

ارزیابی مقاومت خستگی بتن آسفالتی اصلاح شده با نانو سیلیس

معین حسنی نیا (مسئول مکاتبات)، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

محمود عامری، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

حسن زیاری، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

E-mail: moin.hasani@yahoo.com

پذیرش: ۱۳۹۳/۰۳/۰۱

دریافت: ۱۳۹۲/۱۰/۰۳

چکیده:

هدف از این تحقیق، بررسی عمرخستگی و مقاومت مخلوط آسفالتی اصلاح شده با نانوسیلیس در دماهای میانی، در برابر ترک‌های خستگی است. در این تحقیق، نانو سیلیس به اندازه ۴٪ و ۶٪ درصد وزن قیر، به قیر اضافه شده است. آزمایش‌های مدول برجهندگی، کشش غیرمستقیم و تیر خستگی خمشی چهار نقطه‌ای برای ارزیابی مقاومت عمرخستگی مخلوط آسفالتی اصلاح شده انجام گرفته است. نتایج آزمایشها نشان داد که عمرخستگی و مقاومت مخلوط آسفالتی در دماهای میانی در برابر ترک‌های خستگی، با اصلاح قیر توسط نانوسیلیس، به میزان قابل توجهی بهبود می‌یابد. افزودن نانو سیلیس باعث افزایش مقدار مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم نیز شده است. نتایج آزمایش تیرخستگی ۴ نقطه‌ای نیز نشان داد که افزودن نانو سیلیس عمرخستگی را افزایش داده است. در مجموع افزودن نانوسیلیس باعث کاهش ترک‌های خستگی مخلوط آسفالتی، افزایش عمرخستگی و افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در دماهای میانی شده است.

واژه‌های کلیدی: نانو سیلیس، عمر خستگی، مدول برجهندگی، مقاومت کششی غیرمستقیم، بتن آسفالتی

۱. مقدمه

حدود ۵۳ سال پیش، توسط ریچارد فینمن دانشمند کوانتوم نظری و دارنده جایزه نوبل، مطرح شده است، او گفت: اگر دانشمندان ترانزیستورها را ساخته‌اند، ما با علم اتمی می‌توانیم همین ترانزیستورها را با مقیاس بسیار کوچکی بسازیم [Ramsden, 2009].

۲. پیشینه تحقیقات

در سالهای اخیر تحقیقات گسترده‌ای بر روی نانو مواد به عنوان اصلاح کننده قیر و مخلوط آسفالتی انجام شده است. پژوهش‌های گذشته در حوزه استفاده از نانو مواد در بهبود خواص عملکردی قیر و مخلوط آسفالتی نشان داده است که نانو مواد به علت دارا بودن سطح مخصوص بالا^۱ و ایجاد شبکه‌های قوی در قیر، اغلب باعث سخت شدگی قیر، افزایش مقاومت در برابر شیار افتادگی، افزایش مدول برجهندگی آسفالت و در برخی موارد باعث افزایش عمرخستگی قیر و مخلوط آسفالتی شده است. از جمله نانو موادی که در سال‌های اخیر به عنوان اصلاح کننده به قیر یا مخلوط‌های آسفالتی اضافه شده است می‌توان به نانورس^۲، نانوآهک هیدراته^۳، نانو فیبر کربن^۴ و نانو لوله کربنی^۵ اشاره نمود. [Fang et al. 2013].

نتایج به دست آمده در یکی از این تحقیقات که بر روی ۲ نوع نانورس برای اصلاح خواص قیر صورت گرفته و آزمایش‌های ویسکوزیته چرخشی و مدول دینامیک برشی که برای به دست آوردن خواص فیزیکی قیر اصلاح شده، انجام شده است، بیانگر آن است که ویسکوزیته چرخشی در دماهای مختلف با افزودن نانورس افزایش یافته است. همچنین در دامنه‌های دمایی مختلف و دامنه‌های فرکانسی متفاوت، مدول دینامیکی در هر دو حالت نانورس نوع اول و نوع دوم، افزایش داده شده است [Fang et al. 2013].

در تحقیقی دیگر پس از بررسی اثر نانورس به عنوان اصلاح کننده، عدم بهبود مقاومت در برابر خستگی در دماهای پایین، توسط نانورس نتیجه شده است [Ven et al. 2009]. از نانو ذرات کربن نیز برای اصلاح قیر استفاده شده است، نتایج آزمایشها بر روی قیر اصلاح شده،

امروزه با افزایش روزافزون ترافیک و بار محوری خودروها، نیروی بیشتری بر سیستم سازه روسازی اعمال می‌شود که باعث کاهش عمر مفید روسازی‌ها می‌گردد. عمده خرابی در روسازی، ناشی از شیارشدگی آسفالت به دلیل رفتار ویسکوپلاستیک آسفالت در دماهای بالا و همچنین ترک‌های ناشی از بارگذاری مکرر ترافیک در دماهای میانی و پایین به دلیل عدم انعطاف‌پذیری لازم در آسفالت است. میزان مقاومت در برابر خستگی یک مخلوط آسفالتی برابر با میزان پایداری آسفالت در برابر بارهای خمشی تکراری، بدون ایجاد شکست در مخلوط آسفالتی است [Jahromi and Khodaii, 2009].

میکرو ترک‌های ناشی از پدیده خستگی، وابستگی زیادی به خواص رئولوژیکی قیر، نوع سنگدانه و نوع دانه‌بندی مصالح سنگی، نوع و میزان فیلر، شرایط بارگذاری و دمای محیط دارد. مشخصات ماده چسبنده قیری، نقش عمده‌ای در کنترل خرابی و دوام مخلوط‌های آسفالتی دارد [Moreno and Rubio, 2013].

در سال‌های اخیر برای بهبود خواص رئولوژیکی قیر، تکنیکها و روش‌های مختلفی توسط محققان ارائه شده است، یکی از روش‌های بهبود خواص عملکردی قیر، استفاده از افزودنی مناسب است. تاکنون افزودنی‌های رایجی مانند افزودنی‌های پلیمری و واکس‌ها برای اصلاح رفتار قیر در دماهای بالا و پایین، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با ظهور نانو فناوری، نانو مواد جهت اصلاح خصوصیات قیر و مخلوط‌های آسفالتی توسط محققان بکار گرفته شدند.

نانو مواد، به علت داشتن سطح مخصوص بالا و ایجاد شبکه‌ای قوی در قیر، اغلب باعث سخت شدگی قیر، افزایش مقاومت در برابر شیار افتادگی، افزایش مدول برجهندگی آسفالت و در برخی موارد باعث افزایش عمر خستگی قیر و مخلوط آسفالتی می‌شوند [Buzea et al. 2007].

نانوفناوری دارای سابقه زیادی نیست. این موضوع برای نخستین بار

ارزیابی مقاومت خستگی بتن آسفالتی اصلاح شده با نانو سیلیس

دماهای پایین و فرکانسهای بالا سختی کاهش پیدا کرده است که این خاصیت، باعث کنترل ترکهای حرارتی قیر و افزایش عمر خستگی⁹ آن شده است، بررسیها نشان داده است که افزایش عمر خستگی به دلیل آن است که نانولوله های کربنی به صورت شبکه ای، در ماتریس قیر قرار گرفته و باعث مسلح شدن قیر، شده اند [Santagata et al. 2012].

در تحقیقی دیگر از نانولوله های تک جداره، برای اصلاح قیر استفاده شده است. آزمایشها نشان داده اند که نانولوله های تک جداره باعث بهبود خواص قیر اصلاح شده در دماهای بالا و افزایش جز الاستیک مدول برشی قیر، شده اند. [Larisa et al. 2011].

از نانوسیلیس نیز به عنوان اصلاح کننده قیر استفاده شده است. در این پژوهش بیشتر بر روی خواص قیر اصلاح شده با نانوسیلیس تمرکز شده است. نانوسیلیس با درصد های ۴ و ۶ درصد، به قیر حاوی پلیمر SBR افزوده شده است. نتایج آزمایشها بر روی قیر نشان داده است که نانوسیلیس، مقدار ویسکوزیته را در دمای بالا، کاهش می دهد و از این جهت از سایر نانو ها متمایز می شود. در مجموع نانو سیلیس باعث بهبود خواص شیارشدگی و ترکهای ناشی از خستگی قیر شده است [Yao et al. 2012].

نانو سیلیس کاربرد گسترده ای در صنعت پزشکی، داروسازی و مهندسی دارد. در صنعت بتن، سیلیس یکی از معروف ترین موادی است که نقش مهمی در چسبندگی و پرکنندگی بتن با عملکرد بالا ایفا می کند. از مزایای نانوسیلیس، داشتن خواص عملکردی و هزینه پایین تولید است. نانوسیلیس از جمله مواد جدید معدنی است که دارای خواص مفید بالقوه مانند سطح ویژه بالا، توانایی پراکندگی خوب، جذب قوی، پایداری زیاد و درصد خلوص بالا است [Yao et al. 2012].

بیشتر مطالعات یاد شده مزبور بر روی خواص قیر بوده و هنوز مطالعات کامل و همه جانبه ای بر روی مخلوط آسفالتی انجام نگرفته است. در این تحقیق، نانو سیلیس برای اصلاح مخلوط آسفالتی

نشان داده است که مقدار ویسکوزیته درجه حرارت شکست^۶ مدول برشی^۷ و مدول الاستیسیته^۸ در اثر استفاده از نانو ذرات کربن، افزایش می یابد و در نتیجه مقاومت در برابر شیار شدگی آسفالت بهبود داده می شود. همچنین نتایج نشان داده است که برای اصلاح قیر با نانو ذرات کربن، از درصد های بالاتر از ۱٪ استفاده شود. [ArmenN et al. 2011].

در سال های اخیر از نانوفیبر کربن نیز برای اصلاح خواص عملکردی قیر و مخلوط آسفالتی استفاده شده است، نانوفیبر کربن به دو روش خشک و تر با قیر مخلوط گردیده است. نتایج آزمایش بر روی قیر اصلاح شده، نشان داده است که نانوفیبرهای کربن باعث بهبود خواص ویسکوالاستیک و افزایش مقاومت شیار شدگی قیر شده است. خاصیتی که بیشتر از همه، افزایش چشم گیری داشته است، عمر خستگی قیر اصلاح شده با نانوفیبر کربن است [Khattak et al. 2012].

از نانوفیبرهای کربنی به عنوان اصلاح کننده مخلوط های آسفالتی نیز استفاده شده است. آنچه نانوفیبر کربن را از سایر نانو مواد متمایز کرده است، بهبود چشمگیر خواص خستگی قیر و همچنین افزایش عمر خستگی مخلوط های آسفالتی است. نتایج نشان داده است که افزودن نانوفیبر کربنی، عمر خستگی مخلوط آسفالتی را به میزان قابل توجهی بهبود دارد و همچنین مقدار سختی و مدول دینامیکی مخلوط آسفالتی را افزایش داده است. می توان گفت که نانو فیبرهای کربنی به دلیل باربری کششی بالا، مانع افزایش میکروتکرکها در قیر گردیده و در نتیجه خواص چسبندگی قیر و مخلوط آسفالتی به میزان چشمگیری بهبود یافته است [Khattak et al. 2013].

نانولوله های کربنی از دیگر نانو مواد هستند که برای اصلاح قیر بکار گرفته شده اند. نانولوله های کربن به دو دسته تک جداره و چند جداره تقسیم بندی می شوند، نانولوله های تک جداره در فرآیندی پیچیده تر نسبت به نانولوله های چند جداره تولید می شوند. نتایج آزمایش قیر اصلاح شده با نانولوله های کربن نشان داده است که در

بکار برده شده است. در این پژوهش آزمایش های مدول برجهندگی، کشش غیرمستقیم و تیر خستگی برای ارزیابی مقاومت عمر خستگی مخلوط آسفالتی اصلاح شده، انجام شده است.

استفاده شده در این پژوهش دارای سطح ویژه بالا است، انتظار می رود که با افزودن نانو سیلیس، مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر خستگی افزایش داشته باشد.

۳. هدف مطالعه

هدف از انجام این پژوهش بررسی اثر نانوسیلیس بر مقاومت مخلوط های آسفالتی در دماهای میانی در برابر ترک های خستگی و عمر خستگی مخلوط آسفالتی است، از آن جا که نانوسیلیس

۴. مواد آزمایش و اختلاط

۴-۱ مشخصات مواد و مصالح مصرفی

قیر ۶۰/۷۰ مورد استفاده در این پژوهش از شرکت نفت پاسارگاد واحد تهران تهیه شده است. مشخصات قیر استفاده شده در جدول شماره ۱

جدول ۱. مشخصات قیر استفاده شده

| مشخصات اندازه گیری شده | استاندارد آزمایش | مقدار اندازه گیری شده |
|---|------------------|-----------------------|
| وزن مخصوص در دمای C ۲۵ (g/cm^3) | AASHTO T228 | ۱/۰۱ |
| درجه نفوذ در دمای C ۲۵ ($mm \cdot 0/1$) | AASHTO T49 | ۶۰ |
| نقطه نرمی (C) | AASHTO T53 | ۵۶ |
| ویسکوزیته در دمای C ۱۲۰ (سانتی استوکس) | AASHTO T201 | ۱۰۵۵ |
| ویسکوزیته در دمای C ۱۳۵ (سانتی استوکس) | AASHTO T201 | ۳۶۱ |
| ویسکوزیته در دمای C ۱۶۰ (سانتی استوکس) | AASHTO T201 | ۱۷۰ |
| انعطاف پذیری در دمای C ۲۵ | AASHTO T51 | >۱۰۰ |

جدول ۲. مشخصات مصالح سنگی

| مشخصات اندازه گیری شده | استاندارد آزمایش | مقدار مورد نیاز | اندازه |
|--------------------------------|------------------|-----------------|--------|
| مشخصات مصالح سنگی درشت دانه | | | |
| درصد سایش لس آنجلس | AASHTO T96 | بیشینه ۳۰ | ۲۰ |
| درصد جذب آب | AASHTO T85 | بیشینه ۵ | ۰/۸ |
| درصد شکستگی در یک وجه | ASTM D5821 | کمینه ۱۰۰ | ۱۰۰ |
| چگالی مخصوص ظاهری (g/cm^3) | AASHTO T85 | | ۲/۶۵۴ |
| درصد شکستگی در دو وجه | ASTM D5821 | کمینه ۹۰ | ۱۰۰ |
| مشخصات مصالح ریزدانه | | | |
| چگالی مخصوص ظاهری (g/cm^3) | AASHTO T84 | | ۲/۶۱۷ |
| درصد جذب آب | AASHTO T84 | | ۱,۴ |
| مشخصات فیلر | | | |
| چگالی مخصوص ظاهری (g/cm^3) | AASHTO T84 | | ۲/۷۰۲ |

جدول ۳. مشخصات دانه بندی مخلوط آسفالتی

| اندازه الک | اینچ | شماره ۴ | شماره ۸ | شماره ۵۰ | شماره ۲۰۰ |
|------------|------|---------|---------|----------|-----------|
| میلیمتر | ۱۹ | ۵/۱۲ | ۷۵/۴ | ۳/۰ | ۰/۷۵/۰ |
| درصد عبوری | ۱۰۰ | ۹۵ | ۶۰ | ۱۵ | ۵ |

است. از چکش مارشال جهت متراکم کردن نمونه‌های مارشال برای محاسبه قیر بهینه استفاده شده است. برای آزمایش‌های مدول بر جهندگی و کشش غیرمستقیم، نمونه‌ها با دستگاه متراکم کننده چرخشی اتانانتنت تراکم یافته‌اند.

برای ساخت نمونه‌های آزمایش خستگی چهار نقطه‌ای، از دستگاه متراکم کننده مالشی استفاده شده است. تمام نمونه‌ها در قیر بهینه با درصد فضای خالی ۴٪ ساخته شده‌اند. از آنجا که در سطح نمونه ساخته شده، فضای خالی زیاد است، ۱۰ mm از هر طرف نمونه زده می‌شود. در نهایت با توجه به آیین‌نامه AASHTO 321T نمونه‌های با ابعاد 385 mm × 50 mm × 63 mm × 5 mm مهیا شده است.

۵. شرح آزمایش‌های انجام شده

۵-۱- مدول بر جهندگی

مدول بر جهندگی، یکی از پارامترهای مهم در سازوکار طراحی روسازی است. اندازه‌گیری این پارامتر به شکل پاسخ روسازی، زیر بار دینامیکی و کرنش متناظر این بار است. مقدار مدول بر جهندگی بر اساس آیین‌نامه ASTM D4123-04 اندازه‌گیری شده است. اصول این آزمایش بر پایه تئوری الاستیک است، اما می‌دانیم که مخلوط‌های آسفالتی به صورت الاستیک عمل نمی‌کنند و بعد از هر بارگذاری، مقداری تغییر شکل ماندگار دارند. اما اگر مقدار بارگذاری در مقایسه با مقاومت مواد کم و تعداد تکرارهای بارگذاری زیاد باشد، آنگاه تغییر شکل‌های زیر هر بارگذاری، تقریباً برابر با تغییر شکل‌های برگشت‌پذیر در هر بارگذاری هستند، در نتیجه می‌توان رفتار آن ماده را به صورت الاستیک در نظر گرفت [Huang, 2004]. در آزمون مدول بر جهندگی، تغییر شکل کلی برابر است با مجموع تغییر شکل آبی به علاوه تغییر شکل برگشت‌پذیر که به ترتیب نشان‌دهنده خواص الاستیک و ویسکوالاستیک آن ماده است [Brown and Kee, 1989].

آمده است. مصالح لازم برای ساخت نمونه‌ها از معدن اسب‌چران در رودهن واقع در شمال تهران تهیه شده است. از پودرسنگ به عنوان فیلر در ساخت نمونه‌ها استفاده شده است. مشخصات مصالح در جدول شماره ۲ نشان داده شده است. جدول شماره ۳، دانه‌بندی مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد. نانو سیلیس بکاررفته در این مطالعه دارای خلوص بیشتر از ۹۹٪ است. حداکثر قطر ذرات آن ۱۰ nm و دارای سطح ویژه ۶۰۰ m²/gr است. چگالی ظاهری آن کمتر از ۱/۰ gr/cm³ و چگالی واقعی آن، ۴/۲ gr/cm³ است. در نانو سیلیس اغلب موارد، اتم Si در مرکز چهارضلعی و چهار اتم اکسیژن در اطراف آن قرار دارند. [Yao et al. 2012].

۴-۲- مخلوط کردن و آماده سازی نمونه‌ها

برای اصلاح قیر با نانو سیلیس از دستگاه اختلاط با تنش برشی بالا استفاده شده است. نانو سیلیس با درصدهای ۴ و ۶ درصد وزنی قیر، به قیر اضافه شده است. با توجه به پژوهش [Yao et al. 2012] نانو سیلیس به وسیله دستگاه اختلاط با تنش برشی بالا با ۴۰۰۰ دور در دقیقه برای مدت ۲ ساعت و در دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد با قیر مخلوط شده است.

از روش مارشال برای مشخص کردن قیر بهینه مخلوط آسفالتی گرم استفاده شده است. برای ۴ و ۶ درصد نانو سیلیس و قیر خالص (اصلاح نشده) ۱۲ نمونه برای به دست آوردن درصد قیر بهینه ساخته شده است. برای هر یک از درصدهای قیر، حداقل ۳ نمونه آسفالتی ساخته شده است. درصد قیر بهینه مخلوط آسفالتی با میانگین‌گیری از سه درصد قیر زیر حاصل شده است:

۱- درصد قیر متناظر با حداکثر پایداری (مقاومت) مخلوط آسفالتی

۲- درصد قیر متناظر با حداکثر وزن مخصوص مخلوط آسفالتی

۳- درصد قیر متناظر با میانگین محدودیت‌های درصد هوا برای تمام مخلوط آسفالتی

مقدار قیر بهینه برای مخلوط اصلاح نشده ۵/۵ درصد، برای مخلوط اصلاح شده با نانو سیلیس ۴٪ و ۶٪ به ترتیب برابر با ۲/۵ و ۵ درصد

حسب تغییر شکل تعریف می‌شود و مقدار انرژی شکست برای هر نمونه از رابطه زیر محاسبه می‌شود [Ziari et al. 2013].

$$F_{E-} = \frac{\int_0^{\delta_{max}} p(\delta)d\delta}{HD} \quad (2)$$

که در آن F_E برابر است با کل انرژی شکست تا نقطه تسلیم (J/m^2)، مقدار نیرو (N)، δ تغییر شکل (mm)، H ضخامت نمونه (mm)، D قطر نمونه (mm) است.

در آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم برای هر متغیر، ۳ نمونه مطابق آیین‌نامه AASHTO T 283 ساخته شده‌است و در دمای C25 آزمایش شده‌اند و نتیجه نهایی از میانگین‌گیری بین این ۳ نمونه حاصل شده‌است.

۳-۵ خستگی مخلوط‌های آسفالتی (تیر خستگی ۴ نقطه‌ای)

برای اندازه‌گیری عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی، از آزمایش تیر خمشی چهار نقطه‌ای استفاده شده‌است. عموماً آزمایش تیر خمشی چهار نقطه‌ای به عنوان یکی از مناسب‌ترین آزمایش‌ها جهت بیان ویژگی‌های مخلوط‌های آسفالتی، مورد پذیرش قرار گرفته‌است. در این آزمایش، نمونه‌ها در ابعاد $385 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 63 \text{ mm}$ مطابق با آیین‌نامه AASHTO T321 تهیه شده‌اند. برای انجام آزمایش تیر خستگی چهار نقطه‌ای از دستگاه شرکت IPC استفاده شده‌است. همه نمونه‌ها در کرنش ثابت ۸۰۰ میکرواسترین، به صورت (مود) سینوسی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. فرکانس بارگذاری نمونه برابر ۱۰ HZ است و مقدار سختی اولیه در ۵۰ سیکل اول از شروع آزمایش، محاسبه شده است. تمام نمونه‌ها در دمای 25°C محیط مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. این نمونه‌ها قبل از انجام آزمایش به مدت ۴ ساعت در محفظه‌ای با دمای 25°C قرار گرفته‌اند. این آزمایش تا زمانی که سختی خمشی به مقدار ۵۰ درصد سختی خمشی اولیه برسد، ادامه پیدا می‌کند و مقدار سیکل‌های بارگذاری به عنوان عمر خستگی مخلوط آسفالتی گزارش می‌شوند. روابط ۳ تا ۷، روابطی که برای محاسبه پارامترهای خروجی استفاده شده است را نشان می‌دهد [AASHTOT321 2003].

بسته به فرکانس بارگذاری، دما و نوع مخلوط، حداقل تعداد بارگذاری بین ۵۰ تا ۲۰۰ دفعه است. حداقل تعداد بارگذاری باید به گونه‌ای باشد که تغییر شکل‌های انعطاف‌پذیر مقدار ثابتی باشند [Brown and Kee, 1989].

در این آزمایش برای دماهای ۵ و ۲۵ درجه، آزمایش انجام گرفته‌است و حداقل تعداد بارگذاری ۱۰۰ در نظر گرفته شده‌است.

۲-۵ مقاومت کششی غیرمستقیم

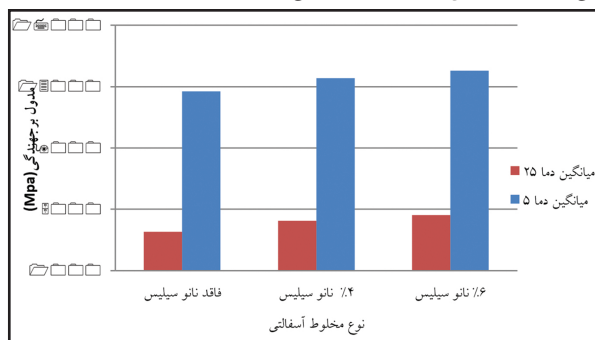
این آزمایش برای ارزیابی مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شود. خروجی این آزمایش، به طور نسبی نشان‌دهنده مقدار کیفیت نمونه‌های ساخته شده است. مخلوط‌های آسفالتی با مقاومت کششی بیشتر، دارای مقاومت بالاتری در مقابله با ترک‌های خستگی و دمای هستند [Huang et al. 2003]. در این آزمایش به وسیله اعمال بار فشاری تغییر شکل قائم، با یک نرخ ثابت در امتداد قطر نمونه‌های استوانه‌ای اعمال می‌شود. در این آزمایش نمونه بین دو نوار بارگذاری قرار می‌گیرد تا اینکه تنش یکنواخت کششی در صفحه قطری قائم نمونه به وجود بیاید. معمولاً نمونه در امتداد بارگذاری شکسته می‌شود. مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی از معادله زیر محاسبه می‌شود [AASHTO T283, 2003]

$$ITS = 2 \frac{P_{max}}{\pi Dt} * 10^6 \quad (1)$$

که در آن ITS مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم هر نمونه (kPa)، P_{ult} بیش‌ترین باری که نیاز است تا نمونه شکسته شود (KN)، D قطر نمونه (mm) ضخامت نمونه (mm) هستند.

خروجی‌های دیگری مانند انرژی شکست کل¹⁰ و انرژی شکست تا نقطه تسلیم را (اوج نیرو) می‌توان از این آزمایش استخراج کرد. انرژی شکست، به کار انجام شده برای ایجاد یک ترک به مقدار سطح واحد در یک نمونه گفته می‌شود که این برابر است با مساحت زیر منحنی بار بر حسب تغییر شکل، تا نقطه‌ای که بیشترین مقدار بار را تحمل می‌کند و انرژی شکست کل، تمام مساحت زیر نمودار بار بر

در شبکه قیر پخش و باعث مسلح شدن قیر شده‌اند که تغییرات در شبکه قیر می‌تواند باعث افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر تغییر شکلهای الاستیک و افزایش مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی شود. مدول برجهندگی یکی از پارامترهای مهم در سازوکار طراحی روسازی است، افزایش مدول برجهندگی می‌تواند باعث کنترل ترکهای ناشی از بارگذاری در دماهای میانی شود و همچنین از آنجا که مدول برجهندگی در تعیین ضخامت آسفالت تأثیر مستقیم دارد، می‌توان با افزایش مدول برجهندگی از ضخامت آسفالت کاست.



شکل ۱. نتایج مدول برجهندگی در دماهای ۲۵ و ۵ درجه سانتی‌گراد

۶-۲ مقاومت کششی غیرمستقیم

مقادیر مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوطهای آسفالتی حاوی درصدهای مختلف نانو سیلیس در شکل ۲ نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود که با افزودن نانوسیلیس مقاومت کششی غیرمستقیم افزایش می‌یابد و همچنین با افزایش مقدار نانوسیلیس، نرخ افزایش مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم به صورت صعودی افزایش پیدا می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نانوسیلیس با درصدهای ۴ و ۶ درصد، به ترتیب مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم، ۱۶ و ۲۹ درصد افزایش می‌یابد. در شکل ۳، نشان داده می‌شود که افزودن نانوسیلیس، مقدار انرژی شکست کل و انرژی شکست تا نقطه تسلیم را افزایش داده است. از آنجا که مخلوطهای آسفالتی با انرژی شکست بیشتر، مقاومت بالاتری در برابر ترکهای خستگی و دمایی دارند، در نتیجه می‌توان گفت که افزودن نانوسیلیس باعث

$$\varepsilon = \frac{12\delta h \times 10^6}{3(G_1^2 - 4G_0^2)} \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{G_0 p}{Bh^2} \quad (4)$$

$$S = \frac{1000\sigma}{\varepsilon} \quad (5)$$

که در آن S سختی خمشی بر حسب (Pa)، تنش کششی (Pa)، کرنش کششی، P بار اعمال شده، میانگین عرض نمونه (m)، میانگین ارتفاع نمونه (m)، δ تغییر شکل حداکثر در وسط تیر (m)، L فاصله بین تکیه‌گاه‌ها (معمولاً 357/0 متر) و a فاصله بین گیره‌های بارگذاری است.

انرژی تلف شده^{۱۱} در هر سیکل از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$D = \pi \sigma \varepsilon \sin(360 f \varphi) \quad (6)$$

که در آن D انرژی تلف شده در هر سیکل (J/m^3)، f فرکانس بارگذاری (هرتز)، زمان بین حداکثر کرنش (ثانیه) است.

$$W = \sum_{i=1}^{i=n} D_t \quad (7)$$

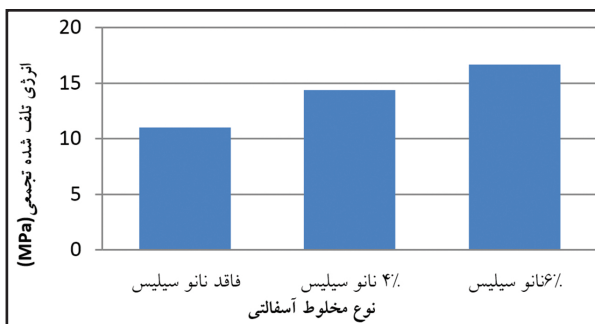
که W انرژی تلف شده تجمعی (J/m^3)، D_i انرژی تلف شده در سیکل i ام است.

۶. شرح و بحث نتایج

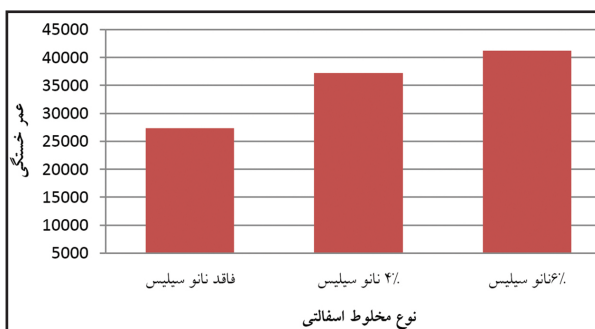
۶-۱ مدول برجهندگی

مقادیر مدول برجهندگی مخلوطهای آسفالتی در شکل ۱ نشان داده شده‌است. در شکل ۱، مقادیر مدول برجهندگی در دمای ۲۵ و ۵ درجه C نشان داده شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که در دمای ۲۵ درجه، افزودن نانوسیلیس به مقدار ۴ و ۶ درصد، مقدار مدول برجهندگی را به ترتیب به مقدار ۲۰ و ۳۱ درصد افزایش می‌دهد و همچنین در دمای ۵ درجه با افزایش نانوسیلیس مقدار مدول برجهندگی افزایش می‌یابد. از آنجا که نانو سیلیس مورد استفاده در این پژوهش دارای سطح ویژه بسیار زیاد است، ذرات نانوسیلیس

پیدا کرده‌است، این درحالی است که با افزودن ۴٪ نانو سیلیس عمرخستگی نسبت به نمونه شاهد به میزان ۳۶ درصد افزایش پیدا کرده‌است. میزان انرژی تلف‌شده مخلوط آسفالتی با افزودن ۴ و ۶ درصد نانوسیلیس به میزان ۳۱ و ۵۲ درصد افزایش یافته‌است، در نتیجه می‌توان گفت افزودن نانوسیلیس باعث افزایش عمر خستگی در دماهای میانی می‌شود که این افزایش عمر خستگی، می‌تواند به دلیل بسیار بالا بودن سطح ویژه نانوسیلیس باشد که با قرارگرفتن در شبکه قیر باعث مسلح شدن شبکه قیر و افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر بارگذاریهای متناوب می‌شود.



شکل ۴. نتایج انرژی تلف‌شده تجمعی مخلوط آسفالتی

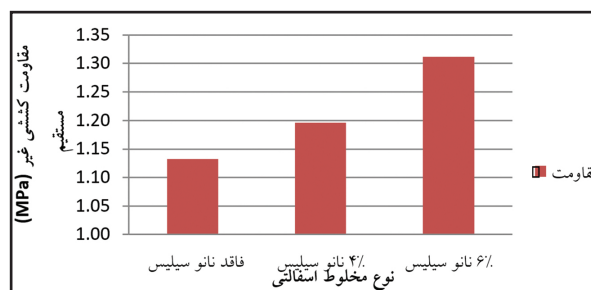


شکل ۵. نتایج عمر خستگی مخلوط آسفالتی

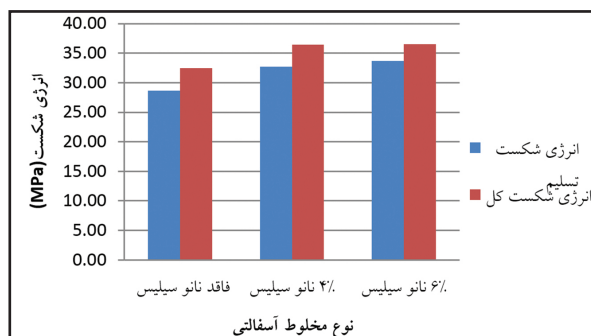
۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر نانوسیلیس به عنوان اصلاح‌کننده قیر، در دماهای میانی بر مقاومت مخلوطهای آسفالتی در برابر ترکهای خستگی مورد بررسی قرار گرفته است. برای ارزیابی مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با نانوسیلیس، آزمایشهای متنوعی بر روی مخلوط آسفالتی انجام پذیرفته و نتایج زیر به دست آمده است:

افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی، در برابر ترکهای خستگی می‌شود. با افزودن ۴٪ نانو سیلیس مقدار انرژی شکست کل به میزان ۱۲٪ افزایش پیدا کرده‌است. نتایج در شکل ۳ نشان می‌دهد که با افزودن ۶٪ نانوسیلیس، انرژی شکست کل و انرژی شکست تسلیم، افزایش قابل توجهی نسبت به ۴٪ نانوسیلیس نکرده است، به نحوی که مقدار انرژی شکست کل برای ۴ و ۶ درصد نانوسیلیس، تقریباً برابر است.



شکل ۲. نتایج ITS مخلوط آسفالتی



شکل ۳. نتایج انرژی شکست تسلیم و انرژی شکست کل مخلوط آسفالتی

۳-۶ خستگی مخلوطهای آسفالتی (تیر خستگی ۴ نقطه‌ای)

نتایج این آزمایش در شکل ۴ و ۵ نشان داده شده‌است. با توجه به این نتایج، افزودن نانوسیلیس باعث افزایش عمرخستگی مخلوط آسفالتی و افزایش انرژی تلف‌شده تجمعی مخلوط آسفالتی شده‌است. با افزودن ۴ درصد نانوسیلیس، عمر خستگی به میزان ۳۶ درصد افزوده شده است. با افزودن درصدهای بیشتر نانوسیلیس، نرخ افزایش عمر خستگی کاهش می‌یابد، به طوری که با افزودن ۶ درصد نانوسیلیس، تنها ۱۴ درصد عمر خستگی نسبت به ۴ درصد نانوسیلیس، افزایش

8- Elastic modulus

9- Fatigue life

10- Total fracture energy

11- Dissipated energy

۹. مراجع

- AASHTO T283 (2003) "Resistance of compacted hot-mix asphalt (HMA) to moisture-induced damage", AASHTO, USA

-AASHTO T321 (2003) "Standard method of test for determining the fatigue life of compacted hot-mix asphalt (HMA) subjected to repeated flexural bending", AASHTO, USA

-AmirKhanian, Armen N., Xiao, Feipeng and AmirKhanian, Sergi, N.(2011) "Characterization of unaged Asphalt binder modified with carbon nano particles", International Journal of Pavement Research and Technology Vol.4, pp.281-286

- Brown, E. R. and Kee, Y. Foo (1989) "Evaluation of variability in resilient modulus test result (ASTM D 4123)", NCAT Report No. 91-6.

- Buzea, C., Pacheco, I. & Robbie, K. (2007) "Nanomaterials and nanoparticles: Sources and toxicity", Biointerphases, Vol.2, pp.MR17-MR71.2007/12/01

۱- با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم و مدول برجهندگی، می توان گفت که افزودن نانوسیلیس باعث بهبود مقاومت مخلوط آسفالتی در دماهای میانی می شود. در آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم و مدول برجهندگی مشاهده می شود که به ترتیب افزودن نانوسیلیس به میزان ۶ درصد، باعث افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم به میزان ۲۹ درصد و افزایش مدول برجهندگی به میزان ۳۱ درصد، نسبت به نمونه شاهد داشته است. می توان نتیجه گرفت که افزودن نانوسیلیس به قیر به دلیل سطح مخصوص بالای نانوسیلیس، باعث مسلح شدن قیر و در نتیجه افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر ترکهای خستگی می شود.

۲- نتایج آزمایش تیرخستگی نشان داد که افزودن نانو سیلیس باعث افزایش عمر خستگی مخلوط آسفالتی به میزان قابل توجهی می شود. نتایج نشان می دهند که با افزودن نانوسیلیس به مقدار ۶ درصد، عمرخستگی مخلوط آسفالتی و انرژی تلف شده تجمعی به میزان ۵۰ درصد افزایش می یابد، در نتیجه می توان گفت افزودن نانوسیلیس باعث افزایش عمرخستگی در دماهای میانی می شود که این افزایش عمرخستگی، می تواند به دلیل بسیار بالا بودن سطح ویژه نانوسیلیس باشد که با قرارگرفتن در شبکه قیر باعث مسلح شدن شبکه قیر و افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر بارگذاریهای متناوب می شود.

۸. پی نوشت ها

1- Huge surface area

2- Nanoclay

3- Nano lime

4- Carbon nanofiber

5- Carbon nanotube

6- Failure temperature

7- Complex modulus

- Materials and New Innovations in Pavement Engineering, Vol.223, pp.229-237
- Moreno, F. and Rubio, M. C. (2013) "Effect of aggregate nature on the fatigue-cracking behavior of asphalt mixes", *Materials & Design*, Vol.47, pp.61-67
- Ramsden, J. (2009) "Essentials of nanotechnology", Free Books. net, Ramoden and ventus publishing.
- Santagata, E., Baglieri, O., Tsantilis, L. and Dalmazzo, D. (2012) "Rheological characterization of bituminous binders modified with carbon nanotubes", *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol.53, pp.546-555
- Ven, M. F. C. van de., Molenaar, A. A. A. and Besamusca, J. (2009) "Nanoclay for binder modification of asphalt mixtures", *Advanced Testing and Characterization of Bitumen Materials*, 2009, pp.133-142
- Yao, H., You, Z., Li, L., Lee, C., Wingard, D., Yap, Y., Shi, X. and Goh, S. (2012) "Properties and chemical bonding of asphalt and asphalt mixtures modified with nanosilica". *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.0, pp.null
- Ziari, H., Behbahani, H., Izadi, A. and Nasr, D. (2013) "Long term performance of warm mix asphalt versus hot mix asphalt", *Journal of Central South University*, Vol.20, pp.256-266
- Fang, C., Yu, R., Liu, S. and Li, Y. (2013) "Nanomaterials applied in asphalt modification: A review", *Journal of Materials Science & Technology*, Vol.29, pp.589-594
- Huang, B., Li, G. and Mohammad, L. N. (2003) "Analytical modeling and experimental study of tensile strength of asphalt concrete composite at low temperatures", *Composites Part B: Engineering*, Vol.34, pp.705-714
- Huang, Y. H. (2004) "Pavement analysis and design", Singapore: Pearson Education Limited
- Jahromi, S. G. and Khodaii, A. (2009) "Effects of nanoclay on rheological properties of bitumen binder", *Construction and Building Materials*, Vol.23, pp.2894-2904
- Khattak, Mohannad Jamal, Khattab, Ahmad and Rizvi, Hashem R. (2013) "Characterization of carbon nano-fiber modified hot mix asphalt mixtures", *Construction and Building Materials*, Vol.40, pp.738-745.
- Khattak, Mohammad Jamal, Khattab, Ahmad, Rizvi, Hashem.R. and Zhang, P. (2012) "The impact of carbon nano-fiber modification on asphalt binder rheology". *Construction and Building Materials*, Vol.30, pp.257-264
- Larisa, S., Alexey, S., Natalia, S. and Natoliy, L. (2011) "Effects of nanocomposites on the high temperature rheological properties of a PG58 asphalt-binder", *Road*