

## ارزیابی مقاومت شیارشدگی قیر و مخلوط‌های آسفالتی داغ و مخلوط آسفالتی

### گرم حاوی نانورس و آسفالتن - بی

#### مقاله علمی - پژوهشی

مصطفی وامق، استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران  
داریوش دریایی\*، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران  
حامد روح الامینی، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: D.daryae@malayeru.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۱ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱

صفحه ۲۴۲-۲۲۹

#### چکیده

خرابی‌ها در روسازی آسفالتی علاوه بر کاهش عمر خدمت روسازی منجر به کاهش ایمنی و نارضایتی کاربران می‌شود و همچنین مصرف زیاد انرژی و انتشار آلودگی‌ها در ساخت روسازی‌های آسفالتی محققان را به سمت توسعه تولید مخلوط آسفالتی سوق داده است. در این پژوهش به منظور غلبه بر مشکلات قیرهای خالص معمولی و ارتقای عملکرد آن و در نتیجه بهبود عملکرد و مقاومت در خرابی‌ها مخلوط‌های آسفالتی داغ و مخلوط‌های آسفالتی گرم از نانو رس Cloisite 15A و همچنین برای تولید مخلوط آسفالتی گرم از یک افزودنی آلی بنام آسفالتن - بی استفاده شده است. آزمایش‌های عملکردی قیر توسط دستگاه رنومتر برشی دینامیکی در دمای ۶۴ درجه، و آزمایش‌های عملکردی مخلوط‌های آسفالتی نظیر آزمایش شیار چرخ در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد و آزمایش خزش دینامیکی بر روی نمونه‌های مخلوط آسفالتی حاوی ۲، ۴ و ۶ درصد نانو رس و نمونه شاهد انجام گرفته است. نتایج آزمایش رنومتر برشی دینامیکی نشان داد که استفاده از نانو رس در قیر خالص باعث میزان افزایش فاکتور شیارشدگی ( $G^*/\text{Sin}\delta$ ) و در نتیجه افزایش مقاومت شیارشدگی قیر می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که با افزوده شدن نانو رس به قیر مقاومت در برابر شیارشدگی در مخلوط‌های آسفالتی داغ و مخلوط‌های آسفالتی گرم افزایش و یا عمق شیار کاهش می‌یابد. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که رابطه مناسبی از نظر آماری بین نتایج قیر و آزمایش‌های مخلوط‌های آسفالتی وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالتی گرم، آسفالتن بی، شیار شدگی، نانو رس

#### ۱-مقدمه

می‌کند (Abukhettala, 2006; Dekhli et al., 2015; Li & Tang, 2023). کیفیت مخلوط‌های آسفالت‌های به اجزای تشکیل‌دهنده آن یعنی قیر و مصالح سنگی بستگی دارد. بنابراین، برای کاهش خرابی‌ها و تغییر شکل‌های روسازی مانند ترک خوردگی ناشی از خستگی، شیار شدن در دمای بالا و غیره، محققان و مؤسسات به طور فزاینده‌ای بر بهبود خواص قیر تمرکز داشته‌اند. اصلاح خواص قیر، باعث بالارفتن کیفیت و افزایش عمر مفید آن می‌شود. (Brûlé, 1996; Li & Tang, 2023) اصلاح‌کننده‌های متعددی در طول سال‌ها مورد

مخلوط آسفالتی به دلیل عملکرد و ویژگی‌های راحتی سواری بیشترین استفاده را در ساخت روسازی راه‌ها دارد. با این حال مشکلات و خرابی‌های روسازی به دلیل ترافیک سنگین وسایل نقلیه، استفاده از مصالح با کیفیت پایین، تأثیرات محیطی و غیره باعث تخریب روسازی و کاهش عمر آن که منجر به افزایش هزینه‌های چرخه عمر می‌شود. خرابی‌های روسازی علاوه بر اینکه عمر خدمت‌رسانی روسازی را کاهش می‌دهد و با تحت تأثیر قراردادن ویژگی‌های کنترلی وسایل نقلیه، خطرات جدی را برای استفاده‌کنندگان از راه ایجاد

روش‌ها و تکنیک‌های مختلفی برای کاهش دمای تولید و تراکم (حدود ۲۰ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد) که منجر به پوشش کامل سنگ‌دانه‌ها توسط قیر، کارایی و تراکم پذیری می‌شود، وجود دارد که رایج‌ترین آنها استفاده از افزودنی‌های شیمیایی، افزودنی‌های آلی و تکنولوژی کف قیر می‌باشد. (Pereira et al., 2018)

افزودنی‌های آلی معمولاً واکس (طبیعی یا مصنوعی) و آمیدهای چرب هستند که می‌توانند ویسکوزیته قیر را در بالای نقطه ذوب (کمی بالاتر از ۹۰ درجه سانتی‌گراد) کاهش دهند. واکس‌های متداول مورد استفاده در تولید مخلوط‌های آسفالتی گرم ساسوبیت و اسفالتاتن-بی هستند. (Caputo et al., 2020)

در تحقیقی که توسط وامق و همکاران برای ارزیابی اثر امیخته پلیمری SBR/PP و پلیمر SBS بر روی مخلوط‌های آسفالتی انجام شد از ۱٫۵ درصد نانورس نیز به جهت پایداری و جلوگیری از دوفاز شدن افزودنی‌های پلیمری با درصد‌های مختلف استفاده شد. آزمون پایداری حرارتی نشان داد که استفاده از نانورس منجر افزایش پایداری پلیمرها در قیر می‌شود (Vamegh et al., 2019)

نتایج حاصل از تحقیقی که در سال ۲۰۰۵ توسط Chile با استفاده از آزمایش‌های مکانیکی روی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با نانورس Cloisite 15A انجام شده نشان‌دهنده بهبود در خواص مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی از جمله مقاومت کششی غیرمستقیم، خزش و خستگی است. (Garba, 2002; Ghile, 2006)

در سال ۲۰۲۰، صداقت و همکارانش اثر نانورس مونت موریلونیت k10 را بر روی مخلوط‌های آسفالتی گرم بررسی کردند. آنها دریافتند که وجود نانورس اثر منفی ساسوبیت در مخلوط‌های آسفالتی گرم را در برابر عملکرد ترک خوردگی ناشی از پدیده خستگی و دمای منفی کاهش می‌دهد. (Sedaghat et al., 2020)

در سال ۲۰۲۲، Zahid و همکارانش اثر ترکیبی نانولوله های کربنی و نانورس را بر روی مخلوط‌های آسفالتی HMA، بررسی کردند. آنها دریافتند که افزودن ۱/۵ درصد نانولوله کربنی به اضافه ۶ درصد نانورس می‌تواند باعث افزایش چشمگیری در مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های HMA گردد. (Zahid et al., 2022)

روح الامینی و همکاران در سال ۲۰۱۹ اثر همزمان نانورس و SBS با درصد‌های مختلف بر عملکرد خستگی مخلوط‌های آسفالتی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد

استفاده قرار گرفته‌اند، از جمله معرف‌های پلیمری، الیاف طبیعی و مصنوعی، لاستیک طبیعی و خرده لاستیک، پلاستیک‌های زائد، نانوذرات و غیره. استفاده از نانومواد در میان همه این اصلاح‌کننده‌ها در سال‌های اخیر به دلیل اثرات مثبت گسترده آن در کاهش تغییر شکل‌های دائمی، خستگی و ترک خوردگی شیاردار، آسیب‌های رطوبتی، تنش‌های ناشی از دما و غیره توجه زیادی را به خود جلب کرده است. معمولاً منظور از مقیاس نانو ابعادی در حدود ۱ تا ۱۰۰ نانومتر است. نانوفناوری، فناوری در سطح اتم‌ها و مولکول‌ها است و به عبارتی توانمندی تولید مواد و سیستم‌های جدید با در دست گرفتن کنترل آن‌ها در سطوح مولکولی و اتمی و استفاده از خواص ظاهر شده می‌باشد. این فناوری ساخت ابزارهای نوین مولکولی منحصربه‌فرد با به‌کارگیری خواص شیمیایی کاملاً شناخته‌شده اتم‌ها و مولکول‌ها، نحوه پیوند آن‌ها به یکدیگر را ارائه می‌دهد. مهارت مطروحه در این فناوری دست‌کاری اتم‌ها به طور جداگانه و جای‌دادن دقیق آن‌ها در مکانی است که برای رسیدن به ساختار دلخواه و ایده‌آل مورد نیاز است. (Li & Tang, 2023). نانورس‌ها مواد منحصربه‌فردی هستند که به عنوان مواد افزودنی برای ساخت نانوکامپوزیت‌ها و بهبود قابل توجه خواص مواد به کار می‌روند.

ساختار نانورس‌ها شامل صفحاتی کوچک و نامنظم ضخامتی در حدود ۱ نانومتر و قطر چند صد نانومتری هستند. یکی از مهم‌ترین خصوصیات نانورس‌ها نسبت طول به ضخامت بسیار بالای تک تک صفحات (از ۳۰۰ به ۱ و ۱۵۰۰ به ۱ است) است. به علت ساختار صفحه‌ای، نانورس‌ها باعث بهبود خواص مکانیکی مواد می‌شوند، افزایش استحکام، مدول و ثبات ابعادی از این موارد است. (Quang Nguyen & Baird, 2005).

همچنین در سال‌های اخیر صنعت روسازی با توجه به افزایش آگاهی و محبوبیت توسعه پاسدار به دنبال استراتژی‌های برای بهبود مصرف انرژی، کاهش هزینه‌ها و همچنین تضمین کیفیت مخلوط‌های آسفالتی بوده است. یکی از این استراتژی‌ها تولید مخلوط‌های آسفالتی در دمای پایین‌تر می‌باشد که به عنوان مخلوط‌های آسفالتی گرم شناخته می‌شود. (Zhang et al., 2023). مخلوط‌های آسفالتی گرم در دماهای بسیار پایین‌تر از مخلوط آسفالتی داغ تولید می‌شود و در نتیجه مصرف انرژی کمتر، انتشار آلودگی کمتر، کاهش پیری، دمای اختلاط و تراکم پایین‌تر، اجرای روسازی با دمای کمتر و کارایی بهتر مخلوط را به همراه دارد. (Caputo et al., 2020).

شکست تا ۳۰ درصد و افزایش چقرمگی شکست تا ۲۰ درصد می‌شود. در این تحقیق مقدار بهینه NC در محدوده ۲ تا ۴ درصد محاسبه شده است (Karimi et al., 2024). در سال ۲۰۲۳، Sukhija و همکارانش اثر افزودنی‌های مختلف مخلوط آسفالت گرم را بر مقاومت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی بررسی کردند. آنها دریافتند که افزودنی‌های شیمیایی تأثیر بهتری بر بهبود حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی داشته است (Sukhija et al., 2023).

همچنین عامری و همکاران اثر نانورس را خصوصیات شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی SMA حاوی الیاف سلولزی و پلیمر SBS مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که نانورس علاوه بر افزایش پایداری پلیمرها در قیر منجر بالاترین مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط‌های SMA در نمونه حاوی ۳ درصد نانورس شده است (Ameri et al., 2017).

باتوجه به نتایج تحقیقات گذشته و مروری بر منابع، در این تحقیق تأثیر افزودنی نانورس Cloisite 15A بر مقاومت شیارشدگی دو نوع مخلوط آسفالتی گرم و داغ و مقایسه آنها بررسی می‌شود. مخلوط‌های آسفالتی در دو حالت، مخلوط آسفالتی گرم و مخلوط آسفالتی گرم با قیر حاوی نانورس ساخته شده و با استفاده از آزمایش رئومتر برشی دینامیکی (DSR)، دستگاه شیار چرخ و آزمایش خزش دینامیکی مقاومت در برابر شیارشدگی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

## ۲- مصالح مصرفی

### ۲-۱- مصالح سنگی

دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های به‌کاررفته در این تحقیق مطابق جدول (۱) که بر اساس دانه بندی شماره ۴ نشریه ۲۳۴ روسازی ایران می‌باشد. مصالح سنگی مصرفی از نوع آهکی بوده که خصوصیات آن در جدول ۲ ارائه شده است.

### ۲-۲- قیر

در این پژوهش قیر خالص مصرفی برای تهیه مخلوط آسفالتی گرم و داغ با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ می‌باشد که خصوصیات آن در جدول ۳ ارائه شده است.

نانورس در دمای میانی باعث بهبود خصوصیات خستگی مخلوط‌های آسفالتی می‌شود (Rooholamini et al., 2017). باباگلی تأثیر نانورس در مخلوط‌های آسفالتی گرم که با پلیمر ضایعاتی پلی‌پروپیلن اصلاح شده بود را بررسی کرد. نتایج آزمون رفتار رئولوژیکی قیر نشان داد که افزودن افزودنی‌های ترکیبی منجر به افزایش رفتار دمای بالا قیر می‌شود. آزمایش پایداری ذخیره‌سازی قیر نیز نشان داد که با استفاده از نانورس، پایداری ذخیره‌سازی قیرهای حاوی پلی‌پروپیلن بهبود می‌یابد و مقاومت شیارشدگی قیرها با افزودن نانورس و پلی‌پروپیلن افزایش می‌یابد (باباگلی، ۲۰۲۳). Aljbouri و Albayati اثر چهار نانومواد شامل نانو سیلیس، نانو کربنات کلسیم، نانورس و نانو پلاکت‌ها بر خصوصیات مارشال و دوام مخلوط آسفالت گرم (شامل حساسیت رطوبتی، مدول برجهدگی و تغییر شکل دائم) مورد ارزیابی قرار دادند. یافته‌های این تحقیق پتانسیل بالای این نانومواد برای بهبود خواص مارشال و دوام مخلوط آسفالت گرم را نشان می‌دهد. همچنین نتایج نشان داد که استفاده از نانومواد در آسفالتی باعث افزایش طول عمر روسازی می‌شود که NC، NS، NCC و NP، عمر طراحی را به ترتیب ۵۹،۶، ۴۳،۱، ۲۴،۴ و ۱۲،۲ درصد بهبود بخشید. با این حال، نرخ بهبود برای ویژگی‌های اندازه‌گیری شده به دوز و نوع نانومواد بستگی دارد (Aljbouri & Albayati, 2023).

Baht و Mir اثر افزودنی‌های مخلوط آسفالت گرم را بر عملکرد شیارشدگی و خستگی قیرهای اصلاح شده با نانو اکسید آلومینیوم را ارزیابی نمودند. نتایج نشانگر افزایش نقطه نرمی، و کاهش درجه نفوذ، کشش‌پذیری و ویسکوزیته قیر اصلاح شده با نانومواد در حضور افزودنی‌های مخلوط آسفالتی گرم است و همچنین نتایج آزمایش‌های LAS و MSCR نشان می‌دهد استفاده از افزودنی‌های مخلوط آسفالت گرم موجب افزایش مقاومت شیارشدگی و خستگی در این قیرها می‌شود (Bhat & Mir, 2022).

کریمی و همکاران پارامترهای مقاومت در برابر ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی گرم با درصد بالای RAP حاوی قیر اصلاح شده با مقادیر مختلف نانو کربنات کلسیم (NC) بررسی کردند. از نتایج، مشاهده می‌شود که افزودن RAP، هم چقرمگی شکست و هم انرژی شکست را افزایش می‌دهد. همچنین حضور نانو کربنات کلسیم (NC)، مخلوط آسفالتی گرم را در برابر ترک مقاوم‌تر و باعث افزایش انرژی

### ۳-۲- نانورس

نانورس مصرفی از نوع مونت موریلونیت موسوم به Cloisite 15A با درصدهای ۲، ۴ و ۶٪ وزنی قیر ۴ ارائه شده است. مورد استفاده قرار گرفته است و مشخصات آن در جدول

جدول ۱. دانه بندی نمونه‌ها

شماره الک	دانه بندی شماره ۴ (آستر و رویه)	
	درصد رد شده	حدود مجاز
۳/۴ اینچ	۱۰۰	۱۰۰
۱/۲ اینچ	۹۵	۱۰۰-۹۰
شماره ۴	۶۰	۷۴-۴۴
شماره ۸	۴۳	۵۸-۲۸
شماره ۵۰	۱۳	۲۳-۷
شماره ۲۰۰	۴	۱۰-۲

جدول ۳. خصوصیات قیر

خصوصیات	قیر ۷۰/۶۰	روش آزمایش
وزن مخصوص در ۲۵ درجه سانتی گراد	۱/۰۳	ASTM D70
درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی گراد	۶۴	ASTM D5
نقطه نرمی (درجه سانتی گراد)	۵۴	ASTM D36
انگمی در ۲۵ درجه سانتی گراد	۱۰۲	ASTM D113
نقطه اشتعال	۳۰۵	ASTM D92
نقطه احتراق	۳۱۷	ASTM D70

جدول ۴. مشخصات نانو رس

مشخصات	مقدار
اصلاح کننده آلی	2M2HT
مقدار اصلاح کننده در ۱۰۰ گرم رس	۱۲۵ میلی گرم
درصد رطوبت	< ۲٪
کاهش رطوبت در اثر حرارت	۴۳٪

### ۴-۲- آسفالتن-بی

است که در این پژوهش ۳ درصد مورد مصرف قرار گرفته است. جدول (۵) مشخصات آسفالتن - بی مورد استفاده را نشان می دهد.

آسفالتن-بی یک افزودنی آلی یا واکس جهت کاهش ویسکوزیته قیر برای تولید مخلوط آسفالتی گرم می باشد. آسفالتن-بی موم مونتان است که پس از تصفیه به اسید چرب اضافه می شود. مقدار مصرف این افزودنی بین ۲ تا ۴ درصد

جدول ۵. مشخصات Asphaltan-B

مشخصات	مقدار
نقطه اشتعال [C°]	>300
دمای احتراق [C°]	>250
نقطه انجماد [C°]	95-105
نوع ماده	جامد
رنگ	قهوه ای

جدول ۲. خصوصیات مصالح سنگی مورد استفاده

استاندارد آزمایش	حدود مجاز طبق نشریه ۲۳۴		نتایج آزمایش	شرح
	رویه	آستر		
AASHTO T96	۳۰	۴۰	۲۲/۳	حداکثر سایش به روش لس آنجلس (درصد)
BS 812	۲۵	۳۰	۱۶	حداکثر ضریب تورق (درصد)
ASTM D5821	۹۰	۸۰	۹۳	حداقل شکستگی در دو جبهه روی الک شماره ۴ (درصد)
AASHTO T85	۲/۵	۲/۵	۲/۲	حداکثر درصد جذب آب (مصالح درشت‌دانه)
AASHTO T84	۲/۵	۲/۸	۲/۴	حداکثر درصد جذب آب (مصالح ریزدانه)
ASTM C127	-	-	۲/۵۹	وزن مخصوص واقعی مصالح سنگی درشت‌دانه (گرم بر سانتی متر مکعب)
ASTM C128	-	-	۲/۳۲	وزن مخصوص واقعی مصالح سنگی ریزدانه (گرم بر سانتی متر مکعب)

### ۳- روش آزمایش و تهیه نمونه‌ها

ابتدا برای تعیین درصد قیر بهینه نمونه‌های استاندارد مارشال ساخته می‌شود و در نهایت با نمونه که با دستگاه تراکم ژیراتوری ساخته می‌شود و مقدار شیارشدگی هر یک از نمونه‌ها با استفاده از آزمایش شیار چرخ مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

### ۳-۱- آزمایش مارشال (تعیین درصد قیر بهینه)

طرح اختلاط بر اساس طرح اختلاط مارشال (ASTM D1599) است که این روش جزء روش‌های طرح اختلاط تجربی است. مقدار قیر بهینه در این طرح اختلاط بر اساس پارامترهای حداکثر وزن مخصوص، حداکثر مقاومت فشاری، روانی، درصد حجمی فضای خالی آسفالت متراکم شده و درصد حجمی فضای خالی مصالح سنگی در آسفالت متراکم شده به دست آمده است. افزودن ساسوبیت تنها ویسکوزیته قیر را پایین می‌آورد و تغییری در درصد قیر بهینه ایجاد نمی‌کند. در جدول ۶ مقدار قیر بهینه و مقاومت مارشال ارائه شده است.

جدول ۶. درصد قیر بهینه و نتایج آزمایش مارشال

نوع نمونه	درصد قیر بهینه	استقامت مارشال (کیلوپاسکال)	روانی (MM)
نمونه شاهد	۴/۸	۸/۸۹	۳/۲۲
Cloisite 15-A	۲٪	۵/۳	۳/۶۵
	۴٪	۵/۴	۳/۶۸
	۶٪	۵/۵	۳/۵۸

### ۴- آزمایش‌های انجام شده

#### ۴-۱- آزمایش رئومتر برشی دینامیکی DSR

AASHTO T315 بر روی نمونه‌های مختلف صورت گرفت. دستگاه DSR برای ارزیابی رفتار ویسکوالاستیک قیر

برای ارزیابی مقاومت شیارشدگی ترکیب‌های قیر و مواد افزودنی، آزمایش رئومتر برشی دینامیکی طبق استاندارد

(22, 2022). برای ارزیابی مقاومت شیارشدگی قیر، کار انجام شده در هر سیکل بارگذاری در تنش ثابت  $\sigma_0$  از رابطه (۱) تعیین می‌شود (AASHTO T315-22, 2022).

$$W_c = [\pi\sigma_0^2 [G^* / \sin \delta]^{-1}]$$

تحقیق دمای ۶۴ درجه تعیین شده است. مقدار مدول برشی مختلط و زاویه فاز در آزمایش DSR از روابط (۲) تا (۴) تعیین می‌شوند (Daryae, 2019).

$$\tau_{max} = \frac{2T}{\pi r^3}$$

$$\gamma_{max} = \frac{\theta \cdot r}{h}$$

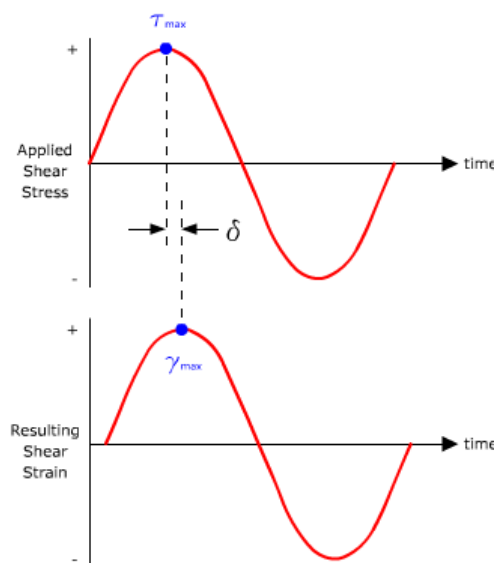
$$G^* = \frac{\tau_{max}}{\gamma_{max}}$$

که در آنها،  $T$ : حداکثر گشتاور اعمالی،  $r$ : شعاع نمونه،  $\theta$ : زاویه چرخش بر حسب رادیان،  $\tau_{max}$ : حداکثر تنش برشی اعمال شده و  $\gamma_{max}$ : حداکثر کرنش برشی بدست آمده می‌باشد.

مقدار زاویه فاز نیز بر حسب درجه از رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$\delta = \frac{360(t)}{f} \quad (5)$$

که  $t$ : فاصله افقی فاصله افقی بین حداکثر تنش برشی در منحنی تنش - زمان و حداکثر کرنش برشی در منحنی کرنش - زمان بر حسب ثانیه و  $f$ : فرکانس دستگاه است.



شکل ۱. زاویه فاز فاصله افقی بین حداکثر تنش برشی و حداکثر کرنش برشی (Daryae, 2019)

#### ۴-۲- آزمایش شیار چرخ

در مجموع نمونه‌ها تحت ۸۰۰۰ سیکل بارگذاری قرار گرفتند و پس از آن عمق شیار به وجود آمده در هر نمونه اندازه‌گیری می‌شود. میانگین سه نمونه به عنوان عمق شیار هر نوع مخلوط به دست آمد. شکل (۲)، دستگاه آزمایش ویل تراک را برای ارزیابی مقاومت شیارشدگی نشان می‌دهد.

یکی از روش‌های اندازه‌گیری ویژگی تغییر شکل‌های دائمی مخلوط‌های آسفالتی، آزمایش شیار جای چرخ است. آزمایش شیار چرخ بر اساس استاندارد AASHTO T324 صورت گرفت (AASHTO T 324-17, 2017) در این آزمایش نمونه‌ها تحت بارگذاری با فرکانس ۱ هرتز و دمای آزمایش ۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشند.



شکل ۲. دستگاه اندازه‌گیری عمق شیار ویل تراک (Fakhri & Towfigh, 2002)

#### ۴-۳- آزمایش خزش دینامیکی

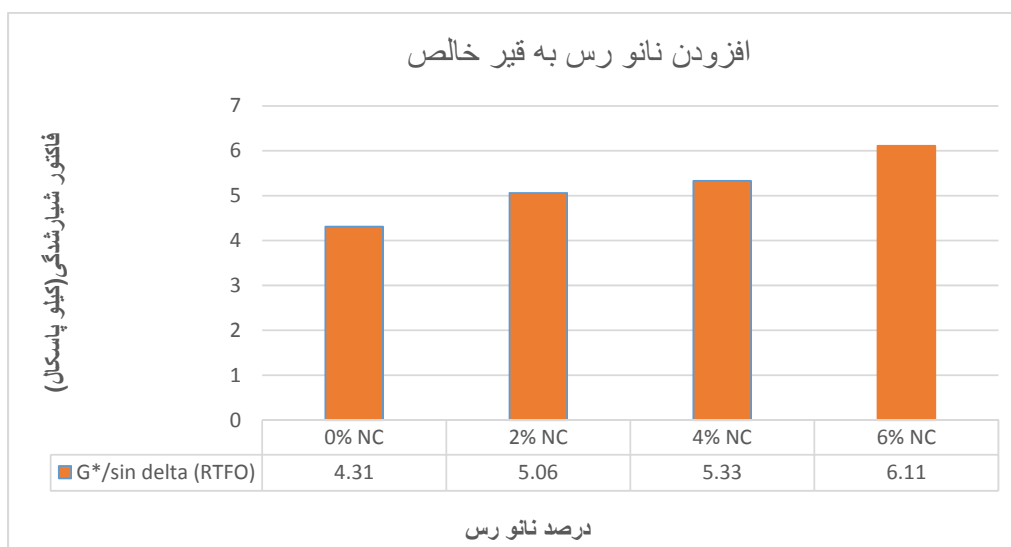
عددی است که به عدد روانی شناخته می‌شود. هر چه مقدار این عدد روانی بیشتر باشد، مقاومت نمونه در برابر تغییر شکل‌های ماندگار بیشتر است.

##### نتایج و تحلیل آنها

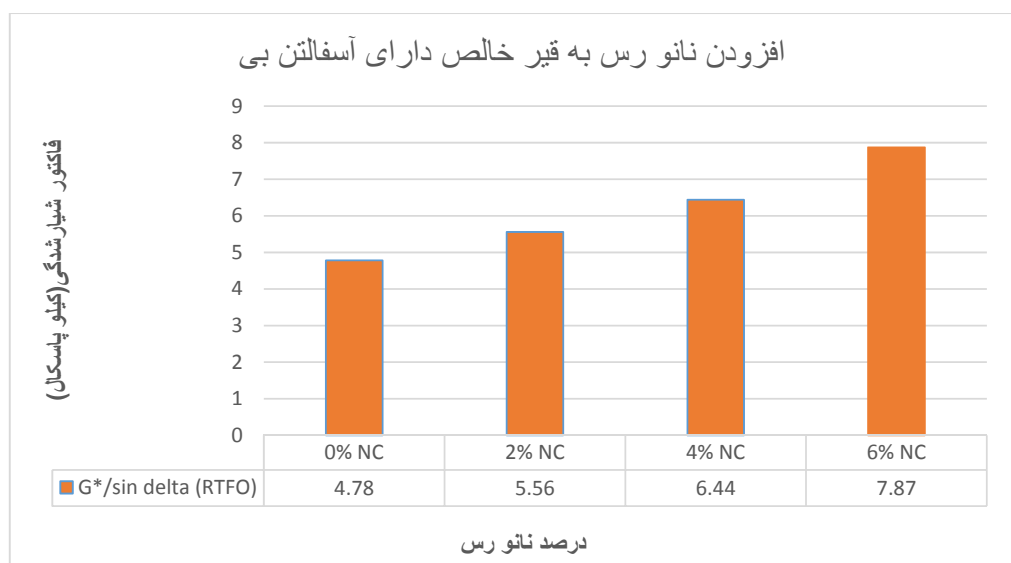
##### آزمایش رئومتر برشی دینامیکی DSR

پس از انجام آزمایش رئومتر برشی دینامیکی در دمای عملکردی قیر مورد استفاده (۶۴ درجه سانتیگراد) مقادیر فاکتور شیارشدگی ( $G^*/\text{Sin}\delta$ ) در شرایط پیرشدگی کوتاه مدت به روش RTFO بدست آورده شد. شکل (۳)، فاکتور شیارشدگی بدست آمده از آزمایش رئومتر برشی دینامیکی را در دمای ۶۴ درجه سانتیگراد برای قیرهای حاوی درصد‌های مختلف نانو رس نشان می‌دهد.

در این مطالعه، رفتار مخلوط‌های مختلف در برابر دائمی مورد بررسی قرار گرفت. تغییر شکل‌ها با استفاده از آزمون خزش دینامیکی بر اساس استاندارد NCHRP 9-19 و با استفاده از دستگاه UTM 25P انجام شد. ابتدا از هر نوع مخلوط سه نمونه به مدت ۵ ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرند. سپس نمونه‌ها در دستگاه آزمایش قرار گرفته و با اعمال بار تغییر شکل‌های ماندگار در برابر تعداد سیکل بارگذاری توسط دستگاه اندازه‌گیری می‌شود. (Taher et al., 2022). آزمایش در دمای ثابت ۵۰ درجه سانتیگراد و با تنش ثابت ۴۵۰ کیلو پاسکال و به صورت شبه سینوسی، انجام گرفت. در این آزمایش به ازای تعداد سیکل‌های بارگذاری، کرنش تجمعی توسط دستگاه اندازه‌گیری می‌شود و به صورت یک نمودار ترسیم می‌شود. در این منحنی با ترسیم منحنی نرخ کرنش، مقدار حداقل نرخ کرنش تعیین می‌شود، که این نقطه



شکل ۳. نتایج آزمایش DSR در دمای عملکردی ۶۴ درجه و تعیین فاکتور شیارشدگی قیر برای شرایط بدون افزودنی آسفالتن بی (شرایط HMA)



شکل ۴. نتایج آزمایش DSR در دمای عملکردی ۶۴ درجه و تعیین فاکتور شیارشدگی قیر برای شرایط با افزودنی آسفالتن بی (شرایط WMA)

شیارشدگی ( $G^*/\text{Sin}\delta$ ) نیز افزایش پیدا می‌کند. این افزایش نشان دهنده افزایش سختی و مقاومت نمونه‌های قیری در برابر تغییر شکل‌های ماندگار و خرابی شیارشدگی در دمای بالا می‌باشد. همانطور که در شکل‌های (۳ و ۴)، مشاهده می‌شود با افزودن ۶ درصد نانو رس به قیر خالص و قیر خالص حاوی آسفالتن-بی مقدار فاکتور شیارشدگی در شرایط پیرشدگی RTFO به ترتیب دچار افزایش ۴۲ و ۶۵ درصدی شده است. از طرفی با مشاهده نتایج شکل‌های (۳ و ۴) می‌توان نتیجه

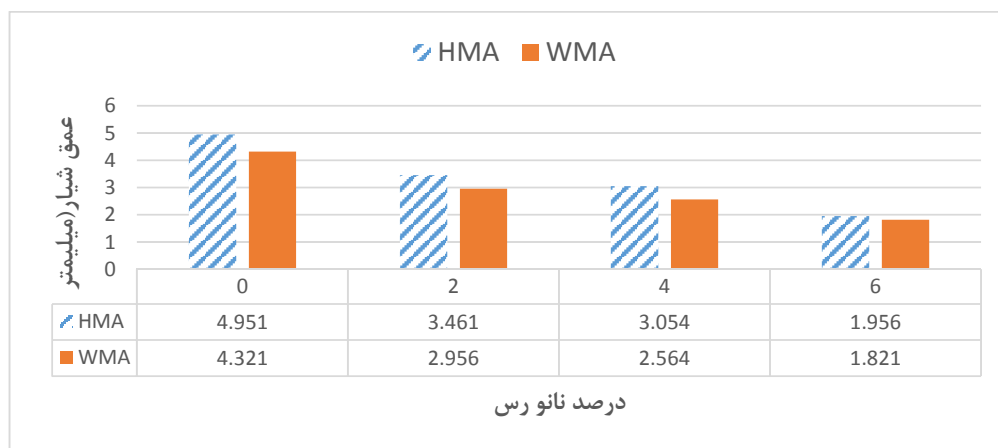
نتایج شکل (۳) مربوط به افزودن نانو رس به قیر خالص می‌باشد. در شکل (۴)، نتایج فاکتور شیارشدگی در آزمایش DSR بر روی نمونه‌های قیری همراه افزودنی آسفالتن-بی نشان داده شده است. این نمودار مقدار فاکتور شیارشدگی را در اثر افزودن نانو رس به قیر خالص حاوی آسفالتن-بی (که معرف شرایط آسفالت WMA است) نشان می‌دهد. همانطور که در در شکل‌های (۳ و ۴)، مشاهده می‌شود، با افزایش درصد نانو رس به قیر خالص مقدار فاکتور

باعث افزایش فاکتور شیارشدگی شده است که نشان دهنده بهبود خصوصیات مقاومتی در برابر تغییر شکل‌های ماندگار می‌باشد.

### آزمایش شیار چرخ

از آزمایش شیار چرخ برای اندازه‌گیری مقدار عمق شیار چرخ و ارزیابی مقاومت در برابر تغییر شکل‌های ماندگار یا شیارشدگی استفاده می‌شود. برای آماده‌سازی نمونه‌ها جهت انجام آزمایش، ابتدا از هر نوع مخلوط سه نمونه به مدت ۵ ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرند. نتایج عمق شیار در مخلوط‌های آسفالتی داغ و مخلوط‌های آسفالتی گرم در صورت استفاده از درصد‌های مختلف نانورس در شکل (۵) آورده شده است. باتوجه به نتایج نشان‌داده‌شده در شکل (۵)، با افزودن نانوذرات رس از عمق شیار مخلوط‌های کاسته می‌شود که روند این کاهش عمق شیار با مقاومت مارشال مخلوط‌های آسفالتی هماهنگی خوبی دارد.

گرفت که وجود آسفالتن-بی در نمونه‌های قیری باعث افزایش فاکتور شیار شدگی شده است. این موضوع به خاطر اثرات کریستالیزه شدن نمونه‌های قیر بعد از افزودن آسفالتن-بی که یک نوع واکنس است، می‌باشد. این پدیده منجر به سخت‌تر شدن قیر و افزایش مدول سختی قیر در دمای بالا می‌شود. از اینرو افزودن آسفالتن-بی باعث بالا بردن مقاومت شیار شدگی نمونه‌های قیری شده است. در تحقیقات دیگری نیز که نانورس به همراه یک ماده دیگر برای افزایش مقاومت شیارشدگی استفاده شده بود، مشخص شده بود که افزایش نانورس تا ۶ درصد به مخلوط‌های آسفالتی باعث بهبود خصوصیات مقاومت شیارشدگی آسفالت می‌گردد (Ameri et al. 2018, Ziari et al. 2019). در تحقیقی که عامری و همکاران انجام داده بودند دریافتند که در صورت افزایش نانو رس تا ۶ درصد مقاومت شیارشدگی قیر نسبت به قیر اولیه بهبود می‌یابد (Ameri et al. 2018). زیاری و همکاران نیز دریافتند که استفاده از ۶ درصد نانو رس می‌تواند بر اثرات منفی جوانساز بر مقاومت شیارشدگی قیر غلبه کند (Ziari et al. 2019). در این تحقیق نیز اثبات شد که در نمونه‌های قیری در هر دو مخلوط HMA و WMA افزایش ۶ درصد نانو رس



شکل ۵. مقدار عمق شیار شدگی مخلوط‌های حاوی نانو رس

رس به مخلوط‌های آسفالتی گرم و مخلوط‌های آسفالتی داغ به ترتیب باعث کاهش ۶۱ و ۵۸ درصدی عمق شیار مخلوط نسبت به شرایط بدون استفاده از نانو رس شده است. همان‌طور که از نتایج شکل ۵ پیداست، در نمونه‌های مخلوط آسفالتی گرم و داغ نیز با افزودن ۶ درصد نانو رس کاهش چشمگیری در عمق شیار مخلوط بدست آمده است. این در حالی است که در تحقیقی که توسط زیاری و همکارانش نیز

اضافه کردن آسفالتن-بی که به عنوان یک افزودنی مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم است و دمای تولید مخلوط‌های آسفالتی را کاهش می‌دهد و باعث افزایش مقاومت شیارشدگی می‌گردد. این افزایش مقاومت را می‌توان ناشی از سازگاری قیر حاوی نانورس و آسفالتن-بی و فرآیند کریستالیزه شدن واکنس در قیر در دماهای زیر نقطه ذوب واکنس توجیه کرد. باتوجه به نتایج به دست آمده در شکل (۶)، افزودن ۶ درصد نانو

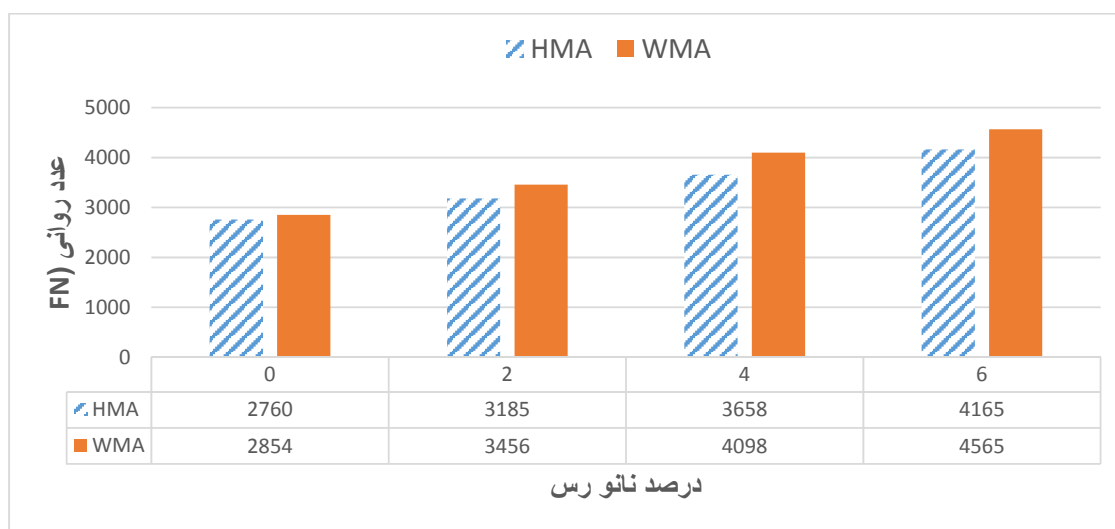
دارای عدد روانی بالاتری هستند و این نشان دهنده مقاومت شیارشدگی بیشتر این نوع مخلوطها است. پس می توان نتیجه گرفت که افزودن آسفالتن-بی به مخلوط آسفالتی نقش مثبتی در بالا بردن مقاومت شیارشدگی مخلوطهای آسفالتی دارد. از طرفی با افزایش درصد نانورس، در مخلوطهای آسفالتی گرم و همچنین مخلوطهای آسفالتی داغ مقدار عدد روانی افزایش پیدا کرده است. این امر نشان دهنده تأثیر مثبت افزودن نانورس برای افزایش مقاومت شیارشدگی در مخلوطهای آسفالتی داغ و گرم است. در شکل (۷) رابطه بین نتایج آزمایش DSR (فاکتور شیارشدگی) و مقدار عدد روانی در مخلوطهای آسفالتی داغ و گرم نشان داده شده است. در شکل (۸) نیز رابطه بین نتایج آزمایش DSR (فاکتور شیارشدگی) و مقدار عمق شیار در مخلوطهای آسفالتی گرم و داغ نشان داده شده است. همانطور که در شکل های ۷ و ۸ مشاهده می شود با توجه به R2 یا، از لحاظ آماری رابطه بسیار خوبی بین پارامتر فاکتور شیارشدگی در قیر و مقاومت شیارشدگی مخلوطهای آسفالتی وجود دارد. بنابراین، می توان نتیجه گرفت که با استفاده از آزمایش های قیر در دمای بالا با استفاده از دستگاه DSR و تعیین فاکتور شیارشدگی، می توان تخمین مناسبی از مقاومت شیارشدگی مخلوطهای آسفالتی انجام داد. همانطور که در شکل های ۷ و ۸ نشان داده شده است، ارتباط آماری در مخلوطهای آسفالتی داغ بهتر (با توجه به R2 بالاتر) از مخلوطهای آسفالتی گرم می باشد.

صورت گرفته بود، افزودن ۶ درصد نانو رس بیشترین کارایی را در افزایش مقاومت شیارشدگی مخلوطهای آسفالتی حاوی RAP با جوانساز، داشته است (Ziari et al. 2019). با توجه به شکل ۵، در درصدهای ثابت نانو رس، عمق شیار مخلوطهای آسفالتی گرم به مراتب کمتر از مخلوطهای داغ است. این نشان دهنده اثر مثبت ماده آسفالتن بی بر مقاومت شیار شدگی مخلوطهای آسفالتی است. از آنجایی که آسفالتن بی یک ماده شیمیایی است همانطور که در تحقیق سال ۲۰۲۳ Shukija بیان شد، مواد شیمیایی مخلوط آسفالتی گرم تأثیر چشمگیری بر عملکرد مخلوطهای آسفالتی دارند (Sukhija et al., 2023).

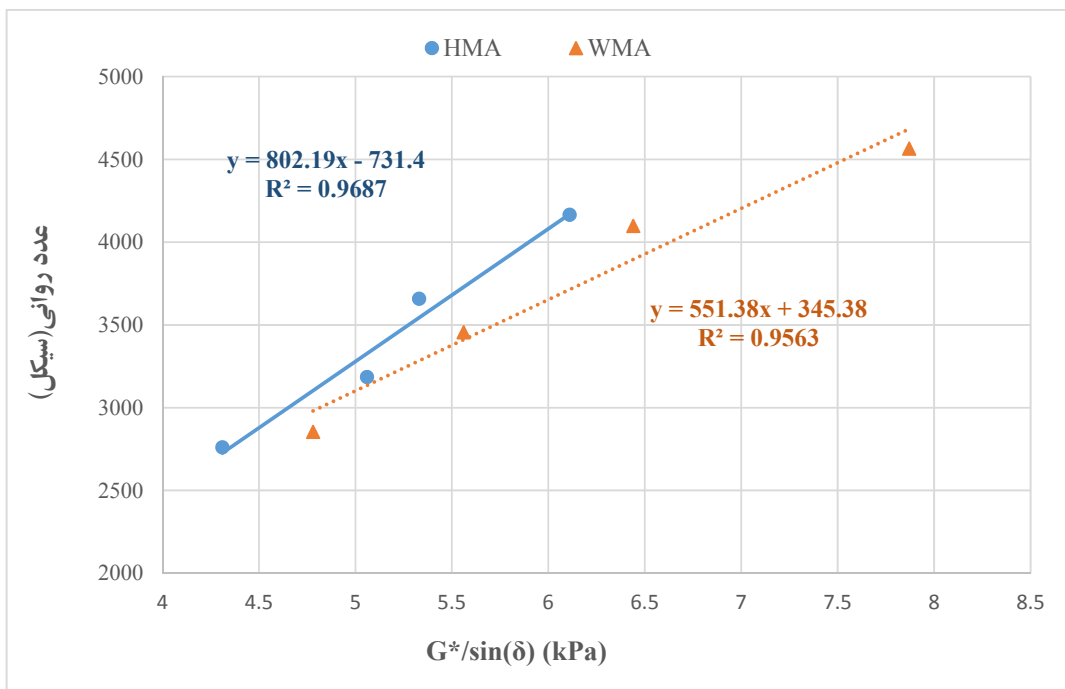
### آزمایش خزش دینامیکی

بر اساس آزمایش خزش دینامیکی که در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد صورت گرفت، نتایج زیر بدست آمد. با استفاده از عدد روانی، مقاومت مخلوطهای آسفالتی مختلف در برابر پدیده شیارشدگی با هم مقایسه گردید. هر چه مقدار عدد روانی در یک مخلوط آسفالتی بیشتر باشد نشان دهنده مقاومت بیشتر در برابر تغییر شکلهای ماندگار می باشد. شکل (۶)، نمودار مربوط به عدد روانی بدست آمده از آزمایش خزش دینامیکی را در مخلوطهای آسفالتی داغ و گرم نشان می دهد.

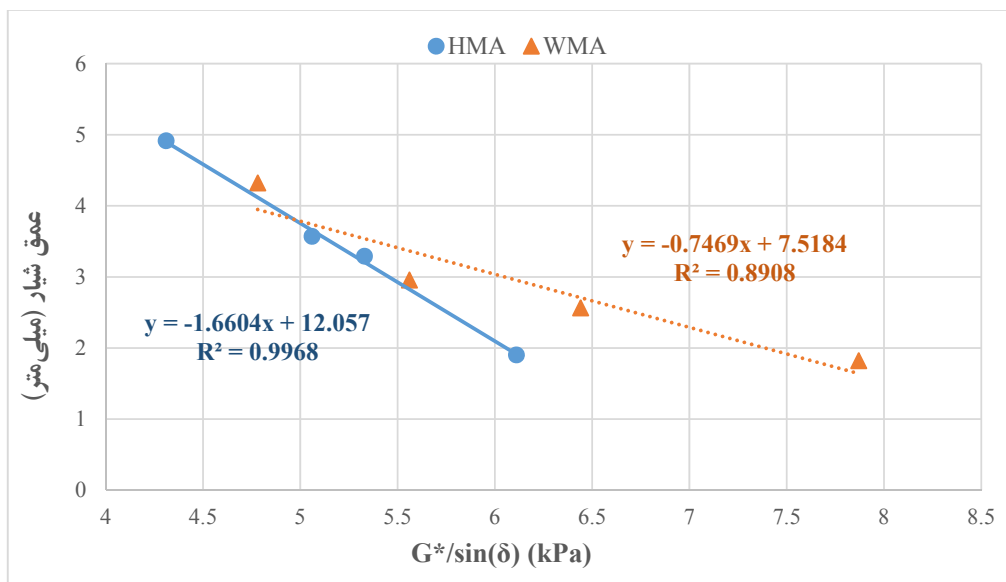
همانطور که در شکل (۷) مشاهده می شود، نتایج آزمایش خزش دینامیکی نیز همانند آزمایش شیار چرخ نشان دهنده این است که مخلوطهای آسفالتی گرم نسبت به مخلوطهای داغ



شکل ۶. مقدار عدد روانی مخلوطهای حاوی نانو رس



شکل ۷. رابطه بین فاکتور شیارشدگی نمونه‌های قیری با عدد روانی مخلوط‌های آسفالتی داغ و گرم



شکل ۸. رابطه بین فاکتور شیارشدگی نمونه‌های قیری با عمق شیار مخلوط‌های آسفالتی داغ و گرم

### ۵- نتیجه گیری

در آزمایش DSR افزایش پیدا می‌کند. با افزودن ۶ درصد نانورس به قیر خالص و قیر خالص حاوی آسفالتن-بی مقدار فاکتور شیارشدگی در شرایط پیرشدگی RTFO به ترتیب دچار افزایش ۴۲ و ۶۵ درصدی شده است.

به‌کارگیری نانورس به‌عنوان ماده افزودنی به قیر اثر قابل‌ملاحظه‌ای روی استحکام مارشال و افزایش روانی این نوع مخلوط‌ها نسبت به مخلوط‌های شاهد داشته است. -با افزایش درصد نانورس به قیر خالص و قیر خالص حاوی آسفالتن- بی مقدار فاکتور شیارشدگی ( $G^*/\sin(\delta)$ )

مخلوط‌های آسفالتی HMA و WMA به طور قابل توجهی در برابر پدیده شیارشدگی بهبود پیدا می‌کند. با مقایسه نتایج این تحقیق مشخص شد که از نظر آماری رابطه بسیار خوبی بین پارامتر فاکتور شیارشدگی در قیر و مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی وجود دارد.

-افزودن آسفالتن -بی باعث بالابردن مقاومت شیارشدگی نمونه‌های قیری شده است.  
-باتوجه به نتایج آزمایش‌های ویل تراک و خزش دینامیکی مشخص گردید با افزایش انواع نانوذرات رس تا ۶٪ رفتار

#### ۶-مراجع

- باباگلی، رضوان (۲۰۲۳). ارزیابی آزمایشگاهی تاثیر افزودنی نیمه گرم بر عملکرد قیر و مخلوط آسفالتی حاوی ضایعات پلی پروپیلن و نانورس. *پژوهشنامه حمل و نقل*، ۲۰(۳)، ۴۴۲-۴۱۹. doi.org/10.22034/tri.2023.175433
- AASHTO T315-22, A. (2022). Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR). In *American Association of State and Highway Transportation Officials*.
- AASHTO T 324-17. (2017). AASHTO T 324-17: Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA). In *American Association of State Highway and Transportation Officials*. Vol. T 324-17.
- Abukhattala, M. E. (2006). The Relationship Between Marshall Stability, Flow and Rutting of the New Malaysian Hot-Mix Asphalt Mixtures. March, 74.
- Aljbouri, R. Q., & Albayati, A. H. (2023). Investigating the effect of nanomaterials on the Marshall properties and durability of warm mix asphalt. *Cogent Engineering*, 10(2). doi.org/10.1080/23311916.2023.2269640
- Ameri, M., Mohammadi, R., Vamegh, M., & Molayem, M. (2017). Evaluation the effects of nanoclay on permanent deformation behavior of stone mastic asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 156, 107-113. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.055
- Ameri, Mahmoud, Vamegh, Mostafa, Rooholamini, Hamed, Haddadi, Farshad, (2018). Investigating Effects of Nano/SBR Polymer on Rutting Performance of Binder and Asphalt Mixture, *Advances in Materials Science and Engineering*, 5891963. doi.org/10.1155/2018/5891963
- Bhat, F. S., & Mir, M. S. (2022). Study Investigating the Influence of Warm-Mix Asphalt Additives on Rutting and Fatigue Performance of Nano-Modified Asphalt Binders. *Transportation Research Record*, 2676(4), 719-731. doi.org/10.1177/03611981211064995
- Brûlé, B. (1996). Polymer-modified asphalt cements used in the road construction industry. Basic principles. *Transportation Research Record*, 1535, 48-53. doi.org/10.3141/1535-07
- Caputo, P., Abe, A. A., Loise, V., Porto, M., Calandra, P., Angelico, R., & Rossi, C. O. (2020). The role of additives in warm mix asphalt technology: An insight into their mechanisms of improving an emerging technology. *Nanomaterials*, 10(6), 1-17. doi.org/10.3390/nano10061202
- Daryaei, D. (2019). Performance evaluation of HMA containing RAP after modification of chemical -physical properties of recycled bitumen. Ph.D. thesis. *Iran University of Science and Technology*.
- Dekhli, S., Mokhtar, K. A., Hammoumm, F., & Bachir, D. S. (2015). Rheological Behaviour of Ethylene-Vinyl-Acetate (EVA) Modified Road Bitumen. *Journal of Applied Sciences*, 15(3), 444-455. doi.org/10.3923/jas.2015.444.455
- FAKHRI, M., & TOWFIGH, A. (2002). Evaluation of Rutting Distress for Asphalt Concrete Mixture Using Abaqus Program. *White 2002*, 1-10.
- Garba, R. (2002). Permanent Deformation Properties of Asphalt Mixtures. *Norwegian University of Science and Technology*.
- Ghile, D. B. (2006). Effects of nanoclay modification on rheology of bitumen and on performance of asphalt mixtures.
- Karimi, F., Mousavi, S. R., & Miri, M. (2024). On the effect of nano calcium carbonate on the flexibility and tensile-shear cracking resistance of greener WMA asphalt concretes containing RAP contents. *Case Studies in Construction Materials*, 20. doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03159
- Li, J., & Tang, F. (2023). Effects of two metal nanoparticles on performance properties of asphalt binder and stone matrix asphalt mixtures containing waste high density polyethelene. *Construction and Building Materials*, 401. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132787
- Pereira, R., Almeida-Costa, A., Duarte, C., & Benta, A. (2018). Warm mix asphalt: Chemical additives' effects on bitumen properties and limestone aggregates mixture compactibility. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11(3), 285-299. doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.10.005
- Quang Nguyen, & Baird, D. G. (2005). Process for Increasing the Exfoliation and Dispersion of Nanoparticles Into Polymeric Matrices Using

-Vamegh, M., Ameri, M., & Chavoshian Naeni, S. F. (2019). Performance evaluation of fatigue resistance of asphalt mixtures modified by SBR/PP polymer blends and SBS. *Construction and Building Materials*, 209.

**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.111**

-Zahid, A., Ahmed, S., & Irfan, M. (2022). Experimental investigation of nano materials applicability in Hot Mix Asphalt (HMA). *Construction and Building Materials*, 350.

**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128882**

-Zhang, R., Moshfeghi, A. R., Zhou, F., & Mishra, D. (Deb). (2023). Effect of chemical warm-mix additives on asphalt binder rheological and chemical properties in the context of aging. *Construction and Building Materials*, 393.

**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132061**

-Ziari, H., Moniri A., Norouzi N., The effect of nanoclay as bitumen modifier on rutting performance of asphalt mixtures containing high content of rejuvenated reclaimed asphalt pavement. *Petroleum Science and Technology*: Vol 37, No 17, **doi/metrics/10.1080/10916466.2018.1471489**

Supercritical Carbon Dioxide. *Virginia Polytechnic Institute and State University*.

-Rooholamini, H., Imaninasab, R., & Vamegh, M. (2017). Experimental analysis of the influence of SBS/nanoclay addition on asphalt fatigue and thermal performance. *International Journal of Pavement Engineering*.

**doi.org/10.1080/10298436.2017.1321414**

-Sedaghat, B., Taherian, R., Hosseini, S. A., & Mojtaba Mousavi, S. (2020). Rheological properties of bitumen containing nanoclay and organic warm-mix asphalt additives. *Construction and Building Materials*, 243.

**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118092**

-Sukhija, Nikhil Saboo, Agnivesh Pani, (2023). Effect of warm mix asphalt (WMA) technologies on the moisture resistance of asphalt mixtures, *Construction and Building Materials*, Vol. 369.

**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130589**

-Taher, M. N. M., Aman, M. Y., Nazir, M. A. M., & Bujang, H. (2022). Dynamic Creep Performance of Hot Mix Asphalt Mixture Incorporating Fibre. *International Journal of Integrated Engineering*, 14(5), 49–56.

**doi.org/10.30880/ijie.2022.14.05.005**

# Evaluation of Rutting Resistance of Asphalt Binder and Hot Mix Asphalt and Warm Mix Asphalt Containing Nano Clay and Asphaltene-B

*Mostafa Vamegh, Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran.*

*Daryoosh Daryae, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Malayer University, Malayer, Iran.*

*Hamed Rooholamini, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Hormozgan University, Hormozgan, Iran.*

*E-mail: d.daryae@malayeru.ac.ir*

Received: January 2025- Accepted: April 2025

## **ABSTRACT**

In addition to reducing the service life of asphalt pavements, failures in asphalt pavements lead to decreased safety and user dissatisfaction. The high consumption of energy and the emission of pollution during the construction of asphalt pavements have prompted researchers to develop improved asphalt mixtures. In this research, to address the issues associated with ordinary pure bitumen and enhance its performance, hot asphalt mixtures (HMA) and warm asphalt mixtures (WMA) incorporating Cloisite 15A nano clay, as well as an organic additive called Asphaltan-B, were utilized in the hot asphalt mixture. Performance tests of bitumen were conducted using a dynamic shear rheometer (DSR) at 64 degrees Celsius, while performance tests of asphalt mixtures, including wheel track and dynamic creep tests, were performed at 50 degrees Celsius on samples containing 0, 2, 4, and 6% nano clay. The results from the dynamic shear rheometer test indicated that the addition of nano clay to pure bitumen increases the rutting factor ( $G^*/\text{Sin}\delta$ ), thereby enhancing the rutting resistance of the bitumen. Furthermore, the results demonstrated that incorporating nano clay into bitumen improves the rutting resistance in both HMA and WMA asphalt mixtures, resulting in reduced rut depth. The findings reveal a strong statistical correlation between the bitumen results and the asphalt mixture tests.

**Keywords:** Warm Mix Asphalt, Rutting, Nano Clay, Asphaltene B