

ارزیابی آزمایشگاهی تاثیر نانو کامپوزیت Nano-Al₂O₃ بر خواص دمای متوسط و بالا قیر و مخلوط آسفالتی گرم

علمی - پژوهشی

امین فرج اللهی*، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران

علیرضا عاملی، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران

فرزین پورحیدری ممقانی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: AminFarajollahi@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۱ - پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۵

صفحه ۳۶۴-۳۵۱

چکیده

اصلاح قیر به روش کامپوزیت به طور فزاینده‌ای برای کاهش مشکلات مضر مرتبط با اصلاح‌کننده‌های آسفالت و برآورده کردن تقاضای انبوه برای آسفالت استفاده می‌شود. در این مطالعه، نانو کامپوزیت nano-Al₂O₃ در سه درصد ۱٪، ۲٪ و ۳٪ نسبت به وزن قیر در قیر شاهد و اصلاح شده به منظور بهبود عملکرد آنها در دماهای بالا و متوسط اجرا شد. این قیرها از نظر خواص پایداری ذخیره‌سازی، فیزیکی، رئولوژیکی و دمای بالا مورد ارزیابی قرار گرفتند. علاوه بر این، قیرهای اصلاح‌شده کامپوزیت nano-Al₂O₃ در مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار گرفتند و مقاومت آنها در برابر ترک خوردن، تغییر شکل دائمی و آسیب رطوبت بررسی شد. اصلاح قیر nano-Al₂O₃ با استفاده از قیرهای خالص، اصلاح‌شده با پلیمر و اصلاح‌شده با خرده لاستیک انجام شد. اضافه کردن nano-Al₂O₃ به قیر، سختی، پایداری ذخیره دمای بالا، مقاومت تغییر شکل دائمی و تحمل ترک خوردگی را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، کامپوزیت‌های nano-Al₂O₃ با قیر خالص و اصلاح‌شده، مقاومت بهبود یافته در برابر تغییر شکل دائمی، ترک خوردگی و آسیب رطوبت در بتن آسفالتی مخلوط گرم را فراهم می‌کنند. کامپوزیت ۲٪ nano-Al₂O₃ بهترین عملکرد را از نظر مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی نشان داد، کامپوزیت ۳٪ nano-Al₂O₃ بهترین عملکرد را از نظر مقاومت در برابر آسیب رطوبت نشان داد، ۲٪ nano-Al₂O₃ با پلیمر و قیرهای آسفالت تغییر یافته پودرلاستیک هر دو بهترین عملکرد را از نظر مقاومت در برابر ترک خوردگی نشان دادند و کامپوزیت ۳٪ نانو nano-Al₂O₃ با قیر خالص مقاومت در برابر ترک خوردگی را بهبود بخشید.

واژه‌های کلیدی: nano-Al₂O₃، اصلاح ترکیبی، قیر، مخلوط آسفالتی

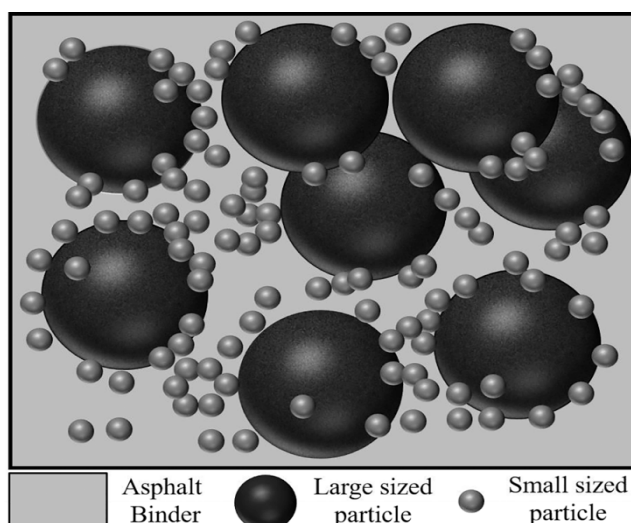
۱-مقدمه

قیرها معمولاً با پلیمرها، پودرلاستیک و مواد زائد بازیافتی اصلاح می‌شوند. علاوه بر پلیمر و پودرلاستیک، نانو موادی مانند نانو رس، نانو سیلیکا، نانو تیتانیوم، نانو آهن، نانو آهن، کلسیت، نانو روی، نانو آلومینا، نانولوله‌های کربنی و گرافن اکسید به طور فزاینده‌ای در اصلاحات آسفالت مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

مقاومت قیرها در شکل طبیعی خود دیگر برای کنترل حجم بالای ترافیک جاده‌ای امروز، افزایش بار محوری، شرایط پیری، و تنش‌های آب و هوایی شدید رو به افزایش بر روی روسازی جاده کافی نیست (Bhat et al, 2021) که بهبود قیرهای آسفالت را برای افزایش عملکرد روسازی ضروری می‌سازد.

خواص شیمیایی و رئولوژیکی را تحت تاثیر قرار می‌دهد و عملکرد را کاهش می‌دهد. نانو کامپوزیت‌ها به عنوان یک راه‌حل بالقوه برای مشکلات مضر مربوط به اصلاح آسفالت مورد استفاده و بررسی قرار گرفته‌اند. نانو کامپوزیت ترکیبی است از دو یا بیشتر مواد که حداقل یکی از آنها در سایز نانو و خصوصیات متفاوت فیزیکی و شیمیایی باشد. با توجه به شکل شماره ۱، یک کامپوزیت ساخته شده از نانو مواد و ذرات با اندازه بزرگ، تعداد نقاط تماس را با ایجاد شکاف بین ذرات افزایش می‌دهد و به طور بالقوه ایجاد یک شبکه به هم پیوسته را در ماتریس کامپوزیت تسهیل می‌کند (Moddares et al,)

نانومواد به طور قابل توجهی خواص قیر را به دلیل مساحت سطح بالا و درصد بیشتر اتم‌ها و مولکول‌ها بر روی سطح خود تحت تاثیر قرار می‌دهند. لی و همکاران (Li et al, 2017) بررسی کردند که استفاده از نانومواد در قیرها به طور قابل توجهی خصوصیات ویسکوالاستیک و مقاومت در برابر تغییر شکل، خستگی، ترک خوردگی دمای پایین، پیرشدگی و حساسیت رطوبتی را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، این اصلاح‌کننده‌ها الزامات عملکردی آسفالت را از نظر قابلیت کار یا مقاومت در برابر ترک خوردگی دمای پایین، خستگی، و تغییر شکل دائمی برآورده نمی‌کنند. نگرانی اصلی در مورد اصلاح آسفالت، جداسازی فاز یا ناسازگاری است که کاربرد آن را محدود می‌کند،



شکل ۱. نمای شماتیک برهمکنش ذرات نانو کامپوزیت

خرده لاستیک / نانو رس از اصلاح کننده‌های کامپوزیت هستند که تابحال مورد استفاده قرار گرفتند. یافته‌های این مطالعات نشان می‌دهد که اصلاح نانو کامپوزیت به طور قابل توجهی مشکلات مربوط به پایداری و سازگاری ذخیره‌سازی را کاهش می‌دهد. خواص فیزیکی و رئولوژیکی را بهبود می‌بخشد. عملکرد دمای پایین را بهبود می‌بخشد؛ و مقاومت به شیارشدگی، خستگی و خسارت رطوبت را بهبود می‌بخشد (Arabani et al, 2017). (Ali et al, 2016) نانو $\text{nano-AL}_2\text{O}_3$ ماده‌ای با مساحت سطح بالا، هدایت گرمایی خوب، پاسخ بالا به اکسیداسیون، سختی بالا، استحکام فرسایش خوب و مقاومت نسبتاً بالا در برابر گرما است. علاوه بر این، اضافه کردن نانو $\text{nano-AL}_2\text{O}_3$ به مواد پلیمری به منظور افزایش استحکام، تسهیل پراکندگی و

این افزایش در شبکه به هم پیوسته باعث تشکیل قیرهایی می‌شود که پایدارتر هستند و مشکلات سازگاری کمتر و عملکرد مکانیکی بهتری دارند. در نانو کامپوزیت‌های پلیمری، وجود فازهای افزودنی بهم پیوسته مولکولی، حرکت قطعات زنجیره پلیمری را مختل می‌کند و منجر به بهبود پایداری ذخیره‌سازی می‌شود. علاوه بر این، نانو کامپوزیت سرعت مهاجرت مواد افزودنی بی‌اثر در فاز مایع را کاهش می‌دهد، که نیروی محرکه جداسازی بین مواد افزودنی بی‌اثر و قیر را کاهش می‌دهد و به حل مساله سازگاری کمک می‌کند (Airey et al, 2003).

SBS/نانورس، SBS/کائولینیت-رس، SBS/نانو موئتموریلونیت، nanoTiO₂/SBS، nanoSiO₂/SBS، خرده لاستیک / نانو رس، خرده لاستیک / نانومونتموریلونیت،

گرفته است، با نتایج نشان می‌دهد که اصلاح قیر با نانو Al_2O_3 عملکرد حساسیت به رطوبت، مقاومت شیاردار و استحکام کششی غیرمستقیم را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، چسب آسفالت تمیز اصلاح شده با ذرات نانو Al_2O_3 نشان داده شده است که مقاومت در برابر شکست را افزایش داده و عملکرد دینامیکی مخلوط‌های بتن آسفالتی را بهبود می‌بخشد. با این حال، مطالعات کمی اثرات نانو- Al_2O_3 /پلیمر و نانو Al_2O_3 /پودر لاستیک را بر روی قیرهای آسفالتی بررسی کرده‌اند. علاوه بر این، هیچ مطالعه‌ای به این موضوع در زمینه مخلوط بتن آسفالت پرداخته است. بنابراین، در این مطالعه، تغییرات کامپوزیت نانو- Al_2O_3 در یک قیرهای اصلاح شده برای ارزیابی اثرات افزایشی بر پایداری ذخیره‌سازی، دمای بالا و خواص دمای متوسط مورد استفاده قرار گرفت. تمرکز این تحقیق بررسی اثر درصدهای مختلف کامپوزیت نانو Al_2O_3 بر خواص فیزیکی، خواص رئولوژیکی و پایداری ذخیره‌سازی در دمای بالا، اصلاح شده پلیمری و پودرلاستیکی بود. اثر تغییر کامپوزیت نانو- Al_2O_3 بر عملکرد تغییر شکل دائمی، تحمل ترک خوردگی و مقاومت در برابر آسیب رطوبت مخلوط‌های مخلوط آسفالت گرم (HMA^3) نیز مورد بررسی قرار گرفت. این اولین تحقیقی بود که اثرات نانو Al_2O_3 /پلیمر و نانو Al_2O_3 /پودرلاستیک را بر عملکرد مخلوط HMA بررسی کرد.

تضمین تعامل مناسب بین سطحی و هنگامی که در قیر خالص اضافه می‌شود، به منظور افزایش خواص فیزیکی، حساسیت دمایی، تحمل شکست ناشی از خستگی، پاسخ به تغییر شکل دائمی و مقاومت اکسیداتیو با پایداری ذخیره‌سازی دمای بالا، نشان داده شده است. بات و میر (Bhat and mir, 2021) گزارش کردند که ترکیب $nano-Al_2O_3$ در قیر، قیر را از یک ماهیت آمورف به ماهیت کریستالی تغییر می‌دهد و این پایدارتر است. بررسی کامپوزیت پلیمری نانو Al_2O_3 و آکریلات استایرن (ASA) ^۲ در قیر توسط مبارکی و همکاران. (Mobaraki et al, 2016) بهبودهایی را در مقاومت تغییر شکل دائمی، بازیابی خزش و پایداری ذخیره‌سازی نشان داد. همچنین المنسب و همکاران. (Almansob et al, 2017) کامپوزیت $nano-Al_2O_3$ و لاستیک طبیعی اپوکسید شده را بررسی کردند و گزارش کردند که کامپوزیت پراکندگی بهتری در قیر دارد که منجر به بهبود سازگاری، پایداری ذخیره‌سازی و عملکرد شیاردار می‌شود. علاوه بر این، افزودن کامپوزیت نانو $nano-Al_2O_3$ بر روی قیر اصلاح شده با پلیمر SBS منجر به بهبود قابل توجهی در پایداری ذخیره‌سازی، سفتی، حساسیت به دما، شیار شدن، خستگی و مقاومت در برابر پیری شد (Hamedi, 2017). تأثیر قیر شاهد اصلاح شده با نانو Al_2O_3 بر روی خواص بتن آسفالتی نیز مورد مطالعه قرار

۲- روش‌های تجربی و مواد مصرفی

۲-۱- مواد

در این تحقیق از قیر ۸۵-۱۰۰ و پلیمر SBS استفاده گردید که خصوصیات آنها در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. نتایج آزمایش قیر

آزمایشات قیر	قیر پایه	قیر پلیمری
درجه نفوذ	۱/۶۶	۵/۳۵
نقطه نرمی	۴۴	۳/۷۰
انگمی	۱۱۵	۶۳
چگالی	۱	۱,۰۲
ویسکوزیته دینامیکی در دمای ۶۰	۲۱۹	-
ویسکوزیته دینامیکی در دمای ۱۳۵	۴۶/۰	۲/۴۷
ویسکوزیته دینامیکی در دمای ۱۶۰	۱۳/۰	۰/۷۹
درصد بازیابی الاستیک	۸/۸۹	۹۰

سنگدانه سنگ آهک و سنگ آهک در تولید نمونه‌های بتن آسفالتی استفاده شد و مشخصات فیزیکی آنها در جدول ۲ خلاصه شده است.

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی مصالح سنگی آهکی

محدوده مشخصات	نتایج	مصالح درشت دانه
-	2.6	وزن مخصوص حقیقی
-	2.62	وزن مخصوص حالت SSD
-	2.67	وزن مخصوص ظاهری
max 40	25.13	سایش لس انجلس
max 20	8.3	کاهش سایش micro deval
max 40	22.5	پوسته شدن ریزدانه
-	2.59	وزن مخصوص حقیقی
-	2.6	وزن مخصوص حالت SSD
-	2.68	وزن مخصوص ظاهری
-	2.72	فیلر وزن مخصوص حقیقی

استفاده شد و ویژگی فیزیکی پودرهای نانو Al_2O_3 و CR در جدول ۳ نشان داده شده است.

نانو $nano-Al_2O_3$ مورد استفاده به عنوان اصلاح کننده، پودر نور سفید با اندازه متوسط ۳۰ نانومتر و ساختار بلوری فاز بود. پودر لاستیک خرد شده (CR) که از الک #۴ عبور می کرد

جدول ۳. خصوصیات فیزیکی افزودنی

پودر لاستیک	Nano- Al_2O_3	مشخصات
سیاه	سفید	رنگ
-	۹۹/۹	درصد خلوص
مش ۴۰	30 nm	اندازه ذرات
۱,۱۳	۰/۲-۰/۴	وزن مخصوص حقیقی
-	۷۱/۶	سطح مخصوص

۲-۲- روش اصلاح قیر

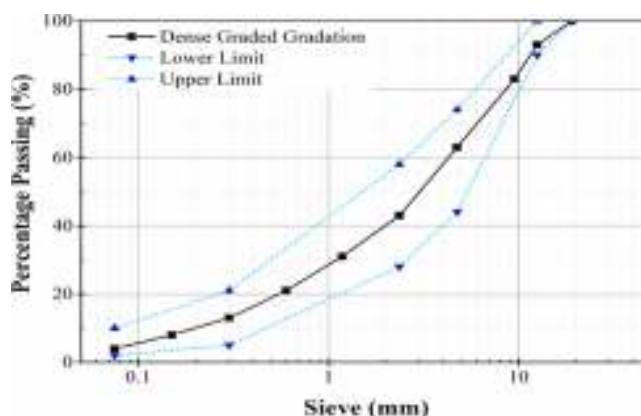
مخلوط شد. سپس، سه غلظت ۱٪، ۲٪ و ۳٪ $nano-Al_2O_3$ به قیرها اضافه شد و در سرعت برشی بالای ۳۰۰۰ rpm به مدت ۶۰ دقیقه در دمای سانتی گراد ترکیب شد. پس از مخلوط کردن، برای رسیدن به یک قیر اصلاح شده پایدارتر و برای بیرون راندن هوای محبوس شده در طول مخلوط کردن، نمونه ها به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۱۸۰ سانتی گراد تثبیت شدند.

قیرهای اصلاح شده $nano-Al_2O_3$ و نانوکامپوزیت $nano-Al_2O_3$ و پلیمر در درصدهای ۱٪، ۲٪ و ۳٪ با استفاده از مخلوط کن برشی با سرعت بالا که در دمای ۱۸۰ سانتی گراد و ۳۰۰۰ rpm به مدت ۶۰ دقیقه کار می کند، آماده شدند (Ali et al, 2016). برای تولید قیرهای اصلاح شده با پودر لاستیک به میزان ۱۵٪ وزنی و کامپوزیت $nano-Al_2O_3$ ، قیر خالص تا دمای ۱۸۰ سانتی گراد حرارت داده شد و پودر CR به مدت ۱۰ دقیقه در سرعت برشی پایین ۲۵۰ rpm اضافه و به طور کامل

۳-۲- آماده‌سازی نمونه بتنی آسفالت

نشان‌داده شده‌اند. مقدار بهینه قیر به ازای فضای خالی ۴٪ برای همه نوع قیر بدون اصلاح $nano-AL_2O_3$ انتخاب شد. ۵٪، ۳٪/۵ و ۸٪/۵ قیر بهینه برای مخلوط‌های به ترتیب حاوی قیرخالص، حاوی پلیمر و ۱۵ درصد پودر لاستیک مورد استفاده قرار گرفت.

برای مطالعه اثرات نانو $nano-AL_2O_3$ در مخلوط‌های بتن آسفالتی از حداکثر اندازه اسمی سنگدانه ۱۲٫۵ میلی‌متر استفاده شد. برای ساخت نمونه‌های استوانه‌ای جهت شبیه‌سازی شرایط تراکم سایت از یک دستگاه تراکم ژیراتوری سوپرپیو استفاده شد. منحنی‌های دانه‌بندی مورد استفاده در این مطالعه در شکل ۲



شکل ۲. منحنی دانه بندی مصالح سنگی

۳- برنامه آزمایشگاهی

۳-۱- آزمایشات فیزیکی پایه قیر

تست ویسکوزیته با استفاده از ویسکومتر چرخشی بروکفیلد برای اندازه‌گیری ویسکوزیته قیرهای اصلاح‌نشده و اصلاح شده در دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد مطابق با استاندارد ASTM - D ۴۴۰۲ انجام شد. در این تحقیق پیرشدگی بلند مدت قیر در گرمخانه شبیه سازی شد. یک غشای نازک ۵۰ گرمی از قیر به صورت یکنواخت بر روی ظرف آزمایش با قطر ۱۴۰ میلی‌متر اسپری شد و به مدت ۴ ساعت در دمای ۱۶۳ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد و سپس در اون به مدت ۱۲۰ ساعت در دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد.

۳-۲- پایداری ذخیره سازی

آزمایش پایداری ذخیره سازی نمونه‌های قیر با استفاده از اختلاف نقطه نرمی بدست آمد. نمونه در یک لوله فویل

خواص فیزیکی متداول قیر پایه و قیر اصلاح‌شده با درصد‌های مختلف پدراستیک و گلیسونایت با آزمایش‌های مختلف از جمله خاصیت انگمی، نقطه نرمی و درجه نفوذ ارزیابی شدند. نقطه نرمی قیر مطابق با ASTM - D ۳۶ تعیین شد. همچنین تست خاصیت انگمی مطابق با استاندارد ASTM - D ۱۱۳ انجام شد. درجه نفوذ می‌تواند نشان‌دهنده سختی قیر باشد، که مطابق با ASTM - d ۵ انجام شد. خواص فیزیکی متداول قیر پایه و قیر اصلاح‌شده با آزمایش‌های مختلف از جمله خاصیت انگمی، نقطه نرمی و درجه نفوذ ارزیابی شدند. نقطه نرمی قیر مطابق با ASTM - D ۳۶ تعیین شد. همچنین تست خاصیت انگمی مطابق با استاندارد ASTM - D ۱۱۳ انجام شد. درجه نفوذ می‌تواند نشان‌دهنده سختی قیر باشد، که مطابق با ASTM - d ۵ انجام شد.

در دمای -۱۰ درجه سانتیگراد منجمد شدند تا جامد شوند. انتظار می‌رفت وقتی که اختلاف در نقاط نرم شدن کمتر از ۲/۵ درجه سانتیگراد باشد، بایندر پایداری ذخیره سازی در دمای بالا را بهتر نشان دهد. SPD در این مطالعه به صورت زیر محاسبه شد:

$$SPD = |SP_{Top} - SP_{Bottom}|$$

که در آن SPD برابر است با اختلاف نقطه نرمی بر حسب درجه سانتیگراد

SP_{Top} برابر است با نقطه نرمی در بالای نمونه

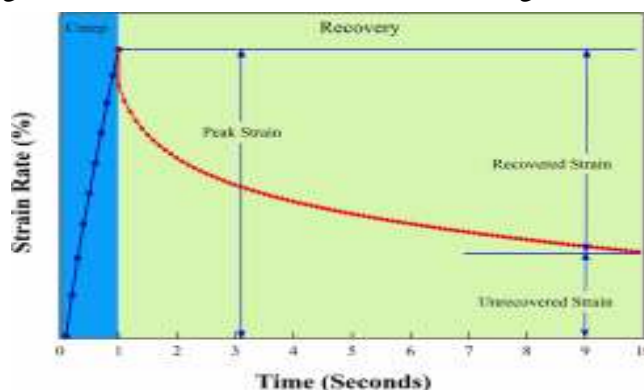
SP_{Bottom} برابر است با نقطه نرمی در پایین نمونه

۳-۳- آزمایش شیارشدگی

خزش غیر قابل بازیافت (Jnr) انجام شد. این آزمایش شامل ۱۰ چرخه خزش و بازیابی با زمان بارگذاری ۱ ثانیه و زمان بازیابی ۹ ثانیه در سطح تنش ۳,۲ بود.

هر دو تست جارو فرکانس و MSCR با استفاده از یک اسپیندال با قطر ۲۵ میلی‌متر و شکاف ۱ میلی‌متری در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد برای برآورد شرایط دمایی سطح جاده در ایران در طول تابستان انجام شد. چرخه خزش و بازیابی در آزمایش MSCR در شکل ۳ نشان داده شده است. مدول غیر قابل بازگشت (Jnr) و درصد بازیابی (R) به صورت زیر محاسبه شد.

مقاومت در برابر تغییر شکل در دمای بالا بایندهای آسفالت با استفاده از آزمون‌های جارو فرکانسی و بازیابی خزش استرس چندگانه (MSCR) مورد بررسی قرار گرفت. یک آزمایش جایجایی فرکانس در حالت کنترل کرنش برای مشخص کردن فرکانس و وابستگی دما نمونه‌های بایندر آسفالت کهنه نشده مطابق با (ASTM D7175, 2015) در محدوده فرکانسی ۰,۱-۲۰ هرتز انجام شد. آزمایش MSCR بر روی بایندهای آسفالتی کهنه نشده مطابق با (ASTM D7405) برای بررسی عملکرد شیار شدن بایندر از نظر درصد بازیابی (R) و انطباق



شکل ۳. تنش و بازیابی در آزمایش MSCR

$$R = \frac{1}{10} \left[\sum_{n=1}^{10} \frac{Peak\ Strain_n - Unrecovered\ Strain_n}{Peak\ Strain_n} \right] \times 100 \quad (2)$$

$$J_{nr} = \frac{1}{10} \left[\sum_{n=1}^{10} \frac{Unrecovered\ Strain_n}{Applied\ Shear\ Stress} \right] \times 100 \quad (3)$$

۳-۴- خواص مقاومت در برابر ترک خوردگی

آزمایش‌های جاروب فرکانس DSR^7 با دوک با قطر ۸ میلی‌متر و فاصله ۲ میلی‌متر در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد برای ارزیابی خواص مقاومت در برابر ترک خوردگی نمونه‌های بایندر آسفالت قدیمی استفاده شد. این آزمایش تحت مد کنترل کرنش با سرعت ۱۰ راد بر ثانیه انجام شد و با استفاده از پارامتر خستگی Superpave $G^*Sin\delta$ ارزیابی شد.

۳-۵- مقاومت در برابر آسیب رطوبت

آزمایش کشش غیر مستقیم (IDT^8) برای ارزیابی مقاومت کششی و حساسیت به رطوبت در نمونه‌های بتن آسفالتی استفاده شد. نمونه‌ها با فضاهای خالی هدف $0.5 \pm 7.0\%$ (یعنی درصد فضای خالی هوای مورد نیاز برای تشدید آسیب رطوبت) آماده شدند. آزمایش در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد در هر دو شرایط خشک و مرطوب با سرعت ۵۰ میلی‌متر در دقیقه انجام شد. نمونه‌های مرطوب به ترتیب در دما/زمان - ۱۰/۱۶ درجه سانتی‌گراد و ۶۰/۱۰ سانتی‌گراد بر ساعت منجمد و ذوب شدند. علاوه بر این، نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS^9) در شرایط خشک و مرطوب برای تعیین مقاومت در برابر آسیب رطوبت استفاده شد. معادلات مورد استفاده برای آزمون IDT عبارت بودند از:

$$ITS = \frac{2000 \times P}{\pi \times t \times D} \quad (4)$$

$$TSR = \frac{ITS_{Wet}}{ITS_{Dry}} \quad (5)$$

نمونه (میلی‌متر) = ضخامت نمونه (میلی‌متر) ITS_{Wet} و ITS_{Dry} به ترتیب مقادیر آن در شرایط خشک و مرطوب هستند.

که در آن، $Jnr =$ انطباق خزش غیر قابل بازیابی ($kPa/1$)؛ $R =$ درصد بازیابی (%); $Peak Strain =$ کرنش در ثانیه ۱ (%); کرنش بازیابی نشده = کرنش در ثانیه دهم (%). $n =$ تعداد چرخه‌ها. تنش برشی کاربردی = سطح تنش استاندارد (kPa). ظرفیت تغییر شکل نمونه‌های بتن آسفالتی در این مطالعه با استفاده از پایداری مارشال، ضریب مارشال (MQ^6) و دستگاه شیار جای چرخ هامبورگ ارزیابی شد. به گفته عامری و همکاران (Ameri et al, 2013)، MQ ، که به عنوان نسبت پایداری مارشال تعریف شده است، نشان دهنده انعطاف پذیری بتن آسفالتی در برابر تغییر شکل دائمی و تنش برشی است، با مقادیر MQ بالاتر که با مقاومت بیشتر در برابر تغییر شکل دائمی و تنش برشی مرتبط است. همچنین در این مطالعه، عملکرد شیار شدن نمونه‌های بتن آسفالتی با استفاده از دستگاه ردیابی چرخ هامبورگ با بار متحرک مکرر اعمال شده $4.5 \pm$ (AASHTO T324, 2011) نیوتن مطابق با (۷۰۵ نیوتن مطابق با (۷۵ میلی‌متر و حفره‌های هوای $0.5 \pm 7\%$ در درصد در آزمایش شیار جای چرخ مورد استفاده قرار گرفتند. آزمایش مقاومت به تغییر شکل دائمی در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد انجام شد.

که در آن $ITS =$ قدرت کشش غیرمستقیم؛ $TSR =$ نسبت استحکام کششی؛ $P =$ حداکثر بار اعمالی (N)؛ $D =$ قطر

۴- نتایج و بحث

۴-۱- خواص فیزیکی قیر خالص

آزمایش‌های معمولی قیر شامل تست‌های نفوذ، نقطه نرم شدن، شکل‌پذیری، درصد بازیابی الاستیک و آزمایش‌های ویسکوزیته ظاهری در این مطالعه انجام شد. خواص فیزیکی کامپوزیت‌های نانو Al_2O_3 در قیر پایه، قیر پلیمری و قیر اصلاح شده CR در جدول ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزودن نانو Al_2O_3 به قیر پایه، پلیمر اصلاح شده و CR چسب آسفالت مقدار نفوذ را کاهش می‌دهد و مقدار نقطه نرمی را

افزایش می‌دهد. کاهش مقدار نفوذ مشاهده شده نشان می‌دهد که افزودن نانو Al_2O_3 به بایندر آسفالت سفتی قیر را افزایش می‌دهد که مقاومت در برابر خرابی مکانیکی را بهبود می‌بخشد. اثر سفت شوندگی نانو Al_2O_3 نیز با نقطه نرم شدن بالاتری همراه بود، که نشان می‌دهد قیرهایی که کامپوزیت‌های نانو Al_2O_3 را در خود جای می‌دهند کمتر مستعد تغییرات دما هستند. علاوه بر این، مقادیر شکل‌پذیری کاهش یافته و بازیابی

افزایش دهد. بنابراین، افزایش درصد بازیابی الاستیک باعث بهبود عملکرد قیر در دماهای پایین و بالا می‌شود. نکته قابل توجه، قیر پلیمری اصلاح شده درصد بازیافت الاستیک بالاتری را نشان می‌دهد و با افزودن نانو Al_2O_3 کاهش می‌یابد، اما کاهش قابل توجهی ندارد.

الاستیک در قیر پایه و قیر اصلاح شده با پودرلاستیک بهبود یافته است که این نیز شاخص‌های بهبود سفتی قیر است. در مقابل، افزودن نانو Al_2O_3 به قیر پلیمری باعث افزایش شکل‌پذیری می‌شود که نشان می‌دهد نانو Al_2O_3 ممکن است با تضعیف خاصیت چسبندگی بین قیر و مواد پلیمری، قابلیت کشش مواد را

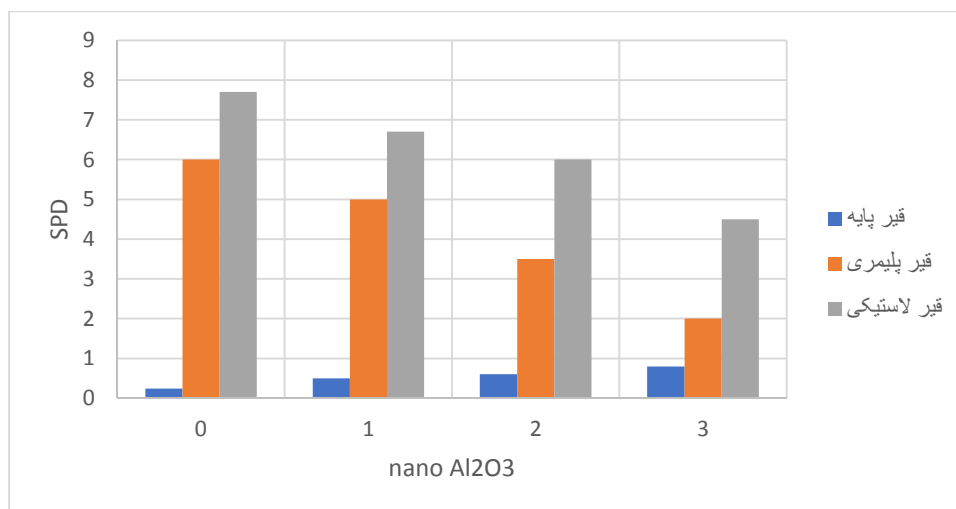
جدول ۴. تاثیر $Nano Al_2O_3$ بر خصوصیات فیزیکی قیر

نوع قیر	خصوصیات قیر پایه			
	درصد Al_2O_3	درجه نفوذ	نقطه نرمی	انگمی
قیر خالص	۰	66.8	43.9	115
	۱	63.4	44.8	110.2
	۲	59.7	47.3	90.5
	۳	56.3	49.2	80.4
	۰	35.2	70.3	58.4
	۱	27.5	71	60.4
پلیمر	۲	23.2	72.3	62.1
	۳	18.7	73.5	63.7
	۰	34.7	52.4	16.3
۱۵٪ پودرلاستیک	۱	23.7	53.3	15.6
	۲	31.3	54.5	15
	۳	30.3	55.2	14.6
	۰	34.7	52.4	16.3

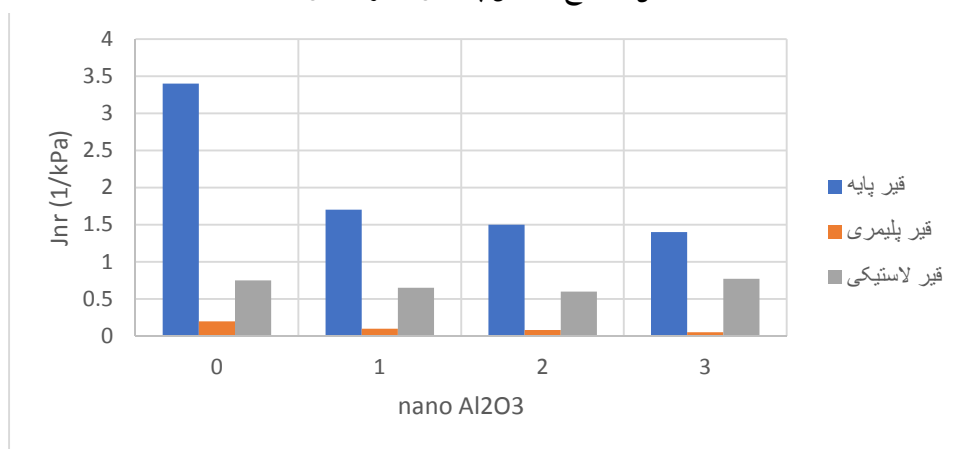
۴-۲- ویژگی‌های پایداری ذخیره سازی

۷۰٪ در SPD را نشان داد که نشان‌دهنده بهبود قابل توجهی در پایداری ذخیره‌سازی در دمای بالا است که نیاز برای پایداری خوب ذخیره‌سازی در دمای بالا را برآورده می‌کند. با این حال، تأثیر مفید بر قیر اصلاح شده با CR محدود شد. در کامپوزیت‌های پلیمری و نانو- Al_2O_3 ، وجود فازهای افزودنی به هم پیوسته مولکولی، حرکت قطعات زنجیره پلیمری را مختل می‌کند، که ممکن است پایداری ذخیره سازی را بهبود بخشد. علاوه بر این، جداسازی فاز در مواد دو فازی تحت قانون استوک است که بر اساس آن اثر سفت شدن یا افزایش ویسکوزیته قیر به دلیل افزودن نانو Al_2O_3 سرعت ته نشینی ذرات را کاهش می‌دهد و در نتیجه باعث کاهش سرعت ته نشینی ذرات می‌شود.

SPD برای ارزیابی خواص پایداری ذخیره سازی قیر استفاده شد. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، همه کامپوزیت‌های قیر و نانو- Al_2O_3 پایداری ذخیره سازی در دمای بالا را از خود نشان دادند. که نشان داد که مقادیر $SPD < 2.5$ درجه سانتی‌گراد نشان دهنده پایداری خوب در طول ذخیره سازی در دمای بالا است. در قیر اصلاح شده پودرلاستیک و کامپوزیت نانو- Al_2O_3 ، SPD با افزایش محتوای نانو- Al_2O_3 کاهش یافت. کامپوزیت با ۳٪ نانو Al_2O_3 و اصلاح CR کاهش ۵۰٪ در SPD را نشان داد. با این حال، کاهش SPDها نیاز SPD برای پایداری ذخیره سازی را برآورده نمی‌کند. در قیرهای اصلاح شده پلیمری SPD با افزایش محتوای نانو Al_2O_3 کاهش یافت. کامپوزیت با ۳٪ نانو Al_2O_3 و اصلاح پلیمری کاهش



شکل ۴. نتایج آزمایش پایداری ذخیره سازی



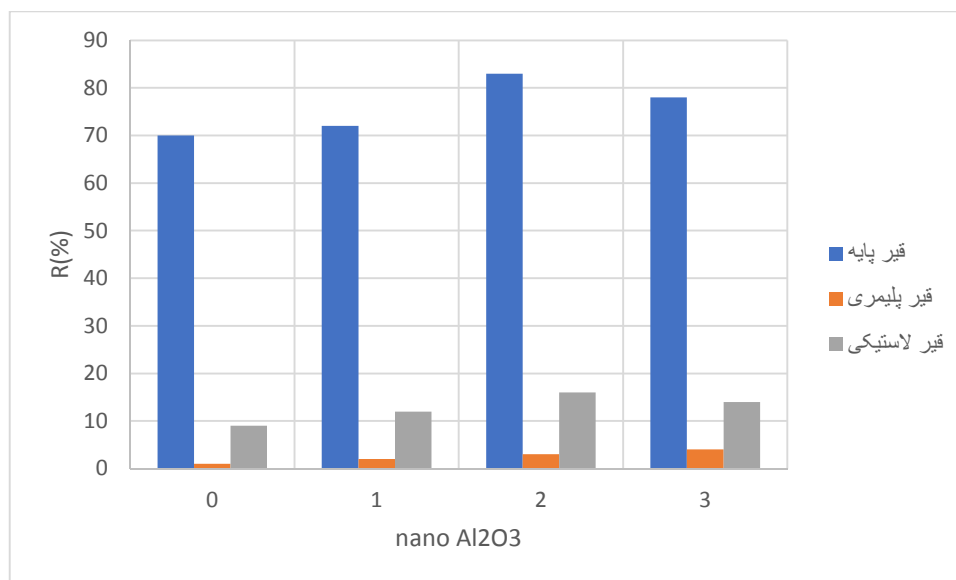
شکل ۵. نتایج پارامتر Jnr

۴-۳-خواص مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی

۴-۳-۱-قیر

زیرا کمترین Jnr و بالاترین مقادیر R ثبت شد. نکته قابل توجه، در نمونه‌های قیر اصلاح‌شده با پلیمر III-B و اصلاح‌شده با CR، اصلاح ۲٪ نانو Al₂O₃ با مقدار Jnr کمتر همراه بود که به درصد بازیابی بالاتر نسبت داده شد. به طور کلی، افزودن نانو Al₂O₃ به چسب‌های آسفالت مستقیم، اصلاح‌شده با پلیمر و اصلاح‌شده با CR باعث افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی شد. علاوه بر این، غلظت بهینه نانو Al₂O₃ مورد نیاز برای حداقل انطباق غیرقابل بازیافت و درصد بازیابی بالاتر با افزایش سفتی بایندر آسفالت کاهش یافت.

نتایج پارامترهای آزمایش MSCR، انطباق غیر قابل بازیافت (Jnr) و درصد بازیابی (R) در سطوح تنش ۳،۲ کیلو پاسکال در شکل‌های ۵ و ۶ ارایه شده است. مقادیر Jnr پایین‌تر نشان دهنده مقاومت شیاردار بهتر است، در حالی که درصد بازیابی به‌طور مثبت با سطح کشسانی قیر مرتبط است. نمونه‌های اصلاح‌شده با نانو Al₂O₃ نسبت به آسفالت اصلاح‌شده با AC20، اصلاح‌شده با پلیمر و آسفالت اصلاح‌شده با CR، Jnr کمتر و مقادیر درصد بازیابی بالاتری را نشان دادند. مقادیر Jnr و R اصلاح‌شده با ۳٪ نانو Al₂O₃ بهترین نتیجه را نشان داد.

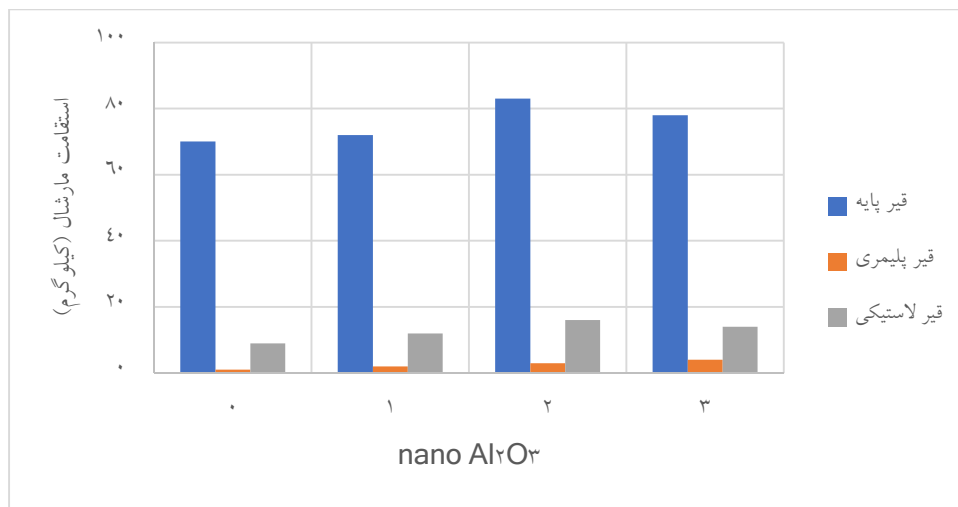


شکل ۶. نتایج بازگشت درصد کرنش

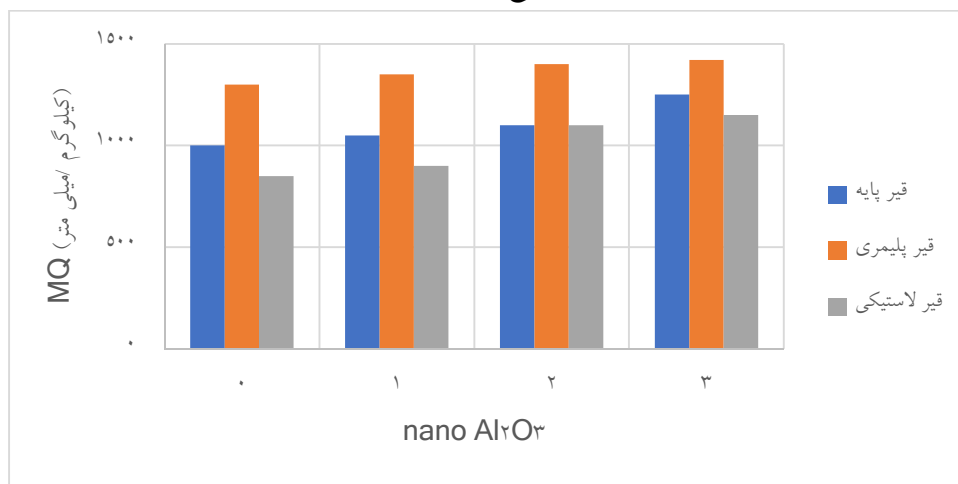
۴-۳-۲- بتن آسفالت

در مقادیر ضریب مارشال نشان دادند، در حالی قیر پایه با ۳٪ نانو Al_2O_3 مقدار ضریب مارشال ۳۰ درصد افزایش را نشان دادند. به طور کلی، بر اساس شاخص‌های مقاومت تغییر شکل برای قیر (G^* و Jnr) و آسفالت (ضریب مارشال)، افزودن ۲٪ نانو Al_2O_3 سطح بهینه مقاومت را در برابر تغییر شکل دائمی ارایه می‌کند. بر اساس این شواهد، عملکرد شیارشدن بتن آسفالت با کامپوزیت ۲٪ نانو- Al_2O_3 با استفاده از دستگاه شیارجای چرخ هامبورگ مورد بررسی قرار گرفت. مقاومت تغییر شکل دائمی مخلوط‌های مختلف بتن آسفالتی در شکل ۹ نشان داده شده است، نتایج نشان می‌دهد که افزودن نانو Al_2O_3 باعث افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی می‌شود. همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است، کامپوزیت‌های قیر اصلاح شده با قیر پایه، پلیمری و پودرلاستیک با ۲٪ نانو Al_2O_3 به ترتیب کاهش ۱۸٪، ۲۶٪ و ۱۳٪ را در عمق شیار نشان دادند.

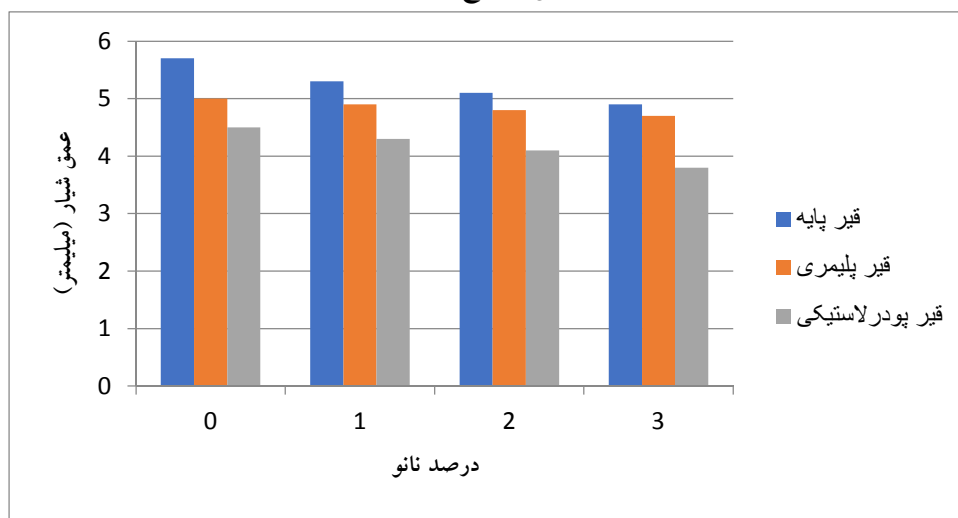
نتایج مقاومت مارشال و ضریب مارشال برای مخلوط‌های آسفالت در شکل ۷ و ۸ نشان داده شده است. با افزایش نانو Al_2O_3 سبب افزایش مقادیر پایداری مارشال در همه نمونه‌ها شده است. قیرهای اصلاح شده، پلیمری و اصلاح شده با CR با ۳٪ نانو Al_2O_3 به ترتیب افزایش مقاومت پایداری ۲۵٪، ۱۴٪ و ۳۴٪ را نشان دادند. مقادیر ضریب مارشال برای بتن‌های آسفالتی اصلاح‌شده پلیمری و بتن‌های آسفالتی اصلاح‌شده CR افزایش فزاینده‌ای را تا ۲ درصد غلظت نانو Al_2O_3 نشان داد، که پس از آن افزودن بیشتر نانو- Al_2O_3 این مقدار را کاهش داد. نتایج نشان می‌دهد که ۲٪ نانو Al_2O_3 مقاومت بهینه را در برابر تنش‌های برشی و تغییر شکل دائمی در مخلوط‌های بتن پلیمری و آسفالتی اصلاح‌شده با CR ایجاد می‌کند. با این حال، در قیرهای پایه اصلاح شده با نانو Al_2O_3 ، ضریب مارشال با افزایش محتوای نانو Al_2O_3 افزایش یافت. قیرهای پلیمری و پودرلاستیکی با ۲٪ نانو Al_2O_3 به ترتیب ۱۴٪ و ۳۶٪ افزایش



شکل ۷. نتایج استقامت مارشال



شکل ۸. نتایج MQ

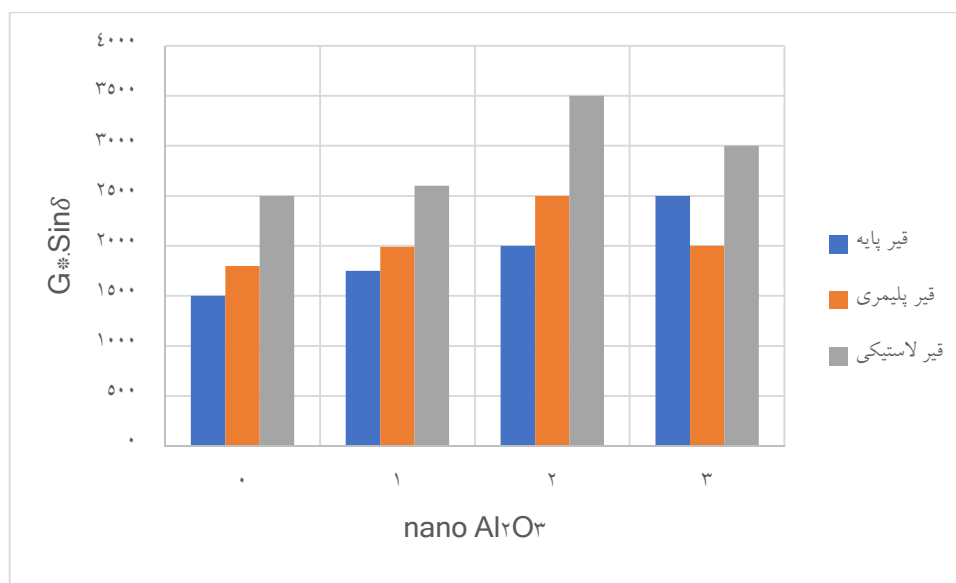


شکل ۹. نتایج عمق شیار

۴-۴- خواص مقاومت در برابر ترک خوردگی

نانو- Al_2O_3 افزایش یافت که غلظت ۳ درصد بهترین نتیجه را نشان داد. در قیرهای پلیمرهای و آسفالت اصلاح شده با CR، کامپوزیت‌های ۲٪ نانو Al_2O_3 به نتایج بهینه از نظر مقاومت در برابر ترک خوردگی در قیرهای قدیمی دست یافتند. همه نمونه‌های قیر الزامات Superpave را با مقدار $G^*Sin\delta <$ 5000 کیلو پاسکال برای قیرهای پیرشده برآورده کردند.

پارامتر خستگی $G^*Sin\delta$ Superpave در ۱۰ راد بر ثانیه استفاده شد. تحمل ترک خوردگی قیرهای پیرشده را در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد ارزیابی کنید. همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، افزودن نانو Al_2O_3 باعث افزایش مقادیر $G^*Sin\delta$ در تمام نمونه‌ها شد. در اصلاح کامپوزیت قیرپایه و نانو- Al_2O_3 مقادیر $G^*Sin\delta$ با افزایش محتوای

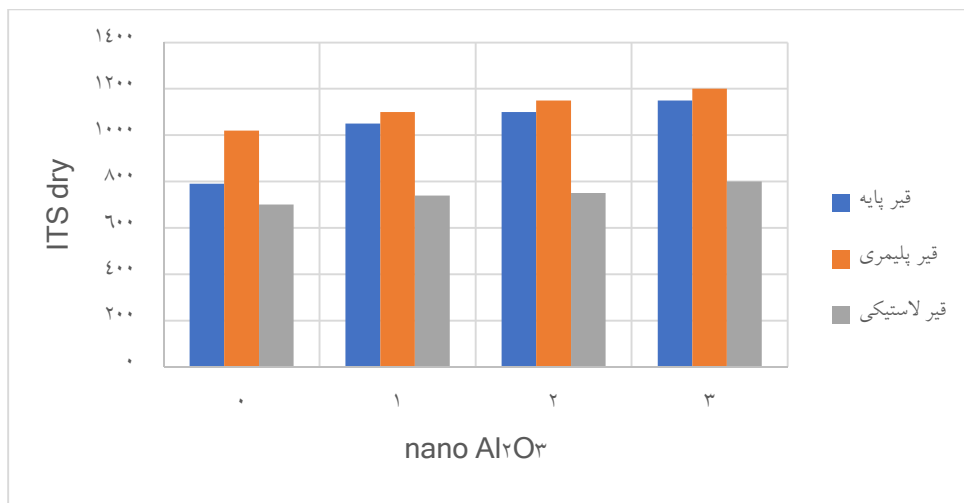


شکل ۱۰. نتایج پارامتر خستگی

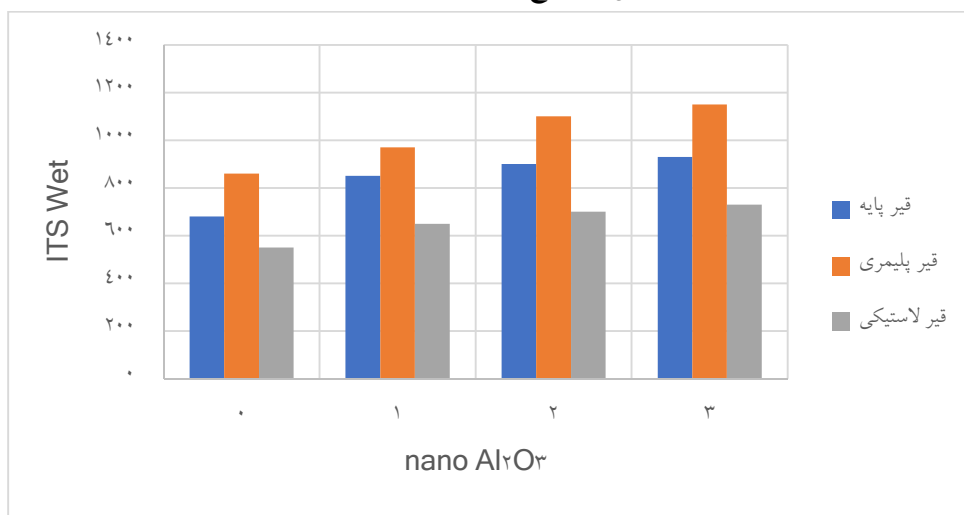
۴-۵- مقاومت در برابر آسیب رطوبت

مخلوط‌های بتن آسفالتی اصلاح شده با پلیمر بسیار معنی‌دار بود. کامپوزیت‌های ۳٪ نانو Al_2O_3 با قیر اصلاح شده با پلیمر و اصلاح شده با CR به ترتیب افزایش مقدار ITS خشک ۳۶٪، ۱۴٪ و ۱۶٪ و به ترتیب افزایش ارزش ITS مرطوب ۲۵٪، ۳۸٪ و ۲۸ درصد را نشان دادند. نتایج TSR نشان داد که افزودن نانو Al_2O_3 TSR را افزایش می‌دهد، که نشان می‌دهد نانو Al_2O_3 به عنوان یک عامل ضد لایه‌برداری در مخلوط‌های آسفالتی عمل می‌کند.

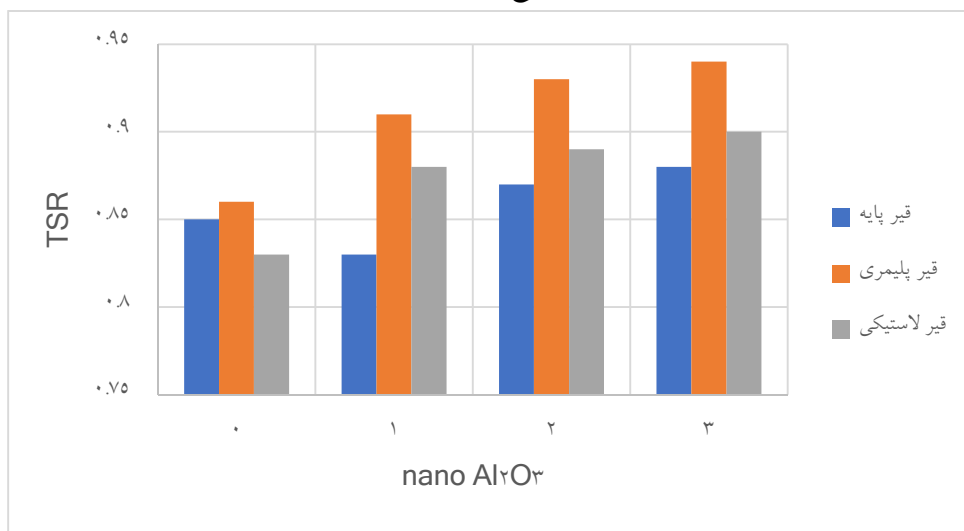
در بتن آسفالتی، مقاومت در برابر ترک خوردگی و تغییر شکل دائمی به استحکام کششی مربوط می‌شود، با ترک خوردگی کمتر و تغییر شکل دائمی در مخلوط‌های بتن با مقاومت کششی بالاتر. نتایج ITS در شرایط خشک و مرطوب برای مخلوط‌های بتن آسفالتی و مقادیر نسبت مقاومت کششی (TSR) مربوطه در شکل ۱۱ نشان داده شده است. و مخلوط آسفالتی اصلاح شده با CR در هر دو شرایط خشک و مرطوب با افزایش محتوای نانو Al_2O_3 افزایش یافت. اثر نانو Al_2O_3 بر مقادیر ITS در



شکل ۱۱. نتایج مقاومت کششی خشک



شکل ۱۲. نتایج مقاومت کششی تر



شکل ۱۳. نتایج نسبت مقاومت کششی

۵- نتیجه گیری

آسفالتی نشان داد. مخلوط در برابر تغییر شکل دائمی از نظر خواص دمای متوسط، نشان داده شد که نانو Al_2O_3 تحمل ترک خوردگی قیرهای آسفالت را بهبود می بخشد. حداکثر تحمل ترک خوردگی قیرهای آسفالت قدیمی در کامپوزیت ۳٪ نانو Al_2O_3 برای AC20 و ۲٪ نانو Al_2O_3 برای چسباننده آسفالت اصلاح شده با پلیمر و اصلاح شده با CR به دست آمد. همچنین، مقاومت به ترک بالاتری در قیر پایه، پلیمری اصلاح شده، و قیرهای اصلاح شده با CR با ۳، ۲ درصد و ۱ درصد نانو Al_2O_3 افزایش یافته است. علاوه بر این، نتایج حاصل از آزمایش کشش غیرمستقیم نشان داد که نانو Al_2O_3 مخلوط های کنترلی، اصلاح شده با پلیمر و اصلاح شده با CR، ITS و TSR مخلوط های بتن آسفالتی را بهبود بخشید. این یافته نشان داد که نانو- Al_2O_3 به عنوان یک عامل ضد عریان در مخلوط های آسفالتی عمل می کند و تأثیر مثبتی بر عملکرد آسیب رطوبت دارد، با ۳ درصد کامپوزیت های نانو- Al_2O_3 مقاومت بالاتری در برابر آسیب رطوبت نشان می دهد.

در این مطالعه، کامپوزیت های نانو Al_2O_3 -با AC20، پلیمر اصلاح شده، و آسفالت اصلاح شده با خرده لاستیک برای بهبود خواص دمای بالا و متوسط آسفالت قیر و بتن آسفالتی مخلوط گرم مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که کامپوزیت های نانو Al_2O_3 با قیرهای آسفالتی پایه، اصلاح شده با پلیمر و اصلاح شده با CR دارای مقادیر نفوذ پایین تر، افزایش نقاط نرم شدگی و افزایش ویسکوزیته بودند. علاوه بر این، کامپوزیت های با نانو Al_2O_3 پایداری ذخیره سازی قیر اصلاح شده با پلیمر را به طور قابل توجهی بهبود می بخشند و کامپوزیت های با ۳ درصد نانو Al_2O_3 شرایط آستانه برای پایداری ذخیره سازی در دمای بالا را برآورده می کنند. با این حال، اثرات مثبت اصلاح ۳٪ نانو Al_2O_3 -در قیر اصلاح شده با CR کمتر آشکار است. علاوه بر بهبود ویژگی های فیزیکی، کامپوزیت نانو Al_2O_3 با AC20، پلیمر اصلاح شده، و قیر اصلاح شده با CR مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی بهبود یافته را نشان داد، کامپوزیت ۲٪ نانو Al_2O_3 بهترین عملکرد را در قیر و بتن

۶- پی نوشت ها

- 1- Styrene Butadiene Styrene
- 2- Anti-Stripping Agent
- 3- Hot Mix Asphalt
- 4- Crumb Rubber
- 5- Softening Point Difference
- 6- Marshal Quotient
- 7- Dynamic Shear Rheometer
- 8- Indirect Tensile Strength
- 9- Tensile Strength Ratio

۷- مراجع

process crumb rubber-modified asphalt mixtures with nanomaterial", Road Mater. Pavement Design 19 (5) pp.1241-1258. Doi.org/10.1080/14680629.2017.1302356.
-Ali . S.I.A., A. Ismail, M.R. Karim, N.I.M. Yusoff, R.A. Al-Mansob, E. Aburkaba, (2016), "Performance evaluation of Al_2O_3

-Airey .G.D., M.M. Rahman, A.C. Collop, (2003), "Absorption of Bitumen into Crumb Rubber Using the Basket Drainage Method", Int. J. Pavement Eng. 4 (2), pp.105-119. Doi.org/10.1080/1029843032000158879.
-Arabani .M., S.A. Tahami, G.H. Hamedi, (2017), "Performance evaluation of dry

- properties of asphalt binder, *Road Mater.*”, *Pavement Design* 22 (11) pp.2604–2625.
- Bhat. F. Sadiq, M. Sha Mir, (2021), “A study investigating the influence of nano Al₂O₃ on the performance of SBS modified asphalt binder, *Constr. Build. Mater.*”, 271,121499.
- Hamedi. G.H. Hamedi, (2017), “Evaluating the effect of asphalt binder modification using nanomaterials on the moisture damage of hot mix asphalt, *Road Mater.*”, *Pavement Design* 18 (6), pp.1375–1394. Doi.org/10.1080/14680629.2016.1220865.
- Li . R.Y., F.P. Xiao, S. Amirhanian, Z.P. You, J. Huang, (2017), “Developments of nano materials and technologies on asphalt materials - A review, *Constr. Build. Mater.*”, 143, pp. 633–648. Doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.158.
- Modarres . A., H. Hamedi, (2014), “Effect of waste plastic bottles on the stiffness and fatigue properties of modified asphalt mixes, *Mater.*”, *Des.* 61, pp. 8–15. Doi.org/ 10.1016/j.matdes.2014.04.046.
- Mubaraki . M., S.I.A. Ali, A. Ismail, N.I.M. Yusoff, (2016), “Rheological Evaluation of Asphalt Cements Modified with ASA Polymer and Al₂O₃ Nanoparticles”, *Procedia Eng.* 143 (2016) pp.1276–1284. Doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.135.
- nanoparticle-modified asphalt binder, *Road Mater. Pavement Design* 18 (6), pp.1251–1268. Doi.org/10.1080/ 14680629.2016.1208621.
- S.I.A. Ali, A. Ismail, M.R. Karim, N.I.M. Yusoff, R.A. Al-Mansob, E. Aburkaba, (2016), “Performance evaluation of Al₂O₃ nanoparticle-modified asphalt binder, *Road Mater., Pavement Design* 18 (6), pp.1251–1268. Doi.org/10.1080/14680629.2016.1208621.
- Al-Mansob . R.A. Al-Mansob, A. Ismail, R.A.O.K. Rahmat, M.N. Borhan, J.M.A. Alsharif, S.I. Albrka, M.R. Karim, (2017), “The performance of Epoxidised Natural Rubber modified asphalt using nano-alumina as additive”, *Constr. Build. Mater.* 155, pp.680–687. Doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.106.
- M. Ameri, S. Hesami, H. Goli, (2013), “Laboratory evaluation of warm mix asphalt mixtures containing electric arc furnace (EAF) steel slag, *Constr. Build. Mater.*”, 49, pp.611–617. Doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.034.
- AASHTO, (2011), “Standard method of test for Hamburg wheel-track testing of compacted hot-mix asphalt (HMA)”, AASHTO T324, AASHTO, Washington, DC.
- Bhat. F.S., M.S. Mir, (2021), “Investigating the effects of Nano Al₂O₃ on high and intermediate temperature performance

Laboratory Evaluation of the Effect of Nano Al₂O₃ on High and Intermediate Temperature Performance of Asphalt Binder and Hot Mix Asphalt Mixture

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.

Farzin Poorheydari Mamaghani, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Malard Branch, Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.

E-mail: AminFarajollahi@gmail.com

Received: September 2022- Accepted: February 2023

ABSTRACT

Composite modification is increasingly used to alleviate the detrimental problems associated with asphalt modifiers and meet the massive demand for asphalt pavement. In this study, nano-Al₂O₃ composite modifications at three concentrations of 1%, 2%, and 3% by weight of asphalt binder were implemented in neat and modified asphalt binders to improve their performance at high and intermediate temperatures. These binders were evaluated in terms of their physical, rheological, and high-temperature storage stability properties. In addition, nano-Al₂O₃ composite modified binders were utilized in asphalt concrete and investigated for their resistance to cracking, permanent deformation, and moisture damage. The nano-Al₂O₃ composite modifications were made using neat, polymer-modified, and crumb-rubber (CR) modified asphalt binders. Adding nano-Al₂O₃ to the asphalt binders was found to improve stiffness, high-temperature storage stability, permanent deformation resistance, and cracking tolerance. Moreover, the composites of nano-Al₂O₃ with neat and modified asphalt binders were found to provide improved resistance to permanent deformation, cracking, and moisture damage in hot mix asphalt concrete. The composite of 2% nano-Al₂O₃ showed the best performance in terms of resistance to permanent deformation, the composite of 3% nano-Al₂O₃ showed the best performance in terms of resistance to moisture damage, the composites of 2% nano-Al₂O₃ with polymer and CR-modified asphalt binders both showed the best performance in terms of resistance to cracking, and the composite of 3% nano-Al₂O₃ with AC20 showed improved resistance to cracking.

Keywords: Nano-Al₂O₃, Composite Modification, Asphalt Binder, Asphalt Concrete