

یادداشت پژوهشی

تأثیر استفاده از قیرهای اصلاح شده با مواد نانورس در عملکرد خستگی مخلوطهای آسفالتی

احمد خدادادی (مسئول مکاتبات)، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

جواد سوداگری، استادیار، دانشکده فنی، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

امیرحسین اصلانی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

حمید صالحی، کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

E-mail: akdarban@modares.ac.ir

دریافت: ۹۱/۰۲/۱۵ پذیرش: ۹۱/۰۸/۲۰

چکیده

نگهداری از شبکه راهها به دلیل هزینه های زیاد احداث جاده ها، همواره یکی از مهم ترین مسائل مهندسی راه بوده است. استفاده از مواد نانو در صنعت و مفید بودن آنها نویسنندگان را براین داشته که در راستای افزایش عمر روسازیهای آسفالتی، مفید بودن این مواد را مورد بررسی قرار دهند. با توجه به استفاده نانورس در پلیمرها و بهبود خواصی از پلیمرها مانند افزایش سختی و مقاومت کششی، پایداری حرارتی، افزایش درجه اشتعال و محافظت در برابر رطوبت و بخار آب، و همچنین در نظر گرفتن قیر به عنوان یک ماده ترموپلاستیک، در این تحقیق، قیر با افزودن ۲٪ نانورس اصلاح شد و در جهت افزایش عمر خستگی روسازیهای آسفالتی مورد آزمایش قرار گرفت. آزمایش خستگی کشش غیر مستقیم بر روی نمونه های استوانه ای ساخته شده از قیرهای استاندارد و اصلاح شده در سطوح تنش ۴۰۰-۳۰۰-۲۰۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال، نشان می دهد که افزودن ۲٪ نانورس به قیر باعث افزایش عمر خستگی بیش از دو برابر باتوجه به سطح تنش آسفالت می شود.

واژه های کلیدی: قیرهای اصلاح شده، نانورس، آسفالت، پلیمرها

۱. مقدمه

و محافظت در برابر رطوبت، حلالها، گازها و بخار آب مؤثر بوده است. یکی از دلایل اصلی افزودن مواد پرکننده به پلیمرها، افزایش کارایی مکانیکی آنهاست. به عنوان مثال پرکننده‌های با مدول بالا، مدول و استحکام پلیمرها را افزایش می‌دهند. در کامپوزیت‌های معمولی متأسفانه افزایش در مدول و استحکام به قیمت کاهش نرمی و در برخی موارد کاهش مقاومت ضربه تمام می‌شود و این به دلیل تمرکز تنش بر روی پرکننده هاست [GFR, 2003- Haiming and Thomas, 1996].

با این حال نانو پرکننده‌هایی که خوب توزیع شوند، می‌توانند مدول و استحکام کششی را افزایش داده و در عین حال نرمی را ثابت نگه داشته و یا حتی افزایش دهند. علت این موضوع این است که نانو ذرات به دلیل داشتن سایز کوچک، تمرکز تنش زیادی ایجاد نمی‌کنند. افزون بر این، ناحیه بین مرزی بزرگ در نانوکامپوزیتها خواص ماتریس را به شکل بی نظیری تغییر می‌دهد.

از آنجا که ترکهای ناشی از خستگی یکی از پارامترهای تعیین کننده کیفیت و عمر آسفالت هستند، بنابراین در این تحقیق بررسی تأثیر کاربرد نانورس بر افزایش عمر روسازی آسفالتی از طریق آزمایش خستگی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در مورد استفاده از نانورس در بهسازی قیر و بخصوص افزایش عمر روسازی آسفالت در دنیا، تحقیقی مشاهده نگردید و تنها در میان مقالات موجود میتوان به تحقیق آقای شادلر وهمکاران اشاره کرد که استفاده از نانو کربن و گوگرد به عنوان افزودنی در بهسازی قیر را ذکر کرده اند. [Schadler, Braun and Ajayan, 2003] در ایران نیز این

تحقیق شاید اولین پژوهش در این زمینه باشد. روشهای مختلفی برای تعیین عمر خستگی روسازیهای آسفالتی وجود دارند که می‌توان به روشهای کشش غیر مستقیم، کشش مستقیم، تیرچه خمشی و ... اشاره کرد که از میان این روشها، آزمایش کشش غیر مستقیم برای پیش بینی عمر خستگی نمونه‌های آسفالتی این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت [Khodadadi, et al., 2005]. هدف از این تحقیق بررسی فنی امکان افزودنی نانورس در روسازیهای آسفالتی و تأثیر کاربرد آنها در افزایش عمر خستگی روسازی بر اساس مطالعات آزمایشگاهی است.

عمده خرابی در روسازیهای انعطاف پذیر در اثر دو عامل ترک خوردگی یا شیار افتادگی روی می‌دهد. عامل شیار افتادگی عموماً در اثر عبور بارهای بیش از توان روسازی است، اما ترکها معمولاً در اثر عبور زیاد وسایل نقلیه با بارهای عادی و انقباض و انبساط روسازی در اثر تغییرات دمایی حاصل می‌شوند. از میان این دو سازوکار، ترکهای مربوط به خستگی به تعداد زیاد در رویه های آسفالتی دیده می‌شوند. خستگی عبارت است از پدیده شکست بر اثر تکرار بار، تغییر و تناوب دینامیکی بار که معمولاً کمتر از مقاومت نهایی استاتیکی آسفالت باشد. مقاومت در برابر خستگی یک مخلوط آسفالتی، توانمندی مخلوط در مقابل بارهای خمشی تکراری بدون شکست است. ترکهای ناشی از خستگی در روسازیها عموماً در اثر تغییرات شرایط محیطی خصوصاً تغییرات دمایی و تکرار بار وسایل نقلیه به وجود می‌آیند [Chang, 1999, Ahikari and You, 2010]. این ترکها را می‌توان به سه گروه دسته بندی کرد؛ ترکهای طولی، ترکهای عرضی و ترکهای پوست سوسماری. گسترش این ترکها در سه مرحله انجام می‌شود: مرحله اول مرحله آغاز ترک است و ترکهای ریز در اثر تمرکز تنش در رویه ایجاد می‌شوند. در مرحله دوم، ترکهای ریزی که در مرحله اول ایجاد شده اند شروع به گسترش می‌کنند و ترکهای بزرگ تر تشکیل می‌شوند و در مرحله سوم شکست روسازی اتفاق می‌افتد [Pourghaffar Maghferati, 2002, Hosseini, 2004].

با گسترده شدن علم نانو تکنولوژی و شناخت ویژگیهای مواد در ابعاد نانو، نیاز به بررسی و استفاده از این علم در صنعت راهسازی و بویژه روسازیهای آسفالتی احساس می‌شود. در طول دو دهه اخیر، مواد در ابعاد نانو (زیر ۱۰۰ نانو متر) در مصارف بسیاری بکار گرفته شده اند. یکی از این مصارف، استفاده نانو رسها در صنعت پلیمر و ساخت نانو کامپوزیتها است [Schadler, Braun and Ajayan, 2003]. با توجه به تحقیقات انجام شده در صد کمی از نانو رس، در بهبود خواصی از پلیمرها نظیر افزایش سختی و مقاومت کششی، پایداری حرارتی، افزایش درجه اشتعال

تأثیر استفاده از قیرهای اصلاح شده با مواد نانورس در عملکرد خستگی مخلوطهای آسفالتی

نشان داده شده است.

۲. مواد و روش آزمایش

به منظور بررسی اثر نانورس بر افزایش عمر خستگی روسازی آسفالتی، نمونه های آسفالتی از دو نوع قیر استاندارد و اصلاح شده (با ۲٪ نانورس) ۶۰-۷۰ پالایشگاه تهران، ساخته شد. دانه بندی مصالح سنگی، نوع نانورس مصرفی و نحوه ساخت نانوکامپوزیت قیری در ادامه آمده است.

۲-۲ نانورس مصرفی

در پژوهش حاضر، از نانو ذرات خاک رس مونتموریلونیت، اصلاح شده با دی متیل دی هیدروژنتید تالو آمونیوم کلراید، به منظور دستیابی به بهترین پراکنش و سازگاری، ساخت شرکت Southern Clay با نام تجاری ۱۵A Clohsite که از این پس C۱۵A نامیده می شود استفاده گردید. این صفحات سیلیکاتی ۱ نانومتر ضخامت و ۷۰-۱۵۰ نانومتر عرض دارند. در جدول ۱ برخی از خواص این ماده آمده است.

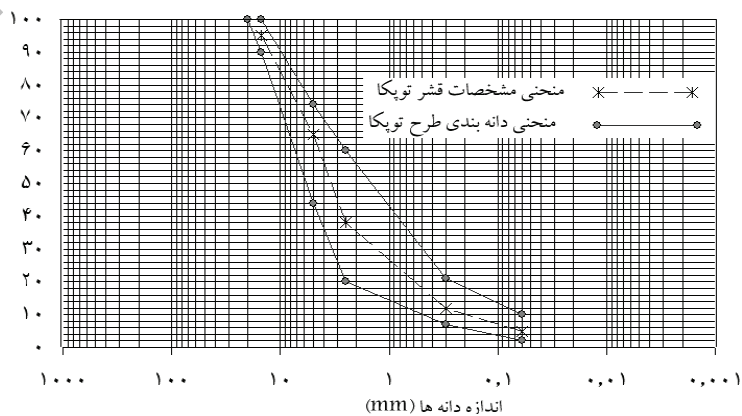
۲-۳ نحوه ساخت نانوکامپوزیت قیر

۱-۲ دانه بندی سنگدانه ها

منحنی دانه بندی حاصل از اختلاط درصدهای وزنی فوق، در مقایسه با دانه بندی بکارگرفته شده در تهیه نمونه ها در شکل ۱

جدول ۱. مشخصات عمومی C۱۵A

رنگ	سفید و شیری رنگ
فاصله بین لایه ای (A)	۳۱/۵
چگالی ویژه ($\frac{g}{cm^3}$)	۱/۶۶
غلظت اصلاح کننده ($\frac{meq}{100gclay}$)	۱۲۵
وزن باقی مانده پس از آزمون سوختن	۵۷٪
دمای ذوب اصلاح کننده (°C)	۴۶
دمای تخریب اصلاح کننده (°C)	۳۰۰



شکل ۱. منحنی دانه بندی نمونه های آزمایشگاهی

سیکل بارگذاری گزارش می شود. ساده ترین فرمول خستگی تحت بارگذاری ساده به صورت رابطه ۳ ارائه شده است [Fakhri and Karimi, 2004].

$$N = k \left(\frac{1}{\sigma_t} \right)^n \quad (3)$$

که در این رابطه:

N عمر خستگی نمونه آسفالتی، σ_t تنش کششی وارده و k و n ضرائب تعیین شده آزمایشگاهی است.

۳-۱ مراحل شکست خستگی

مراحل مختلف سازوکار خستگی نمونه آسفالتی به این ترتیب است: در مرحله اول (I)، ترکهای ریز در پوشش نازک قیری بین سنگدانه ها پدید می آید. این تغییرات سریع در مرحله انتقالی پدیده ترمومکانیکی که ناشی از افت ویسکوالاستیک در مخلوطهای آسفالتی است رخ می دهد. در مرحله دوم (II) این تغییرات حرارتی پایان یافته و ترکهای اولیه ایجاد می شوند که منجر به یک الگوی ترک بزرگ به صورت تدریجی می شود که در نهایت در مرحله سوم (III) یک ترک بزرگ تا شکست نمونه آسفالتی با یک رشد سریع گسترش می یابد. [Baghaee Moghadam et al. 2011]

۴. انجام آزمایش

در این آزمایش که استاندارد DD ABF (BS draft) مد نظر است، هدف اندازه گیری پاسخ خستگی مخلوط آسفالتی نمونه های استوانه ای به شکل کشش غیرمستقیم است. در این آزمایش روش بارگذاری از طریق کنترل تنش انجام شد و شکل بار از نوع نیمه سینوسی (haver sine) با طول پالس ۱۵۰۰ میلی ثانیه و زمان بارگذاری ۱۲۵ میلی ثانیه که در مجموع با فرکانس ۰/۶۶ HZ اجرا شد. لازم به ذکر است که آزمایش بر روی سه نمونه از نمونه های آسفالتی ساخته شده از قیرهای استاندارد و اصلاح شده در سطوح تنش ۲۰۰-۵۰۰ کیلوپاسکال انجام شد. دمای محفظه آزمایش ۲۵ درجه سانتیگراد و معیار نهایی شکست نمونه آسفالتی رسیدن به جابجایی ۹ میلیمتر تنظیم گردید.

در ابتدا مقدار ۲۰۰۰ گرم قیر ۶۰-۷۰ پالایشگاه تهران با گرم کردن و رسیدن به دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد به حالت مذاب و روان درآمد و سپس در زیر دستگاه هموژنایزر با سرعت ۵۱۰۰ دور بر دقیقه قرار داده شد. سپس مقدار ۴۱ گرم نانورس بتدریج به قیر اضافه گردید و پس از طی زمان ۱۵ دقیقه عمل اختلاط توسط دستگاه هموژنایزر و سرد شدن کامپوزیت حاصل، قیر اصلاح شده مورد نیاز برای ساخت نمونه های آسفالتی تهیه شد.

۳. آزمایش کشش غیر مستقیم

آزمایش کشش غیر مستقیم یک نوع آزمایش خستگی است که بارگذاری به صورت تکراری بر یک نمونه استوانه ای وارد می شود، به طوری که بار فشاری بر وجه استوانه ای و به صورت موازی و قائم اعمال می شود. بارگذاری سبب تنش کششی یکنواختی در نمونه شده که عمود بر جهت بارگذاری و در طول نمونه استوانه خواهد بود. آزمایش از نظر اجرائی ساده و جهت بیان ویژگی آسفالت روش موثری است. پژوهشگران مختلفی این شکل آزمایش را برای ارزیابی آسفالت و آنالیز روسازی بکار برده اند. نمونه های آزمایش معمولاً دارای قطری برابر ۴ اینچ و ارتفاع ۲/۵ اینچ بوده و عرض نوار بارگذاری بر کناره های نمونه استوانه ای برابر ۰/۵ اینچ است. تنشهای کششی و فشاری ایجاد شده در مرکز نمونه بر اثر بار فشاری وارده از روابط ۱ و ۲ به دست می آید [EN ۱۲۶۹۷-۲۴].

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi ah} \left[\sin 2\alpha - \frac{a}{2R} \right] \quad (1)$$

$$\sigma_c = \frac{-6P}{\pi ah} \left[\sin 2\alpha - \frac{a}{2R} \right] \quad (2)$$

که در این رابطه:

P بار وارده بر نمونه، a عرض نوار بارگذاری، h ارتفاع نمونه، R شعاع نمونه، 2α زاویه ایجاد شده به وسیله نوار بارگذاری، σ_t تنش کششی غیر مستقیم (افقی) در مرکز نمونه و σ_c تنش فشاری (قائم) در مرکز نمونه است.

نمودار خستگی به صورت لگاریتم تنش یا کرنش (بسته به انجام آزمایش در حالت تنش یا کرنش ثابت) در مقابل لگاریتم تعداد

تأثیر استفاده از قیرهای اصلاح شده با مواد نانورس در عملکرد خستگی مخلوطهای آسفالتی

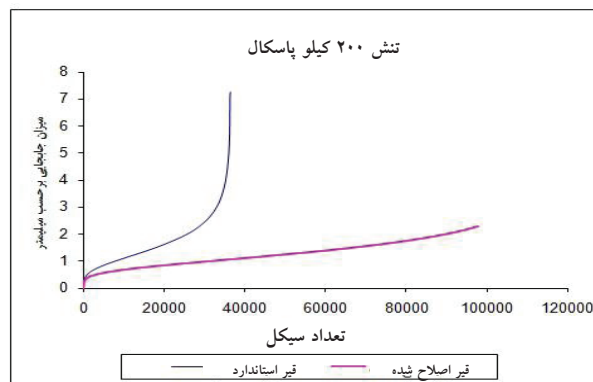
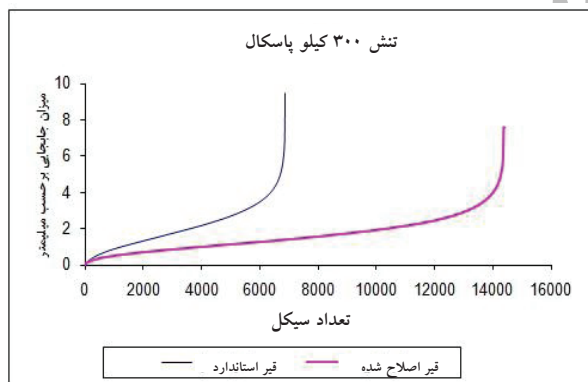
لگاریتم تنش در مقابل لگاریتم تعداد سیکل بارگذاری است، مقادیر n, k مربوط به رابطه ۳ مطابق جدول ۵ به دست می آید. همان طور که در جدول ۵ مشاهده می شود، مقادیر n, k مربوط به رابطه ۳ برای نمونه های ساخته شده از قیر اصلاح شده بیش از نمونه های ساخته شده از قیر استاندارد است که این خود دلیلی بر افزایش مقاومت خستگی آسفالت پس از افزودن ۲٪ نانورس به آن است.

۵. نتیجه گیری

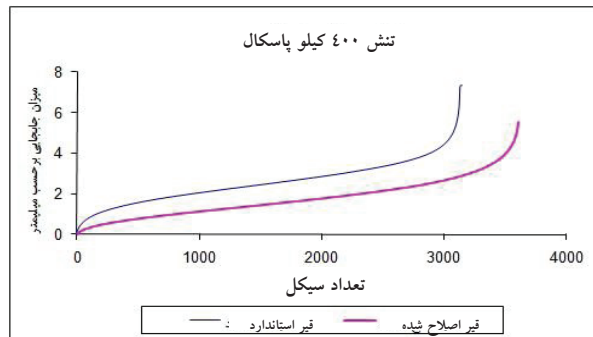
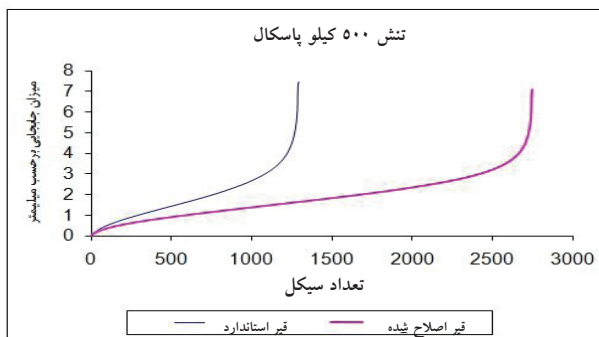
این تحقیقات نشان می دهند که استفاده نانو مواد، نظیر نانورس می تواند در افزایش عمر خستگی روسازیهای آسفالتی تأثیر فوق العاده ای داشته باشد. اگر چه در این تحقیق استفاده از افزودنی نانو رس در خصوص تعمیر و نگهداری راه مورد بررسی قرار نگرفت، ولی با توجه به اینکه نانو رس تنها در قیر بکاربرده شد، بنابراین این پتانسیل برای کاربرد نانو مواد وجود دارد. در این

نمودارهای تعداد بارگذاری- تغییر شکل قائم برای نمونه های آسفالتی ساخته شده از قیر استاندارد و قیر اصلاح شده در شکل های ۳ الی ۱۰ آورده شده است.

با توجه به شکل های ۳ الی ۶ مشاهده می شود که عمر خستگی (تعداد سیکل طی شده تا مرحله شکست) برای نمونه های آسفالتی ساخته شده از قیر اصلاح شده توسط نانورس در تنشهای ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ کیلو پاسکال، به ترتیب ۲/۶، ۲، ۱/۱۴ و ۲/۱ برابر نمونه های ساخته شده از قیر استاندارد است (جدول ۳). همچنین تعداد سیکل طی شده برای رسیدن به مراحل دوم و سوم شکست خستگی برای نمونه های ساخته شده توسط نانورس به مراتب بیشتر از نمونه های ساخته شده از قیر استاندارد است (جدول ۴). نتایج، نشان دهنده افزایش تعداد سیکل بار در تمامی سطوح تنش است. همچنین نتایج نشانگر آن هستند که شدت این افزایش تعداد تکرار بار در مراحل دوم و سوم از نظم خاصی پیروی نمی کند. با توجه به نمودار خستگی ارائه شده در شکل ۱۱ که به صورت



شکل ۲. نمودار تعداد بارگذاری- تغییر شکل قائم برای نمونه آسفالتی ساخته شده از قیر استاندارد و اصلاح شده (تنش ۲۰۰ kPa و ۳۰۰ kPa)



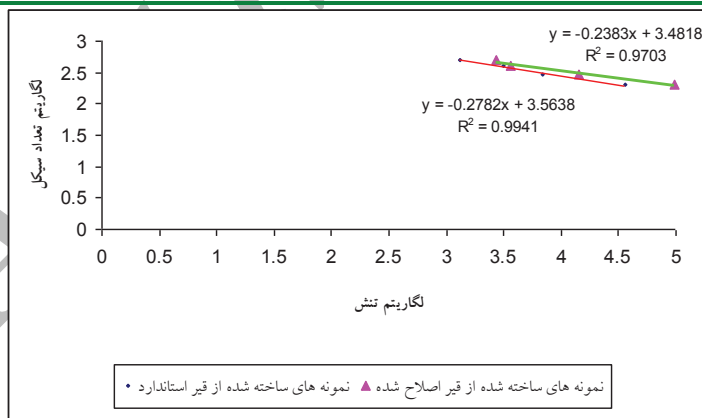
شکل ۳. نمودار تعداد بارگذاری- تغییر شکل قائم برای نمونه آسفالتی ساخته شده از قیر استاندارد و اصلاح شده (تنش ۴۰۰ kPa و ۵۰۰ kPa)

جدول ۲. نتایج آزمایش خستگی کشش غیر مستقیم

آسفالت ساخته شده از قیر اصلاح شده ۶۰-۷۰ (۲٪ نانورس)		آسفالت ساخته شده از قیر ۶۰-۷۰	
عمر خستگی (Cycles)	سطح تنش (kPa)	عمر خستگی (Cycles)	سطح تنش (kPa)
۹۷۹۲۰	۲۰۰	۳۶۴۸۰	۲۰۰
۱۴۴۲۴	۳۰۰	۶۸۸۸	۳۰۰
۳۶۰۶	۴۰۰	۳۱۴۴	۴۰۰
۲۷۴۸	۵۰۰	۱۲۹۶	۵۰۰

جدول ۳. تعداد سیکل‌های طی شده تا رسیدن به مراحل دوم و سوم شکست خستگی

نمونه‌های حاصل از قیر اصلاح شده				نمونه‌های حاصل از قیر استاندارد				سطح تنش (kPa)
شروع مرحله سوم		شروع مرحله دوم		شروع مرحله سوم		شروع مرحله دوم		
تعداد تکرار	میزان جابجایی بارگذاری (mm)	تعداد تکرار	میزان جابجایی بارگذاری (mm)	تعداد تکرار	میزان جابجایی بارگذاری (mm)	تعداد تکرار	میزان جابجایی بارگذاری (mm)	
۷۰۰۰۰	۱/۶	۱۰۰۰۰	۰/۷۵	۲۷۵۰۰	۲/۲	۷۵۰۰	۱	۲۰۰
۱۰۵۰۰	۲/۲	۴۰۰۰	۱	۵۵۲۰	۳/۲۵	۱۲۵۰	۱	۳۰۰
۲۸۰۰	۲/۴	۷۵۰	۱	۲۵۰۰	۳/۴	۵۰۰	۱/۶	۴۰۰
۲۲۰۰	۲/۶	۶۰۰	۱	۱۰۰۰	۲/۸	۳۰۰	۱	۵۰۰



شکل ۴. نمودار لگاریتمی تنش در مقابل تعداد سیکل بارگذاری

جدول ۴. مقادیر n و k مربوط به رابطه ۳

قیر اصلاح شده ۶۰-۷۰ (۲٪ نانورس)		قیر ۶۰-۷۰	
مقدار n	مقدار k	مقدار n	مقدار k
۴/۰۷۱۳	$1/972 \times 10^{14}$	۳/۵۷۳	$5/701 \times 10^{12}$

تأثیر استفاده از قیرهای اصلاح شده با مواد نانورس در عملکرد خستگی مخلوطهای آسفالتی

روسازیهای آسفالتی“ /؛ به راهنمایی: فریدون مقدس نژاد. / پایان نامه (کارشناسی ارشد)-دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده عمران و محیط زیست..

- خدادادی، احمد، فخری، منصور و امیری حسینی، حمید رضا (۱۳۷۵) “اثر ژئوسنتتیکها بر عمرروسازی های آسفالتی”، پژوهشنامه حمل و نقل، سال دوم، شماره ۲، ص. ۱۳۷-۱۴۴.

- فخری، منصور و کریمی، س. (۱۳۸۳) “بررسی مقاومت مخلوطهای آسفالتی در برابر ترکهای ناشی از خستگی و ارائه راهکارهای لازم”، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

- Ahikari. S. and You, Z. (2010) “Fatigue evaluation of asphalt pavement using beam fatigue apparatus” Technology Interface Journal, Vol.10, No.7

- Baghaee Moghadam, T., Karim, M. R. and Abdeaziz, M. (2011) “A review on fatigue and rutting performance of asphalt mixes”, Scientific Research and Essay, Vol.6 (4), pp. 670-684.

- Chang, T.T., Ho, N. H., Chang, H.Y. and Yeh, H.S. (1999) “Laboratory and case study for Geogrid reinforced flexible pavement overlay”, TRB A2K07 Committee78”, Annual Meeting.

- GFR (2003) “Overlay stress absorption and reinforcement”, Geotechnical Fabrics Report, pp. 8-11.

- Grim, R. E. (1968) “Clay mineralogy”, 2nd. ed., Mc Graw-Hill, London.

- Haiming, H. and Thomas, W. (1996) “Dynamic properties of fiber-modified overlay mixture”, Transportation Research Record, N 1545 pp. 98-104

- Schadler, L., Braun, P. V. and Ajayan, P. M.(2003)“Nanocomposite science technology”, London, Wiley.

تحقیق افزودن تنها ۲٪ نانورس به قیر در جهت افزایش خستگی قیر و همچنین افزایش عمر خستگی روسازیهای آسفالتی از طریق آزمایش کشش غیر مستقیم مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج تحقیق بیانگر آن است که آزمایش خستگی کشش غیر مستقیم بر روی نمونه های استوانه ای ساخته شده از قیرهای استاندارد و اصلاح شده در سطوح تنش ۴۰۰-۳۰۰-۲۰۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال، باعث افزایش دو تا سه برابر عمر خستگی آسفالت (با توجه به سطح تنش) می شود. استفاده از آزمایش کشش غیرمستقیم به دلیل استفاده از نمونه های سایز مارشال سهولت کار را افزایش می دهد که هم در آزمایشگاه و هم در صورت نمونه گیری در محل این موضوع تأثیرگذار خواهد بود. علاوه براین می توان نتیجه گرفت که افزودن ۲٪ نانورس به قیر باعث افزایش تعداد سیکل طی شده برای رسیدن به مراحل دوم و سوم شکست خستگی می شود. توجه به نتایج به دست آمده ارزیابی اثر نانورس با درصد های مختلف دیگری بر مقاومت شیارافتادگی و خستگی قیر و همچنین مقاومت خستگی آسفالت و مدول برجهنگدگی آن میتواند انجام گیرد. بحث اقتصادی استفاده از نانو مواد نیاز به بررسی است.

- توصیه می شود برای بررسی دقیق تر اثر نانورس بر مقاومت خستگی آسفالت، انجام آزمایش تیر خمشی با بارگذاری ۴ نقطه انجام شود.

- اثر نانوالیاف کربنی بر مقاومت خستگی مخلوط آسفالتی قابل بررسی است.

- با توجه به وجود مقادیر زیاد گوگرد در کشور، تولید نانوگوگرد و ارزیابی اثر آن بر مقاومت خستگی آسفالت قابل بررسی و اجرا است.

۶. مراجع

- پورغفار مغفرتی، هدی (۱۳۸۱) “انتخاب مصالح و نحوه پرکردن ترکها و درزهای روسازی”، به راهنمایی: امیر کاوسی؛ استاد مشاور: ابوالفضل حسینی. / پایان نامه (کارشناسی ارشد)-دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی.

- حسینی، محمد (۱۳۸۳) “اثر نیروهای افقی بر خستگی