

بررسی رفتار رئولوژیک قیر و ماستیک اصلاح شده با افزودنی ساسویت

غلامعلی شفافبخش*، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

مهرداد رمضان زاده اندواری، دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشگاه سمنان

Email: shafabakhsh@semnan.ac.ir

دریافت: ۹۶/۰۴/۲۰ - پذیرش: ۹۶/۰۸/۲۴

چکیده

قیر و ماستیک (مخلوط قیر و فیلر) یکی از اجزای سازنده مخلوط‌های آسفالتی هستند که تأثیر به‌سزایی بر رفتار و عملکرد آن‌ها دارند. در سال‌های اخیر، مطالعات زیادی در زمینه ارزیابی خواص رئولوژیک قیر صورت پذیرفته است. در مطالعه حاضر، خواص رئولوژیک قیر و ماستیک اصلاح شده با افزودنی آسفالت نیمه گرم (ساسویت) مورد ارزیابی قرار گرفته است. قیر پایه با درجه عملکردی PG64-16 بود که با ۱/۵ درصد وزنی قیر افزودنی ساسویت اصلاح گردید. برای تهیه ماستیک نیز فیلر سیلیسی رودخانه‌ای به نسبت برابر با قیر به آن افزوده شد. آزمایش‌های روسازی ممتاز برای قیر از جمله رئومتر برشی دینامیک و رئومتر تیرچه خمشی روی قیر و ماستیک‌های اصلاحی و پایه صورت گرفتند. پارامترهای شیارشدگی و خستگی مصالح تعیین و مقایسه شدند و جهت نمایش جامع رفتار رئولوژیک قیر و ماستیک، منحنی اصلی مصالح ایجاد گردید. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که افزودنی ساسویت، مدول مختلط قیر و ماستیک را در دمای زیاد به ترتیب تا ۶۰ و ۱۰۰ درصد افزایش داده و زاویه فاز را به صورت محدود (۵٪) کاهش داده است. ساسویت، پارامتر شیارشدگی در قیر و ماستیک را تا دو برابر افزایش داده است. پارامتر خستگی در قیر خالص، با افزودن ساسویت تغییر چندانی نداشته است. در حالی که ساسویت، پارامتر خستگی در ماستیک را ۲۰ تا ۳۰ درصد افزایش داده و مقاومت خستگی آن را کاهش داده است. مدل منحنی اصلی نیز به خوبی بر داده‌های آزمایشگاهی قیر و ماستیک اصلاحی با ساسویت برازش داده شد که امکان بررسی جامع رفتار مصالح در بازه وسیع دمایی و فرکانسی را می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: ساسویت، ماستیک، خواص رئولوژیک، منحنی اصلی، شیارشدگی و خستگی

۱. مقدمه

خصوصیات مکانیکی آن تأثیرگذار است. علم رئولوژی، میزان تغییر شکل ماده بر اثر اعمال تنش و تأثیر زمان در این تغییر شکل را بیان می‌نماید. از آنجایی که قیر و

ویژگی‌های رئولوژیک و ویسکوالاستیک قیر و ماستیک به عنوان یکی از اجزای مخلوط آسفالتی بر

همچنین، افزودن ساسوبیت باعث بهتر شدن مقاومت شیارشدگی در دو قیر نسبت به آدورا شده، در حالی که هر دو افزودنی WMA باعث کاهش مقاومت ترک خوردگی ناشی از خستگی شدند.

کاینستراسی و همکاران (۲۰۱۳) به تحقیق در مورد اثر واکس مصنوعی بر خواص رئولوژی قیر با درجه نفوذ ۷۰/۱۰۰ در شرایط پیرشدگی بلندمدت پرداختند. در این تحقیق، از ۳٪ وزنی قیر افزودنی ساسوبیت برای آزمایش‌های ویسکوزیته، رئومتر برش دینامیک (DSR) و رئومتر تیرچه خمشی (BBR) استفاده شد. نتایج نشان داد که با افزودن ساسوبیت، مقاومت در برابر شیارشدگی افزایش یافته و باعث کاهش مقاومت ترک خوردگی می‌شود و در دمای اختلاط و تراکم ویسکوزیته ۲۵ تا ۳۵ درصد و دمای تراکم ۶ تا ۸ درجه سلسیوس کاهش یافت. در دمای میانی، سختی با فرکانس رابطه مستقیم داشته و همچنین مدول برشی (G^*) با افزودن ساسوبیت و کاهش فرکانس به صفر میل می‌کند.

عبدالله و همکاران (۲۰۱۳) خواص رئولوژی قیر WMA اصلاح شده با افزودنی شیمیایی ($CWAA^4$) را مورد ارزیابی قرار دادند. افزودن CWAA باعث کاهش قابل توجه ویسکوزیته شده و به دنبال آن کاهش دمای اختلاط و تراکم را در پی داشته است. افزودن CWAA مقاومت ترک خوردگی ناشی از خستگی را افزایش داده و مقاومت در برابر شیارشدگی را کاهش داده است.

جمشیدی و همکاران (۲۰۱۵) به ارزیابی اثر افزودنی‌های مخلوط آسفالتی نیمه گرم بر خواص رئولوژیک قیرهای PG64 و PG70 حاوی ردیست^۵ و ساسوبیت پرداختند. مطالعات نشان داد که قیر حاوی ردیست رفتار چسبنده تری نسبت به قیر حاوی ساسوبیت داشته و همچنین به ازای افزایش ۱٪ ساسوبیت، افزایش پارامتر شیارشدگی را در پی داشته که افزودن ساسوبیت

ماستیک رفتار ویسکوالاستیک دارند، پارامترهای رئولوژیک آن‌ها با زمان و دما تغییر می‌کند، که این تغییرات منجر به تغییر خواص فیزیکی آن‌ها مانند شیارشدگی^۱ و خستگی می‌شود. همان‌طور که می‌دانیم، مخلوط آسفالتی گرم (HMA^2) به‌طور معمول در محدوده دمایی بین ۱۴۰ تا ۱۷۰ درجه سلسیوس تولید می‌شود. این دمای زیاد منجر به هزینه زیاد سوخت مصرفی و تولید گازهای گلخانه‌ای خواهد شد. افزودنی آسفالت نیمه گرم، مانند ساسوبیت، ضمن کاهش دمای اختلاط و تراکم بین ۱۰ تا ۳۸ درجه سلسیوس، باعث ایجاد تغییراتی در خواص رئولوژیک قیر و ماستیک می‌گردد (باتون و همکاران، ۲۰۰۷).

در این پژوهش، تأثیر ساسوبیت بر پارامترهای رئولوژیک قیر و ماستیک از قبیل مدول مختلط (G^*) و زاویه فاز (δ) به دست آمده از رئومتر برشی دینامیک (DSR) و خواص مرتبط با آن‌ها مانند پارامترهای خستگی ($G^* \cdot \sin\delta$) و شیارشدگی ($G^*/\sin\delta$) در دمای زیاد و متوسط ارزیابی شده است. همچنین، تأثیر ساسوبیت بر پارامتر سختی خزشی قیر و ماستیک آن در دمای کم به وسیله رئومتر تیرچه خمشی (BBR) بررسی شده و در پایان، ارزیابی جامعی به وسیله منحنی اصلی‌شان صورت گرفته است.

۲. مروری بر مطالعات پیشین

۱-۲. مطالعات عملکرد رئولوژیک قیر

صادق و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی ارزیابی عملکرد رئولوژیک قیر مخلوط آسفالتی نیمه گرم حاوی ساسوبیت و آدورا^۳ در بلندمدت و کوتاه‌مدت پرداختند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که افزودن ساسوبیت، سختی دو قیر مورد نظر و درجه عملکرد آنها را افزایش داده است.

4- Chemical Warm Asphalt Additive
5- Rediset

1- Rutting
2- Hot Mix Asphalt
3- Advera

ملات قیری^۱ آسفالت نیمه گرم حاوی ساسوبیت را مورد ارزیابی قرار دادند. در این پژوهش، از یک آسفالت نفتی معمولی که در ترافیک‌های سنگین استفاده می‌شود، استفاده گردید. قیر با استفاده از ساسوبیت اصلاح شد (افزودن ۳٪ وزنی قیر). سه نوع پُرکننده‌ی معدنی، پُرکننده‌های آهکی (LM)، سیمان پورتلند (PC)، و آهک هیدراته (HL) برای تهیه ملات قیری آسفالت گرم استفاده شدند که نسبت فیلر به ماده چسبنده (F/A) به ترتیب صفر (بدون پرکننده)، ۰/۳، ۰/۶، ۰/۹، ۱/۲، ۱/۵، ۱/۸ و ۲/۱ برابر وزن قیر در نظر گرفته شده است. مطالعات نشان داد که افزودن فیلر تأثیری بر زاویه فاز (δ) ندارد. افزایش نسبت F/A می‌تواند خواص دمایی زیاد را بهبود بخشد که در این بین فیلر آهک هیدراته^۲ بهترین عملکرد را در دمایی زیاد دارد. سختی خزشی (S) با افزایش نسبت F/A افزایش می‌یابد، و زمانی که نسبت F/A افزایش پیدا می‌کند خواص ملات قیری آسفالت در دمایی کم کاهش می‌یابد. الخطیب و همکاران (۲۰۱۱) تأثیر افزودن فیلر سیمان را بر برخی خواص ماده قیر آسفالتی مطابق با روش‌های آزمایش روسازی ممتاز مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج تحقیق نشان داد که افزودن سیمان پورتلند به قیر، ویسکوزیته چرخشی (RV) قیر را در دمایی ۱۳۵ درجه سلسیوس و سرعت‌های چرخشی مختلف افزایش داد. مشخص شد که نسبت C/A برابر ۰/۱۵ نسبت بهینه‌ای است که موجب یک افزایش متعادل در ویسکوزیته چرخشی و مقدار پارامتر شیارشدگی قیر می‌شود. نسبت C/A تأثیر ناچیزی بر رفتار نیوتنی و زاویه فاز (δ) الاستیک مخلوط‌های آسفالتی داشته است. افزایش نسبت C/A موجب افزایش سختی قیر، که با مقدار مدول برشی مختلط (G^*) نشان داده می‌شود، شد. افزایش نسبت C/A پارامتر شیارشدگی روسازی ممتاز، مقدار $G^*/\sin\delta$ را در همه دماها بهبود بخشید.

ویسکوزیته هر دو قیر PG64 و PG76 را در دمایی ۶۰ درجه سلسیوس افزایش داده، در حالی که افزودن ردیست ویسکوزیته و چسبندگی قیر PG76 را افزایش داد.

۲-۲. مطالعات عملکرد رئولوژیک ماستیک و

تأثیر فیلر

کاووسی و همکاران (۱۹۹۷) تأثیر نوع فیلر و شکل آن را بر خصوصیات فیزیکی و رئولوژیک ماستیک قیری مورد ارزیابی قرار دادند. در این تحقیق، کوارتز دارای ابعاد بزرگ و ذرات زاویه‌دار و سنگ آهک دارای ابعاد به نسبت کوچک‌تر، اما با همان حالت زاویه‌دار، انتخاب گردیدند. آن‌ها دریافتند که فیلر با ابعاد ریزتر و کروی شکل، تأثیر کمتری بر درجه نفوذ و نقطه نرمی نسبت به فیلر با ابعاد بزرگ‌تر و حالت زاویه‌دار دارد. کاتولین به نسبت ریز بوده و قیر را بیشتر در برمی‌گیرد. از این رو، ماستیک حاصل سخت‌تر است. خاکستر بادی به عنوان یک فیلر متخلخل، بیشتر مستعد تردی است و به همین علت بیشترین نقطه شکست را دارد. سوبولیف و همکاران (۲۰۱۴) به تأثیر خاکستر بادی بر خواص رئولوژیک قیر در دمایی میانی پرداختند. در این تحقیق، دو قیر PG70-22 و PG58-28 دو نوع فیلر خاکستر بادی با کلاس C (FAC) و F (FAF) با مقادیر صفر، ۱۵، ۳۰ و ۶۰ درصد وزنی قیر تحت آزمایش رئومتر برش دینامیک مطابق با استاندارد AASHTO T315 در دمایی ۵۹ و ۶۴ درجه سلسیوس و فرکانس ۱/۵۹ هرتز در شرایط کنترل مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که افزودن خاکستر بادی سبب بهبود مقاومت در برابر شیارشدگی شده و همچنین سبب افزایش درجه عملکرد یا PG قیر شده است.

یان و همکاران (۲۰۱۳) تأثیر فیلر معدنی بر خواص

۲- Hydrated Lime

1- Bituminous Mortar

۳. مصالح و روش‌ها

۳-۱. مصالح

پاسارگاد تهیه شده و دارای درجه عملکردی PG 64-16 است. مشخصات این قیر طبق استاندارد AASHTO M320 (۲۰۱۵) در جدول ۱ آمده است.

قیر مورد استفاده در این تحقیق از شرکت نفت

جدول ۱. مشخصات قیر پایه

نتیجه آزمایش	معیار استاندارد	استاندارد آزمایش	مشخصه	وضعیت قیر
۳۱۳	>۲۳۰	AASHTO T48	نقطه اشتعال (°C)	قیر پیر نشده
۰/۴۱۲	<۳	AASHTO T316	ویسکوزیته در ۱۳۵ °C (Pa.s)	
۲/۴۰	>۱	AASHTO T315	G*/sinδ با برش دینامیک در دمای ۱۰ rad/s و ۶۴ °C (kPa)	
۰/۰۶	<۱	AASHTO T240	تغییر جرم پس از RTFO (%)	قیر پیر شده در RTFO
۲/۶۵	>۲/۲	AASHTO T315	G*/sinδ با برش دینامیک در دمای ۱۰ rad/s و ۶۴ °C (kPa)	
۳۳۸۵	<۵۰۰۰	AASHTO T315	G*.sinδ با برش دینامیک در دمای ۱۰ rad/s و ۲۱ °C (kPa)	قیر پیر شده در PAV
۱۱۱	<۳۰۰	AASHTO T313	سختی خزشی در دمای -۶ °C و در زمان ۶۰ ثانیه (MPa)	
۰/۳	>۰/۳	AASHTO T313	مقدار m در دمای -۶ °C و در زمان ۶۰ ثانیه	

وزنی قیر (بر اساس مطالعات پیشین و پیشنهاد شرکت سازنده) و در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس به کمک یک همزن برشی دور زیاد با قیر مخلوط شد تا قیر اصلاح شده همگنی به دست آید. قیر حاصل، پایداری ذخیره سازی گرما را بدون تمایل به جدایش فاز دارد. شکل ۱، نمونه‌ای از افزودنی ساسوبیت و نمونه‌های آماده شده را نشان می‌دهد.

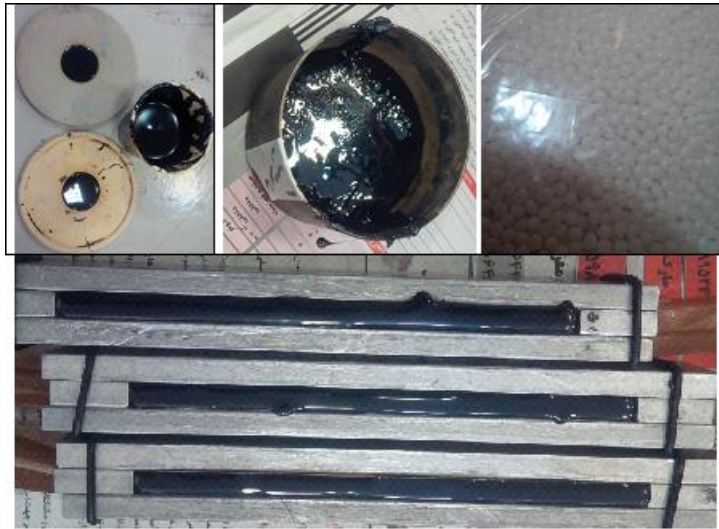
فیلر استفاده شده برای تهیه ماستیک از گرد سنگ مانده زیر الک شماره ۲۰۰ (۰/۰۷۵ میلی‌متر) مصالح سنگی رودخانه‌ای سیلیسی تشکیل شده است. از آنجایی که در مشخصات طرح اختلاط روسازی ممتاز، نسبت

ساسوبیت یک هیدروکربن آلیفاتیک زنجیره بلند است که با استفاده از فرایند موسوم به فیشر- تروپس^۱ (FT) تولید می‌شود. طول زنجیره ملکولی آن در بازه ۴۰ تا بیش از ۱۱۵ اتم کربن است. نقطه ذوب ساسوبیت در بازه ۷۰ تا ۱۱۵ درجه می‌باشد. ساسوبیت در دماهای بیش از ۱۱۵ درجه سلسیوس کاملاً قابل حل در قیر است. این ماده پس از مخلوط شدن با قیر پایه، محلول همگنی تشکیل می‌دهد و کاهش قابل ملاحظه‌ای در ویسکوزیته قیر ایجاد می‌کند. این موضوع باعث می‌شود دمای اختلاط و حمل آسفالت از ۱۰ تا ۳۰ درجه سلسیوس کاهش یابد. در این تحقیق، ساسوبیت به میزان ۱/۵ درصد

۱- Fisher-Tropsch

سلسیوس در همزن معمولی تهیه شده است. عملیات اختلاط تا ایجاد یک مخلوط همگن و یکنواخت ادامه یافت.

فیلر به قیر مؤثر ۱/۶-۰/۸ تعیین شده است، در این تحقیق از نسبت فیلر به قیر ۱ در میان بازه مشخصه استفاده شده است. ماستیک از اختلاط فیلر با قیرهای پایه و اصلاح- شده با ساسوبیت به ترتیب در دماهای ۱۴۰ و ۱۲۰ درجه



شکل ۱. افزودنی ساسوبیت (بالا، راست)، قیر پیرشده ساسوبیتی (بالا، وسط)، نمونه‌گیری قیر ساسوبیتی برای آزمایش رئومتر برشی دینامیک (بالا، چپ) و نمونه قیر ساسوبیتی برای آزمایش رئومتر تیرچه خمشی (پایین)

۳-۲. برنامه آزمایشگاهی

(۲۰۱۵) به کار می‌رود. در این پژوهش، نمونه‌ها در چهار دمای مختلف (۲۱/۱، ۳۷/۸، ۵۴ و ۶۴ درجه سلسیوس) و برای هر دما در چهار فرکانس (۰/۱، ۱/۵۹، ۵ و ۱۰ هرتز) در شرایط کنترل تنش تحت آزمایش رئومتر برشی دینامیک قرار گرفته‌اند. در این پژوهش، برای نمونه‌های پیر شده با RTFO از صفحات موازی با قطر ۲۵ میلی‌متر و ضخامت نمونه ۱ میلی‌متر و برای نمونه‌های پیر شده با PAV از صفحات موازی با قطر ۸ میلی‌متر و ضخامت نمونه ۲ میلی‌متر استفاده گردید. میزان تنش ماکزیمم وارده بر نمونه‌های پیر شده با RTFO ۲۵۰ پاسکال، برای نمونه‌های پیر شده با PAV و در دمای ۳۷/۸ درجه سلسیوس ۱۰۰۰ پاسکال و برای نمونه‌های پیر شده با PAV و در دمای ۲۱/۱ سلسیوس ۲۰۰۰ پاسکال بوده است. تنش‌های اعمالی به نحوی انتخاب شدند که مصالح در محدوده رفتار ویسکوالاستیک خطی قرار گیرند.

در این تحقیق، نمونه‌های قیری با و بدون ساسوبیت تحت پیرشدگی کوتاه‌مدت به وسیله آزمایش اثر حرارت و هوا بر لایه نازک متحرک قیر (RTFO) در دمای ۱۶۳ درجه سلسیوس با دوره زمانی پیرشدگی ۸۵ دقیقه مطابق با استاندارد AASHTO T240 (۲۰۱۵) انجام گرفت. پیرشدگی بلندمدت به وسیله محفظه پیرشدگی تحت فشار (PAV) روی نمونه‌های پیر شده با RTFO مطابق با استاندارد AASHTO R28 (۲۰۱۵) صورت گرفته است. نمونه در دستگاه تحت فشار ۲۰۶۰ کیلوپاسکال و با دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۰ ساعت قرار گرفته و برای انجام آزمایش‌های رئولوژی آماده می‌گردد. آزمایش رئومتر برش دینامیک جهت اندازه‌گیری خواص ویسکوالاستیک دینامیک قیر آسفالتی (G^* , δ) در دمای میانی و زیاد مطابق با استاندارد AASHTO T315

۳-۳. منحنی اصلی مدول برشی دینامیک و زاویه

فاز

یکی از روش‌های بررسی خواص ویسکوالاستیک قیر و آسفالت استفاده از منحنی اصلی است. در طرح روسازی آسفالتی به روش مکانیستیک تجربی، استفاده از منحنی اصلی مبنای تحلیل روسازی و بررسی عملکرد آن است. وابستگی دمایی و زمانی دو عامل مهمی هستند که هنگام توصیف خواص رئولوژی قیر آسفالتی در محدوده ویسکوالاستیک خطی در نظر گرفته می‌شود.

خواص رئولوژی قیر و ماستیک آن با و بدون ساسوبیت در دمای کم به وسیله رئومتر تیرچه خمشی (BBR) مطابق با استاندارد AASHTO T313 (۲۰۱۵) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این پژوهش، آزمایش خزش تحت بار ۹۸۰ میلی‌نیوتن بر نمونه‌های قیر و ماستیک پیر شده با PAV در دو دمای صفر و ۶- درجه سلسیوس انجام گرفته است. سپس سختی خزشی (S(t)) در زمان‌های ۸، ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۲۴۰ ثانیه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برنامه آزمایش‌های صورت گرفته روی قیر و ماستیک پایه و اصلاح‌شده با ساسوبیت در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲. مشخصات آزمایش‌های صورت گرفته روی قیر و ماستیک

وضعیت مصالح	آزمایش صورت گرفته	استاندارد آزمایش	دمای آزمایش (درجه سلسیوس)	فرکانس بارگذاری (هرتز) یا زمان بارگذاری (ثانیه)
قیر و ماستیک پیر شده با AASHTO) RTFO (T240	رئومتر برشی دینامیک (قطر نمونه ۲۵ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر)	AASHTO T315	۵۴ و ۶۴	۰/۱، ۱/۵۹، ۵ و ۱۰
قیر و ماستیک پیر شده با AASHTO) PAV (R28	رئومتر برشی دینامیک (قطر نمونه ۸ میلی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر)	AASHTO T315	۲۱/۱ و ۳۷/۸	۰/۱، ۱/۵۹، ۵ و ۱۰
	رئومتر تیرچه خمشی	AASHTO T313	صفر و ۶-	۸، ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۲۴۰ (ثانیه)

که T دمای مورد نظر آزمایش برای انتقال، T_r دمای مرجع، T_d دمای تعریف شده که در بالا و پایین آن می‌توان توابع WLF و Arrhenius را به ترتیب به کار برد، a_T ضریب انتقالی است که در فرکانس‌های مربوط به هر پارامتر ویسکوالاستیک (δ و G^*) ضرب می‌شود که معرف فرکانس کاهش می‌باشد و C_1 و C_2 ثابت‌های رگرسیون هستند.

مدل منحنی اصلی که در این پژوهش جهت انطباق با داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفت مدل سیگموئید (هلالی) لُجستیک (S شکل) تعمیم یافته

در منحنی اصلی، پارامترهای G^* و δ در مقابل فرکانس کاهش در مقیاس لگاریتمی یا نیمه لگاریتمی با استفاده از اصل برهم‌نهی دما- زمان در یک دمای مرجع رسم می‌شوند (اصغر زاده و همکاران، ۲۰۱۵). در این پژوهش، داده‌های آزمایشگاهی حاصل از DSR به وسیله تابع انتقال Kaelble که توسط رو و شارژک (۲۰۱۱) ارائه گردیده، در دمای مرجع ۲۱/۱ درجه سلسیوس انتقال داده می‌شود که تابع Kaelble به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\log a_T = -C_1 \left(\frac{T - T_d}{C_2 + |T - T_d|} - \frac{T_r - T_d}{C_2 + |T_r - T_d|} \right) \quad (1)$$

مدل تعیین می‌شوند. با در نظر گرفتن مقادیر ضریب خزشی معکوس مقادیر سختی، ضرایب خزشی برای هر حالت تعیین می‌شود ($D(\xi) = 1/S(\xi)$). پس از این، برای تبدیل مقادیر ضریب خزشی به مدول استراحت، از الگوریتم ارائه شده توسط هاپکینز و همینگ (۱۹۵۷) استفاده شده است که شامل یک راه‌حل عددی به وسیله انتگرال کانولوشن زیر است:

$$\int E(\xi) D(t - \xi) d\xi = t \quad (5)$$

که در آن t زمان آزمایش، D ضریب خزشی و E مدول استراحت است.

در گام بعد، یک طیف گسسته برای تابع منطبق شده مدول استراحت محاسبه می‌شود. این مرحله با روش ارائه شده به وسیله بامگارتل و وینتر (۱۹۸۹) انجام می‌گیرد. در این روش، مدول استراحت ($E(t)$) به سادگی به صورت یک مجموعه گسسته از اجزای توانی بیان می‌شود:

$$E(t) = E_e + \sum_{i=1}^N e_i \times \exp(-t / \lambda_i) \quad (6)$$

حالت‌های استراحت به کمک مقاومت‌های استراحت (e_i) و زمان‌های استراحت مرتبط (λ_i) تعریف می‌شوند. مقدار مدول تعادل (E_e) برای جامدات محدود و بزرگتر از صفر و برای مایعات برابر صفر فرض می‌شود. در این مطالعه، پس از سعی و خطا مشخص شد که انتخاب ۷ حالت استراحت با زمان‌های استراحت ۰/۱، ۰/۰۳، ۰/۰۱، ۱، ۱۰، ۳۰ و ۱۰۰ مناسب است.

پس از تعیین طیف گسسته مدول استراحت و جایگزینی آن در معادله ساختاری اساسی مبتنی بر اصل

(GLSM^۱) می‌باشد که در راهنمای طراحی روسازی مکانیستیک تجربی آشتو نیز به کار رفته است (رو، ۲۰۰۹):

$$\log |G^*| = \delta + \frac{\alpha}{[1 + \lambda e^{(\beta + \gamma(\log \omega))}]^{1/\lambda}} \quad (2)$$

$$\delta(\omega) = -90\alpha\gamma \frac{e^{[\beta + \gamma(\log \omega)]}}{[1 + \lambda e^{[\beta + \gamma(\log \omega)]}]^{(1+1/\lambda)}} \quad (3)$$

در این روابط، به ترتیب، مدول دینامیک و زاویه فاز برحسب فرکانس کاهشی (ω) بیان می‌شود و سایر پارامترها ضرایب انطباقی هستند که به وسیله حداقل کردن مجذور مربعات اختلاف داده‌های آزمایشگاهی و مدل پیش‌بینی به دست می‌آیند.

در این مطالعه، منحنی اصلی با استفاده از ترکیب داده‌های دو آزمایش رئومتر برشی دینامیک و رئومتر تیرچه خمشی ایجاد شده است. برای این کار نیاز است تا ابتدا مقادیر سختی به دست آمده از آزمایش رئومتر تیرچه خمشی به مدول ذخیره و مدول تلف شده تبدیل شده و با استفاده از آن مقادیر مدول دینامیک و زاویه فاز تعیین گردند. روش استفاده شده در این تحقیق منطبق بر روند ارائه شده توسط رو و همکاران (۲۰۰۱) است.

در این روش، ابتدا داده‌های به دست آمده از آزمایش رئومتر تیرچه خمشی به مدل CAS^۲ منطبق می‌شوند. این کار با استفاده از افزونه Solver نرم‌افزار اکسل انجام می‌شود. معادله ضریب انتقال به کار رفته در این فرایند، معادله Kaelble می‌باشد. رابطه زیر، مدل CAS را نشان می‌دهد:

$$S(\xi) = S_{glassy} \left[1 + (\xi / \lambda)^\beta \right]^{-1/\beta} \quad (4)$$

در این رابطه، S سختی خمشی برحسب پاسکال و در زمان کاهش یافته ξ است و S_{glassy} مدول شیشه‌ای برحسب پاسکال است که به همراه λ و β حین برآزش

(۱۱)

که در آن‌ها $|G^*|$ مدول دینامیک برشی، $|E^*|$ مدول دینامیک فشاری-کششی و ν نسبت پواسون است. اینک، با داشتن مقادیر مدول دینامیک برشی و زاویه فاز می‌توان منحنی مرجع شامل داده‌های آزمایش رئومتر تیرچه خمشی را نیز تشکیل داد.

۴. نتایج و بحث

۴-۱. بررسی خواص ویسکوالاستیک قیر و ماستیک

همان‌طور که در شکل ۲ ملاحظه می‌گردد، ساسوبیت تأثیر قابل توجهی بر افزایش مدول برشی دینامیک قیر خالص، به‌خصوص در دمای کمتر، می‌گذارد. به‌طوری‌که مدول قیر حاوی ساسوبیت در دمای ۵۴ درجه سلسیوس حتی تا دو برابر شده و در دمای ۶۴ درجه سلسیوس افزایش مدول به ۶۰ درصد می‌رسد. ساسوبیت، زاویه فاز قیر خالص را به صورت محدود (کمتر از ۰/۵٪) کاهش داده و کاهش در دمای ۵۴ درجه بیشتر بوده است. اثر فرکانس بارگذاری بر مقادیر مدول روی قیر خالص مشهودتر بود و برای هر دو قیر این تأثیر در دمای ۶۴ درجه بارزتر است. اثر فرکانس بر مقادیر زاویه فاز بین دو نوع قیر خالص و ساسوبیتی چندان متفاوت نیست.

برهم‌نهی بولتزمن، می‌توان روابط تعیین مدول ذخیره و مدول تلف‌شده را به دست آورد:

$$E'(\omega) = E_e + \sum_{i=1}^N e_i \times \frac{(\omega\lambda_i)^2}{1 + (\omega\lambda_i)^2} \quad (7)$$

$$E''(\omega) = \sum_{i=1}^N e_i \times \frac{\omega\lambda_i}{1 + (\omega\lambda_i)^2} \quad (8)$$

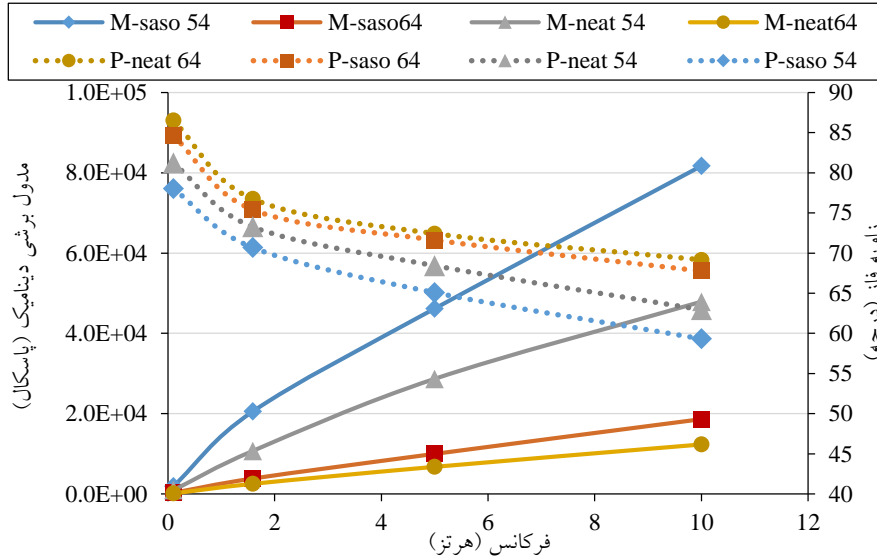
که در آن E' و E'' به ترتیب مدول ذخیره و مدول تلف‌شده برحسب پاسکال هستند و ω فرکانس بارگذاری برحسب هرتز و عکس زمان‌های بارگذاری برحسب ثانیه می‌باشند. با داشتن این دو مدول می‌توان مقدار مدول دینامیک $|E^*|$ برحسب پاسکال و زاویه فاز δ برحسب درجه را تعیین نمود.

$$|E^*| = \sqrt{(E')^2 + (E'')^2} \quad (9)$$

$$\delta = \text{Arc tan} \left(\frac{E''}{E'} \right) \quad (10)$$

جهت تبدیل مقادیر مدول به حالت برشی با فرض نسبت پواسون ۰/۵ از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$|G^*| = \frac{|E^*|}{2(1+\nu)} = \frac{|E^*|}{3}$$

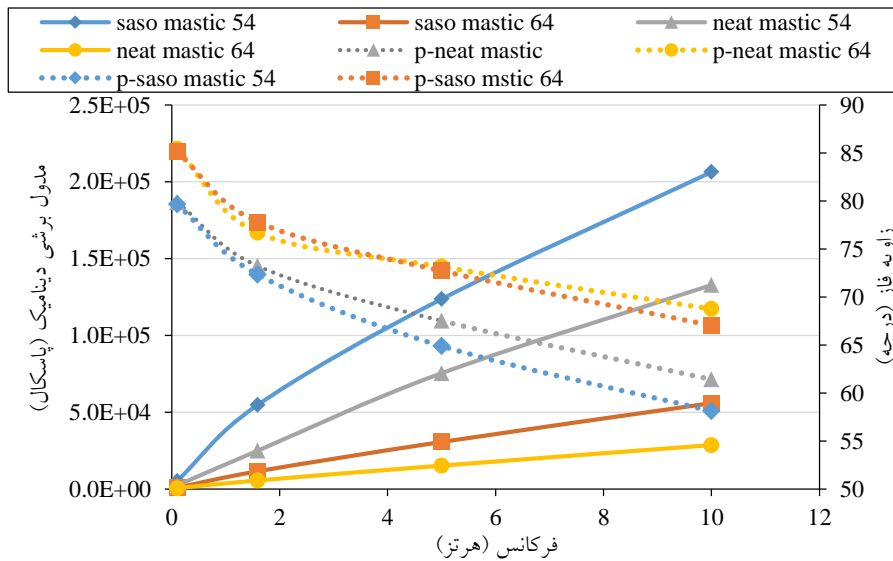


شکل ۲. تغییرات مدول برشی دینامیک (M) و زاویه فاز (P) برحسب فرکانس بارگذاری برای نمونه‌های قیر خالص و قیر

حاوی ساسوبیت در دمای زیاد

درجه سلیسیوس تا ۱۰۰٪ افزایش یافته است. در نمونه‌های ماستیک، همانند نمونه‌های قیر، افزودن ساسوبیت موجب کاهش زاویه فاز شده است که میزان آن در دمای ۵۴ درجه بیشتر است. در مورد اثر فرکانس بارگذاری نیز روندی مشابه قیر مشاهده شد.

مطابق شکل ۳، در نمونه‌های ماستیک همانند قیر، افزودن ساسوبیت، مدول برشی دینامیک آن را افزایش می‌دهد. با این تفاوت که میزان افزایش مدول در دمای زیاد بیشتر است و در دمای ۵۴ درجه و فرکانس‌های بالا برای نمونه‌های ساسوبیتی حدود ۶۰٪ و در دمای ۶۴



شکل ۳. تغییرات مدول برشی دینامیک و زاویه فاز (P) برحسب فرکانس بارگذاری برای نمونه‌های ماستیک خالص و

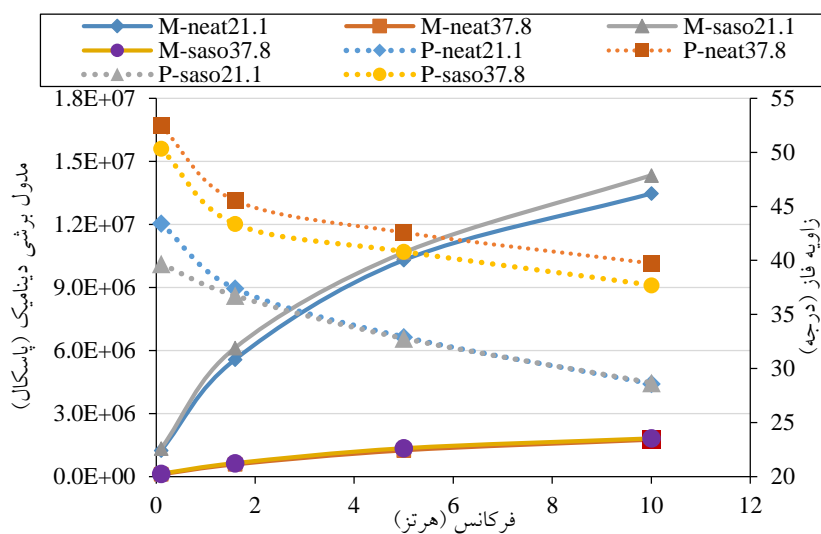
حاوی ساسوبیت در دمای زیاد

همانطور که در شکل ۴ ملاحظه می‌گردد، ساسوبیت به مانند دمای زیاد در دمای میانی (۳۷/۸ و ۲۱/۱) مدول

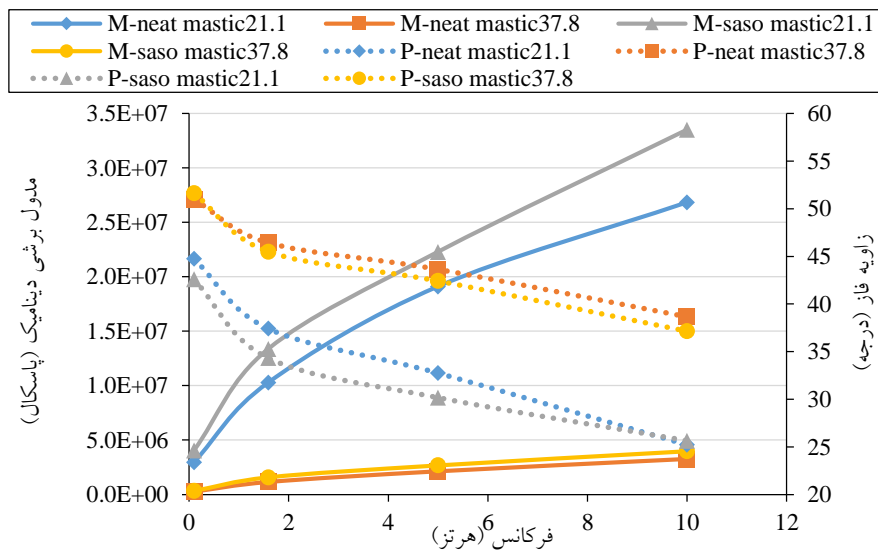
و در دمای ۲۱/۱ درجه شاهد رفتار مشابه قیر خالص و ساسوبیتی هستیم. اثر فرکانس بر مقدار زاویه فاز در دمای ۲۱/۱ درجه و برای قیر خالص مشهودتر است.

شکل ۵، نمودار خواص ویسکوالاستیک ماستیک متأثر از ساسوبیت را در دمای میانی (۲۱/۱ و ۳۷/۸) نشان می‌دهد. افزودن ساسوبیت در ماستیک در هر دو دما سبب افزایش حدود ۳۰ درصدی مدول برش دینامیک شده و زاویه فاز نیز با افزودن ساسوبیت به طور محدود کاهش یافته است. اثر فرکانس بارگذاری بر مقادیر مدول و زاویه فاز هر دو ماستیک تقریباً مشابه است.

برش دینامیک را افزایش داده، با این تفاوت که اثرگذاری آن کمتر شده است. به طوری که مدول با افزودن ساسوبیت در دمای ۲۱/۱ درجه سلسیوس تا ۱۰٪ و در دمای ۳۷/۸ درجه سلسیوس تا ۲۰٪ افزایش داشته است. ساسوبیت زاویه فاز را در دمای ۳۷/۸ درجه سلسیوس ۲ درجه کاهش داده، در حالی که در دمای ۲۱/۱ اثرگذاری ساسوبیت با افزایش بارگذاری از بین می‌رود. به طوری که ساسوبیت زاویه را در این دما در فرکانس کم (۰/۱ هرتز) ۵ درجه کاهش داده، ولی با افزایش بارگذاری کاملاً واضح است ساسوبیت تأثیری بر زاویه فاز ندارد. اثر فرکانس بارگذاری در این دماها کمتر از دماهای بالاست



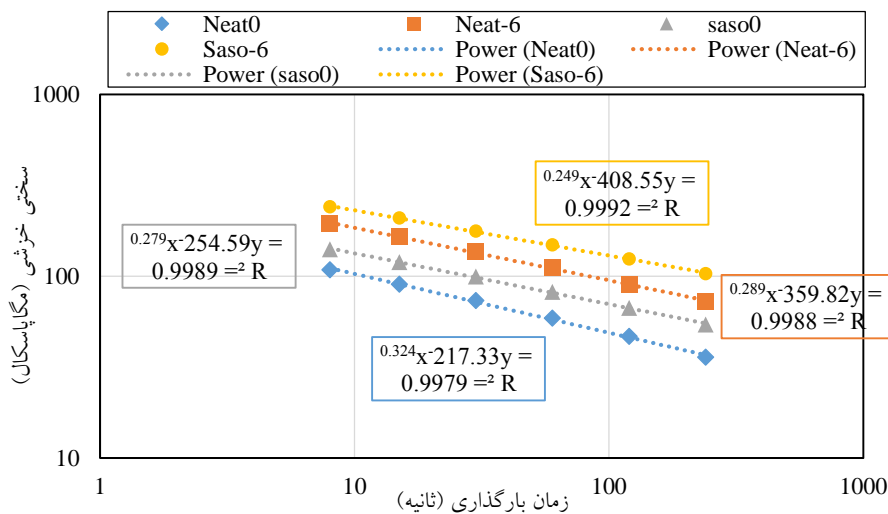
شکل ۴. تغییرات مدول برشی دینامیک (M) و زاویه فاز (P) برحسب فرکانس بارگذاری برای نمونه‌های قیر خالص و قیر حاوی ساسوبیت در دمای میانی



شکل ۵. تغییرات مدول برشی دینامیک (M) و زاویه فاز (P) برحسب فرکانس بارگذاری برای نمونه‌های ماستیک خالص و حاوی ساسویت در دمای میانی

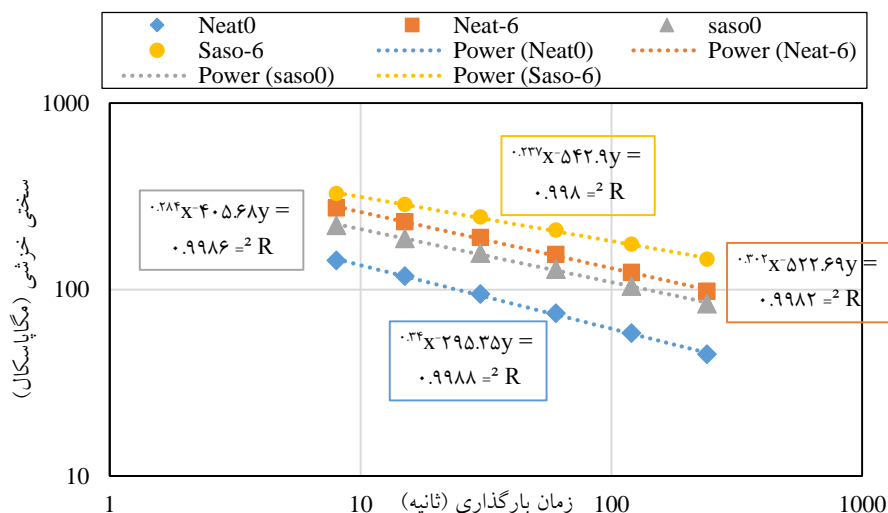
سختی خمشی را افزایش می‌دهد و بر سختی قیر می‌افزاید. به طوری که آهنگ کاهش آن با افزایش زمان بارگذاری نسبت به قیر خالص کاهش کمتری می‌یابد. به عنوان مثال، با افزودن ساسویت، سختی خزشی در زمان ۱۵ ثانیه ۳۲٪ افزایش می‌یابد و این افزایش در زمان ۲۴۰ ثانیه به ۵۴٪ می‌رسد.

ارزیابی رئولوژیک قیر و ماستیک در دمای کم به وسیله رئومتر تیرچه خمشی انجام می‌گردد. یکی از پارامترهای مهم در این زمینه، سختی خمشی $S(t)$ می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، سختی خمشی با کاهش دما افزایش و با افزایش زمان بارگذاری کاهش می‌یابد. همچنین، افزودن ساسویت به قیر خالص،



شکل ۶. مقایسه سختی خمشی برحسب زمان بارگذاری در قیر خالص و قیر حاوی ساسویت در دمای کم
شکل ۷، نمودار سختی خمشی ماستیک با و بدون ساسویت را نشان می‌دهد که بیانگر آن است که افزودن

ساسوبیت موجب افزایش سختی ماستیک می‌شود و به ماند قیر خالص شدت کاهش سختی خمشی ماستیک اصلاح شده با ساسوبیت با گذر زمان بارگذاری کمتر از ماستیک خالص است.



شکل ۷. مقایسه سختی خزشی ماستیک خالص و حاوی ساسوبیت برحسب زمان بارگذاری در دمای کم

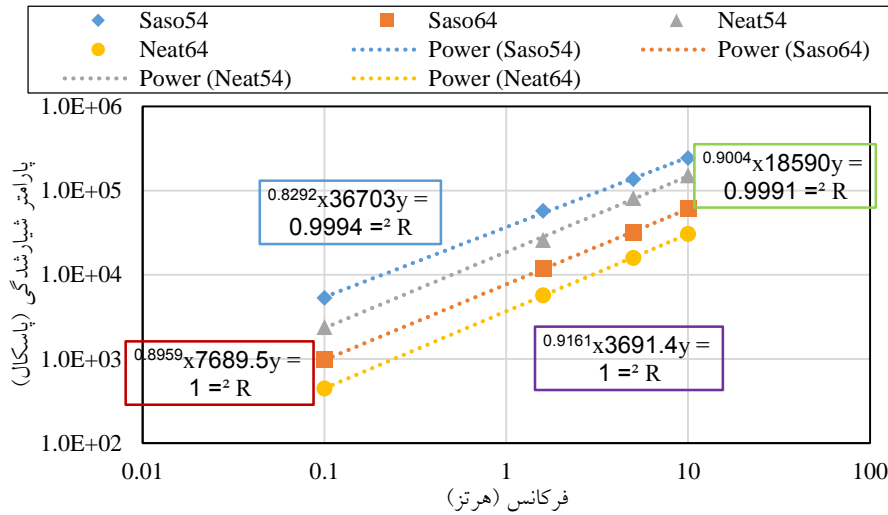
۴-۲. ارزیابی رفتار شیارشدگی و خستگی قیر و ماستیک

در شکل ۸، مشاهده می‌شود که افزودن ساسوبیت باعث افزایش پارامتر شیارشدگی ($G^*/\sin\delta$) می‌شود (۶۵ تا ۱۰۵ درصدی در دمای ۵۴ درجه و ۵۰ تا ۶۵ درصدی در دمای ۶۴ درجه) که به دنبال آن افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی را در پی دارد. علاوه بر این، یک رابطه عمومی بین پارامتر شیارشدگی، فرکانس و دما وجود دارد که با افزایش دما و کاهش فرکانس، پارامتر شیارشدگی کاهش می‌یابد و بالعکس. باید به این نکته توجه داشت که میزان اثرگذاری افزایشی ساسوبیت بر پارامتر شیارشدگی با افزایش فرکانس بارگذاری کمتر می‌شود و در دمای ۵۴ درجه کاهش ۴۰ درصدی و در دمای ۶۴ درجه کاهش کمتر از ۲۰ درصدی را نشان می‌دهد. علت افزایش پارامتر شیارشدگی را می‌توان بیشتر ناشی از سخت‌شدگی و افزایش مدول و تا حدی کاهش زاویه فاز به علت حضور ساسوبیت دانست.

به طور کلی، تغییرات حاصل از افزودن ساسوبیت در خصوصیات قیر و ماستیک در سه طیف دمایی را می‌توان با تغییرات غلظت یا ویسکوزیته قیر یا ماستیک حاوی ساسوبیت مرتبط دانست. از آنجایی که افزودنی ساسوبیت جزو واکنش‌هایی است که بیشترین اثر را بر ویسکوزیته قیر دارد، می‌توان رفتار قیر و ماستیک را در سه بازه دمایی تشریح کرد. ساسوبیت در دماهای زیاد اختلاط و تراکم (بیش از ۱۰۰ درجه سلسیوس) موجب کاهش ویسکوزیته و آسان شدن تراکم و اختلاط مخلوط و در دماهای کم (کمتر از ۷۰ درجه) باعث افزایش ویسکوزیته و به عبارتی غلیظ‌تر و سفت‌تر شدن قیر و ماستیک می‌شود. با این وجود، مقادیر مدول و سختی خزشی بیشتر در دماهای مورد بررسی برای قیر و ماستیک حاوی ساسوبیت نسبت به قیر و ماستیک پایه قابل توجهی است. این تغییرات در مدول یا سختی تأثیر خود را در پارامترهای شیارشدگی و خستگی نیز نشان می‌دهد.

می‌شود. مقادیر کمتر مربوط به فرکانس بارگذاری بیشتر هستند و بنابراین باید به این نکته توجه داشت که میزان اثرگذاری ساسوییت بر پارامتر شیارشدگی، با افزایش فرکانس بارگذاری کمتر می‌شود.

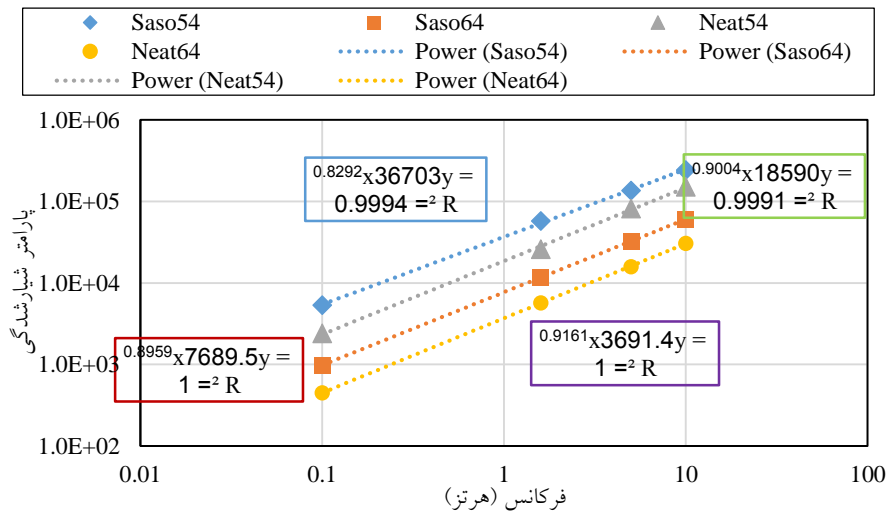
به مانند قیر خالص، ساسوییت تأثیر قابل توجهی بر پارامتر شیارشدگی ماستیک دارد. مطابق با شکل ۹، افزودن ساسوییت در دمای ۵۴ درجه سلسیوس سبب افزایش ۶۰ تا ۱۲۰ درصدی و در دمای ۶۴ درجه سبب افزایش ۱۰۰ تا ۱۲۰ درصدی در مقدار پارامتر شیارشدگی



شکل ۸. تغییرات پارامتر شیارشدگی قیر خالص و قیر حاوی ساسوییت برحسب فرکانس در دماهای ۵۴ و ۶۴ درجه سلسیوس

نتیجه‌ای بیانگر این است که اگر در روند طراحی به جای پارامتر شیارشدگی قیر از پارامتر ماستیک استفاده شود شاهد عملکرد شیارشدگی دو برابر بهتر خواهیم بود.

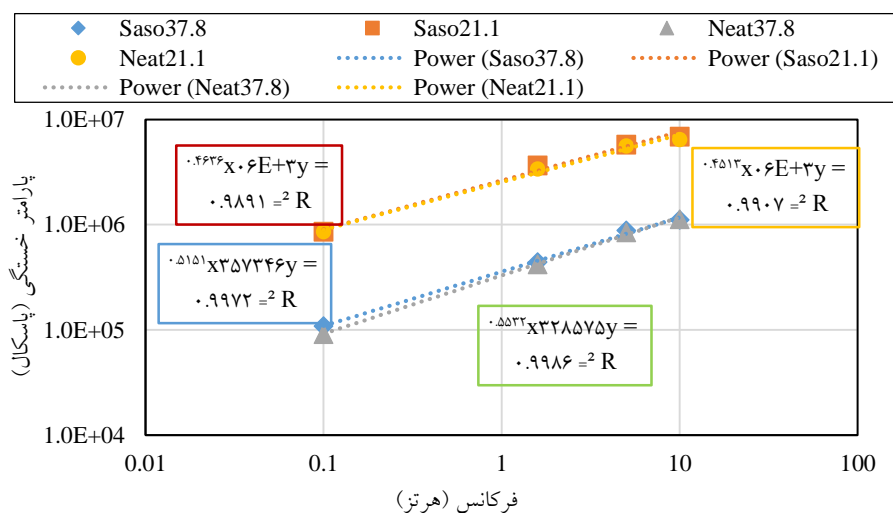
در مقایسه با قیر حاوی ساسوییت، ماستیک ساسوییتی افزایش مقاومت شیارشدگی تا دو برابر قیر در دمای بیش از ۶۴ درجه را نشان می‌دهد. این افزایش مقاومت ناشی از اثر تسلیح فیلر در ماستیک است. چنین



شکل ۹. تغییرات پارامتر شیارشدگی ماستیک خالص و حاوی ساسوییت برحسب فرکانس در دماهای ۵۴ و ۶۴ درجه سلسیوس

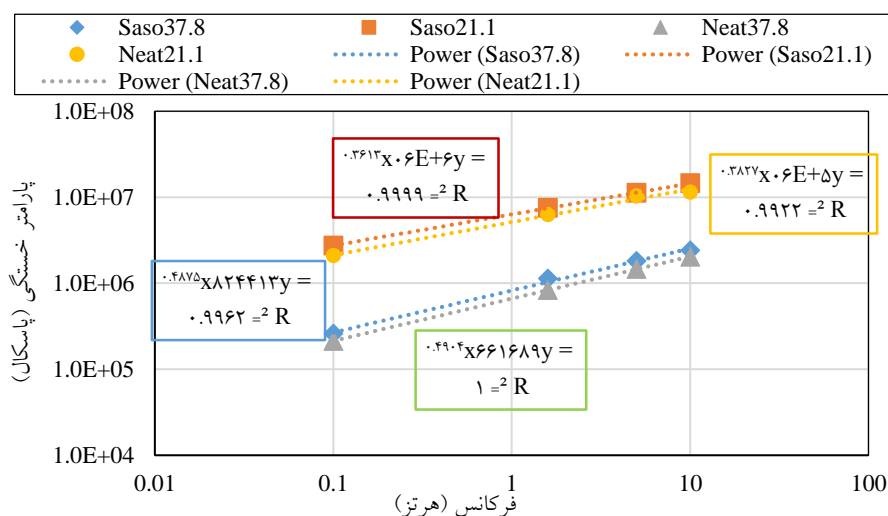
اندکی بر پارامتر خستگی در دمای کم (۲۱/۱) می‌گذارد. به طوری که می‌توان گفت مقاومت خستگی با و بدون ساسویت تقریباً یکسان در نظر گرفته می‌شود. در دمای بیشتر (۳۷/۸) اثر ساسویت بر مقدار پارامتر، به ویژه در فرکانس کم، مشهودتر است و آن را افزایش داده است.

از آنجایی که مقدار پارامتر خستگی قیر جهت عملکرد مناسب مخلوط به مقدار معینی محدود می‌شود و با افزایش فرکانس و کاهش دما این مقدار افزایش یافته، پس مقاومت خستگی رابطه عکس با فرکانس و رابطه مستقیم با دما (در محدوده دمایی ۲۰ تا ۴۰ درجه) دارد. شکل ۱۰ نشان می‌دهد که افزودن ساسویت تأثیر بسیار



شکل ۱۰. تغییرات پارامتر خستگی قیر خالص و قیر حاوی ساسویت برحسب فرکانس در دماهای ۲۱/۱ و ۳۷/۸ درجه

سلسیوس



شکل ۱۱. تغییرات پارامتر خستگی ماستیک خالص و حاوی ساسویت برحسب فرکانس در دماهای ۲۱/۱ و ۳۷/۸ درجه

سلسیوس

خالص و زاویه فاز نمونه‌ها به وسیله مدل GLSM با تابع انتقال Kaelble که در دمای مرجع ۲۱/۱ انتقال داده شده بیان می‌گردد که پارامترهای برازش مربوط به آن در جدول ۳ آورده شده است. در این جدول، SSE مقدار مجذور مربعات خطاها یا اختلافات بین مقدار آزمایشگاهی و مقدار پیش‌بینی شده از مدل، R^2 ضریب رگرسیون یا تعیین و S_e/S_y خطای استاندارد است. نتایج گزارش شده در جدول ۳ بیانگر برازش خوب مدل برای قیر و ماستیک پایه و حاوی ساسوبیت هستند. شکل‌های ۱۲ و ۱۳ به ترتیب نمایانگر منحنی اصلی مدول و زاویه فاز قیر و ماستیک اصلاح شده با ساسوبیت هستند. مزیت استفاده از این منحنی بررسی جامع و نگاه کلی به رفتار قیر و ماستیک در طیف وسیع دمایی و فرکانسی و نیز استفاده از آن در روند طراحی روسازی و بررسی عملکرد مخلوط است.

مطابق شکل ۱۱، افزودن فیلر سبب سخت شدن ماستیک نسبت به قیر خالص شده و در نتیجه این شرایط موجب کاهش مقاومت در برابر ترک خوردگی و در نتیجه افزایش پارامتر خستگی شده است. این در حالی است که افزودن ساسوبیت نیز در مقایسه با قیر افزایش بیشتری (۲۰ تا ۳۰ درصدی) در مقدار پارامتر داشته و بر کاهش مقاومت خستگی ماستیک می‌افزاید. به نظر می‌رسد که بررسی عملکرد خستگی نیاز به آزمایش متقن‌تری مانند آزمایش روبش دامنه تنش خطی (LAST) دارد و مقادیر پارامتر ارائه شده برآوردی تقریبی به دست می‌دهد.

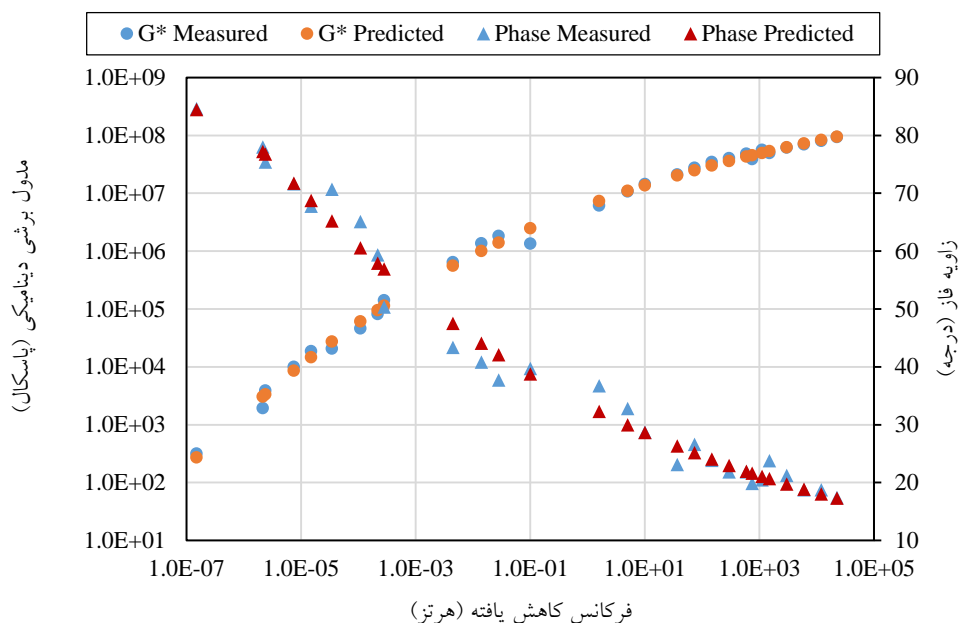
۴-۳. ارائه منحنی اصلی مدول برشی دینامیک

و زاویه فاز

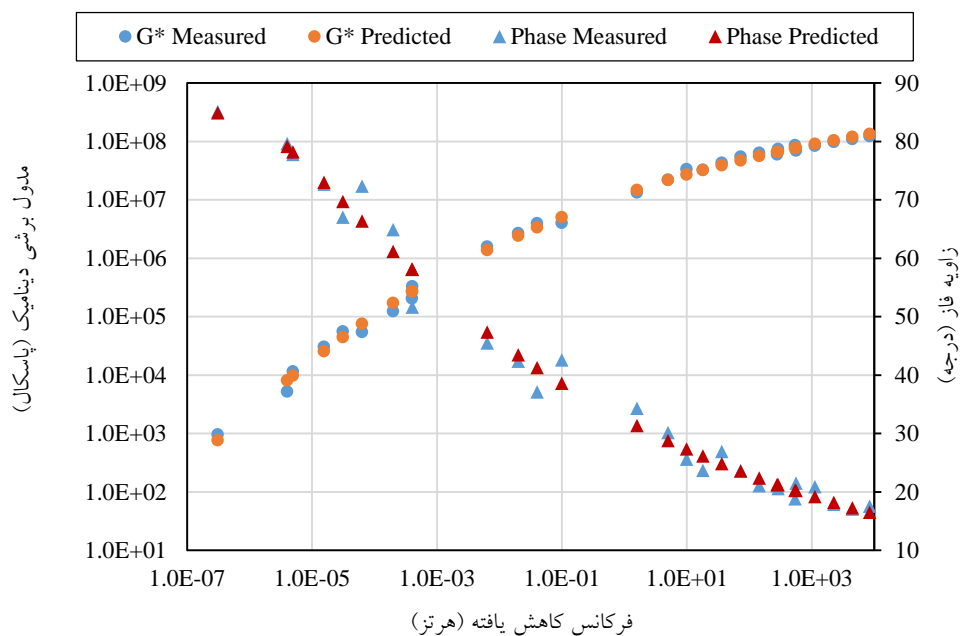
همانطور که گفته شد، منحنی اصلی مدول مختلط قیر

جدول ۳. پارامترهای آماری مدل منحنی اصلی

زاویه فاز			مدول برشی دینامیک			نمونه
R^2	Se/Sy	SSE(δ)	R^2	Se/Sy	SSE(log G*)	
۰/۹۷۸۱	۰/۱۴۸	۲۷۶	۰/۹۹۸۶	۰/۰۳۷	۰/۴۲۶	قیر خالص
۰/۹۷۰۱	۰/۱۷۳	۳۸۶	۰/۹۹۱۱	۰/۰۹۴	۰/۲۳۰	قیر حاوی ساسوبیت
۰/۹۷۹۳	۰/۱۴۴	۲۵۲	۰/۹۹۲۰	۰/۰۹۰	۰/۲۸۳	ماستیک
۰/۹۸۷۶	۰/۱۱۱	۱۷۱	۰/۹۸۲۶	۰/۱۳۲	۰/۱۸۲	ماستیک حاوی ساسوبیت



شکل ۱۲. نمودار منحنی اصلی مدول برشی دینامیک و زاویه فاز برحسب فرکانس کاهش یافته در قیر حاوی ساسوبیت و در دمای مرجع ۲۱/۱ درجه سلسیوس



شکل ۱۳. نمودار منحنی اصلی مدول برشی دینامیک و زاویه فاز برحسب فرکانس کاهش یافته در ماستیک حاوی ساسوبیت و در دمای مرجع ۲۱/۱ درجه سلسیوس

۵. نتیجه گیری

گرم (ساسوبیت) بر خواص ویسکوالاستیک (G^* و δ) قیر و ماستیک آن و همچنین ارزیابی رفتار شیارشدگی و خستگی به وسیله رئومتر برش دینامیک و ارزیابی رفتار

این تحقیق جهت بررسی تأثیر افزودنی آسفالت نیمه

- ساسوبیت تأثیر بسیار اندکی بر پارامتر خستگی $(G^* \sin \delta)$ قیر خالص گذاشته است. این در حالی است که ساسوبیت پارامتر خستگی را در نمونه‌های ماستیک افزایش داده و به عبارتی سبب کاهش مقاومت در برابر خستگی شده است. بنابراین، بررسی اثر ساسوبیت بر خستگی با نتایج حاصل از ماستیک بهتر نمایان می‌شود.

- ساسوبیت سختی خزشی قیر خالص و ماستیک را نیز در دمای کم افزایش داده که آهنگ کاهش آن با افزایش زمان بارگذاری نسبت به حالت پایه کمتر است. به عبارتی، قیر و ماستیک اصلاحی با ساسوبیت در دمای کم، حساسیت کمتری نسبت به زمان بارگذاری دارند.

- مدل GLSM به خوبی بر داده‌های آزمایشگاهی قیر و ماستیک اصلاحی با ساسوبیت برازش یافت که امکانی برای نمایش جامع رفتار مصالح در طیف وسیع دمایی و فرکانسی (شامل دماهای صفر و ۶- درجه سلسیوس) و نیز کاربرد در طرح روسازی مکانیستیک تجربی و ارزیابی عملکرد مخلوط آسفالتی فراهم می‌کند.

- نتایج ارائه شده مبتنی بر آزمایش‌های صورت گرفته در این مطالعه است و برای بررسی بیشتر نیاز به انجام مطالعات وسیع‌تر و در شرایط بارگذاری و دمایی دیگر وجود دارد.

آن‌ها در دمای کم به وسیله رئومتر تیرچه خمشی پرداخته شده است. جهت نمایش جامع خواص ویسکوالاستیک قیر ماستیک با و بدون ساسوبیت منحنی اصلی در دمای مرجع ۲۱/۱ درجه سلسیوس ترسیم گردید. بر اساس آزمایش‌ها، تحلیل نتایج و بررسی مدل منحنی اصلی به نتایج زیر می‌توان اشاره کرد:

- افزودن ساسوبیت موجب افزایش مقدار مدول، به-خصوص در دماهای زیاد، شد که از لحاظ رفتار شیارشدگی مناسب است و زاویه فاز با افزودن ساسوبیت کاهش یافت.

- اثر افزایش مدول ناشی از ساسوبیت روی ماستیک برای دمای زیاد مورد بررسی (۶۴ درجه سلسیوس) مشهودتر بود و افزودن فیلر تغییر محسوسی روی زاویه فاز نداشت.

- افزودن ساسوبیت سبب بهبود مقاومت شیارشدگی قیر و ماستیک شده که با افزایش فرکانس بارگذاری اثرگذاری آن کمتر می‌شود. فیلر نیز تأثیر قابل توجهی بر افزایش پارامتر شیارشدگی $(G^*/\sin \delta)$ داشته است. این بدان معناست که ساسوبیت و فیلر موجب سخت‌تر شدن قیر و کاهش رفتار ویسکوز نمونه شده و مقاومت آن را در برابر شیارشدگی و تغییرشکل‌های ماندگار افزایش داده‌اند.

۶. مراجع

- AASHTO M320. 2015. "Standard Specification for Performance-graded Asphalt Binder". American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- AASHTO R28. 2015. "Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)". American Association of State and Highway Transportation Officials, Washington, D.C.
- AASHTO T240. 2015. "Standard Method of Test for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt Binder (Rolling Thin-Film Oven Test)". American Association of State and Highway Transportation Officials, Washington, D.C.
- AASHTO T313. 2015. "Standard Method of Test for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR)". American Association of State and Highway Transportation Officials, Washington, D.C.
- AASHTO T315. 2015. "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, Washington, D.C.

- Abdullah, M.E., Zamhari, K.A., Shamshudin, M.K., Rosli, H.M. and Idham, M.K. 2013. "Rheological properties of asphalt binder modified with chemical warm asphalt additive". *Adv. Mater. Res.*, 671-674: 1692-1699.
- Al-Khateeb, G.G. and Al-Akhras, M.N. 2011. "Properties of portland cement-modified asphalt binder using superpave tests". *Constr. Build. Mater.*, 25(2): 926-932.
- Asgharzadeh, S.M., Tabatabaee, M., Naderi, K. and Partl, M.N. 2015. "Evaluation of rheological master curve models for bituminous binders". *Mater. Struc.*, 48: 393-406.
- Baumgaertel, M. and Winter, H. 1989. "Determination of discrete relaxation and retardation time spectra from dynamic mechanical data". *Rheol. Acta*, 28(6): 511-519.
- Button, J.W., Estakhri, C. and Wimsatt, A. 2007. "A Synthesis of Warm Mix Asphalt". No. FHWA/TX-07/0-5597-1, Texas Transportation Institute, Texas A & M University, College Station, TX.
- Canestrari, F., Graziani, A., Pannunzio, V. and Bahia, H.U. 2013. "Rheological properties of bituminous binders with synthetic wax". *Int. J. Pavement Res. Technol.*, 6(1): 15-21.
- Jamshidi, A., Golchin, B., Hamzah, M.O. and Turner, P. 2015. "Selection of type of warm mix asphalt additive based on the rheological properties of asphalt binders". *J. Cleaner Production*, 100: 89-106.
- Hopkins, I.L. and Hamming, R.W. 1957. "On creep and relaxation". *J. Appl. Phys.*, 28(8): 906-909.
- Kavussi, A. and Hicks, R.G. 1997. "Properties of bituminous mixtures containing different fillers". *J. Assoc. Asphalt Paving Technol.*, 66: 153-186.
- Rowe, G.M. and Sharrock, M. 2011. "Alternate shift factor relationship for describing temperature dependency of viscoelastic behavior of asphalt materials". *J. Transport. Res. Board*, 2207: 125-135.
- Rowe, G.M., Sharrock, M.J., Bouldin, M.G. and Dongre, R.N. 2001. "Advanced technique to develop asphalt master curves from the bending beam rheometer". *Petrol. Coal*, 43(1): 54-59.
- 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.
- Sobolev, K., Vivian, I.F., Saha, R., Wasiuddin, N.M. and Saltibus, N.E. 2014. "The effect of fly ash on the rheological properties of bituminous materials". *Fuel*, 116: 471-477.
- Yan, K.Z., Xu, H.B. and Zhang, H.I. 2013. "Effect of mineral filler on properties of warm asphalt mastic containing Sasobit". *Constr. Build. Mater.*, 48: 622-627.