بر رسی ارتقاء عملکرد مخلوط آسفالتی SMA در برابر شیارشدگی با افزودن نانوذرات

مقاله علمی – پژوهشی

محمود رضا کی منش*، دانشیار، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
شاهین شعبانی، دانشیار، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
پیمان رشیدیان، دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران ، ایران
سجاد کفاش زاده، دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mrkeymanesh@pnu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۶– پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱
صفحه ۲۹۰-۲۷۹

چکیده

میکرو ساختار مخلوط‌های آسفالتی نقش مهمی در عملکرد آنها ایفاء می‌کند. ایده استفاده از افزودنی‌های مختلف به قیر به منظور اصلاح بهتر عملکرد آن در مخلوط‌های آسفالتی مورد توجه پژوهشگران صنت راه سازی بوده و است. فن آوری نانو مواد با توجه به قابلیت‌های فراوان در اصلاح رفتار مخلوط‌های آسفالتی از جدید ترین روش های عصر حاضر در بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در برابر خرابی‌های رو سازی اسفالتی می‌باشد. در این پژوهش از نانو اکسید آهن به صورت مخلوط در قیر جهت بررسی خصوصیات عملکردی مخلوط آسفالتی ماستیک درشت دانه استفاده شد و نتایج آن با مخلوط بدون افزودنی نانو اکسیدآهن به عنوان مخلوط شاهد مقایسه شده‌اند. در خلال این مطالعه آزمایش تعیین مدول سختی به روش کشش غیر مستقیم وآزمایش ویل تراک بر روی نمونه‌های ساخته شده با افزودنی نانو اکسید آهن و نمونه شاهد انجام شد. ازتجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده مشخص شد که استفاده از نانو اکسیدآهن به صورت مخلوط در قیر تاثیر مثبتی روی مدول سفتی و مقاومت در برابر شیار شدگی دارد. به طوری که با افزایش تا ۱,۲ درصد نانواکسیدآهن نسب به قیر مخلوط مدول سختی در دماهای ۵، ۱۵، ۲۵ درجه ٤١ تا ۷۲ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد که این میزان افزایش احتمال وقوع خرابی شیارشدگی را تا حد زیادی کاهش می‌دهد هچنین از نتایج آزمایش ویل تراک مشخص گردید افزایش تا ۱,۲ درصدی نانو اکسید آهن نسبت به قیر مخلوط در دماهای ۴۰، ۵۰، ۶۰ درجه ۳۶ تا ۵۰ درصد سبب بهبود در عمق شیار نسبت به نمونه شاهد می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: میکرو ساختار،مدول سختی، مخلوط آسفالتی ماستیک، شیار شدگی، ویل تراک

۱-مقدمه

از جمله مصالحی که به وفور برای ساخت روسازی راه‌ها و فرودگاه‌ها استفاده می‌شود بتن آسفالتی است که شامل سه جزء می‌باشد: سنگدانه‌ها در اندازه‌های مختلف، قیر و حفره‌های هوا در حالی که سنگدانه‌ها اساساً به عنوان یک اسکلت عمل می‌کنند قیر اثر چسبندگی را در بین ذرات سنگ دانه ایجاد و به خواص ویسکو الاستیک مخلوط کمک می‌کند. چوبدار، فرج اللهی، عاملی (۱٤۰۲). خواص مخلوط آسفالتی نقش مهمی را در وضعیت روسازی و کنترل خرابی‌های آن بازی می‌کند عملکرد مخلوط به طور قابل ملاحظه‌ای متاثر از شریط چسبنده قیری است زال نژاد، حسامی (۱٤۰۰). مقاومت کششی از مهمترین پارامترهای اثر گذار در ساختار مخلوط آسفالتی است. یک مخلوط آسفالتی با داشتن طرح اختلاط و مقاومت کششی

مناسب از بروز شیار افتادگی ناشی از جریان پلاستیک وکاهش شکنندگی آن جلوگیری خواهد کرد. تردد وسایل نقلیه و وارد آمدن بار محوری به روسازی به مرور زمان باعث بوجود آمدن خرابی‌ها تغییرات دانسیته و شیار شدگی در مسیر چرخ‌ها می‌شود. رشیدیان، کی منش، ایوبی نژاد (۱۴۰۲). امروزه، روسازی‌های آسفالتی به دلیل افزایش شدت و تکرار بارهای ترافیکی در راه‌های با ظرفیت بالا،تحت بارگذاری‌های شدید قرار دارند که این عامل منجر به بروزخرابی شیار شدگی می‌گردد. پیارک (۲۰۰۶).

پژوهشگران و مهندسین به طور پیوسته در تلاشند تا عملکرد روسازی‌های آسفالتی را بهبود بخشند. روسازی راه‌ها با توجه به اینکه در معرض بارگذاری مکرر و متعدد محورهای سنگین قرار می‌گیرند، باید دارای مقاومت کافی در برابر ترک خوردگی، خستگی، شیارشدگی و لغزش باشند. هانگ (۱۹۹۳).

مخلوط آسفالتی ماستیک از مصالح سنگی با دانه‌بندی میان تهی، قیر و مصالح تثبیت کننده تشکیل شده است. درصد زیاد مصالح درشت‌دانه در این مخلوط باعث بهبود ساختار دانه‌بندی آن می‌شود. فضای خالی موجود در این مخلوط آسفالتی تقریباً به طور کامل توسط فیلر ریز دانه و قیر پر می‌شود.

در این مخلوط‌ها به منظور دستیابی به تراکم مطلوب مقدار قیر بیشتری نسبت به مخلوط‌های آسفالت گرم لازم است. به منظور تثبیت این نوع مخلوط های آسفالتی می‌توان از الیاف آلی و معدنی و پلیمرها استفاده کرد. بهبهانی، منیری، تخت فیروز(۱۳۹۷) مخلوط‌های آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه‌ای به علت ضخامت زیاد قشر قیر اندود کننده مصالح سنگی و فضای خالی کم ،دوام بسیار مناسبی از خود نشان می‌دهد. این مخلوط‌های آسفالتی نسبت به جدا شدن دانه‌ها، ترک خوردگی زود هنگام و خرابی ناشی از رطوبت مقاوم هستند برنارد (۲۰۱۷).

علاوه بر دوام وپایداری خوب که خدمت‌دهی و عمر زیاد مخلوط را تضمین می‌نماید. مزایای دیگری برای این مخلوط‌ها مطرح است. به عنوان مثال این مخلوط‌های آسفالتی را می‌توان روی سطح شیار افتاده یا ناهموار اجرا کرد. زیرا در حین عمل تراکم خیلی کم متراکم و فشرده می‌شوند. این ویژگی، صاف و هموار بودن طولی و عرضی سطح را به راحتی تامین می‌نماید.

از دیگر مزایای مخلوط آسفالتی ماستیک نسبت به سایر مخلوط‌های بتن آسفالتی کاهش صدای چرخ وسیله نقلیه به میزان تقریباً ۲,۵ دسی بل می‌باشد. ناپا (۲۰۰۲).

خرابی‌هایی که در طول زمان بهره‌برداری از روسازی راه‌ها رخ می‌دهند، عمدتاً شامل تغییرشکل‌های دائم در مسیرحرکت چرخ وسایل نقلیه (شیار افتادگی)، ترک‌های ناشی از خستگی و ترکهای حرارتی می‌باشند. از آنجا که برای مرمت و بازسازی این خرابی‌ها، هزینه‌های زیادی باید صرف شود، لذا پیش گیری اولیه، معمولاً مقرون به صرفه‌تر است. برای پیشگیری از این خرابی‌ها، مصالح روسازی باید به نحوی انتخاب شوند که استقامت و پایداری کافی را دارا باشند. مصالح سنگی باید شکسته باشند و از به کاربردن بیش از حد مصالح ریز دانه و قیر اجتناب شود. طباطبایی (۱۳۹۶). گودی مسیر چرخ (شیار شدگی) تغییر شکل ماندگار لایه‌های روسازی است که می‌تواند با گذشت زمان افزایش یابد. گودی مسیر چرخ حاصل تغییر شکل در یک یا چند لایه از روسازی آسفالتی است. شیارشدگی بزرگراه‌ها امر رایجی است. زیرا در آنها شدت ترافیک عبوری زیاد است. در فرودگاه‌ها شیارشدگی (گودی مسیر چرخ) کمتر دیده می‌شود. زیرا در آنها شدت تکرر عبور هواپیما کمتر بوده و خطوط حرکت کمتری وجود دارد. رویه آسفالتی، تحت تأثیر ترافیک وسایل نقلیه در معرض کرنش‌های مختلفی قرار می‌گیرد. گودی مسیر حرکت چرخ یکی از انواع اصلی کرنش‌ها است. همچنین آن دسته از خصوصیات مخلوط آسفالتی که مربوط به تغییر شکل می‌باشند، عامل مهم در تعیین قابلیت آن برای شیارشدگی هستند. لارینا ویسیوس (۲۰۰۶) بهبود مقاومت شیارشدگی روسازی، با بکار بردن دو روش امکانپذیر است:

-بهبود مقاومت شیارشدگی با استفاده از قیر اصلاح شده

-بهبود مقاومت شیارشدگی با استفاده ازاصلاح مخلوط آسفالتی

با توجه به افزایش روز افزون استفاده از آسفالت ماستیک درشت دانه، بهبود مشخصات آن و بهینه سازی این مخلوط با استفاده از پلیمرها واصلاح کننده‌ها مورد توجه پژوهشگران امر روسازی راه قرار گرفته است. در سال ۲۰۱۶ پاردس و همکارانش از پودر لاستیک در مخلوط های آسفالتی SMA به عنوان ترکیبی که هم از ریزش قیر جلوگیری می‌کند و هم باعث بهبود خصوصیات عملکردی می‌شود استفاده کردند. مانوسالواس و همکاران (۲۰۱۶). آنها هچنین نشان دادند استفاده از پودر لاستیک موجب بهبود شیار شدگی و خصوصیات عملکردی کشش غیر مستقیم

مخلوط‌های آسفالتی SMA می‌شود. در سال ۲۰۱۷، عامری و همکارانش روی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با نانو رس و پلیمر تحقیقاتی را انجام دادند.

آنها در این تحقیق مخلوط‌های آسفالتی SMA حاوی ۵ درصد پلیمر SBS به همراه ۳،۲،۱ و ٤ درصد نانو رس ساختند و مورد آزمایش‌های خزش، مارشال و شیار چرخ قرار دادند، نتایج این تحقیق نشان داد در صورت استفاده از نانو رس وپلیمر SBS به عنوان اصلاح کننده بهبود چشمگیری در مقاومت مخلوط‌های آسفالتی ماستیک درشت دانه در برابر شیار شدگی ایجاد می‌شود. عامری و همکاران (۱۳۹٤).

در سال ۱٤۰۱ فرج اللهی و همکاران طی پژوهشی نشان دادند که مخلوط‌های اسفالتی ساخته شده از قیر اصلاح شده با نانوکامپوزیت نسبت به قیر اصلاح شده با پلیمر EVA مقاومت بیشتری در مقابل خستگی دارند. فرج اللهی، عاملی، پورحیدری ممقانی (۱٤۰۱).

در سال ۱۳۹۹ احمد زادگان و سرکار تاثیر زئولونیت به صورت پودر و نانو را در عملکرد آسفالت ماستیک درشت دانه نیمه گرم مورد برسی قرار دادند. از نتایج پژوهش آنها مشخص شد که استفاده از این مواد موجب کاهش پتانسیل شیارشدگی به خصوص در نمونه‌های ساخته شده با نانو زئولیت می‌گردد. احمدزادگان و سرکار(۱۳۹۹).

در سال ۱٤۰۳ فرجی و طاهرخانی تاثیر کربن بلک در حساسیت رطوبتی آسفالت متخلخل و SMA را با استفاده ازپارامترهای انرژی سطحی مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند مقاومت کششی مخلوط آسفالتی SMA درحالت مرطوب با افزودن ماده کربن بلاک تا ۸ درصد افزایش و پس از ان کاهش می‌یابد فرجی و طاهرخانی(۱٤۰۳).

یکی از روش‌هایی که می‌تواند عمر روسازی آسفالتی را افزایش دهد، ارتقاء مشخصات اجزای تشکیل دهنده مخلوط آسفالتی، یعنی ماده چسباننده قیری و مصالح سنگی می‌باشد. در این مقاله تاثیر نانو اکسید آهن در ارتقاء عملکرد مخلوط آسفالت ماستیک SMA در برابر شیارشدگی بررسی شده است. ابعاد نانو و میکرو، دانش پایه‌ای برای توسعه علم و تکنولوژی ارائه می‌دهد. در شکل ۱ ابعاد متفاوت مواد در یک مخلوط آسفالتی نشان داده شده است.

۲- روش تحقیق

هدف کلی از این پژوهش بررسی تاثیر نانو ذرات در بهبود ویژگی‌های مخلوط آسفالتی مانند مقاومت در برابر شیارشدگی، افزایش مقاومت کششی و خرابی‌های رطوبتی و.... می‌باشد. در این پژوهش سعی بر آن است تا با تکیه بر نتایج به دست آمده از افزودن نانو اکسید آهن به قیر خالص مصرفی در مخلوط آسفالتی و انجام آزمایش بر روی مخلوط آسفالتی ماستیک درشت دانه شناخت مسئله صورت پذیرد.

۳- مواد و آزمایشات

۳-۱-قیرخالص

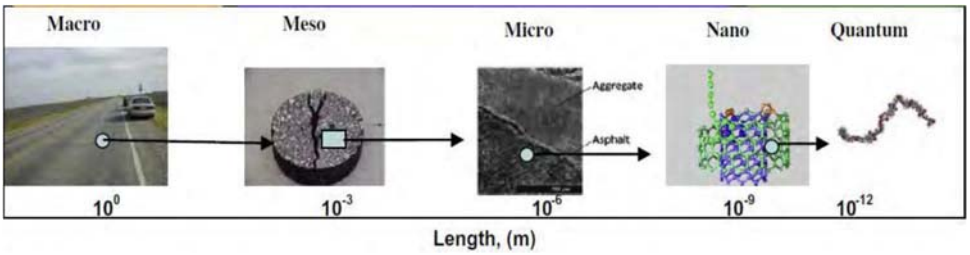
قیر انتخابی برای این تحقیق از نوع ۷۰-٦۰ بوده و کلیه الزامات استاندارد را براساس آیین نامه‌ایران (نشریه ۱۰۱) تامین کرده است. جدول ۱ مشخصات قیر مصرفی در پژوهش را نشان می‌دهد.

۳-۲-نانو اکسید آهن به عنوان افزودنی قیر خالص

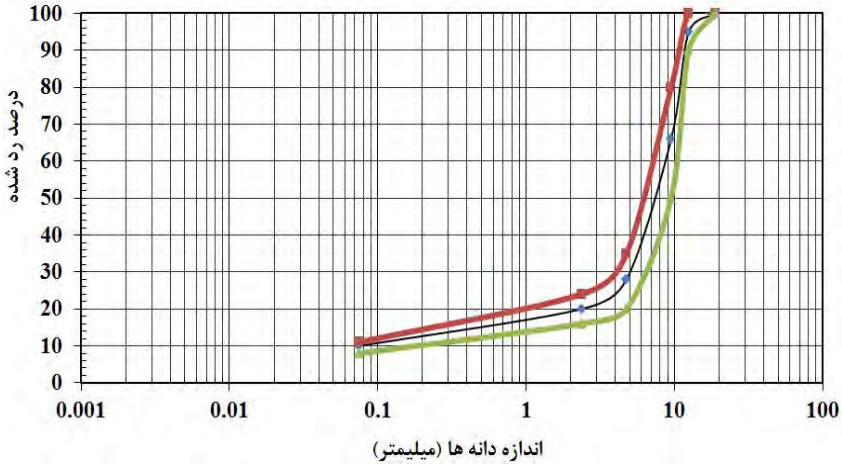
معمول‌ترین نانو ذرات ،نانو ذرات سرامیکی هستند که به سرامیک‌های اکسید فلزی، نظیر اکسیدهای تیتانیوم، روی، آلومنیوم و آهن تقسیم می‌شوند. طبق تعریف، حداقل باید یکی از ابعاد نانو ذرات کمتر از ۱۰۰ نانومتر باشد. نانو ذرات سرامیکی فلزی یااکسید فلزی تمایل به داشتن اندازه یکسانی در هر سه بعد، از دویا سه نانومتر تا ۱۰۰نانومتر دارند که به وسیله نیروهای الکترو استاتیک به یکدیگر چسبیده و به شکل پودر بسیار ریزی رسوب می‌کنند. در شکل ۱ ابعاد متفاوت نانو مواد در یک مخلوط آسفالتی نشان داده شده است. در این پژوهش از نانواکسید آهن به عنوان افزودنی به قیر خالص مخلوط استفاده شد.

۳-۳-مصالح سنگی و دانه بندی آن

مصالح سنگی ۷۵ تا ۸۵ درصد حجمی و ۹۰ تا ۹۵ درصد وزنی مخلوط‌های بتن آسفالتی را شامل می‌شود. ساختار مقاوم مصالح سنگی منجر به ساخت مخلوط‌های بتن آسفالتی با مقاومت بالا در مقابل تغییر شکل ناشی از بارگذاری تکرار شونده می‌شود. مصالح سنگی و دانه بندی، تأثیر قابل توجهی روی مقاومت و عملکرد مخلوط های بتن آسفالتی دارد. مصالح سنگی استفاده شده در این پژوهش بر اساس پیشنهاد نشریه ۲۳٤ حد وسط دانه بندی SMA مطابق شکل۲ می‌باشد.



شکل ۱. ارزیابی ابعاد نانو مواد در یک مخلوط آسفالتی



شکل ۲. منحنی دانه بندی مصالح سنگی

۳-٤- تعیین وزن مخصوص حقیقی، ظاهری و درصد جذب آب مصالح سنگی

آزمایش‌های تعیین وزن مخصوص حقیقی، وزن مخصوص ظاهری و درصد جذب آب مصالح سنگی مانده روی الک شماره ۸ بر اساس استاندارد AASHTO - T85 و مصالح رد شده از الک شماره ۸ و مانده روی الک شماره ۲۰۰ ، بر اساس استاندارد AASHTO - T84 انجام پذیرفت. هم چنین وزن مخصوص مصالح رد شده از الک شماره ۲۰۰ بر اساس استاندارد AASHTO - T100 تعیین گردید. نتایج حاصله از این آزمایش‌ها به انضمام مقدار وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی در جدول ۲ درج گردیده است.

۳-۵- ساخت کامپوزیت قیری

در این پژوهش به منظور ساخت مخلوط قیری همگن از روش اختلاط تر و با استفاده از حلال کمکی کروزن صورت پذیرفته است. در ابتدا مقداری قیری مشخص را تا رسیدن به دمای درجه ۱۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد گرم نموده تا به حالت مذاب و روان درآید. سپس درصدهای مختلف نانو (۱,٦،۱,۲،۰,۸،۰,٤ نسبت به وزن قیر) به قیر افزوده شد و عمل اختلاط توسط همزن دور بالا به مدت ۱۵ دقیقه صورت پذیرفت تا مخلوط قیری یکنواخت و همگنی برای

٦-۳- آزمایش تعیین مدول سختی به روش کشش غیر مستقیم

مدول سفتی از معیارهای سنجش سختی مخلوط آسفالتی می‌باشد. مدول سفتی رابطه‌ی بین تنش و کرنش را بیان کرده و در روش مکانیستیک طراحی روسازی، یکی از پارامترهای ورودی برای طراحی می‌باشد. انجام این آزمایش با اندازه‌گیری

مقاومت کششی غیر مستقیم در بارگذاری تکراری با استفاده از دستگاه آزمایش UTM صورت می‌پذیرد که در شکل ۳ نمایی از آن نمایش داده شده است. نمونه‌ها با مقدار قیر بهینه و افزودنی نانو اکسید آهن ساخته شده و در دماهای ۵، ۱۵و۲۵ درجه تحت نیروی قطری در بارگذاری تکراری قرار گرفتند که نتایج آن در جدول شماره ۳ آورده شده است . این دستگاه شامل سیستم کنترل و ثبت داده و نرم افزار مربوط می‌باشد. این آزمایش با توجه به استاندارد ASTM D4123- 82 انجام گرفته است

از آن جا که در آزمایش مدول سفتی معمولاً بارهای اعمال شده کوچک هستند این آزمایش غیر مخرب محسوب می‌شود و از نمونه‌های ساخته شده موجود می‌توان در آزمایش‌های دیگر نیز استفاده نمود. لازم به ذکر است در محاسبه مدول سفتی توسط نرم افزار موجود در دستگاه UTM از رابطه ۱ که در استاندارد ASTM D4123 به آن اشاره گردیده، استفاده شده است.

مشخصه	وزن مخصوص		درصد جذب آب
	ظاهری	حقیقی	
مصالح سنگی مانده روی الک ۸۸ الک شماره ۸	۲/۶۷۲	۲/۵۳۴	۲/۲۰
مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۸ و مانده روی ۲۰۰	۲/۶۹۷	۲,۵۰۲	۲/۹۰
مصالح رد شده از الک ۲۰۰	۲/۶۶۸		-
وزن مخصوص حقیقی مخلوط	۲,۵۴۳		

جدول ۲. وزن مخصوص مصالح سنگی مخلوط آسفالت ماستیک درشت دانه

$$M_s = \frac{P(v+0.2734)}{tH} \qquad (۱)$$

Ms : مدول سفتی (مگاپاسکال)

P: بار تکراری (نیوتن)

t: ضخامت نمونه (میلی متر)

H: تغییر شکل افقی برگشت پذیر (میلی متر)

v: نسبت پواسون، این ضریب برای نمونه‌های آسفالتی با دما تغییر پذیر می‌باشد. در نتیجه در آزمایش مدول سفتی این مقدار در دمای ۵ درجه برابر ۰,۲۵ ،۱۵ درجه برابر ۰,۳ و در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد برابر ۰,۳۵ فرض گردیده است.

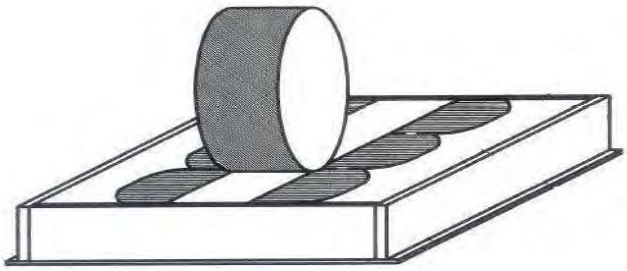
شکل ۳. دستگاه آزمایش utm

۳-۷- آزمایش ویل تراک

آزمایش شیارشدگی ویل تراک برای تعیین مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر تغییر شکل‌های ماندگار در دمای بحرانی و تحت بارگذاری شبیه به آنچه که در جاده‌ها به سطح روسازی وارد می‌شود، بکار می‌رود. آزمایش شیارشدگی ویل تراک با حرکت رفت و برگشت چرخ بارگذاری شده روی نمونهٔ آسفالتی به تعیین پتانسیل شیارشدگی روسازی‌های آسفالتی می‌پردازد. این کار با اندازه‌گیری عمق شیار ایجاد شده در نمونه در امتداد حر کت چرخ دستگاه بوسیله شیارسنج‌هایی در فواصل زمانی مشخص صورت می‌پذیرد. حداکثر عمق شیار قابل اندازه گیری بوسیله دستگاه ویل تراک ۲۰ میلی‌متر بوده و پس از آن دستگاه خاموش می‌گردد. برای انجام این آزمایش از نمونه‌ای با ابعاد ۳۰۰×۳۰۰×۵۰ میلی‌متر ساخته شده با درصدهای مختلف افزودنی نانو اکسید آهن به قیر خالص استفاده شده است. برای انجام آزمایش باید نمونه را داخل ماشین اثر چرخ قرار داده و پس از انجام تنظیمات لازم از طریق نرم افزار موجود در رایانه متصل به دستگاه آزمایش را شروع کنیم. این آزمایش در دماهای ۴۰ و ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی گراد صورت گرفته و بار وارده نیز معادل ۵۰۰ نیوتون می‌باشد. در این آزمایش، چرخ دستگاه به تعداد ۱۰۰۰۰ بار از روی نمونه آسفالتی عبور کرده و عمق شیار ایجاد شده در نمونه نیز بطور پیوسته بوسیله حسگر اندازه گرفته می‌شود، که نتایج آن در جدول شماره ۴ آورده شده است. در نتیجه عمق شیارایجاد شده در مخلوط‌ها به عنوان اصلی ترین نتایج این تحقیق می‌باشد که بطور مستقیم می‌تواند در آزمایشگاه وضعیت مخلوط آسفالتی را در سطح راه شبیه‌سازی نماید.

جدول ۳. نتایج مدول سفتی در دما و درصد متفاوت نانواکسید آهن

دمای آزمایش (درجه)	۵					۱۵					۲۵				
در صد افزودنی نانواکسید آهن	۰	۰,۴	۰,۸	۱,۲	۱,۶	۰	۰,۴	۰,۸	۱,۲	۱,۶	۰	۰,۴	۰,۸	۱,۲	۱,۶
مدول سختی (مگا پاسکال)	۴۱۴۵	۱۳۵۷	۲۶۸۳۱	۲۶۱۶۲	۱۰۰۵۵	۰۶۱۰۶	۱۷۳۶۵	۵۶۸۹	۴۷۰۰۱	۰۳۸۱۹	۰۵۱۰۳	۳۷۱۰۳	۵۶۴۰۳	۲۵۶۳	۳۹۲۰۳



شکل ٤. نمایی شماتیک از نحوه انجام آزمایش ویل تراک

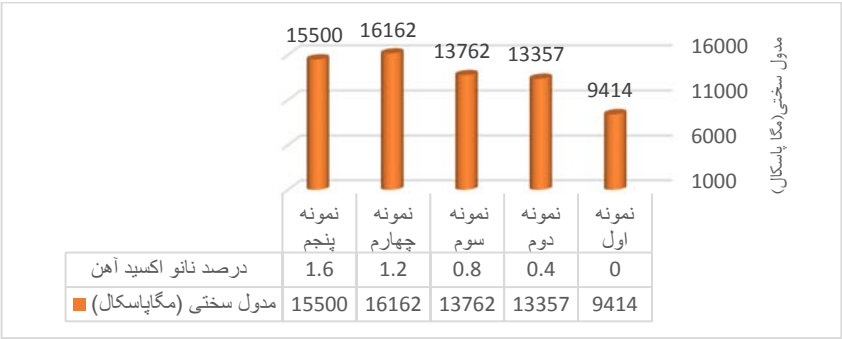
٤- تحلیل و بررسی نتایج

٤-١- بررسی تاثیر نانو اکسید آهن بر مدول سختی

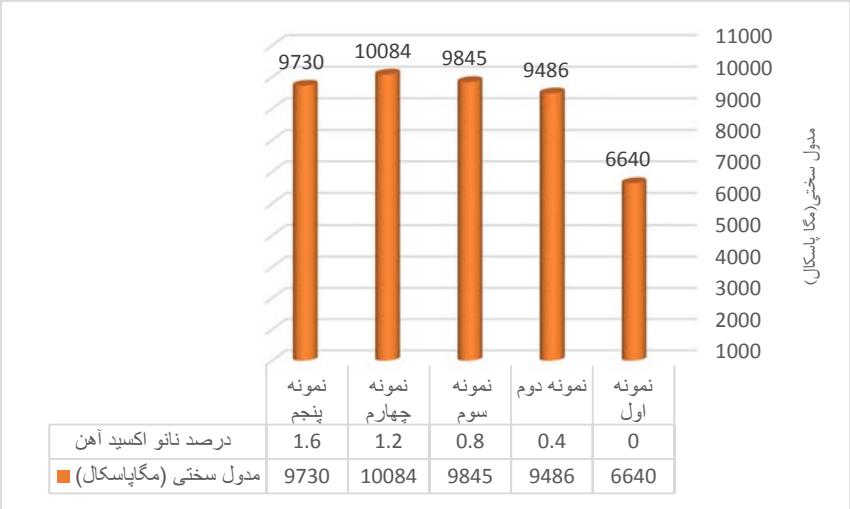
نتایج آزمایش مدول سختی که بر روی نمونه‌های آسفالت ماستیک درشت دانه با درصدهای مختلف نانو اکسید آهن و در دماهای مختلف انجام شده در اشکال ۵ تا ۷ نشان داده شده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهد در تمام دماهای آزمایش با افزایش درصد نانو اکسید آهن تا ۱,۲ درصد قیر بهینه میزان مدول سختی افزایش و سپس کاهش می‌یابد. افزودن ذرات نانو به قیر به علت نسبت سطح به حجم بالا می تواند نقش عامل پرکننده و مسلح کننده در ذرات قیر را داشته و سبب استحکام ذرات قیر کنار یکدیگر گردد که این خاصیت ذرات نانو موجب می‌شود با افزایش دما در درصدهای مختلف نانو اکسید آهن همچنان شاهد افزایش مدول سختی مخلوط آسفالتی نسبت به نمونه بدون افزودنی نانو اکسید آهن باشیم.

جدول ٤. نتایج عمق شیار نمونه‌ها در دما و درصد متفاوت نانواکسید آهن

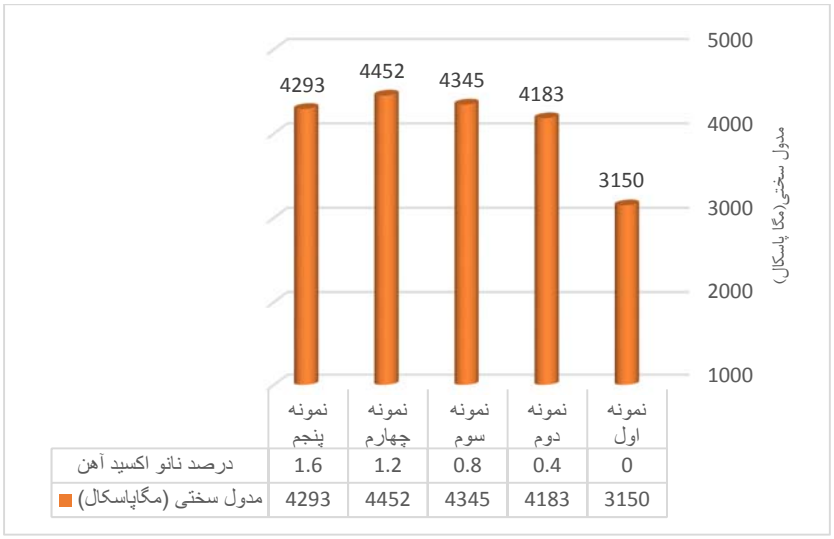
دمای آزمایش (درجه)	٤٠					٥٠					٦٠				
در صد افزودنی نانواکسید آهن	٠	٠,٤	٠,٨	١,٢	١,٦	٠	٠,٤	٠,٨	١,٢	١,٦	٠	٠,٤	٠,٨	١,٢	١,٦
عمق شیار (میلی‌متر)	٢,٨٢	٢,١٧	٢,٠٧	١,١	١,٨	٤,١	٣,٨	٣,٧	٢,٦	٣,٢	١٢,١	١١,٣	١٠,٥	٧,٧	٨,٣



شکل ۵. مدول سفتی نمونه آسفالتی در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد



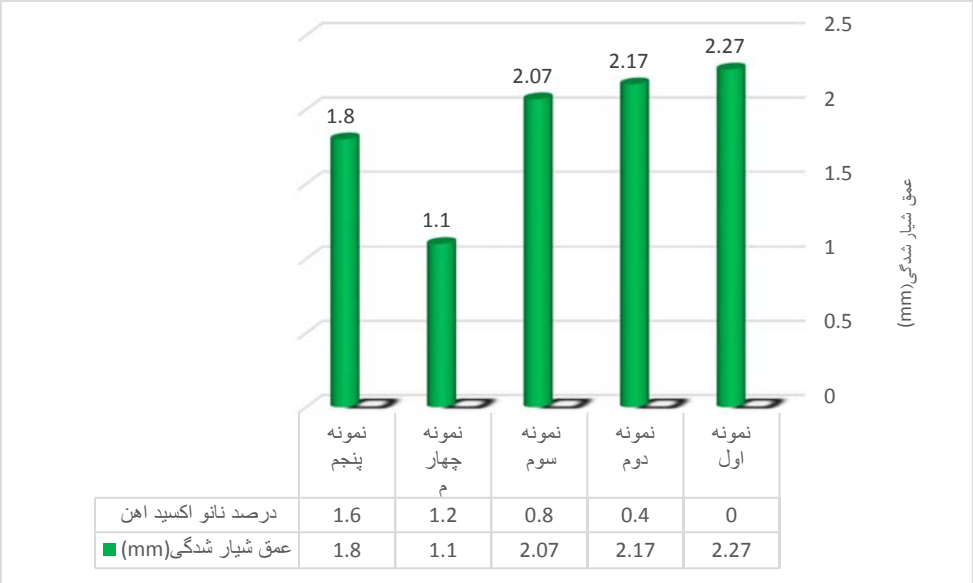
شکل ٦. مدول سفتی نمونه آسفالتی در دمای۱۵ درجه سانتی‌گراد



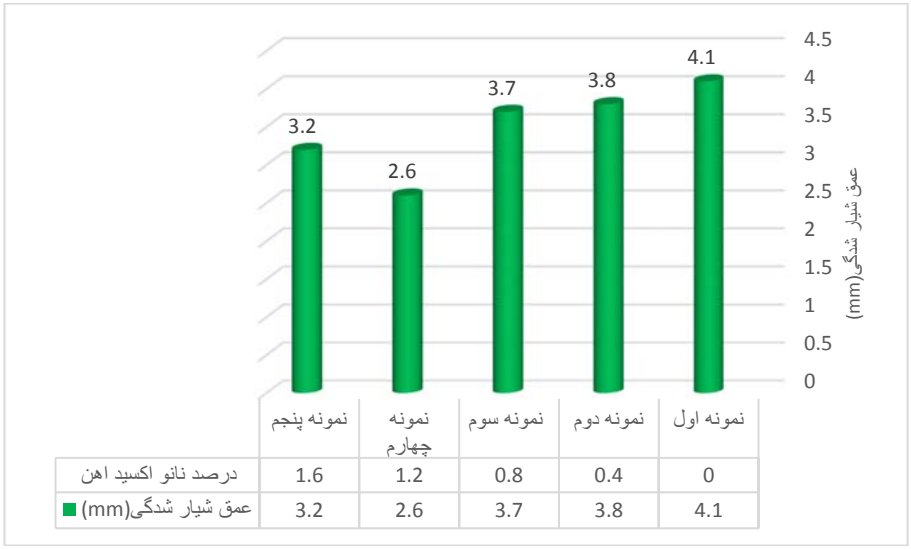
شکل ۷. مدول سفتی نمونه آسفالتی در دمای۲۵ درجه سانتی‌گراد

٤-۲- بررسی تاثیر نانو اکسید آهن بر شیارشدگی

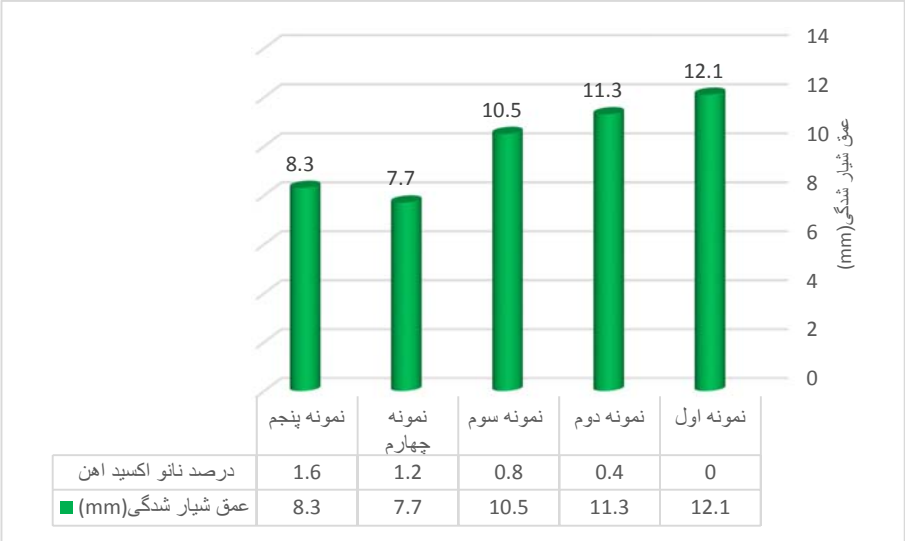
شکل‌های ۸ تا ۱۰ نتایج ازمایش ویل تراک بر روی نمونه‌ها آسفالت با درصدهای مختلف نانواکسید آهن در دماهای مختلف را نشان می‌دهند. همانگونه که از نمودارها مشخص است به تدریج با افزایش درصد نانو اکسیدآهن تا ۱,۲ درصد قیر بهینه مقدار عمق شیار کاهش وسپس افزایش می‌یابد عملکرد مثبت نانو اکسید آهن در کاهش عمق شیار شدگی تا ۱,۲ درصد وزن قیر بهینه را می‌تواند افزایش ویسکوزیته و چسبندگی قیر به علت افزودنی نانو اکسید آهن دانست که سبب بهبود رفتار عملکردی قیر و کاهش حساسیت آن به شیارشدگی می‌شود و عملکرد منفی نانواکسید آهن در افزایش عمق شیارشدگی با افزایش بیش از ۱,۲ درصد نسبت به وزن قیر بهینه را می‌توان اینگونه بیان کرد که با افزایش مقدار نانو اکسید آهن فاصله بین ذرات قیر بیشتر گردیده که این افزایش فاصله می‌تواند سبب کاهش استحکام ذرات قیر شود به گونه‌ای که با اعمال نیروی ثابت پیوستگی و چسبندگی بین ذرات گسسته و قیر دیگر قابلیت چسبندگی سابق را ندارد.



شکل۸. عمق شیار نمونه‌ها بر حسب درصد نانو اکسید آهن در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۹. عمق شیار نمونه‌ها بر حسب درصد نانو اکسید آهن در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد



شکل۱۰. عمق شیار نمونه‌ها بر حسب درصد نانو اکسید آهن در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تاثیر نانو اکسیدآهن در شیار شدگی مخلوط آسفالتی ماستیک درشت دانه SMA به صورت افزودنی بر حسب درصدی از قیر بهینه مخلوط در دماهای مختلف برسی شدو نتایج به شرح ذیل به دست آمد.

-نتایج نشان می‌دهد که بر اثر افزودن نانو اکسید آهن در دماهای مختلف مدول سختی تا ۱,۲ درصد نانواکسید آهن نسبت به قیر بهینه مخلوط در محدوده ٤١ تا ٧٢ درصد افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

-نتایج نشان می‌دهد که در دماهای مختلف، مقدار عمق شیار نمونه‌های آسفالتی حاوی ۱,۲ درصد نانو اکسید آهن به میزان ٣٦ تا ٥٠ درصد کمتر از میزان عمق شیار نمونه‌های کنترل می‌باشد. در نتیجه می‌توان بیان داشت که افزودن نانو اکسید آهن به مخلوطهای آسفالتی بطور متوسط سبب بهبود به میزان ٤٣ درعمق شیار می‌گردد.

-افزایش دما باعث افزایش خاصیت پلاستیکی مخلوط‌های آسفالتی می‌شود و در این شرایط احتمال وقوع شیارشدگی افزایش می‌یابد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اصلاح قیر با نانو اکسید آهن تا حد قابل توجهی از حساسیت حرارتی آن کاسته است و نمونه‌های آسفالتی حاوی نانو اکسید آهن در دماهای بالاعملکردهای مناسبی نسبت به نمونه‌های کنترل از خود نشان می‌دهند. در نتیجه استفاده از نانو اکسید آهن به صورت درصدی از قیر بهینه در محدوده‌ای مشخص می‌تواند نقش مهمی در ارتقاء عملکرد مخلوط آسفالتی ماستیک درشت در برابر شیار شدگی داشته باشد.

٦ - مراجع

-احمدزادگان، فرهاد و سرکار، علیرضا (۱۳۹۹). مقایسه تاثیر افزودنی زئولیت بصورت پودرونانو بر عملکرد آسفالت ماستیک درشت دانه نیم گرم. *فصلنامه علمی پژوهشنامه حمل و نقل*، ٦٢(١)، ٢١٦-٢٠٧.

- بهبهانی، حمید، منیری، علی و تخت فیروز، محمد (۱۳۹۸). بر رسی اثر پلیمر SBR بر رفتار خستگی و شیارشدگی مخلوطهای آسفالتی ماستیک درشت دانه. *فصلنامه مهندسی حمل ونقل*، ٤٣ (٢)، ٣٨٢-٣٧١.

– چوبدار، حامین، امین، فرج اللهی و عاملی، علیرضا (۱۴۰۲). ارزیابی تجربی خاکستر پوسته برنج وخاکستر بادی به عنوان فیلرهای جایگزین در مخلوط آسفالت گرم. *فصلنامه علمی جاده*، ۱۱۵(۲)، ۳۳۵-۳۲۳.

–رشیدیان، پیمان، کی‌منش، محمودرضا، ایوبی نژاد، جلال (۱۴۰۲). ارزیابی قابلیت رادار نفوذی زمین (GPR) درتعیین مقاومت کششی لایه آسفالتی اجرا شده. *فصلنامه علمی پژوهشنامه حمل و نقل*. ۷۷ (٤)، ۱۵٤-۱٤۳.

–زال نژاد، مهدی، حسامی، ابراهیم (۱۴۰۰). مکانیسم خودترمیمی در قیر و روسازی‌های آسفالتی. *فصلنامه علمی جاده*، ۱۰۶(۱)، ۷٤-۵۳.

– طباطبایی، امیر محمد (۱۳۹٦). *روسازی راه*. مرکز نشر دانشگاهی.

– عامری، محمود، وامق، مصطفی، روح الامینی، حامد و کیوان، بمانا (۱۳۹٤). ارزیابی اثر نانو رس بر رفتار تغییر شکل دائم مخلوطهای آسفالتی گرم HMA. *فصلنامه مهندسی عمران مدرس*، ۱۵(۳)، ۱۵۸-۱٤۹.

–فرج اللهی، امین، عاملی، علیرضا و پورحیدری ممقانی، فرزین (۱۴۰۱). بررسی آزمایشگاهی تاثیر نانوکامپوزیت اتیلن وینیل استات –مونتموریلونیت بر خصوصیات شیارشدگی و خستگی مخلوط آسفالتی. *فصلنامه علمی پژوهشنامه حمل و نقل*، ۷۳(٤) ۲۹۵-۲۸۳.

–فرجی، مهدی و طاهرخانی، حسن (۱۴۰۳). بررسی اثر کربن بلک بر حساسیت رطوبتی آسفالت متخلخل و SMA با استفاده از پارامترهای انرژی آزاد سطحی. *فصلنامه علمی پژوهشنامه حمل و نقل*، ۷۹ (۲)، ۵۸-۳۷.

– معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری (۱۳۹۰). آیین نامه روسازی راه‌های آسفالتی ایران. *نشریه شماره ۲۳٤*، وزارت راه و شهرسازی، *پژوهشکده حمل و نقل*، موسسه قیر و آسفالت ایران، تجدید نظراول.

– معاونت و نظارت راهبردی ریاست جمهوری (۱۳۹۲). مشخصات فنی عمومی راه، *نشریه ۱۰۱*، تجدیدنظر دوم.

- AASHTO, T166-16 Standard Method of Test for Bulk Specific Gravity (Gmb) of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) Using Saturated Surface-Dry Specimens. (2016).

-ASTM D2041 -03a (2016). Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous paving Mixtures (2016).

-Bernard, B. (2017). A revive on various issues related to stone matrix asphalt. *International journal of Engineering Technology Science and Research*, 122(4), 588-591

- Huang, Y. (1993). Pavement Analysis and Design. Prentice HALL. University of Kentucky, USA.

-Laurinavicius، A. , & Oginskas. R. (2006). Experimental research on the development of rutting in asphalt concrete pavements rein forced with geosynthetic materials. *Journal of Civil Engineering and Management*, 1822(4), 311-317.

-Manosalvas, M.Gallego, j., saiz, l., & Bermejo, j., (2016).Rubber modified Binders as an alternative to cellulose fiber -SBS polymers in stone materials, 121, 727-732.

-PIARC (permanent International Association of Road congresses) World Road Association (2006). Bituminous materials with a high resistance to flow rutting [The Bureau of Technology and Safety Studies], *PIARC Secretariat in Iran.*

Investigating Performance Improvement of SMA Asphalt Mixtures against Rutting by Adding Nanoparticles

Mahmoud Reza Keymanesh, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Payam Noor University (PNU), Tehran, Iran.
Shahin Shabani, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Payam Noor University (PNU), Tehran, Iran.
Peyman Rashidian, Ph.D., Student, Department of Civil Engineering, Payam Noor University (PNU), Tehran, Iran.
Sajjad Kaffashzadeh, Ph.D., Student, Department of Civil Engineering, Payam Noor University (PNU), Tehran, Iran.

E-mail: mrkeymanesh@pnu.ac.ir

Received: May 2025- Accepted: August 2025

ABSTRACT
The microstructure of asphalt mixtures plays an important role in their performance. The idea of using different additives to bitumen in order to improve its performance in asphalt mixtures has attracted the attention of road engineering researchers. Nanomaterials technology is one of the latest methods of improving the performance of asphalt mixtures against asphalt pavement failures due to its many capabilities in improving the behavior of asphalt mixtures. In this research, nano iron oxide was used as a mixture in bitumen to investigate the functional properties of coarse-grained mastic asphalt mixture (SMA). And its results have been compared with the mixture without nano iron oxide as a control mixture. During this study, the hardness modulus test was performed by indirect tensile method and wheel track test on the samples made with nano iron oxide additive and the control sample. From the analysis of the obtained results, it was found that the use of nano iron oxide mixed in bitumen has a positive effect on the stiffness modulus and resistance to rutting. So that with an increase of up to 1.2 percent iron nanooxide, the hardness modulus of the mixed bitumen at temperatures of 5, 15, 25 degrees increases by 41 to 72 percent compared to the control sample and then decreases. This rate of increase in the probability of failure of the groove will be reduced to a great extent. It was also determined from the wheel track test results An increase of up to 1.2 percent of nano iron oxide compared to mixed bitumen at temperatures of 60, 50, and 40 degrees will improve the groove depth by 36 to 50 percent compared to the control sample.

Keywords: Microstructure, Stiffness Modulus, Mastic Asphalt Mixture, Rutting, Wheel Track