

ارزیابی خصوصیات شیمیایی، فیزیکی و رفتار خستگی قیرهای اصلاح شده با نانوسیلیکا و پلی‌یورتان سنتز شده

مانا معتمدی، دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

غلامعلی شفافبخش*، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

محمد آزادی، استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

Email: ghshafabakhsh@semnan.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۰۱ - پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۰۱

چکیده

روسازی آسفالتی راه‌ها متشکل از قیر، سنگدانه و فیلر می‌باشد. قیر نقش مهمی در خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی داشته و از این جهت شناسایی رفتار آن حائز اهمیت است. بتن آسفالتی همچنان پرکاربردترین مصالح در ساخت جاده‌ها می‌باشد. خرابی خستگی از متداول‌ترین خرابی در راه‌ها بوده و سالانه هزینه زیادی صرف تعمیر و نگهداری راه‌ها می‌شود. اصلاح قیر یکی از روش‌های مهم جهت افزایش مقاومت روسازی در برابر خرابی می‌باشد. در این پژوهش، نانوسیلیکا و پلی‌یورتان سنتز شده با مقادیر ۳، ۵ و ۷ درصد وزنی قیر استفاده شدند. به دلیل عدم پایداری ترموپلاستیک پلی‌یورتان در قیر، از پلی‌یورتان سنتز شده استفاده شد. برای سنتز پلی‌یورتان، از ترکیب پلی‌ال و ایزوسیانات استفاده شد. برای بررسی خستگی از تست جاروب زمان استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که پلی‌یورتان سنتز شده و نانوسیلیکا عمر خستگی را بهبود بخشیدند. تأثیر پلی‌یورتان سنتز شده بر عمر خستگی به مراتب بیشتر از نانوسیلیکا بود. مقدار افزایش عمر خستگی برای نانوسیلیکا و پلی‌یورتان سنتز شده در کرنش کم $3/7$ و $4/5$ برابر بود. نتایج تست شیمیایی طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز و تست‌های فیزیکی نشان می‌دهد که تغییرات فیزیکی ایجاد شده در قیر برای پیش‌بینی خستگی به تنهایی قابل اعتماد نیست. تغییرات شیمیایی و ایجاد پیوندهای مختلف در رفتار خستگی تأثیرگذار می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: رفتار خستگی، پلی‌یورتان سنتز شده، نانوسیلیکا، تست جاروب زمان، طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز

۱. مقدمه

خستگی قیر به این روش همبستگی بالایی با نتایج خستگی مخلوط آسفالتی در آزمایشگاه دارد. آزمایش TS شامل بارگذاری‌های سیکلی تکراری در هر کدام از دو مود تنش یا کرنش کنترل شده می‌باشد که مشابه بسیاری از آزمایش‌های خستگی مخلوط آسفالتی است (جانسون، ۲۰۱۰). از مزایای استفاده از این تست می‌توان به دامنه تحلیل نتایج با روش رویکرد پدیدارشناختی، روش‌های مختلف انرژی و روش آسیب اشاره کرد.

هدف از این پژوهش، بررسی اثر تغییرات خصوصیات فیزیکی و شیمیایی بر رفتار خستگی قیرهای اصلاح شده با نانوسیلیکا و پلی‌یورتان سنتز شده با استفاده از آزمایش‌های نقطه نرمی، درجه نفوذ، ویسکوزیته، تست طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز^۲ (FTIR) و تست جاروب زمان می‌باشد.

۲. مروری بر ادبیات

اصلاح قیر به منظور کاهش خرابی در مخلوط‌های آسفالتی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در سال‌های اخیر، پژوهش‌هایی در زمینه اصلاح قیر با نانومواد صورت گرفته است (فنگ، ۲۰۱۳). نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که نانوسیلیکا تأثیر مثبتی بر بازگشت کرنش داشته و حداکثر ریکآوری برای قیر اصلاح شده با ۲٪ نانوسیلیکا اتفاق افتاده است (ارشد و همکاران، ۲۰۱۷). همچنین، مصرف نانوسیلیکا در قیر و مخلوط آسفالتی باعث افزایش خاصیت الاستیک، کاهش زاویه فاز و افزایش مدول مختلط شده است. در نتیجه، پارامتر $G^* \cdot \sin \delta$ افزایش یافته و این به معنی کاهش مقاومت در برابر خستگی می‌باشد. در این پژوهش، محققان پیشنهاد کردند تا برای تحلیل بیشتر از تست‌های TS و جاروب دامنه خطی^۳ (LAS) استفاده شود (مقدس‌نژاد و همکاران، ۲۰۱۷). در پژوهشی دیگر، آمده است که عمر خستگی

خرابی خستگی یکی از شایع‌ترین خرابی‌ها در روسازی آسفالتی بوده که بر اثر تکرار بارگذاری ایجاد می‌شود. قیر، فیلر و سنگدانه از اجزای تشکیل‌دهنده مخلوط آسفالتی بوده و عملکرد هر کدام از آن‌ها بر عملکرد مخلوط آسفالتی تأثیرگذار می‌باشند. نتیجه تحقیقات حاکی از ارتباط عمر خستگی قیر و مخلوط آسفالتی می‌باشد (صفائی و همکاران، ۲۰۱۶). از این رو، شناخت رفتار قیر می‌تواند گامی بسیار مهم در درک و شناسایی رفتار مخلوط آسفالتی باشد. اصلاح قیر یکی از بهترین روش‌ها به منظور دستیابی به مخلوط آسفالتی با مقاومت بیشتر در برابر خستگی می‌باشد. رابطه پیچیده‌ای بین ساختار شیمیایی، ساختار کلونیدی و خواص فیزیکی و رئولوژیک قیر وجود دارد. هر ماده‌ای که ساختار شیمیایی قیر را تغییر دهد، خواص قیر را نیز تغییر داده و می‌تواند نوعی اصلاح‌کننده باشد. قیر اصلاح شده ایده‌آل، قیری است که نسبت به قیر خالص چسبندگی بیشتر، حساسیت حرارتی کمتر در دامنه دماهای خدمت‌دهی و گرانیوی کافی در دمای اجرا داشته باشد. همچنین، حساسیت آن به زمان بارگذاری کم و مقاومت آن در برابر تغییر شکل پلاستیک، ترک‌های خستگی و برودتی زیاد باشد. در نهایت، خواص آن پس از پیرشدگی، برای اجرا و خدمت‌دهی مناسب باشد (برول، ۱۹۹۷). برای بررسی عمر خستگی قیر از محدود کردن پارامتر $G^* \cdot \sin(\delta)$ به ۵۰۰۰ کیلوپاسکال استفاده می‌شود (اندرسون و همکاران، ۱۹۹۴). نتایج تحقیقات بهیا و همکاران (۲۰۰۱) عدم رابطه بین عمر خستگی مخلوط و این پارامتر را تأیید کرد. در NCHRP 459 روش جدیدی برای مشخص کردن عمر خستگی قیرها توسعه پیدا کرده و تست جاروب زمان^۱ (TS) معرفی شده است. این آزمایش، قابلیت مناسبی در تخمین عمر خستگی قیر داشته و نتایج

۳- Linear amplitude sweep

۱- Time sweep

۲- Fourier-transform infrared spectroscopy

۲۰۱۳). در زمینه اصلاح قیر با پلی‌یورتان، اکثر تحقیقات به بررسی عملکرد رئولوژی و تغییرات رفتاری قیر در دمای زیاد پرداختند. تحقیقاتی در زمینه قیر اصلاح شده با پلی‌اتیلن گلیکول با وزن مولکولی کم و دی‌فنیل متان دی‌ایزوسیانات (MDI 4,4) صورت گرفته و این پلیمر با SBS مقایسه شده است. از لحاظ وزن مولکولی، هرچه وزن مولکولی ایزوسیانات مصرفی در سنتز پلی‌یورتان کمتر بوده، پلی‌یورتان تولید شده تأثیر مثبت بیشتری جهت افزایش مدول برشی مختلط و کاهش زاویه اختلاف فاز داشته است. مقدار کمی از این پلیمر تأثیر به‌سزایی در تغییر خصوصیات رئولوژی قیر در دمای زیاد داشت (ناوارو و همکاران، ۲۰۰۷). همچنین، نتایج پژوهش دیگری در زمینه پلی‌یورتان سنتز شده نشان می‌دهد که هرچه درصد افزودنی بیشتر شده، زاویه فاز کاهش بیشتری از خود نشان داده است که نشان‌دهنده افزایش خاصیت الاستیک قیر است. همچنین، تأثیر مدت فرایند اصلاح نمونه‌ها بر خاصیت الاستیک و سفتی قیر نیز تأثیرگذار بود و رئولوژی قیر طی افزایش دما تغییر کرد (ایزکوردو و همکاران، ۲۰۱۳)؛ ایزکوردو و همکاران، ۲۰۱۴).

۳. مواد و مصالح

قیر مورد استفاده در این پژوهش، قیر با درجه نفوذ ۱۰۰-۸۵ می‌باشد. افزودنی‌های مورد استفاده در این پژوهش نانوسیلیس شرکت US آمریکا و پلی‌یورتان سنتز شده (ترکیب یک پلی‌ال و ایزوسیانات) می‌باشد. نام‌گذاری قیرهای مورد استفاده در این پژوهش به شرح جدول ۱ می‌باشد.

قیر اصلاح شده با نانوسیلیس نسبت به نانوتیتانیم اکسید و نانوکلسیم کربنات افزایش بیشتری داشته و افزودن ۰.۴٪ نانوسیلیس به قیر منجر به افزایش عمر خستگی می‌شود (نظری و همکاران، ۲۰۱۸). همچنین، نتایج تحقیقات دیگر نشان‌دهنده تأثیر مثبت نانوسیلیس بر عمر خستگی در ۳ و ۶ درصد وزنی قیر می‌باشد (لیوا ویلاکورتا و وارگاس نوردبک، ۲۰۱۷).

پلیمرها نیز مدت زمان طولانی برای اصلاح قیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. پلیمرهای مصرفی جهت اصلاح قیر معمولاً به سه شکل الاستومرهای ترموپلاستیک، پلاستومرها و پلیمرهای واکنش‌پذیر وجود دارند (ناوارو و همکاران، ۲۰۰۷)؛ پولاکو و همکاران، ۲۰۰۴). متداول‌ترین آن‌ها استایرن بوتادین استایرن (SBS) می‌باشد (ژو و همکاران، ۲۰۱۴). پلی‌یورتان نام عمومی پلیمرهایی است که دارای پیوندهای یورتانی هستند. پیوندهای یورتانی از واکنش گروه ایزوسیانات‌ها با پلی‌ال‌ها به وجود می‌آیند. گروه‌هایی مثل هیدروکسیل $^2(OH)$ که دارای هیدروژن فعال است با یک گروه ایزوسیانات واکنش داده و پیوندهای یورتانی را به وجود می‌آورد. پلی‌ال‌ها به طور کلی در اغلب موارد جزو مواد پتروشیمی می‌باشند. البته گروه دیگری از آنها به صورت روغن‌های طبیعی (روغن کرچک)، از گیاهان به دست می‌آیند که طی فرایندهای شیمیایی هیدروکسیل به آنها اضافه می‌شود. مکانیزم شیمیایی واکنش میان پلیمر با گروه‌های قطبی قیر که دارای هیدروژن فعال هستند، به صورت انتقال هیدروژن بین مولکولی در واکنش هیدروکسیل در آسفالت با پلیمر صورت می‌گیرد. همچنین، ایزوسیانات‌های آزاد در پلی‌یورتان نیز با گروه‌های قطبی قیر واکنش می‌دهند (کواردی و همکاران،

جدول ۱. اسامی و خصوصیات قیرهای مورد استفاده در این پژوهش

اسامی مختصر	نوع قیر
B1	قیر شاهد ۱
B1-NS-3%	قیر اصلاح شده با ۳٪ نانوسیلیکا
B1-NS-5%	قیر اصلاح شده با ۵٪ نانوسیلیکا
B1-NS-7%	قیر اصلاح شده با ۷٪ نانوسیلیکا
B2	قیر شاهد ۲
B2-PU-3%	قیر اصلاح شده با ۳٪ پلی یورتان
B2-PU-5%	قیر اصلاح شده با ۵٪ پلی یورتان
B2-PU-7%	قیر اصلاح شده با ۷٪ پلی یورتان

طبق استاندارد ASTM D2872، آزمایش لعاب نازک چرخشی^۱ (RTFO) برای شبیه‌سازی پیرشدگی قیر در هنگام ساخت در کارخانه آسفالت است. به سبب آنکه در این آزمایش، نمونه‌ها در حال چرخش و دوران هستند و مرتباً مخلوط می‌شوند، برای قیرهای اصلاح شده مناسب‌تر است. حدود ۳۵ گرم قیر در هشت استوانه شیشه‌ای که به صورت افقی در یک دیسک گردان عمودی قرار داده شده‌اند ریخته می‌شود و دمای اجاق به ۱۶۳ °C رسانده می‌شود. سپس، دیسک به مدت ۸۵ دقیقه با شدت ۱۵ rad/min شروع به گردش کرده و در همین زمان، در هر لحظه، هوا با شدت به داخل استوانه‌ها دمیده می‌شود. این آزمایش، نوعی شبیه‌سازی از پیرشدگی قیر در هنگام اختلاط با مصالح و عملیات راه‌سازی می‌باشد (ASTM-D2872, 2012). سپس، نمونه قیر به دست آمده از RTFO در مقابل هوای فشرده و دمای زیاد (۹۰ °C تا ۱۱۰ °C) قرار می‌گیرد. این آزمایش در دماهای متفاوت، که بیان‌کننده شرایط آب و هوایی منطقه مورد نظر است، انجام می‌شود. نمونه‌ها را روی طبقات محفظه قرار داده تا به مدت ۲۰ ساعت در فشار ۲۰۷۰ کیلوپاسکال قرار گیرند (D6521-18, 2018).

۳-۲-۲ تست جاروب زمان

۳-۱ تهیه و اختلاط نمونه

نانوسیلیکای تهیه شده در این پژوهش در سه مقدار (۳، ۵ و ۷ درصد وزنی قیر) به مدت دو ساعت در دمای ۱۶۰ درجه سلسیوس و با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه با قیر مخلوط شده است. برای جلوگیری از کلوخه شدن و چسبیدن نانومواد به پره‌های دستگاه، نانوسیلیکا مرحله به مرحله به قیر افزوده شده است. این دما و میزان اختلاط بر اساس تحقیقات گذشته مناسب بوده است (سالتان و همکاران، ۲۰۱۷؛ عنیب و دیاب، ۲۰۱۷). پلی یورتان سنتز شده در سه درصد مختلف وزنی (۳، ۵ و ۷) به قیر اضافه شد. زمان اختلاط ۴۵ دقیقه تا ۱ ساعت و دمای اختلاط طبق پژوهش‌های گذشته ۹۰±۱ °C در نظر گرفته شد (کارا و همکاران، ۲۰۱۰؛ ایزکوردو و همکاران، ۲۰۱۲). پس از تهیه نمونه به منظور اطمینان از اختلاط مناسب و به خصوص سنتز درست و واکنش مناسب پلی‌ال با ایزوسیانات، تست طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز روی نمونه‌ها انجام گرفت.

۳-۲ برنامه آزمایشگاهی

۳-۲-۱ پیرشدگی

۱- Rolling Thin-Film Oven

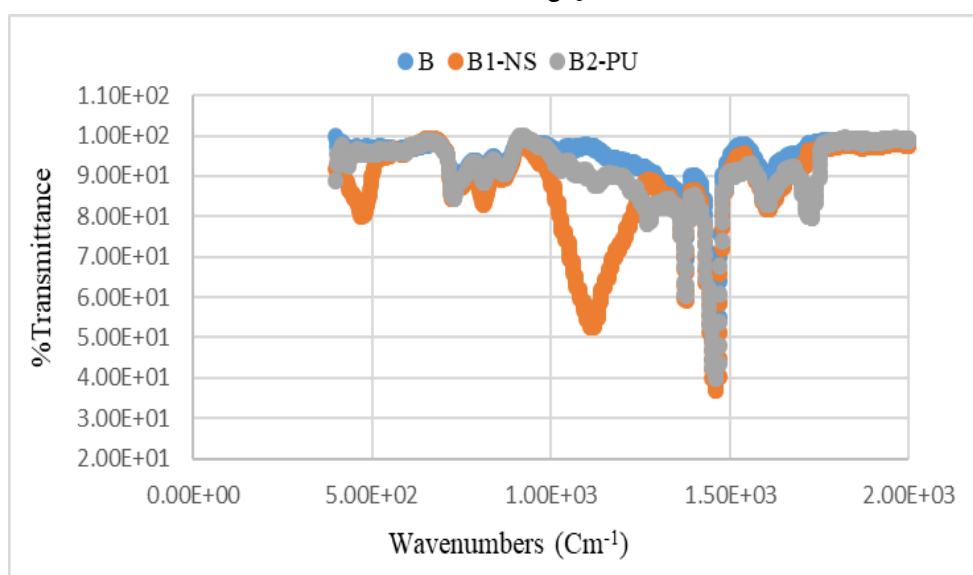
و فرکانس ۱۰ هرتز تحت بارگذاری سینوسی قرار گرفتند.

۶. نتایج و بحث

۶-۱. خصوصیات شیمیایی (تست طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز)

به منظور اطمینان از عملکرد صحیح نانومواد در قیر و سنتز درست پلی‌یورتان، از تست شیمیایی طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR) استفاده شد. نتایج در شکل ۱ آمده است.

این تست به منظور ارزیابی عمر خستگی قیر در دمای متوسط مورد استفاده قرار می‌گیرد. یک تست با سیکل بارگذاری در دامنه ثابت به منظور تعیین عمر خستگی قیر می‌باشد (بهیا، ۲۰۱۰). بارگذاری در دما و فرکانس ثابت و با سطوح ثابت تنش یا کرنش صورت می‌گیرد. تست خستگی روی قیری که بین صفحه‌هایی به قطر ۸ و ضخامت ۲ میلی‌متر قرار دارد، صورت می‌گیرد. تست کرنش ثابت به منظور اطمینان از متوسط جابجایی صفر در طول دوره آزمایش به کار می‌رود (جانسون، ۲۰۱۰). پس از آماده‌سازی نمونه‌های پیر شده بلندمدت در سطح کرنش‌های ۲/۵ و ۵ درصد، در دمای ۲۰ درجه سلسیوس



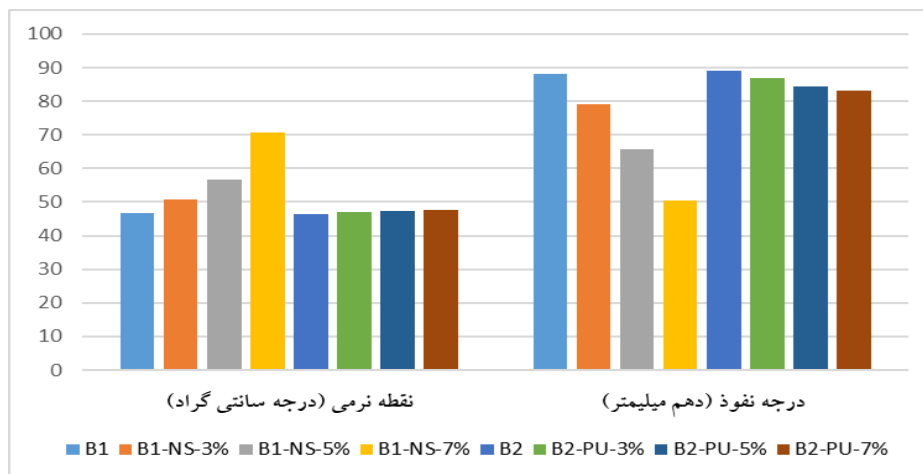
شکل ۱. پیوند FTIR ایجاد شده در پلی‌یورتان سنتز شده و نانوسیلیکا

نشان‌دهنده سنتز درست پلیمر و واکنش پلی‌ال و ایزوسیانات می‌باشد.

۶-۲. خصوصیات فیزیکی (نقطه نرمی، درجه نفوذ و ویسکوزیته)

پس از اصلاح قیر با پلیمر و نانومواد، به منظور بررسی تغییر در خصوصیات فیزیکی، آزمایش درجه نفوذ، نقطه نرمی و ویسکوزیته روی قیرهای مورد مطالعه در این پژوهش انجام شد. نتایج در شکل ۲ آمده است.

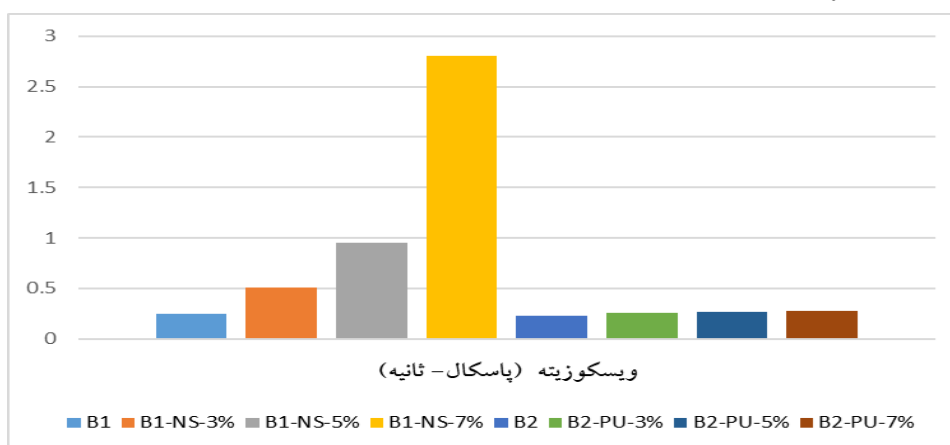
سه گروه برای نانوسیلیکا وجود دارند که این گروه‌ها در قیر پایه وجود ندارند. نوار جذبی ناحیه (cm^{-1}) ۱۱۱۵ تأییدی بر وجود گروه Si-O-Si در ترکیب است و ارتعاشات کششی متقارن گروه نیز در ناحیه (cm^{-1}) ۷۴۴ و (cm^{-1}) ۴۷۳ ظاهر شده‌اند. به دلیل امکان سنتز نادرست و عدم تشکیل پیوندهای یورتانی، تست شیمیایی حائز اهمیت است. نتایج نشان می‌دهد که در طیف قیر اصلاح شده، پیک مربوط به پیوندهای یورتانی با عدد موج (cm^{-1}) ۱۷۲۶/۹۶ دیده می‌شود. این نتیجه



شکل ۲. درجه نفوذ و نقطه نرمی قیرهای شاهد و اصلاح شده در این پژوهش

پیوندهای یورتانی در ماده به وجود آمد. قیرهای حاوی پلی یورتان سفت تر از قیرهای شاهد بوده و مدول برشی مختلط بیشتری دارند. شکل ۳ نتایج تست ویسکوزیته در دمای ۱۳۵ درجه سلسیوس را بر حسب پاسکال-ثانیه نشان می دهد.

در قیرهای حاوی نانوسیلیکا، افزایش نقطه نرمی و کاهش درجه نفوذ وجود داشت. بیشترین تغییرات در قیر حاوی ۷٪ نانوسیلیکا به دست آمد. برای پلی یورتان سنتز شده، تغییر قابل ملاحظه ای در نقطه نرمی و درجه نفوذ مشاهده نشد. دلیل این امر می تواند تشابه خصوصیات فیزیکی پلی یورتان با قیر باشد. مطابق با تست FTIR.



شکل ۳. ویسکوزیته قیرهای شاهد و اصلاح شده در این پژوهش

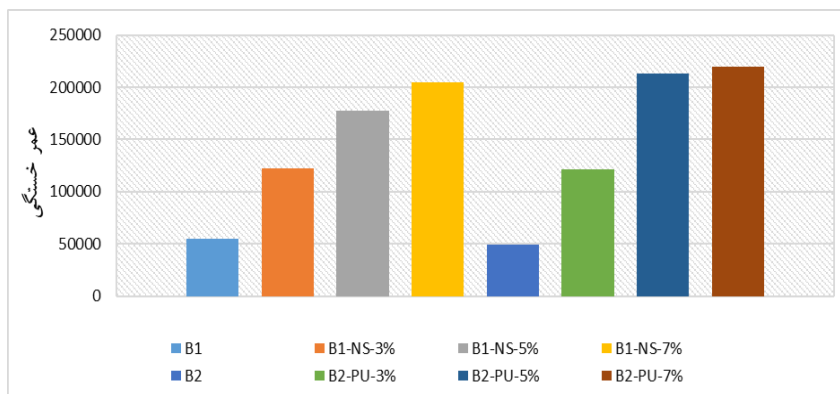
پلی یورتانها، برخلاف اکثر افزودنیها، تفاوت چندانی در ویسکوزیته نمونه اصلاح شده نسبت به شاهد مشاهده نشد و از این جهت پلیمر می تواند از لحاظ محیط زیستی عملکرد مناسب تری داشته باشد.

افزایش ویسکوزیته در قیرهای حاوی نانوسیلیکا زیاد بوده و بخصوص برای ۷٪ نانوسیلیکا عدد ویسکوزیته به ۳ پاسکال-ثانیه نزدیک می شود. ویسکوزیته زیاد نشان دهنده سفتی زیاد قیر بوده و این امر سبب می شود تا در هنگام ساخت به منظور اختلاط مناسب قیر و مخلوط دما تا حد زیادی افزایش یابد. برای

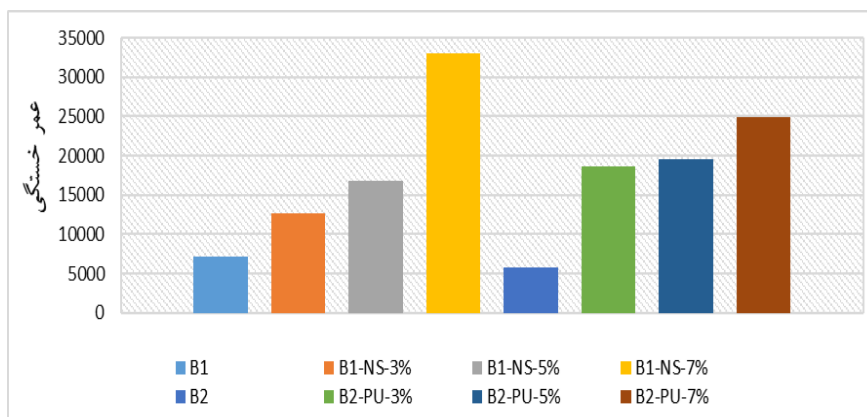
۳-۶. تست خستگی (TS)

و زاویه فاز در هر مرحله اندازه گرفته می‌شود. نتایج عمر خستگی نمونه‌ها با پیرشدگی بلندمدت در دو سطح کرنش در شکل‌های ۴ و ۵ آمده است.

این آزمایش توسط دستگاه رئومتر برش دینامیک^۱ DSR در دما و فرکانس مشخص انجام می‌شود. تعداد زیادی سیکل بارگذاری بر نمونه اعمال می‌شود و مدول مختلط



شکل ۴. عمر خستگی قیرهای شاهد و اصلاح شده در تست TS و کرنش ۲/۵ درصد



شکل ۵. عمر خستگی قیرهای شاهد و اصلاح شده در تست TS و کرنش ۵٪

کرنش بستگی دارد. پلی‌یورتان سنتز شده در کرنش کم، عملکرد بهتری داشته، در حالی که در کرنش زیاد، عملکرد یکسانی بین نانوسیلیکا و پلی‌یورتان سنتز شده وجود داشت. مقدار بهینه برای هر دو افزودنی ۷٪ وزنی قیر به دست آمد. به منظور بررسی روند کاهش مقاومت در نمونه پارامتر نسبت مدول مختلط برشی در هر سیکل به مدول برشی اولیه به دست آمد. شیب منحنی به لحاظ کیفی نشان‌دهنده آسیب وارده به نمونه می‌باشد. شکل-های ۶ و ۷ تکامل مدول برشی مختلط را در طول تست TS با اعمال سطوح مختلف کرنش نشان می‌دهند.

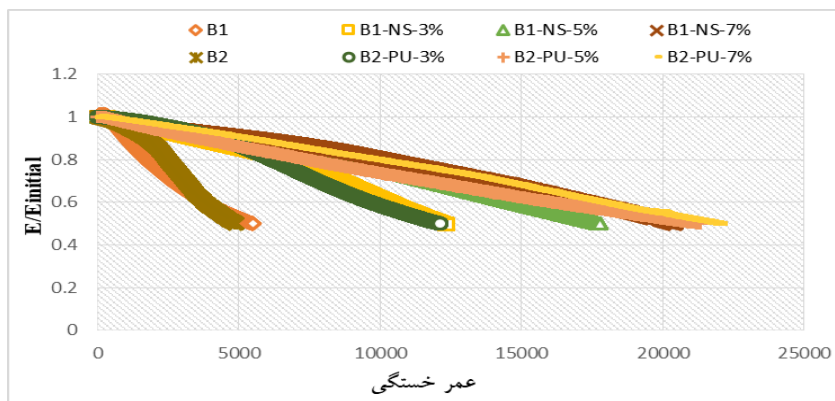
گزارش نتایج عمر خستگی در تست TS بر مبنای کاهش مدول برشی مختلط به ۵۰٪ مقدار اولیه آن می‌باشد. نتایج، نشان‌دهنده تأثیر مثبت نانوسیلیکا و پلی‌یورتان سنتز شده بر عمر خستگی قیر می‌باشد. عمر خستگی قیرهای اصلاح شده با نانوسیلیکا در کرنش کم تا ۳/۷ برابر و پلی‌یورتان سنتز شده تا ۴/۵ برابر افزایش داشت.

برای کرنش‌های زیاد، برای هر دو نوع افزودنی، تا حدود ۴/۵ برابر افزایش عمر خستگی وجود داشت. نتایج نشان می‌دهد که عمر خستگی برای مواد مختلف به سطح

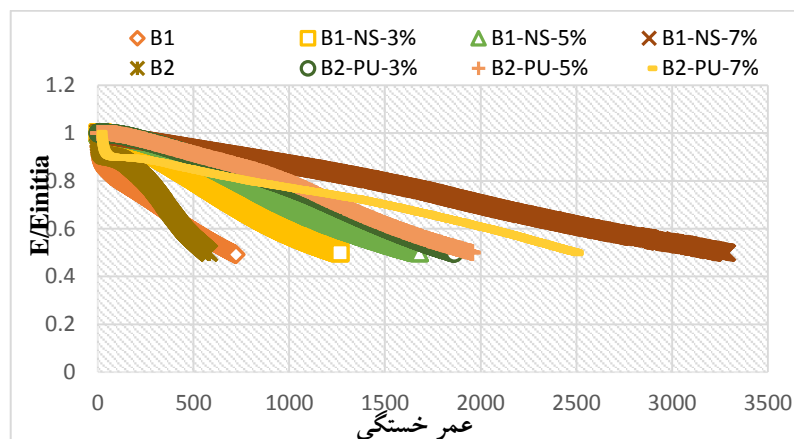
۱- Dynamic shear rheometer

بارگذاری) کمتر است. بنابراین، عمر خستگی کوتاه‌تر است.

همانطور که مشاهده می‌شود، هرچه سطح تغییر شکل ایجاد شده بالاتر باشد، تعداد سیکل‌های منجر به کاهش ۵۰ درصدی در مدول مختلط اولیه (معیار توقف



شکل ۶. نسبت مدول بر حسب عمر خستگی در تست TS و کرنش ۲/۵ درصد



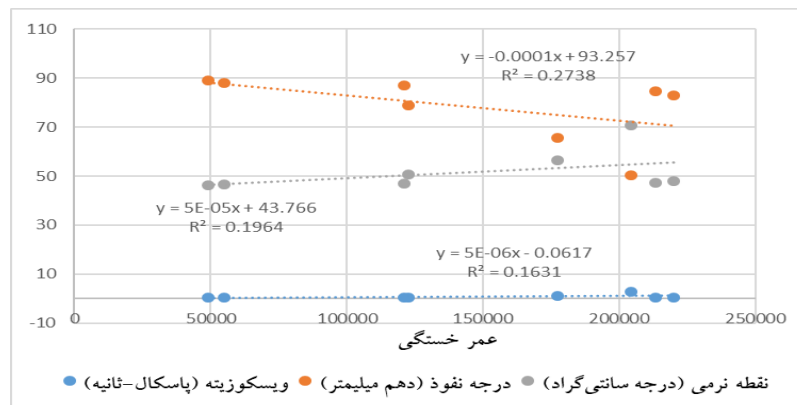
شکل ۷. نسبت مدول بر حسب عمر خستگی در تست TS و کرنش ۵٪

نمونه‌های اصلاح شده با ۳٪ نانو و پلیمر، از سیکل ۷۰۰۰ به بعد، قیرها تحمل در برابر آسیب را از دست داده و مقاومتشان به شدت کاهش می‌یابد. در قیرهای حاوی ۵ و ۷ درصد نانوسیلیس و پلیمر سنتز شده، تحمل نمونه در برابر آسیب تا زمان کاهش ۵۰ درصدی مدول تقریباً با شیب یکسان صورت گرفت.

در کرنش‌های زیاد، رفتار متفاوت‌تری برای قیرهای اصلاح شده وجود دارد. نمونه اصلاح شده با ۷٪ پلی‌یورتان ابتدا آسیب زیادی را تجربه کرده، ولی در طول زمان، شیب آسیب روند کاهشی دارد. نمونه حاوی ۷٪ نانوسیلیکا مقاومت بهتری در برابر آسیب در کرنش بیشتر

نتایج نشان می‌دهد که در مجموع، پلی‌یورتان مقاومت بیشتری نسبت به نانوسیلیکا در برابر خستگی در کرنش کم دارد. نمودارهای آسیب مربوط به قیرهای پلی‌یورتانی با وجود قیر شاهد ضعیف‌تر، آسیب تقریباً یکسانی با قیرهای اصلاح شده توسط نانوسیلیکا داشتند. کاهش شیب و به دنبال آن کاهش آسیب در نمونه‌های پلی‌یورتانی بیشتر مشهود می‌باشد. برای هر دو نوع قیر، در قیرهای اصلاح شده حاوی ۵ و ۷ درصد، روند شیب آسیب به شدت کاهش یافت. نمونه‌های اصلاح نشده شیب بسیار تندی را در سیکل‌های کوتاه طی کرده و این امر نشان‌دهنده آسیب‌پذیری زیاد آن‌ها می‌باشد. برای

جمله نقطه نرمی، درجه نفوذ و ویسکوزیته، تحلیل آماری صورت گرفت. نتایج نشان می‌دهد که هیچ ارتباط بسیار ضعیفی بین خصوصیات فیزیکی و عمر خستگی قیر وجود ندارد. می‌توان استنباط کرد که خصوصیات فیزیکی در نهایت باعث تغییر در سفتی و کاهش یا افزایش پارامتر مدول مختلط برشی می‌شوند. در نتیجه، پارامتر $G^* \cdot \sin(\delta)$ نیز نمی‌تواند پیش‌بینی مناسبی از عمر خستگی ارائه دهد. نتایج تحلیل آماری مربوط به ارتباط عمر خستگی در تست TS و پارامترهای فیزیکی قیر در شکل ۸ آمده است.



شکل ۸. ارتباط عمر خستگی با خصوصیات فیزیکی قیرهای مورد استفاده در این پژوهش

پلی‌یورتان سنتز شده به دما و زمان کمی نیاز داشته که هم افزودنی سازگارتری با محیط‌زیست بوده و هم پیرشدگی کمتری را تجربه می‌کند.

۸. نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش، بررسی عمر خستگی قیرهای اصلاح شده با نانوسیلیکا و پلی‌یورتان سنتز شده می‌باشد. همچنین، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نمونه‌ها بررسی شد. ارتباط پارامترهای فیزیکی، از جمله درجه نفوذ، نقطه نرمی و ویسکوزیته، با عمر خستگی نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که:

دارد. در کرنش کم، بیشترین مقاومت مربوط به نمونه حاوی ۷٪ پلی‌یورتان بود. در کرنش‌های زیاد، تفاوت رفتار در دو نوع قیر شاهد نیز مشهود است. در نمونه‌های حاوی ۳ و ۵ درصد پلی‌یورتان سنتز شده، نسبت به نانوسیلیکا، مقاومت بیشتری در کرنش زیاد با وجود قیر ضعیف‌تر وجود داشت.

۴-۶. بررسی اثر تغییرات فیزیکی بر خصوصیات رفتار خستگی

به منظور بررسی ارتباط میان عمر خستگی نمونه‌های قیری، تست TS و پارامترهای خصوصیات فیزیکی از

۷. تحلیل فنی و اقتصادی

نتایج این پژوهش حاکی از برتری پلی‌یورتان سنتز شده نسبت به نانوسیلیکا می‌باشد. در کرنش‌های کم، برتری پلی‌یورتان سنتز شده نسبت به نانوسیلیکا کاملاً مشهود است. در کرنش بیشتر نیز پلی‌یورتان سنتز شده در ۳ و ۵ درصد وزنی عملکرد بهتری داشته و فقط در ۷٪ وزنی، عملکرد نانوسیلیکا بهتر بوده که با توجه به هزینه تولید نانومواد و قیمت مناسب مواد اولیه پلی‌یورتان، این اختلاف تأثیرگذار نیست. استفاده از پلی‌یورتان سنتز شده توجیه فنی و اقتصادی دارد. برای هر دو نوع افزودنی در تست TS مقدار بهینه ۷٪ وزنی قیر به دست آمد. همچنین، نانوسیلیکا به دما و زمان زیادی برای اختلاط نیاز دارد.

- پلی یورتان سنتز شده عمر خستگی را به میزان قابل توجهی افزایش می دهد. مقدار بهینه آن ۷٪ وزنی قیر می باشد.
- نانوسیلیکا باعث افزایش عمر خستگی شده و مقدار بهینه ۷٪ وزنی قیر بود.
- نانوسیلیکا خصوصیات فیزیکی قیر را تغییر داده، ولی پلی یورتان در این زمینه تأثیرگذار نبود.
- نتایج تست FTIR وجود پیوندهای شیمیایی در قیر حاوی نانوسیلیکا و پلی یورتان را تأیید کرد.
- خصوصیات فیزیکی به تنهایی تعیین کننده عمر خستگی نبوده و وجود پیوندهای شیمیایی در قیرهای اصلاح شده در این زمینه مؤثر است.

۹. مراجع

- Anderson, A., Christensen, D. W., Bahia, H. U., Donger, R., Sharma, M. G. and Antle, C. E. 1994. "Binder characterization and evaluation. Volume 3: Physical characterization". Retrieved from National Research Council, Washington, DC.
- Arshad, A. K., Samsudin, M. S., Masri, K. A., Karim, M. R. and Abdul Halim, A. G. 2017. "Multiple stress creep and recovery of nanosilica modified asphalt binder". MATEC Web of Conferences, 103, pp. 1-8. doi:10.1051/mateconf/201710309005.
- ASTM-D2872. 2012. "Standard test method for effect of heat and air on a moving film of asphalt (rolling thin-film oven test)". ASTM International, West Conshohocken.
- Bahia, H. 2010. "NCHRP09-45, test methods and specification criteria for mineral filler used in HMA". Retrieved from University of Wisconsin, Madison.
- Bahia, H., Hanson, D. I., Zeng, M., Zhai, H., Khatri, M. A. and Anderson, M. A. 2001. "Characterization of modified asphalt binders in superpave mix design". NCHRP Report 459, Retrieved from Washington, DC.
- Brule, B. 1997. "Polymer-modified asphalt cements used in the road construction industry: Basic principles". Transport. Res. Record: J. Transport. Res. Board, 1535: 48-53
- Carrera, V., Partal, P., García-Morales, M., Gallegos, C. and Pérez-Lepe, A. 2010. "Effect of processing on the rheological properties of poly-urethane/urea bituminous products". Fuel Process. Technol., 91(9): 1139-1145.
- Cuadri, A. A., García-Morales, M., Navarro, F. J. and Partal, P. 2013. "Isocyanate-functionalized castor oil as a novel bitumen modifier". Chem. Eng. Sci., 97, 320-327.
- ASTM-D6521-18, S. 2018. "Standard practice for accelerated aging of asphalt binder using a pressurized aging vessel (PAV)". ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Enieb, M. and Diab, A. 2017. "Characteristics of asphalt binder and mixture containing nanosilica". Int. J. Pavement Res. Technol., 10(2): 148-157.
- Fang, C., Yu, R., Liu, S. and Li, Y. 2013. "Nanomaterials applied in asphalt modification: A review". J. Mater. Sci. Technol., 29(7): 589-594.
- Izquierdo, M. A., Navarro, F. J., Martínez-Boza, F. J. and Gallegos, C. 2012. "Bituminous polyurethane foams for building applications: Influence of bitumen hardness". Constr. Build. Mater., 30: 706-713.
- Izquierdo, M. A., Navarro, F. J., Martínez-Boza, F. J. and Gallegos, C. 2013. "Effects of MDI-PPG molecular weight on the thermorheological behaviour of MDI-isocyanate based bituminous foams". J. Ind. Eng. Chem., 19(2): 704-711.
- Izquierdo, M. A., García-Morales, M., Martínez-Boza, F. J. and Navarro, F. J. 2014. "Thermo-mechanical properties and microstructural considerations of MDI isocyanate-based bituminous foams". Mater. Chem. Phys., 146(3): 261-268.
- Johnson, C. M. 2010. "Estimating asphalt binder fatigue resistance using an accelerated test method". PhD Thesis, University of Wisconsin, Madison.
- Leiva-Villacorta, F. and Vargas-Nordbeck, A. 2017. "Optimum content of nano-silica to ensure proper performance of an asphalt binder". Road Mater. Pavement Design, doi:10.1080/14680629.2017.1385510.
- Moghadas Nejad, F., Nazari, H., Naderi, K., Karimiyan Khosroshahi, F. and Hatefi Oskuei, M. 2017. "Thermal and rheological properties of nanoparticle modified asphalt binder at low and intermediate temperature range". Petrol. Sci. Technol., 35(7): 641-646.

- Navarro, F., Partal, P., Garciamorales, M., Martinezboza, F. and Gallegos, C. 2007. "Bitumen modification with a low-molecular-weight reactive isocyanate-terminated polymer". *Fuel*, 86(15), 2291-2299.
- 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.
- Polacco, G., Stastna, J., Biondi, D., Antonelli, F., Vlachovicova, Z. and Zanzotto, L. 2004. "Rheology of asphalts modified with glycidylmethacrylate functionalized polymers". *J. Colloid Interf. Sci*, 280(2): 366-373.
- Safaei, F., Castorena, C. and Kim, Y. R. 2016. "Linking asphalt binder fatigue to asphalt mixture fatigue performance using viscoelastic continuum damage modeling". *Mech. Time-Depend. Mater.*, 20(3): 299-323.
- Saltan, M., Terzi, S. and Karahancer, S. 2017. "Examination of hot mix asphalt and binder performance modified with nano silica". *Constr. Build. Mater.*, 156: 976-984.
- Zhu, J., Birgisson, B. and Kringos, N. 2014. "Polymer modification of bitumen: Advances and challenges". *Eur. Polym. J.*, 54; 18-38.

