

تاثیر نانو مواد و پلیمر ضایعاتی بر عملکرد قیر و مخلوط آسفالتی

مقاله علمی - پژوهشی

حامین چویدار، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران
امین فرج الهی، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران
علیرضا عاملی*، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: amelii@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۸

صفحه ۴۵۶-۴۴۳

چکیده

مطالعه حاضر به منظور بررسی اثر ذرات نانو سیلیس بر ویژگی‌های قیرهای اصلاح شده پلیمری انجام شد. در این مطالعه، قیر پایه ۱۰۰/۸۵ با پلیمر پلی پروپیلن و ذرات نانوسیلیس در درصد ۰ تا ۴ درصد اصلاح شد. هر دو ذرات نانو سیلیس و پلیمر پلی پروپیلن به وزن قیر کل اضافه شدند. آزمایش‌های عملکرد آسفالت تست خستگی خمش چهار نقطه‌ای، استحکام کششی غیرمستقیم، مدول سختی کششی غیرمستقیم و آزمایش‌های ریزش قیر برای ارزیابی اثر ذرات نانوسیلیس انجام می‌شود. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که ذرات نانوسیلیس خواص خستگی قیرهای اصلاح شده پلی پروپیلن را بهبود می‌بخشد. این نشان می‌دهد که ذرات نانوسیلیس تأثیر قابل توجهی بر بهبود ویژگی‌های عملکردی قیرهای اصلاح شده پلیمری دارند. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که پلی پروپیلن پلیمری گرما نرم با ذرات نانو سیلیس زمانی که به عنوان اصلاح کننده قیر استفاده می‌شود، عملکرد و دوام مخلوط های آسفالتی را بهبود می‌بخشد.

واژه‌های کلیدی: ترک خوردگی خستگی، پلی پروپیلن، مدول سختی، آسفالت اصلاح شده

۱-مقدمه

و سنگدانه‌ها در مخلوط آسفالتی، عملکرد روسازی آسفالت‌های مخلوط گرم^۱ (HMA) را تعیین می‌کند (Khodaii et al, 2013; Hafeez et al, 2009). ترک خوردگی ناشی از خستگی مشکلی است که به طور جدی عمر روسازی‌های آسفالتی را کاهش می‌دهد، ترک خوردگی در روسازی آسفالت در مدت زمان طولانی به دلیل تأثیر دو عامل اصلی به نام دما و بارگذاری رخ می‌دهد. در اغلب موارد، ترک خوردگی ناشی از اعمال بار مکرر از کف لایه‌های روسازی آسفالتی شروع شده و به سمت بالا منتشر می‌شود، در حالی که ترک خوردگی ناشی از آن معمولاً از لایه‌های سطحی روسازی آسفالتی اتفاق می‌افتد و

طول عمر روسازی یکی از مهم‌ترین مسائلی است که به دلیل اقتصادی و دلایل دیگر باید به آن پرداخته شود. خرابی‌های روسازی آسفالت طول عمر روسازی را کاهش می‌دهد و برای حفظ طول عمر روسازی، نیاز به رسیدگی به این موضوع وجود دارد. متداول‌ترین حالت آسیب‌های روسازی، آسیب شیار است که معمولاً به شکل تغییر شکل دائمی و آسیب ترک خوردگی ناشی از خستگی رخ می‌دهد که عموماً به دلیل تجمع متوالی کرنش کششی ناشی از اعمال بار مکرر روی روسازی آغاز می‌شود. عامل دیگری که بر دوام روسازی‌های آسفالتی تأثیر می‌گذارد، آسیب رطوبتی است. پیوند چسبنده و چسبنده بین بایندر

کوپلیمر استایرن-بوتادین-استایرن^۱ (SBS) و evaloy متمرکز هستند که یافتن آنها گران و دشوار است. با این حال، نتیجه دلگرم‌کننده نبود زیرا هزینه اصلاح را افزایش می‌دهد، همچنین بیشتر مطالعات روی اصلاح آسفالت نانومواد و پلیمری نانوکامپوزیت، محتوای بهینه بالای ۴-۸٪ را نشان دادند. با این حال، از نظر وزنی قیر، نانومواد هنوز گران هستند و بنابراین با توجه به هزینه نانومواد، محتوای بالای مورد استفاده در اصلاح آسفالت نیز نیاز به مطالعه دارد. به منظور پرداختن به این مسائل، تحقیق حاضر به بررسی کاربرد پلیمر پلاستومری کم هزینه (پلی پروپیلن) می‌پردازد که می‌تواند از زباله‌های روزانه با افزودن نانو سیلیس در محتویات پایین‌تر (۰.۱٪ تا ۰.۴٪) به دست آید. هدف اصلی این مطالعه بررسی اثر ذرات نانوسیلیس بر ویژگی‌های عملکردی بایندر اصلاح‌شده پلی پروپیلن است. کاربرد پلیمرهای پلاستومر ارزان قیمت با نانو ذرات به ویژه اثرات دمای پایین (خستگی) گزارش نشده است. بنابراین، بررسی فعلی می‌تواند به درک ویژگی‌های عملکرد مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده کامپوزیتی برای بهبود طراحی مخلوط‌های آسفالتی با عملکرد بالا کمک کند. (Bala et al, 2016)

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

۲-۱-۱- مصالح سنگی

بایندر قیر درجه نفوذ ۱۰۰/۸۵ دارای خواص نشان داده شده در جدول ۱ برای تهیه مخلوط قیر اصلاح شده استفاده شد. پلیمرهای پلی پروپیلن ترموپلاستیک با ذرات نانو سیلیس برای اصلاح قیر برای تهیه قیرهای اصلاح شده با نانو کامپوزیت استفاده شد. خواص ذرات نانوسیلیس مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است. سنگدانه‌های درشت و ریز هر دو برای تهیه نمونه‌های مخلوط آسفالتی استفاده می‌شوند، سنگدانه درشت مورد استفاده گرانیته خرد شده با حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلی‌متر است. برای به دست آوردن سنگدانه‌های در هم قفل شده مناسب، یک نمودار دانه‌بندی متراکم نشان داده شده در شکل ۱ برای آماده سازی مخلوط آسفالت استفاده شد. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مصالح سنگی در جدول ۳ و ۴ آورده شده است.

به سمت پایین به لایه‌های زیرین منتقل می‌شود. اعمال بارهای مکرر باعث کاهش مقاومت روسازی آسفالت به دلیل تخریب مداوم مواد می‌شود که در نهایت منجر به ایجاد ترک‌های ریز و شکست کامل روسازی می‌شود (Baldi-Sevilla et al, 2017; Zhao et al, 2013).

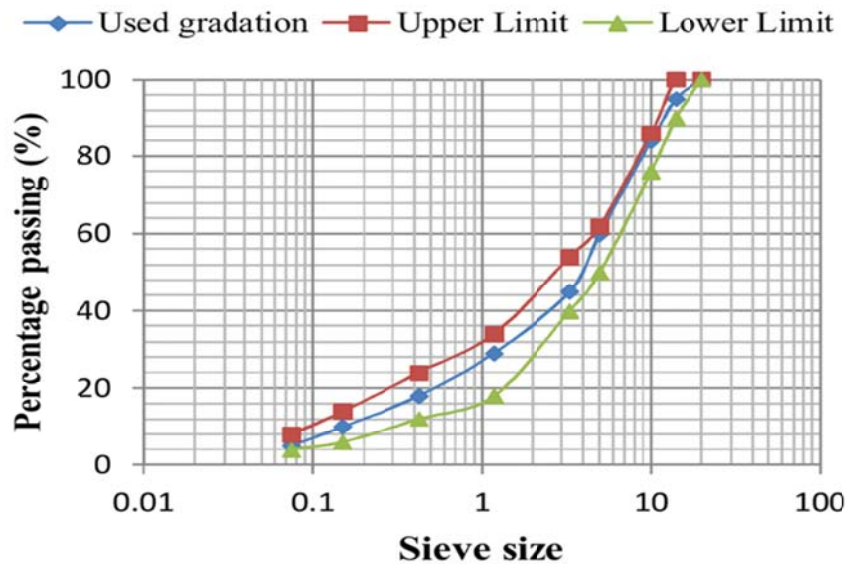
روش متداول بهبود عملکرد روسازی‌های آسفالتی از طریق اصلاح است. مطالعات قبلی نشان داده است که استفاده از انواع پلیمرها باعث افزایش عمر روسازی آسفالت می‌شود. پلیمرها باعث افزایش چسبندگی بین سنگدانه‌ها و قیر در مخلوط می‌شوند. با این حال، نگرانی عمده استفاده از قیر اصلاح شده با پلیمرها، ناپایداری آن به دلیل تشکیل دو فاز متمایز از قیر و پلیمر پس از اصلاح، چسبندگی ضعیف و اکسیداسیون است. ناپایداری قیر اصلاح‌شده با پلیمر، محققان را تشویق می‌کند تا مواد جدیدی را برای بهبود عملکرد قیر اصلاح‌شده پلیمری کشف کنند (Aboufoul et al, 2013; Zhang et al, 2004). اخیراً افزودنی‌های نانو مواد به دلیل خواص مفید عالی مانند سطح بزرگ، توانایی پراکندگی عالی، جذب قوی، پایداری عالی و همچنین مواد شیمیایی بالا، به طور گسترده مورد توجه محققان روسازی برای تهیه مخلوط‌های آسفالتی بادوام با عملکرد بالا قرار گرفته است. خلوص در حال حاضر، کاربردهای نانومواد در ارتباط با پلیمرها به دلیل خواص عالی اندازه ذرات کوچک مواد نانو که باعث می‌شود آنها به راحتی با قیر ترکیب شوند و سازگاری بیشتری با قیر داشته باشند، در افزایش خواص چسبنده قیر قابل توجه است. اصلاح نانومواد/پلیمر مرکب به طور کلی مقرون به صرفه‌تر است زیرا هم مقدار پلیمرها و هم مواد نانو را کاهش می‌دهد و در عین حال سازگاری پلیمرها با قیر را افزایش می‌دهد. نانومواد معمولی که در اصلاح قیر به کار می‌روند، نانولوله‌های کربنی، دی اکسید تیتانیوم، نانو خاک رس (مونتموریلونیت آلی)، نانو تری اکسو کربنات کلسیم، نانو اکسید سیلیکون و نانو اکسید روی هستند. در میان نانومواد، نانو سیلیس به طور کلی در تهیه مخلوط‌های نانوکامپوزیت پلیمری به دلیل واکنش زیاد بین ماده سیلیس و چسب آسفالت که منجر به توانایی پراکندگی نانو سیلیس و پلیمرها در مخلوط قیر در مقایسه با سایر نانومواد می‌شود، استفاده می‌شود (Amini et al, 2017; Singh et al, 2013; Li et al, 2013). در حال حاضر، اکثر مطالعات موجود در مورد اصلاح آسفالت نانومواد تنها بر روی کاربرد پلیمرهای الاستومری بکر مانند

جدول ۱. خصوصیات قیر خالص استفاده شده

روش آزمایش	قیر ۸۵/۱۰۰	خصوصیات
ASTM D-70	۰,۶۴	ویسکوزیته در دمای ۱۳۵ درجه
ASTM D-5	۸۴	درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی گراد
ASTM D-36	۴۲	نقطه نرمی (درجه سانتی گراد)
ASTM D-113	+۱۰۰	انگمی در ۲۵ درجه سانتی گراد
ASTM D-92	٪ ۰,۰۶	کاهش جرم

جدول ۲. مشخصات نانوسیلیس

مقدار	خصوصیات فیزیکی
سفید جامد پودری	ظاهر
به شدت آب گریز	آب گریزی
٪ ۹۷,۸	درصد سیلیس
۲۵-۱۰	اندازه (نانو متر)
۱۱۰	سطح مخصوص (مترمربع بر گرم)



شکل ۱. نمودار دانه بندی سنگدانه ها

جدول ۳. خصوصیات مصالح سنگی

استاندارد	نتایج	آزمایشات سنگ
ASTM C127	۲.۴۹۳	وزن مخصوص حقیقی
ASTM C127	۲.۲	سایش مصالح درشت دانه(%)
ASTM C128	۴.۲	سایش مصالح ریزدانه(%)
AASHTO T96	۲۲.۳	سایش لس آنجلس(%)
ASTM D5821	۹۴	درصد شکستگی در دو وجهه(%)

جدول ۴. خصوصیات شیمیایی مصالح

نوع	درصد اکسید (%)							
	CaO	Na2O	K2O	Al2O3	Fe2O3	MgO	SiO2	MnO
مصالح آهکی	۴۳	۰.۰۷	۰.۶۵	۲.۱۲	۰.۹۵	۰.۷۵	۱۷.۵۳	۰.۰۴۶

۲-۲- آماده سازی نمونه‌ها

قیرهای اصلاح شده کامپوزیت نانوسیلیس/پلی پروپیلن از طریق افزودن ۵ درصد پلیمر پلی پروپیلن همراه با غلظت‌های مختلف (۱ تا ۴ درصد) ذرات نانوسیلیس بر حسب وزن چسب قیر پایه تهیه شدند. پلیمر پلی پروپیلن ابتدا بر روی ۵۰۰ گرم وزن چسب پایه (Pen ۱۰۰/۸۰) قبل از افزودن ذرات نانوسیلیس حل شد. هنگامی که پلی پروپیلن به طور کامل روی بایندر پایه حل می‌شود، ذرات نانو سیلیس به آرامی به بایندر اصلاح شده پلی پروپیلن اضافه می‌شوند و با استفاده از میکسر برشی بالا با سرعت برش بالا برش داده می‌شوند. برای اختلاط از سرعت برش ۴۰۰۰ دور در دقیقه استفاده شد. در طول زمان اختلاط، دما در 10 ± 150 درجه سانتی‌گراد حفظ شد. مخلوط کنترل تنها با ۵٪ پلیمر پلی پروپیلن بر حسب وزن قیر پایه بدون ذرات نانوسیلیس تهیه شد، در حالی که مخلوط‌های نانو کامپوزیت پلیمری با ۵٪ پلی پروپیلن و ۱٪ تا ۴٪ ذرات نانوسیلیس تهیه شد.

۳- روش کار آزمایش

۳-۱- آزمایش کشش غیر مستقیم

در آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم، همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، یک نمونه استوانه‌ای به صورت قطری بارگذاری می‌شود. آزمایش کشش غیرمستقیم برای تعیین مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی و پیش بینی ظهور ترک‌ها در مخلوط آسفالتی استفاده می‌شود. همچنین می‌توان از این آزمایش برای ارزیابی عمر خستگی نیز استفاده کرد. آزمایش کششی غیر مستقیم براساس آیین‌نامه ASTM D6931-12 با نرخ ثابت $50/8$ میلی‌متر بر دقیقه و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌ها با استفاده از معادله زیر تعیین شد:

$$ITS = (2P_{\max}) / (\pi Dt) \quad (2)$$

که ITS: مقاومت کششی نمونه‌ها بر حسب Kpa، P_{\max} بار اعمالی در زمان شکست بر حسب kN، D قطر نمونه‌ها بر حسب میلی‌متر، t ارتفاع نمونه‌ها بر اساس میلی‌متر می‌باشد. همچنین می‌توان از این آزمایش برای ارزیابی عمر خستگی نیز استفاده کرد.

۲-۳- مدول برجهندگی

قرار داده شد. شکل بارگذاری نیمه سینوسی، مدت اعمال بار ۰/۱ ثانیه، زمان استراحت ۰/۹ ثانیه و ضریب پواسون ۰/۳۵ فرض گردید. در این آزمایش به ازای هر مخلوط، ۳ نمونه آسفالتی تهیه و روی هر نمونه ۵ پالس تکرار شد و میانگین نتایج به وسیله دستگاه نمایش داده شد. مدول برجهندگی براساس معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$M_r = \frac{p(g + 0.2734)}{\delta t} \quad (۴)$$

آزمایش مدول برجهندگی در دماهای پایین بنحوی مرتبط با ترک خوردگی حرارتی می‌باشد. تحقیقات متعددی نشان داده است که مخلوط‌های سخت‌تر در دماهای پایین‌تر بیشتر مستعد ترک خوردگی حرارتی می‌باشند. برای تعیین مدول برجهندگی از استاندارد AS 2891-13-1-1995 استفاده شد. ابتدا نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در محفظه دستگاه در دمای ۲۵ سانتی‌گراد

$$M_R = \text{مدول برجهندگی (مگا پاسکال)}$$

$$P = \text{بار تکراری (نیوتن)}$$

$$V = \text{نسبت پواسون}$$

$$t = \text{ضخامت نمونه (میلی‌متر)}$$

$$H = \text{تغییر شکل افقی برگشت پذیر (میلی‌متر)}$$

$$V = \text{تغییر شکل قائم برگشت پذیر (میلی‌متر)}$$

۳-۳- آزمایش تیر خمشی چهار نقطه‌ای خستگی

تمامی نمونه‌ها در سطح کرنش ثابت ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ میکرو استرین با بارگذاری سینوسی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. آزمایش در دمای ثابت ۲۰ درجه سانتی‌گراد انجام شده است. نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت قبل از آزمایش در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته‌اند تا به دمای مذکور برسند. فرکانس بارگذاری ۱۰ هرتز می‌باشد. مدول سختی براساس نیرو و جابه‌جایی اندازه‌گیری شده بعد از ۵۰ سیکل براساس معادلات زیر محاسبه شده است.

مقاومت خستگی تیرها براساس آزمایش تیر خمشی چهار نقطه‌ای براساس آیین نامه AASHTO T321-07 ارزیابی شده است. هدف از این آزمایش تعیین عمر خستگی تیرها در سطوح کرنش مختلف می‌باشد. آزمایش خستگی می‌تواند هم در شرایط تنش ثابت و کرنش ثابت انجام شود. در حالت تنش ثابت، شکست نمونه بلافاصله بعد از شروع ترک تعریف می‌شود. در حالت کرنش ثابت، شکست نمونه زمانی که مدول سختی آن به نصف مدول اولیه آن می‌رسد، تعریف می‌گردد. این معیار بر اساس آیین نامه AASHTO-T321 استفاده شده است.

$$\varepsilon = \frac{12\delta h \times 10^6}{3(G_0^2 - 4G_1^2)} \quad (۵)$$

$$\sigma = \frac{G_0 P}{Bh^2} \quad (۶)$$

$$S = \frac{1000\sigma}{\varepsilon} \quad (۷)$$

تیر (میلی متر)، S مدول سختی تیر (مگاپاسکال). آزمایش خستگی تا زمانی که مدول سختی به نصف مقدار اولیه خود برسد، ادامه می‌یابد. بعد از آزمایش عمر خستگی تیرها، عمر خستگی مخلوط با معادله زیر محاسبه گردیده است:

$$N_f = a\varepsilon^{-b}$$

و صفحه کاغذی در فر با دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت نگهداری می‌شود. پس از نگهداری در اون، بشقاب با سبد و نمونه از فر خارج می‌شود. مقدار تخلیه به عنوان بخشی از بایندر که از نمونه مخلوط جدا می‌شود، ثبت می‌شود. ریزش قیر هر مخلوط آسفالتی با استفاده از معادله محاسبه شد.

$$\text{Draindown} = \frac{D-C}{B-A} \times 100$$

که در آن A وزن سبد سیم خالی، B وزن سبد سیمی با نمونه، C وزن صفحه خالی و D وزن صفحه با مواد قیر تخلیه است.

۴- نتایج

۴-۱- توزیع احتمال عمر خستگی

سطوح کرنش نسبت به شاهد و سایر مخلوط‌های اصلاح شده کامپوزیت نشان می‌دهد، این نشان می‌دهد که مخلوط در هر دو حالت کم در برابر خستگی مقاوم‌تر است و سطح کرنش بالا جدول ۳ ضرایب عمر خستگی (k) و (n) و ضریب تعیین معادلات عمر خستگی مربوطه ارائه شده در شکل‌ها را نشان می‌دهد ۲ و ۳. این ضرایب نشان دهنده مقاومت در برابر خستگی مخلوط‌های آسفالتی است. همانطور که مشاهده می‌شود، بدیهی است که مخلوط‌های تهیه شده با نانو سیلیس در مقایسه با مخلوط‌های شاهد n مقدار کمتری را نشان می‌دهند. این نشان می‌دهد که مخلوط‌های اصلاح شده کامپوزیت نانو سیلیس عمر خستگی بالاتری خواهند داشت زیرا مقادیر n پایین‌تر و مقادیر k بالاتر نشان‌دهنده عمر خستگی بیشتر است.

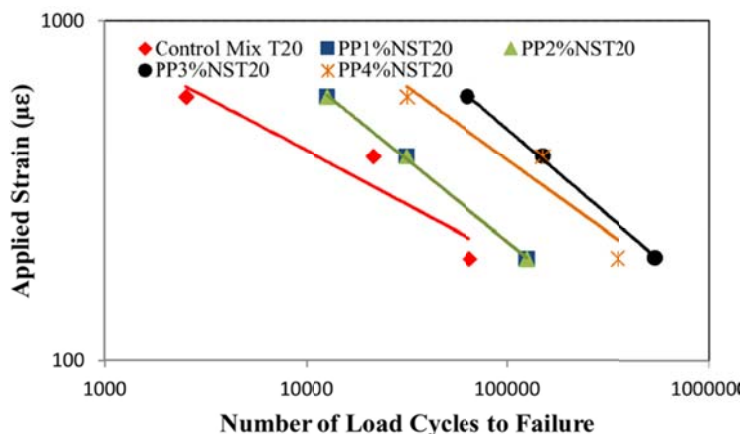
که حداکثر کرنش اعمال شده بر تیر، تغییر شکل ماکزیمم در وسط تیر (میلی متر)، طول خارجی گیج (۳۵۵/۵ میلی متر)، طول داخلی گیج (۱۱۸/۵ میلی متر)، حداکثر تنش کششی (کیلو پاسکال)، P حداکثر نیرو (کیلو نیوتن)، B میانگین عرض

(۸)

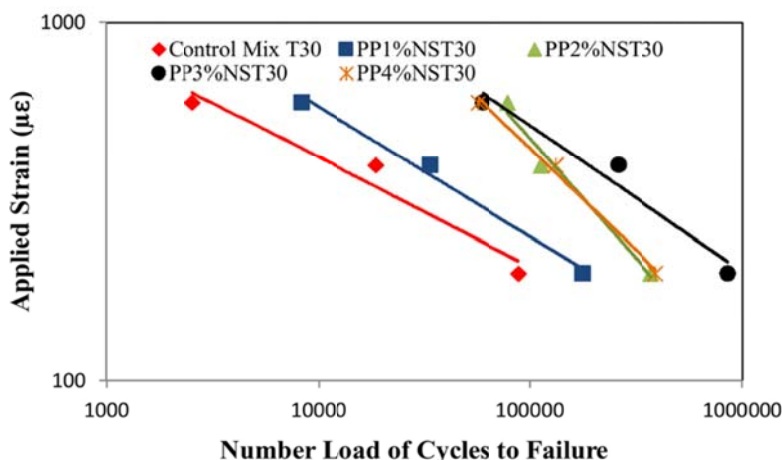
۳-۴- آزمایش ریزش قیر

آزمایش تخلیه مطابق با مشخصات استاندارد ASTM D6390 با استفاده از نمونه‌های مخلوط آسفالتی متراکم نشده انجام شد. این آزمایش شرایطی را شبیه سازی می‌کند که مخلوط‌های آسفالتی در دماهای بالا در طول ذخیره سازی، تولید، حمل و نقل یا قرار دادن مخلوط‌ها تجربه می‌کنند. سنگدانه‌ها با یک کلاسور مخلوط می‌شوند و در یک سبد سیمی قرار می‌گیرند که در بالای صفحه کاغذ قرار دارد. سبد به همراه نمونه آسفالت

شکل ۲ و ۳ نمودار خطوط خستگی در مقابل کرنش را در سطوح دماهای مختلف برای کنترل و مخلوط‌های اصلاح شده کامپوزیت نانو سیلیس نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که خط فرسودگی رسم شده تفاوت قابل توجهی را بین مخلوط‌های کنترل و اصلاح شده کامپوزیت در تمام سطوح دما نشان می‌دهد. این نشان می‌دهد که ذرات نانو سیلیس اثر قابل توجهی بر عمر خستگی مخلوط دارند. این را می‌توان به دلیل انرژی سطحی نانو سیلیس نسبت داد که از تجمع ذرات پلی پروپیلن کوچک در مخلوط جلوگیری می‌کند و در نتیجه خاصیت ارتجاعی و چسبندگی بایندر به سنگدانه‌ها را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، می‌توان اشاره کرد که خط خستگی مخلوط آسفالتی حاوی ۳ درصد ذرات نانو سیلیس عملکرد بهتری در برابر خستگی در تمام



شکل ۲. عمر خستگی نمونه‌ها در دمای ۲۰ درجه



شکل ۳. عمر خستگی نمونه‌ها در دمای ۳۰ درجه

۴-۲- اثر دما بر عمر خستگی نمونه‌ها

شکل ۴ چرخه‌های بارگذاری را نشان می‌دهد که عمر خستگی مخلوط‌های کامپوزیت نانوسیلیس و کنترل را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، مخلوط‌های کامپوزیتی نانوسیلیس چرخه‌های بارگذاری فرسودگی ظاهری بالاتری نسبت به مخلوط‌های اصلاح‌شده پلی‌پروپیلن کنترل نشان دادند. همچنین می‌توان مشاهده کرد که عمر خستگی مخلوط‌ها با افزایش دما از ۲۰ درجه سانتی‌گراد به ۳۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. این بیشتر تایید می‌کند که عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی به شدت وابسته به دما است و افزایش قابل‌توجه در چرخه‌های بارگذاری خستگی مشاهده شده با افزایش دما را می‌توان به

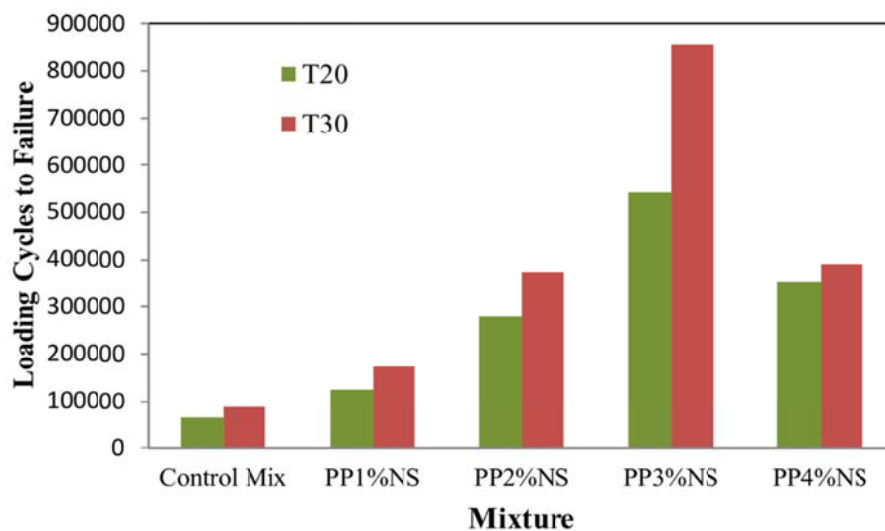
ضریب همبستگی (R^2) برای بررسی خطا استفاده می‌شود و تأیید می‌کند که رابطه بین پارامترهای k و n می‌تواند برای تعریف عمر خستگی تمام مخلوط‌های اصلاح شده استفاده شود. از جدول ۳ می‌توان دریافت که ضریب همبستگی R^2 همه مخلوط‌ها همگی بزرگتر از ۰,۹۰ هستند. این نشان می‌دهد که رابطه بین عمر خستگی و کرنش همبستگی خوبی برای همه مخلوط‌ها فراهم می‌کند. ضرایب همبستگی بالای ۰,۹۹۹-۰,۹۰۰۰ برای مخلوط‌ها نشان می‌دهد که عمر خستگی پیشنهادی معادلات ارایه شده در شکل ۲ و ۳ برای تخمین رفتار عمر خستگی مخلوط‌های اصلاح شده کافی هستند.

نانوسیلیس تهیه شده با ۳ درصد ذرات نانوسیلیکا در هر دو دما، عمر خستگی بالاتری حاصل شد. در مقایسه مخلوط با کنترل، عمر خستگی مخلوط ۸۸ درصد بیشتر از مخلوط کنترل است.

کاهش سفتی مخلوط‌ها ناشی از افزایش دما نسبت داد. دمای بالاتر در مخلوط‌های آسفالتی باعث لغزش ذرات در مخلوط می‌شود که در نتیجه سفتی نمونه‌های مخلوط را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، می‌توان مشاهده کرد که با مخلوط کامپوزیت

جدول ۵. ضرایب عمر خستگی نمونه‌ها

	k	n	R2
Control Mix T20	8218	-0.325	0.913
Control Mix T30	7020	-0.306	0.952
PP1%NST20	59292	-0.484	0.999
PP1%NST30	16290	-0.362	0.989
PP2%NST20	59292	-0.484	0.999
PP2%NST30	1112887	-0.674	0.978
PP3%NST20	179688	-0.514	0.999
PP3%NST30	56155	-0.407	0.957
PP4%NST20	57344	-0.433	0.904
PP4%NST30	322641	-0.572	0.904

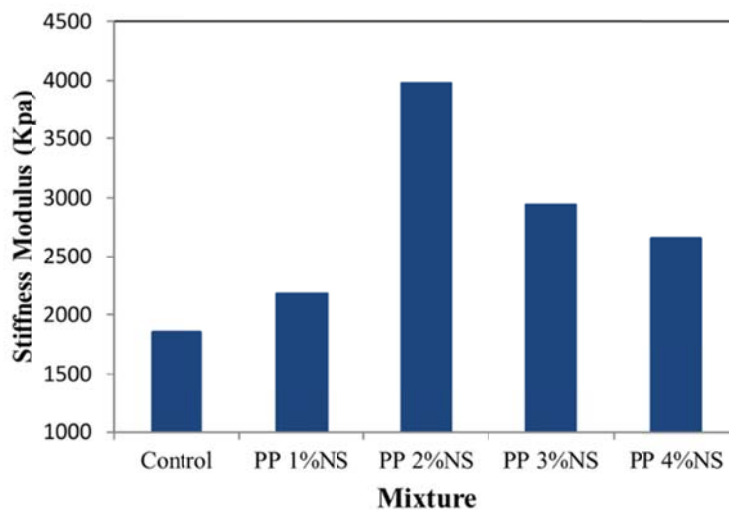


شکل ۴. نتایج عمر خستگی نمونه‌ها

۴-۳- نتایج مدول برجهندگی

این، مشاهده شد که مدول سختی مخلوط‌ها در محتوای نانوسیلیس بالاتر کاهش می‌یابد. این را می‌توان به مقدار بالای نانو سیلیس مورد استفاده در مخلوط‌ها نسبت داد. در نتیجه، اثرات تجمع نانوسیلیکا ناشی از پراکندگی نامناسب ذرات نانوسیلیس در مخلوط اصلاح‌شده، عملکرد چسب اصلاح‌شده را بدتر می‌کند. گزارش شده است که مدول سختی مخلوط‌های نانو آسفالت اصلاح شده کاهش می‌یابد و ویسکوزیته در غلظت‌های بالاتر افزایش می‌یابد. در نتیجه افزایش ویسکوزیته و کاهش سختی، چسبندگی بین سنگدانه‌ها و بایندر کاهش می‌یابد و باعث می‌شود که سنگدانه‌ها در مخلوط به راحتی بلغزند. بنابراین مدول سختی مخلوط آسفالت به طور قابل توجهی کاهش یافت. این همچنین در نتایج آزمایش خزش پویا تأیید شد.

شکل ۵ ITSM به دست آمده از میانگین سه نمونه برای هر مخلوط را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود مخلوط‌های اصلاح شده کامپوزیتی مدول سختی نسبتاً بیشتری نسبت به مخلوط کنترل دارند. مدول سختی مخلوط‌ها با افزایش محتوای نانو سیلیس در مخلوط تا ۳ درصد افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که مخلوط کامپوزیتی حاوی ۲ درصد نانوسیلیس بالاترین مدول سختی را در مقایسه با سایر مخلوط‌های اصلاح‌شده کامپوزیت نشان می‌دهد. مخلوط ۵۳٪ NS ۲٪ PP و ۴۵٪ افزایش در مدول سختی را در مقایسه با کنترل و مخلوط ۱٪ NS ۱٪ PP نشان می‌دهد. این نشان می‌دهد که مخلوط در مقایسه با سایر مخلوط‌ها توانایی پخش بار بالاتر و مقاومت بیشتری در برابر سایر عیوب روسازی خواهد داشت. علاوه بر



شکل ۵. نتایج مدول برجهندگی

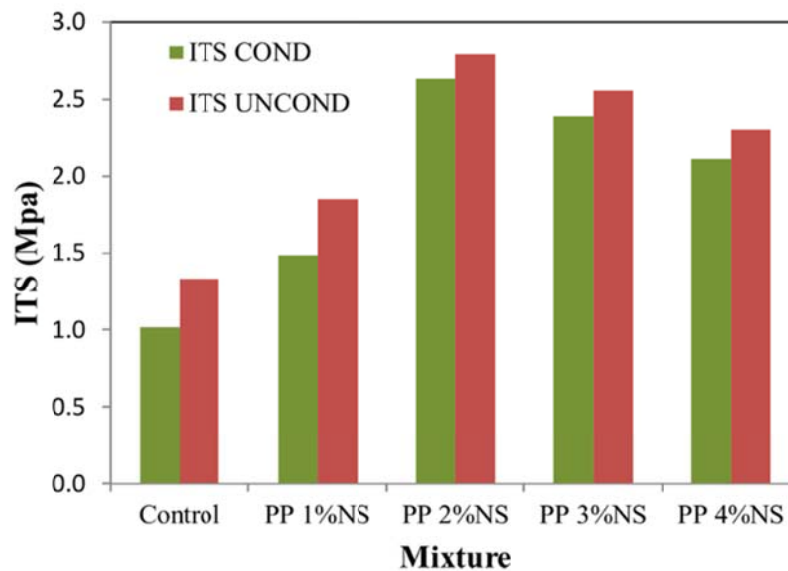
۴-۴- مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها

این نشان داد که نانو سیلیس تأثیر مثبتی بر بهبود مقاومت کششی مخلوط‌های کامپوزیتی دارد. مشاهده شد که نمونه‌های شرطی شده مقادیر ITS را در مقایسه با نمونه‌های غیرشرطی کمی پایین‌تر داشتند. کاهش ITS نمونه‌های شرطی شده را می‌توان به از دست دادن چسبندگی در مخلوط یا از دست دادن چسبندگی در بایندر اصلاح شده ناشی از قرار گرفتن طولانی‌تر

استحکام کششی غیرمستقیم یکی از بهترین روش‌هایی است که استحکام مخلوط آسفالتی را هنگام قرار گرفتن در معرض کشش اندازه‌گیری می‌کند. شکل ۶ نتایج استحکام کششی غیرمستقیم را برای مخلوط‌های اصلاح شده شرطی و غیرشرطی نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود مخلوط‌های کامپوزیت نانو سیلیس دارای مقادیر ITS بالاتری نسبت به مخلوط‌های شاهد هستند.

غیرشرطی نشان می‌دهد که افزودن نانو سیلیس به مخلوط‌های PP، به دلیل افزایش چسبندگی و پیوندهای چسبندگی بین بایندر و سنگدانه‌ها، به راحتی اجازه جابه‌جایی بایندر قیر پوشش داده شده بر روی سطح سنگدانه را نمی‌دهد. این افزایش مقاومت بهتری در برابر آسیب‌های ناشی از دما مانند ترک خوردگی خستگی ایجاد می‌کند.

نمونه‌ها در معرض رطوبت نسبت داد. همچنین می‌توان مشاهده کرد که مخلوط حاوی ۲ درصد نانو سیلیس، حداکثر افزایش ITS را نشان می‌دهد که حدود ۵۲ درصد بیشتر از مخلوط‌های شاهد بود. از سوی دیگر مشاهده می‌شود که در مخلوط‌های حاوی ۳٪ و ۴٪ نانو سیلیس کاهش مقادیر ITS وجود دارد. کاهش در مقدار ITS مشاهده شده ممکن است به کاهش سفتی مخلوط‌ها به دلیل غلظت بالای نانو سیلیس نسبت داده شود. تفاوت کوچک مشاهده شده بین نمونه‌های شرطی شده و

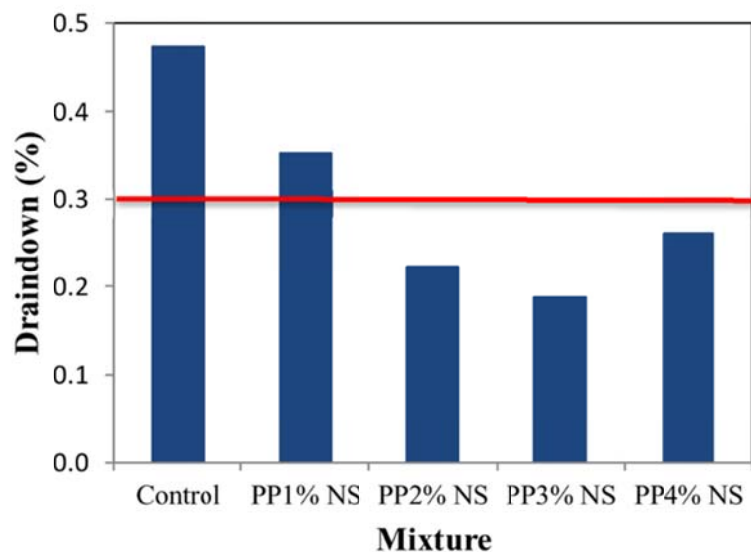


شکل ۶. نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها

۴-۵- نتایج ریزش قیر

مجاز ۰٫۳ درصد هستند. مخلوط اصلاح‌شده پلیمری شاهد بالاترین میزان زه‌کشی ۰٫۳۸ درصد را نشان می‌دهد در حالی که نانوکامپوزیت پلیمری حاوی ۳ درصد NS کمترین مقدار زه‌کشی ۰٫۰۹ درصد را نشان می‌دهد، این بیشتر تأیید می‌کند که محتوای نانو سیلیس چسبندگی و کاهش زه‌کشی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با نانوکامپوزیت را افزایش می‌دهد.

شکل ۷ نتایج آزمایش زه‌کشی را برای مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با کامپوزیت نانوسیلیس نشان می‌دهد. برای کاهش اثر زه‌کشی در مخلوط‌های آسفالتی، حداکثر مقدار ۰٫۳ درصد تخلیه بایندر برای مخلوط‌های آسفالتی توصیه شد. همانطور که مشاهده می‌شود، مخلوط کنترل در مقایسه با مخلوط‌های اصلاح شده کامپوزیت نانوسیلیس، زه‌کشی بیشتری را نشان می‌دهد. همچنین مشاهده می‌شود که تمامی مخلوط‌های اصلاح شده کامپوزیت نانوسیلیس دارای زه‌کشی بایندر کمتر از حداکثر نیاز



شکل ۷. نتایج ریزش قیر نمونه‌ها

۵- نتیجه گیری

مقادیر زهکشی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با کامپوزیت نانوسیلیس است.

- غلظت بالای نانو سیلیس در مخلوط ممکن است باعث کاهش قابل توجه خواص عملکرد دمای پایین مخلوط آسفالت اصلاح شده کامپوزیت شود، همانطور که در مخلوط‌های حاوی ۴ درصد ذرات نانوسیلیس مشاهده شد. مقدار متوسط ۲٪ ذرات نانوسیلیس تقریباً تمام خواص عملکردی آزمایش شده را برآورده می‌کند.

بر اساس آزمایش عملکرد مخلوط‌های آسفالتی انجام شده در این مطالعه، نتایج زیر را می‌توان استخراج کرد:

- تست خستگی تیر خمشی نشان داد که افزودن نانو سیلیس به قیر اصلاح شده پلیمری پلی پروپیلن می‌تواند عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی را افزایش دهد. علاوه بر این، ۳ درصد نانوسیلیس تأثیر مثبتی در افزایش مقاومت به خستگی مخلوط‌ها در هر دو دما نشان داد.
- نتایج آزمایش‌های تخلیه نشان می‌دهد که نانو سیلیس تأثیر مثبتی بر مخلوط اصلاح‌شده دارد، زیرا نشان‌دهنده کاهش

۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Hot Mix Asphalt
- 2- Styrene-Butadiene-Styrene

۷- مراجع

- Khodaii, Ali, and Amir Mehrara, (2009), "Evaluation of permanent deformation of unmodified and SBS modified asphalt mixtures using dynamic creep test", *Construction and Building Materials* 23, No. 7 pp. 2586-2592.
- Li, Ruoyu, Feipeng Xiao, Serji Amirkhanian, Zhanping You, and Jia Huang, (2017), "Developments of nano materials and technologies on asphalt materials–A review." *Construction and Building Materials* 143, pp. 633-648.
- Singh, L. P., S. R. Karade, S. K. Bhattacharyya, M. Mohamed Yousuf, and Saurabh Ahalawat, (2013), "Beneficial role of nanosilica in cement based materials–A review", *Construction and building materials* 47, pp.1069-1077.
- Zhao, Sheng, Baoshan Huang, Xiang Shu, and Mark Woods, (2013), "Comparative evaluation of warm mix asphalt containing high percentages of reclaimed asphalt pavement." *Construction and Building Materials* 44, pp.92-100.
- Zhang, Xiao-Ning, G. Zou, Shao-Huai Wang, and Duan-Yi Wang, (2004), "Evaluating the resistance to reflective cracking of asphalt mixtures in south china", *SATC* 2004.
- Aboufoul, Mustafa, and A. Garcia, (2017), "Factors affecting hydraulic conductivity of asphalt mixture", *Materials and Structures* 50, pp.1-16.
- Amini, Behnam, Mohammad Javad Rajablookat, Ali Abdi, and Reza Salehfard, (2017), "Investigating the influence of using nano-composites on storage stability of modified bitumen and moisture damage of HMA", *Petroleum Science and Technology* 35, No. 8, pp.800-805.
- Bala, N., and I. Kamaruddin, (2016), "Physical and storage stability properties of linear low density polyethylene at optimum content", In *Engineering Challenges for Sustainable Future: Proceedings of the 3rd International Conference on Civil, Off shore and Environmental Engineering (ICCOEE 2016, Malaysia, 15-17 Aug)*, CRC Press, p. 395.
- Baldi-Sevilla, Alejandra, Jose Pablo Aguiar-Moya, Adriana Vargas-Nordbeck, and Luis Loria-Salazar. (2017), "Effect of aggregate-bitumen compatibility on moisture susceptibility of asphalt mixtures", *Road Materials and Pavement Design* 18, No. sup2, pp. 318-328.
- Hafeez, I., M. A. Kamal, M. W. Mirza, and S. Bilal, (2013), "Laboratory fatigue performance evaluation of different field laid asphalt mixtures", *Construction and Building Materials* 44, pp.792-797.

The Effect of Nano Materials and Waste Polymer on the Performance of Bitumen and Asphalt Mixture

*Hamin Chobdar, Department of Civil Engineering, Malard Branch,
Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.
Amin Farajollahi, Department of Civil Engineering, Malard Branch,
Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.
Alireza Ameli, Department of Civil Engineering, Malard Branch,
Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.*

E-mail: amelii@gmail.com

Received: March 2023- Accepted: August 2023

ABSTRACT

The goal of the current investigation was to determine how nanosilica particles affected the performance parameters of asphalt binders treated with polymers. In this investigation, nanosilica particles and polypropylene polymer were added at concentrations ranging from 0% to 4% to regulate 80/100 binder. By weight, polypropylene polymer and nanosilica particles were added to the total bitumen content. To assess the impact of nanosilica particles, asphalt performance tests such as the flexural four point beam fatigue test, indirect tensile strength, indirect tensile stiffness modulus, and draindown tests are carried out. The study's findings demonstrate that adding nanosilica particles to a modified polypropylene polymer binder increases its resistance to fatigue. This suggests that the performance characteristics of binders modified with polymers are significantly improved by nanosilica particles. The outcome also shows that bitumen modifiers made of thermoplastic polymer polypropylene and nanosilica particles enhance the functionality and longevity of asphalt mixes.

Keywords: Polypropylene Fatigue Cracking Stiffness Modulus Modified Asphalt Draindown