

## بررسی تاثیر افزودنی نیمه گرم بر رفتار خستگی قیر و مخلوط آسفالتی اصلاح شده با گیلسونایت و پودر لاستیک

مقاله علمی - پژوهشی

رضوان باباگلی\*، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران

محمد کاشانی نوین، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

(مدیر عامل شرکت مهندسی مشاور آرا طرح رویان، تهران، ایران)

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: rezvan\_babagoli@yahoo.com

دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۱۷ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۱۸

صفحه ۳۲۷-۳۵۸

### چکیده

هدف از مطالعه حاضر بررسی اثر افزودنی آسفالت نیمه گرم بر عملکرد خستگی قیر و مخلوط آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه‌ای حاوی پودر لاستیک و گیلسونایت می‌باشد. در تحقیق حاضر، گیلسونیت، پودرلاستیک و ۲ افزودنی نیمه گرم (۳٪ Sasobit و همچنین ۳٪ Zycotherm) برای اصلاح قیر خالص (AC-۱۵/۱۰۰) استفاده شد. چندین آزمایش رئولوژیکی قیر و آزمایش عملکردی مخلوط انجام شد. برای تجزیه و تحلیل مجموعه داده، ANOVA توسعه داده شد. نتایج آزمون رفتار رئولوژیکی نشان داد که افزودن افزودنی‌های ترکیبی منجر به افزایش رفتار دمای متوسط قیر می‌شود. عملکرد قیرهای آسفالتی در دمای پایین با افزودن گیلسونایت بدتر شد. در حالی که استفاده از پودر لاستیک عملکرد دمای پایین را بهبود بخشید. آزمایش پایداری ذخیره سازی نشان داد که با استفاده از گیلسونیت تا ۱۰ درصد، پایداری ذخیره سازی قیرها بهبود می‌یابد، اگرچه با افزایش درصد گیلسونیت، جداسازی فازی قیرها بدتر می‌شود. عمر خستگی قیرها با افزودن گیلسونایت و افزودنی‌های نیمه گرم افزایش می‌یابد. علاوه بر این، پودرلاستیک می‌تواند رفتار خستگی قیرهای اصلاح شده با گیلسونایت را افزایش دهد. نتایج آزمایش نمونه نشان داد که استفاده از گیلسونیت، افزودنی‌های نیمه گرم و پودرلاستیک ویژگی‌های خستگی، انرژی شکست، مقاومت کششی نمونه‌ها را افزایش می‌دهد. بر اساس نتایج آزمون مدول برجهندگی، CR میزان مدول برجهندگی مخلوط‌ها را کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: قیر، پودرلاستیک، مخلوط آسفالتی، رئولوژی قیر، خستگی

### ۱- مقدمه

توانایی محاسبه عملکرد قیرها در دماهای میانی را در طبقه‌بندی‌ها ندارند و با عملکرد نمونه‌ها رابطه ضعیفی دارند. محققان روسازی یک تکنیک آزمایشی جدید را برای محاسبه رفتار خستگی قیرها به نام LAS ارائه کردند (Zhang et al, ۲۰۱۷; Wang et al, ۲۰۱۵). از آنجا که قیر یکی از اجزای اصلی مخلوط آسفالت گرم است که در روسازی راه‌ها و فرودگاه‌ها استفاده می‌شود، اصلاح قیر روشی موثر برای افزایش

خستگی یکی از مهم‌ترین خرابی‌های روسازی می‌باشد. اخیراً متخصصین مختلفی اقدام به کاهش میزان و شدت خرابی قیرهای خالص نموده‌اند. علاوه بر این، تحقیقات متعددی برای ارائه یک پارامتر رئولوژیکی مناسب انجام شد که بتواند به طور دقیق خواص دمای متوسط قیر را نشان دهد. سیستم‌های درجه عملکرد شارپ  $\sin\delta^*$  را برای بررسی ویژگی‌های خستگی قیرها پیشنهاد می‌کنند. مطالعات مختلف نشان داد که عوامل فوق

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، به عنوان مثال سالانه ۲۸۰ میلیون تایر فرسوده در ایالات متحده تولید می‌شود، که به طور میانگین یک تایر بازای 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، پیش بینی 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 باربری 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 پیش بینی شده می‌باشد. برای دست یابی 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 پیش بینی 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 سوپریپو و پارامتر بازیابی و خزش در تنش چندگانه برای تعیین خصوصیات شیارشدگی قیر بدست آمد. هدف بعد در آن تحقیق بررسی تاثیر 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  $MSCR^2$  و پارامتر  $G^*/\sin \delta$  وجود دارد. نتایج نشان داد که قیر اصلاح شده با گیلسونایت

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 مخلوط 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 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; 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 گیلسونایت 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 عمده‌ای که شرکت‌های تیرسازی با آن مواجه هستند، مشکل تایرهای فرسوده و مسائل زیست محیطی مربوط به آن است. به عنوان مثال، بر طبق آمار اعلام شده توسط وزارت صنایع و معادن جمعیت ۷۰ میلیون نفری ایران در هر سال حدود ۱۲

(مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان داد، با افزایش درصد گیلسونایت از ۰٪ تا ۱۲٪ PG، دمای بالای قیر از ۵۲ به ۷۰ سانتی گراد می‌رسد. ولیکن PG دمای پایین قیر از ۲۲- درجه سانتی گراد به ۲۸- درجه سانتی گراد 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, ۲۰۰۸)). 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 روش های مختلف تولید مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد اندازه ذره، شکل و محتوای CR<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 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 تأثیر 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 تأثیری بر روی خصوصیات

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 سنگدانه‌ای و مخلوط بتن آسفالتی گرم اصلاح شده با گیلسونایت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش مدول برجهندگی و خستگی نشان داد، مخلوط آسفالتی حاوی گیلسونایت دارای بیشترین مقدار مدول برجهندگی 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، ۸ و ۱۲٪ است، مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته است. افزودن 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). در تحقیق نقطه نرمی قیر می‌گردد (Ameri et al, 2012). در تحقیق میدانی انجام شده توسط لیو و لی، تأثیر گیلسونایت بر مشخصات قیر آاسکایی مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق از قیر PG 52-28 با درصدهای مختلف گیلسونایت) ۰٪، ۳٪، ۶٪ و ۹٪ و ۱۲٪ نسبت به وزن کل قیر

برای مدت طولانی در روسازی جاده‌ها استفاده می‌شود و از لاستیک‌های وسایل نقلیه و همچنین کامیون‌ها بازیافت می‌شود. پودر لاستیک نوعی اصلاح کننده آسفالت است که برای بهبود خواص نمونه‌ها استفاده می‌شود. افزودن این ماده به قیرهای اصلاح شده با پلیمر باعث بهبود رفتار قیر می‌شود. مطالعات مختلفی برای روشن شدن امکان استفاده از پودر لاستیک در روسازی‌ها مورد بررسی قرار گرفت. تحقیقات اخیر نشان داده است که افزودن CR باعث بهبود رفتار روسازی‌ها و کاهش صدای چرخ‌ها در سطح روسازی می‌شود (Yuan et al, ۲۰۱۲, Vargas et al, ۲۰۱۳) یک اصلاح کننده مفید ممکن است عملکرد قیر را در برابر چندین خرابی بهبود بخشد. همانطور که برخی از مطالعات انجام شده قبلاً نشان می‌دهد، اصلاح مخلوط‌ها با افزودن تنها یک عنصر نمی‌تواند رفتار مخلوط‌ها را بهتر کند. بنابراین، اصلاح با بیش از یک افزودنی ضروری است که احتمالاً منجر به بهبود روسازی‌ها در نتیجه فعل و انفعالات متعدد می‌شود. برای این منظور، اصلاح قیرها توسط گیلسونایت و CR در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. طبق مطالعات قبلی، گیلسونایت به ترتیب منجر به افزایش و کاهش ویسکوزیته و سفت شدن قیر در اثر استفاده از گیلسونایت باشد. این ماده به صورت خشک و مرطوب در روسازی‌ها استفاده می‌شود. در روش مرطوب، مستقیماً در قیرها اعمال می‌شود در حالی که در روش خشک، این اصلاح کننده در سنگدانه‌ها قبل از مخلوط کردن با آسفالت در میکسرها اعمال می‌شود. تحقیقات مختلف در گذشته در مورد استفاده از این ماده نشان داد که استفاده از گیلسونایت باعث افزایش خستگی و همچنین رفتارهای شیاردار در قیر می‌شود. اما عملکرد قیر را در دماهای پایین کاهش می‌دهد. (Xie et al, ۲۰۱۳, Fang et al, ۲۰۱۳)

هدف از تحقیق حاضر بررسی استفاده از افزودنی گیلسونایت و پودر لاستیک به همراه افزودنی‌های نیمه گرم جهت بهبود خرابی خستگی روسازی محورهای استان کرمانشاه می‌باشد. شکل ۱ خرابی موجود در محورهای استان را نشان می‌دهد. با توجه به تغییرات آب و هوایی و سردسیر بودن منطقه خرابی‌های متعددی از جمله ترکهای طولی و عرضی و خستگی در محور مشاهده شده است. اصلاح قیر با گیلسونایت و CR در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. همچنین برای کاهش ویسکوزیته و همچنین دمای تراکم و اختلاط مخلوط اصلاح شده گیلسونایت/CR، از نانومواد زایکوترم و ساسوبیت استفاده شد. هدف از این کار بررسی تاثیر گیلسونایت با چهار درصد (۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪)،

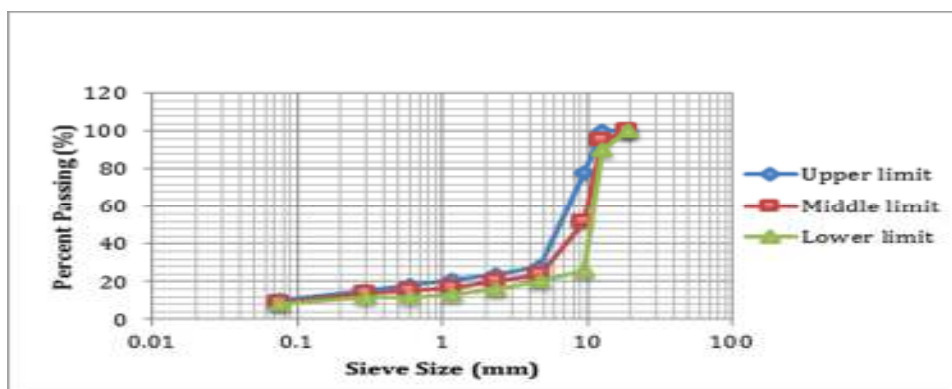
دمای پایین قیر ندارد (Mirzaiyan et al, ۲۰۱۹). با هدف بهبود عملکرد دمای بالا و پایین، پایداری ذخیره‌سازی و سازگاری آسفالت اصلاح شده با گیلسونایت، لاستیک استیرین بوتادی ان (SBR) برای دستیابی به اصلاح بیشتر در این تحقیق انتخاب شد. اثرات SBR<sup>۱</sup> بر خواص سستی، رفتارهای ریولوژیک (شیارافتادگی، آسیب خستگی و عملکرد مقاومت شکاف دما پایین)، ثبات ذخیره‌سازی و سازگاری آسفالت‌های اصلاح شده با ژیلسونایت با استفاده از رنومتر برشی دینامیک (DSR<sup>۲</sup>)، رنومتر پرتو ترکیبی (BBR<sup>۳</sup>) و ویسکوزیته چرخشی (RV<sup>۴</sup>) ارزیابی شدند. تست‌های DSR نشان داد که اضافه کردن SBR، دمای شکست آسفالت اصلاح شده گیلسونایت را افزایش می‌دهد که نشان‌دهنده بهبود برش و مقاومت خستگی است. گیلسونایت تاثیر زیادی در بهبود حساسیت دمایی آسفالت داشت. علاوه بر این، تست‌های BBR نشان داد که SBR اثر مفیدی بر مقاومت ترک حرارتی پایین آسفالت اصلاح شده گیلسونایت دارد. علاوه بر این، SBR می‌تواند ثبات ذخیره‌سازی و سازگاری آسفالت اصلاح شده با گیلسونایت 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 گیلسونایت 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 گیلسونایت SBR حاوی ۳۰ درصد وزنی گیلسونایت، محتوای مخلوط SBR به صورت ۷,۵ wt % توصیه شد (Ren et al, ۲۰۱۸). قیر طبیعی گیلسونایت یک هیدروکربن رزینی طبیعی است که برای اولین بار در حوالی آبگیر 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 ماده ای سیاه رنگ و درخشان و شبیه مواد معدنی شیشه ای است. این ماده شکننده است و بسیار آسان تبدیل به پودر قهوه ای تیره می‌شود. قیر طبیعی گیلسونایت در رگه‌های عمودی زیر سطح زمین یافت می‌شود. اندازه عرض رگه ها ۸/۱ - 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 اندازه ای در حدود ۲۴۱۳/۵ کیلومتر می‌رسد. عرض رگه‌ها در نزدیک سطح کم است و هرچه به عمق می‌رویم بیشتر می‌شود. پودر لاستیک یکی از افزودنی‌های قابل توجه در روسازی است که

طبقه‌بندی قیرها به جای وضعیت ترافیک متمرکز شده است. بنابراین، در این تحقیق از روش‌های MSCR و PG برای درجه‌بندی قیرهای مختلف استفاده شد و نتایج با هم مقایسه شدند. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها، ANOVA اجرا شد. علاوه بر این، برای بررسی ویژگی‌های مخلوط، آزمایش‌های کشش غیرمستقیم، مدول برجهندگی، و خستگی انجام شد.

و پودر لاستیک (۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪) و ۲ اصلاح کننده نیمه گرم (۳٪ Zycotherm و ۳٪ Sasobit) بر رفتار قیرها و مخلوط‌های SMA<sup>۱</sup> می‌باشد. عملکرد قیرهای حاوی مواد افزودنی با اجرای آزمایش‌های LAS، DSR، ویسکوزیته چرخشی، نقطه نرمی و درجه نفوذ ارزیابی شد. همچنین، تحقیقات کمی در مورد وضعیت ترافیک به قیرهای درجه بندی انجام شده است. تحقیقات گذشته بر شرایط آب و هوایی برای



شکل ۱. نمونه‌ای از خرابی‌های روسازی موجود در محورهای استان کرمانشاه



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی سنگدانه‌ها

جدول ۱. خصوصیات مصالح سنگی

آزمایشات سنگ	نتایج	استاندارد
وزن مخصوص حقیقی	۲.۴۹۳	ASTM C127
(%) سایش مصالح درشت دانه	۲.۲	ASTM C127
(%) سایش مصالح ریزدانه	۴.۲	ASTM C128
(%) سایش لس آنجلس	۲۲.۳	AASHTO T96
(%) درصد شکستگی در دو وجهه	۹۴	ASTM D5821

جدول ۲. خصوصیات شیمیایی مصالح

نوع	درصد اکسید (%)							
	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SiO <sub>2</sub>	MnO
مصالح آهکی	۴۳	۰.۰۷	۰.۶۵	۲.۱۲	۰.۹۵	۰.۷۵	۱۷.۵۳	۰.۰۴۶

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مواد

#### ۲-۱-۱- مصالح سنگی

برای تهیه مصالح در تهیه نمونه، از یک معدن در کرمانشاه استفاده شد. خواص سنگدانه‌های مورد استفاده در جداول ۱-۲ نشان داده شده است. شکل ۲ درجه بندی سنگدانه‌ها را با حداکثر اندازه اسمی ۱۲/۵ میلی متر نشان می‌دهد.

#### ۲-۱-۲- قیر

در این پژوهش از نوع قیر خالص ۸۵/۱۰۰ بود که از شرکت نفت پاسارگاد تهیه شد و مشخصات فیزیکی آن در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳. خصوصیات قیر خالص استفاده شده

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

#### ۲-۱-۳- 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 جدول ۴ آمده است. در این تحقیق از چهار 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 درجه 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. ۲۰۰۶).

جدول ۴. دانه‌بندی پودر لاستیک مش ۴۰-

اندازه الک ( $\mu\text{m}$ )	مانده (%)	رد شده (%)
۳۰(۶۰۰)	۰	۱۰۰
۴۰(۴۲۵)	۸/۲	۹۱/۸
۵۰(۳۰۰)	۳۳	۵۸/۸
۱۰۰(۱۵۰)	۴۷/۵	۱۱/۳
۲۰۰(۷۵)	۱۱/۳	۰

#### ۲-۱-۴- پودر قیر معدنی گیلسونایت

این گیلسونایت در جداول ۵ و ۶ آورده شده است. لازم به ذکر است که پودر گیلسونایت رد شده از الک شماره ۲۰۰ برای استفاده در این پژوهش استفاده شده است.

گیلسونایت مورد استفاده در این پژوهش از معدن قیر کویری گراوه در روستای گراوه مابین شهرستان‌های قصر شیرین و گیلان غرب تهیه شد. مشخصات فیزیکی و مواد تشکیل دهنده

جدول ۵. 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 ۶. مشخصات شیمیایی گیلسونایت

استاندارد	نتیجه	آزمایش
ASTM-D3174	۱۲-۱۵	میزان خاکستر (%)
ASTM-D3173	$\leq 5$	میزان رطوبت (%)
ASTM- D3172	۲۹	میزان کربن (%)
ASTM-D4	۸۱	حلالیت در سولفید کربن (%)
ASTM-D3289	۱,۱۱	وزن مخصوص در ۲۵ درجه سانتیگراد $\text{gr/cm}^3$
-	سیاه	رنگ در حالت کلوخه
-	قهوه ای تیره	رنگ در حالت پودر
ASTM-D36	۲۲۱	نقطه نرمی $^{\circ}\text{C}$
ASTM-D5	۰-۱	درجه نفوذ در $^{\circ}\text{C}$ ۲۵

۵-۱-۲- فیبر

برای از بین بردن ریزش قیر در مخلوط SMA، بهتر است بر اساس توصیه NCHRP No 425 (Brown and Cooley, ) کاربرد فیبر در جدول ۷ ارزیابی شده است. ویژگی‌های الیاف

جدول ۷. خصوصیات فیبر

نتایج	خصوصیات
۸۰	(%) درصد سلولز
۱.۱	(میلی‌متر) میانگین طول فیبر
۰.۰۴۵	(میلی‌متر) میانگین ضخامت
۷.۵	(۵ گرم بر ۱۰۰ مترمکعب) مقدار PH
۰.۵	(گرم بر مترمکعب) وزن مخصوص

۶-۱-۲- افزودنی‌های WMA

برای ارزیابی تاثیر مواد WMA<sup>۱۱</sup> بر رفتار رئولوژیکی قیرهای ترکیبی اصلاح شده گیلسونایت/CR، از ماده WMA از زایکوترم و همچنین ساسوبیت استفاده شد. ویژگی‌های اصلاح کننده‌های گرم در جدول ۸ نشان داده شده است. درصد یک افزودنی خاص با توصیه سازنده انتخاب شده است.

جدول ۸. مشخصات افزودنی‌های نیمه گرم

زایکوترم	ساسوبیت	خصوصیات
مایع	پاستیلی	حالت فیزیکی
زرد	قهوه ای	رنگ
بدون بو	بدون بو	بو
-	گرم بر مول ۱۰۰۰	وزن مولکولی
گرم بر مول ۱.۰۱ (۲۵ سانتی‌گراد)	۰.۹ (۲۵ سانتی‌گراد)	وزن مخصوص
-	-	چگالی بخار
-	-	چگالی حقیقی
۱۰ درصد قابل حل در آب خثی یا کمی اسیدی	خثی	مقادیر pH
-	-	نقطه جوش
غیر قابل اشتعال	[ASTM D۹۲, ۲۰۱۲] ۲۸۵ سانتی‌گراد	نقطه اشتعال
-	۱۰۰ سانتی‌گراد	نقطه ذوب
۱۰۰-۵۰۰ CPS	-	ویسکوزیته
فایل حل	غیر حلال	حلالیت در آب



## ۲-۲- 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 و در نهایت افزودنی WMA به قیر اصلاح شده اضافه گردید. تحقیقات مختلف دمای ۱۴۰-۱۶۰ درجه را برای اختلاط قیرهای اصلاح شده توسط پودر لاستیک و اصلاح کننده‌های WMA پیشنهاد کرده‌اند. در نتیجه، دمای ۱۵۵ درجه سانتی‌گراد (۲۰ درجه سانتی‌گراد کمتر از تهیه قیر اصلی) برای اصلاح WMA قیر بکر در نظر گرفته شد. یک دستگاه اختلاط با برش بالا به مدت ۳۰ دقیقه در ۵۰۰ دور در دقیقه برای مخلوط کردن افزودنی‌های نیمه گرم استفاده شد. گزارش NCHRP شماره ۴۲۵ برای ساخت نمونه استفاده شد. با توجه به طرح مخلوط نمونه‌ها، مقدار قیر ۷ درصد به عنوان درصد قیر بهینه تعیین شد. ۳ نمونه برای هر نوع اصلاح کننده با مقادیر مختلف در این مطالعه ساخته شد.

جدول ۹. کدگذاری نمونه‌های مختلف

شماره	قیر اصلی	گیلسونایت	پودر لاستیک	افزودنی نیمه گرم	کد نمونه
۱		۰	۰	۰	C
۲		۱۰	۰	۰	G10
۳		۲۰	۰	۰	G20
۴		۳۰	۰	۰	G30
۵		۴۰	۰	۰	G40
۶		۳۰	۵	۰	G30C5
۷		۳۰	۱۰	۰	G30C10
۸		۳۰	۱۵	۰	G30C15
۹	۸۵-۱۰۰	۳۰	۲۰	۰	G30C20
۱۰		۳۰	۵	۳٪ S	G30C5S
۱۱		۳۰	۵	۰.۳٪ Z	G30C5Z
۱۲		۳۰	۱۰	۳٪ S	G30C10S
۱۳		۳۰	۱۰	۰.۳٪ Z	G30C10Z
۱۴		۳۰	۱۵	۳٪ S	G30C15S
۱۵		۳۰	۱۵	۰.۳٪ Z	G30C15Z
۱۶		۳۰	۲۰	۳٪ S	G30C20S
۱۷		۳۰	۲۰	۰.۳٪ Z	G30C20Z

جدول ۱۰ دمای تراکم و اختلاط نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۱۰. دمای اختلاط و تراکم مخلوط

مخلوط	دمای اختلاط (سانتی‌گراد)	دمای تراکم (سانتی‌گراد)
C	143	135
G10	148	137
G20	150	139
G30	151	140
G40	153	142
G30C5	154	143
G30C10	156	145
G30C15	158	147
G30C20	160	149
G30C5S	161	151
G30C5Z	162	153
G30C10S	164	154
G30C10Z	166	155
G30C15S	168	156
G30C15Z	169	157
G30C20S	170	159
G30C20Z	169	158

### ۳- روش کار آزمایش

#### ۳-۱- آزمایش پایه‌ای قیر

خواص فیزیکی متداول قیر پایه و قیر اصلاح‌شده 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 اصلاح‌نشده و اصلاح‌شده در دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد مطابق با استاندارد ASTM - D ۴۴۰۲ انجام شد.

#### ۳-۲- رئومتر برش دینامیکی

به منظور مشخص کردن ویژگی‌های اساسی رپولوزیکی 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 ( $\delta$ ) پارامترهای اصلی ویسکوالاستیک 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 تاخیر زمانی بین تنش‌های برشی اعمال‌شده و پاسخ‌های کرنش برشی را نشان می‌دهد. تحلیل این دو پارامتر می‌تواند رفتار قیر مانند پتانسیل شیارشدگی را پیش‌بینی کند. پارامتر  $G^* / \sin \delta$  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 ۶۴، ۵۸، ۵۲، ۷۰ و ۷۶ درجه سانتی‌گراد با توجه به روش آزمون استاندارد ASTM - D ۷۱۷۵، تست شدند. مقدار  $G^*$

اثر بار ثابت است و شیب یا نرخ خزش (میلی‌متر) که بیانگر تغییر سختی با تغییرات بار اعمال شده می‌باشد، به دست می‌آید. آزمایش بدین صورت انجام می‌گیرد که تیرچه قیری با ریختن قیر داغ در قالب‌های مکعب مستطیل ساخته می‌شود. 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 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 تکیه‌گاه‌ها گذاشته شده و باری حدود ۳ تا ۴ گرم بر آن وارد می‌شود. سپس بار ۱۰۰ گرمی بصورت اتوماتیک به مدت ۱ ثانیه توسط دستگاه 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 حاصله نیز همزمان اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۳ و ۴). از منحنی تغییر شکل (افت و خیز) بر زمان بارگذاری می‌توان سختی خزش و مقدار میلی‌متر را بدست آورد. بر اساس آئین نامه شارپ مقدار میلی‌متر در زمان ۶۰ ثانیه بایستی برابر یا بیش از ۰٫۳ باشد.

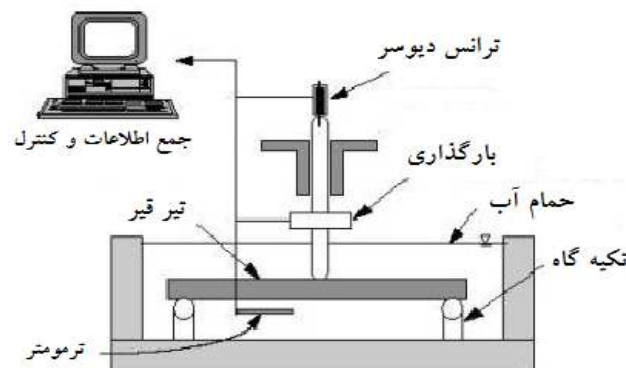
$\sin \delta$  برای قیرهای پیرنشده توصیه می‌شود که با توجه به استاندارد، ASTM - D۷۱۷۵ بیش از ۱ کیلو پاسکال باشد.

### ۳-۳- 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 حاصله در وسط تیرچه در تمام این مدت اندازه‌گیری 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



شکل ۳. رئومتر تیرچه خمشی (BBR)



شکل ۴. شمای آزمایش رئومتر تیرچه خمشی (BBR)

### ۳-۴-LAS

می‌شود که در آن A و B ضرایب معادله‌ای هستند که بر اساس تئوری آسیب پیوسته ویسکوالاستیک محاسبه می‌شوند. این آزمایش در دمای ۲۵ درجه انجام شد.

$$N_f = A (\gamma_{max})^B$$

ارزیابی عمر خستگی نیز استفاده کرد. آزمایش کششی غیر مستقیم بر اساس آیین‌نامه ASTM D6931-12 با نرخ ثابت ۵۰/۸ میلیمتر بر دقیقه و دمای ۲۰ درجه سانتیگراد انجام شد. مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌ها با استفاده از معادله زیر تعیین شد:

$$ITS = (2P_{max}) / (\pi Dt)$$

مورد استفاده قرار می‌گیرد. انرژی شکست به عنوان کار انجام شده جهت ایجاد یک ترک که برابر است با سطح زیر منحنی بار-تغییر شکل شکست نمونه تعریف می‌گردد. برای محاسبه چگالی انرژی شکست از آزمایش کشش غیر مستقیم، انرژی شکست بر حجم مخلوط تقسیم می‌گردد. چگالی انرژی شکست براساس معادله زیر محاسبه می‌گردد.

$$F E = \frac{\int_0^{\delta_{max}} P(\delta) d\delta}{V}$$

که FE چگالی انرژی شکست (MPa)، P بار (N)، V حجم نمونه (mm<sup>3</sup>)،  $\delta$  تغییر شکل می‌باشد.

### ۳-۶-مدول برجهنگی

قرار داده شد. شکل بارگذاری نیمه سینوسی، مدت اعمال بار ۰/۱ ثانیه، زمان استراحت ۰/۹ ثانیه و ضریب پواسون ۰/۳۵ فرض گردید. در این آزمایش به ازای هر مخلوط، ۳ نمونه آسفالتی تهیه و روی هر نمونه ۵ پالس تکرار شد و میانگین نتایج به وسیله دستگاه نمایش داده شد. مدول برجهنگی براساس معادله زیر محاسبه می‌گردد:

آزمایش LAS در این مطالعه برای محاسبه رفتار خستگی قیرهای مختلف انجام شد. این آزمایش بر اساس دستورالعمل AASHTO TP 101-14 اجرا شد. برای ارزیابی و اندازه‌گیری عمر خستگی قیرهای مختلف، معادله ۱ اعمال (۱)

### ۳-۵-آزمایش کشش غیر مستقیم

در آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم، همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، یک نمونه استوانه‌ای به صورت قطری بارگذاری می‌شود. آزمایش کشش غیر مستقیم برای تعیین مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی و پیش بینی ظهور ترک‌ها در مخلوط آسفالتی استفاده می‌شود. همچنین می‌توان از این آزمایش برای

(۲)

که ITS: مقاومت کششی نمونه‌ها بر حسب Kpa،  $P_{max}$  بار اعمالی در زمان شکست بر حسب D، قطر نمونه‌ها بر حسب میلی‌متر، t ارتفاع نمونه‌ها بر اساس میلی‌متر می‌باشد. همچنین می‌توان از این آزمایش برای ارزیابی عمر خستگی نیز استفاده کرد. انرژی شکست و مقاومت کششی به عنوان دو پارامتر به طور همزمان برای ارزیابی رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی

(۳)

آزمایش مدول برجهنگی در دماهای پایین بنحوی مرتبط با ترک خوردگی حرارتی می‌باشد. تحقیقات متعددی نشان داده است که مخلوط‌های سخت‌تر در دماهای پایین‌تر بیشتر مستعد ترک خوردگی حرارتی می‌باشند. برای تعیین مدول برجهنگی از استاندارد AS 2891-13-1-1995 استفاده شد. ابتدا نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در محفظه دستگاه در دمای ۲۵ سانتی‌گراد

$$M_r = \frac{p(\vartheta + 0.2734)}{\delta t} \quad (۴)$$

$M_R$  = مدول برجهنگی (مگا پاسکال)

$P$  = بار تکراری (نیوتن)

$V$  = نسبت پواسن

$t$  = ضخامت نمونه (میلی متر)

$H$  = تغییر شکل افقی برگشت پذیر (میلی متر)

$V$  = تغییر شکل قائم برگشت پذیر (میلی متر)

### ۳-۷- آزمایش تیر خمشی چهار نقطه‌ای خستگی

تمامی نمونه‌ها در سطح کرنش ثابت ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ میکرو استرین با بارگذاری سینوسی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. آزمایش در دمای ثابت ۲۰ درجه سانتیگراد انجام شده است. نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت قبل از آزمایش در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد قرار گرفته‌اند تا به دمای مذکور برسند. فرکانس بارگذاری ۱۰ هرتز می‌باشد. مدول سختی براساس نیرو و جابه جایی اندازه‌گیری شده بعد از ۵۰ سیکل براساس معادلات زیر محاسبه شده است.

$$\varepsilon = \frac{12\delta h \times 10^6}{3(G_0^2 - 4G_1^2)} \quad (۵)$$

$$\sigma = \frac{G_0 P}{Bh^2} \quad (۶)$$

$$S = \frac{1000\sigma}{\varepsilon} \quad (۷)$$

مدول سختی تیر (مگاپاسکال). آزمایش خستگی تا زمانی که مدول سختی به نصف مقدار اولیه خود برسد، ادامه می‌یابد. بعد از آزمایش عمر خستگی تیرها، عمر خستگی مخلوط با معادله زیر محاسبه گردیده است:

مقاومت خستگی تیرها براساس آزمایش تیر خمشی چهار نقطه‌ای براساس آیین نامه AASHTO T321-07 ارزیابی شده است. هدف از این آزمایش تعیین عمر خستگی تیرها در سطوح کرنش مختلف می‌باشد. آزمایش خستگی می‌تواند هم در شرایط تنش ثابت و کرنش ثابت انجام شود. در حالت تنش ثابت، شکست نمونه بلافاصله بعد از شروع ترک تعریف می‌شود. در حالت کرنش ثابت، شکست نمونه زمانی که مدول سختی آن به نصف مدول اولیه آن می‌رسد، تعریف می‌گردد. این معیار بر اساس آیین نامه AASHTO-T321 استفاده شده است.

که حداکثر کرنش اعمال شده بر تیر، تغییر شکل ماکزیمم در وسط تیر (میلی‌متر)، طول خارجی گیج (۳۵۵/۵ میلی‌متر)، طول داخلی گیج (۱۱۸/۵ میلی‌متر)، حداکثر تنش کششی (کیلوپاسکال)،  $P$  حداکثر نیرو (کیلو نیوتن)،  $B$  میانگین عرض تیر (میلی‌متر)،  $S$

(۸)

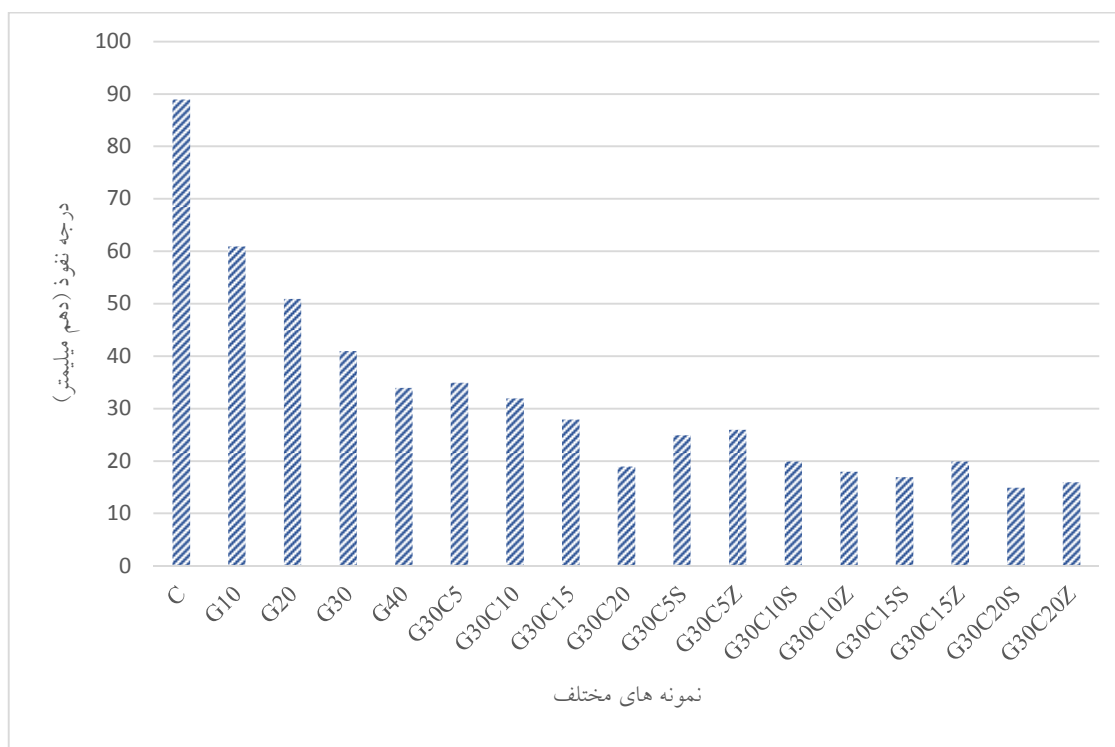
$$N_f = a\varepsilon^{-b}$$

#### ۴- نتایج

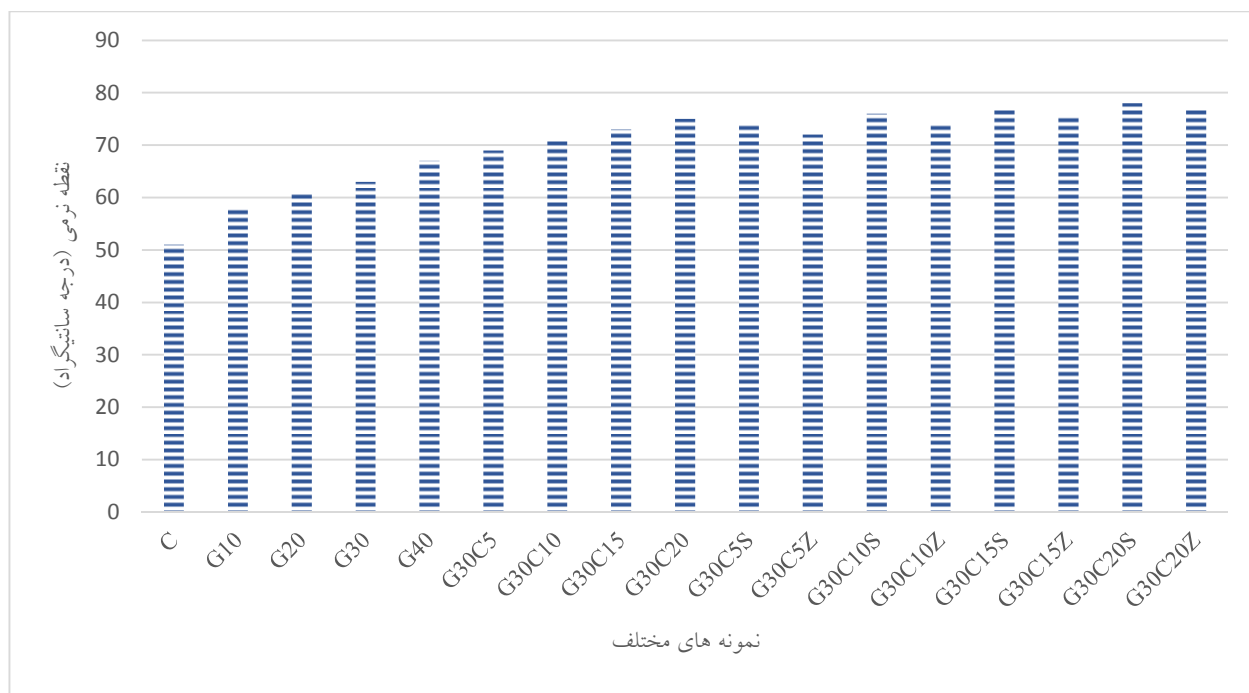
##### ۴-۱- نتایج آزمایشات سنتی و ربولوژی قیر

نمونه‌ها کاهش و نقاط نرم شدن نمونه‌ها افزایش می‌یابد. علاوه بر این، قیر اصلاح شده با گیلسونایت را در برابر ترک خوردگی مقاوم و انعطاف پذیرتر می‌کند. در بین قیرهای اصلاح شده با افزودنی نیمه گرم، قیرهای اصلاح شده با ساسوبیت در مقایسه با قیرهای اصلاح شده توسط زایکوترم، نفوذ کمتر و نقاط نرم شدن بیشتری داشتند. همچنین نشان داد که استفاده از CR باعث بهبود رفتارهای شیاردار و دمای پایین قیرهای اصلاح شده با گیلسونایت می‌شود.

شکل‌های ۵ و ۶ نتایج آزمایش‌های قیر فیزیکی یک پایه، گیلسونیت، گیلسونیت/CR و همچنین قیرهای اصلاح شده گیلسونیت/CR/گرم را نشان می‌دهند. با توجه به نتایج، استفاده از گیلسونیت و گیلسونیت/CR در قیرهای بکر منجر به افزایش عملکرد قیرها می‌شود. نتایج نشان داد افزودن گیلسونیت، گیلسونیت/CR و همچنین افزودنی‌های گرم باعث کاهش درجه نفوذ و افزایش نقاط نرم شدن قیر می‌شود. این می‌تواند به دلیل سفت شدن قیر با استفاده از گیلسونیت و گیلسونیت/CR باشد. با افزایش درصد گیلسونیت و گیلسونیت/CR، عیار نفوذ



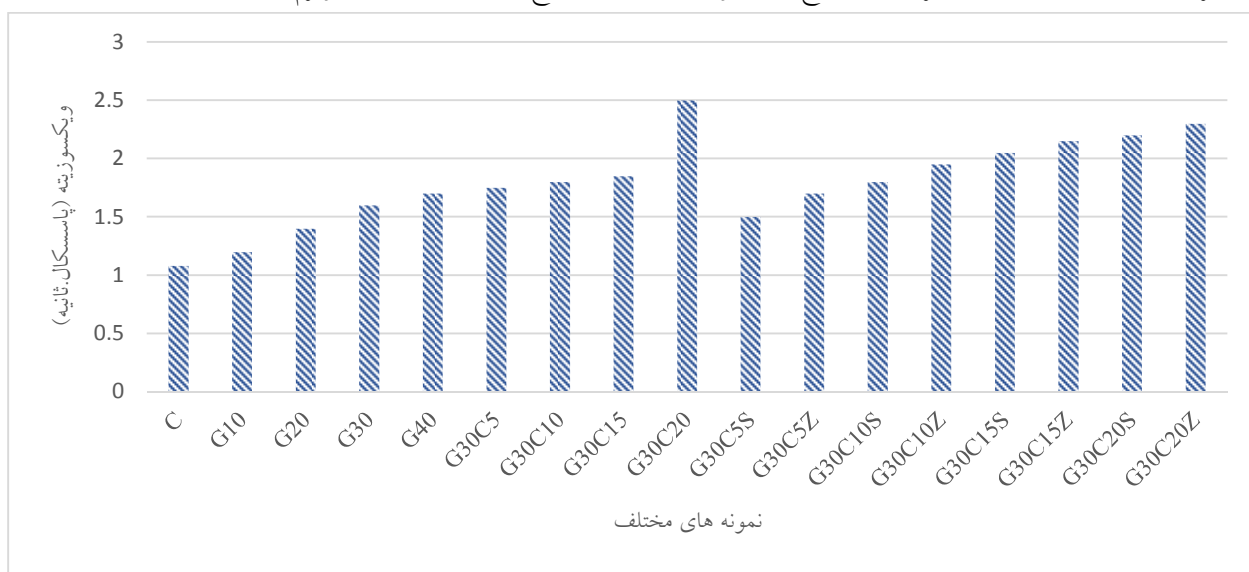
شکل ۵. نتایج آزمایش درجه نفوذ



شکل ۶. نتایج نقطه نرمی

Gilsonite/CR. مقدار ویسکوزیته افزایش می‌یابد. نتیجه با استفاده از افزودنی‌های گرم نشان داد که ویسکوزیته قیرهای حاوی گیلسونیت/CR کاهش می‌یابد. در بین اصلاح‌کننده‌های گرم، ساسوبیت توانایی برتری در کاهش ویسکوزیته قیرهای اصلاح‌شده در مقایسه با زایکوترم دارد.

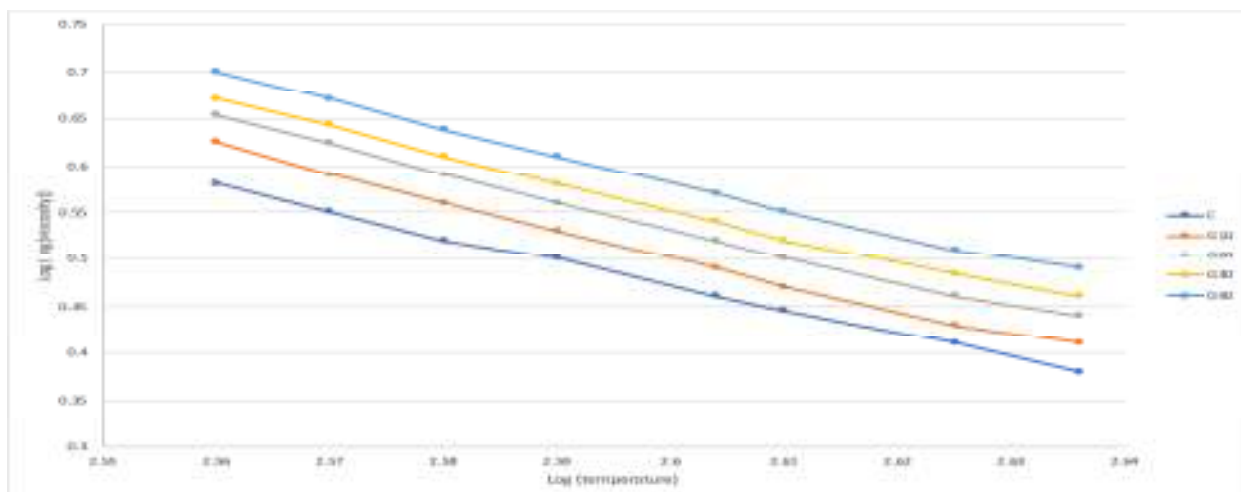
همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، استفاده از گیلسونیت منجر به افزایش ویسکوزیته قیر پایه می‌شود. با توجه به نتایج آزمایش‌های ویسکوزیته، افزودن افزودنی گیلسونیت/CR باعث افزایش ویسکوزیته قیر می‌شود و با افزودن درصد CR در قیرهای اصلاح‌شده توسط



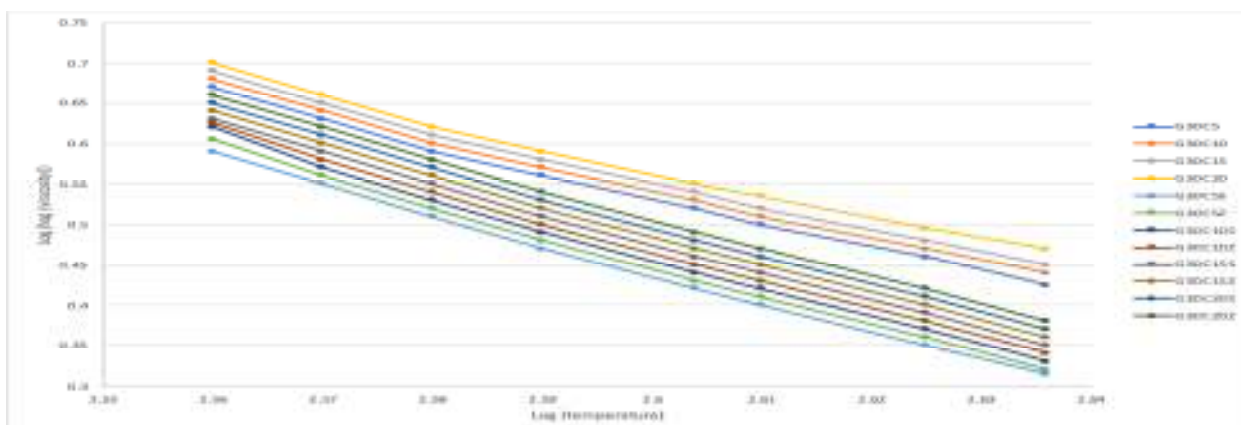
شکل ۷. نتایج ویسکوزیته

عملکرد بهتری در کاهش ویسکوزیته قیرهای اصلاح شده Gilsonite/CR دارد. علاوه بر این، برای بررسی حساسیت به دما در قیرها، مقدار حساسیت دمای ویسکوزیته ( $VTS^{11}$ ) به دست آمد. نتایج جدول ۱۱ نشان می‌دهد که استفاده از گیلسونیت منجر به کاهش مقادیر VTS در قیر بکر می‌شود. همچنین، نتیجه VTS نشان داده شده با استفاده از Gilsonite/CR و همچنین افزودنی‌های گرم باعث کاهش VTS در ۹۰-۱۶۰ درجه می‌شود. با کاهش مقدار VTS، مقاومت قیر در برابر تغییرات دما افزایش می‌یابد، بنابراین عملکرد شیاربندی قیر افزایش می‌یابد.

برای ارزیابی حساسیت دما و اندازه‌گیری دمای اختلاط نمونه‌ها، به دست آوردن نمودارهای ویسکوزیته-دما رایج است. نتایج تغییرات ویسکوزیته در برابر دما در قیرهای اصلاح شده گیلسونیت، گیلسونیت/CR و گیلسونیت/CR/گرم به ترتیب در شکل‌های ۸ الف و ب نشان داده شده است. نتیجه آزمایش نشان می‌دهد که با استفاده از گیلسونیت، ویسکوزیته قیر افزایش می‌یابد. ممکن است به دلیل سفت شدن قیرهای گیلسونیت باشد. علاوه بر این، با توجه به نتایج، افزودن CR در قیرهای اصلاح شده با گیلسونیت، ویسکوزیته را افزایش داد. همانطور، که نتایج نشان داد با استفاده از افزودنی گرم، ویسکوزیته قیر حاوی گیلسونیت/CR کاهش می‌یابد. افزودنی Sasobit



(الف)



(ب)

شکل ۸. منحنی VTS با قیرهای مختلف: قیرهای اصلاح شده توسط Gilsonite

(الف) قیرهای اصلاح شده توسط Gilsonite/CR (ب)

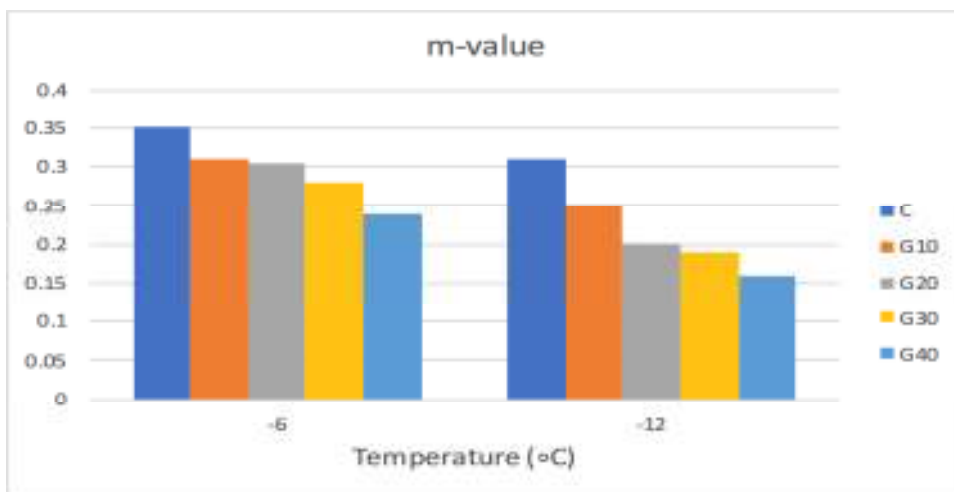


جدول ۱۱. نتایج VTS قیرهای مختلف

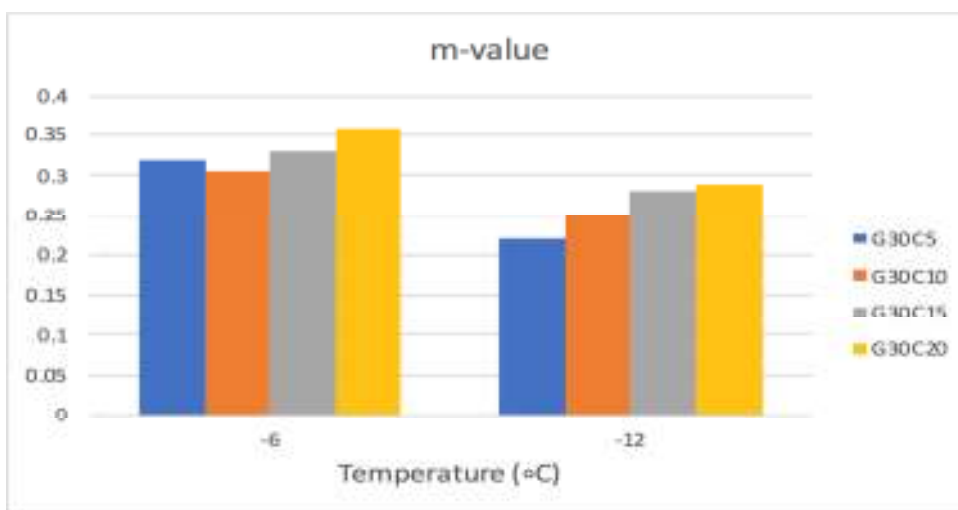
افزودنی‌ها	لگاریتم دما				
	۹۰	۱۱۰	۱۳۰	۱۵۰	۱۶۰
C	۴.۳۴	۳.۷۱	۳.۲	۲.۷۸	۲.۴۷
G10	۴.۲۵	۳.۶۸	۳.۲۵	۲.۷	۲.۴۲
G20	۴.۱۷	۳.۵۹	۳.۲	۲.۶۷	۲.۳۸
G30	۴.۱۶	۳.۵۳	۳.۱۸	۲.۶۴	۲.۳۵
G40	۴.۱۴	۳.۴۹	۳.۱۵	۲.۶	۲.۳۲
G30C5	۴.۰۹	۳.۴۶	۳.۱۲	۲.۵۸	۲.۲۹
G30C10	۴.۰۱	۳.۵۱	۳.۱۹	۲.۵۵	۲.۲۵
G30C15	۳.۹۳	۳.۴۲	۳.۱۳	۲.۴۴	۲.۲۱
G30C20	۳.۸۹	۳.۳۷	۳.۰۷	۲.۴	۲.۱۹
G30C5S	۳.۸۲	۳.۳	۳.۰۲	۲.۳۷	۲.۱۵
G30C5Z	۳.۷۹	۳.۳۴	۲.۹۶	۲.۳۲	۲.۱۶
G30C10S	۳.۷۵	۳.۱۲	۲.۹	۲.۲۸	۱.۰۵
G30C10Z	۳.۷۳	۳.۱۵	۲.۸۵	۲.۲۵	۱.۹
G30C15S	۳.۷۱	۳.۰۹	۲.۸۲	۲.۲	۱.۸۸
G30C15Z	۳.۷۲	۳.۱۳	۲.۷۵	۲.۱۹	۱.۹۲
G30C20S	۳.۶۵	۳.۳۱	۲.۶۳	۲.۱	۱.۸۲
G30C20Z	۳.۶۷	۳.۳۳	۲.۶۷	۲.۱۲	۱.۸۵

شکل در قیرها می‌شود. شاید به دلیل سفت شدن قیر با استفاده از گیلسونیت باشد. همچنین کاربرد CR در قیرهای اصلاح شده توسط ژیلسونایت باعث کاهش مقدار سفتی و افزایش قابل ملاحظه  $m$ -value می‌شود. بر اساس نتایج، CR منجر به بهبود عملکرد دمای پایین در قیر اصلاح شده با گیلسونایت می‌شود. با توجه به نتایج  $m$ -value و  $s$ -value قیرهای اصلاح شده، استفاده از افزودنی‌های گرم باعث کاهش سفتی و افزایش  $m$ -value قیرها می‌شود. افزودنی‌های گرم تأثیر مثبتی بر ویژگی‌های دمای پایین قیر داشتند.

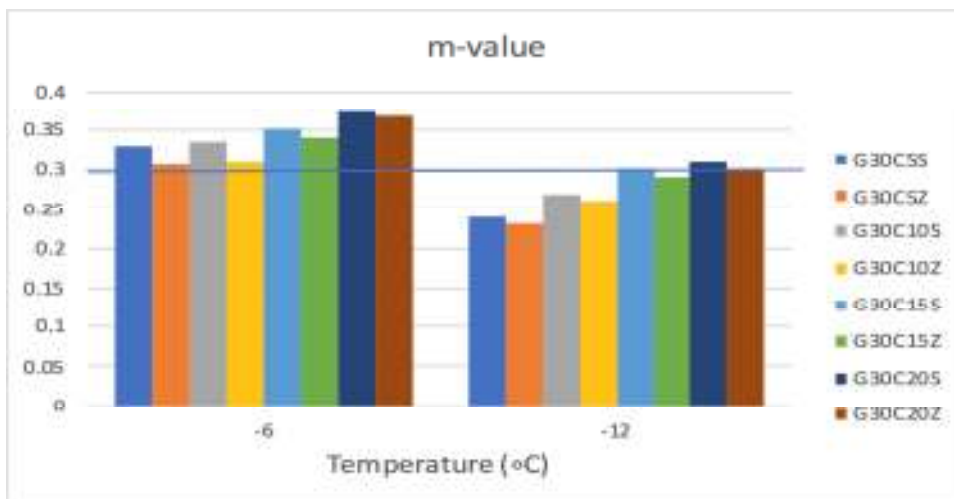
بدیهی است که گیلسونیت تأثیر نامطلوبی بر رفتار دمای پایین در قیرها داشته است. با این حال، استفاده از CR باعث بهبود رفتارهای دمای پایین در قیرها می‌شود. بنابراین، نیاز به کشف و بررسی رفتار دمای پایین قیرهای اصلاح شده با گیلسونایت حاوی CR دارد. نتیجه  $s$ -value و  $m$ -value در قیرهای مختلف به ترتیب در شکل ۹-۱۰ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که با استفاده از گیلسونایت، این عوامل در قیرها به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. استفاده از گیلسونیت باعث سفت شدن قیرها و در نتیجه کاهش انعطاف‌پذیری قیرها می‌شود. علاوه بر این، گیلسونایت منجر به بهبود آخرین تغییر



(الف)

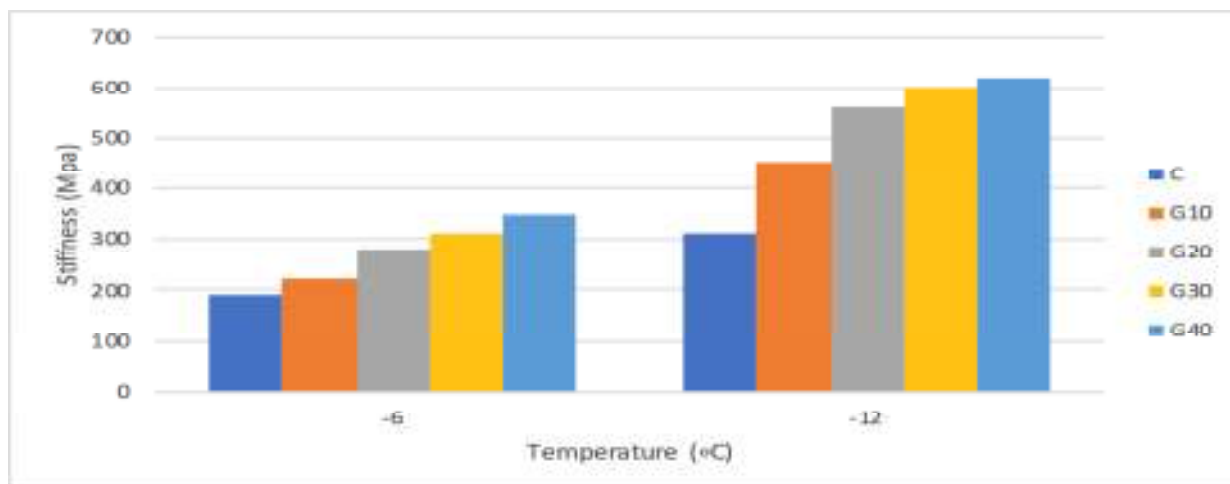


(ب)

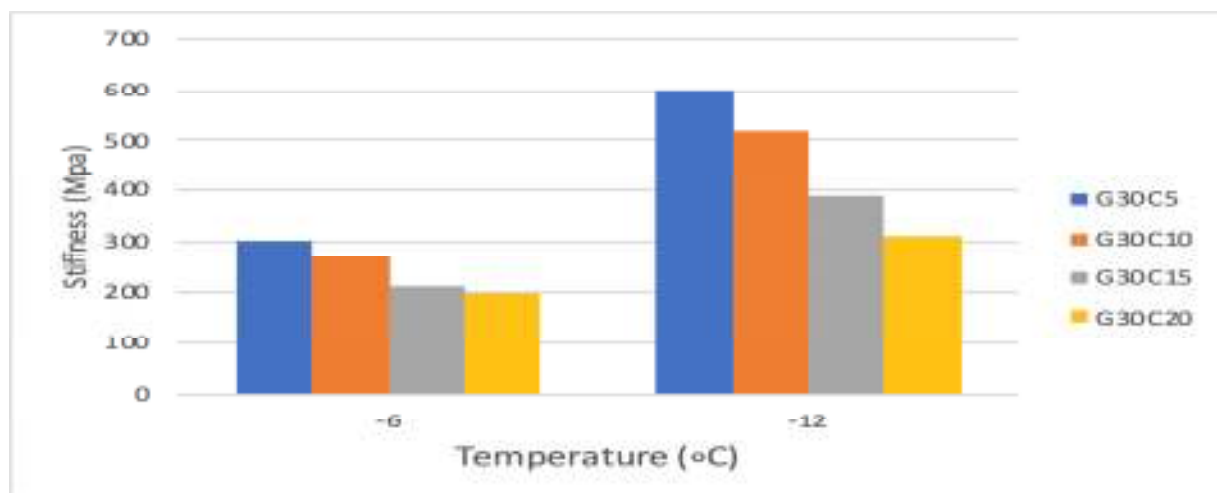


(ج)

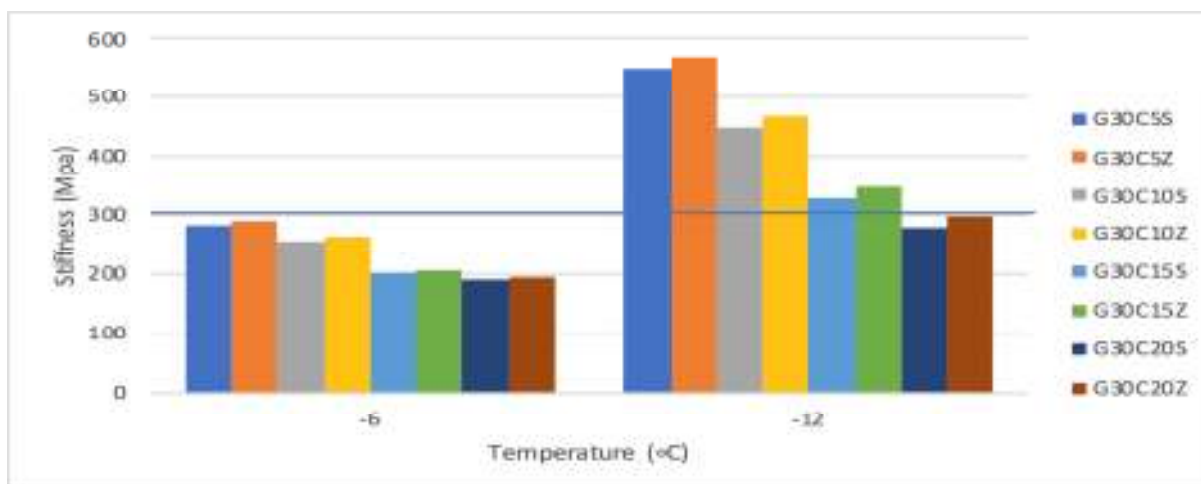
شکل ۹. نتایج m-value برای نمونه‌های مختلف. الف) اصلاح شده با گیلسونایت ب) اصلاح شده با گیلسونایت و پودر لاستیک ج) اصلاح شده با گیلسونایت و پودر لاستیک و افزودنی نیمه گرم



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۰. نتایج s-value برای نمونه های مختلف. الف) اصلاح شده با گیلسونایت ب) اصلاح شده با گیلسونایت و پودر لاستیک ج) اصلاح شده با گیلسونایت و پودر لاستیک و افزودنی نیمه گرم

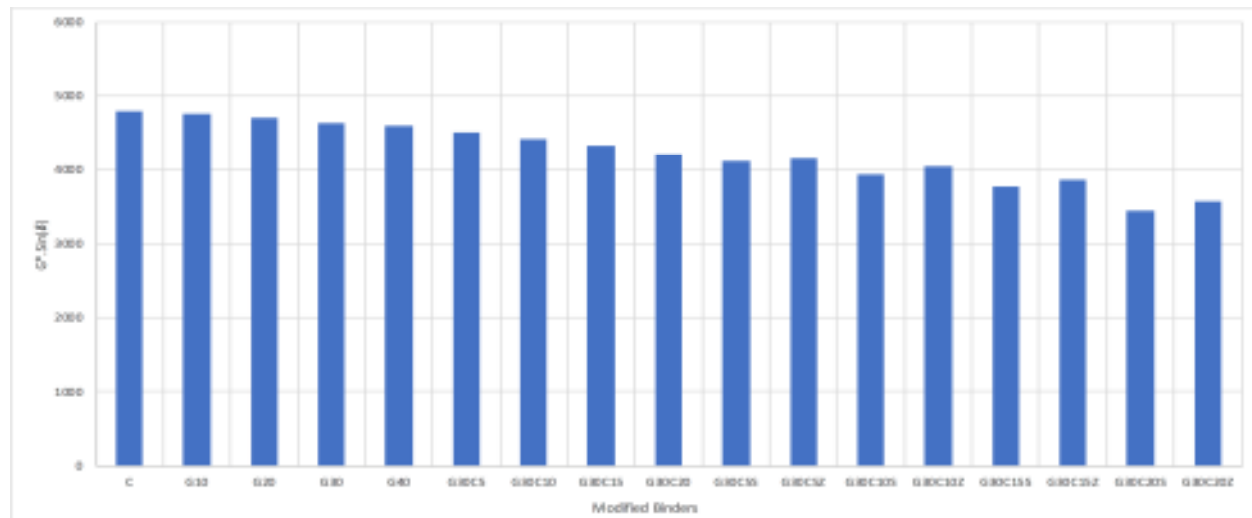
به تأثیرات سفت کننده می‌شود. اما کاربرد CR در قیرهای اصلاح شده با گیلسونایت باعث افزایش رفتار خستگی قیر می‌شود. همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، اصلاح کننده‌های WMA در قیرهای اصلاح شده Gilsonite/CR باعث افزایش رفتار خستگی در قیر می‌شوند.

علاوه بر این، با پیشنهادات سیستم PG، قیرهای با فاکتور  $G^*.sin\delta$  کمتر، توانایی مناسب‌تری در رفع ترک‌های خستگی داشتند. همچنین  $G^*.sin\delta$  در قیر به ۵۰۰۰ کیلو پاسکال محدود شد که نشان می‌دهد قیرها قادر به مقاومت در برابر ترک‌های میانی هستند. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که افزودن گیلسونیت در قیر پایه باعث کاهش استحکام دمای متوسط کلاسورها مربوط

#### ۴-۲- پایداری ذخیره سازی

و ویسکوزیته قیرها نسبت داده شود. از آنجایی که درصد CR از ۱۵٪ فراتر می‌رود، پایداری دمای بالا در قیرهای اصلاح شده توسط گیلسونایت کاهش می‌یابد. بنابراین، یک مقدار CR مناسب باید برای غلبه بر مشکل پایداری ذخیره سازی انتخاب شود. استفاده از افزودنی‌های گرم در قیرهای اصلاح شده توسط Gilsonite/CR، پایداری در دمای بالا در قیرها افزایش می‌یابد. در بین قیرهای اصلاح شده گرم، فقط قیر اصلاح شده G30C5 دارای مقادیر بالاتر از ۲٫۵ درجه سانتیگراد است. بین اصلاح‌کننده‌های WMA، Sasobit اثرات مناسب‌تری در افزایش پایداری قیرها در دمای بالا داشت.

آزمایش پایداری ذخیره‌سازی مقاومت قیر را در دماهای بالا در مقابل جداسازی فاز محاسبه می‌کند. نتیجه این آزمایش برای قیرهای اصلاح شده در جدول ۱۲ نشان داده شده است. یک تغییر در نتیجه آزمایش نقطه نرمی از بخش‌های پایین و بالای نمونه‌ها تا ۱۰ درصد قیرهای اصلاح‌شده با گیلسونیت بیش از ۲٫۵ درجه بود، اما محتوای گیلسونیت بیشتر باعث جداسازی فاز در گیلسونیت شد. قیرهای اصلاح شده همچنین استفاده از CR منجر به افزایش جداسازی فازها شد و نتایج نقاط نرم شدن از مقاطع پایین و بالا در نمونه‌ها کمتر از ۲٫۵ درجه برای CRهای ۱۰٪ و ۱۵٪ بود که ممکن است به افزایش سازگاری



شکل ۱۱. نتایج عمر خستگی نمونه‌ها

جدول ۱۲. نتایج پایداری ذخیره سازی نمونه‌ها

نمونه قیر	نقطه نرمی		$\Delta S$ (°C)
	پایین	بالا	
C	۴۸	۴۷	۰
G10	۵۴.۶	۵۳.۲	-۱.۴
G20	۵۸	۵۰.۲	-۷.۸
G30	۶۰.۱	۵۴.۵	-۹.۶
G40	۷۰.۸	۵۰.۲	-۲۱.۳
G30C5	۶۷.۵	۵۹.۳	-۸.۲
G30C10	۶۸.۳	۶۶.۲	-۲.۱
G30C15	۷۰	۶۷.۹	-۲.۱
G30C20	۷۵.۹	۷۰.۶	-۵.۳
G30C5S	۶۷.۵	۶۳.۱	-۳.۶
G30C5Z	۶۸	۶۲.۷	-۵.۱
G30C10S	۷۰.۱	۶۷.۹	-۲.۲
G30C10Z	۶۹.۶	۶۷.۴	-۲.۳
G30C15S	۷۴.۷	۷۲.۳	-۲.۴
G30C15Z	۷۲.۱	۶۹.۷	-۲.۴
G30C20S	۷۶.۴	۷۴.۱	-۲.۳
G30C20Z	۷۶	۷۳.۶	-۲.۴

#### ۳-۴- نتایج LAS

به بهبود عمر خستگی قیرهای پایه می‌شود، شاید به دلیل افزایش انعطاف‌پذیری در قیرها با استفاده از CR.

جداول ۱۳ و ۱۴ نتایج LAS را نشان می‌دهد که بر اساس آن، اصلاح قیر توسط مواد باعث کاهش تنش برشی در سطح تنش بالا می‌شود. نتایج نشان داده شده با استفاده از CR منجر

جدول ۱۳. ضرایب VECD برای نمونه‌های مختلف

Binders	$C_0$	$C_1$	$C_2$
C	1	0.053	0.552
G10	1	0.056	0.562
G20	1	0.061	0.454
G30	1	0.067	0.473
G40	1	0.62	0.413
G30C5	1	0.088	0.395
G30C10	1	0.105	0.382
G30C15	1	0.128	0.375
G30C20	1	0.140	0.364
G30C5S	1	0.151	0.349

G30C5Z	1	0.138	0.372
G30C10S	1	0.162	0.348
G30C10Z	1	0.151	0.352
G30C15S	1	0.169	0.33
G30C15Z	1	0.161	0.332
G30C20S	1	0.186	0.322
G30C20Z	1	0.169	0.318

جدول ۱۴. نتایج عمر خستگی نمونه‌ها

Binder Type	2.5% Nf	30% Nf
C	1850	12
G10	50000	1.6
G20	57300	0.9
G30	88000	0.58
G40	99200	0.51
G30C5	13400	0.68
G30C10	15800	0.95
G30C15	17456	1.7
G30C20	20321	2.2
G30C5S	16300	1.3
G30C5Z	15200	1.1
G30C10S	18900	1.6
G30C10Z	18100	1.3
G30C15S	20100	2.2
G30C15Z	18900	2
G30C20S	20300	2.8
G30C20Z	20050	2.6

قیرهای اصلاح شده با گیلسونیت در مقایسه با قیر پایه بیشتر است. همچنین قیر اصلاح شده با گیلسونیت ۴۰ درصد بیشترین عمر خستگی را در بین قیرهای اصلاح شده با گیلسونایت و سپس قیرهای حاوی CR داشت. در حالی که در سطوح کرنش بالاتر، روند نامطلوبی مشاهده شد، به طوری که قیرهای اصلاح شده با گیلسونایت و همچنین قیرهای اصلاح شده توسط Gilsonite/CR عمر خستگی کمتری نسبت به قیر پایه دارند. نتایج نشان داد که قیرهای اصلاح شده باید در سطح کرنش کم

جدول ۱۳ نتیجه VECD قیر را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد استفاده از افزودنی‌ها به ترتیب باعث افزایش و کاهش ضرایب C1 و C2 می‌شود. بر اساس نتایج، قیر اصلاح شده G30C20S بیشترین C1 و کمترین مقدار C2 را داشت. جدول ۱۴ عمر خستگی قیرها را نشان می‌دهد. آزمایش در سطح سویه های ۱ تا ۳۰ درصد انجام شد. طول عمر خستگی برای قیرها در یک سطح کرنش کم و بالا در جدول ۱۴ نشان داده شده است. در می‌توان دید که در سطح کرنش پایین، عمر خستگی برای

دلیل که گیلسونیت باعث افزایش ویسکوزیته قیر می‌شود. قیرها در سطوح پایین کرنش رفتار خستگی بهتری دارند. همانطور که در سطح کرنش بالا، تغییر شکل‌های بیشتری مورد نیاز است. قیرهای اصلاح شده به دلیل ویسکوزیته زیاد قادر به تغییر شکل نیستند. بنابراین، قیرهای با ویسکوزیته کمتر عمر خستگی بیشتری در مقایسه با قیرهای اصلاح شده با ویسکوزیته بیشتر داشتند.

استاندارد در دمای ۱۲- درجه سانتیگراد نیستند. در بین قیرهای اصلاح شده با گیلسونایت، فقط قیرهای اصلاح شده به میزان ۱۰ و ۲۰ درصد دارای حداقل نیاز استاندارد در درجه ۶- هستند. استفاده از گیلسونایت نیز باعث کاهش درجه حرارت پایین ۱ شده و آن را از ۲۲- به ۱۶- تغییر می‌دهد. بعلاوه، در بین قیرهای اصلاح شده توسط Gilsonite/CR، قیرهایی با ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ CR دارای حداقل نیاز استاندارد در درجه ۶- هستند. این محتوای CR باعث کاهش دماهای پایین قیر شاهد درجه ۱ می‌شود. همچنین استفاده از مواد افزودنی گرم در قیرهای اصلاح شده با گیلسونیت و ۲۰٪ CR منجر به افزایش درجه حرارت پایین ۱ شد و از ۱۶- به ۲۲- تغییر کرد. شکل ۱۲ نتایج Jnr قیرهای مختلف در دماهای مختلف را نشان می‌دهد.

استفاده شوند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از افزودنی‌های WMA باعث افزایش عملکرد خستگی در قیر بکر می‌شود. مواد WMA انعطاف پذیری قیر را بهبود می‌بخشد، در نتیجه خواص دمای متوسط چسب بهبود می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که افزودن Sasobit منجر به افزایش عملکرد خستگی قیر می‌شود. بر اساس تجزیه و تحلیل VECD آزمایش LAS، افزودن مواد WMA باعث بهبود رفتار خستگی قیرها می‌شود، شاید به این

#### ۴-۴- درجه بندی سیستم براساس PG و MSCR

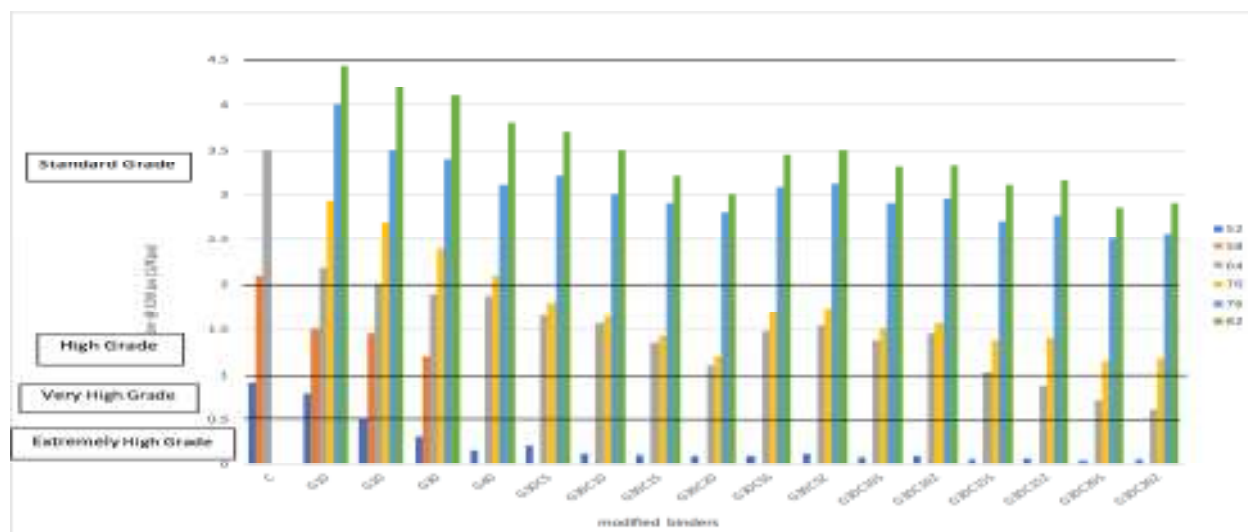
در این تحقیق از روش‌های PG و همچنین MSCR برای دانه بندی قیرهای مختلف استفاده شده است. فاکتور  $G^*/\sin\delta$  به ۱ کیلو پاسکال به درجه قیر پیر نشده محدود شده است، اما برای کلاسورهای با پیرشدگی کوتاه مدت، تکنیک MSCR در ترافیک‌های استاندارد ( $1 = 4.0 \text{ kPa} = 3.2 \text{ kPa} \text{ nr} \text{ J}$ ) محدود شده است. برای ارزیابی و درجه‌بندی قیرها در دماهای پایین، معیارهای مشابه با سیستم PG اعمال شد.

بر اساس نتایج جدول ۱۵، افزودن ۴۰ درصد گیلسونیت منجر به افزایش برآمدگی دو درجه ای در دمای بالای قیر پایه شد و دماهای بالا را از PG ۵۸ به PG ۷۰ تغییر داد. افزایش برآمدگی سه درجه در دمای بالای قیر اصلی و تغییر دمای بالا از (PG58-) به (PG76-). قیرهای اصلاح شده توسط Gilsonite /CR و Gilsonite قادر به برآوردن حداقل نیاز

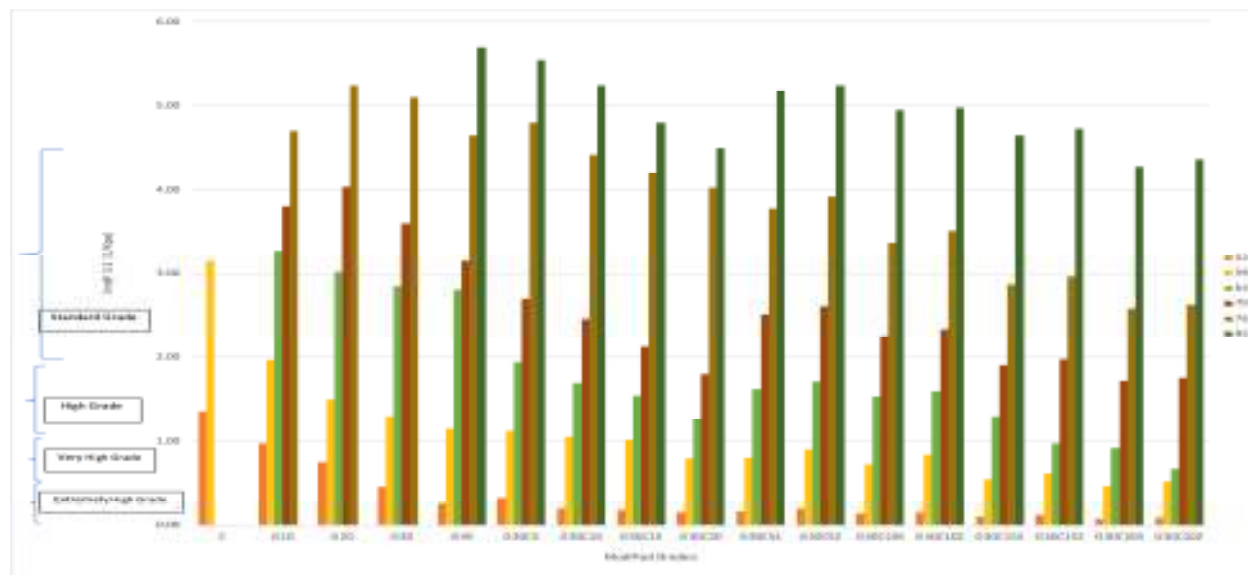
جدول ۱۵. طبقه بندی قیر براساس PG و MSCR

	PG			MSCR		
C	58-22	58S-22	52H-22	-	-	-
G10	70-16	70S-16	64S-16	58H-16	52V-16	-
G20	70-16	70S-16	64S-16	58H-16	52E-16	-
G30	70-10	70S-10	64S-10	58V-10	52E-10	-
G40	70-10	70S-10	64S-10	58V-10	52E-10	-
G30C5	70-16	70S-16	64H-16	58V-16	52E-16	-
G30C10	76-16	76S-16	70S-16	64H-16	58V-16	52E-16
G30C15	76-16	76S-16	70H-16	64H-16	58E-16	52E-16
G30C20	76-16	76S-16	70H-16	64V-16	58E-16	52E-16
G30C5S	76-16	76S-16	70S-16	64H-16	58V-16	52E-16
G30C5Z	76-16	76S-16	70S-16	64H-16	58V-16	52E-16

G30C10S	76-16	76S-16	70S-16	64H-16	58V-16	52E-16
G30C10Z	76-16	76S-16	70S-16	64H-16	58V-16	52E-16
G30C15S	76-16	76S-16	70H-16	64H-16	58V-16	52E-16
G30C15Z	76-16	76S-16	70H-16	64V-16	58V-16	52E-16
G30C20S	76-22	76S-22	70H-22	64V-22	58V-22	52E-22
G30C20Z	76-22	76S-22	70H-22	64V-22	58V-22	52E-22



(الف)



(ب)

شکل ۱۲. نتایج Jnr برای انواع قیرها در دماهای ۵۲ تا ۸۲ درجه سانتی گراد در سطوح تنش مختلف الف) ۱۰۰ پاسکال ب) ۳۲۰۰ پاسکال

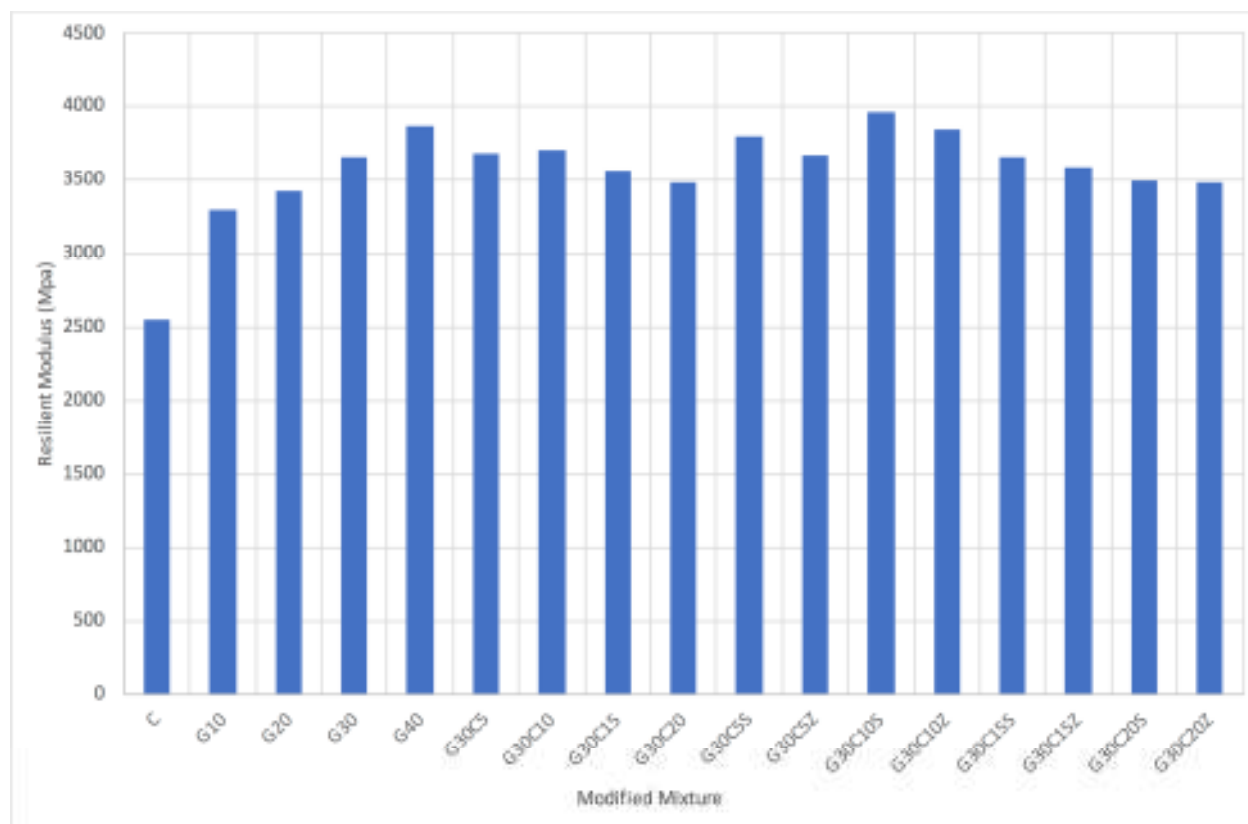


#### ۴-۵- نتیجه آزمایش‌های مخلوط

##### ۴-۵-۱- نتایج Mr

استفاده از مواد گرم باعث افزایش مقادیر Mr، شاید به دلیل بهبود انعطاف پذیری نمونه‌ها با استفاده از افزودنی گرم می‌شود. علاوه بر این، مقدار Mr نمونه‌های با Sasobit در مقایسه با نمونه‌های اصلاح شده توسط Zycotherm بیشتر است. Mr مخلوط‌های حاوی ۴۰٪ گیلسونیت، ۵۲٪ بیشتر از مخلوط پایه بود. با این وجود، ۳۰٪ گیلسونیت و همچنین ۵٪ CR دارای مقادیر Mr تقریباً ۴۴٪ بیشتر از مخلوط پایه بودند.

شکل ۱۳ مقدار Mr را در نمونه‌ها نشان می‌دهد. بدیهی است که استفاده از Gilsonite منجر به بهبود ارزش‌های Mr شد. با استفاده از مخلوط‌های اصلاح شده با گیلسونیت ۴۰ درصد، مقدار Mr حدود ۳۰ درصد افزایش می‌یابد، شاید به دلیل بهبود سفتی در نمونه‌های با استفاده از گیلسونیت. علاوه بر این، استفاده از CR در مخلوط‌های اصلاح شده توسط Gilsonite باعث افزایش در نمونه Mr تا ۱۰٪ CR می‌شود، اما افزودن CR بیشتر مدول ارتجاعی را کاهش می‌دهد. نتایج نشان داد که



شکل ۱۳. نتایج آزمایش مدول برجهنگی

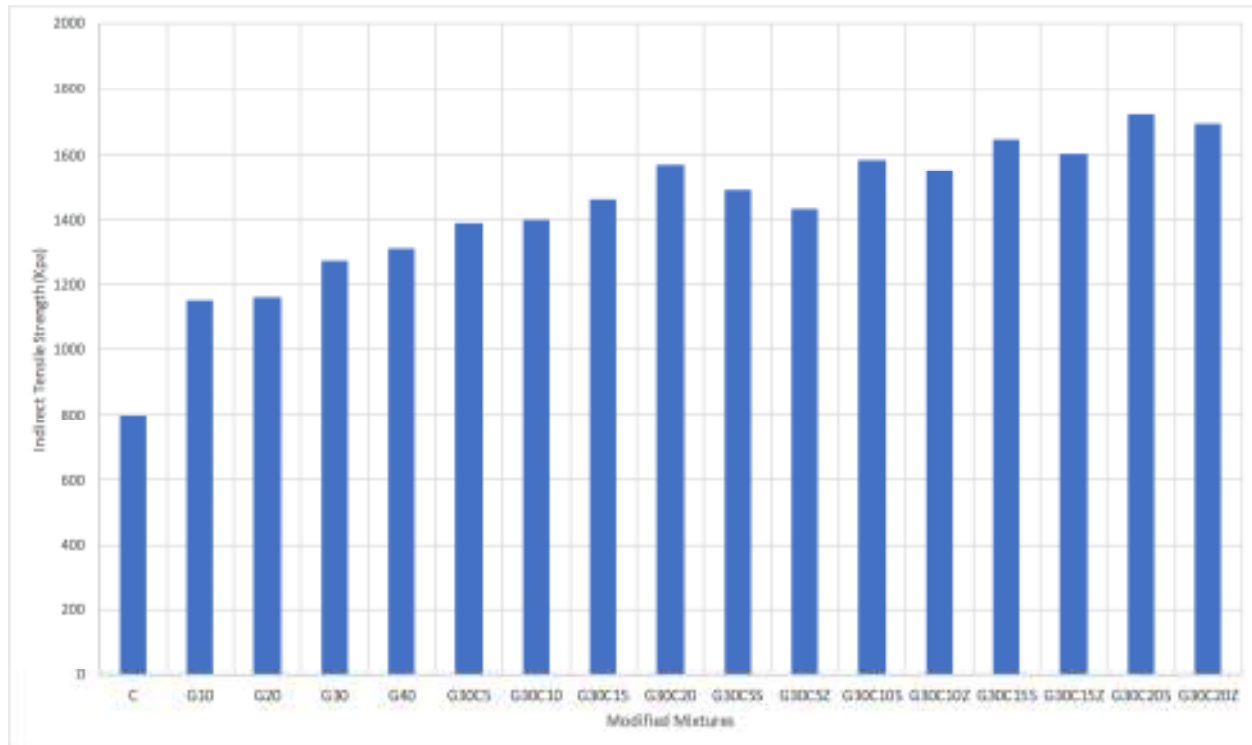
##### ۴-۵-۲- تست ITS

ITS در مخلوط‌ها می‌شود. وقتی درصد CR افزایش می‌یابد، مقدار ITS افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج، استفاده از گیلسونیت ۱۰ درصد در قیر اصلاح نشده باعث افزایش مقادیر ITS نزدیک به ۴۴ درصد شد، اما افزودن گیلسونیت ۴۰ درصد منجر به بهبود مقادیر ITS نزدیک به ۶۴ درصد شد. علاوه بر

شکل ۱۴ مقدار ITS را در نمونه‌ها نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌های دارای گیلسونیت دارای ITS بالاتری نسبت به مخلوط پایه هستند. نتیجه نشان می‌دهد که با افزایش محتوای گیلسونیت، ارزش ITS افزایش می‌یابد. همچنین کاربرد CR در مخلوط‌های اصلاح شده توسط گیلسونیت باعث بهبود

شد. افزودن افزودنی گرم همچنین باعث افزایش مقدار ITS نمونه‌ها می‌شود. بین نمونه‌های اصلاح شده توسط WMA، Sasobit بیشترین مقدار ITS را دارد.

این، استفاده از ۵٪ CR در مخلوط‌های اصلاح شده توسط ۳۰٪ Gilsonite منجر به افزایش مقادیر ITS تقریباً ۷۴٪ شد در حالی که استفاده از ۲۰٪ CR در مخلوط‌های اصلاح شده توسط ۳۰٪ Gilsonite منجر به بهبود ارزش ITS تقریباً ۹۶٪

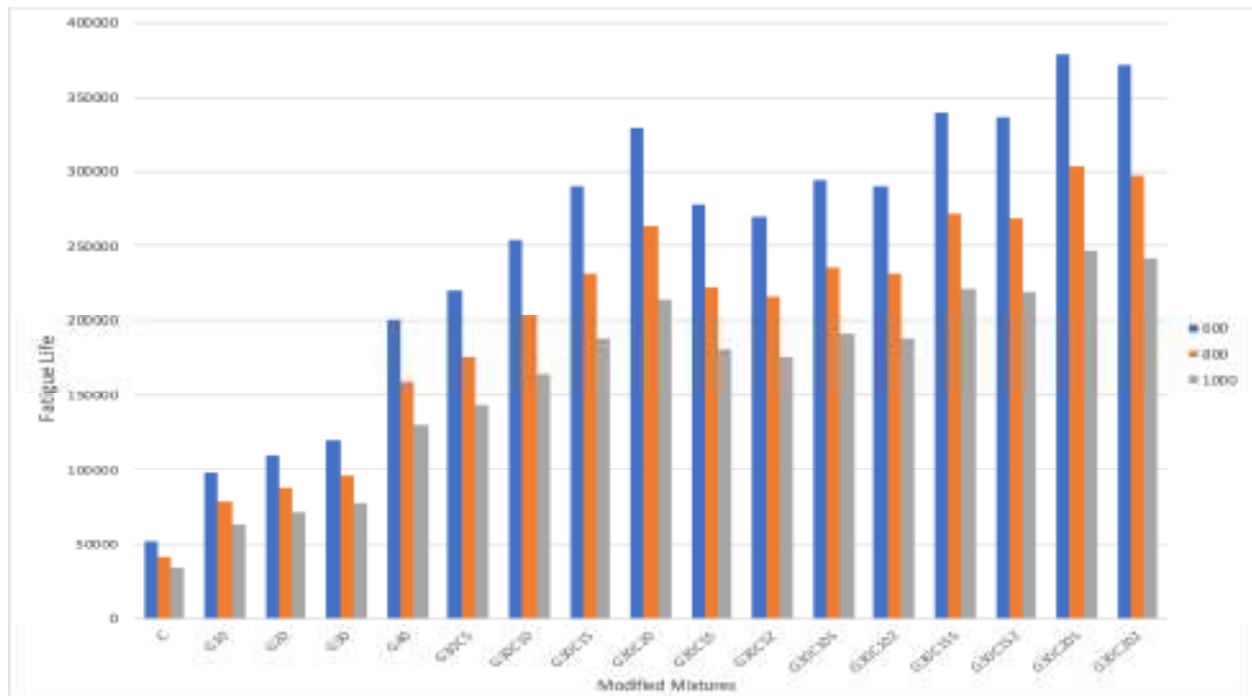


شکل ۱۴. نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم

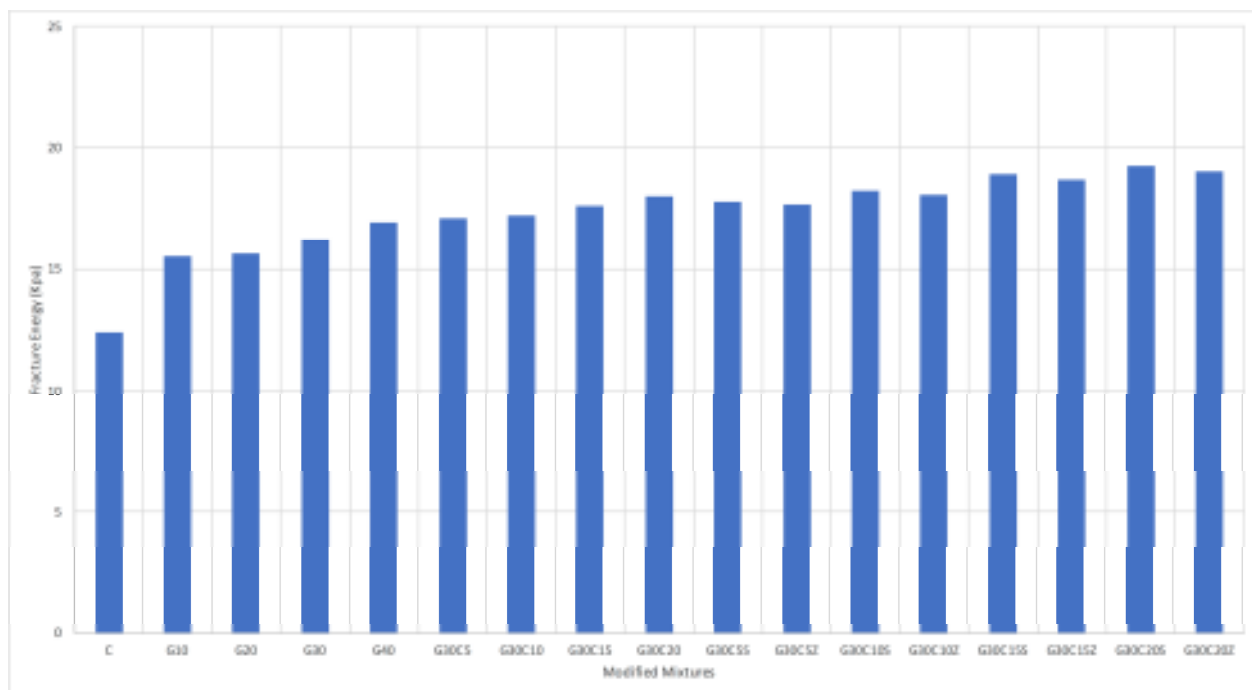
#### ۴-۳-۵- نتیجه FPB

مقدار چگالی FE برای نمونه‌ها در شکل ۱۸ نشان داده شده است. بر اساس شکل ۱۸، افزودن گیلسونیت باعث افزایش FE می‌شود، شاید به دلیل افزایش انعطاف پذیری نمونه با استفاده از گیلسونیت باشد. بنابراین مقاومت نمونه در برابر ترک‌ها بهبود می‌یابد. افزودن CR باعث افزایش FE در مخلوط‌های اصلاح شده با گیلسونیت می‌شود. نتیجه نشان می‌دهد که افزایش محتوای CR باعث کاهش نتایج FE می‌شود. بر اساس شکل ۱۸، استفاده از افزودنی WMA باعث افزایش FE می‌شود که شاید به دلیل افزایش کشسانی مخلوط با استفاده از افزودنی گرم باشد. بنابراین، مقاومت نمونه در برابر ترک‌ها بهبود می‌یابد.

شکل ۱۵ عمر خستگی را برای نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد. همانطور که مشهود است، افزودن گیلسونیت ویژگی‌های دمایی متوسط را در مخلوط‌ها افزایش داد. نتایج نشان داد که استفاده از CR باعث بهبود ویژگی‌های دمایی متوسط در مخلوط‌ها می‌شود. افزایش محتوای گیلسونیت و CR باعث افزایش عمر خستگی در مخلوط‌ها شد. نتایج نشان داد که استفاده از مواد گرم خواص دمایی متوسط را در مخلوط‌ها افزایش می‌دهد. همچنین استفاده از ساسوبیت باعث بهبود عمر خستگی در نمونه‌ها بیشتر از کاربرد افزودنی زایکوترم شد.



شکل ۱۵. نتایج عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی



شکل ۱۶. نتایج چگالی انرژی شکست نمونه‌ها

#### ۶-۴- تحلیل آماری

تحت تأثیر ترکیبات مختلف افزودنی قرار گرفتند. نتیجه ANOVA با جداول ۱۶-۱۸ نشان داده شد و نشان می‌دهد که افزودنی‌های گرم، گیلسونیت و کروم تأثیر قابل‌توجهی بر عمر خستگی، عمق شیار، تعداد جریان، ITS و Mr در نمونه‌ها دارند.

برای تجزیه و تحلیل داده‌ها، ANOVA در مطالعه حاضر پیاده سازی شده است. Mr، ITS، عمر خستگی، FN و عمق شیار به عنوان متغیرهای وابسته در نظر گرفته شدند. چهار پارامتر ثابت مورد بررسی شامل گیلسونیت، کروم و همچنین افزودنی‌های مخلوط گرم بودند. متغیرهای وابسته به طور قابل ملاحظه‌ای

جدول ۱۶. نتایج تحلیل واریانس مدول برجهنگی در برابر افزودنی نیمه گرم و پودر لاستیک و گیلسونیت

Variable	DF	Adjusted SS	Adjusted MS	F value	Sig
Gilsonite	4	95769233	31923078	4014.23	0.000
CR	4	4214721	2107361	264.99	0.000
Sasobit	1	1786681	297780	37.44	0.000
Zycotherm	1	190859	254352	25.2	0.000
Total	10	101961494			

جدول ۱۷. نتایج تحلیل واریانس کشش غیرمستقیم در برابر افزودنی نیمه گرم و پودر لاستیک و گیلسونیت

Variable	DF	Adjusted SS	Adjusted MS	F value	Sig
Gilsonite	4	95769233	31923078	4014.23	0.000
CR	4	4214721	2107361	264.99	0.000
Sasobit	1	1786681	297780	37.44	0.000
Zycotherm	1	190859	254352	25.2	0.000
Total	10	101961494			

جدول ۱۸. نتایج تحلیل واریانس عمرخستگی در برابر افزودنی نیمه گرم و پودر لاستیک و گیلسونیت

Variable	DF	Adjusted SS	Adjusted MS	F value	Sig
Gilsonite	4	56179848	31052349	7492.02	0.000
CR	4	2562765	1381412	263.23	0.000
Sasobit	1	203192	28866	6326.05	0.000
Zycotherm	1	92155	3840	5387.06	0.000
Total	10	63038253			

#### ۵- نتیجه‌گیری

LAS، MSCR و DSR انجام شد. با توجه به نتایج، می‌توان به دست آورد:

با توجه به نتایج LAS، افزودن گیلسونیت باعث افزایش طول عمر خستگی پایه قیر می‌شود. افزودن CR انعطاف‌پذیری قیر را بهبود می‌بخشد و در نتیجه عملکرد خستگی قیر را افزایش

کار موجود بر روی ارزیابی اثرات CR، Gilsonite و همچنین افزودنی‌های گرم بر رفتار عملکرد در نمونه‌های قیر SMA متمرکز بود. آزمایشات مختلفی مانند: Wheel، FPB، Mr، tracking، ITS و Dynamic creep انجام شد. همچنین برای بررسی رفتار رئولوژیکی در قیرها، تست‌های

افزودنی گرم باعث افزایش FE می‌شود که شاید به دلیل افزایش انعطاف پذیری مخلوط با استفاده از WMA باشد. در نتیجه مقاومت مخلوط در برابر ترک خوردگی نیز افزایش می‌یابد. -کاربرد گیلسونیت ویژگی‌های دمای بالا و متوسط را در قیرها بهبود می‌بخشد. همچنین افزودن CR منجر به بهبود رفتارهای خستگی و شیار شدن در قیر می‌شود.

## ۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Linear Amplitude Sweep
- 2- Multiple Stress Creep Recovery
- 3- Performance Grade
- 4- Crumb Rubber
- 5- Styrene-Butadiene-Styrene
- 6- Styrene-Butadiene-Rubber
- 7- Dynamic Shear Rheometer
- 8- Bending Beam Rheometer
- 9- Rotational Viscosity
- 10- Stone Matrix Asphalt
- 11- Warm Mix Asphalt
- 12- Viscosity-Temperature Susceptibility

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

-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

می‌دهد. تست‌های LAS تقریباً اثری مشابه نتیجه FPB دارند. همچنین، LAS می‌تواند نتیجه خستگی را در قیرها بهتر نشان دهد. نتایج آزمون LAS نشان داد که گیلسونیت کارایی بهتری در سطوح پایین‌تر سویه‌ها داشت. با افزایش سطوح کرنش برشی، عملکرد خستگی در قیرهای اصلاح شده توسط گیلسونیت کاهش می‌یابد و قیر پایه نشان‌دهنده عمر خستگی بیشتر است. افزودن افزودنی WMA عملکرد خستگی را در قیر بکر افزایش می‌دهد.

-با توجه به نتایج ITS، مقدار ITS در نمونه‌های اصلاح شده با Gilsonite در مقایسه با نمونه پایه بالاتر بود. استفاده از کروم در نمونه‌های اصلاح شده با گیلسونیت، منجر به بهبود مخلوط‌های ITS شد. مخلوط حاوی ۲۰٪ CR و همچنین ۳۰٪ گیلسونیت بیشترین میزان ITS را داشت. مقادیر ITS مخلوط با مواد گرم در مقایسه با نمونه پایه بالاتر بود. بین مخلوط‌های اصلاح شده با WMA، Sasobit بیشترین مقدار ITS را نشان داد.

-بر اساس نتیجه Mr، استفاده از Gilsonite باعث افزایش Mr می‌شود. نمونه اصلاح شده با گیلسونیت ۴۰ درصد نسبت به نمونه پایه ۵۲ درصد مستر بالاتر دارد، شاید به دلیل افزایش سفتی در نمونه با استفاده از گیلسونیت. علاوه بر این، استفاده از CR منجر به افزایش Mr در مخلوط‌های اصلاح شده با گیلسونیت تا ۱۰٪ شد. اما استفاده بیشتر از مقدار CR، Mr را در مخلوط‌های اصلاح شده با گیلسونیت کاهش می‌دهد. با توجه به نتایج، افزودن افزودنی‌های WMA باعث افزایش مدول ارتجاعی می‌شود، شاید به دلیل افزایش انعطاف‌پذیری در نمونه‌های با استفاده از مواد گرم. همچنین، نتایج Mr در مخلوط با Sasobit در مقایسه با مخلوط‌های حاوی Zycotherm بیشتر بود.

-بر اساس نتیجه آزمون خستگی، استفاده از گیلسونیت عملکرد دمای متوسط را در مخلوط‌ها افزایش داد. نتایج نشان داد که استفاده از CR باعث افزایش خواص میانی در نمونه‌ها می‌شود. استفاده از افزودنی گرم باعث بهبود خواص خستگی در مخلوط‌ها می‌شود. همچنین، استفاده از Sasobit باعث افزایش عمر خستگی در مخلوط‌ها در مقایسه با افزودن افزودنی Zycotherm می‌شود.

-بر اساس نتایج FE در مخلوط‌ها، استفاده از گیلسونیت باعث افزایش FE می‌شود، شاید به دلیل افزایش انعطاف پذیری نمونه با استفاده از گیلسونیت. بنابراین، مقاومت نمونه در برابر ترک‌ها بهبود می‌یابد. کاربرد CR منجر به افزایش FE شد. استفاده از

materials in hot-mix asphalt, ASTM International.

-Khalili, M., Jadidi, K., Karakouzian, M., & Amirghanian, 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.

-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.

-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.

-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.

-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.

-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.

-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.

-Vargas MA, Vargas MA., Sanchez-Solis A., Manero O., (2013), "Asphalt/polyethylene blends: Rheological properties, microstructure

using Superpave tests methodology", *Construction and Building Materials*, 36, pp. 1001- 1007.

-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.

-Brown ER, Cooley LA., (1999), "Designing stone matrix asphalt mixtures for rut-resistant pavements", *Transport Res Board* 1999.

-Djakfar, L., Bowoputro, H., Prawiro, B. and Tarigan, N., (2015), "Performance of recycled porous hot mix asphalt with gilsonite additive", *Advances in Civil Engineering*, accepted January.

-Fang CQ, Yu RE, Liu SL, Li Y., (2013), "Nanomaterial's applied in asphalt modification: a review", *J Mater Sci Technol*, 29(7), pp.589-94.

-Fini, E. H., Al-Qadi, I. L., You, Z., Zada, B., & Mills-Beale, J., (2012), "Partial replacement of asphalt binder with bio-binder, characterization and modification, *International Journal of Pavement Engineering*, 13(6), pp.515-522.

-Federal Highway Administration, (2002), "User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction," Washington, D.C.

-Huang, X. Shu, Q. Dong, J. Shen, (2010), "Laboratory evaluation of moisture susceptibility of hot-mix asphalt containing cementations 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).

-Kandhal, P. S., (1993), "Waste materials in hot mix asphalt—an overview", In *Use of waste*

-Yuan CH, Wang SF, Zhu YQ, Wang HB, Zhang Y., (2012), "Properties of the asphalts modified by typical recycled polyolefin", Polym Mater Sci. Eng. 12. pp. 81-4+9 [in Chinese].

-Zhang, J., L.F. Walubita, A.N. Faruk, P. Karki, G.S. Simate, (2015), "Use of the MSCR test to characterize the asphalt binder properties relative to HMA rutting performance-A laboratory study", Constr. Build. Mater., 94, pp. 218-227.

and viscosity modeling, Constr Build Mater", 45, pp.243-50.

-Wang, Y., C. Wang, H. Bahia, (2017), "Comparison of the fatigue failure behavior for asphalt binder using both cyclic and monotonic loading modes", Constr. Build. Mater., 151, pp.767-774.

-Xie YG, Yao HR, Huang J., (2013), "Structure and properties of POE modified asphalt", China Elastomeric 03, pp.29-34 [in Chinese].

# Investigation of the Effect of Warm Mix Asphalt Additive on Fatigue Behavior of Bitumen and Asphalt Mixture Modified with Gilsonite and Crumb Rubber

*Rezvan Babagoli, Assistant Professor, Department of Civil Engineering,  
University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, Iran.*

*Mohammad Kashani Novin, Ph.D., Student, Department of Civil Engineering,  
Iran University of Science And Technology, Tehran, Iran.  
(Chief Executive Officer of Ara Tarh Royan Company, Tehran, Iran).*

*E-mail: rezvan\_babagoli@yahoo.com*

Received: May 2022- Accepted: August 2022

## **ABSTRACT**

The aim of this study was to investigate the effect of semi-hot asphalt additive on the fatigue performance of bitumen and asphalt mixtures with aggregate ossification containing rubber powder and gilsonite. In the present study, gilsonite, rubber powder and 2 semi-hot additives (3% Sasobit and also 0.3% Zycotherm) were used to modify pure bitumen (AC-85/100). Several bitumen rheological tests and mixed functional tests were performed. ANOVA was developed for data set analysis. The results of rheological behavior test showed that the addition of composite additives leads to an increase in the average temperature behavior of bitumen. The performance of asphalt bitumen at low temperatures deteriorated with the addition of gilsonite, while the use of rubber powder improved the performance of low temperatures. Storage stability test showed that using gilsonite up to 10% improves the storage stability of bitumen, although with increasing the percentage of gilsonite, the fuzzy separation of bitumen worsens. Bitumen fatigue life is increased by adding gilsonite and semi-hot additives. In addition, rubber powder can increase the fatigue behavior of Gilsonite-modified bitumen. The test results showed that the use of gilsonite, semi-hot additives and rubber powder increases the fatigue properties, fracture energy, tensile strength of the samples. Based on the results of the bulk modulus test, CR reduces the bulk modulus of the mixtures.

**Keywords:** Bitumen, Crumb Rubber, Asphalt Mixture, Bitumen Rheology, Fatigue