

بررسی خصوصیات بتن آسفالتی بازیافتی حاوی نانوسیلیس و جوان‌کننده روغن موتور ضایعاتی و روغن خوراکی ضایعاتی

مقاله علمی - پژوهشی

مرتضی ناجی، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

حسن طاهرخانی*، دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: taherkhani.hasan@znu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۸ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۰۱

صفحه ۹۶-۷۷

چکیده

اخیراً استفاده از آسفالت بازیافتی که در آن از مواد ضایعاتی استفاده می‌گردد به دلیل سازگاری با محیط زیست و اقتصادی بودن مورد توجه قرار گرفته است. با این حال چالش‌هایی در ارتباط با عملکرد این نوع مصالح وجود دارد. در این تحقیق، تاثیر استفاده از نانوسیلیس در رفتار آسفالت بازیافتی که فاقد جوان‌کننده بوده و همچنین با دو نوع روغن ضایعاتی جوانسازی شده بررسی شده است. قیر بکر با ۵٪ نانوسیلیس اصلاح شده و در آسفالت بازیافتی که حاوی ۶۰٪ خرده آسفالت ضایعاتی است به کار رفته است. مخلوط حاصل بدون استفاده از جوان‌کننده و جوانسازی شده با درصد ثابتی از روغن خوراکی و موتور ضایعاتی تحت آزمایش‌های مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت خشک و مرطوب، خزش دینامیکی و خستگی تحت تنش ثابت قرار گرفته‌اند و عملکرد آنها با یکدیگر و با مخلوط کنترل که در آن از مصالح سنگی و قیر بکر استفاده شده مقایسه شده است. آزمایشات مذکور در دو حالت پیر نشده و بعد از اعمال پیرشدگی بلند مدت انجام گرفته‌اند تا تاثیر پیرشدگی بر آنها نیز مطالعه گردد. نتایج آزمایش‌ها بیانگر این است که جایگزینی مصالح سنگی با خرده آسفالت ضایعاتی باعث افزایش مقاومت کششی، مقاومت خزشی، مقاومت به خستگی و افزایش حساسیت رطوبتی می‌گردد. همچنین، نتایج نشان می‌دهند که افزودن نانوسیلیس باعث افزایش مقاومت کششی در حالت خشک و مرطوب، مقاومت به آسیب رطوبتی، خزش و خستگی می‌شود. نانوسیلیس مقاومت به پیرشدگی آسفالت بازیافتی را نیز افزایش می‌دهد. از دیگر نتایج این مطالعه این است که روغن‌های ضایعاتی باعث کاهش حساسیت رطوبتی می‌گردند و این تاثیر برای روغن خوراکی ضایعاتی بیشتر از روغن موتور ضایعاتی می‌باشد. همچنین، تاثیر پیرشدگی بر روی خواص مخلوطی که با روغن خوراکی جوانسازی شده است بیشتر از آن برای مخلوطی است که با روغن موتور ضایعاتی جوانسازی شده است.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالتی، خرده آسفالت ضایعاتی، نانوسیلیس، روغن موتور ضایعاتی، روغن خوراکی ضایعاتی

۱-مقدمه

نگرانی بیشتری را در به کارگیری قیر در تولید آسفالت نموده است. همچنین، در تولید مصالح و اجرای روسازی آسفالتی مقدار قابل توجهی انرژی مصرف می‌شود. بنابراین، بالا بردن عمر بهره‌برداری از روسازی‌ها در جهت بهینه کردن هزینه‌ها و کاهش

در ساختار روسازی آسفالتی حجم زیادی از شن و ماسه، قیر و انواع دیگری از مصالح استفاده می‌شود که غالباً تجدید ناپذیر بوده و برداشت آنها از طبیعت باعث آسیب به محیط زیست می‌گردد. افزایش قیمت نفت و محدود بودن این ماده در دنیا

حرارتی و خستگی می‌شوند (Mogawer et al., 2013; Zaumanis et al., 2014; Nahar et al., 2014). همچنین، بر اساس گزارش محققان جوان‌کننده باعث کاهش قابل توجهی در دمای اختلاط و تراکم مخلوط آسفالت بازیافتی می‌گردد (Romera et al., 2006). علاوه بر این، استفاده از جوانسازها درصد فضای خالی مخلوط را نیز کاهش می‌دهد که به دلیل پخش جوان‌کننده در قیر پیر شده می‌باشد (Mogawer et al., 2013). نتایج متناقضی در اثر جوانسازی در مقاومت به شیارشدگی وجود دارد. در حالی که چن و همکاران (Chen et al., 2014) نتیجه گیری نمودند که افزودن جوانساز باعث کاهش مقاومت به شیار شدگی مخلوطهای آسفالتی حاوی خرده آسفالت ضایعاتی می‌شود، برخی از تحقیقات دیگر گزارش نموده‌اند که مخلوطهای ساخته شده با جوان‌کننده‌ها در مقایسه با مخلوطهای ساخته شده با قیر نرم‌تر مقاومت به شیارشدگی بالایی دارند (Shen, Amirkhani, and Aune Miller, 2007). انواع مختلفی از مواد با پایه روغن در سالهای گذشته به عنوان جوان‌کننده در مخلوطهای آسفالتی حاوی خرده آسفالت ضایعاتی استفاده گردیده است. از جمله آنها روغن خوراکی ضایعاتی (Li et al., 2021; Dokandari et al., 2017; Yan et al., 2022; Taherkhani and Noorian, 2018; Taherkhani and Noorian, 2019) و روغن موتور ضایعاتی (DeDene and You, 2014; Dokandari et al., 2017; Jia et al., 2015; Zaumanis et al., 2014; Liu et al., 2019; Taherkhani and Noorian, 2018) می‌باشند. استفاده از مواد ضایعاتی به عنوان جوان‌کننده علاوه بر کمک به حفظ محیط زیست باعث اقتصادی‌تر شدن بازیافت می‌گردد. روغن خوراکی و روغن موتور ضایعاتی در احجام زیاد در سراسر دنیا تولید شده و به دلیل عدم بازیافت بخش زیادی از آنها و دفع آنها در محیط زیست خطرات جدی را برای سلامت انسان و سایر جانداران ایجاد می‌نماید. سالیانه ۴۱ تا ۶۷ میلیون تن روغن خوراکی تولید می‌شود. روغن خوراکی ضایعاتی اصولاً از تری گلیسیریدها و چربی‌های با وزن مولکولی پایین ساخته شده‌اند که دارای خصوصیات جوان‌کنندگی هستند (Lam et al., 2010). مقدار بهینه‌ای از روغن خوراکی ضایعاتی می‌تواند خصوصیات قیر پیر شده را به مقادیر آن در قیر بکر بازیابی نماید. مطالعات قبلی دریافته‌اند که استفاده از ۳ تا ۴٪ وزن قیر از روغن خوراکی ضایعاتی می‌تواند تمام خصوصیات فیزیکی و رئولوژیکی قیر را به حالت پیر نشده آن بازگرداند (Asli,

اثرات مخرب زیست محیطی همواره از اهداف مهندسیین بوده است. از طرف دیگر، محققین به دنبال یافتن مواد جایگزین قابل دسترس برای مصالح آسفالتی بوده‌اند. یکی از این مواد جایگزین ضایعات آسفالتی حاصل از تراشیدن لایه‌های آسفالتی روسازی‌های موجود در عملیات نگهداری آنها می‌باشد که به آن روسازی آسفالتی احیا شده گفته می‌شود. این ضایعات حاوی اجزای ارزشمند قیر و مصالح سنگی می‌باشند که قابل استفاده مجدد خواهند بود. افزایش هر چه بیشتر استفاده از آسفالت ضایعاتی در تولید مخلوطهای آسفالتی جدید علاوه بر کاهش هزینه باعث نجات بیشتر محیط زیست می‌گردد. اما، مهمترین دلیلی که استفاده درصدهای بالا از آسفالت ضایعاتی را محدود می‌کند ضعف قیر پیر شده موجود در آن در برابر خرابی‌ها از جمله ترک‌خوردگی خستگی و حرارتی می‌باشد. به دلیل اکسیداسیون رخ داده در دوره بهره‌برداری از روسازی، ترکیب شیمیایی قیر از طریق کاهش مالته‌ها و افزایش آسفالتن‌ها تغییر یافته و منجر به سخت شدن قیر می‌گردد (Jahangiri et al., 2019; Mirhosseini et al., 2018). تحقیقات نشان داده است که درصدهای کمتر از ۱۵٪ از آسفالت ضایعاتی تغییری در رفتار مخلوط آسفالتی ایجاد نمی‌کند (Mirhosseini et al., 2018; Al-Qadi et al., 2007). در حال حاضر، در بیشتر ایالات آمریکا درصد آسفالت ضایعاتی مورد استفاده محدود به ۱۵ تا ۴۰٪ است (Ali et al., 2016). برای به کارگیری درصدهای بالاتر از خرده آسفالت ضایعاتی و جبران معایب ناشی از قیر، یکی از راه‌حل‌ها جایگزینی بخشی از قیر با قیر نرم‌تر می‌باشد. تحقیقات قبلی بیانگر این است که این راهکار کارایی خوبی برای کاهش ترک‌خوردگی نداشته و هزینه بالایی نیز دارد. راه حل دیگر استفاده از جوان‌کننده‌ها می‌باشد. جوان‌کننده افزودنی است که با بازیابی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی قیر باعث نرم‌تر شدن آن می‌گردد (Hill and Jenings, 2011). جوان‌کننده‌ها دارای مقادیر بالایی از مولکول‌های مالته هستند، که با افزایش سهم مالته‌ها در قیر پیر شده ویسکوزیته و سختی آن را کاهش و شکل‌پذیری را افزایش می‌دهند. به این ترتیب، مقاومت به ترک‌خوردگی مخلوطهای بازیافتی با افزودن جوان‌کننده افزایش می‌یابد. تاثیر انواع مختلف جوان‌کننده‌ها بر روی خصوصیات قیر و مخلوطهای آسفالتی مورد مطالعه قرار گرفته است که نشان داده‌اند جوان‌کننده‌ها باعث افزایش مقاومت در برابر ترک‌های

انرژی شکست و عمر خستگی مخلوطهای آسفالتی شده، حساسیت رطوبتی را کاهش داده و باعث افزایش دوام روسازی آسفالتی می‌شود. همچنین، با توجه به این‌که می‌توان نانوسیلیس را با قیمت کم تهیه نمود، و این‌که بهبود بسیاری در ویژگی‌های قیر و مخلوط آسفالتی ایجاد می‌کند استفاده از آن به عنوان یک اصلاح کننده منطقی به نظر می‌رسد (Enieb and Diab., 2016). یکی از مشکلات استفاده از نانوسیلیس در مخلوطهای آسفالتی در حال حاضر هزینه نسبتاً بالای آن می‌باشد. اما، با توجه به وفور منابع سیلیس در طبیعت، با پیشرفت در تکنولوژی تولید نانوسیلیس و تهیه ارزان‌تر آن می‌توان با هزینه کمتری از منافع این ماده استفاده نمود.

مطالعه ادبیات فنی نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر تحقیقات مختلفی در زمینه تاثیر روغن خوراکی ضایعاتی و روغن موتور ضایعاتی بر خصوصیات قیر و مخلوطهای آسفالتی حاوی خرده آسفالت ضایعاتی انجام گردیده است که بخشی از آنها در قسمتهای قبلی ارائه شد. اما، مواردی که در این زمینه نیاز به بررسی بیشتر دارد تاثیر پیرشدگی بلند مدت بر مخلوطهای آسفالتی حاوی این روغنها و مقایسه آنها در این موضوع می‌باشد. از طرف دیگر، استفاده از روغنهای ضایعاتی باعث کاهش مقاومت به شیار شدگی و مقاومت کششی می‌گردد و یافتن راه حلی برای بهبود این ویژگی‌ها ضمن حفظ سایر خصوصیات می‌تواند دارای اهمیت باشد. بنابراین، در این تحقیق، سعی گردیده است با به کارگیری قیر اصلاح شده با نانوسیلیس در آسفالت‌های باز یافتی حاوی جوان کننده خواص این مخلوطها بررسی شود. تاثیر استفاده از نانو سیلیس بر مقاومت کششی، شیار شدگی، عمر خستگی و آسیب رطوبتی مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین بررسی می‌شود که افزودن نانوسیلیس چگونه بر مقاومت به پیر شدگی آسفالت‌های باز یافتی حاوی جوان کننده موثر خواهد بود.

۲- مصالح مورد استفاده

مواد مورد استفاده در این تحقیق شامل قیرخالص، مصالح سنگی، خرده آسفالت باز یافتی، نانوسیلیس، روغن موتور و روغن خوراکی ضایعاتی می‌باشند. مصالح سنگی شامل درشت دانه، ریزدانه و فیلر از جنس آهک دولومیتی بوده و از یک کارخانه آسفالت در شهر زنجان تهیه گردید. در جدول ۱ و ۲، به ترتیب، خصوصیات فنی و چگالی‌ها و جذب آب مصالح

2012; Zargagar, 2012; Cao et al., 2018; Yan et al., 2022). همچنین، با وجود صدها میلیون وسیله نقلیه مورد استفاده، روغن موتور ضایعاتی نیز هر ساله به میزان ۴۵ میلیون تن در کل دنیا تولید می‌شود که درصد کمی از آن بازیافت می‌شود (Maceiras et al., 2017) و بخش زیادی از آن دور ریز می‌شود. روغن موتور ضایعاتی می‌تواند اجزای نرم از دست رفته قیر پیر شده را جبران نماید و باعث جوانسازی قیرهای پیر شده شود (Jia et al., 2015). تحقیقات مختلفی در گذشته برای بررسی تاثیر روغن موتور ضایعاتی بر روی خواص قیر پیر شده و مخلوطهای آسفالتی حاوی درصدهای بالای خرده آسفالت ضایعاتی انجام شده‌اند که نشان می‌دهند روغن موتور توانایی بازیابی خواص فیزیکی قیر پیر شده و کاهش درجه عملکردی قیر را دارد (Dedene and You, 2014; Zaumanis et al., 2014) و باعث کاهش مقاومت به شیار شدگی و مقاومت کششی (Dedene et al., 2014)، افزایش کارایی مخلوط و افزایش مقاومت خستگی (Zaumanis et al., 2015, al., 2014, Zaumanis et al., 2015) می‌گردد.

یکی از انواع نانومواد مورد استفاده در اصلاح قیر و مخلوطهای آسفالتی نانوسیلیس بوده است (Yao et al., 2013; Bala et al., 2020; Bala et al., 2018). نانوسیلیس به دلیل سطح مخصوص بالا، جذب قوی، پراکندگی خوب، پایداری عالی و خلوص شیمیایی بالا مورد توجه در صنایع مختلف از جمله در صنعت آسفالت بوده است. شکل و ابعاد ذرات نانوسیلیس، برای استفاده در قیر، بسیار مطلوب است و سطح مخصوص بیشتری نسبت به فیلرهای عادی دارد و سطح فعال شیمیایی و قطبی نسبتاً بالایی دارد (Fini et al., 2016). یائو و همکارانش با افزودن ۴ و ۶٪ نانوسیلیس به قیر به مطالعه ویژگی‌های رئولوژیکی و پیوندهای شیمیایی قیر اصلاح شده با نانوسیلیس پرداختند. نتایج آنها نشان داد که افزودن نانوسیلیس باعث افزایش مقاومت به پیرشدگی، مقاومت در برابر خستگی و شیارشدگی قیر می‌شود و در مخلوطهای آسفالتی نیز مدول دینامیکی و مقاومت در برابر شیارشدگی را بهبود می‌بخشد (Yao et al., 2013). انیب و دیاب در سال ۲۰۱۶ دریافتند که افزودن نانوسیلیس باعث افزایش ویسکوزیته و نقطه نرمی و کاهش درجه نفوذ قیر می‌شود ولی تاثیر چندانی بر حساسیت رطوبتی قیر ندارد. همچنین آنها نتیجه گیری نمودند که افزودن نانوسیلیس باعث افزایش مدول برجهندگی، مقاومت کششی،

شده و دانه بندی مصالح سنگی نیز انجام شد. درصد قیر آسفالت ضایعاتی ۴,۶۳٪ و درصد شکستگی مصالح سنگی باقی مانده ۹۰٪ تعیین شدند. آنالیز کانی شناسی نیز نشان داد مصالح سنگی آسفالت ضایعاتی از نوع سیلیسی می‌باشند.

شکل ۲ دانه بندی مصالح خرده آسفالت را قبل و بعد از جدا شدن قیر نشان می‌دهد. در این تحقیق از دو نوع روغن ضایعاتی (روغن خوراکی و روغن موتور) به عنوان جوانساز استفاده شد. روغن خوراکی از سلف مرکزی دانشگاه زنجان و روغن موتور از تعمیرگاهی در شهر زنجان تهیه شده و پس از فیلتر کردن (جداسازی مواد زائد) با الک با اندازه سوراخ ۰,۸ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفتند. در شکل ۳ روغن‌های ضایعاتی مورد استفاده نشان داده شده است.

سنگی نشان داده شده‌اند. قیر مورد استفاده قیر درجه نفوذی ۸۵/۱۰۰ می‌باشد که از شرکت نفت پاسارگاد تهیه شد. جدول ۳ مشخصات قیر مصرفی که توسط شرکت تولید کننده ارائه گردید است را نشان می‌دهد. نانوسیلیس استفاده شده در این تحقیق از شرکت نانوثانی به نمایندگی از شرکت دگوسا، که از جمله تأمین کنندگان اصلی مواد شیمیایی و نیز نانو مواد در جهان است، تهیه شد. شکل ۱ نانوسیلیس مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. مشخصات نانوسیلیس مورد استفاده نیز در جداول ۴ ارائه شده است.

مصالح خرده آسفالت ضایعاتی استفاده شده در این تحقیق از انبار دپوی مصالح خرده آسفالت راهداری زنجان تهیه شده است. ابتدا با جداسازی قیرخرده آسفالت ضایعاتی از سنگدانه‌ها به وسیله سانتریفیوژ با حلال بنزین درصد قیر تعیین

جدول ۱. مشخصات مصالح سنگی بکر

حدود آیین‌نامه		نتایج آزمایش		مشخصه
ریزدانه	درشت دانه	فیلر	ریزدانه	
-	-	-	۷۸	ارزش ماسه‌ای (AASHTO-T176)
-	-	-	B	نوع دانه‌بندی
-	-	-	۵۰۰	درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لوس
-	-	-	۲۷	تعداد دور
-	حداکثر ۲۵	-	-	درصد سایش
-	حداقل ۹۵	-	۹۸	در یک جبهه
-	حداقل ۹۰	-	۱۰۰	در دو جبهه
-	-	-	بیش از ۹۵ درصد	درصد اندود قیر به مصالح سنگی (ASTM-D1664)
حداقل ۴۵	-	-	۴۵,۲	درصد فضای خالی (ASTM-D1252)
-	-	-	۳	رد شده از الک نمرة ۸
-	-	-	۲۰	ضریب نرمی ماسه (AASHTO-M6)
-	حداکثر ۲۵	-	-	درصد تورق (BS-812)
حداکثر ۱۲	حداکثر ۸	-	۱,۳	درصد افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (AASHTO-T104)

جدول ۲. وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی

جذب آب (%)	وزن مخصوص (گرم بر سانتی متر مکعب)		مشخصه
	حقیقی	ظاهری	
۱,۸	۲,۶	۲,۷۲	مصالح سنگی مانده روی الک شماره ۸
۲,۵	۲,۶	۲,۷۸	مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۸ و مانده روی الک شماره ۲۰۰
-		۲,۷۹	مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۲۰۰
	۲,۶۱		وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی G _{sb} (گرم بر سانتی متر مکعب)

جدول ۱. مشخصات قیر مورد استفاده در تحقیق

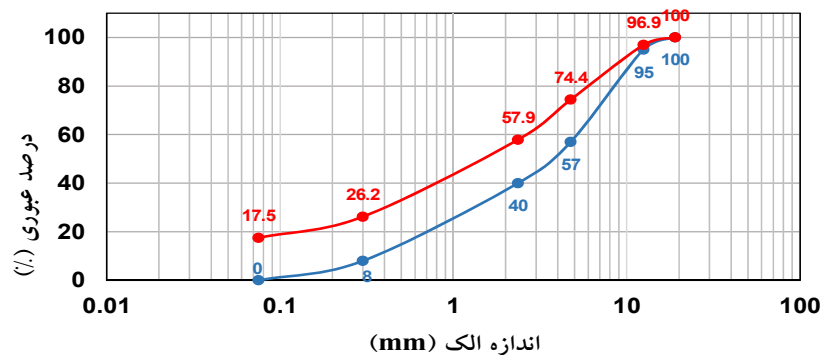
روش آزمایش	نتایج	حدود	مشخصات
ASTM-D5	۹۴	۸۵-۱۰۰	درجه نفوذ (دهم میلی متر)
ASTM-D36	۴۶	۴۵-۵۲	نقطه نرمی (درجه سانتی گراد)
ASTM-D113	>۱۰۰	+۱۰۰	کشش پذیری
ASTM-D2042	۹۹/۸	حداقل ۹۹	حلالیت در تری کلرواتیلن %
ASTM-D70	۱,۰۱۴۳	-	وزن مخصوص (گرم بر سانتی متر مکعب)
ASTM-D92	۲۷۰	حداقل ۲۲۰	درجه اشتعال (درجه سانتی گراد)

جدول ۴. مشخصات نانو سیلیس

مقادیر	خصوصیات
+۹۹%	خلوص
۱۱-۱۳nm	اندازه ذرات
۲۰۰ متر مربع بر گرم	سطح مخصوص
سفید	رنگ
(گرم بر سانتی متر مکعب) < ۰,۱۰	چگالی ظاهری
(گرم بر سانتی متر مکعب) ۲,۴	چگالی حقیقی

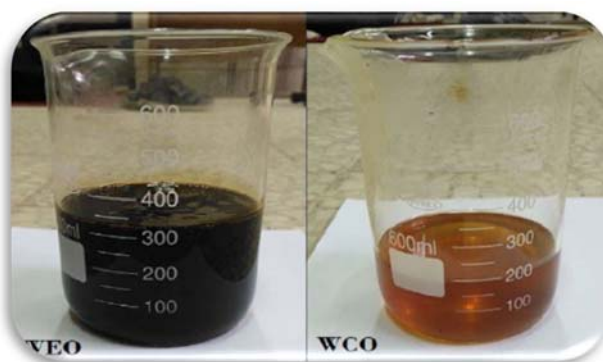


شکل ۱. نانو سیلیس مورد استفاده در تحقیق



دانه بندی مصالح RAP قبل از جداسازی...
 دانه بندی مصالح RAP پس از جداسازی...

شکل ۲. دانه بندی مصالح خرده آسفالت بازیافتی



شکل ۳. روغن های خوراکی و موتور ضایعاتی مورد استفاده در تحقیق

۳- برنامه تحقیق، طرح اختلاط و آماده سازی نمونه ها

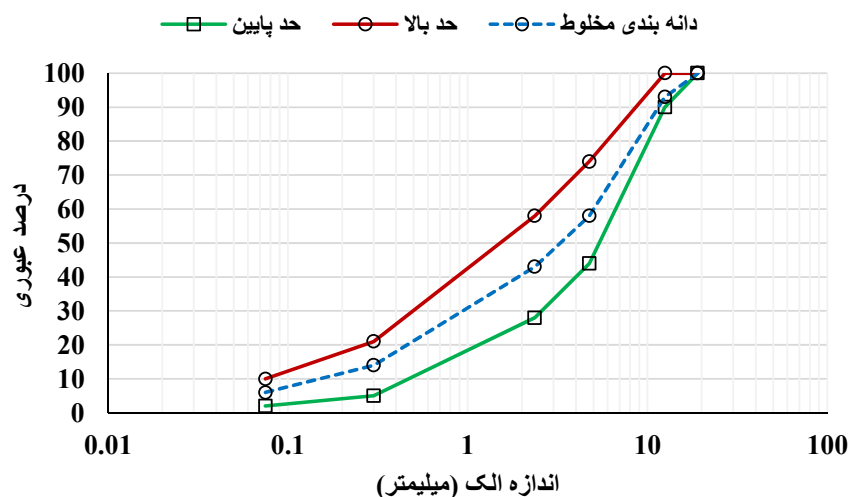
درصد خرده آسفالت ضایعاتی و بدون نانوسیلیس و روغن ضایعاتی می باشد. ترکیب سوم، شامل ۶۰ درصد خرده آسفالت ضایعاتی به همراه نانوسیلیس (۵ درصد بر اساس وزن قیر) و ترکیب چهارم، شامل ۶۰ درصد خرده آسفالت ضایعاتی به همراه نانوسیلیس (۵ درصد بر اساس وزن قیر) و روغن خوراکی ضایعاتی (۸ درصد بر اساس وزن قیر) و ترکیب پنجم، شامل ۶۰ درصد آسفالت ضایعاتی به همراه نانوسیلیس (۵ درصد بر اساس وزن قیر) و روغن موتور ضایعاتی (۸ درصد بر اساس وزن قیر)، می باشد. مقدار روغن های ضایعاتی و نانوسیلیس بر اساس نتایج تحقیقات قبلی انتخاب گردیده اند (Taherkhani and Noorian, 2018; Taherkhani and Noorian, 2019). ترکیبات شماره ۱ تا ۵ به ترتیب با Control, R60, R60+NS5, R60+NS5+C8, R60+NS5+E8 نشان داده می شوند.

هدف این تحقیق بررسی خصوصیات عملکردی آسفالت بازیافتی اصلاح شده با افزودنی های مختلف شامل نانوسیلیس و جوان کننده و مقایسه آنها با مخلوط آسفالتی کنترل و آسفالت بازیافتی بدون مواد افزودنی می باشد. خصوصیات آسیب رطوبتی، مقاومت خزشی و خستگی در تنش ثابت و تاثیر پیرشدگی بلند مدت بر این ویژگی ها مورد توجه می باشد.

به منظور بررسی عملکرد مخلوط های آسفالتی حاوی خرده آسفالت ضایعاتی، نانوسیلیس و روغن های ضایعاتی از ۵ نوع مخلوط آسفالتی مختلف استفاده شد. دانه بندی مورد استفاده در همه مخلوط ها دانه بندی شماره ۴ نشریه ۲۳۴ با حداکثر اندازه ۱۹ میلی متر می باشد. شکل ۴ دانه بندی مورد استفاده در مخلوط های آسفالتی و حدود دانه بندی آیین نامه را نشان می دهد. ترکیب اول، مخلوط شاهد (بدون آسفالت ضایعاتی و نانوسیلیس و روغن ضایعاتی) می باشد. ترکیب دوم شامل ۶۰

به مدت یک ساعت، عمل اختلاط انجام شد (Yusoff et al., 2014). روغن‌های ضایعاتی هنگام اختلاط ابتدا به مصالح آسفالت ضایعاتی افزوده شدند و پس از اختلاط کامل به مصالح سنگی بکر و قیر گرم شده افزوده شده تا اختلاط کامل انجام گیرد. این روش اختلاط طبق روشی که توسط ورااگاون ابداع شد انجام گرفت (Veeraragavan, 2016). در نهایت نمونه‌های با قطر ۱۰۱/۶ میلی‌متر و ارتفاع تقریبی ۶۲٫۵ میلی‌متر، توسط چکش تراکم مارشال با ۷۵ ضربه به هر طرف نمونه، ساخته شدند. سپس، نمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و بر روی آن‌ها آزمایش‌ها صورت گرفت. جهت بررسی پدیده پیرشدگی بر روی مخلوط‌های آسفالتی در آزمایشگاه، نیاز به شبیه‌سازی شرایط محیطی وقوع این پدیده بر روی آسفالت می‌باشد. برای این منظور مطابق استاندارد AASHTO R30 نمونه‌های متراکم شده به مدت ۵ روز در گرمخانه با دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند.

قیر بهینه مخلوط‌ها با روش مارشال و مطابق با استاندارد ASTM D1559 تعیین گردید. مقدار قیر بهینه برای مخلوط کنترل ۳/۹ درصد تعیین شد. سپس مقدار قیر بهینه مخلوط‌های حاوی آسفالت ضایعاتی و روغن‌های ضایعاتی و نانوسیلیس تعیین گردیدند، که برای مخلوط‌های R60+NS5، R60+NS5+E8، R60+NS5+C8، به ترتیب، ۴٫۴۵، ۴٫۹، ۴ و ۴٪ می‌باشد. برای ساخت تمامی نمونه‌ها، قیر و سنگدانه‌ها به طور جداگانه گرم، ترکیب و کوبیده شدند. در روش مارشال، سنگدانه‌ها، ۱۶۰ تا ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت گرم شده و با قیر دارای دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، مخلوط شدند. برای مخلوط‌های بازیافتی، مصالح آسفالت بازیافتی به مدت ۱/۵ ساعت در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شدند و در مخلوط‌های بازیافتی حاوی قیر اصلاح شده با نانوسیلیس و روغن ضایعاتی مخلوط شدند. برای اختلاط قیر با نانوسیلیس، ابتدا قیر تا دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد گرم شده، سپس با استفاده از مخلوط‌کن با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه



شکل ۴. دانه‌بندی مصالح سنگی مخلوط‌ها و حدود آیین نامه

۴-آزمایشات انجام شده

پیر نشده و پیر شده بلند مدت انجام گرفته‌اند تا تاثیر پیرشدگی بلند مدت بر روی خواص مورد نظر مورد ارزیابی قرار گیرد. آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم بر روی نمونه‌های خشک و عمل آمده مطابق با استاندارد AASHTO T283 انجام گرفت تا به طور غیر مستقیم مقاومت در برابر ترک خوردگی قبل و بعد

آزمایش‌های انجام شده بر روی مخلوط‌ها شامل آزمایش مقاومت کششی بر روی نمونه‌های خشک و عمل آمده در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، آزمایش خزش دینامیکی در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد و آزمایش خستگی با روش کنترل تنش در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشند. این آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های

گردید. در رویه‌های آسفالتی با ضخامت زیاد شرایط بارگذاری به صورت تنش کنترل شده در نظر گرفته می‌شود. تکرار این تنش‌ها در نهایت منجر به خستگی می‌شود. به منظور ارزیابی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر ترک خوردگی در دماهای میانی تحت تنش کنترل شده آزمایش خستگی انجام گردید. در این آزمایش بار عمودی ثابت در جهت قطری به صورت دینامیکی بر نمونه‌ها اعمال شده و تا لحظه شکست ادامه یافت. آزمایش با استفاده از دستگاه UTM-10 ساخت شرکت اینفراتست آلمان انجام گردید. بر اساس توصیه پژوهشگران قبلی مقدار بار عمودی مورد استفاده در محدود ۱۰ تا ۵۰٪ باری است که متناظر با مقاومت کششی غیر مستقیم استاتیکی می‌باشد (Kennedy et al., 1983). در این تحقیق تنش ۷۰ کیلوپاسکال به صورت دینامیکی و شکل مربعی با فرکانس ۱ هرتز که شامل ۰,۵ ثانیه زمان بارگذاری و ۰,۵ ثانیه زمان استراحت می‌باشد اعمال گردید. دمای مورد استفاده برای انجام آزمایش خستگی ۲۵ درجه سانتیگراد انتخاب گردید. پایان هر آزمایش با ایجاد ۴ میلی‌متر تغییر شکل قطری و یا ۳۰۰۰۰ تکرار بارگذاری، هر کدام که زودتر اتفاق بیفتد، در نظر گرفته شد. مطالعات قبلی نشان داده‌اند که در حالت تنش کنترل شده، مخلوط‌هایی که سختی بالاتری دارند عمر خستگی بالاتری نیز دارند؛ بر عکس حالت بارگذاری کنترل کرنش که مخلوط‌های با سختی بالاتر دارای عمر خستگی پایین‌تری هستند (Tangella et al., 1990). با اندازه‌گیری تغییر شکل قطری نمونه در سیکل‌های بارگذاری مختلف میزان کرنش عمودی با سیکل بارگذاری محاسبه گردیده و ترسیم شد. عمر خستگی تعداد تکرار بارگذاری است که باعث شکست نمونه‌ها می‌شود.

بحث

در تحقیقات مختلف ارتباط خوبی بین مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی و مقاومت به ترک خوردگی و شیار شدگی پیدا شده است (Christiansen et al., 2000). مخلوط‌های آسفالتی با مقاومت کششی بالاتر مقاومت بیشتری به شیار شدگی و ترک خوردگی حرارتی و خستگی از خود نشان می‌دهند.

از اعمال شرایط رطوبتی ارزیابی شود. این آزمایش بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۰۱ میلی‌متر و ارتفاع تقریبی $1 \pm 6\text{V}$ میلی‌متر و فضای خالی $0,5 \pm 7\%$ انجام گرفت. برای تعیین مقاومت کششی غیر مستقیم بار در جهت قطری به نمونه‌ها اعمال گردیده و با نرخ تغییر شکل قطری ۵ سانتیمتر در دقیقه تا زمان شکست ادامه یافت. با اندازه‌گیری حداکثر باری که باعث شکست نمونه می‌شود مقاومت کششی غیر مستقیم با استفاده از رابطه ۱ محاسبه گردید.

$$ITS = \frac{2000P}{\pi Dt} \quad (1)$$

که در آن، ITS، مقاومت کششی غیر مستقیم (کیلو پاسکال)، P حداکثر بار اعمالی (نیوتن)، t ارتفاع و D قطر نمونه بر حسب میلی‌متر می‌باشند. برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها، نسبت مقاومت کششی نمونه‌های عمل‌آوری شده به مقاومت کششی نمونه‌های خشک، با عنوان TSR از رابطه ۲ محاسبه گردید.

$$TSR = 100 \left(\frac{ITS_w}{ITS_d} \right) \quad (2)$$

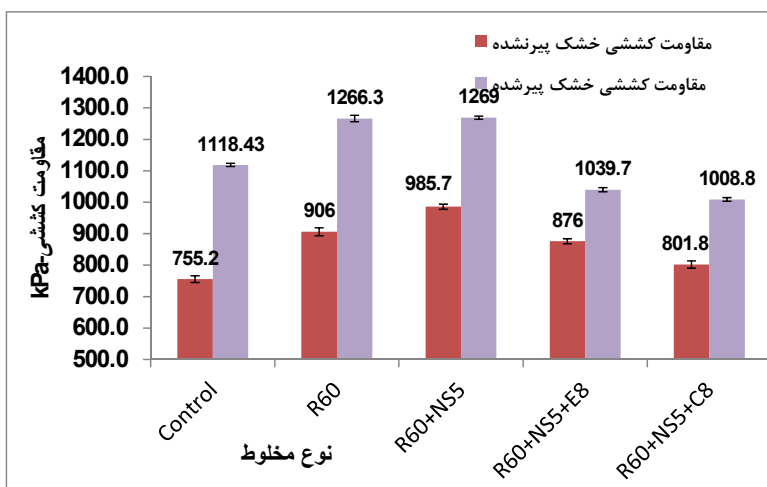
که در آن، ITS_w و ITS_d به ترتیب مقاومت کششی نمونه‌های عمل‌آوری شده و خشک بر حسب کیلو پاسکال می‌باشند. برای تعیین مقاومت مخلوط‌ها در برابر تغییر شکل دائمی از آزمایش خزش دینامیکی استفاده گردید. این آزمایش مطابق با استاندارد EN 12697-25 (2005)، و با استفاده از دستگاه UTM-10 ساخت شرکت اینفراتست آلمان بر روی نمونه‌های آسفالتی ساخته شده به روش مارشال با قطر ۱۰۱ میلی‌متر و ارتفاع تقریبی ۶۵ میلی‌متر در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد انجام گردید. قبل از انجام آزمایش نمونه‌ها به مدت ۳ ساعت در محفظه با دمای کنترل شده به میزان ۴۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند تا به طور یکنواخت به دمای آزمایش برسند. بارگذاری دینامیکی با اعمال تنش عمودی به میزان ۳۰۰ کیلوپاسکال با فرکانس ۱ هرتز (۰,۵ ثانیه بارگذاری و ۰,۵ ثانیه استراحت) به تعداد ۱۰۰۰۰ سیکل یا ۴ میلی‌متر تغییر شکل عمودی انجام

روغن‌ها فرصت نفوذ بیشتر در داخل ساختار قیر در دور سنگدانه خواهند داشت مانع از افزایش زیاد مقاومت کششی شده است. به منظور بررسی تاثیر رطوبت بر عملکرد مخلوط‌های مختلف، مقاومت کششی غیر مستقیم مخلوط‌ها بعد از اعمال شرایط رطوبتی در دو حالت بدون اعمال پیرشدگی و بعد از اعمال پیرشدگی بلند مدت اندازه گیری شده است که نتایج در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، در حالت پیر نشده مقاومت کششی مخلوط بازیافتی R60 که فاقد نانوسیلیس می‌باشد از مقاومت کششی مخلوط کنترل کمتر می‌باشد که می‌تواند به جنس سنگدانه‌های مخلوط بازیافتی مرتبط باشد که حساسیت رطوبتی بیشتری را دارند. اما، مخلوط بازیافتی حاوی نانوسیلیس مقاومت کششی بالاتری از مخلوط کنترل و مخلوط R60 دارد که نشان دهنده این است که نانوسیلیس توانسته حساسیت رطوبتی مخلوط را کاهش دهد. مشابه نتایج آزمایش مقاومت کششی در حالت خشک با افزودن روغن‌های ضایعاتی مقاومت کششی کاهش یافته است ولی به دلیل خاصیت ضد عریان شدگی نانوسیلیس موجود در این مخلوطها مقاومت کششی در حالت مرطوب آنها از مخلوط R60 بیشتر است. ضمناً، میزان کاهش مقاومت کششی در مخلوط بازیافتی حاوی روغن موتور بیشتر از مخلوط حاوی روغن خوراکی می‌باشد که بر خلاف نتایج در حالت خشک بوده است که این می‌تواند نشان دهنده حساسیت رطوبتی کمتر مخلوطهای جوانسازی شده با روغن خوراکی ضایعاتی باشد. همچنین در شکل ۷ ملاحظه می‌گردد که مشابه نتایج مقاومت کششی در حالت خشک پیر شدگی باعث افزایش مقاومت کششی نمونه‌های عمل آمده در شرایط رطوبتی گردیده است و روند تغییرات مقاومت کششی در مخلوطها بعد از اعمال پیرشدگی مشابه حالت پیر نشده می‌باشد. شاخص پیرشدگی با تقسیم مقاومت کششی بعد از پیرشدگی به قبل از آن در حالت عمل آمده محاسبه گردیده تا مقاومت به پیرشدگی مخلوطها ارزیابی گردد. نتایج آن در شکل ۶ نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، مشابه حالت خشک افزودن آسفالت ضایعاتی باعث کاهش تاثیر پیرشدگی گردیده و همچنین افزودن نانوسیلیس و روغن‌های ضایعاتی نیز باعث گردیده‌اند تاثیر پیرشدگی بر مخلوط آسفالتی کاهش یابد. مخلوط‌های حاوی جوان کننده روغن خوراکی کمترین تاثیر را از پیرشدگی داشته است. به منظور بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های

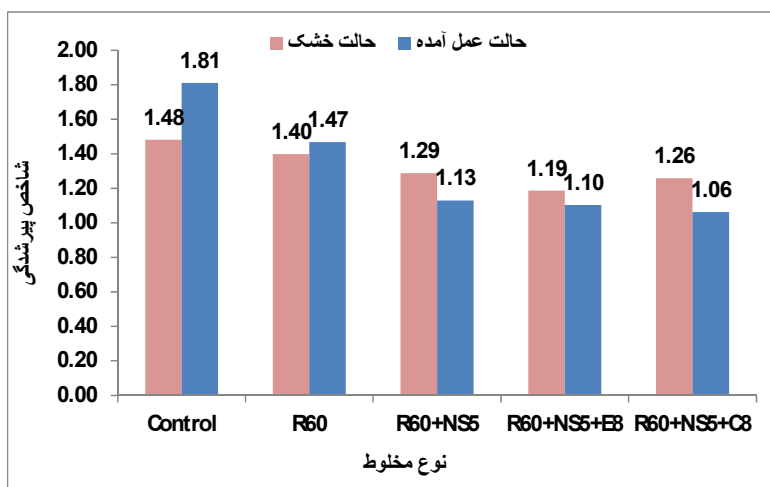
شکل ۵ نتایج آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم در حالت خشک را بر روی مخلوطهای مختلف در حالت پیر نشده و بعد از اعمال پیرشدگی بلند مدت نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، افزودن هر کدام از خرده آسفالت ضایعاتی و نانوسیلیس باعث افزایش مقاومت کششی می‌شود. دلیل افزایش مقاومت کششی با افزودن آسفالت ضایعاتی سختی بیشتر قیر پیر شده موجود در آن می‌باشد (Shu et al., 2008). این نتایج مشابه نتایج آقای دکانداری و همکارانش در سال ۲۰۱۷ نیز می‌باشد که دریافتند مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های حاوی ۷۰ درصد آسفالت ضایعاتی (RAP) بیشتر از نمونه‌های کنترلی می‌باشد (Dokandari et al., 2017). افزایش مقاومت کششی ناشی از افزودن نانوسیلیس به دلیل سطح ویژه بسیار بالای نانوسیلیس است، که با قرار گرفتن در شبکه قیر باعث مسلح شدن شبکه قیر و افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر بارگذاری می‌شود. این نتیجه مطابق با نتایج تحقیقات قبلی می‌باشد (Hasani nia et al., 2014). همچنین، نتایج ارائه شده در شکل ۵ نشان می‌دهند که با افزودن روغن ضایعاتی مقاومت کششی کاهش می‌یابد که به دلیل نرم شدن قیر با افزودن روغن‌ها می‌باشد. روغن خوراکی ضایعاتی کاهش بیشتری در مقاومت کششی را نتیجه داده است. لازم به ذکر است افزایش مقاومت کششی ناشی از سختی قیر ممکن است لزوماً عملکرد مخلوط را بهبود ندهد و اگر افزایش مقاومت کششی ناشی از چسبندگی و پیوستگی قیر باشد می‌توان انتظار عملکرد بهتری را داشت. به منظور بررسی تاثیر پیرشدگی بر مقاومت کششی مخلوطها در حالت خشک شاخص پیرشدگی با تقسیم مقاومت کششی بعد از اعمال پیرشدگی به قبل از آن محاسبه شده و نتایج در شکل ۶ ارائه گردیده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد با افزودن آسفالت ضایعاتی شاخص پیرشدگی نسبت به مخلوط کنترل کاهش می‌یابد که می‌تواند به این دلیل باشد که قیر بکر موجود در مخلوط کنترل مستعد پیرشدگی بیشتری نسبت به قیر پیر شده موجود در آسفالت ضایعاتی است. همچنین، نتایج بیانگر این است که با افزودن نانوسیلیس نیز شاخص پیرشدگی کاهش می‌یابد که نشان دهنده این است که افزودن نانوسیلیس مقاومت به پیرشدگی را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، افزودن روغن‌های جوان کننده نیز تاثیر پیرشدگی را کاهش داده‌اند. با وجود این که مولکول‌های سبک موجود در روغن‌ها در طول زمان پیرشدگی از دست خواهند رفت، اما، به دلیل این که این

ضایعاتی دارد. مقایسه نسبت مقاومت کششی در حالت پیرشده به پیر نشده در مخلوط‌های مختلف نیز نشان می‌دهد که در مخلوط کنترل و مخلوط R60 که فاقد نانو سیلیس و جوان کننده هستند، پیرشدگی حساسیت رطوبتی را کاهش داده است، اما در مخلوط بازیافتی حاوی نانوسیلیس و روغنهای جوان کننده حساسیت رطوبتی افزایش یافته است. دلیلی برای این موضوع یافت نشد و نیاز به بررسی بیشتر دارد. با این حال، در مخلوط‌های حاوی جوان کننده، به نظر می‌رسد در شرایط پیرشدگی روغن‌ها فرصت نفوذ بیشتری در قیر پیرشده پیدا نموده و باعث کاهش بیشتر مقاومت کششی می‌شوند.

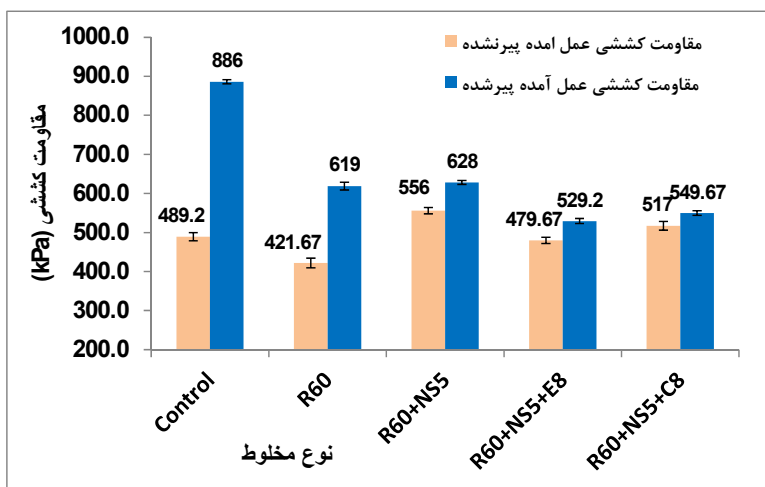
مختلف نسبت مقاومت کششی حالت مرطوب به حالت خشک در مخلوط‌های مختلف قبل از اعمال پیرشدگی و بعد از آن محاسبه شده و نتایج در شکل ۸ نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد با جایگزینی آسفالت بازیافتی به جای سنگدانه‌های طبیعی در مخلوط کنترل حساسیت رطوبتی افزایش یافته است که این مسئله می‌تواند به دلیل جنس سیلیسی مصالح سنگی آسفالت بازیافتی باشد. همچنین، با افزایش نانوسیلیس حساسیت رطوبتی کاهش یافته است و مخلوط‌های حاوی جوان کننده حساسیت رطوبتی کمتری دارند که به دلیل آب‌گریز بودن این روغن‌ها می‌باشد. مخلوط بازیافتی حاوی روغن خوراکی حساسیت رطوبتی کمتری از مخلوط حاوی روغن موتور



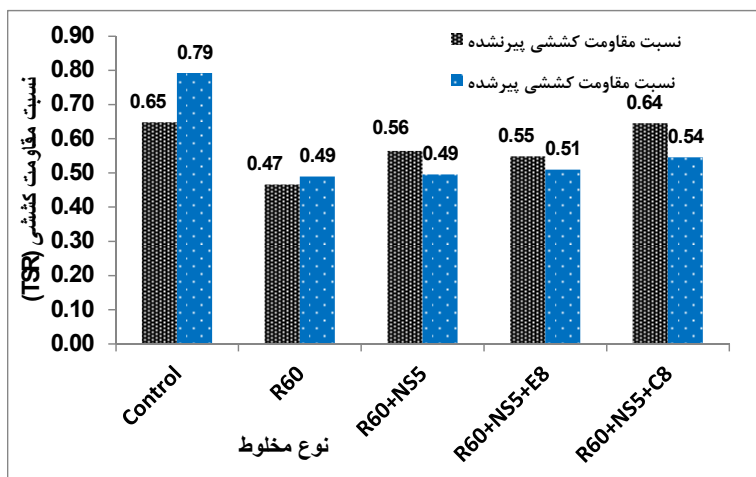
شکل ۵. نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های خشک



شکل ۶. شاخص پیرشدگی بر اساس مقاومت کششی مخلوط‌ها در حالت خشک و مرطوب



شکل ۷. مقاومت کششی در حالت مرطوب برای مخلوط‌های پیرنشده و پیرشده



شکل ۸. نسبت مقاومت کششی مخلوط‌ها در حالت پیرنشده و پیرشده

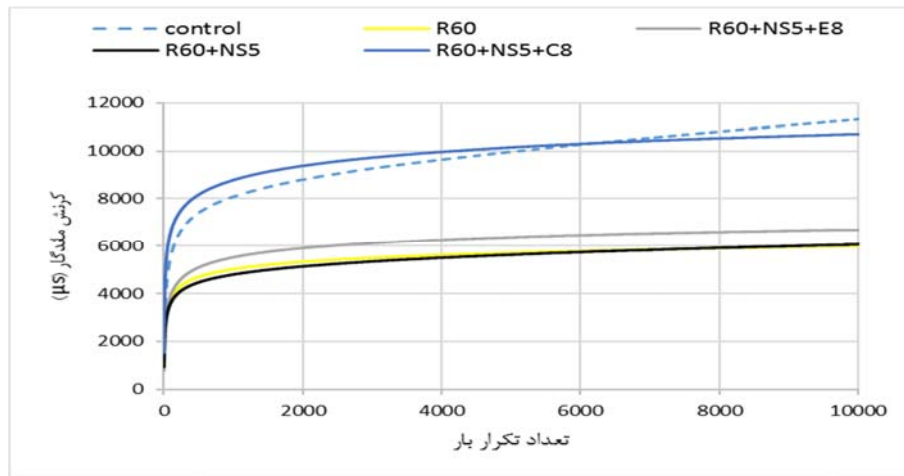
نتایج و تحلیل آزمایش خزش دینامیکی (شیار افتادگی)

شکل ۹ نمودار کرنش ماندگار در برابر تعداد تکرار بارگذاری برای مخلوط‌های آسفالتی را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود مقاومت به تغییر شکل دائمی مخلوط با ۶۰ درصد آسفالت ضایعاتی و ۵ درصد نانوسیلیس تقریباً مشابه مخلوط حاوی ۶۰ آسفالت ضایعاتی بوده و از دیگر مخلوط‌ها بالاتر می‌باشد، که به دلیل اثر سخت‌کنندگی قیر پیرشده موجود در آسفالت ضایعاتی و وجود نانوسیلیس می‌باشد (DeDene and You, 2014). همچنین، با افزودن روغن‌های ضایعاتی به عنوان ماده جوانساز به مخلوط بازیافتی حاوی ۶۰ درصد آسفالت ضایعاتی و ۵ درصد نانوسیلیس، مقاومت به تغییرشکل

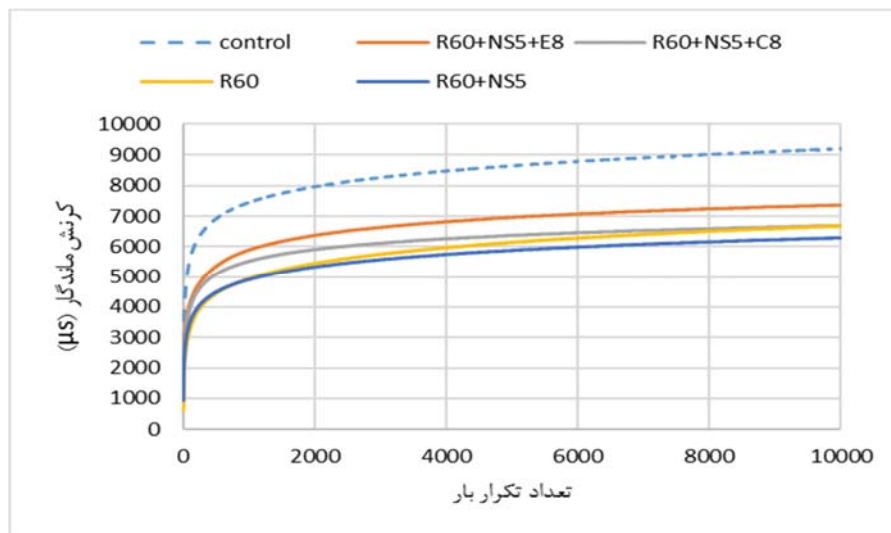
دائمی کاهش می‌یابد و این کاهش برای روغن خوراکی ضایعاتی بیشتر است، که نشان دهنده نرم‌کنندگی بیشتر روغن خوراکی ضایعاتی نسبت به روغن موتور ضایعاتی می‌باشد. این نتیجه منطبق با نتایج تحقیقات قبلی می‌باشد (Taherkhani and Noorian, 2018). در شکل ۹ ملاحظه می‌گردد که نرخ افزایش کرنش در ناحیه دوم منحنی خزش در مخلوط کنترل از سایر مخلوط‌ها بیشتر است. در خصوص مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی معمولاً مقاومت به تغییر شکل عامل نگران‌کننده‌ای نیست. اما، برای تعیین میزان جوان‌کننده برای رسیدن به مخلوطی که دارای انعطاف‌پذیری به اندازه مخلوط کنترل باشد

شکل را بعد از پیرشدگی بلند مدت دارد. از مخلوطهای حاوی جوان کننده، مخلوطی که دارای روغن خوراکی ضایعاتی می باشد مقاومت بیشتری را از مخلوط حاوی جوان کننده روغن موتور ضایعاتی نتیجه داده است و مشاهده می شود مخلوط حاوی آسفالت ضایعاتی و نانوسیلیس نسبت به مخلوط کنترل مقاومت به شیار افتادگی بالایی دارد. دلیل این مقاومت بالا حضور نانوسیلیس در مخلوط است،

استفاده از این ویژگی دارای اهمیت می باشد. به منظور بررسی تاثیر پیرشدگی بلند مدت بر رفتار خزشی مخلوطها، آزمایش خزش بعد از اعمال پیرشدگی بلند مدت نیز بر روی نمونه ها انجام شد که نتایج آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در این شکل نیز مشاهده می شود که مخلوط حاوی نانوسیلیس و آسفالت ضایعاتی بیشترین مقاومت در برابر تغییر شکل را دارد و بعد از آن مخلوط حاوی ۶۰٪ آسفالت ضایعاتی و قیر اصلاح نشده قرار می گیرد. مخلوط کنترل نیز کمترین مقاومت به تغییر



شکل ۹. نمودار کرنش ماندگار در برابر تعداد تکرار بارگذاری برای ترکیبهای مختلف مخلوط آسفالتی در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد و سطح تنش ۲۰۰ کیلوپاسکال



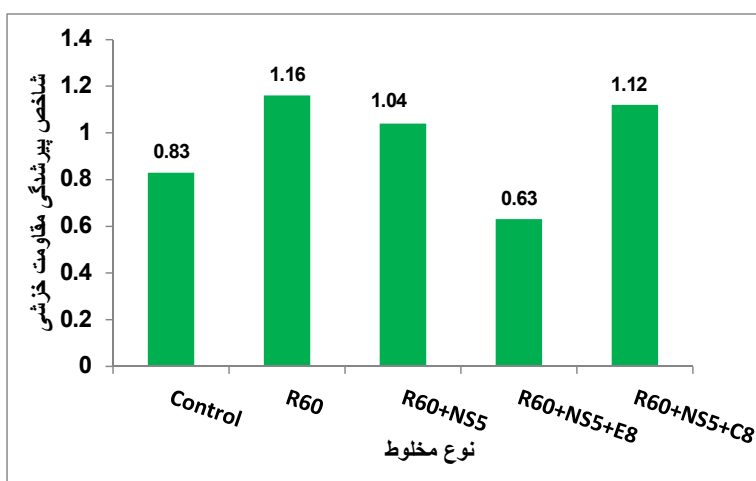
شکل ۱۰. منحنی های خزش مخلوطهای پیرشده در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد و سطح تنش ۲۰۰ کیلوپاسکال

گردید که عبارتست از کرنش جمعی عمودی بعد از اعمال ۱۰ هزار سیکل بارگذاری پس از پیرشدگی بلند مدت به مقدار آن

به منظور تعیین میزان تاثیر پیرشدگی بر رفتار خزشی مخلوطها شاخص پیر شدگی برای مخلوطهای مختلف محاسبه

است. در مخلوط حاوی ۶۰٪ آسفالت بازیافتی و ۵٪ نانوسیلیس که در آن جوان کننده استفاده نگردیده است شاخص پیرشدگی ۱/۰۴ به دست آمده است که نشان می‌دهد استفاده از نانوسیلیس باعث افزایش مقاومت به پیرشدگی می‌شود. در مورد مخلوط بازیافتی بدون جوان کننده و نانوسیلیس و مخلوط حاوی جوان کننده روغن خوراکی شاخص بیشتر از یک نشان دهنده این است که در اثر پیرشدگی مقاومت به شیار شدگی این مخلوط کاهش یافته است. در خصوص مخلوط حاوی روغن گیاهی می‌تواند به دلیل نفوذ بیشتر روغن در لایه قیر پیر شده در اطراف سنگدانه‌ها در طول ۵ روز از زمان پیرشدگی باشد که باعث نرم‌تر شدن قیر و افزایش تغییر شکل می‌گردد.

قبل از اعمال پیرشدگی. اگر شاخص پیرشدگی برابر با یک باشد پیرشدگی تاثیری بر مقاومت خزشی ندارد، اگر کمتر از یک باشد پیرشدگی باعث سخت‌تر شدن مخلوط و افزایش مقاومت آن به خزش شده و اگر بیش از یک باشد مقاومت آن را در برابر تغییر شکل کاهش داده است. شکل ۱۱ نشان‌دهنده شاخص پیرشدگی در تغییر شکل ماندگار مخلوط‌های مختلف می‌باشد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد در مخلوط کنترل و مخلوط حاوی روغن موتور ضایعاتی پیرشدگی مقاومت به شیار شدگی را افزایش داده است که به دلیل سخت‌تر شدن قیر در مخلوط در اثر اکسیداسیون ناشی از پیرشدگی می‌باشد. اما، در سایر مخلوطها میزان تغییر شکل دائمی بعد از پیرشدگی بیشتر از آن قبل از اعمال پیرشدگی



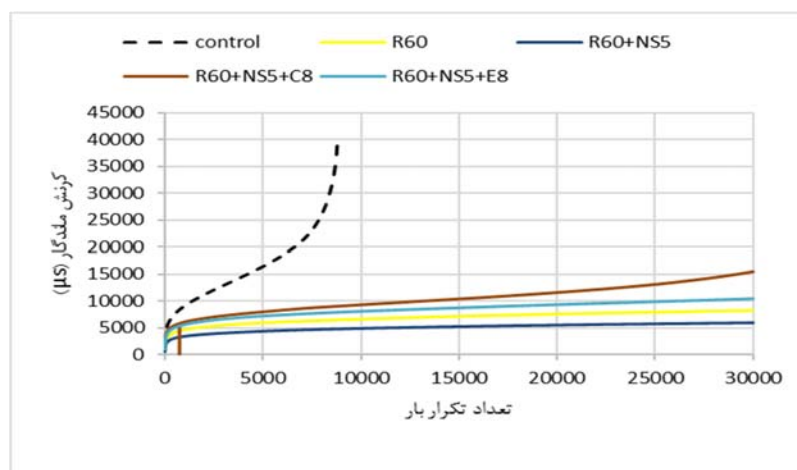
شکل ۱۱. شاخص پیرشدگی در تغییر شکل ماندگار مخلوط‌ها در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد و سطح تنش ۲۰۰ کیلوپاسکال

آسفالت بازیافتی و پخش ذرات ریز نانوسیلیس در قیر و اندرکنش آن با مولکول‌های قیر می‌باشد. مطالعات گذشته نیز نشان داده‌اند که افزایش درصد آسفالت ضایعاتی عمر خستگی را افزایش می‌دهد (Huang et al., 2004; Visintine et al., 2013). در مطالعه‌ای دیگر، نشان داده شد مخلوط حاوی ۱۰ درصد آسفالت ضایعاتی (RAP)، مقاومت به خستگی پایین‌تری نسبت به مخلوط حاوی ۳۰ درصد RAP دارد (Tabakovic et al., 2010). القادی و همکاران در سال

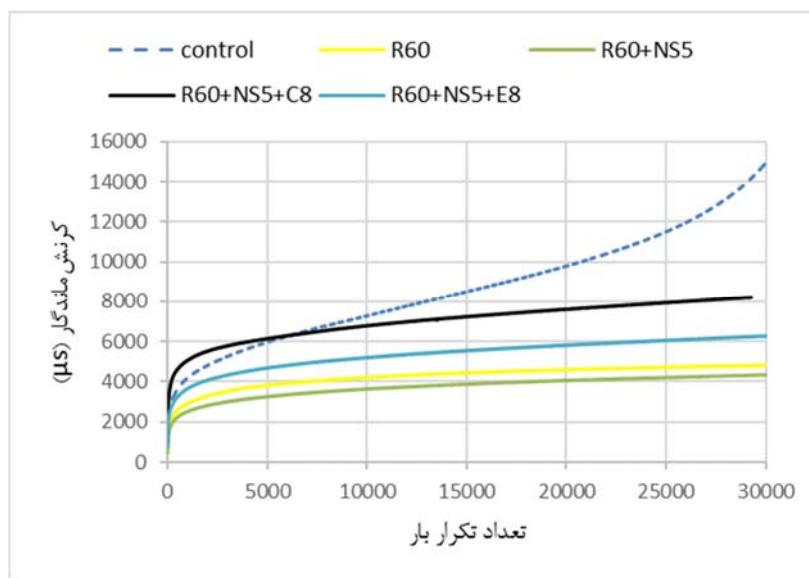
نتایج و تحلیل آزمایش خستگی به روش کشش غیرمستقیم شکل ۱۲ نتایج آزمون خستگی با کنترل تنش پنج مخلوط را نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد فقط مخلوط کنترل به مرحله شکست رسیده است و مخلوط‌های بازیافتی علیرغم تفاوت در میزان کرنش قطری تجمعی هیچکدام بعد از اعمال ۳۰۰۰۰ تکرار بار به مرحله شکست نرسیده‌اند. بر اساس میزان تغییر شکل قطری تجمعی نمونه‌ها، ملاحظه می‌گردد که با افزودن آسفالت ضایعاتی و نانوسیلیس مقاومت به خستگی افزایش می‌یابد که به دلیل اثر سخت‌کنندگی قیر پیر شده در

نمونه‌ها بعد از اعمال ۵۰۰۰ سیکل بارگذاری در حالت قبل از پیرشدگی و بعد از اعمال پیرشدگی شاخص پیرشدگی محاسبه گردید که نتایج در شکل ۴۳ نشان داده شده‌اند. همانگونه که ملاحظه می‌گردد به دلیل سخت شوندگی بعد از اعمال پیرشدگی این شاخص برای همه مخلوط‌ها کمتر از یک می‌باشد. هر چقدر این نسبت کوچکتر باشد نشان دهنده تاثیر بیشتر پیرشدگی بر روی آن می‌باشد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد بیشترین تاثیر پیرشدگی بر روی مخلوط کنترل می‌باشد و کمترین تاثیر پیرشدگی بر مخلوط بازیافتی اصلاح شده با نانوسیلیس و فاقد جوان کننده می‌باشد. ضمناً در مخلوط‌های حاوی جوان کننده نیز تاثیر پیرشدگی کمتر از مخلوط کنترل بوده ولی بیشتر از مخلوطی است که حاوی نانوسیلیس و بدون جوان کننده می‌باشد. مخلوط حاوی جوان کننده روغن خوراکی ضایعاتی تاثیر پیرشدگی بیشتر بوده است. این موضوع همانگونه که قبلاً ذکر شد ممکن است به دلیل قابلیت نفوذ بیشتر روغن خوراکی در داخل قیر پیر شده در طی زمان پیرشدگی می‌باشد که باعث نرمتر شدن قیر و افزایش تغییر شکل قطری شده است.

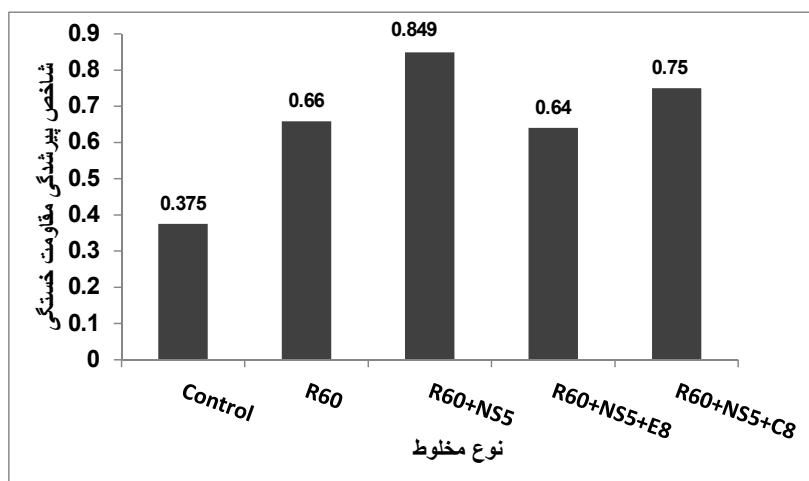
۲۰۱۲ نشان دادند مخلوط‌های با ۳۰ و ۴۰ و ۵۰ درصد RAP در HMA. عمر خستگی را بهبود می‌بخشد (Al-Qadi et al., 2012). نتایج شکل ۱۲ همچنین نشان دهنده این است که با افزودن جوان کننده، به دلیل نرم شدگی قیر، میزان تجمع تغییر شکل قطری بیشتر می‌گردد ولی اثر نرم کنندگی روغن خوراکی ضایعاتی بیشتر از روغن موتور ضایعاتی می‌باشد. به منظور بررسی اثر پیرشدگی بر نتایج آزمایش خستگی این آزمایش بعد از اعمال پیرشدگی بلند مدت بر روی نمونه‌ها مطابق با استاندارد AASHTO R30 انجام گردید که نتایج آن در شکل ۱۳ ملاحظه می‌گردد. مقایسه این نتایج با نتایج نمونه‌های پیر نشده نشان می‌دهد که پیرشدگی مخلوط‌ها عمر خستگی تحت تنش ثابت را افزایش می‌دهد که به دلیل سخت شدگی قیر مخلوط‌ها در اثر اکسیداسیون می‌باشد. در این حالت نیز مخلوط حاوی ۶۰٪ آسفالت ضایعاتی و قیر اصلاح شده با نانوسیلیس بیشترین مقاومت را داشته و بعد از آن مخلوط بازیافتی بدون جوان کننده و حاوی قیر اصلاح نشده، مخلوط بازیافتی حاوی روغن موتور ضایعاتی، مخلوط حاوی روغن خوراکی ضایعاتی و مخلوط کنترل قرار می‌گیرند. با تقسیم تغییر شکل قطری



شکل ۱۲. نمودار خستگی مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی اصلاح شده



شکل ۱۳. نمودار خستگی مخلوط‌های آسفالتی پیرشده بازیافتی اصلاح شده



شکل ۱۴. شاخص پیرشدگی بر حسب تغییر شکل قطری در آزمایش خستگی

۵- نتیجه گیری

-مقاومت کششی مخلوط با افزودن خرده آسفالت ضایعاتی و نانوسیلیس افزایش یافته و با افزودن روغنهای ضایعاتی کاهش می‌یابد و تاثیر روغن خوراکی ضایعاتی در کاهش مقاومت کششی بیشتر می‌باشد.

-تاثیر پیرشدگی بر مقاومت کششی در مخلوط حاوی خرده آسفالت ضایعاتی بیشتر از مخلوط کنترل می‌باشد. افزودن نانوسیلیس و حوان کننده‌ها هر کدام باعث کاهش تاثیر

در این تحقیق خصوصیات انواع مختلفی از مخلوط‌های آسفالت بازیافتی مورد مطالعه قرار گرفته است. مخلوط‌های حاوی ۶۰٪ آسفالت ضایعاتی بدون حوان کننده و با دو نوع حوان کننده مختلف با استفاده از نانوسیلیس اصلاح گردیده و ویژگی‌های آنها شامل مقاومت کششی، حساسیت رطوبتی، مقاومت خزشی، مقاومت به خستگی و تاثیر پیرشدگی بر این خواص مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج کلی زیر حاصل این مطالعه می‌باشند.

موتور ضایعاتی پیرشدگی مقاومت خزشی را افزایش می‌دهد در سایر مخلوط‌ها پیرشدگی باعث می‌شود مقاومت خزشی کاهش یابد. در مخلوط بازیافتی حاوی نانوسیلیس و فاقد جوان کننده، مقاومت خزشی تغییر قابل توجهی در اثر پیرشدگی نمی‌کند. -عمر خستگی تحت تنش ثابت در مخلوط حاوی خرده آسفالت ضایعاتی بیشتر از مخلوط کنترل بوده و با افزودن نانوسیلیس عمر خستگی افزایش و با افزودن روغن ضایعاتی عمر خستگی کاهش می‌یابد. عمر خستگی در مخلوط حاوی روغن خوراکی کمتر از مخلوط حاوی روغن موتور ضایعاتی می‌باشد. -پیرشدگی باعث افزایش عمر خستگی مخلوط‌ها تحت تنش ثابت می‌گردد. بیشترین و کمترین تاثیر پیرشدگی، به ترتیب، بر روی مخلوط کنترل و مخلوط بازیافتی اصلاح شده با نانوسیلیس و فاقد جوان کننده می‌باشد. تاثیر پیرشدگی در مخلوط‌های حاوی جوان کننده کمتر از مخلوط کنترل بوده ولی بیشتر از مخلوطی است که حاوی نانوسیلیس و بدون جوان کننده می‌باشد. مخلوط حاوی جوان کننده روغن خوراکی ضایعاتی تاثیر پیرشدگی بیشتر بوده است.

پیرشدگی بر مقاومت کششی در حالت خشک و مرطوب می‌شوند. -حساسیت رطوبتی مخلوط حاوی خرده آسفالت ضایعاتی بیشتر از مخلوط کنترل است و افزودن نانوسیلیس و همچنین روغن- های ضایعاتی حساسیت رطوبتی را کاهش می‌دهد. جوان کننده روغن خوراکی ضایعاتی حساسیت رطوبتی کمتری از روغن موتور ضایعاتی نتیجه می‌دهد. -در مخلوط کنترل و مخلوطی که حاوی خرده آسفالت ضایعاتی و نانوسیلیس و جوان کننده است، پیرشدگی حساسیت رطوبتی را کاهش می‌دهد، اما در مخلوط‌های حاوی نانوسیلیس و جوان کننده پیرشدگی باعث می‌شود مخلوط به رطوبت حساسیت بیشتری داشته باشد که این موضوع نیاز به بررسی و مطالعه بیشتر دارد. -مقاومت در برابر خزش ناشی از بارگذاری دینامیکی در مخلوط کنترل کمتر سایر مخلوط‌ها بوده و افزودن خرده آسفالت ضایعاتی و نانوسیلیس باعث افزایش مقاومت به خزش شده و افزودن جوان کننده مقاومت به خزش را کاهش می‌دهد و این کاهش برای روغن خوراکی بیشتر از روغن موتور ضایعاتی می‌باشد. -تاثیر پیرشدگی بر مقاومت خزشی مخلوط‌های مختلف متفاوت است. در حالی که در مخلوط کنترل و مخلوط حاوی روغن

۶- مراجع

-Asli, H., Ahmadinia, E., Zargar, M., & Karim, M. R. (2012). Investigation on physical properties of waste cooking oil-Rejuvenated bitumen binder. *Construction and Building Materials*, 37, 398-405.

-Bala, N., Napiyah, M., & Kamaruddin, I. (2018). "Influence of nanosilica on moisture resistance of polymer modified bitumens. *Petroleum Science and Technology*, 36(3), 244-250.

-Bala, N., Napiyah, M., & Kamaruddin, I. (2020). Nanosilica composite asphalt mixtures performance-based design and optimisation using response surface methodology. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(1), 29-40.

-Cao, X., Wang, H., Cao, X., Sun, W., Zhu, H., & Tang, B. (2018). Investigation of rheological and chemical properties asphalt binder rejuvenated with waste vegetable oil. *Construction and*

-Ali, A. W., Mehta, Y. A., Nolan, A., Purdy, C., and Bennert, T. (2016) "Investigation of the impacts of aging and RAP percentages on effectiveness of asphalt binder rejuvenators. *Construction and Building Materials*, Vol.110, 211-217.

-Al-Qadi, I.L., Elseifi, M., Carpenter, S.H. (2007). Reclaimed asphalt pavement-a literature review. *Civil Engineering Studies Illinois Center for Transportation Series No. 07-001 Determination of Usable Residual Asphalt Binder in RAP*.

-Al-Qadi, I. L., Aurangzeb, Q., Carpenter, S. H., Pine, W. J. and Trepanier, J. (2012). Impact of high RAP contents on structural and performance properties of asphalt mixtures. *Report Number FHWA-ICT-12-002*.

- Jahangiri, B., Majidifard, H., Meister, J., Buttlar, W. G. (2019). Performance evaluation of asphalt mixtures with reclaimed asphalt pavement and recycled asphalt shingles in Missouri. *Transportation Research Record*, 0361198119825638.
- Jia, X., Huang, B., Moore, J. A., and Zhao, S. (2015). Influence of waste engine oil on asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol. 27, No.12, 4015042-4015043.
- Kennedy, T. W. and Anagnos, J. N. (1983). Procedures for the Static and Repeated-Load Indirect Tensile Test. Interim Report. *Center for Highway Research*, University of Texas at Austin.
- Lam, M. K., Lee, K. T., & Mohamed, A. R. (2010). Homogeneous, heterogeneous and enzymatic catalysis for transesterification of high free fatty acid oil (waste cooking oil) to biodiesel: a review. *Biotechnology Advances*. 28(4), 500-518.
- Li, H., Zhang, F., Feng, Z., Li, W., & Zou, X. (2021). Study on waste engine oil and waste cooking oil on performance improvement of aged asphalt and application in reclaimed asphalt mixture. *Construction and Building Materials*. 276, 122138-122139.
- Liu, S., Peng, A., Zhou, S., Wu, J., Xuan, W., & Liu, W. (2019). Evaluation of the ageing behaviour of waste engine oil-modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 223, 394-408.
- Maceiras, R., Alfonsín, V., and Morales, F. J. (2017). Recycling of waste engine oil for diesel production. *Waste Management*, Vol.60, 351-356.
- Mirhosseini, A. F., Tahami, S. A., Hoff, I. Dessouky, S., & Ho, C. H. (2019). Performance evaluation of asphalt mixtures containing high-RAP binder content and bio-oil rejuvenator. *Construction and Building Materials*, 227, 116465-1164.
- Mirhosseini, A., F., Kavussi, A., Tahami, S. A., S. Dessouky, S. (2018). Characterizing temperature performance of bio-modified binders containing RAP binder. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30 (8), 04018176-04018177.
- Mogawer, W. S., Booshehrian, A., Vahidi, S., and Austerman, A. J. (2013). Evaluating the effect of rejuvenators on the degree of blending and performance of high RAP, RAS, and RAP/RAS mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, Vol.14,No.sup2, 193-213.
- Nahar, S. N., Qiu, J., Schmets, A. J. M., Schlangen, E., Shirazi, M., Van de Ven, M. F. C., Scarpas, A. (2014). Turning back time: *Building Materials*, 180, 455-463.
- Christensen, W. D., Bonaquist, R., and Jack, D. P. (2000). Evaluation of triaxial strength as a simple test for asphalt concrete rut resistance. *Final Rep., Pennsylvania Dept. of Transportation*.
- Chen, J.-S., Chen, S.-F., Liao, M.-C., and Huang, S. W. (2014). Laboratory evaluation of asphalt blends of recycling agents mixed with aged binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol.27,No.4, 4014143.
- DeDene, C. D., and You, Z. P., (2014). The performance of aged asphalt materials rejuvenated with waste engine oil. *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol.7, No.2, 145-152.
- Dhasmana, H., Hossain, K., & Karakas, A. S. (2019). Effect of long-term ageing on the rheological properties of rejuvenated asphalt binder. *Road Materials and Pavement Design*, 1-19.
- Dokandari, P. A., Kaya, D., Sengoz, B., and Topal, A. (2017). Implementing Waste Oils with Reclaimed Asphalt Pavement. Proceedings of the 2nd World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'17), Barcelona, Spain :2-4
doi.org/10.11159/icsenm17.142
- Enieb, M. Diab, A. (2017). Characteristics of asphalt binder and mixture containing nanosilica. *International Journal of Pavement Research and Technology* (10). 148-157.
- Fini, E.H., Hajikarimi, P., Rahi, M. and Moghadas Nejad, F. (2016). Physiochemical, rheological, and oxidative aging characteristics of asphalt binder in the presence of mesoporous silica nanoparticles. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(2), 04015133-04015134.
- Hassani Nia, M., Ameri, M., & Ziari, H. (2014). Evaluation of Fatigue Resistance of Modified Asphalt Mixtures by Nanosilica. *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, 6(2), 261-270.
- Hill, D. R., Jennings, A. A. (2011). Bioasphalt from Urban Yard Waste Carbonization: A Student Study (No. FHWA/OH-2011/13). *Ohio Department of Transportation, Research & Development*.
- Huang, B., Kingery, W. R. and Zhang, Z. (2004). Laboratory study of fatigue characteristics of HMA mixtures containing RAP. In *International Symposium on Design and Construction of Long Lasting Asphalt Pavements*, Auburn, Alabama, USA.

- Road Materials and Pavement Design. *Taylor & Francis*. 14(2), 432–437.
- Yan, S., Zhou, C., & Ouyang, J. (2022). Rejuvenation effect of waste cooking oil on the adhesion characteristics of aged asphalt to aggregates. *Construction and Building Materials*, 327, 126907.
- Yao, H., You, Z., Li, L., Goh, S.W., Lee, C.H., Yap, Y.K. and Shi, X. (2013). Rheological properties and chemical analysis of nanoclay and carbon microfiber modified asphalt with Fourier transform infrared spectroscopy. *Construction and Building Materials*, 38, 327-337.
- Yu, J.Y., Zhang, H.L., Sun, P. and Zhao, S.F. (2020). Laboratory performances of nano-particles/polymer modified asphalt mixtures developed for the region with hot summer and cold winter and field evaluation. *Road Materials and Pavement Design*. 21(6), 1529-1544.
- Yusoff, N.I.M., Breem, A.A.S., Alattug, H.N., Hamim, A. and Ahmad, J. (2014). The effects of moisture susceptibility and ageing conditions on nano-silica/polymer-modified asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*. 72, 139-147.
- Zargar, M., et al. (2012). Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen. *Journal of Hazardous Materials*, 233, 254-258.
- Zaumanis, M., Mallick, R. B., and Frank, R. (2014). Determining optimum rejuvenator dose for asphalt recycling based on Superpave performance grade specifications. *Construction and Building Materials*, Vol.69, 159–166.
- Zaumanis, M., Mallick, R. Frank, R. (2013). Evaluation of rejuvenator's effectiveness with conventional mix testing for 100% reclaimed asphalt pavement mixtures. *Transportation Research Records. Journal of Transportation Research Board*, 2370 (2013), 17-25.
- Zaumanis, M., Mallick, R. B., and Frank, R. (2015). Evaluation of different recycling agents for restoring aged asphalt binder and performance of 100% recycled asphalt. *Materials and Structures*, Vol.48, No.8, 2475–2488.
- Zhang, R., You, Z., Wang, H., Ye, M., Yap, Y. K., & Si, C. (2019). The impact of bio-oil as rejuvenator for aged asphalt binder. *Construction and Building Materials*. 196, 134-143.
- rheological and microstructural assessment of rejuvenated bitumen. *Transportation Research Records*, 2444 (1) (2014), 52-62.
- Romera, R., Santamaría, A., Peña, J. J., Muñoz, M. E., Barral, M., García, E., and Jañez, V. (2006). Rheological aspects of the rejuvenation of aged bitumen. *Rheologica Acta*. Vol.45, No.4, 474–478.
- Shen, J., Amirkhanian, S., and Aune Miller, J. (2007). Effects of rejuvenating agents on superpave mixtures containing reclaimed asphalt pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol.19, No.5, 376–384.
- Shu, X., Huang, B. and Vukosavljevic, D. (2008). Laboratory evaluation of fatigue characteristics of recycled asphalt mixture. *Construction and Building Materials*. Elsevier, 22(7), 1323–1330.
- Tabaković, A., Gibney, A., McNally, C. and Gilchrist, M. D. (2010). Influence of recycled asphalt pavement on fatigue performance of asphalt concrete base courses. *Journal of Materials in Civil Engineering. American Society of Civil Engineers*, 22(6), 643–650.
- Taherkhani, H., & Noorian, F. (2018). Comparing the effects of waste engine and cooking oil on the properties of asphalt concrete containing reclaimed asphalt pavement (RAP). *Road Materials and Pavement Design*. 1-20.
- Taherkhani, H., & Noorian, F. (2019). Laboratory investigation on the properties of asphalt concrete containing reclaimed asphalt pavement and waste cooking oil as recycling agent. *International Journal of Pavement Engineering*. 1-11.
- Tangella, S. C. S. R., Craus, J., Deacon, J. A. and Monismith, C. L. (1990). Summary report on fatigue response of asphalt mixtures. -A-312.
- Veeraragavan, R. K. (2016). An Investigation of the Performance of Hot Mix Asphalt (HMA) Binder Course Materials with High Percentage of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) and Rejuvenators. Worcester Polytechnic Institute. <https://web.wpi.edu/Pubs/ETD/Available/etd-042816-163006/unrestricted/rveeraragavan.pdf>.
- Visintine, B., Khosla, N. P. and Tayebali, A. (2013). Effects of higher percentage of recycled asphalt pavement on pavement performance.

Investigating the Properties of Recycled Asphalt Concrete Modified by Nano-Silica and Rejuvenated by Waste Cooking and Engine Oil

Mohsen Naji, M.Sc., Grad., Civil Engineering Department, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

Hasan Taherkhani, Associate Professor, Civil Engineering Department, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

E-mail: taherkhani.hasan@znu.ac.ir

Received: June 2024- Accepted: September 2024

ABSTRACT

Using recycled asphalt mixtures, which are made by waste materials, have attracted attentions due to their environmental and economical benefits. However, challenges exist with the performance of the recycled mixtures. In this study, the effect of using nano-silica on the behavior of non-rejuvenated and rejuvenated recycled asphalt concrete has been investigated. Penetration grade asphalt binder modified by 5% of nano-silica has been used in recycled asphalt concrete containing 60% of reclaimed asphalt pavement (RAP). The mixture without rejuvenation and rejuvenated by a constant percentage of waste cooking oil and waste engine oil has been evaluated by indirect tensile strength test on dry and moisture conditioned samples, dynamic creep test and stress controlled fatigue test. The properties of the mixtures have been compared with each other and with the control mixture made by neat binder and aggregates. The tests have been conducted on the samples before aging and after undergoing long term aging condition to investigate the effect of aging on the properties. Results reveal that incorporating RAP into the mixture increases the tensile strength, resistance against creep and fatigue and decreases the moisture resistance of the mixture. Nano-silica modification increases the dry and conditioned tensile strength, resistance against permanent deformation and fatigue. Nano-silica also improves aging resistance of the recycled mixtures. Furthermore, results reveal that waste oils as rejuvenator improves moisture resistance of the mixtures with more improvement for waste cooking oil. In addition, the effect of aging on the properties of the mixture rejuvenated by waste cooking oil is higher than those rejuvenated by waste engine oil.

Keywords: Asphalt Mixture, RAP, Nano-Silica, Waste Engine Oil, Waste Cooking Oil