



ارزیابی مقایسه‌ای پارامترهای مکانیکی قیر اصلاح شده با پلیمرهای SBR و LDPE تولید ایران و پلیمر وارداتی SBS

امیرحسین عامری، محمود عامری*، عصمت ریاحی، ابوالفضل افشین

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۲۴
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۲/۲۹
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۱۴
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۴/۰۹

کلمات کلیدی:

قیر
افزودنی‌های پلیمری
درجه عملکردی
خستگی قیر
آزمایش جاروب دامنه خطی

خلاصه: افزایش روزافزون حجم ترافیک راه‌ها به همراه افزایش بار محوری وسایل نقلیه منجر به اعمال تنش‌های بیشتری بر سازه روسازی راه‌ها می‌شود. بنابراین خرابی‌های زودرس در اثر تکرار بارگذاری در قشر رویه آسفالتی روسازی‌ها، بیشتر مشاهده می‌شود. اصلاح قیر با افزودنی‌های پلیمری یکی از متداول‌ترین روش‌های اصلاح قیر و بهبود مشخصات آن در مواجهه با انواع خرابی‌های ناشی از بارگذاری است. در این پژوهش از افزودنی‌های پلیمری استایرن بوتادین استایرن (SBS)، استایرن بوتادین رابر (SBR) و پلی‌اتیلن سبک (LDPE) به همراه روان‌کننده ساسوبیت به منظور ارزیابی مکانیزم‌های شیارشدگی، خستگی ناشی از بارگذاری و ترک‌های برودتی قیرهای اصلاح شده پلیمری استفاده شده است. ضمن این‌که علاوه بر آزمایش‌های رایج شارپ، از آزمایش تکمیلی جاروب دامنه خطی که برای ارزیابی عملکرد خستگی قیرهای اصلاح شده توصیه شده نیز استفاده شده است. نتایج حاصل از آزمایش رنومتر برش دینامیکی نشان می‌دهند که استفاده از افزودنی‌های پلیمری ضمن بهبود شاخص شیارشدگی قیر پایه، درجه عملکردی بالای قیر را سه رده افزایش می‌دهند. همچنین ساسوبیت علاوه بر کاهش ویسکوزیته چرخشی قیرهای پلیمری، دمای عملکردی بالای قیر پلیمری حاوی استایرن بوتادین استایرن را یک رده افزایش می‌دهد. با این وجود، بر اساس نتایج آزمایش تیرچه خمشی، افزودنی‌های پلیمری و ساسوبیت تأثیر مثبتی بر عملکرد قیر پایه در دمای پایین ندارند. مقایسه عملکرد خستگی قیرهای پلیمری بر اساس نتایج آزمایش جاروب دامنه خطی نیز نشان می‌دهد که پلیمر استایرن بوتادین رابر بیشترین تأثیر را در افزایش عمر خستگی قیر پایه داشته است. ضمن این‌که ساسوبیت در سطوح کرنش بالا عمر خستگی قیرهای پلیمری را افزایش می‌دهد.

۱- مقدمه

تجرباتی که در سال‌های اخیر از عملکرد روسازی راه‌های کشور بدست آمده نشان داده است که این روسازی‌ها در طول دوره بهره‌برداری و قبل از پایان عمر مفید خود دچار خرابی‌های زودرس می‌شوند. عوامل متعددی در بروز خرابی‌های زودرس روسازی‌ها دخیل هستند. ترک‌های خستگی و شیارشدگی دو مورد از مهم‌ترین خرابی‌هایی هستند که در اثر تکرار بارگذاری و پدیده خستگی در روسازی‌های آسفالتی راه‌ها بوجود می‌آیند.

مصالح سنگی اسکلت ساختمانی مخلوط‌های آسفالتی را تشکیل می‌دهد و قیر خصوصیات ویسکوالاستیک آسفالت را در مراحل تولید، اجرا و بهره‌برداری کنترل می‌کند. اگرچه درصد قیر در مقایسه با درصد مصالح سنگی در مخلوط آسفالتی اندک است، اما نقش مهمی در عملکرد، دوام و پایداری مخلوط‌های آسفالتی ایفا می‌کند. هرگونه تغییر در خصوصیات رئولوژیکی^۱ قیر تأثیر مستقیم بر عملکرد روسازی آسفالتی دارد. به همین دلیل در چند دهه اخیر پژوهشگران صنعت قیر و آسفالت برای جلوگیری از بروز خرابی‌های زودرس و بهبود

1 Rheological properties

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ameri@iust.ac.ir



درصد SBS می‌تواند منجر به بهبود شرایط سخت شدگی قیر ناشی از پیرشدگی شود [۱۰]. در درصدهای بالا، شبکه پلیمری می‌تواند مانعی در برابر اکسیداسیون باشد که در نتیجه منجر به افزایش مقاومت قیر در برابر پیرشدگی می‌گردد.

بر اساس نتایج آزمایش‌ها و همچنین یافته‌های سایر پژوهشگران، استنباط عمومی بر این است که افزودنی SBS مشخصات فیزیکی قیر پایه را بهبود بخشیده و کارایی آن را در دماهای عملکردی بالا و میانی بهبود می‌بخشد. با این وجود یکی از نقاط ضعف این کوپلیمر این است که در دماهای بالا پیوند های دوگانه در زنجیره اصلی آن دچار تخریب حرارتی - اکسایشی می‌شود که منجر به کاهش عمر پوشش آسفالتی می‌گردد [۱۱]. از دیگر نقاط ضعف پلیمر SBS، قیمت بالای آن در مقایسه با سایر پلیمر های مشابه از جمله استایرن بوتادین رابر^۳ (SBR) و پلی اتیلن سبک^۴ (LDPE) در کشور ما است. SBR افزودنی پلیمری دیگری است که فرآیندپذیری بسیار بالایی دارد. برخلاف پلیمر SBS که یک ماده وارداتی و گران قیمت است، SBR به دلیل مقاومت سایشی زیاد و همچنین به دو دلیل سازگاری با محیط زیست و ارزان بودن یکی از پر مصرف‌ترین الاستومرهای مصنوعی^۵ در صنعت قیر و آسفالت است [۱۲]. SBR متشکل از استایرن بوتادین و لاستیک است که افزودن آن به قیر موجب انعطاف‌پذیری بیشتر قیر پایه و در نتیجه الاستیسیته آن می‌شود. پژوهش‌های انجام شده بر روی قیرهای اصلاح شده با این پلیمر نشان داده است که SBR و SBS از نظر ساختاری شباهت زیادی به یکدیگر دارند. لیکن به علت ارزان بودن مواد اولیه SBR در مقایسه با SBS، امروزه مصرف SBR در کشور ما رو به افزایش است [۲]. افزودن SBR به قیر پایه باعث افزایش شاخص شیارشدگی، بهبود الاستیسیته قیر و همچنین کاهش حساسیت حرارتی قیر پلیمری نسبت به قیر پایه می‌شود. با این وجود، خاصیت تغییرشکل و برگشت‌پذیری قیر اصلاح شده با SBR در دمای پایین بیشتر از قیر اصلاح شده با پلیمر SBS است [۱۳]. LDPE نیز دسته دیگری از پلیمرهای ارزان قیمت است که در سال‌های اخیر برای اصلاح قیر در صنعت آسفالت مورد توجه زیادی قرار گرفته است [۱۱ و ۱۲].

اصلاح قیر با استفاده از افزودنی‌های پلیمری منجر به افزایش

خواص فیزیکی و شیمیایی قیرهای خالص اقدام به استفاده از مواد افزودنی نموده‌اند [۱].

امروزه استفاده از قیرهای اصلاح شده به منظور بهبود ویژگی‌های آسفالت و همچنین افزایش دوام مخلوط‌های آسفالتی و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری رویه آسفالتی راه‌ها، مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفته است [۲-۴]. از جمله مهم‌ترین افزودنی‌های مورد استفاده در صنعت روسازی آسفالتی، افزودنی‌های پلیمری می‌باشند. نتایج تحقیقات بسیاری نشان داده است که قیرهای اصلاح شده با افزودنی‌های پلیمری دارای شاخص‌های شیارشدگی و ترک خوردگی بهتری نسبت به قیر پایه هستند و حساسیت حرارتی کمتری نیز نسبت به قیر پایه دارند [۵].

پلیمر استایرن بوتادین استایرن^۱ (SBS) یکی از مهم‌ترین اصلاح‌کننده‌های پلیمری قیرها به شمار می‌آید که بطور گسترده و به منظور بهبود خواص قیر استفاده می‌شود. قیرهای اصلاح شده با این پلیمر حدود رواداری ویسکوزیته دمای اختلاط و دمای تراکم را ارضاء می‌کند و در دمای خدمت‌دهی پایین نیز خاصیت الاستیسیته خود را حفظ می‌کنند [۶]. قیرهایی که در ترکیبات آن‌ها میزان آروماتیک بیشتری وجود دارد، هنگام اصلاح با افزودنی SBS از پایداری بیشتری برخوردار بوده و الاستیسیته قیر اصلاح شده به خوبی حفظ می‌شود [۷]. اصلاح قیر با پلیمر SBS مورد بررسی محققان بسیاری قرار گرفته و به این نتیجه رسیدند که پلیمر SBS منجر به بهبود خصوصیات رئولوژیکی قیر، افزایش نقطه نرمی و کاهش حساسیت حرارتی آن می‌شود و به طور کلی میزان پیرشدگی کوتاه‌مدت و بلندمدت قیرهای اصلاح شده با این پلیمر نیز کمتر از قیر پایه است.

بطور معمول در صنعت آسفالت، استفاده از افزودنی‌های پلیمری با درصدهای بین ۳ تا ۴/۵ درصد رواج بیشتری دارد. با این وجود در سال‌های اخیر افزایش درصد پلیمرها (بین ۵ تا ۱۵ درصد) به منظور اصلاح قیر مورد توجه برخی از محققان قرار گرفته است [۸]. نتایج تحقیقات نشان داده است که یکی از مؤثرترین راه‌ها به منظور حفظ خصوصیات فیزیکی قیر در برابر پیرشدگی، افزایش درصد پلیمر است. همچنین در مقایسه با درصدهای پایین، قیرهای اصلاح شده با درصدهای بالاتر پلیمر عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند [۹]. جیاکومو^۲ و همکاران به این نتیجه رسیدند که اصلاح قیر با ۶

3 Styrene-Butadiene Rubber
4 Low-Density Polyethylene
5 Synthetic elastomers

1 Styrene-Butadiene-Styrene
2 Giacomo et al.

برخوردار باشد. لیکن یکی از نقاط ضعف ذاتی این پلیمر، ناپایداری حرارتی و اکسایش حرارتی آن در دماهای بالاست که منجر به کاهش عمر پوشش آسفالتی می‌شود. علاوه بر این نارسایی، SBS از جمله اقلام وارداتی و انحصاری در ایران است که قیمت آن در مقایسه با پلیمرهای مشابه تولید داخل بسیار گران‌تر است. به همین دلیل در این پژوهش از دو پلیمر SBR و LDPE که هر دو از تولیدات داخل می‌باشند، برای ارزیابی کارایی آن‌ها در مقایسه با پلیمر SBS استفاده شده است. SBR حاوی اجزا سازنده کوپلیمر SBS است که سازگاری بسیار خوبی با محیط‌زیست نیز دارد. پلیمر LDPE نوعی ترموپلاستیک سازگار با قیر است که قیر اصلاح شده با آن در دماهای بالا از کندروانی نسبتاً خوبی برخوردار است.

از سوی دیگر آزمایشات سوپرپیو توانایی لازم را برای بررسی دقیق رفتار قیرهای اصلاح شده ندارند. بر همین اساس در این پژوهش آزمایشات تکمیلی که تحت عنوان PG⁺ به منظور ارزیابی عملکرد قیرهای اصلاح شده توسط پژوهشگران برنامه تحقیقات راهبردی بزرگراه‌ها در آمریکا پیشنهاد شده نیز مورد استفاده قرار گرفته است. در پژوهش حاضر، تأثیر پلیمرهای SBS، SBR و LDPE بر روی رفتار قیر با آزمایشات سوپرپیو و آزمایش مکمل سوپرپیو (PG⁺) مورد سنجش قرار گرفته است. همچنین تأثیر روان‌کننده ساسوبیت بر رفتار قیرهای اصلاح شده پلیمری به کمک آزمایشات سوپرپیو بررسی شده و به منظور ارزیابی رفتار خستگی قیرهای اصلاح شده نیز آزمایش جاروب دامنه خطی^۱ (LAS) انجام شده است.

۲- مواد و افزودنی‌ها

۲-۱- قیر

در این پژوهش از قیر ۸۵-۱۰۰ پالایشگاه نفت جی اصفهان استفاده شده است. مشخصات و ویژگی‌های قیر مصرفی در جدول ۱ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که قیر با درجه نفوذ ۸۵/۱۰۰ کلیه الزامات درجه عملکردی قیر PG 22-58 را رعایت می‌کند.

۲-۲- افزودنی‌های مورد استفاده

در این پژوهش از پلیمرهای SBS، SBR و LDPE و همچنین روان‌کننده ساسوبیت استفاده شده است. افزودنی‌های SBR و

ویسکوزیته و سختی قیر می‌گردد. افزایش ویسکوزیته قیر باعث دشوار شدن اختلاط آن با سنگدانه‌ها و در نتیجه افزایش دمای اختلاط و تراکم مخلوط‌های آسفالتی می‌شود. یکی از راهکارهای موجود، استفاده از افزودنی‌های نیمه‌گرم به عنوان یک ماده روان‌کننده و به منظور کاهش ویسکوزیته قیرهای پلیمری است. ساسوبیت یک افزودنی نیمه‌گرم آلی است که از آن در فناوری تولید آسفالت نیمه‌گرم استفاده می‌شود. استفاده از ساسوبیت در تکنولوژی آسفالت نیمه‌گرم برای کاهش ویسکوزیته قیر، کاهش دمای تولید، پخش و تراکم آسفالت و بطور کلی صرفه جویی در انرژی و مصرف سوخت می‌باشد [۱۳ و ۱۴]. تحقیقات انجام شده نشان داده است که اضافه کردن ساسوبیت به قیر نه تنها باعث افزایش مدول برش دینامیکی (G^*)، نقطه نرمی، درجه نفوذ و نقطه شکست فراس قیر می‌شود، بلکه باعث کاهش زاویه فاز آن نیز می‌گردد [۱۸]. افزایش مدول دینامیکی و کاهش زاویه فاز قیر اصلاح شده نه تنها باعث افزایش شاخص شیارشدگی ($G^*/\sin\delta$) می‌شود بلکه منجر به افزایش مقاومت قیر اصلاح شده در برابر شیارشدگی نیز می‌گردد. بنابراین در این پژوهش استفاده از قیرهای پلیمری به همراه ساسوبیت به عنوان کاهنده ویسکوزیته مورد بررسی قرار می‌گیرد و تأثیر این آمیخته پلیمری بر خصوصیات عملکردی قیر ارزیابی می‌شود.

۱-۱- بیان مسأله و اهداف پژوهش

خرابی‌های ناشی از بارگذاری معمولاً بصورت ترک و ناهمواری در لایه رویه آسفالتی روسازی‌ها ظاهر می‌شوند. با توجه به اینکه در شرایط گوناگون جوی و بارگذاری، خواص رئولوژیکی قیر نقش مهمی در عملکرد مخلوط‌های آسفالتی دارد، بخش قابل توجهی از مطالعات و تحقیقات پژوهشگران در صنعت قیر و آسفالت در دو دهه اخیر، بر روی ارزیابی عملکرد قیرهای خالص و بهبود مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن‌ها با استفاده از انواع افزودنی‌ها متمرکز بوده است. یکی از روش‌های رایج و موفق برای رسیدن به این هدف، اصلاح قیر با استفاده از افزودنی‌های پلیمری بوده است. طبق نظر بسیاری از پژوهشگران در صنعت قیر و آسفالت، پلیمر SBS یکی از کارآمدترین اصلاح‌کننده‌های مشخصات قیر خالص محسوب می‌شود که با جذب مواد آروماتیک قیر، باعث می‌شود که قیر اصلاح شده در دماهای بالای محیط از کشسانی، پلاستیسیته و مقاومت کششی نسبتاً خوبی

1 Linear Amplitude Sweep test

جدول ۱. خصوصیات عملکردی قیر پایه ۸۵/۱۰۰ مورد استفاده در این پژوهش
Table 1. The properties of 85/100 Bitumen

حدود مشخصات قیر ۸۵/۱۰۰		نتیجه آزمایش	استاندارد	شرح آزمایش
حداکثر	حداقل			
-	-	۱/۰۱۷۹	ASTM D 70	وزن مخصوص در ۲۵ درجه سانتی‌گراد
۱۰۰	۸۵	۹۱	ASTM D 5	درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه (دهم میلی‌متر)
۵۲	۴۵	۴۹	ASTM D 36	نقطه نرمی (درجه سانتی‌گراد)
-	-	۰/۲۹۱	ASTM D 113	ویسکوزیته دینامیکی در ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد
-	۲۳۲	۳۳۴	ASTM D 92	نقطه اشتعال (درجه سانتی‌گراد)
-	۱۰۰	>۱۰۰	ASTM D 113	انگمی در دمای ۲۵ درجه (سانتی‌متر)
-	۹۹	۹۹/۹۷	ASTM D 2042	حلالیت در تری کلرواتیلن (درصد)

جدول ۳. مشخصات SBR مصرفی
Table 3. Properties of SBR used in this study

مقدار	مشخصات
۲۲/۵-۲۴/۵	مقدار استایرن (%)
۲۵۰	مقاومت کششی (kg/cm ²)
۰/۹۸	چگالی (gr/cm ³)
>۳۵۰	افزایش طول در نقطه شکست (%)
۰/۲	مقدار خاکستر (%)

جدول ۲. مشخصات SBS مصرفی
Table 2. Properties of SBS used in this study

مقدار	مشخصات
۳۰	مقدار استایرن (%)
۰/۹۴	وزن مخصوص (gr/cm ³)
۱۳/۴	ویسکوزیته
<۱	شاخص ذوب (gr/10min)
۰/۲۵	مقدار مواد فرار (%)

LDPE از پلیمرهای تولید داخل هستند که از پتروشیمی بندر امام تهیه شده‌اند. پلیمر SBS و افزودنی نیمه‌گرم ساسوبیت نیز که از اقلام وارداتی هستند، از شرکت پلیمر پیشرفته دانا تهیه شده‌اند. مشخصات و ویژگی‌های هر کدام از این افزودنی‌ها در جدول‌های ۲ تا ۵ نشان داده شده است.

۳- برنامه آزمایشگاهی

۳-۱- آماده‌سازی نمونه‌های قیر

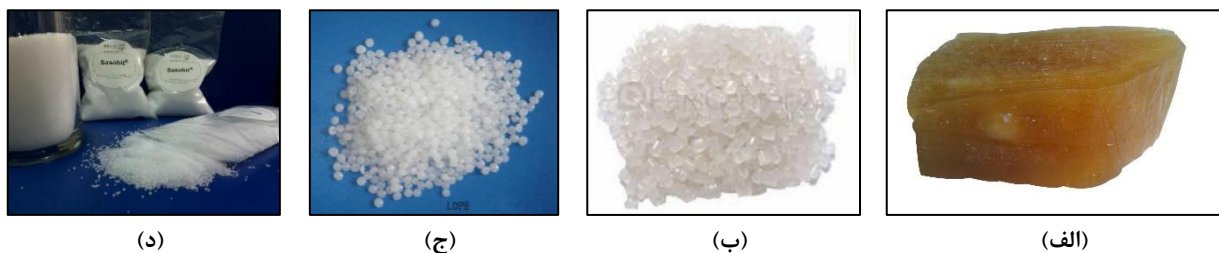
در این پژوهش، به منظور اصلاح قیر و با توجه به مطالعات قبلی، از پلیمر SBS به میزان ۶/۵ درصد و پلیمرهای LDPE و SBR به میزان ۷/۵ درصد وزنی قیر استفاده شده است [۱۹ و ۲۰]. اختلاط قیر و افزودنی‌های پلیمری با استفاده از مخلوط‌کن برش بالا با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه، در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان ۴۵ دقیقه انجام شده است [۲۱ و ۲۲]. همچنین با هدف کاهش ویسکوزیته قیرهای پلیمری از ۲/۵ درصد ساسوبیت استفاده شده است. اختلاط قیرهای پلیمری با ساسوبیت نیز در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت زمان ۳۰ دقیقه انجام شده است [۱۸ و ۲۳]. بنابراین، ۶ ترکیب مختلف قیر به منظور انجام آزمایشات تهیه شد.

جدول ۴. مشخصات LDPE مصرفی
Table 4. Properties of LDPE used in this study

مقدار	مشخصات
۰/۹۲	چگالی (gr/cm ³)
۹۵	نقطه نرمی (°C)
>۳۰۰	افزایش طول در نقطه شکست (%)
۱۷۰	کشش در نقطه شکست (kg/cm ²)
۱۲۰	Dart impact (gr)

جدول ۵. مشخصات ساسوبیت مصرفی
Table 5. Properties of sasobit used in this study

مقدار	مشخصات
حداکثر ۱	درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه (دهم میلی‌متر)
حداقل ۱۰۰	دمای سفت شدن (درجه سانتی‌گراد)
خنثی	PH
۰/۶۲	چگالی (gr/m ³)
۱۰-۱۴	چگالی بروکفیلد در دمای ۱۳۵ درجه (cP)



شکل ۱. افزودنی‌های مورد استفاده در این پژوهش، (الف) پلیمر SBR (ب) پلیمر SBS (ج) پلیمر LDPE (د) ساسوبیت
Fig. 1. Additives used in this study; a) SBR polymer, b) SBS polymer, c) LDPE polymer, d) sasobit

عنوان رئومتر برش دینامیکی (DSR) اندازه‌گیری می‌شود. آزمایش DSR خاص رئولوژیکی قیر شامل مدول برشی مرکب (G^*) و زاویه فاز (δ) را در دماهای بالا و متوسط اندازه‌گیری می‌کند. دو پارامتر اساسی شامل $G^*/\sin\delta$ و $G^* \cdot \sin\delta$ از این آزمایش بدست می‌آیند که به ترتیب به منظور ارزیابی خصوصیات شیارشدگی و خستگی قیر مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این پژوهش آزمایش رئومتر برش دینامیکی مطابق با استاندارد AASTO T315 انجام شده است [۲۸].

۳-۵- آزمایش رئومتر تیرچه خمشی (BBR)

مطابق با دستورالعمل سوپرپیو، برای ارزیابی رفتار قیر در دماهای پایین، آزمایش رئومتر تیرچه خمشی (BBR) پیشنهاد شده است. در این آزمایش، رفتار قیر در سردترین دمایی (قیر شبیه جامد الاستیک است) که در طول عمر خدمت‌هی متحمل می‌شود، تحت بار ثابت ارزیابی می‌گردد. این آزمایش از دمای ۶- تا ۲۴- درجه سانتی‌گراد جهت بررسی عملکرد قیر در دماهای پایین انجام می‌شود. سختی خزشی قیر (S) و نرخ تغییر سختی با زمان (m) دو پارامتری هستند که از این آزمایش بدست می‌آیند. بر اساس ملاحظات شارپ، به منظور کنترل ترک خوردگی قیر در دمای عملکردی پایین، سختی خزشی قیر باید کمتر از ۳۰۰ مگاپاسکال و نرخ تغییر سختی با زمان در مدت زمان ۶۰ ثانیه نیز باید بیشتر از ۰/۳ باشد [۲۹].

۳-۶- آزمایش جاروب دامنه خطی (LAS)

مطابق با استاندارد شارپ، پارامتر $G^* \cdot \sin\delta$ به منظور ارزیابی عملکرد مصالح قیری در برابر بارهای خستگی پیشنهاد شده است. مطالعات بسیاری نشان داده‌اند که پارامتر خستگی سوپرپیو (G^*)

۳-۲- پیرشدگی قیر

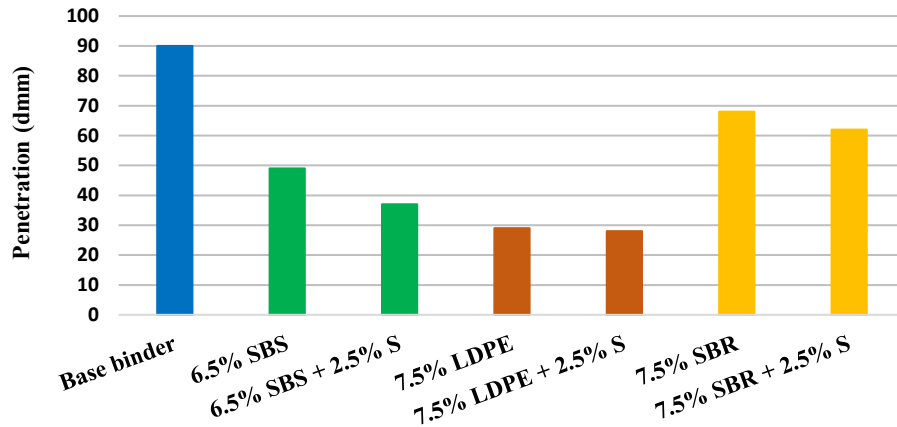
در این پژوهش به منظور شبیه‌سازی پیرشدگی کوتاه مدت قیر در آزمایشگاه از آزمایش لعاب نازک چرخشی طبق با استاندارد AASHTO T240 انجام شده است [۲۴]. از نمونه‌های قیر پیر شده RTFO به منظور انجام آزمایش‌های شیارشدگی استفاده می‌شود. همچنین، پیرشدگی بلند مدت قیر نیز با استفاده از آزمایش محفظه تسریع پیری (PAV) و مطابق با استاندارد AASHTO R28 انجام شده است [۲۵]. از نمونه‌های پیر شده حاصل از این آزمایش، در آزمایش‌های خستگی استفاده شده است.

۳-۳- آزمایش ویسکوزیته چرخشی قیر (RV)

آزمایش ویسکوزیته چرخشی قیر با استفاده از ویسکومتر چرخشی بروکفیلد و بر اساس استاندارد ASTM T316 انجام می‌شود [۲۶]. برخلاف آزمایش ویسکومتر سینماتیکی و دینامیکی که بر اساس جریان قیر در یک لوله موئین کار می‌کنند، این نوع ویسکومتر دارای محفظه بزرگتری است و برای قیرهای اصلاح شده و اصلاح نشده کاربرد دارد. حداکثر ویسکوزیته قیر بر اساس ملاحظات سوپرپیو، ۳ پاسکال-ثانیه است. در این پژوهش آزمایش ویسکوزیته چرخشی در دمای استاندارد ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد انجام شده است.

۳-۴- آزمایش رئومتر برش دینامیکی (DSR)

قیر ماده‌ای ویسکو الاستیک است بدین معنی که در دماهای پایین رفتاری شبیه مواد جامد الاستیک دارد و در دماهای بالا مشابه سیالات ویسکوز است. بنابراین رفتار قیر به دما و زمان بارگذاری بستگی دارد [۲۷]. آزمایش مطلوب برای چسبندگی قیری آن است که هر دو عامل دما و زمان بارگذاری را در نظر بگیرد. این توانایی در آزمایشی تحت



شکل ۲. نتایج درجه نفوذ برای نمونه‌های قیر
 Fig. 2. Penetration grade for asphalt binders

محیط‌های پیوسته ویسکوالاستیک (VECD) انجام و عمر خستگی نمونه‌های قیر با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شده است [۳۴].

$$N_f = A (\gamma_{\max})^{-B} \quad (1)$$

در این رابطه، N_f عمر خستگی نمونه‌های قیر، γ_{\max} حداکثر دامنه کرنش و A و B پارامترهایی هستند که از تحلیل نتایج آزمایش بدست می‌آیند. پارامتر A توصیف کننده خصوصیات خستگی قیر در آزمایش LAS است. پارامتر B نیز میزان حساسیت قیر به تغییرات سطح کرنش را نشان می‌دهد.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- نتایج آزمایش‌های شارپ

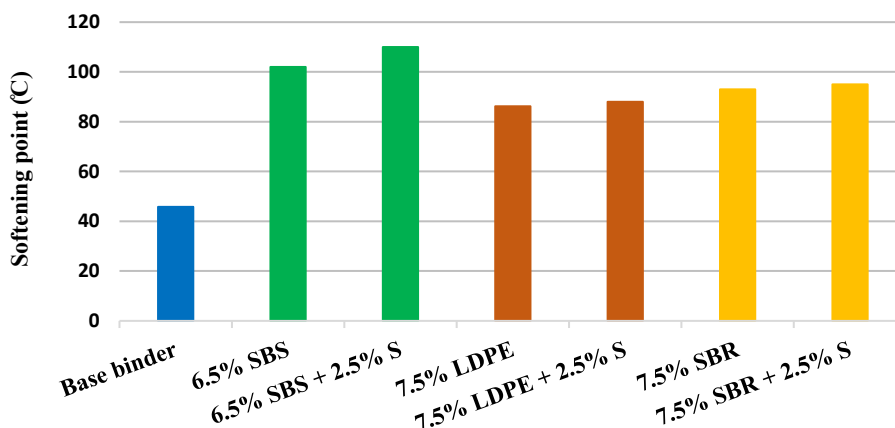
در این بخش به بررسی و ارزیابی نتایج آزمایشات شارپ در قیرهای اصلاح شده پلیمری و قیرهای پلیمری حاوی ساسوبیت پرداخته می‌شود. هدف از انجام آزمایش‌های شارپ بر روی نمونه‌های قیر، تعیین درجه عملکردی (PG) قیرهای اصلاح شده است.

۴-۱-۱- تأثیر افزودنی‌ها بر درجه نفوذ و نقطه نرمی قیر

در این بخش نتایج آزمایشات سنتی قیر شامل درجه نفوذ و نقطه نرمی برای قیرهای اصلاح شده ارائه شده است. شکل ۲ نتایج آزمایش درجه نفوذ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با اضافه کردن افزودنی‌های پلیمری درجه نفوذ قیر کاهش می‌یابد. دلیل این کاهش، تغییر در ویسکوزیته قیر پایه پس از اختلاط با

$\sin\delta$) به دلیل این که تنها خصوصیات رئولوژیکی قیر را در محدوده ویسکوالاستیک خطی اندازه‌گیری می‌کند، نمی‌تواند رفتار خستگی نمونه‌های قیر به خصوص قیرهای اصلاح شده پلیمری را به خوبی ارزیابی کند [۳۰]. این در حالی است که پدیده خستگی رفتاری پیچیده و ماهیتی غیرخطی دارد. از طرف دیگر، نتایج تحقیقات نشان می‌دهند که این پارامتر همبستگی خوبی با عملکرد خستگی مخلوط‌های آسفالتی ندارد [۳۱]. بنابراین، مطالعات بعدی آزمایش‌های جدیدی را به منظور بررسی عملکرد خستگی قیر با استفاده از دستگاه رئومتر برش دینامیکی پیشنهاد کرده‌اند.

آزمایش جاروب دامنه خطی (LAS) مطابق با استاندارد 101-AASHTO TP و به منظور پیش‌بینی عمر خستگی نمونه‌های قیر پیشنهاد شده است [۳۲]. این آزمایش با استفاده از دستگاه DSR و بر روی نمونه‌های قیر با قطر ۸ میلی‌متر انجام می‌شود. آزمایش LAS شامل دو مرحله است. مرحله اول آزمایش، جاروب فرکانسی، به منظور بدست آوردن اطلاعاتی درباره خصوصیات رئولوژیکی قیر قبل از خرابی طراحی شده است. در این مرحله، بارگذاری در حالت کرنش ثابت ۰/۱ درصد با فرکانس‌های ۰/۱، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸، ۱، ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ هرتز انجام می‌شود. در مرحله دوم آزمایش، جاروب کرنش، بارگذاری در فرکانس ثابت ۱۰ هرتز روی نمونه قیر اعمال می‌شود. در این مرحله دامنه کرنش بصورت خطی از ۰/۱ تا ۳۰ درصد افزایش می‌یابد [۳۳]. در این پژوهش آزمایش LAS بر روی نمونه‌های قیر پیر شده PAV و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد (دمای میانی قیر پایه) انجام شده است. تحلیل نتایج آزمایش LAS با استفاده از تئوری خرابی



شکل ۳. نتایج نقطه نرمی برای نمونه‌های قیر
Fig. 3. Softening point for asphalt binders

جدول ۶. تأثیر افزودنی‌های پلیمری بر حساسیت حرارتی نمونه‌های قیر
Table 6. Effect of additives on temperature susceptibility of asphalt binders

نمونه قیر	درجه نفوذ (mm (۰/۱))	نقطه نرمی (°C)	شاخص درجه نفوذ
Base binder	۹۰	۴۵/۸	-۰/۸۶
6.5% SBS	۴۹	۱۰۲	۶/۷۸
7.5% LDPE	۲۹	۸۶/۲	۳/۷۸
7.5% SBR	۶۸	۹۳	۶/۷۹
6.5% SBS + 2.5% S	۳۷	۱۱۰	۶/۸۰
7.5% LDPE + 2.5% S	۲۸	۸۸	۳/۹۱
7.5% SBR + 2.5% S	۶۲	۹۵	۶/۷۳

درجه نفوذ و درجه نرمی قیر است و به عنوان نشانه‌ای از میزان حساسیت قیر نسبت به تغییرات درجه حرارت مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۶]. مقدار PI با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$PI = 20(1 - 25A) / (1 + 50A) \quad (2)$$

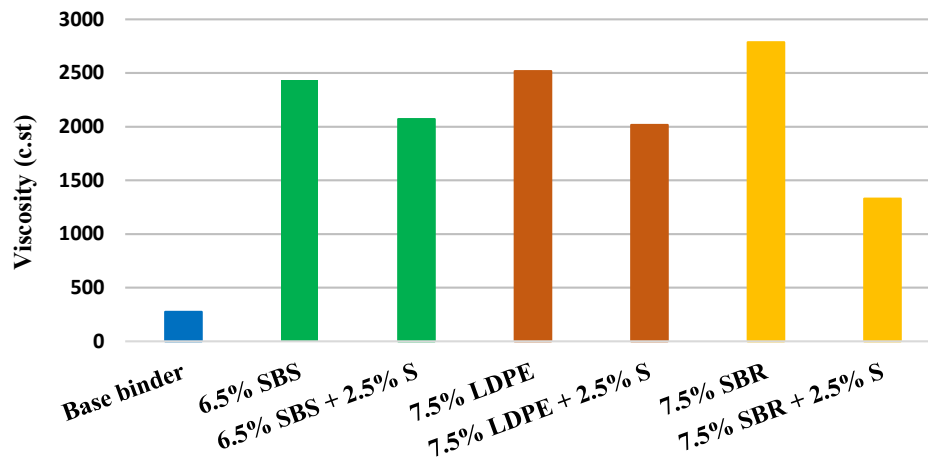
$$A = (\log(\text{pen}T_1) - \log(\text{pen}T_2)) / (T_2 - T_1) \quad (3)$$

در این روابط پارامتر A شیب تغییرات پارامتر PI نسبت به تغییرات درجه حرارت است که از ترسیم منحنی تغییرات درجه نفوذ قیر نسبت به تغییرات درجه حرارت در مقیاس لگاریتمی بدست می‌آید. $\text{pen}T_1$ درجه نفوذ قیر در دمای T_1 و $\text{pen}T_2$ درجه نفوذ قیر در دمای T_2 است. هر اندازه شاخص درجه نفوذ یک قیر بیشتر باشد، حساسیت آن قیر نسبت به تغییرات درجه حرارت کمتر خواهد بود [۳۶]. جدول ۶ نتایج شاخص درجه نفوذ مربوط به نمونه‌های

افزودنی‌های پلیمری است. نتایج آزمایش نقطه نرمی نیز در شکل ۳ نشان داده شده است. نقطه نرمی قیرهای اصلاح شده نسبت به قیر پایه بطور قابل توجهی افزایش یافته است. در بین افزودنی‌های پلیمری، SBS بیشترین تأثیر را در افزایش نقطه نرمی قیر پایه داشته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزودن ساسوبیت درجه نفوذ قیرهای پلیمری کاهش و نقطه نرمی آن‌ها افزایش یافته است. بنابراین با کاهش درجه نفوذ و به دنبال آن کاهش شکل‌پذیری قیر، انتظار می‌رود قیرهای پلیمری حاوی ساسوبیت عملکرد ضعیف‌تری در دماهای پایین از خود نشان دهند. از طرف دیگر افزایش نقطه نرمی حاصل از افزودن ساسوبیت، باعث بهبود عملکرد قیرهای پلیمری در دماهای بالا می‌گردد [۳۵].

۴-۱-۲- تأثیر افزودنی‌ها بر حساسیت حرارتی قیر

شاخص درجه نفوذ (PI) پارامتری است که کمیت آن تابعی از



شکل ۴. تغییرات ویسکوزیته چرخشی نمونه‌های قیر خالص و اصلاح شده
 Fig. 4. Effect of additives on rotational viscosity of asphalt binders

۴-۱-۴- محاسبه شاخص PVN

علاوه بر پارامتر PI شاخص دیگری نیز با عنوان عدد درجه نفوذ-ویسکوزیته به منظور اندازه‌گیری حساسیت حرارتی قیر نسبت به تغییرات درجه حرارت تعریف شده است. این روش بر اساس اندازه‌گیری درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی‌گراد و ویسکوزیته قیر در ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد استوار است [۳۷]. مقدار شاخص PVN با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$PVN = (-1.5) \frac{L - X}{L - M} \quad (4)$$

که در این رابطه، X لگاریتم ویسکوزیته قیر بر حسب سانتی استوکس در ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد و مقادیر پارامترهای L و M با استفاده از روابط (۵) و (۶) محاسبه می‌شوند.

$$L = 4.258 - 0.7967 \log P \quad (5)$$

$$M = 3.46289 - 0.61094 \log P \quad (6)$$

در این روابط P درجه نفوذ قیر در ۲۵ درجه سانتی‌گراد است. شاخص PVN میزان حساسیت حرارتی قیر را در دامنه وسیع‌تری از تغییرات درجه حرارت نشان می‌دهد. هر اندازه شاخص PVN یک قیر بیشتر باشد، حساسیت آن قیر نسبت به تغییرات درجه حرارت کمتر خواهد بود. PVN قیرهای راهسازی معمولاً بین اعداد $+0.5$ و -2 تغییر می‌کند [۳۸]. نتایج ارائه شده در جدول ۷ نشان می‌دهند که اصلاح قیر با افزودنی‌های

قیر خالص و قیرهای پلیمری را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در بین قیرهای پلیمری، نمونه‌های قیر اصلاح شده با پلیمرهای SBS و SBR بیشترین مقدار پارامتر PI و در نتیجه کمترین مقدار حساسیت حرارتی را دارند. با توجه به یکسان بودن شاخص درجه نفوذ این دو نوع قیر پلیمری، می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر پلیمر SBR در کاهش حساسیت حرارتی قیر پایه نسبت به تغییرات درجه حرارت، مشابه با تأثیر پلیمر SBS در کاهش حساسیت حرارتی قیر پایه نسبت به تغییرات درجه حرارت است.

۴-۱-۳- نتایج آزمایش ویسکوزیته چرخشی قیر

شکل ۴ تأثیر افزودنی‌های پلیمری بر ویسکوزیته چرخشی قیر در دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود ویسکوزیته قیرهای پلیمری نسبت به قیر خالص بطور قابل توجهی افزایش یافته است. دلیل این افزایش ویسکوزیته، پیرشدگی کوتاه مدت قیر در حین فرآیند ساخت قیرهای پلیمری در اثر بالا بردن دمای اختلاط و همچنین جذب مواد روغنی موجود در قیر توسط پلیمرها است. علاوه بر این، تأثیر ساسوبیت بر ویسکوزیته قیرهای پلیمری نیز قابل توجه بوده است. بیشترین تأثیر ساسوبیت بر نمونه قیر حاوی ۷/۵ درصد SBR بوده است. با کاهش ویسکوزیته قیرهای پلیمری در اثر استفاده از ساسوبیت، می‌توان انتظار داشت دمای اختلاط و تراکم مخلوط‌های آسفالت پلیمری نیز کاهش پیدا کند.

جدول ۷. مقدار شاخص PVN
Table 7. PVN index results

PVN	نمونه قیر
-۰/۹۱	Base binder
۱/۴۸	6.5% SBS
۰/۸۸	7.5% LDPE
۲/۱۴	7.5% SBR
۰/۹۲	6.5% SBS + 2.5% S
۰/۵۷	7.5% LDPE + 2.5% S
۰/۹۵	7.5% SBR + 2.5% S

قیر را نشان می‌دهند. هانطور که ملاحظه می‌شود، استفاده از پلیمرها منجر به افزایش دمای عملکردی پایین در کلیه قیرهای اصلاح شده نسبت به قیر خالص می‌گردد. این امر می‌تواند ناشی از افزایش ویسکوزیته قیر در اثر اختلاط با پلیمرها باشد. بررسی دمای عملکردی پایین نمونه‌های قیر حاوی SBS نشان می‌دهد افزودن SBS به قیر خالص تأثیر قابل توجهی در سختی قیر ندارد، اما نرخ خزشی کاهش می‌یابد. بنابراین منجر به افزایش دمای عملکردی پایین قیر می‌گردد.

۴-۱-۷- بررسی تغییرات درجه عملکردی قیر پایه حاوی افزودنی با توجه به نتایج آزمایشات سوپریپو، نتایج درجه عملکردی قیرهای اصلاح شده و میزان گسترش محدوده عملکردی آن‌ها در جدول ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با استفاده از افزودنی‌های پلیمری دمای بالای عملکردی قیر پایه افزایش یافته است. هر سه افزودنی پلیمری دمای بالای عملکردی قیر ۱۰۰-۸۵ را سه رده بهبود بخشیده‌اند. البته همان‌طور که پیشتر اشاره شد، این پلیمرها تأثیر مثبتی بر دمای عملکردی پایین قیر پایه نداشته‌اند. نکته قابل توجه دیگر، تأثیر ساسوبیت بر دمای عملکردی قیرهای پلیمری است. ۲/۵ درصد ساسوبیت توانسته دمای بالای عملکردی قیر حاوی SBS را یک رده افزایش دهد. البته ساسوبیت تأثیر مثبتی بر دمای عملکردی پایین قیرهای پلیمری ندارد. علت این امر عمدتاً مربوط به خصوصیات کریستالیزه شدن^۱ افزودنی‌های نیمه‌گرم بر پایه واکس است که منجر به افزایش خصوصیات ویسکوز قیر و در نتیجه افزایش شکنندگی آن در دمای پایین می‌گردد [۳۹]. ضمن اینکه، تمامی نمونه‌های قیر در حالی که دامنه دمای عملکردی را به نسبت قیر

پلیمری منجر به افزایش مقدار PVN می‌گردد. بیشترین مقدار PVN مربوط به نمونه قیر اصلاح شده با ۷/۵ درصد SBR است. همچنین لازم به ذکر است که تأثیر SBR در بهبود حساسیت حرارتی قیر بیشتر از پلیمر SBS می‌باشد. افزودنی نیمه‌گرم ساسوبیت نیز باعث کاهش مقدار PVN و افزایش حساسیت حرارتی قیرهای پلیمری می‌گردد.

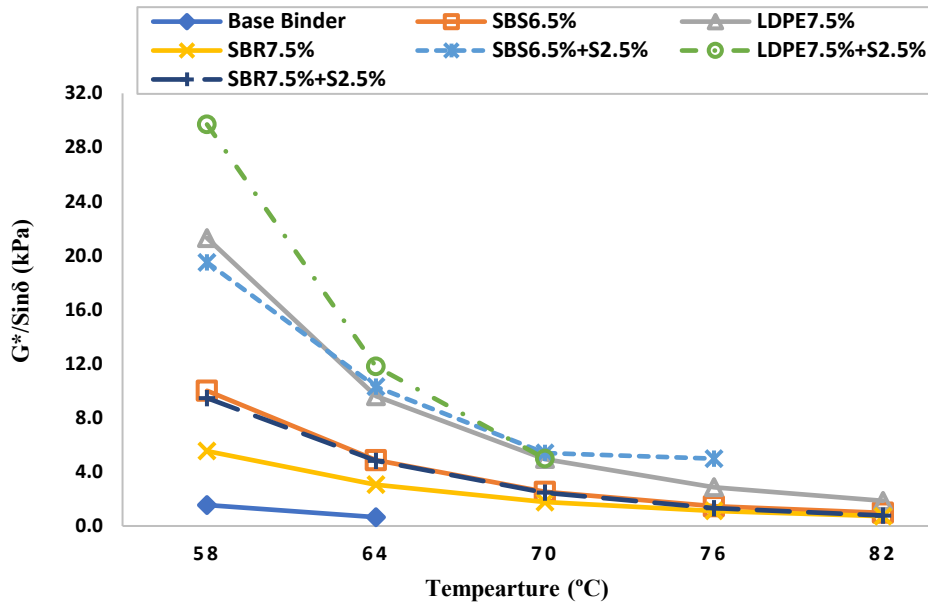
۴-۱-۵- تأثیر افزودنی‌های بر درجه عملکردی بالای قیر

در مشخصات فنی سوپریپو شاخص $G^*/\sin\delta$ ، به عنوان معیاری برای ارزیابی مقاومت قیر در برابر تغییر شکل‌های دائمی در نظر گرفته شده است. هر چه مقدار این پارامتر بیشتر باشد، مقاومت قیر در برابر شیاردگی نیز بیشتر است. مطابق با استاندارد شارپ و به منظور جلوگیری از بروز پدیده شیاردگی، مقدار پارامتر $G^*/\sin\delta$ حداقل ۱ کیلوپاسکال برای قیرهای پیر نشده و ۲/۲ کیلوپاسکال برای قیرهای پیر شده بعد از آزمایش RTFO پیشنهاد شده است. شکل‌های ۵ و ۶ تأثیر افزودنی‌ها بر درجه عملکردی بالای (HT) قیر را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دمای عملکردی بالای قیر خالص در هر دو حالت پیر نشده و پیر شده افزایش یافته است. با افزودن ۷/۵ درصد LDPE دمای عملکردی بالای قیر خالص در حالت پیر نشده از ۵۸ درجه سانتی‌گراد به ۸۲ درجه رسیده است. همچنین قیرهای اصلاح شده با پلیمرهای SBS و SBR در دمای ۷۶ درجه سانتی‌گراد الزامات سوپریپو را رعایت می‌نمایند. بنابراین می‌توان گفت که پلیمر LDPE، چهار رده و پلیمرهای SBS و SBR هر کدام سه رده دمای عملکردی بالای قیر خالص را افزایش داده‌اند. نکته قابل توجه دیگر، تأثیر ساسوبیت بر پارامتر شیاردگی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ساسوبیت منجر به افزایش مقدار پارامتر $G^*/\sin\delta$ و در نتیجه بهبود عملکرد قیرهای پلیمری در دماهای بالا می‌گردد. افزودن ساسوبیت به قیرهای پلیمری منجر به تشکیل ساختار شبکه‌ای در مولکول‌های قیر شده که باعث افزایش مدول مرکب (G^*) و کاهش مقدار زاویه فاز (δ) می‌گردد. بنابراین با افزایش میزان تغییر شکل‌های الاستیک، مقاومت قیر در برابر شیاردگی افزایش می‌یابد [۳۵].

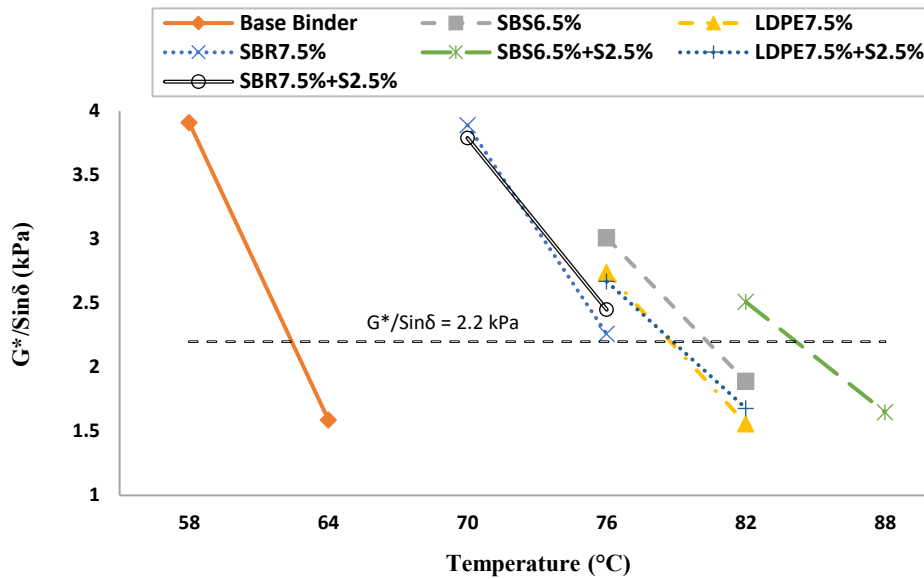
۴-۱-۶- تأثیر افزودنی‌ها بر درجه عملکردی پایین قیر

شکل‌های ۷ و ۸ تأثیر افزودنی‌ها بر درجه عملکردی پایین (LT)

1 crystallization



شکل ۵. نمودار تغییرات پارامتر شیارشدگی در برابر دما برای نمونه‌های قیر پیر نشده
Fig. 5. Rutting parameter for un-aged asphalt binders



شکل ۶. نمودار تغییرات پارامتر شیارشدگی در برابر دما برای نمونه‌های قیر پیر شده RTFO
Fig. 6. Rutting parameter for RTFO-aged asphalt binders

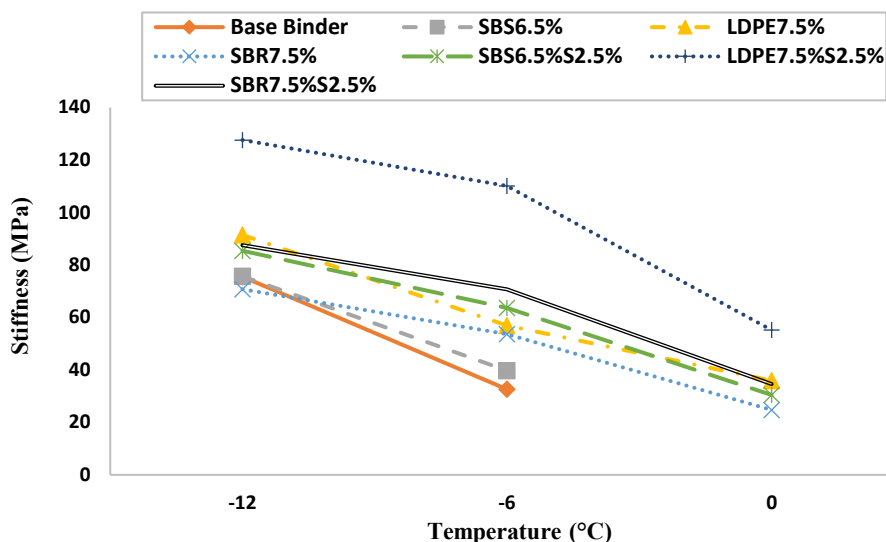
VECD ارائه شده است. دو پارامتر اساسی A و B از نتایج آزمایش LAS بدست می‌آیند. هرچه مقدار پارامتر A بیشتر باشد، نشان‌دهنده این است که توانایی مصالح در حفظ انسجام خود در برابر تجمع خرابی بیشتر است. بنابراین عمر خستگی نمونه‌های قیر افزایش می‌یابد. از طرف دیگر پارامتر B مرتبط با حساسیت نمونه‌های قیر به تغییرات سطح کرنش است. مقادیر بالاتر B نشان‌دهنده افزایش شیب منحنی

پایه افزایش داده‌اند، اما محدوده دمای عملکردی در قیرهای پلیمری نسبت به قیرهای پلیمری حاوی ساسوبیت بیشتر است.

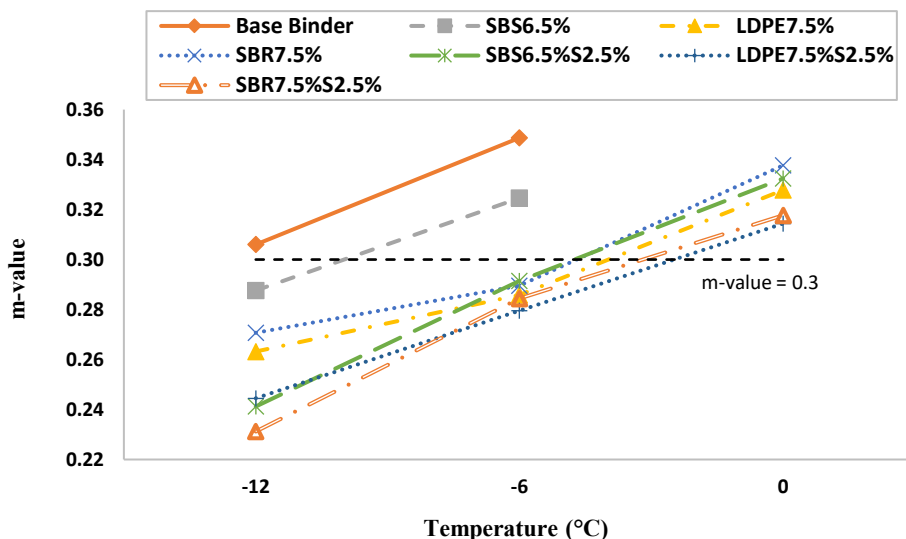
۲-۴- نتایج آزمایش‌های تکمیلی سوپرپیو

۱-۲-۴- نتایج آزمایش جاروب دامنه خطی

در این بخش نتایج عمر خستگی نمونه‌های قیر بر اساس تحلیل



شکل ۷. نمودار تغییرات سختی خزشی برای نمونه‌های قیر پیر شده PAV
Fig. 7. Stiffness results for PAV-aged asphalt binders



شکل ۸. نمودار m-value برای نمونه‌های قیر پیر شده PAV
Fig. 8. M-value results for PAV-aged binders

جدول ۸. درجه عملکردی نمونه‌های قیر
Table 8. Performance grade for asphalt binders

درجه عملکردی با توجه به معیار سوپرپیو	میزان بهبود نسبت به قیر پایه	دامنه دمایی عملکردی	درجه پیوسته	نمونه قیر
PG 58-22	-	۸۴/۵	۶۱-۲۲	Base binder
PG 76-16	۱۵/۸۲	۱۰۰/۳۳	۸۰-۱۹	6.5% SBS
PG 76-10	۸/۲۱	۹۲/۷۲	۷۸-۱۳	7.5% LDPE
PG 76-10	۶/۴	۹۰/۹۱	۷۶-۱۴	7.5% SBR
PG82-10	۱۴/۴	۹۸/۹۱	۸۴-۱۴	6.5% SBS + 2.5% S
PG 76-10	۶/۸۱	۹۱/۳۲	۷۸-۱۲	7.5% LDPE + 2.5% S
PG 76-10	۵/۸۱	۹۰/۳۲	۷۷-۱۳	7.5% SBR + 2.5% S

جدول ۹. مقدار پارامترهای A و B حاصل از تحلیل VECD
Table 9. A and B parameters based on VECD analysis

پارامتر B	پارامتر A	نمونه قیر
۳/۲۲	$۲/۱۵ \times ۱۰^۵$	Base binder
۴/۳۰	$۸/۷۹ \times ۱۰^۵$	6.5% SBS
۴/۲۹	$۷/۱۵ \times ۱۰^۵$	7.5% LDPE
۳/۸۷	$۶/۴ \times ۱۰^۵$	7.5% SBR
۴/۰۲	$۴/۸۴ \times ۱۰^۵$	6.5% SBS + 2.5% S
۴/۶۸	$۹/۷ \times ۱۰^۵$	7.5% LDPE + 2.5% S
۳/۴۱	$۳/۵۵ \times ۱۰^۵$	7.5% SBR + 2.5% S

• اصلاح قیر با استفاده از افزودنی‌های پلیمری مقدار پارامتر شیارشدگی سوپرپیو را افزایش می‌دهد؛ بنابراین قیرهای پلیمری دارای عملکرد بهتری در دماهای بالا و مقاومت شیارشدگی بیشتری هستند. بیشترین مقدار پارامتر شیارشدگی مربوط به نمونه قیر حاوی ۷/۵ درصد LDPE بوده است. ضمن اینکه هر سه افزودنی پلیمری تا سه رده دمای بالای عملکردی قیر پایه ۱۰۰-۸۵ را افزایش می‌دهند.

• افزودنی‌های پلیمری تأثیری در بهبود دمای پایین عملکردی قیر پایه ندارند. دمای پایین عملکردی قیر پایه از ۲۲- درجه سانتی‌گراد، برای قیر حاوی SBS به ۱۶- و برای قیرهای حاوی SBR و LDPE به ۱۰- درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد.

• عمر خستگی نمونه‌های قیر پلیمری در سطوح کرنش پایین نسبت به قیر پایه ۱۰۰-۸۵ افزایش می‌یابد. بیشترین عمر خستگی مربوط به نمونه قیر اصلاح شده با ۷/۵ درصد SBR بوده است که در مقایسه با قیر پایه، ۶۳ درصد افزایش یافته است. لازم به ذکر است که به دلیل افزایش حساسیت قیرهای پلیمری در برابر تغییرات سطح کرنش در سطوح کرنش بالا، قیر پایه بهترین عملکرد را در برابر خستگی نشان داده است.

• نتایج آزمایش ویسکوزیته چرخشی نشان می‌دهد که ساسوبیت منجر به کاهش ویسکوزیته قیرهای پلیمری می‌گردد. بنابراین با افزایش کارایی قیر، دمای اختلاط و دمای تراکم در این نوع مخلوط‌های آسفالتی پلیمری کاهش یافته که موجب کاهش مصرف انرژی و همچنین تولید آلاینده‌های زیست محیطی می‌گردد.

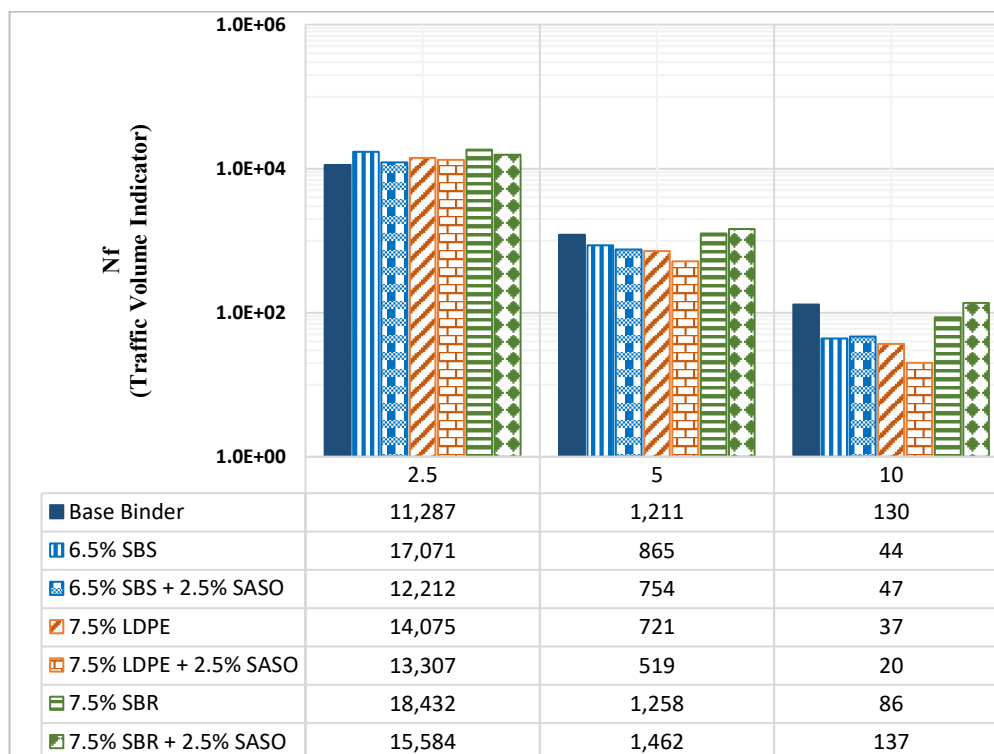
• ساسوبیت منجر به افزایش پارامتر شیارشدگی قیرهای پلیمری و در نتیجه بهبود عملکرد آن‌ها در دماهای بالا می‌گردد. همچنین، با افزودن ۲/۵ درصد ساسوبیت، دمای عملکردی قیر اصلاح شده با SBS

و کاهش بیشتر عمر خستگی با افزایش سطح کرنش است. مقدار پارامترهای A و B در جدول ۹ نشان داده شده است. همچنین عمر خستگی نمونه‌های قیر که با استفاده از رابطه (۱) و در سطوح کرنش ۲/۵، ۵ و ۱۰ درصد محاسبه شده است، در شکل ۹ ارائه شده است. در سطوح کرنش پایین (۲/۵ درصد) و در مقایسه با قیر پایه ۱۰۰-۸۵، عمر خستگی نمونه‌های قیر اصلاح شده با SBS، LDPE و SBR به ترتیب ۵۱٪، ۲۵٪ و ۶۳٪ افزایش یافته است. با توجه به افزایش قابل توجه مقدار پارامتر B در قیرهای اصلاح شده با پلیمرهای SBS و LDPE، شیب کاهش عمر خستگی آن‌ها نسبت به قیر پایه افزایش یافته و همان‌طور که مشاهده می‌شود در سطوح کرنش بالا عمر خستگی کمتری در مقایسه با قیر پایه دارند. بیشترین عمر خستگی در سطوح کرنش ۲/۵ و ۵ درصد مربوط به نمونه قیر حاوی ۷/۵ درصد SBR است. راکو^۱ و همکارانش نیز نتایج مشابهی را در خصوص عمر خستگی قیرهای اصلاح شده با پلیمر SBR بدست آوردند [۴۰]. البته در سطح کرنش ۱۰ درصد قیر پایه در مقایسه با قیرهای پلیمری عمر خستگی بیشتری از خود نشان داده است. لازم به ذکر است با توجه به این‌که بطور معمول کرنش قیر ۵۰ برابر مخلوط آسفالتی در نظر گرفته می‌شود، بنابراین این سطح کرنش هیچگاه در طول عمر خدمت‌دهی روسازی آسفالتی اتفاق نمی‌افتد [۴۱].

نکته قابل توجه دیگر، تأثیر ساسوبیت بر عملکرد خستگی قیرهای پلیمری است. در سطوح کرنش پایین و با افزودن ساسوبیت، عمر خستگی نمونه‌های قیر حاوی SBS، LDPE و SBR به ترتیب ۲۸٪، ۶٪ و ۱۶٪ کاهش یافته است. البته همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، در سطوح کرنش بالا ساسوبیت منجر به افزایش عمر خستگی نمونه‌های قیر اصلاح شده با SBS و SBR شده است. نتایج تحقیقات دیگر نیز نشان داده است که با توجه به انواع مختلف و خصوصیات متفاوت افزودنی‌های نیمه‌گرم، تأثیر این افزودنی‌ها بر عملکرد خستگی قیرهای پلیمری تا حدود زیادی به نوع افزودنی نیمه‌گرم بستگی دارد. با این وجود افزودنی‌های نیمه‌گرم بر پایه واکس می‌توانند منجر به افزایش عمر خستگی قیرهای پلیمری شوند [۴۲].

۵- نتیجه‌گیری

مهم‌ترین نتایج بدست آمده در این پژوهش شامل موارد زیر است:



شکل ۹. عمر خستگی نمونه‌های قیر در سطوح کرنش ۲/۵، ۵ و ۱۰ درصد
Fig. 9. Fatigue lives of asphalt binders at strain levels of 2.5%, 5%, and 10%

بدست آمده در این پژوهش بر روی مخلوط‌های آسفالتی به صورت آزمایشگاهی انجام شده و سپس عملکرد صحرائی این پلیمرها نیز در تحقیقات آینده مورد بررسی قرار گیرد.

مراجع

- [1] M. Porto, P. Caputo, V. Loise, S. Eskandarsefat, B. Teltayev, C.O. Rossi, Bitumen and bitumen modification: A review on latest advances, *Appl. Sci.*, 9 (2019) 35-1.
- [2] M. Vamegh, Evaluation of the effect thermoplastic - elastomeric polymer blends on Hot Mix Asphalt performance PhD dissertation, Iran University of Science and Technology, 2019.
- [3] J. Zhu, B. Birgisson, N. Kringos, Polymer modification of bitumen: Advances and challenges, *Eur. Polym. J.*, 54 (2014) 38-18.
- [4] S. Pyshyev, V. Gunka, Y. Grytsenko, M. Bratychak, Polymer modified bitumen: Review, chemistry and chemical technology, *Chem. Chem. Technol.*, (2016) 636-631.
- [5] B.B. Teltayev, C.O. Rossi, G.G. Izmailova, E.D. Amirbayev,

از ۷۶ به ۸۲ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. از ویژگی‌های مشهود ساسوبیت، بهبود رفتار دمای بالای قیر است.

• تأثیر ساسوبیت بر عمر خستگی قیرهای پلیمری متفاوت بوده است. در کرنش‌های پایین عمر خستگی قیرهای پلیمری با افزودن ساسوبیت کاهش می‌یابد. این در حالی است که در کرنش‌های بالا ساسوبیت باعث افزایش عمر خستگی قیرهای حاوی SBS و SBR گردیده است.

• مقایسه عملکرد پلیمرهای استفاده شده در این پژوهش نشان می‌دهد که از نظر رفتار قیر در دماهای بالا، پلیمر LDPE نسبت به پلیمر SBS عملکرد بهتری داشته است. همچنین، عملکرد خستگی قیر پایه اصلاح شده با پلیمر SBR در مقایسه با پلیمر SBS هم در سطوح کرنش پایین و هم در سطوح کرنش بالا بهتر بوده است. بنابراین، با توجه به این که SBS جزء اقلام وارداتی و گران‌قیمت است، جایگزینی آن با پلیمرهای LDPE و SBR که از تولیدات داخل بوده و ارزان قیمت هستند، هم از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه بوده و هم گزینه مناسبی به منظور بهبود خصوصیات عملکردی قیر می‌باشند. البته لازم است آزمایش‌های تکمیلی به منظور تعمیم نتایج

- mix asphalt: an overview, *J. Clean. Prod.*, 24 (2012) 84–76.
- [17] G. Zhao, P. Guo, Workability of Sasobit Warm Mixture Asphalt, *Energy Procedia*, 16 (2012) 1236–1230.
- [18] A. Jamshidi, M.O. Hamzah, Z. You, Performance of warm mix asphalt containing Sasobit: State of the art, *Constr. Build. Mater.*, 38 (2013) 553–530.
- [19] J. Habbouche, E.Y. Hajj, P.E. Sebaaly, M. Piratheepan, A critical review of high polymer-modified asphalt binders and mixtures, *Int. J. Pavement Eng.*, 0 (2018) 17–1.
- [20] C. Yan, W. Huang, P. Lin, Y. Zhang, Q. Lv, Chemical and rheological evaluation of aging properties of high content SBS polymer modified asphalt, *Fuel*, 252 (2019) 426–417.
- [21] A.H. Fawcett, T. McNally, Blends of bitumen with various polyolefins, *Polymer (Guildf.)*, 41 (2000) 5326–5315.
- [22] Mostafa Vamegh, Evaluation of the Effect of thermoplastic - elastomeric polymer blends on Hot Mix Asphalt Performance, PhD disertation, Iran University of Science and Technology, 2018
- [23] J. Gao, K. Yan, W. He, S. Yang, L. You, High temperature performance of asphalt modified with Sasobit and Deurex, *Constr. Build. Mater.*, 164 (2018) 791–783.
- [24] AASHTO T240, Standard Method of Test for Effect of Heat and and Air on a Moving Film of Asphalt Binder (Rolling Thin-Film Oven Test), American Association of State and Highway Transportation Officials, (2013).
- [25] AASHTO R28, Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV), American Association of State and Highway Transportation Officials, (2012).
- [26] AASHTO Standard T316, Standard Method of Test for Viscosity Determination of Asphalt Binder Using Rotational Viscometer, American Association of State and Highway Transportation Officials, (2010).
- [27] G.D. Airey, B. Rahimzadeh, Combined bituminous binder and mixture linear rheological properties, *Constr. Build. Mater.*, 18 (2004) 548–535.
- [28] AASHTO T315, Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR), American Association of State and Highway Transportation Officials, A.O. Elshibayev, Evaluating the effect of asphalt binder modification on the low-temperature cracking resistance of hot mix asphalt, *Case Stud. Constr. Mater.*, 11 (2019) e00238.
- [6] C. Zhuang, N. Li, W. Zhao, C. Cai, Effects of SBS content on the performance of modified asphalt, in: *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, IOP Publishing, 2017: p. 12028.
- [7] J. Yuan, H. Lu, W. Yin, Y. Wu, Influences of Naphthenic Oil on SBS-Modified Asphalt Binder, *J. Mater. Civ. Eng.*, 31 (2019) 4019162.
- [8] P. Lin, C. Yan, W. Huang, Y. Li, L. Zhou, N. Tang, F. Xiao, Y. Zhang, Q. Lv, Rheological, chemical and aging characteristics of high content polymer modified asphalt, *Constr. Build. Mater.*, 207 (2019) 629–616.
- [9] F. Zhang, C. Hu, The Composition and Ageing of High-Viscosity and Elasticity Asphalts, *Polym. Compos.*, (2015).
- [10] G. Cuciniello, P. Leandri, S. Filippi, D. Lo, M. Losa, G. Airey, Effect of ageing on the morphology and creep and recovery of polymer-modified bitumens, *Mater. Struct.*, 3 (2018) 12–1.
- [11] M. Ameri, M. Vamegh, R. Imaninasab, H. Rooholamini, Effect of nanoclay on performance of neat and SBS-modified bitumen and HMA, *Pet. Sci. Technol.*, 34 (2016) 1097–1091.
- [12] R. Salehfard, A. Abdi, B. Amini, Effect of SBR/NC on the rheological properties of bitumen and fatigue resistance of hot mix asphalt, *J. Mater. Civ. Eng.*, 29 (2017) 4016282.
- [13] M. Ameri, M. Vamegh, H. Rooholamini, F. Haddadi, Investigating effects of nano/SBR polymer on rutting performance of binder and asphalt mixture, *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2018 (2018).
- [14] K.K. Syrmanova, E.T. Botashev, D.B. Tleuov, M.T. Suleimenova, A.A. Eshankulov, Z.B. Kaldybekova, Research of Oil Road Bitumen Modification with Low Density Polyethylene, *Orient. J. Chem.*, 33 (2017) –470 477.
- [15] D.B. Eme, C. Nwaobakata, Effect of low density polyethylene as bitumen modifier on some properties of hot mix asphalt, *Niger. J. Technol.*, 38 (2019) 7–1.
- [16] M.C. Rubio, G. Martínez, L. Baena, F. Moreno, Warm

- temperatures, Int. J. Pavement Eng., 20 (2019) 1407–1400.
- [36] Y.H. Huang, Pavement Analysis and Design, Pearson, (2003) 792.
- [37] M.R. Keymanesh, S. Shaker, Pavement Technology and Materials, Payam Noor University, 1394. (in persian)
- [38] N.W. McLeod, Using Paving Asphalt Rheology to Impair or Improve Asphalt Pavement Design and Performance Asphalt Rheology: Relationship to Mixture, A Symp. Spons. by ASTM STP 941 Oliver E. Briscoe, Philadelphia, (1987).
- [39] X. Zheng, S.M. Easa, T. Ji, Z. Jiang, A.O.A. El Halim, Influence of warm-mix additives on physical, rheological, and morphological properties of high-viscosity asphalt, J. Mater. Civ. Eng., 31 (2019) 11–1.
- [40] R. Roque, B. Birgisson, M. Tia, B. Kim, Z. Cui, Guidelines for Use of Modifiers in Superpave Mixtures: Executive Summary and Volume 1 of 3 Volumes: Evaluation of SBS Modifier, Final Report, 2004.
- [41] E. Masad, N. Somadevan, H.U. Bahia, S. Kose, Modeling and experimental measurements of strain distribution in asphalt mixes, J. Transp. Eng., 127 (2001) 485–477.
- [42] A. Kumar, R. Choudhary, P.S. Kandhal, A. Julaganti, O.P. Behera, A. Singh, R. Kumar, Fatigue characterisation of modified asphalt binders containing warm mix asphalt additives, Road Mater. Pavement Des., 21 (2020) 541–519. (2012).
- [29] C. Zhang, H. Wang, Z. You, J. Gao, M. Irfan, Performance test on Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) modified asphalt based on the different evaluation methods, Appl. Sci., 9 (2019) 467.
- [30] D.A. Anderson, Y.M. Le Hir, M.O. Marasteanu, J.-P. Planche, D. Martin, G. Gauthier, Evaluation of fatigue criteria for asphalt binders, Transp. Res. Rec., 1766 (2001) 56–48.
- [31] F. Zhou, W. Mogawer, H. Li, A. Andriescu, A. Copeland, Evaluation of fatigue tests for characterizing asphalt binders, J. Mater. Civ. Eng., 25 (2013) 617–610.
- [32] C. Hintz, R. Velasquez, C. Johnson, H. Bahia, Modification and validation of linear amplitude sweep test for binder fatigue specification, Transp. Res. Rec., 2207 (2011) 106–99.
- [33] AASHTO TP101, Standard Method of Test for Estimating Damage Tolerance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep, Am. Assoc. State Highw. Transp. Off. Washingt. D.C., (2012).
- [34] M. Ameri, D. Mirzaiyan, A. Amini, Rutting resistance and fatigue behavior of gilsonite-modified asphalt binders, J. Mater. Civ. Eng., 30 (2018) 9–1.
- [35] S. Yang, K. Yan, W. He, Z. Wang, Effects of Sasobit and Deurex additives on asphalt binders at midrange and high

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Ameri, A.H. Ameri, E. Riahi, A. Afshin, Comparative Evaluation of Mechanical Parameters of Bitumen Modified with SBR and LDPE Polymers Produced in Iran and Imported SBS Polymer, Amirkabir J. Civil Eng., 53(8) (2021) 3387-3402.

DOI: [10.22060/ceej.2020.17919.6711](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17919.6711)



