

ارزیابی آزمایشگاهی تاثیر افزودنی نیمه گرم بر عملکرد قیر و مخلوط آسفالتی حاوی ضایعات پلی پروپیلن و نانورس

علمی - پژوهشی

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

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Rezvan_babagoli@yahoo.com

دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۰۲ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۸

صفحه ۴۴۲-۴۱۹

چکیده

بهبود مصالح آسفالتی جهت توسعه عملکرد کلی قیرها و مخلوط‌های آسفالتی، کانون تحقیقات متعددی بوده است که در چند دهه گذشته انجام شده است. استفاده از ضایعات پلاستیکی در اصلاح آسفالت یکی از اقدامات انجام شده در این راستا می‌باشد. استفاده از مواد زائد در ساخت روسازی نه تنها خواص آسفالت را بهبود می‌بخشد، بلکه باعث صرفه جویی قابل توجهی در هزینه مصالح روسازی می‌شود و به رفع مشکلات دفع این گونه مواد زائد کمک می‌کند که تا آنجا که می‌تواند باعث آلودگی آب، خاک و هوا شوند. خطرناک هستند. لذا در این تحقیق، اثر افزودنی‌های آسفالت نیمه گرم، نانورس و ضایعات پلی پروپیلن بر خصوصیات عملکردی قیر و مخلوط‌های آسفالتی مورد ارزیابی قرار گرفت. در تحقیق حاضر، نانورس (۳٪ وزن قیر)، ضایعات پلی پروپیلن (۱٪، ۲٪ و ۳٪ وزن قیر) و ۲ افزودنی نیمه گرم (۲٪ Sasobit و همچنین ۰.۳٪ Zycotherm) برای اصلاح قیر خالص (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 ذخیره‌سازی قیر نیز نشان داد که با استفاده از نانورس، پایداری ذخیره‌سازی قیرهای حاوی پلی پروپیلن بهبود می‌یابد. مقاومت شیارشدگی قیرها با افزودن نانورس و پلی پروپیلن افزایش می‌یابد. علاوه بر این، نانورس و افزودنی نیمه گرم می‌تواند رفتار خستگی قیرهای اصلاح شده با پلی پروپیلن را افزایش دهد. نتایج آزمایش نمونه نشان داد که استفاده از پلی پروپیلن، افزودنی‌های نیمه گرم و نانورس خصوصیات عملکردی قیر و مخلوط‌های آسفالتی را بهبود می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: قیر، نانورس، مخلوط آسفالتی، رئولوژی قیر، ضایعات پلی پروپیلن

۱- مقدمه

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, 2017; Yildirim, 2007; Zhang et al, ۲۰۱۰). با توجه به سطح دمایی مورد نیاز در طول فرآیند اختلاط مخلوط‌های آسفالتی در کارخانه‌های آسفالت، مخلوط‌های آسفالتی به سه گروه آسفالت مخلوط گرم، آسفالت مخلوط نیمه گرم و مخلوط آسفالت سرد

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 مشابهی را در روسازی‌ها از خود نشان می‌دهند، زیرا این ویژگی‌ها در مخلوط آنها حفظ می‌شود. به دلیل شرایط ترافیکی و محیطی، مخلوط آسفالت گرم در معرض شیار

پلیمری استفاده می‌شود (Bala et al, 2017; Kim et al, 2018; Arabani et al, 2014). امروزه، آگاهی بین‌المللی در مورد لزوم توسعه پایدار مانند استفاده از مواد پلیمری بازیافتی از مواد زائد به عنوان اصلاح کننده قیر وجود دارد. پلی پروپیلن یکی از رایج‌ترین انواع پلیمرهای ضایعاتی است که از مواد زائد روزانه به دست می‌آید و به عنوان اصلاح کننده مخلوط آسفالتی از طریق فرآیند مرطوب در محدوده (۳-۵) درصد استفاده شده است. اصلاح WMA در مطالعات قبلی شامل استفاده از موادی مانند پلیمر (استایرن بوتادین استایرن (SBS)، لاستیک استایرن بوتادین (SBR)، عامل ضد نوار (عوامل مایع)، سیمان پرتلند، آهک هیدراته و غیره بود. که مواد گران قیمت هستند عملکرد WMA بهبود یافته بود، اما نتایج دلگرم کننده نبود زیرا هزینه اصلاح را افزایش می‌داد. (Obaid et al, 2021). امروزه، استفاده از مواد زائد در ساخت و ساز روسازی، توجه بسیاری را برای مصرف مواد زائد بدون به خطر انداختن خصوصیات روسازی به دست آورده است. پلاستیک‌ها به یک کالای گسترده تبدیل شده‌اند که به هر جنبه‌ای از زندگی بشر نفوذ می‌کند. تولید پلاستیک‌ها از ۲ میلیون تن در سال ۱۹۵۰ به ۳۲۲ میلیون تن در سال ۲۰۱۵ رشد می‌کرد. مقدار تجمعی تولید پلاستیک در سال ۲۰۱۷ به ۸,۳ میلیارد تن متریک رسیده است. نداشتن آگاهی از بازیافت یا استفاده مجدد، پلاستیک‌ها به سرعت به یک ضایعات اصلی جامد شهرداری (MSW^2) تبدیل شده‌اند. در سال ۲۰۱۸، تولید پلاستیک تقریباً ۳۵,۷ میلیون تن در ایالات متحده بود که ۱۲,۲٪ از نسل MSW بود. در میان تمام پلاستیک‌های تولید شده، تنها ۸,۷ درصد از آنها قابل بازیافت هستند، در حالی که ۷۵,۶ درصد و ۱۵,۷ درصد از پلاستیک‌ها به ترتیب دفن شده و با بازیافت انرژی احتراق شدند. مخلوط آسفالت گرم به عنوان یک رویکرد امیدوارکننده برای استفاده مجدد از پلاستیک‌های زباله در حجم زیاد در نظر گرفته می‌شود. از این رو، پلاستیک‌های زباله به عنوان اصلاح کننده‌های بالقوه برای قیر یا جایگزینی برای سنگدانه‌ها برای دستیابی به روسازی‌های پایدار مورد بررسی قرار می‌گیرند. انواع مختلفی از پلاستیک با ترکیبات و خواص مهندسی مختلف وجود دارد. نقطه ذوب یکی از ویژگی‌های فیزیکی برای اصلاح آسفالت است. زیرا پلاستیک‌ها باید ابتدا ذوب شوند و بخشی از آسفالت

طبقه‌بندی شدند. فناوری WMA استفاده از انواع مختلف افزودنی‌ها در مخلوط‌های آسفالتی را در حین اختلاط خلاصه می‌کند تا دمای اختلاط را از طریق کاهش ویسکوزیته قیر با عمل کف کردن (پاشش آب)، علاوه بر افزایش کارایی در حین حمل و تراکم در دماهای پایین، کاهش دهد. این کاهش دما باعث کاهش سطح اکسیداسیون قیر می‌شود که می‌تواند منجر به افزایش مقاومت در برابر خستگی و اکسیداسیون شود. در همین حال، نرخ دمای پایین‌تر برای مخلوط‌های WMA به دلیل کاهش چسبندگی بین ذرات قیر و سنگدانه که ممکن است در کاهش رطوبت و مقاومت شیارشدگی منعکس شود، به عنوان نقطه ضعف در نظر گرفته می‌شود. مطالعات مختلف نشان داده است که مخلوط‌های WMA می‌توانند خواصی مشابه و حتی بالاتر از HMA داشته باشند.

از سوی دیگر، چندین مطالعه نشان داد که عملکرد مخلوط‌های WMA کمتر از مخلوط‌های HMA است، عمدتاً در مقاومت در برابر شیارشدگی و حساسیت رطوبتی می‌باشد.

(Robjant et al, 2009; Zhao et al, 2012; Vidal et al, 2013; Şengöz et al, 2013). اصلاح مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از انواع مختلف پلیمر را یکی از روش‌های متداول برای افزایش طول عمر و بهبود عملکرد می‌دانند. افزودن پلیمر به مخلوط آسفالت انسجام بین آسفالت و سنگدانه را افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، محققان تأثیر قابل توجه استفاده از نانومواد با پلیمرها را در افزایش خواص آسفالت به دلیل ویژگی‌های عالی مانند اندازه ذرات کوچک نانومواد نشان دادند که باعث می‌شود آنها به سادگی با قیر ترکیب شوند و هماهنگ‌تر شوند. همچنین ترکیب نانومواد با پلیمر معمولاً مقرون به صرفه‌تر است زیرا هم میزان پلیمرها و هم نانومواد را کاهش می‌دهند و هم سازگاری پلیمرها با آسفالت را افزایش می‌دهند. نانو اکسید روی، نانولوله‌های کربنی، نانو اکسید سیلیسیم، دی اکسید تیتانیوم، نانو خاک رس، نانو کلسیم، نانومواد رایجی هستند که در اصلاح مخلوط‌ها استفاده می‌شوند. در میان این نانو مواد، نانو سیلیس به دلیل واکنش زیاد بین مواد سیلیسی و چسب آسفالت که منجر به توانایی پراکندگی بالاتر نانو سیلیس و پلیمرها در قیر می‌شود، عموماً در مخلوط‌های نانوکامپوزیت

شوند. با توجه به دمای ذوب دقیق پلاستیک‌ها، دمای اختلاط متفاوتی در هنگام اصلاح آسفالت باید در نظر گرفته شود. اکثر مخلوط‌های آسفالتی در دمای زیر ۱۸۰ درجه سانتیگراد تولید می‌شوند. با این حال، برخی از پلاستیک‌ها، مانند PVC^۵ و PET^۶ نمی‌توانند ذوب شده و با آسفالت ترکیب شوند تا سنگدانه‌ها را بپوشانند. پلی پروپیلن دومین پلاستیک مولد است که ۲۱ درصد از کل بازار پلاستیک را در سطح جهانی به خود اختصاص داده است. در مقایسه با اصلاح کننده پلی اتیلن، PP^۷ به دلیل نقطه ذوب بالاتر، برای مخلوط کردن همگن با آسفالت در فرآیند مرطوب چالش برانگیزتر است. دمای معمول اختلاط بین ۱۶۰ تا ۱۹۰ درجه سانتی گراد متغیر است، در حالی که درصد PP برای تولید آسفالت اصلاح شده بین ۳ تا ۵ درصد است. فتاح و همکاران به بررسی احتمال استفاده از ضایعات پلی پروپیلن به عنوان اصلاح کننده برای افزایش خواص قیر و مخلوط آسفالت پرداختند. در این تحقیق از دو نوع قیر (۵۰/۴۰) و (۷۰/۶۰) استفاده شد. سه درصد ۱٪، ۳٪ و ۵٪ ضایعات پلی پروپیلن به قیر (۷۰/۶۰) اضافه شد. نتایج نشان داد که ۳ درصد ضایعات پلی پروپیلن درصد بهینه‌ای است که بهترین نتایج را برای قیر و مخلوط آسفالت در مقایسه با درصد‌های اصلی و سایر درصد نمونه‌های آسفالتی به دست می‌دهد (Fattah et al, 2021).

به دستور مخلوط آسفالت گرم اصلاح شده ۳ نسبت میکروپلاستیک مبتنی بر پلی پروپیلن مانند ۱٪، ۳٪، ۰٫۳٪ و ۰٫۶٪ اضافه شد. بهبود عملکرد مخلوط در نمونه مخلوط آسفالت با ۰٫۳٪ پلی پروپیلن نشان داده شده است. علاوه بر این، میکروپلاستیک‌های مبتنی بر پلی پروپیلن با سنگدانه‌های مخلوط به خوبی پیوند می‌خورند، بنابراین مخلوط آسفالت داغ اصلاح شده با پلی پروپیلن می‌تواند ظاهر ترک‌ها را در طول تغییرات ناگهانی دما کاهش دهد.

بالا و همکاران (Bala et al, 2018) به بررسی اثر ذرات نانو سیلیس بر ویژگی‌های عملکردی قیرهای اصلاح شده پلیمری پرداختند. در این مطالعه، قیر پایه ۱۰۰/۸۰ با پلیمر پلی پروپیلن و ذرات نانو سیلیس در غلظت ۰ تا ۴ درصد اصلاح شد. هر دو ذرات نانو سیلیس و پلیمر پلی پروپیلن نسبت به وزن قیر کل اضافه شدند. آزمایش‌های عملکرد آسفالت تست خستگی چهار نقطه‌ای خمشی، مقاومت کششی غیرمستقیم، مدول سختی کششی غیرمستقیم و آزمایش‌های ریزش قیر برای ارزیابی اثر ذرات نانو سیلیس انجام می‌شود. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که ذرات نانو سیلیس خواص خستگی قیرهای اصلاح شده پلی پروپیلن را بهبود می‌بخشد. این نشان می‌دهد که ذرات نانو سیلیس اثر قابل توجهی بر بهبود ویژگی‌های عملکردی قیرهای اصلاح شده پلیمری دارند. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که پلی پروپیلن پلیمری گرم‌انرم با ذرات نانو سیلیس زمانی که به عنوان اصلاح کننده قیر استفاده می‌شود، عملکرد و دوام مخلوط‌های آسفالتی را بهبود می‌بخشد.

مطالعه‌ای که توسط برونا و همکاران (Buruiana et al, ۲۰۲۳) انجام شد، امکان بازیافت دو نوع پسماند با خطر آلودگی بالا مانند ضایعات پلی پروپیلن مبتنی بر پلاستیک و ضایعات سنگ‌ریزه ساینده در روسازی‌های آسفالتی بررسی شد. اثرات افزودن میکروپلاستیک‌های مبتنی بر پلی پروپیلن و ضایعات سنگ ریزه در مخلوط آسفالتی برای عملکرد لایه سایش در این مطالعه نشان داده شده است. مورفولوژی و ترکیب عنصری نمونه‌های مخلوط آسفالت داغ قبل و بعد از چرخه انجماد-ذوب و عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفت. مخلوط آسفالت اصلاح شده با آزمایش‌های آزمایشگاهی از جمله استقامت مارشال، نرخ جریان، گزارش جامد-مایع، چگالی ظاهری و جذب آب تعیین شد.

۲-مواد و روش‌ها

۲-۱-مواد

۲-۱-۱-مصالح سنگی

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



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

۲-۱-۲-۲- 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

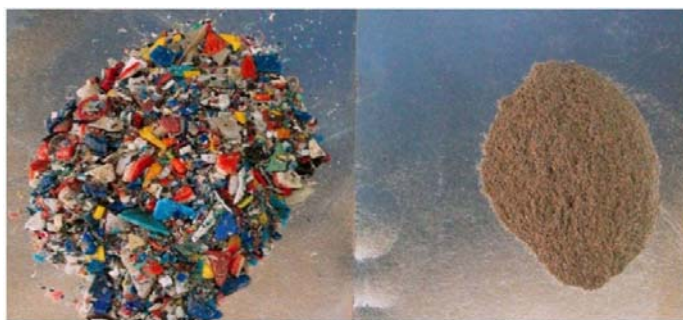
۲-۱-۳ ضایعات پلی پروپیلن

ضایعاتی شسته شد و سپس به پودر تبدیل شد و روی الک شماره ۵۰ الک شد. شکل ۲ ضایعات پلی پروپیلن مورد استفاده و جدول ۴ خواص آن را نشان می‌دهد.

ضایعات پلی پروپیلن مورد استفاده در این مطالعه از یک کارخانه بازیافت پلاستیک زیاله در جویبار مازندران به صورت قطعات کوچک به دست آمد. این پلاستیک

جدول ۴. مشخصات پلی پروپیلن

Property	Results
Melting temperature	160
Specific gravity	0.91
Maximum Particle Size After Grinding And Sieving (mm)	0.3



شکل ۲. ضایعات پلی پروپیلن

۲-۱-۴ نانورس

در این پژوهش از نانورس مونت موریلونیت با نام Cloisite 15A که از شرکت سیگما تهیه شد، استفاده شده است که مشخصات آن در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵. مشخصات نانورس

Organic modifier	2M2HT
Density	0.5 – 0.7 gr/cm ³
X-ray result (d001)	31.5 A
Moisture content	1-2%
Specific surface area	220-270 m ² /gr
Weight loss on ignition	43%

۲-۱-۵-فیبر

برای از بین بردن ریزش قیر در مخلوط، بهتر است بر اساس توصیه ⁹NCHRP No 425 (Brown and Cooley, 1999) از الیاف سلولز ۰,۳٪ استفاده شود. ویژگی‌های الیاف کاربردی در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶. 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 در ۱۰۰ میلی لیتر
۰.۵	وزن مخصوص گرم بر سانتی متر مکعب

۲-۱-۶-افزودنی‌های WMA¹⁰

برای ارزیابی تاثیر مواد WMA بر رفتار رئولوژیکی قیر، از ۲ ماده WMA از زایکوترم و همچنین ساسویت استفاده شد. ویژگی‌های اصلاح کننده‌های گرم در جدول ۷ نشان داده شده است. درصد یک افزودنی خاص با توصیه سازنده انتخاب شده است.

جدول ۷. خصوصیات افزودنی‌های نیمه گرم

خصوصیات	ساسویت	زایکوترم
مواد تشکیل دهنده	هیدروکربن‌های اشباع شده جامد	ترکیبات هیدروکسی آلکیل
حالت فیزیکی	پاستیلی	مایع
رنگ	قهوه ای	زرد
بو	بدون بو	بدون بو
وزن مولکولی	۱۰۰۰ گرم بر مول	-
وزن مخصوص	۰.۹ (۲۵ سانتی گراد)	۱.۰۱ گرم بر مول (درجه سانتی گراد ۲۵)
چگالی بخار	-	-
چگالی حقیقی	-	-
مقادیر PH	خنثی	۱۰ درصد قابل حل در آب خنثی یا کمی اسیدی
نقطه جوش	-	-
نقطه اشتعال	۲۸۵ [ASTM D92, ۲۰۱۲] درجه سانتی گراد	غیر قابل اشتعال
نقطه ذوب	۱۰۰ درجه سانتی گراد	-
ویسکوزیته	-	۱۰۰-۵۰۰ CPS
حلالیت در آب	غیر حلال	فایل حل

۲-۲- آماده سازی نمونه‌ها

اصلاح کننده های WMA پیشنهاد کرده اند. در نتیجه، دمای ۱۵۵ درجه سانتی گراد (۲۰ درجه سانتی گراد کمتر از تهیه قیر اصلی) برای اصلاح WMA قیر پایه 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. جدول ۸ کدگذاری نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهد. 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.

پلیمر پلی پروپیلن ابتدا در وزن ۵۰۰ گرم قیر پایه قبل از افزودن ذرات نانو رس اضافه شد و توسط یک میکسر با سرعت ۵۰۰۰ دور در دقیقه به مدت یک ساعت در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد مخلوط شد. هنگامی که پلی پروپیلن به طور کامل قیر پایه حل شد، ذرات نانو رس به آرامی به قیر اصلاح شده پلی پروپیلن اضافه شده و با استفاده از میکسر برشی بالا با سرعت برش بالا مخلوط شدند. برای اختلاط از سرعت برش ۴۰۰۰ دور در دقیقه استفاده شد. در طول زمان اختلاط، دما در 10 ± 150 درجه سانتی‌گراد حفظ 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

جدول ۸. کد گذاری نمونه‌های مختلف

No	virgin binder	PP	NC	Sasobit	Zycotherm	sample ID
1		0	0	0	0	C
2		1	0	0	0	1PP0N0S0Z
3		2	0	0	0	2PP0N0S0Z
4		3	0	0	0	3PP0N0S0Z
5		1	3	0	0	1PP3N0S0Z
6		2	3	0	0	2PP3N0S0Z
7	85-100	3	3	0	0	3PP3N0S0Z
8		1	3	2	0	1PP3N2S0Z
9		2	3	2	0	2PP3N02S0Z
10		3	3	2	0	3PP3N2S0Z
11		1	3	0	0.3	1PP3N0S0.3Z
12		2	3	0	0.3	2PP3N0S0.3Z
13		3	3	0	0.3	3PP3N0S0.3Z

۳- روش کار آزمایش

۳-۱- آزمایش فیزیکی قیر

می‌تواند نشان‌دهنده سختی قیر باشد، که مطابق با ASTM - ۵d 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 پلیمر پلی پروپیلن و نانورس و افزودنی نیمه گرم 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

۲-۳- رئومتر برش دینامیکی

به منظور مشخص کردن ویژگی‌های اساسی رپولوژیکی قیر، تست ^{۱۱} 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 اعمال شده 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 - D ۷۱۷۵ بیش از ۱ کیلو پاسکال باشد.

۳-۳- آزمایش تنش خزشی دوگانه و باربرداری

جهت ارزیابی حساسیت قیرها در برابر تغییرشکل دائمی یا شیارشدگی، روش MSCR^{۱۱} 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 اثاثیه 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 ۳ آورده شده است:



شکل ۳. 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:

$$\varepsilon_{10} = \varepsilon_r - \varepsilon_0 \quad (۱)$$

$$PR = \frac{\varepsilon_{10} - \varepsilon_0}{\varepsilon_1} \times 100 \quad (۲)$$

$$J_{nr} = ave. \frac{\gamma_u}{\tau} \quad (۳)$$

دائمی نشان می‌دهد. پارامتر γ_u مقدار کرنش غیرقابل بازگشت در انتهای ۹ ثانیه باربرداری می‌باشد. پارامتر T_c تنش برشی اعمالی می‌باشد. مقدار مدول غیرقابل بازگشت توانایی پیش‌بینی مقاومت شیارشدگی مخلوط آسفالتی را دارد. حساسیت نسبت به تنش خزشی نمونه‌های قیری به صورت درصد اختلاف در مدول غیرقابل بازگشت می‌باشد. این پارامتر، مقدار افزایش در مقدار پارامتر J_{nr} را وقتی تنش از ۱۰۰ پاسکال به ۳۲۰۰ پاسکال افزایش می‌یابد، 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.

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_p) 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

۳-۴- LAS¹³

AASHTO TP 101-14 اجرا شد. برای ارزیابی و اندازه گیری عمر خستگی قیرهای مختلف، معادله ۴ اعمال می‌شود:

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

آزمایش در دمای ۲۵ درجه انجام شد.

آزمایش LAS در این مطالعه برای محاسبه رفتار خستگی قیرهای مختلف انجام شد. این آزمایش بر اساس دستورالعمل (۴)

که در آن A و B ضرایب معادله ای هستند که بر اساس تئوری آسیب پیوسته ویسکوالاستیک محاسبه می‌شوند. این

۳-۵- آزمایش کشش غیر مستقیم

از این آزمایش برای 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:

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

آسفالتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. انرژی شکست به عنوان کار انجام شده جهت ایجاد یک ترک که برابر است با سطح زیر منحنی بار-تغییرشکل شکست نمونه تعریف می‌گردد. برای محاسبه چگالی انرژی شکست از آزمایش کشش غیر مستقیم، انرژی شکست بر حجم مخلوط تقسیم می‌گردد. چگالی انرژی شکست بر اساس معادله ۶ محاسبه می‌گردد.

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 پیش‌بینی ظهور ترک‌ها در مخلوط آسفالتی استفاده می‌شود. همچنین می‌توان

(۵)

که ITS: مقاومت کششی نمونه‌ها بر حسب Kpa، P_{max} بار اعمالی در زمان شکست بر حسب D، kN 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

$$F E = \frac{\int_0^{\delta^{max}} P (\delta) d \delta}{V} \quad (6)$$

که FE چگالی انرژی شکست (MPa)، P، بار (N)، V حجم نمونه (mm³)، δ تغییر شکل می‌باشد.

۳-۶-مدول برجهندگی

دمای ۲۵ درجه سانتیگراد 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 برجهندگی براساس معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$M_r = \frac{p(g + 0.2734)}{\delta t}$$

آزمایش مدول برجهندگی 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 برجهندگی از استاندارد AS 2891-13-1-1995 استفاده شد. ابتدا نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در محفظه دستگاه در

(۷)

M_R = مدول برجهندگی (مگا پاسکال)

P = بار تکراری (نیوتن)

v = نسبت پواسن

t = ضخامت نمونه (میلی‌متر)

H = تغییر شکل افقی برگشت پذیر (میلی‌متر)

V = تغییر شکل قائم برگشت پذیر (میلی‌متر)

۳-۷-خزش دینامیکی

توسط دو چرخ که حول مرکزشان دوران می‌کنند با فشار حدود ۱۰ کیلوگرم برسانتی‌متر 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، در هر نمونه اندازه‌گیری و میانگین سه نمونه به عنوان عمق شیار هر مخلوط به دست آمد.

جهت بررسی شیار شدگی 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 $UTM-5P^{14}$ در دمای ثابت ۵۰ درجه سانتی‌گراد و تحت تنش ثابت ۴۵۰ کیلو پاسکال که به صورت 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.

۳-۹-آزمایش تیر خمشی چهار نقطه‌ای خستگی

مقاومت خستگی تیرها براساس آزمایش تیر خمشی چهار نقطه‌ای براساس آیین‌نامه 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،

۳-۸-شیار جای چرخ

جهت تعیین مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر شیارشدگی آزمایش شیار جای چرخ انجام شد. برای هر نوع مخلوط سه نمونه مارشال در دستگاه قرار می‌گیرد و

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 جابه‌جایی اندازه‌گیری شده بعد از ۵۰ سیکل براساس معادلات زیر محاسبه شده است.

$$\varepsilon = \frac{12\delta h \times 10^6}{3(G_0^2 - 4G_1^2)} \quad (8)$$

$$\sigma = \frac{G_0 P}{Bh^2} \quad (9)$$

$$S = \frac{1000\sigma}{\varepsilon} \quad (10)$$

شده (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:

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

تعریف می‌گردد. این معیار بر اساس آیین نامه AASHTO-T321 استفاده شده است. 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

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 مدول سختی تیر

۴- نتایج

۴-۱- نتایج آزمایشات قیر

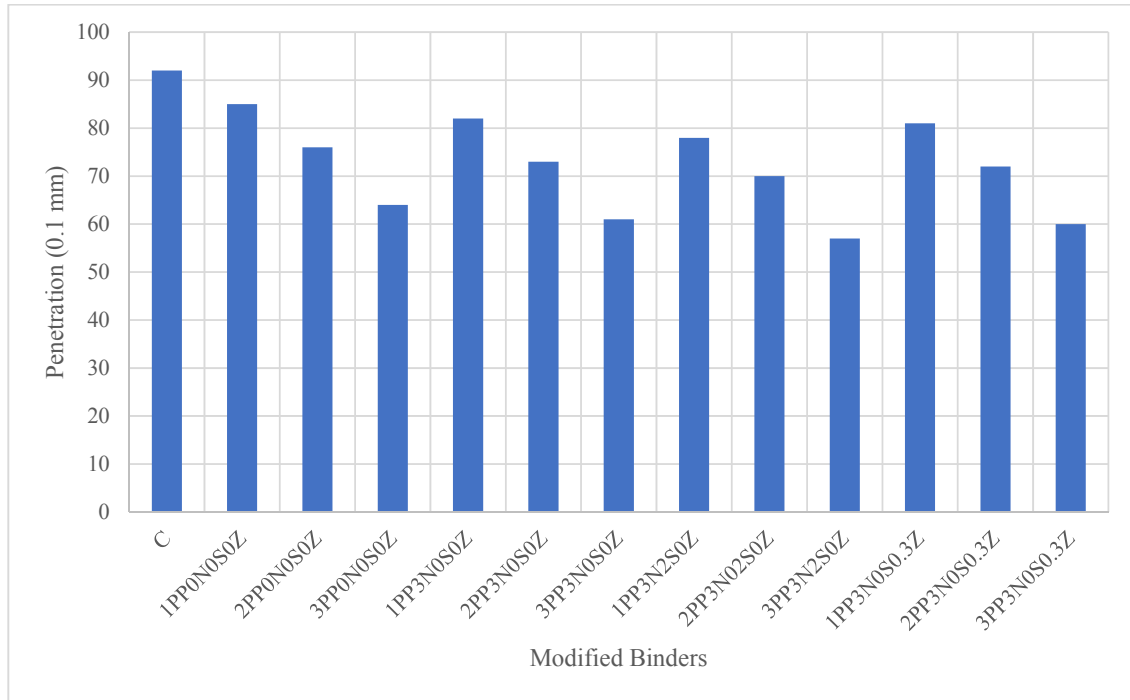
۴-۱-۱- نتایج آزمایش فیزیکی قیر

شکل‌های ۴ و ۵ نتایج آزمایش‌های فیزیکی قیر اصلی، پلی پروپیلن، پلی پروپیلن/نانورس و همچنین قیرهای اصلاح‌شده پلی پروپیلن/نانورس/افزودنی نیمه گرم را نشان می‌دهند. با توجه به نتایج، استفاده از پلی پروپیلن، پلی پروپیلن/نانورس در قیر پایه منجر به افزایش عملکرد قیرها می‌شود. نتایج نشان داد افزودن پلی پروپیلن، پلی پروپیلن/نانورس 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 پلی پروپیلن، پلی پروپیلن/نانورس باشد. با افزایش درصد پلی پروپیلن، درجه نفوذ نمونه‌ها کاهش و نقاط نرم شدن نمونه‌ها افزایش می‌یابد. علاوه بر این، نانورس سبب افزایش سختی قیرها شده و درجه نفوذ و نقطه نرمی را افزایش می‌دهد. در بین قیرهای اصلاح شده با افزودنی نیمه گرم، قیرهای اصلاح

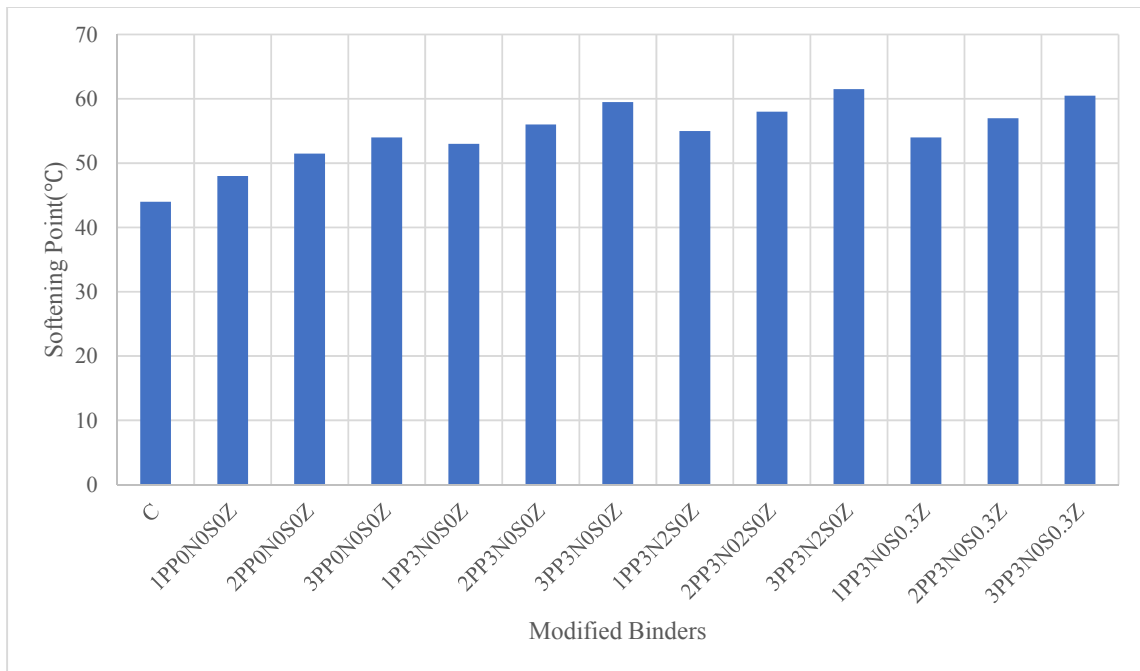
شده با ساسوبیت در مقایسه با قیرهای اصلاح شده توسط زایکوترم، نفوذ کمتر و نقاط نرم شدن بیشتری داشتند. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، استفاده از پلی پروپیلن منجر به افزایش ویسکوزیته قیر پایه می‌شود. با توجه به نتایج آزمایش‌های ویسکوزیته، افزودن نانورس به قیر حاوی پلی پروپیلن باعث افزایش ویسکوزیته قیر می‌شود و با افزودن درصد پلی پروپیلن در قیرهای اصلاح‌شده، مقدار ویسکوزیته افزایش می‌یابد. نتیجه با استفاده از افزودنی‌های نیمه گرم نشان داد که ویسکوزیته قیرهای حاوی پلی پروپیلن/نانورس کاهش می‌یابد. در بین اصلاح‌کننده‌های نیمه گرم، ساسوبیت توانایی برتری در کاهش ویسکوزیته قیرهای اصلاح‌شده در مقایسه با زایکوترم دارد. نتایج شکل پذیری قیرها در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزودن پلی پروپیلن شکل پذیری

پذیری می‌گردند و در بین این دو افزودنی، ساسوبیت نقش بیشتری دارد. شکل ۸ نشانه درجه نفوذ قیرها را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، افزودن پلی پروپیلن و نانورس سبب کاهش حساسیت حرارتی قیر می‌گردد.

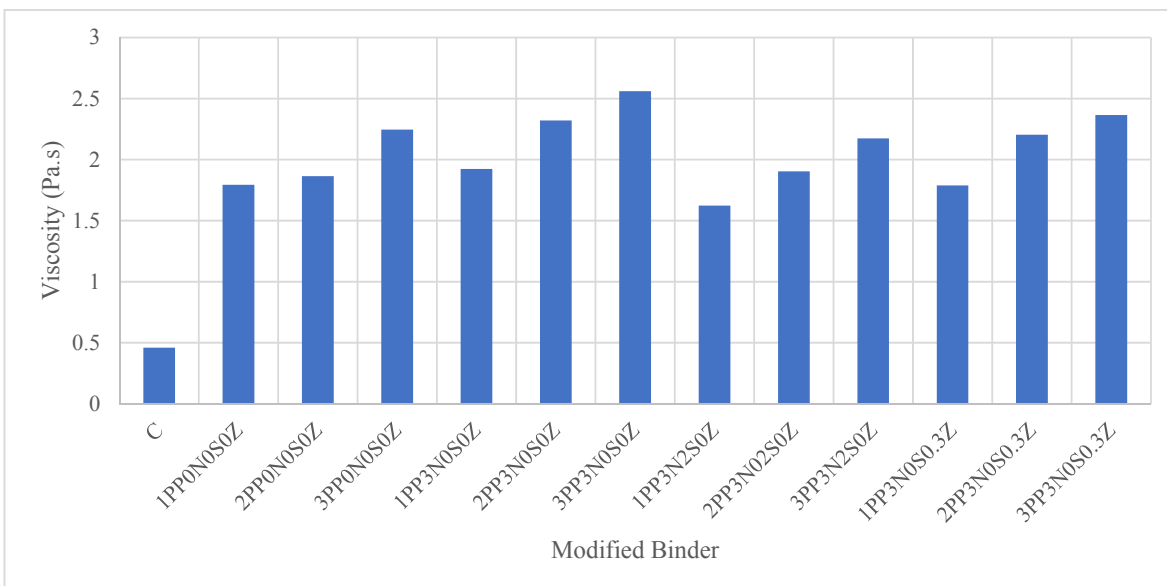
قیرها کاهش می‌یابد و با افزایش درد پلی پروپیلن میزان کاهش بیشتر می‌گردد. همچنین نانورس سبب کاهش شکل پذیری قیرهای حاوی پلی پروپیلن می‌گردد. افزودنی‌های نیمه گرم ساسوبیت و زایکوترم نیز سبب کاهش شکل



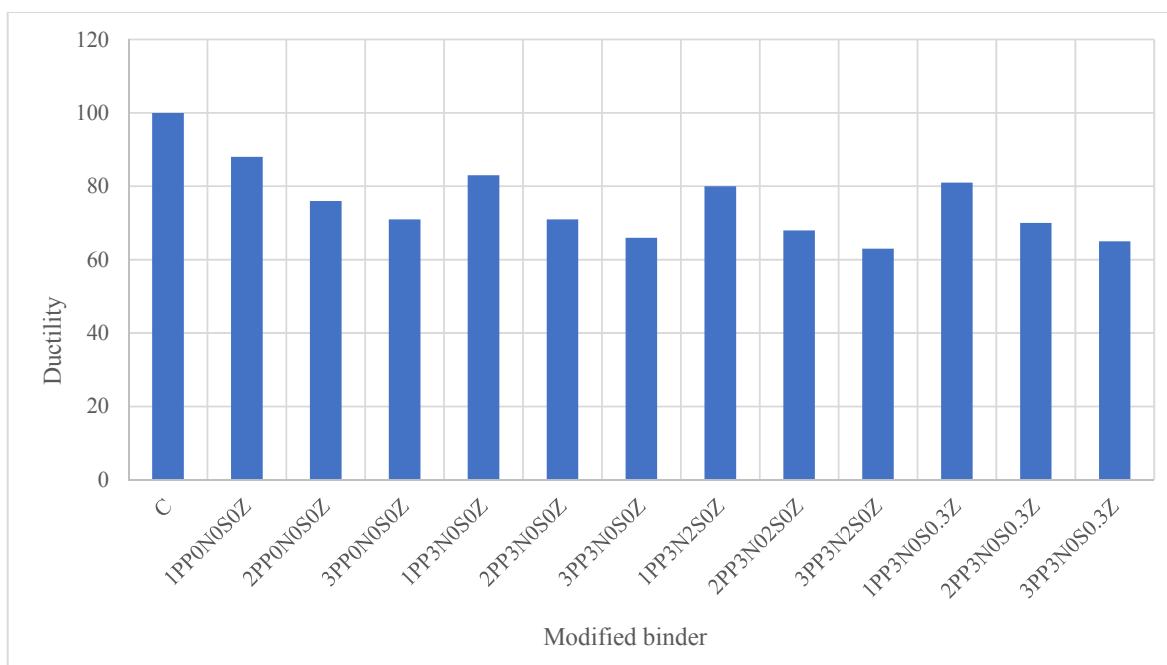
شکل ۴. نتایج آزمایش درجه نفوذ



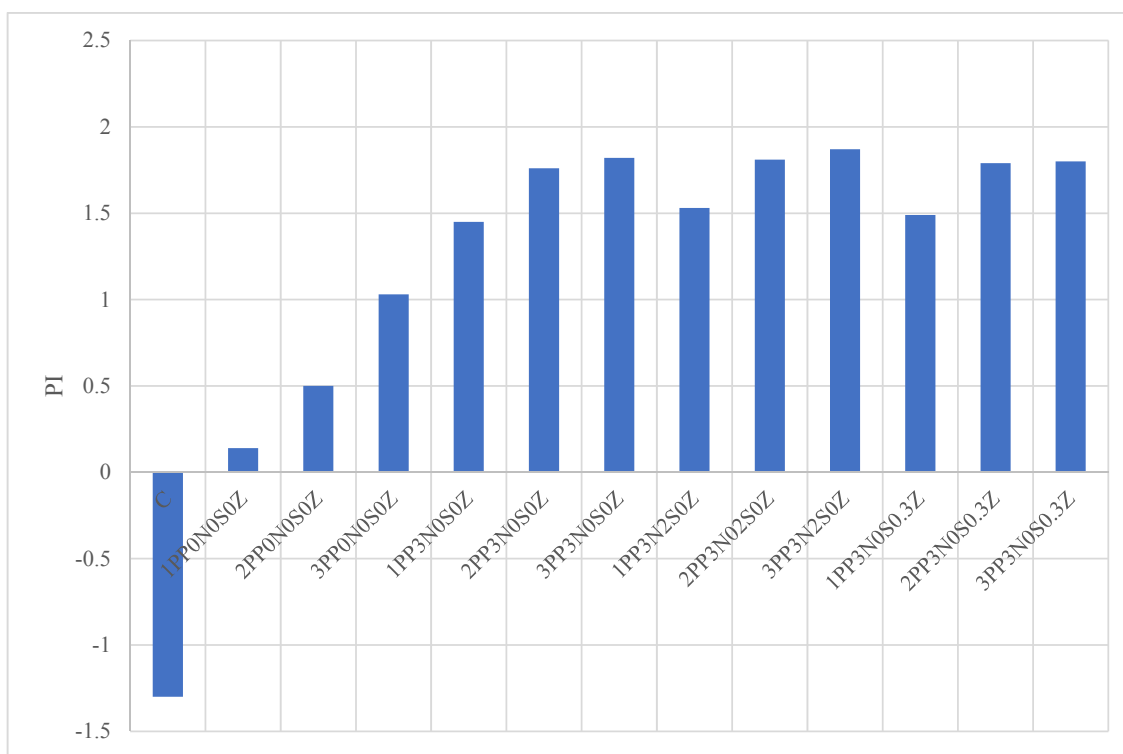
شکل ۵. نتایج نقطه نرمی



شکل ۶. نتایج آزمایش ویسکوزیته قیر



شکل ۷. نتایج شکل پذیری قیر



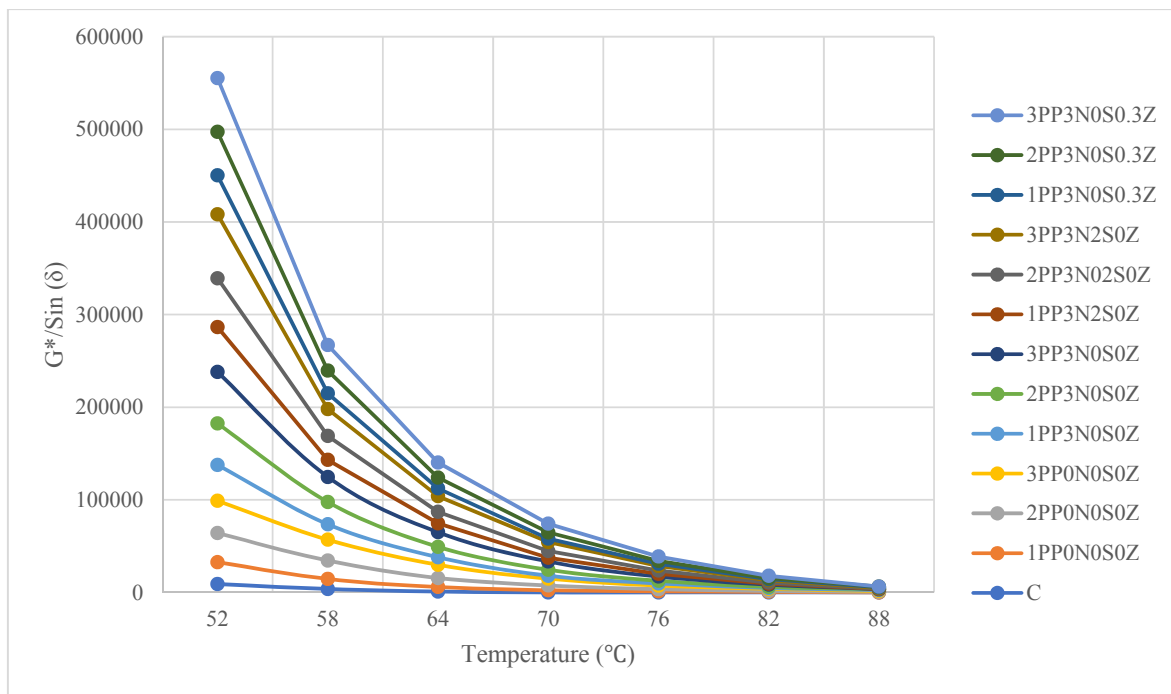
شکل ۸ نتایج نشانه درجه نفوذ قیر

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 پلی پروپیلن و نانورس نسبت به قیرهای قدیمی بهبود می‌یابد، که دلیل آن جلوگیری ذرات نانورس از تبخیر عناصر سبک و تغییرات آروماتیک و رزین به آسفالتین در قیر پایه می‌باشد.

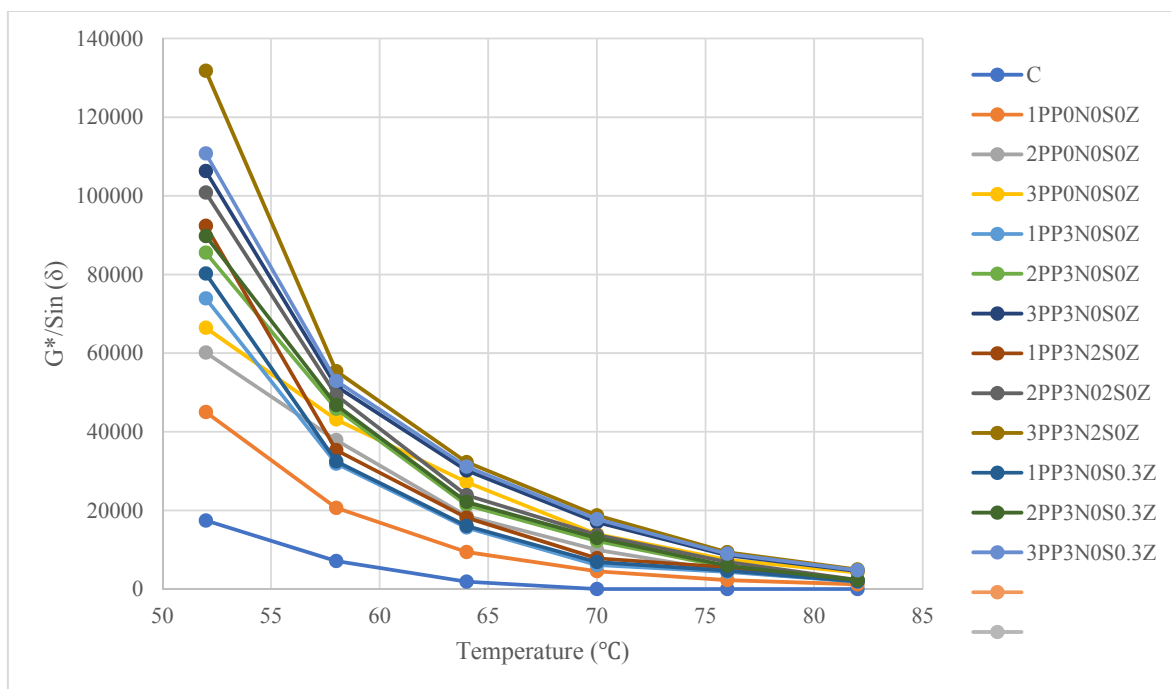
علاوه بر این، با پیشنهادات سیستم PG، قیرهای با فاکتور $G^*.\sin\delta$ کمتر، توانایی مناسب‌تری در رفع ترک‌های خستگی داشتند. همچنین $G^*.\sin\delta$ در قیر به ۵۰۰۰ کیلو پاسکال محدود شد که نشان می‌دهد قیرها قادر به مقاومت در برابر ترک‌های میانی هستند. شکل ۱۰ نشان می‌دهد که افزودن پلی پروپیلن در قیر پایه سبب بهبود رفتار خستگی قیر می‌گردد.

همچنین افزودن نانورس در قیرهای اصلاح شده با پلی پروپیلن باعث افزایش رفتار خستگی قیر می‌شود. همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، اصلاح کننده‌های WMA در قیرهای اصلاح شده پلی پروپیلن/نانورس باعث افزایش رفتار خستگی در قیر می‌شوند.

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 ۹ فاکتور شیار قیر را قبل و بعد از فرآیند پیری کوتاه مدت نشان می‌دهد. بر اساس نتیجه، استفاده از پلی پروپیلن منجر به بهبود تغییر شکل نهایی 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 ۳ درصد پلی پروپیلن نزدیک به ۳۱ درصد افزایش یافته است. نتایج نشان داد با افزایش درصد پلی پروپیلن مقاومت شیارشدگی قیر افزایش می‌یابد. علاوه بر این، استفاده از نانورس باعث بهبود خرابی دمای بالا قیرهای اصلاح شده توسط پلی پروپیلن می‌شود. اصلاح کننده‌های WMA همچنین باعث افزایش انعطاف پذیری قیر و توانایی بازیابی کرنش انباشته شده از طریق بارهای ترافیکی می‌شوند. بین اصلاح کننده‌های WMA، قیرهای اصلاح شده توسط Sasobit عملکرد مناسب‌تری در بهبود رفتار شیار قیر داشتند. می‌تواند مربوط به سفت شدن قیرها با استفاده از



(الف)



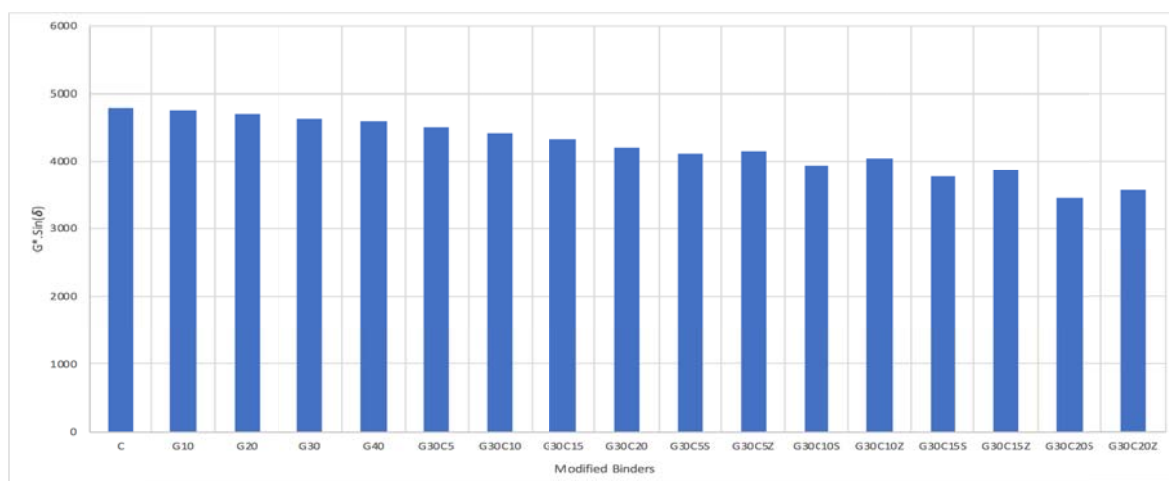
(ب)

شکل ۹. فاکتور شیارشدگی برای قیر شاهد و قیرهای اصلاح شده: الف) قبل از پیرشدگی (ب) بعد از پیرشدگی

۴-۱-۲- پایداری ذخیره سازی

نشان داد افزودن نانورس به قیر حاوی پلی پروپیلن سبب بهبود پایداری ذخیره سازی نمونه گردیده به طوری که اختلاف نقطه نرمی بین بالا و پایین نمونه کمتر از ۲,۵ درجه گردیده است. استفاده از افزودنی‌های گرم در قیرهای اصلاح شده با پلی پروپیلن و نانورس، پایداری در دمای بالا در قیرها افزایش می‌یابد. در بین نمونه‌های اصلاح‌کننده‌های Sasobit, WMA 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 ۹ نشان داده شده است. اختلاف در نتایج آزمایش نقطه نرمی از بخش‌های پایین و بالای نمونه‌های حاوی پلی پروپیلن بیش از ۲,۵ درجه بود، که نشان از جداسازی فاز در نمونه‌های قیر حاوی پلی پروپیلن شد. افزایش درصد پلی پروپیلن، منجر به افزایش جداسازی فازها شد و نتایج نقاط نرم شدن از مقاطع پایین و بالا در نمونه‌ها بیشتر از ۲,۵ درجه بود. نتایج



شکل ۱۰. نتایج عمر خستگی نمونه‌ها

جدول ۹. نتایج پایداری ذخیره سازی نمونه‌ها

نمونه‌ها	نقطه نرمی بالا	نقطه نرمی پایین	ΔS (°C)
C	44	46	2.23
1PP0N0S0Z	48	51	2.62
2PP0N0S0Z	51.5	54	2.84
3PP0N0S0Z	54	57	2.98
1PP3N0S0Z	53	55	2.34
2PP3N0S0Z	56	58	2.39
3PP3N0S0Z	59.5	62	2.45
1PP3N2S0Z	55	57	2.37
2PP3N02S0Z	58	60	2.41
3PP3N2S0Z	61.5	64	2.47
1PP3N0S0.3Z	54	56	2.4
2PP3N0S0.3Z	57	59	2.45
3PP3N0S0.3Z	60.5	63	2.48

۴-۱-۳- نتایج آزمایش MSCR

قیرهای حاوی افزودنی های نیمه گرم اصلاح شده دارای استحکام شیارشدگی بیشتری هستند. با توجه به نتایج جدول ۱۰، قیرهای اصلاح شده توسط Sasobit دارای مقادیر Jnr کمتری نسبت به قیرهای اصلاح شده توسط زایکوترم هستند. دلیل آن این است که با افزودن Sasobit، پایداری و سفتی قیرها با تشکیل یک ساختار شبکه/شبه شبکه کریستالی بهبود یافت، اما مقادیر Jnr بیشتر از قیرهای اصلاح شده Sasobit بود. نتایج آزمایش MSCR نشان داد که استفاده از نانوتکنولوژی زایکوترم منجر به کاهش مقادیر Jnr قیرهای اصلاح شده پلی پروپیلن می شود. نتایج بهتر از قیر کنترل بود. پلی پروپیلن باعث افزایش R٪ قیر می شود. بر اساس نتایج جدول ۱۰، R٪ قیر اصلی کم است. قیرهایی با مقادیر R٪ کمتر، ظرفیت کمتری برای مقاومت در برابر ترک خوردگی و شیار شدن ناشی از خستگی دارند. با توجه به نتایج، اصلاح قیر با نانورس منجر به بهبود R٪ قیر می شود که منجر به افزایش مقاومت شیارشدگی قیر می شود. بر اساس نتایج، قیرهای اصلاح شده توسط Sasobit در مقایسه با قیرهای اصلاح شده زایکوترم دارای درصد بازبازی بیشتری هستند.

عملکرد شیار شدن در قیرها با آزمایش MSCR مورد ارزیابی قرار گرفت. درصد بازبازی (R٪) ^۴ و همچنین ضریب Jnr از نتایج این آزمایش هستند که در ۲ سطح تنش ۱۰۰ و ۳۲۰۰ پاسکال در دماهای ۵۲ درجه سانتی گراد تا ۸۲ درجه سانتی گراد محاسبه می شوند. نتایج در جدول ۱۰ نشان داده شده است. بر اساس نتایج، با افزایش دما، پارامتر Jnr و R٪ به ترتیب افزایش و کاهش می یابد. نتایج Jnr و R٪ قیرها در دمای ۶۴ درجه سانتیگراد به ترتیب در جدول ۱۰ آورده شده است. به طور کلی، با توجه به نتایج، صرف نظر از سطوح تنش، استفاده از پلی پروپیلن به قیر پایه سبب کاهش مقدار Jnr قیر پایه شد که نشان می دهد قیرهای اصلاح شده با پلی پروپیلن مقاومت شیاردار بیشتری دارند. با افزایش درصد پلی پروپیلن، عملکرد شیارشدن بهبود می یابد. بر اساس نتایج جدول ۱۰، با افزودن نانورس به قیرهای حاوی پلی پروپیلن مقدار Jnr کاهش می یابد. به طور کلی، با توجه به نتایج، صرف نظر از سطوح تنش، استفاده از افزودنی های نیمه گرم به قیر حاوی پلی پروپیلن و نانورس سبب کاهش مقدار Jnr قیر پایه شد که نشان می دهد

جدول ۱۰. نتایج آزمایش MSCR

Binder type	R100	R3200	Jnr100	Jnr3200	Jnrdiff
	%	%	kPa-1	kPa-1	%
C	3.83	0.5	2.10	3.00	48.345
1PP0N0S0Z	37.5	19.64	1.41	1.76	35.657
2PP0N0S0Z	38.3	25.32	0.90	1.53	41.458
3PP0N0S0Z	41.6	27.65	0.76	1.42	49.521
1PP3N0S0Z	46.4	29.56	0.63	1.34	52.743
2PP3N0S0Z	48.46	31.2	0.54	1.23	58.018
3PP3N0S0Z	51.7	33.6	0.47	1.16	62.953
1PP3N2S0Z	48.2	32.4	0.52	1.25	41.586
2PP3N02S0Z	50.3	34.7	0.41	1.13	51.58
3PP3N2S0Z	53.9	36.1	0.32	0.93	53.67
1PP3N0S0.3Z	47.2	30.6	0.58	1.28	55.632
2PP3N0S0.3Z	49.5	32.4	0.47	1.20	56.379
3PP3N0S0.3Z	52.6	34.8	0.38	1.03	58.256

خاصیت ارتجاعی پایین قیرهای اصلاح شده زایکوترم نسبت داده شود.

۴-۱-۴- نتایج LAS

جدول ۱۱ نتایج LAS را نشان می دهد که بر اساس آن، اصلاح قیر توسط پلی پروپیلن سبب کاهش تنش برشی در سطح تنش بالا می شود. نتایج نشان داده شده با استفاده از نانورس منجر به بهبود عمر خستگی قیرهای پایه می شود، ممکن است به دلیل افزایش انعطاف پذیری در قیرها با استفاده از نانورس باشد.

درصد اختلاف در مدول غیرقابل بازگشت (Jnr-diff)

برای بررسی مقادیر حساسیت قیر در مقابل تغییرات در سطح تنش قیر ارایه شد در حالی که تنش ها از ۱۰۰ تا ۳۲۰۰ پاسکال افزایش یافتند. اگر این ضریب از حد عبور کند، قیرها نشان می دهند که در برابر تنش ها حساسیت دارند. با توجه به نتایج جدول ۱۰، تمام قیرها دارای مقادیر Jnr-diff کمتر از حد مجاز ۷۵٪ بودند. با توجه به نتایج آزمایش، قیرهای اصلاح شده با زایکوترم بیشترین مقدار Jnr و کمترین R٪ را در هر سطح از تنش ها داشتند که شاید به

جدول ۱۱. نتایج عمر خستگی نمونه ها

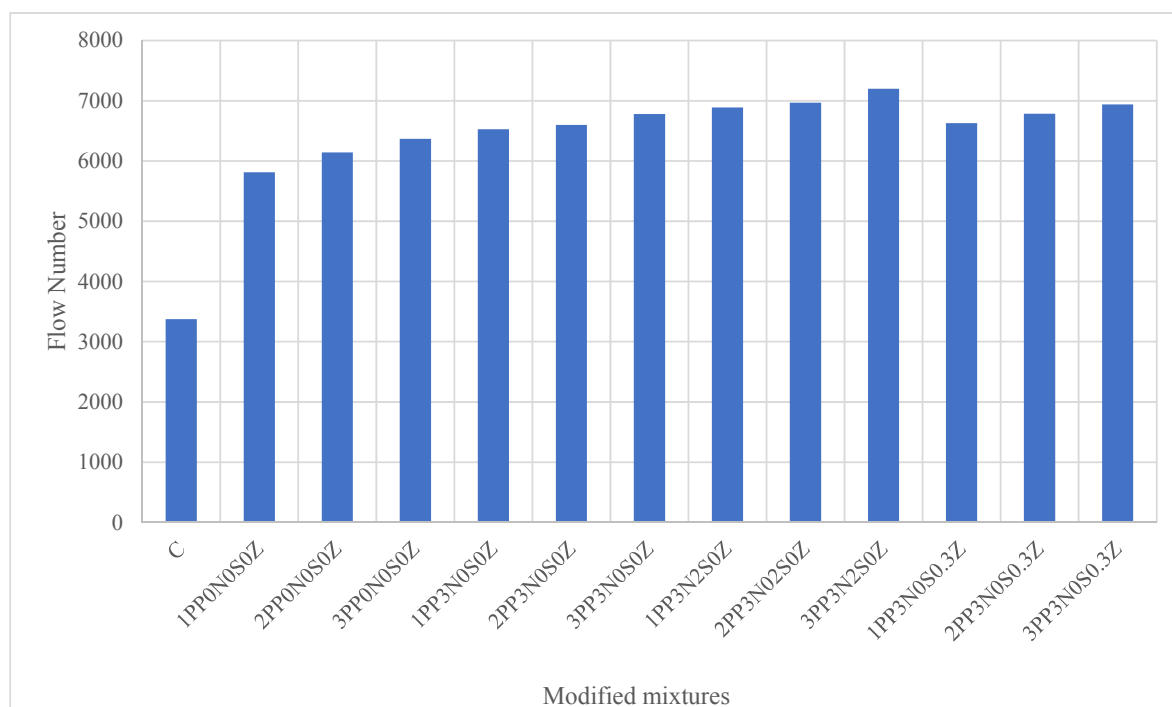
Binder Type	2.5% Strain Level	5% Strain Level
C	1366	853
1PP0N0S0Z	2200	890
2PP0N0S0Z	3300	945
3PP0N0S0Z	4200	1045
1PP3N0S0Z	2500	950
2PP3N0S0Z	3500	1070
3PP3N0S0Z	4500	1160
1PP3N2S0Z	3500	1100
2PP3N02S0Z	4100	1400
3PP3N2S0Z	4600	1630
1PP3N0S0.3Z	3100	1060
2PP3N0S0.3Z	3800	1286
3PP3N0S0.3Z	4570	1500

۴-۲- نتیجه آزمایش های مخلوط

۴-۲-۱- نتایج آزمایش عدد روانی

مقاومت شیاردار بهبود می یابد. بر اساس نتایج، عدد روانی نمونه های اصلاح شده با ۳٪ پلی پروپیلن ۹۰ درصد بیشتر از نمونه حاوی قیرخالص بودند. علاوه بر این، نمونه های با ۳٪ پلی پروپیلن و همچنین ۳٪ نانورس، ۱،۲ برابر عدد روانی بالاتر در مقایسه با نمونه اصلاح نشده داشتند. همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، افزودن افزودنی نیمه گرم سبب بهبود عملکرد شیار در نمونه ها می شود که می تواند به دلیل افزایش انعطاف پذیری نمونه با استفاده از افزودنی نیمه گرم باشد. در نتیجه عملکرد شیاردار بهبود یافت. بین نمونه های WMA، نمونه های اصلاح شده با ساسوبیت بیشترین مقاومت در برابر شیار را دارند.

شکل ۱۱ عدد روانی نمونه ها را نشان می دهد. مقادیر بیشتر عدد روانی نشان می دهد که مخلوطها در برابر تغییر شکل های آخر مقاوم تر هستند. همچنین افزودن پلی پروپیلن باعث افزایش مقاومت شیارشدگی در نمونه ها می شود که ممکن است به دلیل سفت شدن نمونه با استفاده از پلی پروپیلن باشد و در نتیجه مقاومت مخلوط در برابر تغییر شکل های آخر افزایش یابد. نتایج نشان داد با افزودن درصد پلی پروپیلن، عدد روانی نمونه ها افزایش یافت. در نتیجه مقاومت در برابر شیارشدگی افزایش می یابد. علاوه بر این، استفاده از نانورس منجر به افزایش عدد روانی در مخلوطها می شود. علاوه بر این، استفاده از نانورس باعث افزایش سفتی و ویسکوزیته در مخلوطها می شود و در نتیجه



شکل ۱۱. نتایج عدد روانی نمونه‌ها

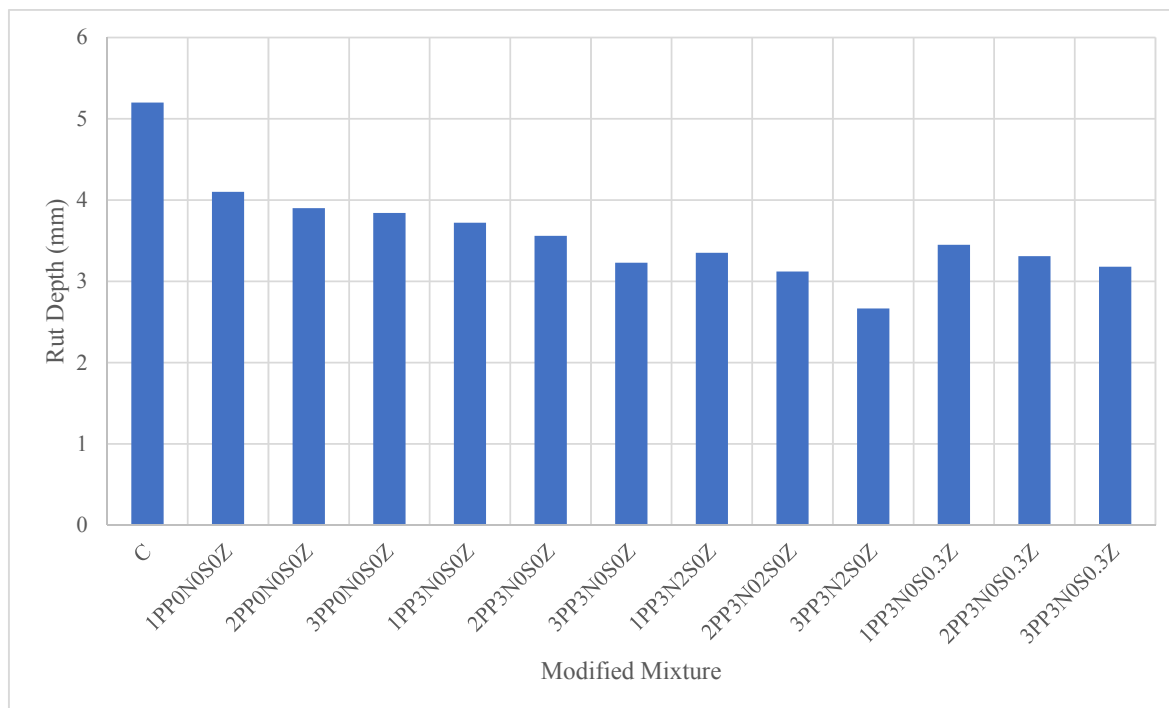
۴-۲-۲-شیار جای چرخ

عمق شیارهای نمونه‌های مختلف در شکل ۱۲ نشان داده شده است. با توجه به نتایج، پلی پروپیلن منجر به کاهش عمق شیارگی در نمونه‌ها شده است. پلی پروپیلن سختی مخلوط را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، استفاده از نانورس باعث بهبود عملکرد شیار نمونه‌ها می‌شود. با افزایش درصد پلی پروپیلن، مقاومت تغییر شکل دائمی افزایش می‌یابد. استفاده از پلی پروپیلن ۳ درصد در قیر اصلی باعث کاهش حدود ۲۴ درصدی تغییر شکل‌های آخر در مخلوط‌ها شد. اما استفاده از پلی پروپیلن ۳ درصد به همراه ۳٪ نانورس سبب کاهش RD مخلوط تا ۳۴ درصد می‌شود. علاوه بر این، افزودن ۳٪ نانورس در ۱٪ مخلوط اصلاح شده با پلی پروپیلن باعث کاهش مقادیر تغییر شکل دائمی تا ۲۶٪ شد. علاوه بر این، افزودنی نیمه گرم منجر به کاهش تغییر شکل دائمی در نمونه‌ها می‌شود. افزودنی نیمه گرم انعطاف پذیری مخلوط را بهبود بخشیدند. در بین نمونه‌های حاوی WMA.

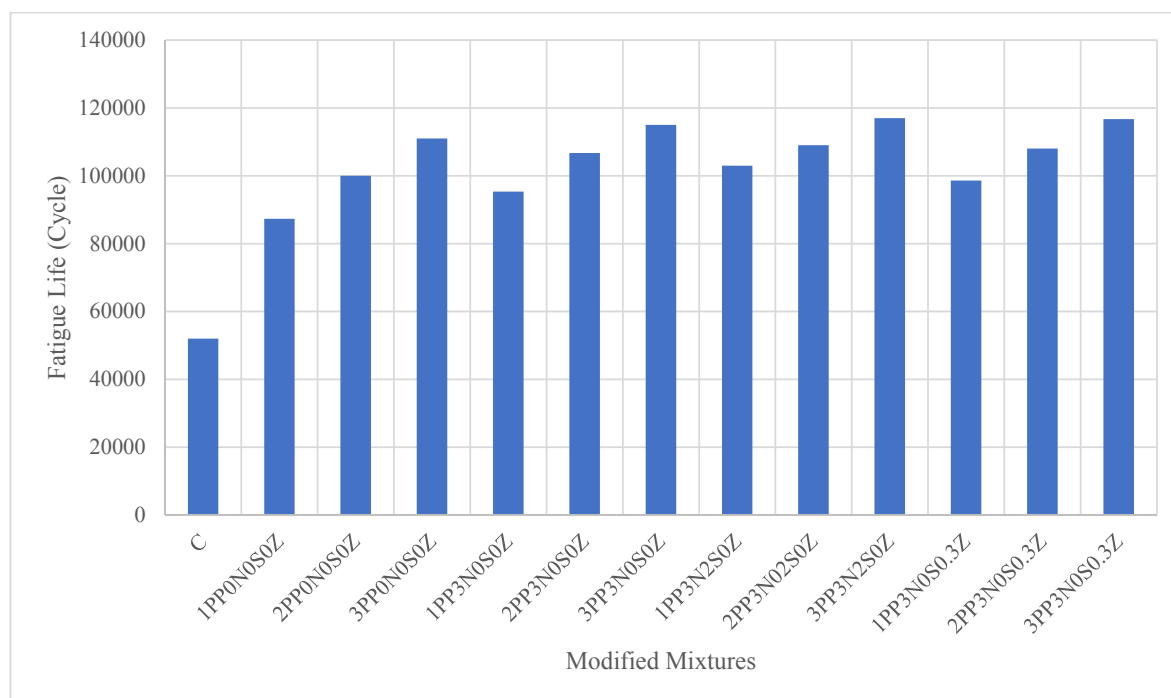
نمونه‌های اصلاح شده با ساسویت بیشترین مقاومت در برابر شیار را دارند.

۴-۲-۳-نتایج FPB

شکل ۱۳ عمر خستگی را برای نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد. همانطور که مشهود است، افزودن پلی پروپیلن ویژگی‌های دمای متوسط را در مخلوط‌ها افزایش داد. نتایج نشان داد که استفاده از نانورس باعث بهبود ویژگی‌های دمای متوسط در مخلوط‌ها می‌شود. افزایش محتوای پلی پروپیلن باعث افزایش عمر خستگی در مخلوط‌ها شد. نتایج نشان داد که استفاده از افزودنی نیمه گرم خواص دمای متوسط را در مخلوط‌ها افزایش می‌دهد. همچنین استفاده از ساسویت باعث بهبود عمر خستگی در نمونه‌ها بیشتر از کاربرد افزودنی زایکوترم شد.



شکل ۱۲. نتایج شیار جای چرخ نمونه‌ها



شکل ۱۳. نتایج عمر خستگی نمونه‌ها

۵- نتیجه گیری

ویسکوزیته در نمونه‌ها می‌شود و در نتیجه مقاومت مخلوط به شیار افزایش می‌یابد. استفاده از افزودنی نیمه گرم سبب بهبود ویژگی‌های شیار در نمونه‌ها می‌شود که ممکن است به دلیل افزایش انعطاف‌پذیری نمونه با استفاده از WMA، بر این اساس، عملکرد شیارشدگی مخلوط افزایش می‌یابد. در بین نمونه‌های WMA، نمونه‌های اصلاح‌شده با Sasobit بهترین عملکرد را در برابر شیارشدگی دارند.

- با توجه به نتایج شیار جای چرخ، استفاده از پلی پروپیلن سبب بهبود مقاومت شیار در نمونه‌ها شد. با افزایش درصد پلی پروپیلن، مقاومت شیارها افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج، استفاده از افزودنی نانورس در قیر اصلاح شده با پلی پروپیلن سبب کاهش تغییر شکل دائمی در نمونه‌ها شد. افزودنی نیمه گرم انعطاف‌پذیری مخلوط را بهبود بخشیدند. بین نمونه‌های WMA، نمونه‌هایی که با Sasobit اصلاح شده‌اند، بیشترین عملکرد را در برابر شیارشدگی دارند.

-نتایج نشان داد افزودن پلی پروپیلن سبب بهبود رفتار خستگی قیر و مخلوط آسفالتی گردیده است. همچنین نانورس سبب افزایش عمر خستگی نمونه‌های قیر و مخلوط آسفالتی شده است.

پژوهش حاضر بر روی ارزیابی اثرات پلی پروپیلن و نانورس و همچنین افزودنی‌های نیمه گرم بر رفتار عملکرد در نمونه‌های قیر و مخلوط SMA متمرکز می‌باشد. آزمایشات مختلفی از جمله خزش دینامیکی، شیار جای چرخ، مقاومت کششی غیرمستقیم، و مدول برجهندگی 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 پلی پروپیلن و همچنین نانورس باعث کاهش تغییر شکل قیر و افزایش مقاومت قیر در برابر شیارشدگی شد. علاوه بر این، افزودن پلی پروپیلن بیشتر باعث افزایش مقاومت شیارها شد. مقدار Jnr قیر پایه با استفاده از مواد WMA کاهش یافت. قیرهای اصلاح شده ساسوبیت ارزش Jnr کمتری نسبت به قیرهای اصلاح شده زیاکوتم داشتند.

-بر اساس نتایج عدد روانی، افزودن پلی پروپیلن باعث بهبود رفتار شیار در نمونه‌ها شد. استفاده از نانورس باعث بهبود در عدد روانی نمونه شد. بر اساس نتایج، افزایش درصد پلی پروپیلن باعث بهبود مقاومت شیارها شد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از پلی پروپیلن سبب افزایش سختی و همچنین

۶- سپاسگزاری

این طرح تحقیقاتی با استفاده از اعتبارات ویژه پژوهشی (Grant) دانشگاه علم و فناوری مازندران به شماره ۱۴۰۲/۱۱۶۹/د تاریخ ۱۴۰۲/۰۳/۲۸ انجام شده است.

۷- پی‌نوشت‌ها

- 1- Municipality Solid Waste
- 2- Polyvinyl Chloride
- 3- Polyethylene Terephthalate
- 4- Polypropylene
- 5- Stone Matrix Asphalt
- 6- National Cooperative Highway Research Program
- 7- Dynamic Shear Rheometer
- 1- Warm Mix Asphalt
- 8- Multiple Stress Creep Recovery
- 9- Linear Amplitude Sweep
- 10-Universal Testing Machine
- 11-Percent Recovery

۸- مراجع

- Obaid, Hayder Abbas, (2009), "Characteristics of warm mixed asphalt modified by waste polymer and nano-silica." *International Journal of Pavement Research and Technology* 14, pp. 397-401.
- Robjant, Lyndon, and Wayne Dosh, (2009), "Warm-mix asphalt for rural county roads", *In Cold Regions Engineering 2009, Cold Regions Impacts on Research, Design, and Construction*, pp. 438-454.
- Şengöz, Burak, Ali Topal, and Cagri Gorkem, (2013), "Evaluation of moisture characteristics of warm mix asphalt involving natural zeolite", *Road materials and pavement design* 14, No. 4, pp. 933-945.
- Vidal, Rosario, Enrique Moliner, Germán Martínez, and M. Carmen Rubio, (2013), "Life cycle assessment of hot mix asphalt and zeolite-based warm mix asphalt with reclaimed asphalt pavement", *Resources, Conservation and Recycling* 74, pp.101-114.
- Wang, Y., C. Wang, H. Bahia, (2017), "Comparison of the fatigue failure behaviour for asphalt binder using both cyclic and monotonic loading modes, *Constr. Build. Mater.*", 15, pp.767-774.
- Yidirim Y., (2007), "Polymer modified asphalt binders, *Constr Build Mater.*" 21(1), pp.66-72.
- Zhao, Wenbin, Feipeng Xiao, Serji N. Amirkhanian, and Bradley J. Putman, (2012), "Characterization of rutting performance of warm additive modified asphalt mixtures", *Construction and Building Materials* 31, pp.265-272.
- 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 rheometer", Washington, DC: American Association of State Transport and Officials.
- Arabani, Mahyar, Seyed Amid Tahami, and Gholam Hossein Hamed, (2018), "Performance evaluation of dry process crumb rubber-modified asphalt mixtures with nanomaterial." *Road Materials and Pavement Design* 19, No. 5, pp. 1241-1258.
- Bala, Nura, Ibrahim Kamaruddin, Madzlan Napih, and Nasiru Danlami, (2017), "Rheological and rutting evaluation of composite nanosilica/polyethylene modified bitumen." *In IOP conference series: materials science and engineering*, Vol. 201, No. 1, pp. 012012, IOP Publishing.
- Bala, Nura, Madzlan Napih, and Ibrahim Kamaruddin, (2018), "Effect of nanosilica particles on polypropylene polymer modified asphalt mixture performance," *Case studies in construction materials* 8, pp.447-454.
- Brown ER, Cooley LA., (1999), "Designing stone matrix asphalt mixtures for rut-resistant pavements", *Transport Res Board*.
- Buruiana, Daniela Laura, Puiu Lucian Georgescu, Gabriel Bogdan Carp, and Viorica Ghisman. (2023), "Recycling micro polypropylene in modified hot asphalt mixture", *Scientific Reports* 13, No. 1, 3639.
- Fattah, Mohammed Y., Wissam Abdulkhabeer, and Miami M. Hilal, (2021), "Characteristics of asphalt binder and mixture modified with waste polypropylene," *Engineering and Technology Journal* 39, No. 8, pp.1224-1230.
- Kim, Sungun, Jiyong Park, Sungjin Lee, and Kwang Kim, (2014), "Performance of modified WMA Mixtures prepared using the same class pg binders of HMA mixtures", *Journal of Testing and Evaluation* 42, No. 2, pp. 347-356.

Laboratory Evaluation of the Effect of Warm Mix Asphalt Additive on the Performance of Bitumen and Asphalt Mixture Containing Polypropylene Waste and Nanoclay

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

E-mail: Rezvan_Babagoli@yahoo.com

Received: March 2023- Accepted: August 2023

ABSTRACT

The improvement of asphalt materials to develop the overall performance of bitumen and asphalt mixtures has been the focus of several researches that have been carried out in the past few decades. Using plastic waste in asphalt modification is one of the measures taken in this direction. The use of waste materials in the construction of pavements not only improves the properties of asphalt, but also significantly saves the cost of pavement materials and helps to solve the problems of disposing of such waste materials that can cause water pollution. Become soil and air, they are dangerous. Therefore, in this research, the effect of semi-heated asphalt additives, nanoclay and polypropylene waste on the performance characteristics of bitumen and asphalt mixtures was evaluated. In the present research, nanoclay (3% bitumen weight), polypropylene waste (1%, 2% and 3% bitumen weight) and 2 semi-heated additives (2% Sasobit and also 0.3% Zycotherm) were used to modify pure bitumen (85/100).) used. Several bitumen rheological tests and mixture performance tests were conducted. The results of the bitumen rheological behavior test showed that the addition of composite additives leads to an increase in the high temperature behavior of bitumen. Bitumen storage stability test also showed that using nanoclay improves the storage stability of polypropylene-containing bitumen. The rutting resistance of bitumen increases with the addition of nanoclay and polypropylene. In addition, nanoclay and semi-heated additive can increase the fatigue behavior of polypropylene modified bitumen. The results of the sample test showed that the use of polypropylene, semi-warm additives and nanoclay improves the performance characteristics of bitumen and asphalt mixtures.

Keywords: Bitumen, Nanoclay, Asphalt Mix, Bitumen Rheology, Waste Polypropylene