

ارزیابی مقاومت شیارشدگی قیر و مخلوط آسفالتی حاوی گیلسونایت، پودر لاستیک و افزودنی نیمه گرم

مقاله علمی - پژوهشی

رضوان باباگلی، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران
محمد کاشانی نوین*، دانشجوی دکتری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

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

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: M_knovin@yahoo.com

دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۰۵ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۲۵

صفحه ۳۰۴-۲۸۳

چکیده

شیارشدگی یکی از مهمترین خرابی‌های روسازی است که در اثر تجمع کرنش‌های برگشت ناپذیر در مسیر چرخ‌ها اتفاق می‌افتد. عوامل مختلفی در بروز این نوع خرابی موثر می‌باشند که یکی از آنها عدم مقاومت کافی مخلوط آسفالتی می‌باشد. یکی از روش‌های بهبود مقاومت مخلوط آسفالتی استفاده از افزودنی‌های مختلف می‌باشد. لذا، در این تحقیق، اثر افزودنی‌های آسفالت نیمه گرم، پودر لاستیک و گیلسونایت بر مقاومت شیارشدگی قیر و مخلوط آسفالتی مورد ارزیابی قرار گرفت. در تحقیق حاضر، گیلسونیت، پودرلاستیک و ۲ افزودنی نیمه گرم (۳٪ Sasobit و همچنین ۰.۳٪ Zycotherm) برای اصلاح قیر خالص (AC-۸۵/۱۰۰) استفاده شد. چندین آزمایش رئولوژیکی قیر و آزمایش عملکردی مخلوط انجام شد. نتایج آزمون رفتار رئولوژیکی قیر نشان داد که افزودن افزودنی‌های ترکیبی منجر به افزایش رفتار دمای بالا قیر می‌شود. آزمایش پایداری ذخیره سازی قیر نیز 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. مقاومت شیارشدگی 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. علاوه بر این، CR می‌تواند مقاومت شیارشدگی قیرهای اصلاح شده با گیلسونایت حاوی گیلسونیت را افزایش دهد. نتایج آزمایش نمونه نشان داد که استفاده از گیلسونیت، افزودنی‌های نیمه گرم و پودرلاستیک مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی را افزایش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: قیر، پودر لاستیک، مخلوط آسفالتی، رئولوژی قیر، شیارشدگی

۱- مقدمه

مخلوط آسفالت گرم در معرض شیار شدن، آسیب‌های ناشی از رطوبت، ترک‌های ناشی از دمای پایین و خستگی قرار می‌گیرند. از افزودنی‌ها برای افزایش طول عمر روسازی‌ها با افزایش مقاومت قیر و مخلوط‌های قیری در برابر گرما و بار ترافیکی استفاده می‌شود (Zhang et al, 2015; Wang et al, 2010; Yildirim, 2007; Zhang et al, 2010). قیرهای طبیعی یکی از افزودنی‌های مورد استفاده در آسفالت‌های مخلوط

مخلوط آسفالت گرم که روسازی انعطاف‌پذیر نام دارد اساساً از قیر و سنگدانه تشکیل شده‌اند. قیر به دلیل خواص رئولوژیکی خود مانند جامدات الاستیک در شرایط بارگذاری بالا و در دماهای پایین و همچنین مانند یک سیال ویسکوز در شرایط بارگذاری پایین و دمای بالا رفتار می‌کنند. قیر رفتار مشابه‌ای را در روسازی‌ها از خود نشان می‌دهند، زیرا این ویژگی‌ها در مخلوط آنها حفظ می‌شود. به دلیل شرایط ترافیکی و محیطی،

بالا/پایین و مقاومت در برابر پیری دارد. مقاومت در برابر آسیب رطوبت و پیری آسفالت اصلاح شده با استفاده از NS^۳ و SBS بر اساس نتایج تحقیقات یوسف بسیار بهبود یافته است.

مطالعات قبلی عملکرد آسفالت اصلاح شده توسط پلیمر RA4 یا مواد نانو را گزارش کرده بودند. با این حال، اطلاعات محدودی در متون وجود دارد که ویژگی‌های آسفالت نانو سیلیس/سنگ/ SBS (NS/RA/SBS) را تشریح می‌کند. در مطالعات قبلی، چهار نانو ماده برای شناسایی بهترین انتخاب برای مطابقت با RA انتخاب شد. NS انتخاب شد (Shi et al, 2016). سپس اثرات NS و RA بر خواص رئولوژیکی آسفالت اصلاح شده مقایسه شد و محتوای اختیاری: ۱٪ NS و ۶٪ RA تعیین شد (Shi et al, 2018) اصلاح کننده فوق هر دو اثرات منفی جزئی بر خواص دمای پایین داشتند.

بر اساس مطالعات پیشین (Zhang et al, 2015; Wang et al, 2010; Yildirim, 2007; Zhang et al, 2017; al, 2010)، اصلاح قیر تنها با یک اصلاح کننده نمی تواند رفتار مخلوط‌ها را بهبود بخشد. بنابراین، اصلاح قیر توسط بیش از یک اصلاح کننده مورد نیاز است که ممکن است به دلیل فعل و انفعالات متعدد منجر به بهبود رفتار روسازی شود. بنابراین، اصلاح قیرها با گیلسونیت و CR^۵ در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. همچنین برای کاهش ویسکوزیته و همچنین دمای تراکم و اختلاط مخلوط اصلاح شده گیلسونیت/CR، از نانو مواد زایکوترم و ساسویت استفاده شد. هدف از این کار بررسی تاثیر گیلسونیت با چهار دوز (۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪، ۴۰٪)، و چهار درصد پودر لاستیک (۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪) و ۲ افزودنی نیمه گرم (۳٪ زایکوترم و ۳٪ ساسویت) بر رفتار قیرها و مخلوط‌های SMA^۶ می‌باشد. عملکرد قیرهای حاوی مواد افزودنی با اجرای آزمایش‌های MSCR7، DSR8، ویسکوزیته چرخشی، نقطه نرمی و درجه نفوذ ارزیابی شد. همچنین، تحقیقات کمی در مورد وضعیت تردد به قیرهای درجه بندی انجام شده است. ادبیات بر شرایط آب و هوایی برای طبقه بندی قیرها به جای وضعیت ترافیک متمرکز شده است. بنابراین، در این تحقیق از روش‌های MSCR^۹ و PG^۹ برای درجه بندی قیرهای مختلف استفاده شد و نتایج با هم مقایسه شدند. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها، ANOVA اجرا شد. علاوه بر این، برای بررسی ویژگی‌های مقاومت شیارشدگی مخلوط آسفالتی، آزمایش‌های خزش دینامیکی و شیار جای چرخ انجام شد.

گرم هستند. قیر دریاچه ترینیداد و گیلسونیت پرکاربردترین اصلاح کننده‌های قیر طبیعی هستند. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که استفاده از گیلسونیت در آسفالت‌های مخلوط گرم خواص آنها را افزایش می‌دهد. گیلسونایت، اولین قیر مورد استفاده در مخلوط‌های آسفالتی گرم در سال ۱۸۷۶، از بزرگترین ذخایر تجاری قیر طبیعی جهان، ترینیداد و توباگو می‌آید. به طور معمول، گیلسونایت از مخلوطی از قیر و مواد معدنی تشکیل شده است. اجزاء قیر از مالتن (۶۳-۶۶٪) و آسفالتین (۳۴-۳۷٪) تشکیل شده است. به طور معمول، گیلسونایت تصفیه شده دارای درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتیگراد ۲ دسی میلیمتر و نقطه نرم شدن بین ۹۳ تا ۹۹ درجه سانتیگراد است. گیلسونیت، یک کانی هیدروکربنی جامد طبیعی، پتانسیل بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی قیر را دارد. گیلسونیت به دلیل استفاده آسان و میل ترکیبی خوب با آسفالت شناخته شده است. با توجه به اینکه گیلسونیت در طبیعت نیز نوعی چسب آسفالت است، می توان آن را به سرعت در قیر آسفالت حل کرد. منابع مهم گیلسونیت در ایالات متحده (یوتا) و ایران قرار دارد. (Lo presti et al, 2013; Ibrahim et al, 2013)

تحقیق هوانگ و همکاران (۲۰۱۵، Huang et al) آسفالت اصلاح شده ترکیبی را با استفاده از پودر لاستیک /گیلسونایت^۱/SBS برای دستیابی به عمر خستگی بهتر از آسفالت اصلاح شده SBS پیشنهاد کرد. علاوه بر این، کوک (Kok et al, 2011) و یانگ (Yang et al, 2015) گیلسونیت و آسفالت دریاچه ترینیداد را به آسفالت اصلاح شده SBS اضافه کردند که خواص دمای بالا به طور مداوم بهبود می یافت. از نظر اصلاح مواد نانو، لاستیک نانو مونتوموریلونیت/استایرن بوتادین (SBR) از مخلوط آسفالت اصلاح شده و نانو مونتوموریلونیت/کوپلیمر اتیلن وینیل استات توسط پولاکو (Polacco et al, 2007) و سورشکومار (Sureshkumar et al, 2010) تهیه شده است. به طور مستقیم، برای بهبود عملکرد رئولوژیکی خود از قیرهای آسفالتی. مطالعه سان و همکاران (Sun et al, 2016) گزارش داد که استفاده از کرنات نانو کلسیم در مخلوط آسفالت اصلاح شده SBR^۲ امکان پذیر است. یوسف و همکاران (Yossuf et al, 2014) خواص آسفالت اصلاح شده ۵٪ SBS را با آسفالت اصلاح شده با ۰٫۵٪ نانو سیلیس (SBR 1%+NS) پلی اتیلن مقایسه کردند. آسفالت اصلاح شده پیشنهادی بهبود قابل توجهی در عملکرد دمای

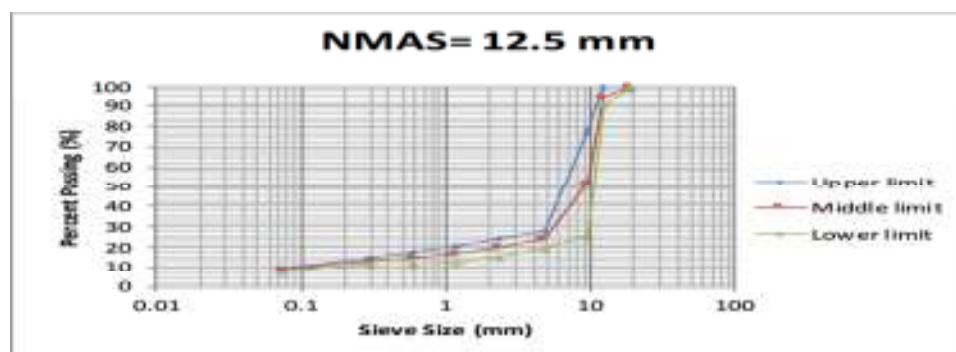
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

۲-۱-۱- مصالح سنگی

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

برای تهیه مصالح در تهیه نمونه، از یک معدن جدید در کرمانشاه استفاده شد. خواص سنگدانه های مورد استفاده در



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 ₂ O	K ₂ O	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SiO ₂	MnO
مصالح آهکی	۴۳	۰.۰۷	۰.۶۵	۲.۱۲	۰.۹۵	۰.۷۵	۱۷.۵۳	۰.۰۴۶

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 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

۲-۱-۳- پودر لاستیک

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 سانتی متر 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.

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. 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

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

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	نیترژن (%)	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	≤ 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 gr/cm^3
-	سیاه	رنگ در حالت کلوخه
-	قهوه ای تیره	رنگ در حالت پودر
ASTM-D36	۲۲۱	نقطه نرمی °C
ASTM-D5	۰-۱	درجه نفوذ در ۲۵ °C

۲-۱-۵-فایبر

برای از بین بردن ریزش قیر در مخلوط SMA، بهتر است (Cooley, 1999) از الیاف سلولز ۰,۳٪ استفاده شود. بر اساس توصیه NCHRP^{۱۱} No ۴۲۵ (Brown and) ویژگی‌های الیاف کاربردی در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۷. خصوصیات فایبر

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

۶-۱-۲- افزودنی‌های WMA

کننده‌های گرم در جدول ۸ نشان داده شده است. درصد یک افزودنی خاص با توصیه سازنده انتخاب شده است.

برای ارزیابی تاثیر مواد WMA^{۱۱} بر رفتار رئولوژیکی قیرهای ترکیبی اصلاح شده گیلسونایت/CR، از ماده WMA از زایکوترم و همچنین ساسویت استفاده شد. ویژگی‌های اصلاح

جدول ۸. مشخصات افزودنی‌های نیمه گرم

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

۲-۲- آماده سازی نمونه‌ها

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 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.

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

جدول ۹. کدگذاری 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 مقادیر مختلف در این مطالعه ساخته شد. جدول ۱۰ دمای تراکم و اختلاط نمونه‌ها را نشان می‌دهد. درصد قیصر بهینه تعیین شد. ۳ نمونه برای هر نوع اصلاح کننده با توجه به طرح مخلوط نمونه‌ها، مقدار قیصر ۷ درصد به عنوان درصد قیصر بهینه تعیین شد. ۳ نمونه برای هر نوع اصلاح کننده

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 فیزیکی قیر

باشد، که مطابق با ASTM - d ۵ انجام شد. تست ویسکوزیته با استفاده از ویسکومتر چرخشی بروکفیلد برای اندازه‌گیری ویسکوزیته قیرهای اصلاح‌نشده و اصلاح شده در دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد مطابق با استاندارد ASTM D ۴۴۰۲ انجام شد.

خواص فیزیکی متداول قیر پایه و قیر اصلاح‌شده با درصد‌های مختلف پدرو 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 ۱۱۳D انجام شد. درجه نفوذ می‌تواند نشان‌دهنده سختی قیر

۳-۲- رئومتر برش دینامیکی

از ۱ کیلو پاسکال باشد.

به منظور مشخص کردن ویژگی‌های اساسی ریولوژیکی قیر، تست DSR انجام شد. این تست می‌تواند به درستی رفتار الاستیک و ویسکوز قیر را در دماهای متوسط تا دماهای بالا توصیف کند. مدول مرکب (G^*) و زاویه فاز (d) پارامترهای اصلی 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 ۴۶، ۵۲، ۵۸، ۶۴، ۷۰ و ۷۶ درجه سانتی‌گراد با توجه به روش آزمون استاندارد ASTM D-۷۱۷۵، تست شدند. مقدار $G^* / \sin \delta$ برای قیرهای پیرنشده توصیه می‌شود که با توجه به استاندارد، ASTM - DV۱۷۵ بیش

۳-۳- آزمایش تنش خزشی دوگانه و باربرداری

جهت ارزیابی حساسیت قیرها در برابر تغییرشکل دائمی یا شیارشدگی، روش MSCR معرفی شده است. روند آزمایش بر این اساس است که یک نمونه قیر به قطر ۲۵ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر در معرض ۱۰ سیکل بارگذاری با اثابیه بارگذاری خزشی و ۹ ثانیه استراحت در سطوح تنش ۱۰۰ و ۳۲۰۰ پاسکال در دمای عملکردی زیاد (دمای ۶۴ درجه سلسیوس) با استفاده از دستگاه رئومتر برش دینامیک قرار می‌گیرد. قبل از انجام آزمایش نمونه قیر، پیرشده کوتاه مدت می‌شود. درصد بازگشت کرنش و مدول غیر قابل بازگشت بعد از ۱۰ سیکل بارگذاری محاسبه خواهد شد (AASHTO, 2011). شماتیک دستگاه در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲. دستگاه رئومتر برش دینامیکی

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

$$\varepsilon_{10} = \varepsilon_r - \varepsilon_0 \quad (1)$$

$$PR = \frac{\varepsilon_{10} - \varepsilon_0}{\varepsilon_1} \times 100 \quad (2)$$

$$J_{nr} = ave. \frac{\gamma_u}{\tau} \quad (3)$$

نمونه‌های قیری به صورت درصد اختلاف در مدول غیرقابل بازگشت می‌باشد. این پارامتر، مقدار افزایش در مقدار پارامتر J_{nr} را وقتی تنش از ۱۰۰ پاسکال به ۳۲۰۰ پاسکال افزایش می‌یابد، نشان می‌دهد. در عمل، این پارامتر مقدار حساسیت قیر به شیارشدگی زمانی که بارهای ترافیکی مختلف به ساختار مخلوط یا دمای غیرمنتظره در سطح روسازی اعمال شود، نشان می‌دهد.

۳-۴- خزش دینامیکی

جهت بررسی شیارشدگی نمونه‌ها از آزمایش خزش دینامیکی استفاده شد. آزمایش خزش دینامیکی یکی از معیارهای مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر تغییر شکل‌های دائم می‌باشد. آزمایش با استفاده از دستگاه UTM- 5P¹² در دمای ثابت ۵۰ درجه سانتی گراد و تحت تنش ثابت ۴۵۰ کیلو پاسکال که به صورت

مقدار کرنش اولیه (ε_0) در شروع بارگذاری خزشی در هر سیکل و مقادیر کرنش در انتهای هر سیکل (ε_C) تعیین می‌گردد. اختلاف دو کرنش به عنوان کرنش اعمالی است (ε_1). به طور مشابه، مقدار کرنش (ε_r) در انتهای باربرداری در هر سیکل و کرنش اعمالی بعد از باربرداری (ε_{10}) در انتهای هر سیکل باربرداری محاسبه می‌شود. معادله (۲) نیز میزان درصد بازگشت کرنش را نشان می‌دهد. مقدار مدول غیرقابل بازگشت کیلوپاسکال (J_{nr}) همان طور که در معادله (۳) آمده است، نسبت مقدار کرنش باقیمانده در نمونه بعد از بارگذاری و باربرداری به تنش اعمالی است که مقدار مقاومت نمونه را در برابر تغییرشکل دائمی نشان می‌دهد. پارامتر γ_u مقدار کرنش غیرقابل بازگشت در انتهای ۹ ثانیه باربرداری می‌باشد. پارامتر τ تنش برشی اعمالی می‌باشد. مقدار مدول غیرقابل بازگشت توانایی پیش بینی مقاومت شیارشدگی مخلوط آسفالتی را دارد. حساسیت نسبت به تنش خزشی

آزمایش شیار جای چرخ انجام شد. برای هر نوع مخلوط سه نمونه مارشال در دستگاه قرار می‌گیرد و توسط دو چرخ که حول مرکزشان دوران می‌کنند با فشار حدود ۱۰ کیلوگرم برسانیمتر مربع مورد بارگذاری قرار می‌گیرند. فرکانس بارگذاری برای هر نمونه ۱ هرتز و دمای آزمایش ۵۰ درجه سانتیگراد است. در مجموع نمونه‌ها تحت ۸۰۰ سیکل بارگذاری قرار گرفتند و پس از آن بیشینه عمق شیار بوجود آمده در هر نمونه اندازه‌گیری و میانگین سه نمونه به عنوان عمق شیار هر مخلوط به دست آمد.

شبه سینوسی اعمال شد، انجام گرفت. در این آزمایش یک تنش ثابت در دمای ثابت با مدت بارگذاری ۰/۱ ثانیه و زمان استراحت ۰/۹ ثانیه، توسط یک صفحه صلب به صورت عمودی به نمونه وارد می‌شود. نتایج آزمایش بر حسب عدد روانی برداشت شد که معیاری برای نشان دادن مقاومت مخلوط در برابر تغییر شکل‌های دائمی می‌باشد یعنی هر قدر عدد روانی بزرگ‌تر باشد، مقاومت نمونه در برابر تغییر شکل‌های دائم بیشتر است.

۳-۵- شیار جای چرخ

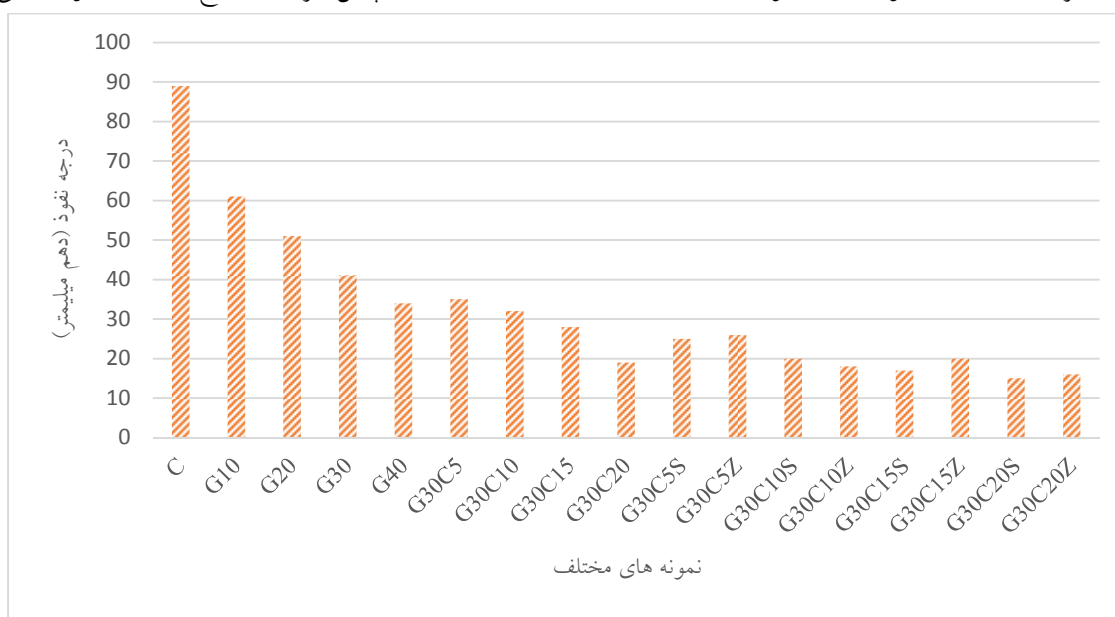
جهت تعیین مقاومت مخلوط‌های اسفالتی در برابر شیارشدگی

۴- نتایج

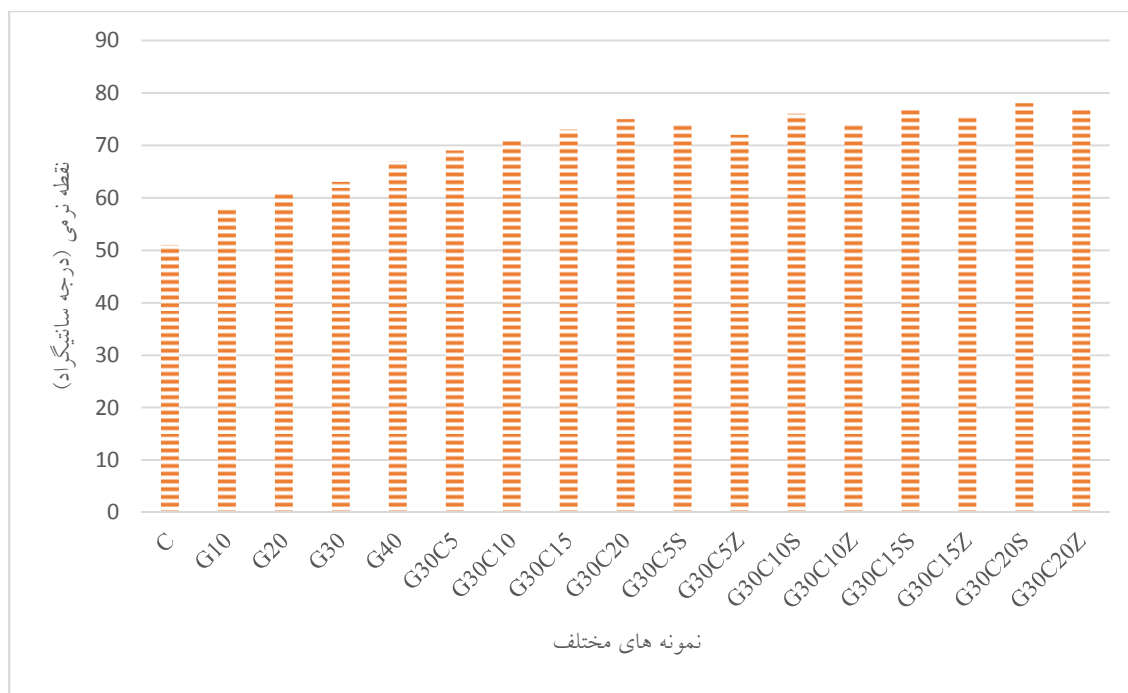
۴-۱- نتایج آزمایشات قیر

با افزایش درصد گیلسونیت و گیلسونیت/CR، عیار نفوذ نمونه‌ها کاهش و نقاط نرم شدن نمونه‌ها افزایش می‌یابد. علاوه بر این، CR 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 ساسویت در مقایسه با قیرهای اصلاح شده توسط زایکوترم، نفوذ کمتر و نقاط نرم شدن بیشتری داشتند. 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 اصلاح‌شده 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.



شکل ۳. نتایج آزمایش درجه نفوذ



شکل ۴. 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.

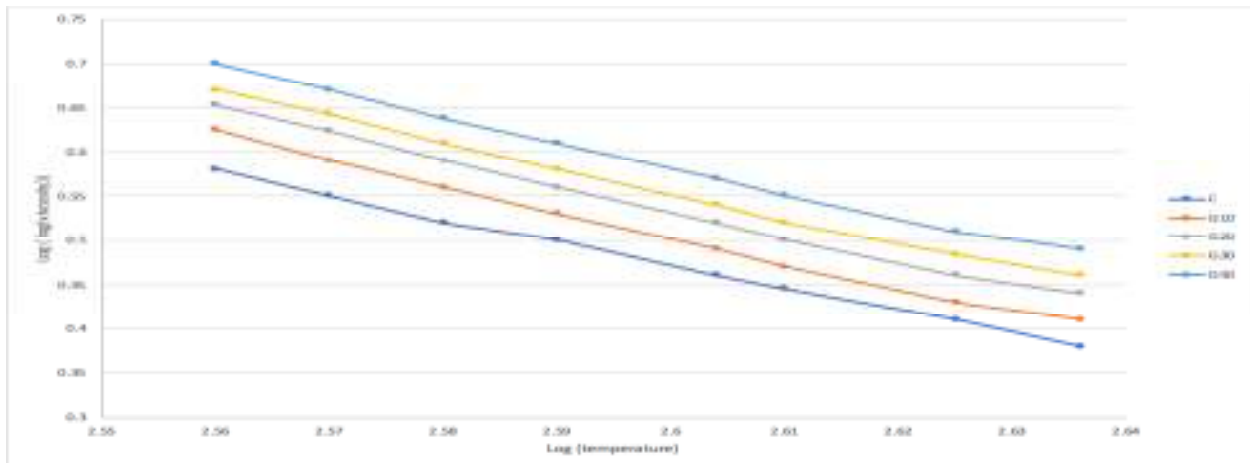
همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، استفاده از گیلسونیت منجر به افزایش ویسکوزیته قیر پایه می‌شود. با توجه به نتایج آزمایش‌های ویسکوزیته، افزودن افزودنی گیلسونیت/CR باعث افزایش ویسکوزیته قیر می‌شود و با افزودن درصد CR در قیرهای اصلاح‌شده توسط



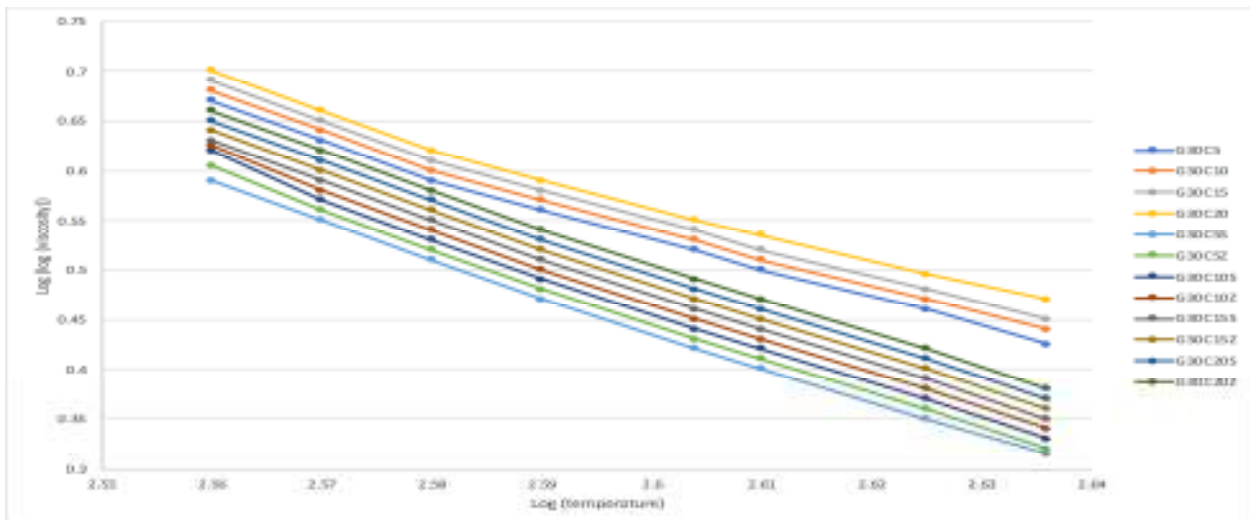
شکل ۵. نتایج آزمایش ویسکوزیته قیر

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 شکل های 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 اصلاح‌شده 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 ۶. منحنی VTS با قیرهای مختلف: قیرهای اصلاح شده (الف) قیرهای اصلاح شده توسط Gilsonite

(ب) توسط Gilsonite/CR و افزودنی نیمه گرم

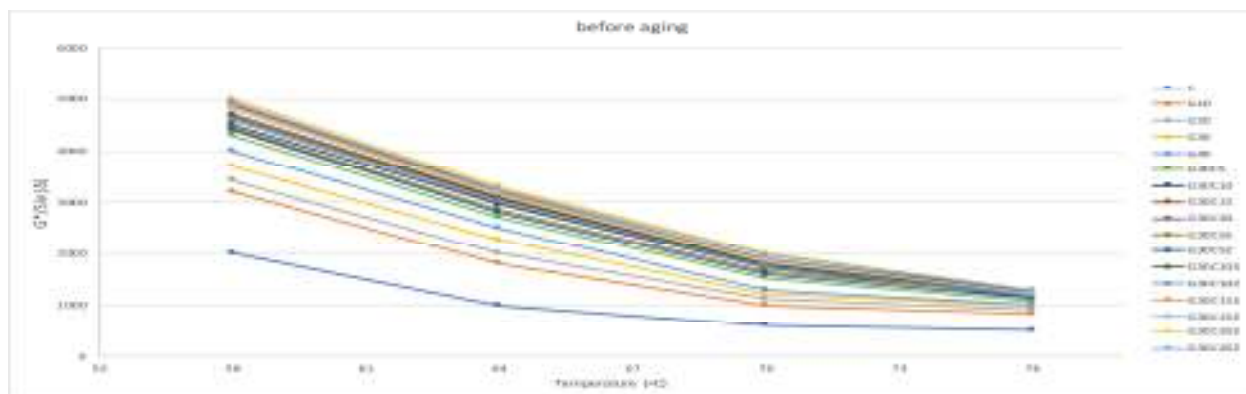
جدول ۱۱. نتایج VTS نمونه‌های مختلف

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

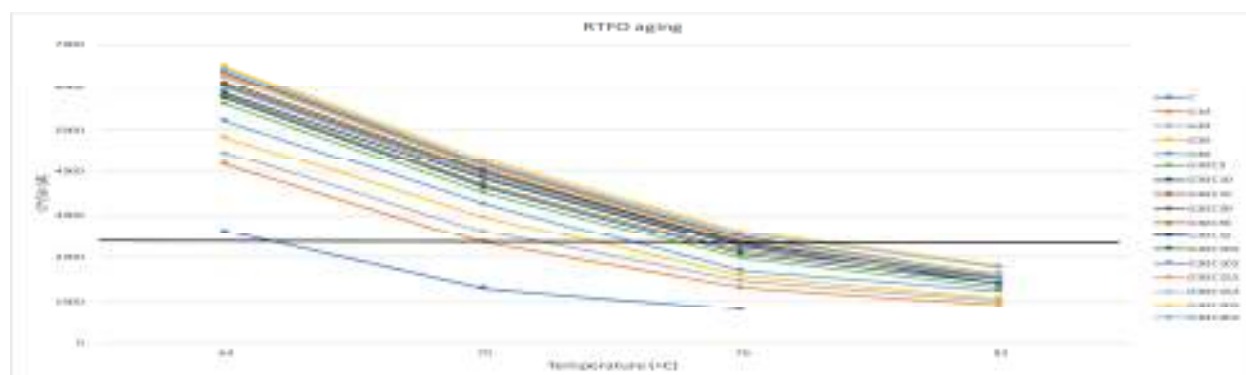
گیلسونیت/CR، رفتار شیارگی افزایش می‌یابد. افزودن ۲۰ درصد CR به ۳۰ درصد قیر اصلاح شده گیلسونیت باعث افزایش ویژگی‌های دمای بالا در حدود ۳۴ درصد می‌شود، شاید به این دلیل که افزودنی‌های گیلسونیت/CR باعث سفت شدن قیرها می‌شود. اصلاح کننده‌های WMA همچنین باعث افزایش انعطاف پذیری قیر و توانایی بازبایی کرنش انباشته شده از طریق بارهای ترافیکی می‌شوند. بین اصلاح کننده‌های WMA، قیرهای اصلاح شده توسط Sasobit عملکرد مناسب تری در بهبود رفتار شیار قیر داشتند. می‌تواند مربوط به سفت شدن قیرها با استفاده از افزودنی‌های Sasobit باشد. علاوه بر این، بر اساس شکل ۷ (ب)، پس از فرآیند پیری کوتاه مدت، فاکتور $G^*/\sin\delta$ در قیرهای اصلاح شده با گیلسونیت نسبت به قیرهای قدیمی بهبود می‌یابد، شاید به دلیل تبخیر عناصر سبک و تغییرات آروماتیک و رزین به آسفالتین در قیر.

قیرهای با مقدار $G^*/\sin\delta$ بیشتر، ظرفیت بیشتری در برابر پوسیدگی داشتند. برای داشتن قیرهایی که می‌توانند در برابر شیار مقاوم باشند، قیرهای پایه و با پیرشدگی کوتاه مدت باید دارای حداقل مقادیر ۱ کیلو پاسکال و ۲،۲ کیلو پاسکال باشند. شکل ۷ فاکتور شیار قیر را قبل و بعد از فرآیند پیری کوتاه مدت نشان می‌دهد. بر اساس نتیجه، استفاده از گیلسونیت منجر به بهبود آخرین تغییر شکل‌ها در قیرها می‌شود که شاید به دلیل سفت شدن قیر با اعمال این افزودنی باشد. نتایج نشان داد که رفتار دمای بالای قیرها با استفاده از ۴۰ درصد گیلسونیت نزدیک به ۲۸ درصد افزایش یافته است.

همچنین کاربرد گیلسونیت منجر به افزایش دمای شکست در قیر نزدیک به ۱۲ درجه می‌شود. علاوه بر این، استفاده از CR باعث بهبود خرابی دمای بالا قیرهای اصلاح شده توسط Gilsonite می‌شود. علاوه بر این، افزودن گیلسونیت/CR منجر به افزایش فاکتور شیارشدگی می‌شود و با افزایش درصد



(الف)



(ب)

شکل ۷. فاکتور شیارشدگی برای قیر شاهد و قیرهای اصلاح شده: الف) قبل از پیرشدگی (ب) بعد از پیرشدگی

۲-۴- پایداری ذخیره سازی

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 اصلاح شده 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 و

جدول ۱۲. نتایج پایداری ذخیره‌سازی نمونه‌ها

نمونه قیر	نقطه نرمی		$\Delta S (^{\circ}C)$
	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 آزمایش MSCR

و ۳۰٪ گیلسونایت کمترین Jnr را در بین قیرهای اصلاح شده دارد. به طور کلی، با توجه به نتایج، صرف نظر از سطوح تنش، استفاده از افزودنی‌های گرم به قیر Gilsonite/CR باعث کاهش مقدار Jnr قیر بکر شد که نشان می‌دهد قیرهای گرم اصلاح‌شده دارای استحکام شیارشدگی بیشتری هستند. با توجه به نتایج جدول ۱۳، قیرهای اصلاح شده توسط Sasobit دارای مقادیر Jnr کمتری نسبت به قیرهای اصلاح شده توسط زایکوترمهستند. دلیل آن این است که با افزودن Sasobit، پایداری و سفتی قیرها با تشکیل یک ساختار شبکه/شبه کریستالی بهبود یافت، اما مقادیر Jnr بیشتر از قیرهای اصلاح شده Sasobit بود. نتایج آزمایش MSCR نشان داد که استفاده از نانوتکنولوژی زایکوترمنجر به کاهش مقادیر Jnr قیرهای اصلاح شده Gilsonite/CR می‌شود. نتایج بهتر از قیر کنترل بود. گیلسونیت باعث افزایش $R/\%$ قیر می‌شود. بر اساس نتایج جدول ۱۳، $R/\%$ قیر اصلی کم است. قیرهایی با مقادیر $R/\%$ کمتر، ظرفیت کمتری برای مقاومت در برابر ترک خوردگی و شیار

عملکرد شیار شدن در قیرها با آزمایش MSCR مورد ارزیابی قرار گرفت. درصد بازیابی $(R/\%)$ و همچنین ضریب Jnr از نتایج این آزمایش هستند که در ۲ سطح تنش ۱۰۰ و ۳۲۰۰ pa در دماهای ۵۲ درجه سانتی گراد تا ۸۲ درجه سانتی گراد محاسبه می‌شوند. نتایج در شکل ۸ نشان داده شده است. بر اساس نتایج، با افزایش دما، پارامتر Jnr و $R/\%$ به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. نتایج Jnr و $R/\%$ قیرها در دمای ۶۴ درجه سانتیگراد به ترتیب در جدول ۱۳ آورده شده است. به طور کلی، با توجه به نتایج، صرف نظر از سطوح تنش، استفاده از گیلسونیت به قیر بکر باعث کاهش مقدار Jnr قیر بکر شد که نشان می‌دهد قیرهای اصلاح شده با گیلسونایت مقاومت شیاردار بیشتری دارند. با افزایش درصد گیلسونیت، عملکرد شیارشدن بهبود می‌یابد. بر اساس نتایج جدول ۱۳، با افزودن CR به قیرهای حاوی مقدار Jnr کاهش می‌یابد. قیر اصلاح شده با گیلسونایت ۴۰ درصد بالاترین مقاومت شیاردار را در بین قیرهای اصلاح شده با گیلسونایت دارد. همچنین مخلوط اصلاح شده با ۲۰ CR $\%$

توسط Sasobit در مقایسه با قیرهای اصلاح شده زایکوترمدارای درصد بازیابی بیشتری هستند.

شدن ناشی از خستگی دارند. با توجه به نتایج، اصلاح قیر با CR منجر به بهبود R٪ قیر می‌شود که منجر به افزایش مقاومت شیارشدگی قیر می‌شود. بر اساس نتایج، قیرهای اصلاح شده

جدول ۱۳. نتایج آزمایش MSCR

Binders	Jnr 100 (kPa-1)	Jnr 3200 (kPa-1)	R 100 (%)	R 3200 (%)	Jnr diff (%)
C	۳.۶	-	۶.۰	۴.۵	-
G10	۲.۲۷	۳.۴۸	۲۷.۵	۲۲.۰	۴۸
G20	۲.۱۳	۳.۴۱	۲۷.۵	۲۰.۶	۴۶
G30	۲.۰۵	۲.۹۹	۲۸.۴	۲۴.۶	۳۸
G40	۱.۹۶	۲.۹	۳۳.۵	۲۷.۰	۳۴
G30C5	۱.۸۸	۲.۱	۳۶.۵	۲۸.۵	۱۸.۸۳
G30C10	۱.۸۱	۱.۹	۴۴.۲	۳۶.۲	۷.۳۶
G30C15	۱.۶	۱.۸	۴۵.۷	۳۷.۴	۱۵.۶۹
G30C20	۱.۳	۱.۵	۵۳.۴	۴۲.۵	۱۴.۳۶
G30C5S	۱.۵۷	۱.۷	۳۸.۲۲	۳۲.۶۵	۱۱.۳۶
G30C5Z	۱.۶۱	۱.۷۶	۳۶.۳	۲۸.۶۴	۱۱.۶۲
G30C10S	۱.۴۸	۱.۴۳	۵۱.۳۹	۴۱.۴	۱۱.۲۳
G30C10Z	۱.۵۱	۱.۵۲	۴۷	۳۹.۲	۱۰.۹
G30C15S	۱.۱	۱.۳۹	۵۶.۴۹	۴۴.۶	۲۷.۳۲
G30C15Z	۰.۹	۱.۱	۵۲.۳۴	۴۱.۷۹	۱۹.۴
G30C20S	۰.۸	۰.۸	۵۷.۸۳	۴۸.۴۲	۳۲.۷۶
G30C20Z	۰.۷	۰.۵۸	۵۵.۲	۴۳.۷۸	۱۲.۸۳

جدول ۱۳، تمام قیرها دارای مقادیر **Jnr-diff** کمتر از حد مجاز بودند. با توجه به نتایج آزمایش، قیرهای اصلاح شده با زایکوترم بیشترین مقدار **Jnr** و کمترین **R٪** را در هر سطح از تنش‌ها داشتند که شاید به خاصیت ارتجاعی پایین قیرهای اصلاح شده زایکوترم نسبت داده شود.

درصد تفاوت در انطباق خزش غیرقابل بازیافت (**Jnr-diff**) برای بررسی مقادیر حساسیت قیر در مقابل تغییرات در سطح تنش قیر ارایه شد در حالی که تنش‌ها از ۱۰۰ تا ۳۲۰۰ پاسکال افزایش یافتند. اگر این ضریب از حد عبور کند، کلاسورها نشان می‌دهند که در برابر تنش‌ها حساسیت دارند. با توجه به نتایج

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

پایین، معیارهای مشابه با سیستم پاسکال اعمال شد. بر اساس نتایج جدول ۱۴، افزودن ۴۰ درصد گیلسونیت منجر به افزایش برآمدگی دو درجه‌ای در دمای بالای قیر پایه شد و دماهای بالا را از ۵۸ به ۷۰ پاسکال تغییر داد. افزایش برآمدگی سه درجه در دمای بالای قیر اصلی و تغییر دمای بالا از (۵۸-) به (۷۶-) پاسکال. قیرهای اصلاح شده توسط Gilsonite و Gilsonite

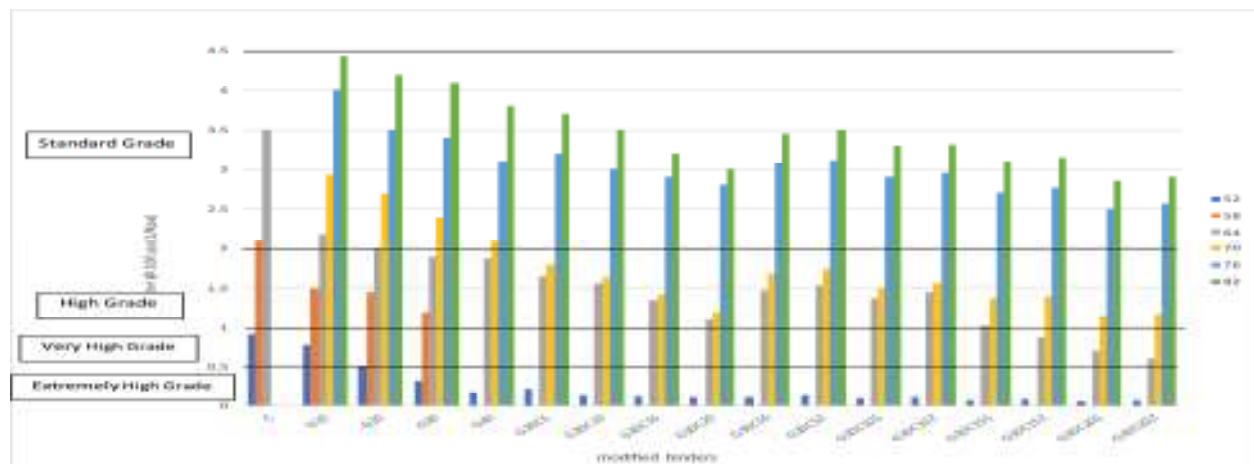
در این تحقیق از روش های PG و همچنین MSCR برای دانه بندی قیرهای مختلف استفاده شده است. فاکتور $G^*/\sin\delta$ به ۱ کیلو پاسکال به درجه قیر پیر نشده محدود شده است، اما برای کلاسورهای با پیرشدگی کوتاه مدت، تکنیک MSCR در ترافیک‌های استاندارد ($Jnr-3.2kPa = 4.5kPa-1$) محدود شده است. برای ارزیابی و درجه بندی قیرها در دماهای

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.

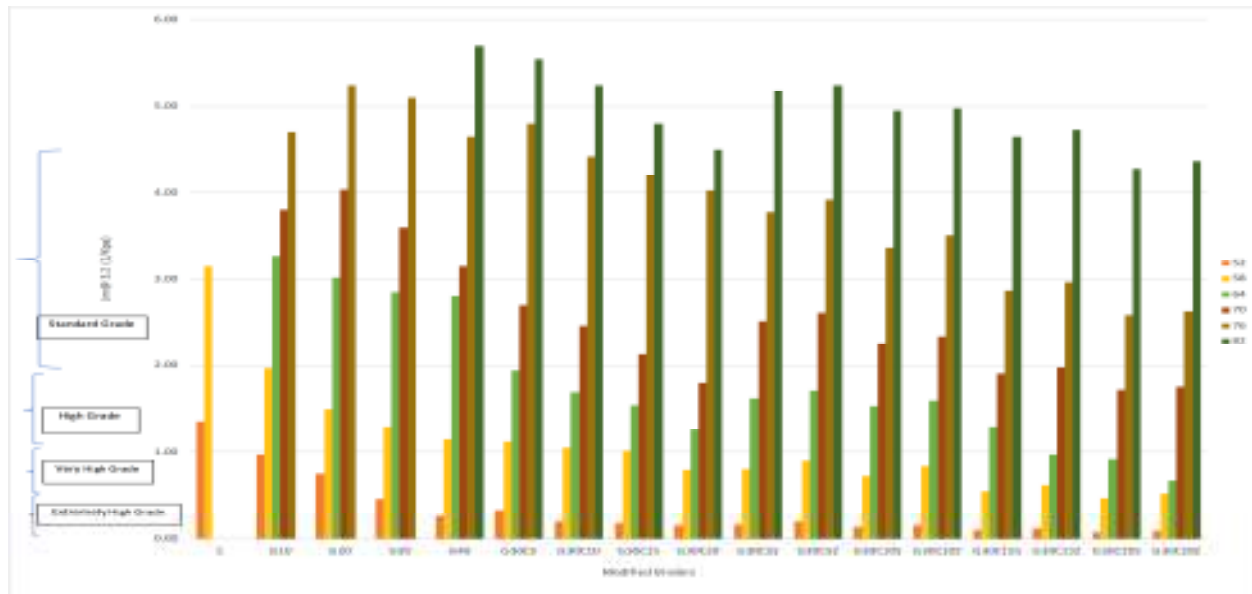
CR/ قادر به برآوردن حداقل نیاز استاندارد در دمای ۱۲- درجه سانتیگراد نیستند. در بین قیرهای اصلاح شده با گیلسونایت، فقط قیرهای اصلاح شده به میزان ۱۰ و ۲۰ درصد دارای حداقل نیاز استاندارد در درجه ۶- هستند. استفاده از گیلسونایت نیز باعث کاهش درجه حرارت پایین ۱ شده و آن را از ۲۲- به ۱۶- تغییر می‌دهد. به علاوه، در بین قیرهای اصلاح شده توسط

جدول ۱۴. طبقه بندی قیرها 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)

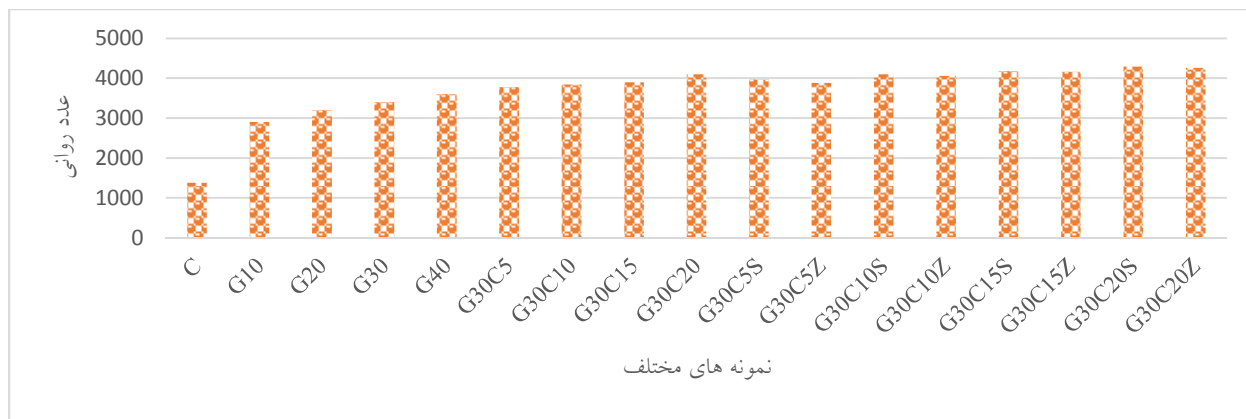
شکل ۸ نتایج Jnr برای قیرهای مختلف در محدوده دمایی ۵۲ تا ۸۲ درجه سانتی گراد در سطوح مختلف الف) ۱۰۰ پاسکال ب) ۳۲۰۰ پاسکال

۴-۵- نتیجه آزمایش‌های مخلوط

۴-۵-۱- نتایج آزمایش عدد روانی

نمونه پایه بودند. اما استفاده از ۴۰٪ گیلسونیت منجر به افزایش ۲۲۰٪ در مخلوط‌های اصلاح‌شده با عدد روانی شد. علاوه بر این، نمونه‌های با ۳۰٪ گیلسونیت و همچنین ۵٪ CR، ۴ برابر عدد روانی بالاتر در مقایسه با نمونه اصلاح‌نشده داشتند. با این حال، استفاده از ۳۰٪ گیلسونیت و همچنین ۲۰٪ CR منجر به افزایش مقدار عدد روانی در حدود ۲۹۰٪ می‌شود. همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است، افزودن افزودنی گرم باعث بهبود عملکرد شیار در نمونه‌ها می‌شود که می‌تواند به دلیل افزایش انعطاف پذیری نمونه با استفاده از افزودنی گرم باشد. در نتیجه عملکرد شیاردار بهبود یافت. بین نمونه‌های WMA، نمونه‌های اصلاح‌شده با Sasobit بیشترین مقاومت در برابر شیار را دارند.

شکل ۹ عدد روانی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. مقادیر بیشتر عدد روانی نشان می‌دهد که مخلوط‌ها در برابر تغییر شکل‌های آخر مقاوم‌تر هستند. همچنین افزودن گیلسونیت باعث افزایش مقاومت شیارشدگی در نمونه‌ها می‌شود که ممکن است به دلیل سفت شدن نمونه با استفاده از گیلسونیت باشد و در نتیجه مقاومت مخلوط در برابر تغییر شکل‌های آخر افزایش یابد. علاوه بر این، استفاده از CR منجر به افزایش عدد روانی در مخلوط‌ها می‌شود. بر اساس نتایج، افزایش درصد CR در نهایت مقاومت در برابر تغییر شکل را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، استفاده از CR باعث افزایش سفتی و ویسکوزیته در مخلوط‌ها می‌شود و در نتیجه مقاومت شیاردار بهبود می‌یابد. بر اساس نتایج، ۱۰ درصد نمونه‌های اصلاح‌شده گیلسونیت ۲،۷ برابر بیشتر از

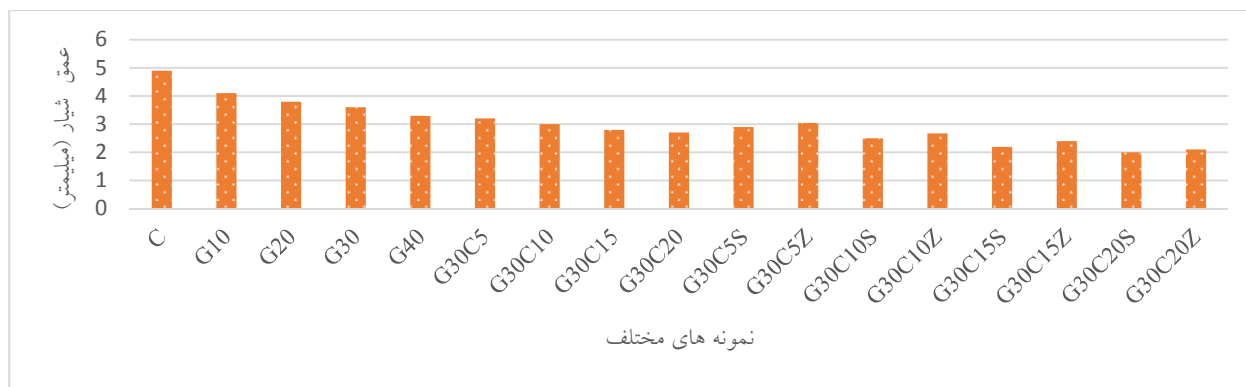


شکل ۹. نتایج عدد روانی نمونه‌ها

۲-۴-۵-ردیابی چرخ

در ۵٪ CR در ۳۰٪ مخلوط اصلاح شده با گیلسونیت باعث کاهش مقادیر تغییر شکل دائمی تا ۳۸٪ شد. استفاده از ۲۰٪ CR در مخلوط اصلاح شده با گیلسونیت ۳۰٪ باعث کاهش تغییر شکل دائمی در مخلوط پایه تا ۵۸٪ می‌شود. علاوه بر این، مواد گرم منجر به کاهش تغییر شکل دائمی در نمونه‌ها می‌شود. مواد گرم انعطاف‌پذیری مخلوط را بهبود بخشیدند. در بین نهال‌های WMA، نمونه‌های اصلاح شده با Sasobit بیشترین مقاومت در برابر شیار را دارند.

عمق شیارهای نمونه‌های مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نشان داده شده است که گیلسونیت منجر به کاهش عمق شیارگی در نمونه‌ها شده است. گیلسونیت سفتی مخلوط را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، استفاده از CR باعث بهبود عملکرد شیار نمونه‌ها می‌شود و با افزایش محتوای CR، خواص تغییر شکل دائمی افزایش می‌یابد. استفاده از گیلسونیت ۱۰ درصد در قیر اصلی باعث کاهش حدود ۲۲ درصدی تغییر شکل‌های آخر در مخلوط‌ها شد. اما استفاده از گیلسونیت ۴۰ درصد باعث افزایش RD مخلوط تا ۳۴ درصد می‌شود. علاوه بر این، افزودن



شکل ۱۰. نتایج شیار جای چرخ نمونه‌ها

۶-۴-تحلیل آماری

برای تجزیه و تحلیل داده‌ها، ANOVA در مطالعه حاضر پیاده سازی شده است. عدد روانی و عمق شیار به عنوان متغیرهای وابسته در نظر گرفته شدند. چهار پارامتر ثابت مورد بررسی شامل گیلسونیت، پودر لاستیک و همچنین افزودنی‌های مخلوط گرم بودند. متغیرهای وابسته به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر ترکیبات مختلف افزودنی قرار گرفتند. نتیجه ANOVA با جداول ۱۵ و ۱۶ نشان داده شد و نشان می‌دهد که افزودنی‌های گرم، گیلسونیت و کروم تأثیر قابل توجهی بر عدد روانی و عمق شیار در نمونه‌ها دارند.

برای تجزیه و تحلیل داده‌ها، ANOVA در مطالعه حاضر پیاده سازی شده است. عدد روانی و عمق شیار به عنوان متغیرهای وابسته در نظر گرفته شدند. چهار پارامتر ثابت مورد بررسی شامل گیلسونیت، پودر لاستیک و همچنین افزودنی‌های مخلوط گرم بودند. متغیرهای وابسته به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر

جدول ۱۵. نتایج آنالیز واریانس: عدد روانی نسبت به پودر لاستیک، گیلسونایت و افزودنی نیمه گرم

Variable	DF	Adjusted SS	Adjusted MS	F value	Sig
Gilsonite	۴	۶۳۱۷۹۹۰۲	۲۱۰۵۹۹۶۷	۵۴۸۴.۶۸	۰.۰۰۰
CR	۴	۳۵۶۲۸۵۲	۱۷۸۱۴۲۶	۴۶۳.۹۴	۰.۰۰۰
Sasobit	۱	۲۰۳۱۹۴	۳۳۸۶۶	۴۲۳۷.۲۱	۰.۰۰۰
Zycotherm	۱	۹۲۱۵۵	۳۸۴۰	۳۳۱۶.۱	۰.۰۰۰
Total	۱۰	۶۷۰۳۸۱۰۲			

جدول ۱۶. نتایج آنالیز واریانس: شیار جای چرخ نسبت به پودر لاستیک، گیلسونایت و افزودنی نیمه گرم

Variable	DF	Adjusted SS	Adjusted MS	F value	Sig
Gilsonite	۴	۳۸.۷۳۹۵	۱۲.۹۱۳۲	۴۰۹.۷۳	۰.۰۰۰
CR	۴	۱.۲۲۹۳	۰.۶۱۴۶	۱۹.۵	۰.۰۰۰
Sasobit	۱	۰.۱۹۱۷	۰.۰۳۱۹	۱.۰۱	۰.۰۰۰
Zycotherm	۱	۰.۷۵۶۴	۰.۰۳۱۵	۱.۰۱	۰.۰۰۰
Total	۱۰	۴۰.۹۱۶۹			

۵- نتیجه گیری

می‌شود و در نتیجه رفتار مخلوط به شیار افزایش می‌یابد. استفاده از مواد گرم باعث بهبود ویژگی‌های شیار در نمونه‌ها می‌شود که ممکن است به دلیل افزایش انعطاف‌پذیری نمونه با استفاده از WMA، بر این اساس، عملکرد شیارکاری مخلوط افزایش می‌یابد. در بین نمونه‌های WMA، نمونه‌های اصلاح‌شده با Sasobit بیشترین عملکرد را در مقایسه با شیاردار دارند.

با توجه به نتایج در شیار جای چرخ، استفاده از Gilsonite باعث بهبود عملکرد شیار در نمونه‌ها شد. با افزایش درصد گیلسونیت، مقاومت شیارها افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج، استفاده از افزودنی CR ۲۰ درصد در قیر اصلاح شده با گیلسونایت ۳۰ درصد باعث کاهش تغییر شکل دائمی در نمونه‌ها شد. مواد گرم انعطاف‌پذیری مخلوط را بهبود بخشیدند. بین نمونه‌های WMA، نمونه‌هایی که با Sasobit اصلاح شده‌اند، بیشترین عملکرد را در مقایسه با شیاردار دارند. کاربرد گیلسونیت ویژگی‌های دمای بالا را در قیرها بهبود می‌بخشد. همچنین افزودن CR منجر به بهبود رفتار شیار شدن در قیر می‌شود.

کار موجود بر روی ارزیابی اثرات CR، Gilsonite و همچنین افزودنی‌های نیمه گرم بر رفتار عملکرد در نمونه‌های قیر و SMA متمرکز بود. آزمایشات مختلفی مانند: Wheel tracking و Dynamic creep انجام شد. همچنین برای بررسی رفتار رئولوژیکی در قیرها، تست‌های MSCR و DSR انجام شد. با توجه به نتایج، می‌توان به دست آورد:

- بر اساس نتایج MSCR، استفاده از گیلسونایت و همچنین CR باعث کاهش سویه‌های قیر و افزایش رفتار شیاردار قیر شد. علاوه بر این، افزودن CR بیشتر و درصد گیلسونیت باعث افزایش مقاومت شیارها شد. ارزش Jnr قیر بکر با استفاده از مواد WMA کاهش یافت. قیرهای اصلاح شده ساسوبیت ارزش Jnr کمتری نسبت به قیرهای اصلاح شده زایکوترم داشتند.

- بر اساس نتایج عدد روانی، افزودن گیلسونایت باعث بهبود رفتار شیار در نمونه‌ها شد. استفاده از CR باعث بهبود در عدد روانی نمونه شد. بر اساس نتایج، افزایش محتویات گیلسونیت باعث بهبود مقاومت شیارها شد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از گیلسونیت باعث بهبود سفتی و همچنین ویسکوزیته در نمونه‌ها

۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Styrene-Butadiene-Styrene
- 2- Styrene-Butadiene-Rubber
- 3- Nano Silica
- 4- Rock Asphalt

- 5- Crumb Rubber
- 6- Stone Matrix Asphalt
- 7- Multiple Stress Creep Recovery
- 8- Dynamic Shear Rheometer
- 9- Performance Grade
- 10- National Cooperative Highway Research Program
- 11- Warm Mix Asphalt
- 12- Universal Testing Machine
- 13- Viscosity-Temperature Susceptibility
- 14- Percent Recovery

۷- مراجع

composite considering high and low temperature performance”, *Constr. Build. Mater.*, 133, pp.358–366.

-Shi, X.G., L.C. Cai, X.J. Liu, W. Xu, X.H. Wang, Y.J. Yang, (2016), “A Laboratory Study on composed modified asphalt applied to airport pavement”, *J Air Force Eng. Univ.*, (Nat. Sci. Ed.) 8, pp.9–12.

-Shi, X.G., L.C. Cai, W. Xu, J. Fan, X.H., (2018), “Wang, Effects of nano-silica and rock asphalt on rheological properties of modified bitumen”, *Constr. Build. Mater.* 161, pp.705–714.

-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.

-Yidirim Y. Polymer modified asphalt binders. *Constr Build Mater* 2007, 21(1), pp.66–72.

-Yang, K., D. Liu, (2015), “Research on Performance of Trinidad Lake Asphalt Added with SBS-modified Asphalt Mixture”, *J. Highway Trans. Res. Dev.* 33 (7), pp. 28– 32.

-Yusoff, N.I.M., A.A.S. Breem, H.N.M. Alattug, A. Hamim, J. Ahmad, (2014), “The effects of moisture susceptibility and ageing conditions on nano-silica/polymer modified asphalt mixtures”, *Constr. Build. Mater.* 72, pp.139–147.

-Zhang, 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.

-Zhang F, Yu JY., (2010), “The research for high-performance SBR compound modified asphalt”, *Constr Build Mater*, 24(3), pp.410–8.

-AASHTO T., (2012), “Standard test method for multiple stress creep recovery (MSCR) test of asphalt binder using a dynamic shear remoter”, Washington, DC: American Association of State Transport and Officials.

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

-Huang, W. D., M. Zheng, M. Huang, (2015), “Fatigue performance comparison of various kind of asphalt mixture”, *J. Build. Mater.* 18 (6), pp.1089–1094.

-Ibrahim MR, Katman HY, Karim MR, Koting S, Mashaan NS., (2013), “A review on the effect of crumb rubber addition to the rheology of crumb rubber modified bitumen”, *Adv Mater Sci Eng*.

-Kök, B.V., M. Yilmaz, M. Guler, (2011), “Evaluation of high temperature performance of SBS + Gilsonite modified binder”, *Fuel* 90, pp.3093–3099.

-Lo Presti D, Airey G., (2013), “Tyre rubber-modified bitumens development: the effect of varying processing conditions”, *Road Mater Pavement Des.*, 14(4), pp.888–900.

-Polacco, G., P. Kriz, S. Filippi, L. Zanzotto, (2008), “Rheological Properties of Asphalt/SBS/ Clay Blends”, *Eur. Polymer J.* 44 (11), pp.3512–3521.

-Sureshkumar, M.S., S. Filippi, G. Polacco, I. Kazatchkov, J. Stastna, L. Zanzotto, (2010), “Internal structure and linear viscoelastic properties of eva/asphalt nano composites”, *Eur. Polymer J.* 46 (4), pp.621–633.

-Sun, P., S. Han, H.L. Zhang, Z.Y. Wang, O.M. Xu, (2016), “High-temperature performance of nano-CaCO₃/SBS modified asphalt mixture”, *Mater. Rev.* 30 (4), pp.122– 126.

-Sun, L., X.T. Xin, J.L. Ren, (2017), “Asphalt modification using nano-materials and polymers

Evaluation of Rutting Resistance of Binder and Mixture Containing Gilsonite, Crumb Rubber and Warm Mix 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,
University of Science and Technology of Mazandaran, Tehran, Iran.
(Chief Executive Officer of Ara Tarh Royan Company, Tehran, Iran)*

E-mail: M_Knovin@yahoo.com

Received: May 2022- Accepted: August 2022

ABSTRACT

Rutting is one of the most important pavement failures that occur due to the accumulation of irreversible strains in the path of the wheels. Various factors are effective in causing this type of failure, one of which is the insufficient strength of the asphalt mixture. One of the ways to improve the strength of asphalt mix is to use different additives. Therefore, in this study, the effect of semi-hot asphalt additives, rubber powder and gilsonite on bituminous resistance of bitumen and asphalt mixture was evaluated. 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. The results of rheological behavior test showed that the addition of synthetic additives leads to an increase in the high temperature behavior of bitumen. The fuzzy separation of the bitumens gets worse. The grooving strength of bitumens increases with the addition of gilsonite and semi-hot additives. In addition, rubber powder can increase the fatigue behavior of Gilsonite-modified bitumens. In addition, CR can increase the corrosion resistance of Gilsonite-modified bitumen containing Gilsonite. The results of sample testing showed that the use of gilsonite, semi-hot additives and rubber powder increases the grooving strength of asphalt mixtures.

Keywords: Bitumen, Crumb Rubber, Asphalt Mix, Bitumen Rheology, Rutting