

بررسی تأثیر SBR بر عملکرد مخلوط آسفالتی حاوی افزودنی‌های نیمه گرم

مقاله علمی - پژوهشی

امین فرج‌اللهی*، 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: ۱۴۰۰/۱۰/۲۷ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۵

صفحه ۳۰۵-۳۲۶

چکیده

خواص عملکرد قیرها و مخلوط‌های آسفالتی را می‌توان با استفاده از چندین اصلاح‌کننده، از جمله: پلی فسفریک اسید (PPA^1)، اصلاح‌کننده‌های مخلوط آسفالت نیمه گرم (WMA^2) و لاستیک استایرن بوتادین (SBR^3) بهبود بخشید. تحقیق حاضر اثر محتویات PPA و WMA را بر خصوصیات عملکردی مخلوط SMA^4 ارزیابی کرد. مخلوط‌های اصلاح‌شده SBR/PPA و $SBR/PPA/WMA$ تحت آزمون‌های مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS^5)، خزش دینامیکی، مدول ارتجاعی (Mr^6)، مسیر چرخ و خستگی پرتو چهار نقطه‌ای (FPB^7) قرار گرفتند. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از تحلیل واریانس دو عاملی ($ANOVA^8$) استفاده شد. بر اساس نتایج، استفاده از SBR و PPA باعث افزایش خواص Mr ، شیاردار، ITS ، FE و رفتار خستگی نمونه‌ها می‌شود. با افزایش درصد PPA ، رفتار پوسیدگی و خستگی افزایش می‌یابد. در حالی که باعث کاهش Mr و ITS مخلوط‌های اصلاح‌شده می‌شود. در میان افزودنی‌های گرم، ساسوبیت تأثیر بهتری در افزایش عملکرد قیرها و مخلوط‌ها دارد.

واژه‌های کلیدی: مخلوط، نیمه گرم، پلیمر، شیارشدگی

۱-مقدمه

متخصصان این حوزه است. شش عامل 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 (baumgardner, 2015; zhang et al, 2016; mashan et al, 2016; orange et al, 2004; kim et al, 2013). افزودنی‌های پلیمری نتایج موفقیت آمیزی را به عنوان اصلاح‌کننده 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 تاپر، استایرن-بوتادین-لاستیک، اتیلن

روسازی یکی از اجزای اصلی راه است که نقش مهمی در تأمین 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 تمساح یکی از آسیب‌های عمده‌ای است که عملکرد روسازی را کاهش می‌دهد. این نوع ترک از لایه‌های زیرین آسفالت که تنش یا کرنش 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

که منجر به تحقیق در مورد جایگزین‌هایی مانند مخلوط‌های پلیمری شده است (fakhri et al, 2017; fakhri et al, 2012; liang et al, 2017; ameli et al, 2020). یکی از افزودنی‌های مفید و موثر برای اصلاح قیرهای پایه است. چندین تحقیق نشان داد که استفاده از SBR باعث افزایش عملکرد مخلوط آسفالتی می‌شود. بر اساس 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 ذخیره‌سازی 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 (norouzi et al, 2019; babagoli et al, 2019). هدف کار حاضر بررسی تأثیر افزودنی‌های نیمه گرم، PPA و SBR بر عملکرد مخلوط SMA است. اثر افزودنی‌های گرم بر روی مخلوط‌های پلیمری SBR/PPA از طریق یک سری آزمایش‌های معمولی مانند: شکل‌پذیری، درجه نفوذ، نقطه نرم شدن، مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین برای بررسی ویژگی‌های نمونه‌ها، آزمون‌های ITS, Mr, مسیر چرخ، FPB و خزش دینامیکی برای ارزیابی ویژگی‌های نمونه‌های مختلف SMA انجام شد.

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 انعطاف‌پذیری 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

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد استفاده شده

۲-۱-۱- مصالح

در این تحقیق از سنگدانه‌هایی با حداکثر اندازه اسمی سنگدانه ۱۲/۵ میلی‌متر استفاده شده است که دانه بندی آنها در جدول ۳ نشان داده شده است.

برای تامین مصالح برای ساخت نمونه‌ها، از یک معدن جدید در نزدیکی تهران استفاده شد. خواص فیزیکی و شیمیایی سنگدانه در جدول ۱ و ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱. خصوصیات مصالح سنگی

آزمایشات سنگ	نتایج	استاندارد
وزن مخصوص حقیقی	2.493	ASTM C127
(%) سایش مصالح درشت دانه	2.2	ASTM C127
(%) سایش مصالح ریزدانه	4.2	ASTM C128
(%) سایش لس آنجلس	22.3	AASHTO T96
(%) درصد شکستگی در دو وجهه	94	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

جدول ۳. دانه‌بندی مصالح سنگی

درصد عبوری	(میلی‌متر) اندازه الک
100	12.5
97	9.5
68	4.75
49	2.36
12	0.3
5	0.075

۲-۲-۱- قیر

یک نوع قیر AC-60/70 استفاده شد و ویژگی‌های قیر پایه در جدول ۴ ارایه شده است.

جدول ۴. خصوصیات قیر

نتیجه	واحد	استاندارد	آزمایش
68	(۰/۱ میلی‌متر)	ASTM D5	درجه نفوذ
48	سانتی‌متر	ASTM D36	نقطه نرمی
+100	سانتی‌متر	ASTM D113	شکل پذیری
305	سانتی‌گراد	ASTM D92	نقطه اشتعال
318	سانتی‌گراد	ASTM D70	نقطه شعله‌وری
1.046	گرم برسانتی‌متر	ASTM D70	وزن مخصوص

۲-۳-۱- فیبر

همانطور که گزارش شماره ۴۲۵ روسازی بزرگراه تحقیقات ملی (Brown and cooley, 1999) 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 ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵. خصوصیات فیبر

نتایج	خصوصیات
80	(%) درصد سلولز
1.1	(mm) میانگین طول فیبر
0.045	(mm) میانگین ضخامت
7.5	مقدار PH (5g/100 ml)
0.5	وزن مخصوص (g/cm ³)

۲-۴-۱- پلیمر

SBR از پالایشگاه نفت پاسارگاد داده شده و خواص آن در جدول ۶ نشان داده شده است.

جدول ۶. خصوصیات SBR

نتایج	خصوصیات
22.5-24.5	(%) درصد استایرن
2.8	(%) اسید ارگانیک
24.5	(مگاپاسکال) مقاومت کششی
>350	(%) درصد کشش
0.2	(%) خاکستر
0.98	(گرم بر سانتی متر مکعب) چگالی

۲-۵-۱- افزودنی PPA

PPA به عنوان اصلاح کننده شیمیایی از مرکز تحقیقات تحقیق و توسعه پالایشگاه نفت پاسارگاد تهیه شد. خواص PPA در جدول ۷ نشان داده شده است.

جدول ۷. 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 بنجار
8.00E-04	(N/cm)	کشش سطحی
1.487	(J/(g °C))	گرمای ویژه
1.964	(گرم بر سانتی متر مکعب)	25 C چگالی در دمای
420	(سانتی گراد)	نقطه جوش
282	-	نقطه ذوب
حلال در آب	-	قابلیت حل

۲-۶-۱- افزودنی‌های نیمه گرم

استفاده شد. جدول ۷ خواص افزودنی‌های گرم ذکر شده را نشان می‌دهد.

برای ارزیابی تأثیر افزودنی WMA بر رفتار قیرهای اصلاح شده کامپوزیت PPA/SBR، از دو افزودنی WMA (نانو فناوری Sasobit و Zycotherm)

جدول ۸. خصوصیات افزودنی‌های نیمه گرم

خصوصیات	ساسوییت	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 [ASTM D92, 2012]	غیر قابل اشتعال
نقطه ذوب	100 (°C)	-
ویسکوزیته	-	100-500 CPS
حلالیت در آب	غیر حلال	فایل حل

۲-۲- آماده سازی نمونه

اختلاط قیرهای اصلاح شده پلیمری با افزودنی‌های WMA پیشنهاد کرده اند. 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 ۸ 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 قیر به عنوان چسب بهینه تعیین شد. در تحقیقات فعلی برای هر نوع افزودنی با درصدهای مختلف، سه تکرار ساخته شد. سه تکرار برای هر مخلوط ساخته شد. جدول ۱۰ دمای اختلاط و تراکم نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

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 (۲ 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 (۰٫۲۵، ۰٫۵، 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 برای

جدول ۹. 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

جدول ۱۰. دمای اختلاط و تراکم نمونه‌های مختلف

نمونه	(سانتی‌گراد) دمای اختلاط	(سانتی‌گراد) دمای تراکم
A	148	135
AE	165	148
AEP0.25	167	151
AEP0.5	168	154
AEP0.75	169	156
AEP1	170	158
AEP0.25S	138	129
AEP0.5S	140	130
AEP0.75S	141	131
AEP1S	142	132
AEP0.25Z	143	132
AEP0.5Z	145	130
AEP0.75Z	146	133
AEP1Z	148	135

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^9) اجرا شد.

۳-۱-۱- پایداری ذخیره سازی در دمای بالا

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

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

۳-۲- تست عملکرد مخلوط

۳-۲-۱- تست ITS

$$ITS = \frac{2P}{\pi Dt}$$

(۲)

نشان می‌دهد. t به ضخامت نمونه‌ها (میلی‌متر) اشاره دارد.

جایی که، ITS به مقاومت کششی غیر مستقیم مخلوط (کیلوپاسکال) اشاره دارد. Pmax نشان دهنده حداکثر بار (کیلونیوتن) است. D قطر نمونه‌ها (میلی‌متر) را

۳-۲-۲- مدول ارتجاعی

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:

مدول برجهنگی 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

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

(۳)

جایی که

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

= v نسبت پواسون؛

t= طول نمونه (میلی‌متر)

δ = تغییر شکل قابل بازیابی افقی (میلی‌متر)

۳-۲-۳- تست خزش دینامیکی

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.

در کار فعلی، استاندارد US.NCHRP 9-19 برای بررسی استحکام مخلوطها در مقابل شیارشدن از طریق آزمایش‌های خزش دینامیکی مورد استفاده قرار گرفت.

۳-۲-۴- تست مسیر چرخ

برای اندازه گیری پتانسیل تغییر شکل دائمی SMA ها، آزمایش مسیر چرخ بر اساس استاندارد [39] AASHTO T-324 در ۵۰ درجه سانتی گراد 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:

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

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

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

جایی که،

رجوع به حداکثر ریز کرنش شود.

به حداکثر جابجایی در وسط تیر (میلی متر) مراجعه کنید.

h طول پرتو (میلی متر) را نشان می‌دهد.

بیرونی (۳۵۵,۵ میلی متر) را نشان می‌دهد.

طول داخلی گیج (۱۱۸,۵ میلی متر) را نشان می‌دهد.

حداکثر تنش کششی (کیلو پاسکال) را نشان می‌دهد.

P به حداکثر بار (کیلونیوتن) اشاره دارد.

B به عرض تیر (میلی متر) اشاره کنید

S به سفتی خمشی (مگاپاسکال) اشاره دارد.

از رابطه (۱۱) برای اندازه‌گیری عمر خستگی نمونه‌ها استفاده شد (Hafeez et al, 2014):

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

جایی که،

عمر خستگی نمونه‌ها است.

سطوح میکرو و سویه‌ها 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/m^3) 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 تجمعی (J/m^3) شود و انرژی تلف شده را برای هر چرخه بار نشان می‌دهد.

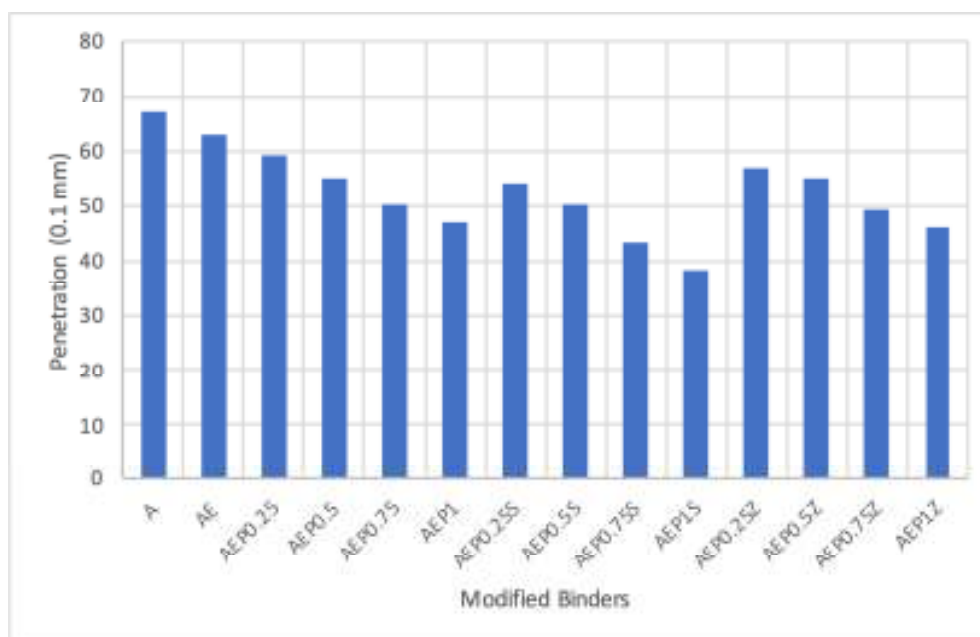
۴- نتایج

۴-۱- نتایج آزمایش قیر

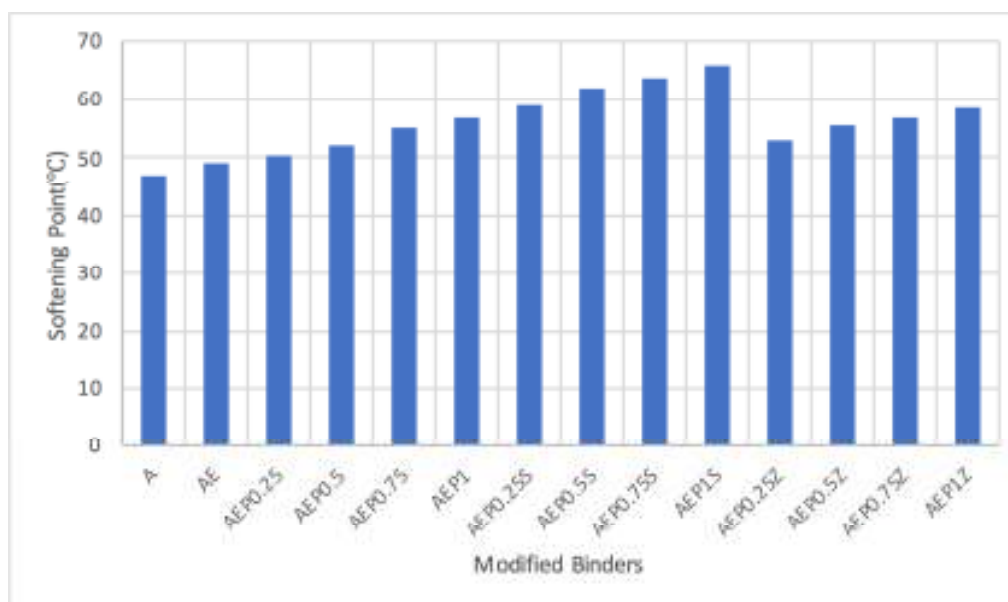
۴-۱-۱- نتیجه آزمایش قیر رئولوژیکی و معمولی

نشان داد که استفاده از اصلاح‌کننده‌های گرم باعث کاهش مقادیر نفوذ قیرهای اصلاح‌شده SBR/PPA می‌شود. در این میان، افزودنی زایکوترم اثر کمتری در کاهش مقادیر نفوذ دارد. با توجه به نتایج آزمایش، با استفاده از اصلاح‌کننده‌ها، قیرها سفت‌تر می‌شوند، بنابراین استحکام مخلوط‌ها در برابر شیار شدن بهبود می‌یابد.

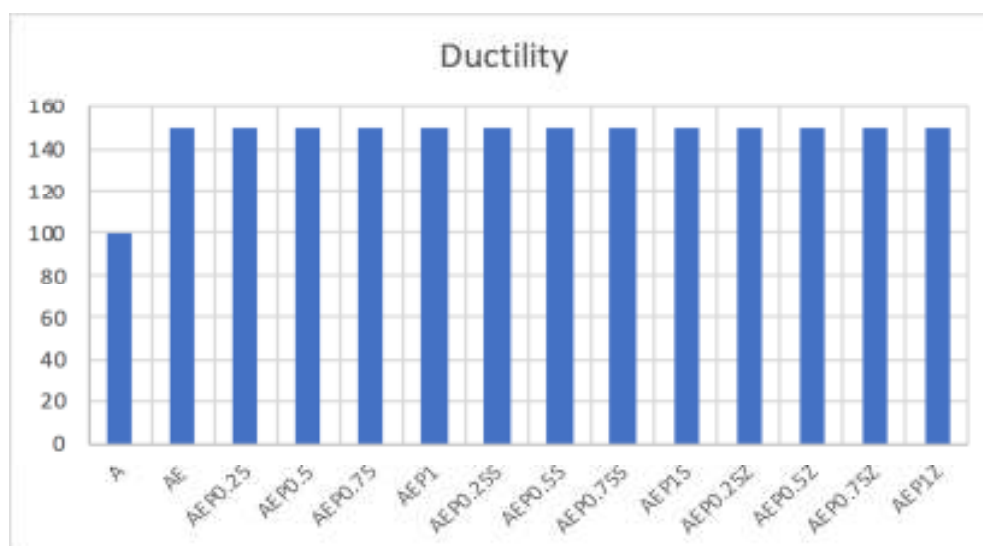
شکل ۳ نتایج آزمایش‌های فیزیکی قیر قیرهای پایه و اصلاح شده را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، استفاده از SBR و PPA باعث کاهش درجه نفوذ قیر و افزایش نقطه نرمی قیر می‌شود که ممکن است به سفت شدن قیر با استفاده از SBR و PPA نسبت داده شود. با افزایش درصد PPA، نفوذ روند کاهشی و نقطه نرم شدن روند افزایشی داشت. همچنین، نتایج



شکل ۱. نتایج آزمایش درجه نفوذ



شکل ۲. نتایج آزمایش نقطه نرمی



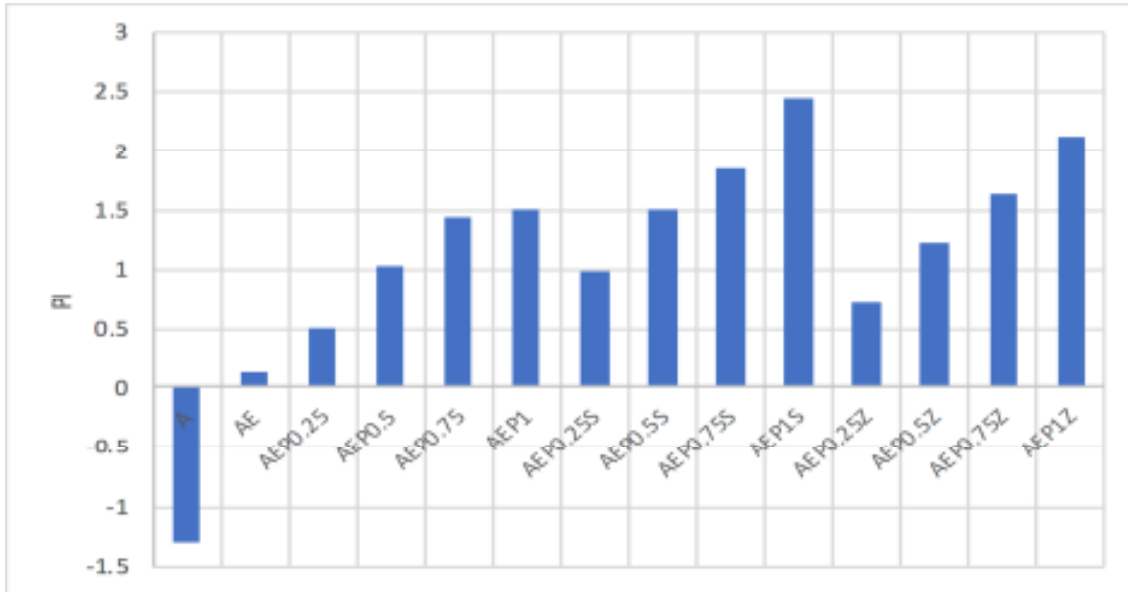
شکل ۳. نتایج آزمایش انگی

می‌یابد. مقادیر PI نمونه‌ها، افزودن افزودنی‌های SBR، PPA و WMA باعث بهبود مقاومت قیرها در برابر حساسیت دما می‌شود. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، استفاده از SBR و PPA باعث افزایش ویسکوزیته قیر پایه می‌شود. با افزایش ویسکوزیته قیر، توانایی قراردادن 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

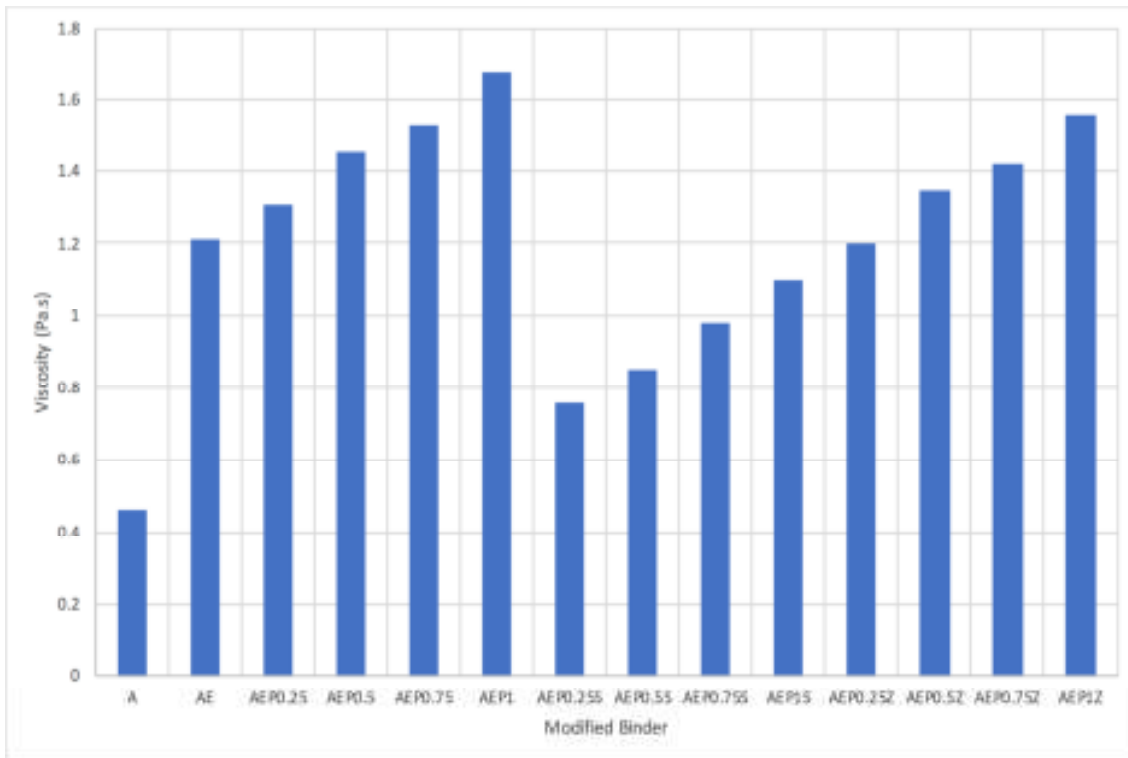
شکل ۴ شاخص نفوذ (PI) قیرهای اصلاح شده را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، استفاده از SBR و PPA باعث افزایش PI قیرها می‌شود. با افزایش درصد PPA، مقادیر PI افزایش می‌یابد. همچنین، افزودن مواد افزودنی گرم باعث افزایش مقاومت دمایی قیر می‌شود. در بین افزودنی‌های گرم، افزودنی ساسوبیت تاثیر بهتری در کاهش حساسیت دمایی قیرها دارد و به دنبال آن افزودنی زایکوترم 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

شده SBR/PPA کاهش می‌یابد. افزودنی Sasobit تاثیر بهتری در کاهش ویسکوزیته دارد و سپس افزودنی Zycotherm قرار دارد.

استفاده از اسید اورتوفسفونیک و انیدرید فسفونیک بی‌آب 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، ویسکوزیته قیر اصلاح



شکل ۴. نتایج مقادیر PI



شکل ۵. نتایج آزمایش ویسکوزیته

۴-۲-۱- نتایج تست پایداری ذخیره سازی

و قسمت بالایی نمونه کمتر از ۲,۵ درجه سانتی گراد بود. این امر بر اساس دو واقعیت قابل توجیه است:

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

- پایداری ذخیره سازی 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 می کند. این یک ماده جامد ایجاد می کند که پایداری بهتری دارد.

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

SBR و قیر اصلی دارای چگالی متفاوتی هستند، بنابراین هنگامی که قیرهای اصلاح شده در یک مخزن ذخیره می شوند 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 می شوند. استحکام قیرها در دماهای بالا در برابر جداسازی فازها با انجام تست پایداری ذخیره سازی اندازه گیری می شود. نتیجه تست پایداری ذخیره سازی قیرهای اصلاح شده در جدول ۱۱ 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 می دهد که جداسازی فاز رخ داده است. در حالی که استفاده از PPA باعث افزایش جداسازی فازی قیرهای اصلاح شده می شود و نتایج نقطه نرم شدن از قسمت پایین

جدول ۱۱. نتایج آزمایش پایداری ذخیره سازی

قیر اصلی	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

۴-۳- نتیجه آزمایش های مخلوط

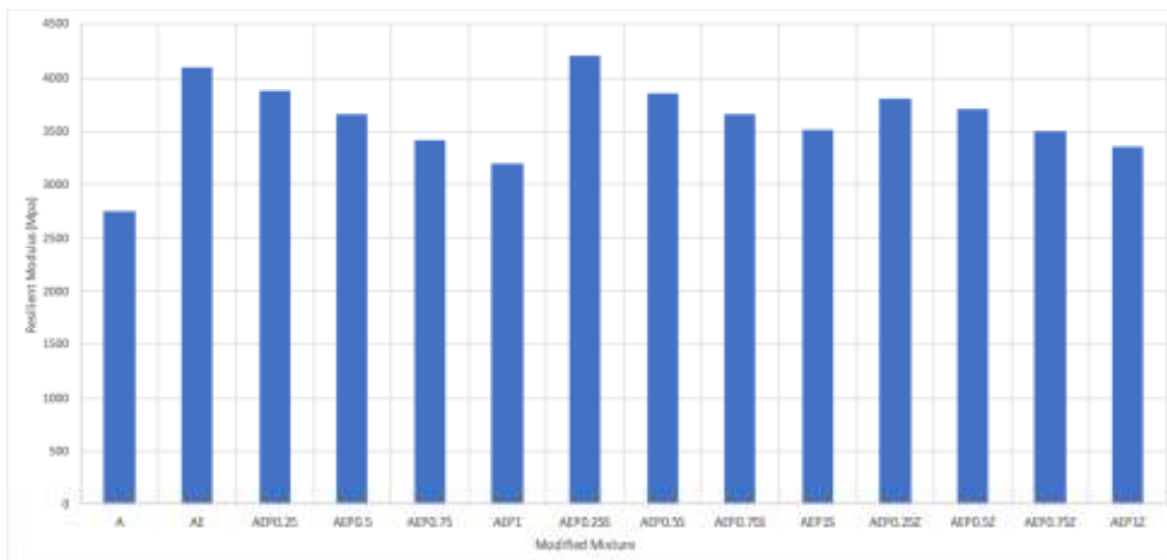
۴-۳-۱- نتیجه آزمون مدول برجهنگی

استفاده از SBR باعث افزایش مقادیر Mr می شود. این افزایش به افزایش انعطاف پذیری مخلوطها با افزودن SBR

نتایج آزمون Mr نمونه های اصلاح شده توسط افزودنی های مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که

استفاده از Sasobit باعث افزایش مدول ارتجاعی قیرهای اصلاح شده SBR/PPA می‌شود. در حالی که مخلوط‌های حاوی نانوتکنولوژی Zycotherm نسبت به مخلوط‌های حاوی Sasobit دارای مقادیر Mr کمتری هستند.

نسبت داده می‌شود. همچنین استفاده از PPA باعث کاهش Mr مخلوط‌ها می‌شود. به طوری که مخلوط AEPO.25 بالاترین مقدار مدول ارتجاعی را در بین نمونه‌های حاوی SBR/PPA دارد. دلیل این امر ممکن است به دلیل سفت شدن قیر توسط PPA باشد. همانطور که نتایج نشان می‌دهد.



شکل ۶. نتایج آزمایش مدول برجهدگی

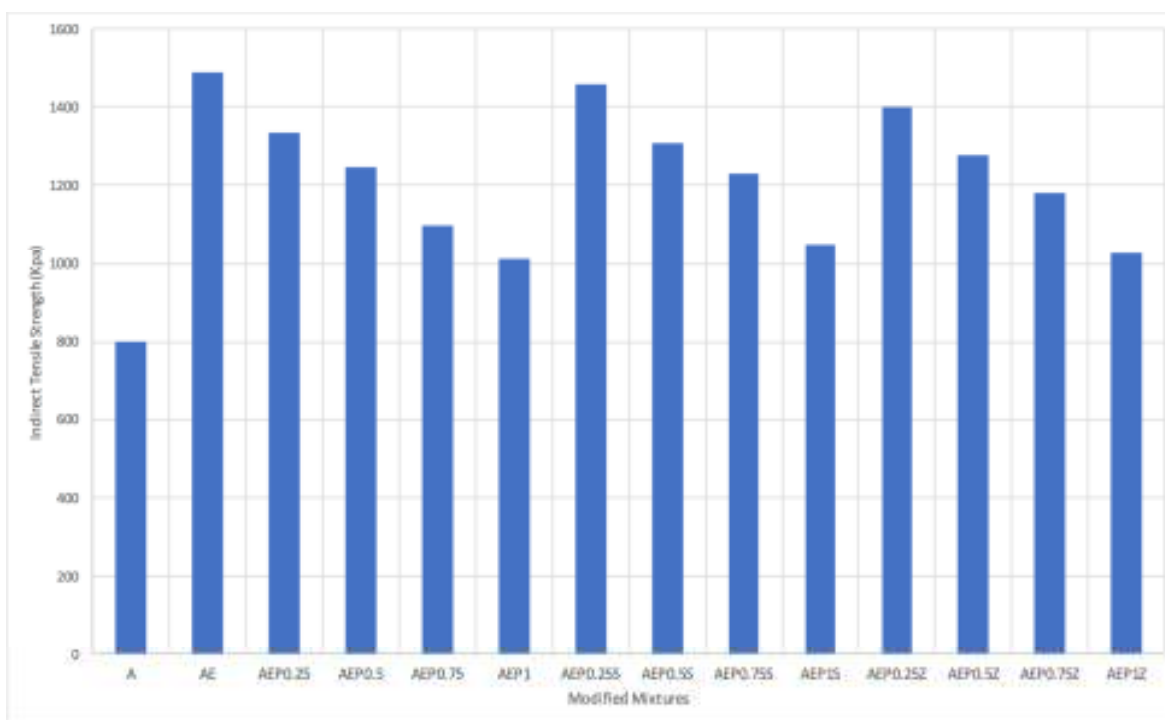
استفاده از افزودنی‌های WMA منجر به افزایش مقادیر ITS مخلوط‌های اصلاح شده SBR/PPA شد. همه مخلوط‌های اصلاح شده گرم به جز مخلوط‌های اصلاح شده Zycotherm مقادیر ITS بالاتری نسبت به مخلوط‌های SBR/PPA داشتند اما نتایج کمتری نسبت به مخلوط‌های اصلاح شده SBR داشتند. در میان مخلوط‌های گرم اصلاح شده، ساسوبیت بالاترین مقادیر ITS را داشت.

همانطور که چسبندگی قیر به سنگدانه‌ها بیشتر می‌شود، مقدار ITS بالاتر می‌رود. بنابراین، همانطور که از علائم مشاهده می‌شود، با استفاده از SBR و PPA، انسجام و چسبندگی قیر به سنگدانه‌ها به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج در شکل ۷، مخلوط‌های حاوی SBR دارای بالاترین مقادیر ITS در بین نمونه‌های اصلاح شده هستند.

Mr مخلوط با ۰٫۲۵٪ PPA ۴۰٪ بیشتر از نمونه اصلاح نشده بود، در حالی که ۱٪ مخلوط اصلاح شده PPA دارای آقایی حدود ۱۷٪ بیشتر از مخلوط اصلاح نشده بود. نتایج آزمون Mr نشان داد که با استفاده از درصد PPA، روند کاهش در مقادیر Mr مشاهده می‌شود. افزودن Sasobit به مخلوط حاوی ۰٫۲۵٪ PPA و SBR باعث افزایش Mr نمونه تا ۵۳٪ می‌شود.

۴-۳-۲-تست ITS

شکل ۷ مقادیر ITS نمونه‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج آزمایش، مقادیر ITS نمونه‌های دارای افزودنی SBR بیشتر از مخلوط نمونه اولیه بود. با افزودن PPA به قیرهای اصلاح شده SBR، مقادیر ITS کاهش یافت. علاوه بر این، نتایج ITS با افزایش محتوای PPA کاهش می‌یابد.

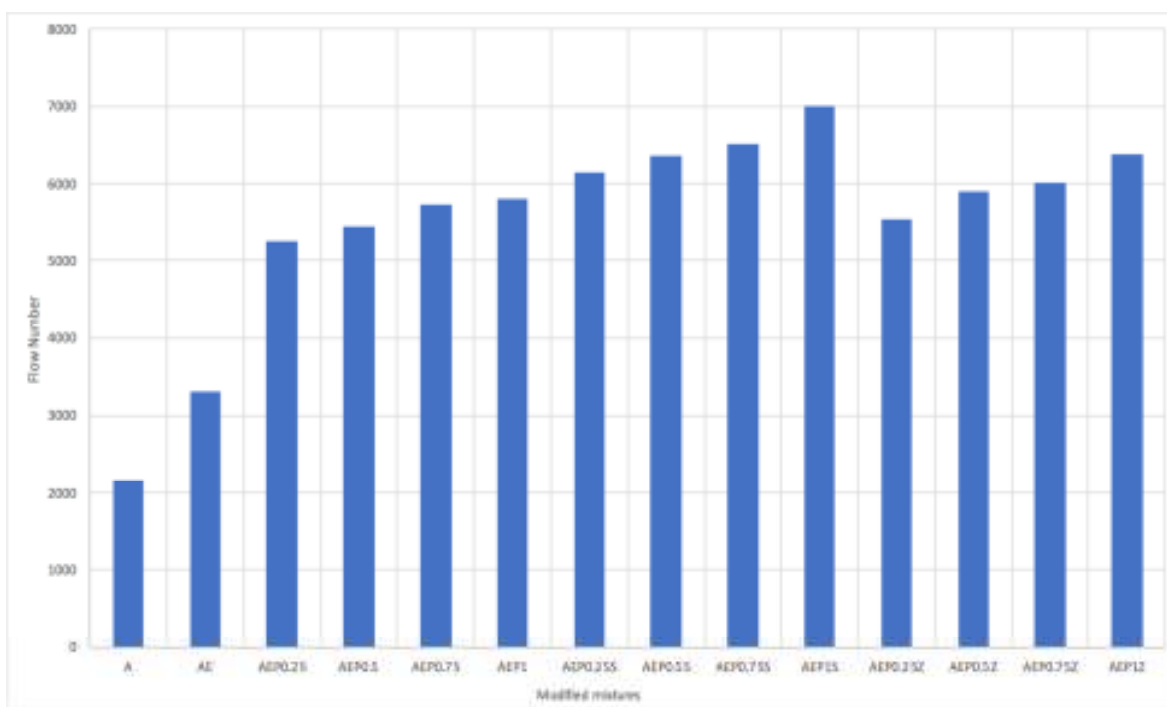


شکل ۷. نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم

۴-۳-۳- نتایج شماره جریان (FN)

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، استفاده از افزودنی‌های WMA باعث افزایش تعداد جریان مخلوط‌های اصلاح شده SBR/PPA می‌شود. در بین مخلوط‌های گرم، مخلوط‌های اصلاح شده ساسوبیت و زایکوترم به ترتیب بیشترین و کمترین مقاومت در برابر شیارشدگی را داشتند. این به دلیل اثر اتصال متقابل اضافی PPA با پلیمرها است که پایداری قوی‌تر و سختی بالاتری را برای قیرهای اصلاح‌شده فراهم می‌کند. به‌عنوان مثال، افزودن افزودنی SBR منجر به افزایش ۵۳ درصدی FN نمونه‌ها شد. همچنین افزودن ۰٫۲۵٪ PPA به مخلوط اصلاح شده SBR FN را تا ۵۹٪ افزایش می‌دهد. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، استفاده از Sasobit باعث افزایش ۱۰۰ درصدی تعداد جریان می‌شود. در حالی که افزودن زایکوترم مقاومت شیارشدگی را تا ۱۸ درصد افزایش می‌دهد.

شکل ۸ FN نمونه‌های اصلاح شده را نشان می‌دهد. مخلوط‌هایی با FN بیشتر می‌توانند در برابر تغییر شکل دائمی مقاومت بهتری داشته باشند. همانطور که نتایج در شکل ۸ نشان می‌دهد، استفاده از SBR مقاومت تغییر شکل دائمی نمونه‌ها را افزایش می‌دهد، که می‌تواند به این دلیل باشد که با استفاده از SBR، پتانسیل بازیابی نمونه‌ها افزایش می‌یابد و توانایی مخلوط‌ها برای بازیابی کرنش انباشته شده آنها بهبود می‌یابد. همانطور که نتایج آزمایش MSCR نشان داد، با افزودن SBR و PPA درصد بازیابی قیرها افزایش می‌یابد. در نتیجه مقاومت شیاردار افزایش می‌یابد. همچنین بر اساس نتایج تست قیر معمولی، افزودن افزودنی‌های SBR و PPA باعث سفت شدن قیر می‌شود. با سفت شدن قیر، مخلوط‌ها سفت‌تر شده و مقاومت مخلوط در برابر شیار شدن بهبود می‌یابد. همچنین، استفاده از PPA باعث افزایش FN مخلوط‌ها می‌شود و با افزودن درصد PPA، مقاومت شیاردار بهبود می‌یابد. نتایج نشان داد که استفاده از PPA باعث افزایش سفتی و ویسکوزیته مخلوط‌ها و در نتیجه افزایش رفتار شیارشدگی می‌شود. افزایش سفتی و

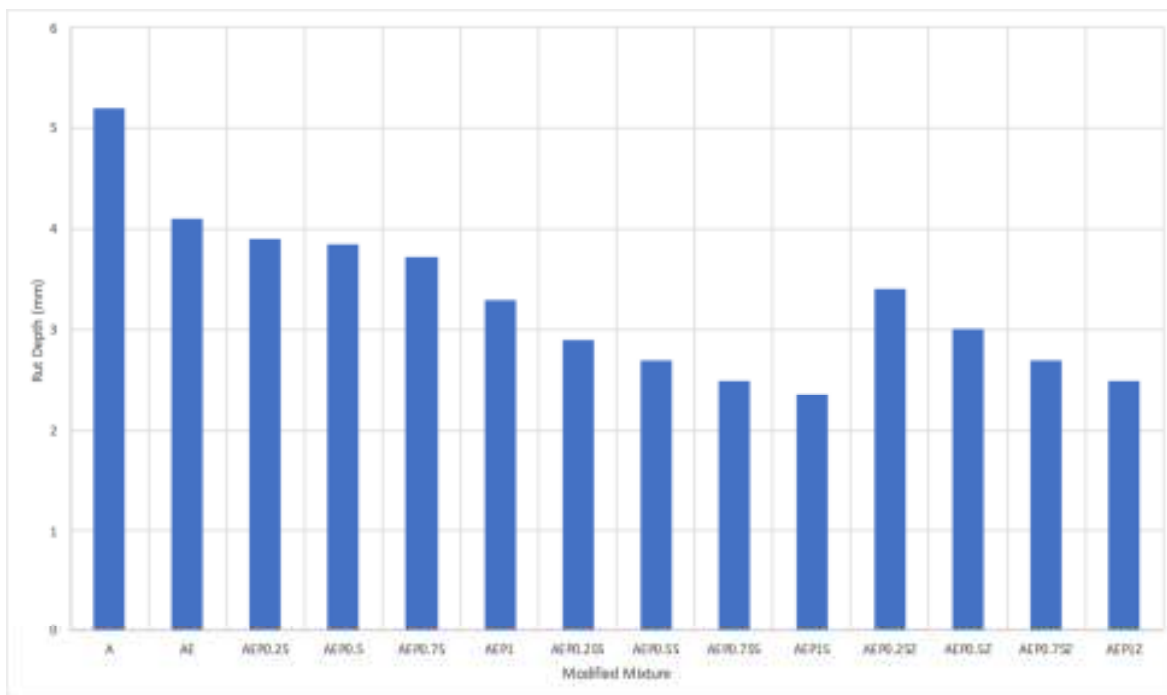


شکل ۸. نتایج عدد روانی

۴-۳-۴- نتایج تست مسیر چرخ

شکل ۹ عمق شیار نمونه‌ها را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، SBR باعث بهبود مقاومت تغییر شکل دائمی نمونه‌ها می‌شود. SBR پتانسیل بازیابی مخلوط‌ها را بهبود می‌بخشد. همچنین افزودن PPA باعث افزایش رفتار شیارشدگی مخلوط‌ها شده و با افزایش درصد PPA، استحکام نمونه‌ها در برابر تغییر شکل دائمی افزایش می‌یابد. همچنین بر اساس نتایج تست قیر معمولی، افزودن افزودنی‌های SBR و PPA باعث سفت شدن قیر می‌شود. با سفت شدن قیر، مخلوط‌ها سفت تر شده و مقاومت مخلوط در برابر شیار شدن بهبود 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 بی آب و افزایش میزان آسفالتین با وزن مولکولی

بالا با تبدیل آروماتیک‌ها به رزین‌ها و رزین‌ها به آسفالتین‌ها. بر اساس نتایج، افزودنی‌های WMA منجر به کاهش عمق شیار شدن مخلوط‌ها می‌شود. افزودنی‌های WMA انعطاف پذیری مخلوط‌ها را بهبود می‌بخشد. در میان مخلوط‌های گرم، مخلوط‌های اصلاح‌شده Sasobit بالاترین مقاومت را در برابر شیارشدگی داشتند. این به دلیل اثر اتصال متقابل اضافی PPA با پلیمرها است که پایداری قوی‌تر و سختی بالاتری را برای قیرهای اصلاح‌شده فراهم می‌کند. استفاده از مخلوط Sasobit به SBR/PPA باعث کاهش عمق شیار تا ۳۰ درصد می‌شود. بر اساس نتایج، عمق شیار مخلوط‌های اصلاح‌شده Zycotherm SBR/PPA کمتر از همه مخلوط‌های اصلاح‌شده SBR و SBR/PPA بود. در حالی که، نتایج بهتر از مخلوط اصلی بود.

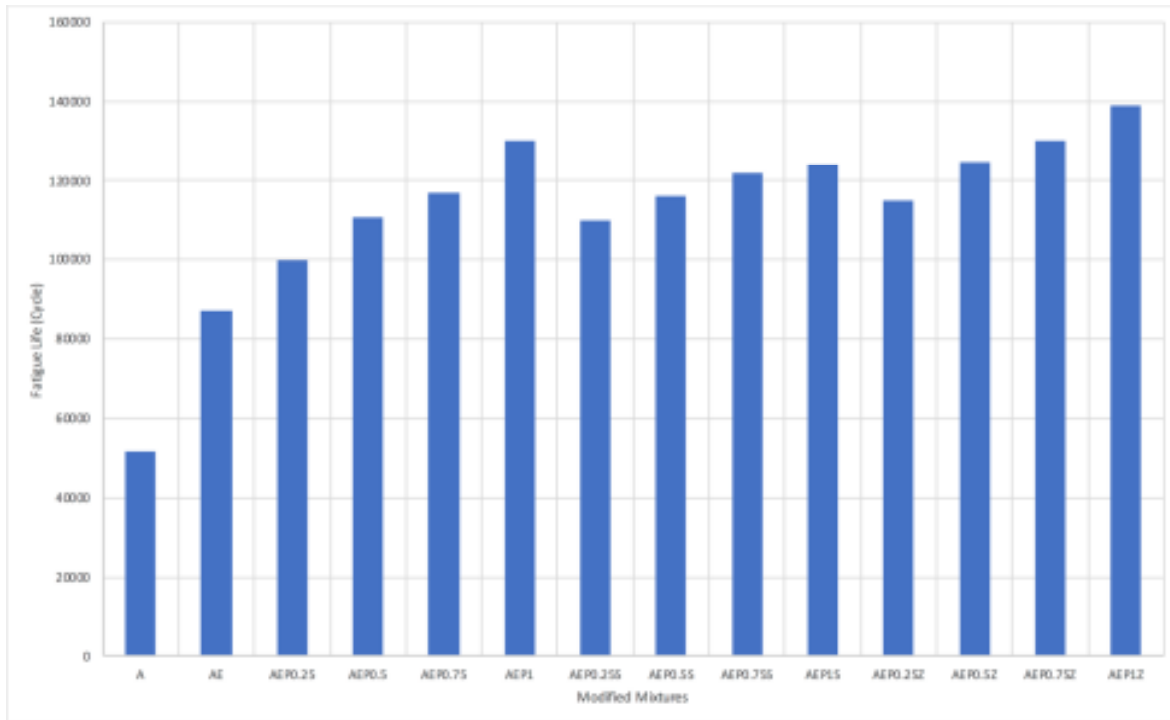


شکل ۹. نتایج عمق شیار نمونه‌ها

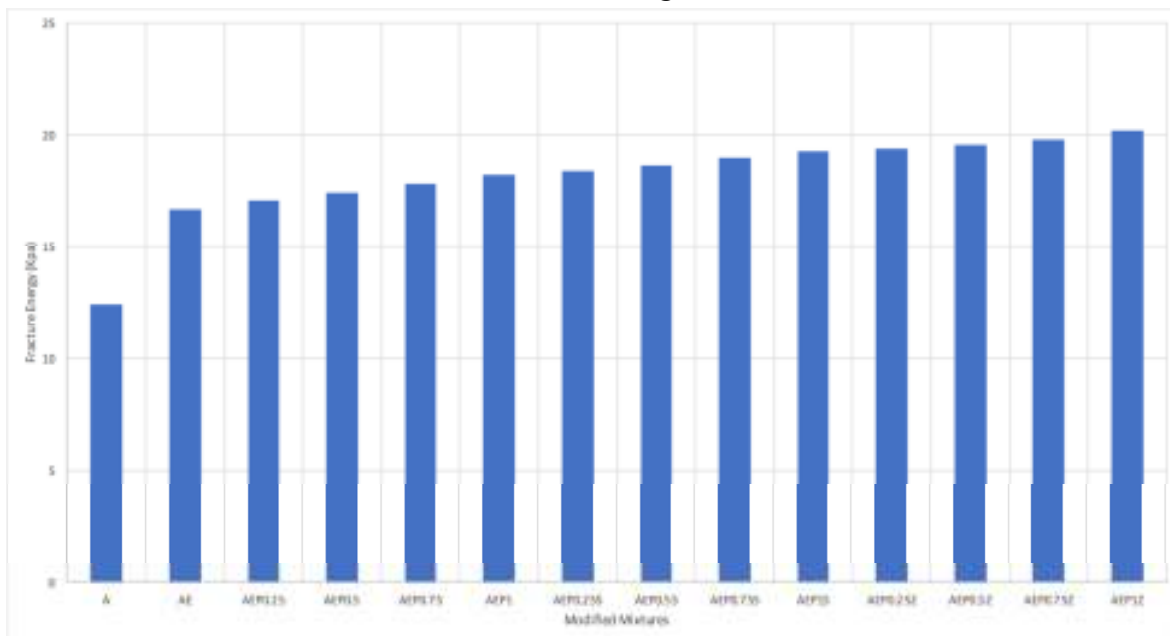
۴-۳-۵-تست FPB

برای شروع اولین ترک در آسفالت به نام انرژی شکست (FE). بر اساس شکل ۱۵، افزودن SBR منجر به افزایش انرژی شکست شد. این می‌تواند به دلیل افزایش پتانسیل بازیابی مخلوط با افزودن SBR باشد و در نتیجه انرژی کرنش و استحکام نمونه در برابر ترک افزایش می‌یابد. افزودن PPA باعث افزایش FE می‌شود. با افزودن بیش از محتویات PPA، مقادیر FE افزایش می‌یابد. نتایج نشان داد که استفاده از افزودنی‌های WMA باعث بهبود مقادیر FE مخلوط‌های اصلاح شده SBR/PPA می‌شود و انرژی مورد نیاز برای شروع ترک در مخلوط افزایش می‌یابد.

شکل ۱۰ رفتار دمایی میانی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که استفاده از SBR رفتار خستگی نمونه‌ها را بهبود می‌بخشد. بر اساس نتایج، استفاده از PPA باعث افزایش رفتار دمایی میانی نمونه‌ها می‌شود و با افزایش محتوای افزودنی PPA، عمر خستگی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. استفاده از WMA با قیرهای اصلاح شده SBR/PPA باعث بهبود رفتار خستگی نمونه‌ها می‌شود. در میان مخلوط‌های گرم اصلاح شده، مخلوط‌های اصلاح شده زایکوترم بیشترین عمر خستگی را داشتند. مقادیر چگالی انرژی شکست مخلوط‌های مختلف در شکل ۱۱ نشان داده شده است. انرژی مورد نیاز



شکل ۱۰. نتایج عمر خستگی نمونه‌ها



شکل ۱۱. نتایج انرژی شکست نمونه‌ها

۴-۳-۶- تحلیل داده‌ها

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 عبارتند از: نوع WMA و PPA. متغیرهای وابسته به طور قابل توجهی تحت

تأثیر چندین ترکیب افزودنی قرار گرفتند. نتایج تجزیه و تحلیل ANOVA در جداول ۱۲-۱۷ نشان داده شده است. نتایج تأیید می‌کنند که نوع افزودنی PPA و WMA تأثیر معنی‌داری بر عمر خستگی، Mr، تعداد جریان، ITS و عمق شیارها دارند.

جدول ۱۲. آنالیز واریانس دو طرفه: کشش غیرمستقیم در برابر نوع PPA, WMA

Source	DF	Adj. SS	Adj. MS	F-value	P-value
ITS					
PPA	5	63179902	21059967	5484.68	0.000
WMA type	2	3562852	1781426	463.94	0.000
Interaction	10	203194	33866	8.82	0.000
Error	24	92155	3840		
Total	34	67038102			

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

جدول ۱۳. آنالیز واریانس دو طرفه: مدول برجهندگی در برابر نوع PPA, WMA

Source	DF	Adj. SS	Adj. MS	F-value	P-value
Mr					
PPA	5	95769233	31923078	4014.23	0.000
WMA type	2	4214721	2107361	264.99	0.000
Interaction	10	1786681	297780	37.44	0.000
Error	24	190859	7952		
Total	34	101961494			

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

جدول ۱۴. آنالیز واریانس دو طرفه: عدد روانی در برابر نوع PPA, WMA

Source	DF	Adj. SS	Adj. MS	F-value	P-value
PPA	5	63179902	21059967	5484.68	0.000
WMA type	2	3562852	1781426	463.94	0.000
Interaction	10	203194	33866	8.82	0.000
Error	24	92155	3840		
Total	34	67038102			

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

جدول ۱۵. آنالیز واریانس دو طرفه: عمق شیار در برابر نوع PPA, WMA

Source	DF	Adj. SS	Adj. MS	F-value	P-value
PPA	5	38.7395	12.9132	409.73	0.000
WMA type	2	1.2293	0.6146	19.5	0.000
Interaction	10	0.1917	0.0319	1.01	0.040
Error	24	0.7564	0.0315		
Total	34	40.9169			

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

جدول ۱۶. آنالیز واریانس دو طرفه: عمرخستگی در برابر نوع PPA, WMA

Source	DF	Adj. SS	Adj. MS	F-value	P-value
PPA	5	56179848	31052349	7492.02	0.000
WMA type	2	2562765	1381412	263.23	0.000
Interaction	10	203192	28866	9.12	0.000
Error	24	92155	3840		
Total	34	63038253			

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

جدول ۱۷. آنالیز واریانس دو طرفه: انرژی شکست در برابر نوع PPA, WMA

Source	DF	Adj. SS	Adj. MS	F-value	P-value
FE					
PPA	5	123.4	52.6	5.23	0.000
WMA type	2	98.4	44.7	2.64	0.000
Interaction	10	100.4	10.4	1.12	0.000
Error	24	24	8.2		
Total	34	345.2			

۵- نتیجه گیری

توجه به نتایج، استفاده از Sasobit باعث افزایش مدول ارتجاعی قیرهای اصلاح شده SBR/PPA می‌شود. در حالی که مخلوط‌های حاوی نانوتکنولوژی Zycotherm نسبت به مخلوط‌های حاوی SBR/PPA مقادیر Mr کمتری دارند. -بر اساس تست خزش دینامیکی، استفاده از SBR باعث افزایش رفتار شیار شدن مخلوط‌ها می‌شود. این می‌تواند به دلیل این واقعیت باشد که با استفاده از SBR، پتانسیل بازیابی مخلوط‌ها افزایش می‌یابد و در نتیجه توانایی مخلوط‌ها برای بازیابی کرنش انباشته شده خود بهبود می‌یابد. نتایج آزمون MSCR نشان داد که افزودن SBR و PPA درصد بازیابی قیرها را افزایش داد. همچنین استفاده از PPA باعث افزایش FN نمونه‌ها می‌شود و همچنین با استفاده از درصد PPA، استحکام تغییر شکل دائمی بهبود می‌یابد. بر اساس نتایج، استفاده از PPA باعث افزایش سفتی و ویسکوزیته نمونه‌ها و سپس افزایش عملکرد تغییر شکل دائمی 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 می‌باشد. با افزایش میزان آسفالتین‌ها و وزن مولکولی بالا به آسفالتین‌ها.

-نتایج تست مسیر چرخ نشان می‌دهد که افزودنی‌های SBR باعث کاهش عمق شیار شدن نمونه‌ها می‌شود. نتایج آزمون MSCR نشان داد که افزودن SBR و PPA درصد بازیابی قیرها را افزایش داد. همچنین، افزودن PPA باعث افزایش رفتار شیارشدگی مخلوط‌ها شده و با افزایش محتوای PPA، استحکام نمونه‌ها در برابر شیار شدن افزایش می‌یابد. افزایش

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 ITS, Mr, Dynamic Creep, Wheel Tracking و Four Point Beam Fatigue اجرا شد. نتایج 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 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.

-با توجه به نتایج آزمایش ITS، مقادیر ITS نمونه‌های اصلاح شده با افزودنی SBR بیشتر از مخلوط شاهد بود. با افزودن PPA به قیرهای اصلاح شده SBR، مقادیر ITS کاهش یافت. همچنین، مقادیر ITS با افزایش محتوای PPA کاهش می‌یابد. استفاده از افزودنی‌های WMA منجر به افزایش مقادیر ITS مخلوط‌های اصلاح شده SBR/PPA شد.

-نتایج آزمون Mr نشان می‌دهد که استفاده از SBR باعث افزایش مدول ارتجاعی می‌شود. این افزایش به افزایش انعطاف‌پذیری مخلوط‌ها با افزودن SBR نسبت داده می‌شود. همچنین استفاده از PPA باعث کاهش Mr نمونه‌ها می‌شود. این به دلیل سفت شدن یک قیر با PPA است. با

میانی نمونه‌ها می‌شود و با افزایش محتوای افزودنی PPA، عمر خستگی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. کاهش در فاکتور خستگی 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. استفاده از WMA با قیرهای اصلاح شده SBR/PPA باعث بهبود رفتار خستگی نمونه‌ها می‌شود.

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. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که استفاده از WMA، شیار شدن نمونه‌ها افزایش می‌یابد. در میان مخلوط‌های گرم، مخلوط‌های اصلاح‌شده Sasobit بالاترین مقاومت را در برابر شیارشدگی داشتند. این به دلیل اثر اتصال عرضی اضافی PPA با پلیمرها است که پایداری قوی‌تر و سفتی بالاتری را برای قیرهای اصلاح‌شده فراهم می‌کند. -با توجه به تست خستگی پرتو چهار نقطه‌ای، استفاده از SBR عملکرد دمای متوسط مخلوط‌ها را افزایش می‌دهد. نتایج نشان داد که استفاده از PPA باعث افزایش رفتار دمای

۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Polyphosphoric Acid
- 2- Warm Mix Asphalt
- 3- Styrene-Butadiene Rubber
- 4- Stone Matrix Asphalt
- 5- Indirect Tensile Strength
- 6- Resilient Modulus
- 7- Four Point Beam Fatigue Test
- 8- Analysis of Varians

۷-مراجع

-Baumgardner, G.L., et al., (2005), "Polyphosphoric acid modified asphalt: Proposed mechanisms", Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 74, pp.283-305.

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

-Fakhri, M., Maleki, H. and Hosseini, S.A., (2017), "Investigation of different test methods to quantify rutting resistance and moisture damage of GFM-WMA mixtures." Construction and Building Materials 152, pp.1027-1040.

-Ameli, A.r. Babagoli, R. Norouzi, N. Jalali, F. and Poorheydari Mamaghani, F., (2020), "Laboratory evaluation of the effect of coal waste ash (CWA) and rice husk ash (RHA) on performance of asphalt mastics and Stone matrix asphalt (SMA) mixture", Construction and Building Materials 236,117557.

-Babagoli, R., (2019), "Investigation of the High-Temperature Behavior of Asphalt Binders Modified by Warm Additives through Performance Grade and Multiple Stress Creep and Recovery System." Journal of Materials in Civil Engineering 32, No. 2, 04019344.

mixtures through binder and mixture tests", International Journal of Pavement Engineering, pp.1-10.

-Orange, G., et al., (2004a), "Rutting and moisture resistance of asphalt mixtures containing polymer and polyphosphoric acid modified bitumen", Road Materials and Pavement Design, 5 (3), pp.323-354.

-Orange, G., et al., (2004b), "Chemical modification of bitumen through polyphosphoric acid: Properties-micro-structure relationship", In Proceedings of the 3rd Eurasphalt and Eurobitume Congress Held Vienna.

-Zhang, J., et al., (2016), "Relating asphalt binder elastic recovery properties to HMA crack modeling and fatigue life prediction", Construction and Building Materials, 111, pp.644-651.

-Kim, H., Lee, S. J., & Amirkhanian, S. N. (2010), "Effects of warm mix asphalt additives on performance properties of polymer modified asphalt binders", Canadian Journal of Civil Engineering, 37(1), pp.17-24. doi:10.1139/111-095 of polyphosphoric acid (PPA), "Construction and Building Materials 139, pp.183-192.

-Liang, Peng, Ming Liang, Weiyu Fan, Yuzhen Zhang, Chengduo Qian, and Shisong Ren. (2017), "Improving thermo-rheological behavior and compatibility of SBR modified asphalt by addition of polyphosphoric acid (PPA), Construction and Building Materials 139 (2017), pp.183-192.

-Mashaan, N.S., et al., (2014), "A review on using crumb rubber in reinforcement of asphalt pavement", The Scientific World Journal, 2014, ID 214612-1-ID 214612-21.

-Norouzi, Navid, Alireza Ameli, and Rezvan Babagoli, (2019), "Investigation of fatigue behaviour of warm modified binders and warm-stone matrix asphalt (WSMA)

Investigation of the Effect of SBR on the Performance of Asphalt Mixtures Containing Warm Mix Asphalt Additives

*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: June 2022

ABSTRACT

The performance properties of bitumen and asphalt mixtures can be improved by using several modifiers, including: poly phosphoric acid (PPA1), semi-hot asphalt mixture modifiers (WMA2) and styrene butadiene rubber (SBR3). The present study evaluated the effect of PPA and WMA contents on the functional properties of SMA4 mixture. The modified SBR / PPA and SBR / PPA / WMA mixtures were subjected to indirect tensile strength tests (ITS5), dynamic creep, elastic modulus (Mr6), wheel path and four-point beam fatigue (FPB7). Two-factor analysis of variance (ANOVA8) was used to analyze the data. According to the results, the use of SBR and PPA increases the properties of Mr, grooved, ITS, FE and fatigue behavior of the samples. As the percentage of PPA increases, caries and fatigue behavior increase. While reducing Mr and IT'S of modified mixtures. Among hot additives, Sasobit has a better effect on increasing the performance of bitumen and mixtures.

Keywords: Mixture, Warm Mix Asphalt, Polymer, Rutting