

# ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر پودر لاستیک ضایعاتی و پودر ضایعاتی پلی اتیلن بازیافتی بر خواص عملکردی قیر و مخلوط آسفالتی با رویکرد زیست محیطی

## مقاله علمی - پژوهشی

آذین چیت سزان\*، گروه ارزیابی و آمایش سرزمین، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Chitsazan.az@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۲۸ - پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۵

صفحه ۳۲۷-۳۴۰

### چکیده

اثرات اصلاحی پلیمر بر عملکرد قیر در دمای پایین به طور قابل ملاحظه ای توسط تجزیه حرارتی پلیمر لاستیک استایرن- بوتادین<sup>۱</sup> (SBR) در طول عملیات تولید مخلوط قیر به خطر می افتد. اثربخشی استفاده از روغن خوراکی ضایعات / ساسوبیت<sup>۲</sup> (Sasobit/WCO) به عنوان یک افزودنی مخلوط گرم در کاهش عواقب نامطلوب پیری حرارتی بر روی قیر اصلاح شده با استایرن بوتادین رابر<sup>۳</sup> (SB) و در عین حال حفظ عملکرد اولیه قیر نشان داده شده است. با این حال، مطالعات کمی برای بررسی بیشتر خواص رئولوژیکی و مقاومت در برابر پیری قیر SB اصلاح شده با ترکیبات Sasobit/WCO انجام شده است. در این تحقیق، سه افزودنی - Sasobit، WCO، و کامپوزیت Sasobit/WCO - انتخاب شدند و اثرات آن‌ها بر ویژگی‌های فیزیکی و رئولوژیکی SB و همچنین دمایی که در آن مخلوط‌ها آماده شدند، ارزیابی شدند. علاوه بر این، با استفاده از رئومترهای برشی دینامیکی<sup>۴</sup> (DSR) و رئومترهای تیر خمشی<sup>۵</sup> (BBR)، اثرات این مخلوط نیمه گرم بر روی درجه عملکرد (PG) و مقاومت در برابر پیری SB مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به نتایج، کامپوزیت‌های Sasobit/WCO در کاهش دمای آماده سازی مخلوط بهتر از Sasobit و WCO عمل می کنند. Sasobit/WCO همچنین عملکرد SB را در دمای بالا و پایین به طور همزمان بهبود می بخشد. در مقایسه با مخلوط‌های آسفالت گرم، افزودن Sasobit/WCO دمای آماده سازی مخلوط‌های قیر را تا ۱۹ درجه سانتی گراد کاهش می دهد که به نوبه خود به حداقل رساندن اثرات منفی پیری دما بر عملکرد SB کمک می کند. علاوه بر این، افزودن کامپوزیت Sasobit/WCO می تواند مقاومت مخلوط SB را در برابر ترک حرارتی بهبود بخشد. پس از معرفی Sasobit/WCO، PG دمای بالا SB بدون توجه به اینکه تأثیر مخلوط گرم در نظر گرفته شده است یا خیر، دو درجه افزایش یافت. با افزودن Sasobit/WCO، انعطاف پذیری SB در برابر پیری کوتاه مدت افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی: کامپوزیت، رفتار رئولوژیکی، پلیمر، عملکرد، افزودنی نیمه گرم

### ۱-مقدمه

توسعه پایدار است. در مقایسه با سایر اصلاح کننده‌های پلیمری، لاستیک استایرن-بوتادین (SBR) در افزایش عملکرد BB در دمای پایین مؤثرتر است. به دلیل درهم تنیدگی بین زنجیره‌های پلیمری SBR، BB اصلاح شده می تواند یک شبکه اتصال متقابل قوی با درصد مناسب SBR ایجاد کند که می تواند به طور قابل توجهی چقرمگی و عملکرد کششی قیر را در دماهای پایین افزایش دهد (Ren et al, 2018; Zhu et al, 2017). با این حال، هنگامی که ترکیب قیر اصلاح شده با

قیر (BB) که ظرفیت چسبندگی بالایی دارد، در حال حاضر یک ماده اتصال دهنده پرکاربرد در ساخت روسازی است. با این حال، افزایش شکنندگی و کاهش انعطاف پذیری BB در اقلیم با دمای سرد باعث ترک خوردن روسازی قیر می شود. به دلیل تبخیر شدن اجزای سبک و تشکیل آسفالتین‌ها، خرابی ترک خوردگی با افزایش عمر به طور فزاینده‌ای آشکار می شود. بنابراین، اصلاح قیر برای افزایش عملکرد روسازی قیر در دمای پایین ضروری است، که نقش اساسی در ساخت روسازی

پایداری حرارتی SB را افزایش داده و خطر پیری را به قیمت کاهش قابل توجه عملکرد آن در دمای پایین کاهش دهد (Eltwati et al, 2023; Li et al, 2023). به دلیل سیالیت و پایداری حرارتی فوق العاده، روغن آشپزی زباله (WCO) می‌تواند با پلیمرها برای افزایش انعطاف‌پذیری مواد آلی واکنش نشان دهد. علاوه بر این، چندین مطالعه تحقیقاتی چگونگی تأثیر WCO بر قیر بازیافتی را بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که WCO می‌تواند پراکندگی یکنواخت قیر و نفوذ پذیری جوان کننده را افزایش دهد. دلیل این پدیده این است که با تکمیل اجزای سبک وزن، ساختار کلوییدی درون قیر را می‌توان متعادل کرد، که شکل پذیری در دمای پایین BBS را بهبود می‌بخشد، در حالی که افزودن WCO پایداری حرارتی BBS را به خطر می‌اندازد و این اثر نامطلوب با افزایش درصد WCO رشد می‌کند (Wang et al, 2023; Sukhija et al, 2023; Kushwaha et al, 2023). بر اساس تحقیقات فوق الذکر، محققان دریافتند که Sasobit به کاهش دمای اختلاط مخلوط SB کمک می‌کند. علاوه بر این، بهبود پایداری در دمای بالا و مقاومت در برابر پیری مخلوط‌ها در حالی که به طور قابل توجهی عملکرد آنها در دمای پایین را کاهش می‌دهد، می‌تواند مفید باشد. افزودن اصلاح کننده‌ها برای جبران کاستی‌های قیر اصلاح شده با Sasobit گزینه خوبی است (Liu et al, 2023). با این حال، WCO دارای مزیت افزایش شکل پذیری قیر و در عین حال کاهش عملکرد آن در دمای بالا است. بنابراین، با توجه به ویژگی‌های مربوط به Sasobit و WCO، اصلاح‌کننده کامپوزیت با تکمیل خواص هر دو تهیه می‌شود تا بتواند عملکرد SB را در دمای پایین حفظ کند و در عین حال مقاومت در برابر پیری و پایداری حرارتی SB را بهبود بخشد (Zhao et al, 2023). به منظور کاهش دمای آماده سازی کامپوزیت های SB، Sasobit به عنوان یک جزء معمولی اختلاط گرم انتخاب شد و WCO برای جبران آسیب ناشی از عملکرد ساسوبیت در دمای پایین گنجانده شد. هدف اصلی این تحقیق کاهش دمای اختلاط مخلوط قیر با استفاده از روش‌های اختلاط نیمه گرم برای کاهش اثرات منفی بر خواص SB است. سپس جهت تعیین اینکه Sasobit/WCO چگونه بر ویژگی‌های رئولوژیکی و مقاومت در برابر پیری SB در طول پیری کوتاه مدت و طولانی مدت تأثیر می‌گذارد. بر اساس این هدف،

SBR در یک محیط با دمای بالا تولید می‌شود، واکنش‌های اکسیداسیون و خرابی قابل توجه SBR اجتناب ناپذیر است، که به وضوح می‌تواند ارتقاء SBR را برای مقاومت در برابر ترک حرارتی BB اصلاح شده تضعیف کند. به عنوان مثال، شکل پذیری در دمای پایین SB پس از پیری کوتاه مدت ۱۳۰ سانتی متر کاهش یافت. در عین حال، توانایی افزودنی SBR برای متلاشی شدن در یک محیط غنی از اکسیژن و دمای بالا، مزایای SBR را در عملکرد قیر در دمای پایین به دلیل SBR به خطر می‌اندازد. برای حل این مسائل، مقاومت در برابر پیری و شیار شدگی SB باید بهبود یابد. این را می‌توان با افزودن مواد افزودنی که از نظر شیمیایی یا فیزیکی برای بهینه سازی خواص SB کار می‌کنند، به دست آورد (Zhang et al, 2023; Alqahtani et al, 2014).

مخلوط‌های آسفالتی با مخلوط گرم (WMA) که حاوی انواع افزودنی‌های مخلوط نیمه گرم هستند، در کاهش درجه پیری کوتاه مدت BB موثر هستند، زیرا دمای تولید آن‌ها ۱۰ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد کمتر از آسفالت معمولی است. بنابراین، روش WMA برای کاهش تجزیه SBR به دلیل اختلاط در دمای بالا در طول ایجاد مخلوط‌های SB ترجیح داده می‌شود. امروزه فناوری‌های مخلوط گرم را می‌توان تقریباً به سه گروه طبقه بندی کرد: آنهایی که از افزودنی‌های آلی با اثر کاهش ویسکوزیته استفاده می‌کنند، مانند Sasobit. افزودنی‌هایی که سطوح‌ها را تغییر می‌دهند، مانند Evotherm. و افزودنی‌هایی که از فناوری کف استفاده می‌کنند. Sasobit، یکی از پرکاربردترین افزودنی‌های آلی، دمای اختلاط مخلوط‌های قیر را کاهش می‌دهد، انعطاف‌پذیری حرارتی BBS را افزایش می‌دهد و مهم‌تر از همه، خطر پیری حرارتی را کاهش می‌دهد. به عنوان مثال، ترکیب ۴٪ Sasobit در مخلوط SB می‌تواند دمای اختلاط را از ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد به ۱۵۶ درجه سانتی‌گراد کاهش دهد. در حالی که نقطه نرمی SB را تا ۳۴٫۸ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌دهد. با این حال، در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد، شکل پذیری SB به سرعت از ۶۳٫۵ سانتی متر به ۲٫۵ سانتی متر کاهش یافت. این موضوع به این دلیل است که موم سخت مصنوعی که اکثریت ساسوبیت را تشکیل می‌دهد، دارای خواص تغییر شکل ضعیفی در دمای اتاق است که به طور قابل توجهی شکل پذیری BB را کاهش می‌دهد. بنابراین، افزودن Sasobit به طور جداگانه می‌تواند به طور همزمان

ویژگی‌های ویسکوالاستیسیته SB در دماهای مختلف پیری با استفاده از آزمون‌های BBR و DSR برای ارزیابی مقاومت در برابر پیری آن آزمایش می‌شوند.

این مطالعه ابتدا به تجزیه و تحلیل و مقایسه خواص فیزیکی و رئولوژیکی SB پس از WCO، Sasobit و اصلاح کامپوزیت می‌پردازد. در مرحله دوم، سختی خزش و

## ۲- مواد و آماده سازی نمونه

### ۲-۱- مصالح سنگی و قیر

خالص ۶۰-۷۰ بود که از شرکت نفت پاسارگاد تهیه شد و مشخصات فیزیکی آن در جدول ۲ آمده است.

در این پژوهش از مصالح سنگی و فیلر آهکی استفاده شد. خصوصیات مصالح سنگی مورد استفاده در جدول ۱ آمده است. قیر بکارگرفته شده در این پژوهش از نوع قیر

جدول ۱. خصوصیات مصالح سنگی مورد استفاده

| استاندارد آزمایش |        | حدود مجاز طبق نشریه ۲۳۴ |      | نتایج آزمایش | شرح   |
|------------------|--------|-------------------------|------|--------------|---|
| ASTM             | AASHTO | رویه                    | آستر |              |   |
| -                | T96    | ۳۰                      | ۴۰   | ۲۲/۳         | حداکثر سایش به روش لوس آنجلس (درصد)         |
| -                | -      | ۲۵                      | ۳۰   | ۹            | حداکثر ضریب تورق با روش BS812 (درصد)        |
| D5821            | -      | ۹۰                      | ۸۰   | ۹۴           | حداقل درصد شکستگی در دو وجه روی الک شماره ۴ |
| -                | T85    | ۲/۵                     | ۲/۵  | ۲/۲          | حداکثر درصد جذب آب (مصالح درشت دانه)        |
| -                | T84    | ۲/۵                     | ۲/۸  | ۲/۴          | حداکثر درصد جذب آب (مصالح ریزدانه)          |

جدول ۲. مشخصات فیزیکی قیر

| نتیجه آزمایش             | استاندارد | نوع آزمایش                |
|--------------------------|-----------|---------------------------|
| ۴۷ درجه سانتیگراد        | ASTM D36  | نقطه نرمی                 |
| ۶۷ دسی میلیمتر           | ASTM D5   | درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه |
| ۳۰۴ درجه سانتیگراد       | ASTM D92  | درجه اشتعال               |
| بیش از ۱۰۰ سانتیمتر      | ASTM D113 | شکل پذیری در دمای ۲۵      |
| ۱/۰۴۵ gr/cm <sup>3</sup> | ASTM D70  | چگالی                     |
| درصد ۰/۰۵                | ASTM D6   | افت حرارتی                |
| درصد ۹۹/۵                | ASTM D4   | قابلیت حل                 |

## SBR-۲-۲

## ۲-۳- ساسوبیت

یک اصلاح کننده پلیمر آنیونی به نام لاتکس مایع SBR از یک کارخانه محلی برای استفاده در این مطالعه خریداری شد. شاخص‌های اساسی SBR در جدول ۳ ارائه شده است.

یک افزودنی نیمه گرم ساسوبیت برای تهیه نمونه‌های قیر اصلاح شده استفاده شد. از آنجایی که Sasobit دارای نقطه ذوب تقریباً ۱۰۰ درجه سانتیگراد است، افزودن آن به قیر در دمای بالا باعث پخش یکنواخت آن می‌شود و ویسکوزیته قیر را کاهش می‌دهد. جدول ۴ مشخصات فیزیکی Sasobit را فهرست می‌کند.

جدول ۳. مشخصات SBR

| نتیجه | واحد                  | خصوصیات         |
|-------|-----------------------|-----------------|
| ۰.۹۶  | گرم بر سانتی متر مکعب | وزن مخصوص       |
| ۲۲.۹  | %                     | درصد استایرن    |
| ۳.۱   | %                     | اسیدهای ارگانیک |
| ۵.۸   |                       | pH              |
| مایع  |                       | شکل فیزیکی      |

جدول ۴. مشخصات ساسوبیت

| نتیجه | واحد                  | خصوصیات     |
|-------|-----------------------|-------------|
| ۰.۹۲  | گرم بر سانتی متر مکعب | وزن مخصوص   |
| ۷.۳۲  | %mPa.s                | ویسکوزیته   |
| ۱۰.۲  | %                     | نقطه ذوب    |
| ۵.۸   |                       | pH          |
| ۲۸۸   |                       | نقطه اشتعال |

## ۲-۴- روغن ضایعاتی

WCO از مغازه‌های کباب‌پزی سرخ‌شده محلی در گویانگ تهیه شده است. قبل از آزمایش، WCO ابتدا به مدت ۱.۵ ساعت در اجاق قرار داده شد تا آب اضافی خارج شود. سپس

از قیف و کاغذ صافی برای فیلتر کردن ناخالصی‌ها و ذرات فلزی روغن مصرفی استفاده شد. خواص فیزیکی WCO در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵. خصوصیات روغن ضایعاتی

| نتیجه | واحد                  | خصوصیات         |
|-------|-----------------------|-----------------|
| ۱۲۵   | گرم بر سانتی متر مکعب | ویسکوزیته       |
| ۲۹۸   | سانتی گراد            | نقطه اشتعال     |
| ۳۲۱   | سانتی گراد            | اسیدهای ارگانیک |
| ۰.۹۱۱ | %                     | تراکم           |

## ۲-۵- روش ساخت نمونه های آزمایشگاهی

مؤثرترین راهها برای آماده سازی SB و SBSW مطابق با تحقیقات قبلی به شرح زیر شناسایی شده اند. قیر خالص BB ابتدا در دمای ۱۶۰ درجه سانتیگراد گرم شد. سپس قیر گرم شده BB به آرامی با ۴ درصد وزنی SBR با سرعت کم در حدود ۱۵۰۰ دور در دقیقه مخلوط شد. SB با افزودن تمام مایع SBR به BB و اختلاط در دمای ۱۶۰ C° به مدت ۴۰ دقیقه با سرعت کنترل شده ۴۰۰۰ دور در دقیقه تولید شد. پس از آن، مخلوط Sasobit با درصد ۴ درصد و SB در دور ۲۰۰۰ به مدت ۲۰ دقیقه در حالی که دما در ۱۶۰ حفظ شد، مخلوط شدند. سایر نمونه های قیر به غیر از تغییر در نوع افزودنی ها، فرآیندهای آماده سازی مشابهی با SB اصلاح شده توسط sasobit/wco را طی کردند. در نهایت، چهار نوع مختلف نمونه قیر - SB, Sasobit اصلاح شده فقط توسط SB اصلاح شده فقط توسط WCO، و SB اصلاح شده توسط ترکیبی از Sasobit /wco - ایجاد شد. در این تحقیق برای سهولت بیان آنها به ترتیب sb, sbs, sbw و sbsw نام گذاری می گردند.

یک آزمایش مخزن پیری تحت فشار (PAV) برای شبیه سازی پیری طولانی مدت برای تمام BB اصلاح شده در شرایط آزمایش ۱۰۰ درجه سانتیگراد و ۲,۱ مگاپاسکال به مدت ۲۰ ساعت استفاده شد. توجه به این نکته مهم است که تست های دمای پیری کوتاه مدت استاندارد و نامتعادل برای ارزیابی مقاومت PG و پیری BB اصلاح شده انجام شد.

## ۳-۳- ترک خوردگی دمایی در دمای پایین

آزمون رئومتر تیرچه خمشی (BBR) برای ارزیابی مقاومت ترک خوردگی در دمای پایین SB, SBS, SBW و SBSW در حالت های مختلف پیری توسط ASTM D6648 استفاده شد (ASTM D6648, 2015). به طور خاص، زمانی که دوره بارگذاری معادل ۶۰ ثانیه بود، سفتی خزشی (S) و خاصیت آرامش (m) قیر مشخص شد. علاوه بر این، این آزمون همچنین از نسبت S/m-value به عنوان یک عامل ارزیابی حیاتی استفاده کرد. مقاومت در برابر ترک حرارتی بهتر با مقادیر S/m کوچکتر و مقادیر m بزرگتر نشان داده می شود.

## ۳-۴- رئومتر برش دینامیکی

تمام ویژگی های ویسکوالاستیک نمونه های قیر با استفاده از DSR به دنبال ASTM D7175 تعیین شد (ASTM D7175, 2015). آزمایش جاروب دما برای ارزیابی خواص رئولوژیکی انجام شد. فاکتور شیارشدگی ( $G^*/\sin\delta$ ) در دمای بین ۴۰-۸۰ درجه سانتیگراد اندازه گیری شد. تست های جارو فرکانس در محدوده فرکانس ۰,۱ تا ۱۰ هرتز انجام شد. آزمایش با استفاده از یک صفحه ۲۵ میلی متری با فاصله کنترل ۱ میلی متر انجام شد. به منظور تضمین اینکه BB اصلاح شده همیشه می تواند یک شرایط ویسکوالاستیک خطی را حفظ کند، کرنش ۱۰٪ در طول این آزمایش کنترل شد.

## ۳-۳- روش کار آزمایش

### ۳-۱- آزمایشات فیزیکی قیر

برای ارزیابی خواص فیزیکی BB اصلاح شده، شکل پذیری، نقطه نرم شدن و آزمایش های نفوذ مطابق با مشخصات ASTM D36 انجام شد. علاوه بر این، ویسکوزیته چرخشی در ۱۲۰، ۱۳۵، ۱۵۰، ۱۶۵ و ۱۸۰ به منظور ایجاد منحنی های ویسکوزیته-دما و تعیین دمای اختلاط و تراکم آزمایش شد. در این مطالعه از سه مجموعه نمونه برای تکرار آزمایش استفاده شد.

### ۳-۲- آزمایشات پیر شدگی

هنگامی که BB اصلاح شده با سنگدانه ها ترکیب می شود، دمای پیری کوتاه مدت برای BB در حال حاضر روی ۱۶۳ درجه سانتیگراد تنظیم می شود، صرف نظر از اینکه آزمایش TFOT یا RTFOT<sup>۹</sup> باشد. با توجه به تنوع مواد، این دما واقعاً نشان دهنده درجه پیری قیر در خدمت نیست. در مقابل، انتخاب دمای اختلاط مخلوط به عنوان دمای پیری کوتاه مدت BB منطقی تر است. همانطور که توسط اصل هم ویسکوزیته بیان شد، دمایی که در آن قیر دارای مقدار ویسکوزیته ۰,۱۷ Pas است به عنوان دمای مرجع برای پیری کوتاه مدت (RTFOT، ۸۵ دقیقه) قیر (بر اساس کارایی) انتخاب می شود (ASTM D6521, 2013). مطابق با ASTM D6521

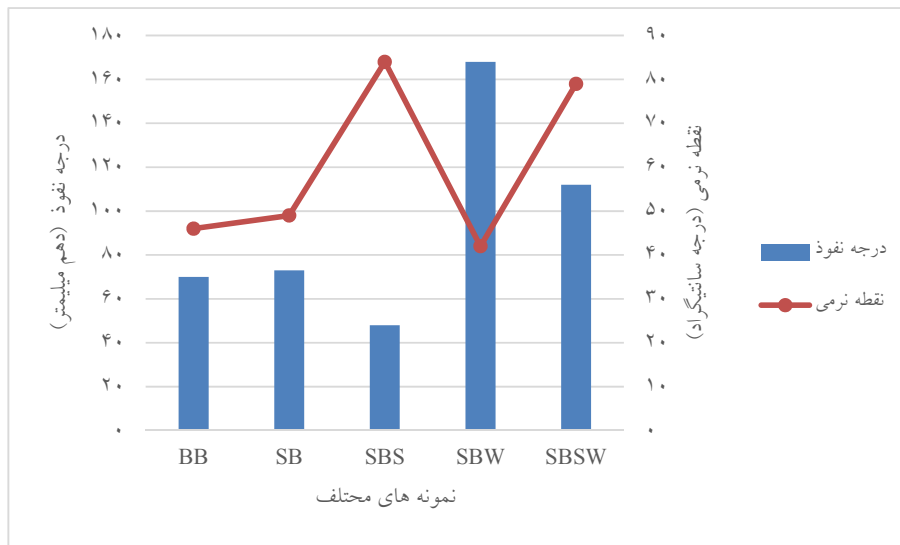
## ۴- تحلیل نتایج آزمایشات

### ۴-۱- نتایج آزمایش فیزیکی قیر

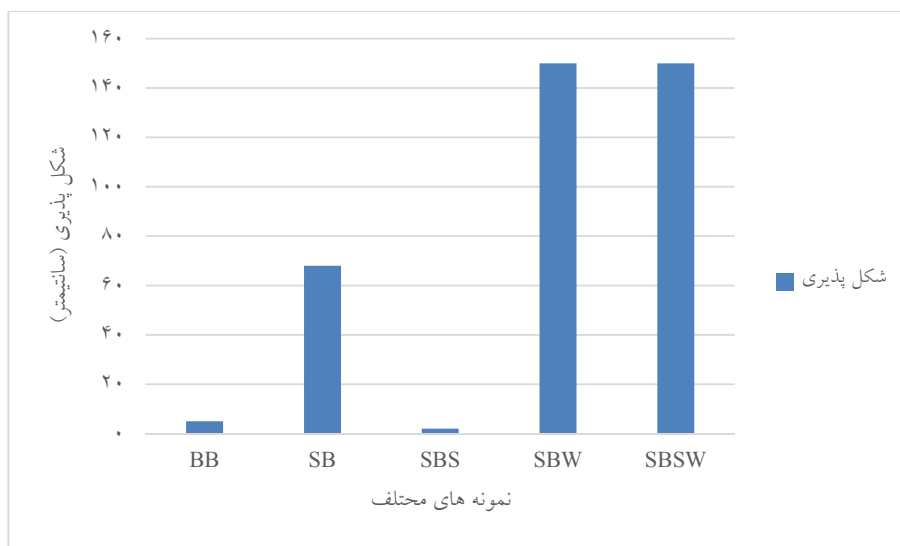
نتایج شکل پذیری، نفوذ و نقطه نرمی قیر اصلاح شده در شکل های ۱ و ۲ نشان داده شده است. نوارهای خطا در شکل به ترتیب نشان دهنده درجه پراکندگی نفوذ سوزن، نقطه نرمی و شکل پذیری هستند. بدیهی است که به استثنای شکل پذیری، عملاً تفاوت کمی بین BB و SB از نظر نفوذ و نقطه نرمی وجود دارد. پس از افزودن ساسوبیت، نفوذ و شکل پذیری قیر اصلاح شده به طور قابل توجهی کاهش یافت، در حالی که نقطه نرمی آن افزایش یافت. به طور خاص، افزودن Sasobit باعث کاهش شکل پذیری SB در دمای ۵ درجه سانتیگراد به

سانتی متر به بیش از ۱۵۰ سانتی متر افزایش می‌دهد. این امر بر توانایی Sasobit/WCO برای بهبود عملکرد SB در یک محدوده دمایی گسترده، در هر دو حد بالا و پایین تاکید می‌کند. می‌توان نتیجه گرفت که کامپوزیت Sasobit/WCO به طور قابل توجهی نسبت به دو افزودنی دیگر برتری دارد. زیرا می‌تواند به طور همزمان مقاومت شیار شدگی و ترک خوردگی SB را بهبود بخشد. در حالی که دمای اختلاط مخلوط SB را کاهش می‌دهد.

میزان ۶۳٫۹ سانتی متر می‌شود. بنابراین، افزودن Sasobit به SB به تنهایی مناسب نخواهد بود. نتایج نیز مشابه مطالعات قبلی است. با این وجود، معرفی WCO منجر به کاهش ۸ درجه سانتی گراد در نقطه نرمی SB می‌شود که به طور قابل توجهی پایداری آن را در دمای بالا به خطر می‌اندازد. در مقابل، ترکیب Sasobit و WCO نه تنها نقطه نرمی SB را ۳۰٫۴ درجه سانتیگراد افزایش می‌دهد، بلکه انعطاف پذیری آن را در دمای ۵ درجه سانتیگراد افزایش می‌دهد و آن را از ۶۷٫۲



شکل ۱. نتایج جدول مختلط نمونه‌ها



شکل ۲. نتایج شکل پذیری نمونه‌ها

کامپوزیتی Sasobit/WCO دمای آماده‌سازی قیر را ۱۹ درجه سانتی‌گراد کاهش داد و به ترتیب WCO و Sasobit را به ترتیب ۱۵ درجه سانتی‌گراد و ۱۳ درجه سانتی‌گراد کاهش داد. ذکر این نکته حائز اهمیت است که این مطالعه آزمایش‌های پیری کوتاه‌مدت را بر روی نمونه‌های مختلف قیر اصلاح‌شده در دمای آماده‌سازی توصیه‌شده علاوه بر دمای پیری کوتاه‌مدت معمولی انجام داد. این رویکرد جامع با هدف ارزیابی کامل مقاومت در برابر پیری قیر اصلاح‌شده انجام شد.

دمای بهینه اختلاط و تراکم برای قیر به ترتیب با دماهایی در مقادیر ویسکوزیته  $Pa s 0,17$  و  $Pa s 0,28$  مطابقت دارد. هر دوی این دماها توصیف دقیق‌تری از ویژگی‌های ویسکوزیته قیر در زمان ساخت ارائه می‌دهند. جدول ۶ دمای اختلاط و تراکم برای BBهای مختلف اصلاح‌شده را نشان می‌دهد. واضح است که SB دارای بیشترین دمای اختلاط و تراکم است، که نشان می‌دهد مواد افزودنی می‌توانند دمای آماده‌سازی SB را به میزان قابل توجهی کاهش دهند. اصلاح‌کننده

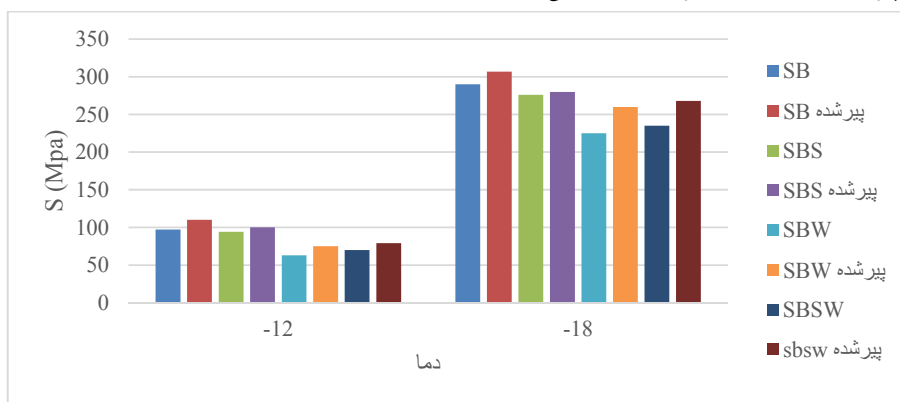
جدول ۶. دمای اختلاط و تراکم نمونه‌ها

| قیر         | SB  | SBS | SBW | SBSW |
|-------------|-----|-----|-----|------|
| دمای اختلاط | ۱۶۸ | ۱۵۵ | ۱۵۳ | ۱۴۹  |
| دمای تراکم  | ۱۵۵ | ۱۴۳ | ۱۴۱ | ۱۳۷  |

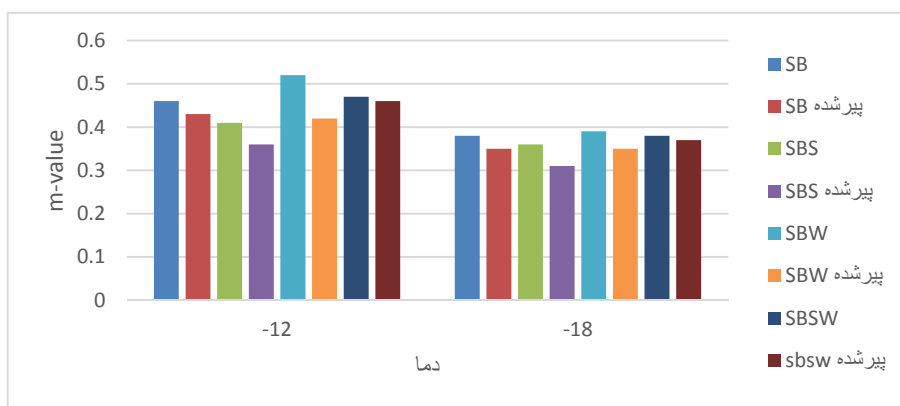
#### ۴-۲- ارزیابی عملکردی دمای پایین

همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود. با این حال، جالب است که پس از اینکه نمونه‌ها تحت RTFOT قرار گرفتند، رابطه بین مقادیر m آنها معکوس می‌شود. با توجه به مشکل در ارزیابی عملکرد دمای پایین BB اصلاح‌شده بر اساس مقادیر S یا m به تنهایی، نسبت S/m به جای آن استفاده شد که تغییر شکل و ظرفیت آرام‌سازی تنش قیر را بهتر منعکس می‌کند. با توجه به نتایج در شکل ۵، مشاهده می‌شود که مقادیر SBSW s/m در تمام دماهای آزمایش قبل و بعد از پیری کمتر از مقادیر SB و SBS است. در دمای آزمایش یکسان، ادغام اصلاح‌کننده sasobit/wco منجر به افزایش قابل توجهی در مقاومت ترک خوردگی SB می‌شود.

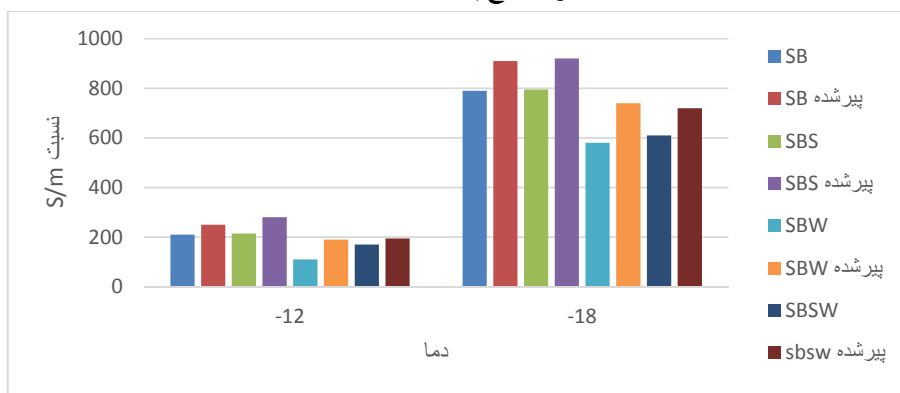
نتایج آزمایش BBR در دمای ۱۲- و ۱۸- درجه سانتی‌گراد برای چندین نوع قیر در شکل ۳ نشان داده شده است. در شکل ۳ می‌توان مشاهده کرد که بدون توجه به دمای پیری، روند عملکرد همه نمونه‌ها با افزایش در مقادیر S و S/m سازگار است، در حالی که مقدار m کاهش می‌یابد. این نشان می‌دهد که در حالی که شکنندگی و سفتی قیر در نتیجه پیری سریع افزایش می‌یابد، مقاومت ترک خوردگی در دمای پایین SB و SBSW کاهش می‌یابد. علاوه بر این، هم قبل و هم بعد از RTFOT، S از SB بزرگتر از SBS، SBW، و SBSW است. این نشان می‌دهد که افزودنی‌ها انعطاف‌پذیری قیر را در دماهای پایین افزایش می‌دهند. در مقایسه با SBSW پیر نشده، SBW پیر نشده مقدار m بالاتری را نشان می‌دهد،



شکل ۳. نتایج پارامتر شیارشدگی نمونه‌ها



شکل ۴. نتایج پارامتر m-value



شکل ۵. نسبت پارامتر s/m

همزمان ساسوبیت و روغن ضایعاتی، نمونه SBSW ظرفیت کاهش تنش و سختی خزشی را دارد. با این حال، روغن ضایعاتی شکست حرارتی در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد را تجربه کرده است که قدرت تعدیل‌کنندگی روغن ضایعاتی را کاهش می‌دهد. در نتیجه، بعد از پیرشدگی، مقدار پارامتر m نمونه SBW با درصد روغن ضایعاتی بیشتر کمتر از نمونه SBSW می‌باشد.

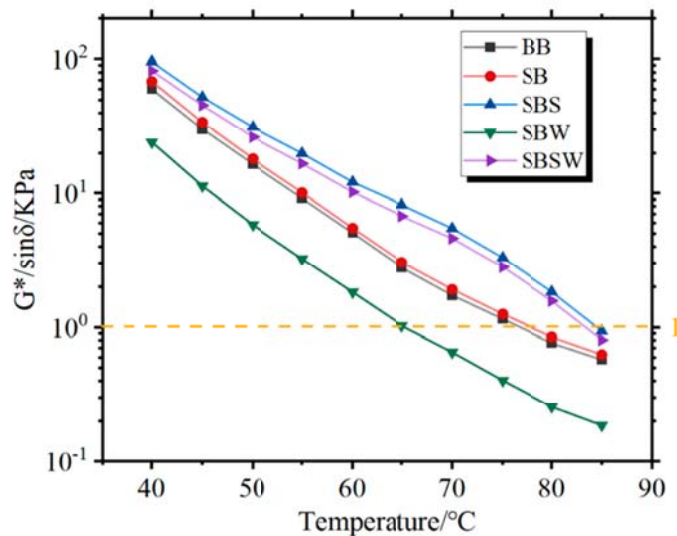
عوامل زیر ممکن است مسئول پدیده‌هایی باشند که در آن Sasobit/WCO می‌تواند مقادیر m قیر SB پریشده RTFO را به طور جزئی افزایش دهد. در دماهای آزمایش، واکس ساسوبیت به طور قابل توجهی میزان m-value را کاهش می‌دهد و مقدار سختی را افزایش می‌دهد. در هر صورت، روغن ضایعاتی ظرفیت تنش حرارتی را از انجایی با کاهش اثرات منفی ساسوبیت، بهبود می‌بخشد. در صورت تاثیر

#### ۴-۳-عملکرد رئولوژیکی

##### ۴-۳-۱-نتایج آزمایش DSR

SB، BB، و SBW پیرشده به ترتیب ۸۴٫۴، ۷۶٫۵، و ۷۶٫۲ درجه سانتی‌گراد است. این نشان می‌دهد که ترکیب Sasobit/WCO می‌تواند به طور قابل توجهی مقاومت شیارشدگی SB را در دمای بالا افزایش دهد. علاوه بر این، تفاوت  $G^*/\sin\delta$  بین قیر خالص و SB پیرشده در تمام دماهای جابجایی حداقل است، که نشان می‌دهد SBR تأثیر ناچیزی بر مقاومت شیارشدگی قیر خالص دارد.

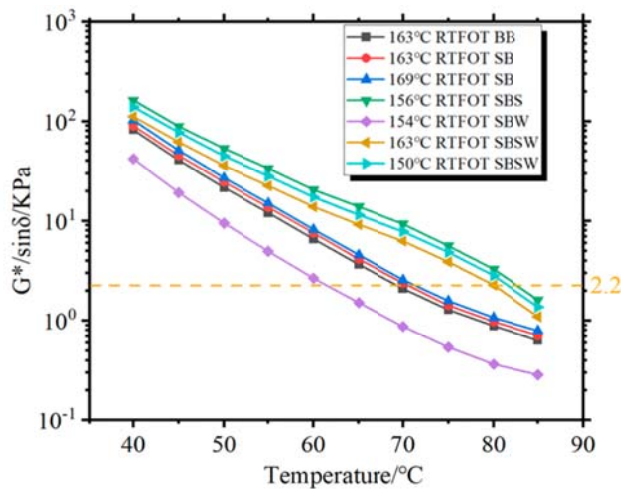
فاکتور شیارشدگی ( $G^*/\sin\delta$ ) برای ارزیابی پایداری قیر اصلاح شده در دمای بالا استفاده شد. مقادیر  $G^*/\sin\delta$  پیر نشده در شکل ۶ نشان داده شده است. برای همان دما، قیرهای با فاکتورهای شیارشدگی بیشتر مقاومت شیارشدگی بهتری دارند. دمای مربوط به ضریب شیار ۱٫۰ کیلو پاسکال اغلب برای تجسم تفاوت در عملکرد قیر استفاده می‌شود. مشاهده می‌شود که دماهای بحرانی دمای بالا برای SBS، SBSW،



شکل ۶. پارامتر شیارشدگی نمونه‌های مختلف

بالا ضعیف می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که افزودن Sasobit/wco و کاهش دمای پیری هر دو به مقاومت RTFOT-SB در برابر شیار شدن در دماهای بالا کمک می‌کنند. توجه به این نکته مهم است که اختلافات  $G^*/\sin\delta$  بین ۱۶۳ RTFOT-BB کوچک است که با نتایج شیارشدگی قیر خالص مطابقت دارد.

مقادیر  $G^*/\sin\delta$  همه قیرهای پیرشده در RTFOT در شکل ۷ نشان داده شده است. بدیهی است که در بین تمام قیرهای اصلاح شده، قیر پیرشده SBS در دمای ۱۵۶ سانتی‌گراد دارای بیشترین  $G^*/\sin\delta$  در کل محدوده دما است، که نشان می‌دهد این مقدار بهترین قابلیت‌های مقاومت در برابر شیارشدگی در دمای بالا را دارد. پیری قیر به تدریج با افزایش دما شدیدتر می‌شود، بنابراین مقاومت آن در برابر تغییر شکل در دماهای



شکل ۷. پارامتر شیارشدگی بعد از پیرشدگی

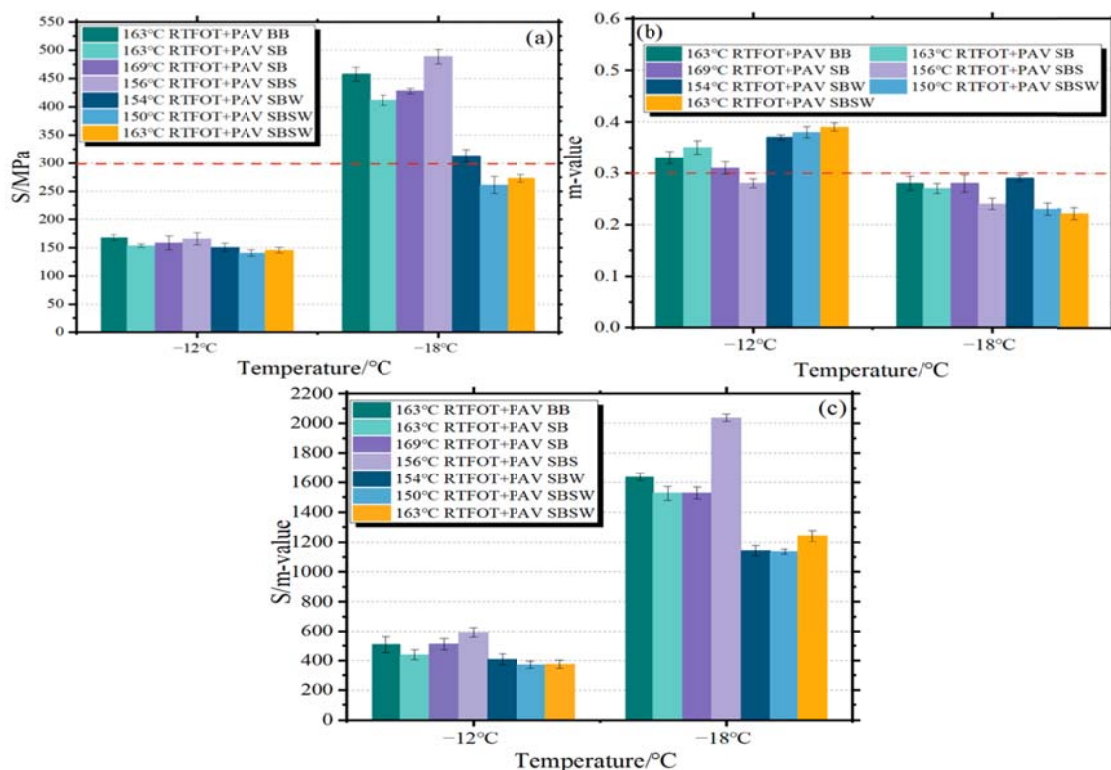
#### ۴-۴- نتایج آزمایش رئومتر تیرچه خمشی

آزمایش رئومتر تیرچه خمشی برای همه نمونه‌ها در دمای ۱۲- و ۱۸- درجه سانتی‌گراد در شکل ۸ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که نمونه SBSW پیر شده بلند مدت دارای کمترین مقدار پارامتر سختی می‌باشد. این نتیجه نشان می‌دهد که استفاده از ساسوبیت و روغن ضایعاتی ظرفیت متعادل کردن تنش حرارتی را دارد. این موضوع سبب کاهش حساسیت روسازی به ترک خوردگی حرارتی می‌گردد. بنابراین کاهش دمای پیرشدگی کوتاه مدت از ۱۶۳ به ۱۵۰ منجر به کاهش در مقدار پارامتر سختی نمونه SBSW می‌گردد. با این وجود، در مورد m-value، به جز در ۱۸- سانتی‌گراد، ادغام Sasobit/WCO توانایی افزایش m-value SB را نشان داد، که نشان‌دهنده تأثیر مطلوب Sasobit/WCO بر ویژگی‌های آرام سازی تنش SB است. با توجه به اثرات متفاوت S و m-value بر روی اصلاح SB، نسبت مقدار S/m به عنوان یک پارامتر ارزیابی محوری در نظر گرفته می‌شود. در تمام دماهای آزمایش، همانطور که در شکل ۸ (ج)

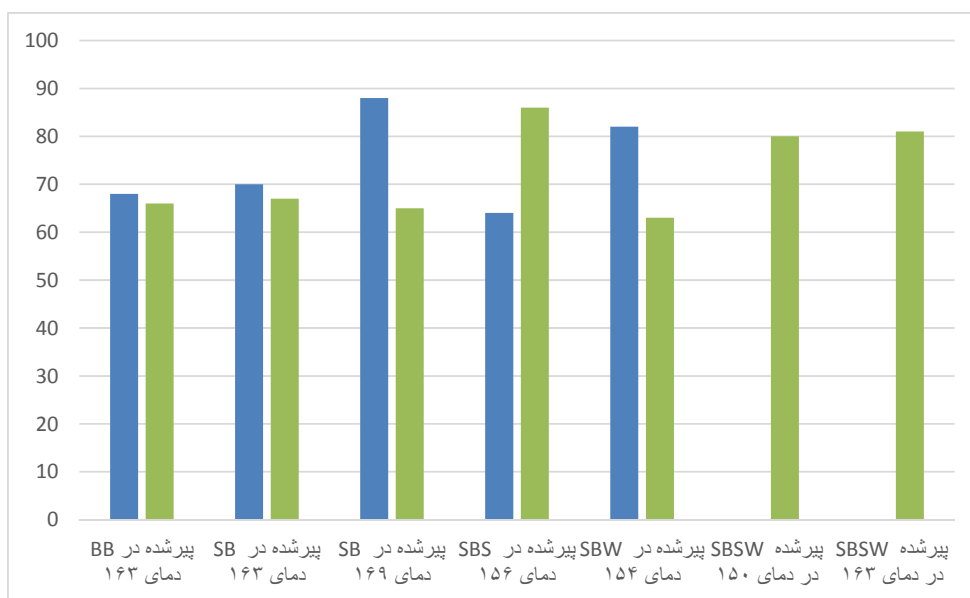
مشاهده می‌شود، مقدار S/m، CRT+PAVSBSW 150° کمتر از ۱۶۹ CRT+PAVSB است، که نشان می‌دهد SBSW مقاومت ترک خوردگی در دمای پایین بیشتری دارد. با توجه به نتایج S/m-value، کاهش Sasobit/WCO در دمای پیری کوتاه‌مدت و تأثیر هم‌افزایی Sasobit/WCO تأثیر مطلوبی بر مقاومت درازمدت شکست حرارتی SB دارد.

#### ۴-۵- نتایج دمای عملکردی نمونه‌ها

شکل ۹ و ۱۰ یک مرور کلی از نتایج دمای بحرانی مرتبط با مقادیر  $G^*/\sin\delta$  1.0 کیلو پاسکال و ۲.۲ کیلو پاسکال، و همچنین  $G^*\sin\delta$  با رسیدن به ۵۰۰۰ کیلو پاسکال، همراه است. این یافته‌ها معیارهای ارزشمندی را برای تعیین قیر در چارچوب تحقیقات علمی ارائه می‌دهند. علاوه بر این، تفاوت دمای بحرانی بین قیرخالص و SB کمتر از ۱ درجه سانتی‌گراد هم قبل و هم بعد از پیری RTFOT است، که تأثیر محدود SBR بر پایداری حرارتی قیر خالص را نشان می‌دهد.



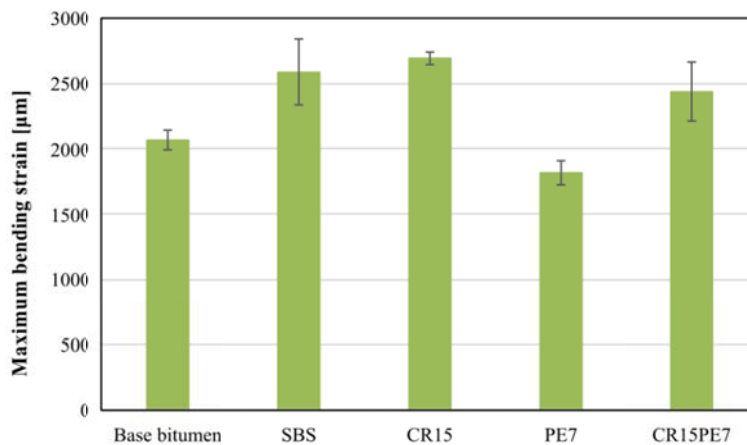
شکل ۸. نتایج آزمایش رئومتر تیرچه خمشی الف) نتایج سختی. ب) نتایج پارامتر m ج) نتایج پارامتر S/m



شکل ۹. دمای بحرانی نمونه‌ها

حداقل مقدار دمای بحرانی را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد SBSW مقاومت بالاتری در برابر ترک خوردگی خستگی در بین نمونه‌ها دارد. نتایج نشان می‌دهد که اضافه نمودن پلیمر SBR مقاومت قیر خالص در برابر خستگی افزایش می‌دهد.

با تعیین دمای بحرانی در معیار  $G.Sin=5000$  کیلوپاسکال، می‌توان مقاومت ترک خوردگی خستگی قیر را تعیین نمود. دماهای بحرانی پایین‌تر مقاومت خستگی بالاتری را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل مشخص است، نمونه SBSW در بین تمامی نمونه‌ها، بدون در نظر گرفتن این موضوع که اثر کاهندگی ویسکوزیته توسط ساسوبیت و روغن ضایعاتی،



شکل ۱۰. حداکثر کرنش خمشی نمونه‌ها

## ۵- نتیجه‌گیری

گرفت. موارد زیر نتایج قابل توجهی است که از نتایج آزمایش به دست آمده است:  
-در مقایسه با Sasobit و WCO، Sasobit/WCO می‌تواند عملکرد SB را در دماهای بالا و پایین بهبود بخشد.

در این مطالعه، اثرات ترکیبات Sasobit/WCO بر خواص فیزیکی، رئولوژیکی و پیری قیر SBR با استفاده از تست‌های عملکرد مرسوم، تست‌های DSR و BBR مورد بررسی قرار

-دمای اختلاط ترکیب SB را می‌توان با افزودنی‌هایی مانند Sasobit، WCO و Sasobit/WCO کاهش داد. Sasobit/WCO به طور خاص می‌تواند دمای آماده سازی را تا ۱۹ درجه سانتی‌گراد کاهش دهد. SBSW بدون توجه به اثر اختلاط گرم تولید شده توسط Sasobit/WCO، PG دمای بالا بهتری نسبت به SB دارد، و Sasobit/WCO می‌تواند مقاومت SB را در برابر شیار شدن در دمای بالا و ترک خوردگی ناشی از خستگی افزایش دهد. PG دمای بالا SBSW دو درجه از SB و BB پیشی می‌گیرد.

ترکیبی از Sasobit و WCO نه تنها نقطه نرم کننده SBRBBSB را با ۳۰،۴ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌دهد بلکه انعطاف پذیری آن را در ۵ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌دهد و آن را از ۶۷،۲ سانتی‌متر به بیش از ۱۵۰ سانتی‌متر افزایش می‌دهد. قبل و بعد از پیری، ترکیب Sasobit/WCO می‌تواند به طور قابل توجهی عملکرد ضد ترک در دمای پایین SB را بهبود بخشد. افزودن Sasobit/WCO می‌تواند به طور قابل توجهی مقاومت‌های کوتاه مدت و بلند مدت SB را افزایش دهد.

## ۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Styrene Butadiene Rubber
- 2- Waste Cooking Oil
- 3- Styrene Butadiene Rubber Bitumen
- 4- Dynamic Shear Rheometer
- 5- Bending Beam Rheometer
- 6- Performance Grade
- 7- Bitumen Binder
- 8- Warm Mix Asphalt
- 9- Rolling Thin Film Oven

## ۷- مراجع

-Kushwaha, P.; Chauhan, A.S.(2023). Pavement design and construction using warm mix asphalt: A bibliometric overview. *Mater. Today Proc.*

-Li, D.; Chen, R. (2023). Investigation on physical properties and modification mechanisms of diatomite/SBR modified asphalt. *PLoS ONE 18*, e0286328.

-Liu, Z.; Sun, L.; Gu, X.; Wang, X.; Dong, Q.; Zhou, Z.; Tang, J. (2023). Characteristics, mechanisms, and environmental LCA of WMA containing Sasobit: An analysis perspective combining viscosity-temperature regression and interface bonding strength. *J. Clean. Prod.* 391, 136255.

-Meng, Y.; Liu, L.; Huang, W.; Li, M. (2023). Effect of increasing preheating temperature on the activation and aging of asphalt binder in reclaimed asphalt pavement (RAP). *J. Clean. Prod.* 402, 136780.

-Ren, S.S.; Liang, M.; Fan, W.Y.; Zhang, Y.Z.; Qian, C.D.; He, Y.; Shi, J.T. (2018). Investigating the effects of SBR on the properties of gilsonite

-Alqahtani, M.A.; Bazuhair, R.W. (2023). Effects of Rediset Additive on the Performance of WMA at Low, Intermediate, and High Temperatures. *Sustainability 15*, 5471.

-ASTM D6521; (2013). Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV). ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.

-ASTM D6648; (2016). Standard Test Method for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR). ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.

-ASTM D7175; (2015). Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.

-Eltwati, A.; Jaya, R.P.; Mohamed, A.; Jusli, E.; Al-Saffar, Z.; Hainin, M.R.; Enieb, M. (2023). Effect of Warm Mix Asphalt (WMA) Antistripping Agent on Performance of Waste Engine Oil-Rejuvenated Asphalt Binders and Mixtures. *Sustainability 15*, 3807.

-Zhang, F. Hu, C. (2014). Influence of aging on thermal behavior and characterization of SBR compound-modified asphalt. *J. Therm. Anal. Calorim.* 115, 1211–1218.

-Zhao, Y.; Chen, M.; Wu, S.; Cao, Z.; Zhou, X. (2023). Full-component cascade utilization of waste cooking oil in asphalt materials. *Constr. Build. Mater.* 404, 133355.

-Zhu, C. Zhang, H. Xu, G. Shi, C. (2017). Aging rheological characteristics of SBR modified asphalt with multi-dimensional nanomaterials. *Constr. Build. Mater.* 151, 388–393.

modified asphalt. *Constr. Build. Mater.* 190, 1103–1116.

-Sukhija, M.; Saboo, N.; Pani, A. (2023). Effect of warm mix asphalt (WMA) technologies on the moisture resistance of asphalt mixtures. *Constr. Build. Mater.* 369, 130589.

-Wang, D.; Hu, L.; Dong, S.; You, Z.; Zhang, Q.; Hu, S.; Bi, J. (2022). Assessment of testing methods for higher temperature performance of emulsified asphalt. *J. Clean. Prod.* 375, 134101.

# Laboratory Evaluation of the Effect of Waste Rubber Powder and Recycled Polyethylene Waste Powder on the Performance Properties of Bitumen and Asphalt Mixture with an Environmental Approach

*Azin Chitsazan, Department of Land Use Planning and Assessment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.*

*E-mail: Chitsazan.az@gmail.com*

Received: June 2023- Accepted: February 2024

## **ABSTRACT**

The implementation of polymer modification on bitumen performance at low temperature is significantly compromised by the breakdown of styrene-butadiene rubber (SBR) polymer during bitumen mixing operations. The effectiveness of using waste edible oil/Sasobit (Sasobit/WCO) as a hot additive mixture has been demonstrated in reducing the adverse effects of thermal aging on bitumen modified with Styrene Butadiene Rubber Bitumen (SB) while maintaining the initial performance of the bitumen. However, few studies have been conducted to further investigate the rheological properties and aging resistance of SB bitumen modified with Sasobit/WCO blends. In this research, three additives - Sasobit, WCO, and Sasobit/WCO composite - were selected on the physical and rheological properties of SB, and they were investigated and also evaluated in those mixtures prepared. In addition, using dynamic shear rheometers (DSR) and bending beam rheometers (BBR), this warm mixture was evaluated on performance grade (PG) and aging resistance SB. According to the results, Sasobit/WCO composites perform better than Sasobit and WCO in reducing the preparation volume. Sasobit/WCO also improves the performance of SB in high and low simultaneously. Compared to hot asphalt mixtures, the addition of Sasobit/WCO reduces the preparation of bitumen mixtures by 19 °C, which contributes to the lowest negative aging temperature on SB performance. In addition, the addition of Sasobit/WCO composite can improve the SB mixture against thermal cracking. After the introduction of Sasobit/WCO, the high PG of SB increased by two grades regardless of whether the effect of warm mixing was taken into account. With the addition of Sasobit/WCO, the acceptability of SB against short-term aging increased.

**Keywords:** Composite, Rheological Behavior, Polymer, Performance, Warm Additive