

ارزیابی آزمایشگاهی عملکرد دمای پایین قیر و مخلوط آسفالتی حاوی گیلسونایت، پودر لاستیک و افزودنی نیمه گرم

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: ۱۴۰۱/۰۷/۲۸ - پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۵

صفحه ۳۴۹-۳۳۷

چکیده

هدف از مطالعه حاضر بررسی اثر افزودنی آسفالت نیمه گرم بر عملکرد ترک‌های دمای پایین قیر و مخلوط آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه ای حاوی پودر لاستیک و گیلسونایت می‌باشد. در تحقیق حاضر، گیلسونیت، پودر لاستیک و ۲ افزودنی نیمه‌گرم (Sasobit ۰.۳٪ و همچنین ۰.۳٪ Zycotherm) برای اصلاح قیر خالص (AC-۱۵/۱۰۰) استفاده شد. آزمایش رئولوژیکی رئومتر تیرچه خمشی قیر و آزمایش عملکردی نیم‌دایره خمشی مخلوط انجام شد. نتایج آزمایش رفتار رئولوژیکی نشان داد که عملکرد قیرهای آسفالتی در دماهای پایین با افزودن گیلسونیت بدتر می‌شود. در حالی که استفاده از پودر لاستیک باعث بهبود عملکرد دماهای پایین می‌شود. نتایج آزمایش نشان داد که استفاده از گیلسونیت منجر به کاهش انرژی شکست و ضریب شدت تنش می‌شود. در حالی که افزودن خرده لاستیک منجر به افزایش آنها شد. بر اساس نتایج، افزودن افزودنی‌های نیمه گرم منجر به افزایش انرژی شکست و کاهش سختی در دماهای پایین شد.

واژه‌های کلیدی: قیر، پودر لاستیک، مخلوط آسفالتی، رئولوژی قیر، ترک خوردگی دمای پایین

۱-مقدمه

(2018). از این رو، ارزیابی رفتار عملکرد دمای کم مخلوط‌های آسفالتی گرم تولید شده با فناوری‌های مختلف نقش بسیار تاثیرگذاری در تحلیل و پیش‌بینی عملکرد روسازی دارد. 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 خواص مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی است (Rusbintardjo et al, 2012; Fini et al, 2013). در سال‌های اخیر، اصلاح‌کننده‌های آسفالت از دسته‌های مختلفی از جمله محصولات لاستیک بازیافتی، پرکننده، فیبرها، کاتالیزورها،

ترک‌های حرارتی یکی از رایج‌ترین خرابی‌های روسازی‌های آسفالتی می‌باشند (Mirseyar, Falchetto et al, 2018). این نوع خرابی، عملکرد سازه ای و کیفی روسازی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. به طور کلی، ریزترک‌ها تحت تاثیر شرایط مختلف آب و هوایی و تردد بارهای ترافیکی ایجاد میشوند. در تحقیقات پیشین، مشخصات قیر و درصد آن، کاربرد مصالح بازیافتی مانند تراشه‌های آسفالتی و همچنین فن اوری مورد استفاده برای تولید آسفالت گرم به عنوان شاخص‌های تاثیرگذار بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی WMA در شرایط دمای کم معرفی شده‌اند (Kasir et al, 2018).

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 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 شده اند که این تایرها نیز بعلت 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 پیش بینی شده می‌باشد. برای دستیابی به این هدف طراحان باید دانش کافی در مورد این مواد، ترافیک، محیط اطراف و تأثیر 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 تأثیر 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 چندگانه برای تعیین خصوصیات شیارشدگی قیر بدست آمد. هدف بعد در آن تحقیق بررسی تأثیر درصد گیلسونایت، نوع قیر و سطح کرنش بر خصوصیات خستگی قیر بود. این مورد با انجام آزمایش جاروب دامنه خطی

پلیمرها (طبیعی و مصنوعی) و پرکننده به عنوان اصلاح‌کننده قیر به کار گرفته شده‌اند تا خواص مخلوط آسفالتی را افزایش دهند. 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 تأثیر 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 مسایل 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، سنگدانه های 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 و نگه 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 اصلاح‌کننده های قیر به گروه هیدروکربن ها 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 اصلاح‌کننده های قیر، بررسی استفاده از این نوع قیر طبیعی در اصلاح خواص قیر و آسفالت امری ضروریست و می‌تواند در آینده ای 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 تایرسازی با آن مواجه هستند، مشکل تایرهای فرسوده و مسایل 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 میلیون حلقه تایر مصرف می‌کنند که این به معنی مصرف

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, 2012, al, 2011). در تحقیق میدانی انجام شده توسط لیو و لی، تأثیر گیلسونایت بر مشخصات قیر آلاسکایی مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق از قیر PG52-28 با درصدهای مختلف گیلسونایت (۰٪، ۳٪، ۶٪، 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 درجه سانتی‌گراد به ۷۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. ولیکن PG دمای پایین قیر از ۲۸- درجه سانتی‌گراد به ۲۲- درجه سانتی‌گراد رسد. 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). 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 ماده‌ای سیاه‌رنگ و درخشان و شبیه مواد معدنی شیشه‌ای است. این ماده شکننده است و بسیار آسان تبدیل به پودر قهوه‌ای تیره می‌شود. قیر طبیعی گیلسونایت در رگه‌های عمودی زیر سطح زمین یافت می‌شود. اندازه عرض رگه ۸/۱۱ - 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. پودر لاستیک یکی از افزودنی‌های قابل توجه در روسازی است که برای مدت طولانی در روسازی جاده‌ها استفاده می‌شود و از لاستیک‌های وسایل نقلیه و همچنین

(LAS) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که همبستگی خوبی بین پارامتر شیارشدگی از آزمایش $^{2}MSCR$ 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 سنگدانه‌ای 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 58-³ 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 طوری که ۷٪، ۴٪، ۲٪، ۱۳٪، ۱۰٪ گیلسونایت دمای عملکردی بالای قیر پایه PG 58-22 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

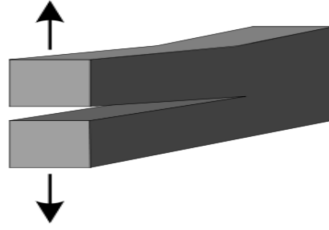
علم رفتار قطعات ترکدار می‌باشد و مقاومت قطعات ترکدار را بررسی می‌کند. در برخی سازه‌ها شکست قطعه در باری بسیار کمتر از بار بحرانی قطعه اتفاق می‌افتد که پس از تحقیق و بررسی مشخص شد که عامل ایجاد شکست در قطعه وجود ترک و نواقصی از این دسته بوده است و همین امر باعث شد تا طراحان در طراحی قطعات وجود ترک‌ها را نیز در نظر بگیرند، ترک یک تمرکز تنش بسیار شدید در قطعه ایجاد کرده و باعث شکست قطعه در باری کمتر از بار پیش بینی شده می‌شود. بررسی‌های انجام شده توسط مهندسان و محققین مختلف، نشان می‌داد که در تمامی سازه‌های وامانده شده، عامل شکست، بروز ترک و نواقصی از این دست در داخل این سازه‌ها بوده است. از آن زمان تا کنون طراحان و مهندسان سعی کرده‌اند که در طراحی سازه‌ها، علاوه بر در نظر گرفتن حالت‌های واماندگی شناخته شده از قبیل تسلیم، کمانش و خستگی، به جنبه‌های شکست سازه نیز توجه کنند. در سال‌های اخیر تلاش‌های بیشتری درباره چگونگی واماندگی و یا استحکام قطعات ترکدار انجام شده است. هر چند که امروزه به سبب در نظر گرفتن اصول و مبانی مکانیک شکست در سازه‌ها، حالت‌های دیگر واماندگی شایع تر از مود شکست می‌باشند، اما از آنجا که مود شکست، در اغلب سازه‌ها بدون هشدار قبلی ایجاد می‌شود و معمولاً منجر به ضایعات جبران ناپذیری نیز می‌گردد؛ پرداختن به مبحث مکانیک شکست ضروری می‌باشد. به طور کلی ترک‌ها در اجسام و قطعات، در اثر شرایط بار اعمالی به چندین صورت می‌توانند تغییر فرم دهند. پیش از پرداختن به مبحث توزیع تنش در قطعات ترکدار و ارایه معیارهای موجود برای مود II بارگذاری، لازم است که انواع بارگذاری قطعات ترکدار بیان گردد. این بارگذاری‌ها عبارتند از: مود I بارگذاری یا مود بازشونده؛ اگر قطعه ترکدار به گونه ای تحت بارگذاری قرار گیرد که سطوح ترک نسبت به هم فقط باز شوند قطعه تحت مود I بارگذاری می‌باشد. در این شرایط تنش‌های کششی عمود بر صفحه ترک اتفاق می‌افتد.

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^۱ باعث بهبود رفتار روسازی‌ها و کاهش صدای چرخ‌ها در سطح روسازی می‌شود (Yuan et al, 2012; Vargas et al, 2013)

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 گلیسونایت و CR در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. طبق مطالعات قبلی، گلیسونیت به ترتیب منجر به افزایش و کاهش ویسکوزیته و درجه نفوذ در قیرهای خالص می‌شود. این ممکن است به دلیل سفت شدن قیر در اثر استفاده از گلیسونیت 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 میکسر اعمال می‌شود. تحقیقات مختلف در گذشته در مورد استفاده از این ماده نشان داد که استفاده از گلیسونیت باعث افزایش خستگی و همچنین رفتارهای شیاردار در قیر می‌شود. اما عملکرد قیر را در دماهای پایین کاهش می‌دهد.

(Xie et al, 2013; Fang et al, 2013)

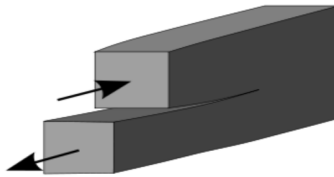
بی‌شک یکی از مباحث مهم مهندسی، علم مکانیک شکست می‌باشد. این علم به طراحان کمک می‌کند تا بتوانند طول عمر و همچنین زمان کارکرد یک قطعه ترکدار را تعیین نمایند. با استفاده از اصول مکانیک شکست می‌توان با مدل‌سازی واقعی تر قطعه ترک دار و پیش بینی طول عمر آن می‌توان زمان بیشتری از قطعه استفاده کرد. مکانیک شکست



شکل ۱. مود I بارگذاری یا مود بازشونده

مود II بارگذاری یا مود برشی:

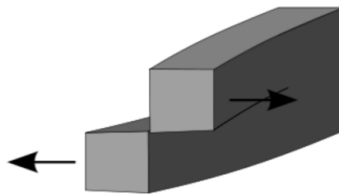
در مود II بارگذاری، لغزش وجوه ترک در راستای موازی با صفحه ترک و عمود بر جبهه ترک می‌باشد.



شکل ۲. مود II بارگذاری یا مود برشی

مود III بارگذاری یا مد پارگی:

در مود III بارگذاری، لغزش وجوه ترک در راستای موازی با صفحه ترک و موازی با جبهه ترک می‌باشد.



شکل ۳. مود III بارگذاری یا مد پارگی

و حرارتی در محور مشاهده شده است. اصلاح قیربا گیلسونیت و CR در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. همچنین برای کاهش ویسکوزیته و همچنین دمای تراکم و اختلاط مخلوط اصلاح شده گیلسونیت CR، از نانومواد زایکوترم و ساسویت استفاده شد. هدف از این کار بررسی تاثیر گیلسونیت با چهار درصد (۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪)، و پودر لاستیک (۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪) و ۲ اصلاح کننده نیمه گرم (۰/۳٪ Zycotherm و ۳٪ Sasobit) بر رفتار قیرها و مخلوط‌های SMA^۱ می‌باشد. از آنجاییکه ترک‌های حرارتی منجر به ایجاد تنش کششی در مخلوط آسفالتی می‌گردد، نمونه‌های مورد نظر در حالت شکست نوع ۱ تحت بارگذاری خمشی سه نقطه‌ای قرار گرفته و رفتار آنها مورد ارزیابی قرار گرفت.

و یا قطعه ترکدار تحت ترکیبی از مودهای مذکور می‌باشد. در مود II و مود III بارگذاری هیچ‌گونه باز شدگی دهانه ترک وجود ندارد. اگر بارگذاری به صورت ترکیبی از هر کدام از مودها باشد و یا ترکیبی از هر سه مود باشد حالت بارگذاری مود ترکیبی به وجود می‌آید. به عنوان مثال در مود ترکیبی I و II بارگذاری وجوه ترک هم نسبت به هم می‌لغزند و هم دهانه ترک باز می‌شود. هدف از تحقیق حاضر بررسی استفاده از افزودنی گیلسونایت و پودر لاستیک به همراه افزودنی‌های نیمه گرم جهت بهبود خرابی ترک خوردگی دمای پایین روسازی محورهای استان کرمانشاه می‌باشد. شکل ۴ 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



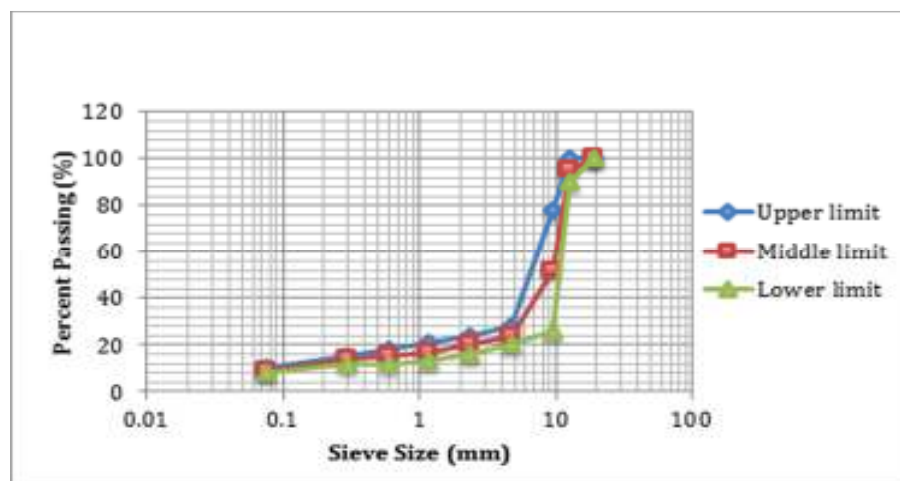
شکل ۴. نمونه ای از خرابیهای روسازی موجود در محورهای استان کرمانشاه

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 ۲-۱ نشان داده شده است. شکل ۵ درجه بندی سنگدانه‌ها را با حداکثر اندازه اسمی ۱۲/۵ میلی متر نشان می‌دهد.



شکل ۵. نمودار دانه‌بندی سنگدانه‌ها

جدول ۱. خصوصیات مصالح سنگی

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

جدول ۲. خصوصیات شیمیایی مصالح

نوع	درصد اکسید(%)							
	CaO	Na2O	K2O	Al2O3	Fe2O3	MgO	SiO2	MnO
مصالح آهکی	۴۳	۰.۰۷	۰.۶۵	۲.۱۲	۰.۹۵	۰.۷۵	۱۷.۵۳	۰.۰۴۶

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 سانتی گراد
ASTM D-5	۹۵	درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی گراد
ASTM D-36	۴۵	نقطه نرمی (درجه سانتی گراد)
ASTM D-113	+۱۰۰	انگمی در ۲۵ درجه سانتی گراد
ASTM D-92	۲۷۰	نقطه اشتعال

پودر لاستیک

پودر لاستیک (۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ وزن قیر) استفاده شد. قیر لاستیکی با استفاده از روش تر و با استفاده از مخلوط کن برش بالا (۲۰۰۰ دور در دقیقه) در دمای تقریبی ۱۷۷ درجه سانتی گراد 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).

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

جدول ۴. دانه‌بندی پودر لاستیک مش ۴۰-

اندازه الک (μm)	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

پودر قیر معدنی گیلسونایت

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 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.

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	کمتر از ۵	میزان رطوبت (%)
ASTM-D3172	۲۹	میزان کربن (%)
ASTM-D4	۸۱	حلالیت در سولفید کربن (%)
ASTM-D3289	۱/۱۱	وزن مخصوص در ۲۵ درجه سانتیگراد
-	سیاه	رنگ در حلالیت کلورخه
-	قهوه ای تیره	رنگ در حالت پودر
ASTM-D36	۲۲۱	نقطه نرمی
ASTM-D5	۱-۰	درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتیگراد

فیبر

برای از بین بردن ریزش قیر در مخلوط SMA، بهتر است بر اساس توصیه NCHRP No 425 (Brown and Cooley, 1999) از الیاف سلولز ۰,۳٪ استفاده شود. ویژگی‌های الیاف کاربردی در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۷. خصوصیات فیبر

نتایج	خصوصیات
۸۰	درصد سلولز(٪)
۱.۱	میانگین طول فیبر (میلی متر)
۰.۰۴۵	میانگین ضخامت (میلی متر)
۷.۵	PH مقدار ۵ گرم بر ۱۰۰ میل
۰.۵	وزن مخصوص (گرم بر سانتی متر مربع)

افزودنی‌های WMA

برای ارزیابی تاثیر مواد WMA^{۱۱} بر رفتار رئولوژیکی قیرهای ترکیبی اصلاح شده گیلسونایت/CR، از ماده WMA از زایکوترم و همچنین ساسوبیت استفاده شد. ویژگی‌های اصلاح کننده های 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
ترکیبات هیدروکسی آلکیل	هیدروکربن های اشباع شده جامد	مواد تشکیل دهنده
مایع	پاستیلی	حالت فیزیکی
زرد	قهوه ای	رنگ
بدون بو	بدون بو	بو
-	۱۰۰۰ g/mole	وزن مولکولی
۱۰.۱ gr/mol (۲۵ درجه سانتی گراد)	۰.۹ (۲۵ درجه سانتی گراد)	وزن مخصوص
-	-	چگالی بخار
-	-	چگالی حقیقی
۱۰ درصد قابل حل در آب خنثی یا کمی اسیدی	خنثی	مقادیر pH
-	-	نقطه جوش
غیر قابل اشتعال	۲۸۵°C [ASTM D۹۲, ۲۰۱۲]	نقطه اشتعال
-	۱۰۰ درجه سانتی گراد	نقطه ذوب
۱۰۰-۵۰۰ CPS	-	ویسکوزیته
فایل حل	غیر حلال	حلالیت در آب

آماده‌سازی نمونه‌ها

۰.۴٪) 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

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

شکست و ترکیبی جهت تست‌های چقرمگی شکست تحت مدهای مختلف در مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد. در قسمت قبل ذکر گردید که نمونه‌های ساخته شده دارای ارتفاع حدود ۱۳ سانتی متر و قطر حدود ۱۵ سانتی متر می‌باشد برای ایجاد نمونه‌ها به شکل SCB لازم است که نمونه‌ها به دیسک‌هایی با ضخامت ۳ سانتی‌متر برش داده شوند. جهت برش نمونه‌های آسفالتی، دستگاه برش با دیسک گردان استفاده شد که بدلیل سطح هموار و حذف گرمای ایجاد شده بدلیل استفاده از آب در هنگام برش بسیار مناسب می‌باشد در شکل نمایی از این دستگاه نشان داده شده است.

به منظور برش یکنواخت نمونه‌های استوانه‌ای شکل با ارتفاع ۱۲ سانتی متر لازم است این نمونه‌ها در زیر دستگاه ثابت نگه داشته شود. لذا، از یک فیکسچر جهت ایجاد نمونه‌های نیم دیسکی تهیه و بر روی میز گردان دستگاه مطابق شکل نصب و تنظیم گردید و به منظور اینکه برش نمونه با دقت کافی انجام گیرد در انتها فیکسچر میله ای قرار داده شد.

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 پودرلاستیک و اصلاح کننده‌های WMA پیشنهاد کرده‌اند. در نتیجه، دمای ۱۵۵ درجه سانتی گراد (۲۰ درجه سانتی گراد 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. نمونه‌های نیم دیسک خمشی سه نقطه‌ای (قطع‌ات SCB) بدلیل هندسه ساده، بارگذاری آسان و سهولت ایجاد ترک لبه‌ای، قطع‌ات مناسبی جهت انجام تست‌های چقرمگی



شکل ۶. دستگاه برش با دیسک گردان



شکل ۷. تنظیم نمونه در داخل فیکسچر قبل از برش

اینکه پس از نصف کردن نمونه‌ها آسفالتی به شکل دیسک، قطعات نیم دایره ای حاصل گردند. برای این منظور از تیغه مخصوص برای برش سنگ با ضخامت ۲ میلی‌متر استفاده شد و برای این منظور ابتدا یک لوله قوطی شکل با مقطع مستطیلی به میز گردان جوش داده شده به عنوان فیکسچر ثابت عمل می‌کند که این لوله دارای سطحی صاف بوده که نمونه‌ها به راحتی به آن تکیه داده شوند و در مرحله بعد یک فیکسچر دستی برای ثابت نگه داشتن نمونه‌ها در کنار این لوله ساخته شد. برای این کار از یک نبشی بگونه‌ای استفاده می‌شود که نمونه‌ها بطور کامل در آن قرار گیرند و یک میلگرد برای در دست گرفتن این نبشی استفاده شد مطابق شکل.



شکل ۸. فیکسچر ثابت و متحرک برای نصف کردن نمونه‌ها دیسک شکل



شکل ۹. نمونه‌های نیم دیسک

آهستگی انجام گرفت تیغه نصب شده برای دستگاه برش برای ایجاد ترک به ضخامت ۰/۵ میلی‌متر بود شکل زیر یک نمونه ترک دار را قبل از تست نشان می‌دهد لازم به ذکر است که کلیه ترک‌ها دارای طول ۲۰ میلی‌متر و در وسط نمونه ایجاد شدند.

به منظور جلوگیری از تغییر خواص مکانیکی نمونه‌های آسفالتی عمل برش همراه با احتیاط کامل و دقت زیاد در حالیکه محل برش با آب خنک می‌شد انجام گرفت. لازم به ذکر است با توجه به ضخامت ۳ میلی‌متر دیسک برش از هر نمونه استوانه‌ای ۳ دیسک به ضخامت ۳ سانتی‌متر ایجاد گردد و در نهایت همه نمونه‌های استوانه‌ای به دیسک‌های نازک مطابق شکل تقسیم گردیدند. بعد از هر مرحله برش کنترل ضخامت قطعه انجام گرفت و در صورت مغایرت با مقدار ۳ سانتی متر به منظور برش دوباره در داخل فیکسچر قرار داده شد. به منظور ایجاد نمونه‌های SCB، نمونه‌های برش داده شده در قسمت قبل لازم است که از وسط برش داده شوند. جهت انجام این مرحله، ضروری است که ضخامت تیغه برش کمترین مقدار ممکن باشد تا

پس از ایجاد نمونه‌های SCB نوبت به ایجاد ترک در این نمونه‌ها می‌رسد. این مرحله از کار نیز مثل مرحله قبل و بستن نمونه در دستگاه برش مطابق شکل انجام گرفت. لازم به ذکر است مشابه حالت قبل (برش نمونه استوانه‌ای) در این حالت نیز محل برش با آب خنک می‌شد و عمل برش با

جدول ۹. کد گذاری نمونه‌های مختلف

شماره	قیصر 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

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 ۱۰ دمای تراکم و اختلاط نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۱۰. دمای اختلاط و تراکم مخلوط

مخلوط	دمای اختلاط (درجه سانتی‌گراد)	دمای تراکم (درجه 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

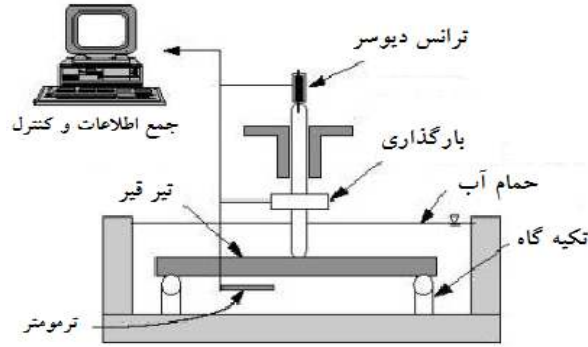
۳-۱- رئومتر تیرچه خمشی (Bending Beam Rheometer)

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 حاصل نیز همزمان اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۱۰ و ۱۱). 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 m در زمان ۶۰ ثانیه بایستی برابر یا بیش از ۰٫۳ باشد.

از آنجاییکه 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 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



شکل ۱۰. رئومتر تیرچه خمشی (BBR)

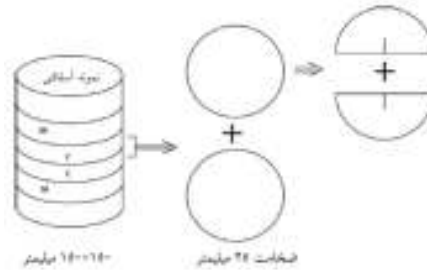


شکل ۱۱. شمای آزمایش رئومتر تیرچه خمشی (BBR)

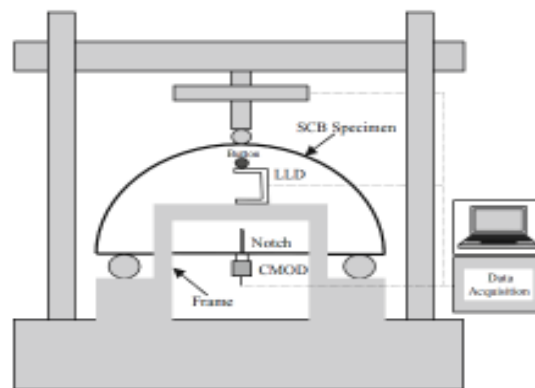
۳-۲- آزمایش SCB

مختلف در ضخامت‌های متفاوت و تأثیر آن در نتایج آزمایش، از نمونه‌های ایجاد شده از ابتدا و انتهای نمونه ۱۵۰ میلیمتری مطابق شکل ۱۲ صرف نظر کردن. برای انجام آزمایش درحالی که نمونه بر روی دو تکیه گاه غلتکی (با دهانه ۱۲۰ میلیمتر) قرار داشت؛ بار به نحوی بر بالای نمونه وارد می‌شد که سرعت بازشدگی دهانه ترک برابر $0/005$ میلیمتر بر ثانیه باشد. در فرایند انجام آزمایش مقدار بار، تغییر مکان قائم (با استفاده از یک انبساط سنخ) و بازشدگی دهانه ترک ثبت می‌شدند و آن‌ها برای بدست آوردن انرژی شکست از سطح زیر نمودار بار-تغییر مکان استفاده کردند.

لی و ماراستینو برای بررسی مقاومت مخلوط آسفالتی در دمای پایین از آزمایش خمش بر روی نمونه‌های با مقطع نیم دایره و مفاهیم مکانیک شکست در دو دمای ۳۰- و ۴۰- درجه سانتیگراد استفاده نمودند. به منظور ایجاد حالت تنش مسطحه نمونه‌های آسفالتی به ضخامت ۲۵ میلیمتر تهیه شدند (این ضخامت پس از انجام تحلیل‌های لازم با استفاده از روش المانهای محدود به دست آمد) نمونه‌های استوانه‌ای به ضخامت ۲۵ میلیمتر از برش نمونه‌های آسفالتی متراکم شده به روش تراکم ژیراتوری که دارای ضخامت ۱۵۰ میلیمتر بودند، تهیه شدند. با توجه به احتمال وجود تراکم‌های



شکل ۱۲. تهیه نمونه‌های SCB



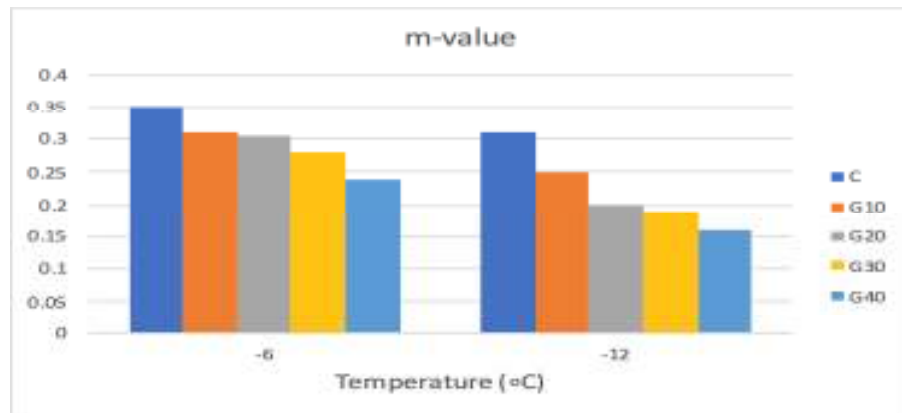
شکل ۱۳. تجهیزات مورد استفاده در آزمایش SCB

۴-نتایج

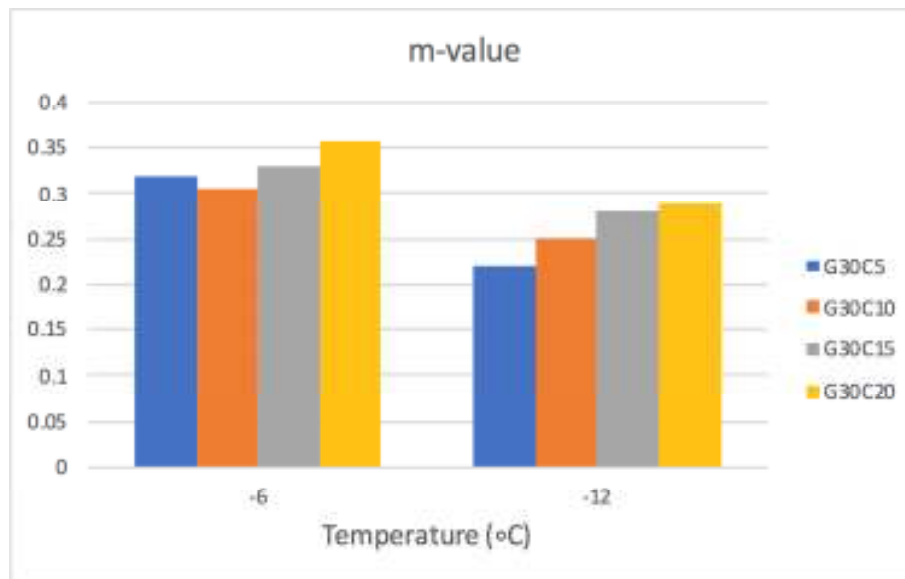
۴-۱-نتایج آزمایشات سنتی و رپولوژی قیر

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 گیلسونیت حاوی CR دارد. نتیجه m -value و s -value در قیرهای مختلف به ترتیب در شکل ۱۳-۱۴ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که با استفاده از گیلسونیت، این عوامل در قیرها به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. استفاده از گیلسونیت باعث سفت شدن قیرها و در نتیجه کاهش انعطاف پذیری قیرها می‌شود. علاوه بر این، گیلسونیت منجر

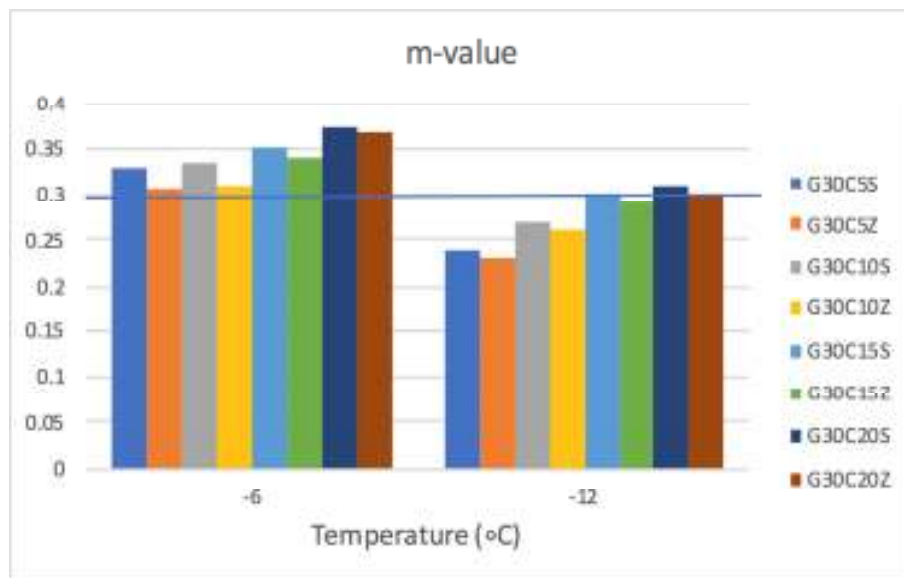
به بهبود آخرین تغییر شکل در قیرها می‌شود. شاید به دلیل سفت شدن قیر با استفاده از گیلسونیت باشد. همچنین کاربرد CR در قیرهای اصلاح شده توسط گیلسونیت باعث کاهش مقدار سفتی و افزایش قابل ملاحظه m -value می‌شود. بر اساس نتایج، CR منجر به بهبود عملکرد دمای پایین در قیر اصلاح شده با گیلسونیت می‌شود. با توجه 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.



(الف)



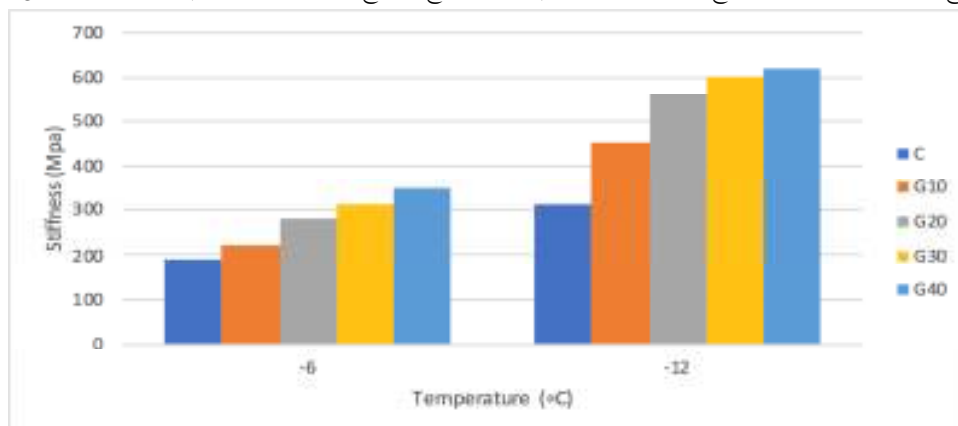
(ب)



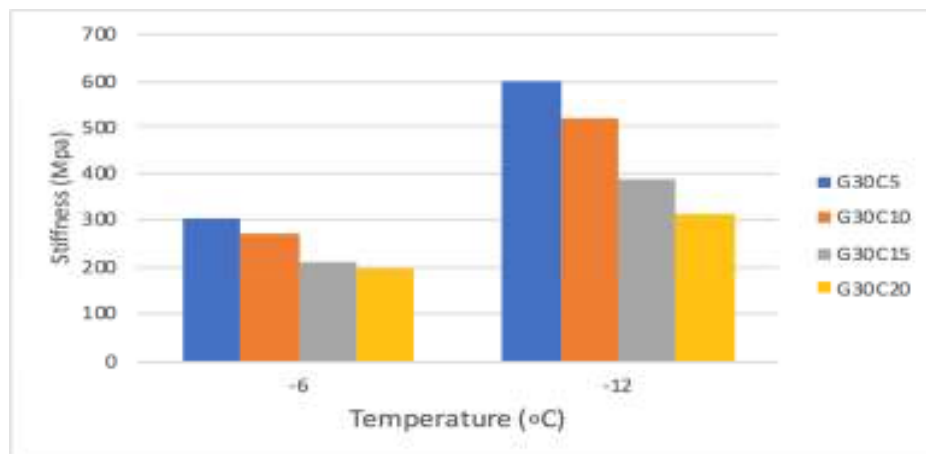
(ج)

شکل ۱۳. نتایج m-value برای نمونه‌های مختلف

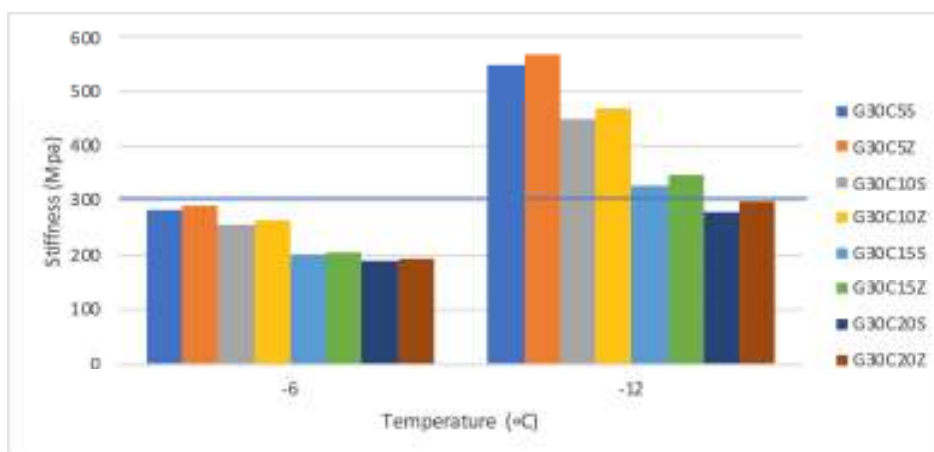
الف) اصلاح شده با گیلسونایت ب) اصلاح شده با گیلسونایت و پودر لاستیک ج) اصلاح شده با گیلسونایت و پودر لاستیک و افزودنی نیمه گرم



(الف)



(ب)



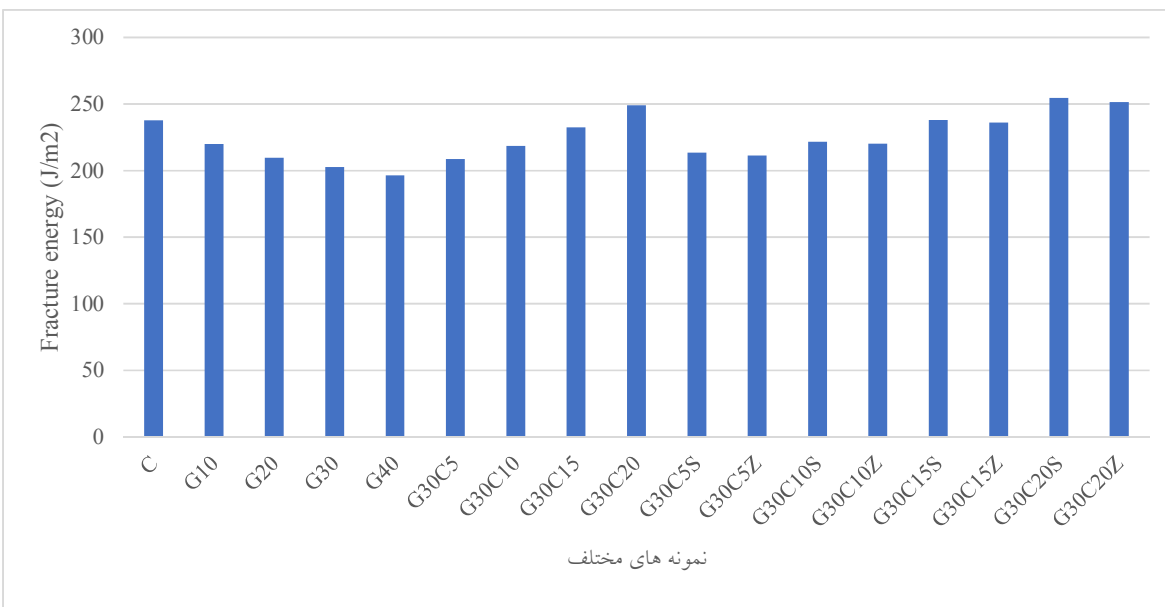
(ج)

شکل ۱۴. نتایج s-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

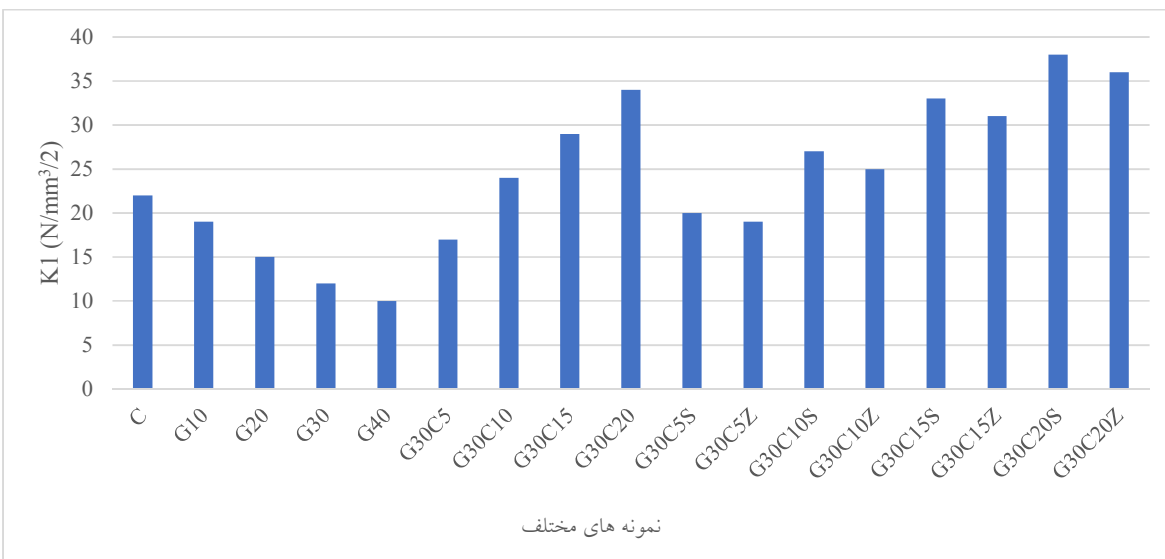
۴-۵- نتایج آزمایش SCB

لاستیک سبب بهبود خصوصیات شکل پذیری قیر می‌گردد و سبب بهبود مقاومت مخلوط در برابر ترک خوردگی می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد با افزودن افزودنی‌های نیمه گرم خصوصیات مقاومتی مخلوط در برابر ترک خوردگی دمای پایین بهبود می‌یابد. با توجه به نتایج، مخلوط‌های حاوی ساسوبیت مقاومت بالاتری نسبت به زایکوترم از خود نشان می‌دهند. سختی نشانه مقاومت در برابر تغییر شکل مواد سخت‌تر شیب تندتری در منحنی‌های بار-تغییر شکل دارند. هنگامی که یک ماده سفت در نتیجه کاهش دما منقبض می‌شود، تنش‌های حرارتی بیشتری در مقایسه با مواد نرم با همان مقدار انقباض ایجاد می‌شود. بنابراین، مواد سفت‌تر با تنش‌های حرارتی بیشتر پس از افت دما، در برابر ترک‌خوردگی حرارتی آسیب‌پذیرتر هستند. نتایج سختی نمونه‌ها در شکل ۱۷ نشان داده شده است. با توجه به نتایج، با افزایش گیلسونایت سختی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. نتایج نشان داد پودر لاستیک سبب بهبود خصوصیات شکل پذیری و بهبود انعطاف‌پذیری قیر می‌گردد و از سختی نمونه‌ها می‌کاهد. اضافه نمودن افزودنی‌های نیمه گرم سبب کاهش سختی قیر در دمای پایین می‌گردد و در میان افزودنی‌های نیمه گرم، ساسوبیت بیشتر سبب کاهش سختی نمونه می‌گردد.

انرژی شکست میزان انرژی جذب شده توسط مخلوط قبل از شکست را نشان می‌دهد. برای تخمین مقاومت در برابر شکست مخلوط‌ها، جابجایی و همچنین مقدار بار را در نظر می‌گیرد. هر چه انرژی شکست بیشتر باشد، مقاومت مخلوط در برابر ترک بهتر است. چقرمگی شکست، خاصیتی از ماده‌ی دارای ترک است که مقاومت آن را در برابر رشد ترک نشان می‌دهد. معمولاً هر چه میزان پارامتر چقرمگی شکست بیشتر باشد، آن ماده بهتر می‌تواند در برابر رشد ترک و بارهای وارده مقاومت کند. آزمایش بارگذاری خمشی نیم دایره‌ای از آزمایش‌های رایج مکانیک شکست می‌باشد، که در آن نمونه نیم دایره‌ای ترک‌دار در معرض بارگذاری خمشی سه نقطه قرار می‌گیرد. چقرمگی از پارامترهای مهم در تحلیل آزمایش شکست می‌باشد. نتایج انرژی شکست نمونه‌های مختلف در شکل ۱۵ نشان داده شده است. با توجه به نتایج با افزودن گیلسونایت انرژی شکست نمونه‌ها کاهش می‌یابد و با افزایش درصد گیلسونایت روند کاهشی مشاهده می‌گردد. با توجه به نتایج می‌توان دریافت افزودن گیلسونایت سبب افزایش سختی نمونه‌ها شده و مقاومت در برابر ترک خوردگی را کاهش می‌دهد. با افزودن پودر لاستیک بر مخلوط حاوی ۳۰٪ گیلسونایت، مقادیر انرژی شکست نمونه‌ها افزایش می‌یابد. هرچه درصد پودر لاستیک افزایش می‌یابد مقادیر انرژی شکست نیز افزایش می‌یابد. پودر



شکل ۱۵. انرژی شکست نمونه‌های مختلف



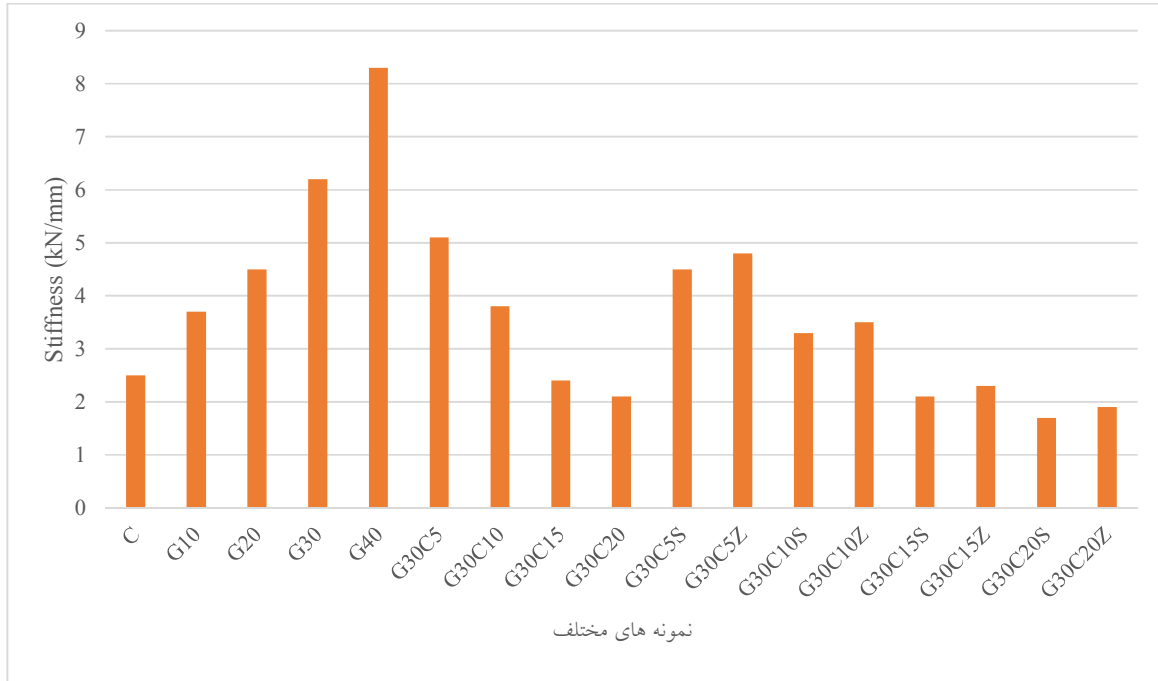
شکل ۱۶. نتایج ضریب شدت تنش نمونه‌ها

نمونه‌های مختلف در شکل ۱۶ نشان داده شده است. با توجه به نتایج با افزودن گیلسونایت ضریب شدت تنش نمونه‌ها کاهش می‌یابد و با افزایش درصد گیلسونایت روند کاهشی مشاهده می‌گردد. با توجه به نتایج می‌توان دریافت افزودن گیلسونایت سبب افزایش سختی نمونه‌ها شده و مقاومت در برابر ترک خوردگی را کاهش می‌دهد. با افزودن پودر لاستیک بر مخلوط حاوی ۳۰٪ گیلسونایت، مقادیر ضریب شدت تنش نمونه‌ها افزایش می‌یابد. هرچه درصد پودر لاستیک افزایش می‌یابد مقادیر ضریب شدت تنش نیز افزایش می‌یابد. پودر لاستیک سبب بهبود خصوصیات شکل

ضریب شدت تنش (KI) به قدرت باز شدن ترک (حالت (۱) تحت بارگذاری می‌پردازد. همانطور که از نام آن پیداست، ضریب شدت تنش نشان می‌دهد که کشش متمرکز در نوک ترک چقدر شدید است. از آنجایی که هندسه نمونه‌ها یکسان است، ضریب شدت تنش، حداکثر بار را برای شکستن نمونه به دو قسمت نشان می‌دهد. هر چه KI بیشتر باشد، استحکام کششی بیشتری برای پاره شدن نمونه‌های SCB مورد نیاز است. هنگامی که استحکام کششی مخلوط افزایش می‌یابد، شکننده‌تر می‌شود و در نتیجه بیشتر مستعد ترک خوردگی حرارتی است. نتایج ضریب شدت تنش

ترک خوردگی قیر می‌گردد و سبب بهبود مقاومت مخلوط در برابر ترک خوردگی می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد با افزودن افزودنی‌های نیمه گرم خصوصیات مقاومتی مخلوط در برابر

پذیری قیر می‌گردد و سبب بهبود مقاومت مخلوط در برابر ترک خوردگی می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد با افزودن افزودنی‌های نیمه گرم خصوصیات مقاومتی مخلوط در برابر



شکل ۱۷. نتایج سختی نمونه‌های مختلف

۵- نتیجه گیری

کار موجود بر روی ارزیابی اثرات CR، Gilsonite و همچنین افزودنی‌های گرم بر رفتار عملکرد دمای پایین در نمونه‌های قیر و SMA متمرکز بود. آزمایشات مختلفی مانند: رئومتر تیر خمشی و شد. با توجه به نتایج، می‌توان به دست آورد:

-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. استفاده از گیلسونیت، مقادیر s -value و m -value در قیرها به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. استفاده از گیلسونیت باعث سفت شدن قیرها و در نتیجه کاهش انعطاف پذیری قیرها می‌شود. می‌تواند به دلیل سفت شدن قیر با استفاده از گیلسونیت باشد. همچنین کاربرد CR در قیرهای اصلاح شده توسط گیلسونیت 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 گیلسونیت

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. افزودن گیلسونیت انرژی شکست نمونه‌ها کاهش می‌یابد و با افزایش درصد گیلسونیت روند کاهشی مشاهده می‌گردد. با توجه به نتایج می‌توان دریافت افزودن گیلسونیت سبب افزایش سختی نمونه‌ها شده و مقاومت در برابر ترک خوردگی را کاهش می‌دهد. با افزودن پودر لاستیک بر مخلوط حاوی ۳۰٪ گیلسونیت، مقادیر انرژی شکست نمونه‌ها افزایش می‌یابد. هرچه درصد پودر لاستیک افزایش می‌یابد مقادیر انرژی شکست نیز افزایش می‌یابد. پودر لاستیک سبب بهبود خصوصیات شکل پذیری قیر می‌گردد و سبب بهبود مقاومت مخلوط در برابر ترک خوردگی می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد با افزودن افزودنی‌های نیمه گرم

پذیری قیر می‌گردد و سبب بهبود مقاومت مخلوط در برابر ترک خوردگی می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد با افزودن افزودنی‌های نیمه گرم خصوصیات مقاومتی مخلوط در برابر ترک خوردگی دمای پایین بهبود می‌یابد. با توجه به نتایج، مخلوط‌های حاوی ساسوبیت مقاومت بالاتری نسبت به زایکوترم از خود نشان می‌دهند. با افزایش گیلسونایت سختی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. نتایج نشان داد پودر لاستیک سبب بهبود خصوصیات شکل پذیری و بهبود انعطاف پذیری قیر می‌گردد و از سختی نمونه‌ها می‌کاهد. اضافه نمودن افزودنی‌های نیمه گرم سبب کاهش سختی قیر در دمای پایین می‌گردد و در میان افزودنی‌های نیمه گرم، ساسوبیت بیشتر سبب کاهش سختی نمونه می‌گردد.

خصوصیات مقاومتی مخلوط در برابر ترک خوردگی دمای پایین بهبود می‌یابد. با توجه به نتایج، مخلوط‌های حاوی ساسوبیت مقاومت بالاتری نسبت به زایکوترم از خود نشان می‌دهند. با افزودن گیلسونایت ضریب شدت تنش نمونه‌ها کاهش می‌یابد و با افزایش درصد گیلسونایت روند کاهشی مشاهده می‌گردد. با توجه به نتایج می‌توان دریافت افزودن گیلسونایت سبب افزایش سختی نمونه‌ها شده و مقاومت در برابر ترک خوردگی را کاهش می‌دهد. با افزودن پودر لاستیک بر مخلوط حاوی ۳۰٪ گیلسونایت، مقادیر ضریب شدت تنش نمونه‌ها افزایش می‌یابد. هرچه درصد پودر لاستیک افزایش می‌یابد مقادیر ضریب شدت تنش نیز افزایش می‌یابد. پودر لاستیک سبب بهبود خصوصیات شکل

۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Multiple Stress Creep Recovery
- 2- Linear Amplitude Sweep
- 3- Performance Grade
- 4- Crumb Rubber
- 5- Styrene-Butadiene-Styrene
- 6- Styrene-Butadiene-Rubber
- 7- Bending Beam Rheometer
- 8- Stone Matrix Asphalt
- 9- Warm Mix Asphalt

۷- مراجع

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.

-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, “Designing stone matrix asphalt mixtures for rut-resistant pavements”, *Transport Res Board* 1999.

-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

Proceedings of the 2008 Airfield and Highway Pavements Conference, pp. 15-18.

-Mirsayar, M. M., (2017), "On the low temperature mixed mode fracture analysis of asphalt binder- Theories and experiments", *Eng. Fract. Mech.*, 186: 181-194. Doi: 10.1016/j.engfracmech.2017.10.010.

-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.

-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 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 Elastomerics*, 03, pp.29-34 [in Chinese].

-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.

-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.

-Falchetto, A. C., Moon, K. H., Wang, D., Riccardi, C. and Wistuba, M. P., (2018), "Comparison of low- temperature fracture and strength properties of asphalt mixture obtained from IDT and SCB under different testing configurations", *Road Mater, Pavement Design*, 19(3), pp. 591-604. Doi. 10.1080/.14680629.2018.1418722.

-Fang CQ, Yu RE, Liu SL, Li Y., (2013), "Nanomaterial 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 materials in hot-mix asphalt*, ASTM International.

-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

Experimental Evaluation of Low Temperature Performance of Asphalt Binder and Mixture Containing Gilsonite, Crumb Rubber, and Warm Mix Asphalt Additives

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: September 2022- Accepted: February 2023

ABSTRACT

The aim of this study was to investigate the effect of warm mix asphalt additive on the low-temperature performance of bitumen and asphalt mixtures containing rubber powder and gilsonite. In the present study, gilsonite, rubber powder and 2 warm mix 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. The results of rheological behavior test showed that the performance of asphalt bitumen's at low temperatures deteriorated with the addition of gilsonite, while the use of rubber powder improved the performance of low temperatures. The test results showed that the use of gilsonite leads to decrease the fracture energy and stress intensity factor. While, addition of crumb rubber led to increase them. Based on results, addition of warm mix additives led to increase the fracture energy and decrease the stiffness at low temperatures.

Keywords: Bitumen, Crumb Rubber, Asphalt Mixture, Bitumen Rheology, Low Temperature Cracking