

ارزیابی اثر نانو رس بر رفتار تغییر شکل دائم مخلوط‌های آسفالتی گرم (HMA)

محمود عامری^۱، مصطفی وامق^{۲*}، حامد روح الامینی^۳، کیوان بمانا^۴

۱. استاد، دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران

۲ و ۳. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران

۴. دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران

Mostafa_Vamegh@yahoo.com

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۳/۱]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۲/۹/۹]

چکیده - تغییر شکل دائم یا شیار افتادگی در مسیر عبور چرخ‌های وسایل نقلیه یکی از مهم‌ترین مدهای خرابی است که بر عمر روسازی انعطاف‌پذیر تاثیر می‌گذارد. این نوع خرابی بیشتر در جاده‌های که در مناطق گرمسیر واقع شده‌اند مشاهده می‌شود. ویژگی‌های مصالح تشکیل‌دهنده نقش زیادی در ویژگی‌های ساختمانی روسازی بازی می‌کنند. اگرچه وزن قیر در مخلوط آسفالتی مقدار ناچیزی است، اما با این حال قیر اثر مهمی روی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی دارد و هرگونه تغییر در عملکرد قیر، روی عملکرد مخلوط آسفالتی اثرگذار خواهد بود. در دهه‌های اخیر به منظور غلبه بر مشکلات قیرهای خالص معمولی و ارتقای عملکرد مخلوط‌های آسفالتی از مواد اصلاح‌کننده قیر استفاده می‌شود. یکی از افزودنی‌هایی که به تازگی در اصلاح مشخصات رفتاری قیرها به کار گرفته شده است، نانو رس است. در این پژوهش با فرض اینکه بستر و لایه‌های زیراساس و اساس از مقاومت باربری کافی برخوردار است از افزودنی نانو رس برای بهبود خواص قیر برای افزایش مقاومت باربری آسفالت و اصلاح خصوصیات فنی آن در برابر شیار افتادگی در روسازی‌های انعطاف‌پذیر استفاده شده است. بدین منظور از مصالح سنگی آهکی با دانه‌بندی شماره ۴، پودر سنگ به عنوان فیلر، قیر ۶۰ - ۷۰ خالص و دو نوع نانو رس مونت موریلونیت Cloisite 15A و Cloisite 30B استفاده شده است. آزمایش مارشال، آزمایش‌های خزش دینامیکی در دو سطح تنش ۳۰۰ و ۴۵۰ Kpa و شیار جای چرخ در دمای ۵۰ درجه برای نمونه‌های مخلوط آسفالتی حاوی ۲، ۴ و ۶٪ از هر نوع نانو رس و نمونه شاهد انجام گرفته است. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی حاوی نانو ذرات را نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: مخلوط آسفالتی گرم، نانو رس، تغییر شکل دائم، مارشال، خزش دینامیکی.

۱- مقدمه

روسازی‌های انعطاف‌پذیر آسفالتی در مناطق گرمسیری در

مسیر چرخ‌ها رخ می‌دهد [۱].

تغییر شکل دائم از خرابی‌های است که مرتبط با بار چرخ است

[۲]. شیار شدگی به واسطه تغییر شکل‌های تجمعی دائمی و

برگشت‌ناپذیر در لایه‌های روسازی تحت تکرار بارگذاری

ترافیکی ایجاد می‌شود. در میان تمام لایه‌های مختلف سهیم در

شیار شدگی، تغییر مکان دائمی در لایه سطحی روسازی بخش

عمده‌ای از شیار شدگی را به خود اختصاص می‌دهد، به همین

خرابی‌های که در سیستم روسازی آسفالتی به وجود می‌آیند به

سه گروه عمده تقسیم‌بندی می‌شود که عبارت است از شیار

شدگی یا تغییر شکل‌های ماندگار^۱، خستگی یا ترک‌های ناشی

از بارگذاری^۲ و ترک‌های حرارتی در درجه حرارت پایین^۳.

شیار شدگی یکی از رایج‌ترین شکل‌های خرابی است که در

1 Permanent deformation or rutting.

2 Fatigue or load associated cracking.

3 Low temperature or thermal cracking.

آسفالتی را دارد، در این پژوهش آزمایش‌های خزش دینامیکی و شیار چرخ انجام شده و خصوصیات تغییر شکل مخلوط‌های آسفالتی حاوی نانو رس Cloisite 15A و Cloisite 30B مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- مروری بر ادبیات موضوع

تغییر شکل دائمی روسازی شامل دو حالت مختلف برای زمان طولانی شناخته شده است [۷ و ۸] که حالت اول تغییر شکل تجمعی و حالت دوم تغییر شکل پلاستیک است. حالت اول سطح تغییر شکل یافته پایین‌تر از سطح روسازی اولیه و در مسیر چرخ‌ها و حالت دوم سطح تغییر شکل یافته بالاتر از سطح روسازی اولیه و بین خارج و بین مسیر چرخ‌ها است. آزمایش‌های مختلفی از قبیل خزش استاتیکی، خزش دینامیکی، آزمایش کشش غیرمستقیم و آزمایش شیار چرخ برای ارزیابی پتانسیل تغییر شکل دائم روسازی‌های آسفالتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در میان روش‌های گفته شده ارزیابی پتانسیل تغییر شکل دائم روسازی‌های آسفالتی آزمون خزش دینامیکی که به وسیله‌ی موی ۱ و همکاران توسعه داده شده است بهترین روش است [۹].

بر اساس گزارش NCHRP از میان روش‌های آزمایشگاهی ارزیابی پتانسیل شیار شدگی، آزمایش خزش دینامیکی (به دلیل ماهیت بارگذاری سیکلی) همبستگی خوبی با عمق شیار اندازه‌گیری شده و ظرفیت بالایی برای تخمین شیار شدگی مخلوط‌های آسفالتی دارد [۱۰].

پژوهش‌های زیادی روی پلیمرهای اصلاح‌شده با نانو رس صورت گرفته است. با این حال، اطلاعات کمی در مورد قیرهای اصلاح‌شده با نانو رس منتشر شده است. متغیرهایی که تأثیر زیادی روی نانو کامپوزیت نهائی دارند شامل انتخاب نوع رس مصرفی، مؤلفه‌های پلیمر مصرفی و چگونگی اختلاط مناسب بین این دو برای دستیابی به نانو کامپوزیت ایده‌آل است [۱۱].

Chile آزمایش‌های مکانیکی روی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با نانو رس Cloisite انجام داد. نتایج حاصل از آن

دلیل توجه به قابلیت تغییر شکل دائمی مخلوط‌های آسفالتی در طرح اختلاط به‌عنوان یک امری ضروری تلقی می‌شود.

شیار شدگی عمر خدمت‌دهی مفید روسازی را کاهش و با تحت تأثیر قرار دادن خصوصیات کنترلی وسیله نقلیه خطرات جدی را برای استفاده کنندگان از راه ایجاد می‌کند [۳]. برای نمونه باران یا برف و یخ ذوب شده در شیار، دریاچه‌ای را تشکیل می‌دهند که سبب افزایش احتمال خطر هیدروپلنینگ و تصادفات ناگهانی می‌شود. شیار شدگی می‌تواند منجر به پدیده قیر زدگی نیز شود. در صورتی که شدت شیار شدگی زیاد باشد شدت قیر زدگی هم زیاد خواهد بود، به شکلی که سطح آسفالت به یک سطح بسیار صیقلی و صاف تبدیل می‌کند که باعث از بین رفتن اصطکاک و افزایش احتمال تصادفات ترافیکی می‌شود. تأثیر دیگر شیار شدگی بر عملکرد روسازی کاهش ضخامت مؤثر روسازی و در نتیجه ظرفیت مؤثر روسازی، که کاهش ظرفیت ساختاری روسازی منجر به شکست زودرس و ترک‌های ناشی از خستگی می‌شود [۴].

قیرهای اصلاح‌شده یکی از راه‌ها برای غلبه بر کاستی‌ها قیر طبیعی و نتیجه آن بهبود عملکرد روسازی است. اصلاح خواص قیر، باعث بالا رفتن کیفیت و افزایش عمر مفید آن می‌شود [۵]. یکی از افزودنی‌های شاخص برای اصلاح خواص قیر نانو ذرات است. نانو رس‌ها مواد منحصر به فردی هستند که به‌عنوان مواد افزودنی برای ساخت نانو کامپوزیت‌ها و بهبود قابل توجه خواص مواد پلیمری به کار می‌روند. ساختار نانو رس‌ها شامل صفحاتی کوچک و نامنظم با ضخامتی در حدود ۱ نانومتر و قطر چند صد نانومتری است. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های نانو رس‌ها نسبت طول به ضخامت بسیار بالای تک تک صفحات (از ۳۰۰ به ۱ و ۱۵۰۰ به ۱) است. به علت ساختار صفحه‌ای، نانو رس‌ها مواد پلیمری معمول را تقویت می‌کنند، یعنی خواص مکانیکی آن‌ها را بهتر می‌کنند، افزایش استحکام، مدول و ثبات ابعادی از این موارد است. صفحات نانو رس به‌عنوان محافظ در برابر رطوبت و مواد شیمیایی به خوبی به‌عنوان حائلی برای جلوگیری از نفوذ یا عبور گازها عمل می‌کنند [۶].

با توجه به اینکه نانو رس قابلیت بهبود عملکرد مخلوط‌های

رس و مخلوط اصلاح نشده.

۳. مقایسه رفتار مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با یکدیگر.

۴- مصالح مصرفی

۴-۱- قیر

قیر در مخلوط بتن آسفالتی به عنوان یک عامل چسباننده عمل می‌کند که مصالح سنگی را به صورت یک حجم پیوسته پیوند می‌دهد. قیر یک ماده با رفتار ویسکوالاستیک است که مقاومت و خصوصیات رفتاری فیزیکی آن وابسته به دما است.

قیر مصرفی مورد استفاده در این پژوهش، قیر خالص با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ است، که از شرکت نفت پاسارگاد تهران تهیه شده است. از این قیر برای تهیه نمونه‌های حاوی افزودنی نانو رس مورد استفاده قرار گرفته است. ویژگی‌های قیر مصرفی در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: ویژگی‌های قیر استفاده شده

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

۴-۲- افزودنی قیر (نانو رس)

افزودن نانو ذرات به سیستم قیر و پلیمر مطمئناً استحکام سیستم و مدول آن را افزایش می‌دهد در این پژوهش از نانو رس مونت موریلونیت با نام‌های Cloisite و Cloisite 15A- 30B با درصد‌های ۲، ۴ و ۶٪ وزنی قیر در قیر مورد استفاده قرار گرفته است (جدول ۲).

برای اختلاط قیر و نانو رس از دستگاه التراسنیک استفاده شده

نشان دهنده بهبود در خواص مکانیکی از جمله مقاومت کششی غیرمستقیم، خزش و خستگی است [۱۲].

خدادادی و همکاران با استفاده از آزمایش کشش غیرمستقیم عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۲ درصد نانو رس را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم که در سطوح تنش مختلف انجام شده افزایش بیش از دو برابر عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی را نشان می‌دهد [۱۳].

غفارپور جهرمی و همکاران آزمایش‌هایی روی قیرهای اصلاح شده با نانو رس Cloisite و Nanofil انجام داده شد. نتایج حاصل از آزمایش‌های متداول قیر و آزمایش رثومتر برشی دینامیکی (DSR) نمایانگر بهبود عملکرد قیر و سختی بالاتر قیرهای اصلاح است [۱۴]. پژوهش دیگری نیز به وسیله‌ی غفارپور جهرمی و همکاران روی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با نانو رس Cloisite و Nanofil انجام شده است. نتایج حاصل از آن نشان‌دهنده سختی بیشتر نمونه‌های حاوی نانو رس و این مخلوط‌ها مقاومت کششی غیرمستقیم و مدول برجهنگی بالاتری نسبت به مخلوط‌های آسفالتی شاهد دارند [۱۵].

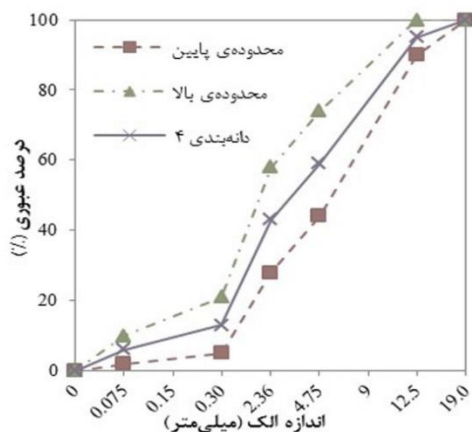
پژوهشی به وسیله‌ی Zhanping You و همکاران روی قیرهای اصلاح شده با نانو رس انجام گرفته است. در این پژوهش آزمایش‌های ویسکوزیته دورانی (RV) در دماهای ۸۰ تا ۱۷۵ درجه سانتی‌گراد و رثومتر برشی دینامیکی برای اندازه‌گیری مدول کل تنش برشی (G*) در محدوده دمایی ۱۳ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد انجام شده است که مقدار ویسکوزیته بین ۴۱ تا ۱۱۲ درصد افزایش و مقدار G* نیز به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا کرده است [۱۶].

۳- هدف

اهداف این پژوهش از ارزیابی اثر نانو رس روی مخلوط‌های آسفالتی گرم عبارت‌اند از:

۱. مقایسه اثر درصد‌های مختلف انواع نانو رس بر رفتار مخلوط‌های آسفالتی گرم (تغییر شکل دائم) و تعیین مقدار بهینه نانو رس.

۲. مقایسه رفتار مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با انواع نانو



شکل ۱: حد بالا، پایین و وسط دانه‌بندی ۴

جدول ۳: خصوصیات مصالح سنگی مورد استفاده

استاندارد آزمایش	حدود مجاز طبق نشریه ۲۳۴		نتایج آزمایش	شرح
	رویه	آستر		
AAS HTO T96	۳۰	۴۰	۲۲/۳	بیشینه سایش به روش لوس آنجلس (درصد)
BS 812	۲۵	۳۰	۱۶	بیشینه ضریب تورق (درصد)
ASTM D5821	۹۰	۸۰	۹۳	کمینه شکستگی در دو جبهه روی الک شماره ۴ (درصد)
AASHT O T85	۲/۵	۲/۵	۲/۲	بیشینه درصد جذب آب (مصالح درشت‌دانه)
AAS HTO T84	۲/۵	۲/۸	۲/۴	بیشینه درصد جذب آب (مصالح ریزدانه)
ASTM C127	-	-	۲/۵۹	وزن مخصوص واقعی مصالح سنگی درشت‌دانه (gr/cm ³)
ASTM C128	-	-	۲/۳۲	وزن مخصوص واقعی مصالح سنگی ریزدانه (gr/cm ³)

۵- روش آزمایش

ابتدا برای تعیین درصد قیر بهینه نمونه‌های استاندارد مارشال ساخته می‌شود و در نهایت با نمونه که با دستگاه تراکم ژیراتوری ساخته می‌شود ویژگی تغییر شکل ماندگار و مقدار شیار شدگی هریک از نمونه مخلوط‌ها با استفاده از آزمایش

است. اختلاط در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد و با تعداد دور ۶۰۰۰ دور در دقیقه و مدت زمان ۳۰ دقیقه انجام گرفته است. برای اطمینان از توزیع یکنواخت و جلوگیری از کلوخه شدن، نانو رس مورد نیاز در ۱۰ مرحله افزوده شده است.

جدول ۲: مشخصات نانو رس مصرفی

CLOISITE 15A	CLOISITE 30B	مشخصات
2M2HT	MT2EtOH	اصلاح‌کننده آلی
۱۲۵ میلی‌گرم	۹۰ میلی‌گرم	مقدار اصلاح‌کننده در ۱۰۰ گرم رس
< ۲٪	< ۲٪	درصد رطوبت
۴۳٪	۳۰٪	کاهش رطوبت در اثر حرارت
۱،۶۶	۱،۹۸	چگالی (گرم / سانتی‌متر مکعب)

۴-۳- مصالح سنگی

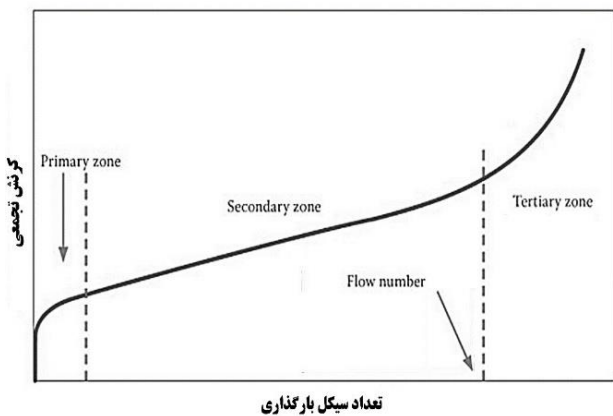
مصالح سنگی ۹۰ تا ۹۵٪ وزنی و ۷۵ تا ۸۵٪ حجمی مخلوط‌های بتن آسفالتی را شامل می‌شود. بنابراین ویژگی‌های فیزیکی و معدنی مصالح سنگی در مقاومت شیار شدگی و تغییر شکل دائم مخلوط آسفالتی تأثیر زیادی دارد. ساختار مقاوم‌تر مصالح سنگی به مخلوط‌های بتن آسفالتی با مقاومت بالا در مقابل تغییر شکل ناشی از بارگذاری تکرارشونده منجر [۱۷ و ۱۸] است.

فیلرهای معدنی به شکل مرسوم در مخلوط‌های بتن آسفالتی برای پر کردن فضای خالی بین مصالح سنگی استفاده می‌شوند. همچنین فیلر باعث بهبود ویژگی‌های مکانیکی مخلوط می‌شود. قابل گفتن است که مهم‌ترین نقش فیلر در بتن آسفالتی افزایش عمر روسازی و ازدیاد مقاومت آن در برابر تأثیر آب است. [۱۹].

مصالح سنگی استفاده شده در این پژوهش برای ساخت نمونه‌های آسفالتی از معدن اسب چران واقع در شهرستان رودهن تهیه شده و از نوع سنگدانه‌های شکسته آهکی می‌باشند. پودر سنگ آهک به‌عنوان فیلر (عبوری از الک شماره ۲۰۰) استفاده شده است. خصوصیات مصالح سنگی در جدول ۳ نشان داده شده است.

۵-۲- آزمایش خزش دینامیکی

مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر تغییر شکل پلاستیک را می‌توان با استفاده از آزمون خزش تکراری تعیین کرد. در آزمایش خزش دینامیکی تنش تک محوره پالسی مکرر روی یک نمونه آسفالت اعمال و تغییر شکل حاصل در همان جهت با استفاده از مبدل‌های دیفرانسیل خطی متغیر (LVDTs) اندازه‌گیری می‌شود [۲۰]. نتایج این آزمایش به صورت منحنی کرنش دائمی تجمعی در برابر تعداد سیکل‌های بارگذاری ارائه می‌شود. شکل (۲) منحنی کرنش تجمعی کل در برابر سیکل بارگذاری را نشان می‌دهد. منحنی کرنش تجمعی به ۳ ناحیه تقسیم می‌شود: ناحیه اول ۱، ناحیه دوم ۲، ناحیه سوم ۳. تعداد سیکل در شروع ناحیه سوم به عدد روانی شناخته می‌شود [۲۱].



شکل ۲: منحنی کرنش تجمعی کل در برابر سیکل بارگذاری در آزمایش خزش [۱۹]

در ناحیه اول تغییر مکان‌های دائم به‌طور ناگهانی روی هم انباشته می‌شوند، در ناحیه دوم افزایش روند (شیب) تغییر مکان دائم کاهش می‌یابد تا به مقدار ثابتی می‌رسد و در ناحیه سوم شیب تغییر مکان دائم دوباره افزایش می‌یابد و مقدار تغییر مکان دائم به شدت روی هم انباشته می‌شود. این آزمایش با استفاده از دستگاه UTM 5P انجام شده است. داده‌های ورودی دستگاه شامل ابعاد نمونه‌ها، مدت زمان

- 1 Primary zone
- 2 Secondary zone
- 3 Tertiary zone

خزش دینامیکی و آزمایش جای شیار چرخ مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۵-۱- آزمایش مارشال (تعیین قیر بهینه)

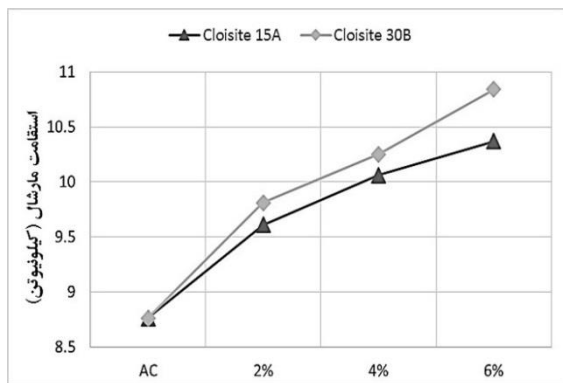
طرح اختلاط بر اساس طرح اختلاط مارشال (ASTM D1599) است که این روش جزء روش‌های طرح اختلاط تجربی است. برای تعیین درصد قیر بهینه نمونه‌هایی با درصد‌های مختلف قیر تهیه می‌شود. درصد‌های انتخابی قیر ۴/۵٪، ۵/۵٪، ۶٪ و ۶/۵٪ است که در هر درصد قیر، سه نمونه ساخته می‌شود. بعد از اختلاط قیر و مصالح سنگی، نمونه در داخل استوانه استاندارد مارشال با قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۵/۶ سانتی‌متر ریخته شده و به وسیله چکش مارشال کوبیده می‌شود. تعداد ضربات لازم برای مدل کردن ترافیک عبوری سنگین، ۷۵ ضربه در هر طرف نمونه است. حد وسط دانه‌بندی شماره ۴ (شکل ۳) نشریه ۲۳۴ برای استفاده از اندازه‌های مختلف مصالح سنگی مورد استفاده قرار گرفته است

مقدار قیر بهینه بر اساس پارامترهای بیشینه وزن مخصوص، بیشینه 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. در جدول ۴ مقدار قیر بهینه و مقاومت مارشال برای هر یک از نمونه قیر نشان داده شده است.

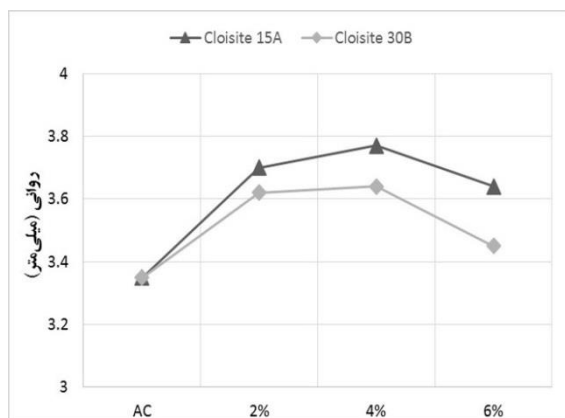
جدول ۴: درصد قیر بهینه و نتایج آزمایش مارشال

روانی (MM)	استقامت مارشال (KPA)	درصد قیر بهینه	نوع نمونه
۳,۳۵	۸,۷۶	۴,۹	نمونه شاهد
۳,۷۰	۹,۶۱	۵,۴	Cloisite 15A
۳,۷۷	۱۰,۰۶	۵,۵	
۳,۶۴	۱۰,۳۷	۵,۶	
۳,۶۲	۹,۸۱	۵,۲	Cloisite 30B
۳,۶۴	۱۰,۲۵	۵,۳	
۳,۴۵	۱۰,۸۴	۵,۴	

همان‌طور که از شکل ۴ مشخص می‌باشد با افزودن نانو رس به قیر روانی ابتدا افزایش و سپس با افزایش درصد نانو رس روانی کاهش پیدا می‌کند. افزایش روانی قیر به دلیل افزایش درصد قیر بهینه (افزایش ۰/۵ درصد قیر در مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۲ درصد نانو رس) با افزوده شدن نانو رس به قیر است. هنگامی که مقدار نانو رس در قیر افزایش (۴ و ۶ درصد نانو رس در قیر) پیدا می‌کند، ویسکوزیته و چسبندگی قیر اصلاح شده افزایش پیدا کرده که منجر به کاهش روانی در مخلوط‌های آسفالتی با درصد نانو رس بیشتر می‌شود. در مجموع می‌توان بیان کرد که نمونه‌های حاوی نانو رس انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به نمونه شاهد دارند.



شکل ۳: نمودار استقامت مارشال



شکل ۴: نمودار روانی

۶-۲- آزمایش خزش دینامیکی و شیار جای چرخ

آزمایش خزش دینامیکی برای اندازه‌گیری مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر تغییر شکل (رسیدن به ناحیه سوم) انجام شده است. در نهایت خصوصیات واکنشی و عدد روانی به دست

بارگذاری و باربرداری، تنش تماسی و تنش اعمالی است. در این پژوهش بارگذاری مربعی با تکرار ۰/۵ HZ (با ۵۰۰ میلی‌ثانیه بارگذاری و ۱۵۰۰ میلی‌ثانیه استراحت) بر اساس استاندارد Australian code AS 2891.12.1 انتخاب شده است.

۵-۳- آزمایش شیار چرخ

یکی دیگر از روش‌های اندازه‌گیری ویژگی تغییر شکل‌های دائمی مخلوط‌های آسفالتی، آزمایش شیار جای چرخ است. از آنجا که از مقادیر تغییر مکان جمع‌ی در آزمایش خزش، با توجه به اینکه مخلوط آسفالتی در این آزمایش در شرایط طبیعی (نداشتن مهار جانبی) که در حالت واقعیت از آن برخوردار است، قرار نمی‌گیرد، نمی‌توان عمق شیار را نتیجه گرفت، بنابراین تغییر مکان بیشتری در مقابل اعمال بار از خود نشان می‌دهد. بنابراین برای اندازه‌گیری عمق شیار از آزمایش شیار جای چرخ استفاده شده است [۲۲].

نمونه‌های استوانه‌ای در دستگاه قرار گرفته و به وسیله‌ی چرخ‌هایی با فشار حدود ۱۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع (۱۴۰ psi) مورد بارگذاری قرار می‌گیرند. فرکانس بارگذاری برای هر نمونه ۱ هرتز و دمای آزمایش ۵۰ درجه سانتی‌گراد است. 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 به‌عنوان عمق شیار هر نوع مخلوط به دست آمد.

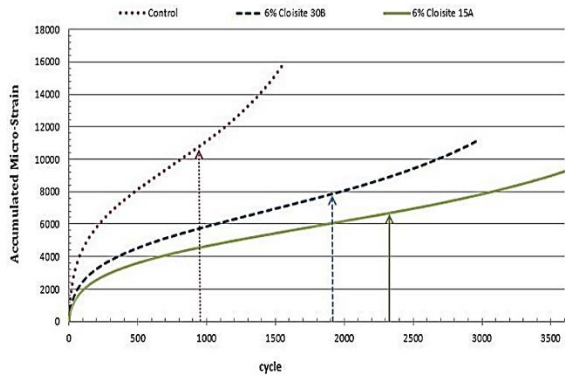
۶- نتایج و تفسیر داده‌ها

۶-۱- آزمایش مارشال

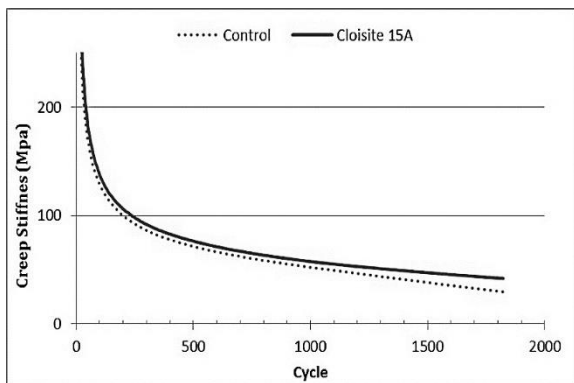
نتایج حاصل از آزمایش مارشال برای تعیین اثر نوع قیر مورد ارزیابی قرار گرفت و پارامترهای مختلفی از جمله روانی و استقامت مارشال مخلوط آسفالتی بررسی شد. شکل ۳ و ۴ برای مقایسه پارامترهای مذکور ترسیم شده است.

با توجه شکل ۳ با اضافه شدن انواع نانو رس بر استقامت مارشال افزوده می‌شود و علت آن بهبود در خواص قیر اصلاح‌شده با نانو رس به دلیل بالا بودن سطح ویژه نانو ذرات و در نتیجه بهبود خواص مکانیکی مخلوط آسفالتی بیان کرد.

دارند و نمونه شاهد در مقایسه با نمونه‌های اصلاح شده دارای تغییر شکل‌های بزرگتری در مرحله اول است. افزودن نانو رس به عنوان اصلاح کننده باعث می‌شود که تغییر شکل‌های برشی در سیکل‌های بالاتری نسبت به مخلوط‌های معمولی اتفاق بیفتد.



شکل ۷: نمودار کرنش تجمعی در سطح تنش ۴۵۰ Kpa



شکل ۸: نمودار مدول خزشی در سطح تنش ۴۵۰ Kpa

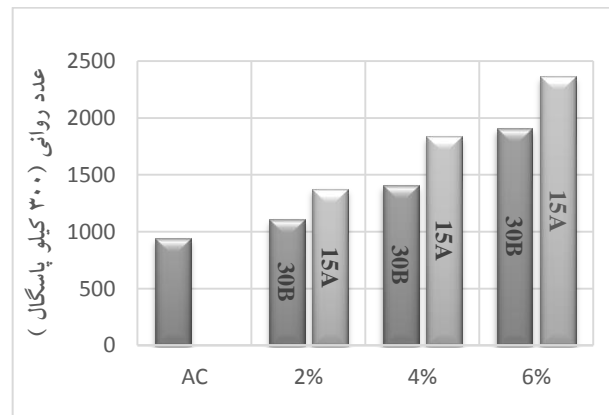
همان‌گونه که از شکل ۸ پیداست مخلوط‌های حاوی نانو رس دارای مدول خزش بالاتری در سیکل یکسان نسبت به مخلوط شاهد است که نشانگر تغییر شکل‌های پلاستیک بزرگتر در مخلوط شاهد است. می‌توان عنوان کرد که افزودن نانو رس باعث ایجاد مخلوط با خاصیت تغییر شکل پلاستیک کمتر نسبت به مخلوط‌های معمولی باشد.

از آزمایش شیار چرخ برای اندازه‌گیری مقدار عمق شیار چرخ استفاده می‌شود. برای آماده‌سازی نمونه‌ها برای انجام آزمایش، ابتدا از هر نوع مخلوط سه نمونه به مدت ۵ ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرند.

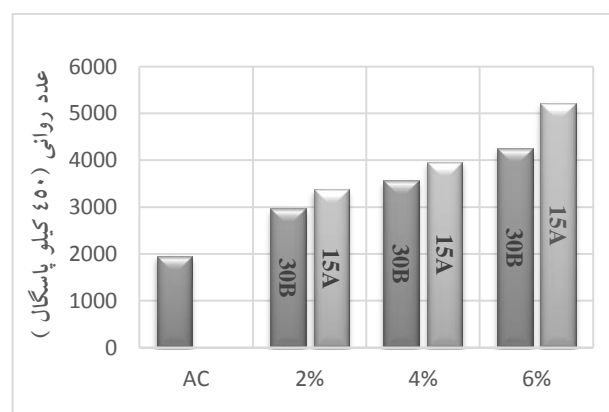
با توجه به شکل ۹ با افزودن نانو ذرات رس از عمق شیار مخلوط‌های کاسته می‌شود که روند این کاهش عمق شیار با

آمده است.

برای هر نوع مخلوط تحت هر کدام از تنش‌های ۳۰۰ و ۴۵۰ Kpa سه نمونه (برای هر مخلوط جمعاً ۶ نمونه) به وسیله دستگاه مترکم کننده ژیراتوری آماده و قبل از آزمایش به مدت ۴ ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته‌اند. برای به دست آوردن عدد روانی هر نمونه نتایج حاصل از آزمایش خزش دینامیکی با استفاده از روش You و Goh [۲۳] مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت نتایج حاصله به صورت نمودار عدد روانی در دو سطح تنش و نمودار کرنش تجمعی برای نمونه شاهد و مخلوط‌های آسفالتی با ۶٪ نانو رس در سطح تنش ۴۵۰ Kpa در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است.



شکل ۵: عدد روانی در سطح تنش ۳۰۰ کیلو پاسگال



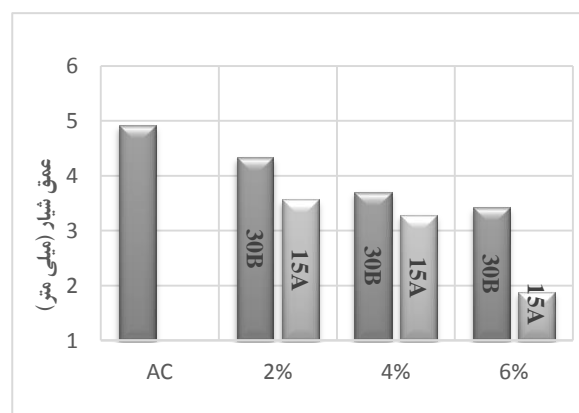
شکل ۶: عدد روانی در سطح تنش ۴۵۰ کیلو پاسگال

با توجه به شکل‌های ۶ و ۷ نمونه‌های اصلاح شده با نانو رس مقاومت بالاتری در برابر تغییر شکل نسبت به نمونه شاهد

مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر تغییر شکل هماهنگی خوبی دارد.

مخلوط‌های آسفالتی به شکل قابل توجهی بهبود پیدا می‌کند و مقدار اصلاح‌کننده در این درصد به مقدار بهینه خیلی نزدیک است.

۵. مخلوط‌های اصلاح‌شده با نانو ذرات Cloisite 15A در مقایسه با Cloisite 30B دارای عملکرد بهتری است و تأثیر بیشتری بر افزایش مقاومت در برابر شیار شدگی دارد که دلیل آن را می‌توان تفاوت در ویژگی‌های فیزیکی و نوع اصلاح‌کننده بکار رفته در آن‌ها تلقی کرد که باعث عملکرد شیمیایی متفاوت در قیر می‌شود.



شکل ۹: عمق شیار مخلوط‌های آسفالتی

۶- مراجع

- [1] Santucci, Larry. ; "Rut resistant asphalt pavement." Institute of Transportation Studies, 1998.
- [2] Pardhan M. M.; "Permanent deformation characteristics of asphalt-aggregate mixture using varied material and modeling procedure with Marshall method." Ph.D. thesis, Montana State University, Bozeman, MT, 1995.
- [3] Sousa J. B., Craus J.; "Monismith C. L. ; Summary Report on Permanent Deformation in Asphalt Concrete." Report SHRP-A/IR-91-104, SHRP, National Research Council. Washington, D.C, 1991.
- [4] Drakos C.A., Roque R., Birgisson B. and Novak, M.; "Identification of a Physical Model to Evaluate Rutting Performance of Asphalt Mixtures." Journal of ASTM International, Volume 2, 2005.
- [5] Kalyoncuoglu S. and Tigdemir M.; "A model for dynamic creep evaluation of SBS modified HMA mixtures." Construction and Building Materials, 25(2), 2011, 859-866.
- [6] Nguyen Q. T., Baird D. G.; "Process for Increasing the Exfoliation and Dispersion of Nanoclay Particles into Polymer Matrices Using Supercritical Carbon Dioxide." Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005.
- [7] Huang HM., White, TD.; "Minimum crushed aggregate requirements." Draft final report, joint highway research project FHWA/IN/JHRP-96/23. West Lafayette, 1996.
- [8] Gokhale S., Choubane B., Byron T., Tia M.; "Rut initiation mechanisms in asphalt mixtures as generated under accelerated pavement testing." Journal of the Transportation Research Board, 2005, pp 136-145.
- [9] Monismith CL., Ogawa N., Freeme C.; "Permanent deformation of subgrade soils due to repeated loadings." Transportation Research Record, i537, 1975, pp 1-17.
- [10] Kaloush KE., Witczak MW.; "Tertiary flow characteristics of asphalt mixtures." Association of Asphalt Paving Technologists, 2002, 71, pp 278-306.
- [11] Pinnavaia TJ., Beall GW. ; Polymer-Clay Nanocomposites; England: John Wiley and Sons Ltd, 2000.

۵- نتیجه‌گیری

۱. نانو رس باعث افزایش چشمگیر درصد قیر بهینه می‌شود به گونه‌ای که تنها به ازای دو درصد نانو رس، قیر بهینه ۰,۵٪ افزایش می‌یابد.
۲. به‌کارگیری نانو رس به‌عنوان ماده افزودنی به قیر اثر قابل‌ملاحظه‌ای روی استحکام مارشال و افزایش روانی این نوع مخلوط‌ها نسبت به مخلوط‌های شاهد داشته است، که مقدار استحکام مارشال در نمونه حاوی ۶ درصد نانورس نسبت مخلوط شاهد ۲۴ درصد افزایش پیدا کرده است. همچنین با اضافه شدن این ماده به قیر مقدار قیر مورد نیاز برای پوشش سنگدانه‌ها افزایش قابل‌ملاحظه‌ای دارد.
۳. با توجه به نتایج حاصل از آزمایش خزش دینامیکی و شیار جای چرخ مقاومت مخلوط‌های اصلاح‌شده با نانو ذرات رس در برابر تغییر شکل‌های دائم به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش پیدا می‌کند و مقدار تغییر شکل‌های الاستیک در مخلوط‌ها نیز افزایش پیدا می‌کند. مقدار مقاومت در برابر تغییر شکل در نمونه‌های حاوی ۶ درصد نانو رس نسبت به نمونه شاهد، ۱۶۰ درصد افزایش پیدا کرده است.
۴. با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام گرفته مشخص می‌شود با افزایش انواع نانو ذرات رس تا ۶٪ رفتار

- [18] shen D. H., kuo M. F., Du J. C.; "Properties of Gap-Aggregate Gradation Asphalt Mixture and Permanent Deformation." *Construction and Building Materials*, Volume 19, 2005, pp. 147-153.
- [۱۹] طباطبایی؛ امیر محمد؛ روسازی راه؛ تهران، انتشارات مرکز نشر دانشگاهی، چاپ دهم، ۱۳۷۳.
- [20] Asi IM.; "Performance evaluation of SUPERPAVE and Marshall asphalt mix designs to suite Jordan climatic and traffic conditions." *Construction and Building Materials*, 2007, pp 1732-1740.
- [21] National Cooperative Highway Research Program; "Simple Performance Test for Superpave Mix Design." NCHRP Report 465. Transportation Research Board. National Academies Press Washington D.C., 2002.
- [22] Garb R.; "Permanent Deformation Properties of Asphalt Concrete Mixtures." Ph.D. Thesis, NTNU, Norway, 2000.
- [23] Goh SW., You Z.; "A simple stepwise method to determine and evaluate the initiation of tertiary flow for asphalt mixtures under dynamic creep test." *Construction and Building Materials*, Volume 23, 2009, pp 3398-3405.
- [12] Ghile DB.; "Effects of Nanoclay Modification on Rheology of Bitumen and on Performance of Asphalt Mixtures." M.Sc. Thesis, Delft University of Technology, 2005.
- [۱۳] خدادادی، ا.، سوداگری، ج.، اصلانی، ا.ح.، صالحی، ح.، "تاثیر استفاده از قیرهای اصلاح شده با مواد نانورس در عملکرد خستگی مخلوط های آسفالتی"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۱۳، ۱۳۹۱، صفحه ۷۱.
- [14] Ghaffarpour Jahromi S., Khodaii A., "Effects of nanoclay on rheological properties of bitumen binder." *Construction and Building Materials*, Volume 23, 2009, pp 2894-2904.
- [15] Ghaffarpour S., Andalibizade B.; "Vossough, S., "Engineering propertises of nanoclay modify asphalt concrete mixture." *Arabian Journal for Science and Engineering*, Volume 35 ,2010, Page 89.
- [16] You Z., Mills-Beale j., Foley J. M., Roy S., Odegard G. M., Dai Q., Goh S. W.; "Nanoclay-modified asphalt materials: Preparation and characterization." *Construction and Building Materials*, Volume 25, 2011, pp 1072-1078.
- [17] ASTM. *Road and Paving Materials*; Volume 04-03, 2003.

