

ارزیابی مقاومت شیارشدگی و درجه عملکردی بالای قیر اصلاح شده

با گوگرد پلیمری و نانو رس

مقاله علمی-پژوهشی

رامین شیخ محمدی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر، اهر، ایران

*سعید صبحی (نویسنده مسئول)، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل،

بابل، ایران

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

فریبا کریمیان خسرو شاهی، دانشجو دکترا، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر، اهر، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: saeid.sobhi.civil@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۲

صفحه ۲۱۴-۱۸۹

چکیده

در این پژوهش، با هدف ارتقای رفتار رئولوژیکی قیر در دماهای بالا و افزایش پایداری آن در برابر فرآیند پیرشدگی، از ترکیب گوگرد پلیمری و نانورس به عنوان روش اصلاح قیر استفاده شد. بدین منظور، قیر پایه با درجه نفوذ ۱۰۰-۱۵ ابتدا با ۳۰ درصد وزنی گوگرد پلیمری (محصول تجاری گوگاس) اصلاح گردید و سپس نانو رس‌های مونت‌موریلونیت و بنتونیت در مقادیر ۱، ۲ و ۳ درصد وزنی به قیر اصلاح شده اضافه شدند. ویژگی‌های فیزیکی و رئولوژیکی قیرها از طریق آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی و رئومتر برش دینامیکی در حالت‌های پیرنشده و پیرشده کوتاه‌مدت مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد افزودن گوگاس موجب افزایش قابل توجه سختی قیر پایه و بهبود چشمگیر مقاومت در برابر شیارشدگی ($G^*/\sin \delta$) گردید به طوری که درجه عملکردی بالا (PG) از ۵۸ به ۷۰ ارتقا یافت. هرچند افزودن نانورس‌ها تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقدار PG ایجاد نکرد، اما باعث کاهش شاخص پیرشدگی (AI) و بهبود پایداری رئولوژیکی قیر گوگاسی در برابر اثرات اکسیداسیون کوتاه‌مدت شدند. مقادیر پایین‌تر AI در نمونه‌های حاوی نانورس به‌ویژه نانو مونت‌موریلونیت، نشان‌دهنده کاهش تمایل به سخت‌شدگی و حفظ بهتر ساختار قیر در فرآیند پیرشدگی است. در مجموع، استفاده هم‌زمان از گوگرد پلیمری و نانو رس‌ها می‌تواند رویکردی مؤثر برای بهبود رفتار دمای بالا و افزایش دوام قیر در برابر پیرشدگی کوتاه‌مدت در روسازی‌های آسفالتی محسوب شود.

واژه‌های کلیدی: گوگرد پلیمری (گوگاس)، نانو مونت موریلونیت، نانو بنتونیت، آزمایش رئومتر برش دینامیکی، پیرشدگی کوتاه مدت

۱- مقدمه

بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی مطرح شده است. تاکنون انواع اصلاح‌کننده‌های پلیمری مانند پودر لاستیک، پلیمرهای الاستومری مانند SBR و SBS و افزودنی‌های واکسی برای بهبود خواص قیر استفاده شده‌اند. هرچند برخی پلیمرهای معمول نظیر SBS علی‌رغم بهبود خواص مکانیکی در دمای بالا، مشکلاتی از قبیل مقاومت کم در برابر پیرشدگی و پایداری ذخیره‌سازی ضعیف در قیر ایجاد می‌کنند. به همین دلیل پژوهشگران در سال‌های اخیر به افزودنی‌های جایگزین روی

امروزه بیشتر راه‌های جهان با استفاده از قیر ساخته می‌شوند و عملکرد مطلوب قیر تحت شرایط آب‌وهوایی و بارگذاری متغیر برای دوام روسازی ضروری است. قیر باید در دماهای بالا به اندازه کافی سفت باشد تا در برابر شیارشدگی مقاوم گردد و در دماهای پایین به اندازه کافی منعطف و نرم باقی بماند تا دچار ترک‌خوردگی حرارتی نشود. دستیابی هم‌زمان به این خواص متناقض در قیر خالص دشوار است، از این رو اصلاح قیر با افزودنی‌های گوناگون به عنوان راهکاری برای

در بهبود عملکرد قیر، ایده ترکیب این دو نوع افزودنی مطرح می‌گردد. گوگرد پلیمری می‌تواند نقش سفت‌کنندگی و افزایش مقاومت شیارشدگی را ایفا کند و نانورس‌ها ممکن است با اصلاح رئولوژی، به پایداری و بهبود بیشتر خواص کمک کنند. تاکنون پژوهش‌های کمی به بررسی همزمان اثر گوگرد پلیمری و نانورس بر قیر پرداخته‌اند. ویوک و همکاران (۲۰۲۱) ترکیب گوگرد عنصری و نانو مونت‌موریلونیت را در مخلوط آسفالتی بررسی کرده و گزارش کردند که استفاده توأم ۲ درصد وزنی نانو رس و ۲ درصد گوگرد باعث افزایش چشمگیر مقاومت مارشال (۲/۸ برابر قیر معمولی) و بهبود حساسیت رطوبتی مخلوط شد (vivek et al., 2021). این نتایج، لزوم بررسی اثرات هم‌افزایی احتمالی افزودنی‌های گوگردی و نانو مواد را نشان می‌دهد. بر این اساس، در تحقیق حاضر اثر افزودن مقادیر مختلف نانو مونت‌موریلونیت و نانوبنتونیت بر خواص قیر حاوی درصد ثابت گوگرد پلیمری (گوگاس) مطالعه شده است.

۲- پیشینه تحقیق

در سال‌های اخیر، استفاده از نانومواد در روسازی به‌عنوان رویکردی نوین برای بهبود دوام، مقاومت حرارتی و پایداری عملکردی قیر و مخلوط‌های آسفالتی مورد توجه فراوان قرار گرفته است. در این میان، نانومواد معدنی به‌دلیل نسبت سطح به حجم بسیار بالا به‌عنوان اصلاح‌کننده‌های نوظهور قیر مطرح شده‌اند. نانورس‌ها به ویژه مونت‌موریلونیت و بنتونیت به علت ساختار لایه‌ای منحصر به فرد، امکان تبادل یونی و قابلیت اصلاح شیمیایی، بیشترین کاربرد را در اصلاح پلیمرها و قیر یافته‌اند. نانو مونت‌موریلونیت یک رس از خانواده اسمکتیت با ساختار ۲:۱ (دو لایه سیلیکاتی و یک لایه آلومینایی) است که به دلیل توانایی ارتقای خواص حرارتی و مکانیکی پلیمرها، در سال‌های اخیر برای اصلاح قیر نیز بررسی شده است (Lai et al., 2025). پژوهش‌های مختلف نشان می‌دهند که افزودن درصد کمی از این نانو رس‌ها به قیر می‌تواند موجب افزایش مدول برشی مرکب و ویسکوزیته، بهبود مقاومت در برابر شیارشدگی و خستگی و در نهایت کاهش نفوذپذیری و حساسیت حرارتی قیر شود. بررسی‌های انجام‌شده در سال‌های اخیر نشان می‌دهد که عملکرد نانورس مونت‌موریلونیت در قیر از سه سازوکار اصلی نشأت می‌گیرد. نخست، تشکیل ساختارهای بین‌لایه‌ای و یا اکسفولیاسیون که موجب بهبود مدول برشی مرکب و افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل‌های دائمی می‌گردد. دوم، ایجاد اثر سدکنندگی در مقیاس نانو که با محدودسازی نفوذ اکسیژن و تابش فرابنفش، فرآیند پیرشدگی حرارتی و نوری قیر را کند می‌نماید. سوم، افزایش انرژی آزاد سطحی در فصل مشترک قیر و سنگدانه که سبب ارتقای چسبندگی و کاهش پدیده‌ی عریان‌شدگی می‌شود. در کنار این مزایا، برخی مطالعات گزارش کرده‌اند که نانورس ممکن است اندکی از انعطاف‌پذیری قیر در دماهای پایین بکاهد، اما این اثر با اصلاح سطحی و استفاده‌ی هم‌زمان از سایر افزودنی‌ها قابل

آورده‌اند که بتوانند عملکرد قیر را در هر دو انتهای محدوده دمایی بهبود دهند. یکی از این مواد، گوگرد و ترکیبات گوگردی است که به وفور به‌عنوان محصول جانبی صنایع نفت و گاز در دسترس می‌باشد. استفاده از گوگرد به‌عنوان افزودنی قیر سابقه طولانی دارد، اما شکل عنصری گوگرد مشکلاتی مانند شکنندگی در دماهای پایین و انتشار گازهای مضر در حین اختلاط دارد. برای رفع این نواقص، فناوری گوگردهای پلیمری توسعه یافته است. محصول تجاری گوگاس یک نوع گوگرد پلیمری است که به صورت پودر جامد عرضه شده و به عنوان اصلاح‌کننده یا جایگزین بخشی از قیر به کار می‌رود. تحقیقات نشان داده‌اند که استفاده از گوگرد پلیمری می‌تواند برخی خصوصیات قیر را بهبود ببخشد، از جمله افزایش نقطه نرمی و کاهش حساسیت حرارتی که موجب بهبود مقاومت شیارشدگی در دمای بالا می‌شود. در کنار افزودنی‌های پلیمری، نانومواد به دلیل ابعاد بسیار کوچک و نسبت سطح به حجم بالا، پتانسیل قابل توجهی در اصلاح خواص قیر نشان داده‌اند (Hesami et al., 2025). نانورس‌ها که عمدتاً شامل سیلیکات‌های لایه‌ای نظیر مونت‌موریلونیت و بنتونیت هستند، در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. تحقیقات متعدد حاکی از آن است که افزودن درصد کمی نانو رس به قیر می‌تواند نقطه نرمی را افزایش، درجه نفوذ را کاهش و مدول برشی مرکب را بالا ببرد و بدین ترتیب مقاومت قیر و مخلوط آسفالتی را در برابر شیارشدگی و خستگی حرارتی بهبود بخشد. برای مثال، مطالعات نشان داده‌اند که حضور نانورس در بافت قیر باعث افزایش انسجام و پیوندهای بین مولکولی شده و در نتیجه مقاومت در برابر ترک‌خوردگی را نیز می‌تواند افزایش دهد. مکانیزم بهبود، به ورود زنجیره‌های مولکولی قیر به میان لایه‌های رس (فرآیند میان‌لایه‌ای شدن) و یا حتی پراکندگی کامل صفحات رس در ماتریس قیر (ساختار ورقه‌ورقه) نسبت داده می‌شود. این ساختارهای حاصله با ایجاد برهم‌کنش‌های واندروالسی و هیدروژنی بین نانورس و مولکول‌های قیر، حرکت حرارتی زنجیره‌های قیر را محدود کرده و موجب افزایش مدول الاستیک و کاهش حساسیت به دما می‌شوند (Lai et al., 2025). علاوه بر این، لایه‌های نانورس چون نفوذپذیری اکسیژن را در قیر کاهش می‌دهند می‌توانند روند پیرشدگی قیر را کند کرده و دوام آن را افزایش دهند (Cheraghian & Wistuba, 2020). مونت‌موریلونیت به عنوان یکی از متداول‌ترین انواع نانورس‌ها، در پژوهش‌های متعددی اثرات مثبت بر خواص رئولوژیکی و پایداری حرارتی قیر نشان داده است. در مقابل، بنتونیت که عمدتاً حاوی مونت‌موریلونیت طبیعی است، به علت ماهیت آب‌دوست (هیدروفیلی) به صورت خام سازگاری کمتری با قیر دارد و برای استفاده مؤثر نیازمند فعال‌سازی آلی (ارگانوفیلی) است. با اصلاح بنتونیت از طریق تبادل یونی با مواد فعال سطحی مناسب، سازگاری آن با ماهیت آلی قیر افزایش یافته و می‌تواند بهبود چشمگیری در خواص قیر ایجاد کند (Lai et al., 2025). با توجه به مزایای بالقوه گوگرد پلیمری و نانورس‌ها

در پژوهش Ezzat و همکاران (۲۰۲۰) عملکرد پیش‌بینی‌شده‌ی آسفالت گرم اصلاح‌شده با نانو مونت‌موریلونیت (۳ درصد) و نانوسیلیکا (۷ درصد) تحت شرایط اقلیمی مصر مورد بررسی قرار گرفت. مدل پیش‌بینی مدول دینامیکی نشان داد که مقدار بهینه نانو رس باعث کاهش چشمگیر شیارشدگی و افزایش مقاومت خستگی در لایه‌های آسفالتی می‌شود. شبیه‌سازی‌های انجام‌شده برای مقاطع مختلف راه نیز نشان داد که ترکیب این دو افزودنی منجر به افزایش مقاومت کلی روسازی در برابر بارگذاری سنگین و فرایند پیرشدگی می‌گردد (Ezzat et al., ۲۰۲۰). هم‌زمان، Liu و همکاران (۲۰۱۸) نیز گزارش کردند که افزودن ۳ درصد نانو مونت‌موریلونیت ارگانیک در قیر SBS دار (۱ الی ۵ درصد) موجب تشکیل ساختار بین‌لایه‌ای نانوکامپوزیتی در قیر اصلاح‌شده شد که توسط آزمایش‌های FTIR و XRD تأیید گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که حضور SBS و نانو رس مقاومت ترک‌خوردگی در دماهای میانی را افزایش می‌دهد، سختی خزش در دماهای پایین را کاهش داده و انعطاف‌پذیری را بهبود بخشید و در مقابل، تأثیر نانو مونت‌موریلونیت بر سختی از نظر آماری معنادار نبود و نقش آن بیشتر در پایداری ساختاری و بهبود همگنی فازی قیر اصلاح‌شده ارزیابی شد (Liu et al., ۲۰۱۸). Ren و همکاران (۲۰۲۰) با هدف بهبود پایداری ذخیره‌ای قیرهای پلیمری شامل CRM، SBR و SBS از نانو مونت‌موریلونیت استفاده کردند. نتایج آزمون‌های رئولوژیکی نشان داد که نانو رس تأثیر محدودی بر قیرهای SBR و SBS داشت اما پایداری ذخیره‌ای قیر CRM را به میزان قابل توجهی افزایش داد و منجر به حذف حالت جداشدگی در آن شد. ساختارهای بین‌لایه‌ای حاصل از پخش نانو رس موجب افزایش چگالی فازها و استحکام پیوندهای فیزیکی بدون تغییرات شیمیایی گردید. این ویژگی‌ها مقاومت قیر را در برابر پیرشدگی افزایش داد و جداشدگی فازی را به حداقل رساند (Ren et al., ۲۰۲۰). در پژوهشی مشابه، Ye و همکاران (۲۰۲۰) با ترکیب نانو مونت‌موریلونیت (۳ درصد) و روغن نفتینیک (۵۰ درصد) نشان دادند که ترکیب این دو افزودنی و افزودن آن به قیر SBS، علاوه بر افزایش مقاومت حرارتی و کاهش اکسایش، انعطاف‌پذیری در دماهای پایین را بهبود می‌دهد و موجب توزیع یکنواخت نانو رس‌ها در ماتریس قیر می‌شود. تحلیل میکروسکوپی AFM نیز نشان داد که نانوذرات با محدودسازی ساختارهای زنبوری، مانع از جداشدگی فازی و افزایش ناپایداری در قیر می‌شوند (Ye et al., ۲۰۲۰). در همین راستا، Cheng و همکاران (۲۰۲۱) با تمرکز بر تحلیل ترمودینامیکی، رفتار رئولوژیکی و شیمیایی قیر پایه و قیر اصلاح‌شده با SBS نشان دادند که نانو مونت‌موریلونیت ضمن افزایش مدول دینامیکی، ارتقای خاصیت الاستیک و بهبود چشمگیر مقاومت در برابر شیارشدگی، موجب افزایش کار چسبندگی و بهبود پیوند میان قیر و سنگدانه می‌شود (Cheng et al., ۲۰۲۱). بررسی ترکیب

جبران است. همچنین شواهد اخیر بیانگر آن است که به‌کارگیری نانورس‌ها می‌تواند از میزان انتشار ترکیبات آلی فرار در فرآیند تولید آسفالت کاسته و پایداری زیست‌محیطی مصالح روسازی را افزایش دهد (Lai et al., 2025). در دهه های گذشته، مطالعات متعددی به بررسی نقش نانو رس‌ها در بهبود عملکرد قیر پرداخته‌اند. زارع شاه آبادی و همکاران (۲۰۱۰) نخستین پژوهش جامع در این زمینه را انجام دادند و اثر بتونیت طبیعی و بتونیت آلی شده را بر خواص رئولوژیکی و حرارتی قیر مورد ارزیابی قرار دادند. تحلیل XRD افزایش فاصله لایه‌ای در ساختار سیلیکات‌ها را پس از اصلاح نشان داد که دلالت بر نفوذ قیر در بین لایه‌ها و تشکیل ساختارهای بین‌لایه‌ای و ورقه‌ای داشت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که هر دو نوع بتونیت باعث افزایش مدول برشی مرکب و کاهش زاویه فاز شده‌اند، اما نوع آلی شده با ایجاد ساختار بین‌لایه‌ای پایداری، عملکرد حرارتی و مقاومت ترک‌خوردگی قیر را به شکل چشمگیری ارتقا داده است (Zare-Shahabadi et al., ۲۰۱۰). در همین راستا مطالعات در خصوص رفتار رئولوژیکی و فرآیند پیرشدگی قیر پایه اصلاح‌شده با نانوبتونیت نشان داد که نانو بتونیت با کاهش حساسیت دمایی و کاهش محتوای گروه‌های کربونیل در FTIR، از اکسایش قیر جلوگیری کرده و مدول الاستیک آن را افزایش می‌دهد (Cheraghian & Wistuba, ۲۰۲۰; Paktin et al., ۲۰۲۴). صادق پور و همکاران (۲۰۱۰) با بررسی اثر مونت‌موریلونیت بر قیرهای SBS اصلاح‌شده نشان دادند که حضور نانورس موجب افزایش خواص الاستیک، بهبود پایداری ذخیره‌ای و حذف فاز جداشدگی می‌شود و نتایج آزمایش‌های FTIR و GPC تأیید کردند که این تغییرات عمدتاً ماهیت فیزیکی دارند و نانورس با تقویت انسجام درونی قیر، پایداری حرارتی و مکانیکی آن را افزایش می‌دهد، بدون آن‌که واکنش‌های شیمیایی جدیدی رخ دهد (Galooyak et al., ۲۰۱۰). از سوی دیگر، Zhang و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی اثر نانو مونت‌موریلونیت ارگانیک بر مقاومت پیرشدگی قیر اصلاح‌شده با SBS در برابر تابش فرابنفش پرداختند. نتایج پس از پیرشدگی نشان داد که نانو رس شاخص ویسکوزیته‌ی پیرشدگی را تا ۲۵ درصد کاهش داده و نقطه نرمی قیر را افزایش می‌دهد. تصاویر XRD و AFM تشکیل ساختار بین‌لایه‌ای در قیر را تأیید کردند که این ساختار سبب بهبود چسبندگی داخلی و پایداری فیزیکی قیر شد (Zhang et al., ۲۰۱۲). Filippi و همکاران (۲۰۱۸) در یک مطالعه مروری جامع به بررسی اثر نانو افزودنی‌هایی همچون نانو مونت‌موریلونیت و نانو بتونیت بر مقاومت قیر در برابر پیرشدگی پرداختند. نتایج مطالعات مرور شده نشان داد که این نانو رس‌ها موجب افزایش مقاومت اکسایشی و حفظ ویژگی‌های الاستیک قیر پس از پیرشدگی می‌شوند. مطالعات میکروسکوپی گزارش‌شده در این مرور نشان دادند که ساختارهای نانوکامپوزیتی حاصل از حضور نانو رس، انسجام و پایداری قیر را افزایش داده و در ترکیب با پلیمرها رفتار هم‌افزا از خود نشان می‌دهند (Filippi et al., ۲۰۱۸).

همکاران (۲۰۲۴) ترکیب نانو مونت‌موریلونیت با SBS موجب بهبود مقاومت حرارتی، کاهش تشکیل گروه‌های C=O و S=O و بهبود مقاومت در برابر شیارشدگی به‌ویژه پس از پیرشدگی کوتاه‌مدت و بلندمدت شد (Lu et al., ۲۰۲۴). در همین مسیر، Chen و همکاران (۲۰۲۳) با پیش‌عمل آوری بتونیت و ترکیب آن با قیر حاوی SBS، موفق به دستیابی به قیری با انعطاف پذیری دو برابر قیر پایه شدند. نتایج FTIR کاهش تشکیل گروه‌های کربونیل پس از پیرشدگی و تصاویر میکروسکوپی فلورسانس ایجاد شبکه‌ای پایدار بین ذرات بتونیت و SBS را نشان دادند که این ساختار موجب افزایش پایداری حرارتی و جلوگیری از سخت‌شدگی بیش از حد قیر شد (Chen et al., ۲۰۲۳). همچنین به دنبال توسعه‌ی نانو رس‌های اصلاح‌شده، Hafeez و Qadir (۲۰۲۴) با تبدیل بتونیت سدیمی به نانو رس ارگانوفیلیک (آب‌گریز) از طریق روش آغشته‌سازی، بهبود قابل‌توجهی در پایداری حرارتی، مقاومت اکسایشی و کاهش مقاومت رطوبتی قیر را گزارش کردند. ساختار آب‌گریز نانو رس موجب تشکیل پیوندهای فیزیکی قوی با قیر شد که عملکرد کلی قیر را بهبود بخشید (Qadir & Hafeez, ۲۰۲۴). Albayati و همکاران (۲۰۲۴) نیز با بررسی مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با نانو مونت‌موریلونیت کلسینه گزارش کردند که افزودن ۱۰ درصد نانو رس اصلاحی مقاومت کششی غیرمستقیم را تا ۳۲ درصد افزایش داده و تغییر شکل دائمی را کاهش می‌دهد (Albayati et al., ۲۰۲۴). Amini (۲۰۲۵) در مطالعه‌ای با استفاده از روش طراحی سطح پاسخ (RSM) محدوده‌ی بهینه مصرف نانو رس در قیرهای حاوی SBS را بین ۳/۹ الی ۴/۷ درصد تعیین کرد و نشان داد که این محدوده بهترین تعادل بین رفتار الاستیک، مقاومت خستگی و پایداری حرارتی در برابر پیرشدگی را در قیر اصلاحی فراهم می‌آورد (Amini, ۲۰۲۵). در حالت کلی مرور مطالعات گذشته نشان می‌دهد که استفاده از نانو مونت‌موریلونیت و نانو بتونیت، به‌ویژه در شکل‌های اصلاح‌شده ارگانیکی، با ایجاد ساختارهای بین‌لایه‌ای پایدار در ماتریس قیر، منجر به افزایش پایداری رئولوژیکی، کاهش شدت پیرشدگی و بهبود هم‌زمان خواص حرارتی و مکانیکی می‌شود. همچنین، ترکیب این نانو رس‌ها با افزودنی‌هایی نظیر SBS و گوگرد اثر هم‌افزایی قابل‌توجهی در کاهش اکسایش، تقویت چسبندگی و ارتقای دوام حرارتی و مکانیکی قیر ایجاد می‌کند

۳- هدف از تحقیق

هدف از این تحقیق، بررسی تأثیر توأم گوگرد پلیمری (گوگاس) و نانو رس‌های مونت‌موریلونیت و بتونیت بر خواص رئولوژیکی و درجه عملکردی قیر است. ایده اصلی پژوهش این است که با استفاده از ترکیب یک افزودنی پلیمری سخت‌کننده (گوگاس) با درصد بالا و مقادیر جزئی نانو رس بتوان ضمن دستیابی به بهبود قابل‌توجه عملکرد قیر در دماهای بالا، تا حدی مشکلات مربوط به سختی بیش از حد و

نانو رس با سایر افزودنی‌ها از جمله گوگرد نیز نتایج قابل‌توجهی در بهبود عملکرد قیر اصلاحی را نشان داده است. Vivek و همکاران (۲۰۲۱) با مطالعه اثر هم‌زمان مونت‌موریلونیت و گوگرد در مقادیر مختلف، گزارش کردند که ترکیب حاوی ۲ درصد نانو رس و ۲ درصد گوگرد بالاترین پایداری مارشال و مقاومت رطوبتی ($TSR > 90\%$) را ارائه می‌دهد. نتایج حاکی از آن بود که نانو رس موجب افزایش نقطه نرمی و کاهش نفوذپذیری قیر شده و گوگرد با افزایش الاستیسیته و پایداری حرارتی، عملکرد نهایی را بهبود می‌بخشد. بدین ترتیب، ترکیب این دو افزودنی به شکل مؤثری موجب افزایش دوام حرارتی و مکانیکی قیر گردید (Vivek et al., ۲۰۲۱). Patra و همکاران (۲۰۲۲) نیز اثر نانو مونت‌موریلونیت را در محدوده ۳ تا ۶ درصد وزنی بررسی کرده و دریافتند که افزودن حدود ۴/۵ درصد از این نانوذرات بهترین تعادل میان مقاومت شیارشدگی، پایداری حرارتی و مقاومت خستگی را فراهم می‌آورد (Patra et al., ۲۰۲۳). به موازات این مطالعه، Zhang و همکاران (۲۰۲۲) نیز با بررسی رفتار خستگی و خودترمیمی قیرهای SBS اصلاح‌شده با نانو مونت‌موریلونیت نشان دادند که افزودن بیش از ۳ درصد نانو مونت‌موریلونیت به‌طور قابل‌توجهی مقاومت خستگی و توانایی خودترمیمی قیر را تقویت می‌کند، هرچند اندکی از انعطاف‌پذیری در دماهای پایین کاسته می‌شود (Zhang et al., ۲۰۲۲). در سال‌های اخیر از منظر مقاومت در برابر پیرشدگی، تحقیقات مختلفی نشان داده‌اند که نانو مونت‌موریلونیت نقش مهمی در کاهش سخت‌شدگی ناشی از اکسیداسیون دارد. به عنوان مثال، در پژوهش Li و همکاران (۲۰۲۲)، اثر اصلاح قیر با نانو مونت‌موریلونیت بر مقاومت در برابر پیرشدگی حرارتی و اکسایشی بررسی شد. نتایج آزمایش‌های DSR، FTIR و AFM نشان داد که افزودن ۲ تا ۶ درصد نانو رس موجب کاهش شاخص‌های پیرشدگی، افزایش سختی و بهبود رفتار ویسکوالاستیک قیر به‌ویژه پس از فرآیندهای پیرشدگی کوتاه مدت (RTFO) و بلند مدت (PAV) می‌شود. همچنین تحلیل‌های شیمیایی کاهش محتوای گروه‌های کربونیل و تشکیل ساختار نانوکامپوزیتی پایدار را تأیید کردند که با مسدودسازی مسیرهای نفوذ اکسیژن، از اکسایش جلوگیری کرده و پایداری حرارتی قیر را بدون ایجاد تغییرات شیمیایی محسوس افزایش می‌دهد (Lai et al., ۲۰۲۵). Li et al., (۲۰۲۲) و Monteiro و همکاران (۲۰۲۳) نیز در پژوهش مشابه‌ای نشان دادند که افزودن ۲ و ۴ درصد نانو مونت‌موریلونیت موجب بهبود مقاومت به پیرشدگی کوتاه‌مدت و بلندمدت شده و عملکرد حرارتی و پایداری ذخیره‌ای قیر را ارتقا می‌دهد (Monteiro et al., ۲۰۲۳). در این خصوص نیز Cai و همکاران (۲۰۲۳) با افزودن مونت‌موریلونیت حاوی جاذب‌های UV گزارش کردند که این ترکیب موجب کاهش شاخص‌های پیرشدگی و افزایش مدول برشی مرکب پس از پیرشدگی کوتاه مدت و بلند مدت تابش فرابنفش می‌شود (Cai et al., ۲۰۲۴). در پژوهش Lu و

۴- مواد و مصالح مصرفی

۴-۱- قیر

در این تحقیق با توجه به شرایط آب و هوایی و کارایی مناسب قیر در منطقه، از قیر ۱۰۰-۸۵ پالایشگاه تبریز به عنوان قیر پایه استفاده شد و مشخصات فیزیکی آن در جدول ۱ آورده شده است.

شکنندگی قیر گوگاس را برطرف نمود. در این پژوهش با تهیه قیرهای اصلاح شده شامل ۳۰ درصد گوگرد پلیمری و ۱، ۲ و ۳ درصد نانو رس مونت موریلونیت و نانو رس بنتونیت و انجام آزمایش های درجه نفوذ، نقطه نرمی و رئومتر برش دینامیکی قبل و بعد از پیرشدگی کوتاه مدت، تأثیر این افزودنی ها بر شاخص های عملکردی قیر (شامل پارامتر شیارشدگی $G^*/\sin\delta$ و دمای عملکردی بالا) مورد ارزیابی قرار گرفته است.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی قیر مورد استفاده

نتیجه	استاندارد	نوع آزمایش
۹۲	ASTM D5	درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد (۰/۱ میلیمتر)
۴۷	ASTM D36	نقطه نرمی (درجه سانتی گراد)
>۱۰۰	ASTM D113	شکل پذیری در دمای ۲۵ سانتی گراد (سانتی متر)
۳۰۲	ASTM D92	دمای اشتعال (درجه سانتی گراد)
۱/۰۱۵	ASTM D70	چگالی
۹۹/۸	ASTM D2042	قابلیت حل شدن در تری کلرو اتلین (درصد)

ایجاد می کند. ترکیب آن شامل گوگرد عنصری و افزودنی های بهبود دهنده است و مقدار مصرف پیشنهادی آن ۳۰ تا ۵۰ درصد وزنی قیر می باشد. در این مطالعه از ۳۰ درصد وزنی قیر پایه استفاده گردید و شکل ۱ گرانول های مورد استفاده را نشان می دهد.

۴-۲- گوگرد پلیمری

در این پژوهش از گوگرد پلیمری گوگاس (محصول شرکت زنیط مشهد) برای اصلاح قیر استفاده شد. این افزودنی به صورت گرانول زرد رنگ جامد بوده و در دمای ۱۳۵ تا ۱۴۵ درجه سانتی گراد در قیر حل شده و ساختاری شبیه پلیمر



شکل ۱. گرانول گوگرد پلیمری مورد استفاده

۴-۳- نانو رس

محصول شرکت Sigma-Aldrich بوده و ذرات آن ها به صورت پودر بسیار نرم با اندازه کمتر از ۵۰ نانومتر و خلوص ۹۵ درصد تهیه شده است. هر دوی این نانومواد بدون هیچ

در این پژوهش از دو نوع افزودنی نانو رس با نام های تجاری نانو مونت موریلونیت و نانو بنتونیت با مشخصاتی فیزیکی و شیمیایی طبق جدول ۲ استفاده شده است این نانو رس ها

(کمتر از ۵ درصد) بر خواص قیر صورت گرفته است. شکل ۲ تصویر فیزیکی نانو رس های مورد استفاده در این مطالعه را نشان می دهد.

پیش‌فرآوری اضافی مورد استفاده قرار گرفتند. درصدهای وزنی ۱، ۲ و ۳ درصد وزنی قیر اصلاحی با گوگاس از این دو افزودنی به ترکیب قیر اضافه گردید. انتخاب این مقادیر بر اساس مطالعات گذشته مبنی بر موثر بودن مقادیر کم نانورس



شکل ۲. نانو رس های مورد استفاده، الف) نانو رس مونت موریلونیت و ب) نانو رس بنتونیت

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و شیمیایی نانو رس های مورد استفاده

نوع افزودنی	درصد استفاده	خواص فیزیکی
مونت موریلونیت (Montmorillonite K 10)	۱ و ۲ و ۳٪	حالت فیزیکی: پودر رنگ: سفید تا خاکستری کم‌رنگ سطح ویژه: ۲۷۰-۲۱۰ m ² /gr چگالی: ۳۷۰-۳۰۰ kg/m ³ ضخامت لایه رسی: ۱ نانومتر خلوص (%): ۹۵ درصد
بنتونیت (hydrophilic bentonite)	۱ و ۲ و ۳٪	حالت فیزیکی: پودر رنگ: بژ کم‌رنگ تا قهوه‌ای کم‌رنگ سطح ویژه: ۱۴۰-۶۰ m ² /gr چگالی: ۱۱۰۰-۶۰۰ kg/m ³ ضخامت لایه رسی: ۱ نانومتر خلوص (%): ۹۵ درصد

۴-۴- تهیه قیرهای اصلاح شده

قیر اضافه شد. در طول این فرآیند، به منظور اختلاط یکنواخت، از همزن دور بالا با سرعت ۲۰۰۰ دور بر دقیقه استفاده شد (شکل ۴). پس از اضافه کردن کامل گوگاس، سرعت مخلوط‌کن به ۴۰۰۰ دور بر دقیقه افزایش یافت و عمل اختلاط به مدت ۱۵ دقیقه دیگر در دمای ثابت ۱۴۰ درجه سانتی گراد ادامه یافت تا گوگرد به طور یکنواخت در قیر

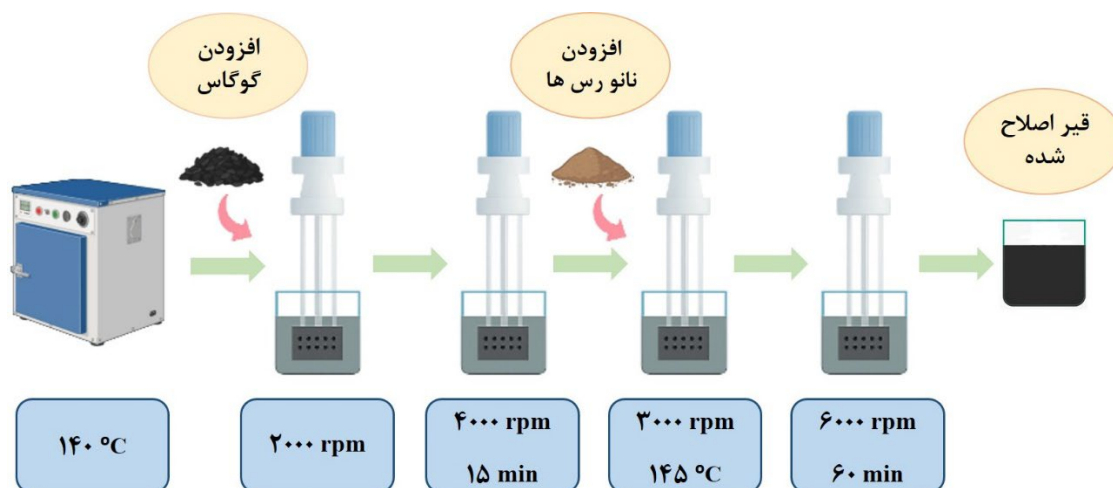
مطابق طرح تحقیق، ۸ نوع نمونه قیر شامل یک نمونه قیر پایه و ۷ نمونه قیر اصلاح شده با درصدهای مختلف افزودنی طبق جدول ۳ تهیه شد. مطابق شکل ۳ برای اختلاط قیر پایه با گوگاس ابتدا قیر پایه تا دمای ۱۴۰ درجه حرارت داده شد تا کاملاً روان شود. سپس در همان دما، مقدار ۳۰ درصد وزنی گوگاس (نسبت به قیر) به تدریج و در طی مدت ۱۵ دقیقه به

۳ درصد وزنی مجموع قیر و گوگاس) به آرامی طی ۵ دقیقه در دمای ۱۴۵ درجه سانتی گراد به هر نمونه اضافه گردید. پس از افزودن کامل نانو رس ها به قیر، سرعت همزن به ۶۰۰۰ دور بر دقیقه افزایش داده شد و اختلاط به مدت ۶۰ دقیقه در همان دمای ۱۴۵ درجه سانتی گراد ادامه یافت تا نانو رس به طور کامل در قیر پخش شده و مخلوطی همگن حاصل شود. شکل ۵ نمونه های قیر اصلاح شده با گوگاس و نانو رس ها را نشان می دهد.

پخش شود. پس از اصلاح کامل قیر با افزودنی گوگاس، جهت تهیه نمونه های حاوی نانو رس، مجدداً نمونه قیر گوگاس جامد شده حرارت داده شد تا روان گردد. سپس این قیر اصلاح شده براساس ترکیب های مختلف مطالعه (قیر گوگاس دار و شش ترکیب حاوی نانو مواد طبق جدول ۳) توسط همزن دور بالا در دمای ۱۴۵، با سرعت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه مخلوط شدند. برای تهیه قیر حاوی نانو رس مقدار از پیش تعیین شده نانو مونت موریلونیت و نانو بنتونیت (۱، ۲ و

جدول ۳. مقدار قیر و درصد های مختلف افزودنی مورد استفاده

کد مشخصه قیر	درصد افزودنی نانو رس مونت موریلونیت	درصد افزودنی نانو رس بنتونیت	درصد افزودنی گوگاس	نوع قیر اصلاحی
B	۰	۰	۰	B
۳۰ G	۰	۰	۳۰	B - %30G
۳۰ G + ۱ NCM	۱	۰		B - %30G - %1NCM
۳۰ G + ۲ NCM	۲	۰		B - %30G - %2NCM
۳۰ G + ۳ NCM	۳	۰		B - %30G - %3NCM
۳۰ G + ۱ NCB	۰	۱		B - %30G - %1NCB
۳۰ G + ۲ NCB	۰	۲		B - %30G - %2NCB
۳۰ G + ۳ NCB	۰	۳		B - %30G - %3NCB
NCB: نانو رس بنتونیت NCM: نانو رس مونت موریلونیت G: گوگرد پلیمری (گوگاس)				B: قیر پایه



شکل ۳. مراحل تهیه قیر های اصلاح شده



شکل ۴. دستگاه همزن دور بالا مورد استفاده در این تحقیق



شکل ۵. قیرهای اصلاح شده با افزودنی‌های نانو رس

انجام شد. آزمون DSR روی قیرهای اصلی و RTFO شده با استفاده از صفحات موازی ۲۵ میلی‌متری در فاصله ۱ میلی‌متر و فرکانس بارگذاری ۱۰ رادیان بر ثانیه انجام گردید. در هر آزمایش، مدول برشی مرکب G^* و زاویه فاز δ در چندین دمای متوالی (۵۲، ۵۸، ۶۴، ۷۰ و ۷۶ درجه سانتی‌گراد) اندازه‌گیری شد تا محدوده عملکردی تعیین گردد. بر اساس ضوابط درجه‌بندی عملکردی (PG)، برای آنکه قیر به عنوان مثلاً PG 64-xx محسوب شود باید در حالت اصلی مقدار $G^*/\sin\delta$ در دمای ۶۴ درجه سانتی‌گراد حداقل ۱ کیلوگرم بر ساعت ۱ و پس از RTFO مقدار $G^*/\sin\delta$ در همان دما حداقل ۲/۲ کیلوپاسکال باشد. بدین ترتیب بالاترین دمایی که هر نمونه قیر توانست این معیارها را برآورده کند به عنوان دمای عملکردی بالای قیر آن در نظر گرفته شد. به علاوه، برای مقایسه رفتار الاستیک قیرها، تغییرات زاویه فاز با دما و میزان افزودنی بررسی گردید.

برنامه آزمایشگاهی

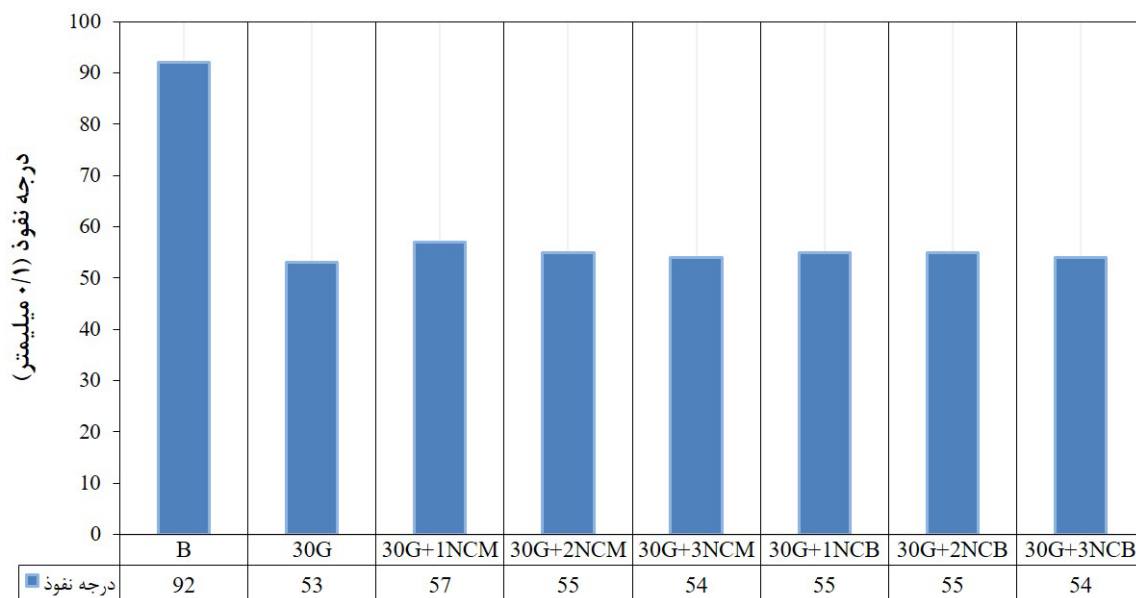
برای تعیین خصوصیات فیزیکی و رئولوژیکی قیرهای پایه و اصلاح‌شده گوگاس حاوی نانو رس، آزمایش‌های کلاسیک قیر از جمله آزمایش درجه نفوذ مطابق استاندارد ASTM D5 در دمای 25°C (بار ۱۰۰ گرم، ۵ ثانیه) و آزمایش نقطه نرمی با روش استاندارد ASTM D36 (حلقه و گلوله) انجام گرفت. همچنین به منظور ارزیابی تاثیر افزودنی گوگاس و پودر نانو رس‌ها بر روی حساسیت حرارتی قیرهای مورد آزمایش شاخص نفوذ مورد محاسبه قرار گرفت. در ادامه به منظور ارزیابی معیار شیارشدگی و همچنین عملکرد دمای بالای قیر، آزمایش رئومتر برش دینامیکی بر اساس استاندارد ASTM D7175 بر روی نمونه‌ها در دو حالت قیر پیرنشده (اصلی) و قیر پیرشده کوتاه‌مدت آزمایش شد. پیرشدگی کوتاه‌مدت قیرها با دستگاه اون‌لایه نازک متحرک طبق استاندارد D2872 ASTM (دمای 163°C درجه سانتی‌گراد به مدت ۸۵ دقیقه)

نتایج آزمایش‌ها

آزمایش‌های کلاسیک قیر

بررسی نتایج آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی و شاخص نفوذپذیری نشان داد که اصلاح قیر پایه با گویگرد پلیمری (گوگاس) و نانورس‌ها، تغییرات ساختاری قابل ملاحظه‌ای در رفتار قیر ایجاد نموده است. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود افزودن گویگرد پلیمری (۳۰ درصد وزنی) تاثیر بسیار محسوسی بر درجه نفوذ قیر داشت و درجه نفوذ قیر پایه از حدود ۹۲ به ۵۳ واحد کاهش یافت که می‌تواند ناشی از افزایش فاز آسفالتن و کاهش سهم مالتین‌ها در اثر پلیمریزاسیون گویگرد و یا تشکیل شبکه پلیمری گویگرد در بافت قیر باشد. نتایج حاکی از آن است که افزودن نانورس‌ها به قیر گویگرد تا حدی این کاهش درجه نفوذ را جبران کرده و در ترکیب‌های حاوی گویگرد پلیمری، اضافه کردن ۱ درصد نانو مونت‌موریلونیت درجه نفوذ را از ۵۳ به ۵۷ افزایش داده و ۲ درصد نانورس درجه نفوذ قیر را به ۵۵ رساند. حتی با افزودن ۳ درصد نانو مونت‌موریلونیت درجه نفوذ نسبت به قیر ۳۰G اندکی بالا رفته (از ۵۳ به ۵۴) که این موضوع نشان می‌دهد حضور مقدار زیاد نانوذرات رس باعث نرم‌تر شدن نسبی قیر گویردی شده است. این رفتار احتمالاً به این علت است که ذرات نانو رس با جذب اجزای سبک قیر از تشکیل

کامل شبکه سه‌بعدی گویگرد جلوگیری کرده و بخشی از سختی ناشی از گویگرد را خشتی می‌کنند. البته همان‌طور که مطابق شکل ۶ مشاهده می‌شود تغییرات درجه نفوذ با ۲ و ۳ درصد نانورس بسیار جزئی بوده و چندان قابل توجه نیست و بیشترین بهبود درجه نفوذ مربوط به مقدار کم یعنی ۱ درصد نانو ماده است. مشابه این رفتار در مطالعات Albayati و همکاران (۲۰۲۴) و Li و همکاران (۲۰۲۲) نیز گزارش شده است که استفاده از نانو مونت‌موریلونیت باعث کاهش جزئی در مقدار درجه نفوذ و افزایش سختی قیر گردید (Albayati et al., ۲۰۲۴). جهت بررسی و تحلیلی تفاوت معنی دار نمونه‌های اصلاح شده با افزودنی‌ها نانورس در مقایسه با قیر پایه از آزمون t زوجی استفاده شد. مطابق جدول ۴ نتایج آزمون t نشان داد که برای تمامی قیرهای اصلاح شده مقادیر P بسیار کمتر از ۰/۰۵ بوده که این موضوع حاکی از معنادار بودن کاهش درجه نفوذ در سطح اطمینان ۹۵ درصد است. به عنوان مثال، برای قیر حاکی گوگاس مقدار t برابر ۳۹ و مقدار p برابر ۰/۰۰۰۶۵ بدست آمد که نشان دهنده تغییرات کاملاً معنادار از نظر آماری است



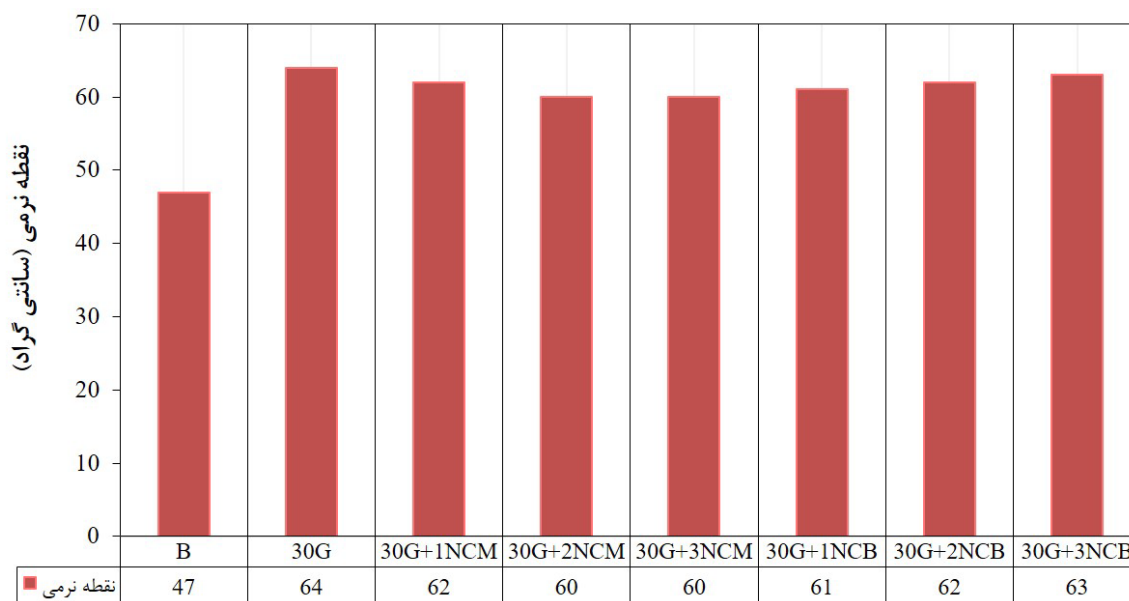
شکل ۶. مقدار درجه نفوذ نمونه‌های قیر

جدول ۴. نتایج آزمون t مقادیر آزمایش درجه نفوذ نمونه های اصلاحی نسبت به قیر پایه

فاصله اطمینان ۹۵ درصد برای اختلاف	p-value	t	خطای استاندارد	انحراف معیار	میانگین اختلاف	نوع قیر
۳۴/۶۹۷۳۴	۰/۰۰۰۶۵	۳۹	۱	۱/۷۳۲۰۵	۳۹	۲۰ G
۳۰/۶۹۷۳۴	۰/۰۰۰۸۱	۳۵	۱	۱/۷۳۲۰۵	۳۵	۲۰ G + ۱ NCM
۳۴/۵۱۵۸۶	۰/۰۰۰۲۴	۶۴/۰۸۵۸۷	۰/۵۷۷۳۵	۱	۳۷	۲۰ G + ۲ NCM
۳۱/۴۲۷۵۸	۰/۰۰۱۶۱	۲۴/۸۷۶۸۳	۱/۵۲۷۵۲	۲/۶۴۵۷۵	۳۸	۲۰ G + ۳ NCM
۳۰/۴۲۷۵۸	۰/۰۰۱۷۰	۲۴/۲۲۲۱۸	۱/۵۲۷۵۲	۲/۶۴۵۷۵	۳۷	۲۰ G + ۱ NCB
۲۸/۳۹۴۶۹	۰/۰۰۲۹۰	۱۸/۵	۲	۳/۴۶۴۱۰	۳۷	۲۰ G + ۲ NCB
۳۱/۴۲۷۵۸	۰/۰۰۱۶۱	۲۴/۸۷۶۸۳	۱/۵۲۷۵۲	۲/۶۴۵۷۵	۳۸	۲۰ G + ۳ NCB

طور کلی تأثیر کمتری نسبت به مونت موریلونیت داشت و کاهش چشمگیری ایجاد نکرد. این نتایج تأیید می‌کند که اضافه کردن نانو رس به قیر گوگردی موجب اندکی نرم‌تر شدن قیر در دماهای بالا می‌شود. علت این امر را می‌توان چنین توجیه کرد که نانو رس‌ها برخلاف گوگرد، خود ماهیت سفت‌کننده قوی ندارند و حتی ممکن است به دلیل ماهیت معدنی و پخش در فاز قیر، اندکی خاصیت نرم‌کنندگی از خود نشان دهند. به طور کلی، می‌توان گفت که ترکیب ۳۰ درصد گوگرد پلیمری با درصد کمی نانو رس توانست بدون افت چشمگیر نقطه نرمی، قیر را نسبت به حالت قیر گوگردی کمی نرم‌تر نماید. این یافته‌ها با گزارش‌های چن و همکاران (۲۰۲۳) همخوانی دارد که مشاهده کردند افزودن نانو رس بتونیت به قیر اصلاح‌شده SBS، علی‌رغم بهبود مدول، کمی از افزایش بیش از حد سختی قیر کاسته و انعطاف‌پذیری آن را افزایش داد (Chen et al., ۲۰۲۳). نتایج آزمون t زوجی مطابق جدول ۵ نشان می‌دهد که افزایش نقطه نرمی در تمامی قیرهای اصلاح‌شده نسبت به قیر پایه از نظر آماری معنادار است ($p < 0.01$). میانگین اختلاف بین ۱۳ تا ۱۷ درجه بوده و بازه اطمینان ۹۵ درصد کاملاً در ناحیه منفی قرار گرفت که به‌طور قطعی نشان می‌دهد افزودنی گوگاس و نانورس‌ها موجب افزایش قابل توجه نقطه نرمی و بهبود عملکرد دمای بالا شده‌اند.

مطابق شکل ۷ افزودن گوگرد پلیمری باعث افزایش بسیار زیاد نقطه نرمی قیر شد به طوری که نقطه نرمی قیر حاوی ۳۰٪ گوگاس به ۶۴ درجه سانتی‌گراد رسید. این افزایش حدود ۱۷ درجه‌ای نشان‌دهنده کاهش حساسیت حرارتی قیر و بهبود عملکرد آن در دماهای بالا است. با افزودن نانو مواد به قیر حاوی گوگرد پلیمری، تغییرات جالبی در نقطه نرمی مشاهده شد. برخلاف اثر شدید گوگاس، اثر نانورس‌ها بر نقطه نرمی نسبتاً جزئی بود. به طور کلی حضور نانورس‌ها کمی از نقطه نرمی قیر گوگاس‌دار را کاهش داده و قیر را اندکی نرم‌تر کرد. در قیر حاوی ۱ درصد نانو مونت‌موریلونیت، نقطه نرمی ۶۲ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد که ۲ درجه کمتر از قیر گوگاس‌دار بود. در نمونه‌های حاوی ۲ و ۳ درصد مونت‌موریلونیت، نقطه نرمی به 60°C کاهش یافت و این بدین معناست که مونت‌موریلونیت توانسته است نقطه نرمی قیر بسیار سخت‌شده را تا ۴ درجه کاهش دهد و این کاهش در نمونه‌های حاوی بیش از ۲ درصد نانو مواد مونت‌موریلونیت ثابت است. در نمونه‌های حاوی بتونیت، کاهش نقطه نرمی کمتر بوده، به عنوان مثال ۱ درصد بتونیت نقطه نرمی را ۳ درجه کاهش داده و به ۶۱ درجه رساند و نمونه‌های حاوی ۲ و ۳ درصد بتونیت به ترتیب نقطه نرمی را ۶۲ درجه (کاهش ۲ درجه سانتی‌گراد) و ۶۳ درجه (کاهش تنها ۱ درجه سانتی‌گراد) نشان دادند. روند بتونیت قدری متفاوت و غیر یکنواخت بود، ولی به



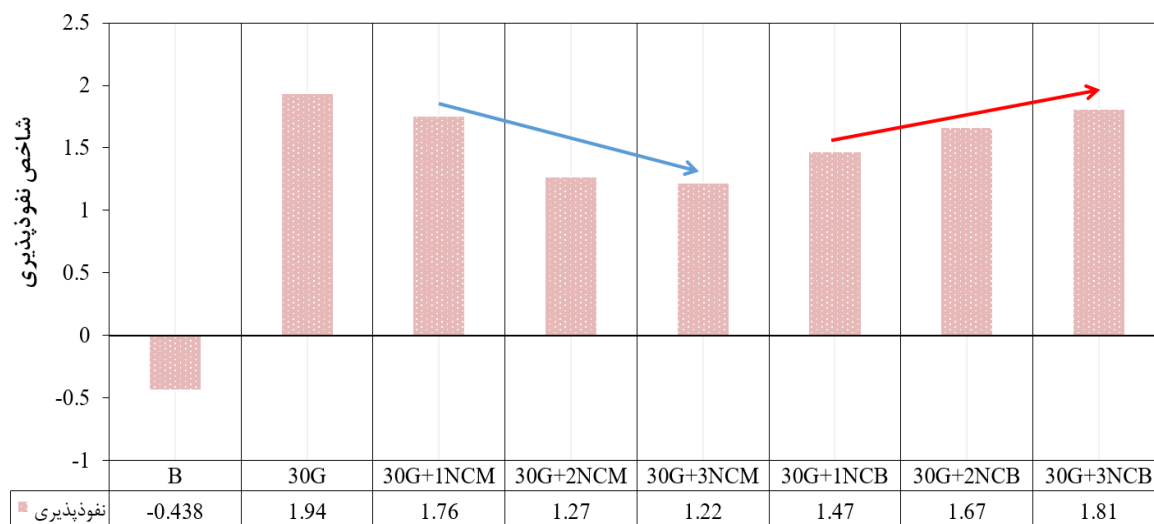
شکل ۷. مقدار نقطه نرمی نمونه‌های قیر

جدول ۵. نتایج آزمون t مقادیر آزمایش نقطه نرمی نمونه‌های اصلاحی نسبت به قیر پایه

فاصله اطمینان ۹۵ درصد برای اختلاف	p-value	t	خطای استاندارد	انحراف معیار	میانگین اختلاف	نوع قیر
	۰/۰۰۴۵۸	-۱۴/۷۲۲۴۳	۱/۱۵۴۷۰	۲	-۱۷	۳۰ G
	۰/۰۰۵۸۷	-۱۲/۹۹۰۳۸	۱/۱۵۴۷۰	۲	-۱۵	۳۰ G + ۱ NCM
	۰/۰۰۵۸۶	-۱۳	۱	۱/۷۳۲۰۵	-۱۳	۳۰ G + ۲ NCM
	۰/۰۰۵۸۶	-۱۳	۱	۱/۷۳۲۰۵	-۱۳	۳۰ G + ۲ NCM
	۰/۰۰۵۰۶	-۱۳	۱	۱/۷۳۲۰۵	-۱۴	۳۰ G + ۱ NCB
	۰/۰۰۵۸۷	-۱۲/۹۹۰۳۸	۱/۱۵۴۷۰	۲	-۱۵	۳۰ G + ۲ NCB
	۰/۰۰۸۹۹	-۱۰/۴۷۴۴۵	۱/۵۲۷۵۲	۲/۶۴۵۷۵	-۱۶	۳۰ G + ۳ NCB

در تعدیل سختی گوگاس را نشان می‌دهد. در مقابل، نانو بنتونیت با افزایش درصد از ۱ تا ۳ درصد موجب رشد PI از ۱/۴۷ به ۱/۸۱ شد؛ روندی که با افزایش نقطه نرمی و کاهش نفوذ مطابقت داشته و بیانگر بازگردانی سختی قیر اصلاح شده است. در مجموع، مونت‌موریلونیت خاصیت نرم‌کنندگی ملایم‌تری ایجاد کرده، درحالی‌که بنتونیت در مقادیر بالاتر موجب تقویت مجدد سختی و پایداری حرارتی گردیده است.

با توجه به نتایج درجه نفوذ و نقطه نرمی، بررسی شاخص نفوذپذیری (PI) مطابق شکل ۸ نشان داد قیر پایه با مقدار $-۰/۴۳۸$ حساسیت حرارتی بالایی دارد، درحالی‌که افزودن ۳۰ درصد گوگاس آن را به $۱/۹۴$ رسانده و پایداری حرارتی را به‌طور محسوسی افزایش داده است. در ترکیبات حاوی نانو مونت‌موریلونیت، افزایش درصد نانو از ۱ تا ۳ درصد باعث کاهش PI از $۱/۷۶$ به $۱/۲۲$ شد که همسو با افزایش جزئی نفوذ و کاهش نقطه نرمی بوده و نقش این نانو ذره



شکل ۸ مقدار شاخص نفوذپذیری نمونه های قیر

آزمایش رئومتر برشی دینامیکی

رفتار رئولوژیکی قبل از پیرشدگی کوتاه مدت

حاوی ۱ درصد، مقدار G^* در دمای ۶۴ درجه سانتی گراد حدود ۲/۰۵ کیلوپاسکال و کمتر از قیر گوگردی بود. اما در نمونه ۳ درصد مقدار آن به ۲/۶۲ کیلوپاسکال رسید که نسبت به نمونه حاوی گوگاس افزایش اندکی داشت. این امر نشان می‌دهد که درصدهای پایین (۱ درصد) نانو مونت موریلونیت بخشی از سختی گوگرد را کاهش می‌دهند، ولی در مقابل آن در درصدهای بالاتر به دلیل ایجاد برهم‌کنش قوی‌تر با ماتریس قیر، موجب افزایش سختی قیر می‌شوند. این روند همخوانی کامل با مطالعه Monteiro و همکاران (۲۰۲۳) دارد و در آن افزایش G^* و بهبود مقاومت شیارشدگی گزارش شده است (Monteiro et al., ۲۰۲۳). نمونه‌های حاوی نانو بتونیت اثر افزایشی منظم‌تری را نسبت به مونت موریلونیت نشان دادند. به عنوان مثال مقدار مدول برشی مرکب در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد برای نمونه‌های حاوی ۱ تا ۳ درصد نانو به ترتیب به ۱/۳، ۱/۴۷ و ۱/۷ کیلو پاسکال رسید. این یافته با گزارش Chen و همکاران (۲۰۲۳) همخوانی دارد که بتونیت را به‌عنوان یک پرکننده معدنی با نقش تقویتی یکنواخت معرفی کرده‌اند (Chen et al., 2023).

جهت بررسی تاثیر افزودنی‌های نانو رس و گوگاس بر رفتار ویسکو الاستیک قیر، سه شاخص کلیدی شامل مدول برشی مرکب (G^*)، زاویه فاز (δ) و پارامتر شیارشدگی ($G^*/\sin\delta$) در فرکانس ۱۰ رادیان بر ثانیه و در دماهای ۵۲، ۵۸، ۶۴، ۷۰ و ۷۶ درجه سانتی‌گراد بررسی گردیدند. جدول ۴ و شکل ۹ تغییرات مدول برشی مرکب قیر پایه و قیرهای اصلاح شده با گوگاس و نانو مواد را نشان می‌دهد. نتایج آزمایش نشان داد که مدول برشی مرکب قیر پایه با افزایش دما کاهش شدیدی دارد، به‌طوری که در دمای ۶۴ درجه سانتی‌گراد مقدار آن کمتر از ۱ کیلوپاسکال بوده و افزودن ۳۰ درصد گوگرد پلیمری در همان دما این مقدار را به حدود ۲/۶ کیلوپاسکال رساند. این افزایش بیش از ۲/۵ برابر نشان‌دهنده اثر قوی گوگرد در تشکیل شبکه‌های پلیمری از طریق ایجاد اتصالات پایدار S-S و C-S بین مولکول‌های قیر و محدودسازی حرکت اجزای سبک قیر است موضوعی که شکیب و همکاران (۲۰۲۱) نیز گزارش کردند و آن را عامل اصلی افزایش مقاومت برشی در قیرهای گوگردی دانستند (Hashami et al., ۲۰۲۵; Sakib et al., ۲۰۲۱). افزودن نانو مونت‌موریلونیت تغییرات جالبی در مقدار مدول برشی مرکب قیر ایجاد کرد، به طوری که در نمونه

جدول ۴. پارامتر شیارشدگی نمونه‌های قیری قبل از پیرشدگی

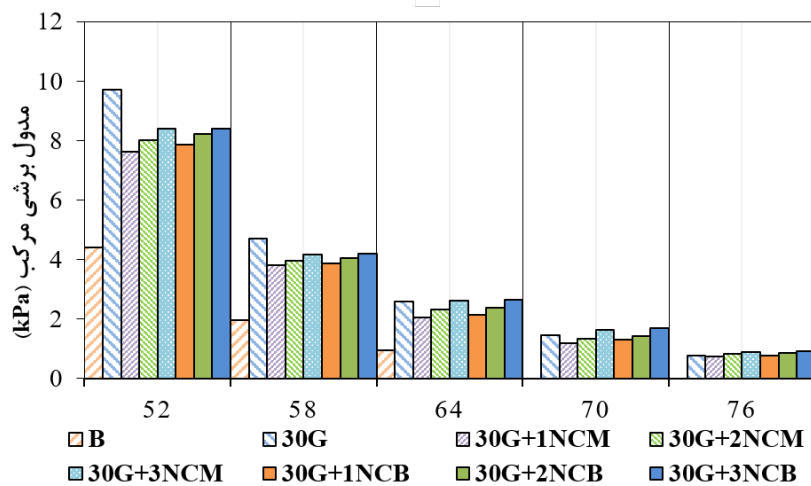
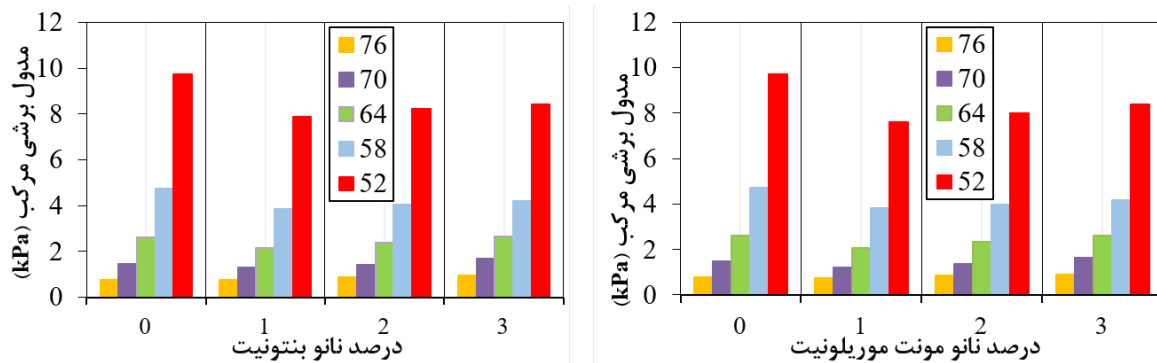
نوع قیر اصلاحی	دمای آزمایش (درجه سانتی‌گراد)	بالاترین دمای عملکردی					
		۵۲	۵۸	۶۴	۷۰	۷۶	
B	G* (kPa)	۴/۴۱	۱/۹۸	۰/۹۶	-	-	۵۸
	Δ	۷۹/۷۸	۷۹/۹	۷۹/۷	-	-	
	G*/sin δ	۴/۵۰	۲/۰۱	۰/۹۷۵	-	-	
۳۰G	G* (kPa)	۹/۷۱	۴/۷۲	۲/۶۰	۱/۴۶	۰/۷۷	۷۰
	Δ	۶۹/۱	۷۰/۶	۷۲/۱	۷۳/۲	۷۴/۹	
	G*/sin δ	۱۰/۴	۵/۰۱	۲/۷۴	۱/۵۳	۰/۸۰	
۳۰G+۱NCM	G* (kPa)	۷/۶۲	۳/۸۲	۲/۰۵	۱/۱۹	۰/۷۴	۷۰
	Δ	۷۱/۲	۷۳/۹	۷۴/۷	۷۵/۴	۷۶/۳	
	G*/sin δ	۸/۰۶	۳/۹۸	۲/۱۳	۱/۲۴	۰/۷۶	
۳۰G+۲NCM	G* (kPa)	۸/۰۱	۳/۹۷	۲/۳۳	۱/۳۵	۰/۸۴	۷۰
	Δ	۶۹/۹	۷۱/۶	۷۲/۳	۷۳/۷	۷۴/۱	
	G*/sin δ	۸/۵۳	۴/۱۹	۲/۴۵	۱/۴۱	۰/۸۸	
۳۰G+۳NCM	G* (kPa)	۸/۴۰	۴/۱۸	۲/۶۲	۱/۶۴	۰/۹۰	۷۰
	Δ	۶۹/۳	۷۰/۹	۷۱/۵	۷۲/۴	۷۳/۹	
	G*/sin δ	۸/۹۸	۴/۴۳	۲/۷۶	۱/۷۲	۰/۹۴	
۳۰G+۱NCB	G* (kPa)	۷/۸۸	۳/۸۶	۲/۱۵	۱/۳۰	۰/۷۶	۷۰
	Δ	۷۱/۱	۷۲/۸	۷۴/۲	۷۵	۷۵/۹	
	G*/sin δ	۸/۳۳	۴/۰۵	۲/۲۴	۱/۳۵	۰/۷۹	
۳۰G+۲NCB	G* (kPa)	۸/۲۳	۴/۰۵	۲/۳۹	۱/۴۲	۰/۸۶	۷۰
	Δ	۶۹/۶	۷۱/۲	۷۱/۹	۷۲/۸	۷۳/۴	
	G*/sin δ	۸/۷۸	۴/۲۸	۲/۵۲	۱/۴۹	۰/۹۰	
۳۰G+۳NCB	G* (kPa)	۸/۴۰	۴/۲۰	۲/۶۵	۱/۷۰	۰/۹۳	۷۰
	Δ	۶۸/۹	۷۰/۱	۷۰/۸	۷۱/۵	۷۲/۷	
	G*/sin δ	۹/۰۱	۴/۴۷	۲/۸۱	۱/۷۹	۰/۹۸	

شیارشدگی مطلوب است، زیرا قیری که رفتار الاستیک دارد تحت بارگذاری تغییرشکل کمتری داده و پس از برداشتن بار بیشتر به حالت اولیه برمی‌گردد. با افزودن نانورس‌ها تغییرات جزئی در زاویه فاز مشاهده شد و روند کاهش شدید زاویه فازی کمتر شد. در قیر حاوی گوگاس، افزودن ۱ درصد نانورس (مونت‌موریلونیت و بنتونیت) موجب افزایش مختصر زاویه فازی در محدوده دماهای آزمایش شد، در حالی که افزودن ۳ درصد نانورس باعث کاهش دوباره زاویه فازی گردید. به عنوان مثال در دمای ۶۴ درجه سانتی‌گراد با افزودن ۱ درصد نانورس مونت‌موریلونیت زاویه فازی قیر از حدود ۷۲/۱ درجه سانتی‌گراد به مقدار

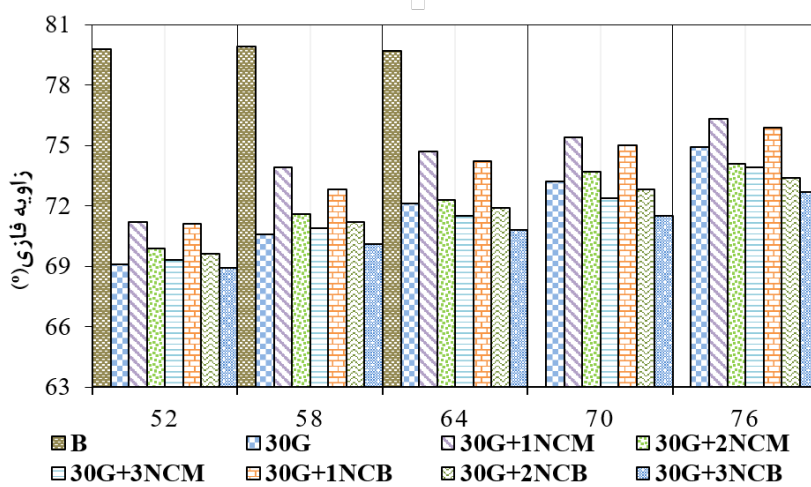
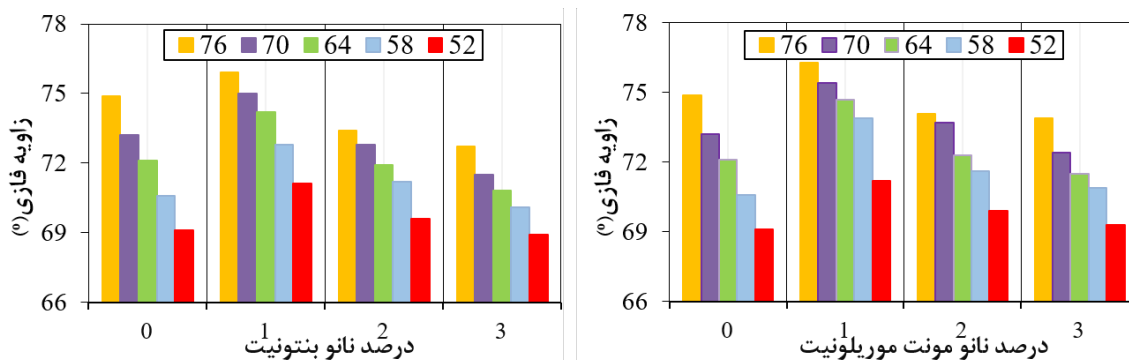
نتایج مرتبط با زاویه فازی مطابق جدول ۴ و شکل ۱۰ نشان داد که این پارامتر در قیر پایه در دماهای بالا نسبتاً بزرگ بود که نشان‌دهنده ماهیت غالباً ویسکوز قیر خالص در آن دما است. افزودن گوگرد پلیمری به قیر پایه باعث کاهش قابل توجه زاویه فازی در تمام دماهای آزمایش شد، به عنوان مثال در دمای ۶۴ درجه سانتی‌گراد زاویه فازی قیر پایه حدود ۷۹/۷ درجه سانتی‌گراد بود در حالی که برای قیر حاوی گوگاس به حدود ۷۲/۱ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت. کاهش زاویه فازی بدان معناست که جزء الاستیک در رفتار قیر غالب‌تر شده و قیر رفتاری جامدتر و الاستیک‌تر پیدا کرده است. این موضوع از منظر مقاومت

عملکردی بالای قیر را از ۵۸ به ۷۰ ارتقا داده است. به عنوان نمونه، در دمای ۶۴ درجه سانتی‌گراد مقدار $G^*/\sin\delta$ قیر پایه تنها ۰/۹۸ کیلوپاسکال بوده در حالی که این مقدار در قیر حاوی ۳۰٪ گوگاس به مقدار ۲/۷۴ کیلوپاسکال رسید که بیانگر بیش از دو برابر افزایش مقاومت قیر اصلاحی در برابر شیارشدگی است. با افزودن نانو مونت‌موریلونیت مشاهده شد که تغییرات پارامتر شیارشدگی وابسته به درصد افزودنی نانو است، به طوری که در ترکیب ۱٪ نانو مقدار شاخص مقاومت در برابر شیارشدگی در دمای ۶۴ درجه سانتی‌گراد به ۲/۱۳ کیلوپاسکال کاهش یافت اما در درصدهای بالاتر مجدداً روند افزایشی داشته و در نمونه‌های حاوی ۳٪ به مقدار ۲/۷۶ کیلوپاسکال رسید. این امر نشان‌دهنده نقش کاهندگی مونت‌موریلونیت در درصدهای پایین و اثر تقویتی آن در مقادیر بالاتر است (Zhang et al., 2022). در مقابل، نانو بتونیت رفتاری یکنواخت‌تر نشان داد و مقدار $G^*/\sin\delta$ در در دمای ۶۴ درجه سانتی‌گراد با افزایش درصد ۱ تا ۳ از ۲/۲۴ به ۲/۸۱ کیلوپاسکال رسید و همچنین در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد از ۱/۳۵ به مقدار ۱/۷۹ کیلوپاسکال افزایش یافت. این روند در دماهای دیگر نیز تداوم داشت و موجب شد نمونه‌های بتونیتی پایداری حرارتی مناسبی را ارائه دهند (Qadir & Hafeez, 2024). در حالت کلی می‌توان گفت که نتایج این آزمایش با گزارش‌های مطالعات Monteiro, Chen و Zhang و همکاران هم‌راستا بوده و نشان می‌دهد انتخاب نوع و مقدار نانورس می‌تواند مسیر متفاوتی برای اصلاح رئولوژیکی قیر ایجاد کند (Chen et al., 2023; Monteiro et al., 2023; Zhang et al., 2022).

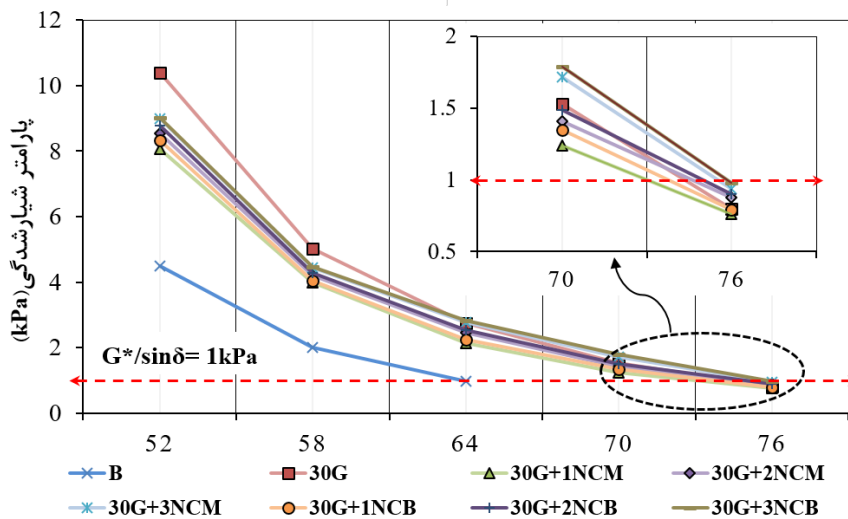
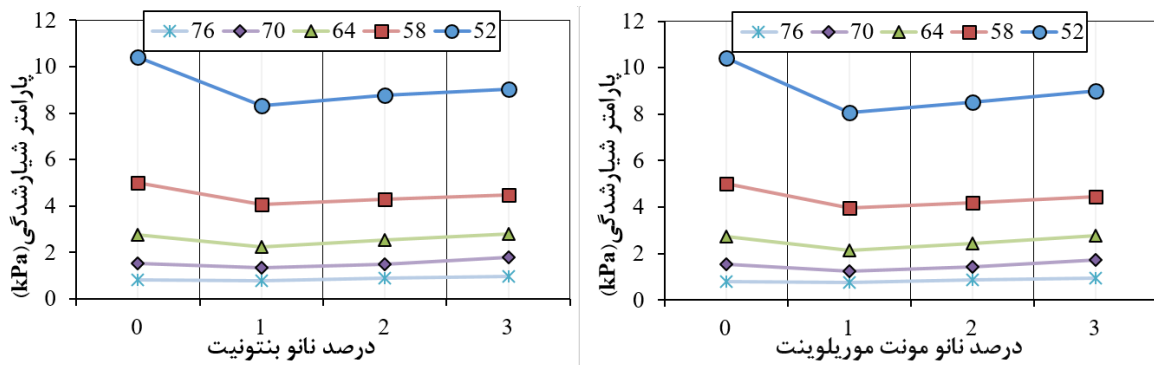
۷۴/۷ درجه سانتی‌گراد رسید و در واقع این امر نشان می‌دهد که مقدار کم نانورس‌ها، رفتار قیر را کمی از حالت الاستیک خالص به سمت ویسکوز بر می‌گرداند. با افزایش درصد نانورس به ۲ و ۳ درصد، مجدداً زاویه فازی کاهش یافته و به نزدیک به زاویه فازی قیر گوگردی می‌شود. به عنوان مثال در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد مقدار زاویه فازی در نمونه حاوی گوگاس برابر ۷۳/۲ درجه بوده که با افزودن ۲ درصد نانو رس مونت‌موریلونیت و بتونیت به ترتیب به ۷۲/۸، ۷۳/۷، ۷۲/۸ درجه سانتی‌گراد کاهش پیدا می‌کند و علت این رفتار آن است که در درصدهای بالاتر، ذرات نانورس درون قیر ممکن است مجدداً با یکدیگر تجمع کرده و به صورت مؤثر در اصلاح رفتار قیر مشارکت نکنند. بنابراین از دیدگاه رفتار ویسکوالاستیک خطی، ترکیب قیر گوگردی با مقدار کمی نانورس می‌تواند قیر را مقداری کم الاستیک (یعنی ویسکوزتر) کرده و تعادل بهتری میان سختی و انعطاف‌پذیری قیر ایجاد نماید، اما مقادیر زیاد نانو رس ممکن است این مزیت را خنثی کند. مشابه این نتایج در مطالعه Liu و همکاران (۲۰۱۸) گزارش شده است که نشان می‌دهد کاهش زاویه فازی به علت حضور نانو رس نشانه‌ای از بهبود مقاومت خستگی و افزایش رفتار شبه جامد در قیر است (Liu et al., 2018). جهت بررسی شاخص شیارشدگی مطابق استاندارد این پارامتر برای قیرهای پیر نشده مقدار $G^*/\sin\delta$ باید بزرگتر یا مساوی یک کیلو پاسکال و برای قیرهای پیر شده از آزمایش RTFO باید این مقدار برابر ۲/۲ کیلو پاسکال باشد همانطور که در جدول ۴ و شکل ۱۱ دیده می‌شود، با افزودن ۳۰٪ گوگرد پلیمری به قیر پایه، شاخص شیارشدگی به‌طور چشمگیری افزایش یافته و درجه



شکل ۹. مدول برشی مرکب نمونه‌های قیر قبل از پیرشدگی



شکل ۱۰. زاویه فازی نمونه‌های قیر قبل از پیرشدگی



شکل ۱۱. پارامتر شیارشدگی نمونه‌های قیر قبل از پیرشدگی

رفتار رئولوژیکی پس از پیرشدگی کوتاه مدت

پس از اعمال پیرشدگی کوتاه مدت بر روی نمونه‌ها، مشخصات رئولوژیکی آن‌ها مطابق نتایج آزمایش DSR مورد بررسی قرار گرفتند. جدول ۵ و شکل ۱۲ تغییرات مدول برشی مرکب قیر پایه و قیرهای اصلاح شده پس از فرآیند پیرشدگی کوتاه مدت را نشان می‌دهند و همانگونه که پیش بینی می‌شود نتایج حاکی از افزایش مدول برشی مرکب و افزایش سفتی همه نمونه‌ها نسبت به حالت قبل از اعمال پیرشدگی می‌باشد. این امر نشان‌دهنده‌ی سخت‌تر شدن ساختار قیر در اثر تبخیر اجزای سبک و آغاز فرآیند اکسیداسیون می‌باشد. مدول برشی مرکب قیر پایه با وجود افزایش تقریباً ۲ برابری ناشی از پیرشدگی همچنان مقادیر پایینی دارد به طوری که در دمای ۶۴ درجه سانتی‌گراد مقدار آن تنها ۱/۹۸ کیلوپاسکال بوده و افزودن ۳۰٪ گوگرد پلیمری موجب بهبود قابل توجهی آن شده و مقدار آن در همین دما به ۴/۹۸ کیلوپاسکال افزایش یافت.

مطابق روال قبل از پیرشدگی، افزودن نانو رس‌ها با درصدهای کمتر از ۳ درصد به قیر حاوی گوگاس موجب

کاهش مدول برشی نسبت به قیر حاوی ۳۰ درصد گوگاس شده و رفتار متفاوتی نسبت به یکدیگر نشان می‌دهند. نانو مونت موریلونیت در اثر پیرشدگی رفتاری وابسته به درصد از خود نشان داد، به طوری که در دمای ۶۴ درجه سانتی‌گراد مقدار مدول برشی مرکب در نمونه حاوی ۱ درصد حدود ۴/۰۱ کیلوپاسکال بوده و با افزایش درصد به ۲ و ۳، مقادیر G^* به ترتیب به ۳/۹۰ و ۵/۲۷ کیلو پاسکال افزایش یافت. این روند نشان می‌دهد که مقادیر کم این نانو رس بخشی از سختی ایجاد شده توسط گوگاس را تعدیل می‌کنند، در حالی که در درصدهای بالاتر با ایجاد ساختارهای منظم‌تر و تعامل قوی‌تر با اجزای آلی قیر، موجب بازگشت و افزایش مجدد سختی به دلیل تاثیر ضدپیرشدگی نانو رس مونت موریلونیت می‌شوند. مشابه این نتایج در مطالعات Cai و همکاران (۲۰۲۳) و Zhang و همکاران (۲۰۲۲) گزارش شده است (Cai et al., ۲۰۲۴; Zhang et al., ۲۰۲۲). تاثیر پیرشدگی بر نمونه های حاوی نانو بنتونیت مشابه روند قبل از پیرشدگی بوده و بر خلاف نانو مونت

موریلونیت در همه درصدها بطور یکنواخت باعث ارتقا و افزایش مدول برشی مرکب نمونه های قیری می شود. به عنوان مثال در دمای ۶۴ درجه سانتی گراد، مدول برشی مرکب قیر حاوی نانو بتونیت در درصدهای ۱ الی ۳، روند افزایشی داشته و به ترتیب به ۴/۷۷، ۴/۷۷ و ۵/۳۲ کیلوپاسکال رسید.

جدول ۵. پارامتر شیارشدگی نمونه های قیری بعد از پیرشدگی

نوع قیر اصلاحی		دمای آزمایش (درجه سانتی گراد)					بالاترین دمای عملکردی
		۵۲	۵۸	۶۴	۷۰	۷۶	
B	G* (kPa)	۹/۰۴	۳/۸۸	۱/۹۸	-	-	۵۸
	Δ	۷۷/۳	۷۸/۴	۷۹	-	-	
	G*/sin δ	۹/۲۶	۳/۹۱	۲/۰۲	-	-	
۳۰G	G* (kPa)	۱۸/۸۵	۹/۱۳	۴/۹۸	۲/۹۶	۱/۴۵	۷۰
	Δ	۶۶/۳	۶۸/۴	۶۹/۱	۷۱/۶	۷۲	
	G*/sin δ	۲۰/۵۹	۹/۸۲	۵/۳۴	۳/۱۲	۱/۵۲	
۳۰G+۱NCM	G* (kPa)	۱۵/۵۲	۷/۵۱	۴/۰۱	۲/۳۲	۱/۴۱	۷۰
	Δ	۷۰/۸	۷۲/۵	۷۴/۳	۷۵/۹	۷۶/۷	
	G*/sin δ	۱۶/۴۴	۷/۸۸	۴/۱۷	۲/۴۰	۱/۴۵	
۳۰G+۲NCM	G* (kPa)	۱۵/۹۷	۷/۸۵	۳/۹۰	۲/۶۰	۱/۶۹	۷۰
	Δ	۷۰/۳	۷۲/۱	۷۳/۲	۷۴/۸	۷۶/۱	
	G*/sin δ	۱۶/۹۷	۸/۲۵	۴/۰۸	۲/۷۰	۱/۷۵	
۳۰G+۳NCM	G* (kPa)	۱۶/۳۹	۸/۱۸	۵/۲۷	۳/۱۰	۱/۷۵	۷۰
	Δ	۶۹/۲	۷۰/۵	۷۲/۱	۷۳/۸	۷۵/۲	
	G*/sin δ	۱۷/۵۳	۸/۶۸	۵/۵۴	۳/۲۳	۱/۸۱	
۳۰G+۱NCB	G* (kPa)	۱۵/۷۹	۷/۶۷	۴/۴۱	۲/۵۴	۱/۴۶	۷۰
	Δ	۷۰/۶	۷۲/۳	۷۳/۹	۷۵/۱	۷۵/۹	
	G*/sin δ	۱۶/۷۴	۸/۰۵	۴/۵۹	۲/۶۳	۱/۵۱	
۳۰G+۲NCB	G* (kPa)	۱۶/۳۲	۸/۴۰	۴/۷۷	۲/۷۳	۱/۷۵	۷۰
	Δ	۶۹/۹	۷۱/۸	۷۲/۴	۷۴/۶	۷۵/۳	
	G*/sin δ	۱۷/۳۸	۸/۸۵	۵/۰۱	۲/۸۹	۱/۸۱	
۳۰G+۳NCB	G* (kPa)	۱۶/۴۰	۸/۷۵	۵/۳۲	۳/۵۰	۱/۸۶	۷۰
	Δ	۶۸/۲	۷۰/۳	۷۱/۸	۷۳/۵	۷۴/۹	
	G*/sin δ	۱۷/۶۶	۹/۳۰	۵/۶۰	۳/۶۴	۱/۹۳	

قیر اصلاح شده با ۳۰ درصد گوگرد تغییر محسوسی نشان داد و زاویه فازی آن در همان دما به حدود ۶۹/۱ درجه کاهش یافت. این کاهش نسبت به حالت قبل از پیرشدگی شدیدتر بوده و نشان می دهد فرآیند پیرشدگی با حذف اجزای سبک و تقویت شبکه گوگردی، سهم جزء الاستیک قیر را افزایش داده است (Cia, et al., 2024) در نمونه های حاوی نانو مونت موریلونیت، نتایج حاکی از

مطابق شکل ۱۳ و جدول ۵، پس از اعمال پیرشدگی کوتاه مدت، تغییرات زاویه فازی در همه نمونه ها نشان دهنده تغییر رفتار ویسکوالاستیک قیر بود. قیر پایه اگرچه پس از پیرشدگی اندکی سخت تر شد، اما همچنان زاویه فازی بالایی داشت به طوری که در دمای ۶۴ سانتی گراد مقدار زاویه فازی برابر ۷۹ درجه بود که این بیانگر باقی ماندن ماهیت غالباً ویسکوز قیر پایه می باشد. در مقابل،

پلیمری به مقدار ۵/۳۴ کیلوپاسکال در همان دما رسید و توانست معیار استاندارد را برآورده ساخته و دمای عملکردی بالای خود را به ۷۰ PG ارتقا دهد.

در نمونه‌های حاوی نانو مونت‌موریلونیت مشاهده شد که پس از پیرشدگی، مقادیر شاخص مقاومت شیارشدگی و به دنبال آن حداکثر دمای عملکردی بالای قیر، وابسته به درصد استفاده از نانو رس می باشد. به عنوان مثال نمونه حاوی ۱ درصد مونت‌موریلونیت در دمای ۶۴ درجه سانتی گراد مقدار پارامتر شیارشدگی معادل ۴/۱۷ کیلو پاسکال را نشان داد که نسبت به قیر گوگردی کاهش داشته و در نمودار PG (شکل ۱۵) نیز دمای عملکردی بالای آن اندکی پایین‌تر از قیر گوگردی قرار گرفت. اما با افزایش محتوای نانو مونت‌موریلونیت به ۲ و ۳ درصد، مقدار این شاخص به ترتیب به ۴/۰۸ و ۵/۵۴ کیلو پاسکال افزایش پیدا کرده و در نتیجه حداکثر دمای بالای عملکردی این نمونه‌ها مجدداً در محدوده ۷۰ PG قرار گرفت.

در واقع این روند نشان داد که مونت‌موریلونیت در درصدهای پایین موجب کاهش جزئی عملکرد دمای بالا می‌شود، در حالی‌که در درصدهای بالاتر اثر تقویتی داشته و باعث تثبیت عملکرد حرارتی می‌گردد (Cai et al., ۲۰۲۴; Zhang et al., ۲۰۲۲).

در نمونه‌های بتونیتی نیز پس از پیرشدگی، افزایش در پارامتر مقاومت شیارشدگی هم زمان با افزایش محتوای نانو رس مشاهده شد و مقدار این پارامتر در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد برای تمامی نمونه‌های اصلاحی با بتونیت بیشتر از ۲/۲ کیلو پاسکال بوده و دمای عملکردی بالای قیر در تمامی آن‌ها در سطح ۷۰ PG قرار گرفت.

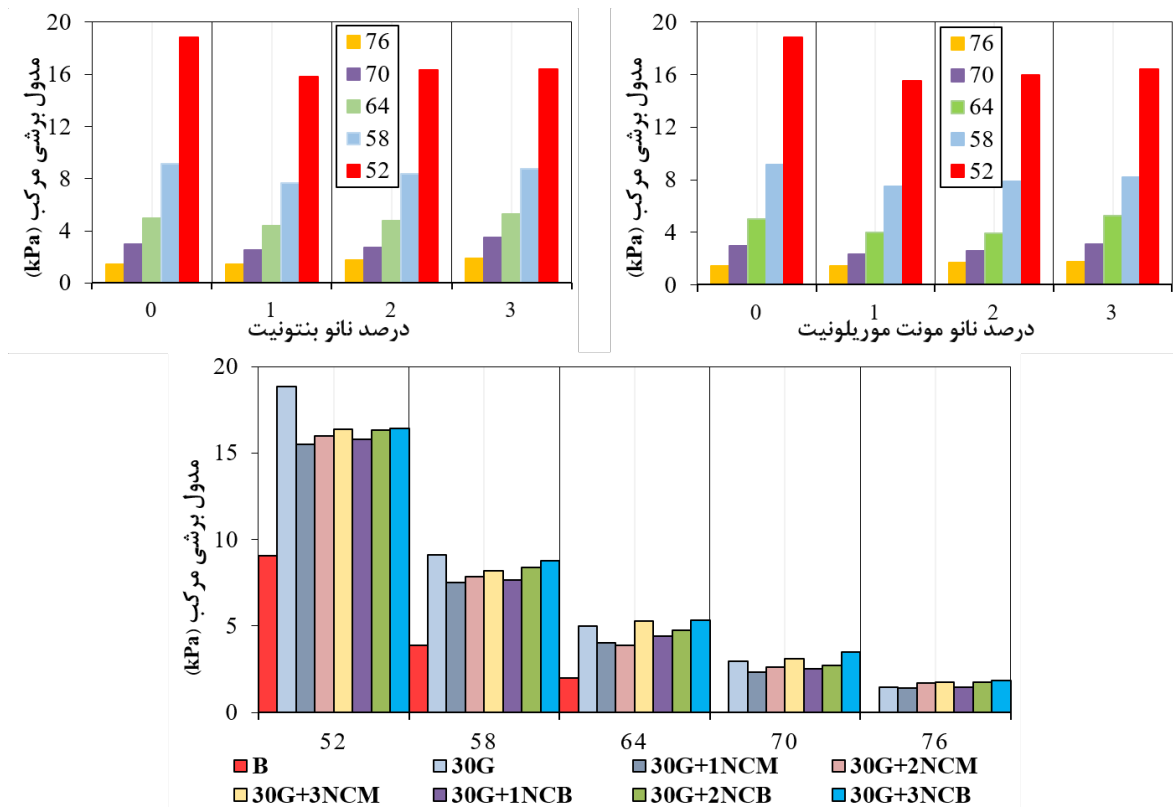
پارامتر شیارشدگی در نانو بتونیت در مقایسه با نانو مونت‌موریلونیت تاثیرگذاری بیشتری داشته و مطابق شکل ۱۴ مقدار این پارامتر در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برابر با $30 G + 3 NCB > 30 G + 3 NCM > 30 G + 2 NCB > 30 G + 2 NCM > 30 G + 1 NCB > 30 G + 1 NCM$ می‌باشد. به طور کلی، ترکیب نانو رس (مونت‌موریلونیت و نانو بتونیت) و گوگرد موجب بهبود عملکرد قیر حتی پس از پیرشدگی می‌شود و این ارتقای عملکرد در درصدهای بالاتر نانو رس بیشتر بوده و در دماهای بالا مؤثرتر می‌باشد.

آن بود که پس از پیرشدگی، افزودن ۱ درصد موجب افزایش نسبی زاویه فازی در دمای ۶۴ درجه سانتی‌گراد تا حدود ۷۴/۳ درجه گردید، اما در مقادیر بالاتر (۲ و ۳ درصد) زاویه فازی کاهش یافت و به مقدار ۷۳/۲ و ۷۲/۱ درجه رسید. این روند بیانگر آن است که مقدار کم نانو مونت‌موریلونیت پس از پیرشدگی رفتار ویسکوز قیر گوگردی را تقویت می‌کند، در حالی‌که درصدهای بالاتر باعث بازگشت رفتار الاستیک و بهبود دوباره سختی می‌شوند.

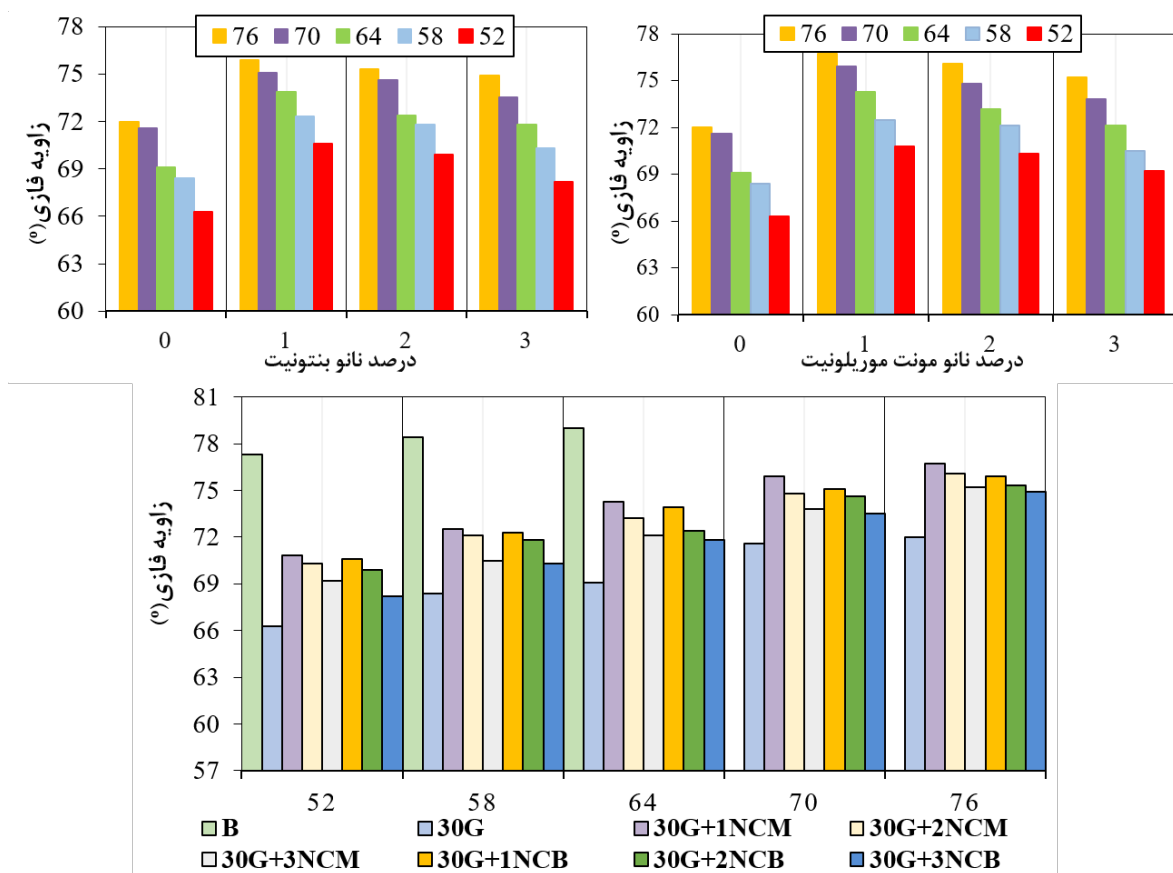
مشابه این الگو در مطالعه Zhang و همکاران (۲۰۲۲) نیز مشاهده شده است (Zhang et al., ۲۰۲۲). نمونه‌های حاوی نانو بتونیت نیز پس از پیرشدگی رفتاری مشابه نمونه‌های مونت‌موریلونیت از خود نشان دادند و در درصدهای بالا موجب افزایش مداوم سهم الاستیک قیر و پایداری بهتر آن در دماهای بالا گردیدند.

این رفتار نانو بتونیت همسو با گزارش Chen و همکاران (۲۰۲۳) و قدیر و حافظ (۲۰۲۴) می‌باشد (Chen et al., ۲۰۲۳; Qadir & Hafeez, ۲۰۲۴). بطور کلی در واقع پس از پیرشدگی، کاهش زاویه فازی در قیرهای اصلاح‌شده با گوگاس و نانو رس‌ها نسبت به قیر پایه مشهودتر بوده و مشابه روال قبل از پیرشدگی، افزودن مقادیر کم نانو رس (نانو مونت‌موریلونیت و نانو بتونیت) به قیر گوگردی رفتار ویسکوز قیر را افزایش داده و تعادل بهتری میان سختی و انعطاف‌پذیری قیر ایجاد می‌نماید، اما افزایش بیش از حد نانو رس این اثر را کاهش می‌دهد.

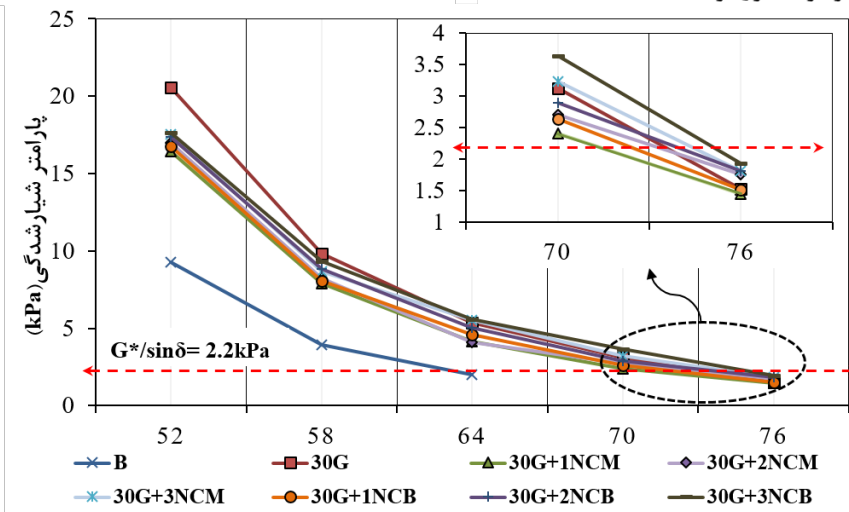
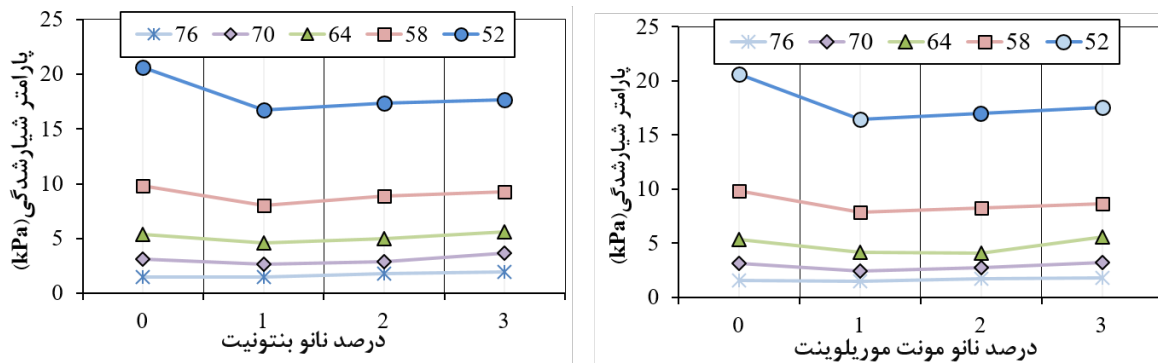
بر اساس الزامات عملکردی، مقدار پارامتر شیارشدگی در قیرهای پیرشده باید حداقل ۲/۲ کیلوپاسکال باشد تا آن دما به‌عنوان دمای عملکردی بالا پذیرفته شود. همان‌طور که در جدول ۵ و شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، نتایج پس از پیرشدگی کوتاه‌مدت نشان داد که شاخص شیارشدگی در تمامی نمونه‌های اصلاح‌شده افزایش یافته و این قیرها عملکرد بهتری نسبت به قیر پایه ارائه داده‌اند. قیر پایه اگرچه نسبت به حالت اولیه سخت‌تر شد، اما در دمای ۶۴ درجه سانتی‌گراد مقدار پارامتر $G^*/\sin\delta$ آن تنها ۲/۰۲ کیلوپاسکال اندازه‌گیری شد که پایین‌تر از حداقل الزامات بوده و بنابراین عملکردی دمای بالای آن در سطح PG ۵۸ باقی ماند. در مقابل، قیر اصلاح‌شده با ۳۰ درصد گوگرد



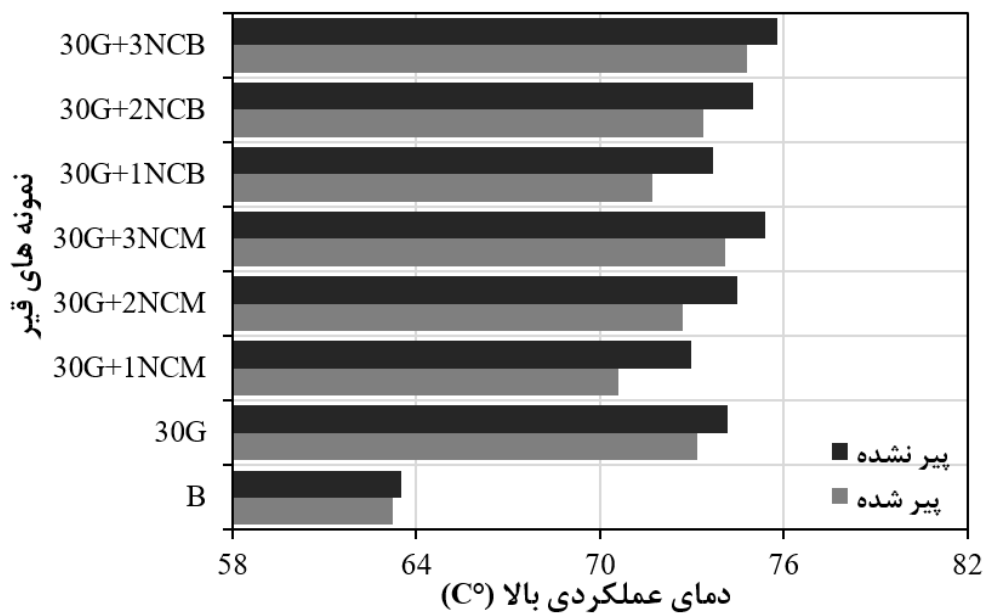
شکل ۱۲. مدول برشی مرکب نمونه‌های قیر بعد از پیرشدگی



شکل ۱۳. زاویه فازی نمونه‌های قیر بعد از پیرشدگی



شکل ۱۴. پارامتر شیارشدگی نمونه‌های قیر بعد از پیرشدگی



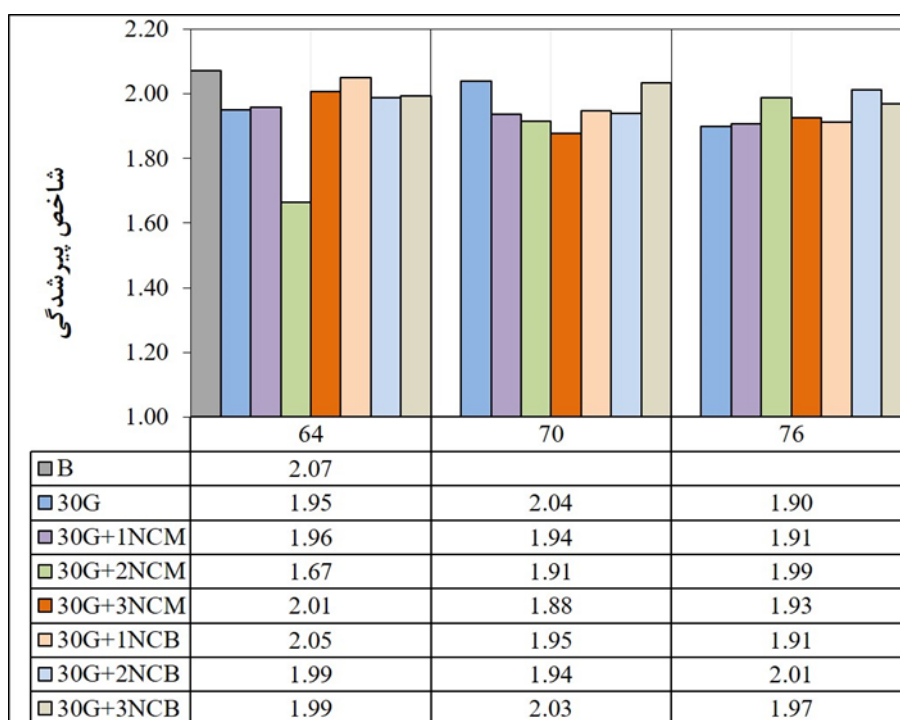
شکل ۱۵. دمای عملکردی بالای نمونه‌های قیر قبل و بعد از پیرشدگی

مقاومت در برابر پیرشدگی

در این پژوهش، به منظور ارزیابی پتانسیل پیرشدگی قیرهای اصلاح شده، از شاخص شیارشدگی بر اساس نسبت پارامتر شیارشدگی بعد و قبل از پیرشدگی استفاده شد. در این روش، شاخص پیرشدگی در دماهای ۶۴، ۷۰ و ۷۶ درجه سانتی گراد در فرکانس 10 rad/s محاسبه گردید. کاهش مقدار شاخص پیرشدگی در هر دما بیانگر مقاومت بالاتر قیر در برابر فرآیندهای اکسیداسیون و کاهش حساسیت آن به سخت شدگی ناشی از پیرشدگی می باشد.

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۱۶، شاخص پیرشدگی در قیر پایه برابر با $2/07$ در دمای 64°C درجه سانتی گراد به دست آمد که نشان دهنده بیشترین سخت شدگی پس از پیرشدگی است. افزودن گوگاس موجب کاهش این شاخص به $1/95$ گردید، در حالی که حضور ۲ درصد نانو مونت موریلونیت منجر به کاهش قابل توجه مقدار پیرشدگی تا $1/67$ شد که بیانگر بهبود حدود ۱۹ درصدی مقاومت در برابر پیرشدگی است. با افزایش دما به 70°C درجه سانتی گراد مقدار شاخص برای اغلب نمونه ها کاهش یافت که

نشان دهنده تداوم اثر محافظتی نانو رس در دماهای بالا می باشد. کاهش شاخص AI در نمونه های حاوی نانو رس را می توان ناشی از ایجاد ساختار بین لایه های پایدار و توزیع یکنواخت صفحات سیلیکاتی درون قیر دانست که با مسدودسازی مسیر نفوذ اکسیژن و کاهش واکنش های اکسیداسیونی، از افزایش شدید مدول برشی مرکب پس از پیرشدگی جلوگیری می کند (Amini, 2025; Lai et al., 2025; Zhang et al., 2022). مقایسه دو نوع نانو رس نشان داد که نانو مونت موریلونیت عملکرد مؤثرتری نسبت به نانو بتونیت داشته و در تمامی دماها شاخص پایین تری ارائه داده است. در حالت کلی می توان گفت که در بین تمامی درصدهای مختلف تو نانو رس، افزودن ۲ درصد نانو مونت موریلونیت به قیر گوگاس در تمامی دماهای ۶۴، ۷۰ و 76°C سانتی گراد پایین ترین مقادیر شاخص پیرشدگی را ایجاد کرده و بهترین عملکرد ضد پیرشدگی را ارائه می دهد و این رفتار ناشی از هم افزایی میان فاز قیری، گوگرد و نانو صفحات رسی بوده منجر به افزایش پایداری حرارتی و دوام رئولوژیکی قیر می گردد.



شکل ۱۶. مقدار شاخص پیرشدگی نمونه های قیری بر اساس پارامتر شیارشدگی

آنالیز اقتصادی

کنندگان قیر پلیمری، مونت موریلونیت و بتونیت در زمان نگارش مقاله تهیه شده است. بر اساس این استعلامها قیمت گوگرد پلیمری، حدود ۶۵ درصد قیمت روز قیر بوده ولی قیمت هر دو نانو رس عدد بسیار بالای دو و یک میلیون تومان به ازای یک کیلوگرم افزودنی است. در این محاسبات، مقدار مصرف قیر برای تولید یک تن آسفالت ۵ درصد، چگالی مخلوط آسفالتی ۲/۲ تن بر مترمکعب و نرخ تنزیل ۴ درصد در نظر گرفته شده است. همچنین فرض شده است ضخامت رویه آسفالت اولیه ۸ سانتی متر و ضخامت روکش‌های بعدی ۴ سانتی متر است. تحلیل نتایج این جدول نشان می‌دهد افزودنی گوگرد پلیمری با توجه به قیمت پایین‌تر نسبت به قیر و با توجه افزایش فاصله زمان لازم برای روکش، دارای هزینه چرخه عمر پایین‌تری در مقایسه با مخلوط آسفالت معمولی است. مخلوط آسفالتی حاوی یک درصد بتونیت و گوگرد پلیمری نیز هزینه پایین‌تری نسبت به آسفالت معمولی نشان می‌دهد. از طرفی، اصلاح قیر با حضور توام گوگرد پلیمری و یک درصد مونت موریلونیت و یا با دو درصد بتونیت نیز مقدار افزایش قیمت ناچیزی نسبت به آسفالت معمولی دارد.

در این پژوهش از آنالیز هزینه چرخه عمر برای اساس ارزش فعلی خالص یک تن مخلوط آسفالتی ساخته شده با قیر خالص و یا قیر اصلاح شده در اجرای یک متر مربع روسازی با تعدادی فرض ساده کننده برای مقایسه اقتصادی پیشنهادهای مختلف استفاده شده است. بدین منظور، طول عمر روسازی ۱۲ سال در نظر گرفته شده و فاصله زمانی بین روکش‌ها برای مخلوط آسفالتی ساخته شده با قیر خالص برابر ۳ سال و برای قیر اصلاح شده برابر ۴ سال با توجه به بهبود رفتار مخلوط آسفالتی در حضور مواد اصلاح کننده، فرض شده است. با این مفروضات، سه روکش برای مخلوط آسفالتی ساخته شده با قیر خالص در انتهای سال سوم، ششم و نهم و دو روکش برای مخلوط آسفالتی ساخته شده با قیر اصلاح شده در انتهای سال چهارم و هشتم لازم خواهد بود. جدول شماره ۶ آنالیز هزینه چرخه عمر را برای ساخت و نگهداری یک متر مربع روسازی آسفالتی با فرض قیمت یک تن قیر برابر ۲۷ میلیون تومان، یک تن آسفالت معمولی برابر ۲/۵ میلیون تومان، یک کیلوگرم قیر پلیمری برابر ۱۷۵۵۰ تومان، یک کیلوگرم نانو مونت موریلونیت برابر ۲ میلیون تومان و یک کیلوگرم نانو بتونیت برابر ۱ میلیون تومان نشان می‌دهد. این اعداد بر اساس استعلام قیمت از تعدادی از تولیدکنندگان قیر و آسفالت و توزیع

جدول ۶. آنالیز هزینه چرخه عمر برای ساخت و نگهداری یک متر مربع روسازی آسفالتی

مشخصه قیر به کار رفته	ارزش یک کیلوگرم قیر	ارزش فعلی خالص یک تن آسفالت			آنالیز هزینه چرخه عمر یک مترمربع آسفالت	
		ساخت	اولین روکش	دومین روکش		
B	۲۷۰۰۰	۲۵۰۰۰۰۰	۲۲۲۲۴۹۱	۱۹۷۵۷۸۶	۱۷۵۶۶۶۷	۵۴۷۷۳۷۲
۳۰G	۲۴۱۶۵	۲۳۵۸۲۵۰	۲۹۱۵۸۴۲	۱۷۲۳۱۵۰	۰	۴۲۲۷۷۴۶
۳۰G+۱NCM	۴۳۸۹۵	۳۳۴۴۷۵۰	۲۸۵۹۱۰۶	۲۴۴۳۹۷۶	۰	۵۹۹۶۲۹۱
۳۰G+۲NCM	۶۳۶۲۵	۴۳۳۱۲۵۰	۳۷۰۲۳۷۱	۳۱۶۴۸۰۲	۰	۷۷۶۴۸۳۶
۳۰G+۳NCM	۸۳۳۵۵	۵۳۱۷۷۵۰	۴۵۴۵۴۶۳۵	۳۸۸۵۶۲۸	۰	۹۵۳۳۳۸۱
۳۰G+۱NCB	۳۳۸۹۵	۲۸۴۴۷۵۰	۲۴۳۱۷۰۴	۲۰۷۸۶۳۱	۰	۵۰۹۹۹۱۸
۳۰G+۲NCB	۴۳۶۲۵	۳۳۳۱۲۵۰	۲۸۴۷۵۶۶	۲۴۳۴۱۱۲	۰	۵۹۷۲۰۸۹
۳۰G+۳NCB	۵۳۳۵۵	۳۸۱۷۷۵۰	۳۲۶۳۴۲۹	۲۷۸۹۵۹۳	۰	۶۸۴۴۲۶۱

۵- نتیجه گیری

هدف ارزیابی بهبود عملکرد قیر در برابر شیارشدگی، حرارت و پیرشدگی مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفتند. نتایج بدست آمده شامل موارد گفته شده، در ادامه می‌باشد. - افزودن ۳۰ درصد وزنی گوگرد پلیمری (گوگاس) به قیر پایه موجب کاهش قابل توجه درجه نفوذ از ۹۲ به ۵۳ واحد

در این پژوهش، تاثیر هم زمان گوگرد پلیمری (گوگاس) و نانو رس‌های مونت موریلونیت و بتونیت بر خواص فیزیکی و رئولوژیکی قیر پایه بررسی شد. برای این منظور، نمونه‌های اصلاح شده با ۳۰ درصد گوگاس و مقادیر مختلف نانورس (۱ تا ۳ درصد) تحت آزمایش‌های نفوذ، نقطه نرمی و DSR قبل و بعد از پیرشدگی کوتاه مدت با

- مقایسه‌ی شاخص پیری میان نانورس‌ها نشان داد که مقادیر پیرشدگی در قیرهای حاوی نانو مونت‌موریلونیت کمتر از نمونه‌های حاوی نانوبنتونیت است. این نتیجه بیانگر نقش مؤثرتر نانو مونت‌موریلونیت در کاهش نرخ سخت‌شدگی قیر و افزایش پایداری عملکردی پس از پیرشدگی است.

- استفاده‌ی هم‌زمان از گوگرد پلیمری (گوگاس) و نانو مونت‌موریلونیت منجر به بهبود هم‌زمان خواص حرارتی و رئولوژیکی قیر، افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی و کاهش حساسیت نسبت به پیرشدگی شد. در میان تمامی ترکیبات، قیر حاوی ۳۰ درصد گوگاس و ۲ درصد نانو مونت‌موریلونیت عملکرد بهینه و تعادل مناسبی بین سختی و انعطاف‌پذیری ارائه داد. این ترکیب را می‌توان به عنوان راهکاری مؤثر و مقرون‌به‌صرفه برای بهبود دوام و عملکرد روسازی‌های آسفالتی در شرایط اقلیمی گرم و ترافیکی سنگین پیشنهاد نمود.

- نتایج تحلیل هزینه چرخه‌ی عمر نشان داد که افزودن مقادیر کم نانورس (حدود ۱ درصد) به قیر حاوی گوگاس، هزینه‌های کل چرخه‌ی عمر روسازی را در مقایسه با قیر پایه کاهش می‌دهد. این صرفه‌جویی اقتصادی ناشی از افزایش دوام مخلوط آسفالتی و افزایش فاصله‌ی زمانی بین روکش‌ها از ۳ به ۴ سال است. با این حال، در درصدهای بالاتر نانورس به دلیل افزایش هزینه‌ی مواد، مزیت اقتصادی کاهش می‌یابد.

۶- سپاسگزاری

بدین وسیله نویسندگان از شرکت محترم آذربام به‌منظور در اختیار قرار دادن تجهیزات و امکانات آزمایشگاهی مورد نیاز این پژوهش، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایند. همچنین از همکاری ارزشمند پالایشگاه زنیط در تأمین و ارائه‌ی ماده‌ی گوگرد پلیمری (گوگاس) که نقش مهمی در انجام این تحقیق داشت، صادقانه سپاسگزاری می‌شود.

و افزایش محسوس نقطه نرمی از ۴۷ به ۶۴ درجه سانتی‌گراد گردید.

این تغییرات با افزایش مدول برشی مرکب و پارامتر مقاومت شیارشدگی همراه بوده و در نهایت، درجه عملکردی بالای قیر را از PG 58 به PG 70 ارتقا داد. این بهبود به تشکیل شبکه‌های پلیمری پایدار درون ماتریس قیر نسبت داده می‌شود که مقاومت آن را در برابر تغییرشکل‌های دائمی در دماهای بالا افزایش می‌دهد.

- افزودن نانورس‌های مونت‌موریلونیت و بنتونیت (در محدوده‌ی ۱ تا ۳ درصد وزنی) به قیر حاوی گوگاس ضمن حفظ مزایای گوگرد پلیمری، منجر به تعدیل رفتار رئولوژیکی قیر گردید. نانو مونت‌موریلونیت در مقدار ۱ درصد، سختی قیر را اندکی کاهش و زاویه فاز را افزایش داد و تعادلی مطلوب میان رفتار الاستیک و ویسکوز قیر ایجاد کرد در حالی که در درصدهای بالاتر (۳ درصد)، این نانورس موجب افزایش مقاومت برشی مرکب و پارامتر شیارشدگی شد.

- نانوبنتونیت با افزایش مقدار (۱ تا ۳ درصد)، سختی و پایداری حرارتی قیر را به‌صورت یکنواخت بهبود داد. در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد، پارامتر $G^*/\sin \delta$ از ۱/۳۵ به ۱/۷۹ کیلوپاسکال افزایش یافت. این رفتار به پخش یکنواخت و برهم‌کنش‌های قوی نانوبنتونیت با قیر نسبت داده می‌شود، هرچند اثر آن نسبت به مونت‌موریلونیت کمتر ارزیابی شد.

- نتایج آزمایش DSR نشان داد که مدول مرکب برشی در نمونه‌های اصلاح‌شده با گوگاس و نانورس، به‌ویژه در دماهای بالا، افزایش قابل توجهی داشته و زاویه فازی کاهش یافته است که نشانگر افزایش رفتار الاستیک و کاهش خاصیت ویسکوز قیر است.

- مقادیر بالاتر شاخص شیارشدگی در قیرهای اصلاح‌شده، به‌ویژه در دماهای بالا، بیانگر مقاومت قابل توجه این ترکیبات در برابر تغییرشکل‌های دائمی است. نمونه حاوی نانو مونت‌موریلونیت بیشترین مقدار این شاخص را نشان داد و عملکرد مطلوب‌تری نسبت به نمونه‌های حاوی نانوبنتونیت ارائه نمود.

- پس از اعمال پیرشدگی کوتاه‌مدت، میزان افزایش مدول برشی مرکب در نمونه‌های نانورس کمتر از قیر پایه بود که نشان‌دهنده‌ی مقاومت بهتر این نمونه‌ها در برابر فرآیند اکسیداسیون است. کاهش شاخص پیری در نمونه‌های حاوی نانو مونت‌موریلونیت تأیید می‌کند که این نانورس با ایجاد ساختار بین‌لایه‌ای پایدار، مسیر نفوذ اکسیژن را محدود کرده و از افزایش بیش از حد سختی پس از پیرشدگی جلوگیری می‌کند.

Journal of Nanomaterials, 2018(1), 2469307.

DOI: 10.1155/2018/2469307

- Galooyak, S. S., Dabir, B., Nazarbeygi, A. E., & Moeini, A. (2010). Rheological properties and storage stability of bitumen/SBS/montmorillonite composites. *Construction and Building Materials*, 24(3), 300-307.

doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.08.032

-Hashami, M., Ongarbayev, Y., Tileuberdi, Y., Imanbayev, Y., Zhambolova, A., & Kanzharkan, Y. (2025). Technological Progress in Sulfur-Based Construction Materials: The Role of Modified Sulfur Cake in Concrete and Bitumen. *Applied Sciences*, 15(16), 8790.

doi: 10.3390/app15168790

- Hesami, S., Mahzari, M., Sobhi, S., & Bay, M. A. (2025). Investigating the rheological properties and microstructural analysis of Nano-expanded Perlite modified asphalt binder. *Case Studies in Construction Materials*, 22, e04208.

doi: 10.1016/j.cscm.2025.e04208

- Lai, H., Xu, A., Zhai, J., Zong, Y., Deng, W., Guo, H., Guan, B., Chang, M., Xiong, R., & Wang, Z. (2025). A systematic review of montmorillonite-asphalt composite materials: Green clay mineral-reinforced asphalt for sustainable pavement solutions. *Applied Clay Science*, 278, 108007.

doi: 10.1016/j.clay.2025.108007

- Li, X., Wang, Y.-M., Wu, S.-J., Wang, H.-R., Liu, X.-C., Sun, H.-D., & Fan, L. (2022). Effect of montmorillonite modification on resistance to thermal oxidation aging of asphalt binder. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00971.

doi: 10.1016/j.cscm.2022.e00971

-Liu, S., Zhou, S. B., & Xu, Y. (2018). Evaluation of cracking properties of SBS-modified binders containing organic montmorillonite. *Construction and Building Materials*, 175, 196-205.

doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.185

- Lu, Y., Li, S., Jiang, Y., Yang, X., & Li, L. (2024). Rheological and aging properties of nano-clay/SBS composite-modified asphalt. *Materials*, 17(17), 4376.

doi: 10.3390/ma17174376

- Albayati, A. H., Wang, Y., & Al-ani, A. F. (2024). Enhancing asphaltic mixtures with Calcined Nano Montmorillonite: A performance assessment. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e02713.

doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02713

- Amini, A. (2025). Effect of Nanoclay on the Rheological Properties, Rutting, Fatigue, and Storage Stability of Polymer-Modified Binder. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 37(6), 04025129.

doi:10.1061/JMCEE7.MTENG-19376

- Cai, F., Feng, Z.-g., Song, W., Liu, J., Cui, Q., Wang, Z., & Zhang, L. (2024). Aging properties of ultraviolet absorber intercalated organo-montmorillonite-modified bitumen based on rheological and chemical analysis. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 36(2), 04023554.

doi: 10.1061/JMCEE7.MTENG-16735

- Chen, S., Pan, Y., Zhang, B., He, X., Su, Y., Liu, Q., Wang, Y., Wang, W., Chen, J., & Zhu, Y. (2023). Preparation and properties of pre-treated nano-bentonite incorporated styrene-butadiene-styrene (SBS) modified asphalt. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02505.

doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02505

- Cheng, P., Zhang, Z., Yang, Z., Xu, J., & Li, Y. (2021). Investigating the effectiveness of nano-montmorillonite on asphalt binder from rheological, thermodynamics, and chemical perspectives. *Materials*, 14(6), 1433.

doi: 10.3390/ma14061433

- Cheraghian, G., & Wistuba, M. P. (2020). Ultraviolet aging study on bitumen modified by a composite of clay and fumed silica nanoparticles. *Scientific Reports*, 10(1), 11216.

doi: 10.1038/s41598-020-68007-0

- Ezzat, H., El-Badawy, S., Gabr, A., Zaki, S., & Breakah, T. (2020). Predicted performance of hot mix asphalt modified with nano-montmorillonite and nano-silicon dioxide based on Egyptian conditions. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(5), 642-652.

doi: 10.1080/10298436.2018.1502437

-Filippi, S., Cappello, M., Merce, M., & Polacco, G. (2018). Effect of nanoadditives on bitumen aging resistance: a critical review.

pavement construction material. *International Journal of Pavement Engineering*, 22(3), 392-403.

doi: 10.1080/10298436.2019.1612064

- vivek, A. k., Sukhija, M., & Singh, K. L. (2021). Effect of montmorillonite nanoclay and sulphur-modified blends on the properties of bituminous mixes. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(2), 119.

doi: 10.1007/s41062-021-00484-2

- Ye, F., Yin, W., Lu, H., & Dong, Y. (2020). Property improvement of Nano-Montmorillonite/SBS modified asphalt binder by naphthenic oil. *Construction and Building Materials*, 243, 118200.

doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118200

- Zare-Shahabadi, A., Shokuhfar, A., & Ebrahimi-Nejad, S. (2010). Preparation and rheological characterization of asphalt binders reinforced with layered silicate nanoparticles. *Construction and Building Materials*, 24(7), 1239-1244.

doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.12.013

- Zhang, H., Yu, J., & Wu, S. (2012). Effect of montmorillonite organic modification on ultraviolet aging properties of SBS modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 27(1), 553-559.

doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.07.008

-Zhang, Z., Cheng, P., Li, Y., Yang, Z., & Chen, J. (2022). Effect of nanomontmorillonite on rheology and fatigue-healing performance of asphalt binder. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(11), 04022311.

doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004448

-Monteiro, L., Baghaee Moghaddam, T., Shafiee, M., & Hashemian, L. (2023). Investigating the addition of organomontmorillonite nanoclay and its effects on the performance of asphalt binder. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(8), 04023267.

doi: 10.1061/JMCEE7.MTENG-15035

- Paktin, H., Kumar, M., Vinayaka Ram, V., & Kar, S. S. (2024). Functional and rheological investigations on hydrophilic nanoclay blended bitumen. *Discover Sustainability*, 5(1), 337.

doi: 10.1007/s43621-024-00565-z

-Patra, S. K., Panda, M., Das, A. K., & Bhuyan, P. K. (2023). Performance evaluation of surface-treated montmorillonite nanoclay-modified bitumen binder at high-and intermediate-temperature conditions. *Road Materials and Pavement Design*, 24(5), 1330-1352.

doi: 10.1080/14680629.2022.2072374

-Qadir, F., & Hafeez, I. (2024). Effect of impregnated organophilic (hydrophobic) nano clay on asphalt binder properties and performance. *Construction and Building Materials*, 419, 135577.

doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135577

- Ren, Z., Zhu, Y., Wu, Q., Zhu, M., Guo, F., Yu, H., & Yu, J. (2020). Enhanced storage stability of different polymer modified asphalt binders through nano-montmorillonite modification. *Nanomaterials*, 10(4), 641.

doi: 10.3390/nano10040641

-Sakib, N., Bhasin, A., Islam, M. K., Khan, K., & Khan, M. I. (2021). A review of the evolution of technologies to use sulphur as a

Evaluation of Rutting Resistance and High-Temperature Performance Grade of Polymeric Sulfur and Nanoclay Modified Asphalt Binder

Ramin Sheikhmohammadi, M.Sc., Grad., Islamic Azad University of Ahar Branch, Iran.

Saeid Sobhi, M.Sc., Grad., Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

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

Fariba Karimian Khosroshahi, Ph.D., Stud., Islamic Azad University of Ahar Branch, Iran.

E-mail: saeid.sobhi.civil@gmail.com

Received: February 2026- Accepted: May 2026

ABSTRACT

In this study, polymeric sulfur and nanoclay were used as an asphalt binder modification approach with the aim of improving the rheological behavior of asphalt binder at high temperatures and enhancing its stability against aging. For this purpose, a base binder with a penetration grade of 85–100 was first modified with 30 wt% polymeric sulfur (commercial product: Googas), and then montmorillonite and bentonite nanoclays were incorporated into the modified binder at contents of 1, 2, and 3 wt%. The physical and rheological properties of the binders were evaluated through penetration, softening point, and dynamic shear rheometer (DSR) tests under unaged and short-term aged conditions. The results showed that the addition of Googas significantly increased the stiffness of the base binder and markedly improved its rutting resistance ($G^*/\sin \delta$), raising the high-temperature performance grade (PG) from 58 to 70. Although incorporating nanoclays did not lead to a considerable change in the PG value, it reduced the aging index (AI) and enhanced the rheological stability of the sulfur-modified binder against short-term oxidation. The lower AI values observed in the nanoclay containing samples particularly those with montmorillonite indicate a reduced tendency toward hardening and better preservation of the binder structure during aging. Overall, the simultaneous use of polymeric sulfur and nanoclays can be considered an effective approach for improving high-temperature performance and enhancing the short-term aging resistance of binder in asphalt pavements.

Keywords: Polymeric Sulfur (Googas), Nano-Montmorillonite (MMT), Nano-Bentonite (NB), Dynamic Shear Rheometer (DSR) Test, Short-Term Aging (RTFO Aging)