

ارزیابی آزمایشگاهی خصوصیات عملکردی قیر اصلاح شده با پلیمر و افزودنی نیمه گرم

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
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: AminFarajollahi@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۲۳ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۰۵

صفحه ۲۶۶-۲۴۹

چکیده

خواص عملکرد قیرها را می‌توان با استفاده از چندین اصلاح‌کننده، از جمله: پلی فسفریک اسید⁽¹⁾ (PPA)، اصلاح‌کننده‌های مخلوط آسفالت نیمه گرم⁽²⁾ (WMA) و لاستیک استایرن بوتادین⁽³⁾ (SBR) بهبود بخشید. مطالعه حاضر اثر افزودنی‌های PPA و WMA را بر رفتار رئولوژیکی قیرهای اصلاح شده SBR ارزیابی کرد. قیرهای اصلاح‌شده SBR/PPA و SBR/PPA/WMA تحت آزمایش‌های ویسکوزیته چرخشی، رئومتر برشی دینامیکی، آزمایش بازیابی کرنش و خزش تحت تنش چندگانه⁽⁴⁾ (MSCR) و جاروب دامنه خطی⁽⁵⁾ (LAS) قرار گرفتند. بر اساس نتایج آزمایش MSCR در هر دو سطح تنش، اصلاح قیر پایه توسط افزودنی‌های SBR، PPA و WMA سبب بهبود عملکرد تغییر شکل دائمی قیر اصلی می‌شود. نتایج آزمایش LAS نشان داد که استفاده از افزودنی‌های SBR و WMA باعث بهبود عمر خستگی قیر می‌شود. همچنین با افزودن PPA، عمر خستگی قیرهای اصلاح شده SBR افزایش می‌یابد. در حالی که عمر خستگی بیشتر از قیرهای اصلی است. در میان افزودنی‌های گرم، ساسوبیت تأثیر بهتری در افزایش عملکرد قیرها و مخلوط‌ها دارد.

واژه‌های کلیدی: قیر، افزودنی، پلیمر، خستگی

۱-مقدمه

متعددی ثابت شده است که این دو پارامتر فاقد توانایی اندازه‌گیری خواص قیر در رفتار دمای متوسط و بالای قیر بوده و با عملکرد مخلوط ارتباط ضعیفی دارند. تحقیقات روسازی روش آزمایشی جدیدی را برای اندازه‌گیری بهتر خواص شیارشدگی و خستگی قیرها به نام تست‌های MSCR و LAS پیشنهاد کردند. (AASHTO, 2012) 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

خستگی و شیار شدگی دو مشکل اصلی هستند که در روسازی‌ها ایجاد می‌شوند. در سال‌های اخیر، چندین متخصص روسازی سعی در کاهش شدت و میزان این نوع خرابی‌ها دارند. همچنین، تحقیقات زیادی برای پیشنهاد یک عامل رئولوژیکی مرتبط انجام شد که می‌تواند عملکرد خستگی و شیار شدن قیر را دقیقاً ثبت کند. سیستم درجه عملکرد به ترتیب پارامترهای $(G^*/\sin\delta)$ و $(G^* \cdot \sin\delta)$ را برای ارزیابی خواص شیارشدگی و خستگی قیرها پیشنهاد می‌کند. تحقیقات

کردند (Yidirim, 2007; Zhang et al, 2010; Ibrahim et al, 2013; Presti et al, 2013).

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 رواسازی‌ها 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 PPA مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به اینکه استفاده همزمان از SBR و PPA باعث بهبود خواص مخلوط می شود، باعث افزایش ویسکوزیته و دمای اختلاط و تراکم می شود. در تحقیقات قبلی ما بیان شده است که استفاده از افزودنی های گرم مانند نانوتکنولوژی ساسویت، رئوفالت و زایکوترم منجر به کاهش دمای اختلاط و تراکم شده است. به همین دلیل، استفاده از این افزودنی های WMA ضروری و از نظر زیست محیطی پایدار است. بنابراین، ارزیابی خواص رئولوژیکی قیرهای SBR/PPA اصلاح شده توسط افزودنی های گرم ضروری است (Aghapour, Babagoli, 2020). اثر و همکاران (Hao et al, 2019) عملکرد ترک خوردگی و شیار شدن در دمای پایین مخلوط های حاوی PPA و SBR را ارزیابی کرد. نتایج نشان داد که استفاده از ۱٪ PPA و SBR منجر به افزایش استحکام شیارشدگی مخلوط شد. در حالی که ۱٪ از PPA تأثیر نامطلوبی بر عملکرد نمونه ها در دمای پایین دارد. همچنین، نتایج نشان داد که اصلاح قیر توسط PPA/SBR بهترین اثر را بر عملکرد شیارشدن نمونه ها دارد. هدف از تحقیق حاضر بررسی تأثیر افزودنی های نیمه گرم، PPA و SBR بر رفتار رئولوژیکی قیرها می باشد. اثر افزودنی های نیمه گرم بر روی قیرهای پلیمری SBR/PPA از طریق یک سری آزمایش های معمولی و رئولوژیکی مانند: شکل پذیری، درجه نفوذ، نقطه نرم شدن، DSR⁶، MSCR و تست های LAS مورد ارزیابی قرار گرفت.

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 رواسازی نشان داده اند که استفاده از پلیمر برای اصلاح قیر باعث افزایش مقاومت در برابر خستگی و شیارشدگی، ترک خوردگی حرارتی، مقاومت در برابر رطوبت و آسیب پذیری دمایی پایین تر می شود. در بین پلیمرهای ذکر شده، لاستیک استایرن بوتادین (SBR) معمولاً در صنعت رواسازی استفاده می شود. (Zhang et al, 2015). یکی از افزودنی های مفید و موثر برای اصلاح قیرهای پایه است. چندین تحقیق نشان داد که استفاده از SBR باعث بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی می شود. بر اساس مروری بر ادبیات، استفاده از SBR منجر به افزایش عملکرد در دمای پایین، بازیابی الاستیک، و عملکرد چسبندگی و چسبندگی قیر به سنگ دانه ها 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 می کند (Wang et al, 2017).

پلی فسفریک اسید (PPA)، یکی از مهم ترین افزودنی هایی است که می تواند به تنهایی و همچنین با ترکیبی از سایر افزودنی ها در اصلاح قیر پایه استفاده شود. همانطور که چندین تحقیق نشان داد که افزودن PPA به دلیل اثر ژل شدن، می تواند عملکرد دمای بالا یا پایداری ذخیره سازی آسفالت اصلاح شده با SBR را افزایش دهد، با این حال، این نتیجه هنوز مورد سوال است. بر اساس قیمت پایین PPA، استفاده از PPA برای ساخت یک قیر اصلاح شده با SBR منجر به کاهش درصد SBR شد. علاوه بر این، تنها چند تحقیق منتشر شده به طور کامل تأثیر PPA را بر عملکرد قیر در دماهای بالا و متوسط از طریق آزمایش های MSCR و LAS بررسی

۲- مواد و روش ها

۲-۱- مواد استفاده شده

۲-۱-۱- قیر

یک نوع قیر AC-60/70 استفاده شد و ویژگی های قیر پایه در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. خصوصیات فیر

نتیجه	واحد	استاندارد	آزمایش
68	(0.1mm)	ASTM D5	درجه نفوذ
48	°C	ASTM D36	نقطه نرمی
+100	(cm)	ASTM D113	شکل پذیری
305	°C	ASTM D92	نقطه اشتعال
318	°C	ASTM D70	نقطه شعله وری
1.046	gr/cm ³	ASTM D70	وزن مخصوص

۲-۱-۲- پلیمر

۲-۱-۳-افزودنی PPA

SBR از پالایشگاه نفت پاسارگاد داده شده و خواص آن در PPA به عنوان اصلاح کننده شیمیایی از مرکز تحقیقات تحقیق جدول ۲ نشان داده شده است. و توسعه پالایشگاه نفت پاسارگاد تهیه شد. خواص PPA در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۲. خصوصیات SBR

نتایج	خصوصیت
22.5-24.5	(%) درصد پلیمر
2.8	(%) اسید ارگانیک
24.5	(مگاپاسکال) مقاومت کششی
>350	(%) افزایش طول
0.2	(%) خاکستر
0.98	(gr/cm ³) چگالی

جدول ۳. خصوصیات PPA

نتیجه	واحد	مشخصات
79.3	%	P2O5 درصد
مایع	-	حالت فیزیکی
خاکستری	-	رنگ
بدون بو	-	بو
2.02	-	وزن مخصوص
2.66E-06	Pa	فشار بخار
8.00E-04	(N/cm)	کشش سطحی
1.487	(J/(g °C))	گرمای ویژه
1.964	g/cm ³	25 C چگالی در دمای
420	(°C)	نقطه جوش
282	-	نقطه ذوب
حلال در آب	-	قابلیت حل

۲-۱-۴- افزودنی‌های گرم

برای ارزیابی تأثیر افزودنی WMA بر رفتار قیرهای اصلاح شده کامپوزیت PPA/SBR، از دو افزودنی WMA (نانو فناوری Sasobit و Zycotherm) استفاده شد. جدول ۴ خواص افزودنی‌های گرم ذکر شده را نشان می‌دهد.

جدول ۴. خصوصیات افزودنی‌های نیمه گرم

خصوصیات	ساسوبیت	زایکوترم
مواد تشکیل دهنده	هیدروکربن های اشباع شده جامد	ترکیبات هیدروکسی آلکیل
حالت فیزیکی	پاستیلی	مایع
رنگ	قهوه ای	زرد
بو	بدون بو	بدون بو
وزن مولکولی	1000 g/mole	-
وزن مخصوص	0.9 (25°C)	1.01 gr/mol (25°C)
چگالی بخار	-	-
چگالی حقیقی	-	-
مقادیر pH	خنثی	۱۰ درصد قابل حل در آب خنثی یا کمی اسیدی
نقطه جوش	-	-
نقطه اشتعال	285°C	غیر قابل اشتعال
نقطه ذوب	100 (°C)	-
ویسکوزیته	-	100-500 CPS
حلالیت در آب	غیر حلال	فایل حل

برای اختلاط قیرهای اصلاح شده پلیمری با افزودنی‌های WMA پیشنهاد کرده‌اند. در نتیجه، دمای ۱۵۵ درجه سانتیگراد برای تهیه قیرهای گرم اصلاح شده در نظر گرفته شد. برای مخلوط کردن افزودنی‌های WMA از یک میکسر با برش بالا با سرعت ۵۰۰ دور در دقیقه به مدت ۳۰ دقیقه استفاده شد. جدول ۵ شناسایی نمونه قیرهای اصلاح شده را نشان می‌دهد.

۲-۲- آماده سازی نمونه

برای ساخت قیرهای اصلاح شده SBR/PPA از میکسر برش بالا استفاده شد. ابتدا قیر اولیه در یک ظرف مخصوص تا دمای ۱۲۵ درجه سانتیگراد گرم شد و سپس SBR (درصد وزنی آسفالت اصلی) به تدریج اضافه شد و با میکسر برشی بالا در دمای ۱۳۰ درجه سانتیگراد و سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه، به مدت ۵۰ دقیقه. پس از آن، مقدار مشخصی از PPA (۰٪، ۰٫۲۵٪، ۰٫۵۰٪، ۰٫۷۵٪ و ۱٫۰٪ وزن قیر) به قیر اصلاح شده SBR اضافه شد. سپس قیر SBR/PPA تا دمای ۱۶۰ درجه سانتیگراد حرارت داده شد و با استفاده از یک میکسر برشی بالا با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۴۰ دقیقه مخلوط شد. پس از این مراحل، قیرهای اصلاح شده SBR/PPA ساخته شدند. و در نهایت، افزودنی‌های گرم اضافه شد. چندین تحقیق دمای ۱۴۰-۱۶۰ درجه سانتیگراد را

۳- برنامه آزمایشی

۳-۱- آزمایش سستی قیر

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

۳-۲- پایداری ذخیره سازی در دمای بالا

برای اندازه‌گیری استحکام قیرهای اصلاح شده در برابر جداسازی، آزمایش پایداری ذخیره سازی بر اساس ASTM-D5892-96a در دمای بالا اجرا شد.

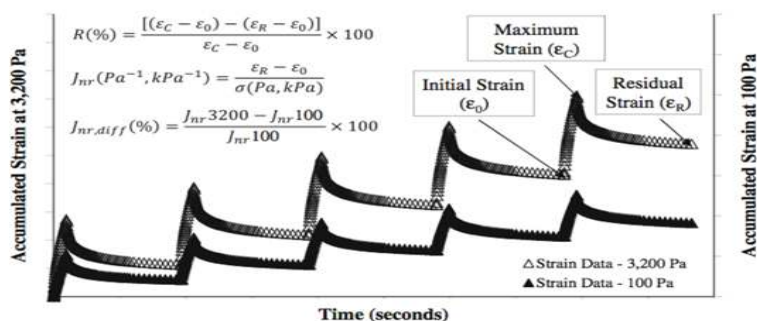
جدول ۵. کد گذاری نمونه‌های مختلف

No	قیر پایه	SBR	PPA	WMA	sample ID
1	60-70	0	0	0	A
2		2	0	0	AE
3		2	0.25	0	AEP0.25
4		2	0.5	0	AEP0.5
5		2	0.75	0	AEP0.75
6		2	1	0	AEP1
7		2	0.25	3% Sasobit	AEP0.25S
8		2	0.5	3% Sasobit	AEP0.5S
9		2	0.75	3% Sasobit	AEP0.75S
10		2	1	3% Sasobit	AEP1S
11		2	0.25	0.3% Zycotherm	AEP0.25Z
12		2	0.5	0.3% Zycotherm	AEP0.5Z
13		2	0.75	0.3% Zycotherm	AEP0.75Z
14		2	1	0.3% Zycotherm	AEP1Z

۳-۳- تست بازیابی خزش تنش چندگانه

خستگی پرتو چهار نقطه ای برای مقایسه رتبه رفتار خستگی مخلوطها و بازیابی قیر انجام شد. برای هر نوع نمونه، دو نمونه ساخته شد. شماتیک انجام تست MSCR در شکل ۱ نشان داده شده است. برای تجزیه و تحلیل نتایج MSCR از معادلات زیر استفاده شد:

آزمون MSCR برای بررسی تأثیر سطوح مختلف تنش بر رفتار دمای بالا قیرهای پیر شده از طریق روش RTFO^۷ بر اساس AASHTO TP 70 (AASHTO 2012b) اجرا شد. فرض بر این است که قیر با درصد بازیابی بالاتر پس از آزمایش MSCR بار ترافیکی بیشتری را تحمل می کند و عمر خستگی بالاتری دارد. به منظور تأیید این فرضیه، آزمون



شکل ۱. خروجی آزمایش MSCR

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

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

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

۳-۴- تست LAS

مقاومت در برابر خستگی قیر با آزمون LAS ارزیابی شد. مقدار تنش برشی توسط AASHTO TP101-14 به عنوان نقطه شکست پیشنهاد شد. آزمایش بر اساس AASHTO TP101-14 انجام شد. معادلات (۴) الی (۶) برای ارزیابی تجمع آسیب استفاده شد. حداکثر

$$D(t) \cong \sum_{i=1}^N [\pi \gamma^2 (C_{i-1} - C_i)]^{\alpha/1+\alpha} (t_i - t_{i-1})^{\alpha/1+\alpha} \quad (4)$$

$D(t)$ = خسارت انباشته شده را نشان می دهد

t = زمان (ثانیه)

γ = کرنش اعمال شده (%)،

$C_t = G^*(t)/G^*$ (اولیه) = پارامتر قابلیت اطمینان،

G^* = مدول پیچیده (MPa).

معادله زیر می تواند رابطه بین آسیب قیر و پارامتر قابلیت اطمینان را نشان دهد:

$$C_t = C_0 - C_1(D)^{C_2} \quad (5)$$

C_0 ، C_1 و C_2 ضرایب منحنی هستند که بر روی نتایج منطبق می شوند.

همچنین مقدار آسیب در نقطه شکست (D_f) محاسبه شد:

$$D_f = \left(\frac{C_0 - C_{peak\ stress}}{C_1} \right)^{1/C_2} \quad (6)$$

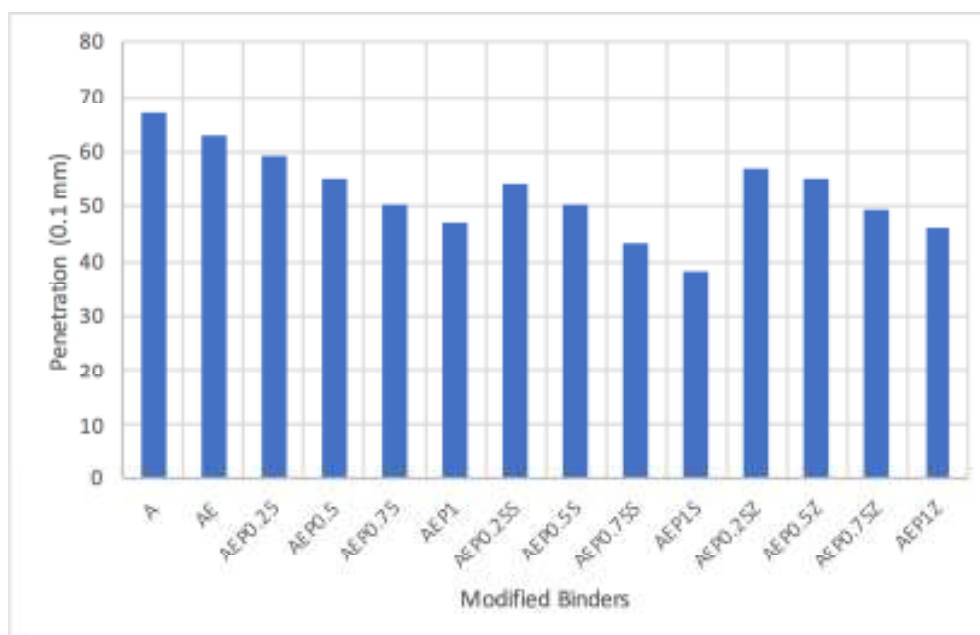
عمر خستگی قیرها از طریق رابطه زیر ارزیابی شد:

$$N_f = A \times (\gamma_{max})^{-B}, \quad (7)$$

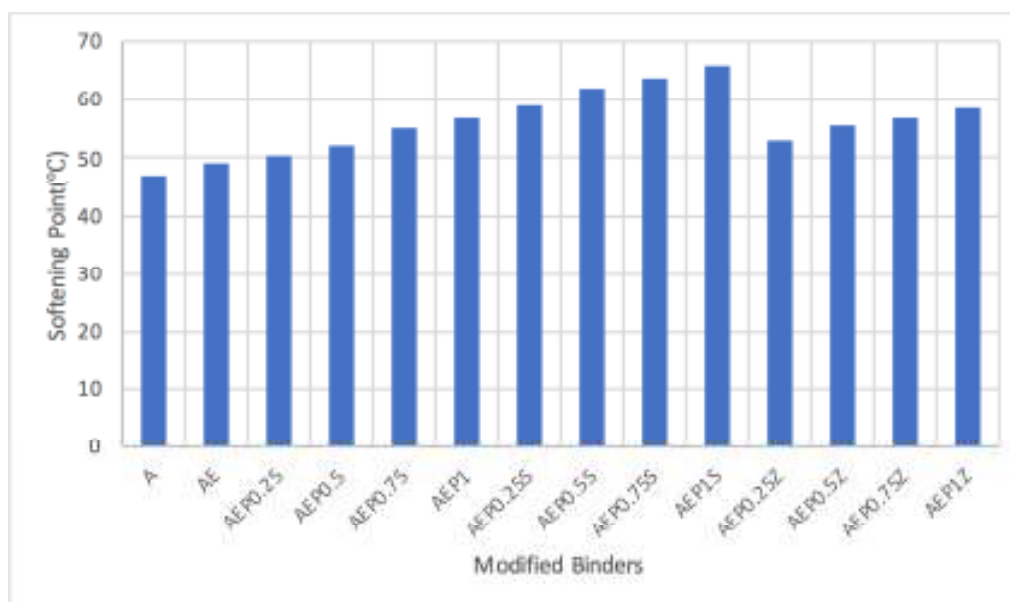
۴- نتایج

نشان داد که استفاده از اصلاح کننده های گرم باعث کاهش مقادیر نفوذ قیرهای اصلاح شده SBR/PPA می شود. در این میان، افزودنی زیکوترم اثر کمتری در کاهش مقادیر نفوذ دارد. با توجه به نتایج آزمایش، با استفاده از اصلاح کننده ها، قیرها سفت تر می شوند، بنابراین، استحکام مخلوطها در برابر شیار شدن بهبود می یابد.

شکل ۲-۴ نتایج آزمایش های فیزیکی قیر قیرهای بکر و اصلاح شده را نشان می دهد. بر اساس نتایج، استفاده از SBR و PPA باعث کاهش درجه نفوذ قیر و افزایش نقطه نرمی قیر می شود که ممکن است به سفت شدن قیر با استفاده از SBR و PPA نسبت داده شود. با افزایش درصد PPA، نفوذ روند کاهشی و نقطه نرم شدن روند افزایشی داشت. همچنین، نتایج



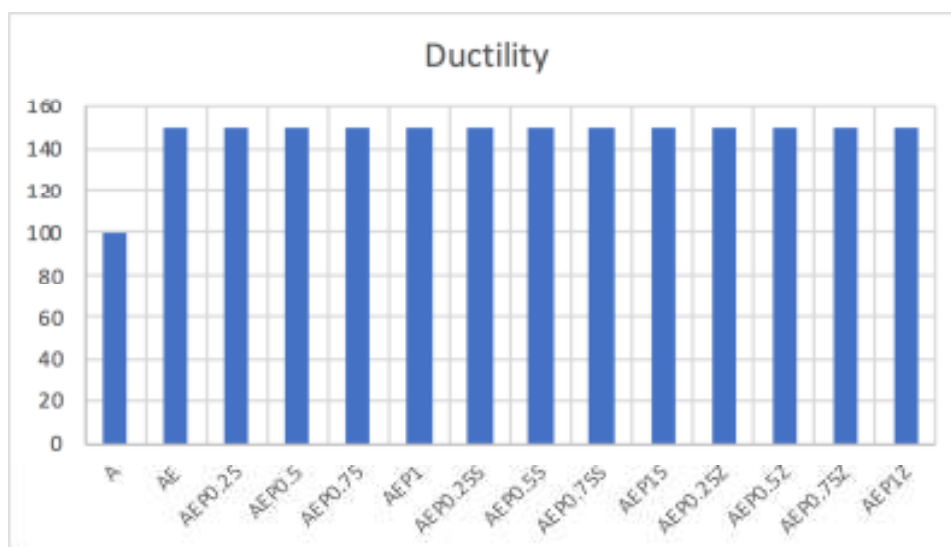
شکل ۲. نتایج آزمایش درجه نفوذ



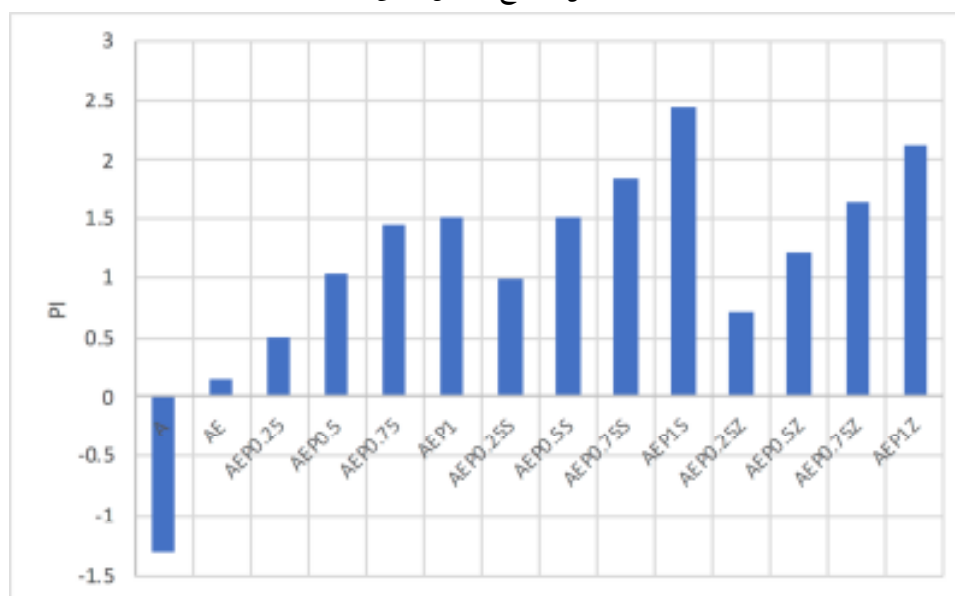
شکل ۳. نتایج آزمایش نقطه نرمی

قیرها دارد و به دنبال آن افزودنی زیگنترم قرار می‌گیرد. قیرهایی با مقادیر PI پایین‌تر نسبت به دما حساس‌تر هستند. با افزایش مقادیر PI، عملکرد مخلوط در برابر تغییر شکل دائمی و پریشانی در دمای پایین بهبود می‌یابد. با توجه به مقادیر PI نمونه‌ها، افزودن افزودنی‌های SBR، PPA و WMA باعث بهبود مقاومت قیرها در برابر حساسیت دما می‌شود.

شکل ۵ شاخص نفوذ (PI) قیرهای اصلاح شده را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، استفاده از SBR و PPA باعث افزایش PI قیرها می‌شود. با افزایش درصد PPA، مقادیر PI افزایش می‌یابد. همچنین افزودن مواد افزودنی گرم باعث افزایش مقاومت حساسیت دمایی قیر می‌شود. در بین افزودنی‌های گرم، افزودنی ساسویت تاثیر بهتری در کاهش حساسیت دمایی



شکل ۴. نتایج آزمایش انگی



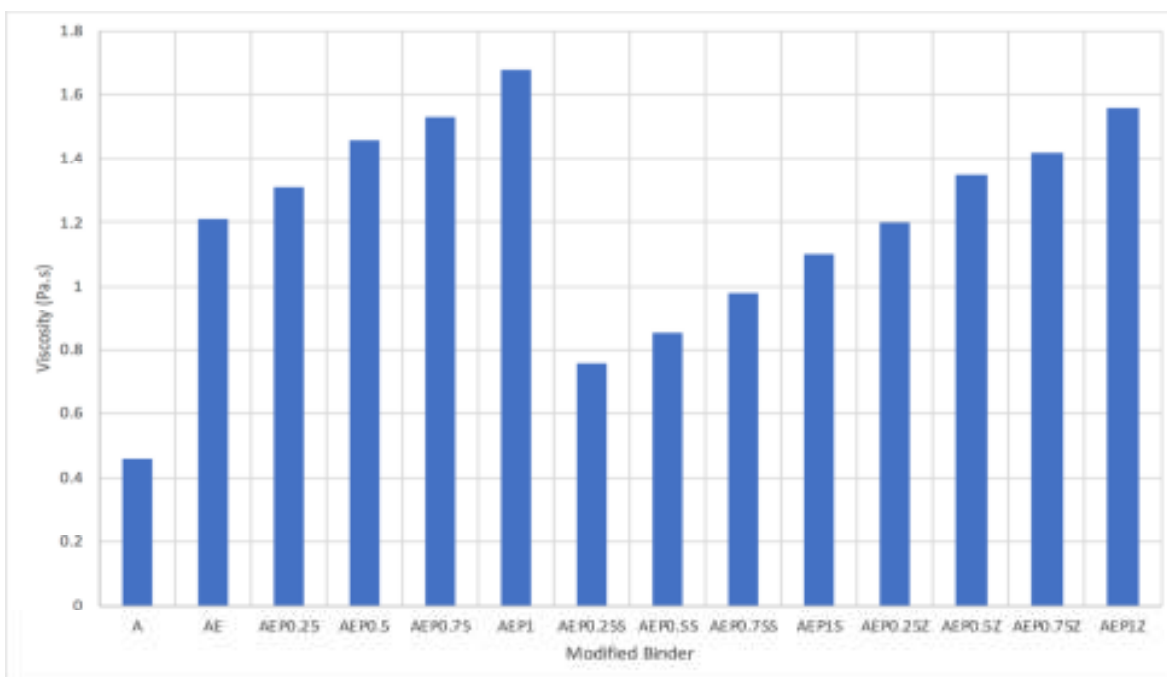
شکل ۵. نتایج مقادیر PI

ویسکوزیته قیر اصلاح شده SBR/PPA کاهش می‌یابد. افزودنی Sasobit تاثیر بهتری در کاهش ویسکوزیته دارد و سپس افزودنی Zycotherm قرار دارد. قیرهایی با مقادیر G^*/\sin بالاتر، دارای مقاومت بالاتر و مقاومت بهتر در برابر تغییر شکل دائمی هستند. کلاسورهای قدیمی و قدیمی RTFO باید حداقل ۱ کیلو پاسکال و ۲،۲ کیلو پاسکال داشته باشند تا در برابر شیار مقاومت کنند. نتایج پارامتر شیاربندی (G^*/\sin) در شکل ۷ قبل و بعد از فرآیند پیری RTFO نشان داده شده است. بر اساس نتایج، مقاومت شیاردار قیرهای اصلاح شده توسط SBR و PPA افزایش یافته است، که نشان می‌دهد استفاده از SBR و PPA باعث سفت‌تر شدن قیر می‌شود. سپس

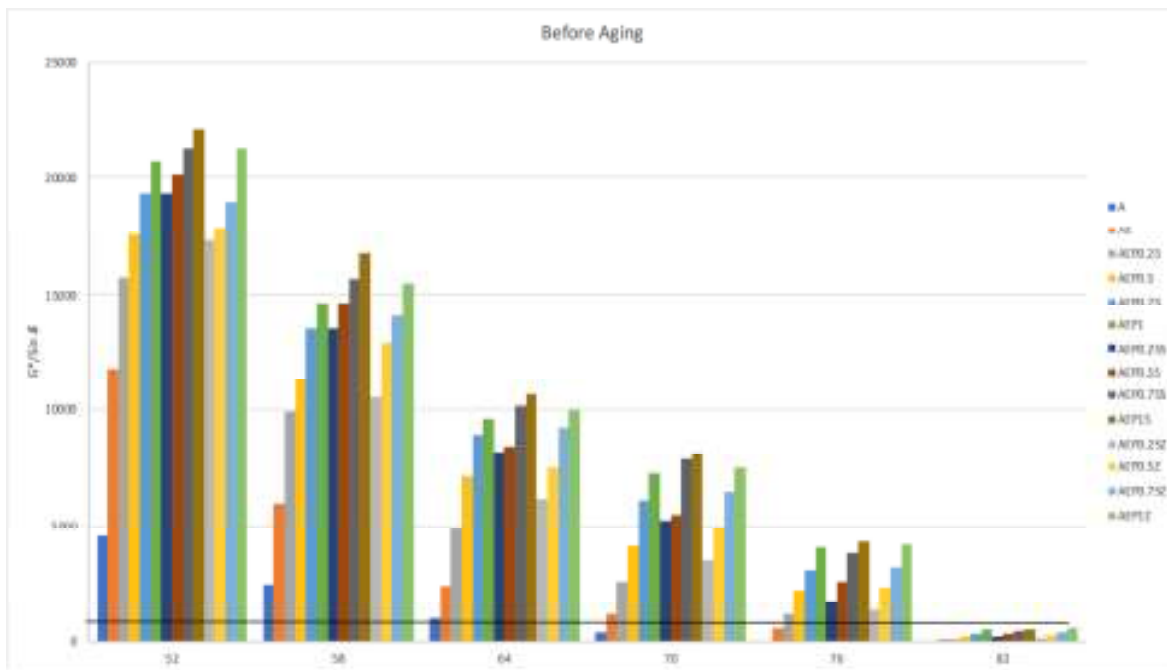
همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، استفاده از SBR و PPA باعث افزایش ویسکوزیته قیر می‌شود. با افزایش ویسکوزیته قیر، توانایی قرار دادن و فشرده شدن مخلوط در مزرعه سخت‌تر می‌شود. با توجه به ویسکوزیته قیر، با افزایش درصد PPA، سفتی قیر افزایش می‌یابد و باعث افزایش ویسکوزیته قیر می‌شود. افزایش سفتی و ویسکوزیته قیرهای آسفالت پس از اختلاط با PPA در نتیجه غلظت آسفالتین‌ها و تشکیل مواد نامحلول در اثر استفاده از اسید اورتوفسفریک و انیدرید فسفریک بی آب و افزایش میزان آسفالتین با وزن مولکولی بالا با تبدیل آروماتیک‌ها به رزین‌ها و رزین‌ها به آسفالتین‌ها. با توجه به نتایج، استفاده از افزودنی‌های گرم،

که نشان می‌دهد که قیرها قادر به مقاومت در برابر ترک خوردگی متوسط هستند. همانطور، که نتایج در شکل ۸ نشان می‌دهد، استفاده از SBR باعث افزایش رفتار خستگی قیر می‌شود. افزودن PPA باعث افزایش مقاومت در برابر خستگی قیرها می‌شود. با افزایش درصد PPA، مقاومت خستگی افزایش می‌یابد. به گفته ژانگ و همکاران، کاهش در فاکتور خستگی نشان می‌دهد که یک ترکیب قیر نرم‌تر از قیر تمیز بعد از پیری طولانی مدت PAV با بهبود مقاومت در برابر اکسیداسیون می‌شود. برای روسازی آسفالتی که در معرض بارگذاری‌های مکرر با بزرگی‌ها و فرکانس‌های مختلف قرار می‌گیرد، استفاده از چسب آسفالتی با مقاومت اکسیداتیو بهبود یافته انتظار می‌رود که عمر خستگی روسازی را در شرایط آب و هوایی مختلف افزایش دهد. این به دلیل وجود PPA در مخلوط‌ها است که با تشکیل ترکیبات کربونیل و سولفوکسید در مرحله اولیه پیری، سرعت پیری اکسیداتیو را با زمان کاهش می‌دهد. کاهش در مقادیر OHI (شاخص سخت شدن اکسیداتیو) (هرچه مقدار OHI بالاتر باشد، یک قیر آسفالت نسبت به پیری اکسیداتیو حساس‌تر است)، کاهش پیری اکسیداتیو را در نتیجه استفاده از PPA در مخلوط قیر تأیید می‌کند. همچنین، افزودن مواد افزودنی گرم به قیرهای اصلاح شده باعث افزایش رفتار خستگی قیر می‌شود. Sasobit بیشترین تأثیر را در افزایش رفتار دمای متوسط کلاسورها دارد.

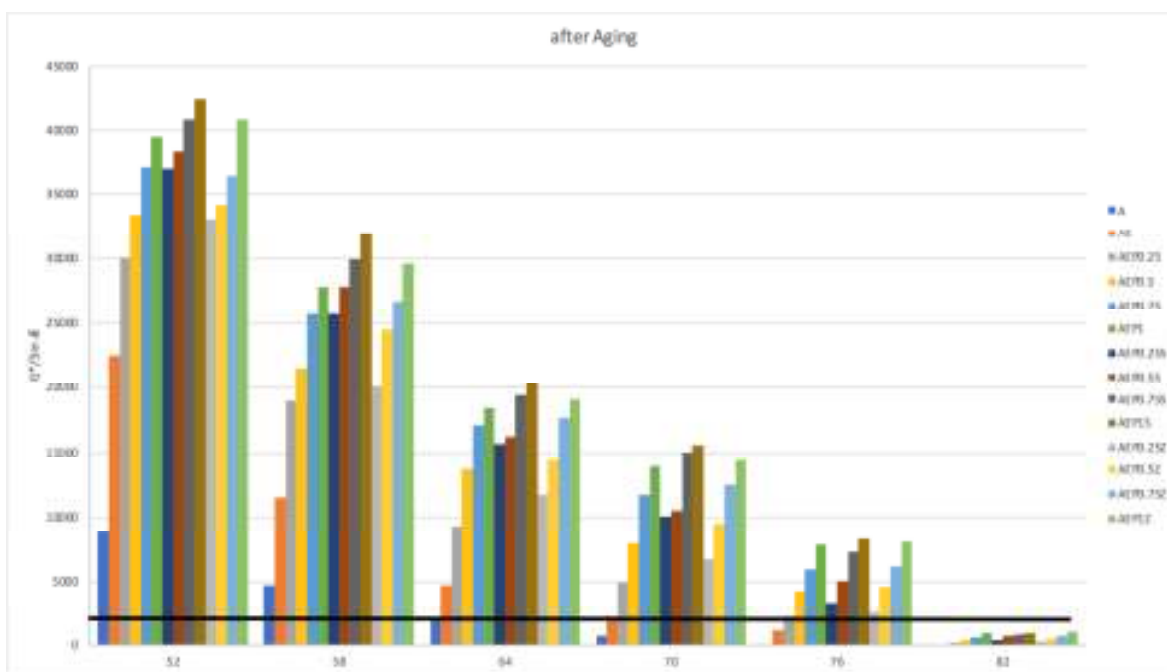
رفتار شیاردار قیر بهبود می‌یابد. با افزایش درصد PPA، سفتی قیر افزایش یافته و منجر به افزایش مقاومت شیارشده قیر می‌شود. بر اساس نتایج، استفاده از افزودنی‌های گرم باعث بهبود پتانسیل بازیافت قیرها و همچنین افزایش توانایی قیر در بازیابی کرنش‌های انباشته شده از بار ترافیکی می‌شود. در میان افزودنی‌های گرم، قیرهای اصلاح‌شده Sasobit عملکرد بهتری در بهبود رفتار شیارشده قیرها دارند و به دنبال آن افزودنی‌های Zycotherm قرار دارند. به سفت شدن قیر توسط افزودنی Sasobit نسبت داده می‌شود. افزودنی WMA و PPA هنگامی که با هم مورد استفاده قرار می‌گیرند توانستند به طور موثر عامل شیارشده مخلوط قیر را افزایش دهند. این نتایج از استفاده از افزودنی WMA و PPA برای افزایش مقاومت قیر در برابر شیارشده پشتیبانی می‌کند. اگرچه یک عامل اسیدی (PPA) و یک عامل بازی در مخلوط‌ها وجود داشت، افزودن PPA همچنان قادر به اصلاح ماتریس قیر و بهبود سفتی آن با افزایش غلظت آسفالتین‌ها به قیمت اشباع بود. در نتیجه، پیش‌بینی می‌شود که مخلوط‌های حاوی افزودنی PPA و WMA در مقایسه با مخلوط‌های بدون هیچ‌گونه افزودنی مقاومت شیارشده بالاتری از خود نشان دهند. همچنین با پیشنهاد سیستم درجه عملکرد (PG)، قیر با پارامتر $G^* \sin \delta$ کمتر استحکام بهتری در برابر ترک خوردگی دمای متوسط دارد. همانطور که سیستم PG پیشنهاد کرد، $G^* \sin \delta$ به حداکثر ۵۰۰۰ کیلو پاسکال برای قیر محدود شد،



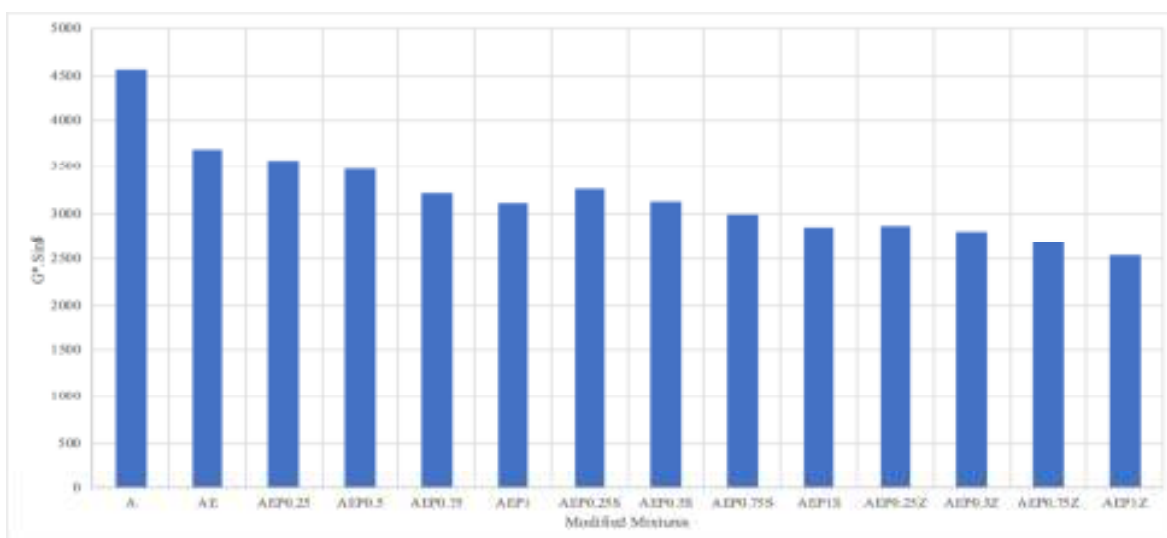
شکل ۶. نتایج آزمایش ویسکوزیته



شکل ۷. الف. نتایج پارامتر شیارشدگی قبل از پیرشدگی



شکل ۷. ب. نتایج پارامتر شیارشدگی بعد از پیرشدگی



شکل ۸. نتایج عمر خستگی

۲-۱-۴- نتایج تست پایداری ذخیره سازی

SBR و قیر اصلی دارای چگالی متفاوتی هستند، بنابراین، هنگامی که قیرهای اصلاح شده در یک مخزن ذخیره می‌شوند یا در حین پمپاژ و استفاده در روسازی، ممکن است بین فازهای مختلف جدایی ایجاد شود. در شرایط ایستا و در دماهای بالا، بر اساس قانون استوکس، قطرات SBR به بالای قیر صعود کرده و شناور می‌شوند. استحکام قیرها در دماهای بالا در برابر جداسازی فازها با انجام تست پایداری ذخیره سازی اندازه‌گیری می‌شود. نتیجه تست پایداری ذخیره‌سازی قیرهای اصلاح شده در جدول ۶ نشان داده شده است. تغییر در نتیجه آزمون نقاط نرم شدن از قسمت پایین و بالای قیرهای حاوی SBR بالاتر از ۲,۵ درجه سانتیگراد است. این نتیجه نشان می‌دهد که جداسازی فاز رخ داده است. در حالی که استفاده از PPA باعث افزایش جداسازی فازی قیرهای اصلاح شده می‌شود و نتایج نقطه نرم شدن از قسمت پایین و قسمت بالایی نمونه کمتر از ۲,۵ درجه سانتی گراد بود. این امر بر اساس دو واقعیت قابل توجه است.

- استفاده از PPA، تفاوت بین تراکم قیر و SBR را متعادل می‌کند که یکی از دلایل جداسازی فاز است.

- پایداری ذخیره‌سازی قیر اصلاح شده تحت تأثیر وزن مولکولی و همچنین ساختار قیر است. استفاده از PPA به قیر منجر به سفت شدن قیر شد و در نتیجه، پایداری ذخیره سازی قیر اصلاح شده SBR/PPA افزایش یافت.

- با افزودن PPA، ساختار مواد از سل به ژل تغییر می‌کند. این یک ماده جامد ایجاد می‌کند که پایداری بهتری دارد.

بر اساس نتایج، استفاده از Sasobit باعث بهبود جداسازی فاز می‌شود. دلیل این ویژگی‌ها به ماتریس قیر با افزودن ساسوبیت متبلور می‌شود و در نتیجه قیر اصلاح شده سفت می‌شود. در حالی که افزودن نانوتکنولوژی Zycotherm جداسازی فاز قیر را کاهش می‌دهد.

۲-۲-۴- تست MSCR

% Jnr و قیرهای مختلف در دمای ۶۴ درجه سانتیگراد در جدول ۷ آورده شده است. به طور کلی، بر اساس نتایج، صرف نظر از سطوح تنش، استفاده از SBR باعث کاهش مقدار Jnr قیر بکر شد که نشان می‌دهد قیرهای اصلاح شده با SBR مقاومت شیاردار بیشتری دارند. همانطور که نتایج در جدول ۷ نشان می‌دهد، با استفاده از PPA مقادیر Jnr کاهش می‌یابد. همچنین با افزودن درصد PPA تا ۱ درصد، پارامتر Jnr کاهش می‌یابد. ممکن است به سفت شدن قیر با استفاده از PPA نسبت داده شود و مقاومت قیر در برابر شیار شدن افزایش یابد. افزایش سفتی و ویسکوزیته قیرها پس از اختلاط با PPA در نتیجه غلظت آسفالتین‌ها و تشکیل مواد نامحلول در اثر استفاده از اسید اورتوفسفریک و انیدرید فسفریک بی آب و افزایش میزان آسفالتین با وزن مولکولی بالا با تبدیل آروماتیک‌ها به رزین‌ها و رزین‌ها به آسفالتین‌ها. همانطور که نتایج در جدول ۱۱ نشان می‌دهد، قیرهای اصلاح شده توسط Sasobit دارای مقادیر Jnr کمتری نسبت به قیرهای اصلاح شده توسط Zycotherm هستند. دلیل این امر این است که با افزودن

دارند. این به دلیل اثر اتصال متقابل اضافی PPA با پلیمرها است که پایداری قوی تر و سختی بالاتری را برای قیرهای اصلاح شده فراهم می کند. با افزایش سطح تنش به ۳/۲ کیلو پاسکال، مقادیر Jnr افزایش یافت. این بدان معناست که تغییر شکل دائمی بالاتری در بار ترافیکی بالاتر مشاهده می شود. روند مشابهی در مقادیر Jnr قیرهای اصلاح شده در سطح تنش ۳,۲ Kpa مشاهده شد.

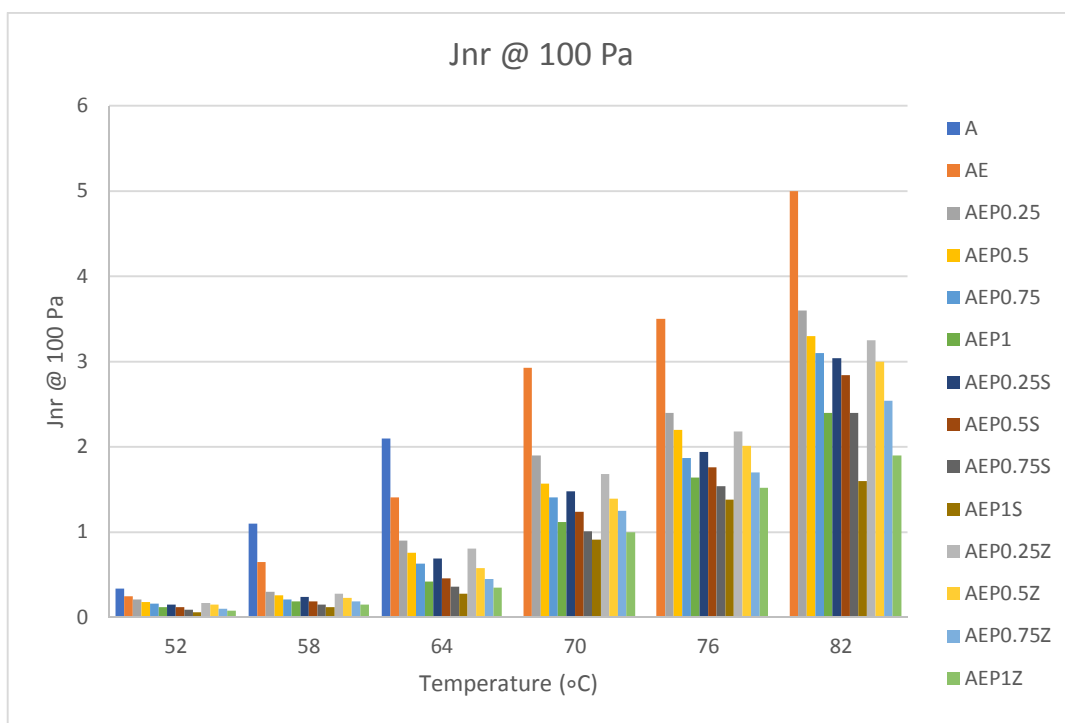
Sasobit. پایداری و سفتی قیرها با تشکیل یک ساختار شبکه/شبکه کریستالی بهبود یافته است. بر اساس نتایج، استفاده از نانوتکنولوژی Zycotherm باعث کاهش مقادیر Jnr قیرهای اصلاح شده پلیمری می شود، اما مقادیر Jnr بیشتر از قیرهای اصلاح شده Sasobit بود. نتایج بهتر از قیر کنترل بود. همچنین، بر اساس نتایج، نمونه های حاوی افزودنی های PPA و WMA نسبت به نمونه شاهد مقاومت شیارشدگی بیشتری

جدول ۶. نتایج آزمایش پایداری ذخیره سازی

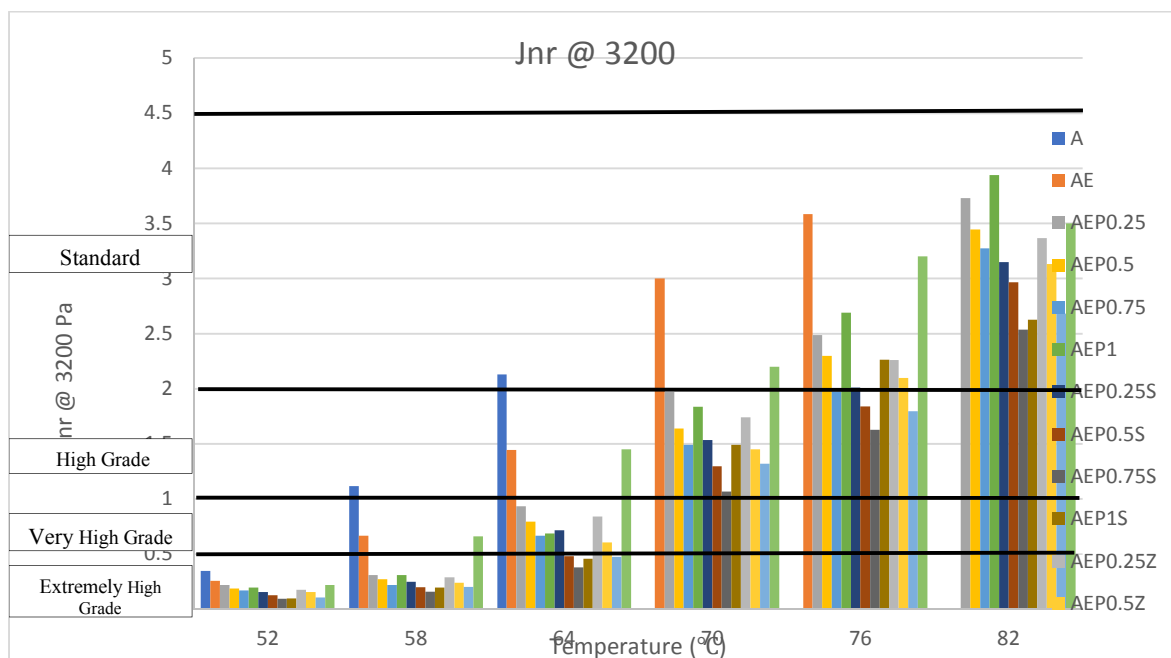
قیراصلی	نقطه نرمی (بالا)	نقطه نرمی (پایین)	ΔS (°C)
A	47	47	0
AE	49.2	45.1	4.1
AEP0.25	50.2	47.8	2.4
AEP0.5	52	49.66	2.34
AEP0.75	55	52.8	2.2
AEP1	57	55	2
AEP0.25S	59	57	2
AEP0.5S	62	60.08	1.92
AEP0.75S	64	62.16	1.84
AEP1S	66	64.3	1.7
AEP0.25Z	53.1	49.7	3.4
AEP0.5Z	55.4	52.17	3.23
AEP0.75Z	56.8	53.66	3.14
AEP1Z	58.6	55.6	3

جدول ۷. نتایج آزمایش MSQR

نوع قیر	R100	R3200	Jnr100	Jnr3200	Jnr diff
	%	%	kPa-1	kPa-1	%
A	6	4.8	2.1	2.1315	1.5
AE	37.5	30	1.41	1.44384	2.4
AEP0.25	38.3	30.64	0.9	0.9324	3.6
AEP0.5	41.6	33.28	0.76	0.79344	4.4
AEP0.75	46.4	37.12	0.63	0.66528	5.6
AEP1	49.3	39.44	0.42	0.6888	64
AEP0.25S	66.2	52.96	0.69	0.71484	3.6
AEP0.5S	68.4	54.72	0.46	0.48024	4.4
AEP0.75S	74.6	59.68	0.36	0.38016	5.6
AEP1S	76.1	60.88	0.28	0.4592	64
AEP0.25Z	15	12	2	2.072	3.6
AEP0.5Z	19	15.2	1.8	1.8792	4.4
AEP0.75Z	22.5	18	1.6	1.6896	5.6
AEP1Z	27.3	21.84	1.4	1.45	3.5



شکل ۹. مقادیر پارامتر Jnr در سطح تنش ۱۰۰ پاسکال



شکل ۱۰. مقادیر پارامتر Jnr در سطح تنش ۳۲۰۰ پاسکال

توانایی کم آن در برابر ترک خوردگی و شیاردار شدن دمای متوسط است. نتایج نشان داد که با افزودن مواد افزودنی گرم به قیر اصلی، درصد بازیابی افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج، قیرهای اصلاح شده توسط Sasobit در مقایسه با قیرهای

طبق جدول ۷، استفاده از SBR باعث افزایش R٪ قیر پایه می‌شود. با افزایش درصد بازیابی قیر، قیر توانایی بهتری برای مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی دارد. نتایج جدول ۷ نشان می‌دهد که درصد بازیابی قیر پایه کم است که نشان دهنده

می‌شود. استفاده از SBR باعث افزایش انعطاف پذیری قیر می‌شود و در نتیجه خواص خستگی قیر افزایش می‌یابد. ضرایب VECD قیرهای اصلاح شده مختلف در جدول ۸ نشان داده شده است. استفاده از اصلاح کننده‌ها به ترتیب باعث افزایش و کاهش ضریب C1 و ضریب C2 می‌شود. بر اساس نتایج، قیر اصلاح شده AEPO.25Z دارای بالاترین C1 و کمترین C2 است. می‌توان نتیجه گرفت که در سطوح آسیب کم، $|G^*|$ پارامتر به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. در حالی که در سطوح آسیب بالا، $|G^*|$ پارامتر با شیب کمتر کاهش می‌یابد. جدول ۹ عمر خستگی قیرهای مختلف را نشان می‌دهد. آزمون خستگی در دو سطح کرنش ۲٫۵٪ و ۵٪ انجام شد. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، استفاده از SBR منجر به افزایش رفتار خستگی قیر اصلی می‌شود. همچنین استفاده از PPA باعث افزایش عمر خستگی قیرها می‌شود. به طوری که با افزودن درصد PPA، عمر خستگی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. به گفته ژانگ و همکاران، کاهش در فاکتور خستگی نشان می‌دهد که یک ترکیب قیر نرم‌تر از قیر تمیز بعد از پیری طولانی مدت PAV با بهبود مقاومت در برابر اکسیداسیون می‌شود. برای روسازی آسفالتی که در معرض بارگذاری‌های مکرر با بزرگی‌ها و فرکانس‌های مختلف قرار می‌گیرد، استفاده از چسب آسفالتی با مقاومت اکسیداتیو بهبود یافته انتظار می‌رود که عمر خستگی روسازی را در شرایط آب و هوایی مختلف افزایش دهد. این به دلیل وجود PPA در مخلوط‌ها است که با تشکیل ترکیبات کربونیل و سولفوکسید در مرحله اولیه پیری، سرعت پیری اکسیداتیو را با زمان کاهش می‌دهد. کاهش در مقادیر OHI (شاخص سخت شدن اکسیداتیو) (هرچه مقدار OHI بالاتر باشد، یک قیر آسفالت نسبت به پیری اکسیداتیو حساس‌تر است)، کاهش پیری اکسیداتیو را در نتیجه استفاده از PPA در مخلوط قیر تأیید می‌کند. بر اساس نتایج، آشکار است که نمونه AEPO.25Z عمر خستگی بالاتری در حدود ۱۸ برابر و ۱۲ برابر بیشتر از قیر اصلی در هر دو سطح کرنش ۲٫۵٪ و ۵٪ دارد. نتایج نشان داد که استفاده از Sasobit باعث افزایش عملکرد خستگی قیرها می‌شود. با توجه به تجزیه و تحلیل VECD نتایج آزمون LAS، می‌توان دریافت که استفاده از افزودنی‌های گرم باعث افزایش رفتار خستگی قیرها می‌شود.

اصلاح شده Zycotherm دارای درصد بازیابی بیشتری هستند. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، درصد بازیابی قیرها با افزودن ASAها افزایش می‌یابد که نشان دهنده افزایش مقاومت قیرها در برابر شیار شدن است. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، قیرهای اصلاح شده توسط PPA دارای درصد بازیابی بالاتری هستند. با افزایش درصد PPA، درصد بازیابی افزایش می‌یابد، که نشان می‌دهد مقاومت قیرها در برابر شیار شدن افزایش یافته است. همچنین بر اساس نتایج، $R/\%$ با افزودن مواد افزودنی گرم بهبود یافت. به عنوان مثال، همه قیرهای اصلاح شده Sasobit درصد بازیابی بالاتری نسبت به کلاسورهای اصلاح شده SBR و SBR/PPA دارند. در حالی که قیرهای اصلاح شده با فناوری نانو زایکوترم درصد بازیابی بالاتری نسبت به قیرهای اصلی و کمتر از قیرهای اصلاح شده SBR و SBR/PPA دارند.

استفاده از دو درصد SBR و SBR دو درصد با یک درصد PPA در قیر پایه، $R/\%$ را به ترتیب ۱۶۷٪ و ۲۵۲٪ بهبود می‌بخشد. افزودن Sasobit به قیرهای حاوی ۲ درصد SBR با یک درصد PPA همچنین $R/\%$ را به ترتیب ۴۴۳٪ و ۲۸۲٪ در سطح تنش ۱۰۰ pa افزایش می‌دهد. استفاده از ۲ SBR $R/\%$ و ۲ درصد SBR با یک درصد PPA به قیر، $R/\%$ را به ترتیب ۱۶۱٪ و ۲۴۳٪ در سطح تنش ۳۲۰۰ pa افزایش می‌دهد. با این حال، افزودن Zycotherm به دو درصد SBR با یک درصد PPA منجر به افزایش $R/\%$ به میزان ۹۰٪ در سطح تنش ۱۰۰ pa می‌شود. بر اساس نتایج، افزودنی زایکوترم کمترین اثر را در افزایش درصد بازیابی قیرهای اصلاح شده در هر سطح تنش داشت. دلیل این امر ممکن است به دلیل عملکرد ارتجاعی کم و سفتی کم قیرهای اصلاح شده زایکوترم باشد. میزان تغییرات پارامتر Jnr در دماهای مختلف و دو سطح تنش ۱۰۰ و ۳۲۰۰ پاسکال به ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰ آورده شده است.

۳-۱-۴- نتایج آزمون LAS

نتایج آزمون LAS در جداول ۸ و ۹ نشان داده شده است. نتایج جدول ۸ نشان می‌دهد که در سطوح کرنش بالا، تنش برشی قیرهای اصلاح شده به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد که نشان دهنده سطح بالایی از آسیب است. بر اساس نتایج، استفاده از SBR باعث بهبود خواص دمای میانی قیر پایه

جدول ۱۳. ضرایب ویسکوالاستیک نمونه‌ها

نوع قیر	C_0	C_1	C_2
A	1	0.069	0.546
AE	1	0.06196276	0.55619817
AEP0.25	1	0.08554175	0.44672221
AEP0.5	1	0.08745118	0.45950058
AEP0.75	1	0.09960012	0.42049347
AEP1	1	0.11232175	0.47350221
AEP0.25S	1	0.14820791	0.58350014
AEP0.5S	1	0.14227959	0.56016014
AEP0.75S	1	0.13931544	0.54849014
AEP1S	1	0.13338712	0.52515013
AEP0.25Z	1	0.1630287	0.64185016
AEP0.5Z	1	0.15650755	0.61617615
AEP0.75Z	1	0.15324698	0.60333915
AEP1Z	1	0.14672583	0.57766514

جدول ۱۴. عمر خستگی نمونه‌ها

نوع قیر	2.5% Nf	5% Nf
A	1366	853
AE	3890	920
AEP0.25	4686	945
AEP0.5	6347	1045
AEP0.75	7900	1258
AEP1	8570	1369
AEP0.25S	10230	7200
AEP0.5S	13579	7900
AEP0.75S	15690	9100
AEP1S	17984	9960
AEP0.25Z	20741	7616
AEP0.5Z	21842	8345
AEP0.75Z	23490	9570
AEP1Z	24638	10500

۵- نتیجه گیری

مختلف انجام شد. یافته‌های زیر را می‌توان از نتایج بدست آورد.

-استفاده از SBR و PPA باعث کاهش درجه نفوذ قیر و افزایش نقطه نرمی قیر می‌شود که ممکن است به سفت شدن قیر با استفاده از SBR و PPA نسبت داده شود. همچنین با

هدف از مطالعه حاضر بررسی تأثیر افزودنی‌های WMA بر رفتار رئولوژیکی قیر و عملکرد مخلوط‌های SMA حاوی افزودنی‌های SBR/PPA بود. برای رسیدن به این هدف، تست‌های LAS، MSCR، RV، DSR، بر روی نمونه‌های

سفتی قیر شد. افزایش سفتی و ویسکوزیته قیرهای آسفالت پس از اختلاط با PPA در نتیجه غلظت آسفالتین‌ها و تشکیل مواد نامحلول در اثر استفاده از اسید اورتوفسفریک و انیدرید فسفریک بی‌آب و افزایش میزان آسفالتین با وزن مولکولی بالا با تبدیل آروماتیک‌ها به رزین‌ها و رزین‌ها به آسفالتین‌ها. علاوه بر این، با افزایش محتوای PPA، استحکام تغییر شکل دائمی بهبود می‌یابد. قیرهای اصلاح شده توسط Sasobit دارای مقادیر Jnr کمتری در مقایسه با کلاسورهای اصلاح شده توسط Zycotherm هستند.

نتایج آزمون LAS نشان داد که استفاده از SBR منجر به افزایش دمای میانی قیر پایه شده است. استفاده از SBR باعث افزایش انعطاف پذیری قیر و در نتیجه افزایش رفتار خستگی قیر می‌شود. همچنین افزودن PPA باعث افزایش خواص دمایی میانی قیرها می‌شود. به طوری که با افزودن درصد PPA، عمر خستگی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. افزایش عمر خستگی نشان می‌دهد که یک ترکیب قیر پس از پیری طولانی مدت PAV با بهبود مقاومت در برابر اکسیداسیون، نرم تر از قیر تمیز می‌شود. برای روسازی آسفالتی که در معرض بارگذاری‌های مکرر با بزرگی‌ها و فرکانس‌های مختلف قرار می‌گیرد، استفاده از چسب آسفالتی با مقاومت اکسیداتیو بهبود یافته انتظار می‌رود که عمر خستگی روسازی را در شرایط آب و هوایی مختلف افزایش دهد. این به دلیل وجود PPA در مخلوط‌ها است که با تشکیل ترکیبات کربونیل و سولفوکسید در مرحله اولیه پیری، سرعت پیری اکسیداتیو را با زمان کاهش می‌دهد. کاهش در مقادیر OHI (شاخص سخت شدن اکسیداتیو) (هرچه مقدار OHI بالاتر باشد، یک قیر آسفالت نسبت به پیری اکسیداتیو حساس‌تر است)، کاهش پیری اکسیداتیو را در نتیجه استفاده از PPA در مخلوط قیر تأیید می‌کند. بر اساس نتایج، استفاده از افزودنی‌های گرم عملکرد خستگی قیرها را افزایش داد.

۵- پی‌نوشت‌ها

- 1- Polyphosphoric Acid
- 2- Warm Mix Asphalt
- 3- Styrene-Butadiene Rubber
- 4- Multiple Stress Creep Recovery
- 5- Linear Amplitude Sweep
- 6- Dynamic Shear Rheometer
- 7- Rolling Thin Film Oven

افزودن SBR و PPA، ویسکوزیته نمونه‌ها افزایش می‌یابد. افزایش سفتی و ویسکوزیته قیرهای آسفالت پس از اختلاط با PPA در نتیجه غلظت آسفالتین‌ها و تشکیل مواد نامحلول در اثر استفاده از اسید اورتوفسفریک و انیدرید فسفریک بی‌آب و افزایش میزان آسفالتین با وزن مولکولی بالا با تبدیل آروماتیک‌ها به رزین‌ها و رزین‌ها به آسفالتین‌ها.

بر اساس نتایج، مقاومت شیارشدگی قیرهای اصلاح شده توسط SBR و PPA افزایش یافته است، که نشان می‌دهد استفاده از SBR و PPA باعث سفت‌تر شدن قیر می‌شود. افزودنی WMA و PPA هنگامی که با هم مورد استفاده قرار می‌گیرند توانستند به طور موثر عامل شیارشدن مخلوط قیر را افزایش دهند. این نتایج از استفاده از افزودنی WMA و PPA برای افزایش مقاومت قیر در برابر شیار شدن پشتیبانی می‌کند. اگرچه یک عامل اسیدی (PPA) و یک عامل بازی در مخلوط‌ها وجود داشت، افزودن PPA همچنان قادر به اصلاح ماتریس قیر و بهبود سفتی آن با افزایش غلظت آسفالتین‌ها به هزینه اشباع بود. در نتیجه، پیش‌بینی می‌شود که مخلوط‌های حاوی افزودنی PPA و WMA در مقایسه با مخلوط‌های بدون هیچ افزودنی مقاومت شیارشدگی بالاتری از خود نشان دهند.

استفاده از SBR و PPA باعث افزایش رفتار خستگی قیر می‌شود. با افزایش درصد PPA، مقاومت خستگی افزایش می‌یابد. کاهش فاکتور خستگی ($G^* \cdot \sin$) نشان می‌دهد که یک ترکیب قیر نرم‌تر از قیر تمیز بعد از پیری طولانی‌مدت PAV با بهبود مقاومت در برابر اکسیداسیون می‌شود. برای روسازی آسفالتی که در معرض بارگذاری‌های مکرر با بزرگی‌ها و فرکانس‌های مختلف قرار می‌گیرد، استفاده از چسب آسفالتی با مقاومت اکسیداتیو بهبود یافته انتظار می‌رود که عمر خستگی روسازی را در شرایط آب و هوایی مختلف افزایش دهد. این به دلیل وجود PPA در مخلوط‌ها است که با تشکیل ترکیبات کربونیل و سولفوکسید در مرحله اولیه پیری، سرعت پیری اکسیداتیو را با زمان کاهش می‌دهد. کاهش در مقادیر OHI (شاخص سخت شدن اکسیداتیو) (هرچه مقدار OHI بالاتر باشد، یک قیر آسفالت نسبت به پیری اکسیداتیو حساس‌تر است)، کاهش پیری اکسیداتیو را در نتیجه استفاده از PPA در مخلوط قیر تأیید می‌کند.

بر اساس آزمایش MSJR، مقدار Jnr قیر پایه با افزودن SBR و PPA کاهش یافت. افزودن SBR و PPA باعث افزایش

۶- مراجع

- Zhang, and Xiaojuan Cao., "Investigation on performance of polyphosphoric acid (PPA)/SBR compound-modified asphalt mixture at high and low temperatures", *Road Materials and Pavement Design* 20, No. 6 (2019), pp.1376-1390.
- Lo Presti D, Airey G., (2013), "Tyre rubber-modified bitumens development: the effect of varying processing conditions", *Road Mater Pavement Des* 2013; 14(4), pp.888-900.
- Wang, C. Wang, H. Bahia, (2017), "Comparison of the fatigue failure behaviour 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.
- Zhang F, Yu JY., (2010), "The research for high-performance SBR compound modified asphalt. *Constr Build Mater.*, 24(3), pp.410-8.
- 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.
- AASHTO T. Standard test method for multiple stress creep recovery (MSCR), (2012), "Test of asphalt binder using a dynamic shear rheometer", Washington, DC: American Association of State Transport and Officials.
- AASHTO TP101, (2014), "Estimating Damage Tolerance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep", *Recuperado el.*, 12.
- Aghapour, Moslem, and Rezvan Babagoli, (2020), "Effect of reclaimed asphalt pavement on performance of rubberised asphalt mixtures", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials* 173, No. 6, pp.284-297.
- 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*.
- Hassan, Ziari, Divandari Hassan, Babagoli Rezvan, and Akbari Ali., "Influence of bentonite additive on bitumen and asphalt mixture properties", *World Academy of Science, Engineering and Technology* 6, (2012).
- Hao, Peiwen, Ruixin Zhai, Zhenxing

Laboratory Evaluation of Performance Properties of Asphalt Binder Modified by Polymer Modified Bitumen and Warm Mix Asphalt Additive

*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.*

E-mail: AminFarajollahi@gmail.com

Received: October 2021- Accepted: May 2022

ABSTRACT

The performance properties of bitumen can be improved by using several modifiers, including: polyphosphoric acid (PPA), semi-hot asphalt mixers (WMA) and styrene butadiene rubber (SBR). The present study evaluated the effect of PPA and WMA additives on the rheological behavior of SBR modified bitumen. Modified SBR / PPA and SBR / PPA / WMA bitumen were subjected to rotational viscosity, dynamic shear rheometer, multiple stress and creep recovery (MSCR) and linear slope sweep (LAS) tests. Based on the results of MSCR test at both stress levels, modification of the base bitumen by SBR, PPA and WMA additives improves the permanent deformation performance of the main bitumen. The results of LAS test showed that the use of SBR and WMA additives improves the fatigue life of bitumen. Also, by adding PPA, the fatigue life of SBR modified bitumen is increased. While the fatigue life is longer than the original bitumen. Among warm additives, Sasobit has a better effect on increasing the performance of bitumen.

Keywords: Asphalt Binder, Additive, Polymer, Fatigue