

ارزیابی خصوصیات عملکردی مخلوط آسفالتی حاوی SBR و نانورس

مقاله علمی - پژوهشی

امین فرج الهی*، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران

علیرضا عاملی، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران

فرزین پورحیدری ممقانی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: AminFarajollahi@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۰۹ - پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۵

صفحه ۳۲۰-۳۰۱

چکیده

نانو مواد ظرفیت امیدوارکننده‌ای را در بهبود رفتار روسازی نشان داده است. از آنجایی که آسفالت مخلوط داغ یک ماده ویسکوالاستیک است، چندین مشکل در طول عمر آنها رخ داده است. علاوه بر این، سرباره فولاد به دلیل خواص فیزیکی برجسته برای افزایش خواص مخلوط مورد استفاده قرار گرفت. این تحقیق اثر نانورس و لاستیک استایرن بوتادین (SBR) بر رفتار عملکرد قیر و عملکرد دمای بالا و متوسط مخلوط‌های SMA حاوی سنگدانه‌های سرباره فولادی را مورد ارزیابی قرار داد. در این مقاله از قیرهای با درجه نفوذ AC-60/70 و AC-85/100 به عنوان قیر پایه استفاده شد. علاوه بر این، 0 SBR، ۲٪، ۴٪، ۶٪، ۸٪ و ۱۰٪ (وزن چسب)، و نانورس (۰٪، ۱٪، ۲٪، ۳٪، ۴٪ و ۵٪ وزنی از binder) به عنوان یک اصلاح کننده مخلوط استفاده شد. برای ارزیابی رفتار عملکرد قیر، آزمون‌های فیزیکی پایه، ویسکوزیته چرخشی، اجرا شد. علاوه بر این، آزمون‌های مدول ارتجاعی، مقاومت کششی غیرمستقیم، خزش دینامیکی، مسیر چرخ و خستگی پرتو چهار نقطه (FPBF) برای بررسی عملکرد نمونه‌های مخلوط انجام شد. برای تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل واریانس دو عاملی^۳ (ANOVA) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد استفاده از NC^۴ مقاومت چسبنده‌ها را در دمای پایین کاهش می‌دهد. در حالی که SBR مقاومت قیر در دمای پایین را بهبود می‌بخشد. نتایج آزمایش مخلوط نشان می‌دهد که استفاده از NC/SBR مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی،^۵ MR^۶ ITS انرژی شکست و خواص دمای متوسط نمونه‌ها را افزایش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: قیر، افزودنی، پلیمر، خستگی

۱-مقدمه

بیشتری وجود دارد شروع می‌شود و با افزایش دفعات بارگذاری به آرامی به سمت بالا حرکت می‌کند. این ترک خوردگی عمدتاً می‌تواند در سطح لایه/روکش آسفالت به دلیل بارهای خستگی حرارتی از جمله چرخه‌های انجماد/ذوب یا تغییرات دمایی روزانه یا فصلی شروع شود و سپس در آن لایه به سمت پایین منتشر شود. بنابراین کنترل ترک خوردگی خستگی یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های متخصصان این حوزه است. شش عامل

روسازی یکی از اجزای اصلی راه است که نقش مهمی در تامین ایمنی و آسایش رانندگان دارد. بارهای ترافیکی، شرایط محیطی و مصالح نامرغوب از جمله عواملی هستند که باعث ایجاد آسیب‌هایی مانند خستگی، شیار و غیره به روسازی می‌شوند. ترک خوردگی خستگی یا ترک خوردگی تماس یکی از آسیب‌های عمده‌ای است که عملکرد روسازی را کاهش می‌دهد. این نوع ترک از لایه‌های زیرین آسفالت که تنش یا کرنش

بسیاری از محققین روسازی به این نتیجه رسیدند که به اصلاح معیارها برای مقاومت در برابر خرابی‌ها نیاز است. مواد افزودنی متعددی از جمله خرده لاستیک، استایرن-بوتادین-استایرن، الاستومر پلی الفین، پلی پروپیلن، لاستیک استایرن-بوتادین، پلی اتیلن و نانومواد [مانند نانو فیبر کربن و نانو خاک رس برای بهبود رفتار قیر مورد استفاده قرار گرفتند. چندین محقق روسازی نشان داده‌اند که استفاده از پلیمر برای اصلاح قیر باعث افزایش مقاومت در برابر خستگی و شیارشدگی، ترک‌خوردگی حرارتی، مقاومت در برابر رطوبت و آسیب‌پذیری دمایی پایین‌تر می‌شود. در بین پلیمرهای ذکر شده، لاستیک استایرن بوتادین (SBR) معمولاً در صنعت روسازی استفاده می‌شود (Yidirim, 2007; Zhang et al, 2007; Ibrahim et al, 2005; Wang et al, ۲۰۱۷).

SBR یکی از افزودنی‌های مفید و موثر برای اصلاح قیرهای پایه است. چندین تحقیق نشان داد که استفاده از SBR باعث بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی می‌شود. بر اساس مروری بر ادبیات، استفاده از SBR منجر به افزایش عملکرد در دمای پایین، بازیابی الاستیک، و عملکرد چسبندگی و چسبندگی قیر به سنگ‌دانه‌ها و افزایش ویسکوزیته شد. با این وجود، در کنار مزایای ذکر شده استفاده از SBR، عملکرد در دمای بالا و پایداری ذخیره سازی قیرهای اصلاح شده SBR به دلیل بارگذاری زیاد ترافیک در مناطق آب و هوای گرم بد است که استفاده از این افزودنی را در چنین مناطقی محدود می‌کند (Lo et al, 2013; Vargas et al, 2012; Yuan et al, 2005).

یک اصلاح کننده مفید باید عملکرد قیر را در مقابل یک سری خرابی‌ها افزایش دهد. بر اساس ادبیات، یک اصلاح کننده قادر به بهبود همه عملکرد روسازی‌ها نیست. بنابراین، اصلاح قیر با بیش از یک اصلاح کننده ضروری است، که ممکن است به دلیل فعل و انفعالات متعدد، چندین بهبود عملکرد را به دست آورد. بنابراین در مطالعه حاضر اصلاح قیر توسط SBR و نانورس مورد ارزیابی قرار گرفت. زارع شارا بادی و همکاران (Zare-Shahabadi et al, 2010) عملکرد ترک خوردگی و شیار شدن در دمای پایین مخلوط‌های حاوی PPA و SBR را ارزیابی کرد. نتایج نشان داد که استفاده از ۱٪ PPA⁷ و SBR منجر به افزایش استحکام شیارشدگی مخلوط شد. در حالی که ۱٪ از

موثر بر عمر خستگی عبارتند از: نوع چسب آسفالت، سطح کرنش، دما، فرکانس بارگذاری، تعداد چرخه‌های بارگذاری و دوره‌های استراحت. هنگامی که روسازی تحت تنش دوره‌ای قرار می‌گیرد، واکنش مصالح به تنش و کشش از سه جزء اصلی کرنش تشکیل می‌شود: الاستیک، ویسکوالاستیک و پلاستیک. کرنش‌های پلاستیکی کششی باعث خستگی و در نتیجه آسیب به روسازی می‌شود (Babagoli et al, 2017). افزودنی‌های پلیمری نتایج موفقیت آمیزی را به عنوان اصلاح کننده قیر و مخلوط آسفالت نشان داده‌اند. عملکرد اصلی آنها بهبود خواص فیزیکی، شیمیایی و رئولوژیکی قیر است. از رایج‌ترین پلیمرهای مورد استفاده در فناوری راهسازی می‌توان به استایرن-بوتادین تایر، استایرن-بوتادین-لاستیک، اتیلن وینیل استات و پلی اتیلن اشاره کرد. اکثر پلیمرها می‌توانند مقاومت در برابر خستگی، شیار شدن، ترک‌های حرارتی و حساسیت به رطوبت را در مخلوط‌های آسفالتی افزایش دهند. عملکرد مواد افزودنی در بایندر آسفالت به میزان پراکندگی آنها در بایندر آسفالت بستگی دارد. لاستیک استایرن بوتادین (SBR) از گروه الاستومر نیز می‌تواند خواص کشسانی و انعطاف پذیری آسفالت را افزایش دهد. این لاستیک باعث افزایش ویسکوزیته بایندر آسفالت و استحکام شیار شدن مخلوط می‌شود و با ایجاد خاصیت کشسانی و چسبندگی در بایندر آسفالت، مقاومت در برابر خستگی و ترک‌های حرارتی و آسیب رطوبتی را نیز افزایش می‌دهد. SBS یک پلیمر الاستوپلاستومری است که می‌تواند عملکرد دینامیکی آسفالت را در برابر بار بهبود بخشد. برخی تحقیقات نشان می‌دهد که حدود ۵ درصد از این پلیمر در بایندر آسفالت باعث عمر خستگی خوبی می‌شود. با این حال، سازگاری ضعیف این پلیمر با بایندر آسفالت و در نتیجه ناپایداری آن در بایندر آسفالت، نگرانی‌هایی را برای استفاده از آن در روسازی ایجاد می‌کند. اگرچه مطالعات زیادی در مورد کاربرد پلیمر در آسفالت انجام شده است، اما هیچ پلیمری نتوانسته است مشکلات مخلوط آسفالت را به طور کامل حل کند. علاوه بر این، قیمت‌های بالای برخی از پلیمرها و برخی محدودیت‌های آنها از دیگر عواملی است که منجر به تحقیق در مورد جایگزین‌هایی مانند مخلوط های پلیمری شده است (King et al, 2002).

مخلوط آسفالت از دو ماده اصلی تشکیل شده است. سنگدانه‌های طبیعی و قیر. تهیه سنگدانه‌های طبیعی از کوه‌ها و رودخانه‌ها معمول است. برای جلوگیری از تخریب طبیعت، مواد جدیدی مانند سرباره فولاد پیشنهاد شد. سرباره فولاد بر روی فرآیند تولید فولاد در صنعت فولاد ساخته می‌شود. در ایران و همچنین در سرتاسر جهان کارخانه‌های متعددی وجود دارد که فولاد تولید می‌کنند. سرباره فولاد مواد زائدی است که در یک کارخانه فولاد که منطقه وسیعی را اشغال کرده است، ته‌نشین می‌شود.

در نتیجه، انتشارات مضر ایجاد می‌کند که منجر به آلودگی محیط زیست می‌شود. بنابراین در این مطالعه استفاده از سرباره فولاد در مخلوط SMA حاوی نانوکامپوزیت قابل توجه است که منجر به استفاده از مواد زائد صنعتی می‌شود. هدف کار حاضر بررسی تأثیر نانورس و SBR بر عملکرد مخلوط SMA است. اثر افزودنی‌های مذکور بر روی قیر از طریق یک سری آزمایش‌های معمولی مانند: شکل‌پذیری، درجه نفوذ، نقطه نرم شدن، مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین برای بررسی ویژگی‌های نمونه‌ها، آزمون‌های Mr، ITS، مسیر چرخ، FPB و خزش دینامیکی برای ارزیابی ویژگی‌های نمونه‌های مختلف SMA انجام شد.

PPA تأثیر نامطلوبی بر عملکرد نمونه‌ها در دمای پایین دارد. همچنین، نتایج نشان داد که اصلاح قیر توسط PPA/SBR بهترین اثر را بر عملکرد شیارشدن نمونه‌ها دارد. در مطالعه‌ای که توسط جهرمی و همکاران انجام شد. اثر نانورس نانوفیل-۱۵ و کلوزیت-۱۱۵ بر عملکرد رئولوژیکی قیر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از نانورس باعث افزایش خواص چسب اصلی می‌شود. زارع شاه آبادی و همکاران. اثر خاک رس بنتونیت و بنتونیت اصلاح شده ارگانیک بر عملکرد رئولوژیکی قیر را بررسی کرد (Jahromi et al, 2009). در پژوهشی دیگر، گوه و همکاران. تأثیر افزودنی‌های شیمیایی رطوبت و یخ‌زدایی بر عملکرد قیر حاوی نانورس را ارزیابی کرد. نتایج نشان داد که مقاومت در برابر رطوبت مخلوط‌ها با افزودن اصلاح‌کننده‌ها افزایش می‌یابد (Goh et al, 2011). در مطالعه‌ای که توسط عاملی و همکاران انجام شد (Ameli et al, 2020) اثر نانورس بر عملکرد شیارشدن بایندها و مخلوط‌های حاوی SBS و فیبر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مخلوط اصلاح شده با ۳ درصد نانورس و ۵ درصد SBS بهترین عملکرد را دارد. همچنین مخلوط‌های حاوی SBS عملکرد بهتری نسبت به مخلوط‌های اصلاح شده فیبر دارند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد استفاده شده

۲-۱-۱- مصالح

حداکثر اندازه اسمی سنگدانه ۱۲ میلی‌متر انتخاب شد و درجه‌بندی سنگدانه در شکل ۱ نشان داده شده است. میکروسکوپ الکترونی روبشی برای ارزیابی بافت سطحی هر سنگدانه استفاده شد. سنگ آهک و سنگدانه‌های سرباره فولادی به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است.

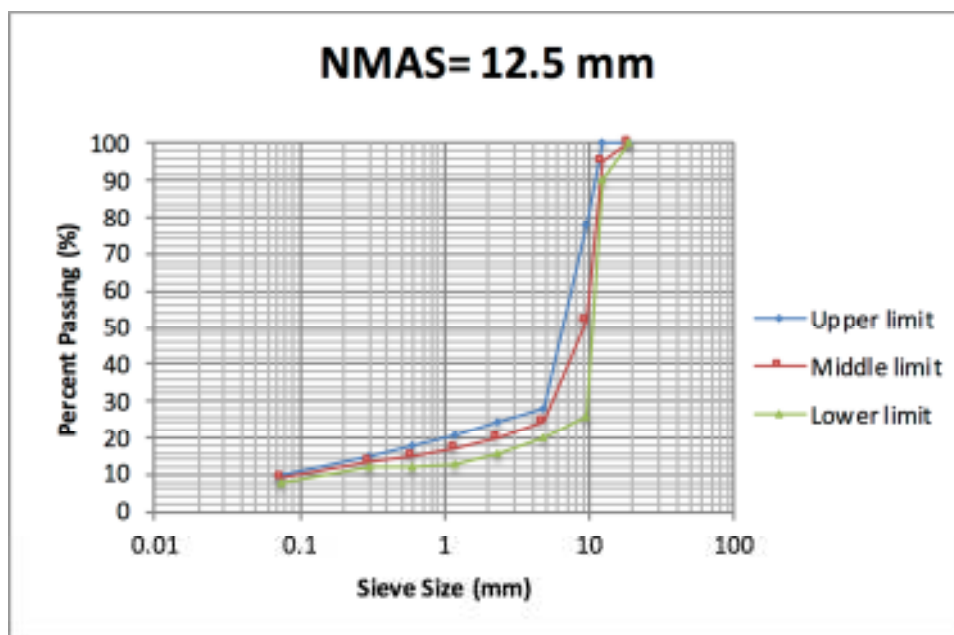
برای تهیه نمونه‌ها از سنگدانه‌های سنگ آهک و سرباره فولادی استفاده شد. از سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی استفاده شد که از شرکت فولادسازی اهواز تامین شد. خواص فیزیکی سنگدانه در جدول ۱ آمده است. همچنین جدول ۲ خواص شیمیایی سنگدانه‌های مورد استفاده را نشان می‌دهد.

جدول ۱. خصوصیات مصالح سنگی

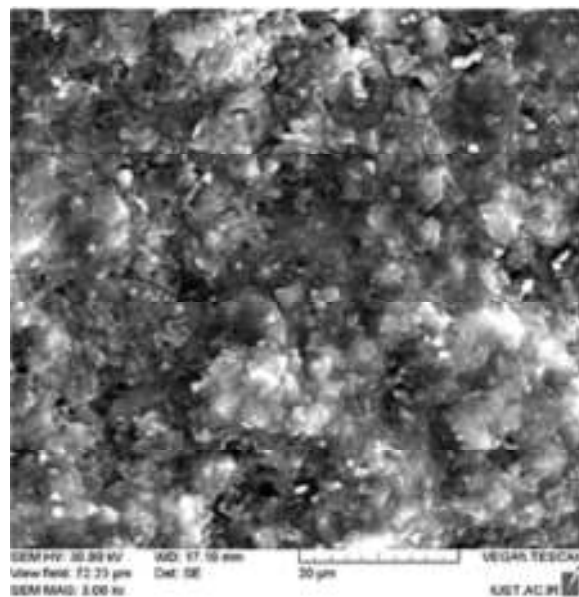
آزمایشات سنگ	نتایج	استاندارد
وزن مخصوص حقیقی	۲/۴۹۳	ASTM C127
(%) سایش مصالح درشت دانه	۲/۲	ASTM C127
(%) سایش مصالح ریزدانه	۴/۲	ASTM C128
(%) سایش لس آنجلس	۲۲/۳	AASHTO T96
(%) درصد شکستگی در دو وجهه	۹۴	ASTM D5821

جدول ۲. خصوصیات شیمیایی مصالح

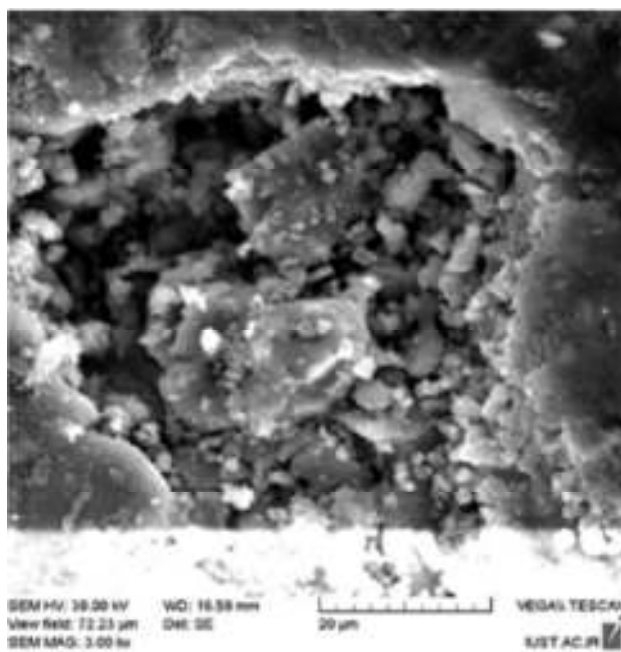
نوع	درصد اکسید (%)							
	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SiO ₂	MnO
مصالح آهکی	43	0.07	0.65	2.12	0.95	0.75	17.53	0.046



شکل ۱. دانه بندی مصالح سنگی



شکل ۲. بافت سطحی سنگ آهک



شکل ۳. بافت سطحی استیل اسلگ

۲-۱-۲- قیر

دو نوع قیر AC-60/70 و AC-85/100 شد و ویژگی‌های قیر پایه در جدول ۳ ارایه شده است.

جدول ۳. خصوصیات قیر

آزمایش	استاندارد	واحد	نتایج	
			۶۰/۷۰	۸۵/۱۰۰
گرم ۱۰۰ ۲۵ درجه سانتی‌گراد درجه نفوذ	ASTM D5	۰/۱ میلی‌متر	۶۷	۹۵
نقطه نرمی	ASTM D36	سانتی‌گراد	۴۷	۴۵
۲۵ درجه سانتی‌گراد در شکل پذیری	ASTM D113	سانتی‌متر	۱۰۰	+۱۰۰
نقطه اشتعال	ASTM D92	سانتی‌گراد	۳۰۴	۲۷۰
نقطه اشتعال	ASTM D70	سانتی‌گراد	۳۱۷	۲۸۴
وزن مخصوص در ۲۵ درجه سانتی‌گراد	ASTM D70	گرم بر سانتی متر مکعب	۱/۰۴۵	۱/۰۱۴۲

۲-۱-۳- پلیمر

SBR از پالایشگاه نفت پاسارگاد داده شده و خواص آن در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴. خصوصیات SBR

Property	Results
Styrene Content (%)	22.5–24.5
Organic Acid (%)	2.8
Tensile Strength (MPa)	24.5
Elongation at Break (%)	>350
Ash (%)	0.2
Density (gr/cm ³)	0.98

۲-۱-۴- نانورس

در این تحقیق از نانورس مونت موریلونیت استفاده شده است. مشخصات نانورس استفاده شده در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵. مشخصات فیزیکی نانورس مورد استفاده

Particle size	Color	Density	Moisture content	Specific surface area
1-2 nm	Pale yellow	0.5 – 0.7 gr/cm ³	1-2 %	220-270 m ² /gr

۲-۱-۵-فیبر

همانطور که گزارش شماره ۴۲۵ [۲۷] روسازی بزرگراه تحقیقات ملی تعاونی (NCHRP) پیشنهاد می‌کند، با استفاده از ۰,۳ درصد فیبر سلولز به روش خشک برای مخلوط، تخلیه قیر رخ نمی‌دهد. خواص فیبر استفاده شده در جدول ۶ نشان داده شده است.

جدول ۶. خصوصیات فیبر

نتایج	خصوصیات
۸۰	درصد سلولز (درصد)
۱/۱	میانگین طول فیبر (میلی‌متر)
۰/۰۴۵	میانگین ضخامت (میلی‌متر)
۷/۵	(۵ گرم در ۱۰۰ میل) مقدار PH
۰/۵	وزن مخصوص (گرم بر سانتی متر مکعب)

۲-۲-آماده سازی نمونه

به مدت ۴۰ دقیقه با استفاده از سرعت برشی بالای مخلوط کن ۴۰۰۰ دور در دقیقه مخلوط شد. پس از این مراحل، قیرهای اصلاح شده NC/SBR ساخته شدند. جدول ۷ شناسایی نمونه قیرهای اصلاح شده را نشان می‌دهد. گزارش NCHRP شماره ۴۲۵ برای طراحی مخلوطها استفاده شد. بر اساس طرح اختلاط مخلوطها، ۷,۵ درصد بایندر به‌عنوان چسبنده بهینه تعیین شد. در تحقیقات فعلی برای هر نوع افزودنی با درصدهای مختلف، سه تکرار ساخته شد.

برای ساخت قیرهای اصلاح شده از میکسر برش بالا استفاده شد. ابتدا قیر اصلی در یک ظرف خاص تا دمای ۱۶۰ درجه سانتیگراد حرارت داده شد. سپس (SBR صفر٪، ۰,۲٪، ۰,۴٪، ۰,۶٪، ۰,۸٪ و ۱,۰٪ وزنی آسفالت اصلی) به تدریج اضافه شد و به مدت ۶۰ دقیقه با استفاده از میکسر برش بالا در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت ۵۰۰۰ مخلوط شد. دور در دقیقه پس از آن، مقدار مشخصی NC (صفر، ۰، ۱، ۲، ۳، ۴ درصد و ۵ درصد وزنی قیر) به قیر اصلاح شده SBR اضافه شد. سپس قیر SBR/NC تا دمای ۱۶۰ درجه سانتیگراد حرارت داده شد و

جدول ۷. کد گذاری نمونه‌های مختلف

No	Virgin Binder	NC	SBR	Sample ID
1		0	0	AN0S0
2		1	2	AN1S2
3	60-70 (A)	2	4	AN2S4
4		3	6	AN3S6
5		4	8	AN4S8
6		5	10	AN5S10
7		0	0	BN0S0
8		1	2	BN1S2
9	85-100 (B)	2	4	BN2S4
10		3	6	BN3S6
11		4	8	BN4S8
12		5	10	BN5S10

۳- برنامه آزمایشی

۳-۱- آزمایش قیر

آزمایش‌های شکل‌پذیری، نقطه نرمی و نفوذ برای بررسی خواص فیزیکی قیرهای مختلف اجرا شد. همچنین، آزمون‌های ویسکوزیته دورانی، رئومتر برشی دینامیکی (DSR) اجرا شد.

۳-۲- آزمون عملکرد

۳-۲-۱- تست ITS

استحکام کششی مخلوط یکی از ویژگی‌های مهم روسازی است که با آزمون ITS قابل اندازه‌گیری است. در بیشتر موارد، تست ITS برای بررسی آسیب آب نمونه‌ها اجرا شد. بر اساس ASTM D6931-12، تست ITS در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. ITS مخلوط‌ها بر اساس رابطه (۲) به دست آمد:

$$ITS = \frac{P_{max}}{2P} \pi D t \quad (2)$$

ITS به مقاومت کششی غیر مستقیم مخلوط (کیلوپاسکال) اشاره دارد. P_{max} نشان دهنده حداکثر بار (کیلونیوتن) است. D قطر نمونه‌ها (میلی متر) را نشان می‌دهد. t به ضخامت نمونه‌ها (میلی متر) اشاره دارد.

۳-۲-۲- مدول ارتجاعی

M_r مخلوط‌ها بر اساس ASTM D 4123 محاسبه شد. همه مخلوط‌ها به دو مجموعه تقسیم شدند. یک مجموعه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد خشک ماند و مجموعه دوم از نمونه‌ها در آب بر اساس AASTHO T283 بیرون آمدند و به عنوان نمونه‌های شرطی نامیده می‌شوند. سپس آزمون مدول ارتجاعی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد با اعمال پالس بار Haversine در ۱ هرتز با زمان بارگذاری ۰,۱ ثانیه و زمان تخلیه ۰,۹ ثانیه اجرا شد. در نهایت پارامتر RMR که به نسبت M_r نمونه‌های شرطی شده به M_r نمونه‌های شرطی نشده ارجاع داده شد، تعیین شد. مقدار RMR 80% به عنوان حداقل مقدار کافی مشخص شد:

$$Mr = (P(v+0.2734))/\delta t \quad (3)$$

P به حداکثر بار اعمال شده (نیوتن) اشاره دارد.

v = نسبت پواسون؛

t = طول نمونه (میلی متر)

δ = تغییر شکل قابل بازیابی افقی (میلی متر)

۳-۲-۳- تست خزش دینامیکی

در کار فعلی، استاندارد US.NCHRP 9-19 برای بررسی استحکام مخلوط‌ها در مقابل شیارشدن از طریق آزمایش‌های خزش دینامیکی مورد استفاده قرار گرفت. سطح تنش ۴۵۰ کیلو پاسکال با بارگذاری ۰,۱ ثانیه و زمان استراحت ۰,۹ ثانیه استفاده شد. آزمایش در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد.

۳-۲-۴- تست شیار چرخ

برای اندازه‌گیری پتانسیل تغییر شکل دائمی SMA، آزمایش مسیر چرخ بر اساس استاندارد AASHTO T-324 در ۵۰ درجه سانتی‌گراد اجرا شد.

۳-۲-۵- تست FPB

به منظور بررسی رفتار خستگی نمونه‌ها، آزمایش خستگی تیر خمشی چهار نقطه‌ای بر اساس AASHTO T321-07 انجام شد. نمونه‌ها در فرکانس ۱۰ هرتز آزمایش شدند. سفتی خمشی بر اساس معادلات زیر به دست آمد:

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

$$\sigma = G_0 P / Bh^2 \quad (9)$$

$$S = 1000\sigma / \varepsilon \quad (10)$$

رجوع به حداکثر ریز کرنش شود.
 به حداکثر جابجایی در وسط تیر (میلی‌متر) مراجعه کنید.
 h طول پرتو (میلی‌متر) را نشان می‌دهد.
 بیرونی (۳۵۵,۵ میلی‌متر) را نشان می‌دهد.
 طول داخلی گیج (۱۱۸,۵ میلی‌متر) را نشان می‌دهد.
 حداکثر تنش کششی (کیلو پاسکال) را نشان می‌دهد.
 P به حداکثر بار (کیلونیوتن) اشاره دارد.
 B به عرض تیر (میلی‌متر) اشاره کنید
 S به سفتی خمشی (مگاپاسکال) اشاره دارد.
 از رابطه (۱۱) برای اندازه‌گیری عمر خستگی نمونه‌ها استفاده شد:

$$N_f = a\varepsilon^{-b} \quad (11)$$

عمر خستگی نمونه‌ها است.
 سطوح میکرو سوبیه‌ها اعمال می‌شود.
 a و b ضرایب هستند.

معادلات ۱۲ و ۱۳ به ترتیب برای اندازه‌گیری انرژی تلف شده و انرژی تلف شده انباشته در هر چرخه بارگذاری استفاده شد.

$$D = \pi\sigma\varepsilon \sin(360f \varphi) \quad (12)$$

جایی که به انرژی تلف شده (J/m³) مراجعه کنید، فرکانس بارگذاری (هرتز) را نشان می‌دهد، بازه زمانی (ثانیه) را نشان می‌دهد.

$$W = \sum_{i=1}^{i=n} D_i \quad (13)$$

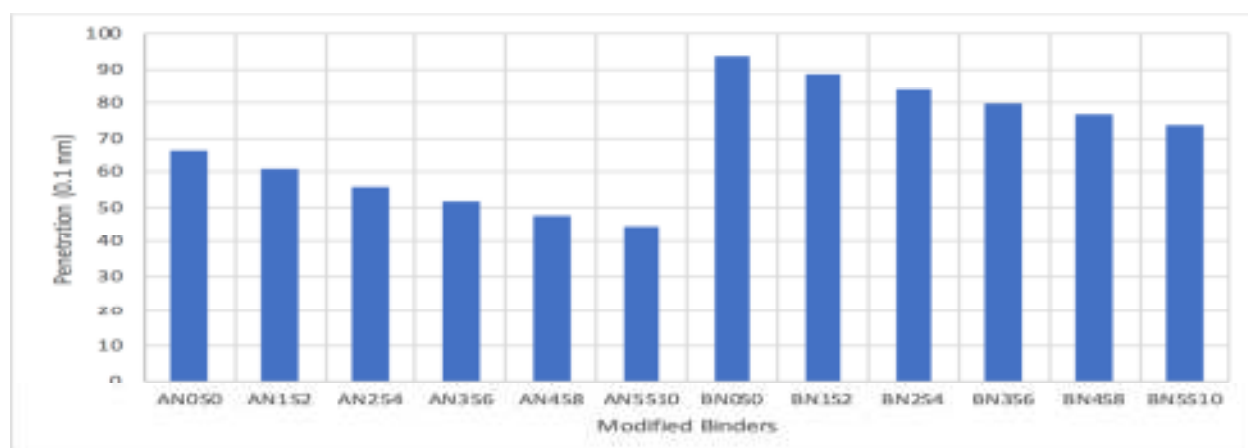
رجوع به انرژی تلف شده جمعی (J/m³) شود و انرژی تلف شده را برای هر چرخه بار نشان می‌دهد.

۴- نتایج

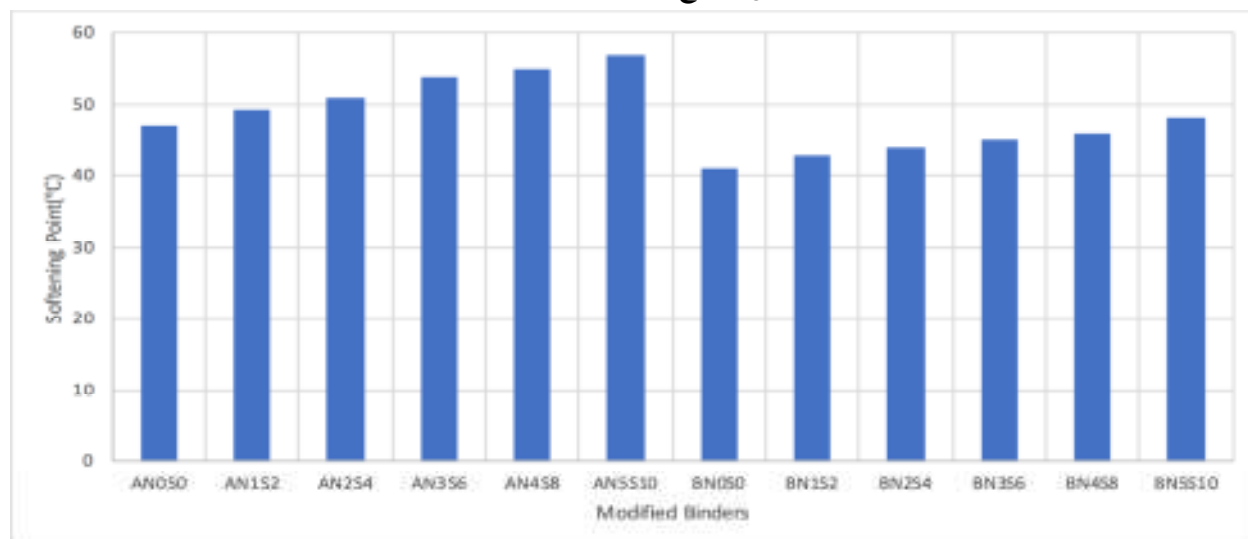
۴-۱- نتایج آزمایش قیر

نتایج، درجه نفوذ نمونه‌های با قیر اصلی ۸۵-۱۰۰ بیشتر از نمونه‌های با قیر ۷۰-۶۰ است. نتایج نشان داد که مقادیر نفوذ قیرها با استفاده از NC/SBR کاهش می‌یابد. با افزایش درصد NC/SBR، درجه نفوذ کاهش می‌یابد و نقطه نرم شدن افزایش می‌یابد. قیرهایی با نقطه نرمی بالاتر مقاومت بیشتری در برابر حساسیت دما دارند. با توجه به نتایج، با استفاده از اصلاح‌کننده‌ها، چسب‌ها سفت‌تر شده و در نتیجه، استحکام مخلوط‌ها در برابر تغییر شکل دائمی افزایش می‌یابد.

شکل ۴ و ۵ نتایج آزمایشات قیر فیزیکی قیرهای اصلی و اصلاح شده را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، استفاده از NC/SBR منجر به کاهش درجه نفوذ قیر شد، در حالی که نقطه نرمی قیرها را افزایش داد، که ممکن است به سفت شدن قیر با استفاده از NC/SBR نسبت داده شود. بخش آسفالتین قیر با جذب فاز مالتن با افزودن نانوکامپوزیت بهبود یافت. علاوه بر این، سفتی نانوکامپوزیت با افزودن نانورس که سفتی بالایی دارد افزایش یافته و در نتیجه سفتی قیر افزایش یافته است. با توجه به



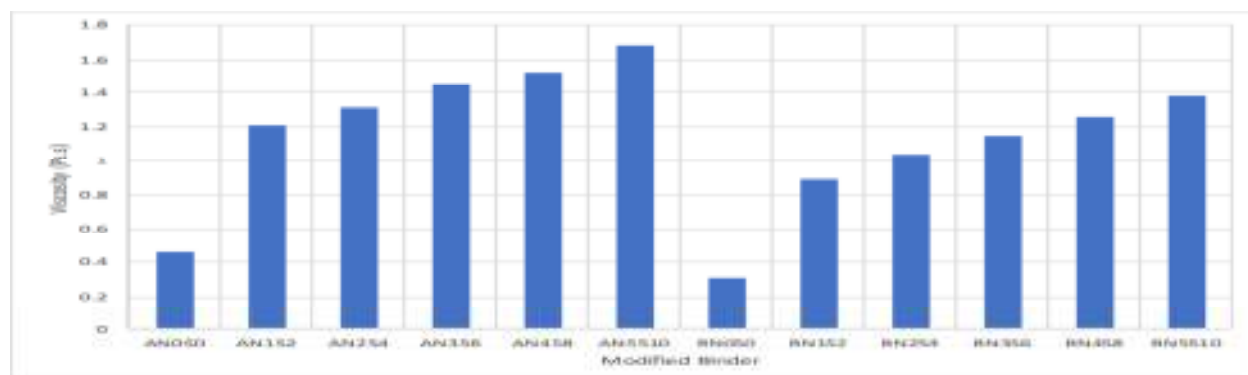
شکل ۴. نتایج آزمایش درجه نفوذ قیر



شکل ۵. نتایج آزمایش نقطه نرمی

ترکیبات روغنی فاز مالتن افزایش یافت که منجر به سفت شدن قیر شد. برای بررسی حساسیت دمایی قیرها، مقدار حساسیت دمایی ویسکوزیته (VTS) اندازه‌گیری شد. همانطور که در جدول ۸ و شکل ۷ نشان داده شده است، استفاده از NC/SBR باعث کاهش ارزش VTS قیرهای تمیز می‌شود. علاوه بر این، نتایج VTS در جدول ۸ نشان داد که استفاده از NC/SBR باعث کاهش VTS در ۸۰-۱۴۰ درجه سانتیگراد می‌شود. با کاهش مقادیر VTS، مقاومت قیرها در برابر تغییرات دمایی افزایش می‌یابد. در نتیجه، عملکرد شیار شدن قیر بهبود می‌یابد.

همچنین، نتایج ویسکوزیته قیرها در شکل ۶ نشان داد که استفاده از NC/SBR باعث افزایش ویسکوزیته نمونه‌ها می‌شود. نمونه AN5S10 بالاترین ویسکوزیته را بین نمونه‌های مختلف دارد. در بین نمونه‌ها، قیرهای اصلاح شده توسط قیر ۷۰-۶۰ ویسکوزیته بالاتری نسبت به قیرهای اصلاح شده ۸۵-۱۰۰ دارند. بر اساس نتایج، با افزایش درصد NC/SBR، مقادیر ویسکوزیته افزایش می‌یابد. بخش آسفالتین قیر با جذب فاز مالتن با افزودن نانوکامپوزیت بهبود یافت. علاوه بر این، سفتی نانوکامپوزیت با افزودن نانورس که سفتی بالایی دارد افزایش یافته و در نتیجه سفتی قیر افزایش یافته است. سفتی و ویسکوزیته قیر با کاهش



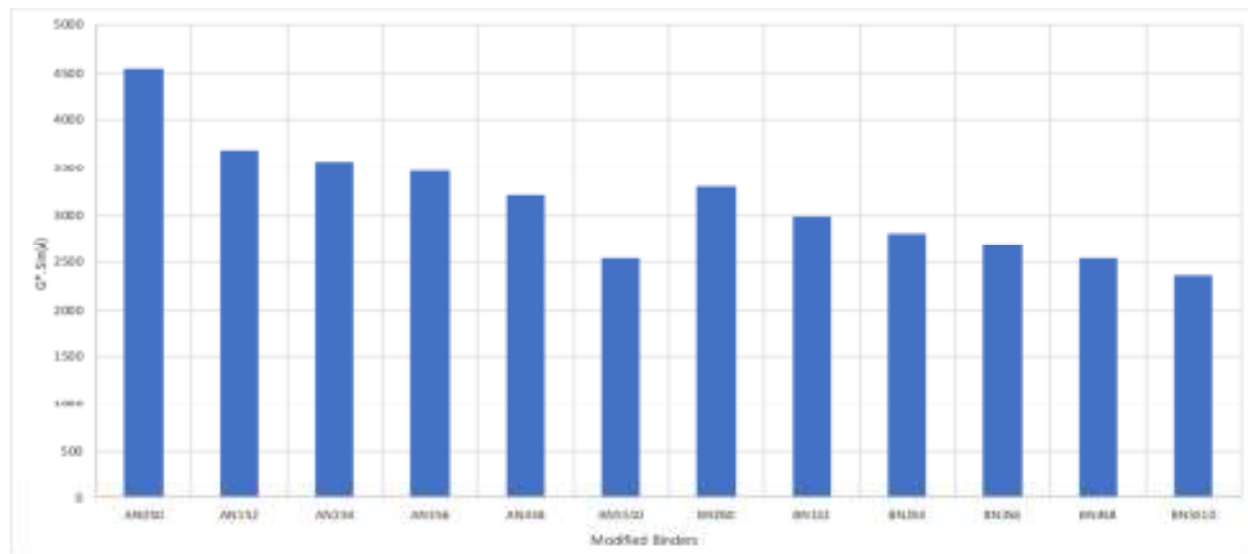
شکل ۶. نتایج ویسکوزیته قیر

جدول ۸. مقادیر حساسیت دمایی ویسکوزیته (VTS) چسباننده‌های مختلف

Additive	Log Temperature				
	80	90	110	130	140
AN0S0	4.15	3.58	3.1	2.65	2.41
AN1S2	4.1	3.51	3.04	2.61	2.38
AN2S4	4.08	3.49	3	2.58	2.34
AN3S6	4.06	3.46	2.99	2.56	2.32
AN4S8	4.04	3.36	2.95	2.51	2.3
AN5S10	4	3.31	2.93	2.45	2.2
BN0S0	3.94	3.42	3.02	2.43	2.16
BN1S2	3.91	3.32	2.94	2.34	2.15
BN2S4	3.85	3.28	2.89	2.31	2.12
BN3S6	3.81	3.19	2.81	2.2	2.1
BN4S8	3.79	3.16	2.71	2.15	2.04
BN5S10	3.76	3.15	2.6	2.11	1.9

همانطور که نتایج در شکل ۸ نشان می‌دهد، استفاده از NC/SBR برای قیر اصلی منجر به افزایش رفتار خستگی قیر می‌شود. علاوه بر این، استفاده از NC/SBR برای قیرهای اصلاح شده منجر به افزایش رفتار خستگی قیر می‌شود.

همچنین با پیشنهاد سیستم درجه عملکرد (PG)، قیر با پارامتر $G^* \sin \delta$ کمتر، مقاومت بهتری در برابر ترک خوردگی خستگی دارد. همانطور که سیستم PG پیشنهاد کرد، $G^* \sin \delta$ به حداکثر ۵۰۰۰ کیلو پاسکال برای قیر محدود شد، که نشان می‌دهد که قیرها قادر به مقاومت در برابر ترک خوردگی متوسط هستند.



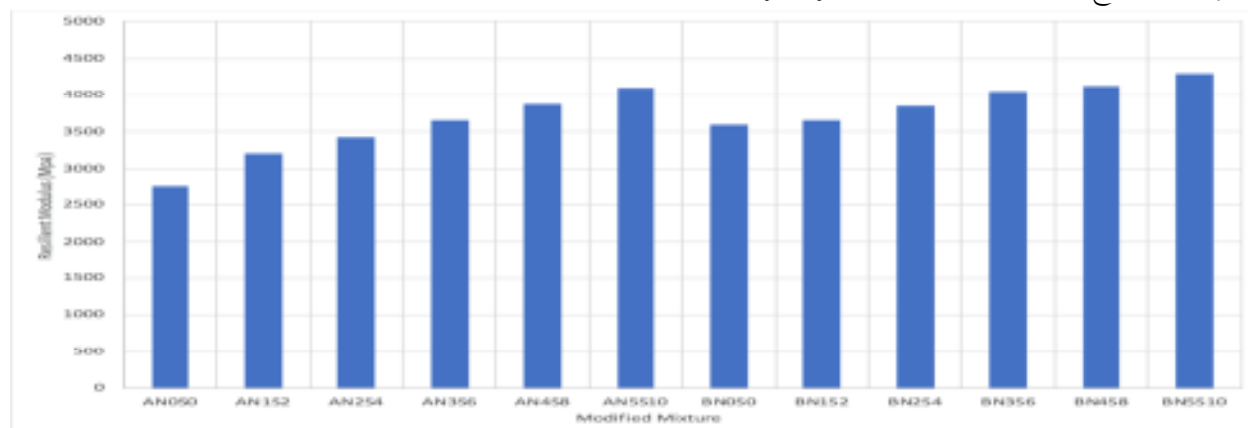
شکل ۸. پارامتر خستگی قیرهای پایه و آسفالت اصلاح شده

۲-۴- نتیجه آزمایش‌های مخلوط

۲-۴-۱- نتیجه آزمون مدول برجهنگی

به مخلوط اصلی هستند. با افزایش درصد نانوکامپوزیت، مقادیر MR افزایش می‌یابد. نتایج نشان داد که مخلوط‌های حاوی ۸۵-۱۰۰ بایندر مدول ارتجاعی بالاتری نسبت به نمونه‌های حاوی ۶۰-۷۰ بایندر دارند.

شکل ۹ مقادیر Mr نمونه‌ها را نشان می‌دهد. نتایج میانگین سه تکرار است. بر اساس نتایج، افزودن افزودنی نانوکامپوزیت باعث افزایش مقادیر Mr. دلیل آن ممکن است به دلیل بهبود سفتی نمونه‌ها با استفاده از افزودنی NC/SBR باشد. علاوه بر این، مخلوط‌های اصلاح شده NC/SBR دارای مقادیر بالاتری نسبت



شکل ۹. نتایج آزمون مدول برجهنگی

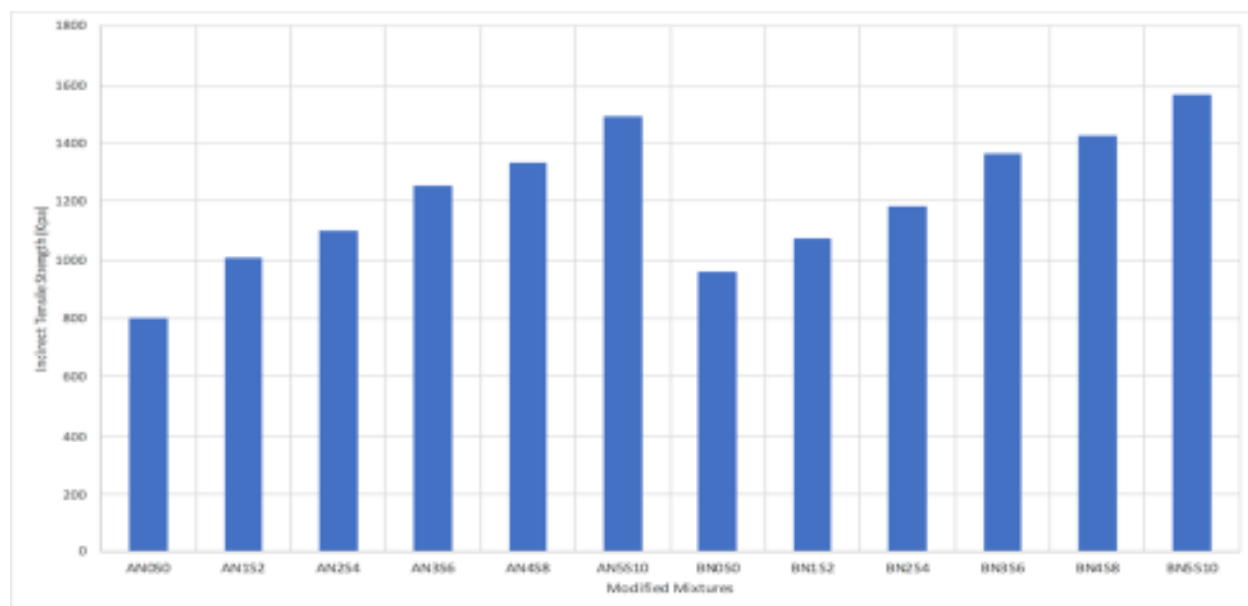
افزودن نانوکامپوزیت بهبود یافت. علاوه بر این، سفتی نانوکامپوزیت با افزودن نانورس که سفتی بالایی دارد افزایش یافته و در نتیجه سفتی بایندر افزایش یافته است. سفتی و ویسکوزیته بایندر با کاهش ترکیبات روغنی فاز مالتن افزایش یافت که منجر به سفت شدن بایندر شد. بر اساس نتایج آزمایش، با افزایش درصد نانوکامپوزیت، مقادیر ITS افزایش یافت.

با اتصال بهتر قیر با سنگدانه، مقادیر ITS مخلوطها بهتر می‌شود. بنابراین، همانطور که از علائم مشاهده می‌شود، با استفاده از نانوکامپوزیت، انسجام و چسبندگی قیر به سنگدانه افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج در شکل ۱۰، نمونه حاوی BN5S10 دارای بالاترین مقادیر ITS در بین نمونه‌های اصلاح شده است.

مدول ارتجاعی AN5S10 و BN5S10 50 و ۱۹٪ بیشتر از نمونه‌های اصلی بود، در حالی که مخلوطهای ANIS2 و BNIS2 به ترتیب تقریباً ۱۶٪ و ۲٪ بیشتر از نمونه اصلی مدول ارتجاعی داشتند.

۴-۲-۲-تست ITS

شکل ۱۰ مقادیر ITS نمونه‌ها را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که مخلوطهای حاوی افزودنی NC/SBR نسبت به نمونه اصلاح نشده، ITS بیشتری داشتند. بر اساس نتایج، استفاده از نانوکامپوزیت باعث افزایش سفتی مخلوطها و در نتیجه افزایش ITS مخلوطها شد. بخش آسفالتین بایندر با جذب فاز مالتن با

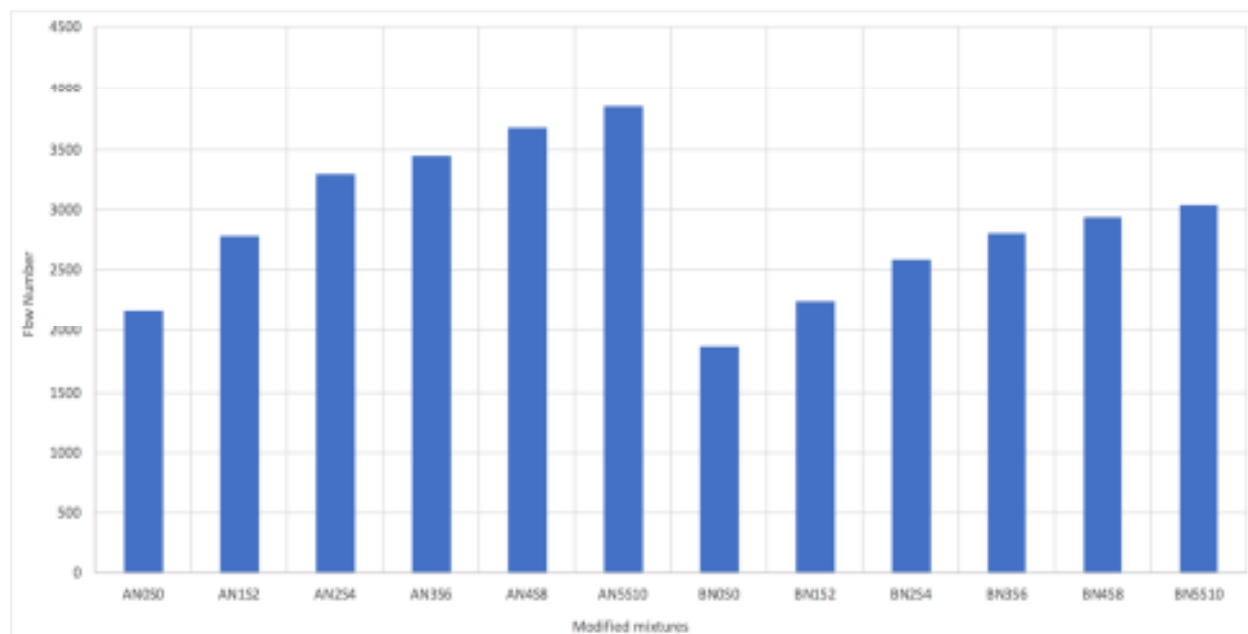


شکل ۱۰. نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم

۴-۲-۳-نتایج FN

شکل دائمی بهبود یابد. بخش آسفالتین بایندر با جذب فاز مالتن با افزودن نانوکامپوزیت بهبود یافت. علاوه بر این، سفتی نانوکامپوزیت با افزودن نانورس که سفتی بالایی دارد افزایش یافته و در نتیجه سفتی بایندر افزایش یافته است. سفتی و ویسکوزیته بایندر با کاهش ترکیبات روغنی فاز مالتن افزایش یافت که منجر به سفت شدن بایندر شد.

FN نمونه‌ها در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مقادیر بالاتر FN نشان دهنده مقاومت بهتر مخلوطها در برابر شیار شدن است. بر اساس نتایج در شکل ۱۱، استفاده از نانوکامپوزیت مقاومت تغییر شکل دائمی نمونه‌ها را افزایش می‌دهد. دلیل آن ممکن است به دلیل سفت شدن مخلوط با استفاده از نانوکامپوزیت باشد و در نتیجه استحکام مخلوط در برابر تغییر



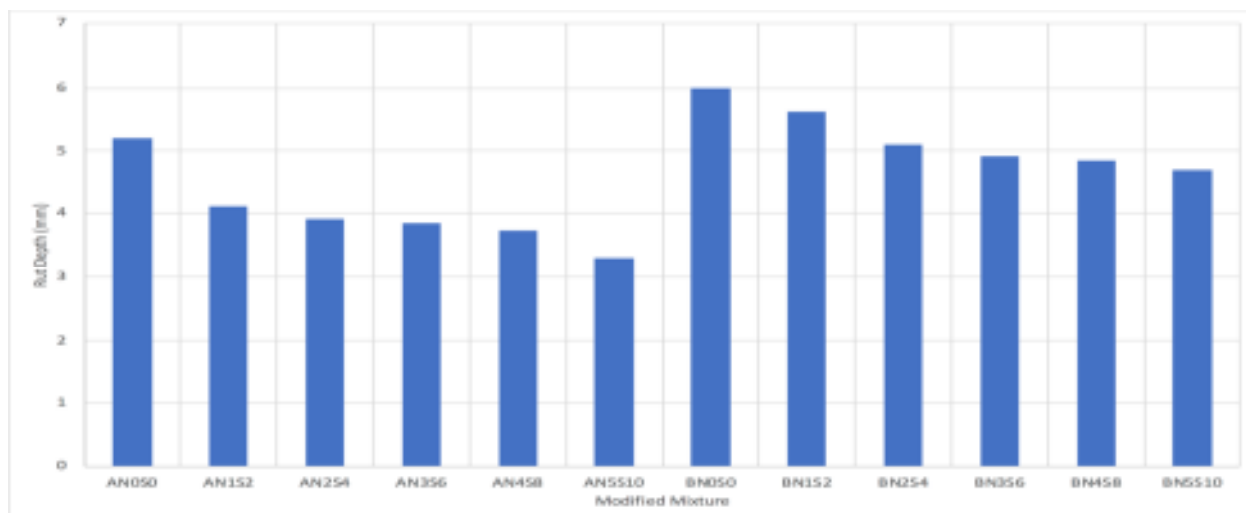
شکل ۱۱. نتایج عدد روانی مخلوط

نانوکامپوزیت، مقاومت مخلوطها در برابر تغییر شکل دائمی افزایش می‌یابد. بخش آسفالتین بایندر با جذب فاز ملتن با افزودن نانوکامپوزیت بهبود یافت. علاوه بر این، سفتی نانوکامپوزیت با افزودن نانورس که سفتی بالایی دارد افزایش یافته و در نتیجه سفتی بایندر افزایش یافته است. سفتی و ویسکوزیته بایندر با کاهش ترکیبات روغنی فاز ملتن افزایش یافت که منجر به سفت شدن بایندر شد. نتایج نشان داد که نمونه‌های شامل ۸۵-۱۰۰ بایندر عمق شیار بالاتری نسبت به مخلوطهای حاوی ۶۰-۷۰ بایندر دارند. بر اساس نتایج، استفاده از افزودنی ۱٪ NC و ۲٪ SBR منجر به افزایش ۲۱٪ تغییر شکل دائمی نمونه‌ها شد. در حالی که استفاده از ۵٪ NC و ۱۰٪ SBR عمق شیار را ۳۶٪ کاهش داد. همچنین استفاده از ۱٪ NC و ۲٪ SBR به ۱۰۰/۸۵ نمونه اصلاح شده، عمق شیار را تا ۶٪ کاهش داد. در حالی که افزودن ۵٪ NC و ۱۰٪ SBR باعث کاهش عمق شیار تا ۲۷٪ شد.

نتایج نشان داد که با افزایش درصد نانوکامپوزیت استفاده شده، مقاومت شیاردار بهتر می‌شود. نتایج نشان داد که نمونه‌ها، از جمله ۸۵-۱۰۰ بایندر، دارای تعداد جریان کمتری نسبت به مخلوطهای حاوی ۶۰-۷۰ بایندر هستند. بر اساس نتایج آزمایش، افزودن ۱٪ NC و ۲٪ افزودنی SBR به بایندر با درجه نفوذ ۷۰/۶۰ باعث افزایش ۲۹٪ FN مخلوطها می‌شود. در حالی که استفاده از ۵٪ NC و ۱۰٪ SBR باعث افزایش ۷۷٪ در FN می‌شود. همچنین افزودن ۱٪ NC و ۲٪ SBR به قیر با درجه نفوذ ۱۰۰/۸۵ باعث افزایش ۲۱٪ FN می‌شود. در حالی که افزودن ۵٪ NC و ۱۰٪ SBR FN را ۶۲٪ افزایش می‌دهد.

۴-۲-۴- نتایج تست مسیر چرخ

عمق شیارهای نمونه‌ها در شکل ۱۲ نشان داده شده است. بر اساس نتایج، نانوکامپوزیت منجر به کاهش عمق شیارگی مخلوطها می‌شود. نانوکامپوزیت انعطاف پذیری مخلوطها را بهبود می‌بخشد. بر اساس نتایج آزمایش، با افزودن محتوای

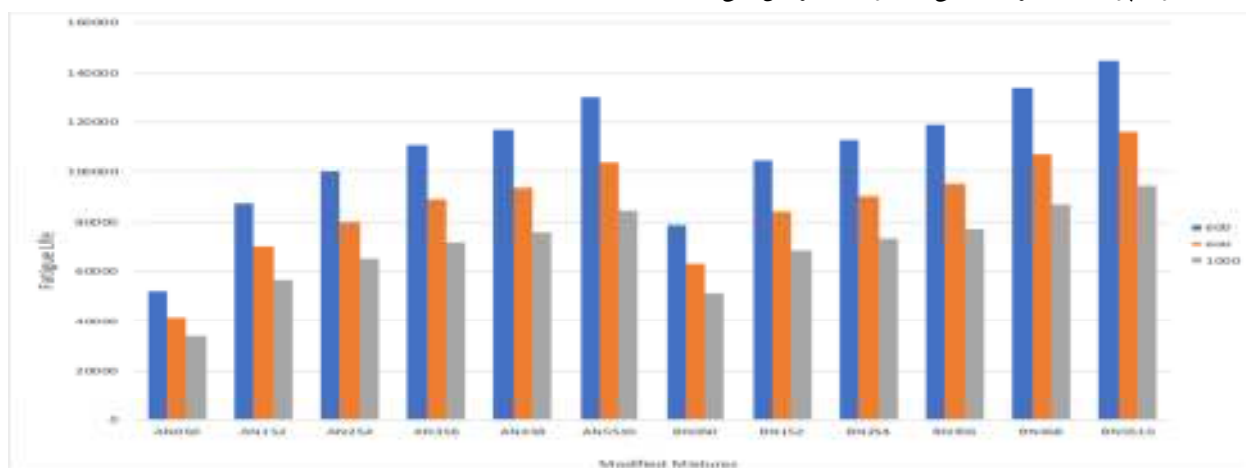


شکل ۱۲. عمق شیار نمونه‌ها

۴-۲-۵-تست FPB

نتایج نشان داد که نمونه‌هایی از جمله بایندر (B) عمر خستگی بالاتری نسبت به مخلوط‌های حاوی بایندر (A) دارند. این می‌تواند به این دلیل باشد که انعطاف پذیری قیر (B) بیشتر از قیر (A) است.

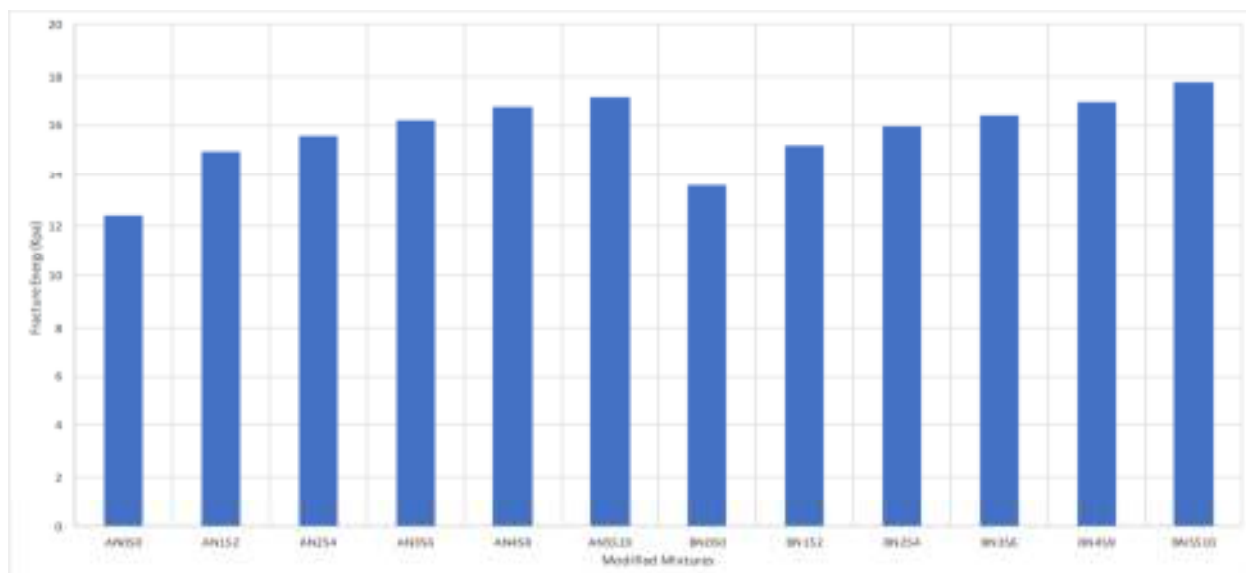
عمر خستگی مخلوط‌های مختلف در شکل ۱۳ نشان داده شده است. با توجه به نتایج، افزودن نانوکامپوزیت عملکرد خستگی نمونه‌ها را افزایش می‌دهد. با توجه به نتایج آزمایش، با افزایش درصد نانوکامپوزیت، عمر خستگی مخلوط‌ها افزایش می‌یابد.



شکل ۱۳. نتایج عمر خستگی نمونه‌ها

می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از افزودنی‌های نانوکامپوزیت، مقادیر FE مخلوط‌ها را افزایش می‌دهد که انرژی مورد نیاز برای شروع ترک در مخلوط افزایش می‌یابد. نتایج Bas نشان می‌دهد که نمونه‌ها، از جمله بایندر (B)، مقادیر FE بالاتری نسبت به مخلوط‌های حاوی بایندر (A) دارند.

مقادیر چگالی انرژی شکست (FE) مخلوط‌های مختلف در شکل ۱۴ نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۴، افزودن افزودنی نانوکامپوزیت باعث افزایش FE می‌شود. دلیل آن می‌تواند افزایش انعطاف‌پذیری نمونه‌ها با استفاده از نانوکامپوزیت باشد. بنابراین انرژی کرنش و مقاومت نمونه‌ها در برابر ترک افزایش



شکل ۱۴. نتایج انرژی شکست نمونه‌ها

۴-۲-۶- تحلیل داده‌ها

قرار گرفتند. نتایج تجزیه و تحلیل ANOVA در جداول ۹ نشان داده شده است. نتایج تایید می‌کنند که SBR و NC تأثیر معنی‌داری بر عمر خستگی، Mr، تعداد جریان، ITS و عمق شیار دارند.

در مطالعه حاضر برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از روش تحلیل واریانس دو عاملی (ANOVA) استفاده شد. مدول ارتجاعی، ITS، عمر خستگی، FN و عمق شیار به عنوان متغیرهای وابسته تعیین شدند. دو عامل ثابت SBR و NC هستند. متغیرهای وابسته به طور قابل توجهی تحت تأثیر چندین ترکیب افزودنی

جدول ۹. آنالیز واریانس عدد روانی در مقابل افزودنی‌ها

Source	DF	Adj. SS	Adj. MS	F-value	P-value
NC	5	64168817	22058773	5585.46	0.000
SBR	5	3653149	1791531	519.82	0.000
Binder type	2	643961	249521	100.4	0.000
Interaction	20	212998	32759	8.64	0.000
Error	15	93249	2961		
Total	35	67038103			

Note: MS, mean square; DF, degrees of freedom; SS, sum of squares

جدول ۱۰. آنالیز واریانس عدد روانی در مقابل افزودنی‌ها

Source	DF	Adj. SS	Adj. MS	F-value	P-value
NC	5	38.6886	12.8944	410.72	0.000
SBR	5	1.3095	0.6248	18.8	0.000
Binder type	2	0.834	0.245	3.45	0.000
Interaction	20	0.1899	0.0320	1.02	0.460
Error	15	0.7668	0.0318		
Total	35	40.9168			

Note: MS, mean square; DF, degrees of freedom; SS, sum of squares.

جدول ۱۱. آنالیز واریانس عمق شیار در مقابل افزودنی‌ها

Source	DF	Adj. SS	Adj. MS	F-value	P-value
NC	5	96889428	32813184	4115.34	0.000
SBR	5	4315842	2218468	272.88	0.000
Binder type	2	2568123	934679	98.23	0.000
Interaction	20	1887692	289976	38.45	0.000
Error	15	191862	8069		
Total	35	101961494			

Note: MS, mean square; DF, degrees of freedom; SS, sum of squares.

جدول ۱۲. آنالیز واریانس مدول برجهندگی در مقابل افزودنی‌ها

Source	DF	Adj. SS	Adj. MS	F-value	P-value
NC	5	57189952	32162451	7593.13	0.000
SBR	5	2673869	1492424	259.31	0.000
Binder type	2	1169384	743769	95.19	0.000
Interaction	20	213289	29975	9.14	0.000
Error	15	93284	3942		
Total	35	64149054			

Note: MS, mean square; DF, degrees of freedom; SS, sum of squares.

جدول ۱۳. آنالیز واریانس کشش غیرمستقیم در مقابل افزودنی‌ها

Source	DF	Adj. SS	Adj. MS	F-value	P-value
NC	5	96829155	328124175	4115.32	0.000
SBR	5	4315802	2218372	273.88	0.000
Binder type	2	3484679	1924812	103185	0.000
Interaction	20	1697293	298592	38.55	0.000
Error	15	191964	254352	25.2	0.000
Total	35	101961494			

Note: MS, mean square; DF, degrees of freedom; SS, sum of squares.

۵- نتیجه گیری

همچنین، با افزودن نانوکامپوزیت به قیر، حساسیت دمایی بایندها کاهش یافت.

با توجه به نتایج آزمایش MSCR، مقدار Jnr بایندها اصلی با استفاده از افزودنی نانوکامپوزیت کاهش می‌یابد. با افزایش درصد نانوکامپوزیت، استحکام بایندها در برابر شیارشدگی افزایش می‌یابد. بخش آسفالتین بایندها با جذب فاز مالتن با افزودن نانوکامپوزیت بهبود یافت. علاوه بر این، سفتی نانوکامپوزیت با افزودن نانورس که سفتی بالایی دارد افزایش یافته و در نتیجه

هدف از این کار بررسی تأثیر نانوکامپوزیت بر عملکرد قیر و مخلوط‌های SMA حاوی سنگدانه‌های سرباره فولادی بود. برای رسیدن به این هدف، تست‌های ITS، Mr، Dynamic Creep و Four Point Beam و Wheel Tracking انجام شد. با توجه به نتایج، می‌توان نتایج زیر را به دست آورد:

-از نتایج نشان می‌دهد که با افزودن محتوای نانوکامپوزیت، عیار نفوذ و نقطه نرمی قیر به ترتیب کاهش و افزایش یافته است.

نانوکامپوزیت با افزودن نانورس که سفتی بالایی دارد افزایش یافته و در نتیجه سفتی بایندر افزایش یافته است. در نتیجه، عملکرد شیاردار افزایش یافت. بر اساس نتایج، مخلوط‌هایی شامل بایندر ۸۵-۱۰۰ نسبت به مخلوط‌های حاوی بایندر ۷۰-۶۰ دارای تعداد جریان کمتری هستند.

با توجه به عمق شیار مخلوط‌ها، نانوکامپوزیت منجر به بهبود مقاومت در برابر شیار شدن مخلوط‌ها شد. بخش آسفالتین بایندر با جذب فاز مالتن با افزودن نانوکامپوزیت بهبود یافت. علاوه بر این، سفتی نانوکامپوزیت با افزودن نانورس که سفتی بالایی دارد افزایش یافته و در نتیجه سفتی بایندر افزایش یافته است. در نتیجه، عملکرد شیاردار افزایش یافت.

بر اساس آزمون FPBF، افزودن نانوکامپوزیت باعث بهبود رفتار خستگی نمونه‌ها می‌شود. با افزایش درصد نانوکامپوزیت، رفتار خستگی مخلوط‌ها افزایش یافت. بر اساس نتایج، مخلوط‌هایی از جمله بایندر (B) در مقایسه با مخلوط‌های حاوی بایندر (A) عمر خستگی بالاتری دارند. این می‌تواند به این دلیل باشد که انعطاف پذیری بایندر (B) از بایندر (A) بیشتر است. افزودن نانوکامپوزیت باعث افزایش FE می‌شود. دلیل آن ممکن است افزایش انعطاف پذیری نمونه‌ها با استفاده از نانوکامپوزیت باشد. بنابراین انرژی کرنش و مقاومت نمونه‌ها در برابر ترک افزایش می‌یابد.

سفتی بایندر افزایش یافته است. در نتیجه، عملکرد شیاردار افزایش یافت.

با توجه به نتایج آزمایش LAS، افزودن مواد افزودنی نانوکامپوزیت باعث بهبود رفتار خستگی بایندر پایه می‌شود. با توجه به نتایج، با افزایش درصد نانوکامپوزیت، عمر خستگی مخلوط‌ها روند صعودی دارد.

بر اساس نتایج آزمون ITS، نتایج ITS نمونه‌های اصلاح شده توسط نانوکامپوزیت بالاتر از نمونه اصلی بود. با افزایش درصد نانوکامپوزیت، ITS مخلوط‌ها افزایش می‌یابد. می‌توان نتیجه گرفت که بخش آسفالتین بایندر با جذب فاز مالتن با افزودن نانوکامپوزیت بهبود یافته است. همچنین با افزودن نانورس که سفتی بالایی دارد، سفتی نانوکامپوزیت افزایش یافت و در نتیجه سفتی مخلوط افزایش یافت.

با توجه به نتایج آزمون Mr، استفاده از نانوکامپوزیت منجر به افزایش Mr شد. دلیل این امر ممکن است به دلیل افزایش انعطاف پذیری نمونه‌ها با استفاده از نانوکامپوزیت باشد. با افزایش درصد NC/SBR، ITS مخلوط افزایش یافت.

با توجه به تست خزش دینامیکی، استفاده از نانوکامپوزیت باعث افزایش خواص شیارشدگی نمونه‌ها می‌شود که می‌تواند به افزایش انعطاف پذیری مخلوط‌ها به دلیل افزودن نانوکامپوزیت نسبت داده شود. بخش آسفالتین بایندر با جذب فاز مالتن با افزودن نانوکامپوزیت بهبود یافت. علاوه بر این، سفتی

۶- پی‌نوشت‌ها

- 1-Styrene-Butadiene Rubber
- 2-Four Point Beam Fatigue Test
- 3-Analysis of Varians
- 4-Nano Clay
- 5-Resilient Modulus
- 6-Indirect Tensile Strength
- 7-Polyphosphoric Acid

۷- مراجع

- pp.888–900.
- 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.
- Yidirim Y., (2007), “Polymer modified asphalt binders. *Constr Build Mater*”, 21(1), pp.66–72.
- Yuan CH, Wang SF, Zhu YQ, Wang HB, Zhang Y., (2012), “Properties of the asphalts modified by typical recycled polyolefin”, *Polym Mater Sci. Eng.*”, pp. 81– 4+9 [in Chinese].
- Zhang, F., Yu., JY., (2010), “The research for high-performance SBR compound modified asphalt. *Constr Build Mater*”, 24(3), 410–8.
- 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.
- Zare-Shahabadi, A. Shokuhfar, S. Ebrahimi-Nejad, (2010), “Preparation and rheological characterization of asphalt binders reinforced with layered silicate nanoparticles, *Constr. Build. Mater.*”, 24 (7), pp.1239–1244.
- Ameli, A., Babagoli, R., Khabooshani, M., AliAsgari, R., & Jalali, F., (2020), “Permanent deformation performance of binders and stone mastic asphalt mixtures modified by SBS/montmorillonite nanocomposite”, *Construction and Building Materials*, 239, 117700.
- Babagoli, R., & Mohammadi, R., (2017), “Laboratory evaluation of the effect of styrene-butadiene-styrene–montmorillonite nanocomposite on rheological behavior of bitumen and performance of stone matrix asphalt mixtures”, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 44(9), pp.736-742.
- Goh. S.W., M. Akin, Z. You, X. Shi, (2011), “Effect of deicing solutions on the tensile strength of micro-or nano-modified asphalt mixture, *Constr. Build. Mater.*”, 25 (1), pp. 195–200.
- 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.*
- Jahromi. S.G., A. Khodaii, (2009), “Effects of Nano clay on rheological properties of bitumen binder, *Constr. Build. Mater.*”, 23 (8), pp.2894–2904.
- King, G., Bishara, S.W., and Fager, G., (2002), “Acid/base chemistry for asphalt modification (with discussion)”, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 71, pp.147–175.
- Lo Presti D, Airey G., (2013), “Tyre rubber-modified bitumen’s development: the effect of varying processing conditions”, *Road Mater Pavement Des.* 14(4),

Evaluation of Performance Properties of Asphalt Mixture Containing SBR & Nanoclay

Amin Farajollahi, Department of Civil Engineering, Malard Branch, Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.

Alireza Ameli, Department of Civil Engineering, Malard Branch, Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.

Farzin Poorheydari Mamaghani, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Malard Branch, Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.

E-mail: AminFarajollahi@gmail.com

Received: September 2022- Accepted: February 2023

ABSTRACT

Nanomaterials have indicated a hopeful capacity in improving the behavior of pavement. As hot mix asphalt is a viscoelastic material, several distresses were occurred during their life time. Furthermore, steel slag was used to enhance the properties of mixture because of its outstanding physical properties. This research evaluated the effect of nanoclay and Styrene Butadiene Rubber (SBR) on performance behavior of bitumen and high and intermediate temperature performance of SMA mixtures containing steel slag aggregate. Through this paper, the AC-60/70 and AC-85/100 penetration grade bitumen's were used as base bitumen. Moreover, SBR (0%, 2%, 4%, 6%, 8% and 10% by weight of binder), and nanoclay (0%, 1%, 2%, 3%, 4%, and 5% by weight of binder) were used as a mixture modifier. For evaluating the performance behavior of bitumen, the rotational viscosity, Dynamic Shear Rheometer (DSR), and Bending Beam Rheometer (BBR), Multiple Stress Creep Recovery (MSCR), and linear Amplitude Sweep (LAS) tests were implemented. Moreover, Resilient Modulus (Mr), Indirect Tensile Strength (ITS), dynamic creep, wheel track, and Four Point Beam Fatigue (FPBF) tests were performed to investigate the performance of mixture samples. To analyze the data statistically, two-factor analysis of variance (ANOVA) is evaluated. The rheological behavior test outcomes showed that the utilization of NC/SBR additive results in an enhancement in the rutting and fatigue resistance of binders. The utilization of NC decreases the low-temperature resistance of binders, while SBR improves the bitumen's low-temperature resistance. Storage stability test outcomes reveal that utilization of NC enhances the storage stability of binders. Also, the application of SBR leads to enhance phase separation. The MSCR test results demonstrate an enhancement in the high-performance temperature of the virgin binder at different stress levels by the addition of NC/SBR. Moreover, the utilization of NS improves the rutting strength of samples. Based on the LAS test outcomes, the utilization of NC/SBR additives improves the fatigue properties of the asphalt binder. The mixture test results reveal that using NC/SBR increases the permanent deformation resistance, MR, ITS, fracture energy, and intermediate temperature properties of specimens.

Keywords: MSCR, Nanoclay, Stone Matrix Asphalt, Styrene-Butadiene Rubber (SBR), LAS