

بررسی آزمایشگاهی استفاده از پلی پروپیلن بازیافتی ضایعاتی در قیر

مقاله علمی-پژوهشی

آذین چیت سازان*، گروه ارزیابی و آمایش سرزمین، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Chitsazan.az@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۵ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۵

صفحه ۵۰۴-۴۸۹

چکیده

پژوهش حاضر عملکرد مخلوط های آسفالتی را با استفاده از نانورس مونت موریلونیت (MMT) و گوگرد به عنوان یک اصلاح کننده مقایسه می کند. هدف اصلی این مطالعه توصیف ویژگی های فیزیکی و استحکامی نانورس MMT و قیرهای آسفالتی اصلاح شده گوگرد است. در آزمایش تجربی، نانورس (۲.۴.۶.۸) MMT، گوگرد (۲.۴.۶.۸)٪ و کامپوزیت MMT نانورس - گوگرد (۲.۴.۶.۸) درصد وزن قیر مخلوط شدند. پس از آن، تأثیر اصلاح کننده های منتخب بر روی خواص فیزیکی، مشخصه های مقاومت و خرابی رطوبت مورد ارزیابی قرار گرفت. افزودن اصلاح کننده ها سبب کاهش مقدار نفوذ شد، در حالی که افزایش قابل توجهی در نقطه نرمی داشت. در بین همه اصلاح کننده ها، حداکثر مقدار پایداری ۳۴.۱۷ کیلو نیوتن با افزودن ۴ درصد نانورس MMT و گوگرد به صورت ترکیبی، یعنی ۲ درصد نانورس MMT و ۲ درصد گوگرد به عنوان کامپوزیت (۵۰:۵۰) گزارش شده است که ۲/۸ برابر پایداری مخلوط آسفالت پایه در درصد قیر بینه $Q^3(OB)$ است. کامپوزیت نانورس-گوگرد MMT موثرترین ترکیب در بهبود حساسیت به رطوبت بوده است، زیرا مقادیر نسبت استحکام کششی (TSR^3) نسبتاً بیشتر از ۹۰٪ بود. به طور کلی، افزودن کامپوزیت نانورس MMT، S، MMT نانورس - گوگرد مقاومت در برابر ترک خوردگی را بهبود می بخشد و پتانسیل خرابی رطوبت را در تمام شرایط آزمایش کاهش می دهد.

واژه های کلیدی: نانورس مونت موریلونیت (MMT)، گوگرد، نسبت استحکام کششی، حساسیت به رطوبت

۱-مقدمه

در شرایط آب و هوایی گرم، افزایش دما باعث نرم شدن قیر شده و منجر به تغییر شکل دائمی می شود. از طرف دیگر آب و هوای سرد یا دمای متوسط و پایین منجر به سفت شدن قیر و در نتیجه ترک خوردگی ناشی از خستگی می شود. در فصل بارندگی یا منطقه ای که الگوی زهکشی به درستی تضمین نمی شود، آب از ریز ترک های روسازی نفوذ می کند. نفوذ آب به داخل روسازی باعث کاهش چسبندگی بین قیر و سنگدانه و ایجاد حفره های ماکرو می شود. اگرچه تعداد زیادی قیر اصلاح شده پلیمری در روسازی ها گنجانده شده اند، اما به دلیل هزینه بالا، جداسازی فاز بی نظیر و ناپایداری حرارتی مشکل ایجاد می شود. برای غلبه بر این کاستی ها، از مواد ابتکاری مختلف برای بهبود عملکرد قیر

قیر یکی از قدیمی ترین مواد مهندسی قابل استفاده در جهان است. تغییر در دما، بار وسیله نقلیه و تغییر در پیکربندی محور منجر به افزایش هزینه تعمیر و نگهداری و گاهی اوقات منجر به شکست زودرس روسازی می شود. به این ترتیب، قابلیت اطمینان به قیر باید به اندازه کافی بالا باشد تا بتوان با شرایط ترافیکی سنگین مقابله کرد. اصلاح قیر یکی از دغدغه های مهم برای بهبود دوام، ایمنی و کارایی روسازی انعطاف پذیر در برابر خرابی های مختلف مانند فرورفتگی، چاله ها، شیارها و ترک های خستگی بوده است (Airey, 2002). روسازی های انعطاف پذیر از نظر هزینه ساخت مقرون به صرفه هستند، اما در طول تعمیر و نگهداری در مقایسه با روسازی های صلب بسیار گران هستند.

آسیب رطوبت می شود.

گوگرد امروزه به طور گسترده‌ای به عنوان یک عامل اصلاح کننده به دلیل در دسترس بودن آن در مقادیر زیاد در سراسر جهان استفاده می‌شود. همچنین، ساختار شیمیایی منحصر به فرد و ویژگی‌های فیزیکی گوگرد راه خود را به سمت مهندسی روسازی می‌سازد. مولکول‌های گوگرد تا دمای ۹۵,۵ درجه سانتیگراد یک ساختار متعادل تشکیل می‌دهند. با این حال، ساختار پس از این محدودیت دما به کریستال‌های مونوکلینیک تغییر می‌کند. قابل توجه است که قسمت خاصی از گوگرد به صورت شیمیایی با قیر پیوند خورده است. تعداد کمی از ادبیات مشاهده کردند که ۸۵ درصد از مولکول‌های سولفور در دمای کمتر از ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد با قیر واکنش شیمیایی می‌دهند. تفاوت در درصد گوگرد واکنش داده شده را می‌توان به تغییر در نوع قیر، زمان تماس و دمای اختلاط نسبت داد. قیر اصلاح شده با گوگرد خواص فیزیکی و همچنین پدیده پیری را افزایش داد. خاطرنشان می‌شود که مخلوط‌های گوگرد اصلاح شده نسبتاً الاستیک تر از قیرهای تمیز در زمان بارگذاری یکسان هستند. علاوه بر این، ادغام گوگرد در قیر، نقطه نرمی را افزایش داده و مقدار نفوذ را کاهش می‌دهد و در نتیجه ویژگی‌های فیزیکی بهتری ایجاد می‌کند (Kumar et al, 2013). افزودن گوگرد به قیر می‌تواند ویژگی‌های قیر را تا جایی که استفاده از آن در ساخت روسازی‌ها مورد توجه قرار گیرد، اغراق‌آمیز کند. گوگرد موجود در قیر منجر به جایگزینی قیر می‌شود زیرا به عنوان یک افزایش دهنده عمل می‌کند. این امر با سوزاندن قیرهای اضافی مقابله می‌کند و منجر به یک محیط زیست پایدار و حفاظت شده می‌شود. طبق مطالعه انجام شده توسط Saboo (Saboo, 2014) هنگامی که گوگرد بین ۳۰ تا ۴۰ درصد به مخلوط سنگفرش اضافه می‌شود، تغییر شکل کلی ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. علاوه بر این، روسازی مخلوط گوگرد تقریباً غیرقابل نفوذ تشخیص داده شد و برای مناطق با شدت بارندگی بالا مناسب گزارش شد. این مطالعه همچنین به نظر قابل توجهی منجر می‌شود که حدود ۲۰ درصد از صرفه جویی در قیر را می‌توان با مخلوط کردن گوگرد در مخلوط آسفالت به دست آورد. گدیک و همکاران (Gedik et al, 2013) یک مطالعه آزمایشگاهی انجام داد و نشان داد که افزودن گوگرد ارزش

و تأثیر آن بر ویژگی‌های مخلوط استفاده می‌شود. این امر نویسندگان را برانگیخت تا چنین مواد ابتکاری را برای تلفیق آنها در بخش زیرساخت روسازی بررسی کنند (Isacsson et al, 1995). نانورس مونت موریلونیت (MMT) به طور گسترده‌ای به عنوان یک اصلاح کننده در قیر استفاده شده است. نانورس MMT یکی از اعضای خانواده اسمکتیت‌ها با ساختار لایه‌ای ۲:۱ است که یک هشت وجهی بین دو چهار وجهی قرار دارد. نانورس نوع MMT بر اساس ترکیب فیلسیلیکات‌های اصلاح شده آلی با فرمول شیمیایی $(\text{Si}_4\text{O}_{10}) (\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ جزئیات عمیق در مورد تجزیه و تحلیل شیمیایی نانورس MMT را می‌توان در جای دیگری یافت. عزت و همکاران (Ezzat et al, 2016) بیان کرد که افزودن ۳ درصد نانورس به طور قابل توجهی عملکرد قیر را برای مناطق با دمای بالا افزایش می‌دهد. یافته‌ها نشان داد که ویسکوزیته و مقدار نفوذ کاهش می‌یابد، در حالی که نقطه نرم شدن افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده بهبود خواص فیزیکی است. تعداد زیادی از مطالعات نشان داد که نانورس MMT می‌تواند یک راه حل زیرساختی نوآورانه برای به حداقل رساندن اثر شیار شدن باشد. گلستانی و همکاران (Golestani et al, 2015) پارامتر نسبت استحکام کششی را اندازه‌گیری کرد و بهبود حساسیت به رطوبت قیرهای اصلاح شده پلیمری را با گنجاندن نانورس نشان داد. خصوصیات فیزیکی قیر هنگامی که قیر با درصد بسیار کمی از نانورس اصلاح شود، به شرطی که سطح پراکندگی نانوسکوپی اتفاق بیفتد، بطور چشمگیری بهبود می‌یابد. نانورس‌ها اساساً نوعی از لرها (مقیاس میکرو) هستند که احتمالاً پلیمرها را مانند تقویت‌کننده‌های لرها مؤثر می‌سازند. گیله (Ghile et al, 2016) آزمایش‌های مختلفی را بر روی مخلوط آسفالت اصلاح شده کلوزیت انجام داد. نتیجه نشان می‌دهد که مخلوط اصلاح شده با نانورس ویژگی‌های مخلوط مانند استحکام کششی غیرمستقیم، مقاومت در برابر خستگی و رفتار شیاردار و خزش را بهبود می‌بخشد. جهرمی و رجایی (Jahromi et al, 2013) مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده نانورس را بررسی کردند و اعلام کردند که درهم‌آمیزی نانورس منجر به پایداری برتر و مقاومت در برابر ترک خوردگی می‌شود. علاوه بر این، مخلوط‌های تهیه شده با ترکیب نانورس منجر به بهبود مقاومت در برابر

نانورس و گوگرد MMT بر روی قیر پایه و مخلوط آسفالت نیز مورد بررسی قرار گرفته است، زیرا قبلاً مورد مطالعه قرار نگرفته است. مطالعه حاضر رویکرد سنتی (پایداری مارشال، مقاومت کششی غیرمستقیم، نسبت مقاومت کششی و نسبت پایداری مارشال) را پوشش می‌دهد. انتظار می‌رود که این کار تحقیقاتی به درک بهتر تأثیر نانورس و گوگرد MMT بر روی خواص قیر پایه و مخلوط آسفالت کمک کند.

۲- روش تحقیق

۲-۱- قیر و مصالح سنگی

بتن آسفالت از سنگدانه‌ها، فیلر و قیر به عنوان یک عامل اتصال تشکیل شده است. علاوه بر این، چقرمگی مخلوط را فراهم می‌کند و مخلوطی بادوام ایجاد می‌کند. سنگدانه‌ها از یک معدن محلی به دست آمد و قیر از یک کارخانه نفت محلی تهیه شد. خواص فیزیکی مواد انتخاب شده در جداول ۱ و ۲ نشان داده شده است.

۲-۲- اصلاح کننده‌ها

در پژوهش حاضر، از دو نوع اصلاح کننده استفاده می‌شود، یعنی نانورس مونت موریلونیت و پودر سولفور. خواص معمولی هر اصلاح کننده در جدول ۳ نشان داده شده است.

پایداری مارشال را افزایش می‌دهد و در نتیجه عملکرد روسازی را در برابر تغییر شکل در دمای بالا بهبود می‌بخشد. تا آنجا که به مقاومت در برابر رطوبت مربوط می‌شود، قیرهای اصلاح شده با گوگرد مقاومت در برابر آب را بهبود می‌بخشند و در نتیجه دوام را افزایش می‌دهند. اگرچه افزودن گوگرد عملکرد را بهبود می‌بخشد، اما نشان دهنده خطرات کمی برای سلامتی و نگرانی‌های ایمنی در صورت اضافه شدن در حالت مذاب است. این نگرانی‌ها به دلیل قرار گرفتن مداوم در معرض گوگرد در دمای بالا ایجاد می‌شود. با گذشت زمان، مفهوم گوگرد به عنوان یک اصلاح کننده دوباره در زمینه ساخت و ساز با استفاده از گلوله‌های گوگرد جامد بدون گرد و غبار تکامل یافته است. این تبدیل گوگرد به طور قابل توجهی انتشار گازهای خطرناکی را که بر سلامتی تأثیر می‌گذارد در مقایسه با گوگرد مبتنی بر مایع معمولی کاهش می‌دهد. این مطالعه عملکرد مخلوط های آسفالتی را با استفاده از نانورس MMT و گوگرد به عنوان یک اصلاح کننده پوشش می‌دهد. دوزهای مختلفی از اصلاح کننده‌ها اضافه شده‌اند تا عملکرد اصلاح کننده‌های منتخب را نسبت به عملکرد قیرها و مخلوط‌های آسفالتی تمیز بررسی کنند. علاوه بر این، حساسیت به رطوبت نانورس MMT و مخلوط‌های آسفالتی گوگرد-مدیاد با دقت کافی پوشانده نشده است. در مطالعه حاضر، روشی برای ارزیابی پتانسیل آسیب رطوبت در طیف وسیعی از دماها انجام شده است. علاوه بر این، اثر ترکیبی

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی مصالح سنگی

خصوصیات	معیار	۶۰/۷۰
سختی	ماکزیمم ۲۴٪	۱۸٪
سختی	ماکزیمم ۳۰٪	۲۲٪
ضریب تورق	ماکزیمم ۱۵٪	۱۲٪
ضریب تطویل	ماکزیمم ۱۵٪	۱۳٪
درصد رطوبت	ماکزیمم ۲٪	۰٫۹٪
مقاومت عریان شدگی	مینیمم ۹۵٪	۹۷٪
وزن مخصوص درشت دانه	۲٫۵-۲٫۹	۲٫۶۵
وزن مخصوص ریزدانه	-	۲٫۶۳
وزن مخصوص فیلر	-	۲٫۶۸

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی قیر

معیار	خصوصیات
۶۰/۷۰	نقطه نرمی
۴۹	وزن مخصوص
۱,۰۱	درجه نفوذ
۶۴	ویسکوزیته در دمای ۶۰
۲۶۲۰	

جدول ۳. مشخصات افزودنی ها

سولفور	نانورس
۰,۰۰۱	وزن مخصوص
۰,۰۰۴	درصد آب
۰,۲۵	وزن مخصوص
	اندازه ذرات
	ضخامت لایه
۱,۸۹	رنگ
۱۲۰	

۲-۳- آماده سازی قیر اصلاح شده

۴۰۰ گرم قیر پایه گرم شده و به درستی هم زده شد تا حباب های هوا از بین برود. متعاقباً ۲٪ وزنی از قیر به قیر از قبل گرم شده اضافه شد. پیش اختلاط با استفاده از میله شیشه ای به مدت ۲۰ دقیقه و سپس یک میکسر با برش بالا انجام شد. میکسر برشی بالا، متشکل از ۸ تیغه روتور، با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۳۰ دقیقه در محدوده دمایی کنترل شده که در جدول ۴ مشخص شده است، کار می کرد. دمای اختلاط مطابق با متون زیر انتخاب شد [۱۵، ۲۲، ۳۲، ۳۳]. دمای پایین تری برای گوگرد انتخاب شد تا از تشکیل سولفید هیدروژن و دی اکسید گوگرد در طول عملیات اختلاط جلوگیری شود. تعداد کمی از ادبیات توصیه می کنند که آماده سازی قیرهای اصلاح شده با گوگرد در دمای کمتر از ۱۴۵ درجه سانتی گراد، از تکامل گازهای خطرناک مختلف مرتبط با گرمایش گوگرد اجتناب می کند (Souaya et al, 2015). از سوی دیگر، زمان اختلاط پس از تلاش های اولیه انتخاب شد که در آن آزمایش های مختلف زمان

اختلاط در نظر گرفته شد. آزمایشات آزمایشی در مدت زمان اختلاط ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ دقیقه انجام شد. مشخص شد که در عرض ۳۰ دقیقه، اصلاح کننده با انجام آزمایش معمولی (نقطه نرم شدن و مقدار نفوذ) به اندازه کافی پراکنده و تایید شده است. نتایج آزمایش نشان داد که تفاوت در نقطه نرم شدن و مقادیر نفوذ زمانی که نمونه به مدت ۳۰ دقیقه و ۴۰ دقیقه مخلوط شد، معنی دار نبود. رویه های مشابهی برای درصد باقی مانده از اصلاح کننده ها، یعنی ۴، ۶ و ۸ مورد اتخاذ شد. پس از انجام نسبت های آزمایشی متفاوت نانورس MMT و نسبت گوگرد، مشاهده شد که نسبت ۵۰:۵۰ منجر به یک ترکیب همگن می شود که نشان دهنده وجود توده های صفر در داخل قیر است. بنابراین، پروتکل اختلاط ملی اتخاذ شده در این مطالعه، مخلوط کردن نانورس MMT و گوگرد به نسبت ۵۰:۵۰ است. برای ارزیابی پراکنده گی مناسب نانورس MMT و کامپوزیت های گوگردی در قیر، رویکرد مشابهی برای یافتن ویژگی های فیزیکی در مدت زمان متفاوت انتخاب شد.

جدول ۴. ترکیب درصدیهای مختلف افزودنی

افزودنی ها	درصد	دمای اختلاط
MMT	2, 4, 6, 8	150-160
SULFUR	2, 4, 6, 8	135-145
MMT+SULFUR	2% (1% MMT+1% SULFUR) 4% (1% MMT+1% SULFUR) 6% (1% MMT+1% SULFUR) 8% (1% MMT+1% SULFUR)	145-150

۳-روش آزمایشگاهی

۳-۱-آزمایش های قیر

که پوشش صددرصدی سنگدانه با قیر به دست آمد ادامه یافت. پس از فرآیند اختلاط، مخلوط شل قبل از تراکم به مدت دو ساعت در فر در دمای تراکم خود قرار داده شد. سپس مخلوط سست با ایجاد ۷۵ عدد ضربه بر روی هر صورت فشرده شد تا نمونه‌ای به قطر ۱۰۱,۳ میلی متر و ضخامت ۶۳,۵ میلی متر تهیه شود. پس از آماده سازی نمونه‌های متراکم شده، پایداری مارشال و مقادیر مخلوط‌های آسفالتی در نظر گرفته شده مطابق با ASTM D6927 آزمایش شدند. آزمایش‌های عملکردی مانند مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS)° برای مقایسه عملکرد مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌نشده و اصلاح‌شده انجام شد. مطالعات مختلف از مقاومت کششی غیرمستقیم به عنوان پارامتری برای تعیین کمیت مقاومت ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد استفاده کرده‌اند. رویکرد مشابهی در این مطالعه برای ارزیابی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در دماهای آزمایش متفاوت اتخاذ شده است.

برای ارزیابی اثر اصلاح‌کننده‌های منتخب بر روی خواص فیزیکی قیر پایه، آزمایش‌های معمولی مانند مقدار نفوذ، نقطه نرم شدن و بازیابی الاستیک انجام شد. نتایج به دست آمده برای ارزیابی شاخص نفوذ (PI)^۴ برای دوزهای مختلف قیرهای اصلاح‌شده مورد استفاده قرار گرفت. مقدار PI یک تعیین کمی پاسخ قیر با توجه به دما است.

۳-۲-مقاومت مارشال و مقاومت کششی غیرمستقیم

سنگدانه‌های مورد استفاده برای تهیه نمونه‌ها بر اساس نیاز دانه‌بندی در فر خشک شده و به طور جداگانه الک شدند. پس از آن، سنگدانه‌های الک شده شامل فیلر (گرد و غبار سنگ) در محدوده دمایی ۱۵۰-۱۶۰ درجه سانتی‌گراد گرم شدند. دماهای مربوط به 20 ± 170 و 30 ± 280 سانتی استوک به عنوان دمای اختلاط و تراکم برای تهیه مخلوط آسفالتی در نظر گرفته شد. میانگین دمای اختلاط برای نانورس MMT، سولفور و کامپوزیت نانورس-گوگرد MMT به ترتیب ۱۶۵ درجه سانتی‌گراد، ۱۵۱ درجه سانتی‌گراد و ۱۵۹ درجه سانتی‌گراد بود. مقدار مورد نظر از قیر در ظرفی جداگانه نگهداری شد و در شرایط دمایی مشخص بر اساس نوع اصلاحگر حرارت داده شد. پس از آن، سنگدانه‌های از قبل گرم شده و قیر (۴,۵٪، ۵,۵٪، ۶٪ و ۶,۵٪ وزن کل مخلوط) تحت یک منطقه دمای کنترل شده کاملاً مخلوط شدند. متون قبلی از رویکرد مشابهی برای به دست آوردن یکنواختی مناسب استفاده کرده‌اند. فرآیند اختلاط تا زمانی

۳-۳-مقاومت به حساسیت رطوبتی

نفوذ آب به لایه‌های روسازی و وجود رطوبت قابل توجهی به طور کلی منجر به کاهش پیوند بین قیر و سنگدانه می‌شود. این منجر به از دست دادن استحکام مخلوط آسفالت می‌شود. روش‌های زیر تخمینی از حساسیت به رطوبت ارائه می‌دهند.

۳-۲-۱-نسبت مقاومت کششی

۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت غوطه ور شدند. پس از ۲۴ ساعت در حمام آب، نمونه‌ها برداشته شدند و قبل از آزمایش به مدت ۲ ساعت در حمام آب در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. پس از آن، آزمایش‌ها بر روی هر دو نمونه شرطی و غیرشرطی تحت یک الگوی بارگذاری مشابه به عنوان مقاومت کششی غیرمستقیم انجام می‌شود و نسبت مقاومت کششی به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$TSR=ITS\ wet/ITS\ dry$$

آب به مدت ۲۴ ساعت در دمای حفظ شده ۶۰ درجه سانتی‌گراد آماده شدند. سپس تست پایداری مارشال بر روی همه نمونه‌ها انجام شد و نسبت پایداری مارشال به صورت داده شده است که در آن MS مقدار پایداری مارشال است.

$$MSR=MS_{conditioned}/MS_{unconditioned}$$

ارائه آزمایش نسبت استحکام کششی توسط AASTHO T283 پیشنهاد شده است. مسیرهای مختلفی از فضای مترکم سازی برای رسیدن به ۷ درصد فضای خالی هوا ساخته شد. در درصد بهینه قیر، شش نمونه استوانه‌ای مترکم تهیه شد و به طور مساوی به نیمه‌های مساوی، یعنی هر کدام سه نمونه، یعنی نمونه‌های شرطی و غیرشرطی گروه‌بندی شدند. سه نمونه با قرار دادن آنها در فریزر (۱۸- درجه سانتی‌گراد) به مدت ۲۴ ساعت در معرض چرخه انجماد و ذوب قرار گرفتند و سپس در حمام آب در دمای

۳-۲-۲-نسبت مقاومت مارشال

در درصد بهینه قیر، شش نمونه تهیه و به طور مساوی در سه مجموعه گروه بندی شدند. یک مجموعه از نمونه‌ها به مدت ۳۰ تا ۴۰ دقیقه در حمام آب در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد. در حالی که سایر نمونه‌ها با غوطه‌ورکردن آن در یک حمام

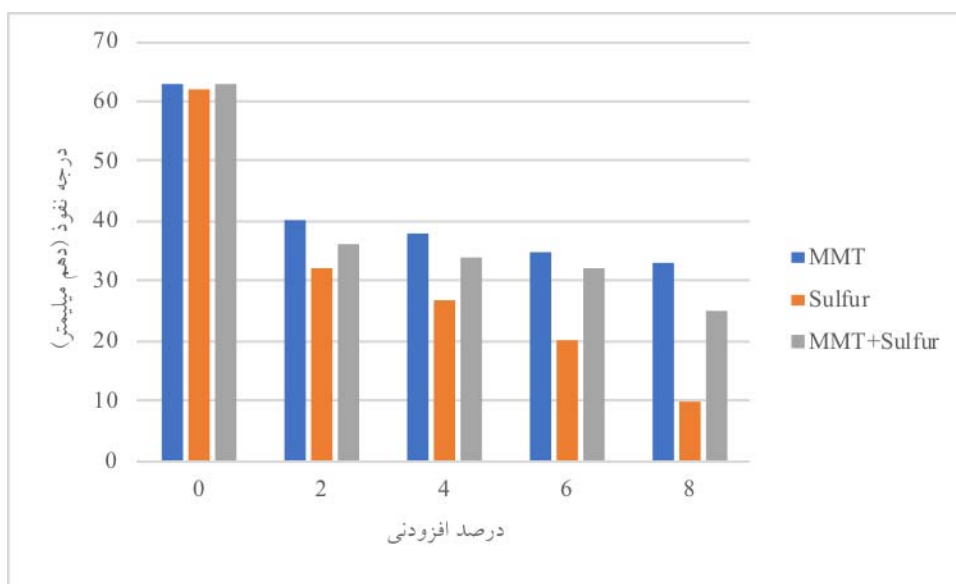
۴- بحث

۴-۱-نتایج تاثیر افزودنی بر روی درجه نفوذ

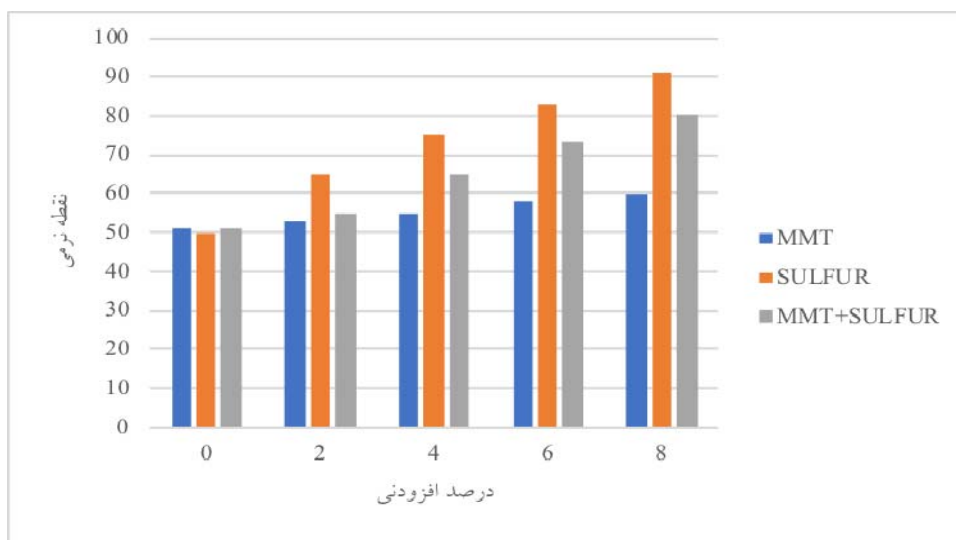
تغییر در مقدار نفوذ قیر اصلاح شده با نانورس MMT و گوگرد در شکل ۱ نشان داده شده است. مقدار نفوذ به طور مداوم برای همه موارد با تغییر درصد اصلاح شده از ۲ تا ۸ درصد کاهش می‌یابد. به طور کلی، مقدار نفوذ، ویسکوزیته نسبی قیر را نشان می‌دهد. فرض بر این است که قیرهای با مقادیر نفوذ کمتر در شرایط آب و هوایی گرم و بارگذاری سنگین به خوبی پاسخ می‌دهند. با این حال، درصد بالاتر اصلاح‌کننده‌ها، مقدار نفوذ را به زیر ۳۰ dmm کاهش می‌دهد، که نشان‌دهنده چسبندگی قیر است. سفتی بالاتر قیر به دلیل درصد تعدیل شده بیشتر ممکن است بر عملکرد در دمای پایین تأثیر منفی بگذارد. بنابراین، درصد گوگرد ممکن است به ۲٪ محدود شود زیرا فراتر از این مقدار نفوذ به زیر ۳۰ dmm می‌رسد. به همین ترتیب، افزودن نانورس-گوگرد MMT باید به ۴ درصد محدود شود. این را می‌توان به بهبود خواص فیزیکی پس از افزودن نانورس MMT و گوگرد به دلیل پراکندگی بهتر نانورس ورقه مانند و رسوب گوگرد به شکل زاویه ای در قیر نسبت داد.

۴-۲-بررسی تاثیر افزودنی بر روی نقطه نرمی

خاطر نشان می‌شود که در همه موارد (شکل ۲)، با افزایش درصد افزودنی، مقدار نقطه نرمی نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه حساسیت کمتری نسبت به دما نشان می‌دهد. قیر پایه به مقدار ۴۸ درجه سانتی‌گراد می‌رسد، در حالی که حداکثر مقدار ۹۳ درجه سانتی‌گراد با افزودن ۸ درصد گوگرد نشان داده شده است، و حداقل مقدار ۵۴ درجه سانتی‌گراد با افزودن ۲ درصد نانورس مشاهده شد. دستیابی به یک مقدار نقطه نرمی بالاتر ممکن است نشان دهنده بهبود ویسکوزیته مواد باشد که می‌تواند برای مقابله با تغییر شکل دائمی ناشی از شیار بسیار مفید باشد. این اصلاح‌کننده‌ها به عنوان یک عامل تقویت کننده برای قیرها عمل می‌کنند زیرا باعث محدود شدن روانی و افزایش سفتی قیر می‌شوند.



شکل ۱. نتایج درجه نفوذ قیرها

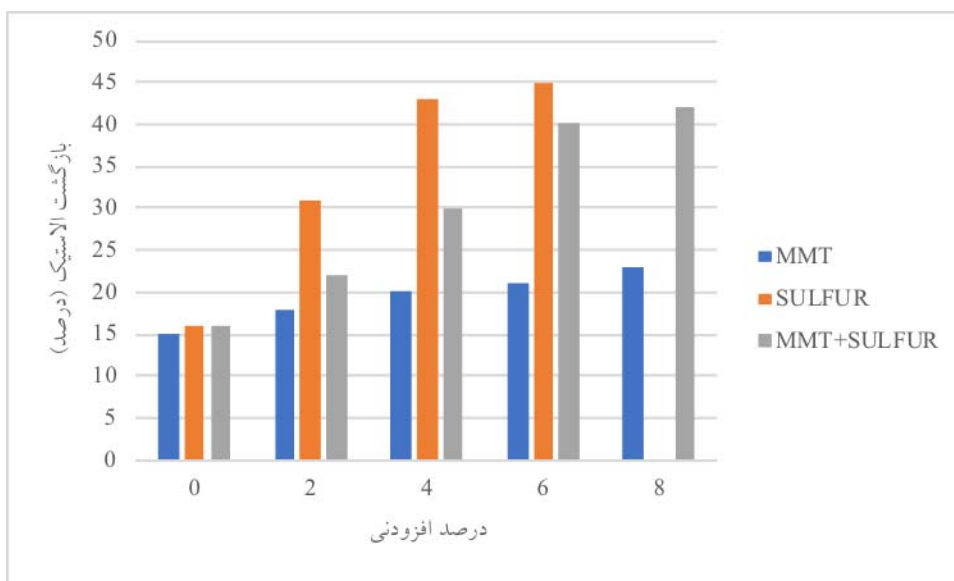


شکل ۲. نتایج نقطه نرمی نمونه‌ها

۳-۴- تاثیر افزودنی بر روی بازگشت الاستیک

الاستیسیتیته ۴۶٪ است، با افزودن ۶٪ گوگرد در بایندر آسفالت تمیز بازیابی الاستیک برای بایندر شامل ۸ درصد گوگرد نمی‌تواند تعیین شود. زیرا نمی‌تواند تا علامت حتی ۱۰ سانتی متر کشیده شود. اثر روان‌سازی گوگرد برای افزایش رفتار الاستیک قیر غالب است.

اثر درصد اصلاح شده در بازیابی الاستیک قیر پایه در شکل ۳ نشان داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که بازیابی الاستیک قیر پایه در مقایسه با قیر اصلاح شده کمتر است. این نشانه ای از مقابله با شیار شدگی، عمدتاً در مناطق با دمای پایین است. افزایش ارزش بازیافت الاستیک با نانورس MMT نسبت به سایر قیرهای اصلاح شده کمی پایین تر است. حداکثر بازیابی در

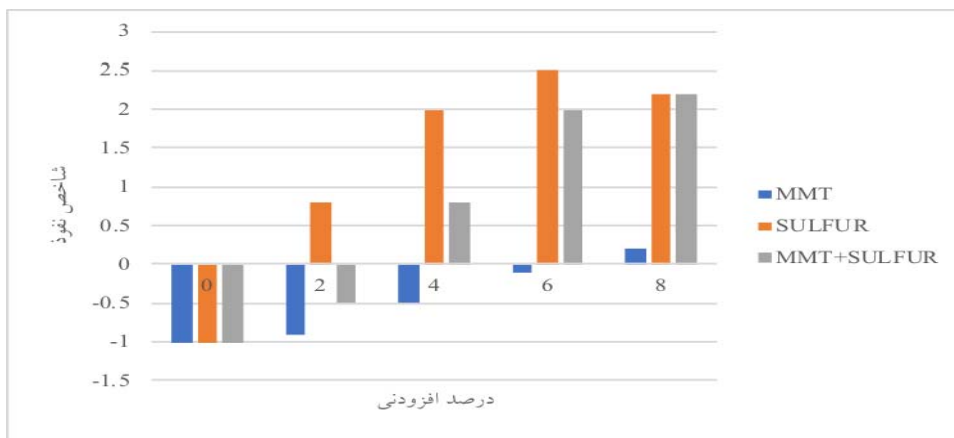


شکل ۳. نتایج بازگشت الاستیک

۴-۴- تاثیر افزودنی بر روی شاخص نفوذ

افزودن اصلاح‌کننده‌ها، مقدار شاخص نفوذ را به سمت مثبت تغییر می‌دهد که نشان‌دهنده حساسیت کمتر نسبت به دما است. برای ۶ و ۸٪ گوگرد، این مقدار از علامت مشخص شده +۲ عبور می‌کند و همین امر را می‌توان برای درصد ۸٪ کامپوزیت نانورس - MMT گوگرد - اصلاح شده مشاهده کرد.

تعیین شاخص نفوذ برای قیر عمدتاً به اندازه دمای آن قابل دسترسی است. شاخص نفوذ در محدوده مجاز -۲ تا +۲ نشان دهنده بهبود حساسیت دما است. شکل ۴ نشان می‌دهد که افزایش در درصد تعدیل شده، مقدار شاخص را برای همه موارد افزایش می‌دهد. برای قیر پایه، مقدار -۰٫۸۴ است. با این حال،



شکل ۴. نتایج شاخص نفوذ نمونه‌ها

۴-۵- درصد بهینه قیر (OBC)

جدول ۵ پارامترهای مارشال به دست آمده در OBC را نشان می‌دهد.

با در نظر گرفتن میانگین درصد قیر مربوط به حداکثر مقاومت، حداکثر وزن مخصوص و ۴ درصد فضای خالی هوا محاسبه می‌شود، درصد قیر بهینه به میزان ۵,۷۵٪ بدست آمد.

جدول ۵. نتایج پارامتر مارشال برای تعیین درصد قیر بهینه

نتیجه	خصوصیت
۱۲,۳۳	مقاومت مارشال
۳,۸	روانی
۴,۴۴	درصد هوا
۷۳,۷	فضای پر شده با قیر
۱۶,۸۷	فضای خالی مصالح سنگی

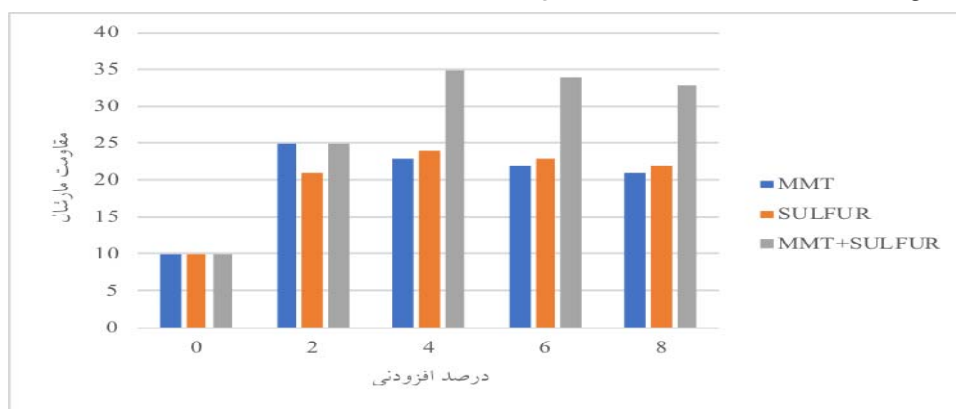
و ۴٪ گوگرد ۲,۱ و ۱,۹۶ برابر پایداری مخلوط آسفالتی تمیز است. اما در بین همه اصلاح‌کننده‌ها، حداکثر مقدار پایداری ۳۴/۱۷ کیلونیوتن با افزودن ۴ درصد نانورس-گوگرد MMT به صورت ترکیبی گزارش شده است که ۲/۸ برابر پایداری مخلوط آسفالتی پایه است. بنابراین، تشکیل قوی‌ترین پیوند با ۴٪ نانورس - گوگرد MMT تضمین می‌شود زیرا حداکثر استحکام در این مورد به دست آمد. می‌توان آن را به اثرات هم افزایی کامپوزیت نانو خاک رس-گوگرد MMT نسبت داد. از این رو، یک روسازی با دوام بالا با تغییر شکل دائمی کمتر ممکن است با استفاده از نانورس و قیر اصلاح شده با گوگرد ساخته شود. این اصلاح‌کننده‌ها به عنوان یک عامل مکمل برای قیرها عمل می‌کنند زیرا منجر به سفت شدن قیر می‌شود.

۴-۶- ارزیابی ویژگی های مقاومتی مخلوط آسفالتی اصلاح شده در OBC

پس از ارزیابی پارامترهای مقاومت، قیر پایه با نانورس MMT، گوگرد و کامپوزیت نانورس - گوگرد MMT اصلاح می‌شود. متعاقباً، ویژگی‌های استحکام با استفاده از قیر اصلاح‌شده در OBC محاسبه شده، یعنی ۵,۷۵٪ ارزیابی شده‌اند.

۴-۶-۱- مقاومت مارشال

از شکل ۵، می‌توان مشاهده کرد که مقدار مقاومت برای همه موارد مخلوط آسفالت اصلاح شده به طور قابل توجهی افزایش یافته است. حداکثر مقدار مقاومت در مخلوط آسفالت اصلاح شده در ۲٪ نانورس (۲۶,۰۴ کیلو نیوتن)، و ۴٪ گوگرد (۲۴,۱۷ کیلو نیوتن) بدست می‌آید. مقادیر بدست آمده برای ۲٪ نانورس



شکل ۵. نتایج مقاومت مارشال نمونه‌ها

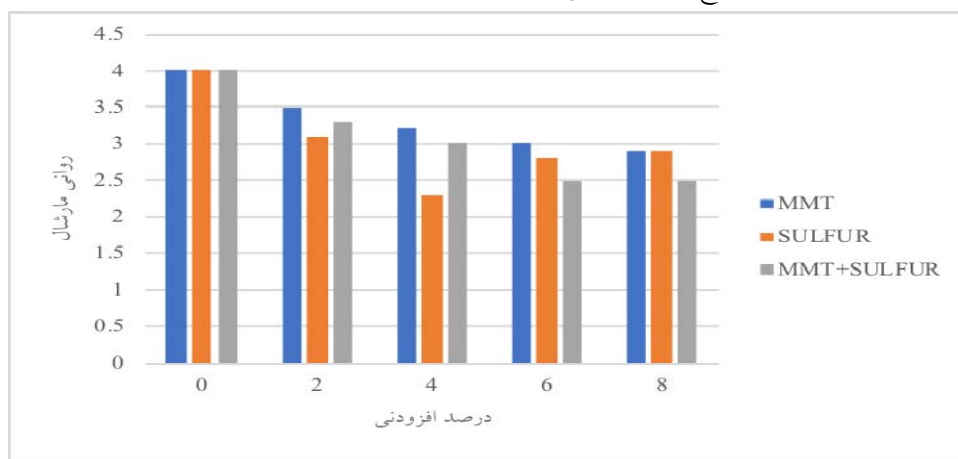
۴-۶-۲- مقادیر روانی

گوگرد MMT در ۲٪، ۴٪ و ۴٪ به ترتیب ۳٫۵ میلی متر، ۲٫۴ میلی متر و ۲٫۹ میلی متر است.

از شکل ۶، می‌توان مشاهده کرد که افزایش درصد اصلاح شده، مقدار روانی را در مورد نانورس MMT و مخلوط آسفالت نانورس-گوگرد-اصلاح شده MMT کاهش می‌دهد، در حالی که، در مورد مخلوط گوگرد-اصلاح شده، روانی اول کاهش می‌یابد سپس در مقایسه با روانی از مخلوط آسفالت پایه کمی افزایش می‌یابد. کاهش مقدار روانی نشان دهنده افزایش سفتی، کاهش انعطاف پذیری و نشان دهنده بهبود مقاومت برای مقابله با تغییر شکل است. مقادیر جریان مربوط به حداکثر مقاومت نانورس MMT، گوگرد، و مخلوط اصلاح شده نانورس -

۴-۷- محاسبه درصد اصلاح کننده بهینه OMC^۱

بر اساس حداکثر مقدار پایداری و روانی مربوطه OMC محاسبه شد. برای نانورس MMT، گوگرد، و MMT قیر نانورس-گوگرد اصلاح شده در OBC به ترتیب ۲، ۴، و ۴ درصد است.



شکل ۶. نتایج روانی مارشال

۴-۸- تست پایداری ذخیره سازی

پایدار هستند و از همگنی اصلاح کننده در قیر در دماهای بالا اطمینان حاصل می‌کنند. با این حال، تغییر در مقدار نقطه نرمی بایندر آسفالت نانورس MMT در مقایسه با سایر اصلاح کننده‌ها حداقل است.

پایداری ذخیره سازی بایندر اصلاح شده برای OMC، یعنی ۲٪ نانورس MMT، ۴٪ گوگرد و ۴٪ MMT نانورس - گوگرد مورد ارزیابی قرار گرفت. جدول ۶ نشان می‌دهد که تفاوت در مقدار نقطه نرم شدن بین بخش‌های بالا و پایین در همه موارد زیر محدوده مشخصی است. بنابراین، تمام قیرهای اصلاح شده

جدول ۶. نتایج پایداری ذخیره سازی نمونه‌ها

نمونه	نقطه نرمی بالا	نقطه نرمی پایین	اختلاف نقطه نرمی
MMT	۵۴٫۸	۵۴٫۲	۰٫۶
SULFUR	۷۷٫۲	۷۴٫۶	۲٫۶
MMT+SULFUR	۶۶٫۸	۶۵٫۴	۱٫۴

۴-۹- ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی

OBC در OMC انجام شد. علاوه بر این، TSR با دمای متغیر محاسبه شد.

حساسیت به رطوبت مخلوط آسفالت با آزمایش دو پارامتر مختلف ارزیابی شد: نسبت مقاومت کششی (TSR) و نسبت مقاومت مارشال (MSR^V). هر دو آزمایش بر روی نمونه‌های با

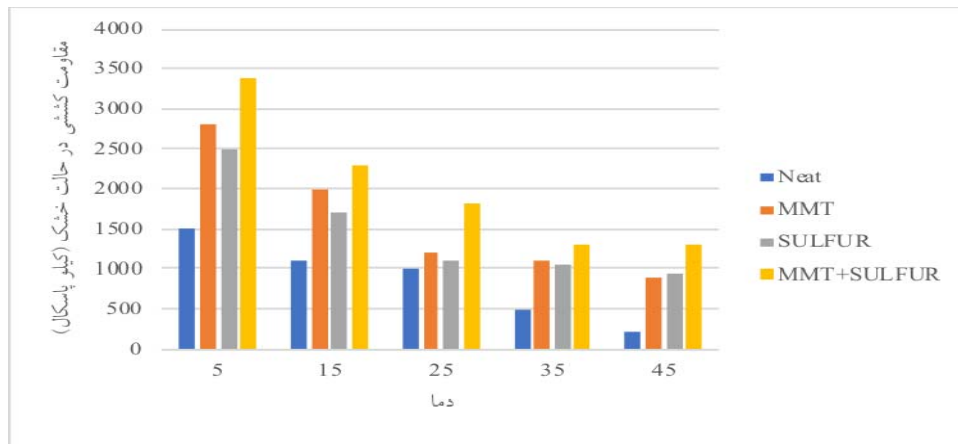
۴-۹-۱- استحکام کششی غیر مستقیم و نسبت استحکام کششی

با این حال، بهبود بستگی به نوع اصلاح کننده مورد استفاده دارد. شکل ۹ نشان می‌دهد که TSR تمام مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با توجه به مخلوط آسفالت پایه افزایش می‌یابد. بنابراین، در دماهای پایین و بالا، نانورس MMT گوگرد و کامپوزیت نانورس-گوگرد MMT، حساسیت به رطوبت را تا حد زیادی بهبود می‌بخشد. از بین این اصلاح‌کننده‌ها، کامپوزیت نانورس-گوگرد MMT مؤثرترین ترکیب در بهبود حساسیت به رطوبت بوده است. در مورد TSR، مقادیر در تمام شرایط دما بیشتر از ۹۰٪ هستند.

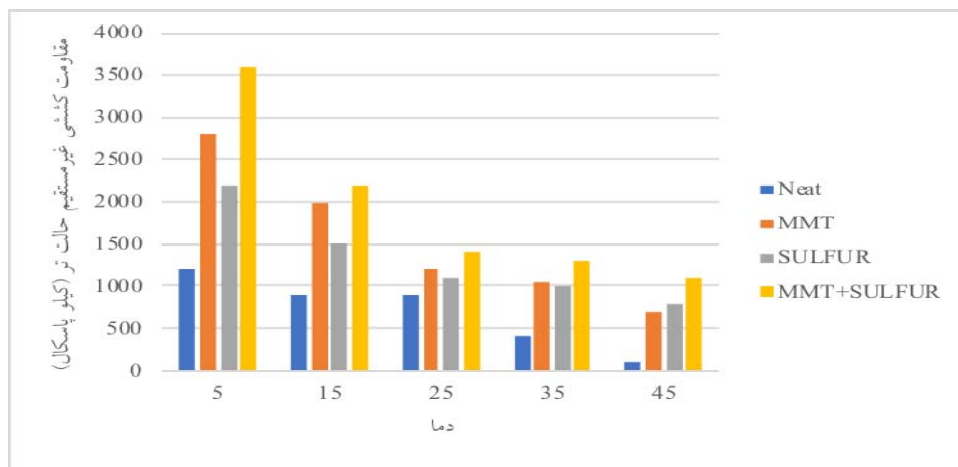
استحکام کششی غیرمستقیم و نسبت استحکام کششی با ارزیابی استحکام کششی غیرمستقیم نمونه خشک و نمونه اشباع در دماهای متفاوت، یعنی ۵، ۱۵، ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد تعیین می‌شود. استحکام کششی غیرمستقیم نشان دهنده مقاومت در برابر مشکلات ترک خوردگی است، در حالی که استحکام کششی نشان دهنده حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی است. مقدار بالاتر کششی غیرمستقیم و استحکام کششی به ترتیب برای مقاومت بالاتر در برابر ترک خوردگی و آسیب رطوبت مطلوب است. با توجه به شکل ۷ و ۸، دو مشاهده ثبت شده است. تحت مشاهدات اول، می‌توان دریافت که کششی غیرمستقیم مخلوط آسفالت خشک و تر اصلاح شده با توجه به مخلوط آسفالت پایه در تمام شرایط دما افزایش می‌یابد. در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد، ۲۵ درجه سانتی‌گراد و ۴۵ درجه سانتی‌گراد، استحکام کششی مخلوط آسفالت اصلاح شده خشک و تر از نانورس MMT، گوگرد و کامپوزیت نانورس-گوگرد MMT به میزان (۸، ۴۴٪، ۲، ۳۶٪، ۵، ۵۳٪)، (۳، ۲۸٪) افزایش می‌یابد. ۷، ۱۸٪، ۴۱، ۳۸٪ و (۶، ۷۰٪، ۴، ۷۱٪، ۳، ۸۱٪). در مقایسه با مخلوط آسفالت پایه خشک. تحت مشاهدات دوم، اشاره شد که با افزایش دما، کششی غیرمستقیم از مخلوط آسفالتی خشک و تر هم برای مخلوط آسفالت پایه و هم اصلاح شده به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. با این حال، این کاهش برای مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده کمتر برجسته است. قابل توجه است که استحکام کششی غیرمستقیم مخلوط‌های اصلاح شده نانورس-گوگرد MMT نسبت به سایر مخلوط‌های اصلاح شده در تمام دماهای آزمایش شده برتر است. این را می‌توان قضاوت کرد که افزودن اصلاح کننده‌های انتخاب شده مقاومت در برابر ترک را بهبود می‌بخشد.

۴-۹-۲- نسبت پایداری مارشال

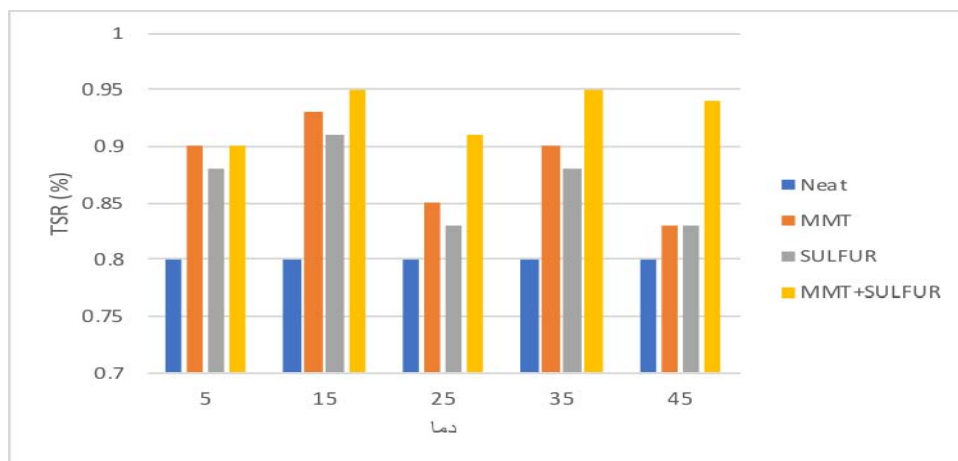
نتایج حاصل از آزمایش (شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲) نشان می‌دهد که از دست دادن مقدار مقاومت با استفاده از قیر اصلاح شده کاهش می‌یابد. به طور کلی، مقدار بالاتر MSR نشان دهنده مقاومت بالاتر در برابر آسیب رطوبت است. مقدار MSR از ۲۸،۳۸٪ به ۸۹،۵۴٪، ۸۴،۳۷٪ و ۹۲،۹۸٪ پس از افزودن ۲٪ نانورس MMT، ۴٪ گوگرد و ۴٪ MMT نانورس - سولفور در قیر پایه به ترتیب افزایش می‌یابد که منجر به افزایش مقاومت مخلوط آسفالت در برابر رطوبت مقدار پایداری نمونه شرطی شده به ترتیب از ۱۲،۳۴ کیلو نیوتن به ۲۶،۲ کیلو نیوتن، ۲۴،۲۵ کیلو نیوتن و ۳۴،۵ کیلو نیوتن پس از اختلاط با نانورس MMT، گوگرد و نانورس-گوگرد MMT افزایش می‌یابد. همین روند برای نمونه خشک مشاهده شد. همچنین، دلیل احتمالی ممکن است به دلیل بهبود در هم‌بستگی بین سنگ‌دانه‌ها باشد، که چسبندگی بهتری به مخلوط برای خشی کردن اثر رطوبت ایجاد می‌کند.



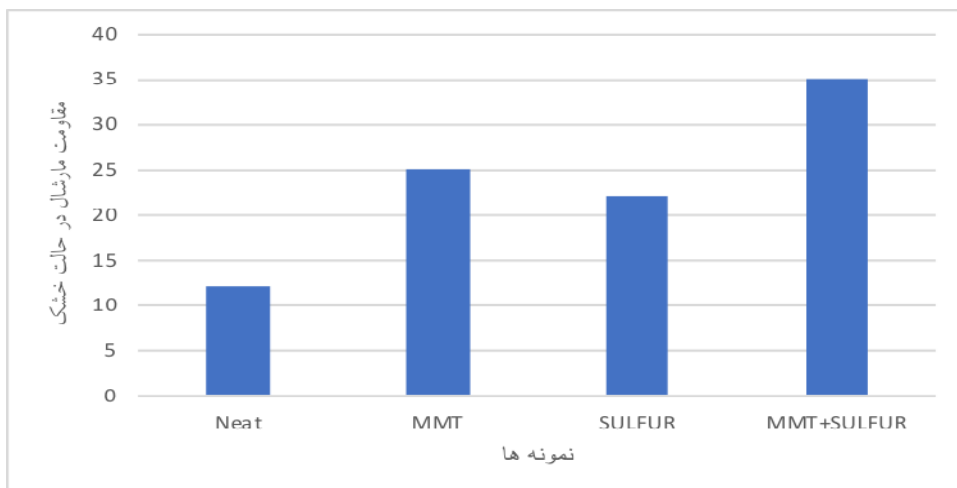
شکل ۷. مقاومت کششی نمونه‌ها در حالت خشک



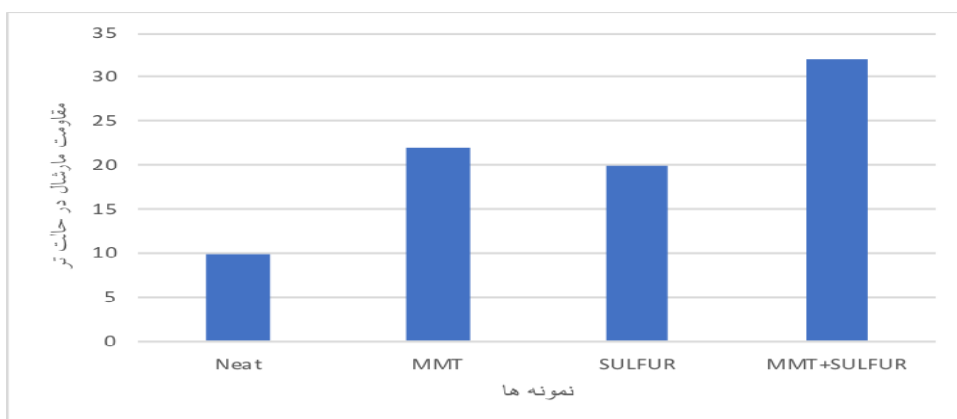
شکل ۸. مقاومت کششی نمونه‌ها در حالت تر



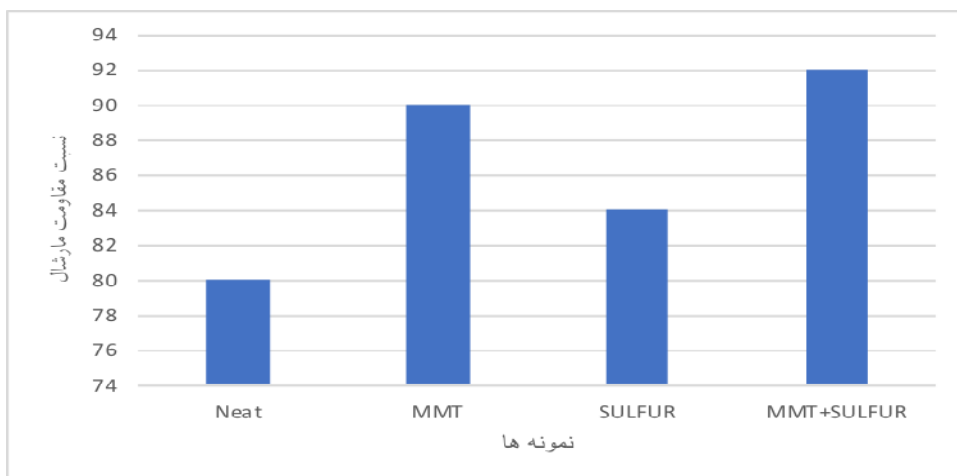
شکل ۹. نسبت مقاومت کششی نمونه‌ها



شکل ۱۰. مقاومت مارشال نمونه‌ها در حالت خشک



شکل ۱۱. مقاومت مارشال نمونه‌ها در حالت تر



شکل ۱۲. نتایج نسبت مقاومت مارشال نمونه‌ها

۵- نتیجه گیری

-اصلاح قیر، بسته به نوع و درصد اصلاح کننده‌ها، خواص مرسوم را بهبود می بخشد تا جایی که به حداکثر پایداری مربوط می‌شود، در بین همه اصلاح کننده‌ها، حداکثر مقدار پایداری ۳۴,۱۷ کیلونیوتن با افزودن ۴ درصد نانورس MMT و گوگرد به صورت ترکیبی گزارش شده است که ۲,۸ برابر پایداری مخلوط آسفالتی پایه در OBC (۵.۷۵٪) است.

-افزودن نانورس MMT، گوگرد، کامپوزیت نانورس-گوگرد MMT مقاومت در برابر ترک خوردگی را بهبود می‌بخشد و پتانسیل خرابی رطوبت را در تمام شرایط آزمایش کاهش می‌دهد. -مخلوط نانورس و گوگرد MMT مؤثرترین ترکیب در بهبود حساسیت به رطوبت است زیرا مقادیر TSR برای همه شرایط دما بیش از ۹۰ درصد است و از استحکام و چسبندگی بهتر در برابر ترک‌های حرارتی اطمینان حاصل می‌کند.

- MSR تأیید می‌کند که افزودن افزودنی‌ها خرابی را کاهش می‌دهد در مقدار مقاومت نمونه‌ها در حالت عمل‌آوری شده، نشان دهنده مقاومت بهتر در برابر رطوبت است. مقدار MSR از ۸۰,۳۸٪ به ۹۲,۹۸٪ با گنجاندن نانورس MMT و کامپوزیت گوگرد افزایش می‌یابد.

چندین اصلاح کننده جهت بهبود خواص قیر به منظور به دست آوردن حداکثر مزایا برای تحمل بارهای چرخ ترافیک سنگین که سبب ایجاد تنش‌های سنگین می‌شود، در دسترس هستند. آزمایش انجام شده بر روی قیرها و مخلوط‌های آسفالت اصلاح‌شده، نشان‌دهنده کارامدی نانورس MMT، گوگرد و مخلوط‌های نانورس-گوگرد MMT را در میان اصلاح‌کننده‌های مختلف نشان داد. از پژوهش حاضر می‌توان نتایج زیر را به دست آورد.

-افزودن نانورس MMT و گوگرد، مقدار نفوذ را کاهش می‌دهد، نقطه نرمی را افزایش می‌دهد و بازیابی الاستیک قیر پایه را بهبود می‌بخشد. قیرهای سولفوری در بین تمام انواع قیرها از نظر خواص فیزیکی بهتر عمل کردند.

-قیر پایه تاثیر منفی بر حساسیت دما داشت. با این حال، گنجاندن اصلاح‌کننده‌های منتخب، شاخص نفوذ را افزایش می‌دهد، که نشان‌دهنده بهبود حساسیت دما است.

-آزمایش پایداری ذخیره سازی در مورد قیرهای اصلاح شده در OMC یعنی در ۲٪ MMT، ۴٪ گوگرد و ۴٪ MMT (نانورس-گوگرد) هیچ گونه ناهمگنی را در دماهای بالا نشان نمی‌دهد.

۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Montmorillonite
- 2- Optimum Bitumen Content
- 3- Tensile Strength Ratio
- 4- Penetration Index
- 5- Indirect Tensile Strength
- 6- Optimum Modified Content
- 7- Marshall Strength Ratio

۷- مراجع

-Ezzat H, El-Badawy S, Gabr A et al (2016). Evaluation of asphalt binders modified with nanoclay and nanosilica. *Procedia Eng.* 143:1260-1267. doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.119

-Airey GD (2002). Rheological evaluation of ethylene vinyl acetate polymer modified bitumens. *Constr Build Mater*, 16:473-487. [doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00103-4](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00103-4)

and applications. *Elsevier Ltd*, 108–126.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780857095442500063#:~:text=Nanoclay%20is%20an%20active%20filler,mixture%2C%20the%20optimum%20binder%20increased.>

-Kumar P, Khan MT (2013). Evaluation of physical properties of sulphur modified bitumen and its resistance to ageing. *Elixir Chem Eng A*, 55:13104–13107 .

-Souaya ER, Elkholy SA, El-Rahman AMMA et al (2015). Partial substitution of asphalt pavement with modified sulfur. *Egypt J Pet*, 24:483–491.
doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.06.003

-Saboo N (2014). Rheological investigations of sulfur modified bitumen. 703–713.
https://www.researchgate.net/publication/294609596_Rheological_Investigations_of_Sulfur_Modified_Bitumen

-Golestani B, Hyun B, Moghadas F, Fallah S (2015). Nanoclay application to asphalt concrete characterization of polymer and linear nanocomposite-modified asphalt binder and mixture. *Constr Build Mater*, 91:32–38.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.019

-Ghile DB (2006) Effects of nanoclay modification on rheology of bitumen and on performance of asphalt mixtures. *Master of Science*, Thesis.
resolver.tudelft.nl/uuid:e92ae692-10e5-455d-b8ad-0e3702071e

-Gedik A, Lav AH (2013). Sulphur utilization in asphaltic concrete pavements. Airfield and highway pavement 2013. A.

-Isacson U, Lu X (1995) Testing and appraisal of polymer modified road bitumens—state of the art. *Mater Struct* 28:139–159.
doi.org/10.1007/BF02473221

-Jahromi SG, Rajae S (2013). Nanoclay-modified asphalt mixtures for eco-efficient construction. In: *Nanotechnology in eco-efficient construction: materials, processes*

Laboratory Investigation of the Use of Waste Recycled Polypropylene in Bitumen

Azin Chitsazan, Department of Land Use Planning and Assessment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Email: Chitsazan.az@gmail.com

Received: June 2024- Accepted: September 2024

ABSTRACT

The present study compares the performance of asphalt mixtures using montmorillonite nanoclay (MMT1) and sulfur as a modifier. The main objective of this study is to describe the physical and strength properties of MMT nanoclay and sulfur modified asphalt bitumen. In the experimental test, MMT nanoclay (2,4,6,8)%, sulfur (2,4,6,8)%, and MMT nanoclay-sulfur composite (2,4,6,8)% by weight of bitumen were mixed. After that, the effect of selected modifiers on physical properties, strength characteristics and moisture damage were evaluated. The addition of modifiers decreased the amount of penetration, while there was a significant increase in the softening point. Among all modifiers, the maximum stability value of 34.17 KN was reported with the addition of 4% of MMT nanoclay and sulfur as a combination, that is, 2% of MMT nanoclay and 2% of sulfur as a composite (50:50), which is 2.8 times the stability of asphalt mixture. The base is in the optimal bitumen percentage of 2 (OBC). MMT nanoclay-sulfur composite was the most effective composition in improving moisture sensitivity because the tensile strength ratio (3TSR) values were relatively higher than 90%. Overall, the addition of MMT, S, MMT nanoclay-sulfur nanoclay composites improved the cracking resistance and reduced the potential for moisture damage under all test conditions.

Keywords: Montmorillonite Nanoclay (MMT), Sulfur, Tensile Strength Ratio, Moisture Sensitivity