

ارزیابی پیرشدگی قیر اصلاح شده با ساسوبیت و پلیمر اتیلن وینیل استات با مطالعه ریزساختار آنها با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی

مقاله علمی - پژوهشی

هادی کوشانیان، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات آذربایجان شرقی، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

* حسن طاهرخانی (نویسنده مسئول)، دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

بابک گلچین، دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

رسول جانی، دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

روزبه دبیری، دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: taherkhani.hasan@znu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۶ - پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۵

صفحه ۲۰۶-۱۸۵

چکیده

مطالعه خصوصیات قیر با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) در سالهای اخیر رایج شده است. در این پژوهش، ریزساختار یک قیر خالص در سه حالت اصلاح نشده، اصلاح شده با ۳٪ ساسوبیت و اصلاح شده با ۳٪ پلیمر اتیلن وینیل استات (EVA) و ۳٪ ساسوبیت به طور همزمان با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی مورد مطالعه قرار گرفته است. قیرها در سه حالت پیر نشده، پیر شده کوتاه مدت و پیر شده بلند مدت مورد بررسی قرار گرفته اند تا تاثیر افزودنی ها و شرایط پیرشدگی بر روی ساختار زنبوری و شاخص های ناهمواری سطح مطالعه گردد. نتایج بررسی نشان می دهد که افزودن ساسوبیت و پلیمر EVA به قیر و اعمال پیرشدگی باعث تغییر در ریزساختار قیر می گردند. در حالت پیر نشده، تعداد ساختار زنبوری و چگالی آنها در قیرهای اصلاح شده بیشتر از قیر پایه و میانگین اندازه و مساحت هر ساختار بیشتر از قیر پایه است. همچنین، مساحت کل ساختار زنبوری در قیر حاوی ساسوبیت کمتر از قیر پایه و در قیر حاوی ساسوبیت و EVA بیشتر از قیر پایه است. در حالی که در قیر پایه، پیرشدگی مساحت کل ساختار زنبوری، تعداد آنها و میانگین اندازه هر ساختار زنبوری را افزایش می دهد، در قیرهای اصلاح شده، باعث کاهش تعداد ساختار زنبوری، مساحت کل ساختار زنبوری و چگالی آنها می شود. بررسی ناهمواری سطح نمونه ها نیز بیانگر این است که با افزودن ساسوبیت و پلیمر EVA ناهمواری سطح قیر پایه بیشتر می شود که نشان دهنده افزایش سختی قیر با این افزودنی هاست. همچنین، پیرشدگی باعث افزایش شاخص های ناهمواری در قیر پایه می شود. اما، در قیرهای اصلاح شده پیرشدگی باعث کاهش پارامترهای ناهمواری می شود که بیان کننده مقاومت بیشتر قیرهای اصلاح شده در برابر پیرشدگی می باشد.

واژه های کلیدی: قیر، پیرشدگی، میکروسکوپ نیروی اتمی، ریزساختار، ساسوبیت، پلی اتیلن وینیل استات، ناهمواری

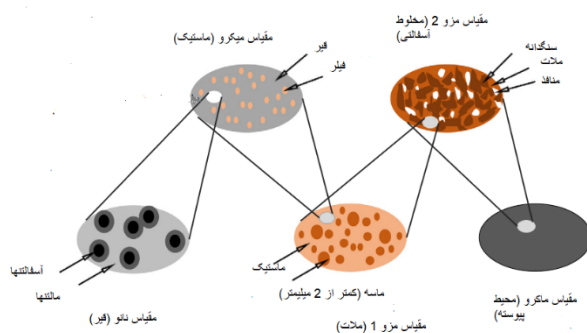
۱-مقدمه

در ایالت متحده آمریکا از نوع آسفالتی می باشند (Diab et al., 2026). در ایران نیز تقریباً تمام راههای روسازی شده از نوع آسفالتی است، هر چند اخیراً روسازی های بتنی نیز به طور محدود

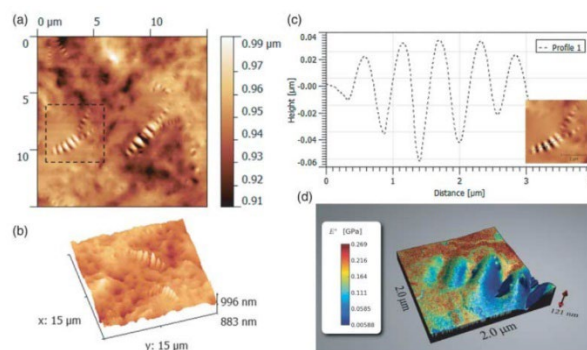
روسازی های آسفالتی به دلیل مزایای زیاد آن از رایج ترین نوع روسازی مورد استفاده در سراسر دنیا می باشند. در حال حاضر، بیش از ۹۳ درصد از حدود ۴,۲ میلیون کیلومتر از راههای روسازی شده

می‌باشد. با این حال، قیر سهم اصلی را در بیشتر مشکلات مربوط به مخلوطهای آسفالتی، که پیش‌تر به آن اشاره شد دارد. دمای بالای تولید آسفالت به دلیل رساندن قیر به ویسکوزیته لازم برای اختلاط با مصالح سنگی است که منجر به بروز انواع مسائل می‌گردد. همچنین، پیرشدگی رخ داده و مسائل مربوط به آن به قیر ارتباط می‌یابد. تغییر شکل زیاد مخلوط آسفالتی در دماهای بالا و تحت بار سنگین، ترک خوردگی ناشی از خستگی تحت بارهای تکراری، و ترک خوردگی ناشی از سرما نیز به مقدار زیادی به خصوصیات قیر بستگی دارد. برای پیش‌بینی عملکرد روسازی‌های آسفالتی اغلب از مکانیک محیط پیوسته، آزمایش‌های آزمایشگاهی و میدانی در مقیاس طول روسازی استفاده می‌شود. اما، همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، بتن آسفالتی یک ماده مرکب متشکل از اجزایی با طول‌هایی در مقیاس نانو تا ماکرو می‌باشد. برای تحقیقات ماکروسکوپی، اغلب به خصوصیات مصالح در سطح میکرو و نانو نیاز است. برای مثال، خصوصیات رئولوژیکی قیر که به مقدار زیادی بر روی عملکرد نهایی روسازی آسفالتی تأثیر می‌گذارد نشان داده شده است که مرتبط با ساختارهای قیر در مقیاس میکرو و نانو است (Lesueur, 2009). امروزه، به خوبی معلوم گردیده است که قیر یک سیستم همگن و تک‌فازی نیست و متشکل از ریزساختارهایی با اندازه از چند میکرون تا چند دهم میکرون با خصوصیات میکرومکانیک مختلف می‌باشد که در شکل ۲ نشان داده شده است.

مورد استفاده قرار گرفته‌اند. روسازی‌های آسفالتی سنتی با وجود داشتن مزایای مختلفی از قبیل راحتی رانندگی، آسان بودن اجرا و نگهداری، مشکلاتی را نیز به همراه دارند. از جمله این مشکلات دمای تولید بالای آنهاست که مشکلات زیادی، از قبیل مصرف انرژی بالا، آلودگی هوای بیشتر، دوره اجرای کوتاه‌تر، فاصله حمل کمتر، ایمنی کمتر و آسیب وارده به قیر در دماهای بالا را به همراه خواهد داشت. همچنین، مخلوطهای آسفالتی معمولی به کار رفته در روسازی‌هایی که تحت ترافیک با بارهای محوری سنگین و حجم زیاد و یا فشار باد لاستیکهای بالا قرار دارند در معرض انواع خرابی‌ها قرار می‌گیرند. یکی دیگر از مشکلاتی که روسازی‌های آسفالتی با آن مواجه می‌شوند، مسئله پیرشدگی در قیر می‌باشد، که هم در فرایند تولید و اجرا و هم در طول مدت بهره‌برداری در آن رخ می‌دهد. پیرشدگی باعث تغییر در خواص رئولوژیکی قیر شده و آن را مستعد بروز انواع خرابی‌ها از جمله ترک خوردگی، شن زدگی و آسیب رطوبتی می‌نماید (Kumar and Chauhan, 2026). قیر، که از آن برای چسباندن مصالح سنگی درشت و ریز و فیلر به هم استفاده می‌شود، و درصد کمی از وزن بتن آسفالتی را تشکیل می‌دهد، خواص مطلوب ویسکوالاستیک را به مخلوط آسفالتی می‌دهد (Wu et al., 2026). علاوه بر افزایش راحتی رانندگی و نگهداری راحت، رفتار ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی نقش مهمی در دوام مخلوطهای آسفالتی دارد. مقاومت در برابر ترکهای حرارتی، ترکهای خستگی و شن زدگی به مقدار زیادی متأثر از خصوصیات قیر



شکل ۱. مدل چند مقیاسی برای مخلوطهای آسفالتی شامل مقیاس قیر، مقیاس ماستیک (قیر و فیلر)، مقیاس ملات (ماستیک و سنگدانه‌های ریزتر از ۲ میلی‌متر)، مقیاس مخلوط (ملات و سنگدانه‌های درشت‌تر از ۲ میلی‌متر) و مقیاس ماکرو (Yu et al., 2015)



شکل ۲. نمونه‌ای از تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی از قیر (الف) توپوگرافی دو بعدی (ب) توپوگرافی سه بعدی (ج) پروفیل خطی در امتداد ریز ساختار زنبور شکل (د) سختی نسبی که بیانگر ریزساختار می‌باشد (Das et al., 2015)

نقطه ذوب بالاتری از دمای تولید آسفالت که معمول کمتر از ۱۸۰ درجه سانتیگراد می‌باشد، دارند و بنابراین در حین تولید نمی‌توانند ذوب شده و با قیر ترکیب شوند. برای مثال، پلیمر PVC و PET دمای ذوب بالاتری از دمای تولید آسفالت داغ دارند. یکی از انواع پلاستیکهایی که نقطه ذوب پایینی داشته و به آسانی قابل اختلاط با قیر است پلیمر اتیلن وینیل استات (EVA) می‌باشد. EVA یک پلیمر پلاستومر است که به مدت بیش از ۳۰ سال در ساخت روسازی‌ها استفاده شده و دومین اصلاح کننده قیر پر مصرف می‌باشد (Tewegbola et al., 2026). همچنین، EVA بخش قابل توجهی از پلاستیکهای ضایعاتی را تشکیل می‌دهد که بازیافت آن به صورت استفاده به عنوان اصلاح کننده قیر کمک قابل توجهی به محیط زیست خواهد بود. EVA با کوپلیمریزاسیون اتیلن و وینیل استات به وجود می‌آید (Abd El-Rahman et al., 2018). با تنظیم و کنترل مقدار اتیلن و وینیل استات در حین فرآیند کوپلیمریزاسیون خواص مختلفی از EVA را می‌توان دست یافت. بخش اتیلن از این پلیمر کریستالی بوده و قیر اصلاح شده صلب‌تری را در دماهای بالای بهره‌برداری نتیجه خواهد داد، در حالی که، بخش وینیل استات خواص غیر کریستالی داشته و بیشتر شدن آن در پلیمر باعث بهبود انعطاف پذیری، خاصیت ارتجاعی و پایداری ذخیره سازی می‌گردد (Xia et al., 2023). آزمایش رثومتر تیر خمشی بر روی قیر اصلاح شده با EVA نشان داده است که افزایش وینیل استات مقدار m -value را افزایش می‌دهد که باعث می‌گردد رفتار قیر در سرما و در مقابل ترکهای

قیر به عنوان یک ماده ویسکوالاستیک، به دلیل خواص مکانیکی و رئولوژیکی عالی، به طور گسترده‌ای در روسازی‌ها استفاده می‌شود (Liu et al., 2018). اما، با افزایش ترافیک کانالیزه شده، وزن محورها و فشار باد لاستیکهای خرابی‌هایی از قبیل شیارشدگی، ترک‌خوردگی و چاله‌ها در روسازی‌های آسفالتی ظاهر می‌گردند که به صورت جدی سطح سرویس عملکردی روسازی‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهند (Xu et al., 2018). بنابراین، ضرورت دارد تا اقداماتی جهت بهبود عملکرد روسازی‌های آسفالتی اتخاذ گردد که موضوع تحقیقات زیادی در سالهای اخیر بوده است. یکی از موثرترین تکنولوژی‌ها جهت بهبود عملکرد آسفالت اصلاح قیر با پلیمر است که به طور گسترده‌ای در عمل نیز استفاده می‌شود (Airey, 2002). پلیمرها به دو گروه پلاستومر و الاستومر ترموپلاستیک تقسیم بندی می‌شوند. انواع زیادی از پلاستیک‌ها با خصوصیات و ترکیبات شیمیایی مختلف وجود دارند. از جمله مهمترین پلاستیکهایی که در زندگی روزمره مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل پلی‌اتیلن با چگالی بالا (HDPE)، پلی‌اتیلن خطی با چگالی پایین (LLDPE)، پلی‌اتیلن با چگالی پایین (LDPE)، پلی‌استایرن (PS)، پلی‌وینیل کلراید (PVC)، پلی‌پروپیلن (PP)، اتیلن وینیل استات (EVA)، پلی‌اورتان (PU)، پلی‌اتیلن ترفثالات (PET)، پلی‌کربنات و اکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS) می‌باشند. یکی از خصوصیات فیزیکی مهم پلاستیکها برای استفاده آنها به عنوان اصلاح کننده قیر نقطه ذوب آنها می‌باشد، چون ابتدا باید پلیمر ذوب شده تا با قیر ترکیب شود. برخی از این پلیمرها

دریافتند که پایداری ذخیره سازی قیر اصلاح شده با ۳ درصد EVA کمتر از آن در قیر اصلاح شده با ۱ درصد از این پلیمر می باشد (Ameri et al., 2013). علاوه بر این، بازیابی الاستیک قیر اصلاح شده با EVA کم می باشد که می تواند باعث شیارشدگی گردد (Ameri et al., 2012). به همین دلیل، و به منظور فائق آمدن به این نواقص برخی از محققین افزودنی هایی را برای رفع این نواقص استفاده نموده اند. یکی دیگر از مشکلات قیرهای حاوی پلیمر افزایش ویسکوزیته آنها و در نتیجه افزایش دمای ساخت می باشد که منجر به اثرات منفی مختلفی می شود. همچنین، بالا رفتن ویسکوزیته قیرهای پلیمری قابلیت پمپاژ آنها را در حین ساخت کاهش داده و کارایی آسفالت را برای تراکم کاهش می دهد. ویسکوزیته قیرهای پلیمری را می توان با افزودنی های آسفالت گرم از قبیل ساسوبیت کاهش داد و مشکلات زیست محیطی آنها و مشکلات مربوط به اختلاط و تراکم آنها را کاهش داد. کاهش دمای تولید و تراکم مخلوطهای آسفالتی باعث کاهش مصرف انرژی و انتشار گازهای مضر برای محیط زیست شده، پیرشدگی قیر را کاهش داده، محیط کار سالمتری را ایجاد کرده، دوره اجرای روسازی را طولانی تر نموده، فاصله حمل آسفالت را بیشتر کرده و امکان استفاده مقدار بیشتری از تراشه آسفالتی را فراهم می نماید. چندین روش مختلف برای کاهش دمای تولید آسفالت استفاده می شود که معمولاً با استفاده از انواع مختلفی از مواد افزودنی صورت می گیرد و دمای تولید مخلوط آسفالتی را حدود ۲۰٪ کاهش می دهد. مخلوط آسفالت گرم به مخلوطهای آسفالتی گفته می شود که در دماهایی کمتر از آسفالت داغ تولید، پخش و متراکم می شوند. کاهش دما در این مخلوطها با فرایندهای جدیدی ایجاد می شود که شامل استفاده از افزودنی های شیمیایی، آلی و ایجاد کف با مواد حاوی آب می باشد. ساسوبیت یک افزودنی آلی برای ساخت آسفالت گرم می باشد که بر پایه واکس بوده و توسط شرکت ساسول واکس آفریقای جنوبی تولید می شود. از سال ۱۹۹۷ از ساسوبیت به طور گسترده در سراسر دنیا استفاده می گردد. ساسوبیت در دماهای بین ۸۵ تا ۱۱۵ درجه سانتیگراد ذوب شده و زنجیره مولکولی بلند آن که حاوی ۴۰ تا ۱۱۵ اتم کربن است ویسکوزیته قیر را کاهش داده و اجازه استفاده از دماهای پایین تر تولید و تراکم مخلوط آسفالتی را می دهد. وقتی دما به کمتر از نقطه ذوب ساسوبیت می رسد، کریستاله شده و باعث افزایش سختی و مقاومت قیر

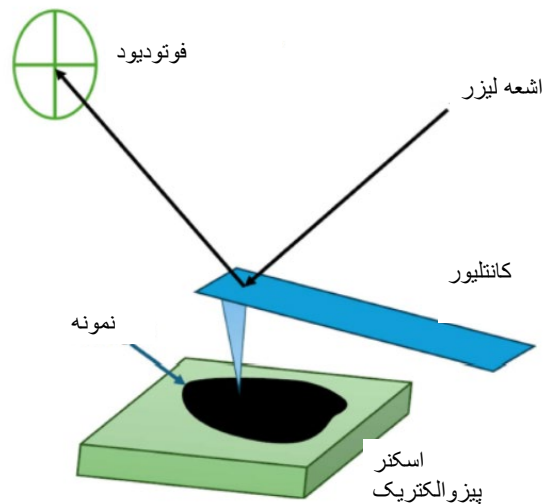
حرارتی بهبود یابد، و در مقابل افزایش مقدار وینیل استات باعث کم شدن مقاومت در برابر پیرشدگی بلند مدت می شود (Yuliestyan et al., 2016). مطالعات اخیر نشان داده اند که اصلاح قیر با EVA می تواند مقدار شیار شدگی در مخلوط آسفالتی را تا ۸۰٪ کاهش دهد، و در عین حال پیرشدگی ناشی از اکسیداسیون را نیز کاهش دهد (Ren et al., 2024; Yan et al., 2021). علاوه بر این، تحقیقات نشان داده است که پلیمر EVA توانایی تشکیل ساختار شبکه سه بعدی را داخل قیر دارد (Nazmey et al., 2024). این موضوع باعث افزایش قابل توجه سختی شده و مقاومت حرارتی قیر اصلاح شده را افزایش داده و باعث کاهش حساسیت به شیار شدگی شود (Nazmey et al., 2024). یافته ها نشان می دهند که مقدار و ساختار مولکولی EVA به مقدار زیادی تعیین کننده موثر بودن اصلاح کننده می باشند. علاوه بر این، طبیعت قطبی پلیمر EVA تضمین کننده سازگاری خوب با قیر بوده و خصوصیات چسبندگی را نیز حتی در حضور آب بهبود می دهند (Zhang et al., 2022). جنبه قابل توجه دیگر پلیمر EVA به دلیل نقطه ذوب پایین آن قابلیت استفاده در آسفالت گرم می باشد (Yan et al., 2022). تحقیقات زیادی خصوصیات قیر اصلاح شده با پلیمر EVA را مورد مطالعه قرار داده اند. این اصلاح کننده پلیمری می تواند به راحتی با قیر ترکیب شود (Airey, 2002) و عملکرد قیر از جمله خصوصیات رئولوژیکی آن در دماهای بالا و پایین بهره برداری را بهبود دهد (Tewegbola et al., 2026). برخی مطالعات (Sengoz and Isikyakar, 2008; Saboo et al., 2018) نشان داده اند که قیر اصلاح شده با EVA مقاومت به تغییر شکل در دماهای بالای بیشتری از قیر اصلاح شده با پلیمر SBS دارد. شبکه پلیمری سه بعدی سخت و صلب تشکیل شده توسط EVA در قیر آن را سخت تر نموده و مقاومت به تغییر شکل آن را افزایش می دهد. از این رو، این پلیمر معمولاً در نواحی با ترافیک سنگین و دمای بالا به عنوان اصلاح کننده قیر استفاده می شود (Li et al., 2026; Jamal et al., 2027). در عمل نیز تجربه های زیادی در کاربرد EVA برای اصلاح قیر جمع شده است. علاوه بر این، پلیمر EVA اقتصادی بوده و می تواند از پلاستیکهای ضایعاتی بازیابی شود (Ashimova et al., 2026). با وجود این مزایا، پلیمر EVA دارای نواقصی می باشد. مشکل اصلی در قیر اصلاح شده با پلیمر EVA پایداری ذخیره سازی آن می باشد. عامری و همکارانش

برداشت می‌کند (شکل ۳). از مزایای میکروسکوپ نیروی اتمی می‌توان به ساده بودن آماده سازی نمونه ها، سریع بودن انجام آزمایش، و عدم نیاز به دستکاری انسان اشاره نمود و این که می‌تواند در شرایط دمای محیط و یا هر دمای دیگری کار کند. اولین تلاش برای مطالعه ریزساختارهای قیر با استفاده از AFM کار لوبر و همکارانش در سال ۱۹۹۶ می‌باشد (Loeber et al., 1996).

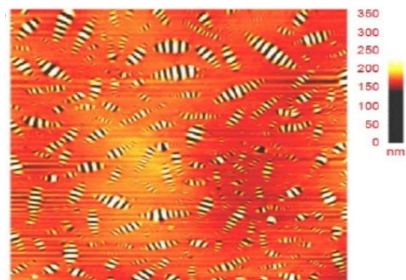
آنها ریزساختارهای موج در سطح یک لایه نازک قیر را گزارش نموده و از اصطلاح ساختار زنبوری برای تشریح الگوهای موجی استفاده نمودند که نوارهای زرد و سیاه یک زنبور عسل را تشبیه می‌کند (شکل ۴). ساختار زنبوری گاها با نام فاز کاتانا (Catana phase) نیز شناخته می‌شود، که توسط ناحیه مسطحی به نام فاز پری (Peri phase) احاطه شده است. فاز پری نیز با ناحیه‌ای به نام فاز پارا احاطه گردیده است (شکل ۵). در ابتدا محققین فکر می‌کردند که ساختار زنبوری از آسفالتنها تشکیل شده است. این موضوع بر اساس مشاهده رابطه بین افزایش آسفالتنها در قیر و ایجاد ساختار زنبوری بود. اما، در برخی قیرها مشاهده گردید که حتی بعد از برداشتن آسفالتنها نیز ساختار زنبوری وجود دارد. از این رو، فرضیه تشکیل شدن ساختار زنبوری از واکس پارافین بلوری شده قوت گرفت. اخیرا نیز محققین پیشنهاد داده‌اند که ساختار زنبوری لایه‌های سطحی هستند که تحت کرنشهای فشاری طبیعی چروک می‌شوند (Lyne et al., 2013; Nahar et al., 2013). مقدار تقریبی ۷۰ تا ۱۴۰ نانومتر برای این ضخامت محاسبه گردید. بعد از لوبر و همکارانش، مطالعات میکروسکوپ نیروی اتمی بیشتری برای

توصیف رفتار میکروسکوپی قیر دنبال گردید (Pauli et al., 2011; Jager et al., 2004; Das et al., 2015; Fischer and Dillingh, 2014; Fischer et al., 2013; Lyne et al., 2013; Masson and Leblond, 2006; Nahar et al., 2013; Sourty et al., 2011; Yu et al., 2013; Zhang et al., 2011). این مطالعات نشان دادند که AFM میتواند یک وسیله قدرتمند برای درک بهتر مورفولوژی میکروسکوپی قیر و خصوصیات مکانیکی آن باشد، که از نتایج آن می‌توان در طراحی عملکردی روسازی‌های آسفالتی استفاده نمود.

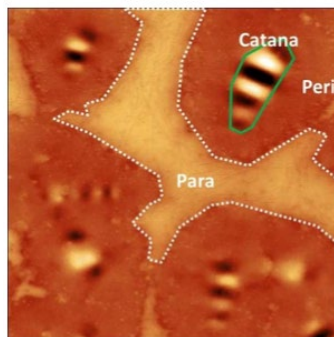
می‌گردد. از همین رو، برخی از تحقیقات نشان داده‌اند که مخلوطهای آسفالتی گرم ساخته شده با ساسوبیت مقاومت به تغییر شکل بیشتری دارند. حسین و همکارانش (Hosain et al., 2013) با افزودن ۲٪ ساسوبیت به قیر PG64 نشان دادند که دمای بالای قیر به PG70 بهبود می‌یابد. الخطیب و همکارانش (Al-Khatib et al., 2024) و هاگاک و همکارانش (Hagag et al., 2011) نشان دادند که رفتار خستگی بتن آسفالتی گرم حاوی ساسوبیت مشابه بتن آسفالتی داغ می‌باشد. هاینین و همکارانش (Hainin et al., 2011) دریافتند که عمر خستگی آسفالت گرم حاوی ساسوبیت بیشتر از عمر خستگی بتن آسفالتی داغ است. تحقیقات دیگر نیز نشان داده‌اند که پیرشدگی قیر در مخلوط بتن آسفالتی گرم کمتر بوده و مقاومت به ترکهای حرارتی بهبود یافته و شکل پذیری قیر نیز افزایش می‌یابد. آگاهی از عملکرد قیر در سطح میکرو و نانو به درک عملکرد قیر و مخلوطهای آسفالتی در سطح ماکرو کمک خواهد نمود (Das et al., 2015). یکی از فناوری های نانو که در بررسی رفتار فیزیکی- مکانیکی ریزساختار مصالح آسفالتی توجه زیادی را اخیرا به خود جلب نموده است میکروسکوپ نیروی اتمی می‌باشد. میکروسکوپ نیروی اتمی یک ابزار تصویربرداری غیر مخرب است که می‌تواند اطلاعات مفیدی را از توپوگرافی سطح، سختی، چسبندگی و اندرکنش مولکولی در سطح میکرو از مواد ارائه دهد (Yu et al., 2015). میکروسکوپ نیروی اتمی ابزاری است قدرتمند که می‌تواند به طور موثری رابطه پیچیده بین خصوصیات ریزساختار و میکرومکانیک قیرها و متعاقبا آن تاثیر بر روی عملکرد در سطح ماکرو آنها را روشن سازد (Zhang et al., 2024). با الهام از اختراع میکروسکوپ تونلی روبشی دستگاه میکروسکوپ نیروی اتمی توسط بینینگ و همکارانش در سال ۱۹۸۶ توسعه داده شد (Bining et al., 1986). اساس کار میکروسکوپ نیروی اتمی این است که یک نوک تیز که به انتهای یک کانتلیور وصل شده سطح نمونه را کاوش می‌نماید. با تمرکز یک اشعه لیزر به انتهای کانتلیور و انعکاس آن، یک تشخیص دهنده نور توپوگرافی سطح را



شکل ۳. اصول کار میکروسکوپ نیروی اتمی (Bora and Saboo, 2026)



شکل ۴. ساختار زنبوری در تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی (Yu et al., 2015)



شکل ۵. فازهای مختلف کاتانا، پری و پارا (Yu et al., 2015)

کمک میکروسکوپ نیروی اتمی نیز بررسی نشده است. بنابراین، هدف این مطالعه بررسی ریزساختار قیرهای اصلاح شده با ساسوبیت و پلیمر EVA با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی می‌باشد. همچنین، تاثیر پیرشدگی کوتاه مدت و بلند مدت بر ریز ساختار این قیرها و مقایسه با قیر اصلاح نشده از اهداف این پژوهش می‌باشد.

بررسی تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که، علیرغم وجود تعدادی از مطالعات انجام گرفته بر روی استفاده همزمان از ساسوبیت و پلیمرهایی مثل استایرن-بوتادین-استایرن و لاستیک، تاکنون مطالعه‌ای بر روی قیر اصلاح شده با EVA و ساسوبیت انجام نگرفته است. همچنین، تاثیر پیرشدگی بر ریزساختار قیر حاوی ساسوبیت و پلیمر EVA با استفاده از بررسی ریزساختار آنها با

۳- روش‌شناسی تحقیق

۳-۱- مواد و مصالح

مواد مورد استفاده در این پژوهش شامل قیر، ساسویت و پلیمر اتیلن وینیل استات (EVA) می‌باشد. قیر مورد استفاده در این پژوهش قیر PG58-22 تولید شده در کارخانه آذربام در تبریز می‌باشد. مشخصات فنی قیر مورد استفاده در جدول ۱ ارائه گردیده‌اند.

پلیمر مورد استفاده در این تحقیق اتیلن وینیل استات از گرید VS430، تولید شده توسط شرکت لوته کره می‌باشد (شکل ۶). جدول ۲ مشخصات فنی پلیمر EVA مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. ساختار میکروسکوپی پلیمر EVA در شکل ۴ نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، ساختار این پلیمر متشکل از بلوکهای پلی‌اتیلن به عنوان اسکلت بندی و گروههای معلق وینیل استات می‌باشد. بلوکهای پلی‌اتیلن احتمالا متبلور شده و نواحی را ایجاد می‌کنند که برای بلوکهای عرضی متقاطع به عنوان گره عمل می‌کنند. در دمای محیط، به علت وجود نواحی متبلور شده، پلیمر EVA خاصیت ویسکوالاستیک از خود نشان می‌دهد و در دماهای بالا این نواحی ذوب شده و تشکیل یک مایع مذاب را می‌دهد.

ساسویت مورد استفاده در این پژوهش تولید شرکت ساسول (Sasol) در کشور آفریقای جنوبی می‌باشد. ساسویت یک

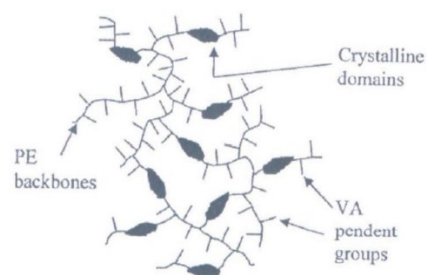
افزودنی آلی با فرمول شیمیایی C_nH_{2n+2} می‌باشد که با روش فیشر- تراپس (F-T) از احتراق ذغال سنگ به دست می‌آید. این واکس پارافینی یک ماده کریستالی متشکل از هیدروکربنهای زنجیره ای بلند با ۴۰ تا ۱۱۵ اتم کربن است که دارای نقطه ذوب حدود ۱۰۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. در دمای بالاتر از ۱۱۵ درجه سانتیگراد ساسویت کاملاً در قیر حل شده و ویسکوزیته قیر را کاهش می‌دهد و باعث می‌شود دمای تولید از ۱۰ تا ۳۰ درجه سانتیگراد کاهش یابد. در دماهای پایین تر از نقطه ذوب، این ماده تشکیل یک شبکه کریستالی می‌دهد که سختی و مقاومت قیر در مقابل شیار شدگی را افزایش می‌دهد. همچنین، گزارش گردیده است که ساسویت تراکم پذیری مخلوط آسفالتی را نیز بهبود می‌دهد. شکل ۷ ساسویت مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد که به شکل قرصهای سفید رنگ می‌باشد. نقطه اشتعال این ماده ۲۹۰ درجه سانتیگراد و وزن مخصوص آن ۶ گرم بر سانتیمتر مکعب می‌باشد. به منظور اثر بخشی ساسویت بر روی ویسکوزیته قیر، شرکت ساسول پیشنهاد استفاده از مقادیر ۰/۴ تا ۰/۸٪ وزن قیر را داده است و تحقیقات قبلی نیز نشان داده‌اند که در مقادیر بالای ۱٪ ساسویت بر خواص قیر تاثیر گذار می‌باشد. بنابراین، در این پژوهش ۰/۳٪ وزنی قیر مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۱. مشخصات فنی قیر مورد استفاده در این تحقیق

مشخصه	روش آزمایش	نتیجه	حدود استاندارد
ویسکوزیته در دمای ۱۳۵ درجه سانتیگراد (Pa.s)	ASTM D4402	۰/۳۲۵	حداکثر 3Pa.s
درجه اشتعال (°C)	ASTM D92	۳۱۸	حداقل ۲۳۰ درجه سانتیگراد
پارامتر شیار شدگی برای قیر بکر (G*/sinδ)	ASTM D175	۲/۱۱	حداقل ۱ کیلوپاسکال
پارامتر شیار شدگی برای قیر پیر شده کوتاه مدت (G*/sinδ)	ASTM D175	۴/۲۸	حداقل ۲,۲ کیلوپاسکال
تغییر جرم بعد از پیرشدگی کوتاه مدت٪	ASTM D2872	۰/۰۶	حداکثر ۱٪
حلالیت در ترا کلرور اتیلن٪	ASTM D2042	۹۹,۸۴	حداقل ۹۹٪



ب.



الف.

شکل ۶. الف. پلیمر EVA مورد استفاده در پژوهش ب. ساختار میکروسکوپی EVA

جدول ۲. مشخصات فنی پلیمر مورد استفاده در پژوهش

مشخصات	روش آزمایش	واحد اندازه گیری	مقدار
شاخص جریان پذیری	ASTM D1238	g/10min	۱۵
درصد وینیل استات	LC Method	%	۱۹
کشیدگی در شکست	ASTM D638	%	۷۴۰
مقاومت کششی	ASTM D638	Kgf/cm ²	۱۹۵
نقطه ذوب	LC Method	°C	۸۴
نقطه نرمی	ASTM D1525	°C	۶۱
وزن مخصوص	ASTM D1505	گرم بر سانتیمتر مکعب	۰/۹۳۹
دمای خود اشتعالی	-	°C	بیش از ۲۵۹



شکل ۷. ساسوبیت مورد استفاده در تحقیق

۳-۲- آماده سازی نمونه‌ها

برای تهیه نمونه‌ها از روش‌های به کار گرفته شده در تحقیقات پیشین استفاده گردید. برای تهیه قیر اصلاح شده با ساسویت، ابتدا قیر پایه به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۱۴۰ درجه سانتیگراد گرم شد تا ویسکوزیته آن کاهش یافته و گرادیانهای دمایی حذف گردند. سپس، قیر با همزن با دور بالا با سرعت یکنواخت ۵۵۰۰ دور در دقیقه به مدت ۵ دقیقه هم زده شد تا ماتریس اولیه یکنواختی فراهم گردد. سپس، ساسویت به مقدار ۳٪ وزن قیر به آن اضافه شده و به مدت ۱۰ دقیقه با همزن با دور بالا تحت ۵۵۰۰ دور در دقیقه هم زده شد. برای تهیه نمونه قیر اصلاح شده حاوی ساسویت و پلیمر EVA، بعد از افزودن ساسویت و هم زدن در شرایط گفته شده، پلیمر EVA به میزان ۳ درصد وزن نمونه به آن اضافه گردید و اختلاط به مدت ۲۵ دقیقه با دور ۵۵۰۰ دور در دقیقه ادامه یافت. این بازه زمانی به منظور ایجاد تورم مناسب پلیمر، افزایش برهم کنش با فاز مالتن و تشکیل شبکه ویسکوالاستیک پیوسته در نظر گرفته شد، که در کاهش جدایش فازی و بهبود رفتار رئولوژیکی نقش موثری دارد.

همانگونه که قبلاً ذکر گردید هر ترکیب در سه حالت پیر نشده، پیر شده کوتاه مدت با آزمایش لعاب نازک چرخشی (RTFOT) و پیر شده بلند مدت با آزمایش پیرشدگی تسریع شده با ظرف تحت فشار (PAV) مورد ارزیابی قرار گرفته است. اعمال پیرشدگی کوتاه مدت مطابق استاندارد ASTM D2872-2022 بر روی قیر انجام گرفت. برای این منظور، ۳۵ گرم از نمونه قیر در بطری‌های شیشه‌ای دستگاه آزمایش ریخته شده و در قفسه داخل محفظه دستگاه RTFOT قرار داده شدند. دمای محفظه بر روی ۱۶۳ درجه سانتیگراد تنظیم گردید و قفسه با سرعت ۱۵ دور در دقیقه به مدت ۸۵ دقیقه چرخانده شد. در حین چرخش قفسه هوای داغ با شدت 200 ± 4000 لیتر در دقیقه به هر بطری دمیده شد. در این آزمایش لایه قیر داخل بطری به طور پیوسته از طریق چرخش نو شده و در معرض هوای داغ قرار می‌گیرد. این آزمایش شرایط پیرشدگی کوتاه مدت رخ داده در قیر در طی فرایند ساخت، حمل و پخش و تراکم آسفالت را نشان می‌دهد. بعد از اعمال شرایط پیرشدگی کوتاه مدت، اعمال پیرشدگی بلند مدت مطابق استاندارد ASTM D6521-2016 انجام گرفت که شبیه سازی

پیرشدگی رخ داده در قیر مخلوط آسفالتی در حین بهره برداری در روسازی در مدت ۷ تا ۱۰ سال می‌باشد.

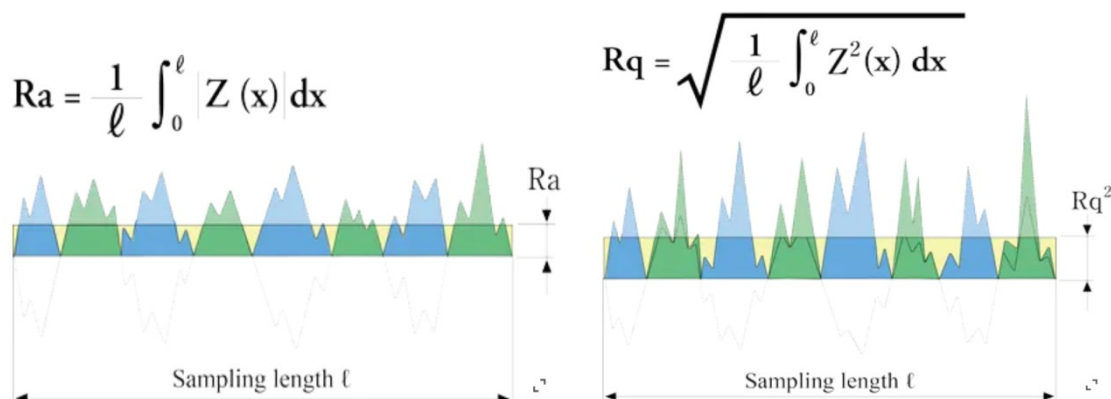
برای این منظور ۵۰ گرم از قیر پیر شده در RTFOT در داخل سینی‌های دستگاه PAV ریخته شده و تحت فشار ۲/۱ مگاپاسکال به مدت ۲۰ ساعت و دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد قرار گرفت.

۳-۳- آزمایش میکروسکوپ نیروی اتمی

میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) دستگاهی است که می‌توان از آن در مطالعه خواص و ساختار سطحی مواد در ابعاد و اندازه‌های نانومتر استفاده نمود. مبنای کار دستگاه AFM نیروهای کوتاه برد اتمی بین اتمهای نوک سوزن و اتمهای روی سطح مورد مطالعه می‌باشد. یک سوزن ظریف و باریک که به یک فلز منعطف به نام کانتیلور متصل است سطح نمونه را جاروب می‌کند و نیروی چسبندگی سطحی را اندازه گیری می‌کند. بسته به وجود فاصله بین نوک سوزن و سطح نمونه روبش سطح نمونه در سه حالت تماسی، غیر تماسی و ضربه ای انجام می‌گیرد. در حالت تماسی نوک پراب با سطح در تماس است و با حرکت آن روی سطح و جابجا شدن اهرم تصویری از سطح تهیه میشود. برای اندازه‌گیری‌های جابجایی اهرم از یک لیزر استفاده می‌شود که بر بازو تابیده و با بازتاب آن بر روی یک صفحه فوتودیود ضمن جابجایی اهرم بازتاب پرتو لیزر تابیده شده نیز جابجا شده و در نتیجه می‌توان پستی و بلندی‌های سطح را اندازه گیری کرد. این حالت سرعت روبش بالایی داشته و برای سطوح سخت و مقاوم گزینه مناسبی است. در حالت غیر تماسی میکروسکوپ نیروی اتمی اهرم با استفاده از یک پیزوالکتریک به نوسان درآورده می‌شود. پروب بر روی سطح نمونه حرکت نموده و آن را روبش میکند. نوک پراب در نزدیکی سطح و بدون تماس با آن قرار می‌گیرد تا نیروی جاذبه واندروالسی ضعیف بین پراب و نمونه را اندازه گیری کند. این حالت بیشتر برای محیط هوا و مایع مناسب است و سرعت روبش در این حالت از حالت تماسی کمتر است ولی آسیب کمتری به نوک سوزن و نمونه وارد می‌شود. در حالت ضربه‌ای نوک پراب به سطح نزدیک شده و سپس برای جلوگیری از برخورد با سطح از آن دور می‌شود. هنگامی که نوک پراب به سطح نزدیک می‌شود دامنه نوسان آن کاهش می‌یابد. با اندازه گیری دامنه نوسان می‌توان به

ویژگی‌های سطح نمونه پی برد. این حالت سرعت روبشی بسیار پایینی دارد و برای سطوح نرم مناسب است. در این تحقیق از حالت تماسی برای رویش سطح نمونه‌ها استفاده گردیده است. در این تحقیق از دستگاه میکروسکوپ نیروی اتمی ARA-AFM تولید شده توسط شرکت تحقیقاتی آرا، در دانشگاه آزاد اسلامی تبریز استفاده گردید که تصاویر با رزولوشن ۸ مگاپیکسل را با دقت ۰/۱ نانومتر تهیه می‌کند. از نمونه های ۵ میلی گرم با ابعاد ۲ در ۲ در ۰/۵ میلیمتر استفاده گردید. آماده سازی نمونه‌ها به روش گرم ریخته شده، مطابق توصیه محققین قبلی (Yu et al., 2015; Yang et al., 2020; Xing et al., 2019; Al-Shraideh et al., 2026) انجام گرفت. این روش به طور گسترده در مطالعات انجام گرفته بر روی قیر با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی مورد پذیرش قرار گرفته است، چون توانایی ایجاد یک لایه نازک، یکنواخت و هموار را ایجاد کرده و دست کاری سطح در آن حداقل بوده و قابلیت اطمینان تصویربرداری را افزایش می‌دهد. هر کدام از قیرها ابتدا در گرمخانه با دمای ۱۶۳ درجه سانتیگراد حرارت داده شده تا کاملاً ذوب شوند و سپس به طور یکنواخت هم زده شده تا اطمینان حاصل شود که مواد اصلاح کننده کاملاً در قیر پراکنده شده و مخلوط یکنواختی حاصل می‌شود. مقدار کمی از قیر مذاب (در حدود ۱/۵ گرم)، بر روی صفحه شیشه‌ای میکروسکوپ با ابعاد ۷۵ در ۲۵ میلیمتر ریخته شد. سپس، صفحه شیشه‌ای حاوی نمونه قیر به مدت ۲ دقیقه به داخل گرمخانه با دمای ۱۶۳ درجه سانتیگراد منتقل گردید تا قیر جاری شده و تحت وزن خود مسطح گردد. از یک کارد هم برای پخش قیر استفاده گردید تا یک سطح صاف و یکنواخت برای میکروسکوپ نیروی اتمی ایجاد شود. سپس، نمونه در دمای اتاق سرد شده و در ظرف بدون گرد و غبار برای حداقل ۲۴ ساعت قبل از تصویربرداری نگهداری شد. داده های ارائه شده توسط میکروسکوپ با نرم افزار Gwyddion 2.70 تحلیل شده و نتایج آن استفاده گردید. نقشه‌های دو بعدی که در آنها ساختارهای زنبوری و فازهای پری و پارا مشخص هستند برای انواع قیرها در شرایط مختلف پیرشدگی مورد مطالعه قرار گرفتند. همچنین، با استفاده از آنها مقادیر کمی از ویژگی‌های ساختارهای زنبوری از قبیل تعداد و مساحت متوسط ساختار زنبوری، چگالی، اندازه متوسط هر ساختار، فاصله مرکز تا مرکز ساختارها و مساحت کل ساختارهای زنبوری برای تحلیل

نتایج مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین، تصاویر سه بعدی از مورفولوژی سطح نمونه‌ها با استفاده از نرم افزار تهیه گردید تا تغییر در ناهمواری سطح نمونه‌ها و ویژگی ناهمواری با استفاده از پارامترهای مختلف ناهمواری تعیین گردیده و در تحلیل نتایج استفاده گردد. پارامترهای ناهمواری که از آنها در این مطالعه استفاده گردید شامل ارتفاع قله حداکثر که نشان دهنده بلندترین نقطه از سطح نمونه می‌باشد و با R_p نشان داده می‌شود. بلندترین نقطه از سطح نمونه مربوط به ناحیه سفید رنگ در ساختار زنبوری است. همچنین، عمق عمیق‌ترین دره سطح هر نمونه نیز با عنوان R_v به عنوان یکی از پارامترهای ناهمواری مورد استفاده قرار گرفت. دره‌ها در سطح نمونه‌ها مربوط به بخش‌های تیره در ساختار زنبوری می‌باشد. پارامتر دیگر مورد استفاده ارتفاع کل ناهمواری است که با R_t نشان داده می‌شود و از مجموع ارتفاع بلندترین قله‌ها در سطح و عمیق‌ترین دره‌ها در آن به دست می‌آید. پارامتر ارتفاع حداکثر پروفیل ناهمواری در طول نمونه‌گیری یکی دیگر از پارامترهای ناهمواری است که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است و با R_z نشان داده می‌شود. R_z از جمع ارتفاع قله حداکثر و ارتفاع دره حداکثر در طول نمونه‌گیری به دست می‌آید. همچنین، از شاخص میانگین حسابی ناهمواری با عنوان R_a در توصیف ناهمواری سطح نمونه‌ها استفاده گردید که نشان دهنده متوسط ناهمواری می‌باشد. پارامتر جذر میانگین مربعات (RMS) با عنوان R_q نیز برای توصیف ناهمواری سطح نمونه‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفت. R_a میانگین حسابی ناهمواری بوده و با گرفتن میانگین از مقادیر مطلق انحرافات ارتفاعی از خط متوسط که در یک طول اندازه‌گیری ثبت شده‌اند محاسبه می‌گردد. این پارامتر ناهمواری به دلیل این که یک مقدار متوسط سر راستی را که نشان دهنده ناهمواری کلی سطح است ارائه می‌دهد دارای اهمیت می‌باشد. اما R_a ، تاثیر کمتری از قله‌ها و دره‌های با ارتفاع شدید می‌گیرد که باعث می‌شود این پارامتر اندازه‌ای پایدار برای بافت کل سطح باشد. R_q ، با روشی متفاوت ناهمواری را محاسبه می‌کند و تمرکز آن بر جذر میانگین مربعات انحرافات ارتفاعی سطح از خط میانگین می‌باشد. R_q به قله‌ها و دره‌های با ارتفاع و عمق حدی حساسیت بیشتری نشان می‌دهد. به همین دلیل، انعکاس دقیق‌تری از نامنظمی‌های سطح می‌باشد. شکل ۸ میانگین حسابی و جذر میانگین مربعات انحرافات سطح را نشان می‌دهد.



شکل ۸. پارامترهای میانگین حسابی و جذر میانگین مربعات ناهمواری سطح نمونه‌ها

بلند مدت است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، تقریباً همه نمونه‌ها ساختار مشابهی دارند که در آنها سه فاز شامل ساختار زنبوری (فاز کاتانا) که توسط فاز پری محصور شده‌اند و در فاز پیوسته پارا پراکنده می‌باشند دیده می‌شود. اعتقاد بر این است که فاز کاتانا یا ساختار زنبوری متشکل از واکس بلوری و مولکولهای آسفالتن می‌باشد، فاز پری متشکل از رزین‌ها و فاز پارا متشکل از مولکولهای اشباع و آروماتیکها می‌باشد (Huang et al., 2023; Zhang et al., 2020). با اینحال، هم پیرشدگی و هم افزودنی‌ها باعث تغییر در الگوی ساختار زنبوری‌ها و اندازه و مشخصات آنها شده‌اند. به منظور کمی سازی ساختارهای زنبوری، در شکل ۱۰ تعداد ساختار زنبوری، میانگین مساحت هر ذره زنبوری، مساحت کل ساختار زنبوری، چگالی ساختار زنبوری، میانگین اندازه هر ساختار زنبوری بر حسب نانومتر و فاصله تقریبی مرکز تا مرکز لکه‌های زنبوری ارائه گردیده‌اند. با توجه به شکل‌های ۹ و ۱۰ ملاحظه می‌گردد که در حالت پیرنشده، تعداد ساختار زنبوری و چگالی ساختارهای زنبوری در قیر پایه کمتر از قیر حاوی ساسوبیت و در قیر حاوی ساسوبیت و EVA بیشتر از قیر حاوی ساسوبیت است. همچنین، ملاحظه می‌گردد که میانگین مساحت، میانگین اندازه هر ساختار زنبوری و فاصله متوسط لکه‌ها در قیرهای اصلاح شده کاهش می‌یابد و این کاهش در قیر حاوی پلیمر EVA کمی بیشتر است. این نتایج بیانگر این است که مواد اصلاح کننده مورد استفاده از تجمع زیاد آسفالتنها در یک محل جلوگیری کرده و آنها را در نمونه پخش می‌نمایند. نتایج نشان می‌دهند که مساحت کل ساختار زنبوری در قیر حاوی ساسوبیت

۴-تحلیل نتایج

۴-۱-ساختار زنبوری

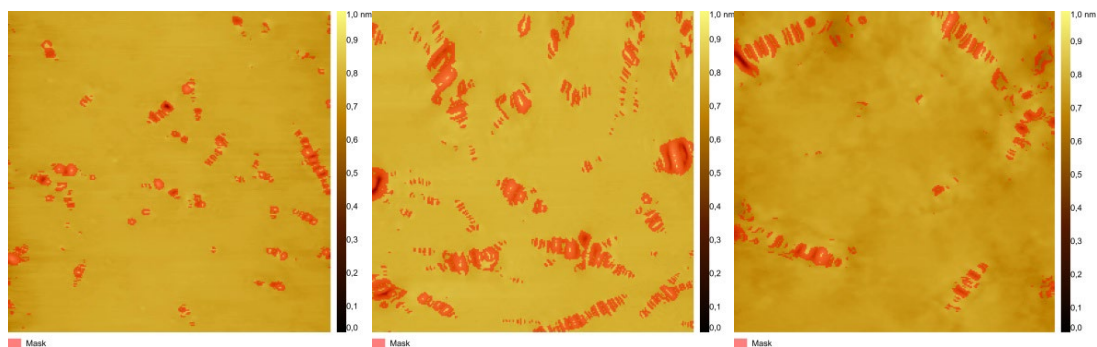
امروزه مطالعه تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی قیر معمولاً با بررسی ویژگی‌هایی مثل ساختارهای زنبوری و ناهمواری سطح نمونه‌ها انجام می‌شود (Sun et al., 2023; Xing et al., 2023). ساختار زنبوری یک شاخص مهم در تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی قیر می‌باشد، که مطالعه اثر پیرشدگی بر قیر قابل توضیح با آن می‌باشد (Chen et al., 2023). مطالعات بسیاری نشان می‌دهند که ساختار زنبوری در تصاویر AFM یک ویژگی مهم ریزساختاری است که ارزش مطالعه و تحقیق بیشتر را دارد (Li et al., 2022). ساختار زنبوری ریزساختاری با ویژگی مورفولوژیکی موج تاریک و روشن است که در سطح قیر دیده می‌شود و تداعی کننده شکل زنبور می‌باشد (شکل ۴). بر روی ترکیب ساختار زنبوری بین محققین اختلاف نظر وجود دارد، اما، سه توضیح اصلی برای تشکیل ساختار زنبوری وجود دارد. اولین توضیح ارتباط ساختار زنبوری با مولکولهای آسفالتن در قیر است. توضیح دیگر این است که ساختار زنبوری با کریستاله شدن واکس در قیر تشکیل می‌شود، و توضیح سوم این که ساختار زنبوری از همکاری مشترک این دو عامل می‌باشد. شکل ۹ ساختار زنبوری قیرهای مورد مطالعه را در سه حالت پیرنشده، پیرشده کوتاه مدت و پیرشده بلند مدت نشان می‌دهد. در شکل ۹، برای هر کدام از قیرها، تصویر سمت چپ برای حالت پیرنشده، تصویر میانی برای حالت پیرشده کوتاه مدت و تصویر سمت راست در حالت پیرشده

کمتر از قیر پایه است، اما، افزودن پلیمر به قیر باعث افزایش قابل توجه مساحت کل ساختار زنبوری گردیده است.

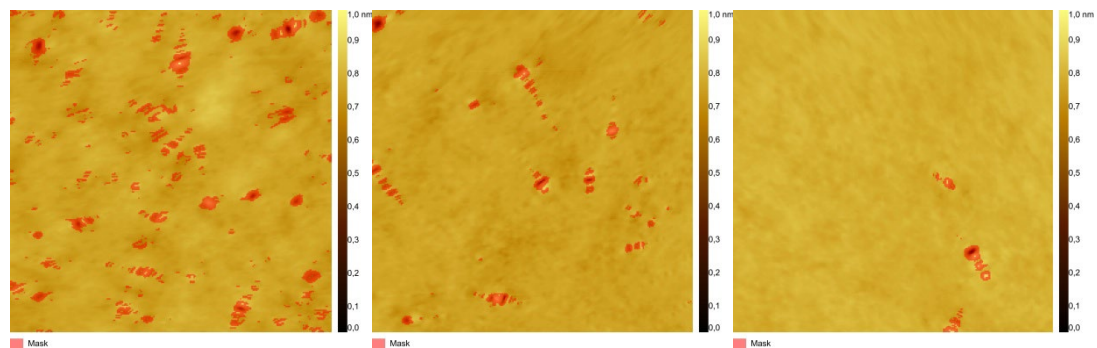
نتایج مربوط به قیر پایه در شرایط پیرشدگی کوتاه مدت نشان می‌دهد که با اعمال پیرشدگی کوتاه مدت تعداد ساختار زنبوری، میانگین مساحت هر ساختار زنبوری، مساحت کل ساختار زنبوری، چگالی ساختار زنبوری و میانگین اندازه هر ساختار زنبوری افزایش می‌یابد. اما، بعد از اعمال پیرشدگی بلند مدت همه این مقادیر مجدداً کاهش می‌یابند، هر چند همه مقادیر در شرایط پیرشده بلند مدت بیشتر از آنها در شرایط پیرنشده هستند. اگرچه اتفاق نظر در تحقیقات قبلی از نظر تاثیر پیرشدگی بر ساختار زنبوری وجود ندارد و در شرایط مختلف نتایج متفاوتی گرفته شده، اما، معمولاً، با رشد پیرشدگی ناهمواری سطح قیر بیشتر می‌شود، که به دلیل تجدید آرایش اجزای داخلی قیر و تجمع محصولات حاصل از اکسیداسیون از قبیل کربونیلها و سولفوکسیدها می‌باشد، که منجر به کاهش تعداد و مساحت ساختارهای زنبوری می‌شود (Sun et al., 2023; Ding et al., 2021). پنگ و همکارانش با مطالعه ریزساختار نمونه‌های مختلف قیر بعد از پیرشدگی کوتاه مدت و بلند مدت دریافتند که در حالت پیرنشده ساختارهای زنبوری پراکنده بودند و بعد از پیرشدگی کوتاه مدت تجمع یافته و با پیرشدگی بلند مدت به طور پیوسته کاهش یافته و تجمع آنها تشدید شد (Pang et al., 2025). جی و همکارانش با مطالعه ریزساختار قیر معمولی و اصلاح شده با پلیمر SBS دریافتند که تعداد و اندازه ساختارهای زنبوری بعد از پیرشدگی به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد (Ji et al., 2020). با اینحال، وو و همکارانش نشان دادند که پیرشدگی بلند مدت اندازه ساختار زنبوری در قیر خالص را افزایش می‌دهد (Wu et al., 2025)، که با نتایج این تحقیق نیز همخوانی

دارد. پیرشدگی باعث افزایش آسفالتنها شده که در نتیجه ذرات زنبوری تجمع یافته و اندازه آنها افزایش می‌یابد. فاصله مرکز تا مرکز لکه‌های زنبوری نیز با پیرشدگی کوتاه مدت کاهش و با پیرشدگی بلند مدت مجدداً افزایش می‌یابد. اما، روند در قیرهای اصلاح شده متفاوت است. برای قیر حاوی افزودنی ساسوبیت، پیرشدگی باعث کاهش تعداد ساختار زنبوری و چگالی آنها شده و میانگین اندازه، میانگین مساحت هر ساختار زنبوری و میانگین فاصله مرکز تا مرکز ساختارهای زنبوری را افزایش می‌دهد، و این تغییر در شرایط پیرشدگی بلند مدت بیشتر است. اما، مساحت کل ساختار زنبوری با پیرشدگی کوتاه مدت افزایش یافته و با پیرشدگی بلند مدت کاهش می‌یابد.

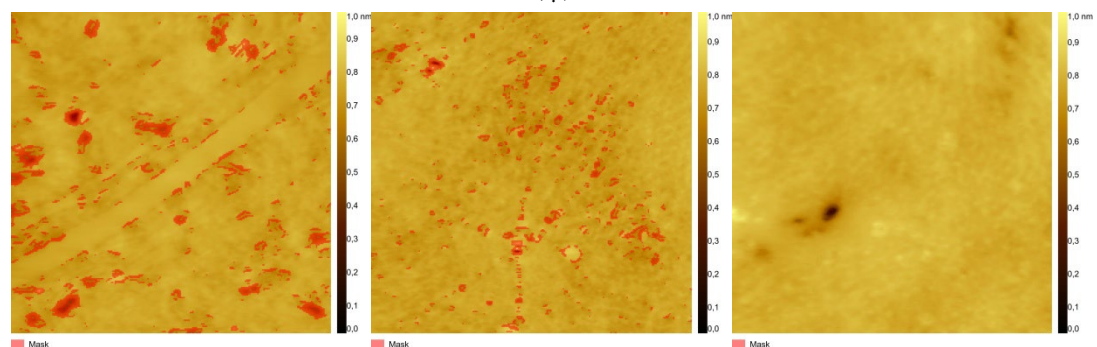
در قیر حاوی پلیمر EVA و ساسوبیت، پیرشدگی کوتاه مدت باعث افزایش تعداد ساختار زنبوری و چگالی ساختار زنبوری شده و میانگین مساحت و اندازه هر ساختار زنبوری و میانگین فاصله مرکز تا مرکز ساختارهای زنبوری و مساحت کل ساختار زنبوری را کاهش داده است. در این قیر، پیرشدگی بلند مدت باعث از بین رفتن تمام ساختارهای زنبوری گردیده است. تحقیقات نشان داده‌اند که در ساختارهای زنبوری نیروی چسبندگی کمتر از آن در بخشهای دیگر است. نیروی چسبندگی کمتر نشان دهنده مقاومت کمتر در برابر ترک خوردگی در دماهای پایین است (Huang et al., 2018; Gong et al., 2023). بنابراین، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که قیر حاوی ساسوبیت و پلیمر EVA بعد از پیرشدگی بلند مدت مقاومت به ترک حرارتی بیشتری از قیر پایه خواهند داشت. همچنین، بخشهای زنبوری دارای بالاترین سختی بوده و مقاومت بیشتری در برابر تغییر شکل ایجاد می‌کنند (Zhang et al., 2020).



(الف)



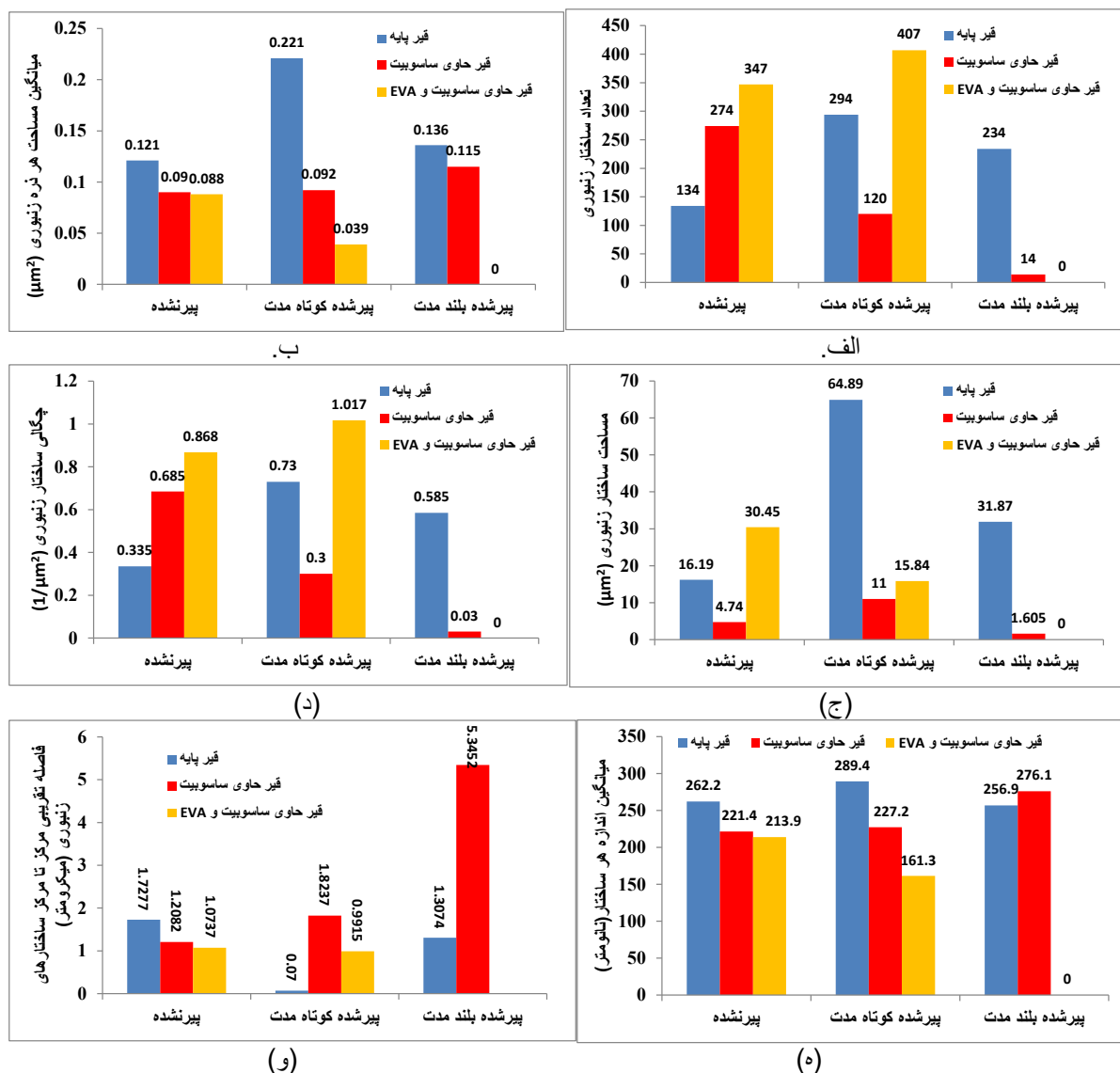
(ب)



(ج)

شکل ۹. تصاویر دو بعدی از سطح نمونه‌ها در حالات مختلف پیرشدگی (الف) قیر پایه (ب). قیر حاوی ساسویت

(ج) قیر حاوی EVA و ساسویت



شکل ۱۰. نتایج مربوط به ساختار زنبوری نمونه‌ها (الف). تعداد ساختار زنبوری (ب) میانگین مساحت هر ذره زنبوری (ج) مساحت کل ساختار زنبوری (د) چگالی ساختار زنبوری (ه) میانگین اندازه هر ساختار زنبوری (و) فاصله متوسط مرکز تا مرکز ساختار زنبوری

۴-۲- ناهمواری سطح نمونه‌ها

قیر اصلاح نشده، اصلاح شده با ساسوبیت و اصلاح شده با ساسوبیت و پلیمر EVA را در سه حالت پیر نشده، پیر شده کوتاه مدت و پیر شده بلند مدت نشان می‌دهد. برای هر کدام از قیرها، تصویر سمت چپ در حالت پیر نشده، تصویر میانی در حالت پیرشدگی کوتاه مدت و تصویر سمت راست در حالت پیرشدگی

مورفولوژی سطح قیر با ارزیابی ناهمواری در تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی نیز قابل توضیح است. ناهمواری سطح نامنظمی‌های سطح قیر را منعکس می‌کند که برای درک خصوصیات و مکانیزم پیرشدگی قیر اهمیت زیادی دارد (Long et al., 2022). شکل ۱۱ تصاویر سه بعدی از سطح نمونه‌های

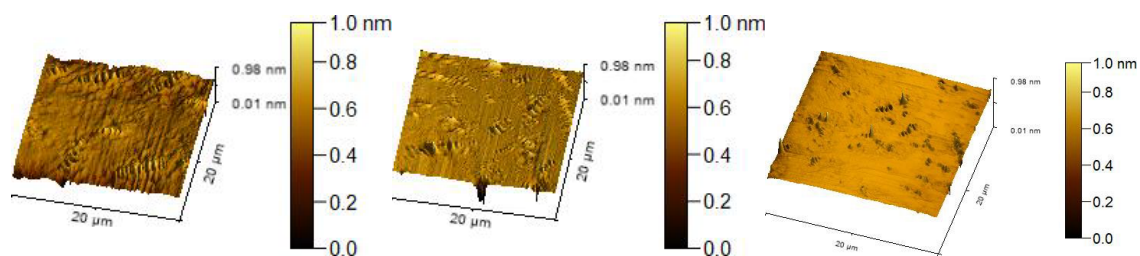
بلند مدت را نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، هم افزودنی‌ها و هم پیرشدگی باعث تغییر در مورفولوژی و ناهمواری سطح قیر پایه شده‌اند.

مقایسه توپوگرافی سطح نمونه قیر پایه با قیرهای حاوی ساسوبیت و EVA در حالت پیرشدگی نشان می‌دهد که در قیر پایه ناهمواری‌ها شدیدتر اما در بخش‌های کوچکی از سطح پراکنده هستند، اما، در قیرهای اصلاح شده شدت ناهمواری کمتر شده اما ناهمواری در کل سطح به طور یکنواخت پراکنده شده است. در قیر اصلاح شده با EVA و ساسوبیت تعداد قله‌ها خیلی بیشتر اما ارتفاع آنها کوچکتر است. افزایش ناهمواری نشان دهنده افزایش سختی، کاهش نیروی چسبندگی، افزایش شکنندگی و استهلاک انرژی و ویسکوزیته می‌باشد (Sun et al., 2024)، که باعث کاهش مقاومت قیر به ترک خوردگی خواهد شد. به منظور درک بهتر اثر شرایط بر مورفولوژی سطح، ناهمواری سطح نمونه‌ها با پارامترهای مختلفی محاسبه شده و در شکل ۱۲ نشان داده شده‌اند. پارامترها شامل ارتفاع قله حداکثر (R_p)، عمق دره حداکثر (R_v)، ارتفاع حداکثر پروفیل ناهمواری (R_z)، ارتفاع کل ناهمواری پروفیل (R_t)، میانگین حسابی ناهمواری (R_a) و جذر میانگین مربعات ناهمواری (R_q) می‌باشند. همانگونه که در شکل ۱۲ ملاحظه می‌گردد، در حالت پیرنشده ارتفاع قله حداکثر، عمق دره حداکثر، حداکثر ارتفاع ناهمواری، میانگین حسابی ناهمواری و جذر میانگین مربعات قیرهای اصلاح شده از قیر پایه بیشتر است، که نشان دهنده اثر سخت کنندگی مواد اصلاح کننده می‌باشد، که نشان می‌دهد این افزودنی‌ها مقاومت قیر را به تغییر شکل و شیارشدگی افزایش می‌دهند.

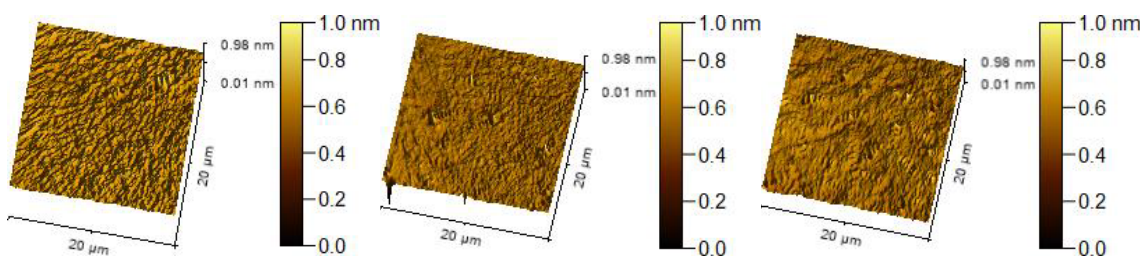
این ویژگی‌ها در قیری که با EVA و ساسوبیت اصلاح شده است بیشترین می‌باشند. با این حال، ارتفاع کل ناهمواری (R_t) در قیر پایه از قیرهای اصلاح شده بیشتر است. کاهش R_t نشان می‌دهد که اگرچه افزودنی‌ها ناهمواری سطح را بیشتر کرده‌اند، اما برجستگی‌های خیلی شدید را کاهش داده‌اند، که بدین مفهوم است

که سطحی که در قیر پایه نقاط خیلی عمیق و مرتفع داشته حالا با افزودن ساسوبیت و پلیمر یکنواخت‌تر شده است. با اعمال پیرشدگی، مقدار R_p ، R_v ، R_z ، R_a و R_q در قیر پایه افزایش می‌یابد، که نشان دهنده این است که پیرشدگی باعث افزایش کلی ناهمواری می‌گردد، که نتیجه آن افزایش سختی و کاهش چسبندگی و مقاومت در برابر ترک حرارتی می‌باشد.

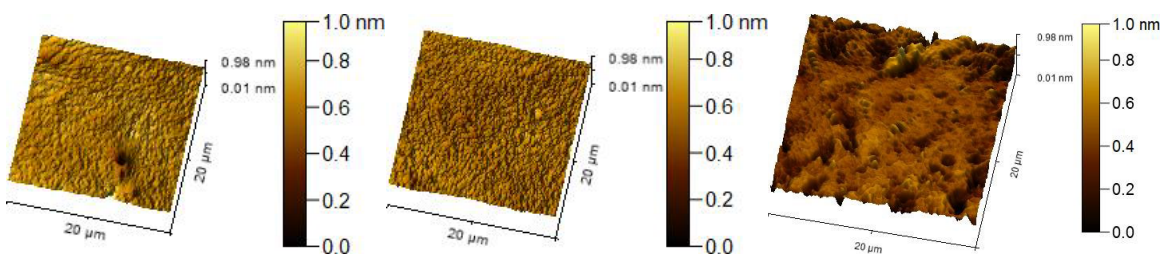
ارتفاع کل ناهمواری در قیر پایه، R_t با پیرشدگی کوتاه مدت کاهش می‌یابد، که نشان دهنده کاهش برجستگی و فرو رفتگی‌های شدید در سطح قیر است، و سپس با پیرشدگی بلند مدت شروع به افزایش می‌کند. در قیر حاوی ساسوبیت و قیر حاوی EVA و ساسوبیت، مقادیر پارامترهای R_p ، R_v ، R_z ، R_a و R_q با اعمال پیرشدگی کاهش می‌یابند. این ویژگی نشان دهنده این است که نگرانی سخت شوندگی و کاهش مقاومت در برابر ترک خوردگی و نیروی چسبندگی ناشی از پیرشدگی که در قیرهای اصلاح نشده وجود دارد، در مورد قیرهای حاوی ساسوبیت و پلیمر EVA کمتر خواهد بود. مقایسه پارامترهای ناهمواری بعد از اعمال پیرشدگی بلند مدت نشان می‌دهد که در قیرهای اصلاح شده شاخص‌های ناهمواری به طور کلی کمتر از قیر پایه می‌باشند که نشان دهنده این است که اثر سخت کنندگی پیرشدگی بلند مدت در قیرهای اصلاح شده کمتر از آن در قیر پایه است که قیر حاوی ساسوبیت و EVA شرایط بهتری دارد. اما، در حالت پیرشدگی کوتاه مدت غالباً شاخص‌ها در قیر اصلاح شده بزرگتر از قیر پایه می‌باشند و مقدار آنها برای قیر حاوی ساسوبیت و EVA بیشترین می‌باشد. این موضوع به دلیل تاثیر افزودنی‌ها بر تجمع اجزای قیر می‌باشد و توضیح دقیق آن نیاز به مطالعات بیشتر دارد.



(الف)



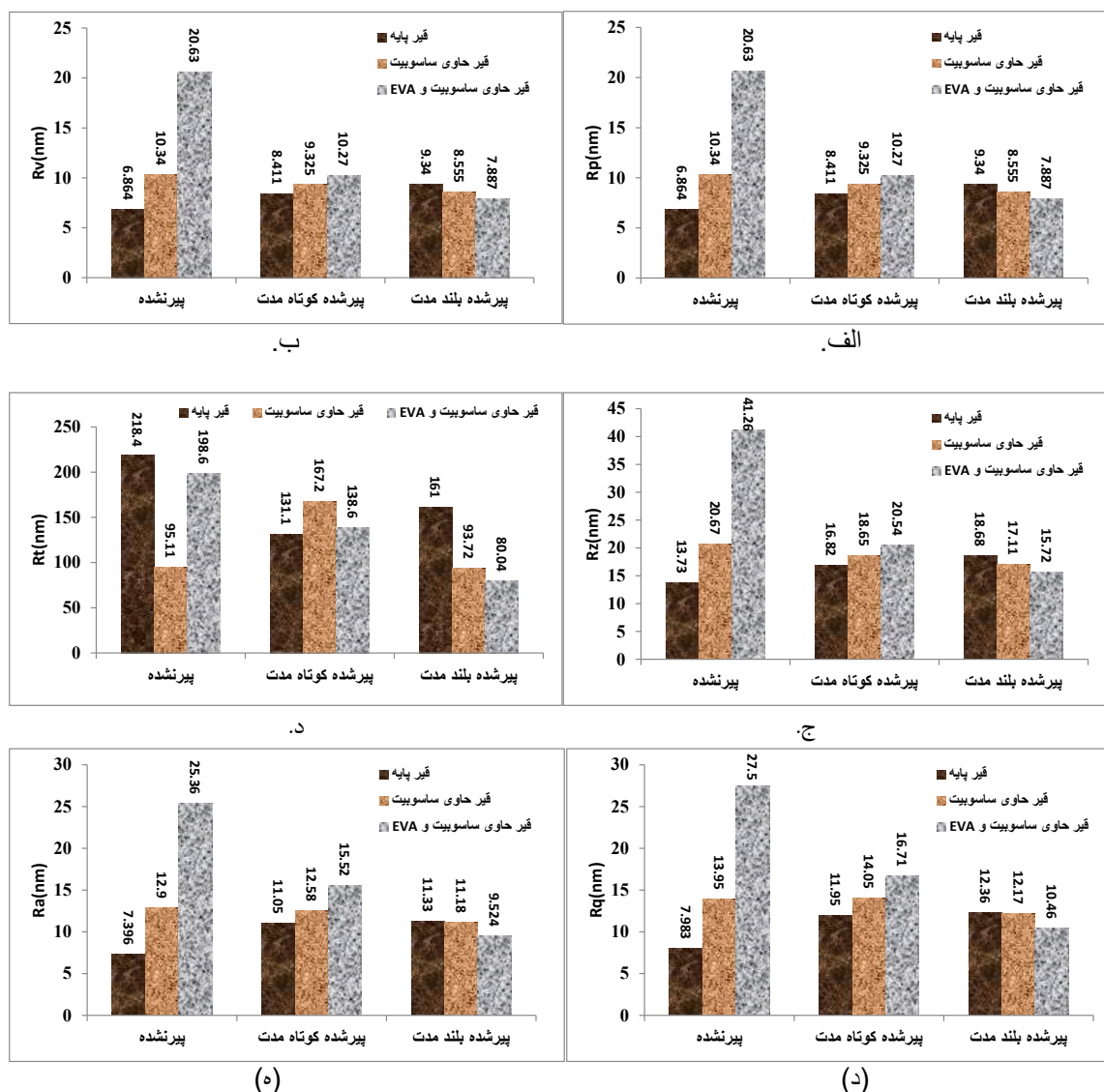
(ب)



(ج)

شکل ۱۱. تصاویر سه بعدی از سطح نمونه‌ها در سه حالت پیر نشده، پیر شده کوتاه مدت و پیر شده بلند مدت

الف. قیر پایه ب. قیر حاوی ساسویت ج. قیر حاوی ساسویت و EVA



شکل ۱۲. پارامترهای ناهمواری سطح نمونه‌ها: الف. R_p ، ب. R_v ، ج. R_t ، د. R_q ، ه. R_a و. R_q

۵- نتیجه‌گیری

-افزودن ساسوبیت و پلیمر EVA تعداد و چگالی ساختارهای زنبوری را نسبت به قیر پایه افزایش می‌دهد، اما، میانگین مساحت و اندازه و فاصله متوسط ساختارهای زنبوری را کاهش می‌دهند. -مساحت کل ساختارهای زنبوری در قیر حاوی ساسوبیت از قیر پایه کمتر، اما، در قیر حاوی EVA و ساسوبیت مساحت آنها بیشتر از قیر پایه می‌باشد. -پیرشدگی قیر پایه باعث افزایش مساحت کل و تعداد ساختارهای زنبوری، میانگین مساحت و اندازه هر ساختار و چگالی آنها می‌گردد، که این تغییرات در پیرشدگی کوتاه مدت بیشتر از پیرشدگی بلند مدت است.

در این تحقیق قیر پایه با درجه عملکردی PG58-22، با افزودنی آسفالت گرم ساسوبیت و همچنین پلیمر EVA اصلاح گردید و تحت شرایط پیرشدگی کوتاه مدت و بلند مدت قرار گرفت. نمونه‌هایی از سه نوع قیر در شرایط مختلف پیرشدگی تحت مطالعه ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی گردیدند و مورفولوژی سطح نمونه‌ها با بررسی ساختارهای زنبوری و ناهمواری سطح بررسی و مقایسه گردیدند. نتایج گرفته شده از این مطالعه به طور خلاصه به شرح ادامه می‌باشند.

دره‌های عمیقی که در سطح قیر پایه مشاهده گردید با اصلاح کننده‌ها برطرف شده و سطح یکنواختی به دست می‌آید.

-بررسی نمونه‌ها بعد از اعمال پیرشدگی نشان می‌دهد که در قیر پایه پیرشدگی باعث افزایش ناهمواری سطح نمونه‌ها می‌شود که نشان دهنده سخت‌شدگی قیر و کاهش چسبندگی می‌باشد و مقاومت در برابر ترک خوردگی می‌باشد. اما، در قیرهای اصلاح شده تاثیر پیرشدگی باعث کاهش شاخص‌های ناهمواری می‌شود.

-بعد از اعمال پیرشدگی بلند مدت، ناهمواری سطح نمونه‌های اصلاح شده کمتر از ناهمواری قیر پایه می‌باشد و کمترین ناهمواری مربوط به قیر حاوی EVA و ساسویت است. این موضوع نشان دهنده مقاومت بیشتر در برابر پیرشدگی قیرهای اصلاح شده می‌باشد.

-در قیر اصلاح شده با ساسویت پیرشدگی باعث کاهش تعداد و چگالی ساختارهای رنبوری می‌شود، اما، میانگین اندازه و مساحت ساختارها و مساحت کل ساختار افزایش می‌یابد، که این تغییرات برای پیرشدگی بلند مدت بیشتر می‌باشد.

-در قیر اصلاح شده با EVA و ساسویت، پیرشدگی کوتاه مدت قیر تعداد و چگالی ساختارهای رنبوری را افزایش می‌دهد، ولی میانگین مساحت و اندازه ساختار رنبوری و مساحت کل آنها کاهش می‌یابد. در این قیر بعد از پیرشدگی بلند مدت ساختار رنبوری مشاهده نگردید.

-ارزیابی ناهمواری سطح نمونه‌ها در حالت پیرنشده نشان می‌دهد که افزودن ساسویت و پلیمر EVA هر کدام شاخص‌های ناهمواری را افزایش می‌دهند، که نشان دهنده افزایش سختی و مقاومت به تغییر شکل قیر می‌باشد. با این حال، قله‌های بلند و

۶-مراجع

performance related parameters. *Construction and Building Materials*, 40, 438-447.

-Ashimova, S., Aitkaliyeva, G., Bektenov, N., Alizhanov, D., Abdyrakhmanova, G., Sarybayev, N. & Oliviero Rossi, C. (2026). Correction: Effect of ethylene-vinyl acetate and rubber waste on asphalt concrete performance. *Frontiers in Chemistry*, 14, 1808130.

-Binnig, G., Quate, C. F. & Gerber, Ch. Atomic force microscope. *Phys. Rev. Lett.* 56, 930-933 (1986).

-Bora, B., & Saboo, N. (2026). Advancing asphalt binder characterisation: insights from atomic force microscopy on morphology, mechanics, and surface interactions. *International Journal of Pavement Engineering*, 27(1), 2681677.

-Chen, Y., Li, H., Yu, W., Dong, X., He, G., & Wu, T. (2023). Characterization of the micromorphology of asphalt surfaces using atomic force microscopy. *Construction and Building Materials*, 401, 132845.

-Das PK, Kringos N, Wallqvist V, Birgisson B. (2023). Micromechanical investigation of phase separation in bitumen by combining atomic force microscopy with differential scanning calorimetry results. *Road Mater Pavement Design*, 14 (Suppl. 1), 25-37.

-Diab, L., Khan, A. A. R., Hafeez, M., & Al-Qadi, I. L. (2026). Role of Asphalt Pavements in Achieving Net-Zero Emissions in the US Transportation Sector. *Transportation Research Record*, 2680(2), 164-181.

-Abd El-Rahman, A. M. M., El-Shafie, M., Mohammedy, M. M., & Abo-Shanab, Z. L. (2018). Enhancing the performance of blown asphalt binder using waste EVA copolymer (WEVA). *Egyptian Journal of Petroleum*, 27(4), 513-521.

-Airey, G. D., Singleton, T. M., & Collop, A. C. (2002). Properties of polymer modified bitumen after rubber-bitumen interaction. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(4), 344-354.

-Al-Khateeb, G. G., Sukkari, A., Ezzat, H., Nasr, E., & Zeiada, W. (2024). Rheology of crumb rubber-modified warm mix asphalt (WMA). *Polymers*, 16(7), 906.

-Al-Shraideh, N., Akkouri, N., Alkhateb, H., Nouranian, S., Ucak-Astarlioglu, M. G., Majdoub, M., & Al-Ostaz, A. (2026). AFM analysis of rejuvenated graphene nanoplatelets for nanoscale reinforcement and microwave-induced healing in asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 536, 147000.

-Ameri, M., Mansourian, A., & Sheikhmotevali, A. H. (2012). Investigating effects of ethylene vinyl acetate and gilsonite modifiers upon performance of base bitumen using Superpave tests methodology. *Construction and Building Materials*, 36, 1001-1007.

Ameri, M., Mansourian, A., & Sheikhmotevali, A. H. (2013). Laboratory evaluation of ethylene vinyl acetate modified bitumens and mixtures based upon

- Binder Aging and Pavement Distress. *International Journal of Research & Technology*, 14(2), 336-344.
- Li, M., Sha, A., Lu, Q., Li, Z., Peng, Z., Jiao, W. & Song, R. (2027). Study on rheology, aging resistance and microstructure of recycled PE/EVA composite-modified asphalt. *Fuel*, 427, 139608.
- Li, C., Xie, X., Wang, L., Guo, Y., Zhang, L., & Xue, Z. (2022). Evaluation of the effect of thermal oxygen aging on base and SBS-modified bitumen at micro and macroscales. *Construction and Building Materials*, 324, 126623.
- Loeber L, Sutton O, Morel J, Valleton JM, Muller G. New direct observations of as-phalts and asphalt binders by scanning electron microscopy and atomic force microscopy. *J Microsc* 1996. 182(1):32-9.
- Lesueur D. (2009). The colloidal structure of bitumen: consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. *Advances in Colloid Interface Science*. 145(1-2): 42-82.
- Long, Z., Guo, N., Tang, X., Ding, Y., You, L., & Xu, F. (2022). Microstructural evolution of asphalt induced by chloride salt erosion. *Construction and Building Materials*, 343, 128056.
- Lyne, Å. L., Wallqvist, V., Rutland, M. W., Claesson, P., & Birgisson, B. (2013). Surface wrinkling: the phenomenon causing bees in bitumen. *Journal of Materials Science*, 48(20), 6970-6976.
- Masson J. F., Leblond V., Margeson J. (2006). Bitumen morphologies by phase-detection atomic force microscopy. *Journal of Microscopy*. 221(1): 17-29.
- Nahar S., Dillingh B., Erkens S., Schmets A.J., Fischer H., Scarpas A., et al. (2013a). Atomic force microscopy suited as tool for fast screening of bituminous materials? Interlaboratory comparison study. *Transportation Research Board 92nd Annual Meeting*.
- Nahar S. N., Schmets A. J. M., Scarpas A., Schitter G. (2013b). Temperature and thermal history dependence of the microstructure in bituminous materials. *European Polymer Journal*, 49(8):1964-74.
- Nahar, S. N., Mohajeri, M., Schmets, A. J. M., Scarpas, A., Van de Ven, M. F. C., & Schitter, G. (2013c). First observation of blending-zone morphology at interface of reclaimed asphalt binder and virgin bitumen. *Transportation Research Record*, 2370(1), 1-9.
- Nazmey, K. G., Eisa, M. S., Morsi, A. G. M., & Debaiky, A. S. (2024). Enhancement of porous asphalt mixtures modified with various fibers and ethylene-vinyl acetate polymer. *Scientific Reports*, 14(1), 15599.
- Pang, Y., Shan, L., Shen, H., Wang, Y., Zhang, E., & Gershome, A. G. (2025). A multi-scale study linking chemical composition and nanostructure to the
- Ding, L.; Wang, X. Zhang, M. Chen, Z. Meng, J. Shao, X. (2021). Morphology and properties changes of virgin and aged asphalt after fusion. *Construction and Building Materials*, 291, 123284.
- Fischer H, Dillingh E. On the investigation of the bulk microstructure of bitumen—introducing two new techniques. *Fuel* 2014. 118:365-8.
- Fischer H., Stadler H., Erina N. (2013). Quantitative temperature-depending mapping of mechanical properties of bitumen at the nanoscale using the AFM operated with Peak Force Tapping mode. *Journal of Microscopy*, 250(3):210-7.
- Fischer H.R., Dillingh E., Hermse C. (2013). On the microstructure of bituminous binders. *Road Materials and Pavement Design*, 1-15.
- Gong, M., Yang, J., Yao, H., Wang, M., Niu, X., & Haddock, J. E. (2018). Investigating the performance, chemical, and microstructure properties of carbon nanotube-modified asphalt binder. *Road Materials and Pavement Design*, 19(7), 1499-1522.
- Haggag, M. M., Mogawer, W. S., & Bonaquist, R. (2011). Fatigue evaluation of warm-mix asphalt mixtures: Use of uniaxial, cyclic, direct tension compression test. *Transportation Research Record*, 2208(1), 26-32.
- Hainin, M. R., Aziz, M. M. A., Feizabadi, S. M., Jaya, R. P., Hassan, N. A., & Jakarni, F. M. (2015). An overall review: Modified asphalt binder containing sasobit in warm-mix asphalt technology. *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, 73(4).
- Hossain, Z., Lewis, S., Zaman, M., Buddhala, A., & O'Rear, E. (2013). Evaluation for warm-mix additive-modified asphalt binders using spectroscopy techniques. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(2), 149-159.
- Huang, Y., Wu, Z., Liang, L., Ying, J., Gui, L., Shen, P. K., & Tian, Z. Q. (2023). Revealing the dependance of mechanical properties of asphalt binder on graphene size via multi-scale methods. *Materials & Design*, 236, 112478.
- Jäger A, Lackner R, Eisenmenger-Sittner C, Blab R. (2004). Identification of four material phases in bitumen by atomic force microscopy. *Road Materials and Pavement Design*; 5 (Suppl. 1):9-24.
- Jamal, H., Xiao, F., Abdelmoez, M. A., Wan, C., & Alae, M. (2026). A multi-scale study of compatibility in SBS-and EVA-modified asphalt and its impact on optimisation of binder performance. *International Journal of Pavement Engineering*, 27(1), 2654195.
- Ji, X., Hou, Y., Zou, H., Chen, B., & Jiang, Y. (2020). Study of surface microscopic properties of asphalt based on atomic force microscopy. *Construction and Building Materials*, 242, 118025.
- Kumar, N., & Chauhan, J. (2026). Review on Artificial Intelligence-Based Prediction of Asphalt

- Xing, C., Liu, L., & Wang, M. (2019). A new preparation method and imaging parameters of asphalt binder samples for atomic force microscopy. *Construction and Building Materials*, 205, 622-632.
- Xing, C., Liu, L., Jiang, W., Shan, J., Xiao, J., Yuan, D., & Wu, W. (2023). Investigation of internal phases of linear SBS modified bitumen at the nanoscale using AFM PF-QNM. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 10(3), 399-412.
- Xia, X., Lian, W., Li, C., Sun, G., Yao, B., Ma, W., & Yang, F. (2023). Exploration of the fundamental factor for the synergistic modification of model waxy oil by EVA and asphaltene: An experiment and simulation study. *Geoenergy Science and Engineering*, 223, 211494.
- Yan, K., Hong, Z., You, L., Ou, J., & Miljković, M. (2021). Influence of ethylene-vinyl acetate on the performance improvements of low-density polyethylene-modified bitumen. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123865.
- Yang, J., Zhu, X., Yuan, Y., & Li, L. (2020). Effects of aging on micromechanical properties of asphalt binder using AFM. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(5), 04020081.
- Yu X., Burnham N. A., Mallick R. B., Tao M. A. (2013). systematic AFM-based method to measure adhesion differences between micron-sized domains in asphalt binders. *Fuel*; 113:443-7.
- Yu, X., Burnham, N. A., & Tao, M. (2015). Surface microstructure of bitumen characterized by atomic force microscopy. *Advances in Colloid and Interface Science*, 218, 17-33.
- Yuliestyan A., Cuadri A. A., García-Morales M., Partal P. (2016). Influence of polymer melting point and Melt Flow Index on the performance of ethylene-vinyl-acetate modified bitumen for reduced-temperature application. *Mater Des* 96: 180-188. doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.003.
- Zhang, M., Hao, P., Dong, S., Li, Y., & Yuan, G. (2020). Asphalt binder micro-characterization and testing approaches: A review. *Measurement*, 151, 107255.
- Zhang, E., Shan, L., & Tan, Y. (2024). Utilization of atomic force microscopy (AFM) in characterizing microscopic properties of asphalt binders: a review. *Journal of Testing and Evaluation*, 52(1), 754-775.
- Zhang H. L., Wang H. C., Yu J. Y. (2011). Effect of aging on morphology of organo-montmorillonite modified bitumen by atomic force microscopy. *Journal of Microscopy*, 242(1):37-45.
- pyrolysis kinetics of asphalt binders. *Chemical Engineering Journal*, 171317.
- Pauli A. T., Grimes R. W., Beemer A. G., Turner T. F., Branthaver J. F. (2011). Morphology of asphalts, asphalt fractions and model wax-doped asphalts studied by atomic force microscopy. *International Journal of Pavement Engineering*. 12(4):291-309.
- Ren, X., Sha, A., Jiang, W., Wu, W., Jiao, W., Li, J., & Li, J. (2024). Effect of EVA on the rheological properties of SBR-modified asphalt binder and its behavioral evolution during the thermo-oxidative aging process. *Construction and Building Materials*, 454, 139159.
- Saboo, N., Kumar, R., Kumar, P., & Gupta, A. (2018). Ranking the rheological response of SBS-and EVA-modified bitumen using MSCR and LAS tests. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(8), 04018165.
- Sengoz, B., & Isikyakar, G. (2008). Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 22(9), 1897-1905.
- Sourty E., Tamminga A., Michels M., VELLINGA W.P., Meijer H. (2011). The microstructure of petroleum acuum residue films for bituminous concrete: a microscopy approach. *Journal of Microscopy*, 241(2):132-46.
- Sun, E., Zhao, Y., & Wang, G. (2024). Nano surface evolution properties of crumb rubber modified asphalt due to aging and adhesion failure mechanism. *Construction and Building Materials*, 420, 135564.
- Sun, E.; Zhao, Y.; Wang, G. (2023). Analysis of nanoscale evolution features of microstructure of asphalt based on atomic force microscopy. *Construction and Building Materials*, 409, 133958.
- Tewegbola, R. O., Arinkoola, A. O., Salawudeen, T. O., & Ogunleye, O. O. (2026). Optimization of Ethylene-Vinyl Acetate Dosage for Rheological and Physico-Mechanical Properties of Loda Bitumen. *LAUTECH Journal of Engineering and Technology*, 20(1), 40-53.
- Wu, Y., Dai, K., Zhang, K., Wen, Y., Li, R., & Wang, X. (2025). Evaluation of aging effects on microstructural and rheological properties of SBS-modified asphalt mixtures using an innovative laboratory aging method. *Construction and Building Materials*, 502, 144411.
- Wu, S., Chen, H., Zheng, S., Dong, Y., & Zhang, W. (2026). Preparation and Rheological Properties of Waterborne Epoxy Resin Emulsified Asphalt. *Materials*, 19(12), 2493.

Evaluating the Aging of Asphalt Binder Modified by Sasobit and Ethylene Vinyl Acetate by Exploring the Microstructure Using Atomic Force Microscopy

Hadi Koushaeian, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.

Hasan Taherkhani, Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

Babak Golchin, Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

Rasool Jani, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Ta.C, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.

Roosbeh Dabiri, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Ta.C, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.

E-mail: taherkhani.hasan@znu.ac.ir

Received: March 2026- Accepted: August 2026

ABSTRACT

Using atomic force microscopy for investigating the properties of asphalt has been common in recent years. In this study, the microstructure of an asphalt cement modified by 3% (by weight) Sasobit and 3% ethylene vinyl acetate (EVA) has been studied using AFM. The binders have been studied in unaged condition and after being aged using rolling thin film oven test (RTFOT) and pressure aging vessel (PAV) to find the effect of aging condition and additives on the microstructure through the change in bee structures and surface roughness. Results revealed that the additives and aging changed the asphalt microstructure. In unaged condition, the density and number of bee structures, and the mean size and area of bee structures in modified binders are more than those of the base binder. The total area occupied by the bee structures for the Sasobit modified asphalt is less than that for the base binder; and for the EVA and Sasobit modified binder is higher than that for the base binder. While, the aging increases the total area, number and mean size of bee structures in the unmodified asphalt binder, it causes reduction of the number, density and total area of bee structures in modified binders. The roughness of samples' surface reveals that the additives increase the surface roughness of the base binder, indicating that the stiffness is improved using the additives. Moreover, the roughness increases with aging in the base binder; however, in modified binders, the aging results in reduction of roughness indices; indicating that the modified binders are less sensitive to aging compared with the base binder.

Keywords: Asphalt Binder, Aging, Atomic Force Microscopy (AFM), Microstructure, Sasobit, Ethylene Vinyl Acetate (EVA), Roughness