

## ارزیابی آزمایشگاهی تاثیر ترکیب زینک نانو اکسید و فیبر بازالت بر عملکرد قیر و مخلوط آسفالتی

مقاله علمی - پژوهشی

حامین چوبدار، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران  
امین فرج الهی، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران  
علیرضا عاملی\*، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران  
\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: ameli@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۵

صفحه ۳۶۸-۳۵۵

### چکیده

به منظور بهبود کیفیت عملکرد جاده‌ها و رفع مشکل خرابی در روسازی آسفالتی معمولی در زمان سرویس‌دهی، در این تحقیق از یک عامل آلومینیت ۵،۳ درصد برای اصلاح سطح نانو اکسید روی و تهیه آسفالت اصلاح شده کامپوزیت با نانو اکسید و فیبر بازالت<sup>۱</sup> (BF) به عنوان اصلاح کننده استفاده شد. ابتدا، عملکرد اولیه انواع مختلف مورد بررسی قرار گرفت. سپس، یک آزمایش رئولوژی برشی دینامیکی برای تجزیه و تحلیل عملکرد شیارشدگی در دمای بالا آسفالت اصلاح شده با کامپوزیت در دماها و فرکانس‌های مختلف انجام شد. سپس با استفاده از آزمون سختی خزشی خمشی، خواص دمای پایین آسفالت اصلاح شده با کامپوزیت بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که عملکرد پیری آسفالت اصلاح شده با کامپوزیت نانو ZnO/BF پس از افزودن الیاف به آسفالت اصلاح شده به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد. میانگین نسبت از دست دادن جرم تنها ۰،۱۹۲٪ است. در دمای ۴۶ درجه سانتی‌گراد، ضریب شیارشدگی آسفالت اصلاح شده با کامپوزیت ۶۲،۳٪ افزایش یافت. منحنی اصلی فرکانس همیشه در بالاترین موقعیت قرار دارد و به افزایش خود ادامه می‌دهد، که نشان دهنده بهبود قابل توجهی در عملکرد شیارشدگی در دمای بالا آسفالت اصلاح شده با کامپوزیت است. در دمای ۲۴ درجه سانتی‌گراد، مقدار S مدول سختی خزش آسفالت اصلاح شده با کامپوزیت ۲۴،۹٪ افزایش یافت. علاوه بر این، هیچ اثر آشکاری از بهبود دمای پایین وجود ندارد، اما دامنه تغییرات شیب مماس خزش M آسفالت اصلاح شده پس از پیری کاهش می‌یابد، که بیشتر نشان می‌دهد که افزودن یک اصلاح کننده می‌تواند تأثیر پیری روی آسفالت را کاهش دهد.

واژه‌های کلیدی: مهندسی راه، قیر اصلاح شده کامپوزیت، فیبر بازالت، نانو زینک اکسید، مخلوط آسفالتی

### ۱- مقدمه

نسبت ترافیک کانالیزه شده سنگین، روسازی آسفالت معمولی در طول دوره خدمات خود آسیب می‌بیند، که باعث می‌شود کیفیت خدمات جاده به سرعت کاهش یابد. این یکی از مشکلات اصلی در ساخت سیستم‌های بزرگراهی مدرن با کیفیت در عصر جدید است. بنابراین، بهبود آسفالت برای

با توسعه سریع سیستم حمل و نقل بزرگراهی، کل مسافت پیموده شده بزرگراه ملی سال به سال در حال افزایش است. روسازی آسفالت مزایای ساخت و ساز ساده و رانندگی راحت را دارد و بیش از ۹۰ درصد بزرگراه‌ها در دنیا با آسفالت روکش شده‌اند. با توجه به تغییرات پیچیده محیطی و افزایش

به طور قابل توجهی ویسکوزیته ملات قیر را افزایش دهد، مانع از روانی موثر قیر شود و تا حدودی احتمال ترک خوردگی ملات قیر را کاهش دهد و در نتیجه مقاومت آن در برابر ترک در دمای پایین را بهبود بخشد. این پایه و اساس نظری را برای محبوبیت و کاربرد BF در روسازی آسفالت فراهم می‌کند (Vamsikrishna et al, 2019; Abdelsalam et al, 2020). به طور خلاصه، برخلاف مخلوط‌های آسفالتی معمولی، افزودن نانوذرات می‌تواند عملکرد مخلوط آسفالت را در دماهای بالا و مقاومت در برابر رطوبت به طور قابل توجهی بهبود بخشد. BF برای تقویت مقاومت ضد ترک و خستگی مخلوط آسفالتی به آسفالت اضافه می‌شود و در نتیجه دوام مصالح روسازی افزایش می‌یابد. با این حال، در نتایج تحقیقات اخیر، مرور بر ادبیات کمی در مورد افزودن الیاف چند بعدی، چند مقیاسی و نانومواد به قیر زمینه وجود دارد. بنابراین، نانو اکسید روی و BF به عنوان افزودنی‌های کامپوزیت برای اصلاح آسفالت در این تحقیق استفاده می‌شود. نانو ZnO و BF به عنوان افزودنی‌های ترکیبی برای اصلاح قیر خالص استفاده می‌شوند. عملکرد آسفالت اصلاح‌شده با ترکیب نانو ZnO/BF در دماهای بالا و پایین ارزیابی می‌شود.

## ۲- مواد و مصالح

### ۲-۱- قیر

در این تحقیق از قیر ۶۰-۷۰ از شرکت نفت پاسارگاد استفاده می‌کند. نتایج خصوصیات فیزیکی قیر در جدول ۱ آورده شده است.

### ۲-۲- نانو زینک اکسید

در این تحقیق از نانو اکسید روی (nano-ZnO) استفاده شد. شکل ذرات نانو اکسید روی تقریباً کروی است و قطر ذرات حدود ۳۰ نانومتر است. ویژگی‌های مورفولوژیکی نانومواد را دارد و جزو نانومواد استاندارد است. خصوصیات فنی آن در جدول ۲ نشان داده شده است.

بهبود عملکرد جاده آن به یک جهت تحقیقاتی مهم در زمینه حمل و نقل تبدیل شده است. کارایی منحصر به فرد و برجسته نانو اکسید روی باعث می‌شود عملکرد آسفالت اصلاح شده با نانو اکسید روی با سایر آسفالت‌های اصلاح شده غیرقابل مقایسه باشد. آسفالت اصلاح شده با نانو اکسید روی دارای مدول پیچیده کمتر و زاویه فاز بالاتر است که نشان می‌دهد آسفالت دارای مقاومت عالی در برابر اکسیداسیون حرارتی است و افزودنی نانو روی می‌تواند به طور قابل توجهی خواص دمای بالا ماتریس را بهبود بخشد. افزایش درصد نانو اکسید روی باعث می‌شود که پایداری مارشال، استحکام کششی غیرمستقیم، چسبندگی کششی و انرژی شکست مخلوط آسفالت به وضوح افزایش یابد و میزان پوشش آسفالت بر روی سنگدانه‌ها افزایش یابد. نانو ZnO دارای یک واکنش اتصال متقابل با آسفالت است و نانو روی دارای تغییرات فیزیکی و شیمیایی روی آسفالت پایه است. در مقایسه با سایر آسفالت‌های اصلاح شده، آسفالت اصلاح شده با نانو اکسید روی عملکرد جاده‌ای تاثیر برجسته ای دارد، اما افزودن تنها اصلاح کننده‌های نانو اکسید روی برای بهبود عملکرد مخلوط آسفالت در دمای پایین قابل توجه نیست. مطالعه نانو اکسید روی در آسفالت و چگونگی بهبود خواص دمای پایین آن و بررسی خواص دمای بالا آن یک مشکل اصلی است (Dong et al, 2020; Tao et al, 2022; Mansour et al, 2021). به دلیل استحکام بالا و حفاظت از محیط زیست سبز، تحقیقات مربوط به افزودنی BF مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است (Gu et al, 2022; Celauro et al, 2018). هنگامی که درصد BF ۲٪ و طول ۹ میلی‌متر است، آسفالت اصلاح شده با BF ظرفیت اتلاف تنش را در دماهای پایین تا حد معینی افزایش می‌دهد و خواص رئولوژیکی بهتری را نشان می‌دهد و BF به صورت سه بعدی در ملات قیر توزیع می‌شود که بهتر است. در مقایسه با آسفالت معمولی، افزودن BF مقاومت انجماد- ذوب نمونه‌های پیر را تا حد زیادی کاهش می‌دهد، به طور موثری از پیری آسفالت جلوگیری می‌کند و مقاومت در برابر دماهای پایین و خرابی رطوبتی را بهبود می‌بخشد (Zhao et al, 2014; Fu et al, 2016; Yan et al, 2019). BF می‌تواند به طور موثر ترکیب سنگدانه معدنی و قیر را بهبود بخشد. افزودن مقدار کمی الیاف می‌تواند

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی قیر

نتایج	واحد	تست
۶۵,۲	دهم میلی متر	درجه نفوذ
۱۳,۱	سانتی متر	شکل پذیری (دمای ۵)
۱۲۸,۴	سانتی متر	شکل پذیری (دمای ۱۵)
۴۸,۳	درجه سانتی گراد	نقطه نرمی
۲۷۶	درجه سانتی گراد	نقطه اشتعال
۱,۲۰۳	گرم بر مترمکعب	وزن مخصوص
-۰,۲۶۲	درصد	تغییر کیفیت

جدول ۲. خصوصیات نانو زینک اکسید

عملکرد	ظاهر	درصد خلوص	سطح مخصوص ویژه	وزن مخصوص
نانو زینک اکسید	پودر سفید	۹۹,۷	۵۷	۰,۹۶

### ۳-۲- فیبر بازالت

الیاف بازالت (BF) مورد استفاده یک الیاف با کیفیت بالا است. به صورت خطی توزیع شده است، سطح صاف است و تغییر شکل و اعوجاج آن آسان نیست. پارامترهای شاخص عملکرد مرسوم در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳. خصوصیات فیبر بازالت

عملکرد	طول (میلی متر)	قطر (میلی متر)	وزن مخصوص (گرم بر سانتی متر مکعب)	طول شکست (%)	مدول الاستیسیته	مقاومت کششی
بازالت	۷	۱۳	۲,۹۲	۲,۹۶	۹۴	۳۴۸۰

### ۴-۲- آماده سازی قیر اصلاح شده کامپوزیت

قیر در یک ظرف خشک کن الکتریکی داغ قرار داده شد و برای آگیری در دمای ۱۸۰ درجه سانتی گراد تا ذوب شدن حرارت داده شد. سپس ۵۰۰ گرم از قیر به سرعت در کوره حرارتی دستگاه برشی پرسرعت وزن شد تا روانی آن حفظ شود. دما برای گرم کردن روی ۱۵۰ درجه سانتی گراد تنظیم شد. در جریان گرمایش، اختلاط مداوم قیر خالص با میله شیشه‌ای می‌تواند از گرم شدن موضعی و پیری قیر جلوگیری کند. ابتدا ۴ درصد از نانو اکسید روی خشک اصلاح شده با سطح به آرامی به صورت دسته‌ای به قیر اضافه شد و سپس از دستگاه برشی پرسرعت برای برش آهسته به مدت حدود ۱۵ دقیقه استفاده شد. هنگامی که پودر سفید در قیر به طور یکنواخت پراکنده شد، ۲٪ از BF خشک به آرامی اضافه شد و لازم بود به طور مداوم هم زدن دستی انجام شود تا اطمینان حاصل شود که در طول فرآیند افزودن به طور یکنواخت پراکنده می‌شود. سرعت برش در ۵۰۰۰  $r/min$  نگه داشته شد. سرعت برش به مدت ۶۰ دقیقه قطع شد، سپس آن را در کوره خشک کن انفجاری الکتروترمال با دمای ۱۸۰ درجه سانتی گراد قرار دادند تا متورم و توسعه یابد تا سطح آسفالت صاف و بدون حباب شود. به این ترتیب، آسفالت اصلاح شده با ترکیب نانو اکسید روی و BF تهیه شد.

قیر در یک ظرف خشک کن الکتریکی داغ قرار داده شد و برای آگیری در دمای ۱۸۰ درجه سانتی گراد تا ذوب شدن حرارت داده شد. سپس ۵۰۰ گرم از قیر به سرعت در کوره حرارتی دستگاه برشی پرسرعت وزن شد تا روانی آن حفظ شود. دما برای گرم کردن روی ۱۵۰ درجه سانتی گراد تنظیم شد. در جریان گرمایش، اختلاط مداوم قیر خالص با میله شیشه‌ای می‌تواند از گرم شدن موضعی و پیری قیر جلوگیری کند. ابتدا ۴ درصد از نانو اکسید روی خشک اصلاح شده با سطح به آرامی به صورت دسته‌ای به قیر اضافه شد و سپس از دستگاه برشی پرسرعت برای برش آهسته به مدت حدود ۱۵ دقیقه استفاده شد. هنگامی که پودر سفید در قیر به طور یکنواخت پراکنده شد، ۲٪ از BF خشک به آرامی اضافه شد و لازم بود به طور مداوم هم زدن دستی انجام شود تا اطمینان حاصل شود که در طول فرآیند افزودن به طور یکنواخت پراکنده می‌شود. سرعت برش در ۵۰۰۰  $r/min$  نگه داشته شد. سرعت برش به مدت ۶۰ دقیقه قطع شد، سپس آن را در کوره خشک کن انفجاری الکتروترمال با دمای ۱۸۰ درجه سانتی گراد قرار دادند تا متورم و توسعه یابد تا سطح آسفالت صاف و بدون حباب شود. به این ترتیب، آسفالت اصلاح شده با ترکیب نانو اکسید روی و BF تهیه شد.

## ۳- برنامه آزمایشگاهی

## ۳-۱- آزمایش لعاب نازک چرخشی

آزمایش پیری قیر  $50 \pm 0.5$  گرم، آسفالت اصلاح شده با نانو اکسید روی و آسفالت اصلاح شده با کامپوزیت نانو اکسید روی/BF با استفاده از کوره فیلم دوار قیر انجام شد. دمای فر به مدت ۸۵ دقیقه در دمای  $163 \pm 0.5$  درجه سانتی‌گراد نگهداری شد. تمام مراحل تست باید در ۷۲ ساعت تکمیل شود. عملکرد اساسی سه نوع آسفالت پس از پیری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و خواص ضد پیری آسفالت اصلاح شده با ترکیب مقایسه و ارزیابی شد.

## ۳-۲- بررسی خصوصیات رئولوژیکی قیر در دمای بالا

رفتار رئولوژیکی آسفالت با استفاده از یک رئومتر برشی دینامیکی مورد بررسی قرار گرفت. نمونه ای به قطر ۲۵ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر در آزمایش استفاده شد. سطح کرنش انتخاب شده برای اسکن دما ۱۰ درصد و فرکانس برشی ۱۰ راد بر ثانیه بود. روند مدول برشی پیچیده  $G^*$ ، زاویه فاز  $\delta$ ، و ضریب شیارشدگی  $G^*/\sin\delta$  در دماهای مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. عملکرد قیر در دمای بالا، آسفالت اصلاح شده با نانو اکسید روی و آسفالت اصلاح شده با کامپوزیت نانو اکسید روی/BF قبل و بعد از پیری مورد مطالعه قرار گرفت. برای انتخاب سطح کرنش ۱٪ از اسکن فرکانس استفاده شد و محدوده فرکانس بین ۰٫۱ تا ۱۰۰ راد بر ثانیه بود. روند  $G^*$  در فرکانس‌های مختلف زاویه‌ای مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و توانایی ضد تغییر شکل سه نوع آسفالت قبل و بعد از پیری بیشتر مورد مطالعه قرار گرفت. بر اساس تئوری اصل هم ارزی زمان و دما، قانون تغییر سه نوع آسفالت  $G^*$  با منحنی اصلی ویسکوالاستیسیته مقایسه شد.

## ۳-۳- بررسی خصوصیات رئولوژیکی قیر در دمای پایین

یک رئومتر خمشی در دمای پایین برای بررسی خواص دمای پایین به کار گرفته شد. آماده سازی آسفالت برای ۱۲۷ میلی‌متر انجام شد. عرض آن ۱۲٫۷ میلی‌متر و ضخامت آن

۶٫۳۵ میلی‌متر بود. نمونه‌ها به مدت ۴ دقیقه در یک محیط سرد تحت بارگذاری تنش مداوم قرار گرفتند. سپس، مقدار مدول سفتی خزش  $S$  و مقدار شیب مماس خزش  $m$  در سه نوع نمونه خمشی تراپکولار به ترتیب ثبت شد. برای اطمینان از دقیق بودن داده‌ها، سفتی خزش،  $S \leq 300 \text{ Mpa}$ ، و نرخ خزش،  $m \geq 0.3$  در ۶۰ ثانیه، در مشخصات مورد نیاز بود. مقایسه و تجزیه و تحلیل نتایج تجربی برای ارزیابی خواص دمای پایین آسفالت زمینه، آسفالت اصلاح شده با نانو اکسید روی و آسفالت کامپوزیت نانو ZnO/BF قبل و بعد از پیری انجام شد.

## ۴- نتایج و بحث

## ۴-۱- آنالیز عملکرد پیری

آسفالت ماتریکس، آسفالت اصلاح شده با نانو اکسید روی و آسفالت اصلاح شده با کامپوزیت نانو اکسید روی/BF به ترتیب در معرض پیری کوتاه مدت RTFOT<sup>۲</sup> قرار گرفتند. نتایج مقایسه در جدول ۴ نشان داده شده است. همانطور که در جدول ۴ نشان داده شده است، نسبت نفوذ باقیمانده آسفالت اصلاح شده به ترتیب ۱٫۷٪ و ۳٫۴٪ افزایش یافته است، نسبت شکل پذیری باقیمانده به ترتیب ۳٫۸٪ و ۱٫۷٪ افزایش یافته است، افزایش نقطه نرم شدن ۰٫۵ و ۰٫۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته است. به ترتیب و تغییر جرم به ترتیب ۰٫۲۷٪ و ۰٫۰۷۲٪ کاهش یافت. هر چه نسبت نفوذ باقیمانده آسفالت پس از پیری بیشتر باشد، افزایش نقطه نرم شدن و تغییر جرم کمتر باشد، عملکرد ضد پیری آسفالت بهتر است. این نشان می‌دهد که افزودن دو ماده افزودنی باعث پیری آسفالت شده و به طور موثری تخریب اجزای سبک در قیر را کاهش می‌دهد. هر دو آسفالت اصلاح شده مقاومت در برابر حرارت بهتری نسبت به قیر دارند. همچنین ثابت می‌کند که آسفالت اصلاح شده با کامپوزیت نانو ZnO/BF قوی‌ترین توانایی ضد پیری را دارد.

جدول ۴. نتایج آنالیز فیزیکی قیر

نوع قیر	درجه نفوذ	شکل پذیری	نقطه نرمی	کیفیت	نسبت نفوذ باقیمانده (%)	نسبت شکل پذیری باقیمانده (%)	افزایش نقطه نرمی	کاهش کیفیت
قیر پایه	۶۴.۷	۱۳.۵	۴۷.۶	۴۹.۸۷۱	۷۴.۱	۸۴.۲	۶.۴	۰.۲۶۲
قیر اصلاح شده نانو اکسید	۶۰.۳	۲۴.۷	۵۳.۶	۵۰.۰۴۱	۷۵.۱	۸۷.۵	۵.۸	۰.۲۳۵
قیر اصلاح شده نانو اکسید/فیبر بازالت	۵۳.۱	۲۲.۱	۵۷.۹	۵۰.۲۱۴	۷۶.۵	۸۶.۳	۵.۵	۰.۱۹۱

#### ۴-۲- آنالیز رئومتر برش دینامیکی

اما روند کاهش با افزودن فیبر بازالت بیشتر می‌باشد. با توجه به نتایج، در فرایند پیرشدگی، اضافه نمودن فیبر بازالت به قیر اصلاح شده سبب بهبود مقاومت در برابر پیرشدگی قیر می‌گردد. براساس نتایج در شکل ۶، نتایج پارامتر پیرشدگی قبل و بعد از پیری بهتر قابل بررسی می‌باشد. با افزایش دما، پارامتر شیارشدگی قیر خالص و قیر پیر شده روند کاهش یکنسانی دارند. پارامتر شیارشدگی در دمای محیطی ۴۶ درجه، روند کلی پارامتر شیارشدگی به طور ناگهانی کاهش می‌یابد. اما سه نمودار قیر بعد از دمای ۶۴ درجه تغییر عددی کمی پیدا می‌کنند و به تدریج هم پوشانی پیدا می‌کنند. دلیل آن این است که نسبت نسبی رفتار ویسکوز با افزایش دمای آزمایش افزایش می‌یابد و اجزای چسبناک افزایش می‌یابند در حالی که اجزای الاستیک به تدریج کاهش می‌یابند. تحت شرایط دمایی یکسان، فاکتور شیاردار  $G^*/\sin\delta$  از بزرگ به کوچک، آسفالت اصلاح شده با نانو ZnO/BF < آسفالت اصلاح شده با نانو ZnO < آسفالت زمینه است. اگر آسفالت مقدار  $G^*/\sin\delta$  بزرگی را نشان دهد، نشان می‌دهد که آسفالت دارای مقاومت تغییر شکل در دمای بالا است، که می‌تواند به طور مؤثرتری در برابر بار گرانشی ترافیک مقاومت کند به طوری که پدیده تغییر شکل شیار به آرامی ظاهر می‌شود یا به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. پیری RTFOT ضریب شیارشدگی آسفالت را بزرگتر می‌کند. تجزیه و تحلیل دلایل نشان می‌دهد که پیری ترکیب آسفالت را تغییر می‌دهد و تبدیل تدریجی اجزای سبک به اجزای سنگین باعث می‌شود که آسفالت اصلاح شده کامپوزیت نانو ZnO/BF سخت تر شود. هنگامی که روسازی آسفالت تحت شرایط دمایی بالا تحت ترافیک سنگین قرار

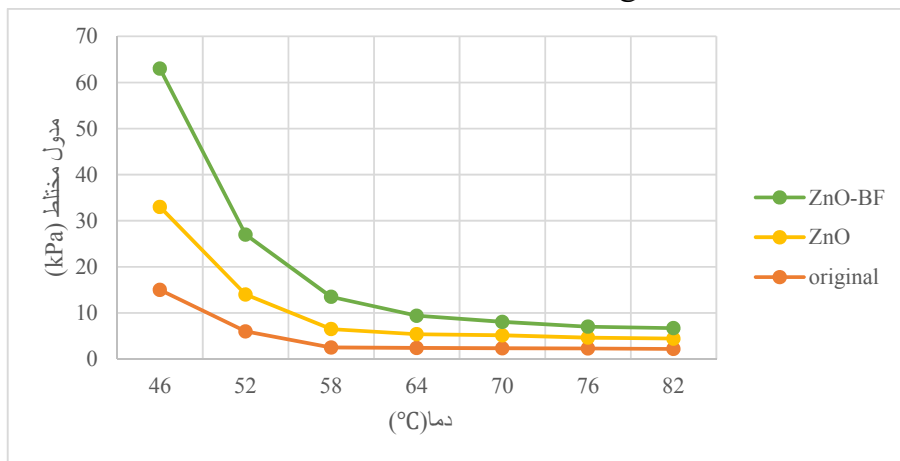
فاکتور شیارگی  $G^*/\sin\delta$  برای پیش‌بینی خواص ویسکوالاستیک آسفالت استفاده می‌شود. تست سه نوع آسفالت قبل و بعد از پیری در دمای ۴۶ تا ۸۲ درجه سانتیگراد انجام شد. فاصله دما ۶ درجه سانتیگراد بود. نتایج در شکل‌های ۱-۶ نشان داده شده است. هنگامی که شرایط دما نسبتاً پایین است، مدول برشی پیچیده سه نوع آسفالت بزرگتر است، اما مقدار زاویه فاز در همان دما کوچکتر است، به طوری که آسفالت الاستیک تر باشد. در دماهای پایین، و ظرفیت قوی تری برای مقاومت در برابر تغییر شکل دارد. با افزایش دما، مدول برشی مختلط کاهش و زاویه فاز افزایش یافت. نتایج نشان می‌دهد که ویسکوزیته قیر در دمای بالا بیشتر است و مقاومت شیارشدگی مقداری کاهش می‌یابد. بعد از افزودن نانوزینک اکسید و فیبر بازالت، در شرایط دمایی یکسان، مدول برشی مختلط نمونه‌ها افزایش یافت و زاویه فاز کاهش یافت. اما افزایش مدول مختلط و کاهش زاویه فاز قیر اصلاح شده کامپوزیتی بیشتر از قیر حاوی نانو زینک اکسید می‌باشد. بنابراین افزودن نانو زینک اکسید و فیبر بازالت سبب افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط می‌گردد.

بعد از پیرشدگی، مقادیر مدول برجهندگی و زاویه فاز قیرهای اصلاح شده تقریباً برابر با مقادیر قبل از پیرشدگی می‌باشد.

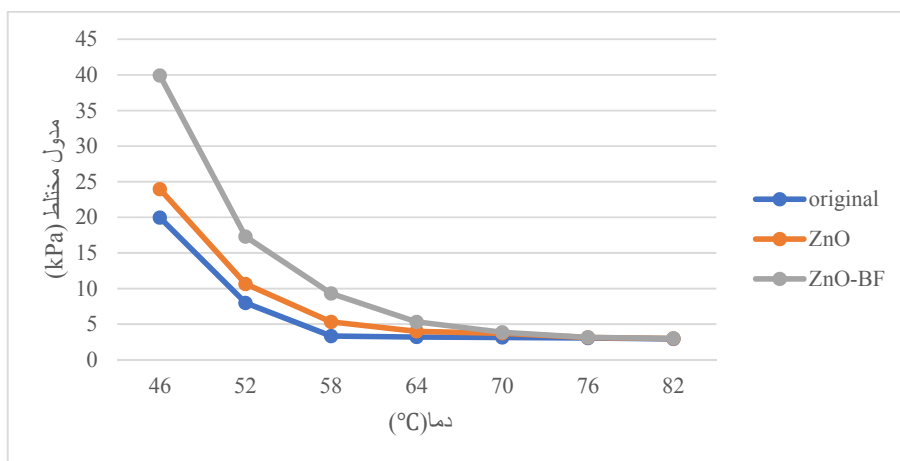
با توجه به شکل ۲، مقادیر مدول مختلط نمونه‌ها بعد از پیرشدگی افزایش یافت. با این حال، در مقایسه با قیر خالص و قیر حاوی نانو زینک اکسید به تنهایی، افزودن فیبر بازالت سبب افزایش بیشتری در مدول مختلط گردیده است. با توجه به شکل ۳، مقادیر زاویه فاز با افزایش در طول پیری کاهش یافت،

پیری همچنین نشان می‌دهد که ویژگی‌های استحکام بالای خود BF به طور موثر با نانوذرات ترکیب می‌شود تا یک سیستم یکپارچه را تشکیل دهد و عملکرد یکپارچه آسفالت اصلاح شده به طور موثر تقویت می‌شود.

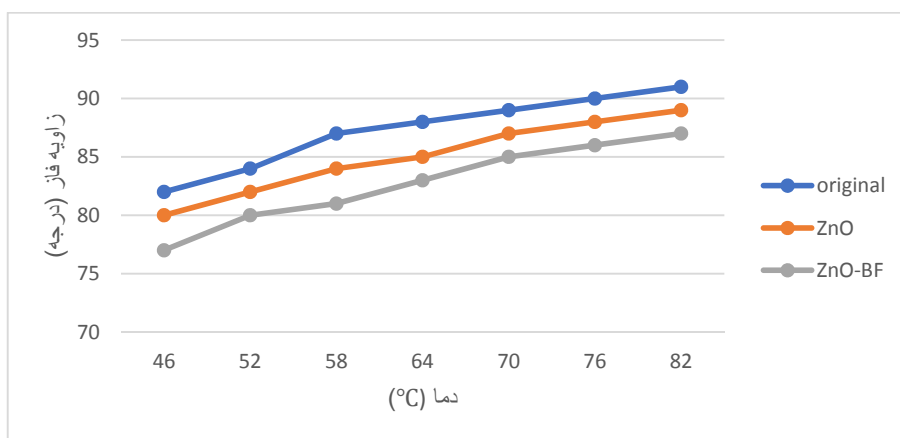
می‌گیرد، رفتار ویسکوالاستیک خوب آن را کمتر مستعد تغییر شکل شیاردار می‌کند، که نشان می‌دهد کهنه شدن باعث می‌شود آسفالت اصلاح شده پایداری حرارتی بهتری داشته باشد. افزایش ضریب شیار شدن آسفالت اصلاح شده پس از



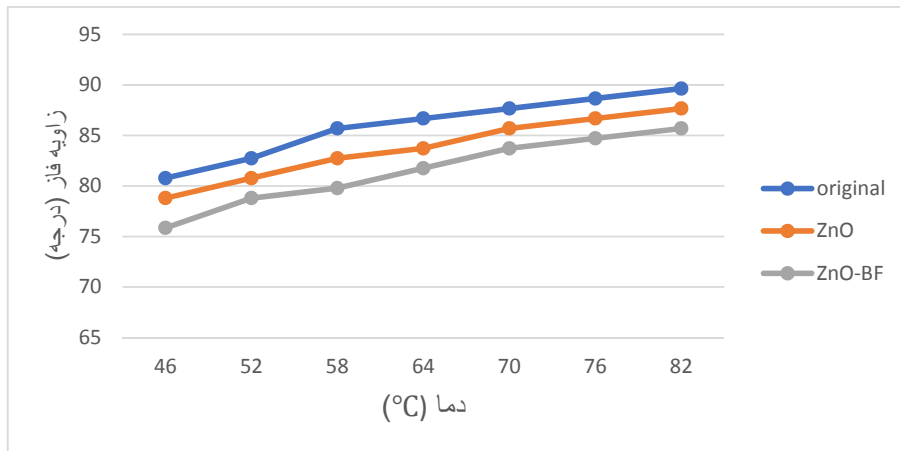
شکل ۱. نتایج مدول مختلط نمونه‌ها قبل از پیرشدگی



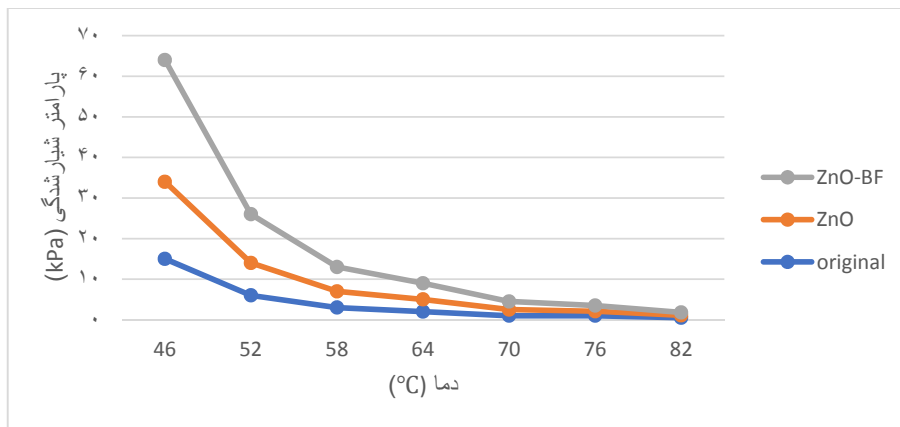
شکل ۲. نتایج مدول مختلط نمونه‌ها بعد از پیرشدگی



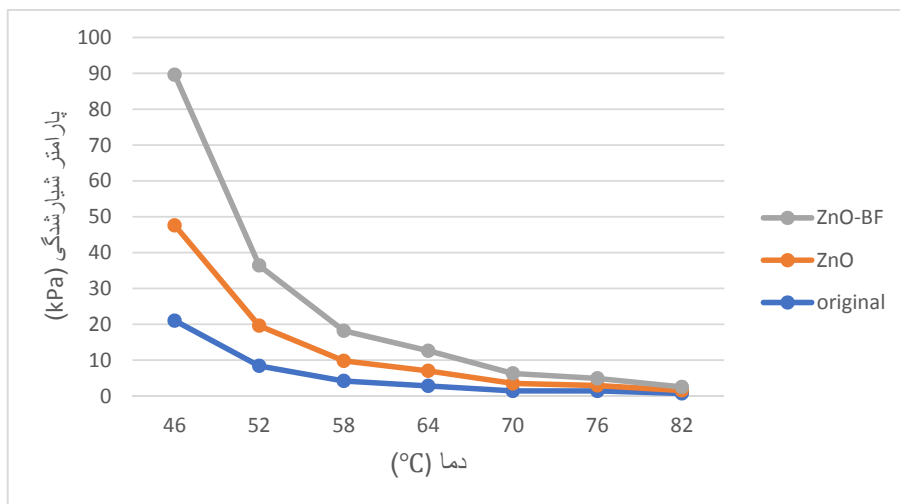
شکل ۳. مقادیر زاویه فاز قبل از پیرشدگی



شکل ۴. مقادیر زاویه فاز بعد از پیرشدگی



شکل ۵. پارامتر شیارشدگی قبل از پیرشدگی

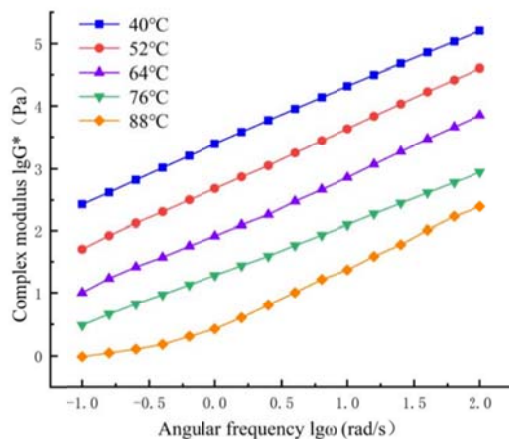


شکل ۶. پارامتر شیارشدگی بعد از پیرشدگی

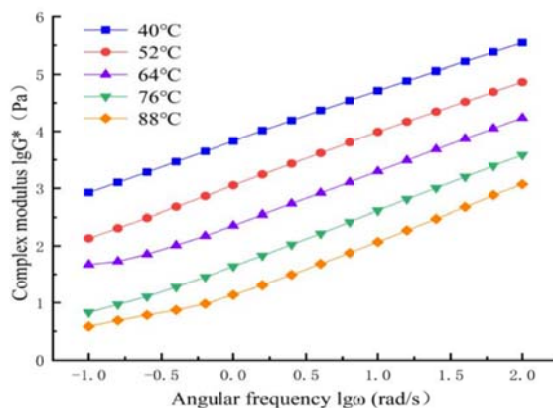
۴-۳- تست جاروب فرکانس

آسفالت در دمای ۴۰ تا ۸۸ درجه سانتی‌گراد و فاصله دمایی ۱۲ درجه سانتی‌گراد انجام شد. نتایج در شکل‌های ۷-۹ آورده شده است.

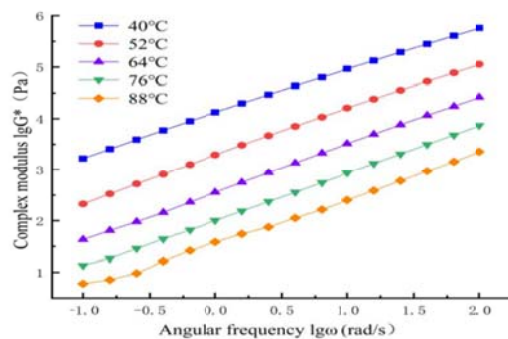
آزمایش جاروب فرکانس می‌تواند به طور دقیق و جامع ویژگی‌های دینامیکی دمای بالا آسفالت‌های مختلف در فرکانس‌های زاویه برشی مختلف را تجزیه و تحلیل کند. در این بخش، آزمایش‌های جاروب فرکانس در سه نوع



شکل ۷. مدول مختلط قیر اصلی



شکل ۸. مدول مختلط قیر اصلاح شده با نانو زینک اکسید



شکل ۹. قیر اصلاح شده با نانو زینک اکسید و فیبر بازالت



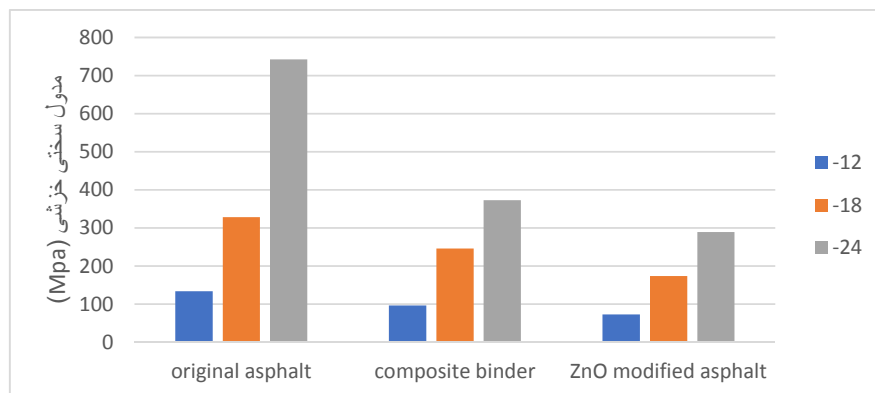
بازالت تقریباً مشابه می‌باشد و تقریباً موازی با هم در شرایط دمایی مختلف می‌باشد. آنالیز داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که در شرایط محیطی مختلف، مدول مختلط قیر رابطه منفی با دما دارد. دلیل آن این می‌تواند باشد که قیر در دمای بالای محیطی نرم می‌گردد و سبب ضعیف شدن مقاومت داخلی قیر می‌گردد که سبب ضعیف شدن خصوصیات الاستیک قیر می‌گردد و سبب تغییر در جهت ویسکوالاستیک می‌گردد. نتیجه نهایی سبب کاهش پارامتر مدول مختلط می‌گردد و بخش ویسکوز، توانایی آن را در برابر مقاومت تغییر شکل بالا کاهش می‌دهد. نشان می‌دهد که در شرایط دمایی بالا، احتمال شیارشدگی راه افزایش می‌یابد و عملکرد مخلوط آسفالتی کاهش می‌یابد.

با توجه به نتایج، در شرایط دمایی یکسان، با افزایش فرکانس زاویه‌ای، مدول مختلط هر سه نمونه قیر افزایش می‌یابد و تقریباً روند خطی را طی می‌نمایند. در کاربردهای عملی راهسازی، افزایش فرکانس بارگذاری روسازی نشان می‌دهد که فرکانس لرزشی بالاتر راه در واحد زمان کرنش برشی کل در واحد زمان کاهش می‌یابد و مدول مختلط قیر افزایش می‌یابد. در شرایط دمایی پایین، افزایش فرکانس بار اثر کمی بر روی روسازی دارد و تغییر شکل مخلوط آسفالتی کمتر خواهد بود. با این حال، در شرایط دمایی بالا، زمانی که روسازی در معرض ترافیک سنگین قرار می‌گیرد، پارامتر مدول مختلط کوچک است و روسازی در معرض شیار شدگی قرار خواهد گرفت که منجر به خرابی بیش از اندازه روسازی خواهد شد. نرخ تغییرات مدول مختلط قیر پایه، قیر اصلاح شده با نانو زینک اکسید و قیر اصلاح شده با کامپوزیت نانوزینک اکسید و فیبر

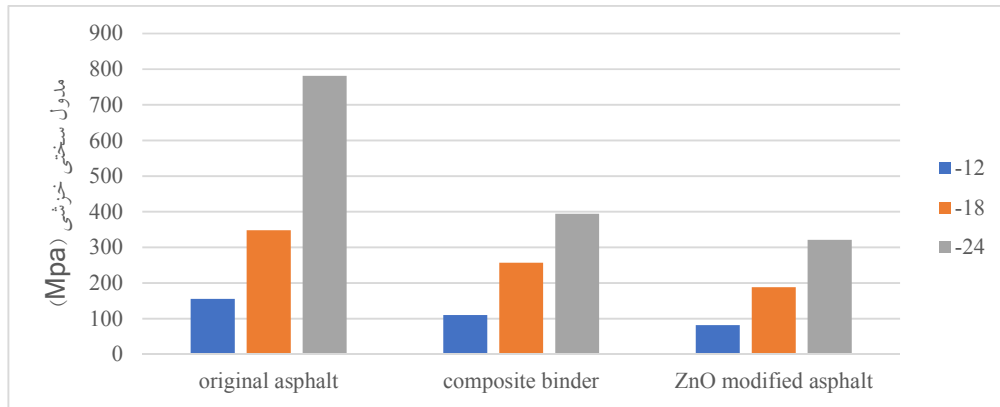
#### ۴-۴- نتایج عملکرد در دمای پایین

نانوذرات، مقدار S کاهش و مقدار m افزایش می‌یابد. پس از افزودن BF به آسفالت اصلاح شده با نانو، مقدار S افزایش و مقدار m کاهش می‌یابد. دلیل ممکن است این باشد که BF بخشی از محتوای سبک در آسفالت را جذب می‌کند به طوری که محتوای اجزای سنگین نسبتاً زیاد است. نانوذرات و BF یک سیستم مش سه بعدی متراکم را تشکیل می‌دهند که هم افزایی آن را افزایش می‌دهد، بنابراین مدول سفتی خزشی آسفالت اصلاح شده کامپوزیت نانو zno-bf را بالاتر از آسفالت اصلاح شده نانو zno می‌کند.

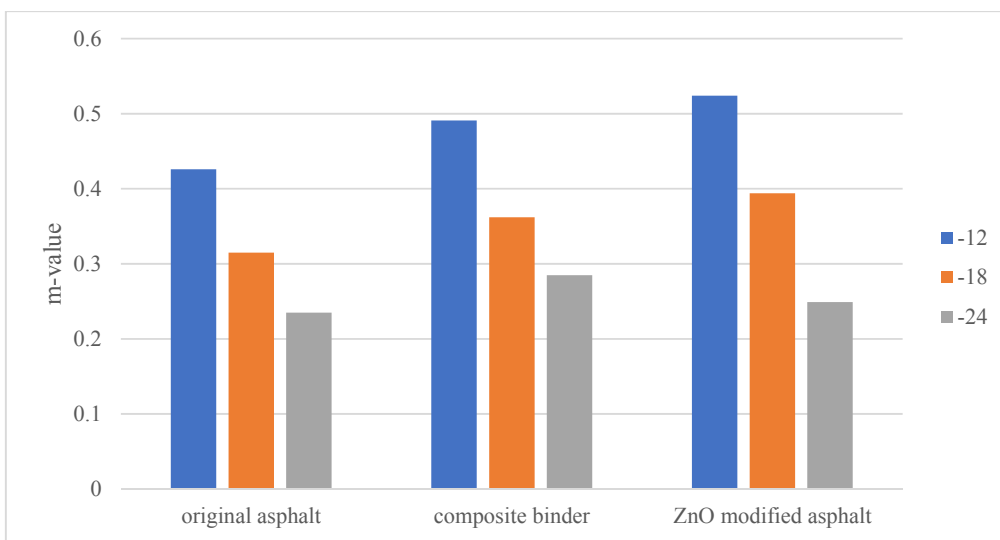
سه شرایط دما برای سه نوع آسفالت انتخاب شد: ۱۲-، ۱۸-، ۲۴- درجه سانتی‌گراد. زمان بارگذاری ۲۴۰ ثانیه تعیین شد. نتایج شکل‌های ۱۰-۱۳ نشان داده شده است. از تجزیه و تحلیل شکل‌های ۱۰ و ۱۱ می‌توان دریافت که مدول سختی خزش سه نوع مختلف آسفالت افزایش می‌یابد و با کاهش دما شیب مماس خزش کاهش می‌یابد. در این میان، افزایش (کاهش) قیر بیشترین اهمیت را دارد که نشان می‌دهد. قیر در شرایط دمای پایین شکنندگی قابل توجهی از خود نشان می‌دهد و مقاومت تغییر شکل ضعیفی دارد. پس از افزودن اصلاح‌کننده



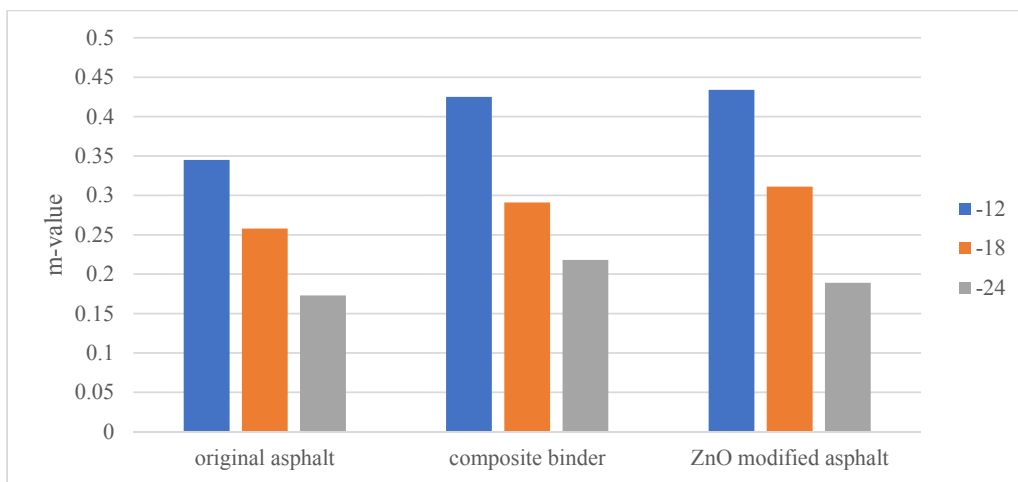
شکل ۱۰. نتایج مدول خزشی نمونه‌ها قبل از پیرشدگی



شکل ۱۱. نتایج مدول خزشی نمونه‌ها بعد از پیرشدگی



شکل ۱۲. نتایج پارامتر m قبل از پیرشدگی



شکل ۱۳. پارامتر m بعد از پیرشدگی

کامپوزیت حاوی نانوزینک اکسید و فیبر بازالت به میزان ۲۱٫۷٪، ۱۴٫۹٪ و ۱۳٫۶٪ به ترتیب کاهش می‌یابد. درکل، ذرات نانو می‌تواند خزش دمای پایین را بهبود بخشد، در حالی که تائنی افزودن فیبر بازالت آشکار نمی‌باشد. بعد از پیرشدگی کوتاه مدت، قیرهای حاوی افزودنی سبب کاهش نرخ تغییرات خزش می‌شوند که در نتیجه افزودن نانو ذرات و فیبر مقاومت ضد پیرشدگی قیر را افزایش می‌دهد.

با توجه به شکل می‌توان دریافت که پارامتر سختی برای قیر پایه، قیر حاوی نانوزینک اکسید و قیر کامپوزیت حاوی نانو زینک اکسید و بیبر بازالت بعد از پیری افزایش می‌یابد. نتایج در دمای ۱۲- نشان می‌دهد که سختی قیر بعد از پیری به میزان ۱۷٫۱ درصد برای قیر پایه، و به میزان ۱۵٫۲ درصد برای قیر حاوی نانو زینک اکسید و میزان ۱۴٫۸ درصد افزایش می‌یابد. مقدار شیب خزشی بعد از پیری کاهش می‌یابد. میزان پارامتر  $m$  برای قیر پایه، قیر حاوی نانو زینک اکسید و قیر

### ۵- نتیجه گیری

افزایش یافت. آسفالت اصلاح شده با کامپوزیت نانو ZnO/BF دارای مقاومت تغییر شکل خوبی در هر دو ناحیه فرکانس بالا و فرکانس پایین است که عملکرد روسازی را از منظر کلان بهبود می‌بخشد. پس از پیری کوتاه مدت، مدول پیچیده سه نوع آسفالت روند رشد قابل توجهی را نشان داد. یعنی کهنه شدن باعث بهبود پایداری آسفالت در دمای بالا شد. -پس از افزودن BF به قیر اصلاح شده با نانو اکسید روی، مقدار S افزایش می‌یابد و مقدار m کاهش می‌یابد، یعنی نانوذرات می‌توانند عملکرد خزشی آسفالت در دمای پایین را تا حد معینی بهبود بخشند، در حالی که اثر بهبود در دمای پایین قیر اصلاح شده با کامپوزیت نانو ZnO/BF مشخص نیست. مقدار S قیر اصلاح شده با نانو اکسید روی و قیر اصلاح شده با کامپوزیت به ترتیب ۱۴٫۹٪ و ۱۵٫۰٪ افزایش یافت، در حالی که مقدار m به ترتیب ۱۴٫۸٪ و ۱۳٫۴٪ کاهش یافت و دامنه تغییر نرخ خزش قیر اصلاح شده کاهش یافت. در ۱۲- درجه سانتی‌گراد پس از پیری RTFOT، میزان خزش قیر اصلاح شده کاهش یافت، که نشان می‌دهد ادغام اصلاح کننده‌ها می‌تواند عملکرد ضد پیری آسفالت را بهبود بخشد.

-پس از افزودن نانو اکسید روی و BF به آسفالت زمینه، سه شاخص عملکرد قبل و بعد از پیری RTFOT به درجات مختلف بهبود یافتند. در مقایسه با آسفالت اصلاح شده با نانو اکسید روی، نسبت شکل پذیر باقی مانده، افزایش نقطه نرمی و تغییر جرم در آسفالت اصلاح شده با کامپوزیت نانو اکسید روی BF به ترتیب ۱٫۷٪، ۰٫۳ درجه سانتی‌گراد و ۰٫۰۴۵٪ کاهش یافت ۱٫۷٪. افزایش یافته است که نشان می‌دهد فیبر می‌تواند اثر پیری روی آسفالت را کاهش دهد و عملکرد ضد پیری آن را بیشتر بهبود بخشد.

-ضریب شیار شدگی سه نوع آسفالت اصلی و آسفالت با پیری حرارتی با افزایش دمای آزمایش کاهش می‌یابد و در همان دما،  $G^*/\sin\delta$  سه نوع آسفالت از بزرگ به کوچک نانو ZnO است. آسفالت اصلاح شده با کامپوزیت  $BF >$  آسفالت اصلاح شده با نانو اکسید روی  $>$  آسفالت زمینه‌ای، نشان می‌دهد که آسفالت اصلاح شده با کامپوزیت قوی‌ترین مقاومت در برابر تغییر شکل در دمای بالا را دارد. پیری RTFOT فاکتور شیار آسفالت را بزرگتر می‌کند که برای مقاومت در برابر آسیب آن در یک محیط با دمای بالا اهمیت زیادی دارد.

-مدول پیچیده سه نوع آسفالت اصلی و آسفالت قدیمی به تدریج با افزایش فرکانس زاویه‌ای، رابطه تقریباً خطی

### ۶- پی‌نوشت‌ها

- 1-Basalt Fiber
- 2-Rolling Thin Film Oven Test

## ۷-مراجع

- asphalt mortar. *Case Stud. Constr. Mater.* 17, e01247.
- Mansour, F. Ehsan, S. (2021). The effects of nano zinc oxide (ZnO) and nano reduced graphene oxide (RGO) on moisture susceptibility property of stone mastic asphalt (SMA). *Case Stud. Constr. Mater.* 15, e00655.
- Tao, H. Liu, H. Xie, X. Sun, T. Dong, R. Lu, X. (2022). Preparation and Properties of Nano-ZnO Combined with Biomass Heavy Oil Composite-Modified Asphalt. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2022, 5179787.
- Vamsikrishna, D. Manikanta, K.V. (2019). Tyre Rubber Modified Bitumen for Asphalt Mixture. *J. Trend Sci. Res. Dev.* 3, 42-46.
- Yan, J. Zheng, J. Li, N. (2019). Study on the crack resistance of basalt fiber asphalt mortar. *J. Build. Mater.* 22, 800-804.
- Zhao, Y. (2014). Experimental study on crack resistance of basalt fiber reinforced asphalt concrete. *Highw. Eng.* 39, 48-51.
- Abdelsalam, M. Yue, Y. Khater, A. Luo, D. Musanyufu, J. Qin, X. (2020). Laboratory Study on the Performance of Asphalt Mixes Modified with a Novel Composite of Diatomite Powder and Lignin Fiber. *Appl. Sci.* 10, 5517.
- Celauro, C. Praticò, F. (2018). Asphalt mixtures modified with basalt fibres for surface courses. *Constr. Build. Mater.* 170, 245-253.
- Dong, T. (2020). *Study on the Properties of Nano-ZnO/SBS/SBR Composite Modified Materials*; Chongqing Jiaotong University: Chongqing, China.
- Fu, Z. Huang, Z. Ma, F. (2016). Effect of basalt fiber on road performance of aged asphalt mixture. *Mater. Bull.* 30, 118-122.
- Gu, Q. Kang, A. Li, B. Xiao, P. Ding, H. (2022). Effect of fiber characteristic parameters on the high and low temperature rheological properties of basalt fiber modified

# **Laboratory Evaluation of the Effect of the Combination of Zinc Nano Oxide and Basalt Fiber on the Performance of Bitumen and Asphalt Mixture**

*Hamin Chobdar, Department of Civil Engineering, Malard Branch, Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.*

*Amin Farajollahi, Department of Civil Engineering, Malard Branch, Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.*

*Alireza Ameli, Department of Civil Engineering, Malard Branch, Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.*

*E-mail: ameli@gmail.com*

Received: June 2023- Accepted: February 2024

## **ABSTRACT**

In order to improve the quality of road performance and solve the problem of deterioration in normal asphalt pavement during service, in this research, a 5.3% aluminate agent was used to modify the surface of nano zinc oxide and prepare composite modified asphalt with nano oxide and basalt fiber 1 (BF). It was used as a modifier. First, the initial performance of the different types was examined. Then, a dynamic shear rheology test was conducted to analyze the high temperature rutting performance of composite modified asphalt at different temperatures and frequencies. Then, using the flexural creep hardness test, the low temperature properties of asphalt modified with composite were investigated. The results show that the aging performance of asphalt modified with ZnO/BF nanocomposite is significantly improved after adding fibers to the modified asphalt. The average mass loss ratio is only 0.192%. At 46°C, the rutting coefficient of composite-modified asphalt increased by 62.3%. The main frequency curve is always at the highest position and continues to increase, indicating a significant improvement in the high-temperature rutting performance of the composite-modified asphalt. At 24°C, the S value of the creep modulus of asphalt modified with composite increased by 24.9%. In addition, there is no obvious effect of low temperature improvement, but the range of variation of creep tangent slope m of modified asphalt is reduced after aging, which further indicates that the addition of a modifier can reduce the effect of aging on asphalt.

**Keywords:** Road Engineering, Composite Modified Bitumen, Basalt Fiber, Nano Zinc Oxide, Asphalt Mixture