

## امکان‌سنجی استفاده از مواد بیوآسفالت در قیر از نظر رئولوژیک و درجه عملکردی

منصور فخری\*، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران  
محمدامین نوروزی، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه

نصیرالدین طوسی، تهران

فاطمه ذوقی، دانش‌آموخته کارشناسی، دانشکده شیمی، دانشگاه سراسری کاشان

Email: fakhri@kntu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۰۷ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۱۳

### چکیده

با پیشرفت‌های اجتماعی و اقتصادی صورت گرفته و همچنین راه‌های جدیدی که هر ساله احداث می‌شوند، نیاز به یک روسازی هموار و مقاوم که عمر خدمت‌دهی بیشتری داشته باشد کاملاً حس می‌شود. علاوه بر این، بر کسی پوشیده نیست که استفاده از مخلوط آسفالتی سنتی، به دلیل استفاده از قیر، که یک منبع تجدیدناپذیر است، مشکلات زیست‌محیطی بسیاری ایجاد می‌کند. از این رو، چندین سال است که محققین به دنبال یافتن راه‌حلی برای بهبود عملکرد روسازی و یافتن جایگزینی مناسب برای قیر هستند. یکی از این مواد جایگزین از منابع زیستی به دست می‌آید که اصطلاحاً به آن بیوآسفالت گفته می‌شود. در این پژوهش، امکان استفاده از لیگنین و روغن موتور ضایعاتی، که از مواد بیوآسفالت هستند، در قیر، جهت بهبود خواص آن بررسی شد. نمونه‌های مورد آزمایش شامل قیر خالص PG64-22 (به‌عنوان شاهد)، نمونه‌های حاوی ۵ و ۱۰ درصد لیگنین، نمونه‌های حاوی ۴ درصد روغن موتور ضایعاتی و هم‌منظور نمونه‌های دارای هر دو افزودنی می‌باشند. آزمایش‌های سوپریو شامل DSR, RV, PAV, RTFO, BBR و MSCR به طور کامل روی تمامی نمونه‌ها در دماهای مختلف انجام شد تا نمونه‌ها از نظر رئولوژی به طور کامل بررسی شوند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزودن لیگنین یا روغن موتور ضایعاتی و یا ترکیبی از هر دو، علاوه بر آنکه از مواد ضایعاتی در قیر استفاده می‌شود و از نظر زیست‌محیطی و اقتصادی بسیار مفید هستند، می‌توانند خواص رئولوژیک قیر را نیز بهبود دهند.

واژه‌های کلیدی: بیوآسفالت، قیر، لیگنین، روغن موتور ضایعاتی، PG

## ۱. مقدمه

که به وفور در طبیعت یافت می‌شود و بعد از سلولز، فراوان‌ترین پلیمر طبیعی در جهان است (موویا کِسادا و همکاران، ۲۰۱۷). چوب درختان، غلوفه و بسیاری از گیاهان کشاورزی دارای مقادیر بسیار لیگنین در دیواره‌های سلولی خود بوده و یک منبع انرژی تجدیدپذیر فراوان هستند (بن ایوو و همکاران، ۲۰۱۶). این ماده توسط کندول در سال ۱۸۱۹ میلادی معرفی گردید و اسم آن از کلمه لاتین لیگنیوم گرفته شده است که به معنی چوب می‌باشد. عامل اصلی ایجاد رنگ قهوه‌ای در ساختار چوب، لیگنین است. لیگنین به مقدار زیاد در پسماند صنعت کاغذسازی (لیکور سیاه<sup>۴</sup>) موجود می‌باشد که اگر به شیوه درست دفع نگردد باعث به وجود آمدن مشکلات زیست‌محیطی فراوان می‌شود. به طور سنتی، از لیگنین در کاربردهایی مانند افزودنی بتن، ماده چسباننده، تعدیل‌کننده ویسکوزیته برای گل‌های حفاری چاه نفت، کنترل گرد و خاک جاده‌ها، عامل پراکنده‌ساز و همین‌طور ماده اولیه برای تولید مواد شیمیایی مختلف، مثل وانیلین، استفاده می‌شود (بن ایوو و همکاران، ۲۰۱۶). با این وجود، مقدار لیگنین تولیدی به راحتی این بازارها را اشباع می‌کند و نیاز به یافتن استفاده‌های جدید برای آن به شدت احساس می‌شود.

لیکور سیاه، محصول ثانویه فرایند کرافت در صنعت کاغذسازی است که در هنگام تبدیل چوب به خمیر کاغذ از فرایند خارج شده است تا سلولز موجود در چوب آزاد شود. لیکور جمع‌آوری شده بعد از مرحله شستشو در فرایند خمیرسازی کاغذ، لیکور سیاه نام دارد (کیان و همکاران، ۲۰۱۷؛ گومز فرناندز و همکاران، ۲۰۱۷). در صنعت کاغذسازی، سالانه مقدار زیادی لیگنین (بیش از ۵۰ میلیون تن) به عنوان محصول ثانویه تولید می‌شود که به شکل آلاینده‌هایی با نام لیکور سیاه وارد طبیعت شده یا به عنوان سوخت سوزانده می‌شود (بیرمن، ۱۹۹۳).

گرچه آسفالت‌های مرسوم و سنتی مزیت‌های فراوانی در ساخت روسازی دارند، اما مشکلاتی نیز به وجود می‌آورند. این مسئله باعث شده است که از سال‌ها قبل محققین روی جنبه‌های مختلف قیر و آسفالت کار کنند و برای بهبود خواص و ویژگی‌های آن تلاش نمایند تا به مصالحی مقاوم‌تر، بادوام‌تر و سازگارتر با محیط‌زیست برای ساخت روسازی راه‌ها دست یابند. در تحقیق پیش رو، سعی شده است که راهکاری ارائه شود که اولاً، وضعیت قیر و روسازی‌های آسفالتی بهبود یابد و ثانیاً، اشکالات محیط‌زیستی استفاده از قیر و مخلوط آسفالتی را تا حدی برطرف کند. برای این منظور، از لیگنین<sup>۱</sup> و روغن موتور ضایعاتی<sup>۲</sup> (WEO) به عنوان افزودنی به قیر استفاده شده که هر دو از دسته مواد بیوآسفالت<sup>۳</sup> هستند. بیوآسفالت به مواد جایگزین قیر گفته می‌شود که از منابع غیرنفتی به دست می‌آید و یک ماده تجدیدپذیر است. در حقیقت، این مواد از زیست‌توده که یک منبع تجدیدپذیر است و محققین آینده سوخت را در آن می‌بینند، به دست می‌آید (مات و همکاران، ۲۰۱۵؛ ازاهر و همکاران، ۲۰۱۶؛ هیل و همکاران، ۲۰۱۸). مواد زیستی، به دلیل تغییر ماهیت CO<sub>2</sub> به طور طبیعی یک سوخت پاک محسوب می‌شوند (شو<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۴). در سال‌های اخیر، به دلیل افزایش بی‌سابقه قیمت نفت، علاقه به استفاده از مواد زیستی در روسازی رو به افزایش است. اغلب مواد زیستی ضایعاتی احتیاج به بازیافت و صرف هزینه دارند و همین‌طور با افزایش هر ساله بارهای ترافیکی و نیاز به ساخت راه‌های جدید و نگهداری روسازی‌های موجود، استفاده از یک فناوری پاک برای این منظور به شدت مورد استقبال قرار می‌گیرد (موویا کِسادا و همکاران، ۲۰۱۷). لیگنین یک پلیمر طبیعی است

4- Xue

5- Black liquor

1- Lignin

2- Waste engine oil

3- Bio-asphalt

گزارش شد که همچنان به خوبی آسفالت‌های معمول در حال سرویس‌دهی است. اما اولین استفاده رسمی از بیوآسفالت در روسازی‌های انعطاف‌پذیر، به سال ۲۰۰۷ برمی‌گردد، که توسط کمپانی شل، دو جاده در نروژ با استفاده از قیر اصلاح شده با روغن‌های گیاهی ساخته شد (سو و همکاران، ۲۰۱۸). در فلسطین اشغالی، یک شرکت از سال ۲۰۰۳ در تعمیر و ساخت برخی جاده‌ها از موادی مانند روغن گیاهی، موم و رزین استفاده کرده‌اند که تاکنون نتایج رضایت‌بخشی داشته است. در سال ۲۰۱۱، یک مسیر دوچرخه به عرض ۳ متر در ایالت آیووا توسط "ویلیامز" و دانشگاه ایالتی آیووا با استفاده از قیر حاوی ۵٪ وزنی بیوویل گرفته شده از چوب بلوط ساخته شد (سو و همکاران، ۲۰۱۸). از نوامبر ۲۰۱۴، دانشگاه و مرکز تحقیقات Wageningen در هلند یک پروژه را شروع کردند که از لیگنین به عنوان ماده بیوبیندر در ساخت جاده‌ها استفاده می‌کند. وضعیت این روسازی‌ها تا کنون بسیار خوب بوده و تمامی ضوابط عملکردی را ارضا کرده‌اند، اما عملکرد درازمدت این روسازی‌ها باید بیشتر مورد بررسی قرار گیرد (سو و همکاران، ۲۰۱۸).

در این پژوهش، از دو افزودنی بیوآسفالت، یعنی لیگنین و روغن موتور ضایعاتی، استفاده شده که در ادامه، مطالعات انجام گرفته روی این دو ماده آورده شده است. وانگ و دروکی (۲۰۱۳) مقادیر ۵ و ۱۰ درصد لیگنین را به قیر اضافه کردند. نتایج نشان داد که افزودن لیگنین باعث افزایش ویسکوزیته و مقاومت در برابر شیارشدگی می‌شود. همچنین، نتایج آزمایش BBR نشان داد که اضافه کردن لیگنین، تغییر چشم‌گیری در مقاومت در برابر ترک‌های برودتی ایجاد نمی‌کند. نورگی و همکاران (۲۰۲۰) به این نتیجه رسیدند که با افزودن لیگنین، چسبندگی و سختی قیر افزایش پیدا می‌کند. آزمایش DSR نشان داد که افزودن لیگنین مقاومت را در برابر شیارشدگی افزایش می‌دهد، در حالی که نتایج آزمایش LAS نشان داد که لیگنین مقاومت در برابر ترک‌های

لیگنین موجود در لیکورسیاه می‌تواند به راحتی استخراج شود و به صورت جداگانه از آن استفاده گردد.

با افزایش تعداد روزافزون وسایل نقلیه، مصرف روغن موتور در جهان روز به روز در حال افزایش است (پلیتلی و همکاران، ۲۰۱۷). تخمین زده شده که هر ساله ۴۵ میلیون تن روغن موتور ضایعاتی در جهان تولید می‌شود و تنها ۴۰ درصد این روغن به درستی جمع‌آوری و دفع می‌شود و فقط ۸ درصد آن بازیافت می‌گردد (ماسیراس و همکاران، ۲۰۱۷). به گفته دبیر کل انجمن پالایشگاه‌های روغن سازی، در کشور ما سالانه ۵۰۰ تا ۵۵۰ هزار تن روغن موتور مصرف می‌شود که از این مقدار سهم زیادی بدون توجه به ضوابط محیط‌زیستی دفع می‌شود و وارد طبیعت می‌گردد. لذا، اگر روغن‌های موتور مصرف شده به درستی مدیریت نگردد، محیط‌زیست و سلامت انسان‌ها را تهدید می‌کند. بنابراین، دفع روغن موتور ضایعاتی به مشکل محیط‌زیستی جدی در سراسر جهان تبدیل شده است. از این رو، بازیافت و استفاده مجدد از این مصالح ضایعاتی گزینه مناسبی برای مقابله با این معضل می‌باشد. در همین راستا، مهندسان روسازی بر آن شده‌اند که از روغن‌های ضایعاتی به عنوان افزودنی قیر استفاده کنند. روغن موتور دارای ترکیبات و ساختار شیمیایی مشابه با قیر است، چرا که هم روغن موتور و هم قیر از پالایش نفت به دست می‌آیند. تحقیقات نشان داده که روغن موتور ضایعاتی می‌تواند به عنوان افزودنی مناسب برای قیر به کار رود (کوراشی و سوامی، ۲۰۱۸).

## ۲. پیشینه پژوهش

استفاده از مواد بیوآسفالت در قیر به سال ۲۰۰۲ برمی‌گردد. اولین تجربه اجرا شده بیوآسفالت در سال ۲۰۰۲ در اوهایو بوده که به صورت آزمایشی برای روسازی چند پارکینگ انجام شد که در آن از ضایعات روغن‌های گیاهی استفاده شده بود. بعد از پنج سال،

می‌دهد. ویلانوا و همکاران (۲۰۰۸) نیز دریافتند که افزودن روغن باعث نرم شدن قیر و افزایش بازه درجه عملکردی قیر می‌شود. کیو و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی قیرهای پیر شده که با روغن اصلاح شده پرداختند و به این نتیجه رسیدند که افزودن روغن موتور ضایعاتی می‌تواند عملکرد آن‌ها را به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود بخشد. ددن و یو (۲۰۱۴) نشان دادند که افزودن روغن به RAP می‌تواند سختی قیر را متعادل کند و به عنوان یک جوان‌ساز عمل نماید. همچنین، فرناندس و همکاران (۲۰۱۹) گزارش دادند که افزودن روغن موتور ضایعاتی در قیر می‌تواند عمر خستگی مخلوط آسفالتی را افزایش دهد.

با وجود مطالعات زیادی که در دهه اخیر در مورد استفاده از روغن موتور و همینطور لیگنین در قیر صورت گرفته است، اما پژوهش‌چندانی در زمینه استفاده همزمان از روغن به عنوان یک افزودنی روان‌کننده، در کنار افزودنی دیگری به نام لیگنین که خاصیت سخت‌کنندگی دارد و در دمای زیاد عملکرد مثبتی دارد، انجام نشده است. بنابراین، هدف از انجام این پژوهش، بررسی استفاده از لیگنین و روغن موتور ضایعاتی در قیر به منظور بهبود خواص رئولوژیک و بررسی درجه عملکردی آن است. از این طریق می‌توان مواد ضایعاتی و تجدیدپذیر را جایگزین قیر کرد تا از مصرف قیر در مخلوط‌های آسفالتی کاسته شود و به این ترتیب مشکلات زیست‌محیطی مخلوط‌های آسفالتی مرسوم کم گردد.

### ۳. روش آزمایش

#### ۳-۱. مواد و مصالح

به دلیل اینکه در کشور ما در بسیاری از پروژه‌های راه-سازی از قیر ۷۰-۶۰ که تقریباً معادل آن در سیستم عملکردی شارپ، PG64-22 است، استفاده می‌شود، در این پژوهش نیز از قیر PG64-22 تولید شده در پالایشگاه

خستگی را به مقدار کمی کاهش می‌دهد. آزمایش MSCR نیز عملکرد قیر حاوی لیگنین را بهتر از قیر معمولی نشان داد. همچنین، چسبندگی قیر حاوی لیگنین به سنگدانه‌ها در مقایسه با قیر معمولی بهتر توصیف شده است (نورگی و همکاران، ۲۰۲۰). پرز و همکاران (۲۰۱۹) پسماند حاوی لیگنین که از صنعت کاغذسازی به دست آمده را به مقدار ۵، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ درصد در قیر امتحان کردند و نشان دادند که قیر حاوی ۲۰ درصد پسماند صنعتی می‌تواند استفاده شود. گائو و همکاران (۲۰۲۰) تأثیر افزودن لیگنین در مشخصات رئولوژیک قیر را بررسی کردند. آزمایش‌های سوپریو نشان داد که افزودن لیگنین باعث افزایش ویسکوزیته در سرعت‌های دورانی مختلف می‌شود. افزودن لیگنین، خاصیت الاستیک قیر را افزایش می‌دهد و مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی را زیاد می‌کند. با وجود نتایج مثبتی که در استفاده از لیگنین در قیر به دست آمده، اما هنوز اطلاعات کاملی در خصوص عملکرد لیگنین در برابر خستگی و ترک‌های برودتی در دسترس نیست. همچنین، قابلیت استفاده از لیگنین به عنوان یک عامل سخت‌کننده، در کنار ماده‌ای دیگر که قابلیت روان‌کنندگی داشته باشد، مانند روغن موتور ضایعاتی، مورد بررسی قرار نگرفته است.

لیو و همکاران (۲۰۱۸) افزودن مقادیر ۴ و ۸ درصد وزنی WEO به قیر را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج رئولوژیک نمونه‌ها نشان داد که افزودن روغن موتور به قیر، ویسکوزیته را به شدت کم می‌کند و دمای تراکم و اختلاط را پایین می‌آورد. همچنین، مقادیر مدول برشی مختلط ( $G^*$ ) را کاهش و زاویه فازی ( $\delta$ ) را افزایش می‌دهد. افزودن WEO تأثیر منفی در عملکرد آسفالت در برابر شیارشدگی و عملکرد مثبت در برابر ترک‌های خستگی دارد. شوکت و یو (۲۰۱۸) دریافتند که افزودن WEO مقاومت در برابر ترک‌های برودتی را افزایش می‌دهد؛ اما مقاومت در برابر شیارشدگی را کاهش

برای شناخت بهتر لیگنین استخراج شده و اطمینان از خلوص آن، درصد عناصر کربن، هیدروژن، نیتروژن، گوگرد و اکسیژن به کمک آزمون CHNS اندازه‌گیری شد که نتایج آن در جدول ۲ مشاهده می‌شود. همچنین، pH و درصد رطوبت لیگنین نیز اندازه‌گیری شد. روغن مورد استفاده در این تحقیق، مستقیماً از یکی از مراکز تعویض روغن در شهر تهران تهیه شد و آنالیز CHNS روی آن انجام گرفت که نتایج در جدول ۳ قابل مشاهده می‌باشد. همچنین، وزن مخصوص، ویسکوزیته و درجه اشتعال آن نیز اندازه‌گیری شد.

نفت پاسارگاد استفاده شده است. مشخصات قیر مصرفی در این مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است. لیگنین به‌کار رفته در این مطالعه، لیگنین کرافت استخراج شده از لیکور سیاه است. لیکور سیاه از پساب کارخانه صنایع چوب و کاغذ ایران (چوکا) در استان مازندران تهیه شده است. لیکور سیاه چوکا به صورت مایع بوده و مقادیر زیادی لیگنین در آن وجود دارد. برای استخراج لیگنین از روش رسوب‌سازی با اسید (لین و دنس، ۱۹۹۲) استفاده شد. لیگنین حاصل، پودری به رنگ قهوه‌ای تیره است که جهت اختلاط بهتر از الک شماره ۱۰۰ رد شد (شکل ۱).

جدول ۱. مشخصات قیر خالص استفاده شده در این پژوهش

پارامترها	واحد	استاندارد	حد مجاز	نتایج
ویسکوزیته دورانی در ۱۳۵ °C	Pa.s	AASHTO T316	کمتر از ۳	۰/۳۴۰
افت وزنی	درصد	AASHTO T240	کمتر از ۱	۰/۰۳
درجه اشتعال	°C	AASHTO T48	بیشتر از ۲۳۰	۲۹۵
درجه نفوذ	mm	ASTM D5	۶۰-۷۰	۶۵
نقطه نرمی	°C	ASTM D36	-	۵۰
کشش‌پذیری در ۲۵ °C	Cm	ASTM D113	بیشتر از ۱۰۰	۱۰۵



شکل ۱. لیگنین به‌دست آمده و عبوری از الک ۱۰۰

جدول ۲. درصد عناصر، رطوبت و pH لیگنین به‌کار رفته در این پژوهش

پارامتر	کربن (%)	هیدروژن (%)	نیتروژن (%)	گوگرد (%)	اکسیژن (%)	خاکستر (%)	رطوبت (%)	pH
نتایج	۶۰/۱۵	۵/۵۲	۱/۰۳	۰/۸۴	۲۸/۶۱	۳/۸۵	۵/۵	۸/۵

جدول ۳. درصد عناصر و سایر ویژگی‌های WEO به کار رفته در این پژوهش

پارامتر	نتایج
کربن (%)	۱۵/۹
هیدروژن (%)	۰
نیتروژن (%)	۲۸/۷
گوگرد (%)	۰/۳
اکسیژن (%)	۵۵/۱
وزن مخصوص (gr/cm <sup>3</sup> )	۰/۸۶
درجه اشتعال °C	۲۰۰
ویسکوزیته کینماتیک (cp) در ۴۰ درجه	۹۵

### ۳-۲. آز مایش های سوپریو و تعیین درجه

#### عملکردی

آزمایش‌های قیرها اکثراً آزمایش‌های تجربی بوده‌اند که بر پایه تجربه نیم قرن اخیر تدوین گشته‌اند و تا حدودی گویای خواص قیر هستند؛ اما اغلب آن‌ها با شرایط راه هم‌خوانی ندارند. کاستی درجه‌بندی قیرها بر اساس درجه نفوذ و ویسکوزیته در زیر آمده که باعث روی کار آمدن آزمایش‌های شارپ شده است: ۱- عدم اندازه‌گیری خصوصیات قیر در دماهای کم، ۲- عدم تطابق شرایط فیزیکی آزمایش‌ها با شرایط واقعی راه، ۳- عدم تناسب آزمایش‌ها برای اندازه‌گیری خصوصیات قیر در دماهای زیاد و ۴- عدم پیش‌بینی چگونگی سخت شدن قیر در طول زمان.

یکی از نکات بارز آزمایش‌های سوپریو، تأکید بر انجام آزمایش‌ها در حالت‌هایی است که مراحل حساس و بحرانی دوره عمر قیر را شبیه‌سازی می‌کند. این مراحل بحرانی شامل هنگام حمل، اختلاط و ساخت (اجرا) و پس از زمان زیادی از اجرا (دوره خدمت‌دهی) است. پیرشدگی کوتاه‌مدت توسط<sup>۱</sup> RTFO شبیه‌سازی می‌شود و پیرشدگی بلندمدت توسط PAV<sup>۲</sup>. آزمایش‌های مختلف سوپریو در این سه مرحله انجام می‌شود: پیر نشده (قبل

نمونه‌های مورد آزمایش شامل قیر خالص PG64-22، نمونه حاوی ۵ درصد وزنی لیگنین (L5)، نمونه حاوی ۱۰ درصد لیگنین (L10)، نمونه حاوی ۴ درصد روغن موتور (W4)، نمونه حاوی ۵ درصد لیگنین و ۴ درصد روغن موتور (L5W4) و نمونه حاوی ۱۰ درصد لیگنین و ۴ درصد روغن موتور (L10W4) است. انتخاب این درصدها با توجه به مطالعات پیشین بوده که برای هر کدام از این دو افزودنی به صورت جداگانه انجام گرفته و مقادیر پیشنهادی این مطالعات اکثراً در این بازه قرار داشته است. اختلاط به وسیله دستگاه مخلوط‌کن برش زیاد، محصول شرکت سیلورسون، انجام گرفت. نمونه‌های L5 و L10 با سرعت ۵۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت یک ساعت و در دمای ۱۶۰ درجه سلسیوس با قیر مخلوط شدند تا مخلوط کاملاً همگنی به دست آید. نمونه‌های حاوی WEO به منظور جلوگیری از پیرشدگی ناخواسته مدت زمان کمتری (۱۵ دقیقه) و در دمای ۱۴۰ درجه مخلوط شدند. همچنین، برای نمونه‌های L5W4 و L10W4 بعد از ۴۵ دقیقه اختلاط لیگنین با قیر، WEO به مخلوط اضافه شد و ۱۵ دقیقه نیز به این صورت اختلاط نمونه ادامه پیدا کرد.

<sup>2</sup> - Pressure Aging Vessel

<sup>1</sup> - Rolling Thin Film Oven

سوپرپیو، به منظور تعیین استانداردهای مؤثر برای قیر، منجر به آزمایش‌های زیر شده است.

### ۳-۳. آزمایش‌های RTFO و PAV برای تولید

#### نمونه‌های پیر شده

آزمایش لعاب نازک چرخشی (RTFO) برای شبیه‌سازی پیرشدگی کوتاه‌مدت نمونه‌ها طبق استاندارد AASHTO T240 و آزمایش محفظه تسریع پیری (PAV) برای شبیه‌سازی پیرشدگی بلندمدت نمونه‌ها مطابق استاندارد AASHTO R28 انجام شد (شکل ۲).



شکل ۲. سمت راست: دستگاه RTFO و سمت چپ: دستگاه PAV

و تأثیر هر افزودنی به صورت کامل بررسی شود. برای این آزمایش، هر نمونه به قدری حرارت داده شد تا روان شود. پس از روان شدن نمونه، ۱۰ گرم آن را در درون محفظه دستگاه ریخته و برای رسیدن به حالت تعادل دما در دمای مورد نظر، حدود ۱۵ دقیقه صبر کردیم. پس از آنکه دما به حالت ثابت رسید، تعداد سه مشاهده برای ویسکوزیته در فواصل یک دقیقه‌ای انجام شد و میانگین آن‌ها ثبت گردید.

### ۳-۵. آزمایش رئومتر برش دینامیک (DSR)

طبق استاندارد AASHTO T315، آزمایش DSR در پنج دمای ۴۶، ۵۲، ۵۸، ۶۴، ۷۰ و ۷۶ درجه برای نمونه‌های پیر نشده و پیر شده RTFO انجام شد تا اطلاعات کاملی

از (RTFO)، پیرشدگی کوتاه‌مدت (بعد از RTFO) و پیرشدگی بلندمدت (بعد از PAV). آزمایش RV<sup>۱</sup> قبل از پیرشدگی، آزمایش DSR<sup>۲</sup> هم قبل و هم بعد از RTFO و آزمایش BBR بعد از PAV انجام می‌گیرد.

درجه‌بندی عملکردی سوپرپیو براساس دو دما صورت می‌گیرد، دمای زیاد و دمای کم. دمای زیاد بیانگر بیشترین دمای هفت روزه روسازی است که در طول دوره طرح به خود می‌بیند. دمای کم بیانگر کمترین دمای یک روز روسازی است که در طول دوره طرح تجربه می‌کند. بر اساس موارد ذکر شده، تحقیقات شارپ با نام

### ۳-۴. آزمایش ویسکومتر چرخشی (RV)

طبق استاندارد ASTM D4402، آزمایش ویسکومتر چرخشی برای اندازه‌گیری ویسکوزیته نمونه‌ها در دماهای مختلف انجام شد. ویسکوزیته چرخشی با اندازه‌گیری تنش پیچشی مورد نیاز برای ثابت نگه داشتن سرعت چرخش همزن استوانه‌ای در دمای ثابت تعیین می‌شود. مقدار تنش پیچشی مورد نیاز مستقیماً قابل تبدیل به ویسکوزیته نمونه قیر می‌باشد. حداکثر ویسکوزیته برای پمپاژ قیر بدون خطر بایستی ۳ پاسکال-ثانیه یا ۳۰۰۰ سانتی‌پواز (Cp) در دمای ۱۳۵ درجه سلسیوس باشد.

این آزمایش در پنج دمای ۱۱۰، ۱۲۰، ۱۳۵، ۱۵۰ و ۱۶۵ درجه سلسیوس انجام گرفت تا تغییرات ویسکوزیته

<sup>2</sup>- Dynamic Shear Rheometer

<sup>1</sup>- Rotational Viscometer

خستگی را مورد ارزیابی قرار دهد. مقدار  $\delta \sin G^*$  بایستی کمتر از ۵۰۰۰ کیلو پاسکال باشد تا در برابر ترک‌های خستگی در دمای میانی مقاومت لازم را از خود نشان دهد. این به معنای آن است که با کاهش مقدار  $G^*$ ، سختی قیر کاهش یافته و قابلیت تغییر شکل آن در اثر تنش‌های وارده افزایش می‌یابد و با کاهش مقدار  $\delta$  به دلیل افزایش خصوصیات الاستیک، قیر توانایی بازگشت به شرایط اولیه خود را با کمترین استهلاك انرژی داراست. لازم به ذکر است که دمای میانی در گزارش درجه عملکردی آورده نمی‌شود و تنها برای ارزیابی مقاومت نمونه در برابر خستگی سنجیده می‌شود.

سرعت زاویه‌ای طبق استاندارد سوپر پیو ۱۰ رادیان بر ثانیه و درصد کرنش برای نمونه‌های پیر نشده ۱۲ درصد، برای نمونه‌های پیر شده RTFO، ۱۰ درصد و برای نمونه‌های پیر شده PAV، درصد کرنش ۱ درصد انتخاب شد.

### ۳-۶. رئومتر تیر خمشی (BBR)

از آنجایی که قیر در دماهای کم بسیار سفت و سخت است، خصوصیات قیر در آن دماها را نمی‌توان با استفاده از رئومتر برش دینامیک به دست آورد. بدین منظور، طبق استاندارد AASHTO T313 از آزمایش BBR که در آن رفتار خزشی قیر به دست می‌آید، استفاده می‌شود (شکل ۳). در آزمایش BBR، تیرچه ساخته شده از قیر در سردترین دمایی که قیر مورد نظر در دوره عمرش تحمل می‌کند، مورد آزمایش قرار می‌گیرد. این آزمایش نشان می‌دهد که قیر تا چه اندازه نسبت به ترک‌های برودتی ضعیف است. آزمایش بر این اساس استوار است که در دمای کم، قیر عمدتاً رفتار الاستیک دارد. تیرچه قیری به مدت ۶۰ ثانیه تحت بار ثابت قرار می‌گیرد و مقدار افت و خیز حاصله در وسط تیرچه در تمام این مدت اندازه‌گیری می‌شود. از این آزمایش "سختی خزشی" که

از وضعیت رئولوژیک نمونه‌ها در دماهای زیاد به دست آید و بتوان به خوبی آن‌ها را با یکدیگر مقایسه کرد.

آزمون DSR خصوصیات ویسکوالاستیک مواد را با اندازه‌گیری مدول برشی مختلط  $G^*$  و زاویه اختلاف فاز  $\delta$  تعیین می‌کند.  $G^*$  مقاومت کلی قیر در برابر تغییر شکل است وقتی که به طور مکرر مورد برش قرار می‌گیرد. مدول برشی مختلط از دو بخش تشکیل شده است: یکی قسمت الاستیک (برگشت‌پذیر) و دیگری قسمت ویسکوز (برگشت‌ناپذیر). زاویه اختلاف فاز  $\delta$  نشان‌دهنده مقدار نسبی تغییر شکل برگشت‌پذیر به برگشت‌ناپذیر می‌باشد. مقدار این دو عدد برای قیر بستگی زیادی به دما دارد. در دمای زیاد، قیر مانند یک ماده ویسکوز عمل کرده و در دمای خیلی کم مانند ماده الاستیک. در دمای میانی که بارگذاری ترافیک بر روسازی اعمال می‌شود، رفتار قیر مجموعه‌ای از رفتارهای ویسکوز و الاستیک می‌باشد. زاویه اختلاف فاز تعیین می‌کند که چقدر رفتار مدول برشی مختلط ویسکوز است و چقدر الاستیک.

یکی از کاربردهای دو پارامتر  $G^*$  و  $\delta$  در ارزیابی پتانسیل شیارشدگی می‌باشد. هرچه مدول  $G^*$  بزرگ‌تر باشد، مقاومت قیر در برابر شیارشدگی بیشتر بوده و همچنین مقدار  $\delta$  کمتر، نشان‌دهنده قیر الاستیک‌تر خواهد بود. لذا، هر نمونه باید در شرایط مختلف پیر شدگی تحت آزمایش DSR قرار گیرد. نمونه پیر نشده در دمای زیاد بایستی مقدار  $\delta \sin G^*$  بیش از ۱ کیلو پاسکال باشد. اگر کمتر از این مقدار باشد، احتمال وقوع شیارشدگی افزایش می‌یابد. نمونه پیر شده RTFO بایستی مقدار  $\delta \sin G^*$  بیش از ۲/۲ کیلو پاسکال داشته باشد. درجه زیاد عملکردی PG دمایی تعیین می‌شود که هر دوی این دو شرایط را ارضا نماید.

قیر پیر شده در PAV نیز در دماهای میانی تحت آزمایش DSR قرار می‌گیرد تا مقاومت در برابر ترک‌های

<sup>1</sup> - Bending Beam Rheometer



شرایط برآورده نشود، قیر دمای مذکور را ارضا نمی‌کند. درجه عملکردی کم قیر از همین دما به دست می‌آید. در این پژوهش، نمونه‌های پیر شده PAV در دو دمای ۱۶- و ۲۲- درجه سلسیوس مورد آزمایش قرار گرفتند.

بیانگر مقاومت آسفالت تحت اثر بار ثابت است و "شیب یا نرخ خزش" (m) که بیانگر تغییر سختی با تغییرات بار اعمال شده می‌باشد، به دست می‌آید. نمونه مورد آزمایش در دمای آزمایش بایستی سختی کمتر از ۳۰۰ مگاپاسکال و همچنین مقدار m بیشتر از ۰/۳۰۰ داشته باشد. اگر این



شکل ۳. سمت راست: دستگاه RV، وسط: دستگاه BBR، سمت چپ: دستگاه DSR

بازگشت (Jnr) می‌باشد. درصد بازگشت کرنش توانایی قیر برای بازگشت به حالت اولیه پس از اتمام بارگذاری را نشان می‌دهد. مدول غیرقابل بازگشت نیز مقدار کرنش غیرقابل بازگشت بعد از اتمام بارگذاری را مشخص می‌کند. هر دوی این پارامترها مقاومت قیر در برابر تغییرشکل دائمی را نشان می‌دهند که از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$R = \frac{\gamma_p - \gamma_n}{\gamma_p - \gamma_0} * 100 \quad (1)$$

$$Jnr = \frac{\gamma_n - \gamma_0}{\tau} \quad (2)$$

که در این دو رابطه  $\gamma_0$  کرنش برشی در ابتدای چرخه است،  $\gamma_p$  کرنش حداکثر پس از یک ثانیه بارگذاری است و  $\gamma_n$  کرنش غیرقابل بازگشت پس از استراحت ۹ ثانیه‌ای می‌باشد. همچنین،  $\tau$  تنش برشی اعمالی می‌باشد. مشخص است که هر چقدر مقدار R بیشتر و مقدار Jnr کمتر باشد، نمونه نسبت به تغییرشکل دائمی عملکرد مناسب‌تری دارد و مقاومت بیشتری نشان می‌دهد. همچنین، حساسیت نسبت به تنش خزشی نمونه‌های قیری به صورت درصد اختلاف در مدول غیرقابل بازگشت یا Jnr-diff اندازه‌گیری می‌شود. این پارامتر،

### ۷-۳. آزمایش 'MSCR'

آزمایش خزش و برگشت قیر در چند سطح تنش (MSCR) به عنوان روشی جایگزین برای ارزیابی حساسیت قیرها در برابر تغییرشکل دائمی یا شیارشدگی به جای پارامتر شیارشدگی  $\delta / \sin G^*$  در PG+ معرفی شده است. مزیت اصلی این روش، دقت بیشتر در بررسی شیارشدگی نمونه‌های اصلاح شده با پلیمر است. چرا که سطح تنش‌های زیادتری که در آزمون MSCR اعمال می‌شود، باعث آسیب دیدن و یا تغییر شبکه ساختاری پلیمر می‌شود. این روش نیز با استفاده از دستگاه DSR انجام می‌پذیرد (شکل ۳). روند آزمایش بر این اساس است که یک نمونه قیر پیر شده RTFO در معرض ۱۰ سیکل بارگذاری با ۱ ثانیه بارگذاری و ۹ ثانیه استراحت در سطوح تنش ۰/۱ و ۳/۲ کیلو پاسکال در دمای زیاد عملکردی با استفاده از دستگاه DSR قرار می‌گیرد. درصد بازگشت کرنش و مدول غیرقابل بازگشت بعد از ۱۰ سیکل بارگذاری محاسبه خواهد شد. پارامترهای به دست آمده درصد بازگشت کرنش (R) و مدول غیرقابل

<sup>1</sup>- Multiple Stress Creep Recovery

به چشم نمی‌آید. لذا، افزودن ۱۰ درصد لیگنین نیز استاندارد مشخص شده در سوپریو را به راحتی ارضا می‌کند. همانطور که می‌دانیم، ویسکوزیته بیشتر احتیاج به دمای زیادتری برای اختلاط و تراکم دارد. در دماهای زیاد، افزایش قابل توجهی در ویسکوزیته قیر حاوی لیگنین در مقایسه با قیر PG64-22 را شاهد نیستیم. لذا، از نظر افزایش دمای اختلاط و تراکم مشکل چندانی به وجود نخواهد آمد.

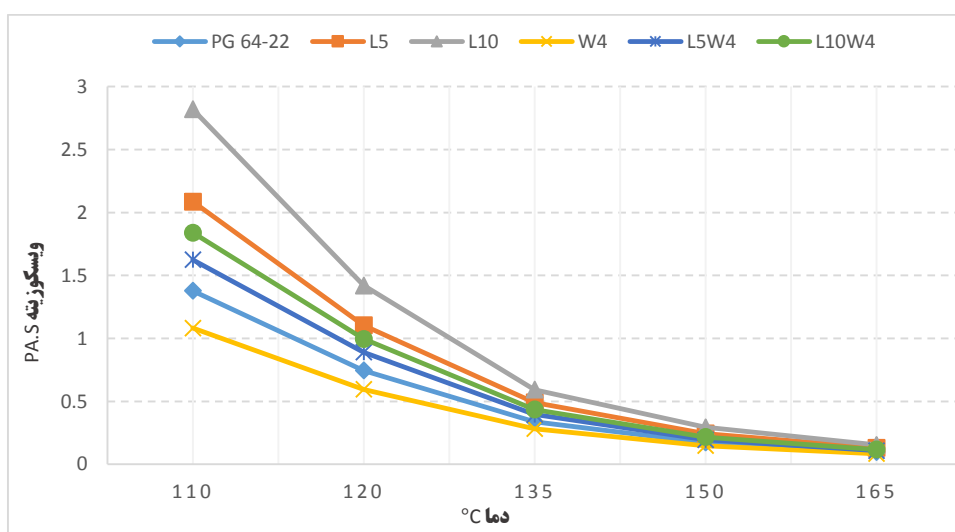
از طرف دیگر، همانطور که انتظار می‌رفت، افزودن ۴ درصد WEO، ویسکوزیته قیر را نسبت به قیر خالص کاهش می‌دهد و آن را نرم‌تر می‌کند. همچنین، نمونه‌های L5W4 و L10W4 ویسکوزیته‌های نزدیک‌تری به قیر خالص داشته و افزودن WEO همراه با لیگنین، از اثر سخت‌شدگی لیگنین کاسته است و به این ترتیب نمونه‌ها دارای ویسکوزیته‌های متعادل‌تری خواهند بود. لذا، استفاده از هر دو افزودنی در قیر باعث می‌شود قیر از نظر ویسکوزیته عملکرد مناسبی داشته باشد، بدون آنکه دمای اختلاط و تراکم را افزایش دهد.

مقدار افزایش در پارامتر Jnr را وقتی تنش از ۰/۱ به ۳/۲ کیلوپاسکال افزایش پیدا می‌کند، نشان می‌دهد. در عمل، این پارامتر مقدار حساسیت قیر به شیارشدگی زمانی که بارهای ترافیکی مختلف به ساختار مخلوط در دمای زیاد عملکردی اعمال می‌شود را نشان می‌دهد. در این پژوهش، آزمون MSCR روی نمونه‌های پیر شده RTFO و در دمای ۶۴ درجه سلسیوس انجام گرفت.

#### ۴. نتایج و تحلیل

##### ۴-۱. ویسکوزیته دورانی

آزمایش RV برای تعیین ویسکوزیته دورانی روی نمونه‌ها با درصد‌های مختلف و دماهای ۱۱۰، ۱۲۰، ۱۳۵، ۱۵۰ و ۱۶۵ درجه انجام گرفت تا رفتار نمونه‌ها در دماهای مختلف بررسی شود. نتایج این آزمایش در شکل ۴ ارائه شده است. همانطور که مشخص است، با افزودن لیگنین به قیر در دماهای مختلف، مقدار ویسکوزیته افزایش داشته است. هرچقدر درصد لیگنین زیادتر بوده، افزایش ویسکوزیته بیشتری نیز شاهد هستیم. این افزایش در دماهای کم محسوس‌تر است و در دماهای زیاد آنچنان



شکل ۴. ویسکوزیته در دماهای مختلف

به عنوان مثال، در دمای ۱۳۵ درجه سلسیوس، نسبت به نمونه قیر خالص PG 64-22 به ترتیب ۷۵، ۴۵، ویسکوزیته نمونه‌های L5، L10، L5W4 و L10W4 ۲۸ و ۱۷ درصد افزایش داشته‌اند و ویسکوزیته نمونه W4

داشت. از این جهت، مقدار  $G^*/\sin \delta$  را به عنوان فاکتور شیارشدگی شارپ می‌نامند. همچنین، در نمونه پیر نشده در دمای زیاد، بایستی مقدار  $G^*/\sin \delta$  بیش از ۱ کیلوپاسکال باشد. نمونه پیر شده RTFO نیز بایستی مقدار  $G^*/\sin \delta$  بیش از ۲/۲ کیلوپاسکال داشته باشد. درجه زیاد عملکردی PG، دمایی تعیین می‌شود که هر دوی این دو شرایط را ارضا نماید. لازم به ذکر است که دمای آزمایش در بازه‌های ۶ درجه تعیین می‌شود.

#### ۴-۲-۱. فاکتور شیارشدگی شارپ

شکل ۵، نتایج آزمون DSR را در هر دو حالت پیر نشده و پیر شده RTFO نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، با افزودن لیگنین در هر دو حالت پیر شده و پیر نشده، مقدار  $G^*/\sin \delta$  افزایش چشم‌گیری داشته است. هرچقدر درصد لیگنین افزوده شده بیشتر باشد، افزایش  $G^*/\sin \delta$  نیز بیشتر است. بنابراین، می‌توان این موضوع را متوجه شد که با افزودن لیگنین، فاکتور شیارشدگی قیر افزایش یافته و نمونه در برابر شیارشدگی در دمای زیاد مقاوم‌تر است. علت این امر آن است که افزودن لیگنین باعث سخت‌تر شدن قیر شده و آن را در برابر تغییرشکل دائمی محافظت می‌کند.

همچنین، ملاحظه می‌شود که افزودن WEO به قیر باعث کاهش مقدار  $G^*/\sin \delta$  و فاکتور شیارشدگی می‌شود. لذا، با افزودن روغن به قیر، مقاومت نمونه به دلیل نرم‌تر شدن، در برابر تغییرشکل دائمی کاهش می‌یابد. در نمونه‌های L5W4 و L10W4 نیز فاکتور شیارشدگی نسبت به قیر خالص افزایش یافته و مقاومت نمونه در برابر شیارشدگی بیشتر شده است.

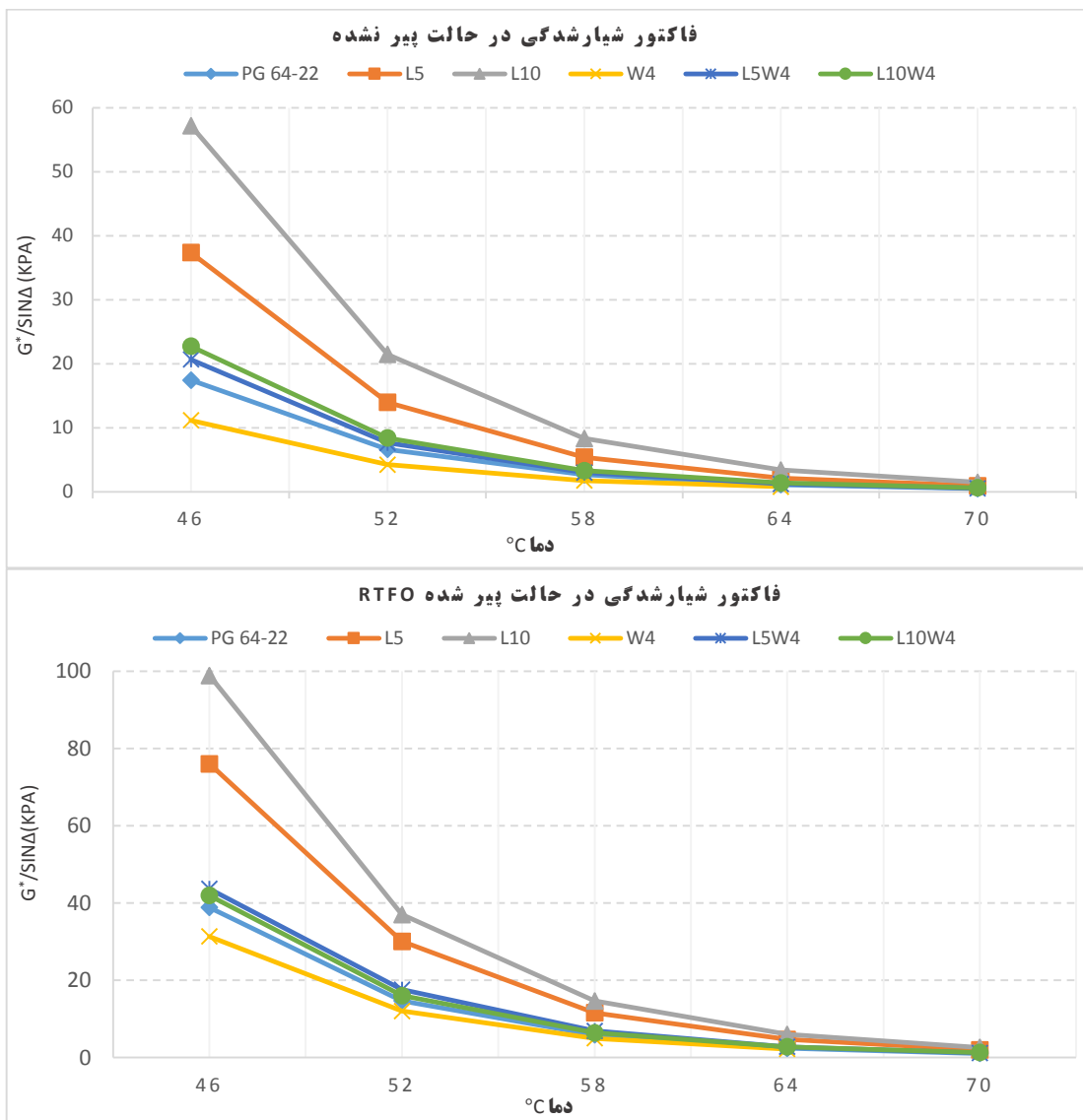
نیز ۱۶ درصد کاهش داشته است. ملاحظه می‌شود که افزایش ۷۵ درصدی افزودن ۱۰ درصد لیگنین، با اضافه کردن ۴ درصد WEO به ۲۸ درصد رسیده است.

ویسکوزیته دورانی تمامی نمونه‌ها با درصدهای مختلف افزودنی، با افزایش دما، کاهش می‌یابد. همچنین، در دماهای زیادتر، از میزان این کاهش کاسته می‌شود. به عنوان مثال، ویسکوزیته نمونه L10W4 در دمای ۱۳۵ درجه نسبت به ۱۲۰ درجه ۵۶ درصد کاهش داشته است، که این کاهش در دمای ۱۵۰ نسبت به ۱۳۵ به ۵۰ درصد و در دمای ۱۶۵ نسبت به ۱۵۰ به ۴۵ درصد رسیده است. این موضوع به این دلیل رخ می‌دهد که قیر یک ماده ویسکوالاستیک است و بستگی زیادی به دما دارد.

#### ۴-۲. مقاومت در دمای زیاد

برای مشخص نمودن میزان مقاومت نمونه‌ها در برابر شیارشدگی در دمای زیاد و همینطور محاسبه دمای زیاد عملکردی آن‌ها، آزمایش DSR روی آن‌ها انجام شد. به کمک آزمون DSR، پارامترهای  $G^*$  و  $\delta$  و در نهایت  $G^*/\sin \delta$  در دماهای ۴۶، ۵۲، ۵۸، ۶۴، ۷۰ و در شرایط مختلف پیرشدگی (پیر نشده و پیر شده RTFO) اندازه‌گیری شد تا رفتار رئولوژیک نمونه‌ها در برابر شیارشدگی در حالت‌های مختلف بررسی شود. همچنین، دمای زیاد عملکردی نمونه‌ها نیز به کمک این آزمون اندازه‌گیری شد.

بر اساس نتایج شارپ، مقدار  $G^*/\sin \delta$  به عنوان پارامتری برای مقاومت در برابر شیارشدگی تعیین شد. هرچقدر مقدار  $G^*/\sin \delta$  بزرگ‌تر باشد، قیر در برابر شیارشدگی و تغییرشکل دائمی عملکرد بهتری خواهد



شکل ۵. نتایج آزمون DSR در دو حالت پیر نشده و پیر شده

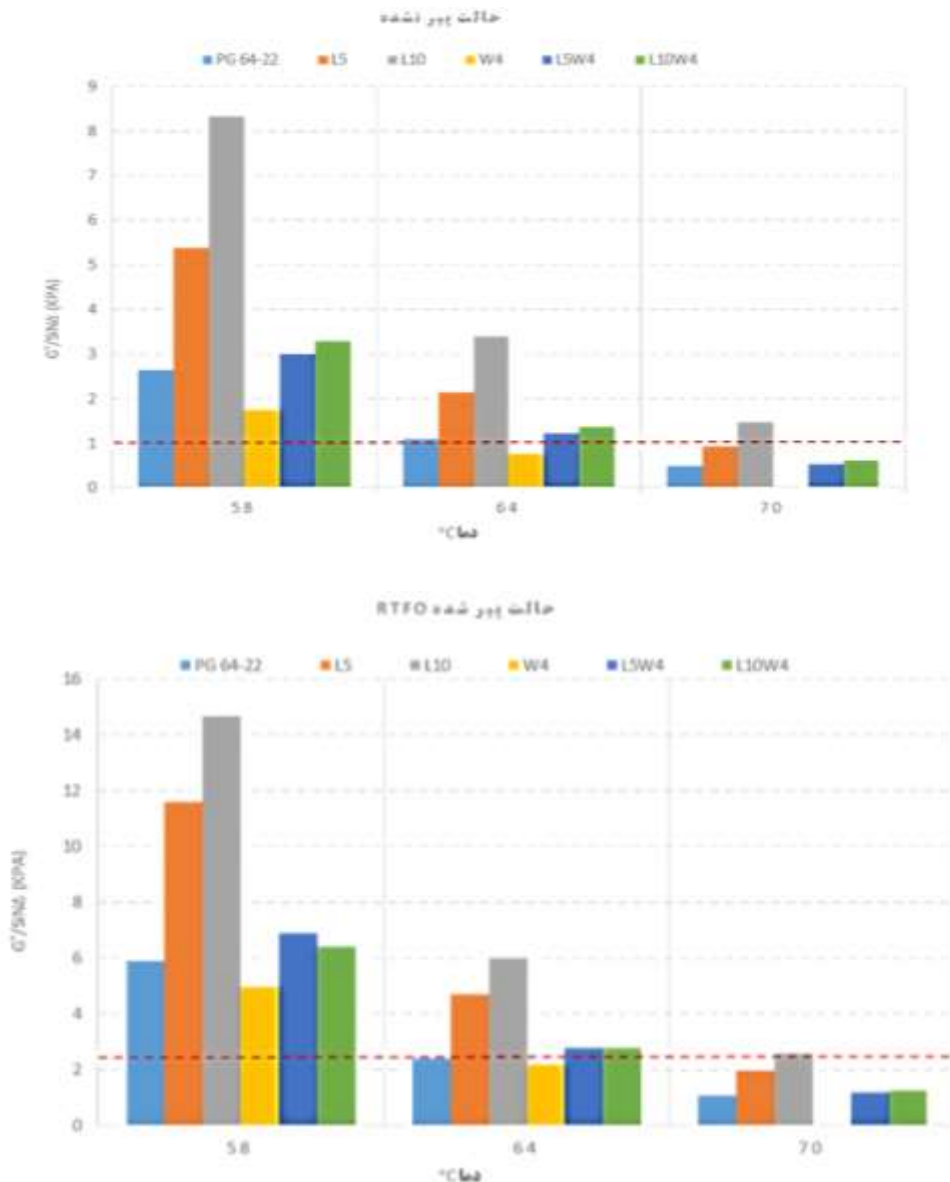
افزایش می‌دهد و قیر را سخت می‌کند. اما WEO اثری عکس دارد و قیر را نرم می‌کند. همانطور که می‌دانیم، سخت شدن قیر، با اینکه عملکرد آن را در برابر شیارشدگی بهبود می‌بخشد، اما ممکن است در دمای کم عملکرد قیر را به خطر بیندازد. همچنین، نرم شدن قیر عملکرد آن را در دمای زیاد به مخاطره می‌اندازد. نمونه‌های L10W4 و L5W4 که هم حاوی لیگنین و هم حاوی روغن هستند، مقاومت قیر را در برابر شیارشدگی افزایش داده، اما این افزایش آنقدر نیست که قیر بسیار سخت شود و بر سایر مشخصات قیر تأثیر مخرب بگذارد.

جهت بررسی دقیق‌تر، به مقدار  $G^*/\sin \delta$  در دمای ۶۴ درجه سلسیوس و حالت پیر نشده توجه کنید. فاکتور شیارشدگی نمونه‌های L5 و L10 نسبت به قیر خالص، به ترتیب ۹۴ و ۲۰۴ درصد افزایش داشته است. در حالی که فاکتور شیارشدگی نمونه W4 نسبت به قیر خالص ۳۰ درصد کاهش یافته است. اما مقدار  $G^*/\sin \delta$  نمونه‌های L10W4 و L5W4 نسبت به قیر خالص به ترتیب ۱۱ و ۲۴ درصد افزایش داشته است. به این ترتیب، مشخص می‌شود که افزودن لیگنین مقاومت قیر را در برابر شیارشدگی به طور چشمگیری

۲-۲-۴. دمای زیاد عملکردی

DSR و مقادیر  $G^*/\sin \delta$  را در دماهای ۵۸، ۶۴ و ۷۰ درجه سلسیوس برای نمونه‌های پیر نشده و پیر شده RTFO نشان می‌دهد.

همانطور که گفته شد، آزمایش DSR در پنج دمای ۴۶، ۵۲، ۵۸، ۶۴ و ۷۰ درجه انجام شده است. شکل ۶، نتایج



شکل ۶. نتایج DSR و مقایسه با حد مجاز استاندارد سوپرپیو

نمونه‌های مختلف را در حالت پیر نشده و پیر شده نشان می‌دهد. دمای زیاد عملکردی، کمینه مقدار دو دمای پیر نشده و پیر شده است.

همانطور که ملاحظه می‌شود، همه نمونه‌ها به غیر از W4 دمای ۶۴ درجه سلسیوس را ارضا نموده‌اند. این در حالی است که نمونه L10 در دمای ۷۰ درجه سلسیوس نیز مورد قبول واقع شده است. جدول ۴، دمای پاس شده

جدول ۴. مقایسه دمای زیاد عملکردی نمونه‌های مختلف

نمونه	دمای مورد قبول پیر نشده	دمای مورد قبول پیر شده RTFO	دمای زیاد عملکردی	درجه PG	مقایسه با قیر خالص
PG64-22	۶۴/۷	۶۴/۳	۶۴/۳	۶۴	-
L5	۶۹/۴	۶۹/۳	۶۹/۳	۶۴	+۵
L10	۷۳/۲	۷۱/۴	۷۱/۴	۷۰	+۷/۱
W4	۶۲/۱	۶۳/۹	۶۲/۱	۵۸	-۲/۲
L5W4	۶۵/۴	۶۶/۳	۶۵/۴	۶۴	+۱/۱
L10W4	۶۶/۳	۶۶/۱	۶۶/۱	۶۴	+۱/۸

وجود دارد. یکی از این روش‌ها، فاکتور خستگی شارپ نام دارد. قیر پیر شده در PAV نیز در دماهای میانی تحت آزمایش DSR قرار می‌گیرد تا مقاومت در برابر ترک‌های خستگی را مورد ارزیابی قرار دهد. پارامتر  $G^*/\sin \delta$  به عنوان فاکتور خستگی نامیده می‌شود. این مقدار بایستی کمتر از ۵۰۰۰ کیلو پاسکال باشد تا در برابر ترک‌های خستگی در دمای میانی مقاومت لازم را از خود نشان دهد. در دمای یکسان، هرچقدر مقدار  $G^*/\sin \delta$  کمتر باشد، عملکرد قیر در برابر خستگی بهتر خواهد بود و در دمای کمتری از حد مجاز ۵۰۰۰ کیلو پاسکال عبور می‌کند.

نمونه‌های پیر شده PAV در دماهای ۲۵، ۲۸، ۳۱، ۲۲، ۱۹، ۱۶ و ۱۳ مورد آزمایش قرار گرفتند و پارامتر  $\delta$   $G^*/\sin$  برای هر کدام از آن‌ها محاسبه شد. شکل ۷، نتایج این آزمون را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، با افزودن WEO، مقدار  $G^*/\sin \delta$  در دماهای مختلف به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. لذا، می‌توان نتیجه گرفت که روغن موتور سوخته می‌تواند عملکرد قیر را در برابر خستگی بهبود دهد. همچنین، افزودن لیگنین به مقدار بسیار کمی  $G^*/\sin \delta$  را زیاد می‌کند، به این دلیل که لیگنین باعث سخت شدن قیر می‌شود و قابلیت تغییرشکل آن در اثر تنش‌های وارده کاهش می‌یابد. در

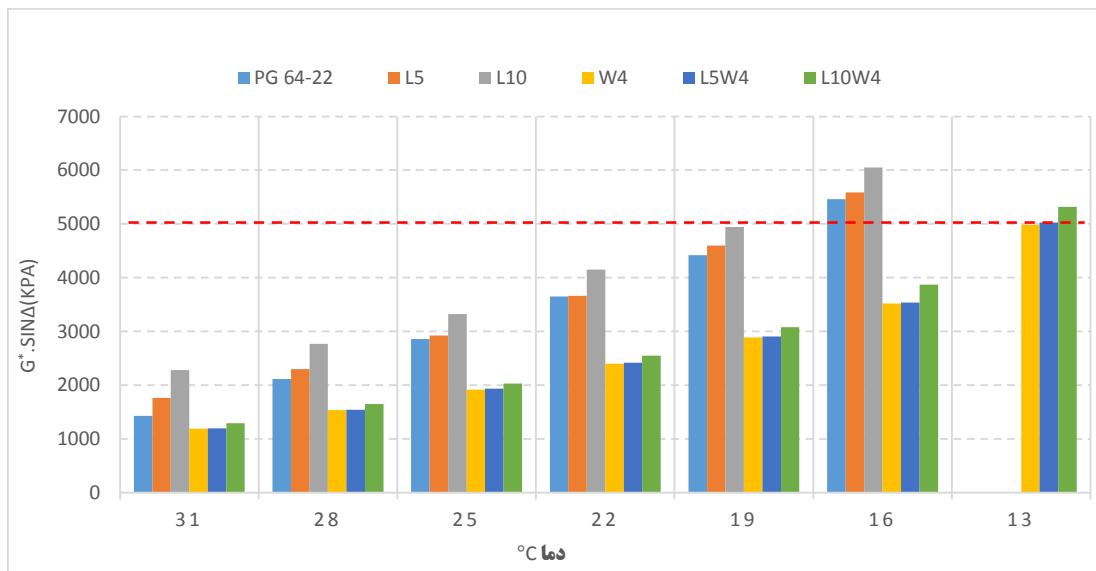
با مقایسه دمای زیاد عملکردی نسبت به قیر خالص PG64-22 برای نمونه‌های مختلف، می‌توان تأثیر افزودنی‌ها بر دمای عملکردی قیر را دقیق‌تر بررسی کرد. دمای عملکردی نمونه‌های L5، L10، L5W4 و L10W4 نسبت به قیر خالص به ترتیب ۵، ۷/۱، ۱/۱ و ۱/۸ درجه سلسیوس افزایش داشته است. همچنین، نمونه W4 نیز ۲/۲ درجه سلسیوس نسبت به قیر خالص کم می‌کند. بنابراین، با افزودن لیگنین به قیر خالص می‌توان دمای زیاد عملکردی قیر را افزایش داد. همچنین، نمونه‌های حاوی لیگنین و روغن نیز می‌توانند دمای عملکردی قیر را زیادتر کنند. همانطور که ملاحظه می‌شود، افزودن لیگنین باعث افزایش قابل توجه دمای زیاد عملکردی می‌شود، به طوری که ۱۰ درصد لیگنین می‌تواند درجه PG را نیز به ۷۰ برساند. همچنین، افزودن WEO باعث کاهش دمای زیاد عملکردی می‌شود و درجه PG را به ۵۸ کاهش می‌دهد.

#### ۳-۴. فاکتور خستگی شارپ در دمای میانی

یکی از خرابی‌های اصلی مخلوط‌های آسفالتی، خستگی ناشی از عبور بار ترافیکی است که معمولاً در دمای میانی و پس از گذشت زمان در روسازی رخ می‌دهد. روش‌های مختلفی برای بررسی مقاومت در برابر خستگی

شده فاکتور خستگی بررسی کرد. هرچقدر نمونه در دمای کمتری به مقدار ۵۰۰۰ کیلوپاسکال رسیده باشد، مقاومت بیشتری در برابر خستگی دارد (جدول ۵). همانطور که ملاحظه می‌شود، افزودن WEO دمای مورد قبول خستگی را به مقدار ۴/۳۶ درجه سلسیوس کاهش می‌دهد. لذا، مقاومت بیشتری در برابر خستگی از خود نشان می‌دهد. همچنین، نمونه‌های حاوی لیگنین مقدار بسیار کمی دمای مورد قبول را افزایش می‌دهند. نمونه‌های L5W4 و L10W4 نیز عملکرد بسیار مناسبی در برابر خستگی دارند و به ترتیب مقدار ۴/۲۸ و ۳/۶۷ درجه مورد قبول خستگی را کاهش می‌دهند.

خصوص نمونه‌های حاوی هر دو افزودنی (L5W4 و L10W4)، مقدار  $G^*.sin \delta$  کاهش قابل توجهی یافته است و می‌توان متوجه شد که عملکرد قیر را در برابر خستگی به مقدار زیادی بهبود بخشیده است. به منظور بررسی دقیق‌تر این موضوع، درصد تغییرات مقدار  $\delta$  هر نمونه نسبت به قیر خالص بررسی گردید. نمونه‌های L5 و L10 نسبت به قیر خالص PG64-22 به ترتیب ۴ و ۱۱ درصد افزایش داشته‌اند. همچنین، نمونه‌های W4، L5W4 و L10W4 نسبت به قیر خالص PG64-22 به ترتیب ۳۵، ۳۴ و ۳۱ درصد کاهش داشته‌اند. با دقت به دمای متناظر با  $G^*.sin\delta=5000$  kPa، می‌توان اثر افزودنی‌های مختلف را به وسیله دمای پاس



شکل ۷. فاکتور خستگی شارپ

مقاومت قیر را در برابر خستگی کاهش می‌دهد. نمونه‌های حاوی لیگنین و WEO نیز عملکرد بسیار مناسبی داشته و مقاومت را در برابر خستگی به مقدار زیادی افزایش دادند.

بنابراین، با توجه به نتایج آزمون DSR در دماهای میانی و فاکتور خستگی، می‌توان دریافت که WEO عملکرد قیر در برابر خستگی را به مقدار قابل توجهی بهبود می‌بخشد. این موضوع با مطالعات گذشته کاملاً مطابقت دارد. همچنین، لیگنین به مقدار بسیار کمی

جدول ۵. دمای متناظر با  $G^*. \sin \delta = 5000 \text{ kPa}$

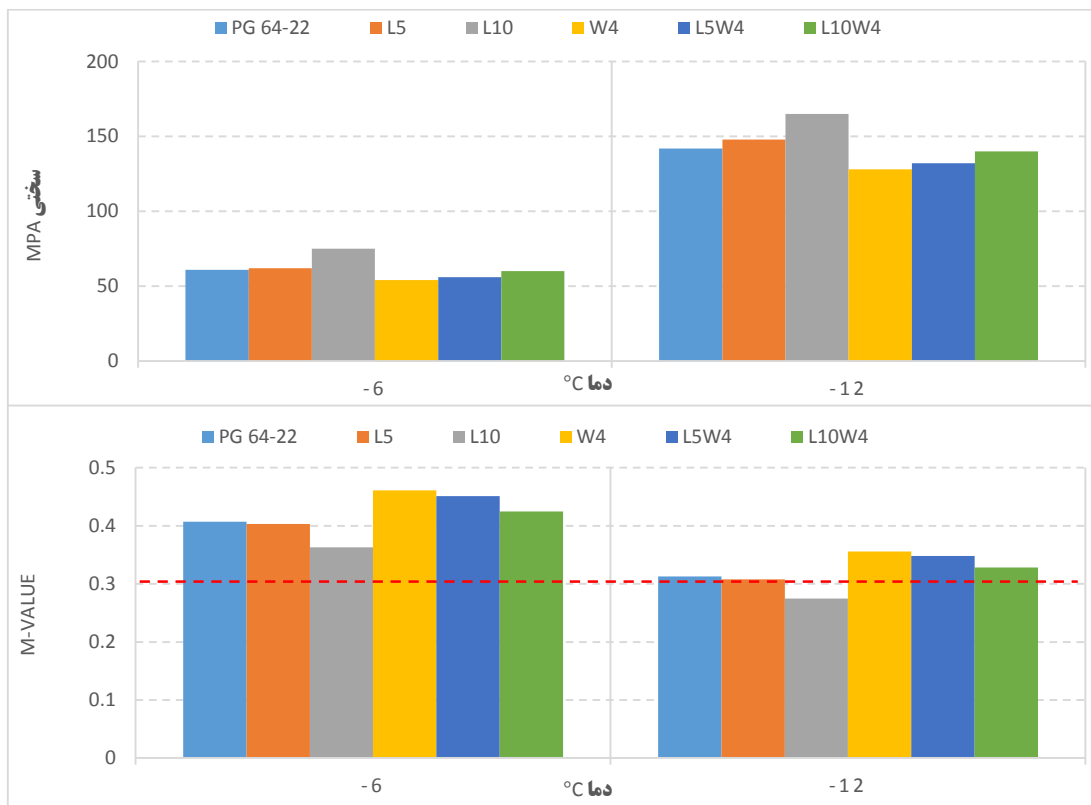
نمونه	دمای مورد قبول با توجه به فاکتور خستگی	مقایسه با قیر خالص
PG64-22	۱۷/۳۳	-
L5	۱۷/۷۷	+۰/۴۴
L10	۱۸/۸۴	+۱/۵۴
W4	۱۲/۹۷	-۴/۳۶
L5W4	۱۳/۰۵	-۴/۲۸
L10W4	۱۳/۶۶	-۳/۶۷

#### ۴-۴. پتانسیل ترک‌خوردگی در دمای کم

به منظور بررسی مقاومت نمونه‌ها در دمای کم (ترک‌های برودتی) و به دست آوردن دمای کم عملکردی آن‌ها، آزمایش BBR روی نمونه‌های پیر شده PAV انجام گرفت و مقادیر سختی خزشی و m-value در دو دمای ۶- و ۱۲- محاسبه شد (شکل ۸). همانطور که ملاحظه می‌شود، افزودن ۵ درصد لیگنین، مقدار m-value را به مقدار ناچیزی کم می‌کند. اما این کاهش در ۱۰ درصد لیگنین محسوس‌تر است. این موضوع نشان می‌دهد که نمونه‌های حاوی لیگنین در جذب تنش برودتی ضعیف‌تر عمل می‌کنند و مدت زمان بیشتری طول می‌کشد تا در اثر تنش وارده به حالت اولیه بازگردند. از طرف دیگر، نمونه حاوی WEO به مقدار قابل توجهی m-value زیادتری نسبت به قیر خالص دارد که این موضوع نشان

می‌دهد روغن موتور، قیر را نرم‌تر کرده و در برابر تنش‌های برودتی انعطاف‌پذیر می‌نماید. لذا، مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد. نمونه‌های L5W4 و L10W4 نیز نسبت به قیر خالص m-value بیشتری دارند. لذا، در دمای کم مقاومت بیشتری خواهند داشت. نتایج سختی خزشی در آزمایش BBR در شکل ۸ ارائه شده است. با افزودن لیگنین به قیر، سختی خزشی به میزان کمی افزایش می‌یابد. هر چقدر درصد لیگنین افزوده شده بیشتر باشد، این افزایش نیز بیشتر می‌باشد. از طرف دیگر، افزودن WEO مقدار سختی خزشی قیر را به طور قابل توجهی کم می‌کند. نمونه‌های حاوی لیگنین و WEO دارای سختی کمتری نسبت به قیر خالص بودند. به این دلیل که روغن اثر کاهندگی بیشتری در سختی قیر می‌گذارد و اثر افزایشی لیگنین را در سختی خشی می‌کند.





شکل ۸. مقدار m-value و سختی در آزمایش BBR

نمونه‌های L5W4 و L10W4 به طور کلی دارای مقاومت بیشتری نسبت به قیر خالص بودند.

حد مجاز سختی ۳۰۰ مگاپاسکال و حد مجاز ۰/۳ در m-value به منظور تعیین دمای کم عملکردی قیر مد نظر قرار می‌گیرد. همانطور که ملاحظه می‌شود، حد مجاز سختی در تمامی نمونه‌ها رعایت شده است. اما در خصوص m-value در دمای ۱۲- نمونه L10 حد مجاز ۰/۳ را ارضا نکرده است.

#### ۴-۵. دمای عملکردی نمونه‌ها

پس از انجام کلیه آزمایش‌های مرتبط با PG، اکنون می‌توان دمای زیاد عملکردی و کم نمونه‌ها را بررسی کرد. این دما با توجه نتایج DSR (برای دمای زیاد) و نتایج BBR (برای دمای کم) به دست آمده است. نتایج حاصل در جدول ۶ ملاحظه می‌گردد. همانطور که دیده می‌شود، نمونه‌های قیر خالص، L5، L5W4 و L10W4 در درجه عملکردی PG64-22 قرار می‌گیرند. با این

به طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که افزودن لیگنین به مقدار کمی مقاومت قیر را در برابر ترک‌های برودتی دمای کم کاهش می‌دهد. در نمونه دارای ۵ درصد لیگنین این موضوع بسیار ناچیز است. اما با افزودن ۱۰ درصد لیگنین این ضعف بیشتر به چشم می‌آید. از طرف دیگر، روغن موتور ضایعاتی مقاومت قیر در دمای کم را بهبود می‌بخشد. دلیل این مورد را می‌توان در این موضوع یافت که روغن موتور به طور کلی در دماهای کم، روان و نرم است تا بتواند در فصل زمستان و در سرما کار کند و موتور خودرو را روشن نماید، لذا، افزودن روغن با چنین ویژگی‌هایی می‌تواند سختی قیر را در دماهای کم کاهش دهد. نمونه‌های حاوی لیگنین و روغن نیز به طور کلی عملکرد بهتری نسبت به قیر خالص داشتند. این موضوع چنین تفسیر می‌شود که در دمای کم، اثر نرم‌کنندگی روغن نسبت به اثر سخت‌کنندگی لیگنین بیشتر بوده و

یک درجه عملکردی با قیر خالص قرار می‌گیرد، اما در برابر شیارشدگی و ترک برودتی مقاومت بیشتری داشته است. همچنین، نمونه W4 دارای درجه عملکردی PG58-22 است و نمونه L10 نیز دارای درجه عملکردی PG70-16 می‌باشد.

وجود، مشخص است که دمای زیاد عملکردی و کم آن‌ها نسبت به قیر خالص متفاوت است. به عنوان مثال، نمونه L5W4 نسبت به قیر خالص بازه دمایی بیشتری را تحمل می‌کند (۱/۹۴ درجه از دمای کم عملکردی و ۱/۱ درجه در دمای زیاد عملکردی). لذا، علیرغم اینکه این نمونه در

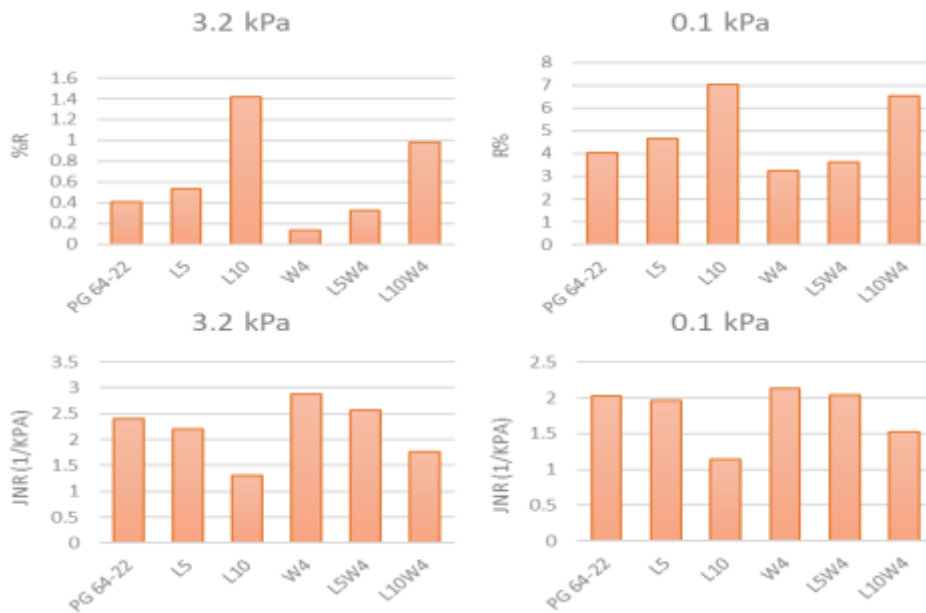
جدول ۶. دمای عملکردی نمونه‌ها

نمونه	دمای کم عملکردی	درجه PG کم	دمای زیاد عملکردی	درجه PG زیاد	PG
PG64-22	-۲۲/۸۳	-۲۲	۶۴/۳	۶۴	PG64-22
L5	-۲۲/۵	-۲۲	۶۹/۳	۶۴	PG64-22
L10	-۲۰/۲۹	-۱۶	۷۱/۴	۷۰	PG70-16
W4	-۲۵/۲	-۲۲	۶۲/۱	۵۸	PG58-22
L5W4	-۲۴/۷۹	-۲۲	۶۵/۴	۶۴	PG64-22
L10W4	-۲۳/۷۳	-۲۲	۶۶/۱	۶۴	PG64-22

تأثیر مثبت قابل توجهی در نتایج گذاشته است. دلیل این امر در سخت شدن قیر در اثر افزودن لیگنین است که باعث می‌شود قیر در دمای زیاد مقاومت کافی را حفظ کند و تغییرشکل دائمی کمتری را تجربه کند. از طرف دیگر، با افزودن ۴ درصد روغن، مقادیر  $Jnr$  کاهش و افزایش پیدا می‌کند. لذا، در برابر شیارشدگی عملکرد قیر را تضعیف می‌کند. روغن به دلیل خاصیت نرم‌کنندگی که دارد، باعث می‌شود قیر در دمای زیاد نرم‌تر باشد و مقاومت کمتری در برابر تغییرشکل دائمی از خود نشان دهد.

#### ۴-۶. آزمایش MSCR

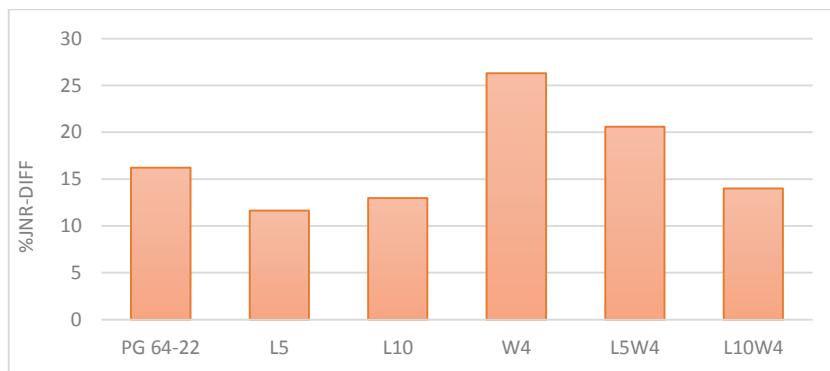
برای بررسی تأثیر افزودنی‌ها در برابر شیارشدگی، آزمایش MSCR در دمای ۶۴ درجه سلسیوس روی نمونه‌ها انجام شد که نتایج در شکل ۹ ملاحظه می‌گردد. همانطور که دیده می‌شود، با افزودن لیگنین به قیر، مقدار درصد بازگشت کرنش ( $Jnr$ ) افزایش پیدا می‌کند و مقدار مدول غیر قابل بازگشت ( $Jnr$ ) نیز کم می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که لیگنین مقاومت نمونه را در برابر شیارشدگی بهبود داده است. این موضوع در نمونه حاوی ۱۰ درصد لیگنین با شدت بیشتری قابل مشاهده است و



شکل ۹. نتایج آزمایش MSCR در دمای 64 °C و مقادیر R (زیاد) و Jnr (کم)

تنش بزرگتر، مقدار %R کمتر شده و از آن طرف مقدار Jnr بیشتر می‌شود. همچنین، مقادیر Jnr-diff در شکل ۱۰ آورده شده است. این پارامتر حساسیت قیر را تحت افزایش تنش از ۰/۱ به ۳/۲ کیلوپاسکال نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، نمونه‌های حاوی لیگنین مقدار %Jnr-diff کمتری نسبت به قیر خالص دارند. به این معنا که در برابر افزایش تنش حساسیت کمتری از خود نشان می‌دهند. از طرف دیگر، نمونه W4 که حاوی ۴ درصد روغن است مقدار حساسیت بیشتری در برابر افزایش تنش دارد.

در نمونه‌های L10W4 و L5W4 می‌توان اثر همزمان لیگنین و روغن را به خوبی مشاهده کرد. نمونه L5W4 به مقدار جزئی نسبت به قیر خالص PG64-22 عملکرد ضعیف‌تری از خود نشان داد. در حالی که نمونه L10W4 عملکرد قیر در برابر شیارشدگی را به مقدار قابل توجهی بهبود داده است. این موضوع نشان می‌دهد که نمونه L10W4 به دلیل داشتن ۱۰ درصد لیگنین، می‌تواند اثر نرم‌کنندگی روغن را در دمای زیاد خنثی نماید و عملکرد نمونه را در برابر تغییر شکل دائمی بهبود بخشد. همچنین، از نمودارها مشخص است که با افزایش سطح تنش از ۰/۱ به ۳/۲ کیلوپاسکال، به دلیل وارد آمدن



شکل ۱۰. مقدار %Jnr-diff به دست آمده از نتایج MSCR

نمونه‌های L5W4 و L10W4 ویسکوزیته‌های نزدیک‌تری به قیر خالص داشته و افزودن WEO همراه با لیگنین، از اثر سخت‌شدگی لیگنین کاسته است و به این ترتیب نمونه‌ها دارای ویسکوزیته‌های متعادل‌تری خواهند بود.

۲. با افزودن لیگنین در هر دو حالت پیر شده و پیر نشده،  $G^*/\sin \delta$  به مقدار ۹۴ درصد و ۲۰۴ درصد افزایش داشته است. همچنین، افزودن WEO به قیر باعث کاهش مقدار  $G^*/\sin \delta$  و فاکتور شیارشدگی به میزان ۳۰ درصد می‌شود. بنابراین، با افزودن روغن به قیر، مقاومت نمونه به دلیل نرم‌تر شدن، در برابر تغییرشکل دائمی کاهش می‌یابد. در نمونه‌های L5W4 و L10W4 نیز فاکتور شیارشدگی نسبت به قیر خالص به ترتیب ۱۱ و ۲۴ درصد افزایش یافته و مقاومت نمونه در برابر شیارشدگی بیشتر شده است.

۳. با افزودن WEO، مقدار  $G^* \cdot \sin \delta$  در دماهای مختلف به مقدار ۳۵ درصد کاهش می‌یابد. لذا، می‌توان نتیجه گرفت که روغن موتور سوخته می‌تواند عملکرد قیر را در برابر خستگی بهبود دهد. همچنین، افزودن لیگنین، مقدار  $G^* \cdot \sin \delta$  را ۴ و ۱۱ درصد زیاد می‌کند، به این دلیل که لیگنین باعث سخت شدن قیر می‌شود و قابلیت تغییرشکل آن در اثر تنش‌های وارده کاهش می‌یابد. در خصوص نمونه‌های L5W4 و L10W4، مقدار  $G^* \cdot \sin \delta$  به ترتیب ۳۴ و ۳۱ درصد کاهش یافته است و می‌توان متوجه شد که عملکرد قیر را در برابر خستگی به مقدار زیادی بهبود بخشیده است.

۴. با افزودن لیگنین به قیر، سختی خزشی به میزان کمی افزایش می‌یابد و m-value به قدر ناچیزی کم می‌شود. بنابراین، افزودن لیگنین به مقدار کمی مقاومت در برابر ترک‌های برودتی را کاهش می‌دهد. از طرف دیگر، افزودن WEO مقدار سختی خزشی قیر را به میزان ۱۲ درصد کم و m-value را به میزان ۱۵ درصد زیاد می‌کند، که این موضوع نشان می‌دهد روغن موتور، قیر را نرم‌تر کرده و در برابر تنش‌های برودتی انعطاف‌پذیر

بنابراین، با بررسی نتایج آزمایش MSCR می‌توان متوجه شد که افزودن لیگنین تأثیر مثبتی در شیارشدگی قیر دارد و هر چقدر درصد افزوده شده بیشتر باشد، این تأثیر بیشتر خواهد بود. همچنین، افزودن روغن موتور سوخته تأثیر منفی در تغییرشکل دائمی خواهد گذاشت. از طرف دیگر، نمونه L5W4 عملکردی تقریباً مشابه با قیر خالص را از خود نشان داد. اما نمونه L10W4 مقاومت قیر در برابر شیارشدگی را به مقدار قابل توجهی افزایش داد. لذا، استفاده همزمان از دو افزودنی می‌تواند در دمای زیاد عملکرد قیر را بهبود بخشد و از طرفی اثر نرم‌کنندگی و سخت‌کنندگی هر کدام از آن‌ها را تعدیل کند تا در شرایط مختلف بتواند عملکرد مثبتی داشته باشد.

## ۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، امکان استفاده از لیگنین و روغن موتور ضایعاتی در قیر جهت بهبود خواص رئولوژیک آن بررسی شد و درجه عملکردی آن به دست آمد. لیگنین استفاده شده در پژوهش از لیکور سیاه استخراج شد و روغن موتور ضایعاتی نیز مستقیماً از یک تعمیرگاه در شهر تهران گرفته شد. نمونه‌های مورد آزمایش شامل قیر خالص PG64-22، L5 و L10 که به ترتیب دارای ۵ درصد و ۱۰ درصد لیگنین بوده، نمونه W4 که دارای ۴ درصد روغن موتور بوده و نمونه‌های L5W4 و L10W4 که به ترتیب دارای ۵ درصد لیگنین و ۴ درصد روغن موتور و ۱۰ درصد لیگنین و ۴ درصد روغن موتور بوده‌اند. آزمایش‌های سوپریو و درجه بندی عملکردی به طور کامل روی آن‌ها انجام گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

۱. اضافه کردن لیگنین به قیر باعث افزایش ۷۵ درصدی و ۴۵ درصدی ویسکوزیته می‌شود. افزودن ۴ درصد WEO، ویسکوزیته قیر را نسبت به قیر خالص ۲۸ درصد کاهش می‌دهد و آن را نرم‌تر می‌کند. همچنین،

خود نشان داد. اما نمونه L10W4 مقاومت قیر در برابر شیارشدگی را به مقدار قابل توجهی افزایش داد. ۷. نمونه‌های حاوی لیگنین و روغن موتور ضایعاتی نشان دادند که از جنبه‌های مختلف می‌توانند عملکرد قیر را بهبود دهند یا به عملکرد قیر خالص نزدیک باشند. استفاده از این نمونه‌ها از این نظر پیشنهاد می‌شود که با افزودن آن‌ها به قیر خالص، از دو افزودنی ضایعاتی و مضر برای طبیعت و همین‌طور تجدیدپذیر استفاده می‌شود و تا ۱۴ درصد جای قیر خالص را پر می‌کند. به این ترتیب، قیر کمتری مصرف می‌شود و مشکل این مواد ضایعاتی مضر هم به شکل مناسبی حل خواهد شد.

#### ۶. تشکر و قدردانی

لازم است که از شرکت "پالایش حصار مهران" به دلیل حمایت و پشتیبانی از این مقاله، قدردانی و تشکر به عمل آید.

می‌کند. لذا، مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد. نمونه‌های حاوی لیگنین و WEO دارای سختی کمتر و m-value بیشتری نسبت به قیر خالص هستند. به این دلیل که روغن اثر کاهندگی بیشتری در سختی قیر می‌گذارد و اثر افزایشی لیگنین را در سختی خنثی می‌کند. بنابراین، در دمای کم، مقاومت بیشتری خواهند داشت. ۵. نمونه‌های قیر خالص، L5، L5W4 و L10W4 در درجه عملکردی PG64-22 قرار می‌گیرند. همچنین، نمونه W4 دارای درجه عملکردی PG58-22 است و نمونه L10 نیز دارای درجه عملکردی PG70-16 می‌باشد.

۶. با بررسی نتایج آزمایش MSCR می‌توان متوجه شد که افزودن لیگنین تأثیر مثبتی در شیارشدگی قیر دارد و هر چقدر درصد افزوده شده بیشتر باشد، این تأثیر بیشتر خواهد بود. همچنین، افزودن روغن موتور سوخته تأثیر منفی در تغییر شکل دائمی خواهد گذاشت. از طرف دیگر، نمونه L5W4 عملکردی تقریباً مشابه با قیر خالص را از

#### ۷. مراجع

- Azahar, W., Bujang, M., Putra Jaya, R., Hainin, M. R., Mohamed, A., Ngadi, N. and Jayanti, D. 2016. "The potential of waste cooking oil as bio-asphalt for alternative binder- An overview". J. Teknol., 78. <https://doi.org/10.11113/jt.v78.8007>
- Ben-Iwo, J., Manovic, V. and Longhurst, P. 2016. "Biomass resources and biofuels potential for the production of transportation fuels in Nigeria". Renew. Sustain. Ener. Rev., 63: 172-192. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.050>
- Biermann, C. J. 1993. "Essentials of pulping and papermaking". Academic Press.
- Dedene, C. D. and You, Z. 2014. "The performance of aged asphalt materials rejuvenated with waste engine oil". Int. J. Pavement Res. Technol., 7: 145-152. [https://doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2014.7\(2\).145](https://doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2014.7(2).145)
- Fernandes, S., Silva, H. M. and Oliveira, J. R. 2019. "Mechanical, surface and environmental evaluation of stone mastic asphalt mixtures with advanced asphalt binders using waste materials". Road Mater. Pavement Design, 20(2): 316-333.
- Gao, J., Wang, H., Liu, C., Ge, D., You, Z. and Yu, M. 2020. "High-temperature rheological behavior and fatigue performance of lignin modified asphalt binder". Constr. Build. Mater., 230: 117063.
- Gómez-Fernández, S., Ugarte, L., Calvo-Correas, T., Peña-Rodríguez, C., Corcuera, M. A. and Eceiza, A. 2017. "Properties of flexible polyurethane foams containing isocyanate functionalized kraft lignin". Industrial Crops Products, 100: 51-64. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.02.005>
- Hill, B., Oldham, D., Behnia, B., Fini, E., Buttlar, W. and Reis, H. 2018. "Evaluation of low temperature viscoelastic properties and fracture behavior of bio-asphalt mixtures". Int. J. Pavement Eng., 19(4): 362-369. <https://doi.org/10.1080/10298436.2016.1175563>
- Liu, S., Peng, A., Wu, J. and Zhou, S. B. 2018. "Waste engine oil influences on chemical and rheological properties of different asphalt binders". Constr. Build. Mater., 191: 1210-1220. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.126>

- Maceiras, R., Alfonsín, V. and Morales, F. J. 2017. "Recycling of waste engine oil for diesel production". *Waste Manag.*, 60: 351-356. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.08.009>
- Mamat, R., Hainin, M. R., Hassan, N., Rahman, N., M. Warid, M. N. and Idham, M. 2015. "A review of performance asphalt mixtures using bio-binder as alternative binder". *J. Teknol.*, 77. <https://doi.org/10.11113/jt.v77.6681>
- Movilla-Quesada, D., Raposeiras, A. C., Muñoz, O. and Castro-Fresno, D. 2017. "Reduction in the use of mineral aggregate by recycling cellulose ashes to decrease the aging of hot asphalt mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 143: 547-557. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.154>
- Norgbey, E., Huang, J., Hirsch, V., Liu, W., Wang, M., Ripke, O. ... and Nkrumah, P. 2020. "Unravelling the efficient use of waste lignin as a bitumen modifier for sustainable roads". *Constr. Build. Mater.*, 230: 116957. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116957>
- Pelitli, V., Doğan, Ö. and Köroğlu, H. J. 2017. "Waste oil management: Analyses of waste oils from vehicle crankcases and gearboxes". *Global J. Environ. Sci. Manag.*, 3(1): 11-20. <https://doi.org/10.22034/gjesm.2017.03.01.002>
- Pérez, I., Pasandín, A. R., Pais, J. C. and Pereira, P. A. 2019. "Feasibility of using a lignin-containing waste in asphalt binders". *Waste Biomass Valorization*, 11: 3021-3034.
- Qian, Y., Zhong, X., Li, Y. and Qiu, X. 2017. "Fabrication of uniform lignin colloidal spheres for developing natural broad-spectrum sunscreens with high sun protection factor". *Industrial Crops Products*, 101: 54-60. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.03.001>
- Qiu, Y., Ding, H., Rahman, A. and Wang, W. 2018. "Damage characteristics of waste engine oil bottom rejuvenated asphalt binder in the non-linear range and its microstructure". *Constr. Build. Mater.*, 174: 202-209. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.056>
- Qurashi, I. A. and Swamy, A. K. 2018. "Viscoelastic properties of recycled asphalt binder containing waste engine oil". *J. Clean. Prod.*, 182: 992-1000. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.237>
- S.Y. Lin, C.W. Dence, *Methods in lignin chemistry*, Springer Science & Business Media 2012
- Su, N., Xiao, F., Wang, J., Cong, L. and Amirkhanian, S. 2018. "Productions and applications of bio-asphalts—A review". *Constr. Build. Mater.*, 183: 578-591. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.118>
- T. Shoukat, P.J. Yoo, *Rheology of Asphalt Binder Modified with 5W30 Viscosity Grade Waste Engine Oil*, *Applied Sciences* 8(7) (2018) 1194
- Villanueva, A., Ho, S. and Zanzotto, L. 2008. "Asphalt modification with used lubricating oil". *Can. J. Civ. Eng.*, 35: 148-157. <https://doi.org/10.1139/L07-092>
- Wang, H. and Derewecki, K. 2013. "Rheological properties of asphalt binder partially substituted with wood lignin". In: *Airfield and Highway Pavement 2013, Sustainable and Efficient Pavements*, pp. 977-986.
- Xue, Y., Wu, S., Cai, J., Zhou, M. and Zha, J. 2014. "Effects of two biomass ashes on asphalt binder: Dynamic shear rheological characteristic analysis". *Constr. Build. Mater.*, 56: 7-15. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.075>