امکان‌سنجی تأثیر نانواکسید آلومینیوم بر عملکرد مخلوط‌های آسفالت ماستیک درشت‌دانه در برابر بارهای دینامیک

سامان کردی، دانش آموخته کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشگاه سمنان
غلامعلی شفابخش*، دانشیار، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

E-mail: Shafabakhsh@semnan.ac.ir
(دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۱۵ – پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۲۷)

چکیده

چند سالیست که گرایش به استفاده از مواد اصلاح کننده در قیر و مخلوطهای آسفالتی هدف اصلی بسیاری از پژوهش‌های صورت گرفته در حوزه روسازی‌های آسفالتی می‌باشد. تمامی تلاش‌های فوق به منظور افزایش کارایی و مقاومت مخلوطها در برابر بارهای دینامیک وسایل نقلیه و همچنین شرایط محیطی مختلف می‌باشد. فناوری نانومواد نیز از جدیدترین این مواد افزودنی می‌باشد که با توجه به قابلیت‌های فراوان به عنوان یک ماده افزودنی مطلوب در اصلاح رفتار مخلوطها مورد استفاده قرار گرفته است. تاکنون تحقیقات آزمایشگاهی زیادی به منظور بهبود رفتار مخلوطهای آسفالتی با دانه‌بندی پیوسته به‌وسیله نانومواد صورت پذیرفته است، اما استفاده از آن‌ها در ساخت مخلوطهای آسفالت ماستیک درشت‌دانه به ندرت صورت پذیرفته است. هدف از این پژوهش، ارزیابی آزمایشگاهی رفتار خستگی و مدول سفتی مخلوطهای آسفالت ماستیک درشت‌دانه بر اثر افزودن درصدهای مختلف نانواکسید آلومینیوم می‌باشد. درصدهای مختلف نانومواد به مخلوطهای آسفالت ماستیک درشت‌دانه افزوده شده و تأثیر آن‌ها بر عملکرد این مخلوطها به‌وسیله آزمایش‌های خستگی و مدول سفتی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که مخلوطهای آسفالت ماستیک درشت‌دانه حاوی ۰/۶٪ نانواکسید آلومینیوم بهترین نتایج را در آزمایش‌های مدول سفتی و عمر خستگی داشته‌اند.

واژه‌های کلیدی: نانو- آسفالت، نانواکسید آلومینیوم، آسفالت ماستیک درشت‌دانه، خستگی، مدول سفتی.

۱. مقدمه

کاهش هزینه‌های نگهداری، رفع ناهمواری‌های سطحی، فراهم آوردن امکان رانندگی سریع و مطمئن و همچنین افزایش قدرت باربری و افزایش عمر مفید مخلوطهای آسفالتی از مهمترین اهداف در حوزه روسازی راه‌ها می‌باشد. خرابی‌های زودرس روسازی‌های آسفالتی و کوتاه بودن عمر مفید پروژه‌های آسفالتی، مهندسین و پژوهشگران این حوزه را بر آن داشته تا تأمل جدی در خصوص ادامه روش‌های پیشین داشته باشند. در این خصوص، تغییر دانه‌بندی مخلوطهای آسفالتی و همچنین استفاده از مواد جایگزین قیر و مواد اصلاح کننده قیر برای افزایش درجه عملکردی قیر از ملزومات

نیل به روسازی‌های با عمر زیاد می‌باشد. مخلوط‌های آسفالتی ماستیک درشت‌دانه از شاخه آسفالت گرم، ولی با مصالح سنگی درشت‌دانه، می‌باشد. این نوع مخلوط آسفالتی برای راه‌های با ترافیک بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجایی که راه‌های ترانزیتی در ایران امروزه بیش از گذشته رونق یافته و هر روزه وسایل نقلیه سنگینی از آنها عبور می‌نمایند، این نوع مخلوط می‌تواند به عنوان انتخابی مناسب مورد استفاده قرار گیرد. با وجود مزایای فراوانی که این مخلوط‌های آسفالتی دارند، از آنجایی که هزینه بیشتری باید صرف تهیه و تولید آن‌ها نسبت به مخلوط آسفالتی معمولی گردد، در نتیجه محققین در تلاش هستند عملکرد این مخلوط‌های آسفالتی را بالا برده تا دوره بهره برداری از آنها افزایش یابد. تحقیقات گسترده در مورد مخلوط آسفالت ماستیک درشت‌دانه صورت پذیرفته که تمامی آنها در جهت افزایش کارایی و بهبود عملکرد آن می‌باشد. در این تحقیق، تلاش گردیده تا تأثیر نانواکسید آلومینیوم بر عملکرد و عمر مخلوط آسفالت ماستیک درشت‌دانه، با انجام یک مطالعه آزمایشگاهی، مورد سنجش قرار گیرد. تحقیقات انجام گرفته در این زمینه نشان می‌دهد که مخلوط آسفالتی اصلاح شده توسط نانومواد نه تنها هزینه نگهداری از راه‌ها را کاهش داده، بلکه سبب افزایش قابلیت باربری روسازی راه شده و از ایجاد ترک‌های احتمالی ناشی از خستگی در طول عمر مفید روسازی جلوگیری به عمل می‌آورد (شفابخش و همکاران، ۲۰۱۵). به منظور برآورده کردن اهداف اصلی این پژوهش، مراحل زیر در نظر گرفته شد: ۱) مطالعه نانواکسید آلومینیوم در مقیاس نانو، ۲) تحقیق در مورد روش میکس نانواکسید آلومینیوم در قیر و ۳) بررسی تأثیر اصلاح قیر با نانواکسید آلومینیوم بر خصوصیات دینامیک مخلوط‌های آسفالتی.

۲. مخلوط‌های آسفالتی ماستیک درشت‌دانه[1]

افزایش عمر رویه‌های آسفالتی، اجرای رویه آسفالتی مقاوم در برابر آمد و شد زیاد، بار محوری سنگین و تغییرات دما و فراهم نمودن رویه‌ای غیرلغزنده، همراه با تأمین جریان حرکتی مطمئن، مورد توجه دست-اندرکاران صنعت راهسازی می‌باشد. از طرف دیگر، ساخت رویه‌های آسفالتی مقاوم در برابر تغییرشکل برای جاده‌های با آمد و شد زیاد و بار محوری سنگین حائز اهمیت است. اجرای رویه‌های آسفالتی گرم با دانه‌بندی پیوسته در راه‌های با آمد و شد زیاد و بار محوری سنگین، به‌ویژه در مناطق گرمسیری، گاهی خرابی‌هایی نظیر گودی مسیر چرخ و قیرزدگی را به دنبال دارد. این خرابی‌ها مستلزم اجرای عملیات تعمیر و بهسازی در فواصل زمانی نسبتاً کوتاه پس از بهره-برداری است که هزینه زیادی را در بر خواهد داشت (شفیعی و همکاران، ۲۰۱۵).

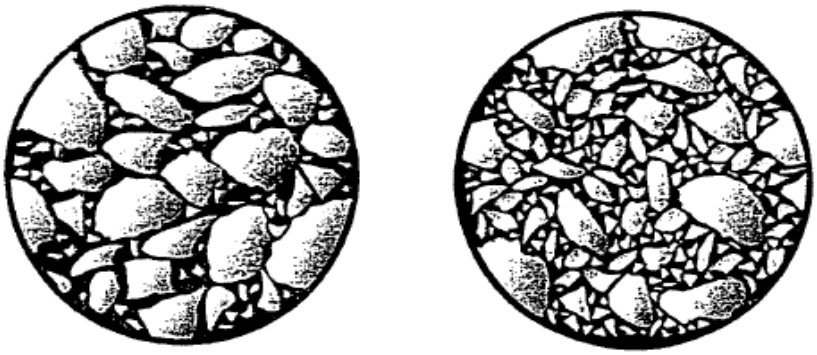
در سال‌های اخیر، در بعضی از کشورهای اروپایی، ایالات متحده آمریکا و کانادا، جهت تأمین برخی از انتظارات خاص روسازی نظیر مقاومت در مقابل شیارافتادگی جای چرخ، جلوگیری از گسترش ترک‌های انعکاسی و تحمل بار محوری سنگین، از مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای (SMA) استفاده شده است. مخلوط‌های آسفالتی با

1- Stone mastic asphalt

استخوان‌بندی سنگدانه‌ای از انواع مخلوطهای آسفالتی گرم بوده که کمتر دچار تغییرشکل شده و رویه‌های به مراتب مقاوم‌تری در برابر لغزندگی هستند. این امر به دلیل وجود درصد بیشتری از مصالح سنگی درشت‌دانه در این گونه مخلوطها ی آسفالتی است (شفیعی و همکاران، ۲۰۱۵).

عامل اصلی باربری و مقاومت در مخلوطهای آسفالتی گرم متداول با دانه‌بندی پیوسته، ملات (مصالح سنگی ریز و قیر) می‌باشد. در این گونه مخلوطهای آسفالتی، مصالح درشت‌دانه به طور مستقیم با یکدیگر درگیر نشده و به هم قفل و بست نمی‌شوند در واقع، تماس مصالح درشت‌دانه و ریزدانه برقرار می‌گردد. این در حالیست که در مخلوطهای آسفالتی SMA عامل اصلی باربری و مقاومت، مصالح درشت‌دانه هستند که به یکدیگر قفل و بست شده‌اند. به عبارت دیگر، تماس مستقیم سنگدانه عامل اصلی پایداری و باربری می‌باشد.

در این مخلوطها، برخلاف مخلوطهای آسفالتی گرم با دانه‌بندی پیوسته، مصالح سنگی ریزدانه در استخوان‌بندی و اسکلت اصلی و قفل و بست‌ها دخالتی ندارند (شفابخش و همکاران، ۲۰۱۵). در شکل ۱، توزیع اندازه دانه‌ها در مخلوطهای آسفالتی با استخوان-بندی سنگدانه‌ای و مخلوطهای آسفالتی با دانه‌بندی پیوسته مقایسه شده است. همانطور که پیش‌تر تشریح گردید، مخلوطهای با دانه‌بندی پیوسته دارای فضای خالی کمتری بوده، در حالی که در مخلوطهای SMA به علت ساختار درشت دانه‌بندی، فضای خالی بیشتری وجود دارد.



الف- دانه‌بندی پیوسته **ب- SMA**

شکل ۱. مقایسه توزیع اندازه دانه‌ها در مخلوطهای آسفالتی با دانه‌بندی پیوسته و مخلوطهای آسفالتی SMA

۳. کاربرد نانومواد در روسازی راه

در سالیان اخیر، به منظور بهبود عملکرد مخلوطهای آسفالتی در برابر بارهای دینامیک، از مواد افزودنی مختلفی استفاده گردیده که در این بین استفاده از نانومواد نتایج مطلوبی به همراه داشته است. فرامرزی و معصومی راد (۱۳۹۳) طی آزمایش‌هایی تأثیر استفاده از نانولوله‌های کربنی را بر خصوصیات مخلوط آسفالتی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آزمایش‌های انجام شده روی قیر و مخلوط آسفالتی نشان داد که اصلاح آسفالت توسط نانولوله‌های کربنی موجب افزایش مقاومت در برابر خستگی آسفالت، به‌خصوص در دماهای کم، می-شود. مقدس نژاد (۱۳۹۳) با بررسی نتایج آزمایش‌های

قیر و خزش دینامیک نمونه‌های آسفالتی بیان کرد که نانوذرات با اصلاح قیر، اثر مثبتی بر عملکرد خزشی مخلوط‌های آسفالتی دارد. همچنین، نتایج کشش مستقیم روی نمونه‌های قیری مشخص کرده که استفاده از نانوذرات باعث افزایش مقاومت کششی قیر شده است.

در تحقیقی دیگر، شیائو و همکاران (۲۰۱۱) به بررسی اثر نانولوله کربنی بر مشخصات رئولوژی ناشی از پیرشدگی کوتاه‌مدت قیر پرداخته و به این نتیجه رسیدند که اضافه کردن این ماده باعث بهبود مشخصات پیرشدگی کوتاه‌مدت قیرها خواهد شد.

غفارپور جهرمی و خدایی (۲۰۰۹) در پژوهشی به منظور بررسی اثر نانورس بر خواص قیرها، از آزمایش‌ها رایج قیر (نقطه نرمی، درجه نفوذ) و آزمایش رئومتر برش دینامیک استفاده کرده و به این نتیجه رسیدند که با افزایش درصد رس به قیر، خصوصیات رئولوژی قیر بهبود پیدا می‌کند. یو و همکاران (۲۰۱۱) نیز پس از استفاده از نانورس‌ها در مخلوط‌های آسفالتی به این نتیجه رسیدند که استفاده از این مواد باعث افزایش مدول دینامیک مخلوط‌های آسفالتی خواهد شد.

طاهرخانی و همکاران (۱۳۹۲) در پژوهشی، نتیجه گرفتند که با افزودن نانورس به قیر، زاویه فاز کاهش یافته که می‌تواند منجر به بهبود رفتار ارتجاعی قیر شود. همچنین، با افزایش نانورس به قیر، مدول مختلط برشی قیر افزایش یافته که این مسئله نشان دهنده اثر سخت‌شدگی قیر بر اثر افزودن نانورس می‌باشد.

در تحقیق دیگری، نانو الیاف کربنی به قیرهای خالص اضافه وخصوصیات قیر اصلاح شده در برابر بارهای خستگی بررسی و وضعیت ویسکوالاستیک آن مطالعه شده است (خطاک و همکاران، ۲۰۱۲). سه نوع قیر با درصدهایی از نانوفیبرهای کربنی اصلاح شده و دو روش خشک و تر در ترکیب نانوذرات در قیر تحقیق شده است. نتایج آزمایش‌های رئومتر برش دینامیک، پاسخ بهتر ویسکوالاستیک و مقاومت شیارشدگی بهتر قیرهای اصلاح شده با نانوذرات را نشان داده است. همچنین نتایج نشان داده که عمر خستگی نمونه‌ها بر اثر افزودن نانوفیبرهای کربنی افزایش یافته است.

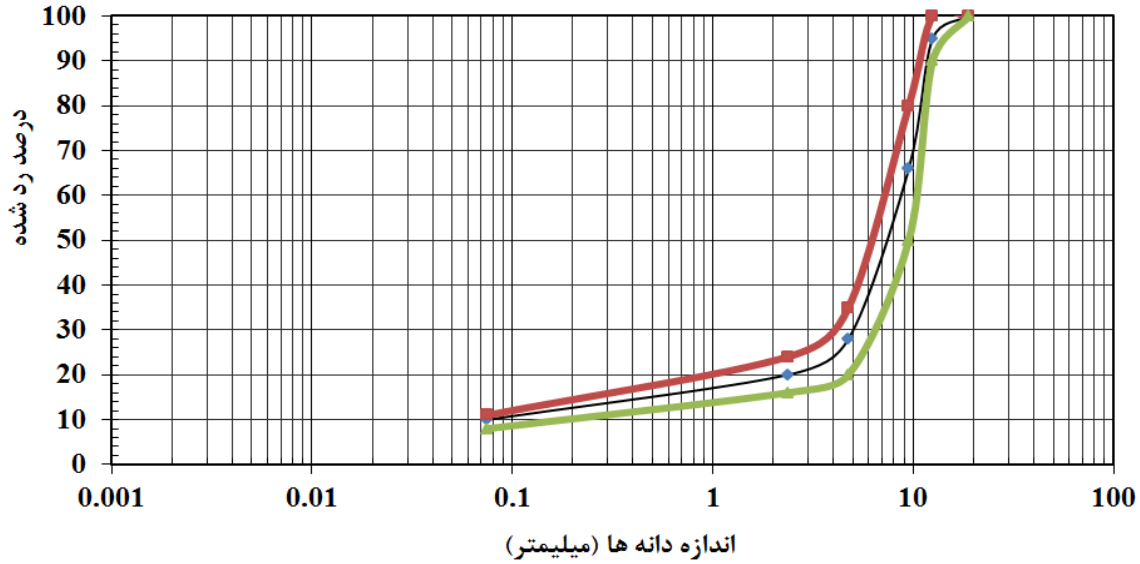
۴. مواد و روش‌ها

۴-۱. مصالح

مصالح مورد استفاده در این تحقیق شامل مصالح سنگی، قیر ۷۰-۶۰، الیاف و نانواکسید آلومینیوم می‌باشد. دانه‌بندی مصالح سنگی مورد استفاده شامل شن متوسط، شن ریز، ماسه و فیلر می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل از دانه‌بندی مصالح سنگی و به منظور دست‌یابی به دانه‌بندی حد وسط حدود مشخصات دانه‌بندی مخلوط ۱۹ میلی‌متری نشریه ۲۳۴، نسبت اختلاط مصالح سنگی به شرح جدول ۱ است. شکل ۲ نیز نشان دهنده منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق می‌باشد. همچنین، قیر مصرفی، قیر ۷۰-۶۰ پالایشگاه نفت پاسارگاد تهران است که دلیل انتخاب آن، استفاده زیاد این نوع قیر در ساخت روسازی‌های آسفالتی در مناطق معتدل و گرمسیر می‌باشد. مشخصات قیر مصرفی در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱. نسبت اختلاط مصالح سنگی مخلوط آسفالت ماستیک درشت‌دانه

نوع مصالح سنگی	درصد اختلاط مصالح سنگی
شن متوسط	۸
شن ریز	۶۵
ماسه	۱۷
فیلر	۱۰



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق

جدول ۲. مشخصات قیر به کار رفته در این تحقیق

چگالی در ۲۵ °C	درجه نفوذ ۰/۱ mm	نقطه نرمی (°C)	شکل پذیری (cm)	درجه خلوص (٪)
۱/۰۱۳	٦٨	۵۰	۱۰۲	۹۹/٦

در این تحقیق، به منظور جلوگیری از پدیده ریزش قیر[۲] در مخلوط آسفالت ماستیک درشت‌دانه، از الیاف سلولزی به میزان ۰/۳٪ وزن قیر استفاده گردیده است. مشخصات نانواکسید آلومینیوم (Al_2O_3) مورد استفاده، در جدول ۳ نشان داده شده و شکل ۳ نیز نشان دهنده پودر نانواکسید آلومینیوم می‌باشد.

2- Draindown

جدول ۳. مشخصات نانواکسید آلومینیوم به‌کار رفته در این پژوهش

فرمول شیمیایی	وزن مخصوص حجمی (g/cm^3)	اندازه ذرات (nm)	رنگ	ریخت‌شناسی	سطح مخصوص ویژه (m^2/g)
Al_2O_3	۰/۹	۸۰	سفید	شبه کروی	۱۵

شکل ۳. پودر نانواکسید آلومینیوم مورد استفاده در این تحقیق

۴-۲. روش ساخت کامپوزیت قیری

در این تحقیق، برای ساخت مخلوط قیری همگن از روش اختلاط تر و با استفاده از حلال کمکی کروزن صورت پذیرفته است. در ابتدا، مقدار ۱۰۰۰ گرم قیر ۷۰-۶۰ پالایشگاه تهران را تا رسیدن به دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد گرم نموده تا به حالت مذاب و روان درآید. سپس، زیر دستگاه میکسر برش بالا (هموژنایزر) با سرعت ٤۰۰۰ دور در دقیقه قرار داده شد. به‌تدریج مقدار ۳ گرم نانواکسید آلومینیوم، که معادل ۰/۳ درصد وزن قیر است، را در حلال کروزن حل نموده و ترکیب حاصل به قیر اضافه شد و پس از طی زمان ۱۵ دقیقه عمل اختلاط توسط دستگاه هموژنایزر و سرد شدن کامپوزیت حاصل، قیر اصلاح شده مورد نیاز برای ساخت نمونه‌های آسفالتی تهیه شد. همین روش جهت ساخت قیر اصلاح شده با ٦ و ۹ و ۱۲ گرم نانواکسید آلومینیوم در ۱۰۰۰ گرم قیر، که به ترتیب معادل ۰/٦، ۰/۹ و ۱/۲ درصد است، استفاده شد.

۴-۳. ساخت نمونه‌های آسفالتی حاوی نانواکسید آلومینیوم

ابتدا از مقادیر ۰/۳، ۰/٦، ۰/۹ و ۱/۲ درصد نانواکسید آلومینیوم جهت اصلاح قیر استفاده شده است. پس از آن، با استفاده از انواع قیرها و بر اساس ضوابط نشریه ۲۳٤، اقدام به ساخت نمونه‌های آسفالتی به منظور تعیین قیر بهینه گردید. از روش مارشال به منظور طرح اختلاط مخلوط آسفالت ماستیک درشت‌دانه (SMA) استفاده گردید، با این تفاوت که تعداد ضربات تراکم در این مخلوط‌ها بجای ۷۵ ضربه، ۵۰ ضربه می‌باشد. ضمن آنکه در این مخلوط‌ها بجای تعیین مقاومت مارشال، روانی و وزن مخصوص مخلوط‌ها و تعیین درصد قیر بهینه بر اساس این معیارها، درصد قیر بهینه تنها بر اساس محدود نمودن درصد فضای خالی به ۴٪ و درصد فضای خالی مصالح سنگی به حداقل ۱۷٪ محاسبه گردید. پس از تعیین قیر بهینه، به منظور ارزیابی تأثیر نانواکسید آلومینیوم بر خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالت ماستیک درشت‌دانه، اقدام به ساخت مخلوط‌های آسفالتی جهت انجام آزمایش‌های مدول سفتی و خستگی به روش کشش غیر مستقیم گردید. براساس نتایج این آزمایش‌ها، اولاً میزان تأثیر نانواکسید آلومینوم بر پارامترهای مکانیکی این مخلوط‌ها تعیین گردیده، و ثانیاً درصد بهینه نانواکسید آلومینیوم تعیین می‌گردد.

۴-۴. آزمایش‌ها

۴-۴-۱. آزمایش مدول سفتی به روش کشش غیرمستقیم (ITSM)

برای تعیین مدول سفتی دینامیک نمونه‌های آسفالتی به روش کشش غیرمستقیم بر اساس استاندارد ASTM D4123-82، ابتدا نمونه‌ها به مدت ۲٤ ساعت در محفظه کنترل دما قرار گرفته تا به‌طور همگن به دمای ۲۵ درجه سانتیگراد برسند. سپس، در محل قاب بارگذاری دستگاه UTM قرار داده می‌شوند. صفحات بارگذاری در بالا و پایین نمونه به‌صورت موازی و در راستای ارتفاع نمونه استقرار می‌یابد. آزمایش مدول سفتی با اعمال نیرویی خطی در راستای محور قطرهای نمونه انجام می‌گردد. هر سیکل از آزمایش به مدت یک ثانیه به طول می‌انجامد. مدت زمان بارگذاری و باربرداری ۰/۱ ثانیه است و پس از آن به مدت ۰/۹ ثانیه به نمونه اجازه استراحت داده می‌شود.

روی هر نمونه دو مرتبه بارگذاری انجام شده که در بارگذاری مرتبه دوم، نیرو در امتداد قطری از نمونه که ۹۰ درجه نسبت به حالت اول چرخیده، اعمال گردیده است. زمان استراحت بین دو بارگذاری روی یک نمونه ۲ ساعت می‌باشد. تغییرشکل نمونه‌ها توسط دو حسگر اندازه‌گیری شده است. لازم به ذکر است که این آزمایش باید در دماها و تنش‌هایی انجام شود که رفتار آسفالت وارد فاز تغییرشکل‌های ماندگار نگردد. لذا، تغییرشکل‌ها در محدوده الاستیک حفظ گردید. این آزمایش روشی غیرمخرب برای اندازه‌گیری مدول سفتی نمونه‌های آسفالتی است.

به منظور علم بیشتر به تأثیر درصد های مختلف نانواکسید آلومینیوم بر مدول سفتی نمونه‌های آسفالت ماستیک درشت‌دانه، این آزمایش در دماهای ۵، ۱۵ و ۲۵ درجه سانتی گراد صورت پذیرفته است. انتخاب دماها به این صورت بوده که محدوده دماهای پایین تا متوسط را شامل گردند. از آنجاییکه ضریب پواسون نمونه‌ها با دما تغییر پذیر می‌باشد در نتیجه در آزمایش های مدول سفتی، مقدار آن برای دمای ۵ درجه برابر ۰/۲۵، ۱۵ درجه برابر ۰/۳، و در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد برابر ۰/۳۵ فرض گردید. در حین انجام آزمایش تغییر شکل نمونه‌ها توسط دو حسگر اندازه‌گیری گردیده و مدول سفتی نمونه‌های آسفالتی از رابطه ۱ محاسبه می گردد.

$$SM = \frac{P}{LH} \times (0.27 + \nu) \qquad (۱)$$

که P میزان حداکثر نیروی عمودی تکرار شونده بر حسب نیوتون، ν ضریب پوآسون، L ضخامت متوسط نمونه آسفالتی بر حسب سانتی‌متر و H متوسط تغییرشکل نمونه بر حسب سانتی‌متر می‌باشد.

۴-۴-۲. آزمایش خستگی به روش کشش غیرمستقیم (ITFT)

آزمایش خستگی به منظور تعیین طول عمر نمونه‌های آسفالت ماستیک درشت‌دانه و مقایسه آن بر اثر افزودن درصدهای مختلف نانواکسید آلومینیوم صورت پذیرفته است. خستگی یکی از ضعف‌های رایج مخلوط‌های آسفالتی بوده که شدت آن بر اثر تکرار بارگذاری و شدت آن و شرایط آب و هوایی متفاوت می‌باشد. آغاز پدیده خستگی در یک مخلوط آسفالتی در واقع شروع وقوع ترک‌هایی است که به‌صورت سلسله مراتبی به یکدیگر متصل شده و با ادامه بارگذاری ممکن است بخش عظیمی از روسازی را شامل شده و تا حد زیادی از قدرت باربری روسازی کاسته و ایمنی در رانندگی را کاهش دهد. در نتیجه، پیدا کردن راهی برای افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر این پدیده یکی از وظایف محققین حوزه روسازی می‌باشد.

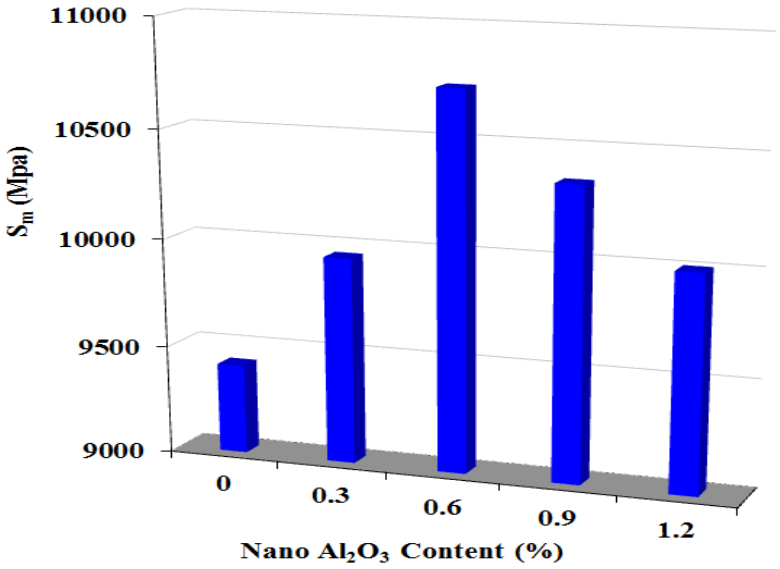
آزمون ITFT بر اساس استاندارد BS 1962-3518 روی نمونه‌هایی به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت ٤۰ میلی‌متر تحت اثر بارگذاری مکرر با پالس‌های یک

هرتز انجام گرفته تا نمونه گسیخته شود. گسیختگی به وسیله اندازه‌گیری میزان تغییرشکل عمودی نمونه تعیین می‌شود. نحوه بارگذاری در آزمایش خستگی به صورت خطی و در امتداد محور قطرهای نمونه صورت می‌پذیرد. روابط و پارامترهای مربوط به خستگی، از جمله عمر خستگی و تعداد سیکل‌های لازم برای شکست ناشی از خستگی به وسیله آزمایش خستگی به روش کشش غیرمستقیم تعیین می‌شود. همچنین، آزمایش خستگی هنگامی به پایان می‌رسد که ترک عمودی در نتیجه تکرار اعمال کرنش کششی غیرمستقیم در مرکز نمونه ایجاد گردد. محدوده اعمال تنش در آزمایش خستگی ۵۰ تا ۱۰۰۰ کیلوپاسکال می‌باشد.

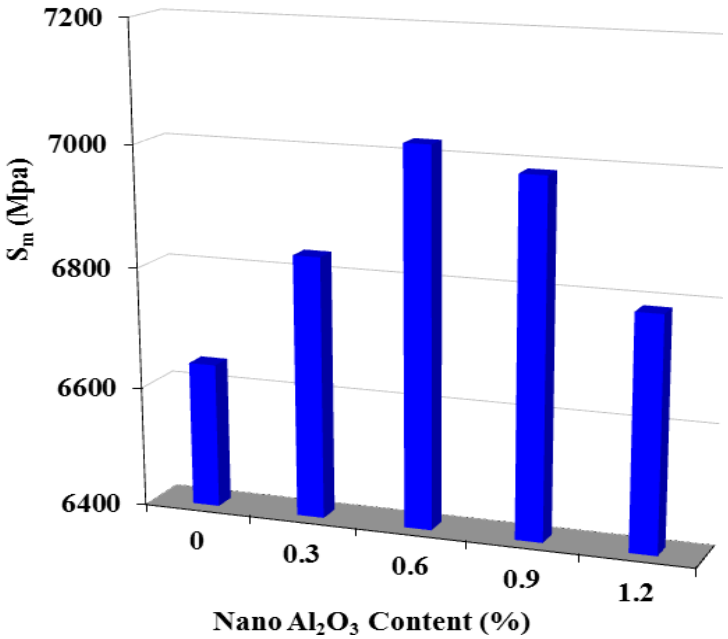
۵. نتایج و تحلیل‌ها

۵-۱. تحلیل نتایج آزمون مدول سفتی

نتایج مدول سفتی مخلوط‌های آسفالتی SMA در دماهای ۵، ۱۵ و ۲۵ درجه سانتی‌گراد و به ازای درصدهای مختلف نانواکسید آلومینیوم در شکل‌های ٤ تا ٦ نشان داده شده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، با افزودن درصدهای مختلف نانواکسید آلومینیوم به مخلوط‌ها، سفتی مخلوط‌ها افزایش یافته و در نتیجه مدول سفتی مخلوط‌ها نیز بهبود می‌یابد. این افزایش تا افزودن ۰/٦ درصد نانواکسید آلومینیوم ادامه داشته و از آن پس مجدداً سفتی مخلوط‌ها دچار کاهش می‌گردد، هر چند که مقدار مدول سفتی در ۱/۲ درصد نانو کماکان به مقدار قابل ملاحظه‌ای بیش از مقدار مدول نمونه‌های کنترل (بدون افزودنی) می‌باشد.

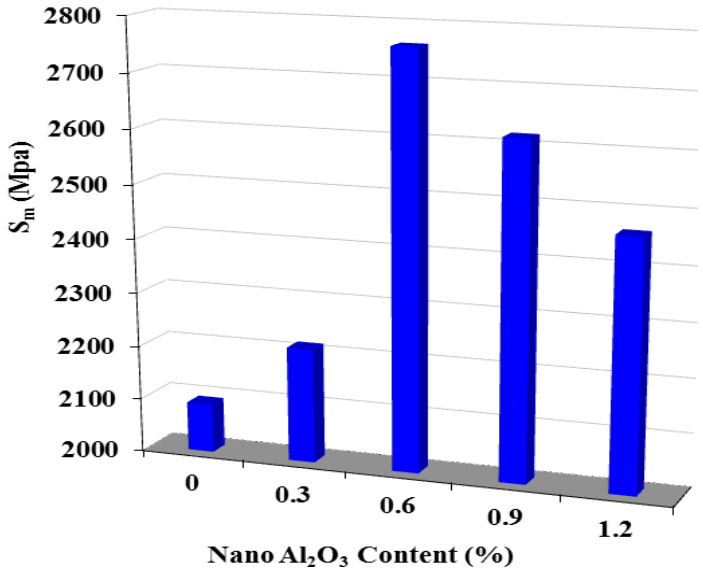


شکل ۴. مدول سفتی نمونه‌های SMA بر حسب درصد نانواکسید آلومینیوم در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد



شکل ۵. مدول سفتی نمونه‌های SMA بر حسب درصد نانواکسید آلومینیوم در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد

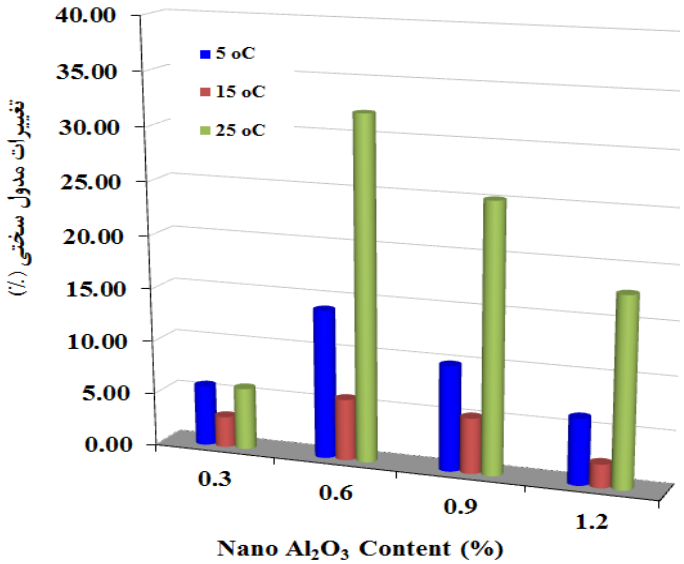
همانطور که نتایج آزمایش مدول سفتی به روش کشش غیر مستقیم نشان می‌دهد، افزودن ۰/٦ درصد نانواکسید آلومینیوم به قیر و سپس استفاده از قیر اصلاح شده در ساخت مخلوط‌های آسفالتی SMA توانسته است بهترین نتایج را به همراه داشته باشد. دلیل عملکرد مناسب مخلوط‌های آسفالتی بر اثر افزودن نانواکسید آلومینیوم را می‌توان در نحوه‌ی افزودن نانومواد جستجو نمود. در این تحقیق، نانواکسید آلومینیوم به قیر مورد استفاده افزوده شده است. توده‌های نانواکسید آلومینیوم بر اثر نیروی برشی قوی که دستگاه همزن برش بالا ایجاد می‌نماید، بین ذرات قیر قرار گرفته و با توجه به نسبت سطح به حجم بالای نانومواد، سبب تسلیح ذرات تشکیل دهنده قیر می‌شوند. تسلیح ذرات قیر سبب ایجاد پیوند قوی‌تر بین آنها و استحکام و چسبندگی بالاتر قیر مورد استفاده می‌گردد. از آنجایی که قیر عامل اصلی پیوند بین مصالح سنگی را در مخلوط‌های آسفالتی بر عهده دارد، در نتیجه، قیر با قابلیت چسبندگی و استحکام بالاتر سبب تولید مخلوط‌های آسفالتی سفت‌تر و سخت‌تر می‌گردد.



شکل ۶. مدول سفتی نمونه‌های SMA بر حسب درصد نانواکسید آلومینیوم در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد

تمامی مسائل فوق پس از افزودن بیش از ۰/٦ درصد نانواکسید آلومینیوم به قیر می‌تواند به‌گونه‌ای دیگر تفسیر گردد. بیشتر شدن توده‌های نانومواد بین ذرات قیر سبب جدایی بیش از اندازه ذرات تشکیل دهنده قیر گردیده و در این حالت، نانومواد وظیفه اصلی خود را که مسلح‌سازی می‌باشد نداشته، بلکه در این حالت آنها به عنوان درصدی از ذرات قیر در حال فعالیت می‌باشند که همین عامل می‌تواند به عنوان نکته منفی سبب کاهش مدول سفتی مخلوط‌های آسفالتی SMA گردد. قیری که تا افزودن ۰/٦ درصد نانواکسید آلومینیوم دارای رفتار ایده‌آلی بوده و با چسبندگی بهبود یافته‌ای سبب افزایش سفتی مخلوط‌ها شده بود، با ازدیاد درصد نانومواد دچار کاهش کیفیت عملکردی شده و ذرات آن با فاصله از یکدیگر به‌خوبی قادر به برقراری ارتباط قوی با یکدیگر نمی‌باشند. نتیجه تمامی بحث‌های فوق به این منجر می‌گردد که نانواکسید آلومینیوم، با توجه به قابلیت‌های فراوان، تنها تا یک درصد محدود (۰/٦ درصد) می‌تواند مفید واقع شود.

شکل ۷ نشان دهنده درصد تغییرات مدول سفتی مخلوط‌های آسفالتی SMA در دماهای مختلف بر حسب افزودن درصدهای مختلف نانواکسید آلومینیوم نسبت به نمونه‌های کنترل می‌باشد. همانطور که دیده می‌شود، تفاوت چشمگیری بین درصد تغییرات مدول سفتی در ۰/٦ درصد نانواکسید آلومینیوم با سایر درصدها مشاهده می‌گردد. در نتیجه، از نظر نتایج این آزمایش، ۰/٦٪ نانو به عنوان درصد بهینه انتخاب می گردد.



شکل ۷. درصد تغییرات مدول سفتی نمونه‌های SMA بر حسب درصد نانواکسید آلومینیوم

نتایج شکل ۷ نشان می‌دهد که در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و با افزودن ۰/٦ درصد نانواکسید آلومینیوم، مقدار مدول سفتی تقریباً ۳۲٪ نسبت به مخلوط کنترل افزایش یافته است. با توجه به اینکه مدول سفتی مخلوط‌های آسفالتی از اصلی‌ترین پارامترهای طراحی روسازی راه می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت با وجود اینکه افزودن ۰/٦ درصد نانواکسید آلومینیوم شاید هزینه ساخت اولیه را تا حدی افزایش دهد، اما ضخامت روسازی مورد نیاز، به علت افزایش ۳۰ درصدی مدول سفتی، به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. ضمن آنکه با افزایش سفتی مخلوط آسفالتی، وقوع بسیاری از خرابی‌ها همچون خستگی، به تأخیر افتاده و از شدت آنها کاسته می‌گردد.

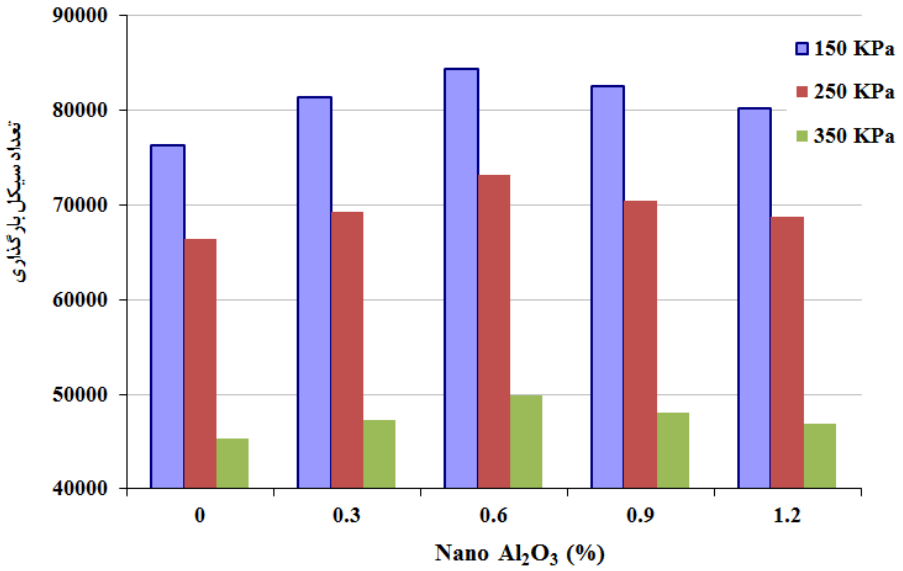
مقایسه درصد تغییرات مدول سفتی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با درصدهای مختلف نانواکسید آلومینیوم با نمونه‌های کنترل نشان می‌دهد که این درصد تغییرات در بیشترین دما (۲۵ درجه سانتی‌گراد) بیشترین مقدار را داشته و این بدان معنی است که نانواکسید آلومینیوم به‌خوبی قادر است حساسیت حرارتی قیر و مخلوط‌های آسفالتی را در دماهای زیاد (زمانی که قیر به علت پدیده روانی دچار کاهش خاصیت مطلوب می‌گردد) کاهش دهد. این اتفاق می‌تواند از نظر اقتصادی بسیار مقرون به صرفه باشد، زیرا دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد دمایی است که روسازی در روزهای مختلف سال و در نقاط مختلف کشور، با توجه به شرایط آب و هوایی مختلف، بسیار آن را تجربه می‌کند و بهبود مدول سفتی مخلوط آسفالتی در این دما می‌تواند از وقوع بسیاری از خرابی‌ها در این دما جلوگیری نماید.

۵-۲. تحلیل نتایج آزمون خستگی به روش کشش غیرمستقیم

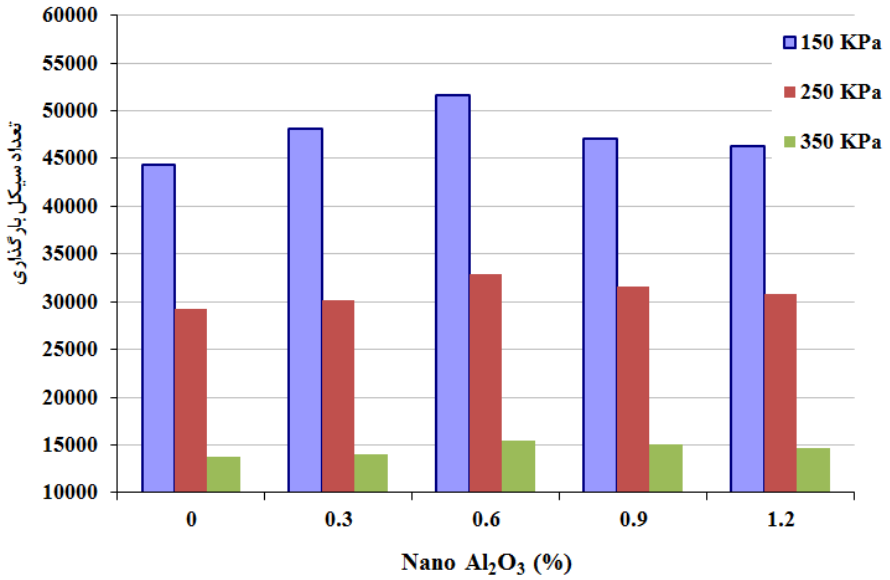
شکل‌های ۸ تا ۱۰ نشان دهنده عمر خستگی مخلوط‌های آسفالت ماستیک درشت‌دانه به ازای درصدهای مختلف نانواکسید آلومینیوم در دماهای مختلف می‌باشد. عمر خستگی در آزمایش کشش غیرمستقیم به صورت تعداد سیکل‌های قابل تحمل یک نمونه آسفالتی تا وقوع ترک تعریف می‌گردد. شکل‌های ۸ تا ۱۰ نشان دهنده این تعداد سیکل به ازای درصدهای مختلف نانواکسید آلومینیوم می‌باشند. در این تحقیق، آزمایش خستگی در سه دمای ۵، ۱۵ و ۲۵ درجه سانتی‌گراد و در سه تنش ۱۵۰، ۲۵۰ و ۳۵۰

کیلوپاسکال صورت پذیرفته است تا از طریق نتایج آن‌ها به مقایسه تأثیر درصدهای مختلف نانواکسید آلومینیوم بر عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی SMA در دماها و تنش‌های مختلف پرداخته شود.

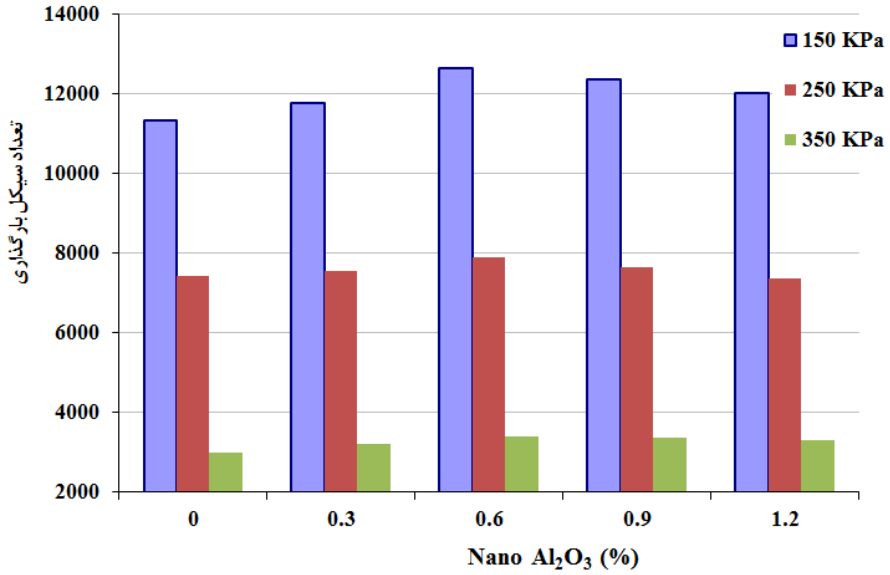
همانطور که نتایج نشان می‌دهد، تعداد سیکل بارگذاری قابل تحمل نمونه‌های SMA در دماها و تنش‌های کمتر، بیشتر می‌باشد. به عنوان مثال، نسبت تعداد سیکل قابل تحمل نمونه‌های کنترل (بدون درصد نانو) در کمترین دما و تنش، که ۵ درجه سانتی‌گراد و ۱۵۰ کیلوپاسکال می‌باشد، با بالاترین دما و تنش، که ۲۵ درجه سانتی‌گراد و ۳۵۰ کیلوپاسکال می‌باشد، معادل ۲۵ است که نشان از تأثیر دما و تنش بر عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی داشته و در واقع دما و تنش کمتر معادل با عمر طولانی‌تر مخلوط‌های آسفالتی است. اما دو پارامتر فوق (دما و تنش) به‌وسیله مهندسین حوزه راهسازی و حمل و نقل قابل تغییر نیستند. آنچه که دست‌یافتنی بوده، یافتن راهی است که حتی در دماها و تنش‌های بیشتر نیز مانع کاهش بیش از اندازه طول عمر مخلوطها گردد.



شکل ۸ عمر خستگی نمونه‌های SMA بر حسب درصد نانواکسید آلومینیوم در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد



شکل ۹. عمر خستگی نمونه‌های SMA بر حسب درصد نانواکسید آلومینیوم در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد



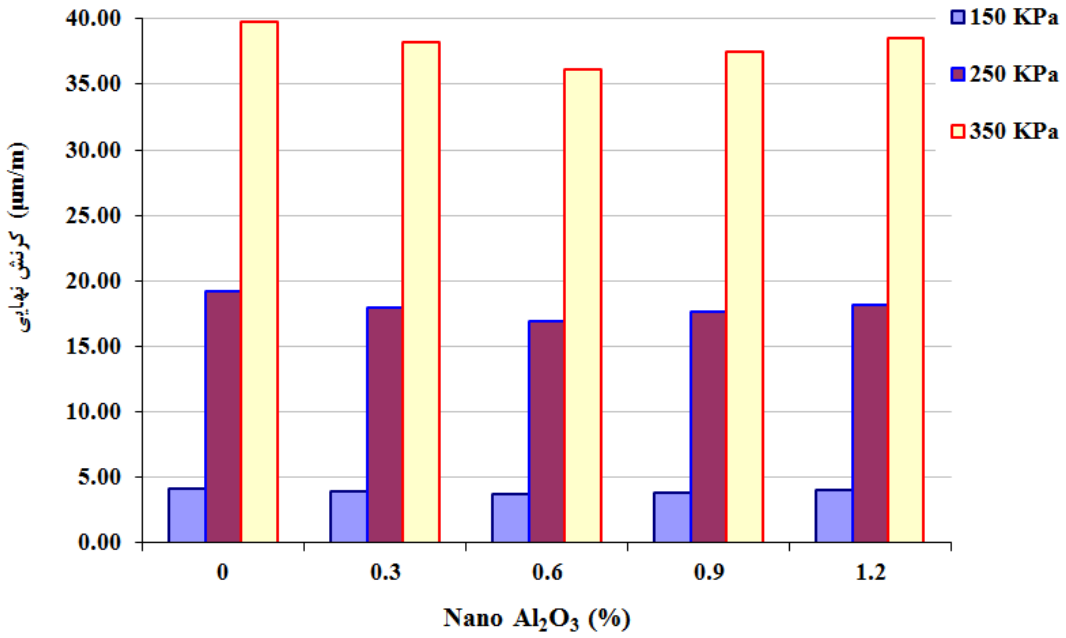
شکل ۱۰. عمر خستگی نمونه‌های SMA بر حسب درصد نانواکسید آلومینیوم در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد

نتایج این تحقیق، استفاده از نانواکسید آلومینیوم را بدین منظور پیشنهاد می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از ۰/۶ درصد نانواکسید آلومینیوم در تمامی دماها و تنش‌ها بیشترین تعداد سیکل قابل تحمل را برای مخلوطهای SMA به همراه می‌آورد. در دماها و تنش‌های مختلف، تعداد سیکل قابل تحمل مخلوطهای اصلاح شده بین ۱۰ تا ۲۰ درصد بیش از مخلوطهای کنترل می‌باشد. در نتیجه، می‌توان انتظار داشت که احتمال وقوع ترک‌ها و شروع پدیده خستگی در مخلوطهای اصلاح شده با ۰/۶ درصد نانواکسید آلومینیوم نسبت به نمونه‌های کنترل به مقدار قابل توجهی کمتر باشد.

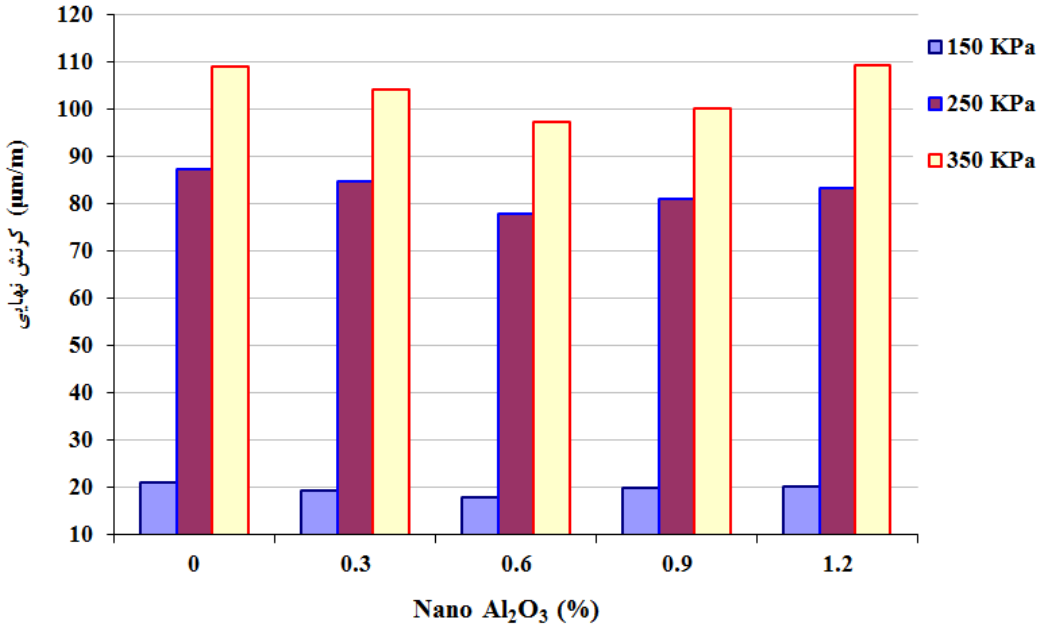
از دیگر نتایج مهم آزمایش خستگی به روش کشش غیرمستقیم، تعیین مقدار کرنش نهایی در حین وقوع اولین ترک (انتهای تعداد سیکل بارگذاری) در نمونه‌ها می‌باشد. همانطور که شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ نشان

می‌دهند، مقدار کرنش نهایی در حین شروع فرایند خستگی در نمونه‌های دارای درصدهای مختلف نانواکسید آلومینیوم کمتر از نمونه‌های کنترل می‌باشد. کرنش نهایی در حین وقوع ترک از نوع کرنش‌های ماندگار بوده که کمتر بودن آن یک پارامتر مطلوب برای مخلوط‌های آسفالت ماستیک درشت‌دانه است.

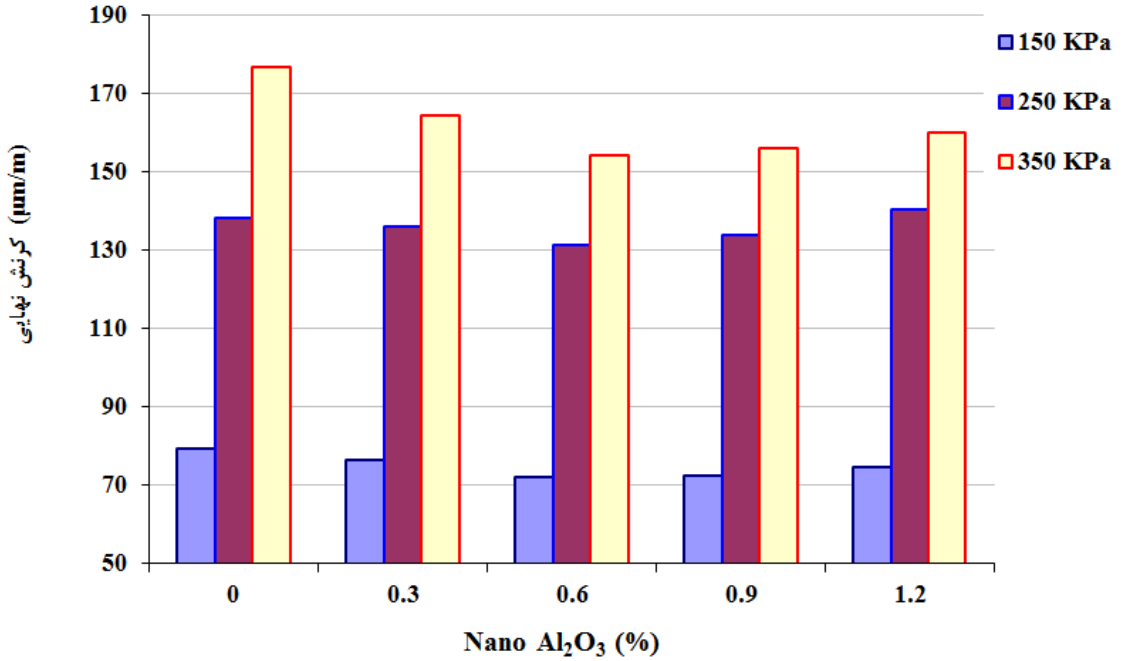
نکته دیگری که در نتایج مشخص است، تفاوت مقدار کرنش نهایی در دماها و تنش‌های مختلف می‌باشد که با بیشتر شدن این مقادیر، مقدار کرنش نهایی نیز افزایش می‌یابد؛ هرچند که با افزودن ۰/٦ درصد نانواکسید آلومینیوم، مقادیر کرنش نهایی نسبت به مخلوط‌های کنترل تا حد زیادی کاهش می‌یابد.



شکل ۱۱. کرنش نهایی نمونه‌های SMA بر حسب درصد نانواکسید آلومینیوم در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد



شکل ۱۲. کرنش نهایی نمونه‌های SMA بر حسب درصد نانواکسید آلومینیوم در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد



شکل ۱۳. کرنش نهایی نمونه‌های SMA بر حسب درصد نانواکسید آلومینیوم در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد

۶. نتیجه‌گیری

مدول سفتی و خستگی دو مورد از مهمترین پارامترهای عملکردی مخلوطهای آسفالتی می‌باشند که بر طراحی روسازی و همچنین عملکرد آن تحت بارهای دینامیک تأثیرات چشمگیری دارند. در نتیجه، بهبود یافتن آنها می‌تواند عملکرد بهتری را برای روسازی راه از نظر ایمنی و اقتصادی به همراه آورد. در این تحقیق، استفاده از مخلوطهای آسفالت ماستیک درشت‌دانه (SMA) و کاربرد نانواکسید آلومینیوم در آنها به منظور بهبود دو پارامتر فوق مورد استفاده قرار گرفته است. بررسی تأثیر درصدهای مختلف نانواکسید آلومینیوم بر دو پارامتر سفتی و خستگی مخلوطهای آسفالت SMA به‌وسیله نتایج دو آزمایش مدول سفتی و خستگی به روش کشش غیرمستقیم صورت پذیرفته است. عمده نتایج حاصل از این تحقیق عبارتند از:

– با افزودن درصدهای مختلف نانواکسید آلومینیوم به مخلوطهای آسفالتی SMA، سفتی مخلوطها افزایش یافته و در نتیجه مدول سفتی مخلوطها نیز بهبود یافته است. افزایش مدول سفتی مخلوطهای آسفالت SMA تا افزودن ۰/٦ درصد نانواکسید آلومینیوم ادامه داشته و از آن پس مجدداً سفتی مخلوطها دچار کاهش می‌گردد؛ هر چند که مقدار مدول سفتی در ۱/۲ درصد نانو کماکان به مقدار قابل ملاحظه‌ای بیش از مقدار مدول نمونه‌های کنترل (بدون افزودنی) می‌باشد.

– با توجه به اینکه مدول سفتی مخلوطهای آسفالتی از اصلی‌ترین پارامترهای طراحی روسازی راه می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که با وجود اینکه افزودن ۰/٦ درصد نانواکسید آلومینیوم شاید هزینه ساخت اولیه را تا حدی افزایش دهد، اما ضخامت روسازی مورد نیاز به علت افزایش ۳۰ درصدی مدول سفتی، به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. ضمن این که با افزایش سفتی مخلوط آسفالتی، وقوع بسیاری از خرابی‌ها، همچون خستگی، به تأخیر افتاده و از شدت آنها کم می‌گردد.

– استفاده از ۰/۶ درصد نانواکسید آلومینیوم در تمامی دماها و تنش‌ها بیشترین تعداد سیکل قابل تحمل را برای مخلوطهای SMA به همراه می‌آورد. در دماها و

تنش‌های مختلف، تعداد سیکل قابل تحمل مخلوط‌های اصلاح شده بین ۱۰ تا ۲۰ درصد بیش از مخلوط‌های کنترل بود. در نتیجه می‌توان انتظار داشت که احتمال وقوع ترک‌ها و شروع پدیده خستگی در مخلوط‌های اصلاح شده با ۰/۶ درصد نانواکسید آلومینیوم نسبت به نمونه‌های کنترل به مقدار قابل توجهی کمتر باشد.

– با توجه به نتایج این مقاله، و مقایسه تأثیر نانواکسید آلومینیوم بر مدول سفتی و خستگی مخلوط‌های آسفالت ماستیک درشت‌دانه با سایر افزودنی‌ها به این نتیجه می‌رسیم که می‌توان از نانواکسید آلومینیوم به عنوان یک افزودنی مناسب در جهت بهبود مدول سفتی مخلوط‌های آسفالت ماستیک درشت‌دانه و بهبود عملکرد آن در برابر پدیده خستگی استفاده کرد.

۷. منابع

طاهرخانی، ح.، شفیعی ماتک، م. و امینی، ح. ۱۳۹۲. "بررسی تأثیر افزودن نانورس اصلاح شده به قیر بر روی مقاومت در برابر پدیده شیارشدگی به کمک آزمایش DSR". هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، زاهدان.

فرامرزی، م. و معصومی راد، ع. ۱۳۹۳. "پیش‌بینی عمر خستگی مخلوط آسفالتی گرم اصلاح شده با نانولوله‌های کربنی". ششمین همایش ملی قیر و آسفالت ایران.

مقدس نژاد، ف. ۱۳۹۳. "تأثیر نانوذرات در مقاومت بتن آسفالتی در برابر بارهای خزشی دینامیکی". ششمین همایش ملی قیر و آسفالت ایران.

Ghaffarpour Jahromi, S. and Khodaii, A. 2009. "Effect of nanoclay on rheological properties of bitumen binder". Constr. Build. Mater., 23: 2894-2904.

Khattak, M. J., Khattab, A., Rizvi, H. R. and Zhang, P. F. 2012. "The impact of carbon nano-fiber modification on asphalt binder rheology". Constr. Build. Mater., 30: 257-264.

Shafabakhsh, Gh., Sadeghnejad, M. and Chelovian, A. 2015. "Experimental study on creep behavior of stone mastic asphalt by using of nano Al_2O_3". Int. J. Sci. Eng. Res., 6(10): 903-911.

Shaffie, E., Ahmad, J., Arshad, M. and Kamarun, A. 2015. "Using nanopolyacrylate and nanocomposite as binder modifiers for stone mastic asphalt (SMA) ". Appl. Mech. Mater., 802: 381-386.

Xiao, F. P., Amirkhanian, A. N. and Amirkhanian, S. N. 2011. "Influence of carbon nanoparticles on the rheological characteristics of short-term aged asphalt binders". J. Mater. Civil Eng., 23(4): 423-431.

You, Z. P., Mills-Beale, J., Foley, J. M. and Goh, S. W. 2011. "Nanoclay-modified asfhalt materials: Preparation and characterization". Constr. Build. Mater., 25: 1072-1078.