

## بررسی خصوصیات رئولوژیکی قیر اصلاح شده با پودر لاستیک و گیلسونایت

### مقاله پژوهشی

فرزین پورحیدری ممقانی، 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: ۹۹/۰۲/۲۷ - پذیرش: ۹۹/۰۷/۲۵

صفحه ۳۰-۱۳

### چکیده

هدف از این مقاله بررسی افزودنی پودر لاستیک و پودر قیر معدنی گیلسونایت بر خواص رئولوژیکی و عملکردی قیر می‌باشد. در این تحقیق از پودر قیر معدنی گیلسونایت به عنوان افزودنی در درصد‌های (۰٪، ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪) در قیر استفاده شد. هم‌چنین به منظور محدود کردن کاهش درجه نفوذ قیر از ۳۰ دهم میلی‌متر در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، درصد گیلسونایت به میزان ۳۰٪ ثابت در نظر گرفته شده و درصد‌های پودر لاستیک به میزان (۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪) متغیر در نظر گرفته شده است. جهت بررسی خصوصیات عملکردی قیر آزمایشات درجه نفوذ، نقطه نرمی، مقاومت خاصیت انکمی، 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 گیلسونایت افزایش می‌یابد. همچنین پودر لاستیک سبب افزایش مقدار پارامتر  $G^*/Sind$  می‌گردد و به ازای افزایش درصد افزودنی روند افزایشی برای پارامتر شیارشدگی اتفاق می‌افتد. همچنین اضافه کردن پودر گیلسونایت سبب افزایش مقادیر  $G^*.Sind$  و اضافه نمودن پودر لاستیک سبب کاهش مقادیر  $G^*.Sind$  می‌گردد. پارامتر  $Jnr$  با افزودن گیلسونایت و پودر لاستیک کاهش می‌یابد. مقادیر کمتر  $Jnr$  نشان‌دهنده مقاومت بیشتر مخلوط ساخته شده با آن قیر یا حساسیت کمتر مخلوط نسبت به شیارشدگی می‌باشد. نتایج مقادیر بهتری را برای افزودنی پودر لاستیک نسبت به گیلسونایت به تنهایی نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: رئولوژی قیر، پودر لاستیک، پودر معدنی گیلسونایت، ضایعات صنعتی

### ۱-مقدمه

افزایش هزینه‌های نگهداری و کاهش در عمر خدماتی جاده می‌شوند. 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، به‌هم‌پیوستگی و استحکام نقش مهمی در عملکرد مخلوط‌های آسفالتی ایفا می‌کند. از آنجا که قیر آسفالت یکی از اجزای اصلی آسفالت مخلوط گرم است که در روسازی راه‌ها و فرودگاه‌ها استفاده می‌شود، اصلاح قیر

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 می‌شود که عملکرد روسازی راه را کاهش می‌دهد (Sengoz and Topal, 2005) این آسیب‌ها منجر به

به عنوان مثال، بر طبق آمار اعلام شده توسط وزارت صنایع و معادن جمعیت ۷۰ میلیون نفری ایران در هر سال حدود ۱۲ میلیون حلقه تایر مصرف می‌کنند که این به معنی مصرف بیش از ۲۵۰ هزار تن تایر در سال است. استفاده مجدد از این مواد زائد در راهسازی مقوله جدیدی است که مورد توجه متخصصان قرار گرفته و تحقیقات متعددی در این رابطه صورت گرفته است. مشکل تایرهای فرسوده در دیگر مناطق دنیا نیز وجود دارد، بعنوان مثال سالانه ۲۸۰ میلیون تایر فرسوده در ایالات متحده تولید می‌شود، که به طور میانگین یک تایر بازاری هر نفر می‌باشد. تقریباً ۳۰ میلیون از این تایرها روکش شده و دوباره استفاده می‌شوند، و مابقی آنها باید سالانه سازماندهی یا بازیافت شوند. حدود ۸۵٪ این تایرها، تایرهای اتومبیل و بقیه تایرهای کامیون هستند. علاوه بر اینکه این تایرهای فرسوده که سالانه تولید می‌شود، باید به صورت صحیح مدیریت و سازماندهی شوند، پیش‌بینی می‌شود که حدود ۲ تا ۳ میلیارد تایر فرسوده در طی سال‌های گذشته انباشته و یا در زیر خاک دفن شده‌اند که این تایرها نیز باعث مضر بودن برای محیط زیست باید به نحو صحیحی مدیریت، بازیافت و یا در صنایع مختلف استفاده شوند (FAA, 2002). افزایش ترافیک جاده‌ها و وسیله‌های باری تجاری همراه با افزایش بار محور این وسایل در ۳۰ سال اخیر باعث تسریع بروز خرابی و اضمحلال روسازی‌های آسفالتی شده است. برای غلبه بر این مشکل روشهای طرح اختلاط مناسب، مصرف بهینه مصالح و روش‌های موثر تولید، می‌تواند موثر باشد. هدف از افزایش و بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی بوسیله افزودن پودر لاستیک به این مخلوطها فراهم نمودن سطح سرویس مناسب برای ترافیک پیش‌بینی شده می‌باشد. برای دست‌یابی به این هدف طراحان باید دانش کافی در مورد این مواد، ترافیک، محیط اطراف و تاثیر آنها بر یکدیگر داشته باشد تا بتواند عملکرد هر یک از اجزای روسازی را پیش‌بینی کند. در تحقیقی که توسط عامری و همکاران انجام شد، خصوصیات خستگی و شیارشدگی قیر حاوی افزودنی گیلسونایت مورد ارزیابی قرار گرفت. در این تحقیق تاثیر درصد افزودنی گیلسونایت، نوع قیر، و دما بر خصوصیات شیارشدگی قیر مورد ارزیابی قرار گرفت. پارامتر شیارشدگی سوپرپیو و پارامتر بازیابی و خزش در تنش چندانگانه برای تعیین خصوصیات شیارشدگی قیر به دست آمد. هدف بعد از آن تحقیق برری

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 اصلاح‌کننده قیر به کار گرفته شده‌اند تا خواص قیر آسفالتی را افزایش دهند (Rusbintardjo et al, 2013) انتخاب یک تعدیل‌کننده 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 مجدد از مواد زائد در مخلوط بتن آسفالتی انجام شود، و تاثیر استفاده از مواد زائد بر عملکرد مخلوط‌های بتن آسفالتی باید مورد ارزیابی قرار گیرد (Kandhal, 1993) افزایش نگرانی‌ها در مورد حفاظت از محیط زیست، 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; Arabani et al, 2015; Gómez et al, 2015; Arabani et al, 2017; Huang et al, 2010). تحمیل هزینه‌های سنگین تعمیر ونگه داری روسازی آسفالتی که یکی از دلایل عمده آن کیفیت نامطلوب قیر است، به مرور زمان تبدیل به یک معضل ملی گردیده است. قیر طبیعی گیلسونایت که در طبقه اصلاح‌کننده‌های قیر به گروه هیدروکربن‌ها تعلق دارد یکی از موادی است که می‌توان از آن در اصلاح قیر و به تبع آن اصلاح مخلوط آسفالتی استفاده نمود. با توجه به وجود معادن زیاد قیر در ایران و حجم بالای قیر طبیعی گیلسو نایت نسبت به سایر اصلاح‌کننده‌های قیر، بررسی استفاده از این نوع قیر طبیعی در اصلاح خواص قیر و آسفالت امری ضروریست و می‌تواند در آینده‌ای نزدیک هم از لحاظ اقتصادی صرفه‌های بسیاری برای کشور به همراه داشته باشد و هم از لحاظ کیفیت روسازی و عمر آن و خواص قیر و مخلوط‌های آسفالتی ارزش بسیاری داشته باشد. مشکل عمده ای که شرکت‌های تیرسازی با آن مواجه هستند، مشکل تایرهای فرسوده و مسائل زیست محیطی مربوط به آن است.

گیلسونایت به قیر باعث افزایش دمای عملکردی بالای قیر می‌گردد. همچنین افزودن گیلسونایت باعث بهبود دمای متوسط و تأثیر منفی بر دمای پایین قیر دارد. همچنین افزودن گیلسونایت سبب کاهش درجه نفوذ، کاهش درجه اشتعال قیر، کاهش مقدار کشش قیر و افزایش نقطه نرمی قیر می‌گردد (Ameri et al, 2011. Ameri et al, 2012)

در تحقیق میدانی انجام شده توسط لیو و لی، تأثیر گیلسونایت بر مشخصات قیر آلاکایی مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق از قیر PG52-28 با درصد‌های مختلف گیلسونایت ۰٪، ۳٪، ۶٪ و ۹٪ و ۱۲٪ نسبت به وزن کل قیر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان داد، با افزایش درصد گیلسونایت از ۰٪ تا PG ۱۲٪ دمای بالای قیر از ۵۲°C به ۷۰°C می‌رسد. ولیکن PG دمای پایین قیر از ۲۸°C به ۲۲°C می‌رسد. نتایج این تحقیق مشخص می‌کند که افزودن گیلسونایت به قیر باعث افزایش مقاومت شیارشدگی مخلوط آسفالتی می‌شود. اما تمایل به ترکهای خستگی در دمای پایین مخلوط آسفالتی را نیز افزایش می‌دهد. با این وجود افزودن درصد‌های کم گیلسونایت ۳٪ نسبت به کل وزن قیر باعث بهبود مقاومت شیارشدگی مخلوط شده، بدون اینکه مشکلی در ترک‌های دمای پایین برای مخلوط پیش بیاید (Liu et al, 2008)

در تحقیقی که توسط لودفی و همکاران انجام شد، تأثیر پودر گیلسونایت بر عملکرد مخلوط آسفالتی متخلخل حاوی مصالح بتنی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد استفاده از مصالح بازیافتی بتنی به عنوان بخشی از مصالح سنگی سبب بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی می‌گردد. همچنین افزودن گیلسونایت به میزان ۸٪-۱۰٪ سبب بهبود مقاومت مارشال مخلوط گردیده است. (Djakfar et al, 2015). در تحقیقی که توسط خلیلی و همکاران انجام شد، ارزیابی خواص رئولوژیکی قیر اصلاح شده با پودر لاستیک مورد بررسی قرار گرفت. قیرهای اصلاح شده با ترکیب قیرخالص با درصد‌های مختلف پودر لاستیک و دانه بندی مختلف و روش‌های مختلف تولید مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد اندازه ذره، شکل و محتوای CRM<sup>۴</sup> تأثیر قابل توجهی بر روی بسیاری از خواص رئولوژیکی قیر اصلاح شده دارد. از آنجا که لاستیک یک ماده با ویسکوزیته بیشتر در مقایسه با قیر دارد، حتی در دمای بالا، ویسکوزیته قیر اصلاح شده با افزایش درصد پودر لاستیک

تأثیر درصد گیلسونایت، نوع قیر و سطح کرنش بر خصوصیات خستگی قیر بود. این مورد با انجام آزمایش جاروب دامنه خطی (LAS) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که همبستگی خوبی بین پارامتر شیارشدگی از آزمایش MSCR<sup>۲</sup> و پارامتر  $G^*/\sin \delta$  وجود دارد. نتایج نشان داد که قیر اصلاح شده با گیلسونایت مقاومت شیارشدگی و خستگی بهتری نسبت به قیر خالص دارد. همچنین گیلسونایت به عنوان جایگزین مناسب و اقتصادی جهت بهبود خصوصیات عملکردی قیر خالص در دمای میانی و بالا می‌باشد (Ameri et al, 2018). در تحقیقی که توسط سو و یونگ انجام شد، خصوصیات خستگی مخلوط‌های آسفالتی گرم، مخلوط با استخوان بندی سنگدانه ای و مخلوط بتن آسفالتی گرم اصلاح شده با گیلسونایت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش مدول برجهنگی و خستگی نشان داد، مخلوط آسفالتی حاوی گیلسونایت دارای بیشترین مقدار مدول برجهنگی و عمر خستگی است (Suo et al, 2009)

در تحقیقی که توسط افلاکی و همکاران انجام شد، خصوصیات رفتاری قیر با درجه عملکردی PG 58-22 حاوی افزودنیهای پودر لاستیک، پلیمر، گیلسونایت و اسید پلی فسفریک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد، افزودنی گیلسونایت باعث بهبود مقاومت شیار شدگی قیر در دمای بالا می‌شود، به طوریکه ۷٪، ۴٪، ۲٪، ۱۳٪، ۱۰٪ گیلسونایت دمای عملکردی بالای قیر پایه PG 58-22<sup>۳</sup> را از ۵۸ درجه سانتیگراد به ترتیب ۲۰/۹، ۱۵/۷، ۱۱/۱، ۶/۳، ۳/۸ درجه سانتیگراد افزایش میدهند. با این حال افزودنی گیلسونایت باعث کاهش خصوصیات رفتار دمای متوسط قیر و در نهایت کاهش مقاومت ترک خوردگی خستگی قیر می‌گردد. همچنین بررسی خصوصیات رفتاری قیر در دمای پایین نیز نشان داد افزودنی گیلسونایت در مقایسه با سایر افزودنی‌ها تأثیر منفی بر خصوصیات دمای پایین قیر دارد. (Aflaki and Tabatabaee, 2009). در تحقیقی که عامری و همکاران انجام دادند، مطالعات تخصصی بر روی گیلسونایت ایران به عنوان اصلاح کننده قیرهای مورد استفاده در روسازی، مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق دو نوع قیر عمده مورد استفاده در عملیات راه سازی ایران شامل قیر ۶۰-۷۰ و ۸۵-۱۰۰ با ۳ درصد مختلف گیلسونایت که شامل درصد‌های ۴ و ۸ و ۱۲٪ است، مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته است. افزودن

ترک حرارتی پایین آسفالت اصلاح شده گیلسونیت دارد. علاوه بر این، SBR می‌تواند ثبات ذخیره‌سازی و سازگاری آسفالت اصلاح شده با گیلسونیت را بهبود بخشد، که به راحتی می‌توان جداسازی فاز را انجام داد. علاوه بر این، SBR می‌تواند ثبات ذخیره‌سازی و سازگاری آسفالت اصلاح شده با گیلسونیت را بهبود بخشد، که به راحتی می‌توان جداسازی فاز را انجام داد. در همین حال، تاثیر گیلسونایت و SBR بر خواص آسفالت‌ها عمدتاً به محتوای آن‌ها بستگی دارد. در این مطالعه، به منظور متعادل کردن سازگاری، عملکرد دمای بالا و پایین آسفالت اصلاح شده گیلسونیت حاوی ۳۰ درصد وزنی گیلسونیت، محتوای مخلوط SBR به صورت ۷,۵ wt % توصیه شد (Ren et al, 2018). قیر طبیعی گیلسونایت یک هیدروکربن رزینی طبیعی است که برای اولین بار در حوالی آبیگر یوتا در آمریکا یافت گردید. قیر طبیعی گیلسونایت در حلال‌های معطر نفتی و حلال‌های چرب همانند قیر نفتی حل می‌شود. قیر طبیعی گیلسونایت در میزان انبوه ماده‌ای سیاه رنگ و درخشان و شبیه مواد معدنی شیشه‌ای است. این ماده شکننده است و بسیار آسان تبدیل به پودر قهوه‌ای تیره می‌شود (شکل ۱). قیر طبیعی گیلسونایت در رگه‌های عمودی زیر سطح زمین یافت می‌شود.

اندازه عرض رگه‌ها ۱/۸ - ۶/۰ متر است که حتی این اندازه گاهی به ۸/۴ متر می‌رسد. رگه‌ها معمولاً موازی یکدیگرند و طول رگه‌ها ممکن است بسیار زیاد بوده و عمق آن‌ها حتی به اندازه‌ای در حدود ۲۴۱۳/۵ کیلومتر می‌رسد. عرض رگه‌ها در نزدیک سطح کم است و هرچه به عمق می‌رویم بیشتر می‌شود.

افزایش می‌یابد. جزء الاستیک مدول دینامیکی با افزایش درصد پودر لاستیک هم برای قیرهای پیرنشده و قیرهای پیرشده کوتاه مدت افزایش یافت. این نتیجه نشان می‌دهد که افزودن پودر لاستیک سبب بهبود مقاومت شیارشدگی روسازی می‌گردد. همچنین دمای عملکردی قیر نیز با افزودن پودر لاستیک بهبود یافت (Khalili et al, 2019). در تحقیقی که توسط میرزاییان و همکاران انجام شد تاثیر گیلسونایت و پلیمر SBS<sup>۵</sup> بر خصوصیات رئولوژیکی قیر مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزودن گیلسونایت و پلیمر SBS سبب افزایش نقطه نرمی، و پارامتر شیارشدگی و کاهش حساسیت حرارتی و درجه نفوذ قیر می‌گردد. دمای عملکردی بالای تمامی قیرها افزایش یافت. نتایج نشان داد افزودن گیلسونایت و پلیمر SBS تاثیر بر روی خصوصیات دمای پایین قیر ندارد (Mirzaiyan et al, 2019). با هدف بهبود عملکرد دمای بالا و پایین، پایداری ذخیره‌سازی و سازگاری آسفالت اصلاح شده با گیلسونیت، لاستیک استیرن بوتادی ان (SBR) برای دستیابی به اصلاح بیشتر در این تحقیق انتخاب شد. اثرات SBR<sup>۱</sup> بر خواص سستی، رفتارهای ریولوژیک (شیارافتادگی، آسیب خستگی و عملکرد مقاومت شکاف دما پایین)، ثبات ذخیره‌سازی و سازگاری آسفالت‌های اصلاح شده با ژیلسونیت با استفاده از رئومتر برشی دینامیک (DSR<sup>۷</sup>)، رئومتر پرتو ترکیبی (BBR<sup>۸</sup>) و ویسکوزیته چرخشی (RV<sup>۹</sup>) ارزیابی شدند. تست‌های DSR نشان داد که اضافه کردن SBR، دمای شکست آسفالت اصلاح شده گیلسونیت را افزایش می‌دهد که نشان‌دهنده بهبود برش و مقاومت خستگی است. گیلسونیت تاثیر زیادی در بهبود حساسیت دمایی آسفالت داشت. علاوه بر این، تست‌های BBR نشان داد که SBR اثر مفیدی بر مقاومت



شکل ۱. قیر طبیعی گیلسونایت

## ۲-روش تحقیق

در این پژوهش تأثیر درصد مختلف پودر لاستیک و گودر قیر معدنی گیلسونایت به عنوان افزودنی بر عملکرد قیر مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق جهت ارزیابی تأثیر پودر لاستیک و گودر قیر معدنی گیلسونایت 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-یاربرداری با تنش چندگانه (MSCR) روی نمونه‌های شاهد و نمونه‌های حاوی افزودنی انجام شد.

## ۲-۱-قیر

در این پژوهش از نوع قیر خالص ۸۵/۱۰۰ بود که از شرکت نفت پاسارگاد تهیه شد و مشخصات فیزیکی آن در جدول ۱ است.

## ۲-۲- پودر لاستیک

نتایج تحقیقات آزمایشگاهی و پروژه‌های میدانی در کارولینای جنوبی ایالات متحده نشان می‌دهد که پودر لاستیک تولیدشده به روش طبیعی با اندازه مش ۴۰ در بهبود خواص مخلوط‌های آسفالتی لاستیکی مؤثرتر است (Amirkhanian and Franzese, 2001). بنابراین در این تحقیق از پودر لاستیک مش ۴۰ استفاده شد. دانه‌بندی پودر لاستیک در ۰ آمده است. در این تحقیق از سه درصد مختلف پودر لاستیک (۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ وزن قیر) استفاده شد. قیر لاستیکی با استفاده از روش تر و با استفاده از مخلوط‌کن برش بالا (۲۰۰۰ دور در دقیقه) در دمای تقریبی ۱۷۷ سانتی‌گراد تهیه شد. همچنین بر اساس تحقیقات گذشته که نتایج آن نشان می‌دهد، زمان اختلاط تأثیر چندانی بر خواص قیر ندارد، زمان اختلاط ۳۰ دقیقه انتخاب شد (Xiao et al. 2006).

جدول ۱. خصوصیات قیر خالص استفاده شده

خصوصیات	قیر ۸۵/۱۰۰	روش آزمایش
وزن مخصوص در ۲۵ درجه سانتی‌گراد	۱/۰۱۴۲	ASTM D-70
درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی‌گراد	۹۵	ASTM D-5
نقطه نرمی (درجه سانتی‌گراد)	۴۵	ASTM D-36
انگمی در ۲۵ درجه سانتی‌گراد	+۱۰۰	ASTM D-113
نقطه اشتعال	۲۷۰	ASTM D-92

جدول ۲. دانه‌بندی پودر لاستیک مش ۴۰-

رد شده (%)	مانده (%)	اندازه الک (μm)
۱۰۰	۰	۳۰ (۶۰۰)
۹۱/۸	۸/۲	۴۰ (۴۲۵)
۵۸/۸	۳۳	۵۰ (۳۰۰)
۱۱/۳	۴۷/۵	۱۰۰ (۱۵۰)
۰	۱۱/۳	۲۰۰ (۷۵)

## ۲-۵-پودر قیر معدنی گیلسونایت

گیلسونایت مورد استفاده در این پژوهش از معدن قیر کویری گراوه در روستای گراوه ما بین شهرستان‌های قصر شیرین و گیلان غرب تهیه شد. مشخصات فیزیکی و مواد تشکیل‌دهنده این گیلسونایت در جداول ۳ و ۴ آورده شده است. لازم به ذکر است که پودر گیلسونایت رد شده از الک شماره ۲۰۰ برای استفاده در این پژوهش استفاده شده است.

جدول ۳. مشخصات فیزیکی گیلسونایت مورد استفاده

ASTM-D5291	۷۴	کربن (%)	۱
ASTM-D5291	۷,۱	هیدروژن (%)	۲
ASTM-D5291	۰,۶۷	نیتروژن (%)	۳
ASTM-D5291	۳,۱	اکسیژن (%)	۴
LEEO Analyser	۴	سولفور (%)	۵

جدول ۴. مشخصات شیمیایی گیلسونایت

استاندارد	نتیجه	آزمایش
ASTM-D3174	۱۵-۱۲	میزان خاکستر (%)
ASTM-D3173	≤۵	میزان رطوبت (%)
ASTM-D3172	۲۹	میزان کربن (%)
ASTM-D4	۸۱	حلالیت در سولفید کربن (%)
ASTM-D3289	۱,۱۱	وزن مخصوص در ۲۵ سانتی‌گراد
-	سیاه	رنگ در حالت کلوخه
-	قهوه‌ای تیره	رنگ در حالت پودر
ASTM-D36	۲۲۱	نقطه نرمی سانتی‌گراد
ASTM-D5	۱-۰	درجه نفوذ در ۲۵ سانتی‌گراد

## ۲-۶- آماده سازی نمونه‌ها

در این تحقیق از پودر لاستیک و پودر گیلسونایت به عنوان اصلاح کننده قیر استفاده شد. جهت بررسی تاثیر گیلسونایت بر خواص قیر، گیلسونایت در درصدهای (۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪) به قیر خالص اضافه گردید. گیلسونایت در دمای ۱۶۰ درجه با استفاده از مخلوط کن با برش بالا با سرعت ۵۰۰۰ دور در دقیقه مخلوط گردید. سپس به منظور اصلاح قیر با گیلسونایت و پودر لاستیک، به منظور جلوگیری از کاهش بیش از اندازه درجه نفوذ از میزان ۳۰ دهم میلی‌متر در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد، میزان گیلسونایت به میزان ۳۰ درصد ثابت در نظر گرفته شد و پودر لاستیک در درصدهای ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ به قیر حاوی گیلسونایت اضافه گردید و در دمای ۱۷۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳۰ دقیقه با مخلوط کن برش بالا با سرعت ۵۰۰۰ دور در دقیقه مخلوط شد.

## ۳-۳- روش کار آزمایش

### ۳-۱- آزمایش پایه‌ای قیر

خواص فیزیکی متداول قیر پایه و قیر اصلاح شده با درصدهای مختلف پدر لاستیک و گیلسونایت با آزمایش‌های 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 D ۱۱۳- انجام شد. درجه نفوذ می‌تواند نشان‌دهنده سختی قیر باشد، که مطابق با ASTM - d ۵ انجام شد. تست ویسکوزیته با استفاده از ویسکومتر چرخشی بروکفیلد برای اندازه‌گیری ویسکوزیته قیرهای اصلاح نشده و اصلاح شده در دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد مطابق با استاندارد ASTM D - ۴۴۰۲ انجام شد.

## ۳-۲- رئومتر برش دینامیکی

به منظور مشخص کردن ویژگی‌های اساسی ریولوژیکی قیر، تست DSR انجام شد. این تست می‌تواند 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 ویسکو الاستیک هستند که در این تست اندازه‌گیری می‌شوند. پارامتر G اطلاعاتی را در مورد مقاومت قیر به تغییر شکل هنگامی که در معرض بار برشی قرار می‌گیرد، فراهم می‌کند. پارامتر d تأخیر زمانی بین تنش‌های برشی اعمال شده و پاسخ‌های کرنش برشی را نشان می‌دهد. تحلیل این دو پارامتر می‌تواند رفتار قیر مانند پتانسیل شیارشدگی را پیش‌بینی کند. پارامتر  $G^* / \text{Sind}$  که پارامتر شیارشدگی نامیده می‌شود مقاومت شیارشدگی قیر را نشان می‌دهد. نمونه‌های قیر با ضخامت ۱ میلی‌متر و قطر ۲۵ میلی‌متر با فرکانس ۱۰ rad/s و در دمای ۴۶، ۵۲، ۵۸، ۶۴، ۷۰ و ۷۶ درجه سانتی‌گراد با توجه به روش آزمون استاندارد ASTM - D ۷۱۷۵، تست شدند. مقدار  $G / \text{Sind}$  برای قیرهای پیرنشده توصیه می‌شود که با توجه به استاندارد، ASTM - DV۱۷۵ بیش از ۱ کیلو پاسکال باشد.

### ۳-۳- آزمایش تنش خزشی دوگانه و باربرداری (MSCR)

جهت ارزیابی حساسیت قیرها در برابر تغییرشکل دائمی یا شیارشدگی، روش MSCR معرفی شده است. روند آزمایش بر این اساس است که یک نمونه قیر به قطر ۲۵ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر 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 می‌گیرد. 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 ۲ آورده شده است.



شکل ۲. دستگاه رئومتر برش دینامیکی

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؛ دی‌آنجلو، ۲۰۱۰).

### ۳-۴- رئومتر تیرچه خمشی

از آنجایی که قیر در دماهای پایین بسیار سفت و سخت است، خصوصیات قیر در آن دماها را نمی‌توان با استفاده از رئومتر دینامیکی برشی بدست آورد. بدین منظور از آزمایش جدیدی که در آن رفتار خزشی بدست می‌آید استفاده می‌شود. در رئومتر تیرچه خمشی، تیرچه ساخته شده از قیر در سردترین دمایی که قیر مورد نظر در دوره عمرش تحمل می‌کند، مورد آزمایش قرار می‌گیرد. 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 می‌گیرد و مقدار افت و خیز حاصل در وسط تیرچه در تمام این مدت اندازه گیری می‌شود. از این آزمایش که در دمای پایین، مطابق با آب و هوای منطقه مورد نظر انجام می‌شود، 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 می‌باشد، بدست می‌آید. آزمایش بدین صورت انجام می‌گیرد که تیرچه قیری با ریختن قیر داغ در قالب‌های مکعب مستطیل ساخته می‌شود. پس از حدود ۴۵ الی

مقدار کرنش اعمالی، درصد بازگشت کرنش، و مقدار مدول غیر قابل بازگشت برای هر ۱۰ سیکل در هر سطح تنش براساس فرمول‌های ارائه شده در زیر محاسبه می‌شود:

$$\epsilon_{10} = \epsilon_r - \epsilon_0 \quad (1)$$

$$PR = \frac{\epsilon_{10} - \epsilon_0}{\epsilon_1} \times 100 \quad (2)$$

$$J_{nr} = ave. \frac{V_u}{T} \quad (3)$$

مقدار کرنش اولیه ( $\epsilon_0$ ) در شروع بارگذاری خزشی در هر سیکل و مقادیر کرنش در انتهای هر سیکل ( $\epsilon_c$ ) تعیین می‌گردد. اختلاف دو کرنش به عنوان کرنش اعمالی است ( $\epsilon_1$ ). به طور مشابه، مقدار کرنش ( $\epsilon_r$ ) در انتهای باربرداری در هر سیکل و کرنش اعمالی بعد از باربرداری ( $\epsilon_{10}$ ) در انتهای هر سیکل باربرداری محاسبه می‌شود. معادله (۲) نیز میزان درصد بازگشت کرنش را نشان می‌دهد.

مقدار مدول غیرقابل بازگشت ( $J_{nr}$ ) ( $k/Pa$ ) همان طور که در معادله (۳) 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  $T$  تنش برشی اعمالی می‌باشد. مقدار مدول غیرقابل بازگشت توانایی پیش بینی مقاومت شیارشدگی مخلوط آسفالتی را دارد (واساژ و همکاران، ۲۰۱۱؛ حافظ و کمال، ۲۰۱۴). حساسیت نسبت به تنش خزشی نمونه‌های قیری به صورت درصد اختلاف در مدول غیرقابل بازگشت می‌باشد. این پارامتر، مقدار افزایش در مقدار پارامتر  $J_{nr}$  را وقتی تنش از ۱۰۰ پاسکال به ۳۲۰۰ پاسکال افزایش می‌یابد،

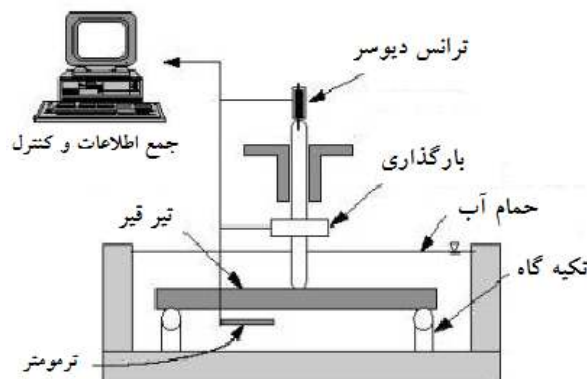


وارد می‌شود و به مدت ۲۰ ثانیه برداشته می‌شود. پس از این مدت بار ۱۰۰ گرمی به مدت ۲۴۰ ثانیه اعمال می‌شود و افت و خیز حاصل نیز همزمان اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۳ و ۴). از منحنی تغییر شکل (افت و خیز) بر زمان بارگذاری می‌توان سختی خزش و مقدار متر را بدست آورد. بر اساس آئین نامه شارپ مقدار متر در زمان ۶۰ ثانیه بایستی برابر یا بیش از ۰,۳ باشد.

۶۰ دقیقه قیر اضافی را با یک کاردک داغ تراشیده و نمونه را همراه قالب به مدت ۵ الی ۱۰ دقیقه بایستی در داخل فریزر قرار داد. پس از جداسازی نمونه از قالب آن را به مدت ۶۰ دقیقه در داخل حمام رنومتر 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 می‌شود. سپس بار ۱۰۰ گرمی به صورت اتوماتیک به مدت ۱ ثانیه توسط دستگاه



شکل ۳. رنومتر تیرچه خمشی (BBR)



شکل ۴. شمای آزمایش رنومتر تیرچه خمشی (BBR)

## ۴- تحلیل نتایج آزمایشات

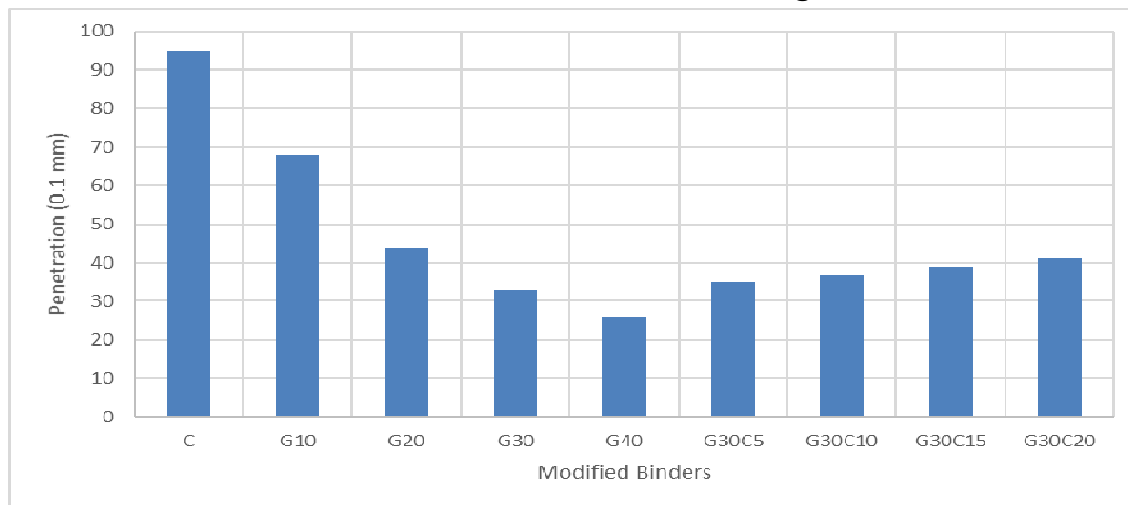
### ۴-۱- نتایج آزمایشات قیر

نرمی می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت که افزودن مواد گیلسونایت، باعث استحکام محکم‌تر و محکم‌تر شدن مخلوط‌های آسفالت شده و مقاومت مخلوط‌های آسفالتی نسبت به شیارافتادگی، بهبود می‌دهد. با توجه به نتایج افزودن پودر لاستیک منجر به افزایش درجه نفوذ و نقطه نرمی قیر گردیده است. با افزودن پودر لاستیک انعطاف پذیری قیر افزایش می‌یابد. نتایج نشان داد که نقطه نرمی و ویسکوزیته روند مشابهی را دارند. در واقع این دو پارامتر وابسته به

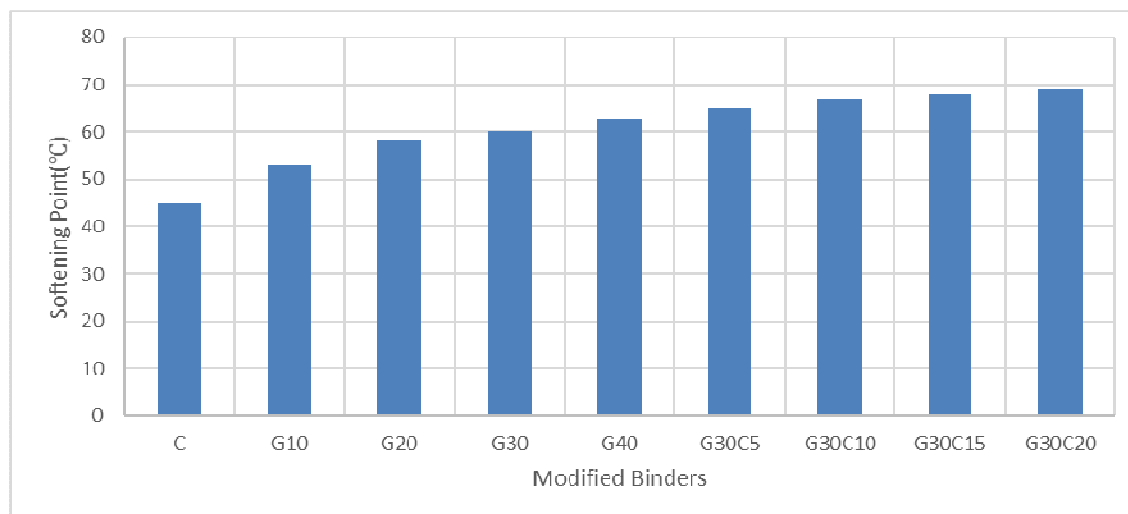
نتایج درجه نفوذ، نقطه نرمی و آزمایش شکل‌پذیری و رئولوژی قیر خالص و اصلاح‌شده در اشکال ۵ الی ۸ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۵ و ۶ مشاهده شد، افزودن گیلسونایت به قیر اصلی منجر به افزایش خواص رئولوژیکی قیر شد. با توجه به نتایج، درجه نفوذ قیر اصلاح‌شده کاهش یافت، در حالی که نقطه نرمی قیر افزایش یافت. ممکن است به خاطر این واقعیت باشد که افزودن پودر گیلسونایت سبب سخت شدن قیر شده و منجر به کاهش نفوذ و افزایش نقطه

نشان می‌دهد. با توجه به نتایج افزودن قیر سبب افزایش ویسکوزیته قیر می‌گردد. افزودن گیلسونایت سبب سخت شدن قیر شده و در نتیجه ویسکوزیته قیر افزایش می‌یابد. همچنین افزودن پودر لاستیک سبب افزایش ویسکوزیته قیر می‌گردد. علت آن این است که با افزایش ذرات پودر لاستیک در قیر مقادیر بیشتری از روغنهای سبک موجود در قیر توسط ذرات پودر لاستیک جذب شده و متورم می‌شوند و باعث افزایش ویسکوزیته قیر می‌شوند.

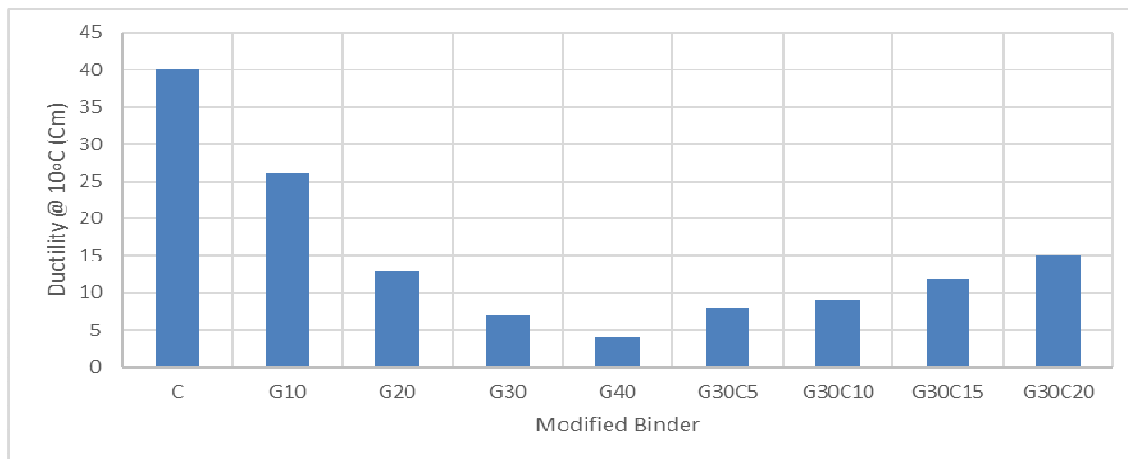
یکدیگر هستند به طوری که با نقطه نرمی بالاتر، گرانیروی بیشتر است. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، نتایج شکل پذیری قیر اصلاح شده کم تر از قیر خالص است. نتایج شکل پذیری قیر نشان می‌دهد با افزودن گیلسونایت شکل پذیری قیر کاهش یافته و قیر سخت تر میگردد. اما با افزودن پودر لاستیک با توجه به اینکه انعطاف پذیری قیر افزایش می‌یابد، در نتیجه میزان کشش پذیری قیر افزایش یافته و خاصیت انگی می‌ان افزایش می‌یابد. شکل ۸ نتایج ویسکوزیته قیر را



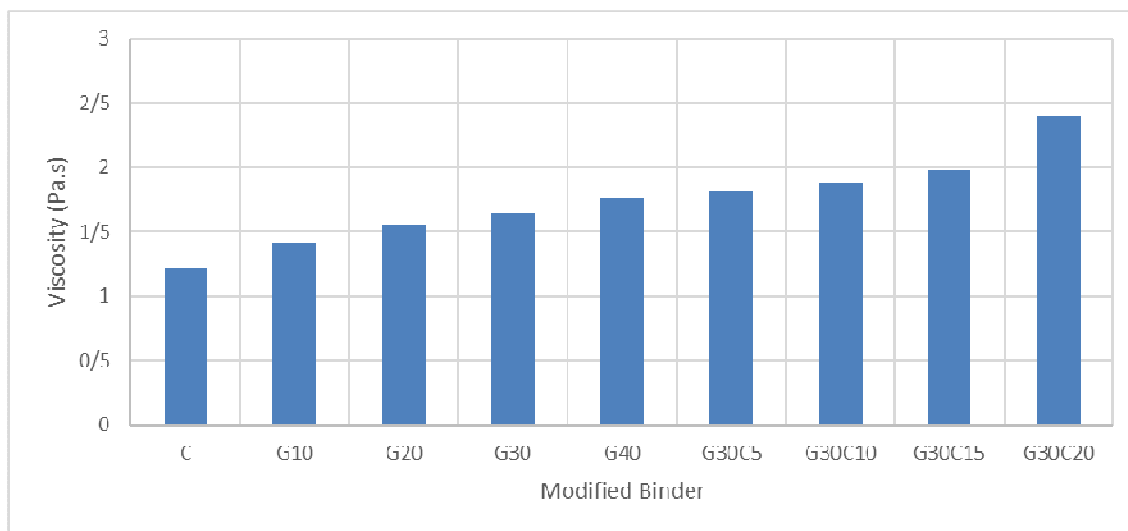
شکل ۵. نتایج آزمایش درجه نفوذ



شکل ۶. نتایج آزمایش نقطه نرمی



شکل ۷. نتایج آزمایش خاصیت انگمی



شکل ۸. نتایج آزمایش ویسکوزیته قیر

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

نتایج آزمایش رئولوژی قیر در جدول ۵ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش پودر لاستیک و گیلسونایت ویسکوزیته قیر افزایش می‌یابد. به طوریکه با افزایش مقادیر بیشتر پودر لاستیک و گیلسونایت، مقدار ویسکوزیته روند افزایشی دارد. میزان افزایش ویسکوزیته نمونه‌های حاوی پودر لاستیک بیشتر از نمونه‌های حاوی گیلسونایت می‌باشد. شارپ حداقل مقدار ۱ کیلوپاسکال را قیرهای پیرنشده و مقدار ۲,۲ را برای قیرهای پیرشده در نظر گرفته است. با توجه به نتایج، در حالت پیر نشده، پارامتر  $G^*/\text{Sind}$  با افزودن مقادیر گیلسونایت افزایش می‌یابد. به طوری که مقدار آن برای قیر حاوی ۸٪ ساسویت از ۲ به ۴ می‌رسد. همچنین افزودن پودر

لاستیک سبب افزایش مقدار پارامتر  $G^*/\text{Sind}$  می‌گردد و به ازای افزایش درصد افزودنی روند افزایشی برای پارامتر شیارشدگی اتفاق می‌افتد. در حالت پیرشده کوتاه مدت، با اصلاح کردن قیر با پودر لاستیک و گیلسونایت مقادیر پارامتر  $G^*/\text{Sind}$  افزایش می‌یابد. به طوری که قیر حاوی ۳۰٪ گیلسونایت و ۲۰ درصد پودر لاستیک دارای بیشترین مقدار می‌باشد.

شارپ حداکثر پارامتر  $G^*/\text{Sind}$  را به ۵۰۰۰ کیلوپاسکال محدود نموده است. با توجه به جدول ۵، اضافه نمودن گیلسونایت سبب افزایش مقادیر  $G^*/\text{Sind}$  و اضافه نمودن پودر لاستیک سبب کاهش مقادیر  $G^*/\text{Sind}$  می‌گردد.

جدول ۵. 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 δ at 25°C	G*/sin δ at 64°C (kPa)	G*/sin δ at 64°C (kPa)	ویسکوزیته در دمای ۱۳۵ درجه سانتی گراد	
0.309	185	3810	2.870	1.3	2.55	C
0.310	184	4100	3.28	1.4	2.57	G10
0.313	182	4200	5.21	1.8	2.6	G20
0.319	170	4300	5.98	2.2	2.63	G30
0.32	168	4423	7.1	2.6	2.66	G40
0.308	186	3734	6.2	2.8	2.68	G30C5
0.306	189	3672	6.7	3.2	2.71	G30C10
0.304	191	3559	7.4	3.5	2.76	G30C15
0.302	194	3100	7.7	3.9	2.82	G30C20

### ۲-۵- نتایج آزمایش MSCR

نشان دهنده مقاومت کمتر در برابر شیارشدگی می‌باشد. قیرهای اصلاح شده با پودرلاستیک، دارای درصد بازگشت کرنش بیشتری نسبت به قیرهای اصلاح شده با گیلسونایت و قیر خالص در دو سطح تنش می‌باشد. این موضوع ناشی از سختی کمتر و رفتار الاستیک بیشتر این نوع نمونه می‌باشد. همانطور که نتایج نشان می‌دهد قیر اصلاح شده با ۲۰٪ پودرلاستیک دارای بیشترین مقدار درصد بازگشت در هر دو سطح تنش را دارد که نشان دهنده این موضوع می‌باشد که قیرهای اصلاح شده با پودرلاستیک دارای مقاوم بیشتری در برابر شیارشدگی دارند.

نتایج آزمایش MSCR برای قیرهای مختلف در جدول ۶ 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 گیلسونایت، سبب افزایش درصد بازگشت کرنش در قیر خالص می‌گردد. درصد بالاتر بازگشت کرنش نشان دهنده این موضوع می‌باشد که قیر توانایی بازگشت نسبت بیشتری از کرنش خود بعد از بارگذاری را دارد. هرچه درصد بازگشت کرنش بیشتر باشد، قیر توانایی بالاتری جهت مقابله با شیارشدگی را دارد. همانطور که از نتایج پیداست، قیر خالص در مقایسه با قیر حاوی گیلسونایت دارای مقدار بازگشت کرنش کمتری در دو سطح تنش می‌باشد که

جدول ۶. نتایج آزمایش MSCR

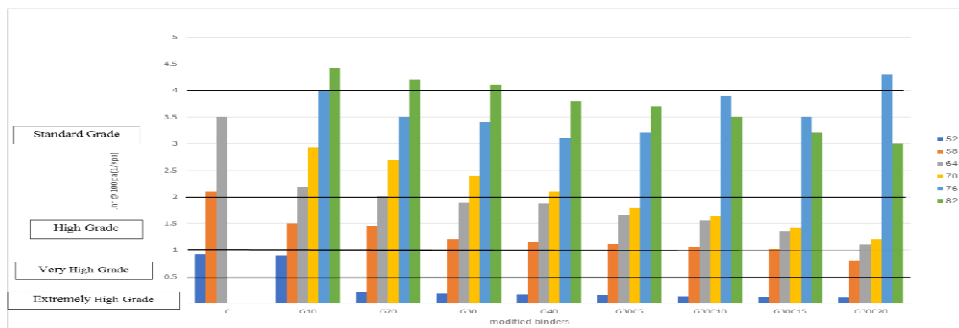
Binder type	R100	R3200	Jnr100	Jnr3200	Jnr diff
	%	%	kPa-1	kPa-1	%
C	6.0	4.8	3.5	5.25	50
G10	26.3	21.0	2.18	3.27	50
G20	26.8	21.4	2.01	3.015	50
G30	29.1	23.3	1.9	2.85	50
G40	32.5	26.0	1.87	2.805	50
G30C5	34.5	27.6	1.65	2.475	50
G30C10	46.3	37.1	1.56	2.34	50
G30C15	47.9	38.3	1.35	2.025	50
G30C20	52.2	41.8	1.1	1.65	50

قیرهای خالص کمتر می‌باشد. حساسیت قیرها نسبت به تنش های اعمالی با استفاده از پارامتر  $Jnr-diff$  بدست می‌آید که از رابطه زیر به دست می‌آید:

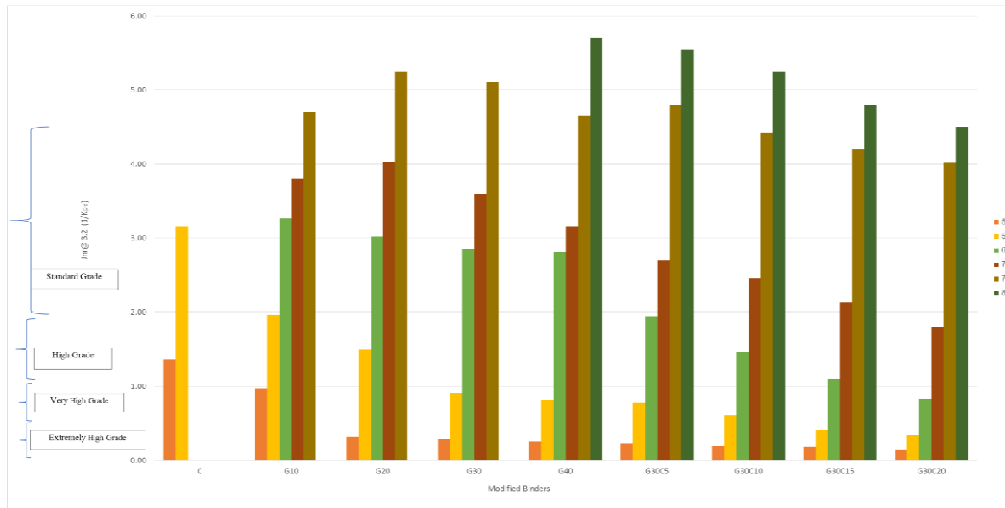
$$J_{nr-diff} = \frac{J_{nr@3200Pa} - J_{nr@100Pa}}{J_{nr@3200Pa}} \times 100 \quad (4)$$

جدول ۶ نتایج درصد اختلاف بین مدول غیرقابل بازگشت را در آزمایش بارگذاری و باربرداری نشان می‌دهد. درصد اختلاف نشان دهنده حساسیت قیر به افزایش در سطح تنش می‌باشد. بنابراین، مقادیر کمتر نشان دهنده حساسیت کمتر مواد به تنش می‌باشد. آیین نامه آشتو مقدار درصد تغییر در مدول غیرقابل بازگشت ( $Jnr-diff$ ) را به ۷۵٪ محدود کرده است. این معیار می‌تواند استفاده از قیرهایی که نسبت به تغییرات تنش حساس می‌باشند و پتانسیل شیارشدگی بالایی دارند را اگرچه الزامات درجه عملکردی را ارضاء نمایند، محدود نماید. با توجه به جدول ۶ می‌توان دریافت که مقدار پارامتر ( $Jnr-diff$ ) برای تمامی قیرها کمتر از حد آیین نامه می‌باشد که نشان دهنده پان است که این نوع قیرها حساسیتی در برابر زیاد تنش ندارند. شکل ۹ و ۱۰ تغییرات پارامتر  $Jnr$  نسبت به دما برای دو سطح تنش ۱۰۰ و ۳۲۰۰ پاسکال نشان می‌دهد. از نتایج می‌توان دریافت با افزایش دما میزان پارامتر افزایش می‌یابد که نشان از کاهش مقاومت قیر در برابر شیار شدگی می‌باشد.

جدول ۶ مقادیر مدول غیر قابل بازگشت ( $Jnr$ ) را در سطوح تنش ۱۰۰ و ۳۲۰۰ پاسکال نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که پارامتر ( $Jnr$ ) با افزودن گیلسونایت کاهش می‌یابد. بطوریکه قیر حاوی ۴۰٪ گیلسونایت دارای کمترین مقدار ( $Jnr$ ) می‌باشد. مقادیر کمتر ( $Jnr$ ) نشان دهنده مقاومت بیشتر مخلوط ساخته شده با آن قیر یا حساسیت کمتر مخلوط نسبت به شیارشدگی می‌باشد. نتایج مقادیر بهتری را برای افزودنی پودرلاستیک نسبت به گیلسونایت نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، قیر اصلاح شده با پودرلاستیک کمترین مقدار پارامتر ( $Jnr$ ) را دارا می‌باشد. این مورد نشان دهنده این است که افزودنی پودرلاستیک منجر به کاهش حساسیت قیر به شیارشدگی می‌گردد. همچنین، افزودن درصدهای بیشتر پودرلاستیک سبب کاهش بیشتر پارامتر ( $Jnr$ ) می‌گردد. 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 می‌باشد. 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 می‌باشد. از نقطه نظر رئولوژی قیر، مقادیر کمتر ( $Jnr$ ) ممکن است از مقادیر کمتر کرنش غیرقابل بازگشت در انتهای بارگذاری در یک سطح تنش بدست می‌آید. اگر آنجایی که سطوح تنش در آزمایش  $MSCR$  یکسان باشد، می‌توان نتیجه گرفت که کرنش دائمی برای قیرهای اصلاح شده نسبت به



شکل ۹. تغییرات پارامتر  $Jnr$  نسبت به دما در سطح تنش ۱۰۰ پاسکال

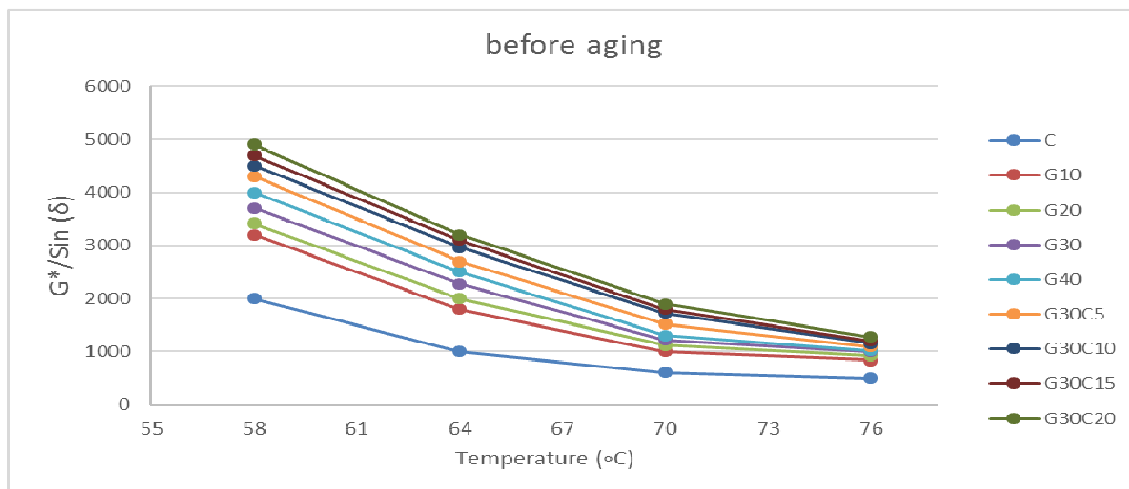


شکل ۱۰. تغییرات پارامتر Jnr نسبت به دما در سطح تنش ۳۲۰۰ پاسکال

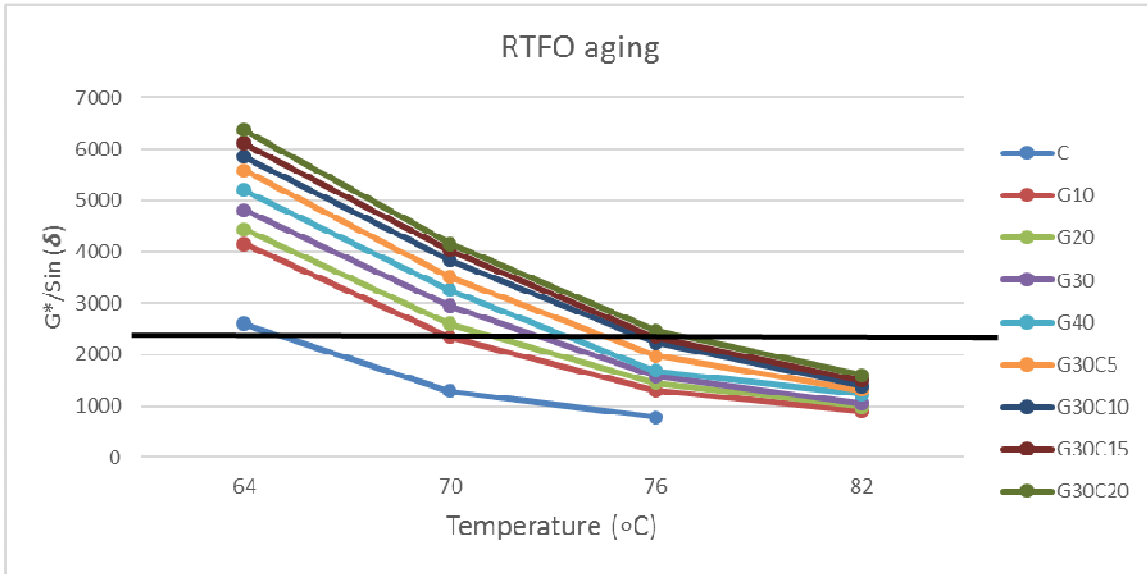
### ۳-۵- تغییرات خصوصیات قیر نسبت به دما (Temperature Sweep Test)

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 دمای بالای قیر را نشان می دهد. با توجه به نتایج می توان دریافت با افزودن پودرلاستیک به قیر خالص تأثیر قابل توجهی بر روی پارامتر شیارشدگی دارد. به طوری که قیر اصلاح شده با پودرلاستیک دارای بالاترین مقدار پارامتر  $(G^*/\sin\delta)$  می باشد. با افزایش درصد پودرلاستیک، مقاومت شیارشدگی قیر افزایش می یابد. زیرا میزان انعطاف پذیری قیر افزایش یافته و قیر توانای بیشتری در بازگرداندن کرنش های وارده به خود را دارد.

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 ۱۱ و ۱۲ 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 گیلسونایت به قیر خالص سبب افزایش پارامتر  $(G^*/\sin\delta)$  می گردد، بطوریکه قیر اصلاح شده با ۰.۴٪ گیلسونایت بالاترین مقدار



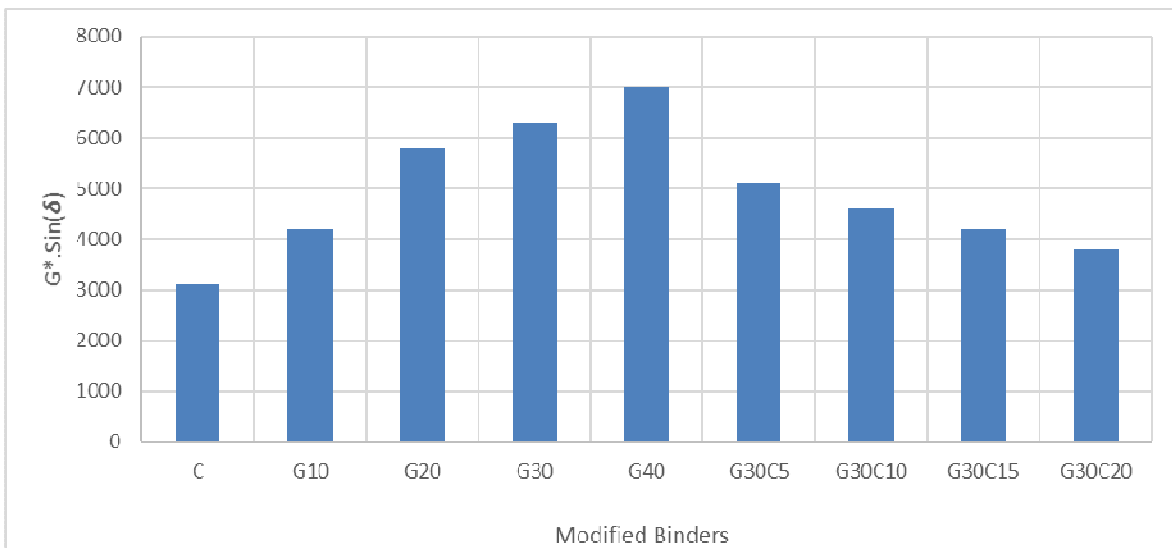
شکل ۱۱. تغییرات پارامتر  $G^*/\sin$  نسبت به دما



شکل ۱۲. تغییرات پارامتر  $G^* \cdot \sin \delta$  نسبت به دما

در برابر خستگی کاهش می‌یابد. همانطور که از نتایج مشخص است می‌توان دریافت که افزودن پودر لاستیک سبب بهبود خصوصیات دمای بالامیانی قیر می‌شود. بطوریکه افزودن درصد پودر لاستیک سبب افزایش مقاومت قیر در برابر خستگی می‌گردد. علت این امر این است که با افزودن پودر لاستیک به قیر روغن‌های آروماتیک توسط ذرات پودر لاستیک جذب شده و متورم می‌شوند که باعث افزایش خاصیت الاستیکی و انعطاف‌پذیری مخلوط آسفالتی می‌شوند.

شارپ پارامتر  $(G^* \cdot \sin \delta)$  را جهت ارزیابی مقاومت قیرهای خالص و قیرهای حاوی افزودنی در برابر خستگی معرفی نمود. شکل ۱۳ تغییرات پارامتر  $(G^* \cdot \sin \delta)$  را در برابر دما نشان می‌دهد. مقادیر مختلف پارامتر  $(G^* \cdot \sin \delta)$  در برابر تغییرات دمایی ۲۰ تا ۸۰ درجه سانتیگراد محاسبه گردید. نتایج نشان می‌دهد که افزودن گیلسونایت به قیر خالص سبب افزایش پارامتر  $(G^* \cdot \sin \delta)$  می‌گردد، بطوریکه قیر اصلاح شده با ۴۰٪ گیلسونایت بالاترین مقدار پارامتر  $(G^* \cdot \sin \delta)$  را دارا می‌باشد. هرچه مقدار پارامتر  $(G^* \cdot \sin \delta)$  بیشتر باشد، مقاومت



نتایج خستگی قیرها

## ۵- نتیجه گیری

(Jnr) با افزودن گیلسونایت کاهش می‌یابد. بطوری که قیر حاوی ۴۰٪ گیلسونایت دارای کمترین مقدار (Jnr) می‌باشد. مقادیر کمتر (Jnr) نشان دهنده مقاومت بیشتر مخلوط ساخته شده با آن قیر یا حساسیت کمتر مخلوط نسبت به شیارشدگی می‌باشد. نتایج مقادیر بهتری را برای افزودنی پودر لاستیک نسبت به گیلسونایت نشان می‌دهد. افزودن پودر لاستیک سبب افزایش خاصیت انعطاف پذیری قیر شده و مقاومت قیر حاوی گیلسونایت را در برابر شیارشدگی و خستگی افزایش می‌دهد.

## ۶- سپاسگزاری

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

## ۷- پی‌نوشت‌ها

- 1- Linear Amplitude Sweep
- 2- Multi Stress Creep Recovery
- 3- Performance Grade
- 4- Crumb Rubber Modified
- 5- Styrene-butadiene-styrene
- 6- Styrene-butadiene-Rubber
- 7- Dynamic Shear Rheometer
- 8- Bending Beam Rheometer
- 9- Rotational Viscosity

## ۸- مراجع

-Aflaki, S. and Tabatabaee, N., (2009), "Proposals for modification of Iranian bitumen to meet the climatic requirements of Iran", *Construction and Building Materials*, 23 (6) , pp. 2141-2150.

-Ameri, M., Mansourian, A., Ashani, S. S., and Yadollahi, G., (2011), "Technical study on the Iranian Gilsonite as an additive for modification of asphalt binders used in pavement construction", *Construction and Building Materials*, 25(3), pp. 1379-1387.

-Ameri, M., Mansourian, A. and Sheikhmotevali, A. H., (2012), "Investigating effects of ethylene vinyl acetate and gilsonite modifiers upon performance of base bitumen using Superpave tests methodology", *Construction and Building Materials*, 36, pp. 1001- 1007.

-Ameri, M., Mirzaiyan, D., & Amini, A. (2018), "Rutting resistance and fatigue behavior of gilsonite-modified asphalt binders", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(11), 04018292.

این تحقیق به منظور ارزیابی اثر پودر معدنی گیلسونایت و پودر لاستیک به عنوان اصلاح‌کننده بر عملکرد قیر انجام شده‌است. 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 چندانگانه انجام شده‌است. نتایج زیر را می‌توان از نتایج بدست آورد:

-با افزودن گیلسونایت درجه نفوذ قیر اصلاح‌شده کاهش یافت، در حالی که نقطه نرمی قیر افزایش یافت. ممکن است به خاطر این واقعیت باشد که گیلسونایت سبب افزایش سختی قیر شده که 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. در حالی که افزودن پودر لاستیک سبب افزایش درجه نفوذ و نقطه نرمی قیر می‌گردد.

-شکل‌پذیری قیر اصلاح‌شده با گیلسونایت کمتر از قیر خالص است. افزودن گیلسونایت سبب افزایش سختی قیر می‌گردد. در حالی که با افزودن پودر لاستیک به قیر حاوی گیلسونایت میزان شکل‌پذیری قیر افزایش یافته و کشش‌پذیری قیر افزایش می‌یابد که نشان از افزایش انعطاف‌پذیری قیر می‌باشد.

-با افزایش گیلسونایت و پودر لاستیک ویسکوزیته قیر افزایش می‌یابد. به طوریکه با افزایش مقادیر بیشتر این مواد، مقدار ویسکوزیته روند افزایشی دارد. میزان افزایش ویسکوزیته نمونه‌های حاوی پودر لاستیک و گیلسونایت بیشتر از نمونه‌های حاوی گیلسونایت می‌باشد.

-در حالت پیر نشده، پارامتر  $G^*/\text{Sind}$  با افزودن مقادیر گیلسونایت افزایش می‌یابد. به طوریکه مقدار آن برای قیر حاوی ۴۰٪ گیلسونایت از ۲ به ۴ می‌رسد. همچنین افزودن پودر لاستیک سبب افزایش مقدار پارامتر  $G^*/\text{Sind}$  می‌گردد و افزایش درصد افزودنی روند افزایشی برای پارامتر شیارشدگی اتفاق می‌افتد.

-اضافه کردن گیلسونایت سبب افزایش مقادیر  $G^*.\text{Sind}$  و اضافه کردن پودر لاستیک سبب کاهش مقادیر  $G^*.\text{Sind}$  می‌گردد. -اضافه نمودن گیلسونایت و پودر لاستیک، سبب افزایش درصد بازگشت کرنش در قیر خالص می‌گردد.

-قیرهای اصلاح شده با گیلسونایت، دارای درصد بازگشت کرنش کمتری نسبت به قیرهای اصلاح شده با گیلسونایت و پودر لاستیک به طور همزمان در دو سطح تنش می‌باشد. این موضوع ناشی از سختی کمتر و رفتار الاستیک بیشتر این نوع نمونه می‌باشد. پارامتر



- modified asphalt with various styrene-butadiene structures in SBS copolymers”, *Materials & Design*, 88, pp.177-185.
- Liu, J. and Li, P., (2008), “Experimental study on Gilsonite-modified asphalt”, In *Proceedings of the 2008 Airfield and Highway Pavements Conference*, pp. 15-18.
- 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.
- Mirzaiyan, D., Ameri, M., Amini, A., Sabouri, M., & Norouzi, A., (2019), “Evaluation of the performance and temperature susceptibility of gilsonite-and SBS-modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*”, 207, pp.679-692.
- Ren, S., Liang, M., Fan, W., Zhang, Y., Qian, C., He, Y., & Shi, J., (2018), “Investigating the effects of SBR on the properties of gilsonite modified asphalt”, *Construction and Building Materials*, 190, pp.1103-1116.
- 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.
- Sengoz, A., (2005), “Topal, Use of asphalt roofing shingle waste in HMA, *Constr. Build. Mater*”, 19 (5) (2005) pp.337-346.
- Suo, Z. and Wong, W. G., (2009), “Analysis of fatigue crack growth behavior in asphalt concrete material in wearing course”, *Construction and Building Materials*, 23(1), pp. 462-468 .
- Xiao. F., (2006), "Development of fatigue predictive models of rubberized asphalt concrete (RAC) containing reclaimed asphalt pavement (RAP) mixtures," Phd, Clemson University.
- 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.
- Amirkhanian and W. Franzese, (2001), "Establishment of an Asphalt Rubber Technology Service (ARTS)," in *Beneficial Use of Recycled Materials in Transportation Applications*.
- 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, *Road Materials and Pavement Design*”, 18(3), pp.713-729.
- Djakfar, L., Bowoputro, H., Prawiro, B. and Tarigan, N., (2015), “Performance of recycled porous hot mix asphalt with gilsonite additive. *Advances in Civil Engineering*.
- Federal Highway Administration, (2002), "User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction," Washington, D.C.
- 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 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 asphalt containing cementitious fillers, *J. Mater. Civ. Eng.* 22 (7), pp.667-673.
- Kandhal, P. S., (1993), “Waste materials in hot mix asphalt—An overview”, In *Use of waste materials in hot-mix asphalt*. ASTM International.
- Khalili, M., Jadidi, K., Karakouzian, M., & Amirkhanian, S., (2019), “Rheological properties of modified crumb rubber asphalt binder and selecting the best modified binder using AHP method”, *Case Studies in Construction Materials*, 11, e00276.
- Liang, M., Liang, P., Fan, W., Qian, C., Xin, X., Shi, J., & Nan, G., (2015), “Thermo-rheological behavior and compatibility of

# Evaluation of Rheological Behaviour Asphalt Binders Containing Gilsonite and Crumb Rubber

*Farzin Poorheydari Mamaghani, 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.*

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

*Email: Amelii@gmail.com*

Received: June 2020-Accepted: November 2020

## **ABSTRACT**

The purpose of this paper is to investigate the effect of rubber powder and Gilsonite powder on the rheological properties of bitumen. In this study, the gilsonite powder was used as additive in percentages (0 %, 10 %, 20 %, 30 % and 40 %) in bitumen. Also, in order to limit the degree of penetration to 30 - deci mm at 25 C, the Gilsonite percentage is considered to be 30 % fixed and the percentages of rubber powder are considered to be 30 %, 10 %, 15 %, 20 %). In order to investigate the performance characteristics of bitumen, the penetration, softening point, ductility, dynamic shear rheometer, bending beam rheometer, rotational viscosity, multiple stress creep recovery (MSCR) tests were performed. Results showed that the  $G^*/\text{Sin } d$  parameter increases with addition to gilsonite. Also, rubber powder causes an increase in the value of  $G^*/\text{Sin } d$  parameter and the rutting parameter increases by addition of crumb rubber percentage. The addition of gilsonite powder causes an increase in values of  $G^*$ .  $\text{Sin } d$  and adding crumb rubber powder cause a decrease in values of  $G^*\text{Sin } d$ . It is found that the parameter ( $J_{nr}$ ) decreases with addition of gilsonite and rubber powder. The lower values ( $J_{nr}$ ) indicates the further resistance of the mixture made with the bitumen or less rutting sensitivity. The results show better values for rubber powder additive compared to Gilsonite.

**Keywords:** Binder Rheology, Gilsonite, Crumb Rubber, Industrial Wastes