

مقایسه تاثیر زایکوترم و آهک هیدراته بر حساسیت رطوبتی و مقاومت به ترک خوردگی آسفالت گرم بازیافتی حاوی جوان کننده روغن ضایعاتی

مقاله علمی - پژوهشی

علی شکری، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

حسین امینی، مربی، گروه مهندسی عمران، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران

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

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

دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۸ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱

صفحه ۱۵۰-۱۳۱

چکیده

در این تحقیق، تاثیر دو نوع ماده ضد عریان شدگی بر عملکرد آسفالت بازیافتی مورد مطالعه و مقایسه قرار گرفته است. مصالح سنگی بتن آسفالتی در دو مقدار مختلف ۲۵ و ۷۵٪ با تراشه‌های آسفالتی جایگزین گردیده و به وسیله مقدار مناسبی از جوان کننده روغن خوراکی ضایعاتی جوانسازی شده و برای افزایش مقاومت در برابر آسیب رطوبتی دو نوع ماده ضد عریان شدگی شامل آهک هیدراته و زایکوترم به آنها اضافه گردیده است. سپس مخلوط‌های تهیه شده تحت آزمایش کشش غیر مستقیم در شرایط خشک و مرطوب، آزمایش کانتابرو در حالت خشک و تر، و خمش نیم‌دایره‌ای در دمای محیط قرار گرفته و خصوصیات مقاومت کششی، حساسیت رطوبتی، مقاومت به شن‌زدگی و شکست مخلوط‌ها مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش جایگزینی مصالح سنگی طبیعی با تراشه آسفالتی مقاومت کششی غیر مستقیم، بار بحرانی و انرژی شکست افزایش یافته ولی مقاومت به شن‌زدگی، مقاومت در برابر آسیب رطوبتی و شاخص مقاومت به ترک خوردگی کاهش می‌یابد. همچنین، نتایج نشان می‌دهند که مخلوط‌های حاوی آهک هیدراته مقاومت کششی، مقاومت به شن‌زدگی، مقاومت در برابر آسیب رطوبتی و خصوصیات مکانیک شکست شامل بار بحرانی و انرژی شکست بیشتری از زایکوترم دارند. اما، تاثیر زایکوترم از نظر اثر رطوبت بر مقاومت شن‌زدگی و همچنین، شاخص مقاومت به ترک خوردگی بهتر از آهک می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آهک هیدراته، انرژی شکست، بتن آسفالتی بازیافتی، حساسیت رطوبتی، زایکوترم

۱-مقدمه

جدید ترکیب شده و مخلوط آسفالتی جدیدی را تولید می‌کند. با توجه به رویکرد کاهش مصرف انرژی و استفاده کمتر از منابع تجدید ناپذیر مثل مصالح سنگی و قیر، به کارگیری تراشه‌های آسفالتی ضایعاتی در تولید مخلوط‌های آسفالتی به طور قابل توجهی در سالهای اخیر افزایش یافته است. استفاده مجدد از تراشه‌های آسفالتی ضایعاتی باعث کاهش هزینه ساخت روسازی‌های جدید شده و به حفظ محیط زیست کمک می‌نماید (Nsengiyumva et al., 2020). در حال حاضر،

یکی از روش‌های بهسازی روسازی‌های آسفالتی بازیافت آسفالت می‌باشد. با برداشت لایه رویه در روسازی‌های آسفالتی قدیمی، تراشه‌های آسفالتی تولید می‌شود که معمولاً در اطراف روسازی‌ها دپو شده و مشکلاتی را برای محیط زیست ایجاد می‌کند (Hettiarachchi et al., 2019). تخمین زده می‌شود که سالانه ۱۲۰ میلیون تن تراشه آسفالتی حاصل از تراشیدن رویه‌های فرسوده راه‌های موجود تولید می‌گردد (EAPA, 2018). در فرآیند بازیافت آسفالت، تراشه‌های آسفالتی با مصالح

کل روغن‌های خوراکی ضایعاتی ۲۰ تا ۳۰٪ آنها بازیافت می‌گردد (Chen et al., 2014). روغن‌های ضایعاتی که بعد از استفاده در سینک آشپزخانه‌ها، سطل زباله، سیستم فاضلاب، سطح زمین یا آب رها می‌شوند برای سلامتی انسان و محیط زیست مضر بوده و توصیه می‌شود که به طور مناسبی مدیریت گردند (Kabir et al., 2014; Sanli et al., 2011). این نوع رهاسازی‌ها به شدت زمین و آب را به شکل آلودگی، اختلال در زندگی موجودات زنده در آب و تامین اکسیژن تحت تاثیر قرار می‌دهد، و باعث گرفتگی و سرریز شدن سیستم‌های فاضلاب و افزایش هزینه عملیات و نگهداری فاضلاب می‌شود. بر اساس یک مطالعه در آمریکا (Howell et al., 2010) تقریباً ۴۰ درصد از گرفتگی در سیستم فاضلاب به دلیل ریختن روغن خوراکی ضایعاتی در سینک آشپزخانه‌ها می‌باشد. با بازیافت روغن خوراکی ضایعاتی نه تنها می‌توان محصولات جدیدی از قبیل سوخت‌های زیستی، صابون و خوراک دام تولید نمود، همچنین اثرات منفی زیست محیطی آن را نیز می‌توان کنترل نمود. ایده استفاده از روغن خوراکی ضایعاتی به عنوان جوان کننده در آسفالت اولین بار توسط بیلی و فیلیپس (Bailey and Philips, 2010) ارائه شد که بعد از آنها توسط محققین مختلف برای بازسازی قیر پیر شده مورد بررسی قرار گرفت (Asli et al., 2012; Asli and Karim, 2011; Wen et al., 2012; Zargar et al., 2013). روغن خوراکی را می‌توان مستقیماً، یا بعد از فیلتر و جداکردن ناخالصی‌ها و یا بعد از اصلاح به عنوان جوان کننده استفاده نمود (Azahar et al., 2017). روغن خوراکی ضایعاتی غنی از اسیدهای چرب است که مشابه اجزاء با وزن مولکولی پایین در قیر (مالته‌ها) می‌باشد. قیر آسفالت در حین پیرشدگی در فرایند تولید و سرویس‌دهی، اجزاء سبک خود را از دست داده و اجزای سنگین آن (آسفالت‌ها) اضافه می‌گردند. روغن خوراکی ضایعاتی می‌تواند نسبت آسفالتن به مالتن را به حالت قیر اولیه بازگرداند (Azahar et al., 2016). در طی بیش از یک دهه گذشته مطالعات متعددی در زمینه استفاده از روغن‌های خوراکی ضایعاتی به عنوان عامل جوانساز در قیر و آسفالت پیر شده انجام گرفته است، که در طی آنها بر روی تاثیر استفاده از روغن خوراکی ضایعاتی بر روی خواص فیزیکی قیر از قبیل درجه نفوذ، نقطه نرمی، درجه انگمی، چگالی، درجه اشتعال، و خصوصیات رئولوژیکی قیر انجام گرفته است. در این مطالعات مقدار مناسبی از جوانساز که باعث رسیدن

در اغلب ادارات حمل و نقل در ایالات متحده آمریکا اجازه استفاده از تراشه آسفالت در درصدهایی بین ۱۵ تا ۴۵٪ داده می‌شود. با این حال، چند نگرانی در مصرف تراشه‌های آسفالتی وجود دارد، که از جمله آنها کیفیت پایین قیر موجود در آن و سختی بالای آن است که بر عملکرد و دوام مخلوط بازیافتی تاثیر مخرب دارد. مخلوط‌های آسفالتی حاوی تراشه آسفالتی معمولاً سخت‌تر از مخلوط‌های بدون آن می‌باشند، که دلیل آن وجود قیر پیر و سخت شده در تراشه آسفالتی می‌باشد، که در نتیجه آن منجر به ترک خوردگی زودرس در این آسفالت‌ها می‌شود (Zhu et al., 2018; Song et al., 2018; Hou et al., 2018; Elkashaf et al., 2017; Jahanbakhsh et al., 2019). راهکارهای مختلفی برای غلبه بر این مشکل ارائه شده است که شامل استفاده از قیر نرم‌تر، استفاده از تکنولوژی‌های آسفالت گرم و استفاده از مواد جوان کننده می‌باشد. مواد جوان کننده معمولاً دارای مقادیر زیادی از مولکولهای مالتن هستند که باعث جبران مالتنهای از دست رفته قیر در فرآیند پیری می‌شوند. بر اساس طبقه‌بندی مرکز ملی صنعت آسفالت، جوان کننده‌ها به پنج نوع مشتقات آروماتیکی، روغنهای چوب، اسیدهای چرب، روغن‌های نفتتیک و روغن‌های پارافینیک تقسیم می‌شوند (NCAT, 2014). علاوه بر اینها، مواد جوانساز مرکب شامل روغنهای پایه زیستی و روغنهای گیاهی اصلاح شده نیز در بازار موجود می‌باشند. همه انواع جوانسازها در فرآیندی مشابه باعث جوانسازی می‌شوند که باعث می‌گردند خصوصیات عملکردی و رئولوژیکی قیر پیر شده تغییر کند. مکانیزم جوانسازی متاثر از سه عامل می‌باشد که عبارتند از: ترکیب قیر تازه، پیر شده و جوانساز در مخلوط، گسترش و پخش جوانساز در قیر پیر شده و سازگاری بین ماده جوانساز، قیر تازه و قیر پیر شده. انتشار و پخش جوان کننده فرآیندی است که در آن قیر پیر شده سعی می‌کند هیدروکرنهای مایع در روغن را جذب نماید (Kaseer et al., 2019). افزایش جمعیت تقاضا برای مواد غذایی را افزایش داده است، که منجر به تولید مقادیر بالای ضایعات آشپزخانه‌ای شده است، که یکی از آنها روغن مورد استفاده در سرخ کردن و پخت و پز است. این روغن‌ها از منابع مختلفی مثل چربی‌های گیاهی و حیوانی به دست می‌آیند. مصرف روغن‌های گیاهی در دنیا در سال ۲۰۱۹ به حدود ۲۰۵ میلیون تن رسید که سالانه نیز به این مقدار ۲٪ اضافه می‌گردد (Zahoor et al., 2021). از همین رو، مدیریت ضایعات روغن‌های پخت و پز به یکی از چالش‌های مهم در سراسر دنیا تبدیل شده است. از

مطالعه حاضر نیز مد نظر قرار گرفته است. هنوز خلأهای زیادی در زمینه استفاده از روغنهای خوراکی ضایعاتی به عنوان جوانساز در بتن آسفالتی بازیافتی وجود دارد که نیاز به انجام تحقیقات بیشتری است. یکی از عوامل مهم موثر بر خرابیهای روسازیهای آسفالتی رطوبت می باشد، که تاثیر مخرب آن به عوامل مختلفی از قبیل جنس و خصوصیات مصالح سنگی، قیر و اثرات متقابل آنها با هم بستگی دارد (Ghaffarpour, 2008; Rafiqol and Arif, 2010; Sengiz and Agar, 2007). مصالح سنگی را از این نظر به دو گروه مصالح آبدوست که حساسیت بالایی در برابر رطوبت دارند، مثل مصالح سنگی از جنس سیلیس، و مصالح سنگی آبگریز، مثل مصالح سنگی از جنس آهک، که در مقابل آسیبهای رطوبت مقاوم می باشند، تقسیم می کنند. مخلوطهای آسفالتی ساخته شده با سنگهای سیلیسی، که دارای بار سطحی منفی هستند، بیشتر از مخلوطهای آسفالتی ساخته شده با مصالح سنگی آهکی، که دارای بار سطحی مثبت هستند دچار آسیب رطوبتی می گردد (Shah, 2003).

سنگدانههای سیلیسی اسیدی بوده و با نفوذ آب در آن مولکولهای اسید به یون منفی کربوکسیلات (R-COO) و یون مثبت هیدروژن تجزیه می گردد، که باعث می گردد بار قیر منفی شده و به سطح سنگدانه با بار منفی نچسبیده و آسیب رطوبتی رخ دهد. اما، وقتی مصالح سنگی سنگی قلبایی بوده و بار سطحی آن مثبت باشد، چسبندگی بین ترکیبات اسیدی قیر با بار منفی و بار مثبت سطح سنگدانهها ایجاد شده و مخلوط در مقابل آسیب رطوبتی مقاوم می گردد. بنابراین، بهتر است برای مقابله با آسیبهای رطوبتی از مصالح سنگی آبگریز استفاده نمود، اما، در برخی از مناطق ممکن است تهیه مصالح سنگی آبگریز امکان پذیر نبوده و یا هزینه بالایی داشته باشد، که در این صورت برای جبران آسیبهای رطوبتی باید از مواد ضد عریان شدگی استفاده نمود. مواد ضد عریان شدگی مختلفی مورد استفاده قرار می گیرند، که شامل مواد ضد عریان شدگی به شکل فیلر، مثل آهک هیدراته، مواد ضد عریان شدگی مایع، مواد ضد عریان شدگی پلیمری و مواد ضد عریان شدگی از نوع نانومواد، مثل زایکوترم و نانوسیلیس می باشند. ژیاو و همکارانش مقایسه ای بین دو ماده ضد عریان شدگی مایع و آهک هیدراته انجام دادند تا اثر آنها را بر حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی ارزیابی کنند و نتیجه گیری نمودند که هر چند افزودنی های مایع مقاومت کششی غیر مستقیم را به میزان قابل توجهی بهبود دادند، اما در مقایسه با آهک هیدراته تاثیر بر روی حساسیت رطوبتی خیلی محدود بود (Xiao et al., 2010). در مطالعه ای دیگری نظری زاد و همکارانش به مقایسه تاثیر آهک هیدراته و یک نوع

به خصوصیات اولیه قیر میشود نیز تعیین شده است. همچنین تاثیر استفاده از روغن خوراکی ضایعاتی بر خصوصیات مخلوط آسفالتی از قبیل مقاومت کششی، حساسیت رطوبتی، مقاومت خستگی، شیار شدگی و سایر خواص مورد مطالعه قرار گرفته است. تمام این موارد به علاوه موضوعات دیگری در زمینه استفاده از روغن خوراکی ضایعاتی به عنوان جوانساز قیر پیر شده در مقاله مروری توسط زاهور و همکاران (Zahoor et al., 2021) ارائه شده است که علاقمندان می توانند برای جزئیات بیشتر به این مقاله مراجعه نمایند. بر اساس مطالعات انجام گرفته خواص مقاومت به شیارشدگی با افزایش مقدار روغن در مخلوط بازیافتی کاهش می یابد (Taherkhani and Noorian, 2018; Wen et al., 2013; Zaumanis et al., 2014). مطالعه انجام گرفته توسط طاهرخانی و نوریان نشان داد که با افزودن روغن خوراکی ضایعاتی به مقدار ۱۰٪ از وزن قیر پیر شده موجود در تراشه آسفالتی مقاومت به خزش تحت بار دینامیکی به مقدار آن در مخلوط کنترل می رسد. تاثیر روغن خوراکی ضایعاتی بر مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط بازیافتی

با افزایش مقدار روغن کاهش می یابد (Taherkhani and Noorian, 2019; Zaumanis et al., 2014). طاهرخانی و نوریان دریافتند که در مخلوطهای حاوی ۲۵، ۵۰ و ۷۵٪ از تراشه آسفالتی، با افزودن، به ترتیب، ۳، ۶ و ۱۰٪ روغن خوراکی ضایعاتی مقاومت کششی به اندازه آن در مخلوط کنترل می رسد. مطالعات محدودی که بر روی تاثیر روغن خوراکی ضایعاتی بر مقاومت خستگی و ترکهای حرارتی انجام گرفته نشان می دهد که افزودن روغن در حد معینی مقاومت به ترک حرارتی را بهبود می دهد، و مقاومت به ترک خستگی با افزایش بیش از حد معین از روغن کاهش می یابد (Zahoor et al., 2021). مطالعات محدودی که در زمینه حساسیت رطوبتی مخلوطهای آسفالتی بازیافتی حاوی روغن خوراکی ضایعاتی انجام گرفته است نشان می دهند که نتایج متناقض است. ون و همکاران نتیجه گرفتند که مخلوطهای بازیافتی حاوی روغن خوراکی ضایعاتی حداقل نسبت مقاومت کششی ۸۰٪ را تامین می کنند، در حالی که مجیدی فرد و همکاران (Majidifard et al., 2019) و زائومانیس و همکارانش (Zaumanis et al., 2014) دریافتند که مخلوطهای آسفالتی بازیافتی حاوی روغن خوراکی ضایعاتی حساسیت رطوبتی بیشتری از مخلوط ساخته شده با مصالح بکر دارند. بنابراین، این موضوع نیاز به بررسی بیشتری دارد، که در

۲- روش تحقیق

۲-۱- مواد و مصالح

مصالح مورد استفاده در این تحقیق شامل قیر و مصالح سنگی بکر، خرده آسفالت ضایعاتی، آهک هیدراته، زایکوترم و روغن خوراکی ضایعاتی می‌باشند.

برای ساخت مخلوط‌های آسفالتی گرم، قیر PG58-22 استفاده شد که از شرکت قیر آکام استان قم تهیه گردید. جدول ۱ برخی از مشخصات قیر مصرفی را نشان می‌دهد که توسط شرکت تولیدکننده ارائه شده است.

مصالح سنگی مورد استفاده در این پژوهش از جنس سیلیس می‌باشد که از کارخانه آسفالت شهرداری زنجان تهیه شد. جدول ۲ مشخصات فنی مصالح سنگی مورد استفاده و جدول ۳ چگالی‌ها و جذب آب مصالح سنگی را نشان می‌دهد. دانه‌بندی شماره ۴ نشریه ۲۳۴ برای مخلوط‌های بتن آسفالتی گرم رویه با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر استفاده گردید. شکل ۱ محدوده دانه‌بندی آیین نامه و دانه‌بندی مورد استفاده برای مخلوط‌ها را نشان می‌دهد. مصالح خرده‌آسفالت استفاده شده در این تحقیق از انبار دپوی مصالح خرده‌آسفالت واقع در راهدارخانه قره‌پشتلو (کیلومتر ۵ جاده زنجان - بیجار) تهیه شد. در ابتدا برای انجام برخی آزمایش‌ها شامل جداسازی قیر از سنگدانه و تعیین درصد قیر پیرشده موجود در خرده‌آسفالت و دانه‌بندی مصالح سنگی آن از کل مصالح موجود، نمونه‌برداری به عمل آمد. نمونه تهیه شده باید به صورتی باشد که معرف خواص کل مصالح بوده تا تغییرات در مشخصات مصالح کاهش یابد. به همین منظور حدود دو کیلوگرم از مصالح درشت‌دانه خرده آسفالت به عنوان نمونه با استفاده از روش چهار قسمت کردن تهیه گردید. سپس درصد قیر مصالح خرده‌آسفالت با استفاده از روش تجزیه آسفالت به وسیله سانتریفوژ مطابق با استاندارد ASTM D2172 در آزمایشگاه بدست آمد. در این آزمایش از بنزین به عنوان حلال استفاده گردید. پس از جداسازی قیر از مصالح سنگی، که درصد قیر آن ۴٫۷۹٪ تعیین شد، دانه‌بندی مصالح سنگی خرده آسفالت تعیین شد، که نتایج آن در شکل ۱ ارائه شده است.

از روغن ضایعاتی خوراکی به عنوان عوامل جوان‌کننده در مخلوط‌های آسفالتی استفاده شد. روغن خوراکی ضایعاتی از یک رستوران در شهر زنجان تهیه گردید و جهت جدا نمودن ناخالصی‌ها، از صافی عبور داده شد.

زایکوترم نسل پیشرفته‌ای از نانو موادهایی است که جزو افزودنی‌های سیلان می‌باشد که به منظور ایجاد پیوند شیمیایی قیر و مصالح سنگی در مقیاس نانو استفاده می‌شود. ترکیبات ارگانو سیلیکون در حضور آب به سیلانول (Si-OH) تبدیل می‌شوند و از طریق واکنش با سیلانول‌های سطحی سنگدانه‌ها

ماده ضد عریان‌شدگی مایع با نام تجاری In/400-S بر حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی پرداختند و نتایج آنها نشان داد که مایع ضد عریان‌شدگی مایع افزایش بیشتری در مقاومت به آسیب رطوبتی ایجاد می‌کند (Nazarizad et al., 2015). بخش زیادی از مواد ضد عریان‌شدگی مایع خصوصیات مخلوط آسفالتی را در حالت خشک بهبود می‌دهند، اما، در شرایط مرطوب این بهبودها موقتی است. به همین دلیل، تکنولوژی نانوفناوری، به ویژه استفاده از مواد افزودنی با پایه ارگانوسیلیکون مورد بررسی قرار گرفته‌اند که در حال حاضر محبوبیت آنها در صنعت روسازی در حال افزایش است. در این تکنولوژی از اتصال قوی شیمیایی در اتم‌های سیلیس که قوی‌ترین پیوند در جهان طبیعی شناخته می‌شود به کار گرفته شده است. زایکوترم و زایکوسویل از مواد افزودنی مایع با پایه سیلان می‌باشند که به طور موثری مقاومت مخلوط‌های آسفالتی را در برابر رطوبت بهبود می‌دهند. زایکوترم یک نانو ماده افزودنی شیمیایی آسفالت گرم است که ضمن بهبود در مقاومت آسفالت در دماهای بالا، پوشش سنگدانه‌ها، تراکم و چسبندگی آسفالت، دمای تولید و تراکم آسفالت را تا ۳۰ درجه سانتیگراد کاهش می‌دهد که منجر به کاهش مصرف انرژی و آلودگی هوا می‌گردد (Nithinchary et al., 2024). این ماده توسط شرکت زایدکس در گجرات هند تولید می‌شود. انجام مطالعه بر روی قیر حاوی افزودنی زایکوترم با انجام آزمایش‌های رئومتر برشی دینامیکی، خزش-باربرداری چند تنش و نقطه نرمی نشان داده‌اند که زایکوترم مقاومت به شیارشدگی قیر را افزایش و حساسیت حرارتی را کاهش می‌دهد (Nasr et al., 2024).

بررسی ادبیات فنی نشان می‌دهد که مطالعات بیشتری در زمینه آسفالت‌های بازآفتابی حاوی جوانساز روغن خوراکی ضایعاتی مورد نیاز است. از جمله خلاءهایی که در این زمینه وجود دارد، وجود سایر افزودنی‌ها در کنار جوانساز روغن خوراکی ضایعاتی است. تاکنون مطالعه‌ای بر روی تاثیر مواد ضد عریان‌شدگی در مخلوط‌های بازآفتابی که حاوی جوانساز روغن خوراکی ضایعاتی هستند انجام نگرفته است. این تحقیق، با این هدف برنامه ریزی گردید که ضمن مقایسه تاثیر دو نوع ماده ضد عریان‌شدگی رایج در کشور بر خصوصیات مقاومت کششی، حساسیت رطوبتی، مقاومت شن‌زدگی و مکانیک شکست مخلوط‌های آسفالتی، این ویژگی‌ها در مخلوطی بررسی گردد که حاوی درصد‌های مختلفی از تراشه آسفالتی بوده و با مقدار مناسبی از روغن خوراکی ضایعاتی جوانساز گردیده است. نتایج این مطالعه می‌تواند به مهندسين در به کار گیری این مواد افزودنی در صنعت آسفالت کمک نماید و بخشی از سوالات در این مورد را پاسخ دهد و سوالات بیشتری را برای تحقیق بیشتر ایجاد نماید.

پودر آهک‌هیدراته مورد استفاده از کارخانه آهک آذرشهر تهیه گردید، که ترکیبات شیمیایی آن مطابق جدول ۶ می باشد. پودر آهک‌هیدراته مورد استفاده، تماماً از الک نمرة ۱۰۰ عبور کرده و مقدار عبوری از الک نمرة ۲۰۰ به میزان ۸۰ درصد می باشد. با انجام آزمایش، مقدار وزن مخصوص آهک‌هیدراته مصرفی، ۲٫۱۶ گرم بر سانتی متر مکعب بدست آمد.

پوششی از پیوندهای (Si-O-Si) را بر روی سنگدانه‌ها ایجاد می‌کنند. پیوند کوالانسی (Si-O-Si) به عنوان پوشش و مانع برای نفوذ آب عمل می‌کند. ترکیبات شیمیایی و مواد تشکیل‌دهنده زایکوترم در جدول ۴ نشان داده شده است. زایکوترم استفاده شده در این تحقیق از شرکت اکسیر شرق مشهد تهیه شد. خصوصیات زایکوترم استفاده شده در این تحقیق در جدول ۵ داده شده است.

جدول ۱. مشخصات قیر مورد استفاده در پژوهش

مشخصه	روش آزمایش	نتیجه	حدود آیین‌نامه
درجه اشتعال (سانتی‌گراد)	AASHTO-T48	۳۰۸	حداقل ۲۳۰
ویسکوزیته در دمای ۱۳۵ درجه سانتیگراد (Pa.s)	AASHTO-T316	۰٫۲۵۳	حداکثر ۳
$G^*/\sin\delta$ در آزمایش DSR در دمای ۵۸ درجه سانتیگراد بر روی قیر پیر نشده (کیلوپاسکال)	AASHTO-T315	۱٫۸۴	حداقل ۱
$G^*/\sin\delta$ در آزمایش DSR در دمای ۵۸ درجه سانتیگراد بر روی قیر پیر شده کوتاه مدت (کیلوپاسکال)	AASHTO-T315	۲٫۹۳	حداقل ۲٫۲
افت وزنی بعد از آزمایش لعاب نازک چرخشی %	AASHTO-T240	۰٫۰۴	حداکثر ۱٪
$G^*\sin\delta$ در آزمایش DSR در دمای ۲۲ درجه سانتیگراد بر روی قیر پیر شده بلند مدت (کیلوپاسکال)	AASHTO-T315	3890	حداکثر ۵۰۰۰
سختی خزشی در آزمایش رئومتر تیر خمشی در دمای ۱۲- (مگاپاسکال)	AASHTO-T313	۱۱۱	حداکثر ۳۰۰
مقدار ضریب m در آزمایش رئومتر تیر خمشی	AASHTO-T313	۰٫۳۵	حداقل ۰٫۳

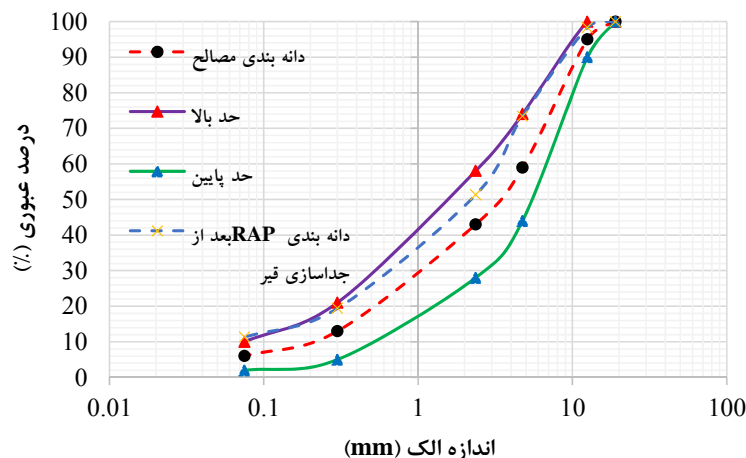
جدول ۲. مشخصات مصالح سنگی بکر

مشخصه	روش آزمایش	نتایج آزمایش	
		درشت دانه	ریزدانه
درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لس آنجلس	AASHTO-T96	۱۶	-
ارزش ماسه‌ای	AASHTO-T176	-	۵۱
درصد شکستگی مصالح سنگی روی الک شماره ۴	ASTM-D5821	در یک جبهه ۹۸ در دو جبهه ۹۶	-
درصد سیلیس مصالح سنگی	-	۵۰٫۸	-
درصد تورق	BS-812	۱۵	-
ضریب نرمی ماسه	AASHTO-M6	-	۳٫۷۵
درصد افت وزنی در مقابل سولفات سدیم	AASHTO-T104	۱	۰
درصد اندود به قیر مصالح سنگی	ASTM-D1664	بیش از ۹۵ درصد	-
درصد دانه‌های پهن و دراز	ASTM-D4791	۹	دارد

جدول ۳. وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی

مشخصه	وزن مخصوص (گرم بر سانتی متر مکعب)	
	ظاهری	حقیقی
جذب آب (%)		

۱,۵	۲,۶۴۸	۲,۷۶	مصالح سنگی مانده روی الک ۸
۱,۹	۲,۶۰۵	۲,۷۴	مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۸ و مانده روی ۲۰۰
-	۲,۷		مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۲۰۰
	۲,۶۳۵		وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی (گرم بر سانتی متر مکعب) Gsb



شکل ۱. دانه بندی مخلوط‌های مورد تحقیق و مصالح سنگی تراشه آسفالت بعد از جداسازی

جدول ۴. ترکیبات شیمیایی زایکوترم

مواد تشکیل دهنده زایکوترم	درصد مواد تشکیل دهنده
Hydroxyalkyl-alkoxy-alkylsilyl	۶۵-٪۷۰
Benzyl Alcohol	۲۵-٪۲۷
Ethylene Glycol	۳-٪۵

جدول ۵. خصوصیات زایکوترم مورد استفاده در پژوهش

حالت	رنگ	نقطه اشتعال (سانتی‌گراد)	چگالی (gr/mlit)	نقطه انجماد (سانتی‌گراد)	مقدار PH	کندروانی (سانتی‌پواز)
مایع	زرد	۸۰	۱,۰۱	۵	۱۰٪ محلول در آب طبیعی یا کمی اسیدی	۵۰۰=۱۰۰

جدول ۶. ترکیبات شیمیایی آهک مورد استفاده در تحقیق

ترکیبات	Ca(OH) ₂	MgO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaCO ₃	CaSO ₄	Fe ₂ O ₃	رطوبت
---------	---------------------	-----	-----	------------------	--------------------------------	-------------------	-------------------	--------------------------------	-------

۲-۲- برنامه تحقیق، طرح اختلاط و روش تهیه نمونه‌ها

هدف از این تحقیق مقایسه تاثیر دو روش رایجی است که در کشور برای مقابله با آسیب رطوبتی به مخلوط‌های آسفالتی اضافه می‌گردد، که شامل محلول زایکوترم و پودر آهک هیدراته می‌باشد. این مقایسه برای آسفالت‌های بازیافتی انجام گرفته است. برای رسیدن به این هدف، ۷ نوع مخلوط مختلف مورد مطالعه قرار گرفتند. یک مخلوط، که فاقد هیچگونه مواد افزودنی و RAP می‌باشد و از قیر بکر و مصالح سنگی معدنی از جنس سیلیس ساخته شده است به عنوان مخلوط کنترل در نظر گرفته شد. در دو مخلوط دیگر از ۲۵ و ۷۵ درصد (برحسب وزن سنگدانه) مصالح آسفالت بازیافتی RAP استفاده گردید اما ماده جوان‌کننده ضایعاتی و زایکوترم یا فیلر آهک در آن به کار برده نشد. ۴ مخلوط دیگر نیز حاوی ۲۵ و ۷۵ درصد خرده آسفالت ضایعاتی بوده که با ۱۰٪ از وزن قیر پیرشده موجود در آن جوانسازی شده و یک بار با ۱۵٪، وزن کل قیر مخلوط زایکوترم اصلاح گردید و بار دیگر با مقدار ۲٪ وزن کل مصالح سنگی آهک هیدراته به عنوان فیلر استفاده گردید. مقدار زایکوترم بر اساس دستورالعمل سازنده محصول و تحقیقات قبلی انتخاب گردید. خوانندی و همکارانش با به کارگیری درصد‌های مختلفی از آهک هیدراته در مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با انواع مختلف مصالح سنگی دریافتند که حساسیت رطوبتی با افزایش میزان آهک هیدراته تا ۲٪ افزایش و بعد از آن کاهش می‌یابد (خوانندی و همکاران، ۱۳۹۸). لازم به ذکر است مقادیر استفاده برای جوانساز بر اساس نتایج تحقیقات قبلی می‌باشد (Taherkhani and Noorian, 2018). طرح اختلاط مخلوط‌ها برای تعیین درصد قیر بهینه به روش مارشال و مطابق با استاندارد ASTM-D1559 انجام گرفت. مقدار قیر بهینه برای مخلوط کنترل (بدون خرده آسفالت و افزودنی) ۵٫۵ درصد تعیین شد. با ارزیابی خواص حجمی مخلوط‌های بازیافتی حاوی روغن ضایعاتی مقدار قیر بهینه مخلوط‌های حاوی درصد‌های مختلف RAP و روغن ضایعاتی تعیین شدند که در بخش بعدی نشان داده می‌شوند. برای ساخت مخلوط کنترل، سنگدانه‌های جدید به مدت ۱۶ ساعت در دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد به منظور خشک شدن مصالح و رسیدن به دمای مورد نظر در گرم‌خانه قرار گرفتند و قیر تا دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد گرم شد. در ادامه مقدار مورد نظر قیر بکر به سنگدانه‌های جدید اضافه شده و اختلاط انجام گرفت. برای مخلوط‌های بازیافتی، مصالح خرده آسفالت به مدت ۲ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شدند و در مخلوط‌های بازیافتی حاوی روغن ضایعاتی، آن را هنگام اختلاط ابتدا به مصالح RAP اضافه نموده و پس از اختلاط کامل با این مصالح، به مصالح سنگی بکر و قیر

گرم شده افزوده شده تا اختلاط کامل و پوشش مصالح سنگی با قیر مخلوط شدند. این روش اختلاط مطابق با روش کار ویراگاون انجام گرفت (Veeraragavan, 2016). در نهایت مخلوط‌ها درون قالب مارشال ریخته شده و برای انجام تراکم زیر چکش مارشال قرار گرفتند. نمونه‌ها با استفاده از چکش مارشال اتوماتیک با ۷۵ ضربه به هر طرف نمونه، با در نظر گرفتن شرایط ترافیک سنگین، متراکم شدند. سپس نمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و بر روی آنها آزمایش‌های مورد نظر انجام گرفت.

۲-۳- آزمایش‌های انجام گرفته

آزمایش‌های انجام گرفته بر روی مخلوط‌های مختلف شامل تعیین وزن مخصوص حداکثر نظری مطابق استاندارد ASTM D2041، تعیین وزن مخصوص واقعی نمونه‌های متراکم مطابق با استاندارد ASTM-D2726، آزمایش مقاومت کششی بر روی نمونه‌های عملی آوری شده در دو حالت خشک و مرطوب با اعمال سیکل ذوب و یخبندان، مطابق با استاندارد AASHTO T283، آزمایش کانتابرو بر روی نمونه‌های خشک مطابق استاندارد NLT-352 و عمل آوری شده در شرایط مرطوب مطابق با استاندارد NLT-362 و آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای مطابق با روش استفاده شده توسط ویراگاون می‌باشد (Veeraragavan, 2016). در ادامه جزئیات بیشتر در مورد نحوه انجام آزمایشات ارائه می‌گردد.

برای انجام آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم، نمونه‌هایی به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت تقریبی 68 ± 1 میلی‌متر ساخته شدند. نمونه‌های مخلوط آسفالتی با تنظیم تعداد ضربات چکش مارشال برای رسیدن به درصد فضای خالی 7 ± 0.5 درصد متراکم شدند. پس از خارج کردن نمونه‌ها از قالب، به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق قرار داده شدند. نمونه‌ها به دو گروه خشک و تر تقسیم‌بندی شدند. گروه خشک قبل از انجام آزمایش، در کیسه پلاستیکی قرار داده شدند و به مدت ۲ ساعت در حمام آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. گروه دیگر نمونه‌ها عمل‌آوری شدند. ابتدا توسط دستگاه خلأ بین ۷۰ تا ۸۰ درصد اشباع شده، سپس در کیسه پلاستیکی محتوی 10 ± 5 میلی‌لیتر آب قرار داده شدند و در فریزر در دمای -18 ± 1 درجه سانتی‌گراد به مدت حداقل ۱۶ ساعت نگهداری گردیدند. بعد از آن، نمونه‌ها در حمام مارشال ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شده و در مرحله آخر عمل‌آوری و قبل آزمایش، نمونه‌ها در حمام آب ۲۵ سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت قرار داده شدند. نمونه‌های خشک و عمل‌آوری شده، تحت آزمایش کشش غیرمستقیم قرار گرفتند. ارزیابی مقاومت کششی غیرمستقیم با

۲۴ ساعت درون آب ۶۰ درجه سانتی‌گراد و پس از آن به مدت ۲۴ ساعت درون آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. نمونه‌ها در دستگاه لس‌آنجلس بدون استفاده از گوی‌های فلزی قرار گرفته و بعد از ۱۰ دقیقه چرخش استوانه با سرعت ۳۰ دور در دقیقه نمونه‌ها بیرون آورده شده و وزن گردیدند. درصد افت وزنی نمونه‌ها با استفاده از رابطه ۳ گردید.

$$CL = \frac{A - B}{A} \times 100 \quad (3)$$

که در آن، CL: درصد افت وزنی کانتابرو، A: وزن اولیه نمونه و B: وزن نهایی نمونه می‌باشند. شکل ۲ نمونه را قبل و بعد از انجام آزمایش کانتابرو نشان می‌دهد.

آزمایش شکست جهت تعیین انرژی و چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی انجام می‌شود. این آزمایش بر طبق تحقیقات ورارگاون (Veeraragavan, 2016) در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد انجام شد. برای این آزمایش نمونه‌های مارشال با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۲۵ میلی‌متر با ترک ایجاد شده در مرکز نمونه به طول ۱۵ میلی‌متر و عرض ۱٫۵ میلی‌متر برش داده شدند و جهت انجام آزمایش‌های شکست از دستگاه تست یونیورسال با قطر تکیه‌گاهی ۱۰ میلی‌متر استفاده شد.

این آزمایش با اعمال بار تماسی کوچک 0.1 ± 0.01 کیلونیوتن و سپس با سرعت بارگذاری ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه انجام شد. آزمایش هنگامی متوقف می‌شود که بار به کمتر از ۰٫۱ کیلونیوتن کاهش یابد. در نهایت، نمودار نیرو-جابجایی حاصل از انجام آزمایش‌ها در یک کامپیوتر ثبت گردید. سپس مقاومت در برابر ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از پارامترهای مختلف نظیر بار بحرانی انرژی لازم برای شکست نمونه‌ها و شاخص انعطاف‌پذیری مورد ارزیابی قرار گرفت (Kaseer et al., 2018). دستگاه آزمایش و نمودار نیرو-جابجایی به ترتیب در شکل ۳ و شکل ۴ نشان داده شده است.

استفاده از جک مارشال، با سرعت بارگذاری ۵۰/۸ میلی‌متر بر ثانیه انجام گرفت، بعد از بارگذاری نمونه‌ها تا شکست با استفاده از معادله ۱ مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها تعیین گردید.

$$ITS = \frac{2000P}{\pi t d}$$

که در آن، ITS، مقاومت کششی غیر مستقیم (Kpa)، P: حداکثر بار اعمالی (N)، t: ارتفاع نمونه (میلی‌متر) و d قطر نمونه (میلی‌متر) می‌باشد. نسبت مقاومت کششی نمونه‌های عمل‌آوری شده به مقاومت کششی نمونه‌های خشک (TSR) مطابق معادله ۲ محاسبه گردید.

$$(2)$$

$$TSR = \frac{ITS_w}{ITS_d} \times 100$$

که در آن ITS_w میانگین مقاومت کششی نمونه‌های عمل‌آوری شده و ITS_d : میانگین مقاومت کششی نمونه‌های تحت شرایط خشک می‌باشند. جهت تعیین مقاومت مخلوط‌ها در برابر شن‌زدگی از آزمایش کانتابرو استفاده گردید. در گذشته بیشتر از این آزمایش برای ارزیابی آسفالت ساخته شده با دانه‌بندی گسسته و آسفالت متخلخل استفاده می‌شد اما در سال‌های اخیر استفاده از این آزمایش برای ارزیابی آسفالت با دانه‌بندی پیوسته نیز رایج شده است (Cox et al, 2017).

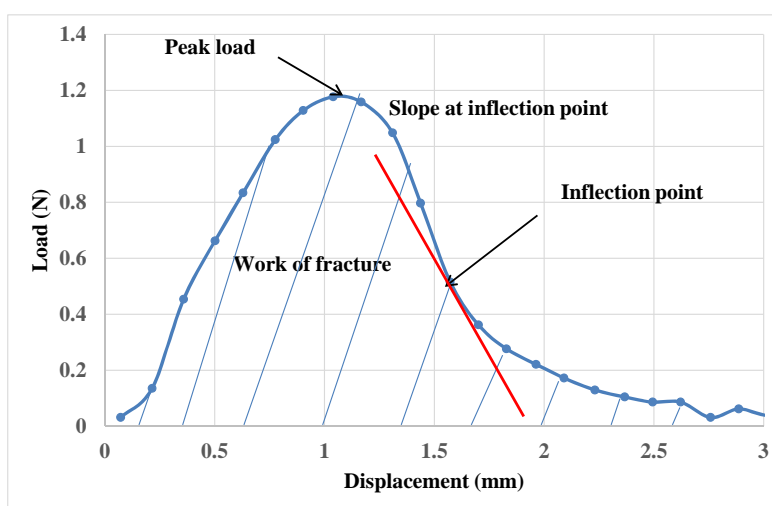
در این تحقیق آزمایش کانتابرو برای نمونه‌های خشک طبق استاندارد NLT-352 و برای نمونه‌های مرطوب طبق استاندارد NLT-362 انجام شد. شش نمونه از هر ترکیب با استفاده از ۷۵ ضربه چکش مارشال به طرفین نمونه تهیه گردید. سه نمونه تحت شرایط خشک به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و سه نمونه دیگر تحت شرایط مرطوب به مدت



شکل ۲. دستگاه لس‌آنجلس و نمونه‌ها قبل و پس از انجام آزمایش کانتابرو



شکل ۳. آزمایش خمش نیم‌دایره



شکل ۴. منحنی بار-جابجایی حاصل از آزمایش خمش نیم‌دایره (شامل پارامترهای حداکثر بار، شیب در نقطه عطف و کار شکست)

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج خصوصیات حجمی مخلوط‌ها

پارامترهای حجمی شامل درصد فضای خالی (V_a)، فضای خالی مصالح سنگی (VMA) و فضای خالی مصالح سنگی پر شده با قیر (VFA) برای نمونه‌های آسفالتی ساخته شده با ترکیبات مختلف مورد نظر مورد ارزیابی قرار گرفت که در جدول ۷ نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، مخلوط‌های بازیافتی حاوی تراشه آسفالتی و بدون روغن جوانساز دارای درصد قیر بهینه بالاتری نسبت به مخلوط کنترل هستند و با افزایش میزان تراشه آسفالتی قیر بهینه افزایش یافته است. دلیل این موضوع این است که با استفاده از تراشه آسفالتی کارایی مخلوط کمتر شده و همچنین قیر سخت شده تراشه

آسفالتی با قیر جدید به خوبی ترکیب نشده و در مخلوط مشارکت نمی‌کند و برای رسیدن به فضای خالی در محدوده مجاز باید قیر بیشتری نسبت به مخلوط کنترل استفاده نمود. این موضوع توسط محققین قبلی نیز بیان گردیده است (Zhang, 2010). این نتایج مشابه با نتایج مطالعه (Zhang, 2010; Mogawer et al., 2013) می‌باشند. در حالت استفاده از مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالتی با درصد قیر مشابه با مخلوط کنترل، درصد فضای خالی $0/8$ تا $1/2$ درصد نسبت به فضای خالی مخلوط‌های بکر بیشتر است که این یافته با نتایجی که توسط ژیا و همکارانش گرفته شده است همخوانی دارد (Jia et al., 2015). اما، در شرایطی که از روغن‌های ضایعاتی در مخلوط استفاده می‌شود، ملاحظه می‌گردد که با درصد قیر بهینه مساوی با مخلوط کنترل، درصد فضای خالی مخلوط‌های

مرطوب با افزایش درصد خرده آسفالت افزایش می‌یابد. این نتایج مشابه با یافته‌های طاهرخانی و نوریان می‌باشد (Taherkhani & Noorian, 2019). افزایش مقاومت کششی با افزایش درصد خرده آسفالت را می‌توان به پیرشدگی قیر موجود در خرده آسفالت و افزایش سختی آن نسبت داد (Shu et al., 2008). مقایسه نتایج مقاومت کششی خشک و مرطوب مخلوط‌های بازیافتی حاوی افزودنی با مخلوط‌های بدون افزودنی نشان می‌دهد که در درصد خرده آسفالت مشابه، به استثناء مخلوط حاوی ۲۵ درصد خرده آسفالت و زایکوترم در حالت خشک، سایر مخلوط‌های حاوی افزودنی مقاومت کششی بیشتری از مخلوط بدون مواد افزودنی دارند، که دلیل آن تاثیر مواد افزودنی ضد عریان شدگی می‌باشد. همچنین، نتایج نشان می‌دهند نمونه‌های حاوی آهک‌هیدراته مقدار مقاومت کششی بیشتری از مخلوط‌های بازیافتی حاوی زایکوترم دارا می‌باشند. این موضوع به دلیل بالا بودن سطح ویژه فیلر آهکی و ترکیب آن با روغن خوراکی ضایعاتی می‌باشد که موجب سفت شدن زیاد پیوند قیر - فیلر شده که موجب افزایش مقاومت کششی شده است. همچنین، از دیگر نتایج قابل استنباط از شکل ۵ این است که در هر مخلوط مقاومت کششی در حالت مرطوب کمتر از مقاومت کششی در حالت خشک است که به دلیل آسیب رطوبتی و کاهش چسبندگی قیر به سنگدانه‌ها می‌باشد. اما، میزان کاهش مقاومت در مخلوط‌های مختلف متفاوت است. در مخلوط بازیافتی بدون مواد افزودنی میزان کاهش مقاومت از مخلوط کنترل بیشتر است، اما در مخلوط‌های بازیافتی حاوی افزودنی میزان کاهش مقاومت در حالت مرطوب نسبت به حالت خشک از مخلوط کنترل کمتر است که به دلیل اثرات افزایش مقاومت به آسیب رطوبتی زایکوترم و آهک هیدراته می‌باشد. با اینحال، میزان کاهش مقاومت کمتری در مخلوط حاوی آهک هیدراته نسبت به مخلوط حاوی زایکوترم مشاهده می‌شود که نشان دهنده اثرات ضد حساسیت رطوبتی بیشتر برای آهک هیدراته می‌باشد. به منظور مقایسه مقاومت به آسیب رطوبتی مخلوط‌های مختلف، نسبت مقاومت کششی در حالت عمل آمده به حالت خشک (TSR) محاسبه گردیده و در شکل ۶ ارائه گردیده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، در حالی که مصالح سنگی طبیعی به میزان ۲۵ و ۷۵٪ تراشه آسفالتی جایگزین گردیده است نسبت مقاومت کششی در مقایسه با مخلوط کنترل کاهش یافته است. اما، این نقص با استفاده از

حاوی روغن، کاهش می‌یابد. بر اساس مطالعات موگاور و ژیا و همکاران آنها این موضوع نیز به دلیل نفوذ روغن به درون قیر پیر شده و در نتیجه افزایش مشارکت مقدار قیر پیر شده RAP در مخلوط و افزایش مقدار قیر موثر کل مخلوط می‌باشد که به عنوان عامل کاهش‌دهنده ویسکوزیته عمل کرده و موجب افزایش کارایی مخلوط و راحتی تراکم آن می‌شود (Mogawer et al., 2013; Jia et al., 2015).

با افزایش درصد خرده آسفالت، مقدار فضای خالی مصالح سنگی مخلوط‌ها افزایش می‌یابد، که به دلیل کاهش کارایی در مخلوط می‌باشد. با افزودن جوانساز از مقدار این پارامتر کاسته می‌شود. در مخلوط‌های حاوی جوانساز نیز مخلوط با تراشه آسفالت ۷۵٪ فضای خالی مصالح سنگی بیشتری از مخلوط حاوی ۲۵٪ تراشه آسفالتی است. از آنجا که میزان تراکم برای هر مخلوط ثابت در نظر گرفته شده، تغییرات فضای خالی مصالح سنگی به تغییرات در ویسکوزیته قیر و همچنین نرم شدن قیر به سبب افزودن روغن و اثرات ترکیبی قیر پیر شده و روغن نسبت داده می‌شوند. علاوه بر این، کاهش درصد فضای خالی مصالح سنگی می‌تواند به دلیل افزایش مشارکت قیر پیر شده خرده‌آسفالت در مخلوط در اثر افزودن روغن باشد.

در مخلوط‌های بازیافتی بدون جوانساز و مواد افزودنی، مقادیر فضای خالی پر شده با قیر با افزایش تراشه آسفالتی افزایش می‌یابد که منطبق با مطالعات (Daniel and Lachance, 2005; Solanki et al., 2012; Jia et al., 2015) می‌باشد. و دلیل آن کاهش کارایی مخلوط با اضافه شدن تراشه آسفالت با قیر پیر شده است. اما، با افزودن روغن و ماده ضد عریان شدگی، در مخلوط حاوی ۲۵٪ تراشه فضای خالی پر شده با قیر افزایش و در مخلوط حاوی ۷۵٪ تراشه فضای خالی پر شده با قیر کاهش یافته است. به دلیل برابر بودن مقدار قیر، در مخلوط حاوی مقدار بیشتر تراشه آسفالتی به دلیل کارایی کمتر فضای خالی بیشتر و فضای خالی مصالح سنگی پر شده با قیر کاهش یافته است.

۳-۲- نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

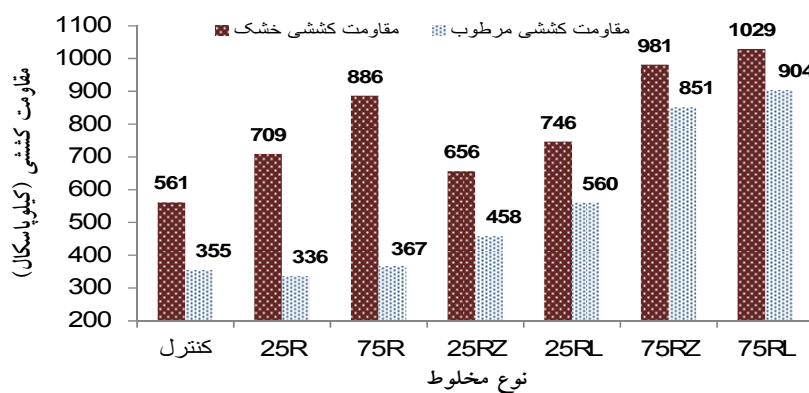
نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌ها در حالت خشک و مرطوب، در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. همانگونه که مشاهده می‌شود برای تمامی مخلوط‌های با و بدون افزودنی مقدار مقاومت کششی در حالت خشک و

که مقاومت به آسیب رطوبتی بهبود یافته است. مقایسه نتایج برای دو ماده افزودنی ضد عریان شدگی نشان می‌دهد که آهک هیدراته عملکرد بهتری از زایکوترم داشته است و باعث کاهش بیشتر حساسیت رطوبتی می‌گردد.

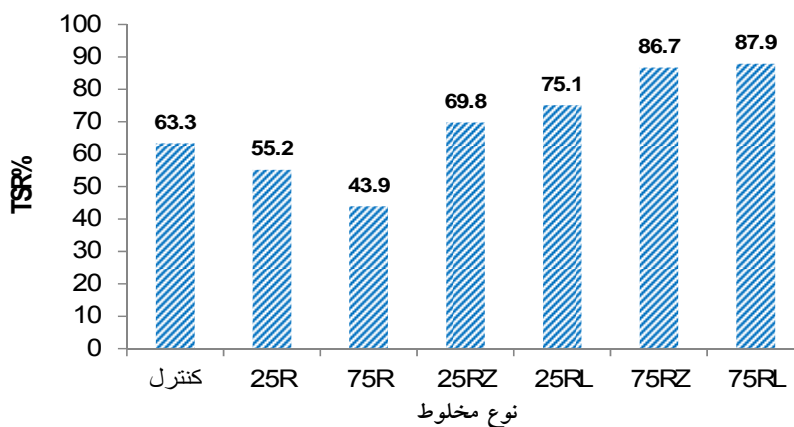
مواد افزودنی زایکوترم و آهک هیدراته برطرف گردیده است، به طوری که در مخلوط‌های بازیافتی حاوی این افزودنی‌ها و جوان‌کننده نسبت مقاومت کششی نسبت به مخلوط کنترل افزایش یافته است. در این حالت، میزان نسبت مقاومت کششی با افزایش درصد تراشه آسفالتی افزایش یافته که بیانگر این است

جدول ۷. نتایج خصوصیات حجمی

نام اختصاری ترکیب‌ها	فیر بهینه (%)	Va	VMA	VFA
Control	5.50	4.51	13.4	65.96
25R	5.60	3.74	13.75	72.41
75R	5.85	4.07	14.68	74
25RZ	5.40	3.26	13.06	74.6
75RZ	5.40	3.7	13.91	68.89
25RH	5.40	3.26	13.06	74.6
75RH	5.40	3.7	13.91	68.89



شکل ۵. مقاومت کششی مخلوط‌ها

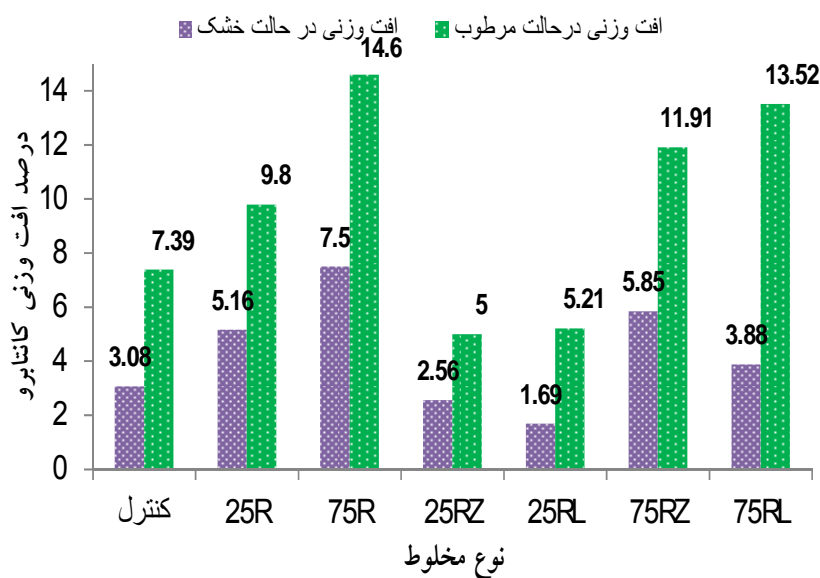


شکل ۶. نسبت مقاومت کششی مخلوط‌ها

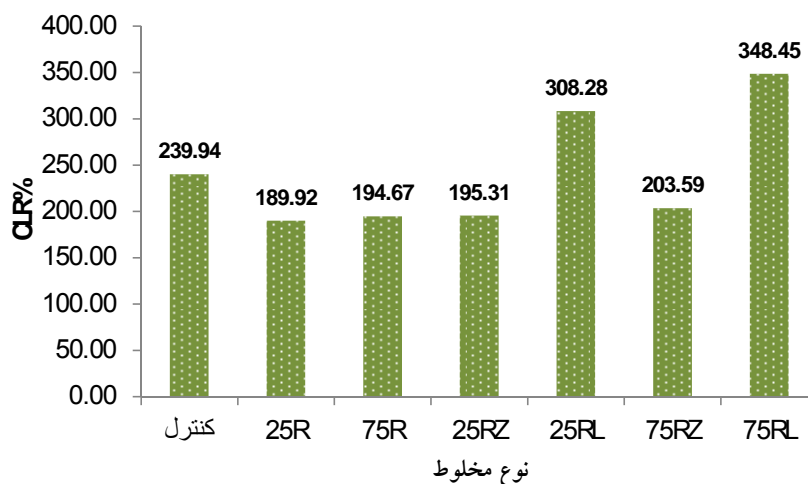
۳-۳- نتایج آزمایش افت وزنی کانتابرو

و پیوستگی قیر می‌باشد. مشابه نتایج حالت خشک، با افزایش درصد تراشه آسفالت میزان افت وزنی بیشتر می‌شود و با استفاده از افزودنی‌های جوان کننده و ضد عریان شدگی افت وزنی کاهش می‌یابد. به عنوان شاخصی برای مقاومت در برابر تاثیر مخرب رطوبت بر شن زدگی نسبت اختلاف افت وزنی در حالت مرطوب و خشک به افت وزنی در حالت خشک برای مخلوط‌ها محاسبه گردیده است. هر چقدر این نسبت کمتر باشد مقاومت به آسیب رطوبتی بیشتر است. نتایج در شکل ۸ نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود، مقاومت به آسیب رطوبتی با افزودن تراشه آسفالت افزایش یافته، ولی با افزایش درصد آن مجدداً کاهش می‌یابد. همچنین، با استفاده از مواد ضد عریان شدگی و جوان کننده مقاومت به آسیب رطوبتی کاهش یافته است، به طوری که تاثیر زایکوترم برای افزایش مقاومت در برابر اثر مخرب رطوبت بر شن زدگی از آهک هیدراته بیشتر است. البته، حساسیت رطوبتی با این شاخص با حساسیت رطوبتی به دست آمده از آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم همخوانی ندارد، که دلیل آن تفاوت در مکانیزم آسیب‌های گسیختگی در آزمایش مقاومت کششی و کانتابرو می‌باشد. در آزمایش کانتابرو وجود جوان کننده باعث نرم شدن قیر شده و آن را در برابر ضربه ضعیف‌تر نموده است که در حضور آب این موضوع تشدید شده است. با این وجود، این موضوع نیاز به تحقیق و بررسی بیشتری دارد.

شکل ۷ نتایج آزمایش افت وزنی کانتابرو را برای مخلوط‌های مختلف در دو حالت خشک و مرطوب نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، در دو مخلوطی که ۲۵ و ۷۵٪ از سنگدانه‌های طبیعی با تراشه آسفالتی جایگزین شده و از جوان کننده و ماده ضد عریان شدگی استفاده نشده است، میزان افت وزنی از مخلوط کنترل بیشتر بوده و با افزایش درصد تراشه آسفالتی میزان افت بیشتر می‌گردد. این موضوع به دلیل چسبندگی کمتر قیر پیر شده موجود در تراشه آسفالتی می‌باشد که در مقابل ضربات ایجاد شده در آزمایش مقاومت کافی نداشته و افت وزنی بیشتر شده است. با اینحال، با استفاده از مواد افزودنی و جوان کننده میزان افت وزنی کاهش می‌یابد که در مخلوط حاوی ۲۵ درصد تراشه آسفالتی میزان افت وزنی از مخلوط کنترل نیز کمتر شده است. در مخلوط حاوی ۷۵٪ تراشه آسفالتی، اگرچه افت وزنی از حالت بدون مواد افزودنی کمتر است اما مقدار افت وزنی از مخلوط کنترل بیشتر شده است. همچنین نتایج بیانگر این است که آهک هیدراته تاثیر بیشتری در افزایش مقاومت در برابر شن زدگی نسبت به زایکوترم در حالت خشک دارد، اما، در شرایط مرطوب تاثیر زایکوترم در افزایش مقاومت بیشتر است. از نتایج ارائه شده در شکل ۷ همچنین استنباط می‌گردد که در همه مخلوط‌ها افت وزنی در شرایط مرطوب بیشتر از افت وزنی در شرایط خشک می‌باشد که به دلیل تاثیر مخرب رطوبت بر چسبندگی بین قیر و سنگدانه



شکل ۷. نتایج افت وزنی کانتابرو



شکل ۸. نسبت افت وزنی کانتابرو در شرایط مرطوب به شرایط خشک

۴- نتایج آزمایش خمش نیمدایره‌ای

پیرشده موجود در تراشه آسفالتی می‌باشد. برخلاف نتایج بار بحرانی، ملاحظه می‌گردد که مخلوط‌های بازیافتی حاوی جوان کننده و مواد ضد عریان شدگی دارای انرژی شکست بیشتری از مخلوط‌های بازیافتی بدون افزودنی می‌باشند. این موضوع می‌تواند به دلیل افزایش شکل پذیری و چسبندگی قیر ناشی از این مواد باشد که باعث می‌گردد مساحت زیر منحنی بار-جابجایی افزایش یابد. انرژی شکست مخلوط حاوی افزودنی آهک هیدراته بیشتر از مخلوط حاوی زایکوترم است. بیشترین انرژی شکست مربوط به مخلوطی است که دارای ۷۵٪ تراشه آسفالتی بوده و به اندازه ۱۰٪ وزن قیر پیرشده جوانساز روغن خوراکی داشته و از آهک هیدراته به عنوان ماده ضد عریان‌شدگی استفاده شده است، که انرژی شکست آن حدوداً ۲ برابر مخلوط کنترل است.

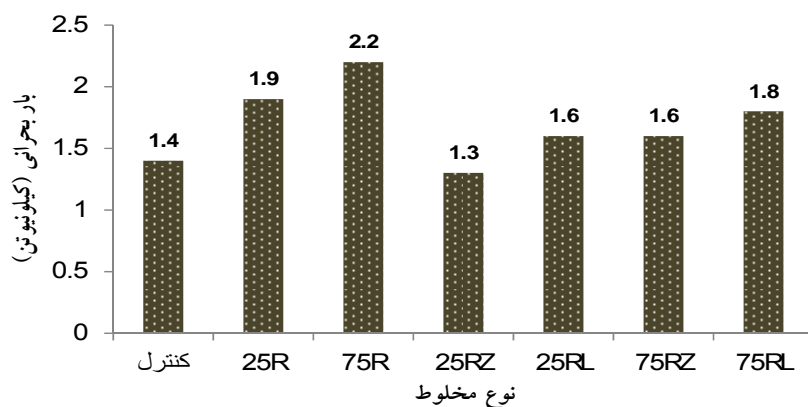
نتایج مربوط به شاخص مقاومت به ترک خوردگی مخلوط‌ها در شکل ۱۱ نشان داده شده است. این شاخص برای بیان مقاومت به ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شود که از تقسیم انرژی شکست به بار بحرانی به دست می‌آید. این شاخص توسط کسیر و همکارانش (Kaseer et al., 2018) به عنوان جایگزینی برای شاخص شکست (FI)، که از تقسیم انرژی شکست به شیب منحنی بار-جابجایی بعد از شکست در نقطه عطف آن به دست می‌آید، معرفی گردید. شاخص مقاومت به ترک خوردگی تکرارپذیرتر بوده و تعیین آن ساده‌تر است. شاخص مقاومت به ترک خوردگی نشان دهنده انرژی لازم برای ترک خوردگی یک ماده نسبت به مقاومت ماده می‌باشد

شکل ۹ نتایج بار بحرانی برای مخلوط‌های مختلف، که حداکثر نیروی لارم برای شکست نمونه‌های نیمدایره‌ای است، را نشان می‌دهد. مقدار بیشتر بار بحرانی نشان دهنده این است که مخلوط آسفالتی که ترک خورده است به نیروی بیشتری نیاز دارد تا شکست کامل در آن رخ دهد که بیانگر عملکرد بهتر در برابر ترک خوردگی‌ها می‌باشد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، با افزایش مقدار تراشه آسفالتی مقدار بار بحرانی افزایش می‌یابد که به دلیل سختی بیشتر قیر پیر شده در تراشه‌های آسفالتی است که سختی مخلوط را افزایش داده و بار مورد نیاز برای گسترش ترک افزایش می‌یابد. نتایج همچنین بیانگر این است که با افزودن جوان کننده و مواد ضد عریان شدگی بار بحرانی کاهش می‌یابد که این موضوع بیشتر مربوط به جوان‌کننده است که باعث گردیده قیر پیر شده نرم‌تر گردد. در مخلوط‌های حاوی افزودنی نیز ملاحظه می‌گردد که بار بحرانی با افزایش تراشه آسفالتی افزایش می‌یابد. از مقایسه مخلوط‌های حاوی زایکوترم و آهک هیدراته ملاحظه می‌گردد که آهک هیدراته عملکرد بهتری از زایکوترم دارد و باعث بهبود بیشتر از نظر مقاومت به شکست می‌گردد. این موضوع به دلیل افزایش سفتی ماستیک قیری حاوی پودر آهک به دلیل سطح ویژه بالای آن می‌باشد.

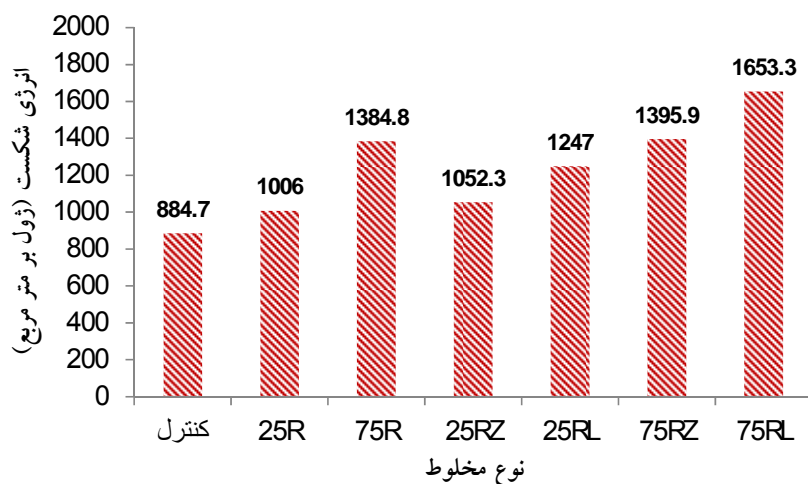
شکل ۱۰ نتایج مربوط به انرژی شکست مخلوط‌های مختلف را نشان می‌دهد. از نتایج ارائه شده در شکل ۱۰ می‌توان استنباط نمود که با افزایش تراشه آسفالتی در مخلوط انرژی شکست افزایش می‌یابد که به دلیل افزایش سختی مخلوط ناشی از قیر

مقاومت به ترک خوردگی مخلوطهای بازیافتی حاوی ماده ضد عریان شدگی زایکوترم بیشتر از مخلوطهای حاوی آهک هیدراته است که نتیجه با سایر نتایج این تحقیق، که تقریباً همه شاخص‌ها نشان دهنده عملکرد بهتر آهک هیدراته بود، متناقض است. این تناقض با نحوه محاسبه شاخص ترک خوردگی قابل توضیح است. در محاسبه شاخص ترک خوردگی شرایط مخلوط بعد از شکست مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. این موضوع توسط مجیدی‌فر و همکاران نیز مورد تایید قرار گرفته است (Majidifard et al. 2021). در مخلوطهای آسفالتی اصلاح شده با پلیمر، مجیدی‌فر و همکارانش نشان دادند که در حالی که مقاومت کششی و انرژی شکست این مخلوط‌ها بیشتر بود. اما شاخص مقاومت به ترک خوردگی و شاخص شکست مقادیر کمتری نشان دادند.

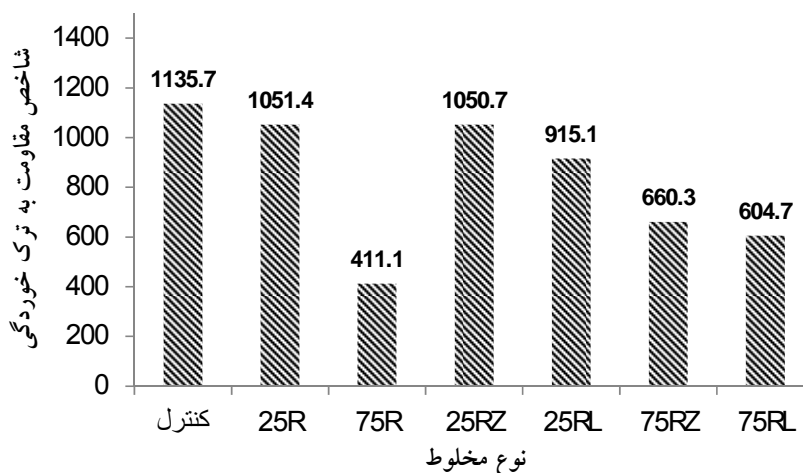
(Ipekyol et al., 2022). یک ماده با شاخص ترک خوردگی بزرگتر نشان می‌دهد که آن ماده مقاومت بیشتری در برابر ترک خوردگی دارد (Espinosa et al., 2020). نتایج بیانگر این است که مقاومت به ترک خوردگی با افزایش تراشه آسفالتی کاهش می‌یابد. با وجود این که انرژی شکست و بار بحرانی با افزایش تراشه آسفالتی افزایش می‌یابد، اما مقاومت به ترک خوردگی کاهش یافته است. این به دلیل این است که مقدار افزایش بار بحرانی بیشتر از افزایش انرژی شکست بوده است که باعث گردیده شاخص مقاومت به ترک خوردگی کاهش یابد. نتایج همچنین بیان کننده این است که مخلوطهای بازیافتی حاوی جوانساز و ضد عریان شدگی دارای شاخص مقاومت به ترک خوردگی کمتری از مخلوط بازیافتی بدون مواد افزودنی و مخلوط کنترل می‌باشند. همچنین، ملاحظه می‌گردد که شاخص



شکل ۹. نتایج بار بحرانی مخلوط‌ها در آزمایش خمش نیم‌دایره



شکل ۱۰. نتایج انرژی شکست مخلوط‌ها در آزمایش خمش نیم‌دایره



شکل ۱۱. نتایج شاخص مقاومت به ترک خوردگی مخلوطها در آزمایش خمش نیمه‌دایره

۵- نتیجه گیری

شامل جوانساز و ضدعریان شدگی استفاده شود باعث افزایش مقاومت به شن زدگی می‌گردد، که تاثیر آهک هیدراته در افزایش مقاومت بیشتر از زایکوترم است.

-مقاومت به شن زدگی مخلوطها در اثر رطوبت کاهش می‌یابد، که این کاهش مقاومت در مخلوطهای مختلف متفاوت است. میزان کاهش مقاومت در مخلوطهای بازپافتی بدون افزودنی کمتر از مخلوط کنترل است. همچنین، مخلوطهای بازپافتی حاوی جوانساز و ضدعریان شدگی حساسیت بیشتری به رطوبت نسبت به مخلوطهای حاوی تراشه آسفالتی و بدون مواد افزودنی هستند. بر خلاف نتایج حساسیت رطوبتی در آزمایش مقاومت کششی، مخلوطهای بازپافتی حاوی زایکوترم حساسیت کمتری از مخلوطهای حاوی آهک هیدراته دارند.

- نتایج آزمایش خمش نیمه‌دایره‌ای نشان می‌دهد که بار بحرانی و انرژی شکست با افزایش میزان جایگزینی مصالح سنگی طبیعی با تراشه آسفالتی افزایش می‌یابد، اما، شاخص مقاومت به ترک خوردگی کاهش می‌یابد. همچنین، استفاده از جوانساز و ماده ضد عریان شدگی باعث کاهش بار بحرانی و شاخص مقاومت به ترک خوردگی می‌شود، ولی باعث افزایش انرژی شکست مخلوطها می‌شود. افزودنی ضد عریان شدگی آهک هیدراته بار بحرانی و انرژی شکست بیشتری از زایکوترم نتیجه می‌دهد، اما، شاخص مقاومت به ترک خوردگی با مخلوطهای حاوی زایکوترم بیشتر از آهک می‌باشد.

در این تحقیق، با جایگزینی ۲۵ و ۷۵٪ از وزن مصالح سنگی بتن آسفالتی با تراشه آسفالتی، در دو حالت بدون جوانساز و مواد افزودنی ضد عریان شدگی آهک هیدراته و زایکوترم، و افزودن جوانساز و مواد ضد عریان شدگی خصوصیات مختلفی از قبیل مقاومت کششی، حساسیت رطوبتی، مقاومت به شن زدگی و خصوصیات مکانیک شکست در دمای میانی مورد بررسی قرار گرفت. خلاصه نتایج مهم این بررسی به شکل زیر ارائه می‌شود:

-مقاومت کششی با افزودن تراشه آسفالتی به جای مصالح سنگی طبیعی افزایش می‌یابد، و با افزودن مواد جوانساز به همراه ماده ضد عریان شدگی کاهش می‌یابد. مخلوط حاوی مقدار بیشتر تراشه آسفالتی مقاومت بیشتری داشته و مقاومت کششی در مخلوطهای حاوی ماده ضد عریان شدگی آهک هیدراته بیشتر از زایکوترم است.

-رطوبت باعث کاهش مقاومت کششی مخلوطها شده و حساسیت به رطوبت با افزایش مقدار جایگزینی مصالح سنگی طبیعی با تراشه آسفالتی کاهش می‌یابد. ولی، در صورتی که مواد ضد عریان شدگی به همراه جوانساز استفاده می‌شود حساسیت رطوبتی کاهش می‌یابد و مقدار کاهش در مخلوط حاوی آهک بیشتر از مخلوط حاوی زایکوترم است.

-نتایج افت وزنی کانتابرو در شرایط خشک و مرطوب نشان داد که با افزودن تراشه آسفالتی به جای مصالح سنگی طبیعی، مقاومت به شن زدگی کاهش می‌یابد. اما، وقتی مواد افزودنی

- Espinosa, L., Caro, S., & Wills, J. (2020). Study of the influence of the loading rate on the fracture behaviour of asphalt mixtures and asphalt mortars. *Construction and Building Materials*, 262, 120037.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120037
- EAPA, 2018a. EAPA Asphalt in Figures (2016).
- Ghaffarpour, G. J. (2008). Estimation of resistance to moisture destruction in asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 6, 2324–2331.
- Howell, S., Jobe, J., Bockey, D., Cordeiro, C.S., Ramos, L.P., Wahid, M.B., Choo, Y.M., Puah, C.W., Saka, S., Imahara, H., Gärtner, S., Reinhardt, G.A., Peterson, C.L., (2010). Current status of the Biodiesel Industry, in: *The Biodiesel Handbook: Second Edition. Elsevier Inc.*
- Hettiarachchi, C., Hou, X., Wang, J., & Xiao, F. (2019). A comprehensive review on the utilization of reclaimed asphalt material with warm mix asphalt technology. *Construction and Building Materials*, 227, 117096.
- Ipekyol, A., Tortum, A., Rasouli, R., & Yazdani, M. (2022). Evaluating fatigue and crack resistance of asphalt mixture containing zinc tailing aggregates. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01384.
doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01384
- 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 American Society of Civil Engineers*, 27(12), 4015042-4015043.
- Song, W. Huang, B., Shu, X. (2018). Influence of warm-mix asphalt technology and rejuvenator on performance of asphalt mixtures containing 50% reclaimed asphalt pavement, *Journal of Cleaner Production*, 192, 191–198.
- Hou, X. Xiao, F. Wang, J. Amirkhanian, S. (2018). Identification of asphalt aging characterization by spectrophotometry technique, *Fuel*. 226 (2018) 230–239.
doi.org/10.1016/j.fuel.2018.04.030
- Jahanbakhsh, H., Karimi, M.M., Naseri, H., MoghaddasNejad, F. (2019). Pavements and Recycling Agents, Performance Assessment, Cost, *Journal of Cleaner Production*,
doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118837
- Asli, H., Ahmadiania, 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.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.042
- Asli, H., and Kari, M.R., (2011). Implementation of Waste Cooking Oil as RAP 888 Rejuvenator. *J. East. Asia Soc. Transp. Stud.* 9, 1336–1350.
doi.org/10.11175/easts.9.1336
- Azahar, W.N.A.W., Jaya, R.P., Hainin, M.R., Bujang, M., Ngadi, N., (2017). Mechanical performance of asphaltic concrete incorporating untreated and treated waste cooking oil. *Construction and Building Materials*, 150, 653–663.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.048
- Azahar, W.N.A.W., Bujang, M., Jaya, R.P., Hainin, M.R., Ngadi, N., Abdullah, M.E., Mohamed, A.A., (2016a). A review on application of waste cooking oil as rejuvenator in porous asphalt mixture. *Journal of Teknology*, 78, 105–109.
doi.org/10.11113/jt.v78.8005
- Bailey, H. K. and Philips, P., (2010). Asphalt Rejuvenation. US Patent. 0034586 A1.
- Chen, M., Leng, B., Wu, S., Sang, Y., (2014a). Physical, chemical and rheological properties of waste edible vegetable oil rejuvenated asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 66, 286–298.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.033
- Cox, B. C., Smith, B. T., Howard, I. L., & James, R. S. (2017). State of knowledge for Cantabro testing of dense graded asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(10), 04017174.
- Daniel, J. and Lachance, A. (2005). Mechanistic and volumetric properties of asphalt mixtures with recycled asphalt pavement. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. Transportation Research Board of the National Academies*, (1929), 28–36.
- Elkashef, M., Williams, R.C., Cochran, E. (2018). Investigation of fatigue and thermal cracking behavior of rejuvenated reclaimed asphalt pavement binders and mixtures, *International Journal of Fatigue*. 108 (2018) 90–95.
doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.11.013

- Additive on the Properties of Asphalt Binders in the UAE. In *Materials Science Forum, Trans Tech Publications Ltd.* Vol. 1142, 117-126.
- Nazirizad, M.; Kavussi, A.; Abdi, A. (2015). Evaluation of the effects of anti-stripping agents on the performance of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 84, 348–353.
- Nithinchary, J., Bhuvana Priya Dhandapani, Ramya Sri Mullapudi, (2024). Application of warm mix technology design and performance characteristics: review and way forward, *Construction and Building Materials*, 414 (2024) 134915, doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.134915.
- Nsengiyumva, G., Haghshenas, H. F., Kim, Y. R., & Kommidi, S. R. (2020). Mechanical-chemical characterization of the effects of type, dosage, and treatment methods of rejuvenators in aged bituminous materials. *Transportation Research Record*, 2674(3), 126-138.
- Riyad, R. H., Wu, J., & Shen, J. (2024). Feasibility of Using Combustion-Based Methods to Quantify Saline-Based Anti-Stripping Agent in Modified Asphalt Binders. *Fire*, 7(4), 138.
- Rafiqul, A.T. and Arif, M.Z. (2010). Nanoscale evaluation of moisture damage in polymer modified asphalts. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 22, No. 7, 714–725.
- Shah, B. D. (2003). Evaluation of moisture damage within asphalt concrete mixes. *Texas A&M University*, Texas, USA.
- Sengoz, B. and Agar, E. (2007). Effect of asphalt film thickness on the Moisture sensitivity characteristics of hot mix asphalt. *Journal of Building and Environment*, Vol. 42, No. 10, 23621 – 3628.
- Sanli, H., Canakci, M., Alptekin, E., (2011). Characterization of Waste Frying Oils Obtained from Different Facilities, in: Proceedings of the World Renewable Energy Congress – Sweden 8–13 May, Linköping, Sweden. Linköping University Electronic Press, 1118 479–485.
- doi.org/10.3384/ecp11057479
- Solanki, P., Hossain, Z., Zaman, M. and Adje, D. (2012). Volumetric and mechanistic characteristics of asphalt mixes containing recycled asphalt pavement. In *GeoCongress* -NCAT, (2014). NCAT researchers explore multiple uses of rejuvenators. *Asphalt Technol. News* 26 (1), 7-8.
- Kabir, I., Yacob, M., Radam, A., (2014). Households' Awareness, Attitudes and Practices Regarding Waste Cooking Oil Recycling in Petaling, Malaysia. *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicol. Food Technol.* 8, 45–51.
- doi.org/10.9790/2402-081034551
- Kaseer, F., Yin, F., Arámbula-Mercado, E., Martin, A. E., Daniel, J. S., & Salari, S. (2018). Development of an index to evaluate the cracking potential of asphalt mixtures using the semi-circular bending test. *Construction and Building Materials*, 167, 286-298.
- Kaseer, F., Martin, A. E., & Arámbula-Mercado, E. (2019). Use of recycling agents in asphalt mixtures with high recycled materials contents in the United States: A literature review. *Construction and Building Materials*, 211, 974-987.
- Majidifard, H., Tabatabaee, N., & Buttlar, W. (2019). Investigating short-term and long-term binder performance of high-RAP mixtures containing waste cooking oil. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 6(4), 396-406. Literature review. *Construction and Building Materials*, 211, 974-987.
- Majidifard, H., Jahangiri, B., Rath, P., & Buttlar, W. G. (2021). Development of a balanced cracking index for asphalt mixtures tested in semi-circular bending with load-LLD measurements. *Measurement*, 173, 108658. doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108658
- Mogawer, W. S., Austerman, A., Roque, R., Underwood, S., Mohammad, L. and Zou, J. (2015). Ageing and rejuvenators: evaluating their impact on high RAP mixtures fatigue cracking characteristics using advanced mechanistic models and testing methods. *Road Materials and Pavement Design*. Taylor & Francis, 16(sup2), 1–28.
- 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*. Taylor & Francis, 14(sup2), 193–213.
- Nasr, E. H., Sukkari, A., Al-Khateeb, G. G., Zeiada, W., Alani, M. W., & Ezzat, H. (2024). Effect of Zycotherm Nano-Based Warm Mix

- waste bio-oil: A review of the production processes, properties and future perspectives. *Process Safety and Environmental Protection*, 147, 1135-1159.
- Zargar, M., Ahmadinia, E., Asli, H., Karim, M.R., (2012). Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen. *Journal of Hazardous Materials*, 233–234,
- Zaumanis, M., Mallick, R.B., Frank, R., (2014b). Determining optimum rejuvenator dose for asphalt recycling based on Superpave performance grade specifications. *Construction and Building Materials*, 69, 159–166.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.035
- Zhang, J. (2010) 'Effects of warm-mix asphalt additives on asphalt mixture characteristics and pavement performance. University of Nebraska, Lincoln, 89-90.
- Zhu, Y. Wang, X. Qiao, Y. Shu, J. (2018). Thermal Cracking and Fatigue Analysis of Recycled Asphalt Mixture Using DCT Test and S-VECD Model BT - Proceedings of GeoShanghai 2018 International Conference. Transportation Geotechnics and Pavement Engineering, in: X. Shi, Z. Liu, J. Liu (Eds.), *Springer Singapore, Singapore*, 483–492.
- 2012: *State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering*, 3709–3718.
- Taherkhani, H., Noorian, F., (2018). Comparing the effects of waste engine and 1164 cooking oil on the properties of asphalt concrete containing reclaimed asphalt pavement (RAP). *Road Materials and Pavement Design*.
doi.org/10.1080/14680629.2018.1546220
- 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*.
- Wen, H., Bhusal, S., Wen, B., 2013. Laboratory evaluation of waste cooking oil-based bio-asphalt as an alternative binder for hot mix asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25, 1432–1437.
doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000713
- Xiao, F. Amirkhani, S. Putman, B. Shen, J. (2010). Laboratory investigation of engineering properties of rubberized asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37, 1414–1422.
- Zahoor, M., Nizamuddin, S., Madapusi, S., & Giustozzi, F. (2021). Recycling asphalt using

Comparing the Effect of Zychotherm and Hydrated Lime on the Moisture Damage and Cracking Resistance of Recycled Asphalt Concrete Containing Waste Cooking Oil as Rejuvenator

Ali Shakori, M.Sc., Grad., Civil Engineering Department, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

Hossein Amini, Lecturer, Civil Engineering Department, Zanjan Branch, Islamic Azad University, Zanjan, Iran.

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

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

Received: May 2025- Accepted: August 2025

ABSTRACT

In this study the effect of two types of anti-stripping agents on the performance of recycled asphalt concrete has been investigated. The natural aggregates of asphalt concrete were replaced with reclaimed asphalt pavement (RAP) concrete at 25 and 75%, and waste cooking oil was used as rejuvenator in all mixtures. Two different types of anti-stripping agents, namely hydrated lime and zychoTherm were used in the mixtures. The mixtures were subjected to indirect tensile strength and Cantabro tests at dry and wet conditions; and semicircular bending (SCB) test at ambient temperature. Results show that the indirect tensile strength, fracture energy and peak load in SCB test increase with increasing RAP content. However, the cracking resistance index and resistance against moisture damage and raveling decrease with increasing RAP content. Results also reveal that the hydrated lime yields higher tensile strength, fracture energy, and moisture damage and raveling resistance, than zychoTherm. However, zychoTherm results in better performance in terms of cracking resistance index and raveling resistance in wet condition.

Keywords: Reclaimed Asphalt Pavement, Hydrated Lime, Zychotherm, Moisture Damage, Fracture Energy