش ۱ درصد از فرکانس‌های ۲/۲۳ تا ۱۰۰ هرتز در دماهای ۵۲، ۵۸، ۶۴ و ۷۰ سانتی‌گراد بر روی قیر ۷۰-۶۰ خالص و قیر حاوی ۳ درصد و ۶ درصد فیلر خاکستر پسماند زغال سنگ در شرایط RTFO<sup>۱۲</sup> انجام شده است. همچنین شعاع نمونه قیر مورد آزمایش، برابر ۱۲/۵ میلی‌متر و ارتفاع آن ۲ میلی‌متر بوده است.

می‌شود. در این آزمون مشخص شد که مقدار ۲ درصد دیورکس تأثیر بیشتری با ساسویت از خود نشان می‌دهد. در نهایت مقدار ۲ درصد دیورکس با ۲ تا ۳ درصد ساسویت جهت بهترین نتیجه از این دو ماده توصیه شد. کاکاد و همکاران (۲۰۱۸) با تحقیق بر روی آهک هیدراته به صورت خشک و مرطوب در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و اثر آن بر شیارشدگی دریافتند که عملکرد شیارشدگی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای با افزودن آهک هیدراته بهبود یافته است، به‌طوری‌که روش مرطوب نسبت به روش خشک تأثیر بیشتری دارد و باعث کاهش شیارشدگی در دمای بالا می‌شود.

با مرور و بررسی سوابق گذشته، آزمایش‌های گوناگونی بر روی قیر جهت افزایش عملکرد آن به‌ویژه در دماهای بالا انجام شده است. در پژوهش حاضر، تأثیر فیلر خاکستر پسماند

### ۲-۲- مشخصات قیر ۶۰-۷۰

قیر ۶۰-۷۰ مورد استفاده دارای مشخصات ذیل بود.

جدول (۱): مشخصات آزمایشگاهی قیر مورد استفاده

نتایج	استاندارد آزمایش		آزمایش‌های قیر
	ASTM	AASHTO	
۱/۰۱۷	D70	T228	وزن مخصوص (گرم بر سانتی متر مکعب)
۶۰	D5	T49	درجه نفوذ (0.1mm)
۵۳	D36	T53	نقطه نرمی (سانتی‌گراد)
+۱۰۰	D113	T51	کشش‌پذیری (سانتی‌متر)
۳۰۰	D92	T48	درجه اشتعال (سانتی‌گراد)
۳۳۶	D88	T72	کندروانی (sec)
۹۹/۶	D2042	T44	حلالیت (%)
۰/۰۳	D1754	T179	افت وزنی (%)

### ۲-۳- آزمایش لعاب نازک چرخشی (RTFO) (ASTM: D2872)

به سبب آنکه در آزمایش RTFO نمونه‌ها در حال چرخش و دوران هستند و مرتباً مخلوط می‌شوند، برای قیرهای اصلاح‌شده مناسب‌تر است. هدف از این آزمایش، تعیین اثر توأم حرارت و هوا بر روی فیلم متحرکی از قیر است. هشت بطری نمونه برای انجام این آزمایش مورد نیاز است. دو بطری برای تعیین اتلاف جرم مورد نیاز است و شش بطری برای آزمایش‌های دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای این منظور حدود ۳۵ گرم قیر در هشت استوانه شیشه‌ای حاوی قیر که به صورت افقی در یک دیسک گردان عمودی قرار داده شده‌اند

پیرشدگی قیر به علت دو سازوکار متفاوت، یعنی تبخیر روغن‌های سبک در قیر و اکسیداسیون به وجود می‌آید. هنگام تهیه مخلوط آسفالتی گرم و در هنگام جابه‌جایی آن، به علت دمای بالا و جریان هوا، ماده چسبنده با هر دو سازوکار پیر می‌شود. طبق استانداردهای ASTM D2872 یا AASHTO T240، آزمایش لعاب نازک چرخشی به منظور شبیه‌سازی پیرشدگی قیر در هنگام ساخت در کارخانه آسفالت، استفاده می‌شود. در واقع این آزمایش پیرشدگی را در کوتاه‌مدت شبیه‌سازی می‌کند و حدود ۸۵ دقیقه به طول می‌انجامد.

استفاده در آزمایش‌های بعدی و تعیین مقدار کاهش جرم مواد فرار قیر در طول آزمایش، دو هدفی است که طی آزمایش RTFO مد نظر می‌باشد. کاهش جرم مواد فرار نشانه‌ای از پیرشدگی است که ممکن است در حین عملیات اختلاط و ساخت آسفالت در قیر به وقوع بپیوندد. درصد کاهش وزن هر نمونه با استفاده از معادله (۱) محاسبه می‌شود.

$$(1) \quad \text{درصد کاهش وزن} = \frac{\text{وزن پیر شده} - \text{وزن اصلی}}{\text{وزن اصلی}} \times 100$$

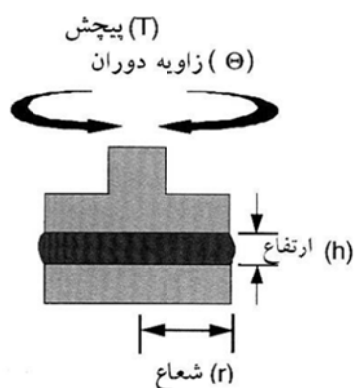
بعد از آزمایش RTFO است. ترک‌های ناشی از خستگی با محدود ساختن  $G^* \times \sin \delta$  برای قیر پیر شده سریع به مقدار کمتر از ۵۰۰۰ کیلوپاسکال کنترل می‌شود. این روش برای دمای بین ۵ تا ۸۵ سانتی‌گراد که مقدار  $G^*$  بین ۰٫۱ تا ۱۰۰۰۰ کیلو پاسکال است، مناسب است. روش آزمایش بدین طریق است که قرصی از قیر مورد نظر که قطر آن با قطر صفحه چرخنده یکسان است، تهیه می‌شود. ضخامت قرص قیر بستگی به درجه حرارت آزمایش دارد. برای دمای پایین در محدوده ۷ تا ۳۴ سانتی‌گراد احتیاج به ضخامتی در حدود ۲ میلی‌متر است. برای دماهای بالاتر از ۵۲ سانتی‌گراد، ضخامت قرص باید کم‌تر باشد (در حدود ۱ میلی‌متر). قطر صفحه چرخنده نیز به دما بستگی دارد. در دمای بالا از صفحه چرخنده بزرگ (۲۵ میلی‌متر) و در دمای پایین از نوع کوچک آن (۸ میلی‌متر) استفاده می‌شود. قیر بین صفحه ثابت و صفحه چرخنده فشرده شده تا ضخامت لازم برای دمای مورد نظر بدست آید. با اندازه‌گیری تنش و کرنش برشی، مقدار  $G^*$  تعیین می‌شود.

ریخته می‌شود و سپس دمای اون را به ۱۶۳ سانتی‌گراد می‌رسانند. سپس دیسک به مدت ۸۵ دقیقه با شدت  $\text{rad/min}$  ۱۵ شروع به گردش کرده و در همین زمان در هر لحظه، هوا با شدت  $400 \text{ ml/min}$  به داخل استوانه‌ها دمیده می‌شود. این آزمایش، نوعی شبیه‌سازی از پیری قیر در هنگام اختلاط با مصالح در زمان ساخت آسفالت است. تهیه قیر پیر شده جهت

#### ۴-۲- آزمایش رئومتر برش دینامیکی (DSR)

رئومتر برشی دینامیکی خواص رئولوژیکی و تغییر شکل‌پذیری قیر مانند اختلاف‌فاز و مدول برشی را در دماهای متوسط تا زیاد اندازه‌گیری می‌کند. این دو پارامتر در تعیین رفتار الاستیک و ویسکوز قیرها کاربرد دارند. در این آزمون، بارگذاری‌های اعمال‌شده به صورت دینامیکی (رفت و برگشتی) است که نمودار آن به صورت سینوسی و مقدار اعمال نیرو به قیر و میزان عکس‌العمل آن، در این آزمون مشخص می‌شود. قابل ذکر است که مدول مختلط برشی به‌صورت نسبت بیشینه تنش برشی به تغییرشکل حداکثر تعریف می‌گردد که در واقع مقیاسی از پایداری کل مصالح در برابر تغییرشکل، به هنگام قرارگیری در معرض ضربات مکرر تنش برشی را ارائه می‌دهد و شامل دو جزء الاستیک (قابل برگشت) و ویسکوز است. همچنین زاویه اختلاف فاز، به صورت وقفه زمانی بین تنش برشی اعمال‌شده و پاسخ تغییرشکل جسم (کرنش برشی) تعریف می‌شود.

تغییرشکل دائمی با محدود ساختن مقدار  $G^*/\sin \delta$  در دمای آزمایش، کنترل می‌شود. مقدار مجاز، بالاتر از ۱۰۰ کیلو پاسکال (برای قیر پیرنشده) و ۲۰۲ کیلو پاسکال (برای قیر



$$\gamma = \frac{\theta \cdot r}{h}$$

$$\tau = \frac{2T}{\pi r^3}$$

حداکثر پیچش اعمال شده  $T =$   
شعاع نمونه  $12/5$  یا  $4$  میلی‌متر  $r =$

زاویه دوران  $\theta =$   
ارتفاع نمونه  $1$  یا  $2$  میلی‌متر  $h =$

شکل ۱. آزمایش رئومتر برشی دینامیکی

## ۲-۵- روش پژوهش

زاویه فازی و مدول برشی تعیین می‌گردد. پارامتر شیارشدگی تعریف شده در روش شارپ مبنای مقایسه رفتار قیرهای مورد استفاده در پژوهش خواهد بود. این پارامترها حداقل در سه دما و سه سطح کرنش مورد محاسبه قرار گرفته و منحنی‌های رفتار رئولوژیکی قیرهای مورد استفاده ترسیم می‌گردد.

آزمایش به روش جاروب فرکانس و از فرکانس ۰.۱ هرتز تا ۱۰۰ هرتز، در دماهای ۱۳، ۱۹، ۲۵ و ۳۱ انجام شده است و آزمون در کرنش ۱ درصد انجام شده و فرکانس از ۰.۱ هرتز تا ۱۰۰ هرتز تغییر پیدا کرده است.

در پژوهش آزمایشگاهی حاضر، قیر خالص ۷۰-۶۰ با دو نوع فیلر پودر سنگ و فیلر پسماند زغال سنگ ترکیب گردید. بدین منظور از مخلوط‌کن دور بالا استفاده شد. لازم است برای دستیابی به توزیع مناسب و یکنواخت، دما و مدت زمان اختلاط تعیین گردد. سپس نمونه‌های قیر-فیلر بدست آمده، در دماهای متوسط مطابق دستورالعمل شارپ، مورد آزمایش رئومتر برشی دینامیکی قرار می‌گیرند. با توجه به دستورالعمل فوق، نمونه‌ها قبل از قرارگیری در دستگاه DSR، در شرایط پیرشدگی اولیه (RTFO) قرار می‌گیرند. سپس با استفاده از نتایج بدست آمده برای فیلرهای مورد پژوهش در آزمایش DSR، پارامترهای



شکل ۲. نمونه‌ای از پودر پسماند زغال سنگ



شکل ۳. نمونه‌ای از خاکستر پسماند زغال سنگ

## ۳- نتایج و بحث

بر خروجی‌های آزمون DSR مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفته است.

در این بخش، نتایج حاصل از آزمایش قیر پیرشده در شرایط RTFO و همچنین قیر حاوی ۳ درصد و ۶ درصد خاکستر پسماند زغال سنگ در شرایط RTFO و تأثیر پارامترهای مختلف شامل دما، فرکانس و تأثیر هم‌زمان آن‌ها بر خروجی‌های آزمون DSR (مدول برشی، زاویه فازی، جز الاستیک، جز ویسکوز و پارامتر شیارشدگی) با استفاده از دستگاه رئومتر برشی دینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است.

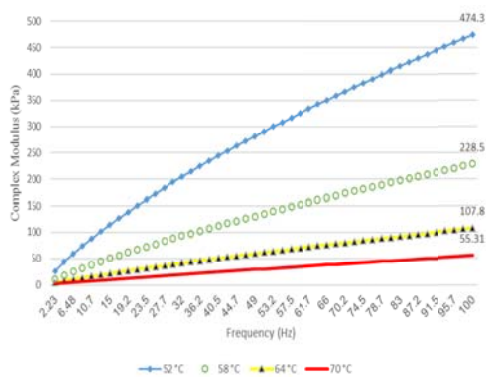
### نتایج تأثیر فرکانس و دما در مدول برشی

همان‌طور که در نتایج آزمایش و رسم شکل ۴ نشان داده شده است، مشاهده می‌شود که با افزایش دما و فرکانس در هر محدوده‌ی دمایی، میزان مدول برشی افزایش یافته است. اما با افزایش دما، مقدار عددی  $G^*$  در دماهای بالاتر، کوچک‌تر شده است که بیانگر این مطلب است که با افزایش دما و فرکانس، قیر نرم‌تر شده و سختی خود را از دست می‌دهد.

### ۳-۱- نتایج بدست آمده بر روی قیر خالص

#### ۳-۱-۱- فرکانس و دما

در این بخش اثر هم‌زمان فرکانس و دما، از فرکانس ۲/۲۳ تا ۱۰۰ هرتز در دماهای (۵۲، ۵۸، ۶۴ و ۷۰) درجه سانتی‌گراد،

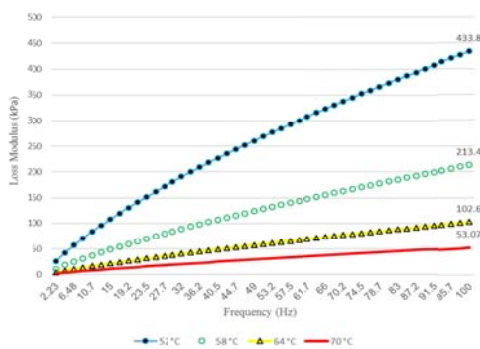


شکل ۴. نمودار تغییرات مدول برشی با فرکانس و دما

### نتایج تاثیر فرکانس و دما در جز ویسکوز

در دماهای بالاتر، کوچکتر شده است که این امر بیانگر این مسئله است که هرچه دما و فرکانس افزایش پیدا می‌کند، قیر سخت‌تر می‌شود و انعطاف‌پذیری خود را از دست می‌دهد.

نتایج آزمایش و شکل ۵ بیانگر این مطلب است که میزان جزء ویسکوز با افزایش دما و فرکانس در هر محدوده دمایی، شاهد افزایش بوده است. اما همان‌طور که دما افزایش پیدا می‌کند، مقدار عددی مدول کاهش (Loss Modulus)

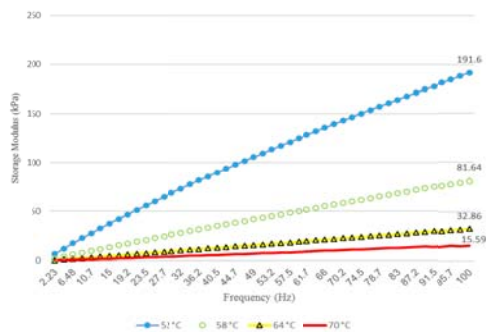


شکل ۵. نمودار تغییرات جز ویسکوز با فرکانس و دما

### نتایج تاثیر فرکانس و دما در جز الاستیک

همان‌طور که دما افزایش پیدا می‌کند مقدار عددی مدول ذخیره در دماهای بالاتر کوچکتر شده است. بیانگر سخت شدن قیر با افزایش دما و فرکانس می‌باشد.

با در نظر گرفتن نتایج حاصله از آزمایش و رسم شکل ۶ مشخص گردید که جزء الاستیک با افزایش دما و فرکانس در هر محدوده دمایی افزایشی را تجربه کرده است، اما



شکل ۶. نمودار تغییرات جز الاستیک با فرکانس و دما

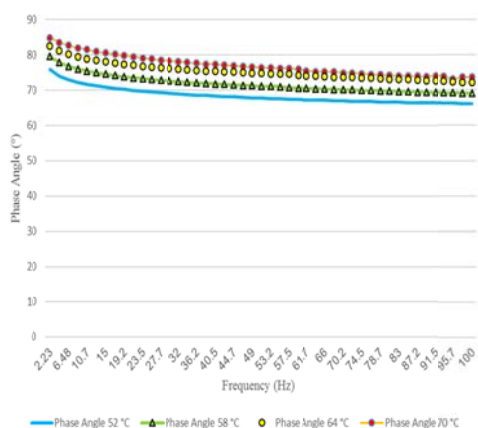
### نتایج تاثیر فرکانس و دما در زاویه فازی

نتایج منعکس شده در شکل ۷ نشان می‌دهد که زاویه فازی با افزایش دما و فرکانس در هر محدوده‌ی دمایی مقدار کاهشی را تجربه کرده است، که به مفهوم سخت شدن قیر می‌باشد. اما همان‌طور که دما و فرکانس افزایش یافته است، مقدار عددی زاویه فازی (Phase Angle) در دماهای بالاتر بزرگ‌تر شده و این دلالت بر این امر دارد که هرچه دما و فرکانس افزایش پیدا کند قیر نرم‌تر و به سمت روانی پیش رفته است.

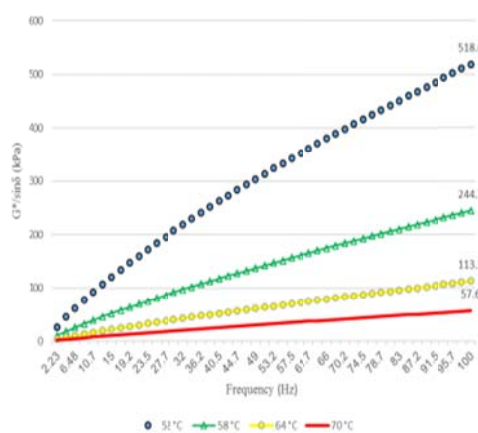
### نتایج تاثیر فرکانس و دما در شیارشدگی

شکل ۸ نشان می‌دهد که عامل شیارشدگی قیر با افزایش فرکانس، افزایش پیدا کرده است. در مقایسه با معیار شارپ،

میزان شیارشدگی ( $G^*/\sin \delta$ ) باید بزرگ‌تر از ۲/۲ کیلوپاسکال برای قیر پیرشده در شرایط RTFO باشد. در این آزمون، عامل شیارشدگی جز در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد و فرکانس ۲/۲۳ هرتز که معیار شارپ برای شیارشدگی در آن برآورده نشده، در سایر دماها و فرکانس‌ها بزرگ‌تر از ۲/۲ مگاپاسکال شده است و در هر محدوده‌ی دمایی روند افزایشی دارد، با این وجود مقدار عددی آن با افزایش دما و فرکانس در هر محدوده‌ی دمایی، مقدار کاهشی را تجربه کرده است، که بیانگر آن است که هرچه دما و فرکانس افزایش پیدا کند خطر ایجاد خرابی شیارشدگی نیز افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۷. نمودار تغییرات زاویه فازی با فرکانس و دما

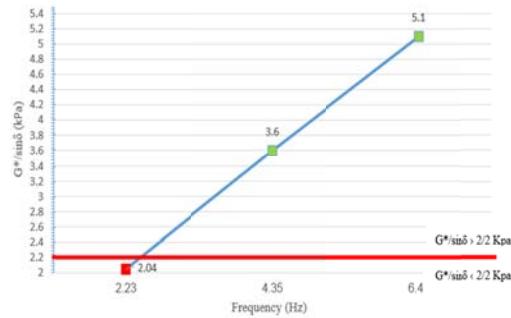


شکل ۸. نمودار تغییرات شیارشدگی با فرکانس و دما

### بررسی معیار شارپ

همان‌طور که بیان شد، برای برآورده شدن معیار شارپ در بحث شیارشدگی، همواره عامل شیارشدگی برای قیر در شرایط RTFO باید بزرگ‌تر از ۲/۲ کیلو پاسکال باشد. همان‌طور که نتایج آزمایش، در شکل ۹ نشان می‌دهد، در دمای ۷۰ درجه

سانتی‌گراد و فرکانس ۲/۲۳ هرتز این معیار حاصل نشده است. یعنی عامل شیارشدگی کمتر از ۲/۲ کیلو پاسکال شده، که نشان‌دهنده‌ی پتانسیل شیارشدگی است.



شکل ۹. بررسی معیار شارپ در ۷۰ سانتی‌گراد و فرکانس ۲/۲۳ هرتز

### نتایج تاثیر فرکانس و دما در مدول برشی

نتایج آزمایش و رسم نمودارهای ۱۰ و ۱۱ نشان می‌دهد که مدول برشی با افزایش دما و فرکانس در قیر حاوی ۳ درصد فیلر متغیر و در دو نمونه دیگر افزایش پیدا کرده است، اما با افزایش دما، مقدار عددی  $G^*$  در دماهای بالاتر کوچک‌تر شده است. به همین دلیل، با افزایش دما و فرکانس، قیر نرم‌تر شده و سختی خود را از دست می‌دهد.

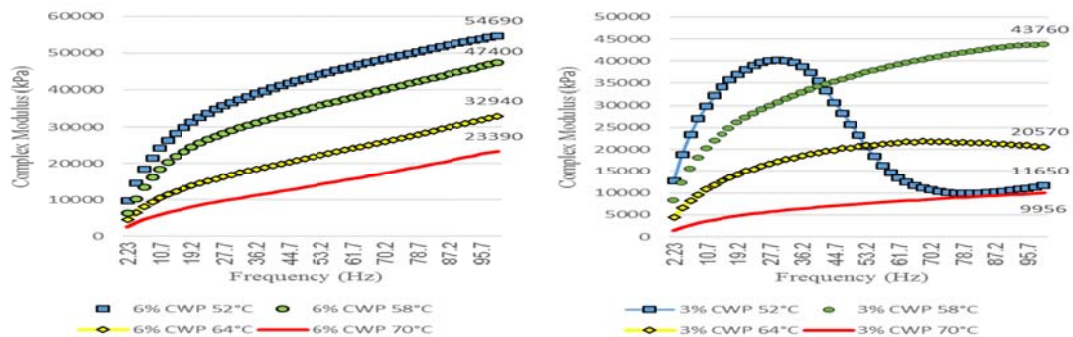
نتایج بیانگر این مسئله است که افزودن خاکستر پسماند زغال‌سنگ سبب شده است که مقدار مدول برشی نسبت به قیر خالص به مقدار قابل توجهی افزایش پیدا کند. ثانیاً، افزایش دما و فرکانس و افزودن فیلر به میزان ۶ درصد سبب شده است که قیر در بین سه نمونه، دارای بیشترین مقدار  $G^*$  باشد و بهترین عملکرد را دارا باشد.

### ۳-۲- نتایج بدست‌آمده بر روی قیر حاوی فیلر

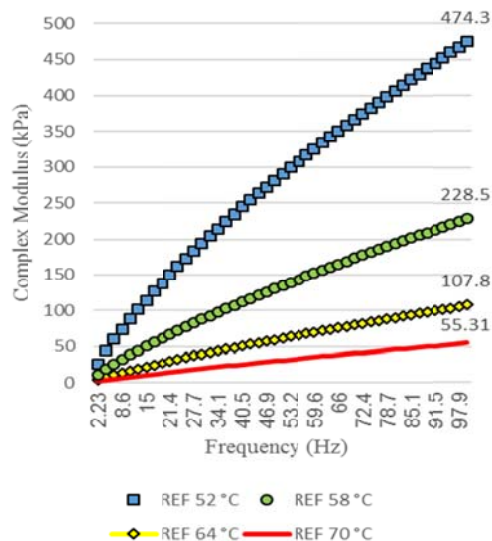
در ادامه، به بررسی تاثیر دما، فرکانس و تاثیر توام آن‌ها در قیر حاوی ۳ درصد و ۶ درصد خاکستر پسماند زغال‌سنگ در شرایط RTFO بر خروجی‌های تست DSR پرداخته شده است.

#### ۳-۲-۱- فرکانس و دما

در این بخش اثر مشترک فرکانس و دما، از فرکانس ۲/۲۳ تا ۱۰۰ هرتز در دماهای (۵۲، ۵۸، ۶۴ و ۷۰) درجه سانتی‌گراد در قیر حاوی ۳ درصد فیلر بر خروجی‌های آزمون DSR مورد ارزیابی قرار گرفته و مقایسه‌ای نیز بین قیر خالص و قیر حاوی ۳ و ۶ درصد فیلر انجام شده است.



شکل ۱۰. نمودار تغییرات مدول برشی با دما و فرکانس در قیر حاوی ۳ درصد و ۶ درصد فیلر

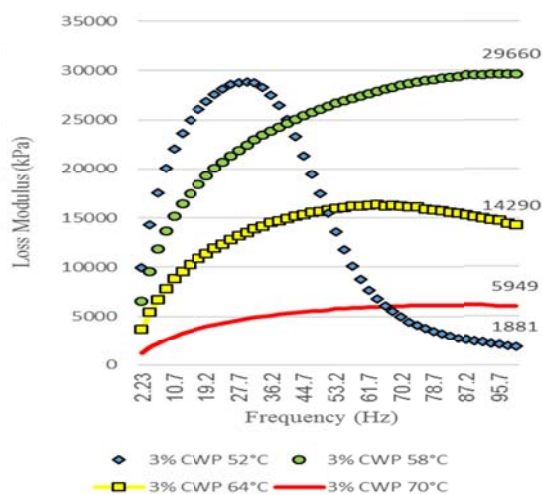
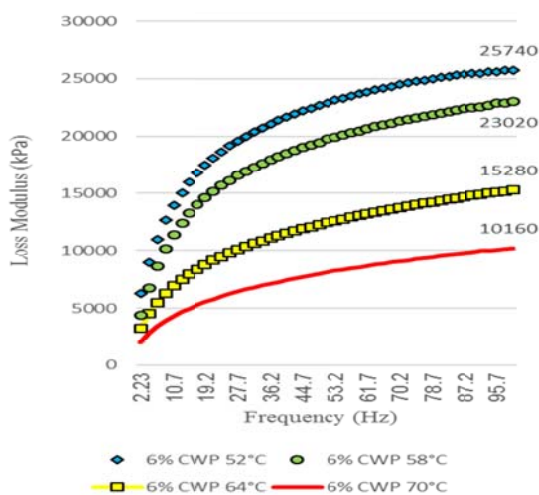


شکل ۱۱. نمودار تغییرات مدول برشی با دما و فرکانس در قیر خالص

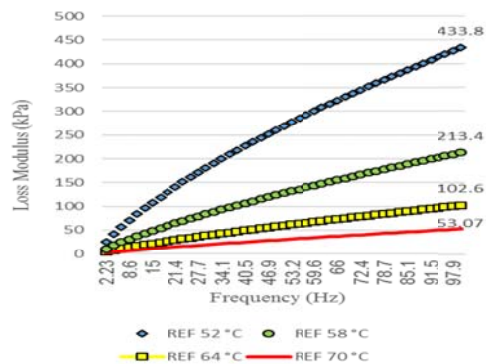
#### نتایج تاثیر فرکانس و دما در جز ویسکوز

در ادامه با توجه به نتایج، مشاهده شد که اولاً، افزودن خاکستر پسماند زغال سنگ سبب شده است تا مقدار جز ویسکوز نسبت به قیر خالص به مقدار قابل توجهی افزایش یابد. ثانیاً، افزایش دما و فرکانس و افزودن فیلر به میزان ۶ درصد سبب شده است که این قیر در بین سه نمونه دارای بیشترین مقدار مدول کاهش می‌باشد که در واقع قیر در این محدوده عملکرد مناسبی ندارد و حالت روان پیدا کرده است.

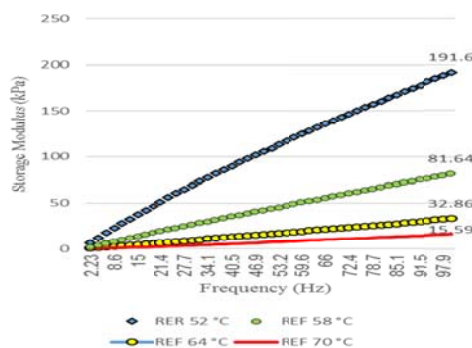
نتایج آزمایش و ترسیم شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داد که جز ویسکوز با افزایش دما و فرکانس در قیر حاوی ۳ درصد فیلر متغیر بوده و در دو نمونه دیگر افزایش پیدا کرده است. اما همان‌طور که دما افزایش پیدا کرده، مقدار عددی جز ویسکوز در دماهای بالاتر کوچک‌تر شده است (هرچه دما و فرکانس افزایش پیدا کند، قیر سخت‌تر می‌شود).



شکل ۱۲. نمودار تغییرات جز ویسکوز با دما و فرکانس در قیر حاوی ۳ درصد و ۶ درصد فیلر



شکل ۱۳. نمودار تغییرات جز ویسکوز با دما و فرکانس در قیر خالص

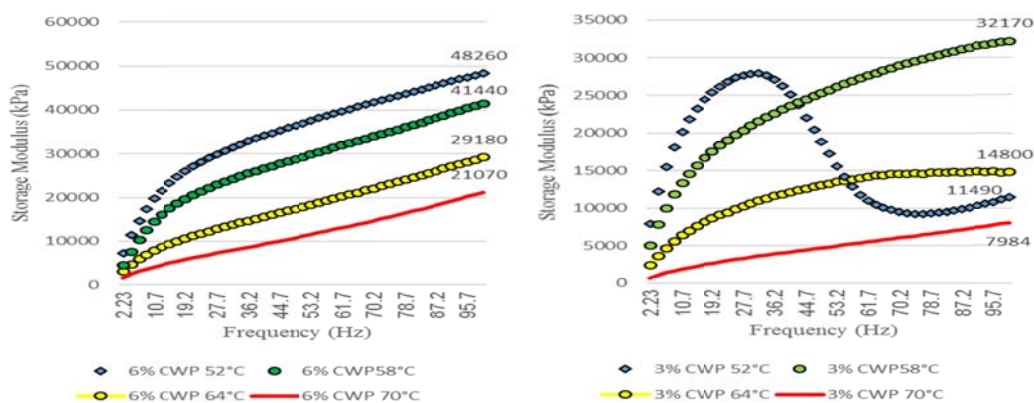


شکل ۱۴. نمودار تغییرات جز الاستیک با دما و فرکانس در قیر خالص

#### نتایج تأثیر فرکانس و دما در جز الاستیک

نتایج گویای این مطلب است که افزودن خاکستر پسماند زغال سنگ سبب شده است که مقدار بخش الاستیک نسبت به قیر خالص به مقدار قابل توجهی افزایش پیدا کرده است. ثانیاً افزایش دما و فرکانس و اضافه کردن فیلر به میزان ۶ درصد سبب شده است که این قیر در بین سه نمونه، دارای بیشترین مقدار مدول ذخیره باشد که در واقع قیر ما در این محدوده عملکرد مناسبی دارد.

بر اساس نتایج آزمایش منعکس شده در نمودارهای ۱۴ و ۱۵، می توان دریافت که جز الاستیک با افزایش دما و فرکانس در قیر حاوی ۳ درصد فیلر حالت متغیر دارد و در دو نمونه دیگر افزایش پیدا کرده است. همچنین با افزایش دما، مقدار عددی جز الاستیک در دماهای بالاتر کوچک تر شده که بیانگر این مسئله است که هرچه دما و فرکانس افزایش پیدا کند، قیر مورد نظر سخت تر و انعطاف پذیرتر می شود.



شکل ۱۵. نمودار تغییرات جز الاستیک با دما و فرکانس در قیر حاوی ۳ درصد و ۶ درصد فیلر

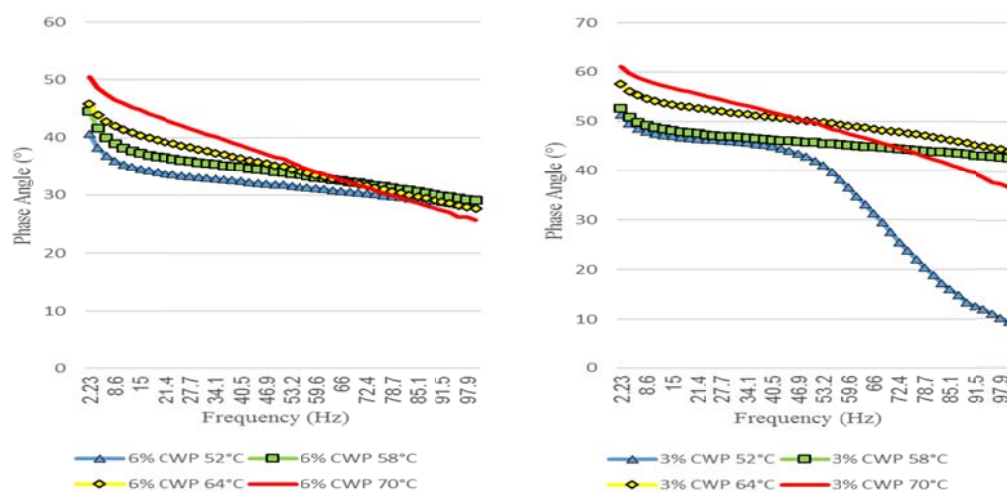
### نتایج تأثیر فرکانس و دما در زاویه فازی

در هر محدوده‌ی دمایی متغیر است و در دو نمونه دیگر با افزایش دما و فرکانس افزایش پیدا کرده است. اما با افزایش دما، پارامتر شیارشدگی در دماهای بالاتر در هر سه نمونه کوچک‌تر شده است، که این امر بیانگر این است که هرچه دما و فرکانس افزایش پیدا کند، مقاومت قیر در برابر شیارشدگی کم‌تر می‌شود. با توجه به نتایج مشخص شد که افزودن خاکستر پسماند زغال‌سنگ باعث شد که پارامتر شیارشدگی نسبت به قیر خالص به مقدار قابل‌توجهی افزایش پیدا کند. ثانیاً با افزایش دما، فرکانس و افزودن فیلر به میزان ۶ درصد سبب شده است که قیر در بین سه نمونه، دارای بیشترین مقدار  $G^*/\sin\delta$  باشد، که در این محدوده عملکرد مناسب و مقاومت بیشتری در برابر شیارافتادگی دارد.

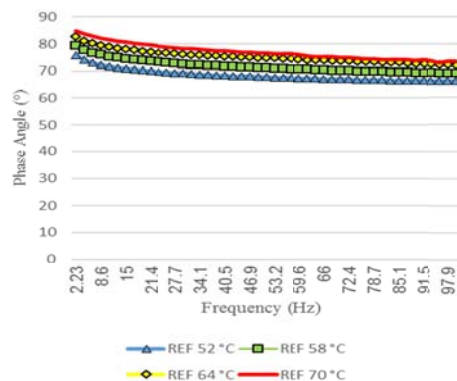
با در نظر گرفتن نتایج حاصل از آزمایش در شکل‌های ۱۶ و ۱۷، مشاهده می‌شود که زاویه فازی با افزایش دما و فرکانس در هر سه نمونه کاهش پیدا کرده است. با توجه به نتایج بدست آمده، مشخص شد که اولاً اضافه کردن خاکستر پسماند زغال‌سنگ باعث شده است که مقدار زاویه فازی نسبت به قیر خالص، کاهش پیدا کند. همچنین افزایش دما و فرکانس و افزودن فیلر به میزان ۶ درصد سبب شده است که این قیر در بین سه نمونه دارای کم‌ترین مقدار Phase Angle باشد، که در واقع قیر مورد مطالعه در این محدوده عملکرد مناسبی دارد.

### نتایج تأثیر فرکانس و دما در شیارافتادگی

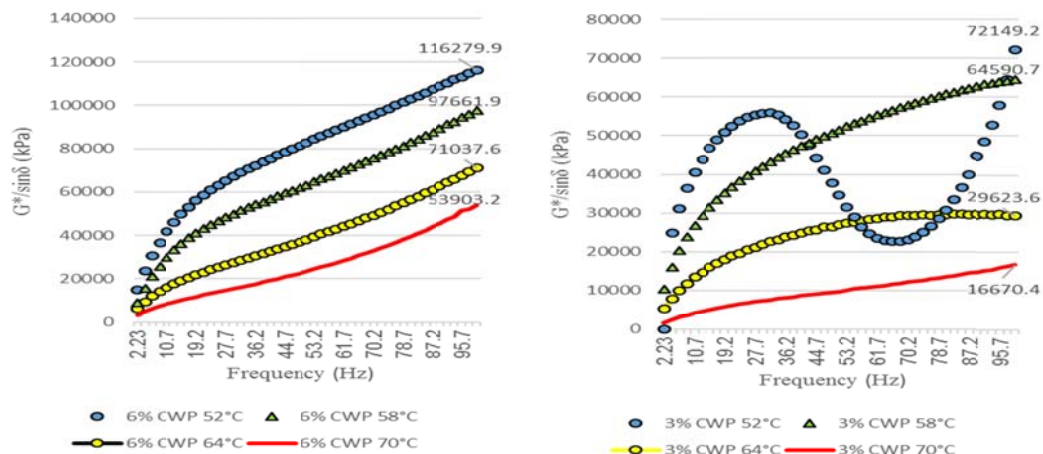
طبق نتایج بدست‌آمده از شکل‌های ۱۸ و ۱۹ مشخص شد که مقدار پارامتر شیارافتادگی در قیر حاوی ۳ درصد فیلر،



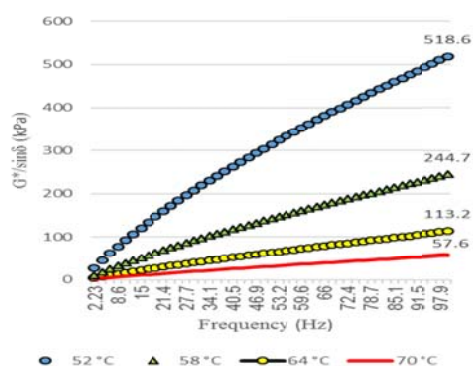
شکل ۱۶. نمودار تغییرات زاویه فازی با دما و فرکانس در قیر حاوی ۳ درصد و ۶ درصد فیلر



شکل ۱۷. تغییرات زاویه فازی با دما و فرکانس در قیر خالص



شکل ۱۸. نمودار تغییرات شیارافتادگی با دما و فرکانس در قیر حاوی ۳ درصد و ۶ درصد فیلر



شکل ۱۹. نمودار تغییرات شیارافتادگی با دما و فرکانس در قیر خالص

#### ۴- بحث

-پیرشدگی قیر سبب شده است که درصد سختی آن افزایش پیدا کند و مقاومت آن در برابر خرابی شیارشدگی نسبت به قیر اولیه افزایش پیدا کند.

-افزایش دما در قیر خالص پیرشده در شرایط RTFO باعث کاهش پارامتر شیارشدگی و کاهش مقاومت قیر در برابر این خرابی شده است. از طرفی افزایش فرکانس در قیر خالص پیرشده در شرایط RTFO باعث افزایش پارامتر شیارشدگی و افزایش مقاومت قیر در برابر این خرابی شده و افزایش همزمان فرکانس و دما در قیر خالص پیرشده در شرایط RTFO سبب افزایش پارامتر شیارشدگی شده است. اما با افزایش دما، پارامتر شیارافتادگی کم شد که نشان‌دهنده کاهش مقاومت قیر در برابر این خرابی در دماهای بالا در قیر خالص بوده است.

یکی از روش‌های افزایش مقاومت قیر در برابر خرابی شیارافتادگی، استفاده از مواد افزودنی است. استفاده از افزودنی‌های ضایعاتی مناسب، علاوه بر جلوگیری از انباشته شدن این مواد در محیط‌زیست، می‌تواند باعث افزایش کارایی قیر نیز گردد. در پژوهش حاضر از خاکستر پسماند زغال‌سنگ در قیر استفاده شد. همچنین پس از افزودن آن و بررسی خواص رئولوژیکی قیر حاصل، مشخص شد که افزودن این فیلر باعث افزایش مقاومت قیر در برابر خرابی شیارشدگی شده است. همان‌طور که اشاره شد، خاکستر پسماند زغال‌سنگ سبب ارتقاء دمای بالای عملکردی قیر شده است. به‌طوری که بهترین عملکرد قیر در برابر خرابی شیارافتادگی در ۶ درصد فیلر تعیین شد. از مهم‌ترین نتایجی که از این پژوهش بدست‌آمده است، به مواردی در ادامه می‌توان اشاره نمود.

مقدار پارامتر شیارشدگی در دمای بالا در بین دو ماده‌ی دیگر بود.

معیار شارپ در تمامی دماها و فرکانس‌ها در قیر حاوی فیلر برآورده شده است. ولی در قیر خالص در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد و فرکانس ۲/۲۳ هرتز این معیار برآورده نشده و پارامتر  $G^*/\sin\delta$  کوچک‌تر از ۲/۲ کیلو پاسکال شده است. بنابراین در این دما و فرکانس در قیر خالص شیارشدگی اتفاق می‌افتد.

#### ۵- نتیجه‌گیری

در نهایت بر اساس آزمایش‌های انجام‌شده، مشخص گردید که افزودن خاکستر پسماند زغال‌سنگ به قیر سبب افزایش قابل‌توجه پارامتر شیارافتادگی و مقاومت در برابر این خرابی نسبت به قیر خالص شده است. همچنین می‌توان از این فیلر در مناطقی که دمای محیط بالا بوده، به‌خصوص در مکان‌هایی که روسازی‌ها دارای شیب طولی می‌باشند، برای جلوگیری از ایجاد خرابی شیارشدگی و افزایش مقاومت قیر در برابر تنش‌های وارده، استفاده کرد.

افزودن خاکستر پسماند زغال‌سنگ به میزان ۳ و ۶ درصد به قیر در شرایط RTFO باعث افزایش قابل‌توجه پارامتر شیارشدگی در دماهای بالا نسبت به قیر خالص شده است. افزایش دما باعث کاهش پارامتر شیارشدگی قیر حاوی فیلر در شرایط RTFO شده است. این کاهش برای قیر حاوی ۳ درصد فیلر به گونه‌ای بوده که در دمای ۵۲ و ۵۸ درجه سانتی‌گراد عملکرد بهتری نسبت به قیر حاوی ۶ درصد فیلر داشته است. ولی وقتی دما افزایش پیدا کرده و به ۶۴ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد رسید، این قیر حاوی ۶ درصد فیلر بوده که پارامتر شیارشدگی و مقاومت را از خود نشان داد. از طرفی افزایش فرکانس باعث افزایش پارامتر شیارشدگی قیر حاوی فیلر در شرایط RTFO در دماهای مورد آزمایش شده است، به‌طوری که قیر حاوی ۶ درصد فیلر دارای بیشترین مقدار پارامتر شیارشدگی و مقاومت در بین سه نمونه را دارا بوده و در نهایت افزایش هم‌زمان فرکانس و دمای حاوی ۳ و ۶ درصد فیلر در شرایط RTFO به گونه‌ای صورت پذیرفت که افزایش پارامتر شیارشدگی و مقاومت در هر سه نمونه را به همراه داشت. اما همان‌طور که دما افزایش پیدا کرد، این مقدار کاهش یافت، به‌طوری که قیر حاوی ۶ درصد فیلر دارای بیشترین

#### ۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Viscous
- 2- Rutting
- 3- Alligator Cracking
- 4- Coal Waste
- 5- Coal Ash
- 6- Dynamic Shear Rheometer (DSR)
- 7- Complex Modulus
- 8- Phase Angle
- 9- Stone Matrix Asphalt (SMA)
- 10- Ethylene-Vinyl Acetate (EVA)
- 11- Deurex
- 12- Frequency Sweep
- 13- Rolling Thin Film Oven (RTFO)

#### ۷- مراجع

- Bahuguna, S. (2004). Permanent deformation and rate effects in asphalt concrete, *Constitutive modeling and numerical implementation*.
- Choubdar, A., Farajollahi, A., & Ameli, A. (2022). Laboratory Evaluation of the Effect of Nano Silica on High Temperature Properties of Binder. *Journal*

- Adnan, A. M., Lü, C., Luo, X., & Wang, J. (2021). High-temperature rheological characteristics of asphalt binder incorporated with graphene oxide and predicting its rutting potential using response surface method. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(11), 04021331.

- permanent deformation test under field conditions. *Construction and Building Materials*, 61, 241-251.
- Modarres, A., & Ayar, P. (2014). Coal waste application in recycled asphalt mixtures with bitumen emulsion. *Journal of cleaner production*, 83, 263-272.
- Modarres, A., & Rahmzadeh, M. (2014). Application of coal waste powder as filler in hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 66, 476-483.
- Niki Rashidi, M. (2008). Asphalt from production to distribution. *Jihad Academic Publishing Organization*, 31-33.
- Pardhan, M. M. (1995). Permanent deformation characteristics of asphalt-aggregate mixture using varied material and modeling procedure with Marshall method. *Montana University*.
- Sheng, Y., Zhang, B., Yan, Y., Chen, H., Xiong, R., & Geng, J. (2017). Effects of phosphorus slag powder and polyester fiber on performance characteristics of asphalt binders and resultant mixtures. *Construction and Building Materials*, 141, 289-295.
- Shyaa, A. S., & Abd Rahma, I. D. R. (2022). asphalt pavement rutting distress and affects on traffics safety. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 10, 35-39.
- Transportation Research Institute. (2007). The use of polymer in improving the properties of bitumen and asphalt mixtures.
- Tong, J., Ma, T., Shen, K., Zhang, H., & Wu, S. (2022). A criterion of asphalt pavement rutting based on the thermal-visco-elastic-plastic model. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(4), 1134-1144.
- Xiong, R., Wang, L., Yang, X., Yang, F., Sheng, Y., Guan, B., & Chen, H. (2018). Experimental investigation on related properties of asphalt mastic with activated coal gangue as alternative filler. *International Journal of Pavement Research and Technology*.
- of Transportation Research*, 19(1), 283-298. doi: 10.22034/tri.2022.143259
- Farajollahi, A., Ameli, A., & Poorheydari Mamaghani, F. (2022). Experimental Evaluation of the Effect of Ethylene Vinyl Acetate-Montmorillonite Nanocomposite on Fatigue and Rutting Behavior of Asphalt Mixture. *Journal of Transportation Research*, 19(4), 283-295. doi: 10.22034/tri.2022.159619
- Gao, J., Yan, K., He, W., Yang, S., & You, L. (2018). High temperature performance of asphalt modified with Sasobit and Deurex. *Construction and Building Materials*, 164, 783-791.
- Hassanzadeh Khabbaz, E. (2020). Laboratory Evaluation of the Effect of Nano Clay and Polymer on Rheological Behaviour of Binder and Rutting Performance of Stone Matrix Asphalt Mixtures. *Journal of Transportation Research*, 17(2), 151-168.
- Hosseini, A. S., Hajikarimi, P., Gandomi, M., Nejad, F. M., & Gandomi, A. H. (2021). Genetic programming to formulate viscoelastic behavior of modified asphalt binder. *Construction and Building Materials*, 286, 122954.
- Jia, Y., Wang, S., Peng, J., Gao, Y., Liu, M., & Zhou, W. (2021). Characterization of rutting on asphalt pavement in terms of transverse profile shapes based on LTPP data. *Construction and Building Materials*, 269, 121230.
- Kakade, V. B., Reddy, M. A., & Reddy, K. S. (2018). Rutting performance of hydrated lime modified bituminous mixes. *Construction and Building Materials*, 186, 1-10.
- Kavossi, A. and Bakhtiari, J. (2012), "Laboratory investigation of the effect of hydrated lime on the liquefaction of asphalt mixtures. Proceedings of the 7th National Congress of Civil Engineering, *Shahid Nighbakht Engineering College, Zahedan*, Iran, 18 and 17 April.
- Li, Q., Ni, F., Gao, L., Yuan, Q., & Xiao, Y. (2014). Evaluating the rutting resistance of asphalt mixtures using an advanced repeated load

# Evaluation of Rutting Resistance of Bitumen Containing Coal Waste Ash Using Dynamic Shear Rheometer Test

*Hassan Divandari, Civil Engineering Department, Faculty of Civil Engineering and Land Resource, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.*

*Pouyan Nazarian, Ph.D., Student, Department of Civil Engineering, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran.*

*Mohammad Amin Youseftabar Miri, M.Sc., Department of Civil Engineering, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran.*

*E-mail: ha.divandari@iau.ac.ir*

Received: February 2024- Accepted: June 2024

## **ABSTRACT**

Pavements are the national capital of countries that annually attract a bulk of the relevant organizations budgets for their designing, constructing, repairing and maintaining. The Rutting is one of the structural failures that is seen in the groove in the direction of the vehicle's wheel. The development of ruts causes cracks, especially alligator cracks, and ultimately leads to the general rupture of the pavement. The bitumen used in asphalt mixtures must have sufficient hardness to deal with the phenomenon of rutting, and on the other hand, the necessary flexibility to avoid thermal cracks at low temperatures. Considering that normal bitumens are not able to provide such properties, it is necessary to use modifiers to improve the functional properties of bitumens. Among the materials that can be used and tested as a filler in bitumen is coal waste ash, which can be seen in large quantities around coal mines. The main goal of the current research was to investigate the rutting resistance of bitumen containing coal waste ash using a dynamic shear rheometer. In this research, bitumen 60-70 was used in pure form and also contained 3% and 6% coal waste ash, and the resistance of the mixture against rutting failure was measured using a dynamic shear rheometer at temperatures of (52°C, 58°C, 64°C and 70°C), and at frequencies of 2.23 to 100 Hz were examined and tested. The results showed that the use of coal waste ash at the rate of 3 and 6% significantly increased the resistance of bitumen against rutting damage at high temperatures compared to pure bitumen. In this way, with the optimal use of this material in the asphalt mixture, in addition to reducing the depth of rutting, the accumulation of these waste materials in the environment was prevented.

**Keywords:** Coal Waste Ash, Dynamic Shear Rheometer, Rutting, Bitumen