

تحلیل رفتار رئولوژی و مقاومت حرارتی قیر اصلاح شده با پلیمر ضایعاتی پلی‌بوتادین رابر

محمودریا خورده‌بینان، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، تهران
محمودرضا کی‌منش*، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، تهران
شمس نوبخت دودران، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

Email: mrkeymanesh@pnu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۲۳ - پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۰۸

چکیده

کاربرد قیرهای خالص در تولید مخلوط آسفالتی به دلیل افزایش بار ناشی از وسایل نقلیه و تأثیرات عوامل محیطی محدود شده است که با استفاده از آن، خرابی‌های زودرس مانند شیارشدگی و ترک‌خوردگی‌های خستگی و حرارتی در لایه‌های آسفالتی رخ می‌دهد. در این تحقیق، برای بهبود رفتار رئولوژی و مقاومت حرارتی قیر، از پلیمر ضایعاتی پلی‌بوتادین رابر و در ترکیب با ساسوبیت استفاده گردید. بدین منظور، نمونه‌های قیری با درصدهای مختلف افزودنی با استفاده از دستگاه مخلوط‌کن برش بالا تهیه شد. نتایج تحقیق نشان داد که با افزودن پلیمر ضایعاتی پلی‌بوتادین رابر به قیر، مقاومت حرارتی، پتانسیل مقاومت در برابر خستگی و شیارشدگی و به طور کلی عملکرد دمای زیاد و میانی افزایش می‌یابد. بر این اساس، ترکیب‌های **PBR 2.3%** و **Sasobit 2.3%+2.5%** به ترتیب یک و دو نمره، نمره عملکردی دمای بالای قیر را افزایش، ترکیب **PBR 2.3%** عمر خستگی را افزایش و افزودن ساسوبیت و همچنین افزایش بیشتر مقدار پلیمر موجب کاهش مقاومت در برابر خستگی خواهد گردید. نتایج **TGA** نشان می‌دهد که بین نتایج این روش و سایر نتایج، توافق خوبی وجود دارد که می‌تواند به ارزیابی دقیق نتایج در سطح ماکرومولکولی کمک کند.

واژه‌های کلیدی: قیر، رئولوژی، پلی‌بوتادین رابر ضایعاتی، ساسوبیت

۱. مقدمه

مخلوط دارد و یکی از دلایل مهم و تأثیرگذار در خرابی های مخلوط آسفالتی (شیارشدگی یا خستگی) به دلیل نواقص مربوط به قیر است (رضایی و همکاران، ۲۰۱۶).

قیر یکی از اجزای کلیدی و سازنده در مخلوط‌های آسفالتی است که تأثیر به‌سزایی بر رفتار و عملکرد

(TGA) روی قیر اصلاح شده با پلی‌اتیلن ضایعاتی صورت پذیرفت، نتایج نشان داد که کاربرد پلی‌اتیلن ضایعاتی منجر به افزایش پایداری حرارتی قیر اصلاح شده گردیده است (فنگ و همکاران، ۲۰۱۴). نتایج آزمایشگاهی ارزیابی رئولوژی قیر اصلاح شده با لاستیک نیتروک ضایعاتی نشان داد که تجزیه و تحلیل حرارتی برای بررسی و مقایسه ویژگی‌های ساختاری اصلاح کننده قیری می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. این پژوهش نشان داد که برای ارزیابی پایداری حرارتی هر نوع اصلاح کننده‌ای می‌توان از TGA استفاده نمود و کاربرد لاستیک نیتروک ضایعاتی منجر به افزایش پایداری حرارتی قیر اصلاح شده گردیده است (سودانی و همکاران، ۲۰۱۶). در پژوهش دیگری که به تحلیل حرارتی قیر اصلاح شده با پودر لاستیک و پلی‌اتیلن سبک پرداخته است، نتایج تحقیق با استفاده از TGA نشان داد که این آزمون به منظور انتخاب نوع مناسب اصلاح کننده می‌تواند کاملاً کاربردی و مؤثر باشد (فراهانی و همکاران، ۲۰۱۷). هرچند تحقیقات گسترده‌ای در مورد اثر انواع پودر لاستیک و پلیمرهای پایه لاستیک روی رفتار رئولوژی و مقاومت حرارتی قیر صورت پذیرفته است، اما تحقیقات در مورد اثر پلیمر پلی‌بوتادین رابر (PBR) و بالاخص نوع ضایعاتی آن، محدود می‌باشد. لذا، در این مقاله، به منظور یافتن درصد بهینه پلیمر در بهبود پتانسیل مقاومت در برابر شیارشدگی و خستگی، رفتار رئولوژی و مقاومت حرارتی افزودنی PBR ضایعاتی و در ترکیب با ساسویت در درصد‌های مختلف به قیر PG 58-22 یا همان قیر ۸۵/۱۰۰ به عنوان یکی از پرمصرف‌ترین قیر در ایران، مورد تحلیل قرار گرفت. بدین منظور، عملکرد ترکیبات مختلف بر اساس آزمایش‌های کلاسیک قیر، بازگشت الاستیک، ویسکومتر دورانی (RV)، رئومتر برش دینامیک (DSR)، بازگشت خزشی در چند سطح تنش (MSCR)، جاروب دامنه خطی (LAS) و تحلیل توزین حرارتی (TGA) مورد ارزیابی قرار گرفت.

بنابراین، جهت افزایش دوام مخلوط آسفالتی و کاهش کاستی‌های مربوط به قیر پایه، اصلاح خواص رئولوژی قیر با افزودنی‌هایی از قبیل پلیمر یکی از گزینه‌های قابل بررسی است (بولاتوویچ و همکاران، ۲۰۱۴). شیارشدگی به تغییر شکل پلاستیک در محل عبور چرخ وسایل نقلیه اطلاق می‌شود و این پدیده یکی از مهمترین خرابی‌ها در مناطق گرمسیری است. در واقع، با افزایش دما، قیر در مخلوط آسفالتی شروع به نرم شدن می‌کند و این موضوع سبب تغییر شکل‌های غیرقابل برگشت مخلوط آسفالتی می‌گردد (صادق و همکاران، ۲۰۱۶؛ رضایی و همکاران، ۲۰۱۷). محققین، هر ساله، اصلاح کننده‌های مختلفی را برای اصلاح خصوصیات و رفتار رئولوژی قیر به کار می‌برند. یکی از راه‌های اصلاح قیر، استفاده از افزودنی‌هایی نظیر پلیمرها، فیلر، فیبر و مواد ضد عریان‌شدگی است که در این میان، پلیمرها به عنوان یکی از بهترین افزودنی‌های اصلاح کننده قیر شناخته شده‌اند (گلچین و همکاران، ۲۰۱۷). تا کنون تحقیقات بی‌شماری در زمینه استفاده از انواع پودر لاستیک (صنعتی و ضایعاتی) و ترکیبات مختلف آن بر اصلاح خصوصیات قیر انجام شده و هم اکنون استفاده از خرده لاستیک به عنوان یک راهکار مؤثر در بهبود خصوصیات قیر مورد توجه است (یانگ و همکاران، ۲۰۱۷؛ گاردزی و حسین، ۲۰۱۸؛ لودر و همکاران، ۲۰۱۸). لاستیک‌هایی همچون استایرن بوتادین رابر (SBR) با بهبود خواص الاستیک قیر موجب بهبود مقاومت در برابر خستگی و شیارشدگی آسفالت می‌شوند (عامری و همکاران، ۲۰۱۷؛ جین و همکاران، ۲۰۱۹؛ عابدینی و همکاران، ۲۰۲۰). میزان ۱۰٪ از خرده لاستیک می‌تواند عملکرد مشابهی در خستگی و شیارشدگی با نمونه‌های حاوی ۵٪ پلیمر استایرن بوتادین استایرن داشته باشد و وجود استایرن بوتادین رابر به عنوان یکی از اصلاح کننده‌های قیر موجب افزایش ویسکوزیته، بهبود خاصیت کشسانی و افزایش خواص چسبندگی قیر می‌گردد (ژانگ و هو، ۲۰۱۳). در پژوهشی که به بررسی پایداری حرارتی با استفاده از تحلیل توزین حرارتی

۲. روش تحقیق

۲-۱. مواد

در این پژوهش، از قیر ۸۵/۱۰۰ (PG 58-22) پالایشگاه نفت تهران، محصول ضایعاتی پلیمر پلی بوتادین رابر از

نوع ۱۲۲۰ کارخانه پتروشیمی شازند و موم فیشر-تروپش (ساسوبیت) از شرکت Ventraco هلند استفاده شد. ترکیبات شیمیایی قیر پایه و مشخصات فیزیکی و شیمیایی PBR و ساسوبیت در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی قیر پایه، پلیمر ضایعاتی پلی بوتادین رابر و ساسوبیت

موم فیشر- تروپش (ساسوبیت)		پلی بوتادین رابر ضایعاتی		قیر پایه ۸۵/۱۰۰ (PG58-22)	
مقدار	خصوصیات فیزیکی و شیمیایی	مقدار	خصوصیات فیزیکی و شیمیایی	مقدار	ترکیبات
هیدروکربن پلی اتیلن آلیفاتیک	عناصر	> ۹۷	مقدار CIS (درصد وزنی)	۱۳/۸	اشباع‌ها (درصد وزنی)
پاستیل، پرل سفید	حالت فیزیکی رنگ	< ۰/۵	مقدار مواد فرار (درصد وزنی)	۴۱	نفتن-آروماتیک (درصد وزنی)
بی‌بو	بو	< ۰/۳	مقدار خاکستر (درصد وزنی)	۳۴/۵	آروماتیک قطبی (درصد وزنی)
۵۹۰-۶۲۲	چگالی حجمی (kg/m ³)	> ۱۵۰	استحکام کششی در ۳۵ دقیقه (kgf/cm ³)	۱۰/۷	آسفالتین‌ها (درصد وزنی)
۲۹۰	نقطه اشتعال (°C)	> ۴۴۰	کرنش نقطه شکست در ۳۵ دقیقه (درصد)		
نامحلول	حلالیت در آب				
۲-۳	مقدار مصرف (درصد وزنی)				

۲-۲. آزمایش‌ها

۲-۲-۱. آماده‌سازی نمونه‌ها

به منظور تهیه ترکیبات قیر، پلی بوتادین رابر ضایعاتی و ساسوبیت از مخلوط‌کن برش بالا و مجهز به ترموکوپل استفاده شد. بر همین اساس، برای تهیه نمونه‌ها، ابتدا قیر تا دمای ۱۷۶ درجه سلسیوس داغ شد. سپس، با حفظ این دما، PBR کم کم در حین چرخش مخلوط‌کن مکانیکی به قیر اضافه شد تا در ظاهر قیر و پلیمر به خوبی مخلوط شدند. آنگاه ترکیب قیر و پلیمر در مخلوط‌کن برش بالا با سرعت ۴۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت یک

ساعت به صورت کامل مخلوط گردید (رضایی و همکاران، ۲۰۱۶a). برای ترکیبات دارای ساسوبیت، پس از داغ نمودن قیر، ابتدا ساسوبیت اضافه گردید و پس از اختلاط چند دقیقه‌ای در مخلوط‌کن مکانیکی مراحل افزودن PBR مطابق آنچه که بیان شد صورت پذیرفت.

۲-۲-۲. آزمایش‌های خصوصیات فیزیکی

آزمون‌های اولیه شامل درجه نفوذ (ASTM D5)، نقطه نرمی (ASTM D36)، کشش‌پذیری (ASTM D113) در ۵ و ۲۵ درجه سلسیوس، وزن مخصوص (ASTM D70)،

آزمایش بازگشت خزشی در چند سطح تنش (MSCR) با استفاده از دستگاه DSR مطابق استاندارد ASTM D7405-15 روی نمونه‌های پیرشده RTFO انجام شد. R، Jnr و R_{dif} برای سطوح تنش ۰/۱ و ۳/۲ کیلوپاسکال در دماهای مختلف به دست آمد.

آزمایش جاروب دامنه خطی (LAS) نیز با استفاده از دستگاه DSR مطابق استاندارد AASHTO TP 101-2018 (12) روی نمونه‌های پیرشده RTFO+PAV در دمای ۲۸ درجه سلسیوس انجام شد. جاروب دامنه خطی در فرکانس ثابت ۱۰ هرتز با افزایش کرنش برشی از ۰٪ تا ۳۰٪ در فاصله زمانی ۳۰۰ ثانیه به دست آمد.

۲-۲-۵. آزمون تحلیل توزین حرارتی

آزمون تحلیل توزین حرارتی (TGA) ساده‌ترین روش آنالیز حرارتی است که اساس آن بر اندازه‌گیری وزن نمونه در هنگام گرمایش استوار است. این روش، زمانی که ماده در خلال گرمایش تجزیه شود، اطلاعات مفیدی را ارائه خواهد داد. دستگاه توزین حرارتی دارای یک ترازوی الکترونیکی حساس است که تغییر وزن نمونه را بر اساس تغییر جریان الکتریکی، در یک سیم پیچ اندازه‌گیری می‌کند. نمونه، در داخل بوتله‌ای از جنس پلاتین یا آلومینا به صورت آویزان در داخل کوره قرار می‌گیرد. انتهای سیم آویز، به یک هسته مغناطیسی متصل است که به دلیل تغییر وزن، به داخل استوانه سیم‌پیچ وارد و یا از آن خارج می‌شود. بر حسب حرکت این هسته، جریان الکتریکی متناسب با تغییر وزن نمونه، در سیم‌پیچ القا و پس از تقویت به قسمت ثبت‌کننده فرستاده خواهد شد. بر این اساس، نتایج آزمون بر حسب درصد وزنی نمونه در برابر حرارت وارده (دمای آزمون) ثبت می‌گردد. در این تحقیق، آزمون TGA بر اساس استاندارد (ASTM D2584) روی نمونه‌های قیر پایه و اصلاح شده انجام گرفت و دمای آزمون تا صفر شدن کامل وزن نمونه ادامه پیدا کرد.

نقطه اشتعال (ASTM D92)، بازگشت الاستیک (ASTM D6084M-18) و آزمون ویسکومتر دورانی (ASTM D4402) در دماهای ۱۳۵، ۱۵۰ و ۱۶۵ درجه سلسیوس روی نمونه‌های مختلف صورت پذیرفت. بر اساس مقادیر نقطه نرمی و درجه نفوذ، PI (رید و وایت-اوک، ۲۰۰۳) محاسبه گردید. مقادیر PI با افزایش نقطه نرمی و درجه نفوذ افزایش می‌یابد که به افزایش نقطه نرمی حساس‌تر است. PI بیشتر، مقاومت بیشتر را در برابر تغییر شکل‌های ماندگار (شیارشده‌گی) نشان می‌دهد (رضایی و همکاران، ۲۰۱۶a).

۲-۲-۳. آزمون رئومتر برش دینامیک

آزمون رئومتر برش دینامیک (DSR) به منظور سنجش ویژگی‌های ویسکوالاستیک و عملکرد دمای زیاد و میانی مطابق استاندارد ASTM D7175 به کار رفت. این آزمون به روش تنش کنترل شده در فرکانس ثابت (10 rad/s) معادل (1.59 Hz) و در دماهای ۵۲، ۵۸، ۶۴، ۷۰ و ۷۶ درجه سلسیوس روی نمونه‌های پیر نشده و پیر شده RTFO برای عملکرد دمای زیاد و در دماهای ۱۰، ۱۳، ۱۶، ۱۹، ۲۲، ۲۵ و ۲۸ درجه سلسیوس روی نمونه‌های پیر شده RTFO+PAV برای عملکرد دمای میانی صورت پذیرفت. پیرشده‌گی RTFO نمونه‌های قیری مطابق با استاندارد AASHTO T240 و PAV مطابق استاندارد AASHTO R 28 انجام شد. آنگاه پارامترهای $G^*/\sin\delta$ و $G^*\times\sin\delta$ تعیین گردید. برای کاهش دادن خرابی شیارشده‌گی باید مقدار شاخص $G^*/\sin\delta$ بزرگتر از 1.00 kPa برای قیر پیر نشده و بزرگتر از 2.2 kPa برای قیر پیر شده باشد. برای بهبود پتانسیل مقاومت در برابر خستگی باید مقدار شاخص $G^*\times\sin\delta$ کوچکتر مساوی ۵۰۰۰ kPa باشد (آئین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران، ۱۳۹۰).

۲-۲-۴. آزمون بازگشت خزشی در چند سطح تنش و

آزمون جاروب دامنه خطی

۳. نتایج

۳-۱. خصوصیات فیزیکی

ویسکوزیته دورانی در جدول ۲ آمده است. علت انتخاب درصد پلیمرها بر اساس نتایج کشش پذیری و الزامات آیین نامه روسازی راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴) برای آن مطابق جدول ۲ و درصد موم پارافینی فیچر- تروپس بر اساس پژوهش‌های گذشته همانند پژوهش شفابخش و رمضانزاده اندواری (۱۳۹۶) می‌باشد.

اثر افزودنی PBR ضایعاتی و در ترکیب با ساسوبیت بر قیر مطابق نتایج نقطه نرمی، درجه نفوذ، PI، کشش پذیری، بازگشت الاستیک، وزن مخصوص، نقطه اشتعال و

جدول ۲. نتایج آزمون خصوصیات فیزیکی قیر پایه، ترکیبات قیر و PBR و ترکیب قیر/PBR/ساسوبیت

ترکیبات											خصوصیات
ترکیب قیر/PBR/ساسوبیت (درصد وزنی قیر)	ترکیبات قیر و پلیمر ضایعاتی پلی بوتادین رابر (درصد وزنی قیر)										
2.3%PBR+ 2.5%Sasobit	۶٪	۵٪	۴٪	۳٪	۲٪/۵	۲٪/۴	۲٪/۳	۲٪	۱٪	قیر پایه	
۷۲/۲	۵۵/۸	۵۴/۷	۵۴	۵۲/۴	-	-	۵۱/۸	۵۱/۴	۵۰/۶	۴۹	نقطه نرمی (°C)
۶۰	۷۹	۸۰	۸۱	۸۲	-	-	۸۳	۸۵	۸۶	۸۹	درجه نفوذ در ۲۵°C (dmm)
۳/۶۹	۱/۴۷	۱/۱۸	۱/۰۹	۰/۷۳	-	-	۰/۶۲	۰/۵۵	۰/۳۷	۰/۰۴	PI
>۱۰۰	۲۱	۳۶	۵۵	۸۵	۹۲	۹۷	>۱۰۰	>۱۰۰	>۱۰۰	>۱۰۰	کشش پذیری (cm)
۵	۰	۲/۱	۳/۸	۴/۱	-	-	۵	۵/۷	۶/۶	۸/۱	
۱/۰۰۳	۱/۰۰۷	۱/۰۰۷	۱/۰۰۸	۱/۰۰۹	-	-	۱/۰۱۰	۱/۰۰۹	۱/۰۱۰	۱/۰۱۵	وزن مخصوص (gr/cm ³)
۳۰۰	۲۹۹	۳۰۱	۳۰۳	۳۰۴	-	-	۳۰۲	۳۰۱	۳۰۳	۲۹۳	نقطه اشتعال (°C)
۳۰	۵۲	۵۰	۴۷	۴۴	-	-	۳۵	۳۲	۲۵	۱۰	بازگشت الاستیک در ۲۵°C (%)
۰/۵۲	۲/۰۴	۱/۶۵	۱/۲۲	۰/۷۸	-	-	۰/۶۵	۰/۶۰	۰/۵۵	۰/۳۶	۱۳۵°C
۰/۲۹	۱/۰۳	۰/۸۵	۰/۶۵	۰/۴۴	-	-	۰/۳۵	۰/۳۰	۰/۲۹	۰/۱۴	۱۵۰°C
۰/۱۷	۰/۶۹	۰/۵۱	۰/۳۷	۰/۲۷	-	-	۰/۲۰	۰/۱۸	۰/۱۶	۰/۰۸	۱۶۵°C

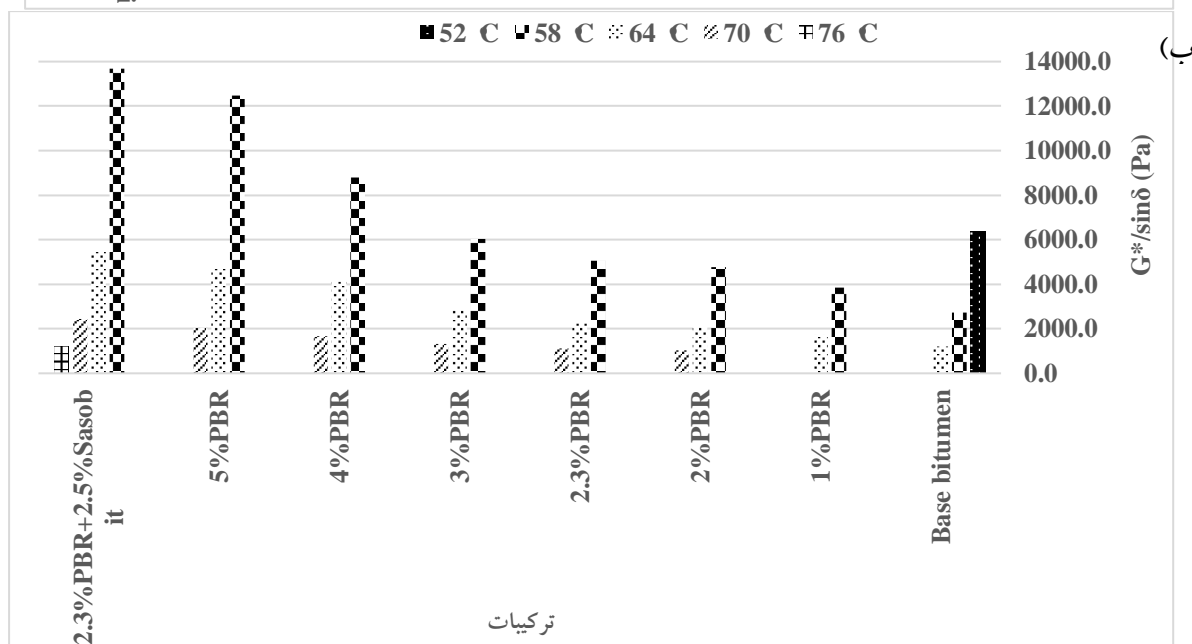
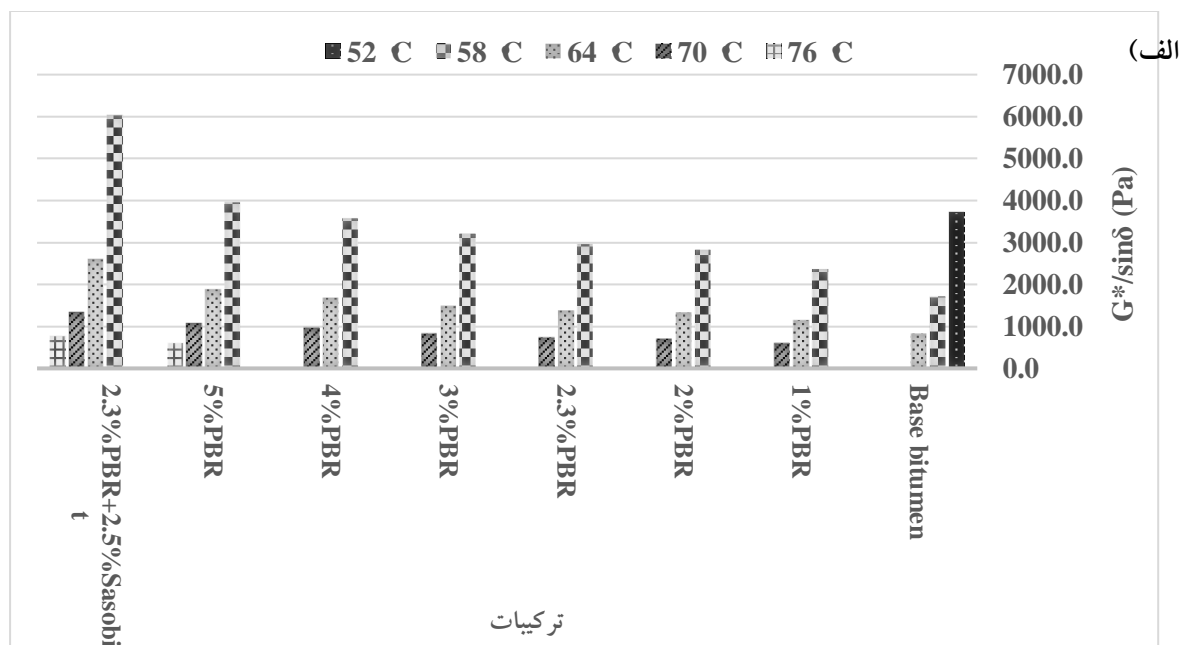
PBR و همچنین در ترکیب با ساسوبیت باشد. با افزودنی PBR و همچنین در ترکیب با ساسوبیت به قیر نقطه اشتعال اندکی افزایش و وزن مخصوص اندکی کاهش می‌یابد. مقدار کشش پذیری در دمای ۲۵ درجه سلسیوس باید بیش از ۱۰۰ سانتی متر باشد (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۲۰۱۱). همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌گردد، از مقدار PBR بیشتر از ۲/۳ درصد وزنی قیر، کشش پذیری در دمای ۲۵ درجه سلسیوس کمتر از ۱۰۰ سانتی متر می‌شود و مقدار کشش پذیری برای

همانطور که مشاهده می‌گردد، با افزودن PBR ضایعاتی و در ترکیب با ساسوبیت به قیر، درجه نفوذ کاهش، نقطه نرمی و PI افزایش می‌یابد. کاهش درجه نفوذ، افزایش نقطه نرمی و افزایش PI منجر به کاهش حساسیت قیر به تغییرات دمایی، بهبود عملکرد آن در دمای زیاد و افزایش مقاومت قیر در برابر تغییر شکل‌های ماندگار (شیارشدگی) می‌شود (رضایی و همکاران، ۲۰۱۶a). این می‌تواند به دلیل ایجاد شبکه‌های سه‌بعدی در محیط قیر پس از تشکیل زنجیرهای بلند و پراکنده

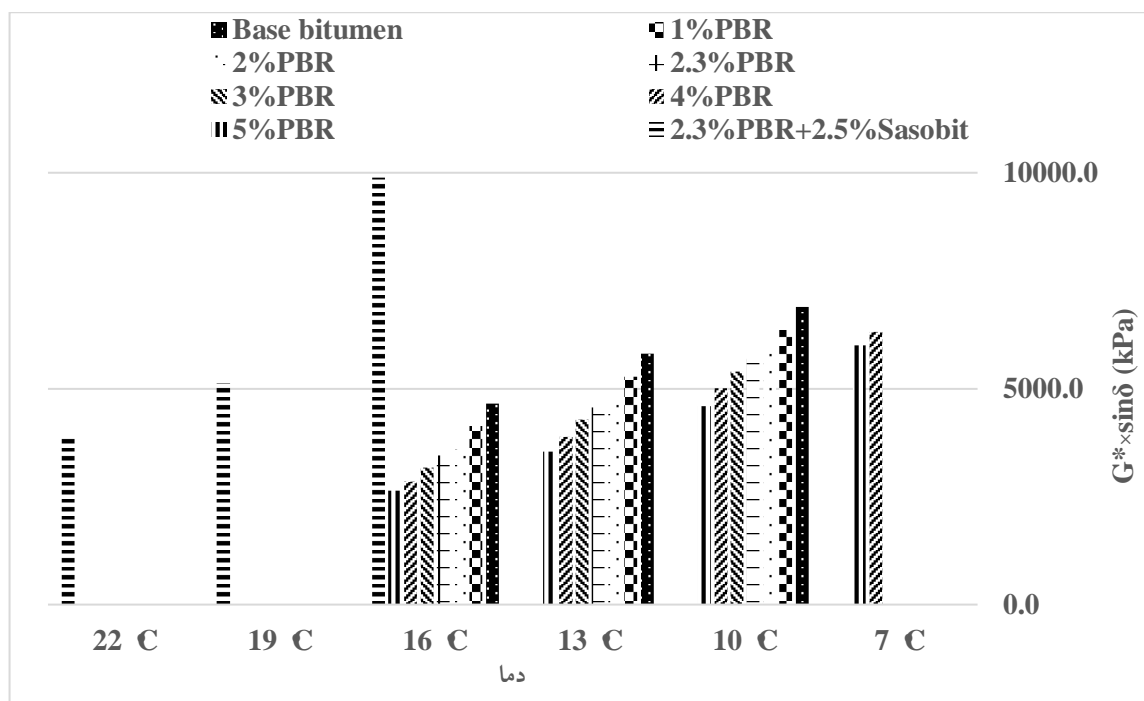
۲-۳. رئومتر برش دینامیک

با تعیین پارامتر $G^*/\sin\delta$ و $G^*\times\sin\delta$ اثر افزودنی PBR ضایعاتی و در ترکیب با ساسوبیت بر مقاومت در برابر شیارشدگی و مقاومت در برابر خستگی قیر پایه به ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ آمده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، با افزودن PBR ضایعاتی به قیر پایه در حالت پیر نشده و پیر شده RTFO، مقاومت در برابر شیارشدگی و خستگی افزایش می‌یابد، که این می‌تواند به دلیل تقویت خاصیت الاستیک ملات قیری در برابر خاصیت ویسکوزیته باشد که منجر به تقویت بازگشت الاستیک تغییر شکل ماده و شکل‌پذیری آن گردیده و مقاومت در برابر شیارشدگی و خستگی افزایش یافته است. اما افزودن ترکیب PBR ضایعاتی و ساسوبیت به قیر پایه موجب افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی و کاهش مقاومت در برابر خستگی می‌شود که این می‌تواند به دلیل خاصیت موم پارافینی ساسوبیت باشد که در دمای میانی سفتی قیر را بیش از حد افزایش می‌دهد و منجر به سخت‌شدگی ملات قیری شده و عمر خستگی کاهش می‌یابد. بر این اساس، از میان ترکیبات با پلیمر ضایعاتی PBR، ترکیب با حداقل ۲/۳ درصد پلیمر (درصد وزنی قیر)، نمره عملکردی دمای زیاد را یک نمره و ترکیب با ساسوبیت را دو نمره افزایش می‌دهد. همچنین، ترکیب با ۲/۳ درصد پلیمر (درصد وزنی قیر) مقدار پارامتر $G^*\times\sin\delta$ را در دمای ۱۳ درجه سلسیوس برای قیر خالص از ۵۸۱۶ به ۴۵۵۹ کیلوپاسکال کاهش داده و معیار خستگی را کنترل نموده، در حالی که ترکیب با ساسوبیت، معیار خستگی را برآورده نمی‌کند.

قیر با ۶ درصد PBR در ۵ درجه سلسیوس صفر شد. لذا، به منظور بررسی عملکرد دمای زیاد قیر بر مبنای آزمون DSR ترکیب با ۲/۳ درصد وزنی قیر پلیمر ضایعاتی PBR و ترکیب ۲/۳ درصد وزنی قیر PBR ضایعاتی با ۲/۵ درصد وزنی قیر ساسوبیت نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین، با افزودن PBR ضایعاتی به قیر پایه، مقدار ویسکوزیته دورانی در همه دماها روندی صعودی دارد. اما کلیه نمونه‌های قیری مقدار حداکثر ویسکوزیته دورانی را در ۱۳۵ درجه سلسیوس برابر ۳ Pa.s (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۲۰۱۱) رعایت نموده‌اند و بر اساس همین دستورالعمل، دمای مناسب اختلاط و تراکم مخلوط آسفالتی برای ترکیب با ۲/۳ درصد وزنی قیر پلیمر ضایعاتی PBR به ترتیب ۱۷۰ و ۱۵۶ درجه سلسیوس و برای ترکیب ۲/۳ درصد وزنی قیر PBR ضایعاتی با ۲/۵ درصد وزنی قیر ساسوبیت به ترتیب برابر ۱۶۵ و ۱۵۰ درجه سلسیوس حاصل گردید. در نهایت، نتایج بازگشت الاستیک در دمای ۲۵ درجه نشان می‌دهد که افزودن PBR موجب افزایش خاصیت الاستیسیته می‌شود. به طوری که افزودن ۵٪ وزنی PBR به قیر در مقایسه با قیر خالص، مقدار بازگشت الاستیک را ۵ برابر افزایش می‌دهد که این می‌تواند به دلیل وجود جزء لاستیک در ساختار شیمیایی پلیمر PBR باشد. اما افزودن ساسوبیت موجب کاهش خاصیت الاستیسیته خواهد شد که این می‌تواند به دلیل خاصیت موم پارافینی ساسوبیت باشد که سفتی ملات قیری را در دمای میانی افزایش داده است.



شکل ۱. نتایج پتانسیل مقاومت در برابر شیارشدگی از آزمون DSR برای ترکیبات مختلف: الف) قیر پیر نشده و ب) قیر پیر شده (RFTO) در دماهای ۵۲، ۵۸، ۶۴، ۷۰ و ۷۶ درجه سلسیوس



شکل ۲. نتایج پتانسیل مقاومت در برابر خستگی از آزمون DSR برای ترکیبات مختلف در دماهای ۷، ۱۰، ۱۳، ۱۶، ۱۹ و ۲۲ درجه سلسیوس

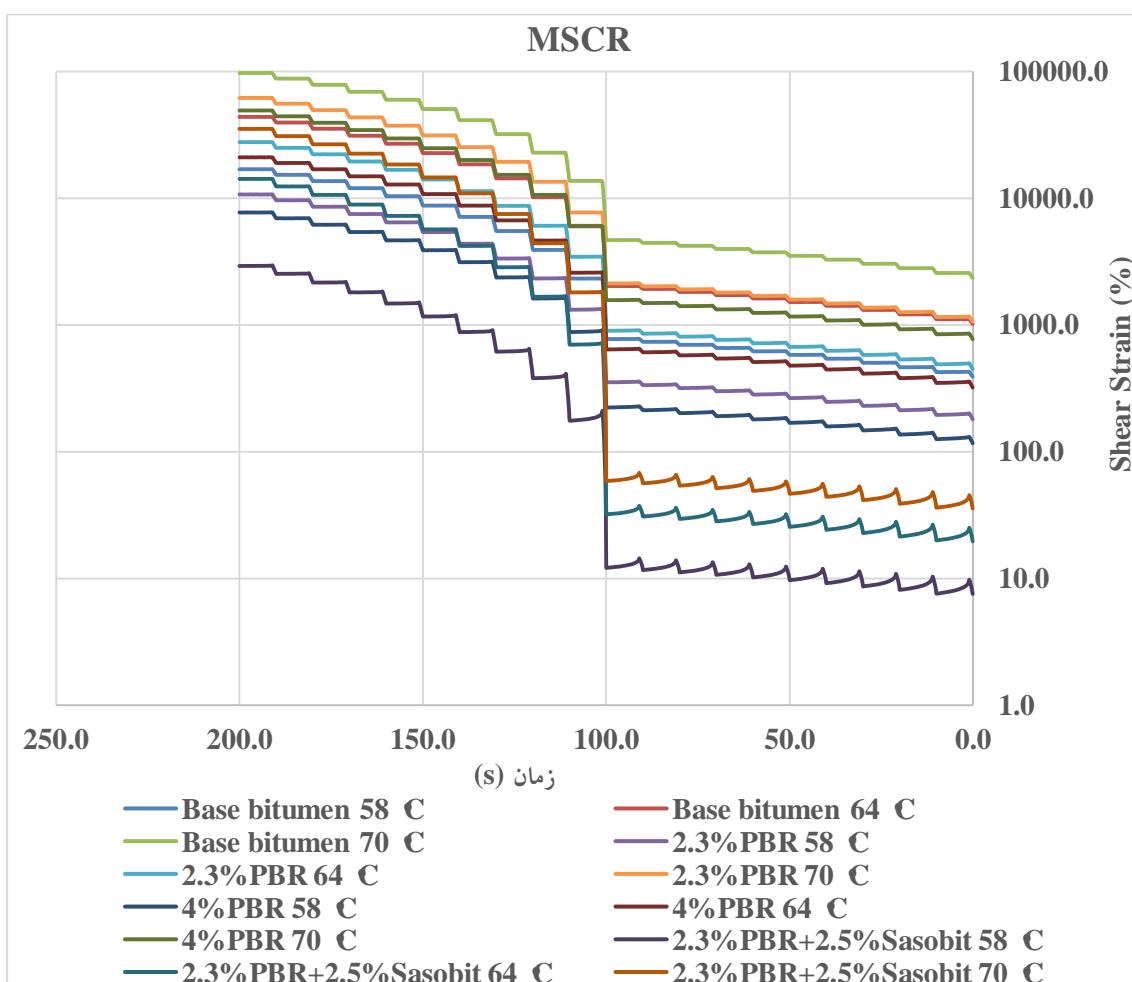
و ساسوبیت در افزایش بازگشت الاستیک عملاً ناچیز می‌شود. بالاترین سطح بازگشت الاستیک برای ترکیب ۲/۳ درصد وزنی قیر PBR ضایعاتی با ۲/۵ درصد وزنی قیر ساسوبیت و برابر ۸۱/۵ درصد به دست آمد که در مقایسه با قیر پایه برابر ۵/۷۵، بیش از ۱۴ برابر افزایش یافته است. همچنین، افزودن PBR ضایعاتی به قیر پایه و در ترکیب با ساسوبیت موجب کاهش مقادیر نرمی غیرقابل بازگشت (Jnr) می‌شود. از آنجا که نرمی غیرقابل بازگشت نشانه‌ای از حساسیت قیر به شیارشدگی است، می‌توان گفت که افزودن PBR و ساسوبیت به قیر پایه استعداد تجمع کرنش غیرقابل بازگشت را تحت بارگذاری و باربرداری متوالی کاهش داده‌اند. مطابق آنچه که در مورد درصد بازگشت مشاهده شد، افزایش دما و سطح تنش نیز بر مقدار Jnr تأثیر دارد و مقادیر آن را افزایش می‌دهد. اما در تنش‌های بیشتر، اثر افزودنی PBR و ساسوبیت در کاهش نرمی غیرقابل بازگشت قابل توجه باقی می‌ماند. کمترین میزان Jnr برای ترکیب ۲/۳ درصد وزنی قیر PBR ضایعاتی با ۲/۵ درصد وزنی قیر

۳-۳. بازگشت خزشی در چند سطح تنش

نتایج کرنش برشی در طول زمان در شکل ۳ و نتایج درصد بازگشت، نرمی غیرقابل بازگشت و اختلاف درصد بازگشت در جدول ۳ برای سطوح تنش ۰/۱ و ۳/۲ کیلوپاسکال و برای دماهای ۵۸، ۶۴ و ۷۰ درجه سلسیوس برای نمونه‌های مختلف پیر شده RTFO مطابق آزمون MSCR آمده است. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌گردد، با افزودن PBR ضایعاتی به قیر پایه و در ترکیب با ساسوبیت کرنش برشی کاهش می‌یابد که نشان دهنده کاهش تغییر شکل ماندگار و افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی خواهد بود. همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌گردد، افزودن PBR ضایعاتی به قیر پایه و در ترکیب با ساسوبیت منجر به افزایش پاسخ الاستیک می‌شود؛ یعنی PBR و ساسوبیت موجب کاهش مقدار کرنش غیرقابل بازگشت در دمای زیاد روسازی می‌گردد. این اثر، با افزایش دما و سطح تنش کمی کاهش می‌یابد. افزایش دما و سطح تنش موجب کاهش خصوصیت الاستیسیته می‌شود. در تنش‌های بیشتر، اثر افزودنی PBR

تغییر شکل ماده گردیده و مقاومت در برابر شیارشدگی افزایش یافته است. در بررسی نهایی نتایج MSCR، اختلاف درصد بازگشت در دماهای مختلف بررسی گردید. نتایج نشان می‌دهد که قیر پایه به تغییر درصد بازگشت بسیار حساس است و با افزایش تنش به سرعت خاصیت الاستیسیته خود را از دست می‌دهد. اما افزودن PBR و ساسوبیت، این حساسیت را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد که دلیل مربوطه پیش از این مطرح گردید.

ساسوبیت و برابر ۰/۰۵ بر کیلو پاسکال به دست آمد که در مقایسه با قیر پایه برابر ۳/۸۸، بیش از ۷۷ برابر کاهش یافته است. بنابراین، چه از نظر درصد بازگشت و چه مقادیر نرمی غیر قابل بازگشت، قیر خالص کمترین مقاومت را در برابر تغییر شکل دائمی نشان می‌دهد. در حالی که تأثیر مثبت افزودن PBR و ساسوبیت در نتایج بسیار برجسته است که این می‌تواند به دلیل تقویت خاصیت الاستیک ملات قیری در برابر خاصیت ویسکوزیته باشد که منجر به تقویت بازگشت الاستیک



شکل ۳. نتایج کرنش برشی در طول زمان حاصل از آزمون MSCR برای ترکیبات پیر شده RTFO در دماهای ۵۸، ۶۴ و ۷۰ درجه سلسیوس

جدول ۳. درصد بازگشت، نرمی غیرقابل بازگشت و اختلاف درصد بازگشت حاصل از آزمون MSCR برای ترکیبات مختلف

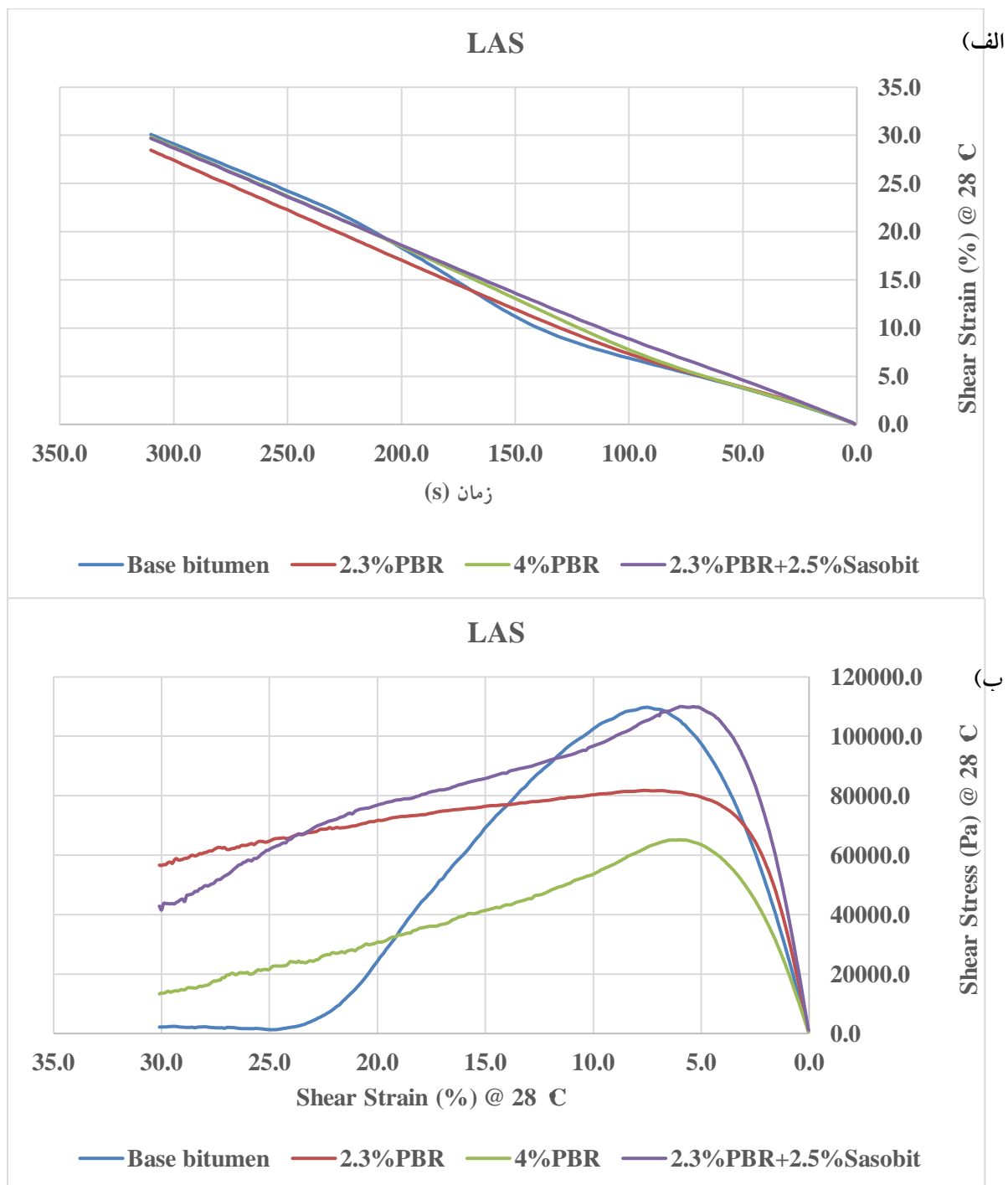
پیر شده با RTFO در دماها و سطح تنش های مختلف

ترکیبات					
۷۰°C	۶۴°C	۵۸°C	۷۰°C	۶۴°C	۵۸°C
R(%) برای ۳/۲ کیلوپاسکال			R(%) برای ۰/۱ کیلوپاسکال		
۰	۰	۰	۰	۰/۸۴	۵/۷۵
۰	۰	۱/۸۴	۸/۳۱	۱۶/۸۵	۲۴/۱۱
۰	۰	۳/۶۱	۱۱/۶۰	۲۱/۴۰	۳۲/۴۹
۰	۱/۲۴	۱۰/۸۱	۷۸/۷۱	۷۹/۵۲	۸۱/۵۰
J _{nr} (1/kPa) برای ۳/۲ کیلوپاسکال			J _{nr} (1/kPa) برای ۰/۱ کیلوپاسکال		
۲۶/۶۸	۱۲/۵۹	۴/۹۹	۲۲/۴۱	۱۰/۱۷	۳/۸۸
۱۷/۷۶	۸/۲۷	۳/۲۴	۱۰/۷۷	۴/۵۶	۱/۷۵
۱۴/۳۲	۶/۳۳	۲/۳۴	۸/۰۳	۳/۲۵	۱/۰۸
۱۰/۷۳	۴/۴۳	۰/۹۱	۰/۲۵	۰/۱۴	۰/۰۵
R _{diff} (%)					
			۰	۱۰۰	۱۰۰
			۱۰۰	۱۰۰	۹۲/۳۶
			۱۰۰	۱۰۰	۸۸/۸۸
			۱۰۰	۹۸/۴۴	۸۶/۷۴

۴-۳. جاروب دامنه خطی

نتایج کرنش برشی در برابر زمان بارگذاری و نتایج تنش برشی در برابر کرنش برشی در دمای ۲۸ درجه سلسیوس برای نمونه‌های مختلف پیر شده RTFO+PAV مطابق آزمون LAS به ترتیب در شکل‌های (۴-الف) و (۴-ب) آمده است. همانطور که در شکل (۴-الف) مشاهده می‌گردد، با افزودن پلیمر ضایعاتی پلی‌بوتادین رابر به میزان ۲/۳ درصد وزنی قیر، مقدار کرنش برشی نسبت به سایر ترکیبات کاهش یافته است و نشان دهنده افزایش مقاومت این ترکیب به خستگی در قیاس با نمونه‌های دیگر است که این می‌تواند به دلیل تقویت مقدار و خاصیت الاستیک ملات قیری در برابر مقدار و خاصیت ویسکوزیته باشد که منجر به استقامت الاستیسیته و شکل‌پذیری آن گردیده و مقاومت در برابر خستگی افزایش یافته است. مطابق نتایج، با افزایش مقدار PBR به ۴٪، مقاومت در برابر

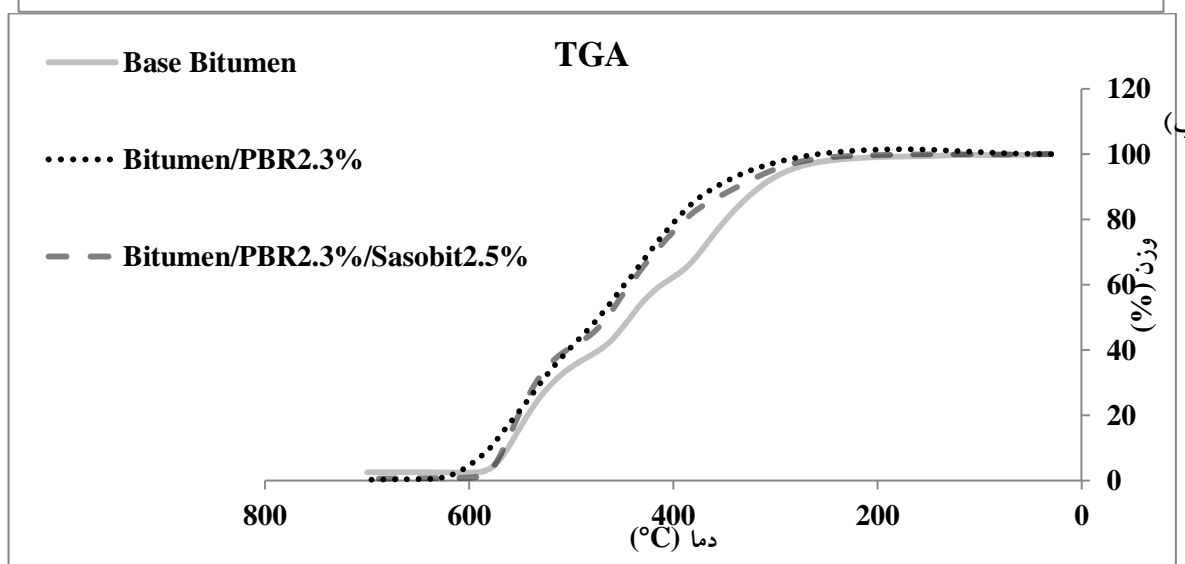
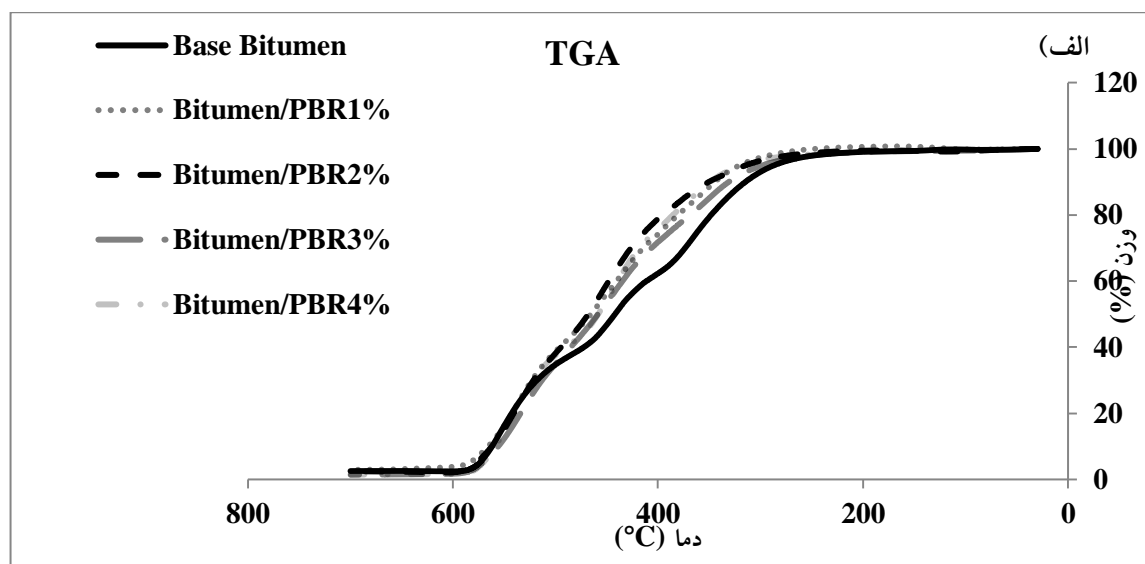
خستگی کاهش می‌یابد و همچنین است افزودن ساسوبیت به قیر پلیمری. نتایج شکل (۴-الف) نیز توسط شکل (۴-ب) تأیید می‌گردد. به نحوی که نمودار تنش-کرنش برای ترکیب با ۲/۳ درصد PBR از ثبات نسبی در قیاس با سایر نمونه‌های قیری برخوردار بوده و با افزایش درصد PBR به ۴٪، سطح زیر نمودار به شدت کاهش می‌یابد که این می‌تواند به دلیل خاصیت موم پارافینی ساسوبیت باشد که در دمای میانی سفتی قیر را بیش از حد افزایش می‌دهد و منجر به سخت‌شدگی ملات قیری شده و عمر خستگی کاهش می‌یابد. مطابق با این نتایج، افزودن ساسوبیت موجب کاهش قابل توجه تنش با افزایش کرنش می‌شود که در نتیجه مقاومت در برابر خستگی آن کاهش می‌یابد. بنابراین، مطابق این نتایج، ترکیب قیر پایه با ۲/۳ درصد پلیمر PBR بهترین ترکیب از نظر مقاومت در برابر خستگی است و افزودن ساسوبیت و همچنین افزایش بیشتر مقدار پلیمر موجب کاهش مقاومت در برابر خستگی خواهد گردید.



شکل ۴. نتایج آزمون LAS برای ترکیبات مختلف پیر شده در $RTFO+PAV$ در دمای ۲۸ درجه سلسیوس: الف) کرنش برشی در برابر زمان و ب) تنش-کرنش برشی

۳-۵. مقاومت حرارتی

تغییرات وزنی قیر پایه و قیرهای اصلاح شده در آزمون TGA در دماهای مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. نتایج تحلیل توزین حرارتی حاصل از آزمون TGA برای ترکیبات مختلف

مشاهده می‌شود. اما تفاوت قابل توجهی با هم ندارند. با این وجود، بر اساس شکل ۵ مشاهده می‌شود که نمونه ۲/۳ درصد وزنی PBR ضایعاتی و نمونه ۲/۳ درصد ساسوبیت وزنی PBR ضایعاتی در ترکیب با ۲/۵ درصد ساسوبیت پایداری حرارتی بالاتری نسبت به دیگر نمونه‌ها دارد که کاملاً مطابق با نتایج رفتار رئولوژی قیر در دمای زیاد می‌باشد.

۴. نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر به بررسی اثر افزودنی PBR ضایعاتی و ترکیب PBR ضایعاتی و ساسوبیت بر قیر پایه بر اساس

همانطور که بیان شد، تحلیل توزین حرارتی یکی از مهمترین روش‌های تحلیل حرارتی برای بررسی پایداری حرارتی مواد و پلیمرهای مختلف است که بیانگر افت وزنی ماده تحت حرارت می‌باشد. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌گردد، افزودن PBR منجر به افزایش پایداری حرارتی قیر خالص شده است. به عبارتی، افت وزنی قیرهای پلیمری، در دمای بالاتری نسبت به قیر خالص رخ داده است. این افزایش پایداری حرارتی، بدون تردید می‌تواند به علت پایداری حرارتی ذاتی PBR و یا به علت برهمکنش‌های این پلیمر با اجزای قیر باشد. در بین قیرهای اصلاح شده نیز تفاوت پایداری حرارتی

در چند سطح تنش نشان می‌دهد که با افزودن PBR و ساسوبیت به قیر پایه، درصد بازگشت افزایش و نرمی غیرقابل بازگشت کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده کاهش تغییرشکل ماندگار و افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی خواهد بود. بر اساس نتایج MSCR، قیر پایه به تغییر درصد بازگشت بسیار حساس است و با افزایش تنش به سرعت خاصیت الاستیسیته خود را از دست می‌دهد. اما افزودن PBR و ساسوبیت این حساسیت را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. نتایج جاروب دامنه خطی نشان می‌دهد که ترکیب قیر پایه با ۲/۳ درصد پلیمر PBR بهترین ترکیب از نظر مقاومت در برابر خستگی است و افزودن ساسوبیت و همچنین افزایش بیشتر مقدار پلیمر موجب کاهش مقاومت در برابر خستگی خواهد گردید. نتایج TGA نشان داد که نمونه ۲/۳ درصد وزنی PBR ضایعاتی و نمونه ۲/۳ درصد وزنی PBR ضایعاتی در ترکیب با ۲/۵ درصد ساسوبیت از پایداری حرارتی بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها برخوردار است که تطابق کاملی با نتایج رفتار رئولوژی دمای زیاد دارد.

آزمون‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی، کشش‌پذیری، وزن مخصوص، نقطه اشتعال، بازگشت الاستیک، ویسکومتر دورانی، رئومتر برش دینامیک، بازگشت خزشی در چند سطح تنش، جاروب دامنه خطی و تحلیل توزین حرارتی پرداخته است. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن PBR ضایعاتی و در ترکیب با ساسوبیت به قیر پایه موجب کاهش درجه نفوذ و افزایش نقطه نرمی و PI می‌گردد که در نتیجه حساسیت دمایی قیر اصلاح شده کم شده است. با افزودن PBR ضایعاتی و در ترکیب با ساسوبیت به قیر پایه کشش‌پذیری کاهش می‌یابد. به طوری که از مقدار PBR بیشتر از ۲/۳ درصد وزنی قیر، کشش‌پذیری کمتر از ۱۰۰ سانتی‌متر خواهد گردید. نتایج بازگشت الاستیک نشان می‌دهد که افزودن PBR موجب افزایش خاصیت الاستیسیته می‌شود. اما افزودن ساسوبیت موجب کاهش خاصیت الاستیسیته خواهد شد. نتایج حاصل از آزمون DSR نشان داد که افزودن ۲/۳ درصد ضایعاتی و ۲/۳ درصد PBR ضایعاتی در ترکیب با ۲/۵ درصد ساسوبیت به قیر پایه به ترتیب نمره عملکردی دمای زیاد را یک و دو نمره افزایش می‌دهد. نتایج بازگشت خزشی

۵. مراجع

- سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور. ۱۳۹۰. "آئین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران". نشریه ۲۳۴، تهران. شفاعخش، غ. و. رمضان‌زاده اندواری، م. ۱۳۹۶. "بررسی رفتار رئولوژیک قیر و ماستیک اصلاح شده با افزودنی ساسوبیت". مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۳(۳): ۹۶-۷۹.
- Abedini, M., Hassani, A., Kaymanesh, M. R., Yousefi, A. A. and Abedini, H. 2020. "Multiple stress creep and recovery behavior of SBR-modified bitumen emulsions". J. Test. Eval., 48(4).
- Ameri, M., Reza Seif, M., Abbasi, M. and Khavandi Khiavi, A. 2017. "Viscoelastic fatigue resistance of asphalt binders modified with crumb rubber and styrene butadiene polymer". Petrol. Sci. Technol., 35(1): 30-36.
- Anderson, D. A., Christensen, D. W., Bahia, H. U., Dongre, R., Sharma, M. G., Antle, C. E. and Button, J. 1994. "Binder characterization and evaluation". Volume 3: Physical Characterization, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Report No. SHRP-A-369.
- Bulatović, V. O., Rek, V. and Marković, K. J. 2014. "Effect of polymer modifiers on the properties of bitumen". J. Elastomers Plastics, 46(5): 448-469.
- Fang, C., Liu, P., Yu, R. and Liu, X. 2014. "Preparation process to affect stability in waste polyethylene-modified bitumen". Constr. Build. Mater., 54: 320-325.
- Farahani, H. Z., Palassi, M. and Sadeghpour Galooyak, S. 2017. "Thermal analysis of bitumen modified with LDPE and CR". Petrol. Sci. Technol., 35(15): 1570-1575.

- Gardezi, H. and Hussain, A. 2018. "Effect of crumb rubber on properties of bitumen of grade 60/70". Available at SSRN 3108429.
- Golchin, B., Hamzah, M. O. and Hasan, M. R. M. 2017. "Optimization in producing warm mix asphalt with polymer modified binder and surfactant-wax additive". *Constr. Build. Mater.*, 141: 578-588.
- Iran Management and Planning Organization. 2011. "Standard on Iran roads' pavements design". Tehran, Iran.
- Jin, T. H., Warid, M. N. M., Idham, M. K., Hainin, M. R., Yaacob, H., Hassan, N. A., ... and Afiqah, R. N. 2019. "Modification of emulsified bitumen using styrene-butadiene rubber (SBR)". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 527, No. 1, IOP Publishing.
- Loderer, C., Partl, M. N. and Poulidakos, L. D. 2018. "Effect of crumb rubber production technology on performance of modified bitumen". *Constr. Build. Mater.*, 191: 1159-1171.
- Read, J. and Whiteoak, D. 2003. "The shell bitumen handbook". Thomas Telford, 136 p.
- Rezaei, S., Ziari, H. and Nowbakht, S. 2016a. "High-temperature functional analysis of bitumen modified with composite of nano-SiO₂ and styrene butadiene styrene polymer". *Petrol. Sci. Technol.*, 34(13): 1195-1203.
- Rezaei, S., Ziari, H. and Nowbakht, S. 2016b. "Low temperature functional analysis of bitumen modified with composite of nano-SiO₂ and styrene butadiene styrene polymer. *Petrol. Sci. Technol.*, 34(5): 415-421.
- Rezaei, S., Khordehbinan, M., Fakhrefatemi, S. M. R., Ghanbari, S. and Ghanbari, M. 2017. "The effect of nano-SiO₂ and the styrene butadiene styrene polymer on the high-temperature performance of hot mix asphalt". *Petrol. Sci. Technol.*, 35: 553-560.
- Sadeq, M., Masad, E., Al-Khalid, H., Sirin, O. and Little, D. 2016. "Rheological evaluation of short-and long-term performance for warm mix asphalt (WMA) binders". 8th RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials, Springer, Dordrecht, pp. 129-139.
- Soudani, K., Cerezo, V. and Haddadi, S. 2016. "Rheological characterization of bitumen modified with waste nitrile rubber (NBR)". *Constr. Build. Mater.*, 104: 126-133.
- Yang, X., You, Z., Hasan, M. R. M., Diab, A., Shao, H., Chen, S. and Ge, D. 2017. "Environmental and mechanical performance of crumb rubber modified warm mix asphalt using Evotherm". *J. Clean. Prod.*, 159: 346-358.
- Zhang, F. and Hu, C. 2013. "The research for SBS and SBR compound modified asphalts with polyphosphoric acid and sulfur". *Constr. Build. Mater.*, 43: 461-468.
- Ziari, H., Nowbakht, S., Rezaei, S. and Mahboob, A. 2015. "Laboratory investigation of fatigue characteristics of asphalt mixtures with steel slag aggregates". *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2015: 623245. <https://doi.org/10.1155/2015/623245>.