

مقایسه آزمایشگاهی تأثیر استفاده از نانوسیلیس و ژئوگرید بر رفتار خستگی مخلوط آسفالتی گرم

غلامعلی شفافبخش*، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان
حسین بهرامی، کارشناس ارشد راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان
مهدی اکبری، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

Email: ghshafabakhsh@semnan.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۰۵ - پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۰۸

چکیده

تمرکز روی اقداماتی با هدف تقویت و بهبود لایه آسفالتی به منظور افزایش عمر روسازی، اهمیت بسزایی دارد. از جمله روش‌های افزایش عمر روسازی بتن آسفالتی در برابر خرابی‌های سازه‌ای که در این تحقیق به آنها پرداخته شده است شامل رویکرد اصلاح مخلوط آسفالتی (با استفاده از نانوسیلیس) و همچنین، رویکرد تسلیح آسفالت (با استفاده از ژئوگرید) می‌شود. در این پژوهش، بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌های صورت گرفته، به بررسی میزان افزایش عمر خستگی این دو رویکرد و مقایسه آنها با عمر خستگی نمونه‌های شاهد پرداخته شده است. به منظور تعیین عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی، از آزمایش خستگی تیرچه خمشی در شرایط کرنش ثابت (در سه سطح ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ میکروکرنش) بهره گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهند که عمر خستگی برای هر دو نمونه مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با نانوسیلیس و تسلیح شده با ژئوگرید افزایش می‌یابد. برای مثال، در سطح کرنش ۵۰۰ میکروکرنش، ۵ درصد نانوسیلیس حدود ۱۹۳/۹ درصد (معادل ۲/۹۴ برابر) و یک لایه ژئوگرید حدود ۲۱۲/۴ درصد (معادل ۳/۱۲ برابر) عمر خستگی را نسبت به نمونه‌های شاهد افزایش می‌دهند. همچنین، مخلوط‌های آسفالتی تسلیح شده با ژئوگرید در سطح کرنش‌های مذکور، به ترتیب حدود ۶/۵ درصد (معادل ۱/۰۶ برابر)، ۶۱ درصد (معادل ۱/۶۱ برابر) و ۱/۸ درصد (معادل ۱/۰۲ برابر) افزایش عمر خستگی مخلوط نسبت به نمونه‌های اصلاح شده با نانوسیلیس گردیدند.

واژه‌های کلیدی: ژئوگرید، نانوسیلیس، رفتار خستگی، مخلوط آسفالتی گرم

۱. مقدمه

نانومواد را به دلیل اندازه بسیار کوچک و مساحت سطحی بزرگی که دارند، می‌توان با مقدار نسبتاً کمی نسبت به ماده اولیه مورد استفاده قرار داد. اما با این حال، به همان میزان اثربخشی دست یافت. نانومواد مختلفی جهت اصلاح آسفالت وجود دارد؛ مانند نانوسیلیس، نانوتیتانیوم و نانوالومینیوم (یائو و همکاران، ۲۰۱۳؛ شفابخش و همکاران، ۲۰۱۴؛ شفابخش و همکاران، ۲۰۱۵).

ژئوگریدها محصولاتی پلیمری با کارکرد تسلیح‌کنندگی هستند که در روسازی‌های آسفالتی استفاده می‌شوند (شفابخش و همکاران، ۲۰۰۸). این مصالح در جلوگیری از ایجاد ترک‌های زودرس مؤثر هستند. استفاده از ژئوگرید به عنوان تسلیح‌کننده روسازی آسفالتی، راه‌حل مؤثری برای افزایش عمر خدمت‌دهی آنها است. عمل تسلیح از دو روش مختلف صورت می‌پذیرد، که شامل تنظیم مجدد سطح تنش- کرنش ایجادشده در داخل روسازی (از طریق جذب تنش‌ها و کرنش‌های کششی زیاد) و همچنین، جذب و کاهش انرژی متمرکزشده در طول ناپیوستگی‌های روسازی می‌شود (کوریا و بوئو، ۲۰۱۱).

کاربرد ژئوستتیک‌ها (خصوصاً ژئوگرید و ژئوتکتایل) به دلیل قدمت معرفی و مصرفشان، دارای سابقه تحقیقاتی نسبتاً طولانی‌ای است و پژوهش‌های خوبی در زمینه کارکردهای آنها در زمینه‌های تسلیح، جداسازی و فیلتراسیون به سرانجام رسیده است. اما همان‌طور که پیشتر نیز بیان شد، اصلاح مخلوط آسفالتی با استفاده از انواع افزودنی‌ها به عنوان راهکاری دیگر همواره مطرح بوده است، چه با استفاده از افزودنی‌های معدنی، طبیعی یا پلیمری در گذشته و یا مواد نانو در حال حاضر. از طرفی، بررسی انواع خرابی‌های مؤثر در اضمحلال سریع روسازی‌های آسفالتی نشان می‌دهد که پدیده خستگی و بروز ترک‌های پایین به بالا از جمله مخرب‌ترین ضعف‌های رویه آسفالتی به شمار می‌آید.

پدیدار شدن انواع خرابی‌ها در روسازی‌ها موجب کاهش ایمنی ترافیکی و افزایش وقوع تصادفات جاده‌ای می‌گردد (اکبری و همکاران، ۲۰۲۰- الف). از آنجا که پدیده خستگی در مخلوط‌های آسفالتی از عوامل اصلی بروز خرابی‌های شدید و زوال زودرس روسازی آسفالتی می‌باشد، لازم است تا با استفاده از آزمایش‌های مربوطه، رفتار و عمر خستگی مخلوط آسفالتی ارزیابی گردد تا با پیشگیری یا کاهش این گونه خرابی‌ها، علاوه بر حفظ نشانه خدمت‌دهی روسازی، از افزایش تصادفات نیز جلوگیری کرد (اکبری و همکاران، ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰- ب). از جمله راه‌های افزایش توان آسفالت برای مقاومت در برابر خرابی‌ها، تهیه مصالح با کیفیت، اصلاح مخلوط آسفالتی و یا تسلیح آن می‌باشد.

عوامل گوناگونی همچون مقدار بار، سرعت، اثر چرخ، زمان (نرخ بارگذاری)، تناوب استراحت، دما، وضعیت تنش، مد بارگذاری، پیرشدگی و رطوبت می‌توانند بر رفتار آسفالت در برابر تغییرشکل و کارایی تأثیرگذار باشند. یکی از مهم‌ترین این عوامل، نقش سرعت بر کرنش کششی انتهای لایه آسفالتی می‌باشد (شفابخش و همکاران، ۲۰۱۹).

در گذشته، برای اصلاح قیر از پلیمرهایی مانند استایرن- بوتادین- استایرن^۱، استایرن- بوتادین- خرده لاستیک^۲، اتیلن گلاسییدیل اکریلیت^۳ و یا خرده لاستیک استفاده می‌شد. اما امروزه، اصلاح قیر در سطح مولکولی و از طریق افزودن نانومواد صورت می‌پذیرد و از این‌رو، انجام تحلیل‌های عمیق روی رفتار شیمیایی و حرارتی قیرهای اصلاح‌شده با مواد نانو مورد توجه خاصی قرار گرفته است. فناوری نانومواد نیز از جدیدترین این مواد افزودنی می‌باشد که با توجه به قابلیت‌های فراوان به‌عنوان یک ماده افزودنی مطلوب در اصلاح رفتار مخلوط‌ها مورد استفاده قرار گرفته است (میتال و شوکلا، ۲۰۱۹).

^۳= Ethylene Glycidyl Acrylate (EGA)

^۱- Styrene-Butadiene-Styrene (SBS)

^۲= Styrene-Butadiene-Rubber (SBR)

نتایج پژوهشی در زمینه اصلاح قیر با مواد نانو نشان می‌دهد که نانوسیلیس تأثیر مثبتی بر بازگشت کرنش داشته و حداکثر بازیابی برای قیر اصلاح‌شده با ۲ درصد نانوسیلیس اتفاق می‌افتد (یائو و همکاران، ۲۰۱۳). عمر خستگی قیر اصلاح‌شده با نانوسیلیس نسبت به نانوتیتانیوم و نانوکلسیم‌کربنات افزایش بیشتری داشته و افزودن ۴ درصد نانوسیلیس به قیر منجر به افزایش عمر خستگی می‌شود (نظری و همکاران، ۲۰۱۸). طبق بررسی‌های شفابخش و همکاران (۲۰۱۹)، مقدار بهینه ۷ درصد وزنی نانوسیلیس باعث افزایش عمر خستگی می‌شود.

در بخش نانوسیلیس، ژو و همکاران در سال ۲۰۰۸، اثر نانوسیلیس بر مخلوط آسفالت اصلاح‌شده را بررسی کردند. در این تحقیق، ۵ درصد نانوسیلیس به‌عنوان میزان مطلوب انتخاب شد. مشاهده شد که نانوسیلیس مقاومت در برابر رطوبت مخلوط را به‌طور چشمگیری افزایش داد؛ اما اثر منفی بر ترک‌خوردگی در دمای کم مخلوط داشت. مقدار ۵/۵۹ درصد اصلاح برای نمونه حاوی نانوسیلیس در مقایسه با قیر پایه به دست آمد.

فرامرزی و همکاران (۲۰۱۵) خصوصیات خستگی مخلوط آسفالت اصلاح‌شده با نانوسیلیس را بعد از اعمال شرایط پیرشدگی کوتاه‌مدت بررسی کردند. در این پژوهش، با مقادیر مختلف نانوسیلیس از ۲ تا ۶ درصد وزنی، خصوصیات خستگی با استفاده از دستگاه استحکام کششی غیرمستقیم بررسی شد. بر طبق این تحقیقات، مشخص شد که میزان ۴ درصد وزنی نانوسیلیس می‌تواند عمر خستگی مخلوط آسفالت را تا ۳۷ درصد افزایش دهد. بنابراین، نمونه‌ای که با ۴ درصد وزنی نانوسیلیس تهیه شده، مقاومت خستگی برتری را نشان می‌دهد.

نظری و همکاران (۲۰۱۸) بیان کردند که عمر خستگی قیر اصلاح‌شده با نانوسیلیس نسبت به نانو تیتانیوم اکسید و نانوکلسیم‌کربنات افزایش بیشتری داشته و افزودن ۴ درصد نانوسیلیس به قیر منجر به افزایش عمر خستگی می‌شود.

هرچند تحقیقات مختلفی در زمینه پدیده خستگی روسازی آسفالتی صورت گرفته است اما در یک مطالعه به طور همزمان، مقایسه‌ای بین میزان اثرگذاری رویکردهای تسلیح با ژئوگرید و اصلاح با نانو مواد در افزایش عمر خستگی و سختی خمشی مخلوط آسفالتی، صورت نگرفته است تا براساس آن، اثربخشی هر یک از آنها بر رفتار خستگی مخلوط آسفالتی گرم ارزیابی گردد. از این‌رو، تحقیق حاضر به دنبال آن است که از طریق انجام یکی از معتبرترین و معروف‌ترین آزمایش‌های خستگی مخلوط آسفالتی و همچنین تحلیل نتایج آنها از نظر میزان عمر خستگی و سختی خمشی، تأثیر دو رویکرد بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی (شامل اصلاح با نانوسیلیس و تسلیح با ژئوگرید) را به صورت مجزا مورد ارزیابی قرار دهد.

۲. پیشینه تحقیق

۲-۱. اصلاح مخلوط آسفالتی با استفاده از

نانوسیلیس

فواید نانوسیلیس شامل کاهش هزینه تولید، مساحت سطحی بزرگ، جذب قوی، توانایی پراکنش بالا، خلوص شیمیایی زیاد و ثبات، بسیار عالی است. با داشتن این خواص سودمند، نانوسیلیس پتانسیل خوبی برای استفاده به عنوان اصلاح‌کننده برای تقویت و بهبود عملکرد آسفالت را دارد (یائو و همکاران، ۲۰۱۳).

استفاده از نانوسیلیس باعث بهبود درجه عملکردی قیر آسفالتی در دماهای بحرانی بالا و میانی شده است (بیلدیریم، ۲۰۰۷). نتایج آزمایش روی قیر نشان می‌دهد که نانوسیلیس در دمای بالا مقدار ویسکوزیته را کاهش داده و از این نظر، از دیگر نانوهای متمایز می‌شود. در مجموع، نانوسیلیس باعث بهبود خواص شیارشدگی و ترک‌های ناشی از خستگی قیر می‌گردد (سان و همکاران، ۲۰۱۳).

۲-۲. تسلیح مخلوط آسفالتی با استفاده از

ژئوگرید

مطالعات انجام شده روی ژئوگریدها و تجربیات اجرایی آن، حکایت از عملکرد بسیار خوب آن در شرایط آب و هوایی و جغرافیایی متفاوت دارد؛ از جاده‌های کویری تا محورهای نزدیک به مناطق بسیار سردسیر قطبی که دستخوش تغییرات جوی بسیار قابل ملاحظه‌ای می‌شوند. در تحقیقات صورت گرفته در زمینه ژئوگریدها، شفابخش و معتمدی (۲۰۱۶) واکنش روسازی را تحت بارهای مختلف با سرعت‌های مختلف بررسی کرده و مکان قرارگیری ژئوگرید در عمق‌های مختلف را نیز ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که محل استقرار ژئوگرید به نسبت مدول الاستیسیته آسفالت به اساس و همچنین ضخامت اساس بستگی دارد.

کوریا و زورنبرگ (۲۰۱۸) به بررسی ایجاد و گسترش کرنش‌های کششی در امتداد ژئوگریدهای تسلیح‌کننده لایه‌های آسفالت پرداختند و نشان دادند که نصب ژئوگریدها منجر به ایجاد مکانیزم مهار جانبی می‌شود که روی رفتار مکانیکی روسازی‌های انعطاف‌پذیر تأثیر می‌گذارد. احمد و همکاران (۲۰۱۹) در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که استفاده از ژئوگریدها عمر بتن آسفالتی را حدوداً سه برابر افزایش می‌دهد.

۳. روش تحقیق

به منظور تعیین اثرات واقعی کاربرد نانوسیلیس و ژئوگرید در افزایش عمر خستگی روسازی آسفالتی، اقدام به ایجاد سه مقطع مختلف گردید که با استفاده از دستگاه

آزمایش خستگی تیر، بارهای خمشی تکراری به نمونه‌های آسفالتی وارد شده و تغییرات بار وارده و تغییرشکل ایجادشده در تیرچه‌ها ثبت گردیدند. ابعاد تیرچه‌های ساخته شده برای انجام آزمایش‌ها در هر سه حالت شامل طول ۳۸۰ میلی‌متر، عرض ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۶۳ میلی‌متر می‌باشد. این مقاطع عبارتند از نمونه شاهد بدون ماده افزودنی و تسلیح‌کننده، نمونه اصلاح‌شده با نانوسیلیس و نمونه‌های تسلیح‌شده با ژئوگرید.

برای اینکه نمونه‌های ساخته‌شده هر چه بیشتر به حالت طبیعی و اجرایی نزدیک‌تر باشند، نسبت به ساخت مقطع آسفالتی در محوطه کارخانه آسفالت اقدام گردید. برای اینکه مقطع اجراشده به لایه زیری چسبیده نشود از فویل‌های آلومینیومی و برای جلوگیری از جابه‌جایی و جمع‌شدگی ژئوگرید، از میخ‌های فولادی استفاده شد و عمل تراکم برای یکدست بودن مقطع با دقت بسیار زیادی صورت پذیرفت. در ساخت نمونه‌هایی که ژئوگرید در یک‌سوم میانی قرار می‌گرفت، لایه دوم به فاصله چند ساعت از لایه اول اجرا گردید.

سه روز پس از ساخت مقطع، برای جابه‌جایی مقطع ساخته‌شده اقدام به برش مقطع آسفالتی توسط دستگاه برش آسفالت در اندازه‌های کوچک‌تر شد تا بلند کردن جابه‌جایی مقطع آسفالتی در آزمایشگاه با سهولت انجام گیرد (شکل ۱). مقاطع آماده شده به آزمایشگاه انتقال داده شد و با استفاده از دستگاه مخصوص برش آسفالت و مطابق استاندارد (ASHTO T321) برش داده شده و نمونه‌هایی با ابعاد ۳۸۰×۶۳×۵۰ میلی‌متر به دست آمد (شکل ۲).



شکل ۱. دستگاه مورد استفاده برای برش نمونه‌ها



شکل ۲. دال‌ها و نمونه‌های برش‌خورده

۳-۱ مواد و مصالح

مخصوص قشر رویه (توپکا) بوده و مقادیر درصد عبوری هر الک در جدول ۱ قابل مشاهده است. همچنین، این مصالح از جنس سنگ‌های سیلیسی هستند که مشخصات فیزیکی آنها در جدول ۲ ارائه شده است.

مشخصات دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها مطابق با منحنی دانه‌بندی شماره ۴ نشریه ۲۳۴ انتخاب شده است که

مقایسه آزمایشگاهی تأثیر استفاده از نانوسیلیس و ژئوگرید بر رفتار خستگی مخلوط آسفالتی گرم

جدول ۱. دانه بندی مصالح سنگ دانه ای

اندازه الک	درصد رد شده	میانگین مشخصات
۱۹ میلی متر	۱۰۰	۱۰۰
۱۲/۵ میلی متر	۹۶	۹۰-۱۰۰
۹/۵ میلی متر	۸۵	-
شماره ۴	۶۶/۵	۴۴-۷۴
شماره ۸	۳۶/۸	۲۸-۵۸
شماره ۵۰	۱۰	۷-۲۳
شماره ۲۰۰	۴	۲-۱۰

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی مصالح سنگ دانه ای

مشخصه	واحد	اندازه
مصالح درشت دانه		
افت وزنی در برابر سایش به روش لس آنجلس	%	۱۸
افت وزنی در برابر سولفات سدیم	%	۱/۳
دانه های دراز (تطویل)	%	۵
دانه های پهن (تورق)	%	۱۷
شکستگی در دو وجه روی الک شماره ۴	%	۸۴
وزن مخصوص حقیقی	gr/cm ³	۲/۵۲۷
وزن مخصوص ظاهری	gr/cm ³	۲/۶۶۵
جذب آب	%	۲
مصالح ریزدانه		
افت وزنی در برابر سولفات سدیم	%	۷/۱
ارزش ماسه ای	%	۷۲
وزن مخصوص حقیقی	gr/cm ³	۲/۵۰۱
وزن مخصوص ظاهری	gr/cm ³	۲/۶۷۳
جذب آب	%	۲/۶
فیلر		
وزن مخصوص	gr/cm ³	۲/۶۸۰
نشانه خمیری (PI)	-	۸

قیر مورد استفاده در این پژوهش، قیر با درجه نفوذ ۸۵-۱۰۰ محصول پالایشگاه سپاهان قیر جی می باشد. جدول ۳، مشخصات قیر مصرفی را نشان می دهد.

جدول ۳. مشخصات قیر مصرفی

نوع قیر	درجه نفوذ (dmm)	نقطه نرمی (°C)	کشش پذیری (mm)
۱۰۰-۸۵	۹۲/۷	۴۵/۶	۱۰۰۰<

یا چسبیدن آنها به پره‌های دستگاه، به صورت مرحله‌ای به قیر افزوده شده است. دما و روش اختلاط بر اساس تحقیقات گذشته انتخاب شده است (حسینی نیا و حدادی، ۲۰۱۷؛ تن‌زاده و شهرضا گاماسایی، ۲۰۱۷).

نانوسیلیس مصرفی محصول شرکت US آمریکا است و مشخصات آن در جدول ۴ ارائه شده است. نانوسیلیس به میزان ۵ درصد وزنی قیر به مدت دو ساعت در دمای ۱۶۰ درجه سلسیوس و با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه با قیر مخلوط شده و برای جلوگیری از کلوخه شدن

جدول ۴. مشخصات نانوسیلیس مصرفی

SiO ₂	Ti	Ca	Na	Fe
>۹۹٪	<۱۲۰ppm	<۷۰ppm	<۵۰ppm	<۲۰ppm

دارند. مشخصات ژئوگرید مصرفی در این تحقیق، در جدول ۵ قابل مشاهده است.

ژئوگرید مصرفی از جنس پلی‌استر با چشمه‌های مربع شکل و با عرض حداکثر ۴۰ میلی‌متر می‌باشد. این مصالح، پوششی پلیمری داشته و با قیر داغ نیز سازگاری

جدول ۵. مشخصات ژئوگرید مصرفی

ویژگی	واحد	مقدار
اندازه منافذ	mm	۴۰×۴۰
مقاومت کششی طولی/عرضی	KN/m	۵۰/۵۰
کشیدگی در حداکثر نیرو عرضی/طولی	%	۱۱/۲۳
وزن در واحد سطح	g/m ²	۲۴۴

سه روز پس از ساخت مقاطع، نسبت به برش آنها توسط دستگاه برش آسفالت در اندازه‌های مورد نظر دستگاه تیر خمشی چهارنقطه‌ای اقدام شد تا جابه‌جایی تیرچه‌ها در آزمایشگاه با سهولت صورت پذیرد. تیرچه‌های آزمایش در ابعاد مورد نظر با استفاده از دستگاه مخصوص و مطابق با استاندارد ASHTO T321، تهیه شدند.

برای این که تیرهای ساخته شده به حالت طبیعی و اجرایی نزدیک‌تر باشند، مقاطع آسفالتی در محوطه کارخانه آسفالت ساخته شدند. برای جلوگیری از چسبیدن دال‌ها به سطح زیرین، از ورقه‌های آلومینیومی استفاده گردید و برای یکدست شدن مقاطع، عمل تراکم با دقت بسیار زیادی صورت پذیرفت. در ساخت نمونه‌های تسلیح شده که در آنها ژئوگرید در ارتفاع یک‌سوم پایینی نصب شده است، لایه آسفالتی دوم با فاصله زمانی اندکی پس از اجرای ژئوگرید، پخش و متراکم گردید.

۲-۳. آزمایش‌های قیر خالص

آزمایش تعیین درجه نفوذ قیر که طبق استاندارد ASTM D5 انجام می‌شود، برای تعیین قابلیت نفوذپذیری قیرها

عمر خستگی نمونه‌های آسفالتی است. از این رو در این تحقیق، آزمایش خستگی مطابق استاندارد AASHTO T321 انجام شد.

با توجه به تعداد نمونه‌های به دست آمده در عملیات برش دال‌ها و همچنین حداقل نمونه‌های مورد نیاز برای رسم منحنی‌های خستگی، برای هر سه مجموعه نمونه‌های تیر بتن آسفالتی، ۳ آزمون در ۳ سطح کرنش مورد آزمایش قرار گرفت. در این آزمایش‌ها، بارگذاری نیمه‌سینوسی با فرکانس ۱۰ هرتز و بدون استراحت در حالت کرنش ثابت اعمال گردید. این نمونه‌ها در ۳ سطح کرنش ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ میکروکرنش و در دمای 20 ± 0.8 درجه سلسیوس مورد آزمایش قرار گرفتند و آزمایش‌ها تا رسیدن به مرحله شکست در مقابل تکرار بار ادامه یافتند. در حالت کرنش کنترل شده، سیستم تعبیه شده در دستگاه آزمایش خستگی تیر، پس از هر بارگذاری، تنش را اصلاح می‌کند تا کرنش در حد مشخص شده ثابت باقی بماند.

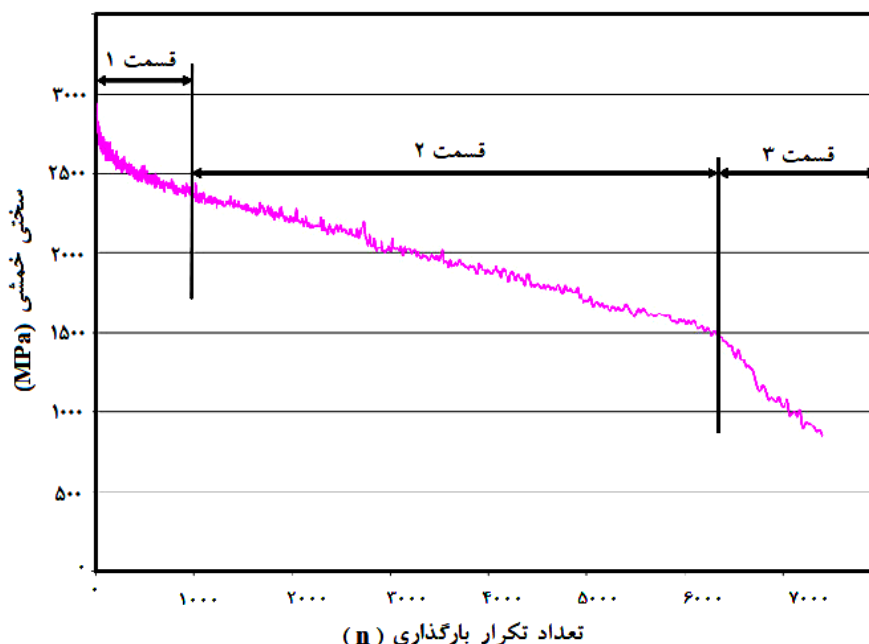
شکل ۳، نمونه‌ای از نمودار سختی در مقابل تکرار بار را نشان می‌دهد که در آزمایش خستگی با حالت کرنش ثابت به دست آمده است که در آن، نمودار را می‌توان به سه قسمت تقسیم نمود. قسمت اول نمودار دارای کاهش سریع در سختی نمونه است و در حدود ۱۰ درصد عمر خستگی را شامل می‌شود. قسمت دوم دارای کاهش خطی در سختی نمونه است که این بخش در حدود ۹۰ درصد عمر خستگی را شامل می‌شود و در واقع، مرحله گسترش ترک‌های ریز در تیر بتن آسفالتی می‌باشد. قسمت سوم، قسمتی است که کاهش ناگهانی در سختی نمونه رخ می‌دهد و نمونه به مرحله شکست نزدیک شده و ترک‌های بزرگ گسترش پیدا می‌کنند.

صورت پذیرفت. آزمایش تعیین نقطه نرمی نیز طبق استاندارد ASTM D36 انجام گرفت. قیری که درجه نرمی اش بیشتر باشد کمتر در مقابل تغییرات دما حساس بوده و درجه نفوذ یا کندروانی آن کمتر تغییر می‌کند. آزمایش کشش پذیری (انگمی) قیر معیاری از خواص کششی مواد قیری است. هر چه شکل پذیری قیر بیشتر باشد خاصیت چسبندگی آن هم بیشتر خواهد بود که این آزمایش نیز طبق استاندارد ASTM D113 انجام شد. ویسکوزیته قیر یکی از عوامل اصلی در نحوه ساخت و اجرای مخلوط‌های آسفالتی است که با افزایش دما، ویسکوزیته قیر کاهش می‌یابد، که این آزمایش نیز طبق استاندارد ASTM D88 به اجرا درآمد.

۳-۳. آزمایش خستگی مخلوط آسفالتی گرم

در تحلیل رفتار خستگی مخلوط آسفالتی گرم فرض بر این است که مصالح دارای خصوصیات ارتجاعی، همگن و همسان (ایزوتروپیک) هستند. علاوه بر این، تسلیح کننده نیز به طور کامل به لایه بتن آسفالتی متصل شده است. هرگونه برش و لغزش ژئوستتیک درون نمونه تیری شکل، نادیده گرفته شده است. کاهش سختی در طول آزمایش صرفاً به دلیل شروع و انتشار ترک‌ها در ناحیه بارگیری است.

آزمایش خمش چهار نقطه‌ای به دلیل عدم وجود مؤلفه برشی عمودی، نسبت به آزمایش سه نقطه‌ای ارجح تر است. در طول آزمایش، قسمت مرکزی تیر در نقاط بارگذاری تحت خمش یکنواخت قرار می‌گیرد و منجر به شکست مود I می‌شود. همان‌طور که بیان شد، از میان روش‌های مختلف ارزیابی خستگی، آزمایش تیرچه خمشی چهارنقطه‌ای، روش مناسب تری برای پیش‌بینی



شکل ۳. نمودار تغییرات سختی خمشی در مقابل تکرار بارگذاری برای نمونه اصلاح شده با نانوسیلیس در سطح کرنش ۵۰۰

۴. نتایج و بحث

۴-۱. نتایج آزمایش درجه نفوذ و نقطه نرمی قیر

به منظور بررسی ابتدایی اثرات نانوسیلیس بر قیر، آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی و ویسکوزیته سینماتیک صورت گرفته است. مطابق مطالعات گذشته روی تأثیر افزودن نانومواد بر قیر، درجه نفوذ قیر به میزان ۰/۲۳ میلی‌متر نسبت به حالت خالص خود کاهش، کندروانی قیر به میزان ۱۰ درجه سلسیوس افزایش و ویسکوزیته قیر به میزان ۰/۶۵ افزایش قابل توجهی یافت.

۴-۲. نتایج آزمایش خستگی

پس از انجام آزمایش خستگی چهارنقطه‌ای روی نمونه‌های شاهد، اصلاح شده با ۵ درصد نانوسیلیس و تسلیح شده با ژئوگرید، نتایج عمر خستگی برای سه سطح کرنش ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ میکروکرنش بر اساس تعداد تکرار بارگذاری تا مرحله شکست تعیین گردید که به صورت نمودارهای میله‌ای در شکل ۴ ترسیم شدند.

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، نانوسیلیس به عنوان یک افزودنی اصلاح‌کننده رفتار فیزیکی و شیمیایی قیر توانسته موجب افزایش مقاومت در برابر

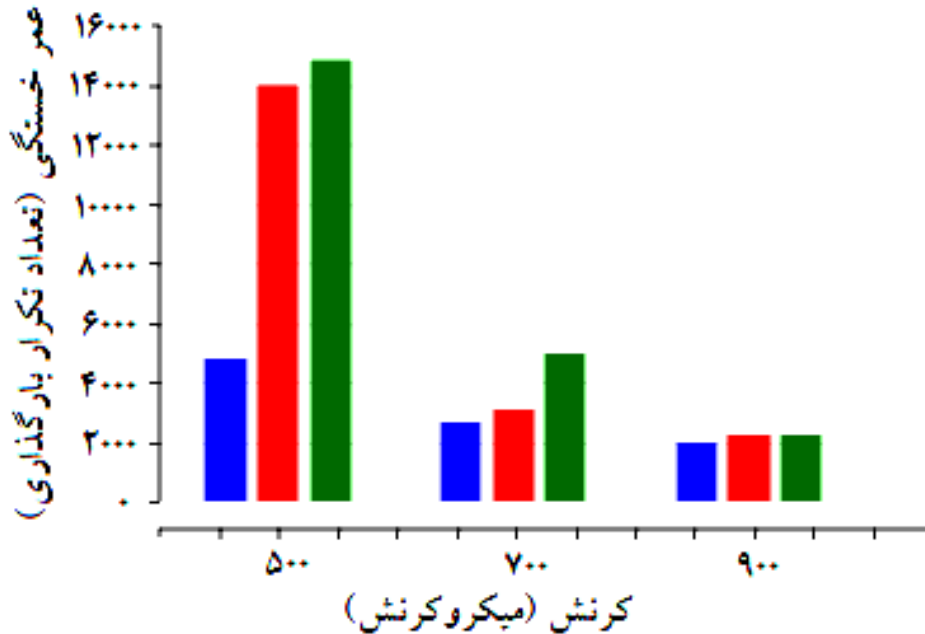
خستگی نمونه‌ها برای هر سه سطح کرنش گردد. هرچند این افزایش برای تمام سطح کرنش‌ها وجود دارد؛ اما این افزایش برای کرنش‌های کمتر بسیار مشهودتر است. نتایج آزمایش خستگی خمشی روی نمونه‌های تسلیح شده با ژئوگرید نیز نشان می‌دهد که استفاده از ژئوگرید در روسازی آسفالتی به دلیل خاصیت ارتجاعی آن، موجب بهبود مقاومت در برابر ترک‌های خستگی شده است.

با توجه به شکل ۴ و مقایسه عملکرد مخلوط‌ها در برابر خستگی، مشاهده می‌شود که نمونه‌های تسلیح شده با ژئوگرید و نمونه‌های اصلاح شده با نانوسیلیس، میزان تحمل بارهای ترافیکی را نسبت به نمونه شاهد افزایش می‌دهند. مقایسه نمودارها حاکی از آن است که رفتار تیرهای تسلیح شده با ژئوگرید بسیار شبیه تیرهای اصلاح شده با نانوسیلیس است؛ هرچند شیب خط تغییرات منحنی نمونه تسلیح شده کمتر از نمونه اصلاح شده است.

این امر نشانگر الگوی رفتاری نسبتاً یکنواخت نمونه تسلیح شده در برابر افزایش کرنش‌ها می‌باشد و بیشتر به الگوی رفتاری نمونه شاهد نزدیک است. با این وجود، با

شاهد، همگرا شده است. به طور کلی، بررسی نمودارها اذعان دارد که تسلیح ژئوگریدی مخلوط آسفالتی نسبت به اصلاح نانوسیلیسی آن، از توانایی بالاتری برای مقابله با ترک‌های خستگی برخوردار است.

افزایش کرنش، مقاومت در برابر خستگی نمونه تسلیح شده با شدت بسیار بیشتری نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته است و برای بالاترین حد کرنش در این تحقیق، در محدوده‌ای نزدیک به عمر خستگی نمونه



شکل ۴. مقایسه عمر خستگی انواع مخلوط‌های آسفالتی گرم در سطح کرنش‌های مختلف

خستگی نمونه‌های مختلف استخراج گردید که به شرح جدول ۶ و با تعریف پارامتر β به عنوان نسبت تعداد تکرار بارگذاری نمونه‌های تقویت شده به نمونه شاهد، بیان شده است. مبنای عمر خستگی که در این تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفته است، کاهش سختی تا ۵۰ درصد سختی اولیه است. در ادامه، معادلات سطوح کرنش در مقابل عمر خستگی برای هر سه حالت رسم شدند و با استفاده از نرم‌افزارهای آماری روی این نقاط رگرسیون نمایی انجام شد که بر اساس نمودارهای حاصل، پارامترهای معادله تعیین و ضریب تبیین (R^2) ارائه گردید. ضرایب K و n بر اساس رابطه (۱)، مطابق مندرجات جدول ۷ به دست می‌آیند.

۳-۴. پیش‌بینی عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی گرم

یکی از متداول‌ترین توابع عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی به صورت رابطه ۱ تعریف شده است (مانیس‌میت، ۱۹۸۱):

$$(1)$$

$$N_f = k \left(\frac{1}{\epsilon} \right)^n$$

که در آن، ϵ کرنش کششی و مقادیر k و n نیز ضرایب ثابت هستند که بعد از رسم نمودار تعداد تکرار بارگذاری در مقابل کرنش کششی اولیه در مقیاس لگاریتمی، با استفاده از معادله خط برازش شده، قابل تعیین هستند. نتایج آزمایش‌های این تحقیق بر اساس معادله فوق، مورد ارزیابی قرار گرفتند. در گام اول پردازش نتایج، عمر

جدول ۶. ضریب نسبت تعداد تکرار بارگذاری برای نمونه‌های مختلف نسبت به نمونه شاهد

سطح کرنش	β برای نمونه‌های اصلاح شده با نانوسیلیس	β برای نمونه‌های تسلیح شده با ژئوگرید
۵۰۰	۲/۹۳	۳/۱۲
۷۰۰	۱/۱۴	۱/۸۴
۹۰۰	۱/۱۱	۱/۱۳

جدول ۷. پارامترهای معادله عمر خستگی برای نمونه‌های آسفالتی مختلف

نمونه آسفالتی	ضریب k	ضریب n	ضریب تبیین (R^2)
شاهد	$۸/۰۷۵۱ \times ۱۰^{۱۱}$	۰/۶۵۱	۰/۹۶۲۱
اصلاح شده با نانوسیلیس	$۷/۵۰۹۵ \times ۱۰^{۱۲}$	۰/۷۵۱	۰/۹۸۵۴
تسلیح شده با ژئوگرید	$۵/۱۷۶۱ \times ۱۰^{۱۰}$	۰/۶۹۰	۰/۹۸۲۷

خمشی اولیه را نشان می‌دهد. این منحنی مستقیماً از نتایج حاصل از آزمایش خستگی تیر خمشی به دست آمده است. همان گونه که در شکل ملاحظه می‌شود، در هر سه سطح کرنش، با افزایش تعداد بار سختی خمشی به صورت کاهشی تا سختی ۵۰ درصد ادامه می‌یابد.

در شکل ۵- الف که مربوط به کرنش ۵۰۰ میکروکرنش می‌باشد، مخلوط آسفالتی اصلاح شده با نانوسیلیس به ترتیب نسبت به نمونه تسلیح شده با ژئوگرید و شاهد در مراحل بارگذاری مقادیر سختی خمشی بیشتری مشاهده می‌گردد. همچنین، مشاهده می‌گردد که در کرنش ۵۰۰ میکروکرنش، منحنی سختی خمشی پس از تکرار ۲۰۰۰ مرتبه بارگذاری مربوط به مخلوط آسفالتی اصلاح شده با نانوسیلیس انطباق وجود دارد. در شکل‌های ۵-ب و ۵-ج که مربوط به کرنش‌های ۷۰۰ و ۹۰۰ میکروکرنش می‌باشند، مخلوط آسفالتی تسلیح شده با ژئوگرید به ترتیب نسبت به نمونه شاهد و اصلاح شده با نانوسیلیس در مراحل بارگذاری مقادیر سختی خمشی بیشتری مشاهده می‌گردد.

نمودارهای سختی خمشی اولیه در برابر عمر خستگی برای سه سطح کرنش ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ میکروکرنش با استفاده از نرم‌افزار به منظور تعیین تابع رگرسیون نمایی روی این نقاط، تهیه گردید. نمودارهای حاصل، معادلات

مقادیر k به دست آمده در جدول ۷ نشان می‌دهند که اثر نانوسیلیس و ژئوگرید بر افزایش عمر خستگی در سطوح با کرنش کم، مشهودتر است و این امر در مورد نانوسیلیس بیشتر قابل توجه است. همچنین، مقادیر n نشان می‌دهند که سرعت کاهش عمر خستگی در نمونه‌های اصلاح شده با افزایش سطح تنش، کمتر از نمونه‌های شاهد است.

با توجه به مندرجات فوق، می‌توان نتیجه گرفت که در نمونه‌های حاوی نانوسیلیس، تأخیر در گسترش ترک‌ها عامل افزایش عمر خستگی است و عملکرد ژئوگریدها در نمونه‌های آسفالتی بیشتر کارکرد تسلیح‌کنندگی دارد.

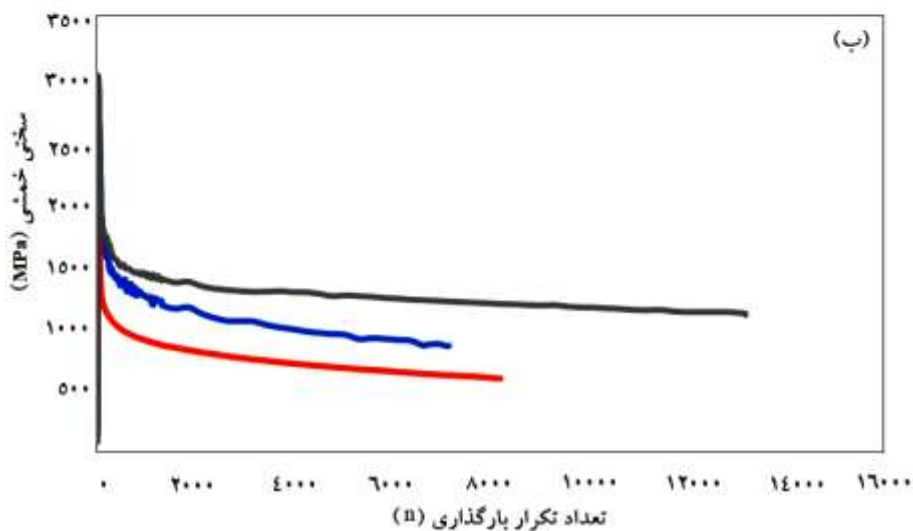
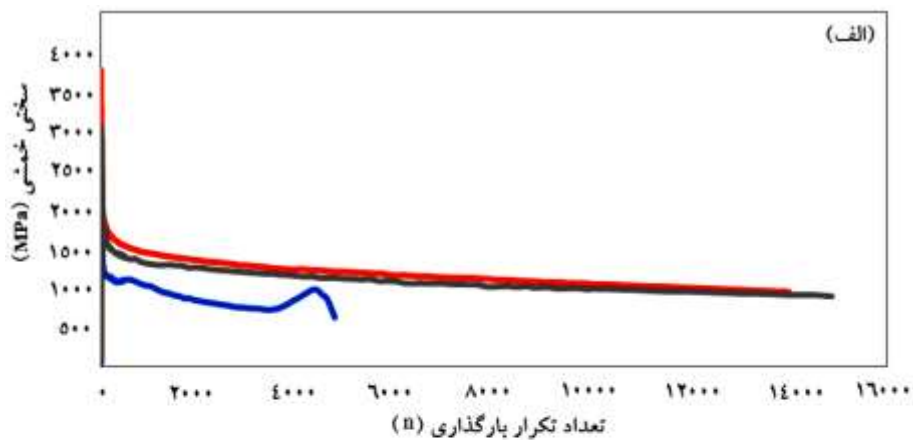
۴-۴. سختی خمشی نمونه‌ها در سطح کرنش‌های مختلف

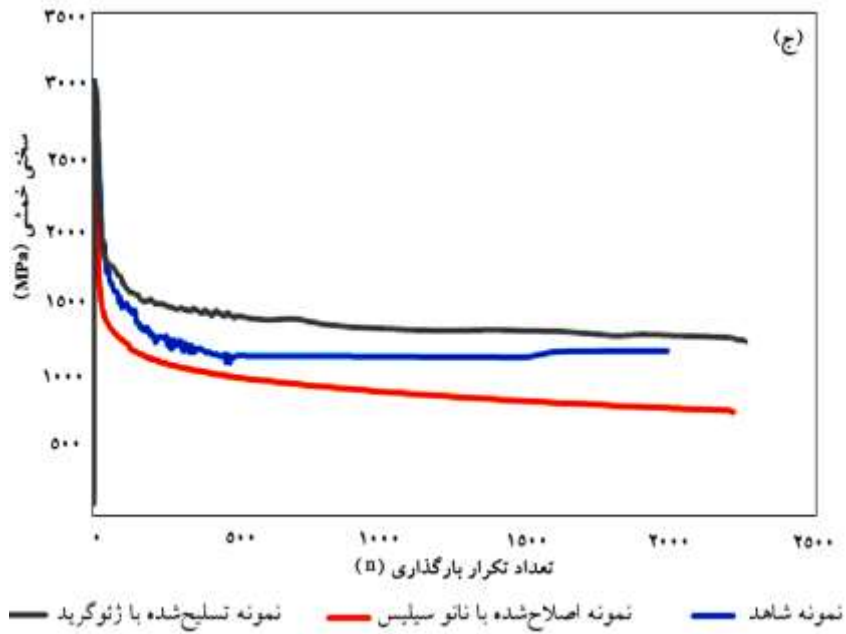
در این بخش از نتایج، نحوه تعیین عمر خستگی براساس معیار ۵۰ درصد سختی اولیه برای نمونه‌ها بیان شده است. در شکل ۵، منحنی تغییرات نزولی سختی خمشی در برابر تغییرات عمر خستگی (تعداد تکرار بارگذاری) برای کرنش‌های ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ میکروکرنش نشان داده شده است. در واقع، شکل ۵، منحنی کاهش سختی خمشی در برابر عمر خستگی تا حد ۵۰ درصد سختی

سختی خمشی اولیه در کرنش ۵۰۰ میکروکرنش ۱/۶۶ برابر سختی خمشی اولیه در کرنش ۹۰۰ میکروکرنش است. در نمونه شاهد در کرنش ۵۰۰ میکروکرنش، سختی خمشی اولیه ۱/۶۲ برابر سختی خمشی اولیه در کرنش ۷۰۰ میکروکرنش می‌باشد. همچنین، سختی خمشی اولیه در کرنش ۵۰۰ میکروکرنش ۴/۳۷ برابر سختی خمشی اولیه در کرنش ۹۰۰ میکروکرنش می‌باشد. در نمونه شاهد در کرنش ۵۰۰ میکروکرنش، سختی خمشی اولیه ۱/۳۶ برابر سختی خمشی اولیه در کرنش ۷۰۰ میکروکرنش می‌باشد. همچنین، سختی خمشی اولیه در کرنش ۵۰۰ میکروکرنش ۲/۲۰ برابر سختی خمشی اولیه در کرنش ۹۰۰ میکروکرنش است.

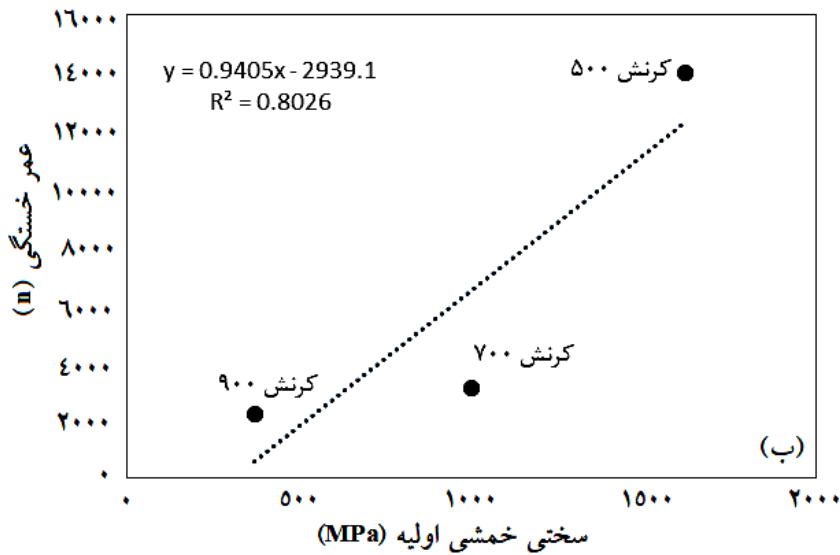
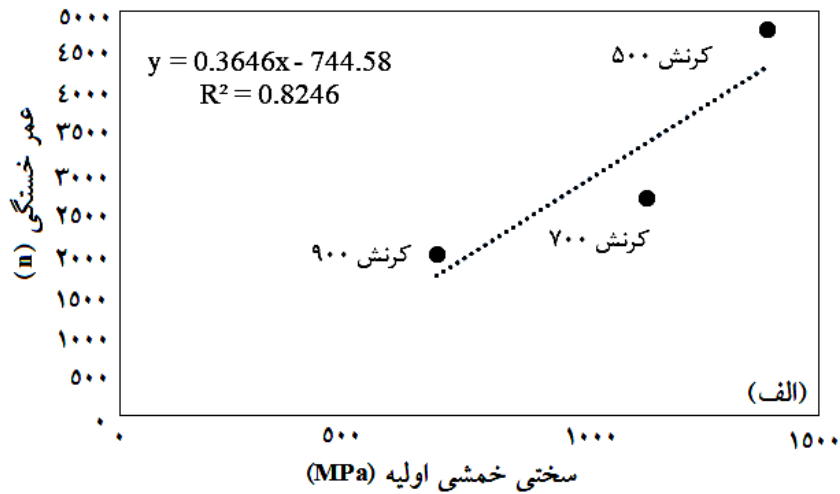
و ضریب تبیین (R^2) برای هر گراف ترسیم و در شکل ۶ آورده شده است.

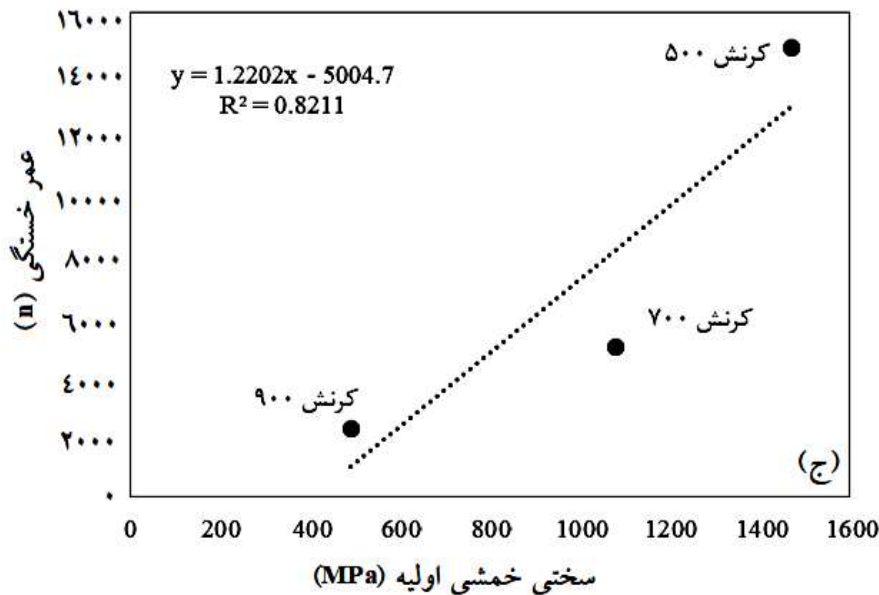
با توجه به شکل ۶، تمامی نمونه‌ها از ضریب همبستگی بالایی برخوردار بودند. همانطور که در شکل ۶ ملاحظه می‌شود، در کرنش ۵۰۰ میکروکرنش برای سه حالت در نظر گرفته شده، بیشترین عمر خستگی و سختی خمشی اولیه ملاحظه می‌گردد و با کاهش کرنش، مقادیر سختی خمشی اولیه و عمر خستگی نیز کاهش یافته است. در نمونه شاهد و در کرنش ۵۰۰ میکروکرنش و با بارگذاری تا ۵۰ درصد سختی اولیه، مقدار سختی خمشی اولیه ۱/۲۳ برابر مقدار متناظر در کرنش ۷۰۰ میکروکرنش می‌باشد.





شکل ۵. منحنی های سختی خمشی در برابر تعداد تکرار بارگذاری: الف) کرنش ۵۰۰، ب) کرنش ۷۰۰ و ج) کرنش ۹۰۰





شکل ۶. تغییرات سختی خمشی اولیه در برابر عمر خستگی: الف) شاهد، ب) نانوسیلیس و ج) ژئوگرید

۵. نتیجه گیری

- در این پژوهش، تأثیر کاربرد مواد اصلاح کننده نانوسیلیسی و تسلیح کننده ژئوگریدی در مخلوط های آسفالتی گرم (HMA) در مقابل خرابی های خستگی به طور مجزا بررسی شدند و نتایج حاصل نیز بر مبنای تحلیل های عمر خستگی و سختی خمشی مورد مقایسه قرار گرفتند. برای این منظور، از نمونه های شاهد (بدون استفاده از مواد نانو و یا ژئوستتیک)، نمونه های اصلاح شده با ۵ درصد نانوسیلیس و نمونه های تسلیح شده با ژئوگرید استفاده گردید. به منظور ارزیابی خرابی خستگی مخلوط های بتن آسفالتی گرم از آزمایش تیرچه خمشی چهار نقطه ای به روش کرنش ثابت در سه سطح ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ میکروکرنش بهره گرفته شد. نتایج حاصل از این پژوهش به طور خلاصه به شرح زیر می باشند:
- افزودن نانوسیلیس به قیر خالص به روش تر (خیس)، باعث کاهش درجه نفوذ قیر، افزایش نقطه نرمی و افزایش چشمگیر ویسکوزیته آن می گردد.
- مخلوط های آسفالتی اصلاح شده با ۵ درصد نانوسیلیس باعث افزایش مقاومت در مقابل خستگی نسبت به نمونه های شاهد - های شاهد در سطوح کرنش ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ میکروکرنش به ترتیب تا حدود ۱۱/۵ و ۱۴/۶، ۱۹۳/۹ درصد می گردند.
- مخلوط های آسفالتی تسلیح شده با ژئوگرید باعث افزایش مقاومت در مقابل خستگی نسبت به نمونه های شاهد در سطوح کرنش ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ میکروکرنش به ترتیب تا حدود ۲۱۲/۴، ۸۴/۳ و ۱۳/۵ درصد می گردند.
- مخلوط های آسفالتی تسلیح شده با ژئوگرید در ۳ سطح کرنش مورد بررسی، به ترتیب حدود ۶/۵، ۶۱ و ۱/۸ درصد افزایش عمر خستگی مخلوط نسبت به نمونه های اصلاح شده با نانوسیلیس گردیدند.
- مقادیر سختی خمشی مخلوط های آسفالتی اصلاح شده با نانوسیلیس، تسلیح شده با ژئوگرید و شاهد در سطوح کرنش ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ میکروکرنش با افزایش تعداد بارگذاری کاهش می یابد.
- مقادیر سختی خمشی مخلوط های اصلاح شده با نانوسیلیس در سطح کرنش ۵۰۰ میکروکرنش با افزایش

- تعداد بارگذاری نسبت به مخلوط های اصلاح شده با نانوسیلیس و شاهد بیشتر می باشد.
- تعداد بارگذاری نسبت به مخلوط های تسلیح شده با ژئوگرید و شاهد بیشتر می باشد.
- مقادیر سختی خمشی مخلوط های تسلیح شده با ژئوگرید در سطوح کرنش ۷۰۰ و ۹۰۰ میکروکرنش با افزایش

۶. منابع

- AASHTO, Standard Test. 2007. "Standard method of test for determining the fatigue life of compacted hot-mix asphalt (HMA) subjected to repeated flexural bending". T321-03.
- Ahmed, M., Abdelhamid, M., Hussain, S., Khedr, S., Breakah, T., Saady, M., Elkadi, O. and Abou-Zeid, M. 2019. "Geogrid reinforcement in flexible paved roads". 12th International Transportation Specialty Conference 2018, Held as Part of the Canadian Society for Civil Engineering Annual Conference 2018, June, pp. 104-113.
- Akbari, M., Shafabakhsh, G. A. and Ahadi, M. R. 2015. "Evaluating the safety effects of pavement condition index (PCI) on frequency of run-off-road accidents". J. Transport. Infrastructure Eng., 1(3): 47-61. (In Persian)
- Akbari, M., Shafabakhsh, G. A. and Ahadi, M. R. 2020a. "Single-vehicle run-off-road crash prediction model associated with pavement characteristics". Int. J. Eng., 33(7): 1375-1386.
- Akbari, M., Shafabakhsh, G. A. and Ahadi, M. R. 2020b. "The impact of segmentation method on the aggregate goodness-of-fit measurements of non-linear crash prediction models". SN Appl. Sci., 2: 1655.
- Correia, N. S. and Zornberg, J. G. 2018. "Strain distribution along geogrid-reinforced asphalt overlays under traffic loading". Geotext. Geomembranes, 46(1): 111-120.
- Correia, N. and Bueno, B. 2011. "Effect of bituminous impregnation on nonwoven geotextiles tensile and permeability properties". Geotext. Geomembranes, 29(2): 92-101.
- Faramarzi, M., Arabani, M., Haghi, A. and Mottaghtalab, V. 2015. "Carbon nanotubes-modified asphalt binder: Preparation and characterization". Int. J. Pavement Res. Technol., 8(1): 29-37.
- Hasaninia, M. and Haddadi, F. 2017. "The characteristics of hot mixed asphalt modified by nanosilica". Pet. Sci. Technol., 35(4): 351-359.
- Mittal, A. and Shukla, S. 2019. "Effect of geosynthetic reinforcement on strength behaviour of weak subgrade soil". MSF, 969: 225-230.
- Monismith, C. L. 1981. "Fatigue characteristics of asphalt paving mixtures and their use in pavement design". In 18th Paving Conference, University of New Mexico, Albuquerque.
- Nazari, H., Naderi, K. and Moghadas Nejad, F. 2018. "Improving aging resistance and fatigue performance of asphalt binders using inorganic nanoparticles". Constr. Build. Mater., 170: 591-602.
- Shafabakhsh, G. A., Ani, O. J. and Talebsafa, M. 2015. "Artificial neural network (ANN) modeling for predicting rutting performance of nano-modified hot-mix asphalt mixtures containing steel slag aggregates". Constr. Build. Mater., 85: 136-143.
- Shafabakhsh, G. A. and Motamedi, M. 2016. "Sensitivity analysis of road actual conditions to evaluate the optimal positioning of geogrid using finite elements and dynamic methods". Int. J. Eng., 29(9): 1235-1241.
- Shafabakhsh, G. A., Mirabdolazimi, S. M. and Sadeghnejad, M. 2014. "Evaluation the effect of nano-TiO₂ on the rutting and fatigue behavior of asphalt mixtures". Constr. Build. Mater., 54: 566-571.
- Shafabakhsh, G. A., Hadad, A., Akbari, M. and Gavashiri, Z. 2008. "Applicability study of geosynthetic reinforced soil walls: A case study in Golestan special road". J. Transport. Res., 5(1): 49-60. (In Persian)
- Shafabakhsh, G. A., Motamedi, M., Firouznia, M. and Isazadeh, M. 2019. "Experimental investigation of the effect of asphalt binder modified with nanosilica on the rutting, fatigue and performance grade". Pet. Sci. Technol., 37(13): 1495-1500.
- Sun, L., Zhu, H. R., Xin, X. T., Wang, H. Y. and Gu, W. J. 2013. "Preparation of nano-modified asphalt and its road performance evaluation". Zhongguo Gonglu Xuebao (China J. Highway and Transport), 26(1): 15-22.
- Tanzadeh, J. and Shahrezagamasaei, R. 2017. "Laboratory assessment of hybrid fiber and nano-silica on reinforced porous asphalt mixtures". Constr. Build. Mater., 144: 260-270.
- Yao, H., You, Z., Li, L., Lee, C. H., Wingard, D., Yap, Y. K., Shi, X. and Goh, S. W. 2013. "Rheological properties and chemical bonding of asphalt modified with nanosilica". J. Mater. Civ. Eng., 25(11): 1619-1630.

Yildirim, Y. 2007. "Polymer modified asphalt binder". *Constr. Build. Mater.*, 21(1): 66-72.

Zhou, T. C., Zhou, S. L. and Fei, Q. Y. 2008. "Effect of surface treated nano silica on thermal and flame retardant properties of PE [J]". *Chem. Eng.*, 7.