مروری بر خواص رئولوژیکی و شیمیایی قیرهای حاوی افزودنی ساسوبیت و ارزیابی چرخه عمر مخلوط‌های آسفالتی گرم

سعید صبحی[1*]، بابک گلچین[2]

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران
۲- گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده

تاکنون مطالعات متعدد پژوهشی و مروری در خصوص معرفی فنّاوری آسفالت گرم باهدف کاهش مصرف انرژی و آلاینده‌های محیط‌زیست توسط محققان مختلف انجام‌گرفته و هرکدام به‌طور مختصر مزایا و معایب این فنّاوری بر روی مخلوط آسفالتی و مخلوط قیری را مورد تجزیه‌وتحلیل قرارداده‌اند. این مطالعه با توجه به جایگاه علمی ایران در حوزه پژوهش‌های مرتبط با آسفالت گرم و همچنین وجود پتانسیل بالقوه در به‌کارگیری آن به‌صورت میدانی در حوزه ساخت روسازی‌های سبز و دوستدار طبیعت در قالب مطالعه مروری انجام‌گرفته است. این پژوهش بر اساس مطالعات پیشین با تمرکز بر رفتار رئولوژیکی قیر اصلاح‌شده با ساسوبیت، به بررسی ویژگی‌های شیمیایی و چرخه عمر روسازی‌های اصلاح‌شده نیز پرداخته است. تحلیل و بررسی نتایج پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که رفتار قیر اصلاح‌شده با ساسوبیت تحت تأثیر تغییرات هم‌زمان در خصوصیات رئولوژیکی، شیمیایی و ریزساختاری قیر قرار دارد و شناخت خصوصیات رئولوژیکی و شیمیایی قیر اصلاحی به‌ویژه از طریق آزمایش‌هایی مانند میکروسکوپ نیروی اتمی، طیف‌سنجی مادون‌قرمز، تفکیک اجزا چهارگانه SARA و انرژی آزاد سطحی و تلفیق نتایج حاصل از این آزمایش‌ها می‌تواند به درک جامع‌تری از نحوه عملکرد ساسوبیت و پیش‌بینی رفتار قیرهای اصلاح‌شده با این افزودنی کمک کند. بنابراین، در نظر گرفتن هم‌زمان ویژگی‌های رئولوژیکی، شیمیایی و ملاحظات زیست‌محیطی قیر و روسازی اصلاح‌شده با ساسوبیت می‌تواند مسیر انتخاب و کاربرد هدفمند این افزودنی را در توسعه روسازی‌های گرم هموار سازد.

کلمات کلیدی

ساسوبیت، خواص شیمیایی، ریزساختار، پیرشدگی، ارزیابی چرخه عمر

*نویسنده عهده دار مکاتبات: saeid.sobhi@stu.nit.ac.ir

ACCEPTED MANUSCRIPT

۱- مقدمه

امروزه قیر پایه به علت عدم کارایی در تمامی شرایط دمایی مختلف (شکل ۱)، همواره با افزودنی و پلیمرهایی ازجمله پودر لاستیک (CR)[1] و استایرن بوتادین استایرن (SBS)[2] اصلاح‌شده و محدوده عملکردی آن را ارتقا می‌دهد، ولی بااین‌وجود استفاده از درصدهای بالای این پلیمرها موجب افزایش ویسکوزیته و پایین آمدن کارایی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده می‌شود. از طرفی دمای بالای تولید مخلوط آسفالتی داغ (HMA)[3] اصلاح‌شده تأثیرات منفی زیادی (ازجمله افزایش تولید گاز گلخانه‌ای، افزایش گاز کربن مونواکسید و افزایش مصرف سوخت) را به دنبال دارد که نمی‌شود آن‌ها را ندیده گرفت. از سوی دیگر مطابق سیاست کشورهای درحال‌توسعه، برنامه بلندمدت حذف سوخت‌های فسیلی از چرخه تولید انرژی و همچنین به حداقل رساندن انتشار کربن، تدوین‌شده و نیازمند استفاده از فنّاوری پاک و نوین جهت حرکت به‌سوی توسعه پایدار است.



شکل ۱ ضعف قیر پایه در دماهای مختلف

Fig. 1. Weakness of neat binder at various temperatures

در این راستا فناوری آسفالت مخلوط گرم (WMA)[4] به‌عنوان یک رویکرد امیدبخش، یکی از راهکارهای پایدار به‌منظور دستیابی به کاهش کربن و بهره‌وری اقتصادی است [۱-۳]. این فنّاوری با کاهش دمای تولید مخلوط آسفالتی، کاهش مصرف انرژی را به دنبال داشته و هم‌زمان با حفظ کارایی مکانیکی مطلوب، عملکرد مناسبی را به ارمغان می‌آورد [۴-۸]. مخلوط آسفالتی گرم دمای تولید مخلوط آسفالتی را حدوده ۳۰ الی ۴۰ درجه سانتی‌گراد کاهش داده و صرفه‌جویی ۲۰ الی ۳۵ درصدی مصرف انرژی درروند تولید مخلوط آسفالتی را به دنبال دارد [۹, ۱۰]. طبق گزارش‌های بانک جهانی، کاهش ۱۰ درجه سانتی‌گراد در دمای تولید یک تن مخلوط آسفالتی موجب صرفه‌جویی ۱ لیتری سوخت و جلوگیری از انتشار ۱ کیلوگرم CO_2 می‌شود [۱۱, ۱۲].

فناوری آسفالت گرم به شکل مختلفی در کشورهای درحال‌توسعه در جهت تولید روسازی با دمای پایین استفاده می‌شود و امروزه در حالت کلی، روش تولید این فناوری بر اساس نوع افزودنی و فناوری استفاده‌شده در جهت کاهش دما مطابق شکل ۲ در یکی از سه گروه شامل افزودنی‌های آلی[5]، افزودنی‌های شیمیایی[6] و فنّاوری کف قیری[7] قرار می‌گیرد. هر یک از این گروه‌ها عملکرد متفاوتی در جهت کاهش دما ساخت مخلوط آسفالتی دارند به‌طوری‌که افزودنی‌های آلی با کاهش ویسکوزیته قیر، افزودنی‌های شیمیایی و فنّاوری کف قیر به ترتیب با افزایش پوشش قیری دور سنگدانه و افزایش حجم قیر، دمای تولید را کاهش می‌دهند [۳].

در میان انواع این افزودنی‌ها، ساسوبیت[8] به‌عنوان افزودنی آلی مخلوط آسفالتی گرم یکی از افزودنی‌های پرکاربرد در تولید مخلوط آسفالتی گرم می‌باشد که با کاهش ویسکوزیته قیر، کارایی مخلوط آسفالتی را افزایش داده و موجب کاهش انرژی مصرفی در اختلاط و

[1] Crumb Rubber
[2] Styrene-Butadiene-Styrene
[3] Hot Mix Asphalt
[4] Warm Mix Asphalt
[5] Organic Additive
[6] Chemical Additive
[7] Foaming Technology

ACCEPTED MANUSCRIPT

تراکم مخلوط آسفالتی می‌شود. در سال‌های اخیر این افزودنی نسبت به سایر افزودنی‌های گرم بیشتر موردتوجه قرارگرفته و مقالات متعددی در رابطه با عملکرد و مقایسه آن با سایر افزودنی‌ها منتشرشده است.



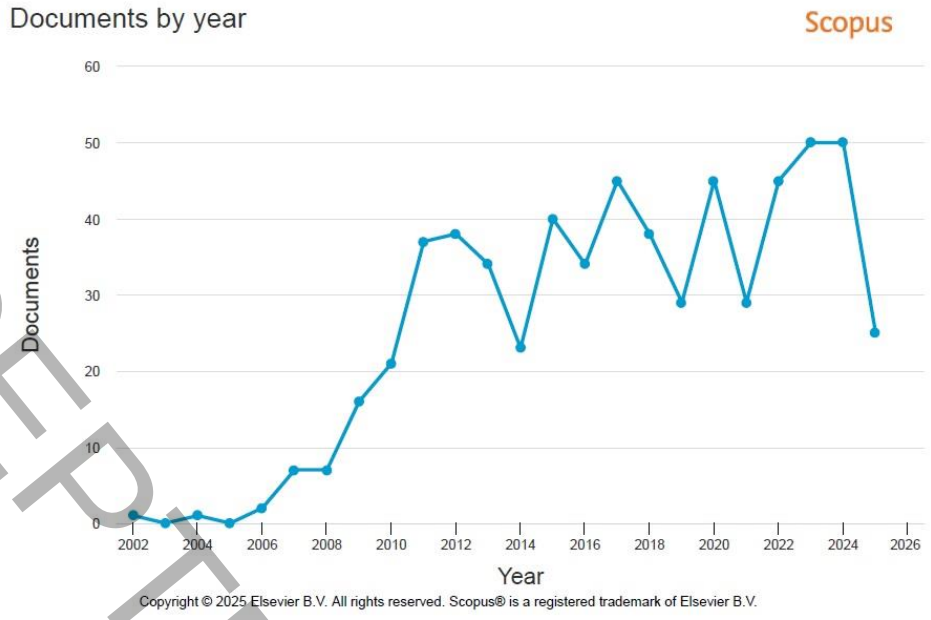
شکل ۲ **گروه‌بندی انواع افزودنی گرم برحسب نوع افزودنی**

Fig. 2. Classification of warm mix additives based on additive type

در این تحقیق، به‌منظور تأکید بر اهمیت موضوع موردبررسی، ابتدا از یک روش علم‌سنجی نوین برای مرور ادبیات پیشین استفاده‌شده است. این روش درواقع تصویر گسترده‌ای از آمارهای مختلف در ارتباط با موضوعات عملی، محققان و جوامع علمی و همچنین روند توسعه موضوعات موردمطالعه را در اختیار محققان قرار می‌دهد. روش علم‌سنجی با دسترسی به منابع داده‌ای ازجمله اسکوپوس، گوگل اسکولار و وب اف ساینس، امکان تجزیه‌وتحلیل کامل‌تر و جامع‌تری از موضوع موردمطالعه در طول زمان را ارائه می‌دهد. در این تحقیق با دسترسی به پایگاه اطلاعاتی اسکوپوس، اطلاعات مقالات مرتبط با افزودنی ساسوبیت در طی ۲۴ سال گذشته (از سال ۲۰۰۲ الی سال ۲۰۲۵) با استفاده از کلمه کلیدی "ساسوبیت" استخراج‌شده و با استفاده از نرم‌افزار VOSviewer تحلیل و بررسی‌شده‌اند.

شکل ۳ روند توسعه مطالعات مرتبط با افزودنی ساسوبیت را در طی سال‌های ۲۰۰۲ الی ۲۰۲۵ نشان می‌دهد. مطابق این شکل اهمیت استفاده از این افزودنی ساسوبیت به‌وضوح پیداست به‌طوری‌که همواره در طی چند سال اخیر تحقیقات و مطالعات انجام‌گرفته مرتبط با این موضوع روند روبه رشدی داشته و همواره پژوهشگران مطالعات متفاوتی را با اضافه کردن این افزودنی به مخلوط‌های آسفالتی انجام داده‌اند.

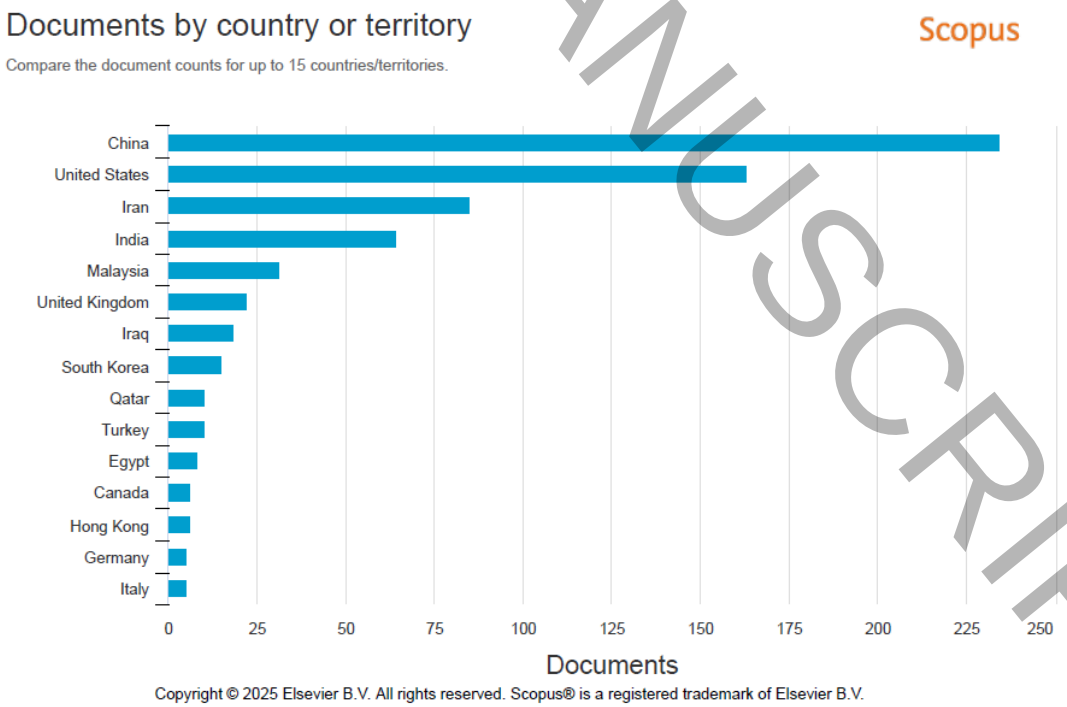
ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۳ **روند توسعه مطالعات مربوط به افزودنی ساسوبیت برگرفته از پایگاه استنادی اسکوپوس**

Fig. 3. The development trend of studies related to the Sasobit additive derived from the Scopus citation database

بیشترین تحقیقات و مطالعات در طی چند سال اخیر همواره در کشورهای چین، ایالات متحده امریکا و کشورمان ایران انجام‌شده است و شکل ۴ نشان‌دهنده تعداد ۱۵ کشور پیشرو در این زمینه است. خوشبختانه کشور ایران با توجه به پتانسیل‌های بالقوه در حوزه روسازی، در زمینه استفاده از افزودنی ساسوبیت به نسبت کشورهای دیگر جایگاه مناسبی در این حوزه دارد و این موضوع نشان‌دهنده ضرورت برقراری ارتباط مستقیم بین دانشگاه و صنعت راهسازی، بهره‌گیری از علم دانش‌آموختگان دانشگاهی و استفاده هرچه بیشتر از این فنّاوری در صنعت راهسازی جهت ارتقای کیفیت روسازی کشورمان است.

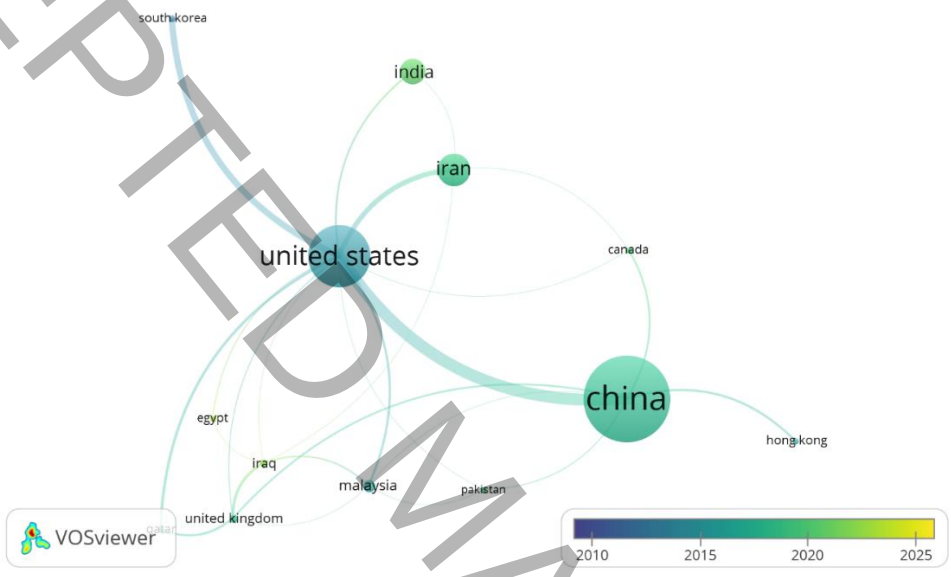


شکل ۴ **مقدار انتشارات مقالات کشورها در زمینه افزودنی ساسوبیت**

ACCEPTED MANUSCRIPT

Fig. 4. Number of publications by countries on the topic of Sasobit additive

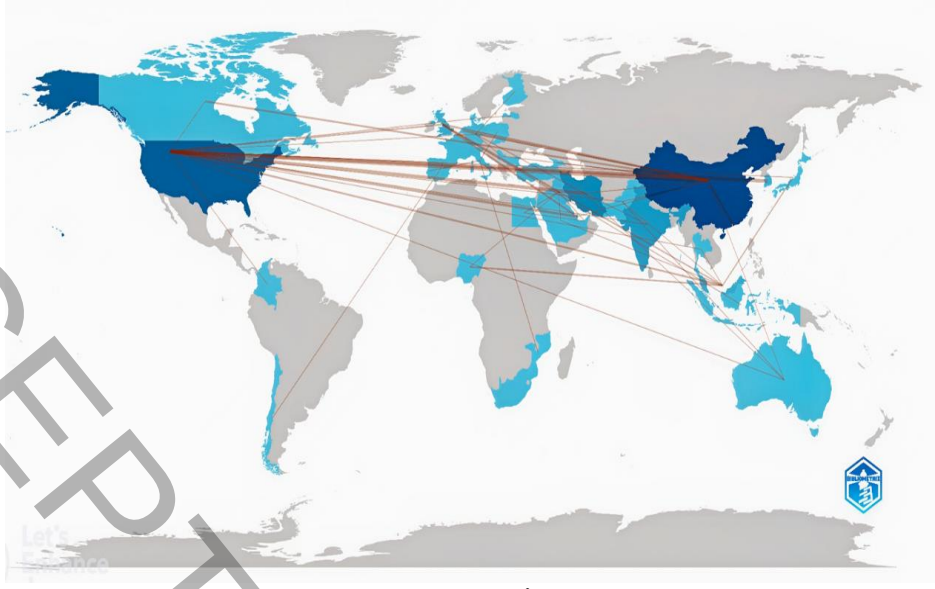
مطابق تحلیل نرم‌افزار VOSviewer از بین نویسندگان ۵۰ کشور مختلف، ۱۳ کشور با حداقل ۵ انتشارات در بازه زمانی سال ۲۰۱۰ الی ۲۰۲۵ انتخاب‌شده و در شکل ۵ آورده شده‌اند. این شکل اهمیت موضوع استفاده از افزودنی ساسوبیت را در ۱۳ کشور منتخب نشان می‌دهد که در این میان کشورهای هند، عراق، ایران و چین در سال‌های اخیر توجه ویژه‌ای به این موضوع داشته و همواره درحال‌توسعه و بهره گرفتن از این افزودنی در راستای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و مضر خصوصاً گاز کربن و همچنین کاهش مصرف انرژی در ساخت روسازی هستند. شکل شماره ۶ نقشه جهانی مشارکت کشورها با یکدیگر در تألیف مقالات را بر اساس تعداد همکاری صورت گرفته نشان می‌دهند که در بین ۱۳ کشور منتخب بیشترین مشارکت و هم تألیفی در بین کشورهای ایالات متحده آمریکا، چین و ایران صورت گرفته است.



شکل ۵ **توزیع بین‌المللی انتشارات مقالات کشورها در بازه زمانی مختلف با موضوع افزودنی ساسوبیت**

Fig. 5. International distribution of research publications by countries over different time periods regarding Sasobit additives

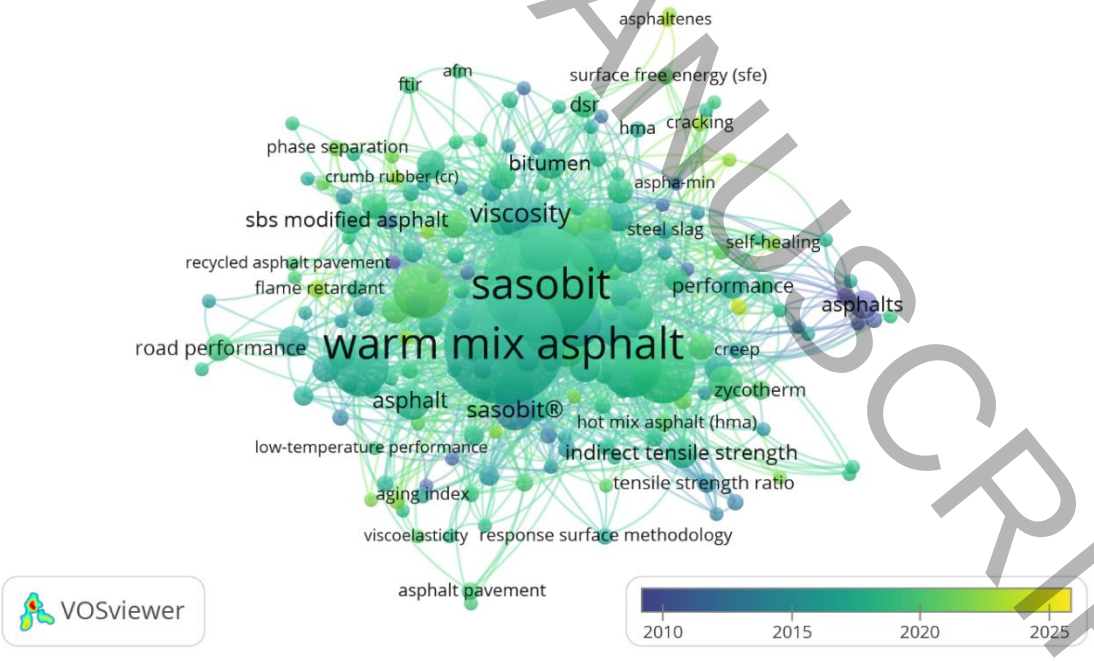
ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۶ **نقشه جهانی هم تألیفی کشورها با موضوع افزودنی ساسوبیت**

Fig. 6. Global co-authorship map of countries regarding Sasobit additives

در شکل شماره ۷، نقشه شماتیک کلیدواژه‌های مورداستفاده در مقالات در بازه زمانی ۲۰۲۵-۲۰۰۲ آورده شده و همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار استفاده از کلمات کلیدی در این بازه زمانی با رنگ‌های مختلف نمایش داده‌شده است. بر اساس اطلاعات مقالات جمع‌آوری‌شده در بین کلیدواژه‌های استفاده‌شده در حوزه افزودنی ساسوبیت، دو کلیدواژه "ساسوبیت" و "مخلوط آسفالتی گرم" بیشترین استفاده در مقالات را داشته‌اند که علت این امر می‌تواند رشد اهمیت به موضوع آسفالت گرم و استفاده از افزودنی ساسوبیت در شاخه‌های مختلف آسفالت بازیافتی و افزایش تعداد مقالات مرتبط با آن‌ها باشد.



شکل ۷ **بررسی مقالات مبتنی بر کلمات کلیدی در زمینه افزودنی ساسوبیت در طی بازه‌های زمانی مختلف**

Fig. 7. Review of keyword based articles on Sasobit additives over various time periods

ACCEPTED MANUSCRIPT

با توجه به مطالب ارائه‌شده در قسمت قبلی و همچنین اهمیت موضوع موردبررسی، در ادامه تأثیر این افزودنی گرم بر روی پارامترهای مختلف قیر موردبحث و بررسی قرار می‌گیرد.

باوجود افزایش قابل‌توجه مطالعات انجام‌شده در زمینه استفاده از افزودنی ساسوبیت در سال‌های اخیر، بررسی دقیق نتایج مطالعات پیشین نشان می‌دهد که هنوز برخی جنبه‌های رفتار قیرهای اصلاح‌شده با ساسوبیت نیازمند تحلیل و جمع‌بندی جامع‌تر است. مطالعات گذشته عمدتاً بر ارزیابی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی گرم، تغییرات خواص رئولوژیکی تمرکز داشته‌اند، درحالی‌که ارتباط میان تغییرات ایجادشده در خصوصیات شیمیایی قیر، ویژگی‌های ریزساختاری، رفتار رئولوژیکی و عملکرد نهایی قیر اصلاح‌شده با ساسوبیت به‌صورت یکپارچه کمتر موردبررسی قرارگرفته است. همچنین، نتایج حاصل از آزمایش‌های ریزساختاری (FTIR[9]، SARA[10]، AFM[11] و SFE[12]) در بسیاری از مطالعات به‌صورت جداگانه گزارش‌شده و تحلیل هم‌زمان اثر این تغییرات بر رفتار قیر، به‌ویژه در شرایط پیرشدگی و استفاده هم‌زمان با سایر افزودنی‌ها، نیازمند بررسی بیشتر است. ازاین‌رو، انجام یک مطالعه مروری جامع برای جمع‌بندی و تحلیل ارتباط میان خصوصیات شیمیایی، آزمایش‌های ریزساختاری و خواص رئولوژیکی قیرهای اصلاح‌شده با ساسوبیت ضروری به نظر می‌رسد و اهداف اصلی این مطالعه مروری به شرح زیر است:

۱) بررسی تأثیر افزودنی ساسوبیت بر خصوصیات رئولوژیکی قیرهای اصلاح‌شده و تحلیل تغییرات ایجادشده در رفتار عملکردی قیر
۲) بررسی تغییرات ایجادشده در خصوصیات شیمیایی و ریزساختاری قیرهای اصلاح‌شده با ساسوبیت بر اساس نتایج مطالعات انجام‌شده با استفاده از آزمایش‌های FTIR، SARA، AFM و SFE
۳) بررسی تغییرات ایجادشده در خصوصیات شیمیایی و ریزساختاری قیرهای اصلاح‌شده با ساسوبیت (به‌تنهایی و در کنار سایر افزودنی‌ها) در اثر اعمال شرایط پیرشدگی
۴) بررسی تغییرات انرژی آزاد سطحی قیرهای اصلاح‌شده با ساسوبیت و تحلیل نقش ویژگی‌های سطحی سنگدانه در عملکرد پیوند قیر و ساسوبیت
۵) مرور مطالعات مرتبط با ارزیابی چرخه عمر و اثرات زیست‌محیطی استفاده از ساسوبیت در فناوری آسفالت گرم

۲- ساسوبیت

ساسوبیت یکی از پرکاربردترین افزودنی‌های واکسی گرم دارای زنجیره بلند هیدروکربن آلفاتیک است که از تبدیل زغال‌سنگ به گاز در طی فرآیند عمل‌آوری به روش فیسچر- تراپسچ حاصل می‌گردد [۱۳]. این افزودنی در ابتدا به‌عنوان افزودنی ضد شیارشدگی مورداستفاده می‌گرفت و سپس به دلیل داشتن خاصیت کاهش ویسکوزیته قیر، به‌عنوان افزودنی گرم استفاده شد. این افزودنی به‌طور میانگین دارای وزن مولکولی ۱۲۰۰-۸۰۰ دالتون بوده و زیرمجموعه افزودنی‌های آلی گرم به رنگ سفید و یا شیری می‌باشد [۱۴] (شکل۸). ساسوبیت به دلیل عدم وجود ترکیبات خاکستر و اتم‌هایی مانند اکسیژن، نیتروژن و سولفور در برابر اکسیداسیون پایدار بوده و با حفظ ویژگی‌های ساختاری و دوام در دراز مدت می‌توان آن را به مقدار زیاد و طی مدت‌زمان طولانی در انبار ذخیره کرد [۱۳, ۱۵]. مشخصات فیزیکی و شیمیایی این افزودنی در جدول ۱ آورده شده است. مطابق شکل ۸ ساسوبیت به‌طور عمده به‌صورت گرانول تولیدشده و به‌طور مستقیم به قیر اضافه می‌شود. مقدار استفاده‌شده از این افزودنی در مطالعات مختلف بین ۰/۸ تا ۴ درصد وزن قیر مصرفی متغیر است، اما تحقیقات نشان داده است که میزان بیشتر از این مقدار ممکن است به ترک‌هایی در دمای پایین روسازی منجر شود. در اکثر مطالعات انجام‌شده، توصیه‌شده که حدود ۳ درصد وزنی قیر از این افزودنی برای فعالیت‌های تحقیقاتی و آزمایشگاهی مورداستفاده قرار گیرد. [۱۳, ۱۶, ۱۷]

[9] Saturate-Aromatic-Resin-Asphaltene (SARA)
[10] Fourier Transform Infrared (FTIR)
[11] Atomic Force Microscopy (AFM)
[12] Surface Free Energy (SFE)

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۸ **شکل ظاهری ساسوبیت**

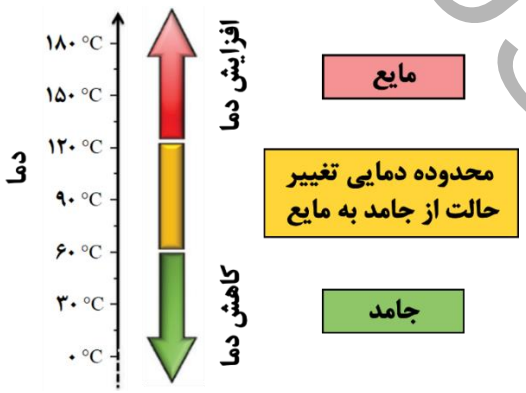
Fig. 8. Appearance of Sasobit

جدول ۱ **خصوصیات فیزیکی و شیمیایی ساسوبیت** [۱۸]

Table. 1. Physical and chemical properties of Sasobit [18]

آزمایش	نتیجه
چگالی (g/cm^3)	۰/۹۵
نقطه ذوب ($^{\circ}C$)	۱۱۵-۸۵
نقطه نرمی ($^{\circ}C$)	۹۷
درجه اشتعال ($^{\circ}C$)	۲۹۰
مقدار pH	خنثی

شکل ۹ محدوده دمایی تغییر حالت ساسوبیت را نشان می‌دهد و مطابق این شکل تغییر حالت ساسوبیت از حالت جامد به مایع در دمای حدود ۱۲۰-۶۰ درجه سانتی‌گراد رخداده و محدوده دمایی ۱۱۵-۸۵ درجه سانتی‌گراد نقطه ذوب آن می‌باشد. ساسوبیت در دمای بالاتر از نقطه ذوب با کاهش ویسکوزیته، دمای تراکم و اختلاط را حدود ۵۴-۱۸ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌دهد [۱۹]. مولکول‌های زنجیره بلند ساسوبیت به‌طور تقریبی شامل ۴۰ الی ۱۱۵ اتم کربن بوده و در محدوده دمایی نقطه ذوب در قیر حل می‌شود[۲۰]. این افزودنی در دماهای زیر نقطه ذوب خود ساختار شبکه بلوری در قیر پدید آورده و موجب پایداری بیشتر و افزایش ویسکوزیته قیر می‌شود [۲۱].



شکل ۹ **محدوده تغییر حالت ساسوبیت در اختلاط با قیر** [۲۲]

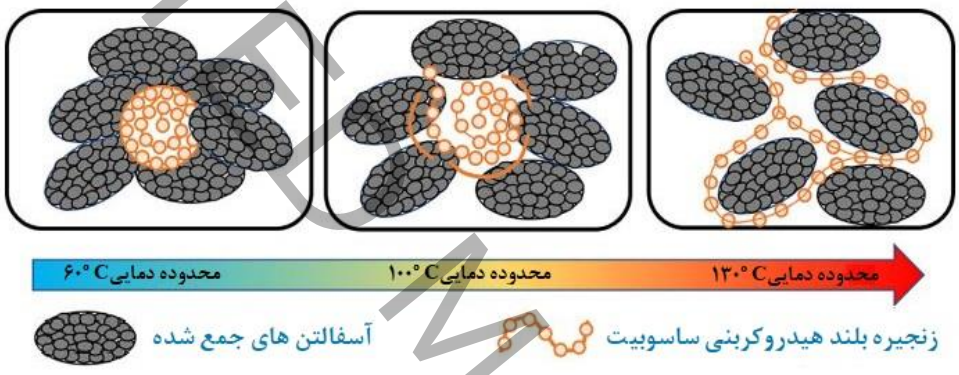
Fig. 9. Phase transition range of Sasobit in asphalt binder blends [22]

ACCEPTED MANUSCRIPT

۳- تأثیر ساسوبیت بر خاصیت رئولوژیکی و شیمی قیر

۳-۱- درجه نفوذ، نقطه نرمی، ویسکوزیته و دمای تراکم و ساخت

ساسوبیت به‌عنوان یک افزودنی، بسته به دمای تولید اثرات متفاوتی دارد و با توجه به عملکرد متفاوتش در دو دمای مختلف پایین و بالای نقطه ذوب می‌توان گفت که این افزودنی مطابق شکل ۱۰ با افزودن به قیر در دمای نقطه ذوبش موجب کاهش سفتی و ویسکوزیته قیر اصلاح‌شده می‌شود. همچنین قیر اصلاح‌شده در دمای پایین‌تر از نقطه ذوب ساسوبیت با افزایش ویسکوزیته و سفتی قیر همراه است و علت این امر تشکیل شبکه‌های کریستالی در قیر اصلاح‌شده توسط ساسوبیت می‌باشد [۱۸]. تحقیقات مختلف اثرات مثبت ساسوبیت را تأیید کرده‌اند. گائو و همکاران در سال ۲۰۱۸ نشان دادند که ساسوبیت نفوذپذیری قیر را کاهش و نقطه نرمی و مقاومت در برابر شیارشدگی را افزایش می‌دهد [۲۳]. گزارش جی و همکاران نیز حاکی از آن است که قیر اصلاح‌شده با ساسوبیت در دماهای بالاتر از نقطه ذوب رفتاری نیوتونی و در دماهای پایین‌تر رفتاری غیر نیوتونی دارد که به دلیل ساختار مشبک کریستالی است [۲۴]. همچنین، ژانگ و همکاران در سال ۲۰۱۵ دریافتند که افزودن ساسوبیت به مخلوط آسفالتی گرم، سفتی و پایداری دمایی را بهبود می‌بخشد و انتشار آلاینده‌ها را کاهش می‌دهد [۲۵].



شکل ۱۰ **تأثیر افزودنی ساسوبیت بر کاهش ویسکوزیته** [۲۶]

Fig. 10. The effect of Sasobit additive on viscosity reduction [26]

شکل ۱۰ به‌صورت شماتیک تأثیر ساسوبیت بر رفتار مولکولی آسفالتن‌ها و تغییر ویسکوزیته قیر را در محدوده دمایی ۶۰ الی ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۰ نمایش داده‌شده است، در محدوده دمایی ۶۰ درجه سانتی‌گراد ذرات آسفالتن به‌صورت خوشه‌های متراکم بوده و حرکت مولکولی آن‌ها به‌شدت محدودشده است. این چیدمان بیانگر حالت سفتی و چسبناکی قیر است که به دنبال آن در برابر تغییر شکل دائمی از مقاومت بالایی برخوردار می‌باشد. با افزایش دما (دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد)، ساسوبیت حرارت را جذب کرده و فعالیت درونی آن آغاز می‌شود و پیوند داخلی C — C موجود در ساختار آن شروع به حرکت و چرخش می‌کند. در این حالت، ذرات آسفالتن اندکی از هم فاصله می‌گیرند و یک ساختار شبکه مانند شروع به شکل‌گیری می‌کند. با افزایش بیشتر دما (دمای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد)، زنجیره‌های بلند هیدروکربنی ساسوبیت به‌طور کامل کشیده شده و ذرات آسفالتن را به‌طور گسترده از یکدیگر جدا می‌کنند. این پراکندگی به کاهش ویسکوزیته کمک کرده و دمای تولید مخلوط آسفالتی کاهش می‌یابد [۲۶]. علاوه بر رفتار ذوب و تشکیل ساختارهای بلوری، ویژگی‌های حرارتی قیر اصلاح‌شده با ساسوبیت نیز می‌تواند در تفسیر عملکرد این افزودنی موردتوجه قرار گیرد. در این راستا، مطالعاتی با استفاده از آزمایش‌های حرارتی مانند آنالیز گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC) به بررسی پارامترهای حرارتی قیرهای اصلاح‌شده با ساسوبیت پرداخته‌اند. کین و همکاران با بررسی رفتار حرارتی قیرهای اصلاح‌شده با ساسوبیت گزارش کردند که افزودن این اصلاح‌کننده در مقادیر ۱ و ۳ درصد وزنی، تغییر قابل‌توجهی در دمای انتقال شیشه‌ای (Tg) ایجاد نمی‌کند و مقدار Tg نمونه‌های اصلاح‌شده نزدیک به قیر پایه باقی می‌ماند. این موضوع نشان می‌دهد که اثر ساسوبیت بر عملکرد دمایی قیر الزاماً از طریق تغییر در انتقال شیشه‌ای رخ نمی‌دهد، بلکه بیشتر به تغییرات ایجادشده در ساختار فیزیکی و رفتار تبلور اجزای

ACCEPTED MANUSCRIPT

واکسی مرتبط است [27]. همچنین، نتایج آزمایش DSC نشان داده است که حضور ساسوبیت موجب ایجاد پیک‌های حرارتی مرتبط با ذوب فاز واکسی در قیر می‌شود. تغییرات مشاهده‌شده در دمای ذوب و آنتالپی ذوب، بیانگر تأثیر مقدار ساسوبیت و نحوه تشکیل و پراکندگی ساختارهای کریستالی آن در ماتریس قیری است [27]. مطالعات انجام‌شده بر روی افزودنی‌های واکسی نیز نشان داده‌اند که تشکیل فازهای بلوری می‌تواند ویژگی‌های گذار حرارتی و رفتار دمای پایین قیر را تحت تأثیر قرار دهد [28]. اگرچه اطلاعات مستقیم مربوط به ظرفیت گرمایی ویژه (Cp) قیرهای اصلاح‌شده با ساسوبیت محدود است، بررسی این پارامتر در کنار سایر ویژگی‌های حرارتی می‌تواند دیدگاه کامل‌تری از رفتار دمایی قیر اصلاح‌شده ارائه دهد [12].

۲-۳- آزمایش‌های عملکردی قیر (پارامترهای شیارشدگی، خستگی و ترک‌خوردگی دمای پایین)

امروزه جهت ارتقای خصوصیات عملکردی قیر از افزودنی‌های مختلف استفاده می‌شود که برخی از این افزودنی‌ها در کنار افزایش عملکرد دمایی قیر موجب افزایش مصرف انرژی و آلاینده‌ها و نگرانی‌های زیست‌محیطی می‌شوند. از طرفی مبحث بازیافت و استفاده از تراشه آسفالت در روسازی و استفاده از فنّاوری گرم از مسائل مهم کاهش مصرف انرژی و حفظ بهتر محیط‌زیست می‌باشد. در این راستا همواره محققان مطالعات متعددی در خصوص رفع مشکلات اصلاح‌کننده‌ها و قیرهای اصلاح‌شده انجام داده‌اند [۲۹-۳۲].

قیرهای پلیمری اصلاح‌شده به‌خصوص قیر اصلاحی با پودر لاستیک و SBS همواره به علت ویسکوزیته بسیار بالا با مشکل کارایی پایین در اختلاط روبه‌رو هستند که در میان استفاده از افزودنی‌های گرم همچون ساسوبیت جهت افزایش کارایی قیر موردمطالعه و بررسی می‌باشند. استفاده از فنّاوری افزودنی گرم می‌تواند دمای تولید قیر و مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با خرده لاستیک را کاهش دهد که در این میان ساسوبیت ویسکوزیته قیر اصلاح‌شده را با ذوب شدن در دمای بالا کاهش می‌دهد. مطالعات متعدد قبلی نشان داده‌اند که ساسوبیت می‌تواند عملکرد قیرهای اصلاح‌شده با پودر لاستیک را در دمای بالا با تشکیل یک ساختار شبکه‌ای کریستالی بهبود بخشیده و مقاومت شیارشدگی را افزایش دهد و درعین‌حال بر عملکرد دمای متوسط قیر اصلاحی تأثیر منفی داشته و مقاومت خستگی آن را کاهش دهد [۳۳]. در مطالعه‌ای تأثیر چهار نوع افزودنی گرم شامل ساسوبیت، اووترم، EC120 و کف قیری بر خواص رئولوژیکی قیر با ویسکوزیته بالا (HVA) به‌منظور افزایش کارایی آن در روسازی آسفالتی متخلخل موردبررسی قرار گرفت. ساسوبیت و اووترم ویسکوزیته قیر HVA را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش داده و دمای بالای عملکردی قیر HVA را ارتقا دادند. نتایج خستگی نشان داد که ساسوبیت مقاومت خستگی HVA را در دمای متوسط به‌طور قابل‌ملاحظه کاهش داده و تأثیر منفی در مقاومت ترک‌خوردگی HVA در دمای پایین دارد[۳۴]. البته اضافه کردن نانو مونتموریلونیت k10 می‌تواند تأثیر منفی ساسوبیت بر خستگی و مقاومت در برابر ترک‌خوردگی در دمای پایین قیر را کاهش دهد [۳۵]. در ادامه خلاصه‌ای از مطالعات انجام‌گرفته در مورد تأثیر ساسوبیت بر روی خصوصیات عملکردی قیرهای پلیمری اصلاح‌شده در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲ **خلاصه‌ای از مطالعات در مورد تأثیر ساسوبیت بر روی خصوصیات عملکردی قیرهای پلیمری اصلاح‌شده**

Table 2. A summary of studies on the effect of Sasobit on the performance properties of polymer-modified binders

درصد افزودنی‌های مورداستفاده	تأثیر ساسوبیت	سال	محققین
Sasobit: ۲٪, ۳٪, ۴٪ Evotherm: ۰/۸٪, ۰/۶٪, ۰/۴٪ SBS: ۵٪	افزایش پارامتر شیارشدگی و کاهش مقاومت ترک‌خوردگی دمای پایین، اووترم باعث بهبود ترک‌خوردگی و کاهش پارامتر شیارشدگی، ترکیب هر سه موجب افزایش عمر خستگی	۲۰۲۳	Li et al[36]
Sasobit: ۳٪ Evotherm: ۰/۵٪ RAP Binder: ۷۰٪, ۵۰٪, ۳۰٪, ۰٪	افزایش پارامتر شیارشدگی دمای بالا و پارامتر خستگی در دمای متوسط (نسبت به اووترم) و تأثیر منفی در ترک‌خوردگی دما پایین	۲۰۲۳	Xu et al[37]
Sasobit: ۴٪ SBR: ۳٪	افزودن ساسوبیت به قیر اصلاحی با SBR موجب افزایش پارامتر شیارشدگی قیر پیر نشده، حفاظت از SBR در برابر پیرشدگی کوتاه‌مدت	۲۰۲۳	Wu et al[38]

ACCEPTED MANUSCRIPT

درصد افزودنی‌های مورداستفاده	تأثیر ساسوبیت	سال	محققین
Sasobi t: ٪۰ ,٪۲,۵ ,٪۳ ,٪۳,۵ SBS: ٪۵	افزایش سازگاری و پایداری قیر، کاهش درجه پیری و ویسکوزیته قیر اصلاح‌شده با SBS	۲۰۲۱	Liu et al[39]
Sasobi t: ٪۳ SBS: ٪۳ , ٪۴ CR: ٪۱۰ , ٪۱۵	افزایش عمر خستگی قیر اصلاح‌شده با پلیمر به‌ویژه برای نمونه‌های قیری پیر شده	۲۰۲۱	Yue et al[40]
Sasobi t: ٪۲, ٪۳, ٪۴ SBS: ٪۲, ٪۳, ٪۴, ٪۵, ٪۶, ٪۷,٪۸ CR: ٪۴, ٪۶, ٪۸ , ٪۱۰	مقاومت در برابر شیارشدگی ترکیب سه افزودنی بالاتر از قیر اصلاحی با SBS، کاهش دما و هزینه اختلاط نسبت به قیر اصلاحی با SBS	۲۰۲۰	Erkuş et al[41]
Sasobi t: ٪۲ CR: ٪۰, ٪۵, ٪۱۰, ٪۱۵ ,٪۲۲	افزودن ساسوبیت موجب کاهش مقاومت در برابر خستگی قیر پایه و افزایش قیر اصلاح‌شده با CR	۲۰۲۰	Wang et al[42]
Sasobi t: ٪۱, ٪۲,۵,٪ Paraffin: ٪۳ ,٪۵	افزایش پارامتر شیارشدگی در دمای بالا و بهبود تأثیر منفی بر مقاومت در برابر خستگی دمای متوسط و پایین	۲۰۱۹	Harooni et al[43]

استفاده هم‌زمان از چندین اصلاح‌کننده می‌تواند به دلیل برهمکنش‌های چندگانه، عملکرد بهتری در قیر و مخلوط‌های آسفالتی داشته باشد. در این راستا صبحی و همکاران به‌منظور افزایش کارایی و کاهش ویسکوزیته قیر اصلاح‌شده با گیلسونایت از ساسوبیت استفاده نموده و نتایج نشان داد ساسوبیت علاوه بر افزایش کارایی قیر، عملکرد دمای بالای قیر اصلاحی را ارتقا می‌دهد [۴۴]. در تحقیق دیگری نیز چو و همکاران گزارش دادند که ساسوبیت جهت ارتقای خاصیت قیر و مخلوط ماتریکس اصلاحی با گیلسونایت و پودر لاستیک عملکرد بهتری در بهبود خصوصیات رئولوژیکی قیر اصلاحی دارد [۴۵]. لاگوس و همکاران در تحقیقی با استفاده از سه آزمایش بازیابی خزش استرس چندگانه (MSCR) ، جاروب دامنه خطی (LAS) و تست انرژی بازده قیر خواص رئولوژیکی قیرهای اصلاح‌شده با پودر لاستیک، SBS و ساسوبیت را در درصدهای مختلف مورد ارزیابی قراردادند. نتایج نشان داد افزودن ساسوبیت به قیرهای اصلاح‌شده CR-SBS مقاومت شیارشدگی، بازیابی الاستیک، عمر خستگی و انرژی تسلیم قیرها را بهبود می‌بخشد، ولی در کنار افزایش ویسکوزیته مقدار شکل‌پذیری آن‌ها را کاهش می‌دهد [۴۶]. یویی و همکاران به دنبال مطالعات قبلی خود در تحقیق دیگر نشان دادند که افزودن ساسوبیت پایداری حرارتی، مقاومت در برابر خستگی و قابلیت خودترمیم شوندگی قیرهای پلیمری اصلاح‌شده را افزایش داده و تأثیر جزئی بر عملکرد دمای پایین قیر اصلاحی دارد [۴۷]. در مطالعه دیگری ونگ و همکاران به این نتیجه رسیدند که قیر بازیافتی بازیافت شده را می‌توان تا مقدار ۴۰ درصد با ساسوبیت استفاده کرد بدون اینکه تأثیر منفی بر عملکرد مخلوط آسفالتی و قیر داشته باشد [۴۸] و همچنین افزودن نانو سیلیس با افزایش پتانسیل خودترمیمی قیر بازیافتی حاوی ساسوبیت می‌تواند آسیب خستگی قیر بازیافتی را به تأخیر اندازد [۴۹]. زارع متخصص و همکاران با استفاده از آزمایش‌های MSCR و LAS خواص رئولوژیکی قیرهای پیر شده حاوی انواع افزودنی گرم را در درصدهای مختلف قیر پیر شده مورد ارزیابی قراردادند. نتایج نشان داد که قیرهای پیر شده حاوی افزودنی‌های گرم نسبت به قیرهای پیر شده همواره پارامتر شیارشدگی کمتر و خستگی بالاتری را دارند. در این میان ساسوبیت و اووترم به ترتیب بالاترین مقاومت شیارشدگی و خستگی را نشان دادند [۵۰] و نتایج پژوهش لی و همکاران مشابه این موضوع می‌باشد [۵۱]. البته با افزایش درصد قیر پیر شده در مخلوط‌های قیر پیر شده حاوی ساسوبیت تأثیر منفی ساسوبیت بیشتر می‌شود [۳۷].

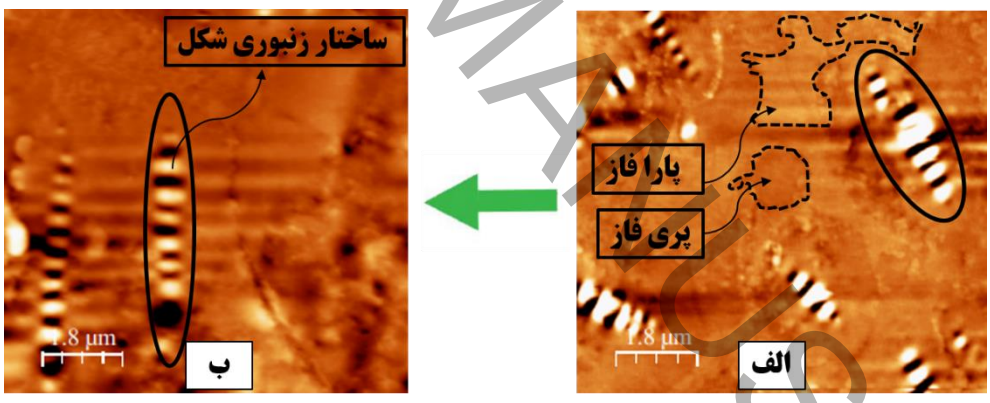
دوآن و همکاران در سال ۲۰۲۳ در پژوهشی از ۴ نوع افزودنی واکسی گرم با وزن مولکولی مختلف ازجمله ساسوبیت با وزن مولکولی ۱۲۰۰-۸۰۰ دالتون، جهت بررسی خصوصیات رئولوژیکی قیرهای اصلاحی استفاده کرد و نتایج حاکی از آن بود که افزودنی واکسی با وزن‌های مولکولی ۱۵۰۰-۱۳۰۰ دالتون بهترین تأثیر بر کاهش ویسکوزیته، مقاومت در برابر تغییر شکل و شیارشدگی در دماهای بالا را داشتند که به علت وزن مولکولی مناسب به‌خوبی در قیر حل‌شده و به‌عنوان روان کننده عمل می‌کنند. در مقابل، افزودنی واکس با وزن مولکولی کم (۷۰۰-۴۰۰ دالتون) می‌توانند مقاومت در برابر ترک‌خوردگی در دمای پایین قیرهای اصلاحی را بهبود ببخشد، اما بر روی مقاومت شیارشدگی در دمای بالا تأثیر منفی دارند [۱۴].

ACCEPTED MANUSCRIPT

۳-۳- آزمایش ریزساختاری میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)

میکروسکوپ نیروی اتمی یک تکنیک تصویربرداری سطحی پیشرفته است که جهت ارزیابی ریزساختار و خواص نانو مکانیکی قیر مورداستفاده قرار می‌گیرد. این روش امکان درک بهتر تعامل بین قیر-افزودنی را در مقیاس نانومتری فراهم می‌کند. در تصاویر AFM معمولاً می‌توان چندین فاز یا قسمت مختلف را تشخیص داد که عبارت‌انداز فاز کاتانا یا ساختار زنبوری، پارافاز که محیط پراکنده در ساختار زنبوری است، پری فاز که نواحی اطراف ساختار زنبوری است و فاز سال که به‌عنوان فاز پس‌زمینه شناخته می‌شود. در بعضی موارد به دلیل شرایط آزمایش و ویژگی‌های قیر، برخی از مراحل ذکرشده ممکن است در ساختار توپوگرافی قابل‌تشخیص نباشند [۵۲, ۵۳] و اغلب ریزساختار قیر عمدتاً از پری فاز و پارافاز تشکیل می‌شود [۵۴، ۵۵].

در تحقیقات متعددی از آزمایش AFM برای ارزیابی ریزساختار قیر گرم با استفاده از افزودنی‌های مختلف صورت گرفته است و در یکی از این مطالعات، ریزساختار قیر اصلاح‌شده با سه نوع افزودنی مختلف ساسوبیت، ادورا و اووترم موردبررسی قرارگرفته و نتایج این پژوهش نشان داد که دو افزودنی ادورا و اووترم ساختار زنبوری در قیر اصلاحی را تغییر نمی‌دهند و تأثیری بر روی آن ندارند ولی افزودنی ساسوبیت باعث کاهش عرض ساختارهای زنبوری شکل و کشیده‌تر شدن آن ساختارها در قیر اصلاح‌شده می‌شود [۵۶] (شکل ۱۱ قسمت الف و ب) و تعداد ساختار زنبوری شکل و طول آن‌ها با افزایش درصد ساسوبیت به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد [۵۷, ۵۸]. درواقع تشکیل ساختار زنبوری شکل به دلیل آرایش و احاطه کرده آسفالتن در اطراف شبکه کریستالی واکس تحت نیروهای واندروالسی است [۱۴]. این تغییرات ساختارهای زنبوری شکل ممکن است با مولکول‌های واکسی در قیر اصلاح‌شده با ساسوبیت ارتباط داشته باشند [۵۶]. نتایج پژوهش هو و همکاران نشان داد که قیر اصلاح‌شده با SBS نسبت به قیر پایه دارای ساختار زنبوری شکل ریزتر و پایدارتر است و افزودن ساسوبیت زبری سطح و چسبندگی قیر اصلاح‌شده با SBS را افزایش می‌دهد [۵۹]. در تحقیق دیگری لی و همکاران (۲۰۲۳) ویژگی‌های چسبندگی قیر بازیافتی گرم حاوی SBS را اندازه‌گیری کردند و نتایج نشان داد که افزودن ساسوبیت می‌تواند مورفولوژی قیر اصلاحی را تغییر داده و چسبندگی نانویی قیر اصلاح‌شده را به دلیل تبلور بر روی سطح قیر افزایش دهد، اگرچه این نتیجه برخلاف نتایج چسبندگی ماکروسکوپیک است [۵۸].



شکل ۱۱ ریزساختار و فازهای مختلف الف) قیر پایه ب) قیر اصلاح‌شده با ساسوبیت [۵۶]

Fig. 11. Microstructure and various phases of: a) neat binder, b) Sasobit-modified binder [56]

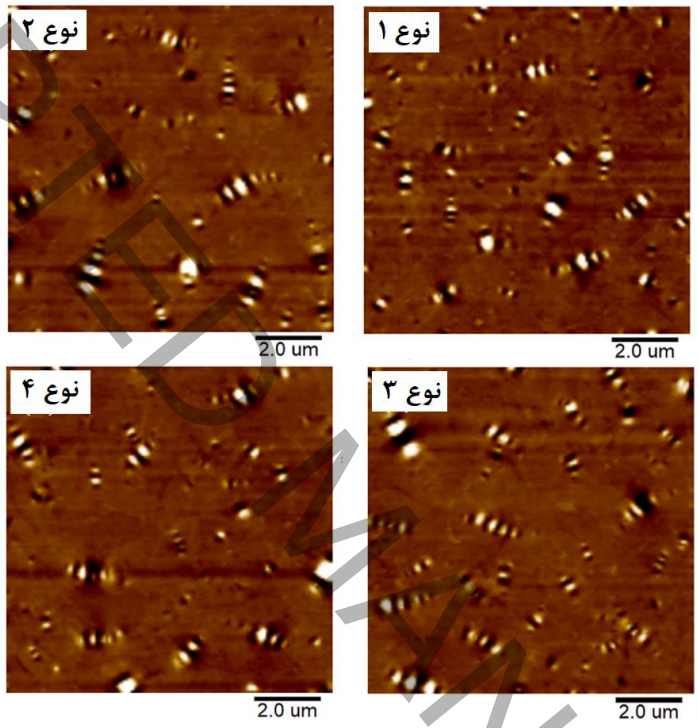
وزن مولکولی افزودنی‌های واکسی بر روی ریزساختار و فازهای مختلف موجود در قیر تأثیر متفاوتی دارد به‌طوری‌که در پژوهشی مطابق جدول ۳، از ۴ نوع افزودنی گرم واکسی با وزن مولکولی متفاوت جهت اصلاح با قیر استفاده شد و مطابق شکل ۱۲ نتایج ریزساختار نشان داد که با افزایش وزن مولکولی، تعداد ساختار زنبوری شکل کاهش‌یافته و اندازه طولی آن‌ها افزایش می‌یابد. درواقع، تشکیل ساختار زنبوری شکل به دلیل آرایش و انبوه آسفالتن در اطراف بلورهای واکس تحت تأثیر نیروهای واندروالسی رخ می‌دهد. از طرفی دیگر افزودنی واکسی با وزن مولکولی کم می‌تواند باعث ایجاد میکرو کریستال در قیر پایه شود [۱۴].

جدول ۳ مشخصات فیزیکی افزودنی‌های گرم واکسی [۱۴]

Table 3. Physical properties of warm-mix wax additives [14]

ACCEPTED MANUSCRIPT

ویژگی	افزودنی واکسی نوع ۱	افزودنی واکسی نوع ۲ (ساسوبیت)	افزودنی واکسی نوع ۳	افزودنی واکسی نوع ۴
وزن مولکولی (گرم بر مول)	۷۰۰-۴۰۰	۱۲۰۰-۸۰۰	۱۵۰۰-۱۳۰۰	۴۰۰۰-۱۵۰۰
درجه شکل فیزیکی	حالت نیمه جامد	گرانول	گرانول	گرانول
چگالی (۲۵°C)	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۹۳	۰/۹۳
نقطه ذوب	۷۰-۶۰	۱۱۵-۱۰۰	۱۱۵-۱۰۵	۱۴۵-۱۳۰
نوع گروه	هیدروکربن‌های آلفاتیک	هیدروکربن‌های آلفاتیک	هیدروکربن‌های آلفاتیک	هیدروکربن‌های آلفاتیک

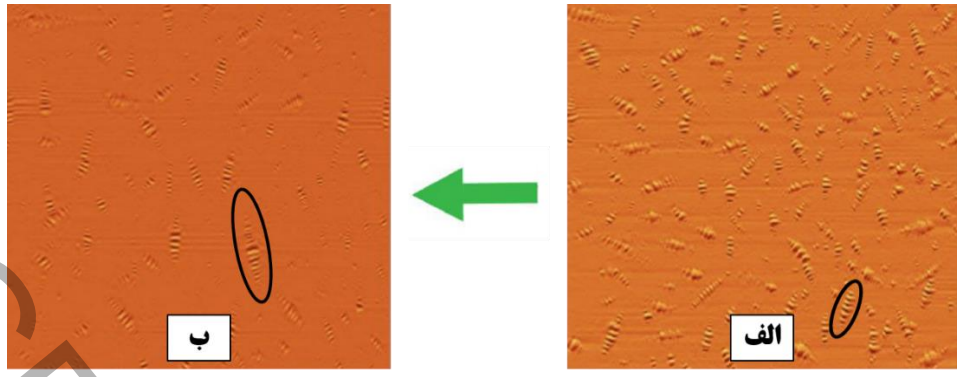


شکل ۱۲ **ریزساختار و فازهای مختلف قیرهای اصلاح‌شده با افزودنی‌های واکسی با وزن‌های مولکولی متفاوت** [۱۴].

Fig. 12. Microstructure and different phases of modified binders with waxy additives of different molecular weights [14]

مطالعات پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد آزمایش AFM علاوه بر ارائه ریزساختار قیر، کاربردهای مختلفی در جهت ارائه خواص نانو مکانیکی قیر و افزودنی‌ها دارد. الرواشد و همکاران در سال ۲۰۱۴ بر اساس نتایج مطالعات خود نشان دادند که آزمایش AFM ابزار مفیدی برای ارزیابی چسبندگی مخلوط قیری اصلاح‌شده حاوی افزودنی گرم در حضور آب است [۶۰]. پژوهشگران متعددی امکان استفاده از آزمایش AFM را برای توصیف چسبندگی قیر با استفاده از نظریه انرژی آزاد سطحی و دینامیک مولکولی آن تأیید کرده‌اند [۶۱, ۶۲]. در این تحقیقات، از آزمایش AFM به‌عنوان یک ابزار مهم برای بررسی و اندازه‌گیری ویژگی‌های چسبندگی سطح قیر استفاده‌شده و از طریق این آزمایش می‌توان اطلاعات مفهومی و کمی در مورد ویژگی‌های سطحی قیر به دست آورد. محققان همچنین از آزمایش AFM برای بررسی تأثیر شرایط مختلف پیرشدگی و بازیافت بر روی خواص چسبندگی قیر استفاده کردند. منصوری و مدرس مشاهده کردند که با پیرشدگی قیر تعداد ساختار زنبوری کمتر و طول ساختار نسبت به حالت اولیه در قیر پایه بلندتر می‌شود [۵۷] (مطابق شکل ۱۳ قسمت الف و ب).

ACCEPTED MANUSCRIPT

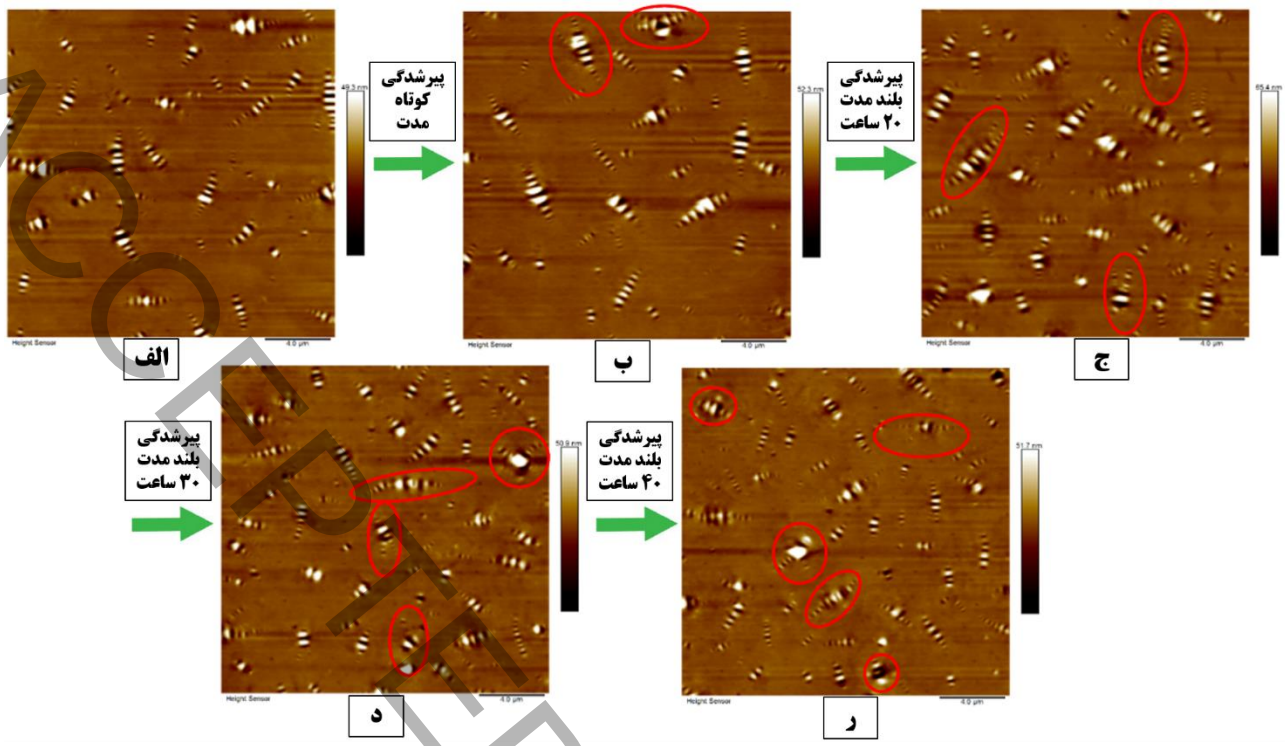


شکل ۱۳ **تأثیر پیرشدگی قیر بر روی ریزساختار و فازهای مختلف قیر پایه الف)قبل از پیرشدگی، ب)بعد از پیرشدگی [۵۷]**

Fig. 13. The effect of asphalt binder aging on the microstructure and various phases of neat binder: a) before aging, b) after aging [57]

مطالعه‌ای دیگری نتایج نشان داد که با افزایش میزان پیرشدگی تعداد ساختاری زنبوری بیشتر شده و ویژگی‌های مورفولوژیکی و ریزساختاری قیر با افزایش تدریجی سطح پیرشدگی به‌طور قابل‌توجهی تغییریافته‌اند. در این مطالعه قیر پایه در ابتدا تحت پیرشدگی کوتاه‌مدت و سپس بلندمدت به مدت‌زمان‌های ۲۰، ۳۰ و ۴۰ ساعت قرار گرفت و نتایج افرایش تعداد ساختار زنبوری شکل را نشان داد که این پدیده می‌تواند ناشی از افزایش قطبیت قیر در طول زمان پیرشدگی باشد. به‌عبارت‌دیگر، با افزایش پیرشدگی، قیر به سمت قطبی‌تر شدن میل پیدا می‌کند که موجب جذب ریزساختارهای مجاور و درنهایت تشکیل تجمع‌های بیشتری می‌شود [۶۳]. همچنین میزان بلندی طول ساختار زنبوری شکل در طول فرآیند پیرشدگی با افزایش شدت پیرشدگی متغیر بود به‌طوری‌که در ابتدا، طول ساختارهای زنبوری شکل با شروع پیرشدگی افزایش‌یافته و سپس کاهش می‌یابد. طولانی‌ترین ساختارهای زنبوری شکل در مدت‌زمان ۲۰ ساعت پیرشدگی مشاهده شد و پس‌ازآن، طول این ساختارها به‌تدریج کاهش‌یافته و ساختار زنبوری شکل کوچک‌تری تشکیل شدند (مطابق شکل ۱۴). در پیرشدگی کوتاه‌مدت واکنش‌های اکسیداسیونی اولیه و از دست رفتن اجزای فرار موجب افزایش تمایز فازها مختلف در سطح قیر شده و درنتیجه واکس‌های موجود در قیر پس از اکسیداسیون متبلور می‌شوند و ساختار زنبوری شکل با وضوح بیشتر نمایان می‌شود. اما در پیرشدگی بلندمدت تفاوت بین فازها کاهش پیداکرده و موجب کاهش وضوح و حتی ادغام ساختار زنبوری با فازهای دیگر قیر می‌شود [۶۴, ۶۵]. به‌طور مشابه مطالعات دیگری نیز دیدگاه متفاوتی را در خصوص افزایش و کاهش طول ساختار زنبوری شکل در طی فرآیند پیرشدگی نشان می‌دهند [۲۲, ۶۶-۷۰] و تفاوت این امر می‌تواند به دلیل نوع قیر و همچنین تراکم آسفالتن، تبلور واکس‌ها [۷۱]، تبخیر و پلیمریزاسیون [۷۲] و تغییر در شکستن آروماتیک ناشی از پیرشدگی [۷۳] باشد که البته در میان این فرضیات، نظریه تبلور واکس در حال حاضر به‌عنوان نظریه حاکم شناخته می‌شود. واکس‌ها نسبت به تغییرات دما حساس هستند و زمانی که حلالیت آن‌ها به دلیل پیرشدگی کاهش می‌یابد، می‌توانند تبلوریافته و ساختارهای زنبوری را تشکیل دهند [۶۶, ۷۴]. برخلاف قیر پایه، تأثیر پیرشدگی کوتاه‌مدت و بلندمدت بر ساختار زنبوری شکل قیرهای اصلاح‌شده با ساسوبیت و ادوورا محدود بوده و تغییرات قابل‌توجهی ندارد و این نشان‌دهنده پایداری بیشتر در برابر پیرشدگی است [۶۵].

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۱۴ **تأثیر مدت‌زمان پیرشدگی (کوتاه‌مدت و بلندمدت) قیر بر روی ساختار زنبوری شکل قیر پایه** [۶۶]

Fig. 14. The effect of asphalt binder aging duration (short-term and long-term) on the bee-like structure of neat binder [66]

در ادامه در جدول ۴ خلاصه‌ای از کاربردهای مختلف AFM در پژوهش‌های پیشین آورده شده است.

جدول ۴ **خلاصه‌ای از کاربردهای مختلف AFM در پژوهش‌های پیشین**

Table 4. A summary of various AFM applications in previous research

محققین	سال	نوع قیر و هدف از آزمایش	نتایج
Kooshaeian et al [75]	۲۰۲۶	بررسی ریزساختاری قیر حاوی ساسوبیت و قیر اصلاح‌شده با ساسوبیت و EVA تحت شرایط مختلف پیرشدگی	ساسوبیت و EVA موجب تغییر ساختارهای زنبوری و افزایش ناهمواری سطح قیر شدند و پس از پیرشدگی ناهمواری سطح قیرهای اصلاح‌شده کمتر از قیر پایه بود
Wang et al [76]	۲۰۲۳	اصلاح‌شده با ساسوبیت، مقایسه پیرشدگی قیر به دو روش جداسازی اکسیژن و پیرشدگی فرابنفش (UV) همراه با اکسیژن	در شرایط پیرشدگی فرابنفش (UV) همراه با اکسیژن ساختار زنبوری مانند دارای طول کوتاه‌تر و نواحی تیره‌تر بیشتری دارد
Lin et al [۷۷]	۲۰۲۲	قیر بازیافت شده و قیر پیرشده آزمایشگاهی، مقایسه قیر پیرشده (RAP) و قیر پس از پیرشدگی	ساختار زنبوری شکل پس از پیر شدن ظاهر می‌شود و ساختار زنبوری شکل در RAP مرکز آن سیاه و نواحی اطراف آن به رنگ روشن است.

ACCEPTED MANUSCRIPT

نتایج	نوع قیر و هدف از آزمایش	سال	محققین
پیرشدگی آزمایشگاهی با پیرشدگی واقعی متفاوت است			
افزودن SBS می‌تواند توزیع یکنواخت ساختار زنبوری شکل را نتیجه دهد	تغییرات ریزساختاری قیر پس از پیرشدگی توسط اشعه فرابنفش و آب	۲۰۲۱	Gao et al [۷۸]
قیر اصلاح‌شده SBS دارای ساختار زنبوری بهتری نسبت به سایر قیرهای اصلاح‌شده است	قیرهای اصلاح‌شده مختلف	۲۰۲۱	Ji et al [۷۹]
افزودن SBS می‌تواند توزیع یکنواخت ساختار زنبوری شکل را نتیجه دهد	قیر اصلاح‌شده با SBS پس از پیرشدگی	۲۰۱۸	Cavalli et al [۸۰]
عملکرد قیر بازیافت شده را ارزیابی کرده و بهینه‌ترین ترکیب بازیافت کننده را به دست آورده‌اند	قیر بازیافت شده	۲۰۱۸	Oldham et al [81]
پیرشدگی قطبیت، ویسکوزیته و سختی قیر را افزایش داد	قیر بازیافت شده	۲۰۱۸	Yang et al [۸۲]
خواص مکانیکی قیر مانند چسبندگی، سختی و مدول الاستیک تخمین زده شد	قیر پایه	۲۰۱۵	Aguiar-Moya et al [83]
تفاوت‌های چسبندگی برای نواحی مختلف در قیر بازیافت شده را تحلیل کرده و پارامترهای میکرومکانیکی آن‌ها را کمی سازی کرده‌اند	قیر بازیافت شده	۲۰۱۴	Yu et al [۸۴]
حضور ساختارهای زنبوری شکل به واکس بستگی دارد	بخش‌های قیر قبل و بعد از حذف واکس	۲۰۱۱	Pauli et al [85]
مکانیزم تشکیل ساختارهای زنبوری شکل در مورفولوژی میکرویی قیر بررسی شد	مورفولوژی میکرویی قیر	۲۰۰۶	Masson et al [۵۵]
مشاهده یک ساختار موجی به شکل ساختار زنبوری که مربوط به آسفالتن بود	قیر پایه	۱۹۹۶	Leober et al [۵۴]

در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از آزمایش AFM در ارزیابی ریزساختار و خواص نانو مکانیکی قیر با افزودنی‌های مختلف بسیار کاربردی بوده و در کنار آن آزمایش انرژی آزاد سطحی نیز می‌تواند به‌عنوان مکمل این آزمایش مورداستفاده قرار گیرد. با استفاده از ترکیب این دو آزمایش می‌توان ویژگی‌های چسبندگی سطح قیر را به‌صورت دقیق‌تر موردبررسی قرار داده و اطلاعات مفهومی

ACCEPTED MANUSCRIPT

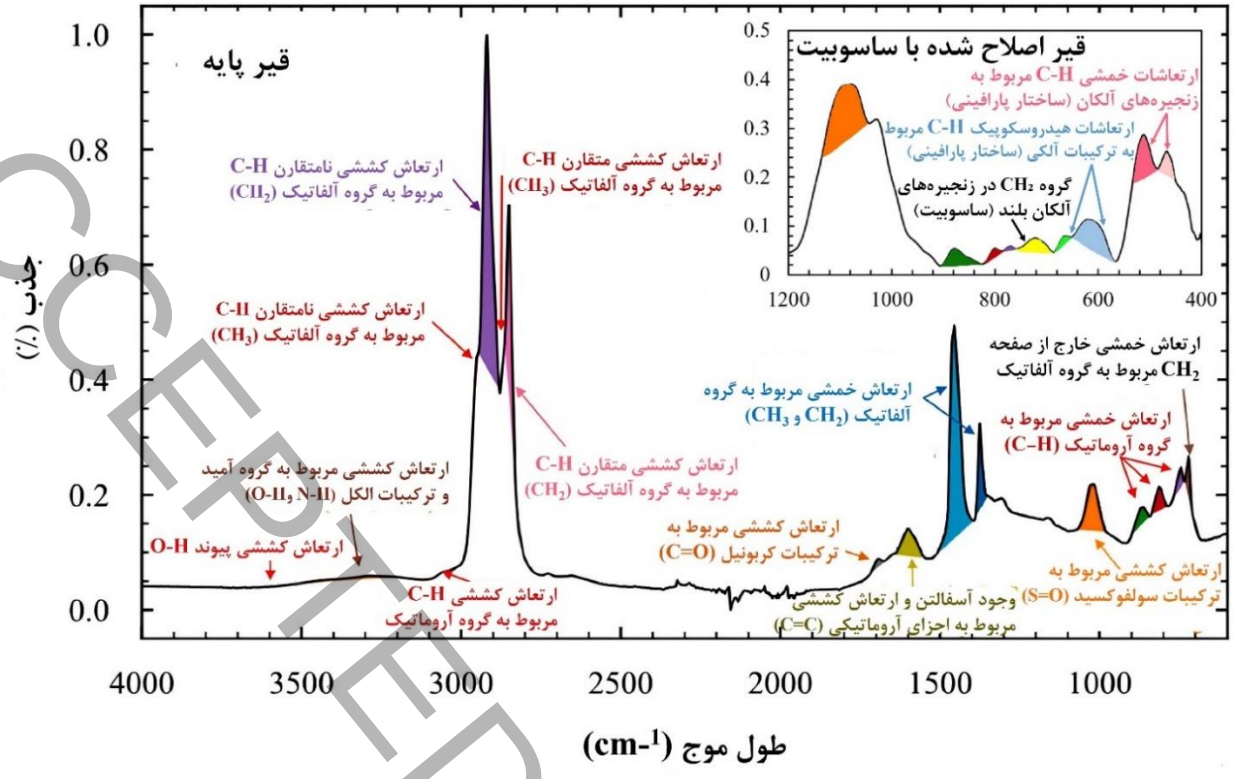
و عددی در مورد تعاملات سطحی و ویژگی‌های سطح قیر را به دست آورد. این اطلاعات می‌تواند در اصلاح و فرآیندهای مرتبط با قیر کاربردی بوده و به توسعه خاصیت قیر اصلاحی با ویژگی‌های مطلوب موردنظر کمک کند.

۴-۳- آزمایش ریزساختاری طیف‌سنجی مادون‌قرمز (FTIR)

آزمایش FTIR یک ابزار قوی جهت شناسایی و بررسی گروه‌های عملکردی و عامل‌های شیمیایی موجود در قیر خالص و قیرهای اصلاح‌شده با انواع افزودنی‌های مختلف بوده و در تعیین ساختار اجزا آن‌ها کمک می‌کند (شکل ۱۵). در این آزمایش مقدار اشعه جذب‌شده توسط پیوندهای کووالانسی در مولکول‌ها اندازه‌گیری می‌شود و چون جذب مادون‌قرمز توسط پیوندهای گوناگون متفاوت است، همین تفاوت موجب تشخیص گروه‌های عملکردی شیمیایی در نمونه‌ها می‌شود [۸۶, ۸۷]. مطالعات مختلفی در خصوص تحلیل ترکیبات شیمیایی و گروه‌های عاملی موجود در قیرهای اصلاح‌شده با ساسوبیت انجام‌شده و در هر مطالعه پارامترهای مختلف همچون پیرشدگی و حساسیت رطوبتی بر روی ساسوبیت و افزودنی‌های اصلاح‌شده با آن موردبررسی قرارگرفته است. شکل ۱۵ طیف FTIR مربوط به قیر پایه و قیر اصلاح‌شده را به‌صورت مقایسه‌ای نمایش می‌دهد. در این طیف‌ها، حضور کلیه گروه‌های عاملی در نواحی جذبی مختلف (مانند پیوندهای C–H، O–H و کربونیل) قابل‌مشاهده است و تغییرات ساختاری ناشی از اصلاح قیر با ساسوبیت از طریق بررسی شدت و موقعیت نمایش داده‌شده است.

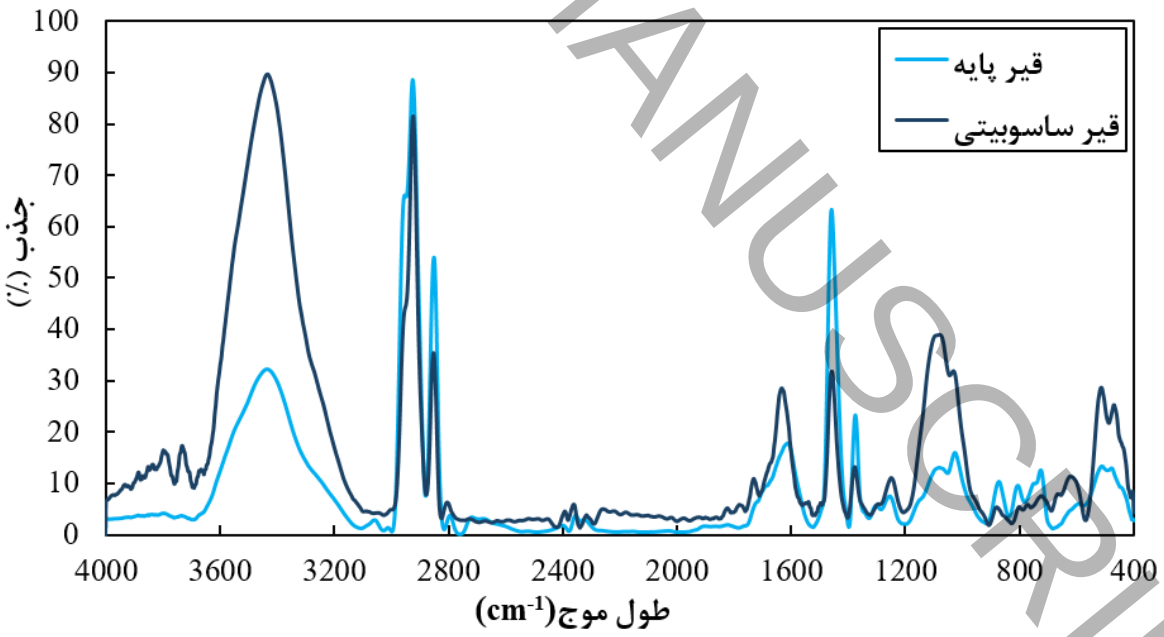
در مطالعه‌ای صبحی و همکاران در ۲۰۲۲ گزارش دادند که افزودن ساسوبیت به قیر پایه باعث افزایش شدت جذب در طول‌موج‌های $3100\ cm^{-1}$ و $3600\ cm^{-1}$ نسبت به قیر پایه می‌شود (مطابق شکل ۱۶). این طول‌موج مربوط به گروه آمید و پیوندهای N-H و ترکیبات الکل (هیدروکسیل O-H) از گروه عاملی کربوسیلیک اسید است [۴۴]. گروه‌های عاملی که با پیوند هیدروژنی همراه هستند با آب بسیار واکنش‌پذیرند، بنابراین چنین گروه‌های عاملی ممکن است مسئول حساسیت رطوبتی در یک مخلوط آسفالتی باشند [۸۸] و نمونه اصلاحی با ساسوبیت مقدار جذب بسیار بالایی در این محدوده دارد. همچنین مطابق شکل افزودن ساسوبیت به قیر پایه به دلیل کاهش چگالی گروه عملکردی منجر به کاهش جذب در طول‌موج‌های $1458\ cm^{-1}$ و $720\ cm^{-1}$ می‌شود [۸۹, ۹۰]. پیک طول‌موج ۱۰۳۰ و پیک‌های محدوده موج ۱۶۹۰ تا ۱۷۱۰ به ترتیب مربوط به گروه سولفوکسید (پیوند S=O) و گروه کربونیل (پیوند C=O) می‌باشد که در بحث مقاومت رطوبتی نقش مهمی دارند و همچنین به‌عنوان شاخص پیرشدگی نیز مورداستفاده قرار می‌گیرند[۹۱, ۸۸, ۴۴]. قیر اصلاح‌شده با ساسوبیت نسبت به قیر پایه جذب در این طول‌موج‌ها را افزایش داده و هیچ پیک جدیدی نسبت به قیر پایه در آن اضافه نکرده و این نشان‌دهنده فرآیند فیزیکی و سازگاری خوب بین قیر پایه و ساسوبیت می‌باشد [۹۲, ۴۴].

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۱۵ گروه‌های عاملی قیر پایه و قیر اصلاح‌شده با ساسوبیت [۹۳]

Fig. 15. Functional groups of neat and Sasobit-modified binder [93]



شکل ۱۶ نتایج آزمایش طیف‌سنجی مادون‌قرمز قیر پایه و قیر اصلاح‌شده با ساسوبیت [۴۴]

Fig. 16. FTIR results for neat and Sasobit-modified binder [44]

ACCEPTED MANUSCRIPT

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که آزمون طیف‌سنجی مادون‌قرمز بیشتر برای بررسی تغییرات شیمیایی قیر در طی فرآیند پیرشدگی به کار گرفته‌شده است. شکل ۱۷ به‌صورت کلی فرایند اکسیداسیون و پیرشدگی قیر را در طی ۳ مرحله اصلی نشان می‌دهد [۹۴]. وقتی قیر در معرض اکسیژن (هوا) و دماهای بالا قرار می‌گیرد، تغییرات شیمیایی عمده‌ای در ساختارش رخ می‌دهد که می‌توان آن را در سه مرحله اصلی خلاصه کرد که عبارت‌انداز :

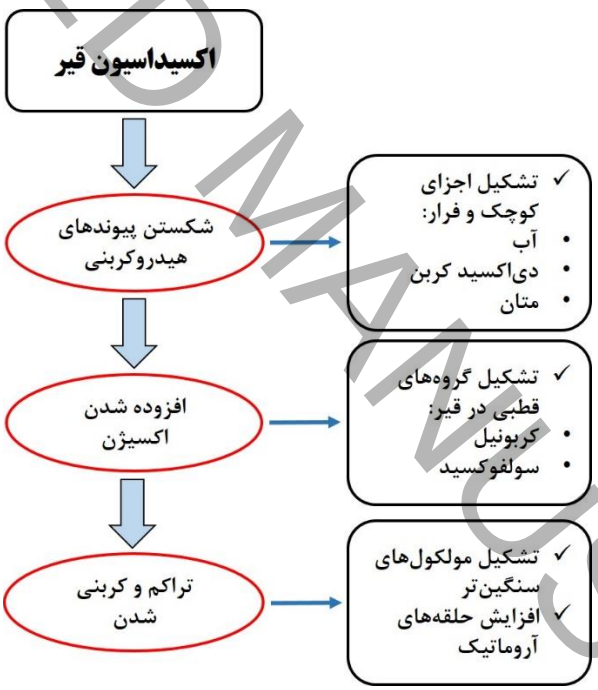
الف) در مرحله اول بخشی از زنجیره‌های هیدروکربنی بلند و پیچیده قیر تحت حرارت و اکسیژن شکسته می‌شوند و مولکول‌های کوچک و فرّاری مانند آب، دی‌اکسید کربن، اسید استیک و متان تولید می‌شود.

ب) در مرحله دوم اکسیژن به ساختار قیر واردشده و منجر به تشکیل گروه‌های قطبی نظیر کربونیل و سولفوکسید می‌شود که بر خواص فیزیکی و شیمیایی قیر (مثل افزایش سختی و شکنندگی) اثر می‌گذارند.

ج) در مرحله سوم مولکول‌های اکسیدشده تمایل دارند با یکدیگر تراکم پیدا کنند و ساختارهای بزرگ‌تر و آروماتیک‌تری بسازند. این فرایند باعث افزایش وزن مولکولی قیر، سفت‌تر شدن و تیره‌تر شدن آن می‌شود.

در حالت کلی می‌توان گفت پیرشدگی قیر صرفاً یک واکنش ساده اکسایش نیست، بلکه مجموعه‌ای از واکنش‌های پیچیده است که هم مولکول‌های قیر را تجزیه و فرّار می‌کند و هم درنهایت ساختارهای سنگین‌تر و آروماتیک‌تر تولید می‌کند. این فرایند در طول زمان و با شرایط محیطی تسریع شده و درنهایت منجر به افت کیفیت و کارایی آسفالت می‌شود.

در این راستا، شناسایی گروه‌های اکسیژن‌دار از طریق شاخص‌های کربونیل و سولفوکسید که به‌عنوان شاخص‌های کلیدی اکسیداسیون و پیرشدگی قیر محسوب می‌شوند، جهت ارزیابی این پارامتر مورداستفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۱۷ **تأثیر اکسیداسیون و پیرشدگی قیر بر روی ساختار شیمیایی قیر [۹۵]**

Fig. 17. The effect of asphalt binder oxidation and aging on the chemical structure of asphalt binder [95]

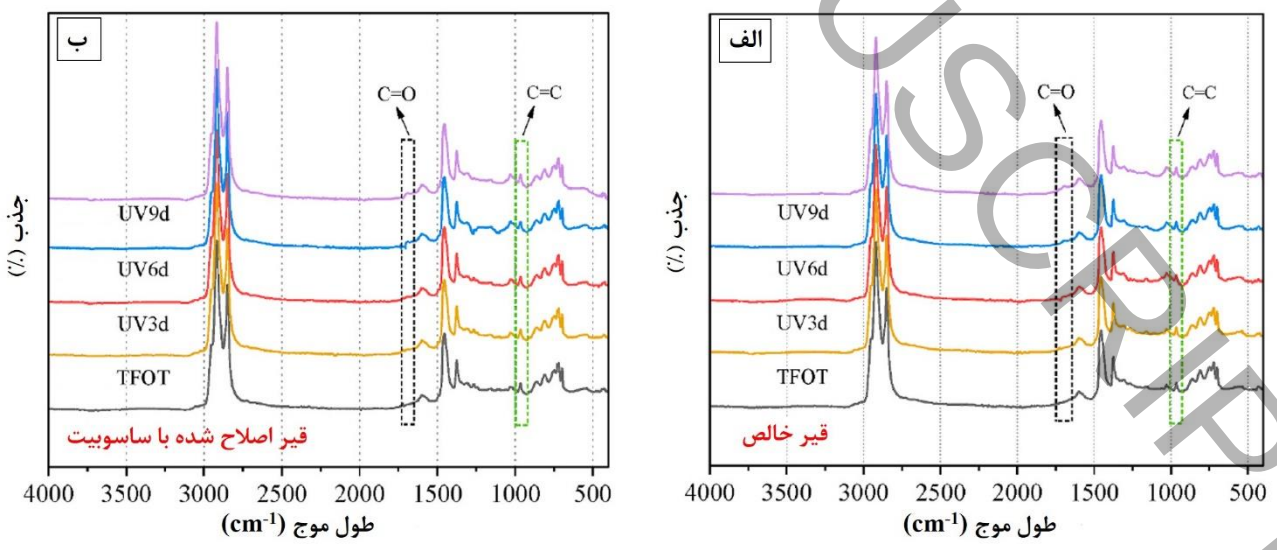
ساسوبیت به‌عنوان یک افزودنی آلی عمدتاً حاوی ترکیبات آلی با گروه‌های عاملی C-H (گروه‌های متیلن، متیل و کربونیل) نقش دوگانه‌ای در تغییرات شیمیایی قیر ایفاد می‌کند. افزودن ساسوبیت موجب افزایش شدت جذب گروه کربونیل در طول‌موج ۱۷۰۰ cm^{-1} می‌شود که این امر نشان‌دهنده شروع اکسیداسیون و پیرشدگی مخلوط‌های قیری با ویسکوزیته بالا است [۹۶]. این افزودنی با کاهش ویسکوزیته قیر، امکان اختلاط و تراکم در دماهای پایین‌تر را فراهم می‌آورد و به‌عبارت‌دیگر، کاهش دمای تولید منجر به کاهش سرعت واکنش‌های اکسیداسیون و پیرشدگی اولیه می‌شود. این کاهش دما موجب کاهش میزان اکسیداسیون در دوران کوتاه‌مدت شده و

ACCEPTED MANUSCRIPT

درنتیجه از پیرشدگی قیر جلوگیری می‌کند [۹۷]. لازم به ذکر است که تأثیر آن بر روند پیرشدگی به نوع منبع و درجه‌بندی قیر بستگی دارد [۹۸]. طبق شکل ۱۸، قیر خالص و قیر اصلاح‌شده با ساسوبیت تحت شرایط مختلف پیرشدگی قرار گرفتند و بررسی مقادیر شاخص کربونیل در جدول ۵ نشان داد که قیر اصلاح‌شده با ساسوبیت، در شرایط مختلف پیرشدگی، شاخص کربونیل کمتری نسبت به قیر خالص داشته و ازاین‌رو پیرشدگی کمتری را تجربه می‌کند[۳۹]. همچنین، در تحقیقی تأثیر ساسوبیت در برابر پیرشدگی کوتاه‌مدت قیر اصلاحی با پلیمر SBR موردبررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد ساسوبیت می‌تواند به‌طور مؤثر از ساختار پلیمری SBR در برابر تجزیه ناشی از پیرشدگی کوتاه‌مدت محافظت کرده و حساسیت اکسیداسیون قیر را کاهش دهد [۳۸].

در فرآیند پیرشدگی حرارتی-اکسیداتیو، رزین و آسفالتن‌های موجود در قیر باعث تشکیل گروه‌های اکسیژن‌دار می‌شوند، ازاین‌رو شاخص‌هایی مانند شاخص کربونیل (CI)، شاخص سولفوکسید (SI) برای تحلیل کمی تغییرات شیمیایی به کار گرفته می‌شوند. مطالعات نشان داده‌اند که افزایش دمای پیرشدگی به‌عنوان‌مثال در شرایط پیرشدگی کوتاه‌مدت با دمای ۱۶۳ درجه سانتی‌گراد، موجب افزایش شاخص‌های CI و SI می‌شود، درحالی‌که کاهش دما به حدود ۱۴۵ درجه سانتی‌گراد به کاهش تشکیل گروه‌های اکسیژن‌دار و حفظ ساختار SBS کمک می‌کند. نتایج پیرشدگی بلندمدت نیز حاکی از این است که قیرهایی که حاوی ساسوبیت هستند، از مقاومت بالاتری در برابر اکسیداسیون برخوردارند و از شکستن پیوندهای C–C در مولکول‌های SBS جلوگیری می‌کنند [۹۹]. ترکیب ساسوبیت با سایر افزودنی‌ها مانند پودر لاستیک، OMMT و $Nano\text{-}TiO_2$ نیز به‌عنوان یک رویکرد مؤثر جهت بهبود خواص شیمیایی و رئولوژیکی قیر مطرح‌شده است [۱۰۰]. به‌عنوان‌مثال استفاده از ترکیب بهینه ۳ درصد ساسوبیت به همراه ۲ درصد OMMT، با ایجاد ساختار شبکه‌ای کریستالی نه‌تنها دمای مخلوط قیری را کاهش می‌دهد بلکه موجب افزایش پایداری ذخیره‌سازی و کاهش نفوذ اکسیژن و تابش UV به داخل قیر می‌شود [۳۹]. همچنین، اضافه کردن ساسوبیت به افزودنی‌هایی مانند Rediset می‌تواند با کاهش تشکیل گروه‌های اکسیژن‌دار، روند افزایش شاخص‌های اکسیداسیون را به تأخیر انداخته و عملکرد ضدپیرشدگی قیر اصلاح‌شده را ارتقا ببخشد [۱۰۱].

یکی از روش‌های مقابله با پیرشدگی در قیرهای بازیافتی استفاده از جوانسازها است. جوانسازها با تأمین ترکیبات سبک (مالتن) قادرند ساختار کلوئیدی قیر را تا حدی بازسازی کنند و اثرات اکسیداسیون را کاهش دهند. در این خصوص لی و همکاران در مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۱ خواص پیرشدگی قیرهای بازیافتی را بر اساس تغییرات گروه‌های عاملی تحلیل کردند و نتایج پژوهش نشان داد که به‌کارگیری جوانساز همراه با افزودنی‌های گرم (ساسوبیت و اووترم) می‌تواند روند اکسیداسیون و تشکیل مولکول‌های بزرگ را کاهش داده و درنتیجه اثرات منفی پیرشدگی را تا حدی کاهش دهد. در بین دو افزودنی گرم، افزودنی اووترم به دلیل کاهش مولکول‌های بزرگ‌تر در قیرهای بازیافتی نسبت به ساسوبیت مقاومت بیشتری در برابر فرآیند پیرشدگی از خود نشان داده و باعث بهبود کلی خواص رئولوژیکی قیر می‌شود. در حالت کلی نتایج حاکی از آن بود که جوانساز و افزودنی‌های گرم تأثیر کمی بر بهبود مقاومت در برابر پیرشدگی قیرهای بازیافتی دارند و عملکرد بهینه در شرایط عملکردی دمای بالا، متأثر از ترکیب مناسب این افزودنی‌هاست [۵۱].



شکل ۱۸ **نمودار طیف‌سنجی مادون‌قرمز قیر خالص و اصلاح‌شده با ساسوبیت در شرایط مختلف پیرشدگی** [۳۹]

ACCEPTED MANUSCRIPT

Fig. 18. FTIR spectra of neat and Sasobit-modified binder under various aging conditions [39]

جدول ۵ **مقدار شاخص کربونیل قیر خالص و اصلاح‌شده با ساسوبیت در شرایط مختلف پیرشدگی** [۳۹]

Table 5. Carbonyl index values of neat and Sasobit-modified binder under various aging conditions [39]

نوع قیر	شدت پیرشدگی	Ic=o (شاخص کربونیل)
قیر خالص	قبل از پیرشدگی	۰/۰۰۱۱
	کوتاه‌مدت	۰/۰۰۱۱
	بلندمدت (۳ روز)	۰/۰۰۶۲
	بلندمدت (۶ روز)	۰/۰۰۶۹
	بلندمدت (۹ روز)	۰/۰۰۷۰
قیر اصلاح‌شده با ساسوبیت	قبل از پیرشدگی	۰
	کوتاه‌مدت	۰/۰۰۱۱
	بلندمدت (۳ روز)	۰/۰۰۱۷
	بلندمدت (۶ روز)	۰/۰۰۱۸
	بلندمدت (۹ روز)	۰/۰۰۲۶

مطالعات اخیر، ازجمله پژوهش‌های هونگ و همکاران (۲۰۲۳)، لی و همکاران (۲۰۲۵) و یوبی و همکاران (۲۰۲۱) نشان داده‌اند که استفاده از ساسوبیت تأثیرات چشمگیری در بهبود خواص قیر دارد. این پژوهش‌ها علاوه بر تأکید بر کاهش واکنش‌های اکسیداسیون در دوره‌های کوتاه‌مدت، به بررسی اثر عوامل محیطی، مانند حضور آب بر قیر اصلاح‌شده با ساسوبیت نیز پرداخته‌اند. به‌طوری‌که افزودن ساسوبیت، افزایش شاخص کربونیل را به تأخیر انداخته و چسبندگی میان قیر و مصالح را بهبود می‌بخشد [۴۰, ۱۰۲, ۱۰۳]. به‌طور کلی تحلیل‌های آزمایش FTIR به‌وضوح نشان می‌دهند که ساسوبیت، چه به‌تنهایی و چه در ترکیب با سایر اصلاح‌کننده‌ها، نقش اساسی در کاهش اثرات پیرشدگی و افزایش دوام قیر دارد.

۵-۳- آزمایش ریزساختاری تفکیک اجزا چهارگانه SARA

قیر دارای ترکیب شیمیایی بسیار پیچیده‌ای است که عمدتاً از کربن و هیدروژن و مقادیر کمی از عناصر دیگری مانند نیتروژن، گوگرد، اکسیژن و فلزات تشکیل‌شده است [۱۰۴]. به‌منظور ساده‌سازی مطالعه و شناخت دقیق اجزای شیمیایی آن از آزمایش جداسازی SARA استفاده می‌شود. این آزمایش طبق استاندارد ASTM D4124، برای تعیین درصد اجزاء شیمیایی مختلف موجود در قیر استفاده‌شده و در آن قیرها به ترتیب به اشباع‌ها، آروماتیک‌ها، آروماتیک‌های قطبی (به‌عنوان رزین‌ها نامیده می‌شوند) و آسفالتن‌ها تفکیک می‌شوند. روش‌های سنتی جداسازی شامل استفاده از حلال‌هایی نظیر ن-پنتان برای جداکردن آسفالتن‌ها از مالتن‌ها و سپس تفکیک مالتن‌ها به بخش‌های مربوط به اشباع‌ها، آروماتیک‌ها و رزین‌ها بوده است. باگذشت زمان، این روش‌ها با استفاده از فناوری‌های خودکار (مانند استخراج فاز جامد) سرعت و تکرارپذیری بیشتری به دست آورده‌اند[۱۰۵]. در تمامی این روش‌های تفکیک عمدتاً باهدف ارزیابی توزیع قطبیت بخش‌ها و تعیین ترکیب آن‌ها به کار می‌روند و تعیین دقیق ترکیبات شیمیایی بخش‌های SARA (مانند کربن، اکسیژن، گوگرد و نیتروژن) تنها از طریق تحلیل عنصری امکان‌پذیر است [۱۰۶].

در شکل ۱۹، شکل شماتیکی از روند جداسازی و تفکیک اجزای چهار مؤلفه‌ای SARA (شامل آسفالتن، اشباع‌شده، آروماتیک و رزین) یک قیر نفتی را با استفاده از کارتریج‌های استخراج فاز جامد مطابق استاندارد ASTM D4124 نمایش داده‌شده است. این روش با سرعت بالا و تکرارپذیری عالی اجراشده و در گروه‌های تحقیقاتی بین‌المللی نیز به کار گرفته می‌شود [۱۰۷]

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۱۹ **تفکیک و جداسازی اجزای مختلف قیر با استفاده از آنالیز SARA [۱۰۵].**

Fig. 19. Separation and fractionation of various binder components using SARA analysis [105]

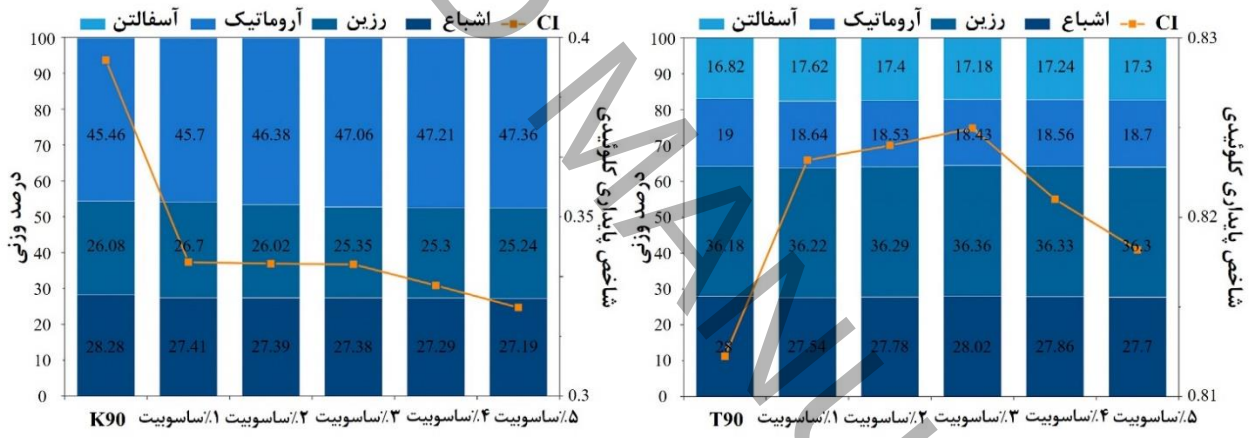
مطابق شکل تفکیک اجزا در چهار مرحله توسط حلال‌های مختلف نشان داده‌شده است. در هر مرحله کارتریج با حلال ویژه‌ای ازجمله ایزو-اکتان و ن-پنتان شسته شده تا یک جز خاص از قیر جدا شود. درواقع هدف از این شستشوهای متوالی، جداسازی هرکدام از اجزای SARA بر پایه تفاوت در قطبیت و حلالیت آن‌ها است.

ایزو-اکتان به‌عنوان یک حلال نسبتاً غیرقطبی، باعث جدا شدن بخش‌هایی می‌شود که در این حلال قابلیت حل شدن داشته باشند. با شستشوی کارتریج با ایزو-اکتان، آسفالتن (نقاط قرمز) که بالاترین قطبیت را در میان بخش‌های SARA دارند، از ستون محلول عبور کرده و مطابق شکل ۱۹ به‌صورت پودر سیاه رسوب می‌کند. در گام بعدی محلول فاقد آسفالتن در حلال n-هپتان از کارتریج عبور داده می‌شود تا اجزای اشباع‌شده (مربع‌های نارنجی) که به‌صورت مایعی بی‌رنگ و شفاف هستند از ستون جداشده و جمع‌آوری شوند (شکل ۱۹). در مرحله بعد ترکیبات آروماتیک که در حلال‌های آروماتیکی نظیر تولوئن به‌خوبی حل می‌شوند، در این مرحله از ستون شسته و جدا می‌گردند. با استفاده از مخلوط تولوئن-متانول، ترکیبات آروماتیک (ستاره‌های سبز تیره) از ستون شسته می‌شوند و در حالت مایع به رنگ زرد تا قرمز تیره جمع می‌گردند. درنهایت، رزین‌ها (مثلث‌های سبز) که قطبیت بالاتری نسبت به آروماتیک‌ها دارند [۱۰۸] ، توسط

ACCEPTED MANUSCRIPT

حلال تری‌کلرواتیلن به‌صورت جامد به رنگ قهوه‌ای تیره تا سیاه استخراج و جداسازی می‌شوند [۱۰۹] پس از تکمیل هر مرحله، حلال حاوی اجزای مربوطه تبخیر شده و باقی‌مانده آن جمع‌آوری می‌شود و جهت ارزیابی خواص فیزیکی و شیمیایی موردبررسی قرار می‌گیرند.

ساسوبیت متأثر از ساختار شیمیایی خود موجب تغییراتی در اجزای مختلف SARA می‌شود و تاکنون تحقیقات محدودی در این زمینه انجام‌گرفته است. آدپو و همکاران در مطالعه‌ای، درصدهای مختلف ساسوبیت و قیر پیر شده تراشه آسفالت را به قیر خالص اضافه کرده و نتایج آنالیز SARA نشان داد که ساسوبیت عملکردی مشابه قیرهای پیر شده تراشه آسفالت داشته به‌طوری‌که با اضافه شدن آن به قیر پایه و همچنین افزایش درصدش، مقدار درصد وزنی محتوای آسفالتن و مالتن قیر به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد [۱۱۰]. در مطالعه دیگری اثر درصدهای مختلف ساسوبیت بر دو نوع قیر با منابع متفاوت (T90 و K90) تحت آنالیز SARA قرار گرفت. مطابق شکل ۲۰ تفاوت در منبع قیر و فرآیند پالایش آن موجب شده که اجزای SARA قیر K90 تفاوت قابل‌توجهی با قیر T90 داشته باشد، به‌طوری‌که مقدار آسفالتن قیر K90 بسیار پایین (حدود ۰/۲ درصد) بوده و مقدار رزین آن نیز درصد بسیار بالایی (حدود ۴۵/۴۶ درصد) دارد و در مقابل، قیر T90 حاوی آسفالتن (۱۶/۸۲ درصد) و آروماتیک (۳۶/۱۸ درصد) بیشتر، اما رزین (۱۹ درصد) و اشباع (۲۸ درصد) کمتری می‌باشد. مطابق شکل درصدهای کم ساسوبیت تأثیر ناچیزی در تغییر نسبت‌های اجزای اصلی چهارگانه قیر داشته و بر روی پایداری کلوئیدی قیر تأثیرگذار نیستند ولی برخلاف آن آسفالتن نقش بسزایی در پایداری قیر داشته و به‌عنوان مهم‌ترین جز سیستم کلوئیدی قیر، خصوصیات رئولوژیکی قیر را تحت تأثیر قرار می‌دهد (شکل ۲۰). به‌طور کلی می‌توان گفت که ترکیب و مقدار آسفالتن در قیر نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد افزودنی‌هایی مانند ساسوبیت دارد. در قیر T90 با محتوای آسفالتن بالا، ساسوبیت به‌طور مؤثری مولکول‌های آسفالتن را به هم متصل کرده و خواص ساختاری و پایداری قیرها را بهبود می‌بخشد، درحالی‌که در قیر K90 با مقدار آسفالتن بسیار کم، نقش ساسوبیت در ایجاد پیوند میان این مولکول‌ها نسبتاً ضعیف بوده و تأثیر قابل‌توجهی ندارد [۱۱۱].



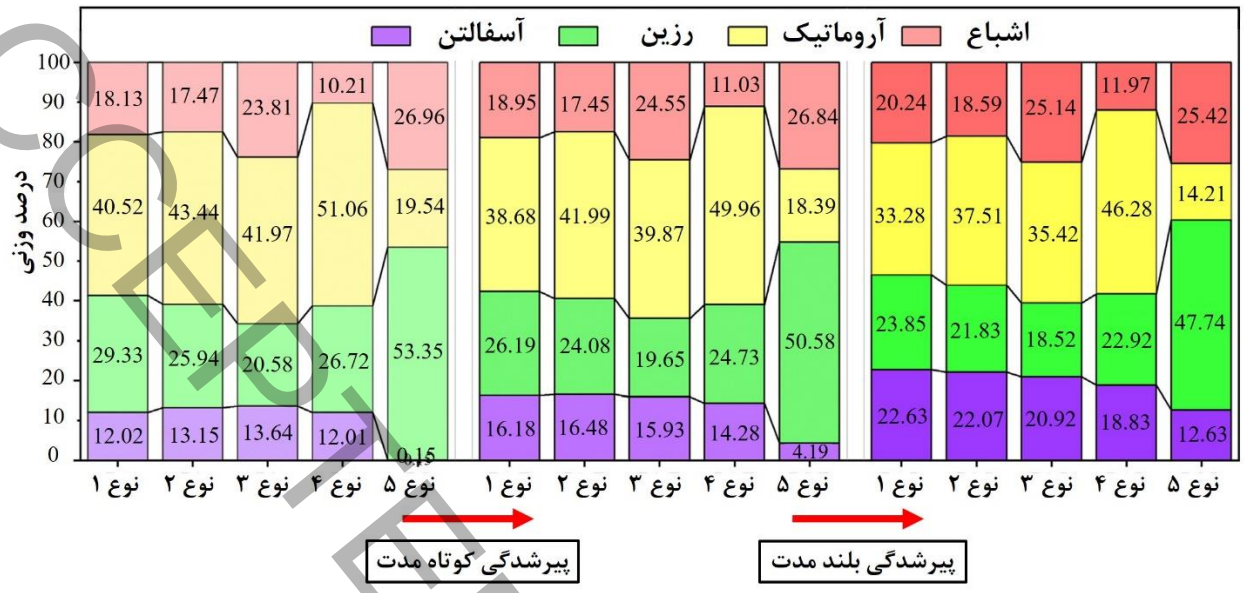
شکل ۲۰ **اجزای مختلف قیرهای اصلاح‌شده با ساسوبیت [۱۱۱].**

Fig. 20. Different components of Sasobit-modified binders [111]

آزمایش SARA راهنمای خوبی جهت بررسی تغییرات شیمیایی قیرهای آسفالتی در طی فرآیند پیرشدگی بوده و با آنالیز و تفکیک اجزای چهارگانه قیر، دید کلی از میزان تأثیر قسمت‌های قطبی و غیر قطبی قیر در نحوه عملکرد قیر می‌دهد. لی و همکاران در پژوهشی تغییرات بخش‌های SARA را در تأثیر پیرشدگی موردبررسی دادند و از ۵ نوع قیر با منابع نفتی مختلف استفاده کردند. در طی پیرشدگی کوتاه‌مدت و بلندمدت همواره قسمت آسفالتن قیر روند افزایشی داشت که این افزایش به دلیل تبدیل آروماتیک‌ها به رزین و سپس رزین به آسفالتن می‌باشد [۱۱۲]. مطابق نتایج خوزه و همکاران در طی پیرشدگی گرما باعث جداشدگی روغن‌ها از قیر شده و بخشی از روغن‌ها به‌صورت فرار درآمده و بخش دیگر به رزین تبدیل می‌شوند. با ورود اکسیژن، رزین به مولکول‌های قطبی آسفالتن تبدیل‌شده و با افزایش شدت پیرشدگی مقدار آسفالتن افزایش می‌یابد که این با یافته‌های مطالعات پیشین همخوانی دارد [۱۱۳, ۱۱۴] البته روند این تغییرات به شرایط پیرشدگی و همچنین به منبع قیر بستگی دارد و در قیرهای اصلاح‌شده نیز تغییرات SARA تقریباً مشابه با قیر

ACCEPTED MANUSCRIPT

خالص مشاهده می‌شود [۱۱۵, ۱۱۶]. طبق شکل۲۱ در طول فرآیند پیرشدگی بخش اشباع تقریباً بدون تغییر باقی‌مانده و نسبت مالتن به آسفالتن کاهش پیداکرده و این عامل منجر به افزایش ویسکوزیته قیر می‌شود [۱۱۷] .



شکل ۲۱ **تغییرات اجزای مختلف SARA در طی فرآیند پیرشدگی قیرهای پایه [۱۱۲].**

Fig. 21. Changes of different components of SARA fractions during the aging process of neat binders [112]

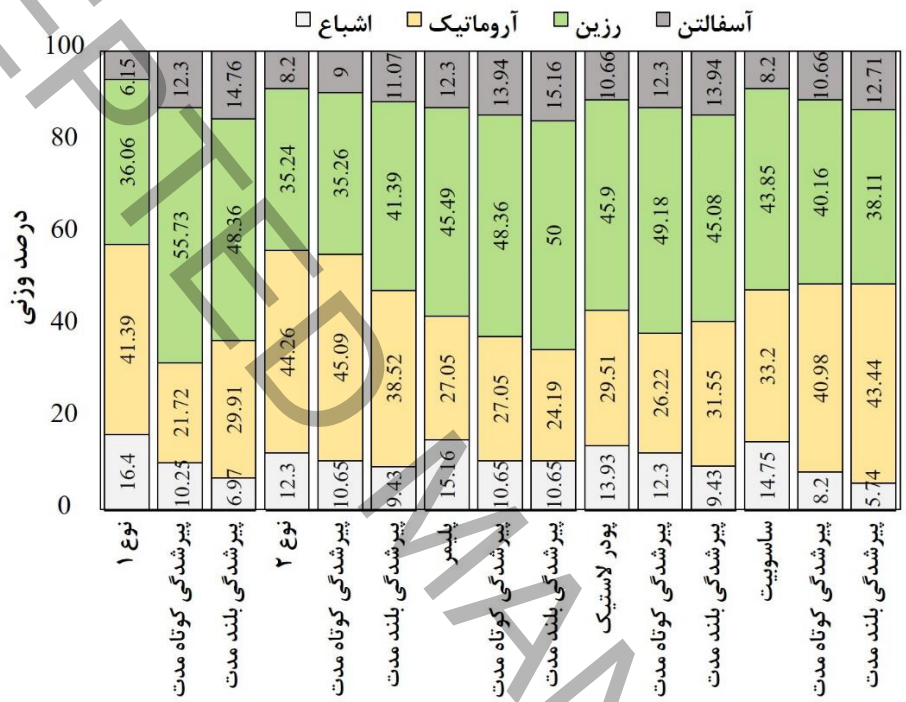
در تحقیقی حق‌شناس تغییرات شیمیایی قیر را در طی زمان‌ها و دماهای مختلف پیرشدگی موردبررسی قرارداد. نتایج روند ثابتی را از افزایش رزین‌ها و آسفالتن‌ها به همراه کاهش آروماتیک‌ها در طول زمان پیرشدگی نشان داد به‌طوری‌که پس از ۲۰ ساعت پیرشدگی در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، میزان آروماتیک‌ها نسبت به حالت اولیه قیر ۱۰/۲ درصد کاهش‌یافته و مجموع آسفالتن‌ها و رزین‌ها ۱۰/۵ درصد افزایش یافت. همچنین این روند پس از ۱۶۰ ساعت پیرشدگی در همان دما تکرار شد، به‌طوری‌که میزان آروماتیک‌ها ۲۱/۵ درصد کاهش و مجموع آسفالتن‌ها و رزین‌ها ۲۱/۸ درصد افزایش یافت [۱۱۷]. درواقع این نتایج نشان می‌دهد که تبدیل آروماتیک‌ها به مجموع رزین‌ها و آسفالتن‌ها یک تغییر شیمیایی کلیدی در طی پیرشدگی محسوب می‌شود.

با توجه به نقش تعیین‌کننده اجزای چهارگانه SARA در شکل‌گیری ساختار کلوئیدی قیر، تغییرات این اجزا می‌تواند تأثیر مستقیمی بر رفتار رئولوژیکی و عملکردی قیر داشته باشد. افزایش مقدار آسفالتن‌ها در اثر فرآیند پیرشدگی، به دلیل وزن مولکولی بالاتر و قطبیت بیشتر این جزء، موجب افزایش نیروهای برهم‌کنش بین‌مولکولی، کاهش تحرک مولکولی و درنهایت افزایش سختی و ویسکوزیته قیر می‌شود. در مقابل، رزین‌ها با نقش پراکنده‌کنندگی خود، از تجمع بیش‌ازحد ذرات آسفالتنی جلوگیری کرده و در حفظ پایداری ساختار کلوئیدی قیر مؤثر هستند. همچنین، کاهش مقدار آروماتیک‌ها در طی فرآیند پیرشدگی می‌تواند توانایی فاز مالتن در حل و پراکنده‌سازی اجزای سنگین‌تر را کاهش داده و تعادل ساختاری قیر را به سمت تشکیل ترکیبات با وزن مولکولی بالاتر تغییر دهد.

این تغییرات عمدتاً ناشی از واکنش‌های اکسیداسیون ترکیبات هیدروکربنی، تشکیل گروه‌های عاملی قطبی مانند کربونیل و سولفوکسید و تغییر نسبت میان اجزای سبک و سنگین قیر است. در قیرهای اصلاح‌شده با ساسوبیت، تغییرات مشاهده‌شده در اجزای SARA الزاماً ناشی از واکنش شیمیایی مستقیم میان ساسوبیت و اجزای قیر نیست، بلکه بیشتر به برهم‌کنش‌های فیزیکی و تغییرات ایجادشده در سازمان‌یافتگی ساختار داخلی قیر مرتبط است. ساسوبیت در دماهای بالا با ذوب شدن و پراکندگی در فاز مالتن، موجب کاهش ویسکوزیته و بهبود فرآیندپذیری قیر می‌شود، درحالی‌که تبلور مجدد زنجیره‌های واکسی در دماهای پایین‌تر می‌تواند بر نحوه توزیع اجزای کلوئیدی و رفتار دمایی قیر اثرگذار باشد. بنابراین، تغییرات اجزای SARA در قیرهای اصلاح‌شده با ساسوبیت را می‌توان حاصل برهم‌کنش میان ترکیب اولیه قیر، مقدار افزودنی، شرایط پیرشدگی و تغییرات ایجادشده در ساختار داخلی قیر دانست.

ACCEPTED MANUSCRIPT

ساها چودهوری و همکاران در دو تحقیق مختلف تغییرات اجزای چهارگانه SARA را تحت تأثیر انواع افزودنی (ساسوبیت، پلیمر و پودر لاستیک) و همچنین اعمال پیرشدگی بررسی کردند. نتایج آنالیز SARA حاکی از آن بود که درصد وزنی آروماتیک‌ها، رزین‌ها و آسفالتن‌ها در قیرهای پایه و اصلاح‌شده مقادیر متفاوت داشتند و نسبت مالتن به آسفالتن در قیرهای پایه بیشتر از قیرهای اصلاح‌شده بود. افزودنی‌ها صرف‌نظر از نوع آن‌ها، باعث افزایش محتوای رزین و آسفالتن و کاهش محتوای آروماتیک گردیدند. تغییرات اجزای تفکیک‌شده SARA در قیر اصلاح‌شده با ساسوبیت به علت ساختار هیدروکربنی‌اش در مقایسه با پلیمر و پودر لاستیک، مقدار کمتری بود (مطابق شکل ۲۲). پس از اعمال پیرشدگی بر روی نمونه‌ها نتایج نشان داد مقادیر آسفالتن و رزین در طی پیرشدگی افزایش‌یافته و محتوای آروماتیک و اشباع کاهش پیدا می‌کنند. این روند برای ساسوبیت برعکس بوده و پیرشدگی موجب کاهش رزین و افزایش آروماتیک در قیر اصلاح‌شده شد [۱۱۹, ۱۱۸].



شکل ۲۲ **تغییرات اجزای مختلف SARA در طی فرآیند پیرشدگی قیرهای اصلاح‌شده و پایه [۱۱۹]**

Fig. 22. Changes of different components of SARA fractions during the aging process of modified and neat binders [119]

به‌طور کلی، در قیرهای با آسفالتن بالا ساسوبیت با افزایش آسفالتن، پایداری کلوئیدی و خواص ساختاری قیر را بهبود می‌بخشد، اما در قیرهای با آسفالتن پایین این تغییرات کمتر قابل‌توجه است. در فرآیند پیرشدگی، قیرهای خالص با افزایش آسفالتن و رزین و کاهش آروماتیک‌ها مواجه می‌شوند که ویسکوزیته را افزایش می‌دهد ولی در مقابل، قیرهای اصلاح‌شده با ساسوبیت با کاهش رزین‌ها و افزایش آروماتیک‌ها، انعطاف‌پذیری بهتری از خود نشان می‌دهند. منشأ قیر نیز با تأثیر بر ترکیب اولیه SARA، پاسخ آن به ساسوبیت و پیرشدگی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهد که انتخاب قیر و افزودنی باید با در نظر گرفتن ترکیب شیمیایی اولیه و شرایط کاربری انجام شود.

۳-۶- آزمایش ریزساختاری انرژی آزاد سطحی (SFE)

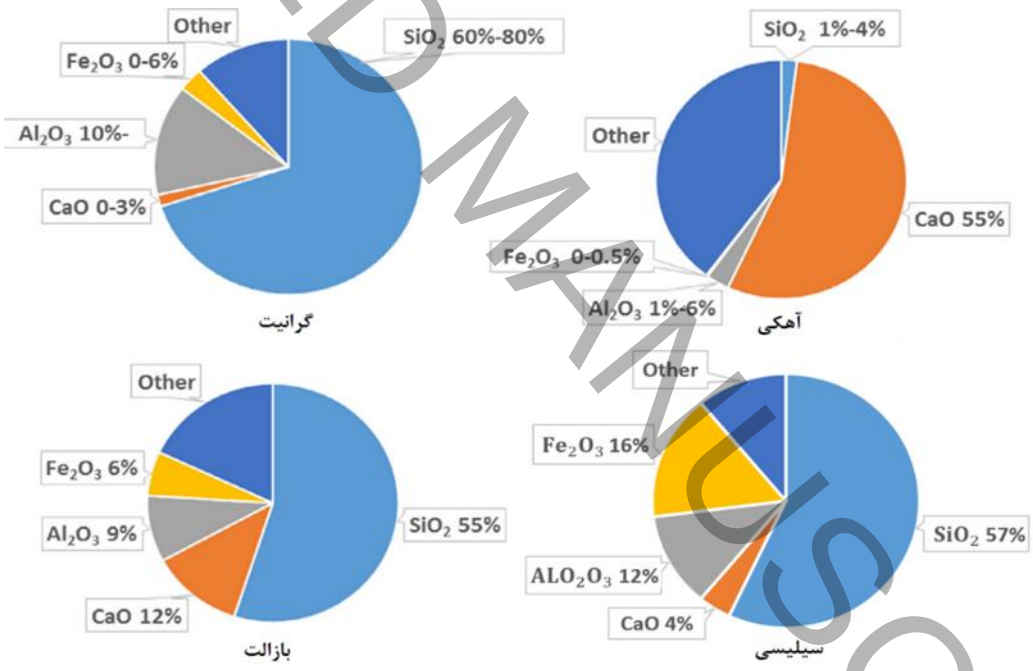
آزمایش انرژی آزاد سطحی با اندازه‌گیری انرژی سطحی قیر و سنگدانه و با استفاده از روابط ترمودینامیکی سازگارترین حالت ترکیب قیر و سنگدانه‌های مختلف را نشان می‌دهد. در این راستا محققان جهت بررسی بهتر تأثیر ساسوبیت بر مقاومت رطوبتی مخلوط اصلاح‌شده

ACCEPTED MANUSCRIPT

با آن از انرژی آزاد سطحی استفاده نمودند که به علت ساختار شیمیایی متفاوت (کانی‌های تشکیل‌دهنده) سنگدانه های مورداستفاده در تحقیقات، نتایج متفاوتی مشاهده شد به‌طوری‌که برخی از نتایج حاکی از تأثیر مثبت ساسوبیت در افزایش چسبندگی بین قیر و سنگدانه گزارش شد [۱۲۰, ۱۲۱]. بنابراین، برای تفسیر دقیق‌تر نتایج گزارش‌شده درباره تأثیر ساسوبیت بر ویژگی‌های انرژی آزاد سطحی و مقاومت رطوبتی، لازم است نقش ویژگی‌های کانی‌شناسی و شیمیایی سنگدانه‌ها نیز موردتوجه قرار گیرد.

علاوه بر ویژگی‌های قیر اصلاح‌شده، خصوصیات سنگدانه‌ها نیز نقش مهمی در رفتار پیوند قیر و سنگدانه دارند. ترکیب کانی‌شناسی و ساختار شیمیایی سنگدانه‌ها می‌تواند بر ویژگی‌های سطحی، مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی و میزان چسبندگی بین قیر و سنگدانه تأثیرگذار باشد. بر اساس نظریه انرژی آزاد سطحی، برهم‌کنش بین قیر و سنگدانه به مؤلفه‌های غیرقطبی و مؤلفه‌های اسیدی - بازی دو سطح وابسته است، بنابراین بررسی اثر ساسوبیت بر عملکرد قیر بدون توجه به ویژگی‌های سطحی سنگدانه‌ها نمی‌تواند بیانگر رفتار واقعی پیوند بین قیر و سنگدانه باشد. بنابراین کانی‌شناسی سنگدانه‌ها یکی از عوامل مؤثر بر تفاوت رفتار پیوند سنگدانه در برابر قیر اصلاح‌شده است.

تفاوت در نوع کانی‌های تشکیل‌دهنده و ترکیب شیمیایی سنگدانه ها موجب تغییر در قطبیت سطح و ویژگی‌های اسیدی - بازی سنگدانه‌ها می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲۳ مشاهده می‌شود، سنگدانه‌های مختلف دارای ترکیب شیمیایی متفاوتی هستند به‌گونه‌ای که سنگدانه‌های سیلیسی دارای مقدار بیشتری سیلیکا (SiO_2) بوده و سنگدانه‌های آهکی ترکیبات کلسیم اکسید (CaO) بیشتری دارند. این تفاوت در ترکیب شیمیایی می‌تواند باعث تغییر در انرژی چسبندگی، انرژی جداشدگی و حساسیت رطوبتی پیوند قیر و سنگدانه شود [3, 122].



شکل ۲۳ ترکیب شیمیایی سنگدانه‌های مختلف و تأثیر آن بر ویژگی‌های سطحی سنگدانه [۱۲۳]

Fig. 23. Chemical composition of various aggregates and its effect on aggregate surface properties [123]

به‌طور کلی، سنگدانه‌های آهکی به دلیل درصد بالای ترکیبات کلسیم اکسید و ماهیت بازی سطح، تمایل بیشتری برای ایجاد پیوند با اجزای قطبی قیر دارند، درحالی‌که سنگدانه‌های سیلیسی به دلیل مقدار بالای سیلیکا و ماهیت اسیدی سطح خود، رفتار متفاوتی در پیوند بین قیر و سنگدانه نشان می‌دهند. خلاصه‌ای از تأثیر ویژگی کانی‌شناسی سنگدانه‌ها بر عملکرد قیر اصلاح‌شده با ساسوبیت در جدول ۶ ارائه‌شده است.

ACCEPTED MANUSCRIPT

جدول ۶ **تأثیر ویژگی کانی‌شناسی سنگدانه‌ها بر رفتار پیوند قیر اصلاح‌شده با ساسوبیت و سنگدانه از دیدگاه انرژی آزاد سطحی**

Table 6. The effect of aggregate mineralogical characteristics on the bonding behavior of Sasobit-modified binder and aggregate from the Surface free energy perspective

نوع سنگدانه	ترکیب کانی‌شناسی غالب	ویژگی سطحی	رفتار گزارش‌شده در پیوند قیر اصلاح‌شده با ساسوبیت و سنگدانه	منبع
آهکی (Limestone)	کلسیت ($CaCO_3$) و ترکیبات دارای کلسیم اکسید(CaO)	ماهیت بازی‌تر سطح، تمایل بیشتر به برهم‌کنش با اجزای قطبی قیر	به دلیل سازگاری شیمیایی بیشتر با قیر، رفتار چسبندگی مطلوب‌تر و مقاومت بالاتری در برابر جداشدگی ناشی از رطوبت نسبت به سنگدانه های سیلیسی دارد	Sobhi et al. (۲۰۲۲) [۴۴] Kassem et al. (۲۰۱۸) [۱۲۴]
گرانیتی (Granite)	کوارتز و ترکیبات سیلیسی (SiO_2 بالا)	ماهیت اسیدی‌تر سطح و حساسیت بیشتر به برهم‌کنش‌های ناشی از حضور آب	به دلیل سازگاری کمتر سطح سیلیسی با قیر، حساسیت بیشتری نسبت به کاهش چسبندگی و جداشدگی در شرایط مرطوب نشان داده است	Sobhi et al. (۲۰۲۲) [۴۴]
بازالتی (Basalt)	سیلیکات‌هایCa-Mg-Fe	سطح‌فعال همراه با زبری مناسب و رفتار حد واسط ازنظر ترکیب شیمیایی	به دلیل ترکیب هم‌زمان اثرات چسبندگی مکانیکی و شیمیایی، رفتار آن به نوع قیر، مقدار اصلاح‌کننده و شرایط محیطی وابسته گزارش‌شده است	Habal and Singh (۲۰۲۲)[۱۲۵] Alvarez et al. (۲۰۲۳) [۱۲۶]
سیلیسی (Siliceous aggregate)	کوارتز و SiO_2 غالب	ماهیت اسیدی‌تر سطح و تمایل بیشتر به جذب آب	حساسیت بیشتر پیوند قیر و سنگدانه به خرابی رطوبتی و کاهش دوام چسبندگی دارد	Sobhi et al. (۲۰۱۸) [۱۸]

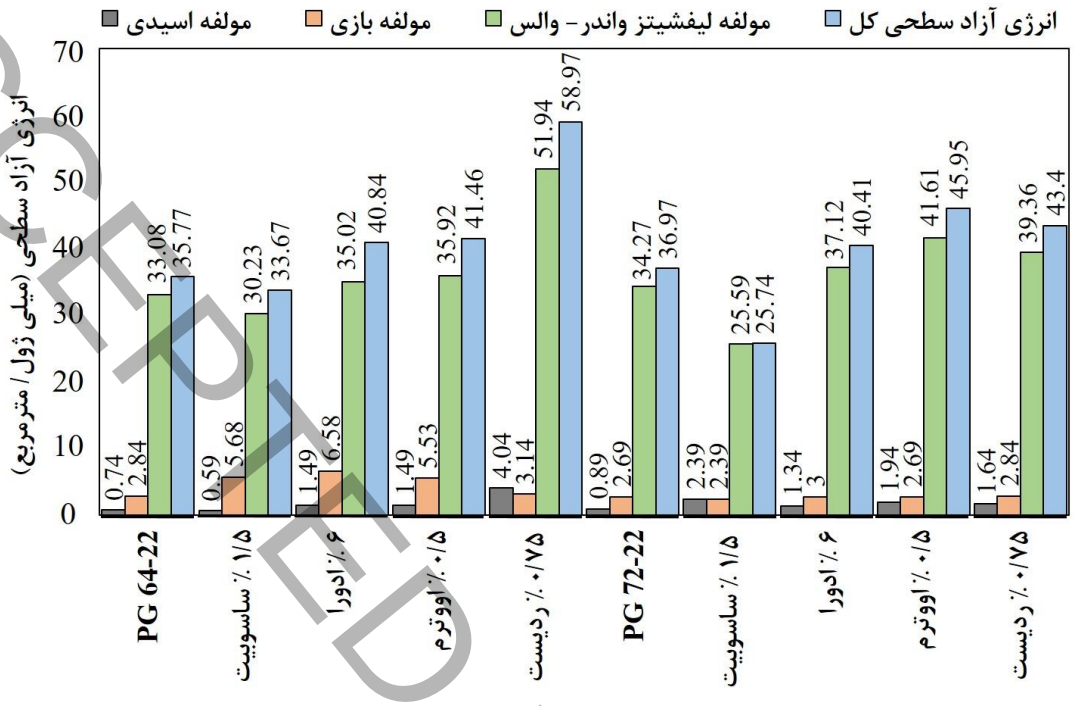
همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، نوع سنگدانه یکی از عوامل مؤثر بر رفتار پیوند مشترک قیر و سنگدانه پس از اصلاح قیر با ساسوبیت است و می‌تواند یکی از دلایل تفاوت نتایج گزارش‌شده در مطالعات مختلف باشد. مطالعه کاسم و همکاران نشان داد که مقدار ساسوبیت و نوع سنگدانه به‌صورت هم‌زمان بر پارامترهای چسبندگی و نسبت انرژی تأثیر دارند [۱۲۴]. همچنین هابال و سینگ گزارش کردند که تغییرات ایجادشده در خصوصیات قیر پس از اصلاح با ساسوبیت، به ویژگی‌های سطحی و معدنی سنگدانه وابسته بوده و افزایش سختی قیر ناشی از حضور ساسوبیت، به‌تنهایی تضمین‌کننده بهبود عملکرد پیوند بین قیر و سنگدانه و مقاومت در برابر آسیب رطوبتی نیست [۱۲۵].

برخی دیگر از محققان همچون عربانی و همکاران و حسامی و همکاران افزایش اجزای اسیدی در قیر و کاهش انرژی آزاد سطحی را پس از افزودن ساسوبیت به قیر مشاهده نموده و کاهش چسبندگی پیوند بین قیر و سنگدانه را گزارش نمودند [۱۲۷, ۱۲۸]. صبحی و همکاران نیز در مقایسه انرژی آزاد سطحی قیر پایه و قیر اصلاح‌شده با ساسوبیت مشاهده کردند که ساسوبیت نسبت به قیر پایه در تمامی نوع سنگدانه تأثیر منفی بر چسبندگی دارد[۱۸, ۴۴] و این نتایج در تحقیقات سایر محققان نیز دیده شد [۶۰, ۱۲۶].

قابچی و همکاران گزارش دادند که آزمایش انرژی سطحی شاخص بهتری نسبت به آزمایش نسبت کشش غیرمستقیم برای بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی گرم است [۱۲۰]. مطالعات انجام‌شده بر روی انرژی آزاد سطحی نشان می‌دهد که افزودنی‌های مختلف تأثیرات متفاوتی بر انرژی آزاد سطحی قیر دارند و از این منظر، ساسوبیت نسبت به سایر افزودنی‌ها عملکرد منفی‌تری از خود نشان می‌دهد و این موضوع در مطالعه اویان و همکاران دیده می‌شود [۱۲۹]. در این مطالعه در نمونه‌های قیری اصلاح‌شده با قیر PG 22–64، افزودن ساسوبیت موجب کاهش انرژی آزاد سطحی کل به مقدار ۲/۰۳ میلی‌ژول بر مترمربع شده است و این کاهش به معنای کاهش مقاومت رطوبتی و کاهش قابلیت چسبندگی قیر می‌باشد. در مقابل، افزودنی‌های ادورا، اووترم و ردیست به ترتیب باعث افزایش انرژی آزاد سطحی به میزان ۵/۱۲، ۵/۸۴ و ۲۳/۲۸ میلی‌ژول بر مترمربع گردیده‌اند (شکل ۲۴). این افزایش نشانگر بهبود ویژگی‌های

ACCEPTED MANUSCRIPT

سطحی و مقاومت در برابر رطوبت قیر است. بنابراین، در مقایسه با سایر افزودنی‌ها، ساسوبیت به‌عنوان یک عامل منفی در تغییر انرژی آزاد سطحی قیر شناخته می‌شود که می‌تواند عملکرد نهایی مخلوط آسفالت را تحت تأثیر قرار دهد [۱۲۹].



شکل ۲۴ **مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی نمونه‌های قیر [۱۲۹].**

Fig. 24. Surface free energy components of asphalt binder samples [129]

امروزه به علت اهمیت استفاده از تراشه‌های آسفالت در روسازی، تحقیقاتی مختلفی نیز در خصوص اندازه‌گیری انرژی آزاد سطحی قیر پیر شده تراشه آسفالت در مخلوط‌های قیری گرم انجام‌گرفته است. هبال و همکاران از انرژی سطحی برای اندازه‌گیری حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی حاوی سه افزودنی ساسوبیت، ادورا، ردیست و سه درصد مختلف رپ استفاده کردند و نتایج نشان داد که در تمامی درصدهای رپ به‌غیراز رپ ۲۵ درصد، افزودنی ردیست کمترین حساسیت رطوبتی را دارد که علت این امر می‌تواند به علت وجود مواد فعال سطحی کاتیونی (سورفکتانت) در آن باشد. همچنین ساسوبیت نیز در تمامی حالت‌ها به غیر حالت ۲۵ درصد رپ بیشترین حساسیت رطوبتی را نسبت به ردیست و مخلوط پایه نشان داد [۱۲۵].

در مطالعه‌ای از انرژی آزاد سطحی برای ارزیابی تأثیر قیر تراشه آسفالتی بر انرژی چسبندگی و پیوستگی قیر در مخلوط‌های قیری حاوی ساسوبیت و زایکوترم و درصدهای مختلف تراشه آسفالت (۰٪، ۲۰٪، ۴۰٪ و ۶۰٪) استفاده شد. زایکوترم با ایجاد پیوندهای شیمیایی پایدار نسبت به ساسوبیت، انرژی آزاد سطحی کل و مؤلفه قطبی انرژی آزاد سطحی بیشتری را در نتایج نشان داد. مطابق جدول ۷ بررسی انرژی آزاد سطحی در قیرهای اصلاح‌شده با ساسوبیت و زایکوترم نشان داد که در تمامی درصدهای تراشه آسفالت، انرژی آزاد سطحی کل با افزایش تراشه آسفالت تا ۴۰ درصد کاهش پیدا می‌کند، اما در درصدهای بالاتر از ۴۰ درصد به دلیل تجمع آسفالتن‌های سخت شده ناشی از پیرشدگی این مقدار روند افزایشی دارد. این مقدار افزایشی نیز نسبت به حالت اولیه قیرهای اصلاح‌شده کمتر بود و این موضوع نشان‌دهنده کاهش انرژی کافی قیر در ایجاد پیوند مؤثر و چسبندگی می‌باشد. از طرف دیگر، مؤلفه قطبی انرژی آزاد سطحی در نمونه‌های قیری تا ۴۰ درصد تراشه آسفالت افزایش پیداکرده و با افزایش درصد تراشه آسفالت مقدار آن کاهش یافت که این موضوع ناشی از اکسیداسیون ترکیبات سبک قیر (مانند اشباع و رزین) و تبدیل آن‌ها به ترکیبات سنگین‌تر (آسفالتن) طی فرآیند پیرشدگی است[۱۳۰].

ACCEPTED MANUSCRIPT

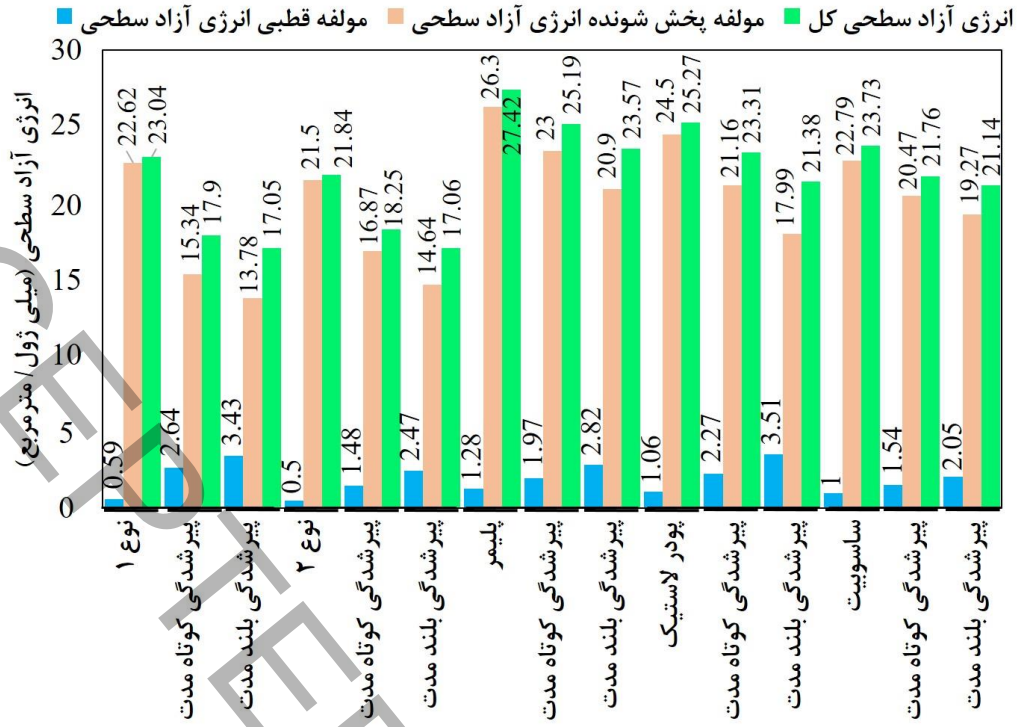
جدول ۷ **مقادیر انرژی آزاد سطحی قیرهای اصلاح‌شده با مقادیر مختلف تراشه آسفالت** [۱۳۰]

Table 7. Surface free energy values of asphalt binders modified with different amounts of RAP [130]

نوع قیر	مؤلفه قطبی انرژی آزاد سطحی (میلی ژول/مترمربع)	مؤلفه پخش شونده انرژی آزاد سطحی (میلی ژول/مترمربع)	انرژی آزاد سطحی کل (میلی ژول/مترمربع)
٪۳ ساسوبیت	۳/۰۴	۱۸/۱۵	۲۱/۱۹
٪۳ ساسوبیت + ٪۲۰ قیر تراشه آسفالتی	۳/۶۸	۱۶/۰۲	۱۹/۷۰
٪۳ ساسوبیت + ٪۴۰ قیر تراشه آسفالتی	۴/۱۳	۱۳/۶۶	۱۷/۷۰
٪۳ ساسوبیت + ٪۶۰ قیر تراشه آسفالتی	۳/۵۵	۱۶/۲۴	۱۹/۷۹
٪۳ زایکوترم	۴/۳۵	۱۷/۱۸	۲۱/۵۳
٪۳ زایکوترم + ٪۲۰ قیر تراشه آسفالتی	۴/۷۱	۱۵/۵۶	۲۰/۲۷
٪۳ زایکوترم + ٪۴۰ قیر تراشه آسفالتی	۵/۵۶	۱۴/۲۱	۱۹/۷۷
٪۳ زایکوترم + ٪۶۰ قیر تراشه آسفالتی	۴/۰۷	۱۶/۶۰	۲۰/۶۷

در پژوهشی ساها و همکارانش به بررسی تأثیر پیرشدگی بر تغییرات مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیرهای اصلاح‌شده با افزودنی‌های مختلف شامل ساسوبیت، پلیمر و پودر لاستیک پرداختند. نتایج گزارش‌شده در شکل ۲۵ حاکی از آن بود که در تمامی نمونه‌های قیر، مؤلفه قطبی انرژی آزاد سطحی در مقایسه با مؤلفه پخش شونده از مقادیر کمتری برخوردار است. این مشاهده، گویای ماهیت عمدتاً غیرقطبی قیر است [۱۳۱]. بااین‌حال، اعمال فرآیند پیرشدگی موجب افزایش چشمگیر مؤلفه قطبی و کاهش هم‌زمان مؤلفه پخش شونده و انرژی آزاد سطحی کل می‌شود. این پدیده را می‌توان ناشی از تغییرات شیمیایی و تبدیل ترکیبات غیرقطبی به گونه‌های قطبی تر در اثر پیرشدگی دانست [۱۳۲]. نکته حائز اهمیت، تفاوت عملکرد افزودنی‌ها در مواجهه با پیرشدگی است. بر اساس داده‌های شکل ۲۵ ، نمونه‌های حاوی پلیمر و پودر لاستیک در مقایسه با نمونه‌های اصلاح‌شده با ساسوبیت، از سطوح بالاتری از انرژی آزاد سطحی کل برخوردارند. مطابق شکل با افزایش شدت پیرشدگی، کاهش انرژی آزاد سطحی می‌تواند منجر به تضعیف پیوند چسبندگی قیر شود، اما این افزودنی‌ها اثرات منفی پیرشدگی را تا حدی کاهش داده و پایداری ساختار قیر را حفظ می‌کنند [۱۱۹].

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۲۵ **تغییرات انرژی آزاد سطحی نمونه‌های اصلاح‌شده در طی فرایند پیرشدگی** [۱۱۹].

Fig. 25. Changes in the Surface free energy of modified samples during the aging process [119]

جی و همکاران مکانیزم چسبندگی مخلوط قیری گرم بازیافتی اصلاح‌شده با SBS را موردبررسی قراردادند و مشاهده کردند قیر پیر شده چسبندگی بین قیر و سنگدانه را بهبود بخشیده که علت این امر می‌تواند تشکیل گروه قطبی مانند کربونیل و سولفوکسید باشند، اما جوانساز با کاهش وزن میانگین مولکولی قیر پیوستگی را کاهش داده و افزودنی ساسوبیت علاوه بر چسبندگی، پیوستگی قیر را کاهش می‌دهد. البته با افزایش درصد قیر پیر شده روند برعکس می‌شود و چسبندگی قیر و سنگدانه کاهش می‌یابد. افزودن ساسوبیت به قیر قطبیت قیر اصلاح‌شده را کاهش داده و واکس که وزن مولکولی بالایی دارد را به قیر اضافه کرده و درنتیجه چسبندگی بین قیر و سنگدانه را تضعیف می‌کند [۱۳۳]. لی و همکاران نیز گزارش دادند که افزودن ساسوبیت مؤلفه قطبی WMRA (مخلوط قیری گرم بازیافتی اصلاح‌شده با SBS) با درصدهای مختلف قیر پیر شده را نسبت به حالت بدون ساسوبیت همواره کاهش می‌دهد [۵۸] و مشابه این نتیجه در پژوهش ژو و همکاران در خصوص با پودر لاستیک گزارش‌شده است [۱۳۴].

در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت عملکرد چسبندگی قیر رابطه مستقیمی با ترکیب شیمیایی آن مخصوصاً گروه‌های عاملی قطبی مانند سولفوکسید و کربونیل دارد. این گروه‌ها می‌توانند به‌عنوان شاخص‌هایی برای پیش‌بینی عملکرد چسبندگی مخلوط‌های آسفالتی مورداستفاده قرار گیرند [۱۳۳]. ازآنجایی‌که همبستگی خوبی بین پارامترهای رئولوژیکی قیر و شاخص‌های شیمیایی وجود دارد، استفاده از FTIR به‌عنوان یک ابزار مؤثر می‌تواند مکمل آزمایش انرژی سطحی باشد [۹۸].

۳-۷- مقایسه روش‌های آزمایشگاهی مورداستفاده در تحلیل خصوصیات شیمیایی و ساختاری قیر

باوجود استفاده گسترده از روش‌های مختلف آزمایشگاهی برای بررسی تغییرات ایجادشده در قیرهای اصلاح‌شده، نتایج حاصل ازاین‌روش‌ها همواره قابل‌مقایسه مستقیم نیستند زیرا هر روش بخشی از ویژگی‌های قیر را مورد ارزیابی قرار داده و دارای محدودیت‌های خاص خود است. به‌عنوان‌مثال، تغییرات مشاهده‌شده در ترکیب شیمیایی الزاماً بیانگر تغییرات رفتار عملکردی قیر نیست و نتایج حاصل از بررسی‌های ساختاری نیز باید در ارتباط با سایر ویژگی‌های قیر تفسیر شوند. ازاین‌رو، شناخت قابلیت‌ها و محدودیت‌های روش‌های

ACCEPTED MANUSCRIPT

مختلف آزمایشگاهی می‌تواند به انتخاب رویکرد مناسب و تفسیر جامع‌تر نتایج مطالعات مرتبط با قیرهای اصلاح‌شده کمک کند. ازاین‌رو، هدف اصلی هر آزمایش، نقاط قوت و محدودیت‌های روش‌های آزمایشگاهی موردبحث در این مطالعه در جدول ۸ ارائه‌شده است.

جدول ۸ **مقایسه قابلیت‌ها و محدودیت‌های آزمایش‌های شیمیایی، ریزساختاری مورداستفاده برای ارزیابی قیر**

Table 8. Comparing the capabilities and limitations of chemical and microstructural tests used to evaluate asphalt binder

روش آزمایش	هدف اصلی آزمایش	نقاط قوت	محدودیت‌ها و ملاحظات تفسیر نتایج
FTIR	شناسایی تغییرات ترکیب شیمیایی و بررسی تغییرات گروه‌های عاملی موجود در ساختار قیر پس از اصلاح با افزودنی‌ها	روش سریع، غیرمخرب و مناسب برای شناسایی تغییرات شیمیایی ناشی از افزودنی‌ها	اطلاعات ارائه‌شده عمدتاً کیفی است و به‌تنهایی برای تفسیر اثر تغییرات شیمیایی بر رفتار رئولوژیکی و ساختاری قیر کافی نیست
SARA	تعیین توزیع اجزای اصلی قیر شامل اشباع‌ها، آروماتیک‌ها، رزین‌ها و آسفالتن‌ها و ارزیابی تغییرات ساختار کلوئیدی	ارائه اطلاعات کمی درباره ترکیب قیر و امکان ارتباط دادن تغییرات اجزا با عملکرد قیر	نتایج به روش جداسازی اجزا وابسته بوده و تغییرات SARA به‌تنهایی نشان‌دهنده عملکرد نهایی قیر نیست
AFM	تصویربرداری و تحلیل مورفولوژی سطح و بررسی تغییرات ریزساختاری مواد قیری	ارائه اطلاعات مستقیم درباره ویژگی‌های ریزساختاری و تغییرات مورفولوژی و فازهای قیر	نتایج به آماده‌سازی نمونه، شرایط تصویربرداری و تفسیر تصاویر وابسته است و نیازمند تلفیق با سایر آزمایش‌ها است
SFE	اندازه‌گیری ویژگی‌های سطحی قیر و سنگدانه و ارزیابی انرژی‌های چسبندگی و جداشدگی در پیوند مشترک قیر و سنگدانه	امکان تحلیل مکانیزم چسبندگی و حساسیت رطوبتی	نتایج به نوع سنگدانه، ویژگی‌های سطحی و شرایط آزمایش وابسته است و نمی‌تواند به‌تنهایی عملکرد کلی مخلوط آسفالتی را پیش‌بینی کند

۴- ارزیابی چرخه عمر روسازی گرم

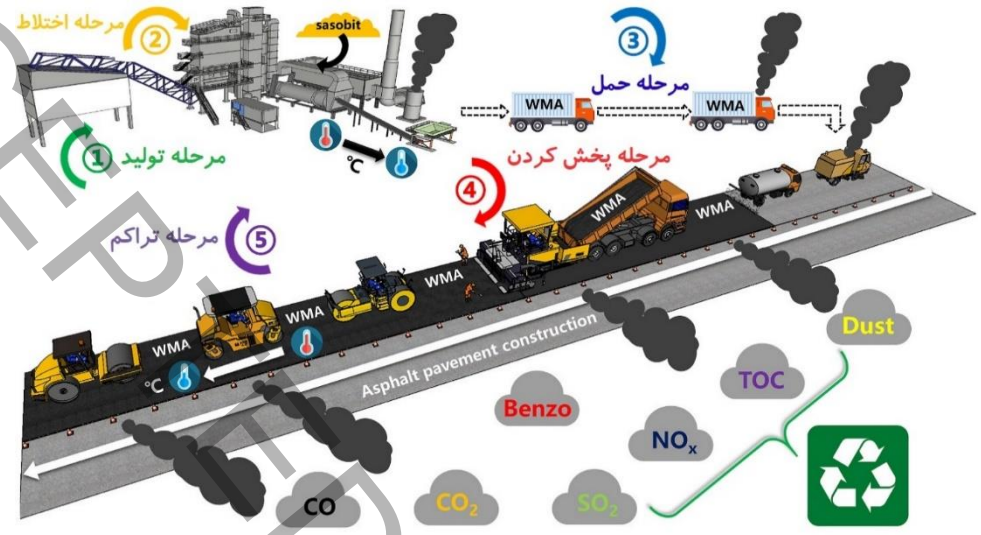
در سال‌های اخیر، فناوری آسفالت گرم به‌واسطه کاهش چشمگیر مصرف انرژی و پایین آوردن انتشار آلاینده‌ها درنتیجه کاهش دمای ساخت نسبت به آسفالت معمولی، در مهندسی روسازی به‌طور گسترده‌ای به‌کار گرفته‌شده است. بااین‌وجود، تکیه صرف بر دمای ساخت پایین، نمی‌تواند معیاری علمی و دقیق برای انتخاب این فناوری محسوب شود، زیرا چنین رویکردی، ارزیابی جامع عملکرد روسازی را در تمام مراحل چرخه عمر از استخراج مواد اولیه تا پایان عمر مفید را در بر نمی‌گیرد. افزون بر دمای ساخت، پارامترهایی مانند نوع و میزان افزودنی‌های مصرفی، هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی مرتبط با به‌روزرسانی یا اصلاح تجهیزات تولید و نیز بازده اقتصادی باید در تصمیم‌گیری لحاظ گردند [۱۳۵, ۱۳۶].

در این میان، ارزیابی چرخه عمر به‌عنوان ابزاری همه‌جانبه، قابلیت تحلیل تأثیرات زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی روسازی‌های مبتنی بر آسفالت گرم را در طول دوره بهره‌برداری فراهم می‌سازد. در این روش، تمامی ورودی‌ها (انرژی، مواد معدنی، مصالح و افزودنی ها) و خروجی‌ها (گازهای گلخانه‌ای، آلاینده‌های ناشی از فرآوری و بازیافت، پسماند) در هر فاز چرخه عمر گردآوری و پس از دسته‌بندی، با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی مانند SimaPro مدل‌سازی می‌شوند. باوجود مزیت‌های گفته‌شده برای آسفالت گرم، این مخلوط را نمی‌توان بر اساس یک پارامتر واحد مانند کاهش مصرف انرژی و یا کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، ارزیابی کرد[۱۳۷-۱۳۹]. ازاین‌رو، چارچوب‌های ارزیابی چندمعیاره مانند LCA[13] و سیستم اعتباربخشی LEED[14] جهت رتبه‌بندی مخلوط‌های آسفالتی گرم، تعیین نوع افزودنی، روش تولید بهینه و انتخاب مصالح موردنیاز شناسایی و مورد بهره‌برداری قرارگرفته‌اند [۱۲, ۱۳۶].

[13] Life Cycle Assessment
[14] Leadership in Energy and Environmental Design

ACCEPTED MANUSCRIPT

LCA مخفف ارزیابی چرخه عمر است که برای ارزیابی اثرات زیست‌محیطی یک محصول از مرحله تولید تا مرحله دفع آن استفاده می‌شود. به‌طور مثال شکل ۲۶ چرخه عمر ساخت روسازی آسفالتی گرم را نشان می‌دهد. جهت بررسی کامل چرخه عمر روسازی مطابق شکل پنج مرحله در ساخت روسازی آسفالتی در نظرگرفته می‌شود که عبارت‌اند از: مرحله تولید، اختلاط، حمل‌ونقل، پخش و مرحله تراکم.



شکل ۲۶ **ارزیابی چرخه عمر احداث روسازی گرم به‌صورت تصویر شماتیکی [۹۲]**

Fig. 26. Schematic illustration of the life cycle assessment of warm mix pavement construction [92]

مطابق شکل ۲۶ در مرحله تولید و اختلاط روسازی گرم با افزودن ساسوبیت، از دماهای پایین‌تری نسبت به روسازی آسفالتی داغ استفاده‌شده و درنتیجه انرژی کمتری در این فرآیند مصرف می‌شود. در مرحله حمل‌ونقل مخلوط آسفالتی گرم در مقایسه با مخلوط آسفالتی داغ، گازهای آلاینده تقریباً برابری در حدفاصل کارخانه تا محل پروژه انتشار می‌یابد. در ادامه از مرحله پخش تا تراکم مخلوط آسفالتی، روسازی آسفالتی گرم در مقایسه با روسازی آسفالتی داغ و روسازی‌های پلیمری داغ باعث کاهش انتشار گازهای مضر مانند دود آسفالت، NO_2، BSO و بنزوپیرن می‌شود، به‌طوری‌که داده‌های میدانی اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد که روسازی آسفالتی گرم حاوی ۳ درصد ساسوبیت در مقایسه با روسازی آسفالتی داغ مقدار انتشار گازهای آلاینده را بیش از ۸۰ درصد کاهش می‌دهد [۹۲]. در تحقیق انجام‌شده توسط سانتوس و همکاران، از یک مطالعه LCA (تجزیه‌وتحلیل چرخه عمر) مبتنی بر فرآیند مقایسه‌ای استفاده شد تا اثرات زیست‌محیطی مخلوط‌های آسفالتی مختلف مورداستفاده در ساخت و نگهداری یک بخش از جاده در طول چرخه عمر آن را محاسبه و مقایسه کنند [۱۴۰]. این تحقیق نتایج جالبی را ارائه داد و نشان داد که مخلوط‌های آسفالتی با دمای پایین، به‌عنوان‌مثال آسفالت اصلاح‌شده با ساسوبیت، دارای اثرات زیست‌محیطی کمتری نسبت به آسفالت مخلوط گرم معمولی هستند. به‌طور مشابه، تاتاری و همکاران (۲۰۱۲) نیز از یک مدل LCA ترکیبی برای مقایسه مزایای زیست‌محیطی انواع مختلف افزودنی‌های مخلوط گرم ازجمله ساسوبیت، آسفامین و اووترم استفاده کردند و مشاهده کردند که مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با ساسوبیت به میزان ۱۷/۹ درصد مصرف گاز طبیعی را کاهش داده و نسبت به سایر افزودنی‌ها آلاینده‌های جزئی‌تری منتشر می‌کنند و اثرات زیست‌محیطی کمتری نسبت به آسفالت مخلوط گرم معمولی دارند [۱۴۱].

با توجه به ارتباط مستقیم مصرف انرژی با هزینه‌های تولید، کاهش دمای فرآیند اختلاط و تراکم در مخلوط‌های آسفالتی گرم می‌تواند علاوه بر کاهش اثرات زیست‌محیطی، در ارزیابی اقتصادی این فناوری نیز موردتوجه قرار گیرد. بااین‌حال، امکان‌پذیری اقتصادی استفاده از ساسوبیت تنها به هزینه اولیه افزودنی محدود نبوده و پارامترهایی مانند مقدار مصرف ساسوبیت، قیمت انرژی، شرایط تولید، هزینه حمل‌ونقل و عملکرد بلندمدت روسازی نیز باید در نظر گرفته شوند. در این راستا لیو و همکاران (۲۰۲۳) با بررسی ویژگی‌ها و ارزیابی چرخه عمر مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی ساسوبیت نشان دادند که افزودن ۴ درصد ساسوبیت موجب کاهش دمای اختلاط و تراکم

ACCEPTED MANUSCRIPT

به ترتیب به میزان۳۸/۹ و ۳۶/۸ درجه سانتی‌گراد نسبت به مخلوط شاهد می‌شود. همچنین، استفاده از ساسوبیت باعث کاهش مصرف انرژی به میزان ۱۳۴/۸۶ MJ/t (معادل ۲۱/۵۶ درصد) و کاهش انتشار کربن به میزان ۱۱۲/۰۳ kg/t (معادل ۴۰/۶ درصد) شد. این نتایج بیانگر آن است که کاهش انرژی مصرفی در فرآیند تولید می‌تواند یکی از عوامل مؤثر در ارزیابی اقتصادی فناوری ساسوبیت باشد [۹۲].

علاوه بر مطالعات انجام‌شده بر روی ساسوبیت، بررسی‌های اخیر در زمینه فناوری‌های آسفالت گرم نشان داده‌اند که ارزیابی مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی این فناوری‌ها باید در چارچوب چرخه عمر کامل روسازی انجام شود. گبولاد و میشرا (۲۰۲۵) در بررسی مخلوط‌های WMA شیمیایی، کاهش مصرف سوخت و بهبود شاخص‌های زیست‌محیطی ناشی از کاهش دمای تولید را گزارش کردند [۱۴۲].، درحالی‌که رودریگز و گارن (۲۰۲۶) بر اهمیت در نظر گرفتن مراحل نگهداری، بهره‌برداری و پایان عمر روسازی در ارزیابی چرخه عمر تأکید نمودند [۱۴۳]. ازاین‌رو، استفاده هم‌زمان از ارزیابی چرخه عمر و تحلیل هزینه چرخه عمر می‌تواند چارچوب جامع‌تری برای بررسی اثرات اقتصادی و زیست‌محیطی استفاده از ساسوبیت فراهم کند. بااین‌حال، در ارزیابی زیست‌محیطی ساسوبیت باید علاوه بر مزایای حاصل از کاهش دمای تولید، اثرات مرتبط با تولید، انتقال و تأمین خود افزودنی نیز موردتوجه قرار گیرد. فرآیند تولید ساسوبیت، انرژی مصرفی، میزان استفاده از افزودنی و شرایط حمل‌ونقل می‌توانند بر نتایج نهایی ارزیابی چرخه عمر اثرگذار باشند. با توجه به محدود بودن مطالعاتی که تمامی مراحل چرخه عمر ساسوبیت را به‌صورت جامع بررسی کرده‌اند، انجام تحقیقات بیشتر با تمرکز بر ارزیابی کامل چرخه عمر این افزودنی ضروری به نظر می‌رسد.

به‌منظور ارزیابی اثر مقدار افزودنی ساسوبیت بر تأثیرات زیست‌محیطی مخلوط‌های WMA، رودریگز و همکاران (۲۰۱۵) با بهره‌گیری از یک مدل ترکیبی تحلیل چرخه عمر مبتنی بر ورودی-خروجی، انرژی نهفته و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای را بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که افزودن ۲ و ۴ درصد ساسوبیت به مخلوط آسفالتی گرم، به‌ترتیب منجر به کاهش ۱۹ و ۱۶ درصدی درمجموع انرژی مصرفی شد. بااین‌حال، افزایش مقدار درصدی ساسوبیت موجب کاهش نرخ صرفه‌جویی انرژی گردید. همچنین، از منظر انتشار گازهای گلخانه‌ای، مشخص شد که استفاده از ۲ و ۴ درصد ساسوبیت به ترتیب موجب کاهش ۱۸ و ۱۶ درصدی در کل انتشار CO_2 به ازای هر تن مخلوط تولیدی در مقایسه با آسفالت معمولی می‌شود [۲۲]. در تحقیق دیگری توسط استیمیلی و همکاران در سال ۲۰۱۷، اثرات زیست‌محیطی مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی در مقایسه با مخلوط‌های آسفالتی گرم، با استفاده از روش ارزیابی چرخه عمر موردبررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان دادند که مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی در مقایسه با مخلوط‌های آسفالتی گرم معمولی می‌توانند مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای را به نسبت ۲۰ تا ۳۰ درصد کاهش دهند [۱۴۴]. بااین‌حال، برای ارزیابی دقیق عملکرد مخلوط‌های آسفالتی گرم در مقایسه با مخلوط‌های آسفالتی داغ، نیاز به داده‌های میدانی بلندمدت همراه با در نظر گرفتن شرایط مختلف منطقه به‌ویژه شرایط آب و هوایی وجود دارد. این اطلاعات و شرایط منطقه‌ای باید به‌منظور تصمیم‌گیری‌های بهتر و ارزیابی دقیق‌تر در مورد عملکرد مخلوط‌های آسفالتی موردتوجه قرار گیرند.

۵- پیشنهادات برای تحقیقات آینده

باوجود مطالعات گسترده درباره کاربرد ساسوبیت در فناوری آسفالت گرم و اثر آن بر کاهش دمای تولید، بهبود کارایی اجرایی و تغییر خواص رئولوژیکی قیر، هنوز برخی جنبه‌های مهم مربوط به سازوکار عملکرد، دوام بلندمدت و کاربرد میدانی این افزودنی نیازمند بررسی بیشتر است. عملکرد ساسوبیت تنها به کاهش ویسکوزیته محدود نبوده و تحت تأثیر ترکیب شیمیایی قیر، ساختار کلوئیدی، شرایط پیرشدگی، نوع سنگدانه و مقدار افزودنی قرار دارد. بنابراین، توسعه رویکردهای چندمقیاسی برای ارتباط دادن تغییرات شیمیایی، ساختاری و عملکردی قیر یکی از مهم‌ترین مسیرهای تحقیقات آینده خواهد بود.

- یکی از زمینه‌های مهم پژوهشی، بررسی ارتباط کمی میان تغییرات اجزای SARA، گروه‌های عاملی، ویژگی‌های ریزساختاری مشاهده‌شده با AFM و پارامترهای رئولوژیکی است. اگرچه مطالعات متعددی اثر ساسوبیت و پیرشدگی را بر ترکیب شیمیایی قیر بررسی کرده‌اند، اما مکانیسم ارتباط این تغییرات با عملکرد بلندمدت روسازی هنوز به‌طور کامل مشخص نشده است.
- با توجه به تفاوت نتایج گزارش‌شده درباره اثر ساسوبیت در شرایط پیرشدگی، مطالعات آینده باید تغییرات شیمیایی، ریزساختاری و رئولوژیکی قیر را به‌صورت هم‌زمان در شرایط پیرشدگی کوتاه‌مدت و بلندمدت موردبررسی قرار دهند. همچنین، بررسی اثر

ACCEPTED MANUSCRIPT

عوامل محیطی مانند رطوبت، تابش فرابنفش و تغییرات دمایی می‌تواند اطلاعات دقیق‌تری درباره دوام بلندمدت قیرهای اصلاح‌شده فراهم کند.

- از دیدگاه پایداری، مطالعات آینده باید ارزیابی چرخه عمر را با در نظر گرفتن مراحل تولید و حمل ساسوبیت، تولید و اجرای مخلوط آسفالتی، استفاده از RAP، نگهداری و سناریوهای پایان عمر توسعه دهند. همچنین، ترکیب با تحلیل هزینه چرخه عمر می‌تواند ارزیابی دقیق‌تری از مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی استفاده از ساسوبیت ارائه کند.
- با توجه به محدود بودن مطالعات میدانی بلندمدت، انجام ارزیابی‌های میدانی تحت شرایط اقلیمی و ترافیکی و محیطی مختلف می‌تواند به بررسی میزان تطابق نتایج آزمایشگاهی با عملکرد واقعی روسازی‌های اصلاح‌شده با ساسوبیت کمک کند.
- تلفیق داده‌های شیمیایی، ریزساختاری و رئولوژیکی با مدل‌های پیش‌بینی و روش‌های یادگیری ماشین می‌تواند برای شناسایی عوامل مؤثر بر عملکرد قیر و تعیین محدوده مناسب مصرف ساسوبیت مورداستفاده قرار گیرد.

۶- نتیجه‌گیری

باوجود مزایای متعدد فناوری آسفالت گرم، کاهش دمای تولید می‌تواند در برخی شرایط بر چسبندگی قیر پایه و سنگدانه و حساسیت مخلوط در برابر رطوبت تأثیرگذار باشد. ازاین‌رو، انتخاب و استفاده از افزودنی‌های مناسب می‌تواند نقش مؤثری در حفظ یا بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی گرم داشته باشد. در این مقاله، افزودنی ساسوبیت به‌عنوان یکی از افزودنی‌های پرکاربرد در فناوری آسفالت گرم معرفی‌شده و مطالعات انجام‌شده در زمینه تأثیر آن بر ویژگی‌های رئولوژیکی و شیمیایی قیر موردبررسی و ارزیابی قرارگرفته است. مهم‌ترین نتایج حاصل از این بررسی به شرح زیر است:

۱) ساسوبیت به‌عنوان یک افزودنی گرم، متناسب با دمای استفاده از آن اثرات متفاوتی بر روی قیر اصلاح‌شده دارد و با توجه به عملکرد متفاوتش در دو دمای مختلف پایین و بالای نقطه ذوبش به ترتیب رفتاری غیر نیوتونی و نیوتونی از خود نشان می‌دهد.

۲) وزن مولکولی افزودنی واکسی ساسوبیت به‌طور قابل‌توجهی بر عملکرد آن در دماهای مختلف تأثیر می‌گذارد. واکس با وزن مولکولی ۱۳۰۰ تا ۱۵۰۰ دالتون ویسکوزیته را کاهش داده، مقاومت در برابر تغییر شکل و شیارشدگی در دمای بالا را بهبود می‌بخشد و به دلیل حلالیت مناسب، به‌عنوان روان کننده عمل می‌کند. در مقابل، ساسوبیت با وزن مولکولی پایین (۴۰۰ تا ۷۰۰ دالتون) مقاومت در برابر ترک‌خوردگی در دمای پایین را افزایش داده و اثر منفی بر مقاومت شیارشدگی در دمای بالا دارد.

۳) استفاده از ساسوبیت به‌عنوان افزودنی گرم در قیرهای پلیمری اصلاح‌شده، ضمن کاهش ویسکوزیته و بهبود کارایی اختلاط، مقاومت شیارشدگی و عملکرد دمای بالای قیر را ارتقا می‌دهد، اما ممکن است مقاومت خستگی و ترک‌خوردگی در دمای متوسط و پایین را کاهش دهد. افزودن موادی مانند نانو مونتموریلونیت یا نانو سیلیس می‌تواند اثرات منفی ساسوبیت را تعدیل کرده و پایداری حرارتی، خودترمیمی و عمر خستگی قیر را بهبود بخشد. این ویژگی‌ها، همراه با کاهش دمای تولید و اثرات زیست‌محیطی مثبت، ساسوبیت را به گزینه‌ای مؤثر برای بهینه‌سازی مخلوط‌های آسفالتی تبدیل می‌کند.

۴) بررسی‌های میکروسکوپی با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی نشان می‌دهد که افزودنی ساسوبیت تأثیر قابل‌توجهی بر مورفولوژی قیر اصلاح‌شده دارد. این افزودنی باعث کاهش عرض ساختارهای زنبوری شکل و کشیده‌تر شدن آن‌ها می‌شود. با افزایش درصد ساسوبیت، تعداد این ساختارها کاهش‌یافته، درحالی‌که طول آن‌ها افزایش می‌یابد. همچنین، در طول فرآیند پیرشدگی، طول ساختارهای زنبوری شکل با شدت پیرشدگی تغییر می‌کند؛ به‌طوری‌که در مراحل اولیه پیرشدگی، طول این ساختارها افزایش‌یافته و سپس با پیشرفت پیرشدگی کاهش می‌یابد. تعداد این ساختارها نیز در طی فرآیند پیرشدگی متغیر بوده و این تغییرات می‌تواند به عواملی نظیر نوع قیر، تراکم آسفالتن و تبلور واکس‌ها وابسته باشد.

۵) مطابق آزمایش طیف‌سنجی مادون‌قرمز هیچ پیک جدیدی نسبت به قیر پایه در قیر اصلاح‌شده با ساسوبیت اضافه نشده و این موضوع نشان‌دهنده فرآیند فیزیکی و سازگاری خوب بین قیر پایه و ساسوبیت می‌باشد.

۶) ساسوبیت با کاهش ویسکوزیته قیر، امکان اختلاط و تراکم در دماهای پایین‌تر را فراهم می‌آورد و این کاهش دمای تولید، منجر به کاهش سرعت واکنش‌های اکسیداسیون و پیرشدگی اولیه (پیرشدگی کوتاه‌مدت) می‌شود. بنابراین ساسوبیت، چه به‌تنهایی و چه در ترکیب با سایر اصلاح‌کننده‌ها، نقش اساسی در کاهش اثرات پیرشدگی و افزایش دوام قیر دارد.

ACCEPTED MANUSCRIPT

۷) ساسوبیت به‌واسطه ساختار شیمیایی خود موجب تغییرات در اجزای مختلف SARA در قیر می‌شود و از این نظر عملکردی مشابه قیرهای پیر شده تراشه آسفالت دارد به‌طوری‌که با افزودن به قیر پایه و افزایش تدریجی آن مقدار درصد وزنی محتوای آسفالتن و مالتن قیر به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. همچنین با اعمال پیرشدگی، درصد وزنی رزین و آروماتیک در قیر حاوی ساسوبیت به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد.

۸) ساسوبیت به‌عنوان یک عامل منفی در تغییر انرژی آزاد سطحی قیر شناخته می‌شود که می‌تواند عملکرد نهایی مخلوط آسفالت را تحت تأثیر قرار دهد. بااین‌حال، این افزودنی در فرآیند پیرشدگی نقش دوگانه‌ای ایفا می‌کند. با افزایش شدت پیرشدگی، کاهش انرژی آزاد سطحی ممکن است پیوند چسبندگی قیر را تضعیف کند، اما ساسوبیت با کاهش اثرات منفی پیرشدگی، به حفظ پایداری ساختار قیر کمک می‌کند.

۹) روسازی آسفالتی گرم حاوی ساسوبیت در مقایسه با روسازی آسفالتی معمولی مقدار انتشار گازهای آلاینده را بیش از ۸۰ درصد کاهش داده و دارای اثرات زیست‌محیطی کمتری است.

در حالت کلی می‌توان بیان کرد که فنّاوری WMA با بهره‌گیری از افزودنی‌هایی مانند ساسوبیت، نه‌تنها از منظر زیست‌محیطی با کاهش دما و انتشار گازهای مضر برتری دارد، بلکه ازنظر فنی نیز با بهبود خواص رئولوژیکی، مکانیکی و دوام روسازی، عملکردی ممتاز ارائه می‌دهد. امکان استفاده از RAP بالا، تغییرات مثبت در میکروساختار قیر و نتایج مطلوب تحلیل‌های LCA و اقتصادی، این فنّاوری را به گزینه‌ای پایدار و کارآمد برای پروژه‌های راه‌سازی تبدیل کرده است.

۷- منابع و مراجع

[1] M. Sukhija, N. Saboo, A. Pani, Correlating the Fatigue Response of Asphalt Binders and Mixtures Prepared Using Warm-Mix Asphalt Technologies, Journal of Materials in Civil Engineering, 37(3) (2025) 04024537.

[2] M. Sukhija, N. Saboo, A. Pani, Economic and environmental aspects of warm mix asphalt mixtures: A comparative analysis, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 109 (2022) 103355.

[3] S. Sobhi, A. Yusefi, S. Hesami, M. Ameri, An investigation of factors affecting the moisture sensitivity of warm mix asphalt (WMA), Amirkabir Journal of Civil Engineering, 52(1) (2020) 187-212.

[4] A. Yousefi, A. Behnood, A. Nowruzi, H. Haghshenas, Performance evaluation of asphalt mixtures containing warm mix asphalt (WMA) additives and reclaimed asphalt pavement (RAP), Construction and Building Materials, 268 (2021) 121200.

[5] A.A. Yousefi, H.F. Haghshenas, B.S. Underwood, J. Harvey, P. Blankenship, Performance of warm asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement, an anti-stripping agent, and recycling agents: A study using a balanced mix design approach, Construction and Building Materials, 363 (2023) 129633.

[6] M. Ameri, S.V. Abdipour, A.R. Yengejeh, M. Shahsavari, A.A. Yousefi, Evaluation of rubberised asphalt mixture including natural Zeolite as a warm mix asphalt (WMA) additive, International Journal of Pavement Engineering, 24(2) (2023) 2057977.

[7] H. Ziari, M. Orouei, H. Divandari, A. Yousefi, Mechanical characterization of warm mix asphalt mixtures made with RAP and Para-fiber additive, Construction and Building Materials, 279 (2021) 122456.

[8] A.A. Yousefi, S. Sobhi, M.M. Aliha, S. Pirmohammad, H.F. Haghshenas, Cracking properties of warm mix asphalts containing reclaimed asphalt pavement and recycling agents under different loading modes, Construction and Building Materials, 300 (2021) 124130.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[9] M.R. Pouranian, M. Shishehbor, Sustainability assessment of green asphalt mixtures: A review, Environments, 6(6) (2019) 73.
[10] C. Hettiarachchi, X. Hou, J. Wang, F. Xiao, A comprehensive review on the utilization of reclaimed asphalt material with warm mix asphalt technology, Construction and Building Materials, 227 (2019) 117096.
[11] M. Sukhija, N. Saboo, A comprehensive review of warm mix asphalt mixtures-laboratory to field, Construction and Building Materials, 274 (2021) 121781.
[12] A. Jamshidi, M.O. Hamzah, Z. You, Performance of warm mix asphalt containing Sasobit®: State-of-the-art, Construction and Building Materials, 38 (2013) 530-553.
[13] G.C. Hurley, B.D. Prowell, Evaluation of Sasobit for use in warm mix asphalt, NCAT report, 5(6) (2005) 1-27.
[14] P. Duan, T. Lei, Y. Han, H. Dai, M. Hou, W. Yao, Q. Zhou, S. Zeng, Z. Min, Effect of warm-mixing wax' s molecular weights on microstructure, rheological and mechanical properties of asphalt composites, Construction and Building Materials, 408 (2023) 133620.
[15] K. Zhang, Y. Luo, F. Chen, F. Han, Performance evaluation of new warm mix asphalt and water stability of its mixture based on laboratory tests, Construction and Building Materials, 241 (2020) 118017.
[16] S. Pirmohammad, S. Sobhi, A. Yousefi, Study on the effect of reclaimed asphalt pavement and rejuvenator on fracture behavior of WMA, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 53(10) (2021) 4413-4432.
[17] A. Yousefi, S. Pirmohammad, S. Sobhi, Fracture toughness of warm mix asphalts containing reclaimed asphalt pavement, Journal of Stress Analysis, 5(1) (2020) 85-98.
[18] S. Sobhi, A. Yousefi, A. Behnood, The effects of Gilsonite and Sasobit on the mechanical properties and durability of asphalt mixtures, Construction and Building Materials, 238 (2020) 117676.
[19] T. Gandhi, S. Amirkhanian, Laboratory simulation of warm mix asphalt (WMA) binder aging characteristics, in: Airfield and Highway Pavements: Efficient Pavements Supporting Transportation's Future, 2008, pp. 195-204.
[20] A. Syroezhko, M. Baranov, S. Ivanov, N. Maidanova, Influence of natural additives and those synthesized by the Fischer-Tropsch method on the properties of petroleum bitumen and quality of floated asphalt, Coke and Chemistry, 54(1) (2011) 26-31.
[21] Y. Edwards, U. Isacsson, Wax in bitumen: part 1−classifications and general aspects, Road materials and pavement design, 6(3) (2005) 281-309.
[22] N. Liu, L. Liu, M. Li, L. Sun, A comprehensive review of warm-mix asphalt mixtures: Mix design, construction temperatures determination, performance and life-cycle assessment, Road Materials and Pavement Design, 25(7) (2024) 1381-1425.
[23] J. Gao, K. Yan, W. He, S. Yang, L. You, High temperature performance of asphalt modified with Sasobit and Deurex, Construction and Building Materials, 164 (2018) 783-791.
[24] J. Ji, S. Xu, Study on the impact of Sasobit on asphalt's properties and micro-structure, in: Pavements and materials: Testing and modeling in multiple length scales, 2010, pp. 182-194.
[25] J. Zhang, F. Yang, J. Pei, S. Xu, F. An, Viscosity-temperature characteristics of warm mix asphalt binder with Sasobit®, Construction and Building Materials, 78 (2015) 34-39.
[26] H. Luo, H. Leng, H. Ding, J. Xu, H. Lin, C. Ai, Y. Qiu, Low-temperature cracking resistance, fatigue performance and emission reduction of a novel silica gel warm mix asphalt binder, Construction and Building Materials, 231 (2020) 117118.
[27] Q. Qin, M.J. Farrar, A.T. Pauli, J.J. Adams, Morphology, thermal analysis and rheology of Sasobit modified warm mix asphalt binders, Fuel, 115 (2014) 416-425.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[28] A. Samieadel, B. Høgsaa, E.H. Fini, Examining the implications of wax-based additives on the sustainability of construction practices: Multiscale characterization of wax-doped aged asphalt binder, ACS sustainable chemistry & engineering, 7(3) (2019) 2943-2954.
[29] R. Sheikh Mohammadi, S. Sobhi, B. Golchin, F. Karimian Khosroshahi, Evaluation of Rutting Resistance and High-Temperature Performance Grade of Polymeric Sulfur and Nanoclay Modified Asphalt Binder, Journal of Transportation Research, (2025) e237371.
[30] S. Hesami, M. Mahzari, S. Sobhi, M.A. Bay, Investigating the rheological properties and microstructural analysis of Nano-expanded Perlite modified asphalt binder, Case Studies in Construction Materials, 22 (2025) e04208.
[31] S. Sobhi, S. Hesami, Evaluation of moisture and rutting resistance of modified warm mix asphalt with a mineral additive, Journal of Transportation Research, 20(2) (2023) 263-280.
[32] M. Qolizade, H. Divandari, S.a. Sobhi, Investigation of using Coal Waste in asphalt mixtures and it's effects on moisture damage with the approach of bitumen chemistry and asphalt mixture mechanical test, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 54(12) (2023) 4769-4788.
[33] T. Sesay, Q. You, J. Chuan, H. Qiao, H. Zhang, S. Tian, High and intermediate temperature performance of warm asphalt rubber containing conventional warm mix additives and novel chemical surfactant, Construction and Building Materials, 394 (2023) 132214.
[34] X. Liang, X. Yu, C. Chen, G. Ding, J. Huang, Towards the low-energy usage of high viscosity asphalt in porous asphalt pavements: A case study of warm-mix asphalt additives, Case Studies in Construction Materials, 16 (2022) e00914.
[35] B. Sedaghat, R. Taherrian, S.A. Hosseini, S.M. Mousavi, Rheological properties of bitumen containing nanoclay and organic warm-mix asphalt additives, Construction and Building Materials, 243 (2020) 118092.
[36] R. Li, N. Shao, J. Yue, B. Liang, Research on the influence of different warm-mix modifiers on pavement performance of bitumen and its mixture, Applied Sciences, 13(2) (2023) 955.
[37] H. Xu, Y. Sun, J. Chen, J. Li, B. Yu, G. Qiu, Y. Zhang, B. Xu, Investigation into Rheological Behavior of Warm-Mix Recycled Asphalt Binders with High Percentages of RAP Binder, Materials, 16(4) (2023) 1599.
[38] D. Wu, X. Zhao, Y. Peng, Y. Cheng, P. Zhou, Improving Effects of Warm-Mix Additive Sasobit on Performance of Short-Term Aged SBR Modified Asphalt, International Journal of Pavement Research and Technology, 16(4) (2023) 983-991.
[39] H. Liu, Z. Zhang, J. Xie, Z. Gui, N. Li, Y. Xu, Analysis of OMMT strengthened UV aging-resistance of Sasobit/SBS modified asphalt: Its preparation, characterization and mechanism, Journal of Cleaner Production, 315 (2021) 128139.
[40] M. Yue, J. Yue, R. Wang, Y. Xiong, Evaluating the fatigue characteristics and healing potential of asphalt binder modified with Sasobit® and polymers using linear amplitude sweep test, Construction and Building Materials, 289 (2021) 123054.
[41] Y. Erkuş, B.V. Kök, M. Yilmaz, Evaluation of performance and productivity of bitumen modified by three different additives, Construction and Building Materials, 261 (2020) 120553.
[42] H. Wang, X. Liu, M. van de Ven, G. Lu, S. Erkens, A. Skarpas, Fatigue performance of long-term aged crumb rubber modified bitumen containing warm-mix additives, Construction and Building Materials, 239 (2020) 117824.
[43] M. Harooni Jamaloei, M. Aboutalebi Esfahani, M. Filvan Torkaman, Rheological and mechanical properties of bitumen modified with Sasobit, polyethylene, paraffin, and their mixture, Journal of Materials in Civil Engineering, 31(7) (2019) 04019119.
[44] S. Sobhi, S. Hesami, M. Poursoltani, P. Ayar, R.S. Mullapudi, Coupled effects of gilsonite and Sasobit on binder properties: Rheological and chemical analysis, Journal of Materials in Civil Engineering, 34(3) (2022) 04021470.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[45] H.-H. Chu, A.I. Almohana, G.A. QasMarrogy, S.F. Almojil, A.F. Alali, K.T. Almoalimi, A. Raise, Experimental investigation of performance properties of asphalt binder and stone matrix asphalt mixture using waste material and warm mix additive, Construction and Building Materials, 368 (2023) 130397.
[46] M. Lagos-Varas, D. Movilla-Quesada, A. Raposeiras, P. Monsalve-Cárcamo, D. Castro-Fresno, Rheological analyses of binders modified with triple combinations of Crumb-Rubber, Sasobit and Styrene-Butadiene-Styrene, Case Studies in Construction Materials, (2023) e02235.
[47] M. Yue, J. Yue, R. Wang, Y. Guo, X. Ma, A Comprehensive Analysis of Fatigue and Healing Capacity of Sasobit Polymer-Modified Asphalt from Two Perspectives: Binder and FAM, Journal of Materials in Civil Engineering, 35(3) (2023) 04022478.
[48] D. Wang, C. Riccardi, B. Jafari, A.C. Falchetto, M.P. Wistuba, Investigation on the effect of high amount of Re-recycled RAP with Warm mix asphalt (WMA) technology, Construction and Building Materials, 312 (2021) 125395.
[49] S.K. Badroodi, M.R. Keymanesh, G. Shafabakhsh, Experimental investigation of the fatigue phenomenon in nano silica-modified warm mix asphalt containing recycled asphalt considering self-healing behavior, Construction and Building Materials, 246 (2020) 117558.
[50] F. Zaremotekhases, H. Sadek, M. Hassan, C. Berryman, Impact of warm-mix asphalt technologies and high reclaimed asphalt pavement content on the performance of alternative asphalt mixtures, Construction and Building Materials, 319 (2022) 126035.
[51] Q. Li, G. Sun, Y. Lu, Y. Meng, S. Luo, L. Gao, Effects of warm-mix asphalt technologies and modifiers on pavement performance of recycled asphalt binders, Journal of Cleaner Production, 282 (2021) 125435.
[52] D.M. Abd, H. Al-Khalid, R. Akhtar, Nano-scale properties of warm-modified bituminous binders determined with atomic force microscopy, Road Materials and Pavement Design, 18(sup2) (2017) 189-202.
[53] E. Mirzaaghaeian, A. Modarres, Rheological properties of bituminous mastics containing chemical warm additive at medium temperatures and its relationship to warm mix asphalt fatigue behavior, Construction and Building Materials, 225 (2019) 44-54.
[54] L. Loeber, O. Sutton, J. Morel, J.M. Valleton, G. Muller, New direct observations of asphalts and asphalt binders by scanning electron microscopy and atomic force microscopy, Journal of microscopy, 182(1) (1996) 32-39.
[55] J.F. Masson, V. Leblond, J. Margeson, Bitumen morphologies by phase-detection atomic force microscopy, Journal of microscopy, 221(1) (2006) 17-29.
[56] M.D. Nazzal, L. Abu-Qtaish, S. Kaya, D. Powers, Using atomic force microscopy to evaluate the nanostructure and nanomechanics of warm mix asphalt, Journal of Materials in Civil Engineering, 27(10) (2015) 04015005.
[57] S. Mansoori, A. Modarres, Rheological and micro-structural properties of bituminous mastics containing chemical and wax warm additives, Construction and Building Materials, 248 (2020) 118623.
[58] B. Li, A. Li, X. Chen, X. Nan, Z. Li, K. Qiu, H. Ji, Multi-scale investigation on the adhesion properties of warm-mixed recycled SBS modified asphalt, Construction and Building Materials, 377 (2023) 131129.
[59] W. Huo, Y. Zhuang, Z. Wang, X. Kang, R. Wang, The Microscopic Mechanism and Rheological Properties of SBS-Modified Asphalt with Warm Mixing Fast-Melting, Materials, 16(16) (2023) 5690.
[60] A.S. Al-Rawashdeh, S. Sargand, Performance assessment of a warm asphalt binder in the presence of water by using surface free energy concepts and nanoscale techniques, Journal of materials in civil engineering, 26(5) (2014) 803-811.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[61] Z. Dong, Z. Liu, P. Wang, X. Gong, Nanostructure characterization of asphalt-aggregate interface through molecular dynamics simulation and atomic force microscopy, Fuel, 189 (2017) 155-163.
[62] M. Gong, H. Zhu, T. Pauli, J. Yang, J. Wei, Z. Yao, Evaluation of bio-binder modified asphalt's adhesion behavior using sessile drop device and atomic force microscopy, Construction and Building Materials, 145 (2017) 42-51.
[63] I. Menapace, L.G. Cucalon, F. Kaseer, E. Arámbula-Mercado, A.E. Martin, E. Masad, G. King, Effect of recycling agents in recycled asphalt binders observed with microstructural and rheological tests, Construction and Building Materials, 158 (2018) 61-74.
[64] W. Li, P. Hao, L. Huang, X. Qu, Y. Fan, Research progress of bitumen bee structure based on atomic force microscopy: a literature review, International Journal of Pavement Engineering, 25(1) (2024) 2400556.
[65] I. Menapace, E. Masad, A. Bhasin, D. Little, Microstructural properties of warm mix asphalt before and after laboratory-simulated long-term ageing, Road Materials and Pavement Design, 16(sup1) (2015) 2-20.
[66] Y. Hu, Y. Yin, A. Sreeram, W. Si, G.D. Airey, B. Li, B. Singh, D.K. Özdemir, L. Zhou, Atomic force microscopy (AFM) based microstructural and micromechanical analysis of bitumen during ageing and rejuvenation, Construction and Building Materials, 467 (2025) 140387.
[67] X. Lu, P. Sjövall, H. Soenen, J. Blom, M. Makowska, Oxidative aging of bitumen: A structural and chemical investigation, Road Materials and Pavement Design, 23(5) (2022) 1091-1106.
[68] M. Xu, J. Yi, Z. Pei, D. Feng, Y. Huang, Y. Yang, Generation and evolution mechanisms of pavement asphalt aging based on variations in surface structure and micromechanical characteristics with AFM, Materials Today Communications, 12 (2017) 106-118.
[69] M. Wang, L. Liu, Investigation of microscale aging behavior of asphalt binders using atomic force microscopy, Construction and Building Materials, 135 (2017) 411-419.
[70] S.-p. Wu, G.-j. Zhu, Z. Chen, Z.-f. Liu, Laboratory research on rheological behavior and characterization of ultraviolet aged asphalt, Journal of Central South University of Technology, 15 (2008) 369-373.
[71] A. Chen, G. Liu, Y. Zhao, J. Li, Y. Pan, J. Zhou, Research on the aging and rejuvenation mechanisms of asphalt using atomic force microscopy, Construction and Building Materials, 167 (2018) 177-184.
[72] S. Liu, A. Peng, S. Zhou, J. Wu, W. Xuan, W. Liu, Evaluation of the ageing behaviour of waste engine oil-modified asphalt binders, Construction and Building Materials, 223 (2019) 394-408.
[73] J.P. Aguiar-Moya, J. Salazar-Delgado, A. García, A. Baldi-Sevilla, V. Bonilla-Mora, L.G. Loría-Salazar, Effect of ageing on micromechanical properties of bitumen by means of atomic force microscopy, Road Materials and Pavement Design, 18(sup2) (2017) 203-215.
[74] G. Pipintakos, N. Hasheminejad, C. Lommaert, A. Bocharova, J. Blom, Application of atomic force (AFM), environmental scanning electron (ESEM) and confocal laser scanning microscopy (CLSM) in bitumen: A review of the ageing effect, Micron, 147 (2021) 103083.
[75] H. Taherkhani, H. Kooshaeian, B. Golchin, R. Dabiri, R. Jani, Evaluating the Aging of Asphalt Binder Modified by Sasobit and Ethylene Vinyl Acetate (EVA) by Exploring the Microstructure Using Atomic Force Microscopy (AFM), Journal of Transportation Research, (2026) e247928.
[76] Y. Wang, B. Li, D. Li, D. Wei, C. Tu, X. Ren, Y. Zhang, Effects of oxygen isolation and light-oxygen coupling ultraviolet aging on adhesion, micromorphology, and functional groups of warm-mix asphalt, Journal of Materials in Civil Engineering, 35(9) (2023) 04023309.
[77] M. Lin, J. Shuai, P. Li, X. Kang, Y. Lei, Analysis of rheological properties and micro-mechanism of aged and reclaimed asphalt based on multi-scales, Construction and Building Materials, 321 (2022) 126290.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[78] M. Guo, M. Liang, Y. Jiao, Y. Tan, J. Yu, D. Luo, Effect of aging and rejuvenation on adhesion properties of modified asphalt binder based on AFM, Journal of Microscopy, 284(3) (2021) 244-255.
[79] J. Ji, Z. Suo, R. Zhang, H. Li, B. Han, J. Wang, Z. You, Effect of physical hardening on low temperature performance of DCLR modified asphalt, Construction and Building Materials, 295 (2021) 123545.
[80] M.C. Cavalli, M. Zaumanis, E. Mazza, M.N. Partl, L.D. Poulikakos, Effect of ageing on the mechanical and chemical properties of binder from RAP treated with bio-based rejuvenators, Composites Part B: Engineering, 141 (2018) 174-181.
[81] D. Oldham, A. Hung, M.M. Parast, E.H. Fini, Investigating bitumen rejuvenation mechanisms using a coupled rheometry-morphology characterization approach, Construction and Building Materials, 159 (2018) 37-45.
[82] Z. Yang, X. Zhang, Z. Zhang, B. Zou, Z. Zhu, G. Lu, W. Xu, J. Yu, H. Yu, Effect of aging on chemical and rheological properties of bitumen, Polymers, 10(12) (2018) 1345.
[83] J.P. Aguiar-Moya, J. Salazar-Delgado, V. Bonilla-Mora, E. Rodríguez-Castro, F. Leiva-Villacorta, L. Loría-Salazar, Morphological analysis of bitumen phases using atomic force microscopy, Road Materials and Pavement Design, 16(sup1) (2015) 138-152.
[84] X. Yu, M. Zaumanis, S. Dos Santos, L.D. Poulikakos, Rheological, microscopic, and chemical characterization of the rejuvenating effect on asphalt binders, Fuel, 135 (2014) 162-171.
[85] A. Pauli, R. Grimes, A. Beemer, T. Turner, J. Branthaver, Morphology of asphalts, asphalt fractions and model wax-doped asphalts studied by atomic force microscopy, International Journal of Pavement Engineering, 12(4) (2011) 291-309.
[86] B. Hofko, L. Porot, A. Falchetto Cannone, L. Poulikakos, L. Huber, X. Lu, K. Mollenhauer, H. Grothe, FTIR spectral analysis of bituminous binders: Reproducibility and impact of ageing temperature, Materials and Structures, 51 (2018) 1-16.
[87] I.M.U. Din, M.S. Mir, Experimental investigation of low viscosity grade binder modified with Fischer Tropsch-Paraffin wax, International Journal of Pavement Research and Technology, 14 (2021) 129-137.
[88] H.F. Haghshenas, Y.-R. Kim, M.D. Morton, T. Smith, M. Khedmati, D.F. Haghshenas, Effect of softening additives on the moisture susceptibility of recycled bituminous materials using chemical-mechanical-imaging methods, Journal of Materials in Civil Engineering, 30(9) (2018) 04018207.
[89] F. Xiao, V. Punith, S.N. Amirkhanian, Effects of non-foaming WMA additives on asphalt binders at high performance temperatures, Fuel, 94 (2012) 144-155.
[90] G. Shiva Kumar, M. Rahul, S.S. Jakati, M. Karthik, H. Ramaraju, Eco-friendly warm mix asphalt mixtures incorporating electric arc furnace steel slag as substitute to conventional aggregates, Innovative Infrastructure Solutions, 8(9) (2023) 233.
[91] J. Lamontagne, P. Dumas, V. Mouillet, J. Kister, Comparison by Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy of different ageing techniques: application to road bitumens, Fuel, 80(4) (2001) 483-488.
[92] Z. Liu, L. Sun, X. Gu, X. Wang, Q. Dong, Z. Zhou, J. Tang, Characteristics, mechanisms, and environmental LCA of WMA containing sasobit: an analysis perspective combing viscosity-temperature regression and interface bonding strength, Journal of Cleaner Production, 391 (2023) 136255.
[93] L. Ma, A. Varveri, R. Jing, S. Erkens, Chemical characterisation of bitumen type and ageing state based on FTIR spectroscopy and discriminant analysis integrated with variable selection methods, Road Materials and Pavement Design, 24(sup1) (2023) 506-520.
[94] D. Hu, X. Gu, Q. Dong, L. Lyu, B. Cui, J. Pei, Investigating the bio-rejuvenator effects on aged asphalt through exploring molecular evolution and chemical transformation of asphalt components during oxidative aging and regeneration, Journal of Cleaner Production, 329 (2021) 129711.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[95] P.K. Das, H. Baaj, N. Kringos, S. Tighe, Coupling of oxidative ageing and moisture damage in asphalt mixtures, Road Materials and Pavement Design, 16(sup1) (2015) 265-279.
[96] B. Chen, F. Dong, X. Yu, S. Ren, C. Zheng, Chemo-Rheological Characterization of Aging Behaviors of Warm-Mix High-Viscosity Modified Asphalt, Journal of Materials in Civil Engineering, 34(12) (2022) 04022342.
[97] S. Yang, K. Yan, W. Liu, The effect of ultraviolet aging duration on the rheological properties of sasobit/SBS/Nano-TiO2-Modified asphalt binder, Applied Sciences, 12(20) (2022) 10600.
[98] R. Zhang, A.R. Moshfeghi, F. Zhou, D.D. Mishra, Effect of chemical warm-mix additives on asphalt binder rheological and chemical properties in the context of aging, Construction and Building Materials, 393 (2023) 132061.
[99] H. Zhang, Y. Liang, B. Liang, K. Shi, Z. Liu, D. Zhang, J. Zheng, Evaluation of aging indicators for warm mix styrene-butadiene-styrene-modified asphalt: Molecular structure and rheological properties, Construction and Building Materials, 465 (2025) 140264.
[100] Z. Li, Z. Lu, X. Liu, J. Wang, Investigating the synergistic anti-aging effects of Sasobit and recycled engine oil in styrene-butadiene rubber modified asphalt, Frontiers in Materials, 11 (2024) 1412094.
[101] V.P. Wagh, M. Sukhija, A. Gupta, Exploring the consequences of reduced aging on the performance of warm mix asphalt binders, International Journal of Pavement Engineering, 24(2) (2023) 2270768.
[102] A.M. Hung, M. Li, G. Wu, E.H. Fini, Effects of liquefied waste plastics on chemical and rheological properties of bitumen, Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, 149(2) (2023) 04023003.
[103] Q. Li, H. Zhang, C. Sun, J. Li, J. Feng, Effect of novel warm-mix compound on road performance and aging resistance of SBR-modified bituminous mixture, Construction and Building Materials, 464 (2025) 140116.
[104] M.V. Kök, K.G. Gul, Combustion characteristics and kinetic analysis of Turkish crude oils and their SARA fractions by DSC, Journal of thermal analysis and calorimetry, 114 (2013) 269-275.
[105] M. Wu, L. Yin, M. Li, Z. You, D. Jin, K. Xin, A state-of-the-art review of asphalt aging behavior at macro, micro, and molecular scales, Construction and Building Materials, 460 (2025) 139738.
[106] M. Holý, E. Remišová, Analysis of influence of bitumen composition on the properties represented by empirical and viscosity test, Transportation Research Procedia, 40 (2019) 34-41.
[107] G. Pipintakos, A. Sreeram, J. Mirwald, A. Bhasin, Engineering bitumen for future asphalt pavements: A review of chemistry, structure and rheology, Materials & Design, (2024) 113157.
[108] Y. Xu, E. Zhang, L. Shan, Effect of SARA on rheological properties of asphalt binders, Journal of Materials in Civil Engineering, 31(6) (2019) 04019086.
[109] C. Zhang, T. Xu, H. Shi, L. Wang, Physicochemical and pyrolysis properties of SARA fractions separated from asphalt binder, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 122 (2015) 241-249.
[110] R. Adepu, V.V. Ramayya, A. Mamatha, V.V. Ram, Fracture studies on basalt fiber reinforced asphalt mixtures with reclaimed asphalt pavement derived aggregates and warm mix additives, Construction and Building Materials, 386 (2023) 131548.
[111] B. Hu, X. Ai, J. Feng, Comparative study of typical asphalt binders in Xinjiang region modified with warm mix additives, Frontiers in Materials, 11 (2024) 1363474.
[112] Z. Li, C. Fa, H. Zhao, Y. Zhang, H. Chen, H. Xie, Investigation on evolution of bitumen composition and micro-structure during aging, Construction and Building Materials, 244 (2020) 118322.
[113] H. Chen, D. Adwani, N. Zorigtbaatar, F. Zhou, P. Karki, Assessment of binder test methods for detecting cracking susceptibility in asphalt mixtures, International Journal of Fatigue, (2025) 108827.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[114] J. Puello, N. Afanasjeva, M. Alvarez, Thermal properties and chemical composition of bituminous materials exposed to accelerated ageing, Road materials and pavement design, 14(2) (2013) 278-288.
[115] G. Xu, Y. Yao, M. Wu, Y. Zhao, Molecular simulation and experimental analysis on co-aging behaviors of SBS modifier and asphalt in SBS-modified asphalt, Molecular Simulation, 49(7) (2023) 629-642.
[116] H. Wei, X. Bai, G. Qian, F. Wang, Z. Li, J. Jin, Y. Zhang, Aging mechanism and properties of SBS modified bitumen under complex environmental conditions, Materials, 12(7) (2019) 1189.
[117] H.H. Fatmehsari, Chemical-Physical-Mechanical Charactization of Aging and Restoration of Asphaltic Materials in Different Length Scales, The University of Nebraska-Lincoln, 2018.
[118] P.S. Chowdhury, T. Andiyappan, R.S. Mullapudi, M.A. Reddy, An Investigation of the Effect of the Chemical Properties on the Rheological Properties of Asphalt Binders, International Journal of Pavement Research and Technology, (2025) 1-12.
[119] P. Saha Chowdhury, R.S. Mullapudi, M.A. Reddy, An investigation on the effect of aging on chemical and mechanical properties of asphalt binders, Journal of Materials in Civil Engineering, 34(10) (2022) 04022252.
[120] R. Ghabchi, D. Singh, M. Zaman, Q. Tian, Mechanistic evaluation of the effect of WMA additives on wettability and moisture susceptibility properties of asphalt mixes, Journal of Testing and Evaluation, 41(6) (2013) 933-942.
[121] A. Buddhala, Z. Hossain, N.M. Wasiuddin, M. Zaman, A. Edgar, Effects of an amine anti-stripping agent on moisture susceptibility of sasobit and aspha-min mixes by surface free energy analysis, Journal of Testing and Evaluation, 40(1) (2011) 91-99.
[122] A.V. Kataware, N. Darshan, A.A. Kulagude, S.K. Hanchinamani, A.M. Khanagoud, Moisture Susceptibility in Warm Mix Asphalt Mixtures: Influence of Aggregate Type, Binder Grade, Additive Type, Compatibility and Evaluation Methods, International Journal of Pavement Research and Technology, (2026) 1-36.
[123] S. Xu, F. Xiao, S. Amirkhanian, D. Singh, Moisture characteristics of mixtures with warm mix asphalt technologies‐A review, Construction and Building Materials, 142 (2017) 148-161.
[124] E. Kassem, L. Garcia Cucalon, E. Masad, D. Little, Effect of warm mix additives on the interfacial bonding characteristics of asphalt binders, International Journal of Pavement Engineering, 19(12) (2018) 1111-1124.
[125] A. Habal, D. Singh, Establishing threshold value of surface free energy and binder bond strength parameters for basaltic asphalt mixes, Road Materials and Pavement Design, 23(8) (2022) 1877-1899.
[126] A.E. Alvarez, E.J. Diaz, R.A. Mejía, E. Arámbula-Mercado, O.J. Reyes-Ortiz, Optimizing the Dose of Warm-Mix Asphalt Additives by Maximizing the Asphalt-Aggregate Adhesion Measured via Surface-Free Energy, Journal of Materials in Civil Engineering, 35(2) (2023) 04022410.
[127] S. Hesami, H. Roshani, G.H. Hamedi, A. Azarhoosh, Evaluate the mechanism of the effect of hydrated lime on moisture damage of warm mix asphalt, Construction and Building Materials, 47 (2013) 935-941.
[128] M. Arabani, H. Roshani, G.H. Hamedi, Estimating moisture sensitivity of warm mix asphalt modified with zycosoil as an antistrip agent using surface free energy method, J. Mater. Civ. Eng, 24(7) (2012) 889-897.
[129] M.N.S. Oyan, Z. Hossain, Feasibility of warm mix asphalt in Arkansas, International Journal of Pavement Research and Technology, (2024) 1-19.
[130] J. Nithinchary, R.S. Mullapudi, Fatigue and Healing Characteristics of WMA‐RA Blended Binders, Journal of Materials in Civil Engineering, 37(6) (2025) 04025143.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[131] Y. Wang, X. Wang, X. Zhou, G. Yang, L. Zhang, Evaluation of the physical and adhesive properties of natural weathering asphalt, Advances in Materials Science and Engineering, 2021(1) (2021) 5783256.
[132] M. Xu, Y. Zhang, P. Zhao, Long-term aging performance study of asphalt with different composition, in: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing, 2021, pp. 012050.
[133] H. Ji, B. Li, A. Li, Z. Li, J. Han, Z. Liu, Adhesion mechanism of warm-mixed recycled SBS Modified Asphalt Binder: Surface free energy, microstructure and chemical compositions, Case Studies in Construction Materials, 19 (2023) e02426.
[134] J. Zhu, L. Li, C. Yin, X. Zhang, X. Zhou, H. Wang, Study on viscosity reduction mechanism of warm-mixed rubber modified asphalt: A green sustainable perspective, Case Studies in Construction Materials, 21 (2024) e03494.
[135] T. Blankendaal, P. Schuur, H. Voordijk, Reducing the environmental impact of concrete and asphalt: a scenario approach, Journal of cleaner production, 66 (2014) 27-36.
[136] M. Hassan, Evaluation of the environmental and economic impacts of warm-mix asphalt using life-cycle assessment, International Journal of Construction Education and Research, 6(3) (2010) 238-250.
[137] R. Vidal, E. Moliner, G. Martínez, M.C. Rubio, Life cycle assessment of hot mix asphalt and zeolite-based warm mix asphalt with reclaimed asphalt pavement, Resources, Conservation and Recycling, 74 (2013) 101-114.
[138] S. Capitão, L. Picado-Santos, F. Martinho, Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt, Construction and Building Materials, 36 (2012) 1016-1024.
[139] A. Milad, A.M. Babalghaith, A.M. Al-Sabaeei, A. Dulaimi, A. Ali, S.S. Reddy, M. Bilema, N.I.M. Yusoff, A Comparative Review of Hot and Warm Mix Asphalt Technologies from Environmental and Economic Perspectives: Towards a Sustainable Asphalt Pavement, International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(22) (2022) 14863.
[140] J. Santos, S. Bressi, V. Cerezo, D.L. Presti, M. Dauvergne, Life cycle assessment of low temperature asphalt mixtures for road pavement surfaces: A comparative analysis, Resources, Conservation and Recycling, 138 (2018) 283-297.
[141] O. Tatari, M. Nazzal, M. Kucukvar, Comparative sustainability assessment of warm-mix asphalts: A thermodynamic based hybrid life cycle analysis, Resources, Conservation and Recycling, 58 (2012) 18-24.
[142] A.P. Gbolade, D. Mishra, Quantifying the environmental impacts of reduced temperature chemical warm-mix asphalt with life cycle assessment, Road Materials and Pavement Design, 27(2) (2026) 483-500.
[143] A.M. Rodríguez-Alloza, D. Garraín, Cradle-to-Grave Life Cycle Assessment of Asphalt Pavements Incorporating Recycled Tire Rubber and Warm Mix Additives, Coatings, 16(2) (2026) 229.
[144] A. Stimilli, A. Virgili, F. Canestrari, Warm recycling of flexible pavements: Effectiveness of Warm Mix Asphalt additives on modified bitumen and mixture performance, Journal of Cleaner Production, 156 (2017) 911-922.

ACCEPTED MANUSCRIPT