

## بررسی رفتار رئولوژیکی قیرهای اصلاح شده با خاکستر ضایعات صنعتی

### مقاله پژوهشی

مجید ستاری، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران  
علیرضا عاملی\*، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران  
سید روح اله معافی مدنی، گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی رحمان، رامسر، مازندران، ایران  
\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Amelii@gmail.com

دریافت: ۹۹/۰۱/۲۰ - پذیرش: ۹۹/۰۶/۲۰

صفحه ۱۸-۱

### چکیده

هدف از این مقاله بررسی افزودنی خاکستر ذغال سنگ و خاکستر پوسته برنج بر خواص رئولوژیکی و عملکردی قیر می باشد. در این تحقیق از خاکستر ذغال سنگ و خاکستر پوسته برنج به عنوان افزودنی در درصد‌های (۰٪، ۲٪، ۴٪، ۶٪ و ۸٪) در قیر استفاده شد. جهت بررسی خصوصیات عملکردی قیر آزمایشات درجه نفوذ، نقطه نرمی، مقاومت خالصیت انگمی، حساسیت دمایی، رئومتر برش دینامیکی، رئومتر تیرچه خمشی، ویسکومتر دورانی و آزمایش خزش-باربرداری با تنش چندگانه (MSCR) انجام شد. نتایج نشان داد نتایج نشان داد پارامتر  $G^*/Sind$  با افزودن مقادیر خاکستر پوسته برنج افزایش می یابد. در حالیکه افزودن خاکستر ذغال سنگ سبب کاهش مقدار پارامتر  $G^*/Sind$  می گردد و به ازای افزایش درصد افزودنی روند کاهش برای پارامتر شیارشدگی اتفاق می افتد. همچنین اضافه نمودن خاکستر پوسته برنج سبب کاهش مقادیر  $G^*.Sind$  و اضافه نمودن خاکستر ذغال سنگ سبب افزایش مقادیر  $G^*.Sind$  می گردد. پارامتر  $Jnr$  با افزودن خاکستر پوسته برنج کاهش می یابد. مقادیر کمتر  $Jnr$  نشان دهنده مقاومت بیشتر مخلوط ساخته شده با آن قیر یا حساسیت کمتر مخلوط نسبت به شیارشدگی می باشد. نتایج مقادیر بهتری را برای افزودنی خاکستر پوسته برنج نسبت به خاکستر ذغال سنگ نشان می دهد.

واژه‌های کلیدی: رئولوژی قیر، خاکستر پوسته برنج، خاکستر ذغال، ضایعات صنعتی

### ۱- مقدمه

مخلوط‌های آسفالتی ایفا می کند. از آنجا که قیر آسفالت یکی از اجزای اصلی آسفالت مخلوط گرم است که در روسازی راه‌ها و فرودگاه‌ها استفاده می شود، اصلاح قیر روشی موثر برای افزایش خواص مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی است (Fini, 2012, Lesueur, 2005) در سال‌های اخیر، اصلاح‌کننده‌های آسفالت از دسته‌های مختلفی از جمله محصولات لاستیک بازیافتی، پرکننده، فیبرها، کاتالیزورها، پلیمرها (طبیعی و مصنوعی) و پرکننده به عنوان اصلاح کننده قیر به کار گرفته شده اند تا خواص قیر آسفالتی را افزایش دهند (Rusbintardjo et al, 2013) انتخاب یک تعدیل کننده مناسب به عوامل مختلفی از جمله شرایط جغرافیایی، تسهیلات موجود در کشورهای مختلف، مسایل اقتصادی، تولید تغییردهنده و سازگاری محیطی بستگی دارد (Ziari et al, 2015). تحقیقات زیادی باید بر روی استفاده

به دلیل هزینه‌های بالای ساخت جاده، محققان باید طراحی ترکیب صحیح و مواد مناسب را برای افزایش کارایی ساخت جاده و افزایش عمر خدمات پیاده‌رو پیدا کنند (Serin et al, 2012). افزایش باره‌ای محوری، حجم ترافیک، ساخت و خطاهای طراحی باعث ایجاد خسارات عمده‌ای در روسازی آسفالتی از جمله شیارشدگی، خستگی و ترک خوردگی دمای پایین می شود که عملکرد روسازی راه را کاهش می دهد (Sengoz and Topal, 2005) این آسیب‌ها منجر به افزایش هزینه‌های نگهداری و کاهش در عمر خدماتی جاده می شوند. علاوه بر این، خواص قیر مانند رفتار ویسکوالاستیک، استحکام و سرعت تغییر شکل پلاستیک از نزدیک به این آسیب‌ها مرتبط هستند (Liang et al, 2015) قیر به دلیل ویژگی‌های ویسکوالاستیک آن، به هم پیوستگی و استحکام نقش مهمی در عملکرد

زمین‌های مجاور بدون ملاحظات زیست‌محیطی ذخیره شده‌است. با توجه به این که زمین‌های کشاورزی شالیزاری زیادی در ایران به ویژه در شمال ایران وجود دارد، تولید برنج در این منطقه بسیار بالا است و همچنین سوزاندن پوسته برنج منجر به تولید مقدار زیادی خاکستر پوسته برنج می‌شود. اگرچه خاکستر پوسته برنج به طور گسترده در بسیاری از زمینه‌ها مانند ساخت‌وساز بتن کاربرد دارد، استفاده از خاکستر پوسته برنج در مخلوط‌های آسفالت هنوز در مراحل اولیه است. همچنین مقدار زیادی خاکستر ضایعات زغال‌سنگ در این منطقه ذخیره می‌شود و باعث نگرانی‌های زیست‌محیطی بسیاری می‌شود. بسیاری از جنبه‌های استفاده از این پرکننده در مخلوط‌های آسفالت مطالعه نشده است. علی و همکاران (Ali et al, 1996) اثر خاکستر بادی بر خواص مکانیکی مخلوط‌های بتن آسفالتی را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که خاکستر بادی تأثیر زیادی بر عمق شیار و شاخص وضعیت روسازی مخلوط‌های بتن آسفالتی ندارد، اما میزان ترک خوردگی سطح روسازی را افزایش می‌دهد. چرچیل و همکاران (Churchill, Amirkhanian, 1999) اثر خاکستر بادی و خاکستر کف را به عنوان مواد جایگزین برای جایگزینی سنگ دانه‌های خوب در مخلوط آسفالت بررسی کردند و دریافتند که هر دو خاکستر بادی و خاکستر پایین اثرات مضر و زیان کمتری بر روی مخلوط‌های آسفالتی دارند، اما می‌تواند الزامات روسازی را در مقادیر مناسب برآورده کند. لاو و همکاران (Lav et al, 2006) خواص مواد پایه روسازی را که حاوی مقدار بالای خاکستر بادی کلاس F ثابت شده توسط سیمان بود، مطالعه کردند. (Celikl, 2008) امکان‌پذیری خاکستر بادی را برای جایگزینی سنگ دانه‌های ریز با مقادیر کم در بتون مخلوط آسفالتی گرم مورد بررسی قرار دادند و عملکرد مارشال آسفالت را مورد بررسی قرار دادند. هوانگ و همکاران (Huang et al, 2010) از پنج پرکننده سیمانی (از جمله خاکستر بادی) برای بهبود مقاومت به آب مخلوط‌های آسفالتی گرم مخلوط استفاده کرد و دریافتند که فیلرهای سیمانی از جمله خاکستر بادی می‌توانند در کاهش حساسیت مخلوط‌های آسفالتی موثر باشند. شارما و همکاران (Sharma et al, 2010) اثر خاکسترهای بادی مختلف بر عملکرد مخلوط‌های آسفالت را بررسی کردند و اعلام کردند که خاکسترهای بادی برای استفاده در مخلوط‌های آسفالتی مناسب هستند و می‌توانند عملکرد بهتری نسبت به پرکننده معمولی در مقدار ۷ درصد داشته باشند. اسپنوبی و همکاران (Osinubi et al, 2011) عملکرد روسازی‌های آسفالتی اصلاح شده (RAP<sup>۳</sup>) را با استفاده از خاکستر زغال شده و

مجدد از مواد زائد در مخلوط بتن آسفالتی انجام شود، و تأثیر استفاده از مواد زائد بر عملکرد مخلوط‌های بتن آسفالتی باید مورد ارزیابی قرار گیرد (Kandhal, 1993) افزایش نگرانی‌ها در مورد حفاظت از محیط‌زیست، حفاظت از انرژی و مسائل اقتصادی محققان را ترغیب کرده است که دیگر مواد اولیه جایگزین را در صنعت روسازی پیدا کنند. تحقیقات نشان می‌دهند که مواد زائد را می‌توان به طور موفقیت آمیزی به عنوان پرکننده، سنگ دانه‌ها و اصلاح‌کننده قیر در مخلوط‌های آسفالتی به کار برد (به عنوان مثال، صدف، سنگدانه‌های بازیافت شده، شیشه، آجرهای زباله، لاستیک بازیافتی و آسفالت بازیافتی) (Arabani et al, 2017; Araban et al, 2015; Gómez et al, 2015; Araban et al, 2010; Huang et al, 2017). سوزاندن زیست‌توده جامد به طور عمده دو محصول جانبی را تولید می‌کند که خاکستر بادی و پایی هستند. به دلیل افزایش تولید انرژی توسط این منبع، دفع خاکستر تولید شده باعث ایجاد مشکلات زیست‌محیطی و اقتصادی شده است. همچنین انواع مختلف خاکستر به طور قابل توجهی در مخلوط‌های آسفالت و بتنی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Melotti et al, 2013) خاکستر برنج (RHA<sup>۱</sup>) محصول جانبی حاصل از احتراق برنج است که برای تامین سوخت کارخانه‌های آسیاب برنج مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مساله منجر به نگرانی‌های متعددی از جمله مشکلات زیست‌محیطی و اقتصادی می‌شود. در حالی که پوسته برنج از تولید برنج تولید می‌شود که در ایران بسیار شایع است. پوسته برنج قبل از اینکه فروخته شود و مصرف شود، در فرآیند کشاورزی برداشته می‌شود. این شرکت ۲۰٪ از ۵۰۰ میلیون تن برنج تولید شده در جهان را تشکیل می‌دهد.

سال‌ها از دست اندرکاران صنعت حجم عظیمی از زغال سنگ (CWA<sup>۲</sup>) را در محل‌های دفن زباله و وسیع ذخیره می‌کنند که باعث گرد و غبار می‌شوند و منجر به آلودگی آب و خاک می‌شوند. سوزاندن زغال سنگ حجم زیادی دی‌اکسید کربن، آلاینده‌ها مانند مونواکسید کربن، دوده، ذرات غبار رادیواکتیو و اکسید نیتروژن را تولید می‌کند. بنابراین باعث نگرانی‌های زیست‌محیطی و اقتصادی می‌شود و توجه مردم را به خود جلب می‌کند.

یک منطقه جنگلی در شمال ایران وجود دارد که در آن یک معدن زغال سنگ وجود دارد. برای سال‌ها یک زباله زغال سنگ در آنجا ذخیره شد و یک منطقه وسیع با این مواد اشغال شد. مقدار زغال سنگ که در آنجا ذخیره می‌شود، ۵۵۷ میلیون تن برآورد می‌شود (Arabani, 2019) بنابراین بیش از ۲ میلیون تن پسماند این معدن در بیش از ۲ هکتار از

نتیجه گرفتند که آزمون‌های تغییر شکل پلاستیک و مارشال قابل مقایسه با دو مخلوط بتن آسفالتی هستند. از طرف دیگر، شارما و همکاران (Sharma et al, 2010) گزارش داده‌اند که خاکستر بادی با اکسید کلسیم بالا برای کنترل خواص مقاومتی مخلوط‌های بتن آسفالتی موثر است. همچنین، آن‌ها بیان کردند که تا حدود ۷ درصد از خاکستر بادی را می‌توان به عنوان پرکننده معدنی در HMA ترکیب کرد. علاوه بر این، چاندر و همکاران (Chandra et al, 2013) کاربرد احتمالی سه پسماند صنعتی یعنی گرانیت و گرد سنگ مرمر را بررسی می‌کنند. صنعت سنگ و خاکستر بادی از نیروگاه‌های حرارتی به عنوان پرکننده در HMA و مقایسه نتایج با مخلوط‌های دیگر که با آهک هیدراته و گرد و غبار سیمان معمولی از کوارتزیت در هند تهیه شده بودند، مقایسه شد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که گرد و غبار سنگ مرمر موثرترین پرکننده هاست، به طوری که HMA با گرد و غبار مرمر کم‌ترین مقدار قیر بهینه را دارند.

## ۲- روش تحقیق

در این پژوهش تأثیر درصد مختلف خاکستر ذغال سنگ و خاکستر پوسته برنج به عنوان افزودنی بر عملکرد قیر مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق جهت ارزیابی تأثیر خاکستر ذغال سنگ و خاکستر پوسته برنج بر خصوصیات رئولوژی قیر آزمایشات درجه نفوذ، نقطه نرمی، مقاومت خاصیت انگمی، حساسیت دمایی، رئومتر برش دینامیکی، رئومتر تیرچه خمشی، ویسکومتر دورانی و آزمایش خزش-باربرداری با تنش چندگانه (MSCR<sup>6</sup>) روی نمونه‌های شاهد و نمونه‌های حاوی افزودنی انجام شد.

## ۲-۱- قیر

در این پژوهش از نوع قیر خالص ۶۰/۷۰ بود که از شرکت نفت پاسارگاد تهیه شد و مشخصات فیزیکی آن در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی قیر

نوع آزمایش	استاندارد	نتیجه آزمایش
نقطه نرمی	ASTM D36	۴۷ درجه سانتیگراد
درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه	ASTM D5	۶۷ دسی میلیمتر
درجه اشتعال	ASTM D92	۳۰۴ درجه سانتیگراد
شکل پذیری در دمای ۲۵	ASTM D113	بیش از ۱۰۰ سانتی‌متر
چگالی	ASTM D70	۱/۰۴۵ گرم بر سانتی‌متر
افت حرارتی	ASTM D6	۰/۰۵ درصد
قابلیت حل	ASTM D4	۹۹/۵ درصد

نسبت اجزا آن در خصوصیات تراکمی و فشردگی در ساخت جاده مورد مطالعه قرار دادند. شیواپراساد و همکاران (Shivaprasad et al, 2011) رطوبت و حساسیت شیارافتادگی مخلوط‌های آسفالتی گرم با حجم کم (HMA<sup>5</sup>) و مخلوط‌های آسفالتی گرم با مخلوط گرم (WMA<sup>4</sup>) را مقایسه کردند که هر دو شامل دانه‌های مرطوب، خاکستر زغال و سفال‌های سقف دار هستند. سوبولو و همکاران (sobolev et al, 2014) اثر خاکستر بادی بر روی خواص رئولوژیکی و گرانیروی دینامیک را بررسی کردند و دریافتند که افزودن خاکستر بادی در مخلوط‌های آسفالت می‌تواند عملکرد مکانیکی آن را بهبود بخشد. اگر چه تحقیقات زیادی در مورد استفاده از خاکستر پوسته برنج در بسیاری از مناطق کاری انجام شد، اما تحقیقات کمی در نوشته‌ها در مورد استفاده از خاکستر پوسته برنج در بتن آسفالتی وجود دارد. سارگین و همکاران (Sargin et al, 2013) قابلیت استفاده از خاکستر پوسته برنج را به عنوان پرکننده معدنی در HMA<sup>5</sup> مورد بررسی قرار داده‌اند. برای این منظور، چهار نمونه بتنی با استفاده از سنگ آهک در نسبت‌های مختلف (۴٪، ۵٪، ۶٪ و ۷٪) به عنوان پرکننده معدنی تولید شدند. مقدار بهینه قیر و مقدار پایداری مارشال با آزمایش برای نمونه‌ها تعیین شد. انتخاب مجموعه آسفالت حاوی ۵٪ پرکننده که بالاترین پایداری را به خود اختصاص داده‌است. خاکستر پوسته برنج به میزان ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ تغییر کرد. پس از آن آزمایش خاکستر پوسته برنج بر روی نمونه‌های تولیدی انجام شد و نتایج ارزیابی شدند. در نتیجه، به خصوص در مناطقی که در آن زباله خاکستر پوسته برنج گسترده وجود دارد، می‌توان از آن به جای پرکننده معدنی در مخلوط بتن آسفالتی به عنوان پرکننده معدنی استفاده کرد. مطالعه مقایسه‌ای بین گرد و غبار سنگ مرمر (که مواد زائد صنعتی است) و گرد و غبار سنگ آهک به عنوان پرکننده توسط و تیزی و کاراشیان انجام شده‌است (Terzi, Karasahin, 2007). آن‌ها

## ۲-۲- خاکستر پوسته برنج

پوسته برنج از یک کارخانه تولید برنج محلی از استان مازندران بخش شمالی ایران جمع‌آوری شد.

شکل ۱، پوسته برنج و خاکستر پوسته برنج مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد. خاکستر پوسته برنج مورد استفاده برای این تحقیق توسط سوزاندن برنج در ۶۵۰ درجه سانتیگراد در کوره به مدت ۲ ساعت تولید شد. خاکستر در یک آسیاب تویی برای ۱۵ دقیقه ساخته شد و سپس از میان

اندازه الک ۰,۰۷۵ میلی متر عبور کرد. گزارش شده است که شرایط احتراق بر روی سطح خاص خاکستر برنج تاثیر می‌گذارد. بنابراین تولید بیش‌ترین واکنش پذیری خاکستر به دما و محیط بستگی دارد. بیش‌ترین مقدار واکنش پذیری با سوزاندن پوسته برنج در دمای حدود ۵۰۰ - ۷۰۰ درجه سانتی گراد بدست می‌آید. (Arabani, 2019)



شکل ۱. پوسته برنج و خاکستر پوسته برنج

## ۲-۳- خاکستر ضایعاتی دغال سنگ

براساس نتایج مطالعات قبلی، CWA با منفجر کردن دسته‌ای از ضایعات زغال‌سنگ خام (CW) در ۷۵۰ درجه سانتی گراد به مدت ۵ ساعت بدست آمد (Modarres و Ayar, ۲۰۱۴). این CW از محل دفن زباله یک کارخانه زغال‌سنگ واقع در شمال ایران به دست آمد. در این کارخانه

زغال شویی، زغال‌سنگ یا با استفاده از روش شناورسازی فرآوری می‌شود. مواد زاید مورد استفاده در این تحقیق، محصول فرعی روش شناورسازی است که ضایعات درشت دانه تر نسبت به شناورسازی تولید می‌کند.



شکل ۲. ضایعات دغال سنگ

## ۲-۴- آماده سازی نمونه‌ها

در این تحقیق از خاکستر پوسته برنج و خاکستر ذغال سنگ به عنوان اصلاح کننده قیر استفاده شد. جهت اصلاح قیر، قیر خالص تا دمای حدوداً ۱۶۰ درجه سانتیگراد گرم گردید. سپس خاکستر پوسته برنج به قیر اضافه گردید و با هم زن با برش بالا با دور ۲۵۰۰ دور در دقیقه به مدت ۳۰ دقیقه مخلوط گردید. ۵ درصد خاکستر پوسته برنج جهت اصلاح قیر استفاده گردید: (۰/۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸) نسبت به وزن قیر. جهت ساخت نمونه های اصلاح شده حاوی خاکستر ذغال سنگ نیز طبق روش قبل استفاده شد.

خواص فیزیکی متداول قیر پایه و قیر اصلاح شده با درصدهای مختلف RHA و CWA با آزمایش های مختلف از جمله خاصیت انگمی، نقطه نرمی و درجه نفوذ ارزیابی شدند. نقطه نرمی قیر مطابق با ASTM - D ۳۶ تعیین شد. همچنین تست خاصیت انگمی مطابق با استاندارد ASTM ۱۱۳D انجام شد. درجه نفوذ می تواند نشان دهنده سختی قیر باشد، که مطابق با ASTM - d ۵ انجام شد. تست ویسکوزیته با استفاده از ویسکومتر چرخشی بروکفیلد برای اندازه گیری ویسکوزیته قیرهای اصلاح نشده و اصلاح شده در دمای ۱۳۵ درجه سانتی گراد مطابق با استاندارد ASTM ۴۴۰۲D انجام شد. شاخص نفوذ (PI) به عنوان معیاری برای حساسیت دمایی قیرها در نظر گرفته می شود. حساسیت دمایی قیرهای اصلاح شده با استفاده از نتایج بدست آمده از آزمایش درجه نفوذ و نقطه نرمی با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد.

## ۳- روش کار آزمایش

### ۳-۱- آزمایش پایه ای قیر

(۱)

$$PI = \frac{1952 - 500 \log(\text{Pen}25) - 20 \times SP}{50 \log(\text{Pen}25) - SP - 120}$$

### رئومتر برش دینامیکی

به منظور مشخص کردن ویژگی های اساسی ریولوژیکی قیر، تست DSR انجام شد. این تست می تواند به درستی رفتار الاستیک و ویسکوز قیر را در دماهای متوسط تا دماهای بالا توصیف کند. مدول مرکب ( $G^*$ ) و زاویه فاز (d) پارامترهای اصلی ویسکوالاستیک هستند که در این تست اندازه گیری می شوند. پارامتر G اطلاعاتی را در مورد مقاومت قیر به تغییر شکل هنگامی که در معرض بار برشی قرار می گیرد، فراهم می کند. پارامتر d تاخیر زمانی بین تنش های برشی اعمال شده و پاسخ های کرنش برشی را نشان می دهد. تحلیل این دو پارامتر می تواند رفتار قیر مانند پتانسیل شیارشدگی را پیش بینی کند. پارامتر  $G^* / \text{Sind}$  که پارامتر شیارشدگی نامیده می شود مقاومت شیارشدگی قیر را نشان می دهد. نمونه های قیر با ضخامت ۱ mm و قطر ۲۵ mm با فرکانس ۱۰ rad / s و در دمای ۴۶، ۵۲، ۵۸، ۶۴، ۷۰ و ۷۶ درجه سانتی گراد با توجه به روش آزمون استاندارد ASTM ۷۱۷۵D، تست شدند. مقدار  $G / \text{Sind}$  برای قیرهای پیرنشده توصیه می شود که با توجه به استاندارد،

ASTM - DV1۷۵ بیش از ۱ کیلو پاسکال باشد.

### آزمایش تنش خزشی دوگانه و باربرداری (MSCR)

جهت ارزیابی حساسیت قیرها در برابر تغییر شکل دائمی یا شیارشدگی، روش MSCR معرفی شده است. روند آزمایش بر این اساس است که یک نمونه قیر به قطر ۲۵ میلی متر و ضخامت ۱ میلی متر در معرض ۱۰ سیکل بارگذاری با ۱ ثانیه بارگذاری خزشی و ۹ ثانیه استراحت در سطوح تنش ۱۰۰ و ۳۲۰۰ پاسکال در دمای عملکردی زیاد (دمای ۶۴ درجه سلسیوس) با استفاده از دستگاه رئومتر برش دینامیک قرار می گیرد. قبل از انجام آزمایش نمونه قیر، پیرشده کوتاه مدت (RTFO) میشود. درصد بازگشت کرنش و مدول غیر قابل بازگشت بعد از ۱۰ سیکل بارگذاری محاسبه خواهد شد. (آشتو، ۲۰۱۰). شماتیک دستگاه در شکل ۳ آورده شده است:



شکل ۳. دستگاه رئومتر برش دینامیکی

براساس فرمولهای ارائه شده در زیر محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon_{10} = \varepsilon_r - \varepsilon_0$$

$$PR = \frac{\varepsilon_{10} - \varepsilon_0}{\varepsilon_1} \times 100$$

$$J_{nr} = ave. \frac{\gamma_u}{\tau}$$

خزشی نمونه های قیری به صورت درصد اختلاف در مدول غیرقابل بازگشت می باشد. این پارامتر، مقدار افزایش در مقدار پارامتر  $J_{nr}$  را وقتی تنش از ۱۰۰ پاسکال به ۳۲۰۰ پاسکال افزایش مییابد، نشان میدهد. در عمل، این پارامتر مقدار حساسیت قیر به شیارشدگی زمانی که بارهای ترافیکی مختلف به ساختار مخلوط یا دمای غیرمنتظره در سطح روسازی اعمال شود، نشان میدهد (اندرسون و همکاران، ۲۰۱۰؛ دیانجلو، ۲۰۱۰).

#### رئومتر تیرچه خمشی

از آنجاییکه قیر در دماهای پایین بسیار سفت و سخت است، خصوصیات قیر در آن دماها را نمی توان با استفاده از رئومتر دینامیکی برشی بدست آورد. بدین منظور از آزمایش جدیدی که در آن رفتار خزشی بدست می آید استفاده می‌شود. در رئومتر تیرچه خمشی، تیرچه ساخته شده از قیر در سردترین دمایی که قیر مورد نظر در دوره عمرش تحمل

مقدار کرنش اعمالی، درصد بازگشت کرنش، و مقدار مدول غیر قابل بازگشت برای هر ۱۰ سیکل در هر سطح تنش

(۲)

(۳)

(۴)

مقدار کرنش اولیه ( $\varepsilon_0$ ) در شروع بارگذاری خزشی در هر سیکل و مقادیر کرنش در انتهای هر سیکل ( $\varepsilon_c$ ) تعیین میگردد. اختلاف دو کرنش به عنوان کرنش اعمالی است ( $\varepsilon_1$ ) به طور مشابه، مقدار کرنش ( $\varepsilon_r$ ) در انتهای باربرداری در هر سیکل و کرنش اعمالی بعد از باربرداری ( $\varepsilon_{10}$ ) در انتهای هر سیکل باربرداری محاسبه میشود. معادله (۳) نیز میزان درصد بازگشت کرنش را نشان می دهد.

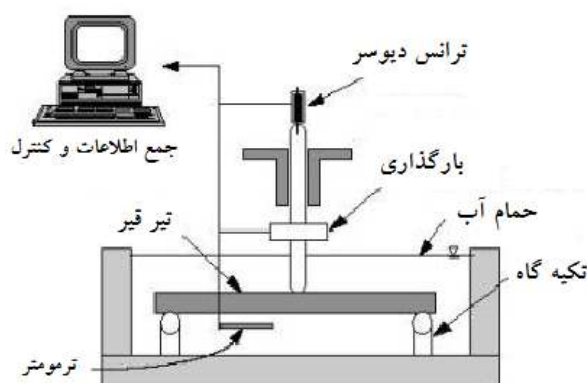
مقدار مدول غیرقابل بازگشت ( $J_{nr}$ ) همان طور که در معادله (۴) آمده است، نسبت مقدار کرنش باقیمانده در نمونه بعد از بارگذاری و باربرداری به تنش اعمالی است که مقدار مقاومت نمونه را در برابر تغییرشکل دائمی نشان میدهد. پارامتر  $J_{nr}$  مقدار کرنش غیرقابل بازگشت در انتهای ۹ ثانیه باربرداری میباشد. پارامتر  $J_{nr}$  تنش برشی اعمالی میباشد. مقدار مدول غیرقابل بازگشت توانایی پیش بینی مقاومت شیارشدگی مخلوط آسفاتی را دارد (واساژ و همکاران، ۲۰۱۱؛ حافظ و کمال، ۲۰۱۴). حساسیت نسبت به تنش

بایستی در داخل فریزر قرار داد. پس از جداسازی نمونه از قالب آن را به مدت ۶۰ دقیقه در داخل حمام رئومتر قرار داده تا دما به وضعیت تعادل برسد. پس از این مدت تیرچه قیری بر روی تکیه گاهها گذاشته شده و باری حدود ۳ تا ۴ گرم بر آن وارد می شود. سپس بار ۱۰۰ گرمی بصورت اتوماتیک به مدت ۱ ثانیه توسط دستگاه وارد می شود و به مدت ۲۰ ثانیه برداشته می شود. پس از این مدت بار ۱۰۰ گرمی به مدت ۲۴۰ ثانیه اعمال می شود و افت و خیز حاصل نیز همزمان اندازه گیری می شود (شکل ۳-۱۰ و ۳-۱۱). از منحنی تغییر شکل (افت و خیز) بر زمان بارگذاری می توان سختی خزش و مقدار متر را بدست آورد. بر اساس آئین نامه شارپ مقدار متر در زمان ۶۰ ثانیه بایستی برابر یا بیش از ۰,۳ باشد.

می کند، مورد آزمایش قرار می گیرد. اساس این آزمایش بر این اساس استوار است که در دمای پایین، قیر عمدتاً رفتار الاستیک دارد. تیرچه قیری به مدت ۴ دقیقه تحت بار ثابت قرار می گیرد و مقدار افت و خیز حاصله در وسط تیرچه در تمام این مدت اندازه گیری می شود. از این آزمایش که در دمای پایین، مطابق با آب و هوای منطقه مورد نظر انجام می شود، سختی خزشی که بیانگر مقاومت آسفالت تحت اثر بار ثابت است و شیب یا نرخ خزش (متر) که بیانگر تغییر سختی با تغییرات بار اعمال شده می باشد، بدست می آید. آزمایش بدین صورت انجام می گیرد که تیرچه قیری با ریختن قیر داغ در قالب های مکعب مستطیل ساخته می شود. پس از حدود ۴۵ الی ۶۰ دقیقه قیر اضافی را با یک کاردک داغ تراشیده و نمونه را همراه قالب به مدت ۵ الی ۱۰ دقیقه



شکل ۴. رئومتر تیرچه خمشی (BBR)



شکل ۵. شمای آزمایش رئومتر تیرچه خمشی (BBR)

#### ۴-تحلیل نتایج آزمایشات

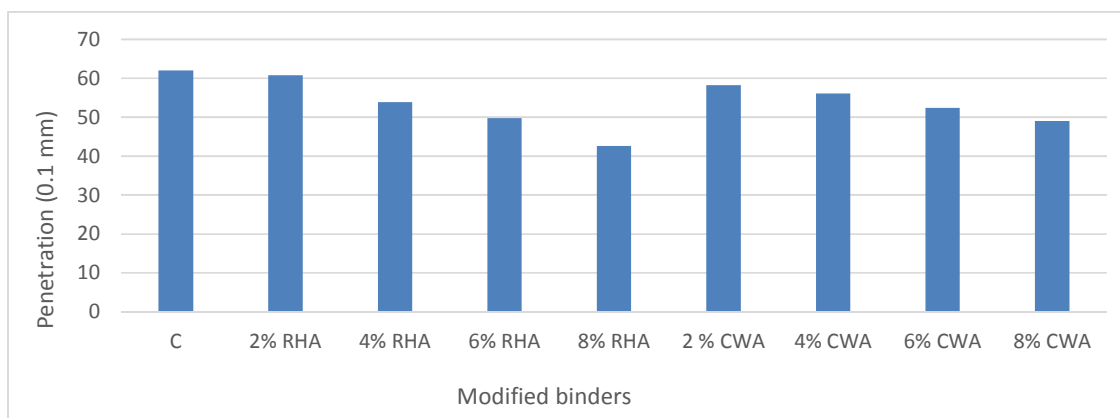
##### ۴-۱- نتایج آزمایشات قیر

همانطور که در شکل ۶ و ۷ مشاهده شد، افزودن RHA و CWA به قیر اصلی منجر به افزایش خواص رئولوژیکی قیر

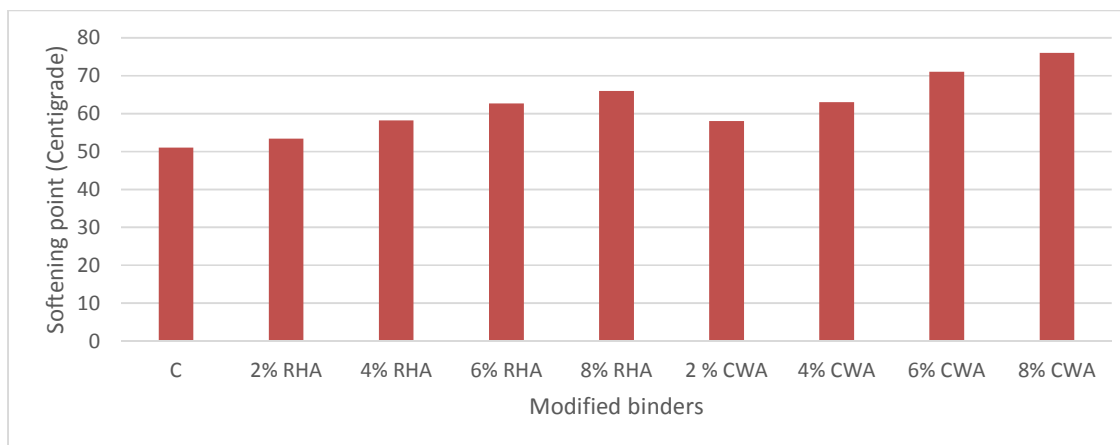
نتایج درجه نفوذ، نقطه نرمی و آزمایش شکل پذیری قیر خالص و اصلاح شده در اشکال ۶ الی ۹ نشان داده شده است.

از قیر خالص است. نتایج شاخص نفوذ قیر اصلاح شده در شکل ۹ نشان داد که با اضافه کردن RHA و CWA مقادیر شاخص نفوذ افزایش یافت. همچنین با افزودن مواد افزودنی، مقدار شاخص نفوذ نیز افزایش می‌یابد. بنابراین، با افزایش درصد RHA و CWA، حساسیت دمایی قیر کاهش یافت. قیر با شاخص نفوذ بالاتر، حساسیت دمایی کمتری را به دست می‌دهد که منجر به بهبود مقاومت شیارافتادگی و کاهش در ترک خوردگی دمای پایین می‌شود [۳۰]. می‌توان نتیجه گرفت که اصلاح کننده‌های RHA و CWA به بهبود حساسیت دمایی، عملکرد شیارشدگی و ترک خوردگی دمای پایین قیر کمک می‌کنند.

شد. با توجه به نتایج، درجه نفوذ قیر اصلاح شده کاهش یافت، در حالی که نقطه نرمی قیر افزایش یافت. ممکن است به خاطر این واقعیت باشد که CWA چگالی پایین و حجم بیشتری نسبت به پرکننده سنگ آهک دارد و منجر به کاهش نفوذ و افزایش نقطه نرمی می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت که افزودن مواد افزودنی، باعث استحکام محکم‌تر و محکم‌تر شدن مخلوط‌های آسفالت شده و مقاومت مخلوط‌های آسفالتی نسبت به شیارافتادگی، بهبود می‌دهد. نتایج نشان داد که نقطه نرمی و ویسکوزیته روند مشابهی را دارند. در واقع این دو پارامتر وابسته به یکدیگر هستند به طوری که با نقطه نرمی بالاتر، گرانروی بیشتر است. همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است، نتایج شکل پذیری قیر اصلاح شده کم‌تر

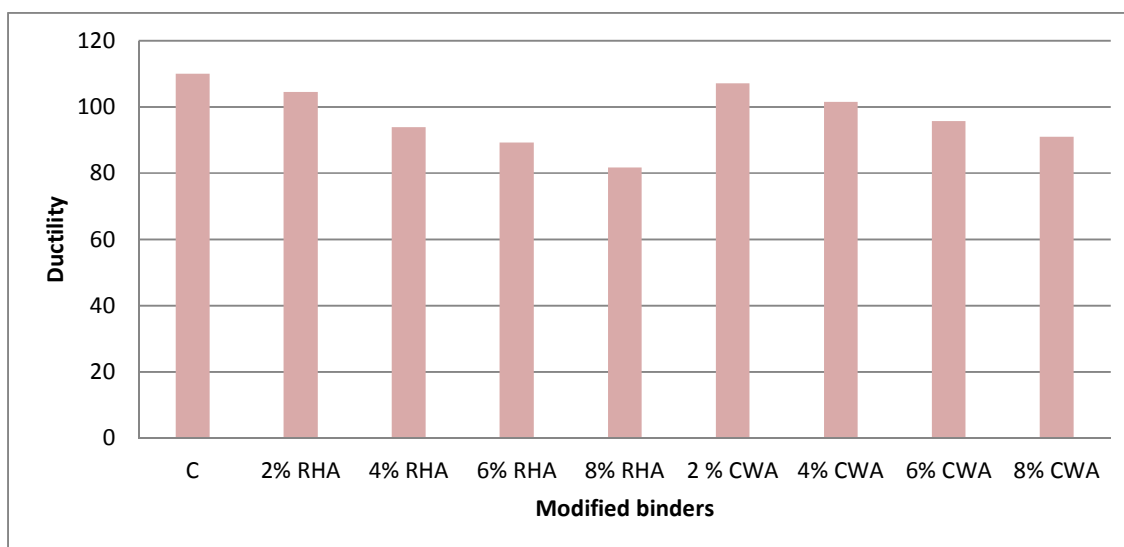


شکل ۶. نتایج آزمایش درجه نفوذ



شکل ۷. نتایج آزمایش نقطه نرمی





شکل ۸. نتایج آزمایش خاصیت انگمی



شکل ۹. نتایج آزمایش حساسیت حرارتی قیر

#### ۴-۲- نتایج رئولوژی قیر خالص و قیر حاوی افزودنی

نتایج آزمایش رئولوژی قیر در جدول (۴-۱) آورده شده است. نتایج نشان می دهد با افزایش خاکستر پوسته برنج و خاکستر ذغال سنگ ویسکوزیته قیر افزایش می یابد. به طوریکه با افزایش مقادیر بیشتر خاکستر، مقدار ویسکوزیته

روند افزایشی دارد. میزان افزایش ویسکوزیته نمونه های حاوی خاکستر پوسته برنج بیشتر از نمونه های حاوی خاکستر ذغال سنگ می باشد. شارپ حداقل مقدار ۱ کیلوپاسکال را قیرهای پیرنشده و مقدار ۲,۲ را برای قیرهای

$G^*/\sin \delta$  افزایش می یابد. به طوریکه قیر حاوی ۸٪ خاکستر پوسته برنج دارای بیشترین مقدار می باشد. شارپ حداکثر پارامتر  $G^*.\sin \delta$  را به ۵۰۰۰ کیلوپاسکال محدود نموده است. با توجه به جدول (۴-۲)، اضافه نمودن خاکستر پوسته برنج سبب کاهش مقادیر  $G^*.\sin \delta$  و اضافه نمودن خاکستر ذغال سنگ سبب افزایش مقادیر  $G^*.\sin \delta$  می گردد.

پیرشده در نظر گرفته است. با توجه به نتایج، در حالت پیر نشده، پارامتر  $G^*/\sin \delta$  با افزودن مقادیر خاکستر پوسته برنج افزایش می یابد. به طوریکه مقدار آن برای قیر حاوی ۸٪ ساسوبیت از ۳ به ۸۷ می رسد. در حالیکه افزودن خاکستر ذغال سنگ سبب کاهش مقدار پارامتر  $G^*/\sin \delta$  می گردد و به ازای افزایش درصد افزودنی روند کاهش برای پارامتر شیارشدگی اتفاق می افتد. در حالت پیرشده کوتاه مدت، با اصلاح نمودن قیر با خاکسترها مقادیر پارامتر

جدول ۲. نتایج آزمایش رئولوژی قیر

پیرشده بلندمدت (PAV)		پیرشده کوتاه مدت (RTFO)		قیر پیر نشده		نوع قیر
m-values at -12°C	Stiffness (MPa) at -12°C	$G^*.\sin \delta$ at 25°C	$G^*/\sin \delta$ at 64°C (kPa)	$G^*/\sin \delta$ at 64°C (kPa)	ویسکوزیته در دمای ۱۳۵ درجه سانتیگراد	
0.309	185	3810	2.870	1.3	2.55	قیر خالص
0.310	184	3734	3.28	1.7	2.68	RHA ۲٪
0.313	182	3672	5.21	2.2	2.71	RHA ۴٪
0.319	170	3559	5.98	2.7	2.76	RHA ۶٪
0.32	168	3100	7.1	3.2	2.82	RHA ۸٪
0.308	186	4100	2.26	1.1	2.57	۲٪ CWA
0.306	189	4200	1.43	0.85	2.60	۴٪ CWA
0.304	191	4365	1.03	0.7	2.63	۶٪ CWA
0.302	194	4423	0.65	0.5	2.66	۸٪ CWA

#### ۴-۳- نتایج آزمایش MSCR

برنج، سبب افزایش درصد بازگشت کرنش در قیر خالص می گردد. درصد بالاتر بازگشت کرنش نشان دهنده این موضوع می باشد که قیر توانایی بازگشت نسبت بیشتری از کرنش خود بعد از بارگذاری را دارد. هرچه درصد بازگشت

نتایج آزمایش MSCR برای قیرهای مختلف در جدول ۳ نشان داده شده است. درصد بازگشت کرنش برای قیرهای مختلف در دو سطح کرنش ۱۰۰ و ۳۲۰۰ پاسکال نشان داده شده است. در کل، اضافه نمودن خاکستر پوسته

و قیر خالص در دو سطح تنش می باشد. این موضوع ناشی از سختی کمتر و رفتار الاستیک کمتر این نوع نمونه می باشد. همانطور که نتایج نشان می دهد قیر اصلاح شده با ۸٪ خاکستر پوسته برنج دارای بیشترین مقدار درصد بازگشت در هر دو سطح تنش را دارد که نشان دهنده این موضوع می باشد که قیرهای اصلاح شده با خاکستر پوسته برنج دارای مقاوم بیشتری در برابر شیارشدگی دارند.

کرنش بیشتر باشد، قیر توانایی بالاتری جهت مقابله با شیارشدگی را دارد. همانطور که از نتایج پیداست، قیر خالص در مقایسه با قیر حاوی خاکستر برنج دارای مقدار بازگشت کرنش کمتری در دو سطح تنش می باشد که نشان دهنده مقاومت کمتر در برابر شیارشدگی می باشد. قیرهای اصلاح شده با خاکستر ذغال سنگ، دارای درصد بازگشت کرنش کمتری نسبت به قیرهای اصلاح شده با خاکستر پوسته برنج

جدول ۳. نتایج آزمایش MSCR

Binder	R100	R3200	Jnr100	Jnr3200	Jnrdiff
	%	%	kPa-1	kPa-1	%
Original Binder	19.57	9.87	1.86	1.96	5.38
2% RHA	20.67	9.96	1.79	1.83	2.23
4% RHA	23.85	12.82	1.52	1.71	12.50
6% RHA	32.29	16.82	1.19	1.41	18.49
8% RHA	79.66	35.25	0.31	0.51	64.52
2% CWA	19.21	9.45	1.96	2.07	5.61
4% CWA	17.42	8.23	2.091	2.21	5.69
6% CWA	15.29	5.82	2.18	2.29	5.05
8% CWA	13.37	4.23	2.27	2.5	10.13

می گردد. با توجه به مواردی که در قبل ذکر شد، مقادیر کمتر مدول غیرقابل بازگشت نشان دهنده مقاومت بیشتر قیر در برابر شیارشدگی بعد از اعمال بارگذاری می باشد. از لحاظ مخلوط آسفالتی، قیرهای دارای مقادیر کمتر (Jnr) و یا مقادیر بیشتر درصد بازگشت کرنش، نشان دهنده نقش کمتر قیر در کرنش غیرقابل بازگشت می باشد. از نقطه نظر رئولوژی قیر، مقادیر کمتر (Jnr) ممکن است از مقادیر کمتر کرنش غیرقابل بازگشت در انتهای بارگذاری در یک سطح تنش بدست می آید. اگر آنجایی که سطوح تنش در آزمایش MSCR یکسان باشد، می توان نتیجه گرفت که کرنش دائمی برای قیرهای اصلاح شده نسبت به قیرهای خالص کمتر می باشد. حساسیت قیرها نسبت به تنش های اعمالی با استفاده از پارامتر Jnr-diff. بدست می آید که از رابطه ۵ بدست می آید.

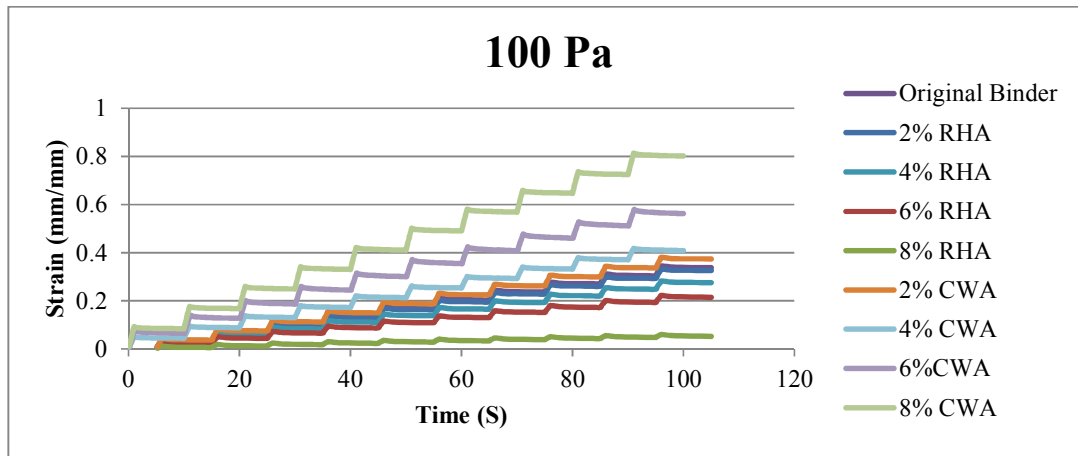
جدول ۳ مقادیر مدول غیر قابل بازگشت (Jnr) را در سطوح تنش ۱۰۰ و ۳۲۰۰ پاسکال نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که پارامتر (Jnr) با افزودن خاکستر پوسته برنج کاهش می یابد. بطوریکه قیر حاوی ۸٪ خاکستر پوسته برنج دارای کمترین مقدار (Jnr) می باشد. مقادیر کمتر (Jnr) نشان دهنده مقاومت بیشتر مخلوط ساخته شده با آن قیر یا حساسیت کمتر مخلوط نسبت به شیارشدگی می باشد. نتایج مقادیر بهتری را برای افزودنی خاکستر پوسته برنج نسبت به خاکستر ذغال سنگ نشان می دهد. با توجه به نتایج، قیر اصلاح شده با خاکستر ذغال سنگ بیشترین مقدار پارامتر (Jnr) را دارا می باشد. این مورد نشان دهنده این است که افزودنی خاکستر ذغال سنگ منجر به حساسیت قیر به شیارشدگی می گردد. همچنین، افزودن درصدهای بیشتر خاکستر ذغال سنگ سبب افزایش بیشتر پارامتر (Jnr)

$$J_{nr-diff} = \frac{J_{nr@3200Pa} - J_{nr@100Pa}}{J_{nr@3200Pa}} \times 100$$

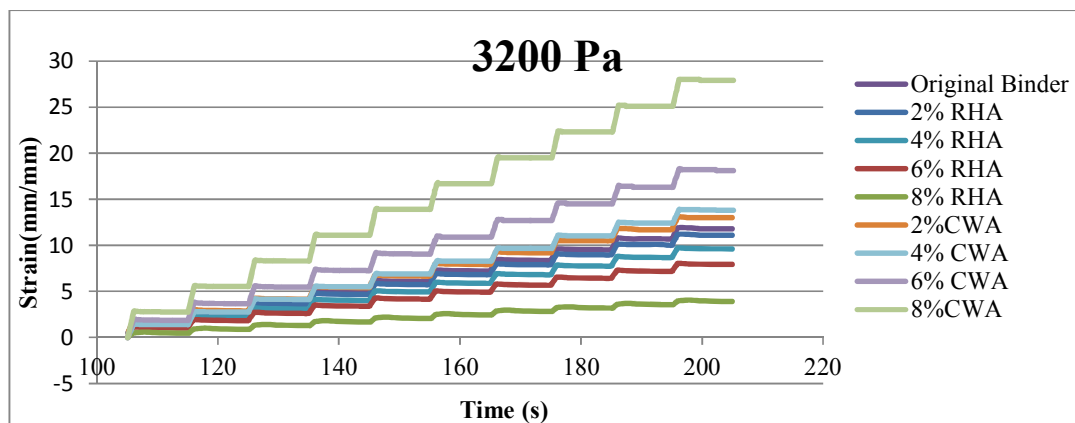
(۵)

حاوی ۸٪ خاکستر پسته برنج بیشترین مقدار می باشد. بنابراین این نوع قیر اصلاح شده می تواند در زمره قیرهای با حساسیت بالا نسبت به تنش قرار گیرد. حساسیت قیرهای حاوی خاکستر پسته برنج نسبت به تنش در شکل های ۱۰ و ۱۱ نیز نشان داده شده است که کرنش تجمعی برای قیرهای اصلاح شده در ۱۰ سیکل اول و ۱۰ سیکل انتهایی نشان داده شده است. حضور اصلاح کننده ها نسبت به حساسیت قیرها به شیارشدگی در شرایط دمایی غیر قابل پیش بینی و یا شرایط بارگذاری مختلف بسیار مضر می باشد.

جدول ۳ نتایج درصد اختلاف بین مدول غیرقابل بازگشت را در آزمایش بارگذاری و باربرداری نشان می دهد. درصد اختلاف نشان دهنده حساسیت قیر به افزایش در سطح تنش می باشد. بنابراین، مقادیر کمتر نشان دهنده حساسیت کمتر مواد به تنش می باشد. آیین نامه آشتو مقدار درصد تغییر در مدول غیرقابل بازگشت (Jnr-diff) را به ۷۵٪ محدود کرده است. این معیار می تواند استفاده از قیرهایی که نسبت به تغییرات تنش حساس می باشند و پتانسیل شیارشدگی بالایی دارند را اگرچه الزامات درجه عملکردی را ارضاء نمایند، محدود نماید. با توجه به جدول ۳ می توان دریافت که مقدار پارامتر (Jnr-diff) برای قیر



شکل ۱۰. روند تغییرات کرنش برای قیرهای با افزودنی های مختلف در ۱۰ سیکل اول بارگذاری در آزمایش MSCR در سطح تنش ۱۰۰ پاسکال

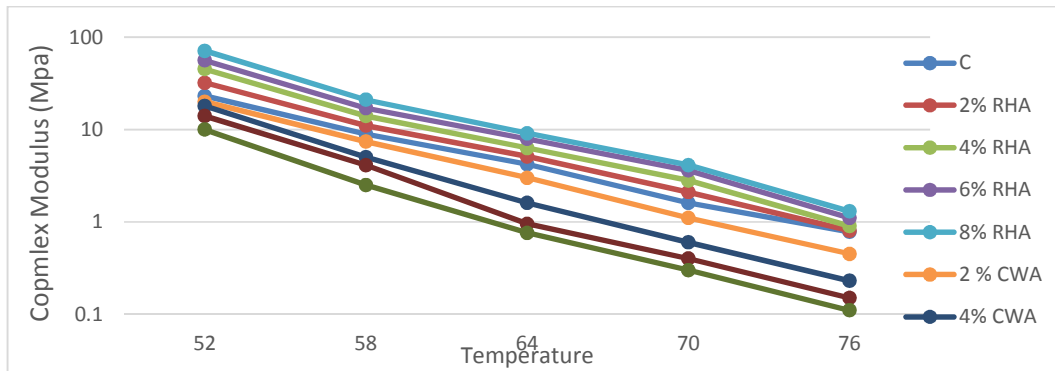


شکل ۱۱. روند تغییرات کرنش برای قیرهای با افزودنی های مختلف در ۱۰ سیکل پایانی بارگذاری در آزمایش MSCR در سطح تنش ۳۲۰۰ پاسکال

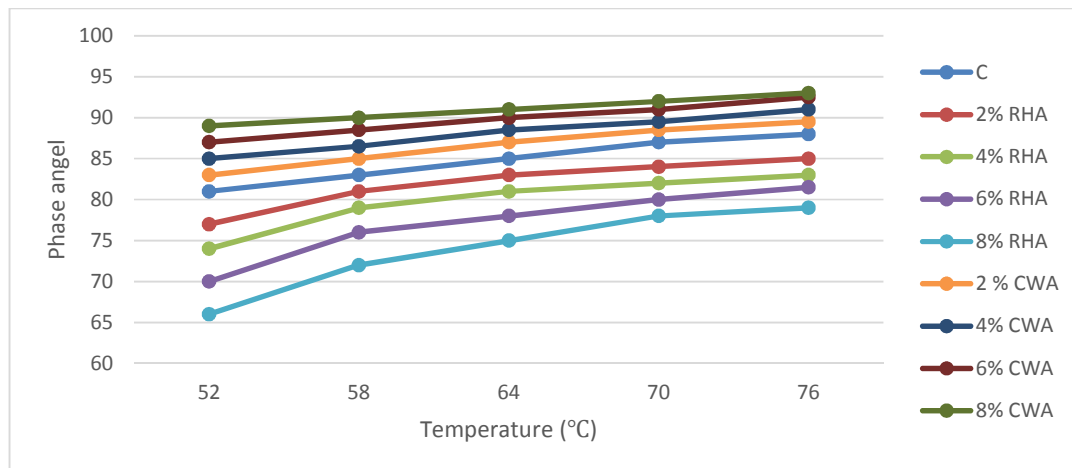
#### ۴-۴- تغییرات خصوصیات قیر نسبت به دما (Temperature Sweep Test)

ارزیابی خصوصیات ویسکوالاستیک مواد به کار می رود. کاهش زاویه فاز نشان دهنده خاصیت الاستیک بیشتر مواد می باشد. اندازه گیری زاویه فاز نسبت به مدول مختلط در قیرهای اصلاح شده جهت تعیین ساختار فیزیکی و شیمیایی بیشتر حساس می باشد. همچنین نشان می دهد که زاویه فاز قیرهای اصلاح شده خاکستر پوسته برنج از قیر خالص کمتر می باشد. این موضوع نشان می دهد که مقاومت در برابر شیارشدگی افزایش می یابد. کمتر بودن مقادیر زاویه فاز برای نمونه قیر حاوی افزودنی در مقایسه با قیر خالص بیانگر این حقیقت است که رفتار قیر اصلاح شده الاستیک تر از رفتار قیر خالص است. بنابراین از جمله مزایای استفاده از افزودنی نیمه گرم، دسترسی به خصوصیات الاستیک و برجهندگی (فنی) بیشتر است. در حالیکه نمونه های حاوی خاکستر ذغال سنگ دارای زاویه فاز بیشتری می باشند که می توان نتیجه گرفت نمونه های حاوی خاکستر ذغال سنگ دارای مقاومت شیارشدگی کمتری می باشند.

با توجه به شکل ۱۲ برای تمامی نمونه ها، مدول مختلط با افزایش دما کاهش می یابد. مدول برشی مختلط به عنوان پارامتری نشان دهنده مقاومت ماده در برابر تغییر شکل وقتی که در برابر تنش های برشی تکراری قرار می گیرد، می باشد. همچنین شکل ۱۲ نشان می دهد که مدول برشی قیرهای اصلاح شده با خاکستر پوسته برنج از قیر خالص بیشتر می باشد. افزایش مقدار مدول برشی ( $G^*$ ) برای نمونه قیر حاوی خاکستر پوسته برنج بعنوان نشانه ای از انتشار و توسعه شبکه ای در ساختار قیر خالص و افزایش ویسکوزیته آن در دماهای محیطی مطرح می شود. در حالیکه نمونه های حاوی خاکستر ذغال سنگ دارای مقادیر مدول برشی کمتری می باشند. در دمای پایین افزایش کمی در پارامتر مدول برشی مختلط مشاهده می شود، بطوریکه در دمای بالا افزایش بیشتری مشاهده می شود. نتایج زاویه فاز در برابر تغییرات دما در شکل ۱۳ در فرکانس ۱/۵۹ هرتز نشان داده شده است. زاویه فاز به اختلاف فاز بین تنش و کرنش در آزمایش نوسانی اطلاق می شود که معمولاً جهت



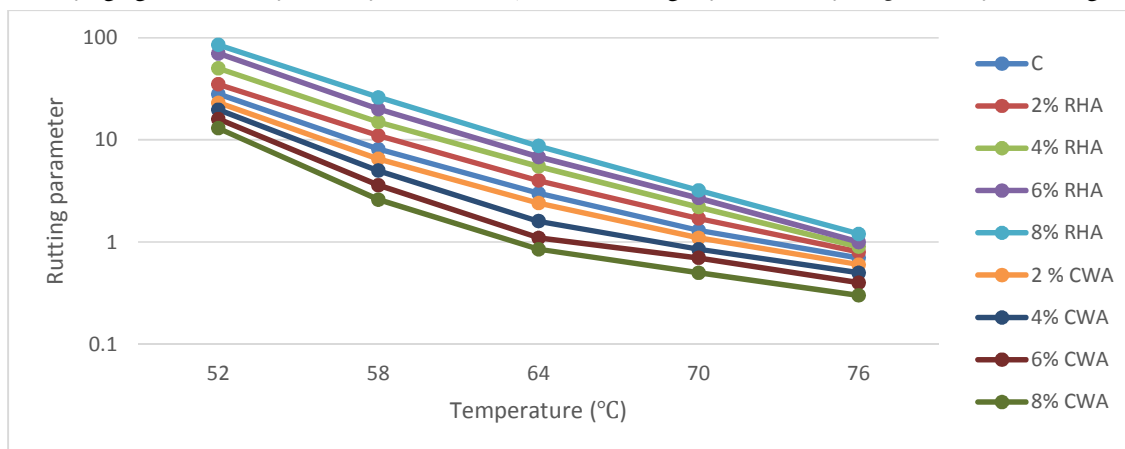
شکل ۱۲. تغییرات مدول مختلط در برابر دما



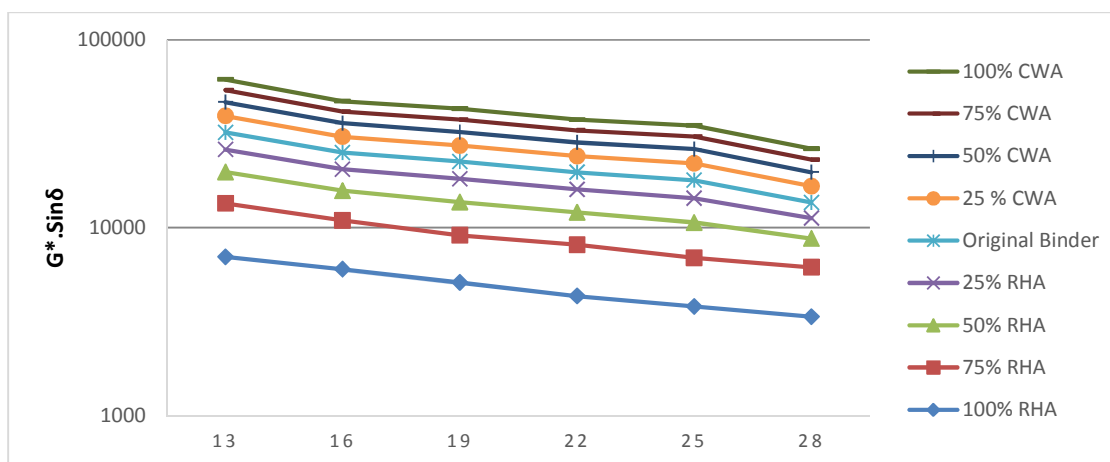
شکل ۱۳. تغییرات زاویه فاز در برابر دما

برابر خستگی معرفی نمود [۹۱]. شکل ۱۵ تغییرات پارامتر  $(G^* \cdot \sin \delta)$  را در برابر دما نشان می دهد. مقادیر مختلف پارامتر  $(G^* \cdot \sin \delta)$  در برابر تغییرات دمایی ۲۰ تا ۸۰ درجه سانتیگراد محاسبه گردید. نتایج نشان می دهد که افزودن ساسوبیت به قیر خالص سبب افزایش پارامتر  $(G^* \cdot \sin \delta)$  می گردد، بطوریکه قیر اصلاح شده با ۳٪ ساسوبیت بالاترین مقدار پارامتر  $(G^* \cdot \sin \delta)$  را دارا می باشد. هرچه مقدار پارامتر  $(G^* \cdot \sin \delta)$  بیشتر باشد، مقاومت در برابر خستگی کاهش می یابد. همانطور که از نتایج مشخص است می توان دریافت که افزودنی ساسوبیت سبب بهبود خصوصیات دمایی بالای قیر می شود. بطوریکه افزودن ساسوبیت سبب افزایش مقاومت قیر در برابر شیارشدگی می گردد. همچنین با توجه به نتایج آزمایش خستگی افزودن ساسوبیت سبب کاهش مقاومت قیر در برابر ترک های خستگی می گردد. در نتیجه می توان این گونه نتیجه گیری نمود که از افزودنی ساسوبیت بهتر است جهت بهبود خصوصیات قیر در مناطق گرمسیر استفاده نمود. چرا که افزودنی ساسوبیت در مناطق سردسیر سبب سخت شدن قیر و ایجاد ترکهای دمایی می گردد.

جهت ارزیابی بهتر خصوصیات قیر در برابر شیارشدگی، پارامتر شیارشدگی شارپ  $(G^*/\sin\delta)$  جهت ارزیابی قیرهای ساده و اصلاح شده پیشنهاد گردید. شیارشدگی به عنوان تغییرشکل دائمی تجمعی هرلایه در برابر بارگذاری تکراری می باشد. شکل ۱۴ تغییرات پارامتر  $(G^*/\sin\delta)$  نسبت به دما را نشان می دهد. مقادیر مختلف پارامتر  $(G^*/\sin\delta)$  در برابر تغییرات دمایی ۲۰ تا ۸۰ درجه سانتیگراد محاسبه گردید. نتایج نشان می دهد که افزودن خاکستر پوسته برنج به قیر خالص سبب افزایش پارامتر  $(G^*/\sin\delta)$  می گردد، بطوریکه قیر اصلاح شده با ۸٪ خاکستر پوسته برنج بالاترین مقدار پارامتر  $(G^*/\sin\delta)$  را دارا می باشد. این موضوع به نوبه خود سبب افزایش مقاومت مخلوط در برابر شیارشدگی می گردد که افزایش محدوده دمایی بالای قیر را نشان می دهد. افزودن رئوفالت و زایکوترم به قیر خالص تأثیر قابل توجهی بر روی پارامتر شیارشدگی ندارد. بطوریکه قیر اصلاح شده با زایکوترم دارای پایین ترین مقدار پارامتر  $(G^*/\sin\delta)$  می باشد. شارپ پارامتر  $(G^*/\sin\delta)$  را جهت ارزیابی مقاومت قیرهای خالص و قیرهای حاوی افزودنی در



شکل ۱۴. تغییرات پارامتر  $G^*/\sin$  نسبت به دما



شکل ۱۵. تغییرات پارامتر  $G^* \cdot \sin$  نسبت به دما

## ۵- نتیجه گیری

- قیرهای اصلاح شده با خاکستر ذغال سنگ، دارای درصد بازگشت کرنش کمتری نسبت به قیرهای اصلاح شده با خاکستر پوسته برنج و قیر خالص در دو سطح تنش می باشد. این موضوع ناشی از سختی کمتر و رفتار الاستیک کمتر این نوع نمونه می باشد.

پارامتر (Jnr) با افزودن خاکستر پوسته برنج کاهش می یابد. بطوریکه قیر حاوی ۸٪ خاکستر پوسته برنج دارای کمترین مقدار (Jnr) می باشد. مقادیر کمتر (Jnr) نشان دهنده مقاومت بیشتر مخلوط ساخته شده با آن قیر یا حساسیت کمتر مخلوط نسبت به شیارشدگی می باشد. نتایج مقادیر بهتری را برای افزودنی خاکستر پوسته برنج نسبت به خاکستر ذغال سنگ نشان می دهد.

## ۶- سپاسگزاری

از پرسنل محترم مرکز تحقیقات قیرو مخلوطهای آسفالتی به دلیل همکاری صمیمانه تشکر و قدردانی می شود.

## ۷- پی نوشتها

- 1- Rice Husk Ash
- 2- Coal Zaste Ash
- 3- Reclaimed Asphalt Pavement
- 4- Hot Mix Asphalt
- 5- Warm Mix Asphalt
- 6- Multi Stress Creep Recovery

## ۸- مراجع

- Ali N, Chan JS, Simms S, Bushman R, Bergan AT., (1996), "Mechanistic Evaluation of Fly Ash Asphalt Concrete Mixtures". J Mater Civil Eng., 8(1), pp.19-25.
- Arabani, M., Babamohammadi, S., & Azarhoosh, A. R., (2015), "Experimental investigation of seashells used as filler in hot mix asphalt", International Journal of Pavement Engineering, 16(6), pp.502-509.
- Arabani, M., Tahami, S. A., & Taghipoor, M. (2017), "Laboratory investigation of hot mix asphalt containing waste materials",

این تحقیق به منظور ارزیابی اثر RHA و CWA به عنوان اصلاح کننده بر عملکرد قیر انجام شده است. برای رسیدن به این هدف، چندین آزمایش مانند درجه نفوذ، نقطه نرمی، خاصیت انگمی، حساسیت حرارتی، رئومتر برش دینامیکی، رئومتر تیرچه خمشی و آزمایش جدید خزش و باربرداری تحت تنش چندگانه انجام شده است. نتایج زیر را می توان از نتایج بدست آورد:

- درجه نفوذ قیر اصلاح شده کاهش یافت، در حالی که نقطه نرمی قیر افزایش یافت. ممکن است به خاطر این واقعیت باشد که CWA چگالی پایین و حجم بیشتر دارد که منجر به کاهش نفوذ و افزایش نقطه نرمی می شود. می توان نتیجه گرفت که افزودن مواد افزودنی، باعث استحکام محکم تر و محکم تر شدن مخلوطهای آسفالت شده و مقاومت مخلوطهای آسفالتی نسبت به شیارافتادگی، بهبود می دهد.

- نتایج شکل پذیری قیر اصلاح شده کم تر از قیر خالص است. نتایج شاخص نفوذ قیر اصلاح شده نشان داد که با اضافه کردن RHA و CWA مقادیر شاخص نفوذ افزایش یافت. همچنین با افزودن مواد افزودنی، مقدار شاخص نفوذ نیز افزایش می یابد. بنابراین، با افزایش درصد RHA و CWA، حساسیت دمایی قیر کاهش یافت.

- با افزایش خاکستر پوسته برنج و خاکستر ذغال سنگ ویسکوزیته قیر افزایش می یابد. به طوریکه با افزایش مقادیر بیشتر خاکستر، مقدار ویسکوزیته روند افزایشی دارد. میزان افزایش ویسکوزیته نمونه های حاوی خاکستر پوسته برنج بیشتر از نمونه های حاوی خاکستر ذغال سنگ می باشد.

- در حالت پیر نشده، پارامتر  $G^*/\text{Sind}$  با افزودن مقادیر خاکستر پوسته برنج افزایش می یابد. به طوریکه مقدار آن برای قیر حاوی ۸٪ ساسوبیت از ۳ به ۸/۷ می رسد. در حالیکه افزودن خاکستر ذغال سنگ سبب کاهش مقدار پارامتر  $G^*/\text{Sind}$  می گردد و به ازای افزایش درصد افزودنی روند کاهش برای پارامتر شیارشدگی اتفاق می افتد. اضافه نمودن خاکستر پوسته برنج سبب کاهش مقادیر  $G^*/\text{Sind}$  و اضافه نمودن خاکستر ذغال سنگ سبب افزایش مقادیر  $G^*/\text{Sind}$  می گردد.

- اضافه نمودن خاکستر پوسته برنج، سبب افزایش درصد بازگشت کرنش در قیر خالص می گردد.

- construction and demolition waste”, *Construction and Building Materials*, 77, pp.168-178.
- Huang, X. Shu, Q. Dong, J. Shen, (2010), “Laboratory evaluation of moisture susceptibility of hot-mix asphalts containing cementitious fillers, *J. Mater. Civ. Eng.* 22 (7), pp.667–673, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000064](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000064).
- Huang, B., Shu, X., & Vukosavljevic, D., (2010), “Laboratory investigation of cracking resistance of hot-mix asphalt field mixtures containing screened reclaimed asphalt pavement”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(11), pp.1535-1543.
- Kandhal, P. S., (1993), “Waste materials in hot mix asphalt—An overview”, In *Use of waste materials in hot-mix asphalt*, ASTM International.
- Karasahin, S., Terzi, (2007), “Use of marble waste dust in the mixture of asphalt concrete as mineral filler, *Constr. Build. Mater.* 21 (3), pp.616–620.
- Lesueur, D., (2009), “The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification”, *Advances in colloid and interface science*, 145 (1-2), pp.42-82.
- Liang, M., Liang, P., Fan, W., Qian, C., Xin, X., Shi, J., & Nan, G., (2015), “Thermorheological behavior and compatibility of modified asphalt with various styrene-butadiene structures in SBS copolymers”, *Materials & Design*, 88, pp.177-185.
- Melotti, R., Santagata, E., Bassani, M., Salvo, M., & Rizzo, S., (2013), “A preliminary investigation into the physical and chemical properties of biomass ashes used as aggregate fillers for bituminous Road Materials and Pavement Design, 18(3), pp.713-729.
- Arabani, M., Tahami, S. A., & Hamed, G. H., (2018), “Performance evaluation of dry process crumb rubber-modified asphalt mixtures with nanomaterial”, *Road Materials and Pavement Design*, 19(5), pp.1241-1258.
- Asi, I. M., (2006), "Laboratory comparison study for the use of stone matrix asphalt in hot weather climates", *Journal of Construction and Building Materials*, No. 20, Issue 10, pp. 982-989.
- A.H. Lav, M.A. Lav, A.B. Goktepe, (2006), “Analysis and design of a stabilized fly ash as pavement base material, *Fuel* 85 (16), pp.2359–2370. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.05.017>.
- B. Sengoz, A., (2005), “Topal, Use of asphalt roofing shingle waste in HMA, *Constr Build*”, *Mater* 19 (5) pp.337–346.
- Çelik, (2008), “Influence of fly ash on the properties of asphalt, *Pet. Sci. Technol*”, pp. 1571–1582, <https://doi.org/10.1080/10916460701287474>.
- Chandra, R. Choudhary, (2013), “Performance characteristics of bituminous concrete with industrial wastes as filler”, *J. Mater. Civil Eng.* 11, pp.1666–1673.
- Churchill EV, Amirkhanian SN., (1999), “Coal Ash Utilization in Asphalt Concretemixtures”. *J Mater Civil Eng*, 11(4), pp.295–301.
- Fini, E. H., Al-Qadi, I. L., You, Z., Zada, B., & Mills-Beale, J., (2012), “Partial replacement of asphalt binder with bio-binder: characterisation and modification”, *International Journal of Pavement Engineering*, 13(6), pp.515-522.
- Gómez-Meijide, B., Pérez, I., Airey, G., & Thom, N., (2015), “Stiffness of cold asphalt mixtures with recycled aggregates from



- pp.1209–1216, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\) MT.1943-5533.0000125](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000125).
- Sobolev, I.F. Vivian, R. Saha, N.M. Wasiuddin, N.E. Saltibus, (2014), “The effect of fly ash on the rheological properties of bituminous materials, *Fuel* 116, pp.471–477, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.07.123>.
- Shivaprasad, F. Xiao, S. Amirkhanian, (2011), “Performance of warm-mix asphalt mixtures containing recycled coal ash and roofing shingles with moist aggregates for low-volume roads, *Transp. Res. Rec.* 2205 pp.48–57, <https://doi.org/10.3141/2205-07>.
- Sargin, M. Saltan, Yilmaz, N. Morova, S. Serin, S. Terzi, (2013), “Evaluation of rice husk ash as filler in hot mix asphalt concrete, *J. Constr. Build, Mater*, 48 pp.390–397.
- Ziari, H., Babagoli, R., & Akbari, A., (2015), “Investigation of fatigue and rutting performance of hot mix asphalt mixtures prepared by bentonite-modified bitumen”, *Road Materials and Pavement Design*, 16(1), pp.101-118.
- mixtures”, *Waste management*, 33(9), pp.1906-1917.
- National Cooperative Highway Research Program, (2002), “Simple Performance Test for Superpave Mix Design”, Report 465.
- Osinubi, J.E. Edeh, (2011), “Reconstituted coal ash stabilization of reclaimed asphalt pavement, in: *In Geo-Frontiers 2011 Advances in Geotechnical Engineering*, 2011, pp. 1172–1181, [https://doi.org/10.1061/41165\(397\)120](https://doi.org/10.1061/41165(397)120).
- Rusbintardjo, G., Hainin, M. R., & Yusoff, N. I. M., (2013), “Fundamental and rheological properties of oil palm fruit ash modified bitumen” *Construction and Building Materials*, 49, pp.702-711.
- S. Serin, N. Morova, M. Saltan, S. Terzi, (2012), “Investigation of usability of steel fiberin asphalt concrete mixtures, *Constr, Build, Mater*, 36 pp.238–244.
- Sharma, S. Chandra, R. Choudhary, (2010), “Characterization of fly ash bituminous concrete mixes, *J. Mater. Civ. Eng.* 22 (12)

# Evaluation of Rheological Behaviour of Bitumen Containing Industrial Waste Ashes

*Majid Sattari, M.Sc., Student, Department of Civil Engineering, Malard Branch,  
Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.*

*Alireza Ameli, Department of Civil Engineering, Malard Branch, Islamic Azad  
University, Malard, Tehran, Iran.*

*Seyedrohalah Moafimadani, Department of Civil Engineering, Rahman Institute  
of Higher Education, Ramsar, Mazandaran, Iran.*

*Email: Amelii@gmail.com*

Received: March 2020-Accepted: September 2020

## **ABSTRACT**

The purpose of this paper is to investigate the effect of coal waste ash and rice husk ash on mechanical properties of the stone matrix asphalt mixtures. In this study, of coal waste ash and rice husk ashes was used as a substitute for limestone powder in percentages (0 %, 25 %, 75 %, 75 % and 100 %)in the stone matrix asphalt mixtures. also to prevent drain down of this mixture, the cellulose fibers and SBS polymer fibers were used. in order to investigate the performance characteristics of mixtures the Marshall stability test, Resilient modulus, indirect tensile strength, moisture sensitivity, dynamic creep, and wheel tracking tests were performed. the results showed that the replacement of rice husk ash with limestone powder has improved the performance characteristics of the mixture. While the use of coal waste ash is only enhanced the moisture sensitivity of mixtures and it has a negative effect on the performance properties of mixtures.

**Keywords:** Binder Rheology, Coal Waste Ash, Rice Husk Ash, Industrial Wastes