

ارزیابی آزمایشگاهی مخلوط آسفالتی نیمه گرم اصلاح شده با ضایعات پلیمر و نانوسیلیس

مقاله علمی - پژوهشی

حامین چوبدار، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران
امین فرج اللهی، 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: ۱۴۰۱/۰۹/۱۴ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۸

صفحه ۲۶۰-۲۵۱

چکیده

تحقیق حاضر ویژگی های مخلوط آسفالت نیمه گرم (WMA^1) حاوی پلیمر پلی پروپیلن (PP^2) و ذرات نانو سیلیس (NS^3) را مورد بررسی قرار داد و نوع WMA مورد استفاده قرار گرفت. WMA اصلاح نشده و WMA اصلاح شده حاوی ۳٪ PP و ۵-۲٪ NS وزن کل قیر. تست های عملکردی که برای ارزیابی عملکرد انجام می شوند عبارتند از: تست مقاومت در برابر رطوبت، تست مقاومت شیارشدگی و تست مقاومت در برابر خستگی. نتایج به دست آمده نشان می دهد که افزودن نانو سیلیس و پلی پروپیلن باعث بهبود عملکرد WMA می شود. همچنین نتایج نشان می دهد که افزودن نانو سیلیس و پلی پروپیلن به عنوان اصلاح کننده آسفالت باعث افزایش دوام و بهبود عملکرد مخلوط آسفالت گرم می شود.

واژه های کلیدی: آزمایش مقاومت خستگی، آزمایش حساسیت رطوبتی، نانوسیلیس، پلیمر پلی پروپیلن، مخلوط آسفالت نیمه گرم

۱- مقدمه

چسبندگی بین ذرات قیر و سنگدانه که ممکن است در کاهش رطوبت و مقاومت شیارشدگی منعکس شود، به عنوان نقطه ضعف در نظر گرفته می شود. مطالعات مختلف نشان داده است که مخلوط های WMA می توانند خواصی مشابه و حتی بالاتر از HMA داشته باشند. از سوی دیگر، چندین مطالعه نشان داد که عملکرد مخلوط های WMA عمدتاً در شیارشدگی و مقاومت و آسیب رطوبت کمتر از مخلوط های HMA است (Hettiarachchi et al, 2019; Zhao et al, 2012; Mallick et al, 2011). اصلاح مخلوط های آسفالتی با استفاده از انواع مختلف پلیمر را یکی از روش های متداول برای افزایش طول عمر و بهبود عملکرد می دانند. افزودن پلیمر به مخلوط آسفالت انسجام بین آسفالت و سنگدانه را افزایش می دهد. از سوی

با توجه به سطح دمای مورد نیاز در هنگام اختلاط فرآیند مخلوط های آسفالتی در کارخانه های آسفالت، مخلوط های آسفالتی به سه گروه آسفالت مخلوط گرم (HMA^4)، آسفالت مخلوط گرم (WMA) و آسفالت مخلوط سرد طبقه بندی شدند. فناوری WMA استفاده از انواع مختلف افزودنی ها در مخلوط های آسفالتی را در حین اختلاط خلاصه می کند تا دمای اختلاط را از طریق کاهش ویسکوزیته با عمل کف کردن (پاشش آب)، علاوه بر افزایش کارایی در حین حمل و تراکم در دماهای پایین، کاهش دهد. این کاهش دما باعث کاهش سطح اکسیداسیون قیر می شود که می تواند منجر به افزایش مقاومت در برابر خستگی و اکسیداسیون شود. در همین حال، نرخ دمای پایین تر برای مخلوط های WMA به دلیل کاهش

ضایعاتی (پلی پروپیلن) می‌پردازد که می‌توان از ضایعات روزانه با افزودن نانو سیلیس با محتوای کمتر (۲ تا ۵ درصد) به دست آورد (Prowell et al, 2007; Kim et al, 2012; Yu et al, 2015; Arabani et al, 2015).

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

۲-۱-۱- مصالح سنگی

قیر با درجه نفوذ (۵۰/۴۰) دارای فیزیکی خواص نشان داده شده در جدول ۱، برای تهیه انواع مخلوط آسفالت مورد استفاده قرار گرفت. خواص نانو سیلیس در جدول ۲ آمده است. سنگدانه‌های درشت مورد استفاده در این تحقیق دانه بندی سنگدانه‌های درشت بین ۱۹ میلی‌متر تا ۴٫۷۵ میلی‌متر متغیر بود. سنگدانه‌های ریز خرد شده و شن و ماسه طبیعی، با دانه‌بندی از عبور از ۴٫۷۵ میلی‌متر تا مانده بر روی الک شماره ۲۰۰ (۰٫۰۷۵ میلی‌متر) بود. دانه‌بندی سنگدانه‌های مورد استفاده برای تهیه مخلوط آسفالتی است در جدول ۳ ارایه شده است. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مصالح سنگی در جداول ۴ و ۵ آورده شده است. در نهایت، سه نوع کلی از افزودنی‌ها جهت تولید WMA وجود دارد از جمله: افزودنی‌های آلی مانند Sasobit، افزودنی‌های شیمیایی مانند Evethorm، و افزودنی‌های کف‌دار مانند Asphamin هستند. در مطالعه حاضر، نوع افزودنی مورد استفاده Aspha-min برای تولید مخلوط‌های نیمه گرم می‌باشد و روش استفاده شده برای افزودن این افزودنی فرآیند خشک بود.

دیگر، محققان تأثیر قابل توجه استفاده از نانومواد با پلیمرها را در افزایش خواص آسفالت به دلیل ویژگی‌های عالی مانند اندازه ذرات کوچک نانومواد نشان دادند که باعث می‌شود آنها به سادگی با قیر ترکیب شوند و هماهنگ‌تر شوند. همچنین ترکیب نانومواد با پلیمر معمولاً مقرون به صرفه‌تر است زیرا هم میزان پلیمرها و هم نانومواد را کاهش می‌دهند و هم سازگاری پلیمرها با آسفالت را افزایش می‌دهند. نانو اکسید روی، نانولوله های کربنی، نانو اکسید سیلیسیم، دی اکسید تیتانیوم، نانو خاک رس، نانو کلسیم، نانو مواد رایجی هستند که در اصلاح مخلوط‌ها استفاده می‌شوند. در میان این نانو مواد، نانو سیلیس به دلیل واکنش زیاد بین مواد سیلیسی و قیر که منجر به توانایی پراکندگی بالاتر نانو سیلیس و پلیمرها می‌شود، عموماً در ترکیبات نانوکامپوزیت پلیمری در داخل قیر استفاده می‌شود (Ali et al, 2014; Barthel et al, 2004;).

امروزه یک آگاهی بین‌المللی در مورد آن وجود دارد ضرورت توسعه پایدار مانند استفاده از مواد پلیمری بازیافتی از ضایعات به عنوان اصلاح کننده قیر.

پلی پروپیلن یکی از رایج‌ترین انواع پلیمرهای ضایعاتی است که از مواد زائد روزانه به دست می‌آید و به عنوان اصلاح کننده مخلوط آسفالتی از طریق فرآیند مرطوب در محدوده (۳-۵) درصد استفاده شده است. اصلاح WMA در مطالعات قبلی شامل استفاده از موادی مانند پلیمر (استایرن بوتادین استایرن^۳ (SBS)، لاستیک استایرن بوتادین (SBR)، عامل ضد نوار (عوامل مایع)، سیمان پرتلند، آهک هیدراته و غیره بود. که مواد گران قیمت هستند. عملکرد WMA بهبود یافته بود، اما نتایج دلگرم کننده نبود زیرا هزینه اصلاح را افزایش می‌داد. به همین دلیل، مطالعه حاضر به بررسی استفاده از پلیمر

جدول ۱. خصوصیات قیر خالص استفاده شده

خواص	قیر ۴۰/۵۰	روش آزمایش
ویسکوزیته	۰٫۶۴	-
درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی‌گراد	۴۷	ASTM D-5
نقطه نرمی (درجه سانتی‌گراد)	۵۱	ASTM D-36
انگمی در ۲۵ درجه سانتی‌گراد	+۱۰۰	ASTM D-113
نقطه اشتعال	۲۳۵	ASTM D-92

جدول ۲. مشخصات نانو سیلیس

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)

جدول ۳. دانه بندی سنگدانه ها

اندازه الک (میلی متر)	۱۹	۱۲٫۵	۹٫۵	۴٫۷۵	۲٫۳۶	۰٫۳	۰٫۰۷۵
درصد عبوری (%)	۱۰۰	۹۵	۸۵	۶۵	۵۲	۱۳	۷

جدول ۴. خصوصیات مصالح سنگی

آزمایشات سنگ	نتایج	استاندارد
وزن مخصوص حقیقی	۲٫۴۹۳	ASTM C127
سایش مصالح درشت دانه (%)	۲٫۲	ASTM C127
سایش مصالح ریزدانه (%)	۴٫۲	ASTM C128
سایش لس آنجلس (%)	۲۲٫۳	AASHTO T96
درصد شکستگی در دو وجهه (%)	۹۴	ASTM D5821

جدول ۵. خصوصیات شیمیایی مصالح

نوع	درصد اکسید (%)							
	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SiO ₂	MnO
مصالح آهکی	۴۳	۰٫۰۷	۰٫۶۵	۲٫۱۲	۰٫۹۵	۰٫۷۵	۱۷٫۵۳	۰٫۰۴۶

قیر در مخلوط SMA^۱، بهتر است بر اساس توصیه No 425 8NCHRP (Brown and Cooley, 1999) از الیاف سلولز ۰٫۳٪ استفاده شود. ویژگی های الیاف کاربردی در جدول ۵ ارایه شده است.

ضایعات پلی پروپیلن مورد استفاده در این مطالعه از یک کارخانه بازیافت پلاستیک زباله در جویبار مازندران به صورت قطعات کوچک به دست آمد. این پلاستیک ضایعاتی شسته شد و سپس به پودر تبدیل شد و روی الک شماره ۵۰ الک شد. جدول ۴ خواص آن را نشان می دهد. برای از بین بردن ریزش

جدول ۴. مشخصات پلی پروپیلن

Property	Results
Melting temperature	160
Specific gravity	0.91
Maximum particle size after grinding and sieving (mm)	0.3

جدول ۵. خصوصیات فیبر

نتایج	خصوصیات
۸۰	درصد سلولز (%)
۱.۱	میانگین طول فیبر (میلی متر)
۰.۰۴۵	میانگین ضخامت (میلی متر)
۷.۵	PH مقدار ۵ گرم در ۱۰۰ میلی لیتر
۰.۵	وزن مخصوص (گرم بر سانتی متر)

۲-۲-۱- افزودنی های WMA

برای ارزیابی تاثیر مواد WMA بر رفتار رئولوژیکی قیر، از ماده WMA از آسفامین استفاده شد. ویژگی های اصلاح کننده های گرم در جدول ۶ نشان داده شده است. درصد یک افزودنی خاص با توصیه سازنده انتخاب شده است.

جدول ۶. خصوصیات افزودنی های نیمه گرم

آسفامین	خصوصیات
هیدروکربن های اشباع شده جامد	مواد تشکیل دهنده
پاستیلی	حالت فیزیکی
قهوه ای	رنگ
بدون بو	بو
۱۰۰۰ گرم بر مول	وزن مولکولی
۰.۹ (۲۵ سانتی گراد)	وزن مخصوص
-	چگالی بخار
-	چگالی حقیقی
خشتی	مقادیر pH
-	نقطه جوش
[ASTM D۹۲, ۲۰۱۲] ۲۸۵ سانتی گراد	نقطه اشتعال
۱۰۰ سانتی گراد	نقطه ذوب
-	ویسکوزیته
غیر حلال	حلالیت در آب

۲-۲-۲- آماده سازی نمونه ها

دستگاه مخلوط کن مخصوص با سرعت اختلاط ۳۵۰۰ دور در دقیقه و دمای اختلاط ۱۵۰ درجه سانتی گراد برای اختلاط مواد اصلاح کننده با قیر استفاده شد. درصد بهینه قیر یافت شده از WMA کنترل برای WMA اصلاح شده برای حذف اثر درصدهای مختلف آسفالت بر تحلیل و بررسی نتایج استفاده شد.

سه نوع مخلوط آسفالتی با روش طرح اختلاط مارشال ساخته شد. نوع اول HMA بود، نوع دوم WMA اصلاح نشده بود، در حالی که نوع سوم WMA اصلاح شده بود. مخلوط WMA اصلاح شده با استفاده از قیر اصلاح شده پلیمر/نانو سیلیس تهیه شد. قیر اصلاح شده با افزودن ۳ درصد پلی پروپیلن - پلیمر به قیر تهیه شد. هنگامی که پلیمر کاملاً ذوب شد، نانو سیلیس با نرخ (۲-۵) درصد وزنی قیر اضافه شد.

۳-روش کار آزمایش

۳-۱-آزمایش کشش غیر مستقیم

آزمایش برای ارزیابی عمر خستگی نیز استفاده کرد. آزمایش کششی غیرمستقیم براساس آیین نامه ASTM D6931-12 با نرخ ثابت ۵۰/۸ میلی متر بر دقیقه و دمای ۲۰ درجه سانتی گراد انجام شد. مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌ها با استفاده از معادله زیر تعیین شد:

$$ITS = (2P_{max}) / (\pi Dt) \quad (1)$$

حسب میلی متر، t ارتفاع نمونه‌ها بر اساس میلی متر می‌باشد. همچنین می‌توان از این آزمایش برای ارزیابی عمر خستگی نیز استفاده کرد.

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 پیش‌بینی ظهور ترک‌ها در مخلوط آسفالتی استفاده می‌شود. همچنین می‌توان از این

که ITS: مقاومت کششی نمونه‌ها بر حسب P_{max} , Kpa بار اعمالی در زمان شکست بر حسب D , kN قطر نمونه‌ها بر

۳-۲-شمار جای چرخ

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. 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 سانتی گراد انجام شده است. نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت قبل از آزمایش در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد 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.

جهت تعیین مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر شیارشدگی آزمایش شیار جای چرخ انجام شد. برای هر نوع مخلوط سه نمونه مارشال در دستگاه قرار می‌گیرد و توسط دو چرخ که حول مرکزشان دوران می‌کنند با فشار حدود ۱۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع مورد بارگذاری قرار می‌گیرند. فرکانس بارگذاری برای هر نمونه ۱ هرتز و دمای آزمایش ۵۰ درجه سانتی گراد است. در مجموع نمونه‌ها تحت ۸۰۰ سیکل بارگذاری قرار گرفتند و پس از آن بیشینه عمق شیار، در هر نمونه اندازه‌گیری و میانگین سه نمونه به عنوان عمق شیار هر مخلوط به دست آمد.

۳-۳-آزمایش تیر خمشی چهار نقطه‌ای خستگی

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

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

$$\sigma = \frac{G_0 P}{Bh^2} \quad (3)$$

$$S = \frac{1000\sigma}{\varepsilon} \quad (4)$$

تیر (میلی‌متر)، S مدول سختی تیر (مگا پاسکال). 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:

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

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

تعداد کل سیکل های بارگذاری تا شکست با استفاده از معادله زیر به دست می‌آید: (۶)

$$N_f = K \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^n$$

جایی که در آن N_f تعداد سیکل های بارگذاری تا شکست، ε کرنش اعمال شده، K و n ضرایب مربوط به مشخصات مخلوط می‌باشد.

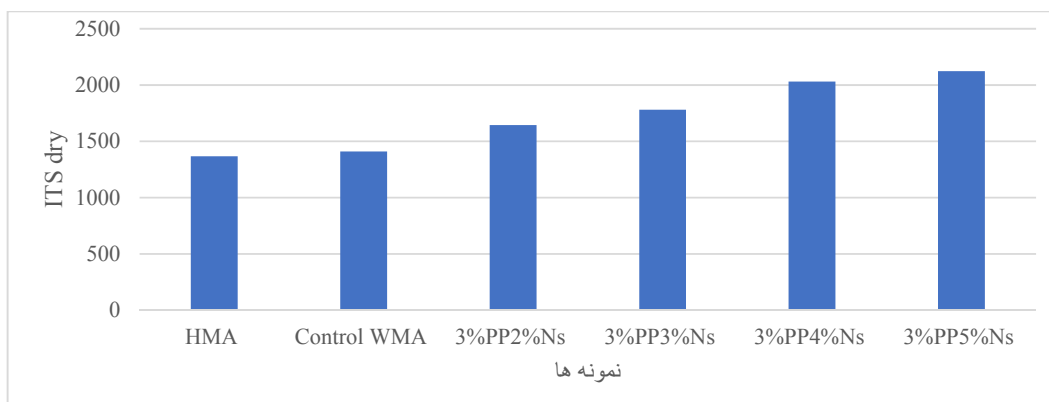
۴- نتایج

آسفالتی خلاصه می‌کند. همانطور که در شکل نشان داده شده است، مقدار TSR برای HMA بالاتر از مقدار TSR برای WAM اصلاح نشده بود.

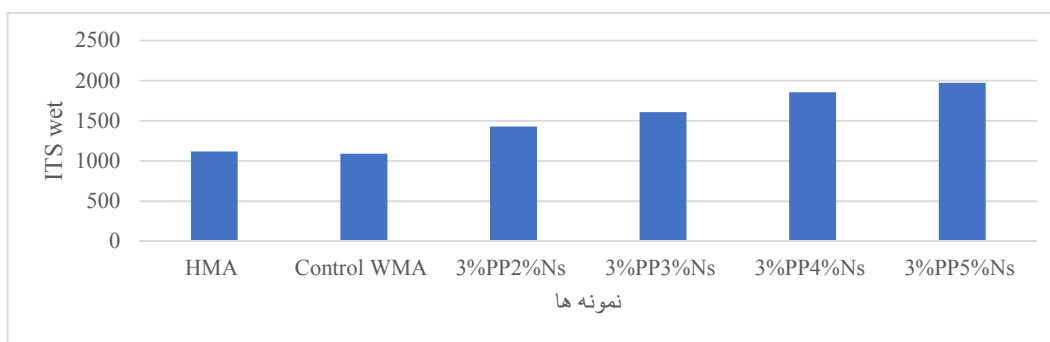
به این معنی که WMA به رطوبت حساس‌تر است، برای WMA اصلاح شده، مقادیر TSR افزایش یافته است.

این نشان داد که پلی پروپیلن و نانو سیلیس نقش مهمی در بهبود مقاومت کششی از طریق ایجاد نیروهای پیوند بین آسفالت و سنگدانه دارند. این بهبود مقاومت بهتری در برابر آسیب‌های ناشی از رطوبت ایجاد می‌کند.

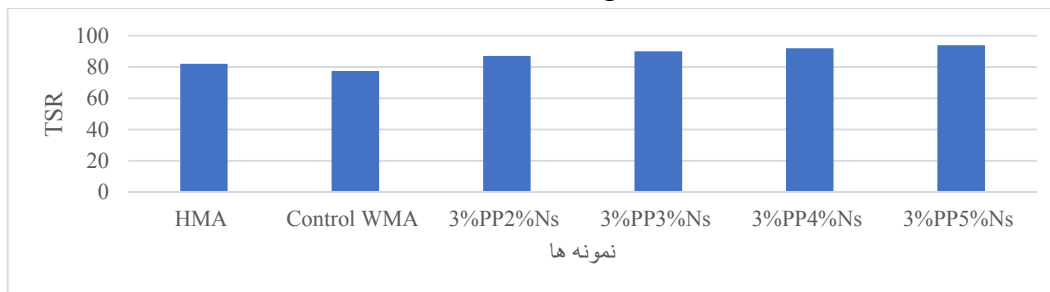
پس از اعمال آزمایشات آزمایشگاهی که قبلاً توضیح داده شد، نتایج زیر به دست آمد. شکل‌های ۱ و ۲ مقادیر ITS^۱ را برای مخلوط‌های آسفالتی HMA و WMA نشان می‌دهد. از اشکال می‌توان دریافت که WMA اصلاح شده دارای مقادیر ITS بالاتری نسبت به WMA کنترل است. در همین حال، نمونه‌های مرطوب دارای مقادیر ITS کمتری نسبت به مقادیر ITS نمونه‌های خشک بدون توجه به نوع WMA بودند. این آسیب رطوبت نامیده می‌شود و با مقادیر TSR اندازه‌گیری می‌شود. شکل ۳ مقادیر TSR را برای مخلوط‌های



شکل ۱. نتایج آزمایش مقاومت کششی در حالت خشک



شکل ۲. نتایج مقاومت کششی در حالت تر



شکل ۳. نتایج نسبت مقاومت کششی

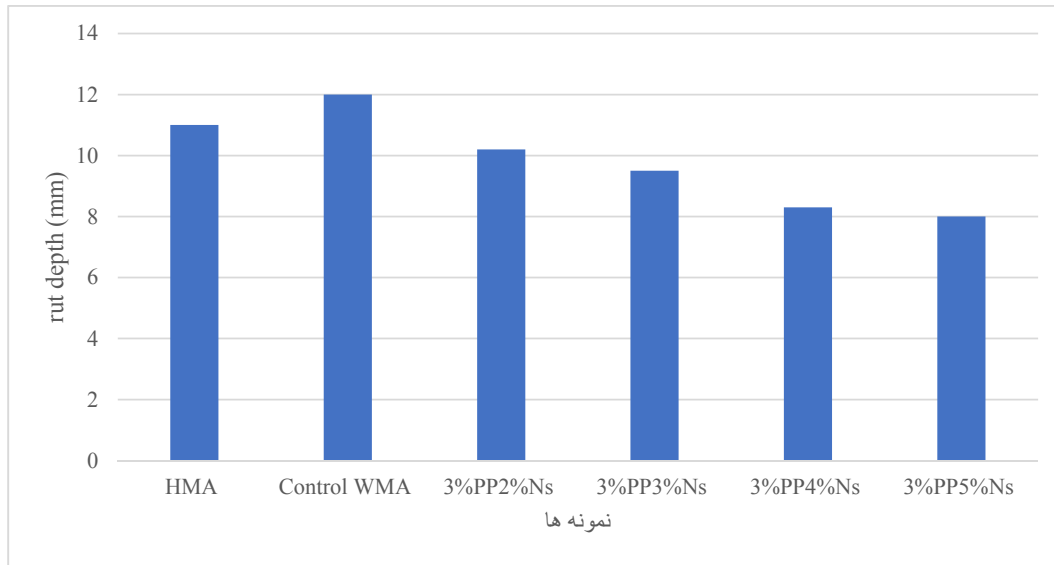
جدول ۷. پارامترهای رگرسیون خستگی

	k	n	R2
HMA	7219	-0.328	0.92
Control WMA	8321	-0.306	0.952
3%PP2%Ns	57293	-0.404	0.999
3%PP3%Ns	179688	-0.514	0.957
3%PP4%Ns	324461	-0.572	0.994
3%PP5%Ns	1132778	-0.674	0.998

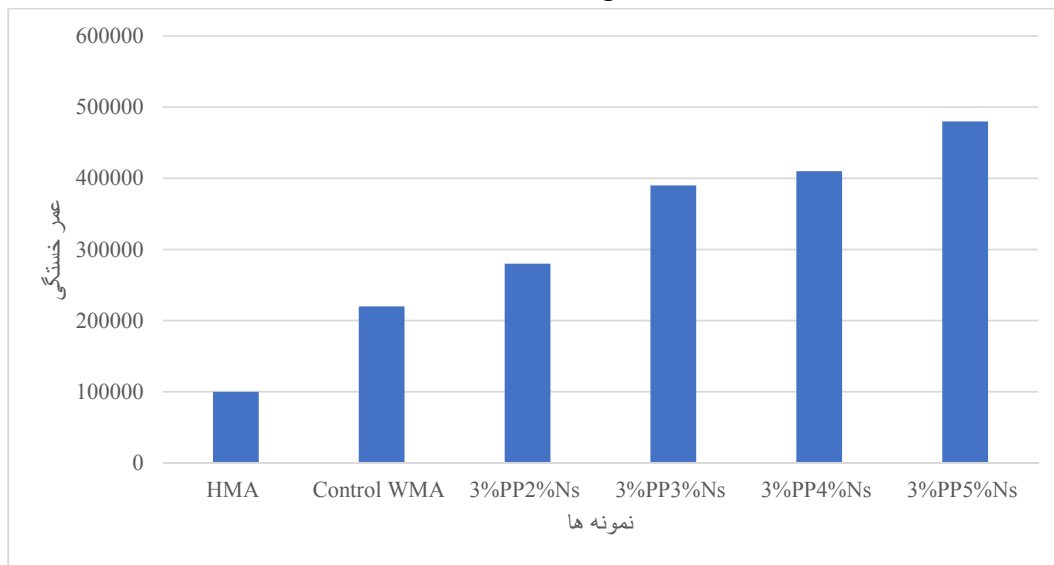
اصلاح شده کمترین مقدار n و بالاترین مقدار k را دارد. این بدان معنی است که اصلاح WMA با استفاده از پلیمر و نانو سیلیس می‌تواند مقاومت خستگی را افزایش دهد زیرا مقادیر k بالاتر و مقادیر n کمتر به معنای مقاومت در برابر خستگی بیشتر است. تعداد کل چرخه‌های بار تا شکست ارایه شده در شکل ۳، همانطور که نشان داده شده است، با افزایش محتوای نانو سیلیس، تعداد بار چرخه‌ها برای WMA اصلاح شده افزایش یافت.

این را می‌توان به انرژی سطحی نانو سیلیس نسبت داد که از تجمع ذرات پلیمری در مخلوط جلوگیری می‌کند و باعث افزایش کشش و چسبندگی آسفالت به سنگدانه‌ها می‌شود. به طور کلی، اضافه کردن NS مواد اثر مثبتی بر حساسیت به رطوبت شیارشدگی و مقاومت در برابر خستگی دارد.

شکل ۴ نتایج آزمایش شیار جای چرخه‌ها نشان می‌دهد که عمق شیار برای HMA کمتر از WMA اصلاح نشده بود. این را می‌توان به دمای اختلاط پایین‌تر نسبت داد که از خشک شدن سنگدانه جلوگیری می‌کند و باعث از دست رفتن چسبندگی بین سنگدانه و چسب می‌شود و در نتیجه مخلوط‌هایی که به رطوبت و شیاردار شدن حساس‌تر هستند. از سوی دیگر، مقادیر عمق شیار برای WMA اصلاح شده کاهش یافت. این نشان دهنده تأثیر مثبت نانو سیلیس و پلی پروپیلن بر مقاومت شیارشدگی است. این بهبود مقاومت در برابر شیار به دلیل افزایش نیروی چسبندگی و جلوگیری از لغزش آسان ذرات سنگدانه در زیر فشار بود. بارها، بنابراین تغییر شکل‌های دائمی کاهش می‌یابد. در نهایت نتایج آزمون خستگی در جدول ۷ و شکل ۵ نشان داده شده است. جدول ۷ ضرایب خستگی را ارایه می‌کند که نشان می‌دهد WMA



شکل ۴. نتایج عمق شیار نمونه‌ها



شکل ۵. نتایج عمر خستگی نمونه‌ها

۵- نتیجه‌گیری

اصلاح WMA شده با افزایش محتوای نانو سیلیس کاهش یافت. حداقل عمق شیار ثبت شده برای WMA حاوی نانو سیلیس در محدوده (۴-۵) درصد است. تعداد چرخه‌های بارگذاری (Nf) در تست خستگی برای اصلاح شده با افزایش نانو سیلیس افزایش یافت. این افزایش Nf n به وضوح اثرات برتر پلیمر/نانو سیلیس را بر مقاومت در برابر خستگی نشان داد.

با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایشات فوق، نتایج اصلی عبارتند از:

- نتایج آزمون مقاومت در برابر آسیب رطوبت نشان داد که اصلاح WMA توسط پلی پروپیلن و نانو سیلیس باعث ایجاد مقاومت در برابر رطوبت می‌شود. اصلاح شده WMA با ۵٪ Ns بالاترین مقدار TSR را داشت.

- نتایج آزمون ردیابی چرخه‌ها نشان داد که اصلاح WMA بر مقاومت شیاردار تأثیر مثبت دارد. عمق شیار برای

۶- پی‌نوشت‌ها

- 1-Warm Mix Asphalt
- 2-Polypropylene
- 3-Nano Silica
- 4- Hot Mix Asphalt
- 5- Styrene-Butadiene-Styrene
- 6- Syrene Butadiene Rubber
- 7- Stone Matrix Asphalt
- 8- National Cooperative Highway Research Program
- 9- Indirect Tensile Strength

۷- مراجع

- laboratory-field evaluation." *Construction and Building Materials* 31, pp. 204-211.
- Mallick, Rajib B., Mingjiang Tao, Bao-Liang Chen, Karen O'sullivan, and Peter Cacciatore, (2011), "Practical method to understand the effect of aggregate drying on the moisture content of hot-mix asphalt", *Transportation research record* 2208, No. 1, pp.90-96.
- Prowell, Brian D., Graham C. Hurley, and Everett Crews, (2007), "Field performance of warm-mix asphalt at national center for asphalt technology test track", *Transportation Research Record* 1998, No. 1, pp.96-102.
- Yu, Ruien, Changqing Fang, Pei Liu, Xiaolong Liu, and Yan Li., (2015), "Storage stability and rheological properties of asphalt modified with waste packaging polyethylene and organic montmorillonite", *Applied Clay Science* 104, pp.1-7.
- Zhao, Wenbin, Feipeng Xiao, Serji N. Amirkhanian, and Bradley J. Putman, (2012), "Characterization of rutting performance of warm additive modified asphalt mixtures." *Construction and Building Materials* 31, pp.265-272.
- Arabani, Mahyar, Seyed Amid Tahami, and Gholam Hossein Hamed, (2018), "Performance evaluation of dry process crumb rubber-modified asphalt mixtures with nanomaterial", *Road Materials and Pavement Design* 19, No.5, pp.1241-1258.
- Ali, Ayman, Ala Abbas, Munir Nazzal, Ahmad Alhasan, Arjun Roy, and David Powers, (2014), "Workability evaluation of foamed warm-mix asphalt", *Journal of materials in civil engineering* 26, No. 6,04014011.
- Barthel, W., J. P. Marchand, and M. Von Devivere, (2004), "Warm asphalt mixes by adding a synthetic zeolite", In *Proceedings Of the 3rd Eurasphalt and Eurobitume Congress Held Vienna, May, Vol. 1.*
- Hettiarachchi, Chamod, Xiangdao Hou, Jiayu Wang, and Feipeng Xiao, (2019), "A comprehensive review on the utilization of reclaimed asphalt material with warm mix asphalt technology", *Construction and Building Materials* 227, 117096.
- Kim, Yong-Rak, Jun Zhang, and Hoki Ban, (2012), "Moisture damage characterization of warm-mix asphalt mixtures based on

Laboratory Evaluation of Warm Mix Asphalt Mixture Containing Waste Polymer and Nanosilica

*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 current study examined the properties of warm mixture asphalt (WMA), which contains nano- and polypropylene polymer (PP) polymers. Unmodified WMA and modified WMA both include 3% PP and NS (2–5%) by weight of asphalt respectively. The tests used to assess performance include the tests for fatigue resistance, rutting resistance, and moisture resistance. The results show that adding Nano-silica and Polypropylene enhances WMA performance. The results also show that adding polypropylene and nano-silica to asphalt as modifiers increases the asphalt's performance and durability.

Keywords: Fatigue Resistance Test; Moisture Resistance Test; Nano-Silica; Rutting Resistance Test; Warm Mixture Asphalt; Polypropylene