

# ارزیابی و مقایسه خصوصیات دوام و شکست بتن آسفالتی بازیافتی جوانسازی شده با دو نوع روغن ضایعاتی و مواد ضد عریان‌شدگی آهک هیدراته و زایکوترم

مقاله علمی - پژوهشی

علی شکری، 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](mailto:taherkhani.hasan@znu.ac.ir)

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

صفحه ۲۱۶-۱۹۷

## چکیده

این تحقیق به مقایسه تاثیر دو نوع ماده ضد عریان‌شدگی شامل آهک هیدراته و زایکوترم و دو نوع ماده جوانساز شامل روغن موتور ضایعاتی و روغن خوراکی ضایعاتی بر عملکرد بتن آسفالتی حاوی ۵۰٪ تراشه آسفالتی ضایعاتی پرداخته است. نمونه‌های ساخته شده تحت آزمایش‌های مقاومت کششی در شرایط خشک و مرطوب بعد از اعمال ۰.۱، ۵ و ۷ سیکل ذوب و یخبندان، افت وزنی کانتابرو در شرایط خشک و مرطوب و آزمایش خمش نیمدایره‌ای در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهند که مقاومت کششی مخلوط بازیافتی حاوی روغن خوراکی ضایعاتی بیشتر از روغن موتور ضایعاتی بوده و تاثیر نوع ماده ضد عریان‌شدگی بر مقاومت کششی بستگی به نوع جوانساز دارد. همچنین، روغن موتور ضایعاتی مقاومت به آسیب رطوبتی را بیشتر از روغن خوراکی افزایش می‌دهد و تاثیر زایکوترم نیز از آهک هیدراته در کاهش حساسیت رطوبتی بیشتر است. از نظر مقاومت به سیکل‌های ذوب و یخبندان و مقاومت به ش‌زدگی افزودنی آهک هیدراته عملکرد بهتری از زایکوترم نتیجه می‌دهد. روغن موتور ضایعاتی عملکرد بهتری نسبت به روغن خوراکی از نظر مقاومت به ش‌زدگی دارد، ولی نوع روغن برای مقاومت در برابر سیکل‌های یخبندان و ذوب عامل موثری نیست. نتایج آزمایش شکست با خمش نیمدایره نشان داد که مخلوط حاوی آهک هیدراته انرژی شکست بیشتری از مخلوط حاوی زایکوترم داشته و روغن موتور ضایعاتی نیز از نظر انرژی شکست عملکرد بهتری را نسبت به روغن خوراکی ضایعاتی نتیجه می‌دهد. اما، از نظر شاخص مقاومت به ترک خوردگی زایکوترم از آهک هیدراته بهتر و روغن خوراکی ضایعاتی از روغن موتور ضایعاتی بهتر است.

واژه‌های کلیدی: آهک هیدراته، بتن آسفالتی بازیافتی، روغن خوراکی ضایعاتی، روغن موتور ضایعاتی، زایکوترم

## ۱-مقدمه

یکی از سرمایه‌های مهم کشور روسازی‌های آسفالتی ساخته شده در راه‌ها می‌باشند که امکان رفت و آمد و افزایش رفاه عمومی را فراهم می‌آورند. افزایش قابل توجه در حجم ترافیک و بارهای محوری و عدم بکارگیری روش‌های مناسب اجرا و نگهداری روسازی‌های موجود، باعث ایجاد خرابی‌های زودرس و فرسودگی سریع آنها شده است. مرمت و بهسازی راه‌ها، افزایش قابل ملاحظه مصرف مصالح سنگی و قیر و تولید حجم انبوه مصالح خرده‌آسفالت ناشی از تراش روسازی‌های فرسوده را به دنبال دارد. امروزه تولید حجم زیاد تراشه‌های آسفالتی حاصل از ترمیم و بازسازی روسازی‌های آسفالتی به یکی از معضلات زیست محیطی

تبدیل شده است. از یک طرف دپوی این مصالح در اطراف راه‌ها بر منظر راه‌ها تاثیر منفی داشته و از طرف دیگر این مصالح دارای اجزای با ارزشی مثل مصالح سنگی و قیر هستند که از منابع تجدید ناپذیر برداشت شده و به راحتی تلف می‌شوند. بازگرداندن این اجزاء به چرخه ساخت و تولید مخلوط‌های آسفالتی جدید در دهه‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته که منافع زیادی از آن حاصل می‌گردد. با بازیافت تراشه‌های آسفالتی، تقاضای منابع تجدیدناپذیر کاهش می‌یابد، و همچنین باعث کاهش مصرف انرژی و انتشار گازهای سمی، که در فرایند استخراج و حمل و نقل مصالح جدید ایجاد می‌گردند، می‌شود. با اینحال، در بازیافت مصالح باید در نظر داشت که مخلوط حاوی مصالح بازیافتی، ویژگی‌های مورد انتظار همسان با مخلوط ساخته شده با مصالح جدید را ارضا کند و در مرحله بعد، از لحاظ عملکردی مشابه یا بهتر از مصالح بکر باشد. اولین استفاده از خرده‌آسفالت در ساخت یک راه جدید در سال ۱۹۱۵ ثبت شده است. با این حال، آغاز کاربرد وسیع‌تر خرده‌آسفالت به دهه ۱۹۷۰ بر می‌گردد، زمانی که در نتیجه بحران انرژی قیمت قیر بصورت چشمگیری افزایش یافت ( Taylor et al., 1983). طبق آمارهای موجود، در سال ۲۰۲۱ تنها در ایالات متحده آمریکا مقدار ۹۴٫۶ میلیون تن خرده‌آسفالت در مخلوط‌های آسفالتی، مجدداً استفاده شده که با توجه به وجود حدود ۵ درصد قیر در آن، بیش از ۴٫۷۳ میلیون تن در قیر صرفه‌جویی شده است (NAPA, 2021). همچنین، استفاده از خرده‌آسفالت نیاز به حدود ۹۰ میلیون تن سنگدانه جدید را کاهش می‌دهد. در تحقیقی دیگر که در مورد هزینه‌های استفاده از ۰ تا ۱۰۰ درصدی از خرده‌آسفالت در مخلوط‌های آسفالتی انجام پذیرفت، بسته به وضعیت بازار و در دسترس بودن RAP، هزینه‌های هر تن مخلوط با ۱۰۰ درصد خرده‌آسفالت در مقایسه با مخلوط تازه بین ۵۰ تا ۷۰ درصد کاهش می‌یابد که هزینه‌های مخلوط‌های بازیافتی بیشتر صرف هزینه‌های آماده‌سازی خرده‌آسفالت، آزمایش، بکارگیری جوانساز و کنترل آلودگی می‌شود. همچنین، بررسی‌ها نشان می‌دهد که با تولید هر تن از مخلوط ۱۰۰ درصد بازیافتی تولید شده در مقایسه با مخلوط جدید، حدود ۱۸ کیلوگرم یا ۳۵ درصد گاز کربن دی اکسید کاسته می‌شود (Zaumanis et al., 2014). مصالح خرده‌آسفالت به طور عمده شامل قیر و سنگدانه می‌باشند. کیفیت مصالح سنگی در خرده‌آسفالت معمولاً با کیفیت مصالح سنگی جدید تفاوتی ندارد و تغییرات زیادی در آن در طول بهره‌برداری رخ نمی‌دهد. اما، خواص شیمیایی، فیزیکی و

رئولوژیکی قیر موجود در خرده‌آسفالت به دلیل پیرشدگی تغییر می‌یابد. قیر پیرشده در خرده‌آسفالت در مقایسه با قیر بکر سخت تر بوده و چسبندگی کمتری داشته و مستعد ترک خوردگی می‌باشد (Veeraragavan, 2017). پیرشدگی در قیر خرده‌آسفالت در دو مرحله رخ می‌دهد که شامل پیرشدگی کوتاه مدت و بلند مدت می‌باشد. پیرشدگی کوتاه مدت در حین تولید، حمل، پخش و تراکم رخ می‌دهد و پیرشدگی بلند مدت در حین بهره‌برداری از روسازی رخ می‌دهد. در مواقعی که مقدار خرده‌آسفالت استفاده شده در تولید مخلوط آسفالتی کم می‌باشد، معایب قیر پیرشده در آن جای نگرانی چندانی ندارد. به همین دلیل، در خیلی از کشورها معمولاً مقدار استفاده از خرده‌آسفالت را در مخلوط جدید محدود می‌کنند. اما، برای استفاده از مزایای به کار گیری درصد‌های بالای خرده‌آسفالت باید مشکل مربوط به سختی قیر پیرشده در آن را حل نمود، که روشهایی شامل استفاده از جوانسازها، استفاده از قیر نرمتر، استفاده از افزودنی‌های آسفالت گرم و یا استفاده از مقدار قیر بکر بیشتر در آسفالت‌های بازیافتی می‌باشند. یکی از رایجترین روشها استفاده از جوانسازها می‌باشد، که در مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصد بالای خرده‌آسفالت (بیشتر از ۲۵٪) استفاده می‌گردند. جوانسازها اجزاء از دست رفته قیر را بازگردانده و باعث کاهش سختی و شکنندگی قیر می‌گردند. انواع زیادی از مواد با اسامی تجاری مختلف و یا مواد ضایعاتی به عنوان جوانساز در تحقیقات مختلف استفاده شده است. استفاده از مواد ضایعاتی مانند روغن موتور ضایعاتی و روغن خوراکی ضایعاتی در سالهای اخیر در تحقیقات مختلفی مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده‌اند که پتانسیل استفاده به عنوان جوانساز را در آسفالت‌های بازیافتی دارند (Azahar et al., 2017; Kumar and Aggarwal, 2023b). این مواد ضایعاتی در احجام زیاد در دنیا تولید می‌گردند که رهاسازی آنها در طبیعت آلودگی محیط زیستی زیادی را به همراه دارد. در تولید آسفالت بازیافتی، نوع و مقدار جوانساز باید بدرستی تعیین شود، به طوری که بتواند در حالی که خواص مخلوط در دماهای بالاتر را تحت تاثیر قرار نداده خواص دمای پایین و میانی آن را بهبود بخشد (Reyes-Ortiz et al., 2012). برخی از محققان مقدار بهینه روغن‌های ضایعاتی را بر اساس بازگرداندن خواص فیزیکی و رئولوژیکی قیر پیر شده به قیر پایه تعیین نموده‌اند. برای مثال، جین و چاندراپا (Jain and Chandrappa, 2022) دریافتند که با افزودن ۵ و ۷٫۵٪ روغن خوراکی ضایعاتی به قیری که حاوی، به ترتیب، ۵۰ و ۶۰ درصد

خاکستر بادی، افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی مایع از قبیل زایکوترم، ایوانیک، زایکوسیل، رپیول و ... به منظور کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط کمک گرفت (Harvey and Qing, 2005). یکی از متداول‌ترین روش‌های کاهش حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی، استفاده از مواد ضدعریان‌شدگی است. از کاربردی‌ترین این مواد که به عنوان بهبود دهنده عریان‌شدگی استفاده می‌شود آهک‌هیدراته می‌باشد. آهک‌هیدراته هم مصالح سنگدانه‌ای را اصلاح می‌کند و هم خواص قیر را بهبود می‌بخشد. آهک یک ماده ضدعریان‌کننده عالی است و در شرایط استفاده از سنگدانه اسیدی و یا وجود ریزدانه رسی در مخلوط و همچنین در شرایط رطوبت، تاثیرگذار است. آهک با مولکول‌های با قطبیت بالا در قیر ترکیب شده و در نتیجه آن با محیط واکنش نمی‌دهند، بنابراین موجب انعطاف‌پذیری قیر در برابر شکنندگی می‌گردد که به خصوص در هوای سرد اهمیت دارد (Stroup et al., 1990). مواد ضدعریان‌شدگی مایع هم که ساختاری نانو دارند به عنوان اصلاح‌کننده‌های قوی برای افزایش عملکرد مخلوط‌های آسفالتی مطرح هستند. نانو مواد ترکیبات مورفولوژیک در مقیاس نانو هستند که خواص ویژه‌ای دارند که از ابعاد نانو مقیاس آن‌ها نشأت می‌گیرد. ویژگی بی‌نظیر مکانیکی، حرارتی، نوری، الکتریکی و مغناطیسی آنها توجه بسیاری از محققان را به خود جلب نموده و در سال‌های اخیر، زمینه ورود به فناوری نانو در اصلاح خواص آسفالت فراهم شده است (Sun et al., 2017). از جمله این مواد افزودنی می‌توان به زایکوترم اشاره کرد. زایکوترم نسل پیشرفته‌ای از محصولاتی با فناوری نانو است که به عنوان افزودنی ضدعریان‌شدگی استفاده می‌شود. این ماده یک ترکیب ارگانو سیلیکون است که از گروه‌های سیلانول (Si-OH) تشکیل شده است. زایکوترم به صورت مایع بوده و مانند نانو الیاف، نیاز به میکسرهای خاص برای اضافه کردن آن به مخلوط آسفالتی ندارد، ترکیبات ارگانوسیلیکون در حضور آب به سیلانول (Si-OH) تبدیل می‌شوند و از طریق واکنش با سیلانول‌های سطحی سنگدانه‌ها پوششی از پیوندهای (Si-O-Si) را بر روی سنگدانه‌ها ایجاد می‌کنند. که این پیوند کوالانسی به عنوان پوشش، مانع از نفوذ آب می‌شود (Hamedi, 2017). ارزیابی مخلوط‌های آسفالتی باز یافتی شامل ارزیابی خصوصیات مختلف مخلوط‌ها می‌باشد. از مهمترین خصوصیتاتی که باید مورد ارزیابی قرار گیرند حساسیت رطوبتی، مقاومت در برابر ترک خوردگی، مقاومت در برابر سیکلهای مختلف ذوب و یخبندان، مقاومت به شن‌زدگی و مقاومت

قیر پیرشده است می‌توان به خواص قیر اولیه رسید. برخی دیگر از محققین نیز نتیجه‌گیری نموده‌اند که افزودن ۳ تا ۴٪ از روغن خوراکی ضایعاتی می‌تواند به طور موثری خصوصیات رئولوژیکی و فیزیکی قیر پیرشده را به خصوصیات قیر اصلی بازگرداند (Asli Zargar et al., et al., 2012; Azahar et al., 2022). مطالعات متعددی روغن خوراکی ضایعاتی و روغن موتور ضایعاتی را به عنوان جوان کننده قیر پیرشده استفاده نموده‌اند و یافته‌های آنها نشان دهنده این است که هر دو جوان کننده توانایی باز یابی خصوصیات قیر اولیه را دارند (Azahar et al., 2016; Kumar and Aggarwal, 2023a; Li et al., 2019; Mohi Ud Din et al., 2021). در برخی دیگر از تحقیقات نیز مقدار بهینه جوان کننده‌ها بر اساس ارزیابی خصوصیات مخلوط آسفالتی ارزیابی شده است که با مقدار بهینه به دست آمده از ارزیابی خصوصیات قیر همخوانی ندارد که نیاز به تحقیق و بررسی بیشتر دارد. مامون و وهب (Mamun and Wahab, 2018) با ارزیابی مقاومت کششی، مدول برجهنگی و دوام مخلوط‌های آسفالتی دریافتند که استفاده از ۷ تا ۱۳٪ از جوان کننده‌های تجاری برای رساندن خواص مخلوط باز یافتی حاوی ۳۰ تا ۴۰٪ از تراشه آسفالت به آسفالت کنترل کافی خواهد بود. طاهرخانی و نوریان (Taherkhani and Noorian, 2020) دریافتند که افزودن ۱۰٪ ورن قیر پیرشده از جوان کننده روغن موتور و روغن خوراکی ضایعاتی خصوصیات مقاومت کششی مخلوط باز یافتی حاوی ۵۰ و ۷۵٪ تراشه آسفالتی را به خصوصیات مخلوط کنترل می‌رساند، که در تحقیق حاضر نیز از این درصد استفاده گردیده است. یکی از عوامل محیطی که خسارات جبران ناپذیری به روسازی راه‌ها وارد می‌آورد، سیکل‌های ذوب و یخ است، معمولاً پس از هر بارش باران یا برف به خصوص در فصول سرد سال که امکان انجماد آب وجود دارد، درجه اشباع آسفالت افزایش یافته و به دلیل تکرار این سیکل، روسازی راه مستعد خرابی‌های بعدی می‌گردد. از خرابی عمده این سیکل‌ها می‌توان به عریان‌شدگی اشاره کرد که با افزایش حجم آب موجود در منافذ موجب تغییر شکل‌های ماندگار روسازی می‌شود. معمولاً خرابی عریان‌شدگی آسفالت از زیر لایه آسفالتی که در شرایط اشباع قرار گرفته باشد شروع و نهایتاً منجر به اضمحلال لایه آسفالتی می‌شود. عریان‌شدگی می‌تواند بر اثر عوامل دیگری از جمله طرح اختلاط نامناسب، جنس سنگ‌دانه، و قیر نامناسب ایجاد گردد. برای بهبود این موضوع می‌توان از روش‌های مختلفی مانند اصلاح فیلر و یا افزودن مواد ضدعریان‌شدگی از قبیل آهک‌هیدراته، سیمان پرتلند،

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 خرده‌آسفالت 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 D2172-ASTM 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، دانه بندی مصالح سنگی خرده آسفالت تعیین شد، که نتایج آن در شکل ۱ ارائه شده است. از دو نوع روغن ضایعاتی شامل روغن موتور ضایعاتی و روغن خوراکی ضایعاتی به عنوان جوان کننده 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.

همچنین، روغن موتور نیز از یک مرکز سرویس خودرو در شهر زنجان تهیه گردیده و ناخالصی‌ها جدا گردیدند. در شکل ۲ روغن‌های ضایعاتی به همراه سایر افزودنی‌ها ملاحظه می‌گردد.

زایکوترم استفاده شده در این تحقیق از شرکت اکسیر شرق مشهد تهیه شد. ترکیبات شیمیایی و مواد تشکیل‌دهنده زایکوترم در جدول ۴ و خصوصیات فیزیکی زایکوترم استفاده شده در این تحقیق نیز در جدول ۵ داده شده است. 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. پودر آهک‌هیدراته مورد استفاده از کارخانه آهک آذرشهر تهیه گردید، که ترکیبات شیمیایی آن مطابق جدول ۶ می‌باشد. پودر آهک‌هیدراته مورد استفاده، تماماً از الک نمره ۱۰۰ عبور کرده و مقدار عبوری از الک نمره ۲۰۰ به میزان ۸۰ درصد می‌باشد. با انجام آزمایش، مقدار وزن مخصوص آهک هیدراته مصرفی، ۲٫۱۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب بدست آمد.

در برابر شکست ناشی از گسترش ترک‌ها می‌باشد. درک رفتار مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی ساخته شده با درصد‌های مختلف از تراشه آسفالت از منابع متفاوت و انواع جوانسازها در شرایط مختلف بهره‌برداری هنوز به خوبی شناخته شده نیست و نیاز به بررسی بیشتر دارد. به ویژه اگر مواد افزودنی دیگری نیز به مخلوط اضافه شده باشد به پیچیدگی و ابهام موضوع اضافه می‌کند. در این تحقیق این موضوع مورد توجه قرار گرفته است و برخی از خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی حاوی مقدار ثابت تراشه آسفالتی و جوانسازی شده با دو نوع جوان کننده روغن موتور ضایعاتی و روغن خوراکی ضایعاتی و اصلاح شده با دو نوع ماده ضد عریان شدگی شامل آهک هیدراته و زایکوترم مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

## 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 موتور و روغن خوراکی ضایعاتی می‌باشند.

برای ساخت مخلوط‌های آسفالتی گرم، قیر PG58-22 استفاده شد که این قیر از شرکت قیر آکام استان قم تهیه گردید.

جدول ۱ برخی از مشخصات قیر مصرفی را نشان می‌دهد که توسط شرکت تولید کننده 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. مصالح سنگی شامل بخش درشت دانه، ریزدانه و فیلر می‌باشد که بر اساس دانه‌بندی مورد استفاده برای مخلوط که دانه بندی پیوسته شماره ۴ از نشریه ۲۳۴ می‌باشد، درصد اختلاط هر بخش تعیین گردید.

شکل ۱ محدوده دانه‌بندی شماره ۴ و دانه بندی مورد استفاده در مخلوط‌ها کنترل را نشان می‌دهد.

مصالح خرده‌آسفالت استفاده شده در این تحقیق از انبار دپوی مصالح خرده‌آسفالت واقع در راهدارخانه قره‌پشتلو (کیلومتر ۵ جاده

جدول ۱. مشخصات قیر مورد استفاده در پژوهش

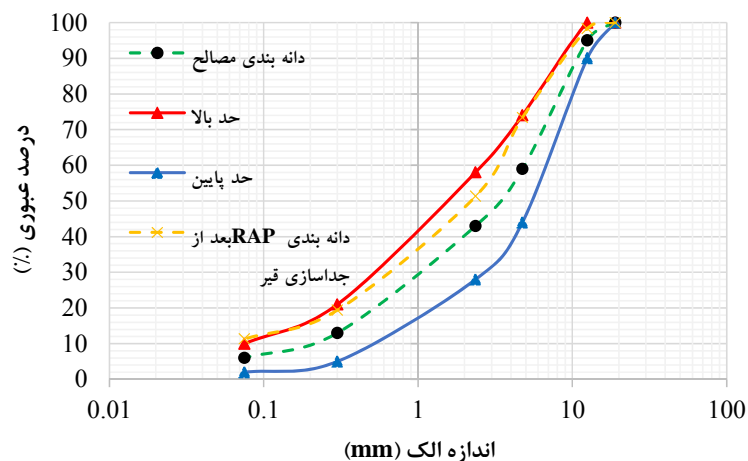
مشخصه	روش آزمایش	نتیجه	حدود آیین نامه
درجه اشتعال (سانتی گراد)	AASHTO-T48	۳۰۸	حداقل ۲۳۰
ویسکوزیته در دمای ۱۳۵ درجه سانتیگراد (Pa.s)	AASHTO-T316	۰,۲۵۳	حداکثر ۳Pa.s
$G^*/\sin\delta$ در آزمایش DSR در دمای ۵۸ درجه سانتیگراد بر روی قیر پیر نشده (کیلوپاسکال)	AASHTO-T315	۱,۸۴	حداقل ۱
$G^*/\sin\delta$ در آزمایش 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	۳۸۹۰	حداکثر ۵۰۰۰
سختی خزشی در آزمایش رئومتر تیر خمشی در دمای ۱۲- درجه سانتی گراد (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 انجلس	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)		جذب آب (%)
	ظاهری	حقیقی	
مصالح سنگی مانده روی الک ۸	۲,۷۶	۲,۶۴۸	۱,۵
مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۸ و مانده روی ۲۰۰	۲,۷۴	۲,۶۰۵	۱,۹
مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۲۰۰	۲,۷	-	-
وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی (گرم بر سانتی متر مکعب) $G_{sb}$	۲,۶۳۵		-



شکل ۱. دانه بندی مصالح سنگی مخلوط و مصالح سنگی تراشه آسفالت



شکل ۲. مواد افزودنی مورد استفاده در تحقیق

جدول ۴. ترکیبات شیمیایی زایکوترم

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

جدول ۵. خصوصیات زایکوترم مورد استفاده در پژوهش

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

جدول ۶. ترکیبات شیمیایی آهک هیدراته مورد استفاده در تحقیق

ترکیبات	Ca(OH) <sub>2</sub>	MgO	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	CaSO <sub>4</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	رطوبت
مقدار٪	۹۲	۰٫۴	۰٫۵	۰٫۴۶	۰٫۲	۵	۰٫۵	۰٫۱	۰٫۵

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

هدف از این تحقیق مقایسه تاثیر دو روش برای مقابله با آسیب رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی است، که شامل مخلوط زایکوترم و پودر آهک هیدراته می‌باشد.

این مقایسه برای آسفالت‌های بازیافتی انجام گرفته است. بنابراین، در این پژوهش ۶ 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 ساخته شده است به عنوان مخلوط کنترل در نظر گرفته شد. در یک مخلوط دیگر از ۵۰ درصد (برحسب وزن سنگدانه) تراشه آسفالت بازیافتی استفاده گردید اما ماده جوان‌کننده و زایکوترم یا فیلر آهک هیدراته در آن به کار برده نشد (R50). ۴ مخلوط دیگر نیز حاوی ۵۰ درصد خرده آسفالت ضایعاتی بوده که یک بار با ۱۰٪ از وزن قیر پیرشده موجود در آن با روغن خوراکی ضایعاتی و یک بار نیز با ۱۰٪ روغن موتور ضایعاتی جوانسازی شده و هر کدام از آنها 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. مخلوط‌های حاوی جوان‌کننده روغن خوراکی و اصلاح شده با زایکوترم با R50-CZ، و اصلاح شده با آهک هیدراته با R50-CL نشان داده میشوند. مخلوط‌های حاوی روغن موتور و زایکوترم و آهک نیز به ترتیب با R50-EZ و R50-EL نشان داده می‌شوند. لازم به ذکر است مقادیر مورد استفاده برای جوانسازها بر اساس نتایج تحقیقات قبلی می‌باشد (Taherkhani and Noorian, 2018).

همانگونه که قبلاً ذکر گردید، در همه مخلوطها از دانه بندی شماره ۴ نشریه ۲۳۴ استفاده گردید که در آن حداکثر اندازه سنگدانه‌ها ۱۹ میلیمتر می‌باشد. 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 خرده آسفالت RAP و روغن ضایعاتی تعیین شدند. 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 روغنهای ضایعاتی، آنها را هنگام اختلاط ابتدا به مصالح RAP اضافه نموده و پس از اختلاط کامل با این مصالح، 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 ویراراگون 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 سیکل‌های مختلف 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 در دمای میانی ۲۵ درجه می‌باشند. در ادامه جزئیات بیشتر در مورد نحوه انجام آزمایشات ارائه می‌گردد. برای انجام آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم، نمونه‌هایی به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت تقریبی  $1 \pm 0.68$  میلی‌متر ساخته شدند. نمونه‌های مخلوط آسفالتی با تنظیم تعداد ضربات چکش مارشال برای رسیدن به درصد فضای خالی  $0.5 \pm 7$  درصد متراکم شدند. پس از خارج کردن نمونه‌ها از قالب،

خشک طبق استاندارد NLT-352 و برای نمونه‌های مرطوب طبق استاندارد NLT-362. منطبق با استاندارد اسپانیا 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 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 ۳ دستگاه آزمایش و نمونه‌ها قبل و بعد از آزمایش را نشان می‌دهد.

آزمایش شکست جهت تعیین خصوصیات مکانیک شکست مخلوط‌های آسفالتی انجام گردید. این آزمایش بر طبق تحقیقات ویرارگاون (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  $0.01 \pm 0.1$  kN و سپس با سرعت بارگذاری ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه انجام شد. آزمایش هنگامی متوقف می‌شود که بار به کمتر از ۱/ کیلونیوتن کاهش یابد.

در نهایت، نمودار نیرو-جابجایی حاصل از انجام آزمایش‌ها در یک کامپیوتر ثبت گردید. سپس مقاومت در برابر ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از پارامترهای مختلف نظیر بار بحرانی، انرژی لازم برای شکست نمونه‌ها و شاخص مقاومت در برابر ترک خوردگی مورد ارزیابی قرار گرفت (Kaseer et al., 2018). دستگاه آزمایش و نمودار نیرو-جابجایی به ترتیب در شکل ۴ و شکل ۵ نشان داده شده است.

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  $10 \pm 5$  میلی‌لیتر آب قرار داده شدند و در فریزر در دمای  $18 \pm 1$  - 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 درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت قرار داده شدند. برای اعمال سیکل‌های مختلف ذوب و یخ این مراحل به تعداد ۱، ۵ و ۷ بار تکرار گردید. نمونه‌های خشک و عمل‌آوری شده، تحت آزمایش کشش غیرمستقیم قرار گرفتند. ارزیابی مقاومت کششی غیرمستقیم با 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.

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

که در آن، ITS، مقاومت کششی غیر مستقیم (Kpa)، P حداکثر بار اعمالی (N)، t ارتفاع نمونه (mm) و D قطر نمونه (mm) می‌باشد. نسبت مقاومت کششی نمونه‌های عمل‌آوری شده با اعمال سیکل‌های مختلف یخبندان و ذوب به مقاومت کششی نمونه‌های خشک (TSR) مطابق معادله ۲ محاسبه گردید.

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

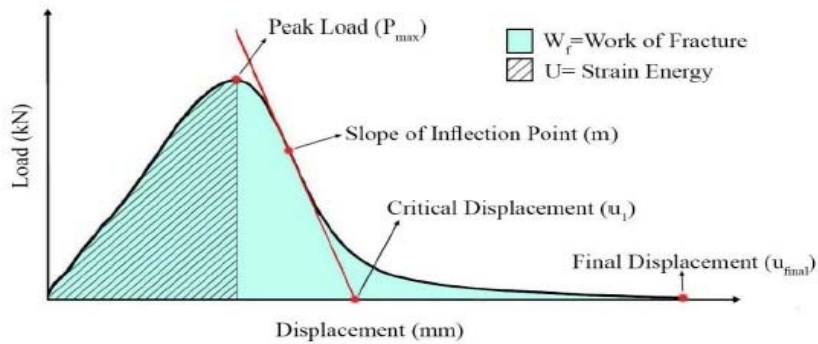
که در آن  $ITS_w$  میانگین مقاومت کششی نمونه‌های عمل‌آوری شده و  $ITS_d$ : میانگین مقاومت کششی نمونه‌های تحت شرایط خشک می‌باشند. جهت تعیین مقاومت مخلوطها در برابر شن‌زدگی از آزمایش کانتابرو استفاده گردید. در گذشته بیشتر از این آزمایش برای ارزیابی آسفالت ساخته شده با دانه‌بندی گسسته و آسفالت متخلخل استفاده 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



شکل ۳. دستگاه لس انجلس و نمونه‌ها قبل و پس از انجام آزمایش کانتابرو



شکل ۴. آزمایش خمش نیم‌دایره



شکل ۵. منحنی بار-جابجایی حاصل از آزمایش خمش نیم‌دایره (شامل پارامترهای حداکثر بار، شیب در نقطه عطف و انرژی شکست)

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- خصوصیات حجمی

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 ارزیابی قرار گرفت که نتایج در جدول ۷ نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، مخلوط بازیافتی (حاوی ۵۰ درصد RAP) بدون روغن جوانساز دارای درصد قیر

کششی مخلوط با افزودن تراشه آسفالتی افزایش یافته است که به دلیل افزایش سختی مخلوط در اثر وجود قیر پیر شده در تراشه آسفالتی می‌باشد. اما، مخلوطهایی که حاوی مواد افزودنی جوان کننده و ضد عریان شدگی هستند مقاومت کششی کمتری از مخلوط بازیافتی بدون مواد افزودنی دارند.

این کاهش نیز به دلیل نرم‌تر شدن قیر پیر شده موجود در تراشه آسفالتی با افزودن روغن‌ها می‌باشد، که در حالت جوانساز روغن موتور مقدار کاهش سختی بیشتری نسبت به روغن خوراکی ضایعاتی ملاحظه می‌گردد، که به دلیل منشاء مشابه روغن موتور و قیر می‌باشد که هر دو از نفت خام می‌باشند. نتایج همچنین نشان می‌دهد که تاثیر افزودنی ضد عریان شدگی در مخلوط‌های با دو نوع متفاوت از جوانساز متفاوت می‌باشد. در حالی که در مخلوط حاوی روغن موتور ضایعاتی افزودنی زایکوترم افزایش بیشتری را در مقاومت کششی نسبت به آهک هیدراته نتیجه داده است، در مخلوط حاوی جوانساز روغن خوراکی ضایعاتی آهک هیدراته مقاومت کششی بیشتری را نسبت به زایکوترم نتیجه داده است. مخلوط بازیافتی حاوی آهک هیدراته و روغن خوراکی ضایعاتی بالاترین مقاومت را همه مخلوط‌ها دارد. از نتایج ارائه شده در شکل ۶ همچنین استنباط می‌گردد که مقاومت کششی در حالت مرطوب نسبت به حالت خشک کاهش داشته است، که به دلیل تاثیر رطوبت بر چسبندگی بین قیر و سنگدانه و پیوستگی قیر می‌باشد. بیشترین کاهش مقاومت کششی در مخلوطی است که ۵۰٪ سنگدانه‌ها با تراشه آسفالتی جایگزین شده است و فاقد مواد افزودنی است (R50). در مخلوط‌های حاوی افزودنی تاثیر رطوبت بر مقاومت کششی کمتر شده است. در مخلوط‌های حاوی زایکوترم مقدار کاهش مقاومت کششی مرطوب نسبت به خشک کمتر از مخلوط‌های حاوی آهک هیدراته می‌باشد. همچنین، میزان کاهش مقاومت کششی حالت مرطوب نسبت به خشک در مخلوط حاوی روغن موتور کمتر از مخلوط‌های حاوی روغن خوراکی ضایعاتی است. به منظور مقایسه حساسیت رطوبتی مخلوط‌های مورد مطالعه، نسبت مقاومت کششی در حالت مرطوب، بعد از اعمال سیکل‌های مختلف یخبندان و ذوب، نسبت به مقاومت کششی در حالت خشک (TSR) محاسبه گردیده است، که نتایج آن در شکل ۷ ملاحظه می‌گردد. مطابق مشخصات فنی حداقل این نسبت بعد از اعمال یک سیکل یخبندان و ذوب برای مخلوط آسفالتی ۷۵٪ می‌باشد و مخلوط‌هایی که این نسبت در آنها کمتر از ۷۵٪ باشد، از نظر مقاومت به آسیب رطوبتی مورد پذیرش نیستند. همانگونه

بهینه بالاتری نسبت به مخلوط کنترل می‌باشد، که به دلیل بالا بودن درصد فضای خالی آن در هنگامی است که قیر بهینه مخلوط کنترل برای آن استفاده می‌شود. افزایش درصد فضای خالی نشان می‌دهد که قیرهای سخت شده RAP به طور کامل با قیر جدید ترکیب نمی‌شوند و منجر به ایجاد مخلوط با مقدار قیر موثر کل کمتر و در نتیجه کاهش کارایی مخلوط می‌شود (Zhang, 2010). به همین منظور، به درصد قیر افزوده شد تا جوابگوی حداقل درصد فضای خالی مجاز باشد. این نتایج مشابه با نتایج مطالعه (Mogawer et al., 2013) می‌باشند. 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 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 افزودن RAP، مقدار فضای خالی مصالح سنگی مخلوط افزایش می‌یابد، که با افزودن جوانساز از مقدار آن کاسته می‌شود. 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. مقادیر فضای خالی پر شده با قیر نیز با افزودن RAP افزایش می‌یابد که منطبق با مطالعات (Daniel and Lachance, 2005; Solanki et al., 2012; Jia et al., 2015) می‌باشد. با توجه به جدول و مقایسه نتایج بدست آمده تفاوت چشمگیری در تفاوت تاثیر مواد ضدعریان‌شدگی مشاهده نگردید.

### ۲-۳- نتایج آزمایش مقاومت کششی

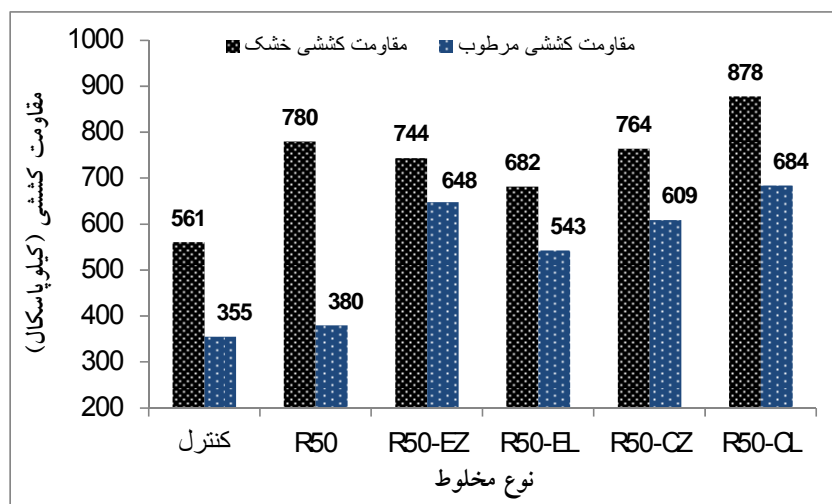
شکل ۶ نتایج مقاومت کششی مخلوط‌ها را در دو حالت خشک و مرطوب (بعد از اعمال یک سیکل یخبندان و ذوب) نشان می‌دهد. مقاومت کششی مخلوط آسفالتی نشان دهنده مقاومت در برابر ترک خوردگی مخلوط می‌باشد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد مقاومت

اندازه گیری شده است. نسبت مقاومت کششی بعد از اعمال سیکل‌های مختلف یخبندان و ذوب به مقاومت کششی در حالت خشک در شکل ۷ نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، با افزایش تعداد سیکل یخبندان و ذوب، مقاومت کششی کاهش بیشتری می‌یابد. همچنین، در شکل ۷ ملاحظه می‌گردد که مخلوط کنترل عملکردی بهتر از مخلوطی که حاوی ۰.۵٪ تراشه آسفالتی و بدون مواد افزودنی است دارد. مخلوط‌های بازیافتی حاوی آهک هیدراته به آسیب ناشی از سیکل‌های یخبندان و ذوب مقاومت بیشتری از مخلوط حاوی زایکوترم نشان می‌دهند. مخلوط‌های حاوی زایکوترم از این نظر حتی دارای عملکردی بدتر از مخلوط کنترل و مخلوط حاوی ۰.۵٪ تراشه آسفالتی و بدون مواد افزودنی هستند. اما، تفاوت چندانی در عملکرد جوان کنند روغن موتور و روغن خوراکی ضایعاتی دیده نمی‌شود.

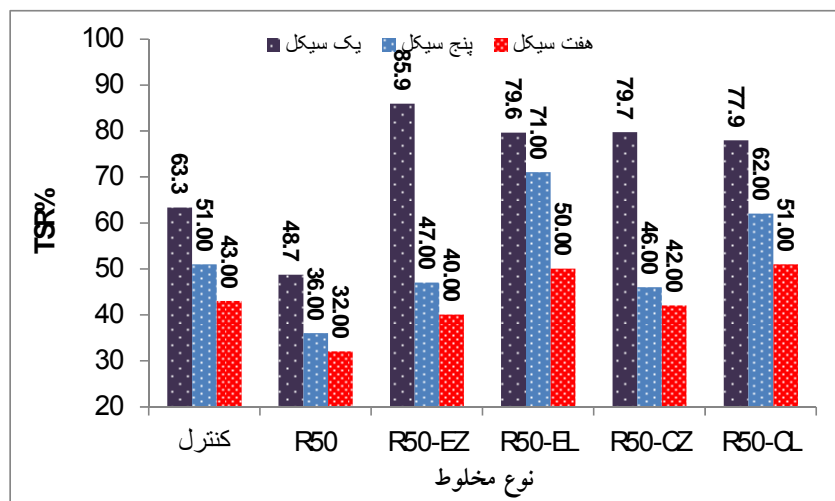
که ملاحظه می‌گردد، مقدار TSR برای مخلوط کنترل و مخلوط حاوی ۰.۵٪ تراشه آسفالتی و بدون افزودنی کمتر از ۰.۷۵٪ می‌باشد، که به دلیل نوع مصالح سنگی در آنها می‌باشد که از جنس سیلیس و آبدوست می‌باشد. اما، در مخلوط‌های بازیافتی حاوی جوانساز و مواد ضد عریان شدگی این نسبت به بالای ۰.۷۵٪ رسیده است که نشان دهنده تاثیر مواد افزودنی ضد عریان شدگی می‌باشد. از بین جوانسازها روغن موتور ضایعاتی تاثیر ضد رطوبتی بیشتری دارد. همچنین، در بین مواد ضد عریان شدگی تاثیر زایکوترم بر افزایش مقاومت به آسیب رطوبتی بیشتر از آهک هیدراته بوده است. بالاترین مقاومت به آسیب رطوبتی را مخلوطی دارد که حاوی زایکوترم و جوان کننده روغن موتور ضایعاتی می‌باشد. به منظور بررسی تاثیر سیکل‌های مختلف یخبندان و ذوب بر مخلوط‌ها مقاومت کششی مخلوط‌ها بعد از اعمال ۱، ۵ و ۷ سیکل یخبندان و ذوب مطابق استاندارد AASHTO T283

جدول ۷. نتایج خصوصیات حجمی

نام اختصاری ترکیب ها	قیر بهینه (%)	Va	VMA	VFA
Control	5.50	4.51	13.4	65.96
50R	5.70	4.44	14.49	72.56
50R-EZ	5.40	3.68	13.65	72.82
50R-EL	5.40	3.68	13.65	72.82
50R-CZ	5.40	3.7	13.55	72.3
50R-CL	5.40	3.7	13.55	72.3



شکل ۶. مقاومت کششی مخلوط‌ها در حالت خشک و مرطوب



شکل ۷. نسبت مقاومت کششی مرطوب به خشک بعد از اعمال سیکل‌های مختلف یخبندان و ذوب

### ۳-۳- نتایج آزمایش کانتابرو

مقاومت به آسیب رطوبتی بیشتر است. نتایج در شکل ۹ نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود، تاثیر رطوبت بر مقاومت شن زدگی در مخلوط R50 بیشتر از مخلوط کنترل می‌باشد، و با افزودن روغن جوانساز و مواد ضد عریان شدگی این مقاومت کاهش

می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که در مخلوط‌های جوانسازی شده با روغن خوراکی ضایعاتی تاثیر رطوبت بر مقاومت به شن زدگی بیشتر از روغن موتور ضایعاتی است. همچنین، زایکوترم تاثیر افزایش مقاومت در برابر رطوبت بیشتری از آهک هیدراته دارد، که با نتایج TSR همخوانی دارد.

### ۳-۴- نتایج آزمایش خمش نیمه‌دایره‌ای

شکل ۱۰ نتایج بار بحرانی برای مخلوط‌های مختلف، که حداکثر نیروی لارم برای شکست نمونه‌های نیمه‌دایره‌ای 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 گسترش ترک خوردگی‌ها تلقی می‌شود. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، با جایگزینی ۵۰٪ از مصالح سنگی طبیعی با تراشه آسفالتی مقدار بار بحرانی به مقدار ۴۳٪ افزایش می‌یابد. این افزایش 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

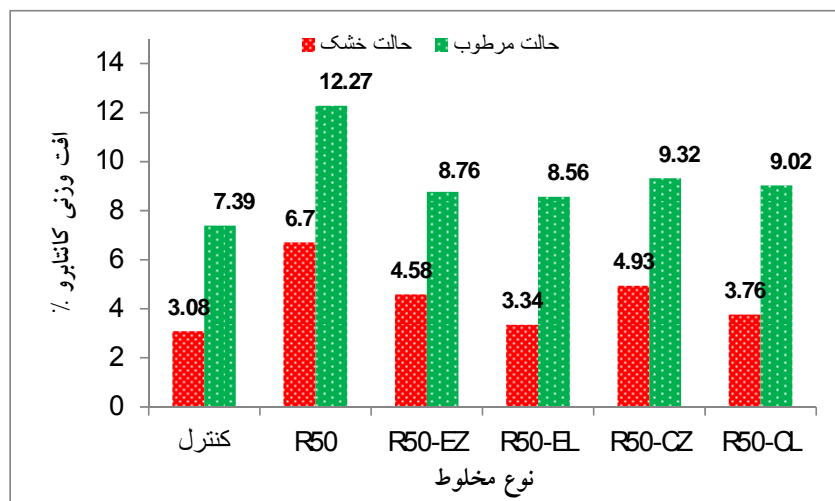
شکل ۸ نتایج آزمایش افت وزنی کانتابرو را برای مخلوط‌های مختلف در دو حالت خشک و مرطوب نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، در مخلوطی که ۵۰٪ از سنگدانه‌های طبیعی با تراشه آسفالتی جایگزین شده و از جوان کننده و ماده ضد عریان شدگی استفاده نشده است (R50)، میزان افت وزنی در دو حالت خشک و مرطوب از مخلوط کنترل بیشتر می‌باشد. 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، هر چند مقدار آن در مخلوط‌های باز یافتی حاوی جوان کننده و مواد ضد عریان شدگی نیز از مخلوط کنترل بیشتر است. بخشی از این اختلاف به دلیل نرم‌تر شدن قیر به دلیل افزودن روغن‌ها و در نتیجه کاهش مقاومت به ضربه می‌باشد. همچنین نتایج بیانگر این است که در شرایط خشک آهک هیدراته تاثیر بیشتری در افزایش مقاومت در برابر شن زدگی نسبت به زایکوترم دارد، اما تاثیر آن در شرایط مرطوب قابل توجه نمی‌باشد. از نتایج ارائه شده در شکل ۸ 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 و پیوستگی قیر می‌باشد. به عنوان شاخصی برای مقاومت در برابر تاثیر مخرب رطوبت بر شن زدگی نسبت افزایش افت وزنی در شرایط مرطوب نسبت به افت وزنی در شرایط خشک برای مخلوط‌ها محاسبه گردیده است. هر چقدر این نسبت کمتر باشد

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 (Ipekyol et al., 2022).

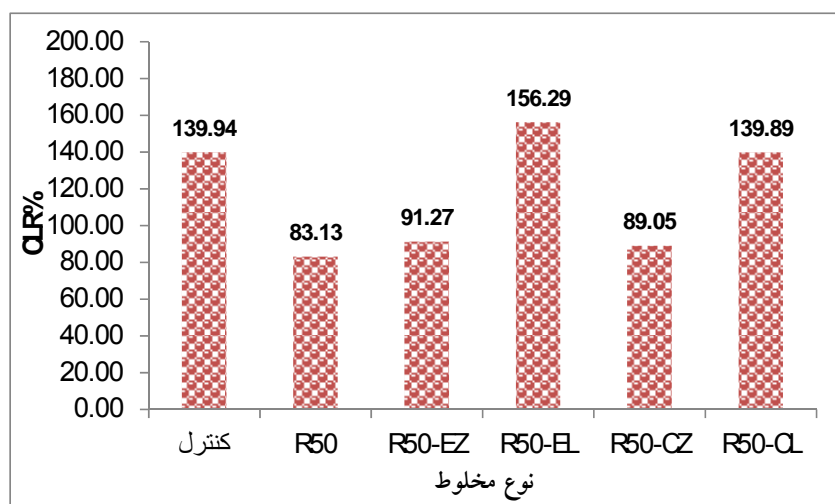
یک ماده با شاخص ترک خوردگی بزرگتر نشان می‌دهد که آن ماده مقاومت بیشتری در برابر ترک خوردگی دارد (Espinosa et al., 2020). نتایج بیانگر این است که مقاومت به ترک خوردگی با جایگزینی ۵۰٪ از مصالح سنگی طبیعی با تراشه آسفالتی به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. با وجود این که انرژی شکست و بار بحرانی با افزایش 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 روغن موتور ضایعاتی و ضد عریان شدگی آهک هیدراته و زایکوترم دارای شاخص مقاومت به ترک خوردگی بیشتری از مخلوط بازیافتی بدون مواد افزودنی می‌باشد. اما، مخلوطهای بازیافتی حاوی روغن خوراکی دارای شاخص مقاومت به ترک خوردگی کمتری از مخلوط بازیافتی بدون مواد افزودنی است. نتایج همچنین نشان می‌دهند که جوان کننده روغن موتور عملکرد بهتری از روغن خوراکی داشته و همچنین شاخص مقاومت به ترک خوردگی مخلوطهای حاوی زایکوترم از مخلوطهای حاوی آهک هیدراته بیشتر است. این 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 مجیدی فر و همکاران نیز مورد تایید قرار گرفته است (Majidifard et al., 2021). در مخلوطهای آسفالتی اصلاح شده با پلیمر، مجیدی فر 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.

مربوط به جوان کننده است که باعث گردیده قیر پیرشده نرمتر گردد و سختی مخلوط کاهش یابد. 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. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که مخلوطهای بازیافتی حاوی روغن موتور بار بحرانی بالاتری را نسبت به مخلوط حاوی روغن خوراکی ضایعاتی تحمل می‌کنند.

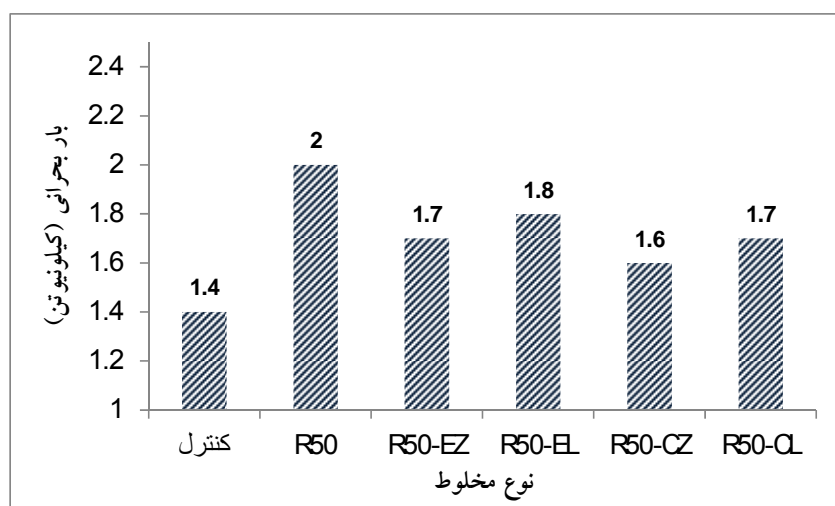
شکل ۱۱ نتایج مربوط به انرژی شکست مخلوطهای مختلف را نشان می‌دهد. از نتایج ارائه شده در شکل ۱۱ می‌توان استنباط نمود که با افزودن تراشه آسفالتی در مخلوط انرژی شکست افزایش می‌یابد که به دلیل افزایش سختی مخلوط ناشی از قیر پیرشده موجود در تراشه آسفالتی می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که مخلوطهای حاوی جوان کننده و آهک هیدراته انرژی شکست بیشتری از مخلوط بازیافتی بدون مواد جوان کننده دارد. انرژی شکست وابسته به مساحت زیر منحنی بار-جابجایی است که ممکن است با افزایش شکل پذیری مخلوط این مساحت افزایش یابد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، انرژی شکست مخلوطهای بازیافتی حاوی آهک هیدراته از مخلوطهای حاوی زایکوترم بیشتر است که میتوان گفت این مخلوطها مقاومت به ترک خوردگی بالاتری دارند. نتایج همچنین بیانگر این است که انرژی شکست مخلوطهای حاوی روغن خوراکی ضایعاتی بیشتر از روغن موتور ضایعاتی است. این موضوع میتواند به دلیل افزایش بیشتر نرمی قیر پیر شده با استفاده از روغن خوراکی نسبت به روغن موتور باشد. بیشترین انرژی شکست مربوط به مخلوطی است که دارای ۵۰٪ تراشه آسفالتی بوده و به اندازه ۱۰٪ وزن قیر پیرشده جوانساز روغن خوراکی داشته و از آهک هیدراته به عنوان جوانساز استفاده شده است. نتایج مربوط به شاخص مقاومت به ترک خوردگی (CRI) مخلوطها در شکل ۱۲ 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



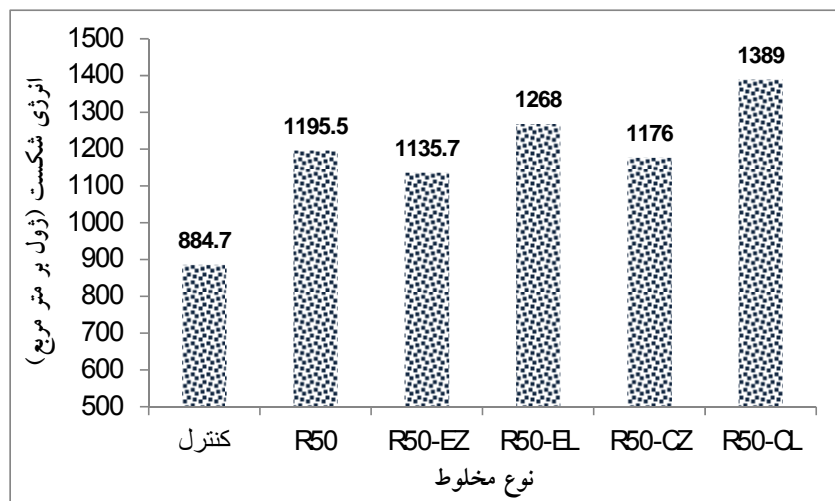
شکل ۸. نتایج افزایش وزنی کاکتارو



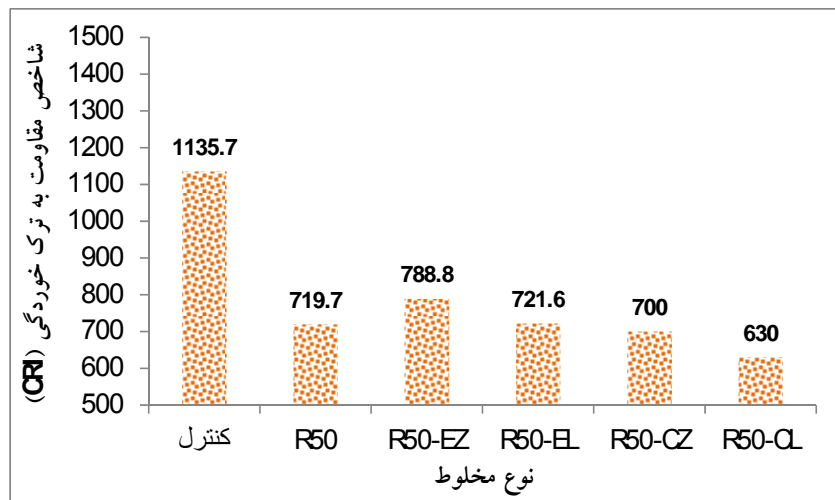
شکل ۹. نسبت افزایش وزنی کاکتاروی مرطوب به خشک برای مخلوط‌های مورد مطالعه



شکل ۱۰. نتایج بار بحرانی در آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای



شکل ۱۱. انرژی شکست مخلوط‌های مورد مطالعه



شکل ۱۲. شاخص مقاومت به ترک خوردگی مخلوط‌های مختلف

#### ۴-تحلیل آماری

تحلیل آماری در جدول ۸ نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد نوع جوانساز و نوع ماده ضد عریان شدگی و اثرات متقابل آنها بر خصوصیات مقاومت کششی، افت وزنی کانتابرو، انرژی شکست و شاخص مقاومت بر ترک خوردگی دارای اثرات مهمی می‌باشند. از نظر حساسیت رطوبتی، مشاهده می‌گردد که نوع ماده ضد عریان شدگی دارای اهمیت است اما تاثیر نوع جوانساز و اثر متقابل نوع جوانساز و نوع ماده ضد عریان شدگی در این ویژگی اهمیت قابل توجهی ندارد.

با استفاده از آنالیز واریانس دو طرفه در نرم افزار اکسل اهمیت اثر نوع روغن جوانساز و نوع ماده ضد عریان شدگی و اثرات متقابل آنها بر خصوصیات مخلوط‌های بازیافتی مطالعه گردید. سطح اطمینان ۹۵٪ برای تحلیل انتخاب شد. دو نوع روغن جوانساز و دو نوع ماده ضد عریان شدگی برای تحلیل انتخاب شدند. درجه آزادی برای نوع جوانساز و نوع ضد عریان شدگی هر کدام ۱ و برای اثرات متقابل آنها ۸ می‌باشد. از مقدار  $p$ -value برای ارزیابی اهمیت اثر متغیرهای مستقل و اثرات متقابل آنها بر خصوصیات مقاومت کششی، حساسیت رطوبتی، افت وزنی کانتابرو، انرژی شکست و شاخص مقاومت به ترک خوردگی استفاده گردید. مقدار  $p$ -value کمتر از ۰,۰۵ نشان دهنده اهمیت اثر می‌باشد. نتایج

## ۵- نتیجه گیری

و نوع روغن جوان کننده نیز از نظر مقاومت به سیکل های یخبندان و ذوب اهمیت ندارد.

- جایگزینی مصالح سنگی طبیعی با تراشه های آسفالت ضایعاتی باعث کاهش مقاومت در برابر شن زدگی می گردد، که با افزودن مواد ضد عریان شدگی و جوانساز این مقاومت تا حدودی بهبود می یابد، اما از مقاومت مخلوط کنترل کمتر است. مخلوط های حاوی آهک هیدراته عملکرد بهتری از مخلوط های حاوی زایکوترم دارند. همچنین، روغن موتور ضایعاتی عملکرد بهتری از روغن خوراکی ضایعاتی دارد.

- رطوبت باعث کاهش مقاومت به شن زدگی مخلوطها می گردد، که این کاهش با جایگزینی سنگدانه های طبیعی با تراشه آسفالت کمتر شده و با افزودن مواد ضد عریان شدگی و روغن جوانساز تاثیر رطوبت بر شن زدگی افزایش می یابد. زایکوترم عملکرد بهتری از نظر آسیب رطوبت به شن زدگی داشته و همچنین روغن خوراکی ضایعاتی عملکردی بهتر از روغن موتور ضایعاتی دارد.

- از نظر شاخص بار بحرانی و انرژی شکست مخلوط های بازیافتی عملکرد بهتری از مخلوط کنترل داشته، ولی از نظر شاخص مقاومت به ترک خوردگی عملکرد مخلوط های بازیافتی از مخلوط کنترل ضعیف تر می باشد. ماده ضد عریان شدگی آهک هیدراته انرژی شکست و بار بحرانی بالاتری را از زایکوترم نتیجه می دهد، ولی شاخص مقاومت به ترک خوردگی پایین تری دارد. انرژی شکست مخلوط بازیافتی حاوی جوانساز روغن خوراکی ضایعاتی بیشتر از روغن موتور ضایعاتی است، اما بار بحرانی و شاخص مقاومت به ترک خوردگی مخلوط حاوی روغن موتور ضایعاتی بیشتر است.

در این تحقیق، از دو نوع ماده ضد عریان شدگی در مخلوط آسفالتی بازیافتی حاوی ۵۰٪ از تراشه آسفالتی و جوانسازی شده با دو نوع روغن شامل روغن خوراکی ضایعاتی و روغن موتور ضایعاتی استفاده گردید و خصوصیات مختلف مخلوطها شامل خصوصیات حجمی، مقاومت کششی، حساسیت رطوبتی تحت سیکل های مختلف یخبندان و ذوب، مقاومت به شن زدگی با آزمایش افت وزنی کانتابرو و خصوصیات شکست با آزمایش خمش نیمدایره ای مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج مهم این تحقیق

به طور خلاصه در زیر ارائه می گردند:

- مخلوط های بازیافتی حاوی جوانساز و ضد عریان شدگی مقدار قیر بهینه کمتر، درصد فضای خالی مصالح سنگی کمتر و درصد فضای خالی پر شده با قیر بیشتری از مخلوط کنترل دارند و این موضوع مستقل از نوع روغن و نوع ماده ضد عریان شدگی می باشد. - مقاومت کششی مخلوط های بازیافتی حاوی روغن خوراکی ضایعاتی از روغن موتور ضایعاتی بیشتر است. تاثیر نوع ماده ضد عریان شدگی بر مقاومت کششی نیز بستگی به نوع جوانساز دارد. در حالی که در مخلوط حاوی جوانساز روغن موتور ضایعاتی تاثیر زایکوترم بر افزایش مقاومت کششی بیشتر است، در مخلوط حاوی جوانساز روغن خوراکی ضایعاتی تاثیر آهک هیدراته بیشتر از زایکوترم می باشد.

- استفاده از مواد جوانساز و ضد عریان شدگی باعث بهبود مقاومت در برابر آسیب رطوبتی گردیده است. تاثیر روغن موتور ضایعاتی از روغن خوراکی بیشتر بوده و همچنین تاثیر زایکوترم از آهک هیدراته از نظر کاهش حساسیت رطوبتی بهتر است.

- با افزایش تعداد سیکل های ذوب و یخبندان عملکرد مخلوط های بازیافتی حاوی آهک هیدراته بهتر از مخلوط حاوی زایکوترم است

جدول ۸. نتایج تحلیل آماری و آنالیز واریانس دو طرفه

منبع	درجه آزادی	F	F <sub>cr</sub>	p-value	اهمیت
مقاومت کششی غیر مستقیم در حالت خشک					
نوع جوانساز	۱	۱۱۱٫۸۵۱	۵٫۳۱	$۵٫۵۸ \times ۱۰^{-۶}$	بله
نوع ماده ضد عریان شدگی	۱	۶۹۳۹٫۳	۵٫۳۱	$۴٫۸ \times ۱۰^{-۱۳}$	بله
اثرات متقابل نوع جوانساز و نوع ضد عریان شدگی	۸	۱۱۴٫۱۱	۵٫۳۱	$۵٫۱۷ \times ۱۰^{-۶}$	بله

نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم (TSR)					
نوع جوانساز	۱	۰,۵۷	۵,۳۱	۰,۴۶۹۴	خیر
نوع ماده	۱	۲۵۲۱,۹۸	۵,۳۱	$۲,۷۴ \times 10^{-11}$	بله
ضد عریان شدگی					
اثرات متقابل نوع جوانساز و نوع ضد عریان شدگی	۸	۰,۰۱۱۷۶۵	۵,۳۱	۰,۹۱۶	خیر
افت وزنی کانتابرو					
نوع جوانساز	۱	۷,۸۱	۵,۳۱	۰,۰۲۳۳	بله
نوع ماده	۱	۳۸۸,۱۹	۵,۳۱	$۴,۵۸ \times 10^{-۸}$	بله
ضد عریان شدگی					
اثرات متقابل نوع جوانساز و نوع ضد عریان شدگی	۸	۴۶,۸	۵,۳۱	۰,۰۰۰۱۳۲	بله
انرژی شکست					
نوع جوانساز	۱	۱۴۲,۷	۵,۳۱۷	$۲,۲۲ \times 10^{-11}$	بله
نوع ماده	۱	۶۹۴۵۱,۶	۵,۳۱۷	$۸,۰۴ \times 10^{-17}$	بله
ضد عریان شدگی					
اثرات متقابل نوع جوانساز و نوع ضد عریان شدگی	۸	۱۴۷,۵۲	۵,۳۱۷	$۱,۹۶ \times 10^{-6}$	بله
شاخص ترک خوردگی (CRI)					
نوع جوانساز	۱	۳۴۱۶,۷۸	۵,۳۱۷	$۱,۳۴ \times 10^{-3۴}$	بله
نوع ماده	۱	۳۵۲۹۷,۸۶	۵,۳۱۷	$۷,۲ \times 10^{-16}$	بله
ضد عریان شدگی					
اثرات متقابل نوع جوانساز و نوع ضد عریان شدگی	۸	۱۵۵,۹۴	۵,۳۷	$۱,۵۸ \times 10^{-6}$	بله

## ۶-مراجع

-Azahar, W. N. A. W., Bujang, M., Jaya, R. P., Hainin, M. R., Mohamed, A., Ngadi, N., & Jayanti, D. S. (2016). The potential of waste cooking oil as bio-asphalt for alternative binder – An overview. *Journal Teknologi*, 78(4), 111–116.  
[doi.org/10.11113/jt.v78.8007](https://doi.org/10.11113/jt.v78.8007)  
 -Azahar, W. N. A. W., Kasim, N., Ismail, N. N., Jaya, R. P., Hainin, M. R., Masri, K. A., Bujang, M., & Al-Saffar, Z. H. (2022). Behaviour of hot mix asphalt incorporating untreated and treated waste cooking oil. *International Journal of*

-Asli, Hallizza, et al. (2012). Investigation on physical properties of waste cooking oil–Rejuvenated bitumen binder. *Construction and Building Materials* 37, 398-405.

-Azahar, W. A. N. W., Jaya, P. R., Hainin, R. M., 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](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.048)

- Kumar, V., & Aggarwal, P. (2023a). Characteristics of waste oil-rejuvenated rap bitumen: an experimental study. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 17(3), 443–456. [doi.org/10.14525/JJCE.v17i3.07](https://doi.org/10.14525/JJCE.v17i3.07)
- Kumar, Vishal, & Aggarwal, P. (2023b). Application of natural and waste oils as rejuvenator in reclaimed asphalt pavement: a review. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 0123456789. [doi.org/10.1007/s42947-023-00388-7](https://doi.org/10.1007/s42947-023-00388-7).
- Li, H., Dong, B., Wang, W., Zhao, G., Guo, P., & Ma, Q. (2019). Effect of waste engine oil and waste cooking oil on performance improvement of aged asphalt. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(9). [doi.org/10.3390/app9091767](https://doi.org/10.3390/app9091767).
- Majidifard, H., Jahangiri, B., Rath, P., & Buttler, 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](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108658)
- Mamun, A. A., & Al-Abdul Wahhab, H. I. (2018). Evaluation of waste engine oil-rejuvenated asphalt concrete mixtures with high rap content. *Advances in Materials Science and Engineering*. [doi.org/10.1155/2018/7386256](https://doi.org/10.1155/2018/7386256)
- Mamun, A. A., Al-Abdul Wahhab, H. I., & Dalhat, M. A. (2020). Comparative evaluation of waste cooking oil and waste engine oil rejuvenated asphalt concrete mixtures. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(10), 7987–7997. [doi.org/10.1007/s13369-020-04523-5](https://doi.org/10.1007/s13369-020-04523-5)
- Mohi Ud Din, I., Bhat, F. S., & Mir, M. S. (2021). A study investigating the impact of waste cooking oil and waste engine oil on the performance properties of RAP binders. *Road Materials and Pavement Design*, 24(1), 295–309. [doi.org/10.1080/14680629.2021.2002182](https://doi.org/10.1080/14680629.2021.2002182)
- 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 *Pavement Research and Technology*, 15(3), 577–588. [doi.org/10.1007/s42947-021-00038-w](https://doi.org/10.1007/s42947-021-00038-w)
- 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.
- 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](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120037)
- Hamedi, Gholam Hossein (2017). Evaluating the effect of asphalt binder modification using nanomaterials on the moisture damage of hot mix asphalt. *Road Materials and Pavement Design* 18.6, 1375-1394.
- Harvey, John T., and Qing Lu. (2005). Investigation of conditions for moisture damage in asphalt concrete and appropriate laboratory test methods.
- 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](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01384)
- Jain, S., & Chandrappa, A. K. (2022). Rheological and chemical investigation on asphalt binder incorporating high recycled asphalt with waste cooking oil as rejuvenator. *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(4).
- Jain, S., & Chandrappa, A. K. (2024). Influence of blended waste cooking oils on the sustainable asphalt rejuvenation considering secondary aging. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 0123456789. [doi.org/10.1007/s42947-023-00408-6](https://doi.org/10.1007/s42947-023-00408-6)
- 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.
- 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.

- containing reclaimed asphalt pavement (RAP). *Road Materials and Pavement Design*, 21(5), 1238–1257.
- doi.org/10.1080/14680629.2018.1546220**
- Taylor, M. A. and Khosla, N. P. (1983). Stripping of Asphalt Pavements: State of the Art, *Transportation Research Record 911*.
- Veeraragavan, Ram Kumar, et al. (2017). Laboratory comparison of rejuvenated 50% reclaimed asphalt pavement hot-mix asphalt with conventional 20% RAP mix. *Transportation Research Record 2633.1*, 69-79.
- 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.
- Zahoor, M., Nizamuddin, S., Madapusi, S., & Giustozzi, F. (2021). Sustainable asphalt rejuvenation using waste cooking oil: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123304.
- doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123304**
- Zargar, M., Ahmadiania, 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 and 254–258.
- doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.06.021**
- Zaumanis, M., Mallick, R. B., Poulidakos, L., & Frank, R. (2014). Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 71, 538–550.
- doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.073**
- Zhang, J. (2010). Effects of warm-mix asphalt additives on asphalt mixture characteristics and pavement performance. University of Nebraska, *Lincoln*, 89-90.
- RAP/RAS mixtures. *Road Materials and Pavement Design*. Taylor & Francis, 14(sup2), 193–213.
- Reyes-Ortiz, O., et al., (2021). Evaluation of hot mix asphalt mixtures with replacement of aggregates by reclaimed asphalt pavement (RAP) material. *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 53, 379-388.
- Solanki, P., Hossain, Z., Zaman, M. and Adje, D. (2012). Volumetric and mechanistic characteristics of asphalt mixes containing recycled asphalt pavement. *In GeoCongress 2012: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering*, 3709–3718.
- Stroup-Gardiner, Mary, and David Newcomb. (1990). Comparison of dolomitic and normally hydrated lime as antistripping additives. *Transportation Research Record 1269*, 56-68.
- Sun, Lu, Xiantao Xin, and Jiaolong Ren. (2017). Asphalt modification using nano-materials and polymers composite considering high and low temperature performance. *Construction and Building Materials* 133, 358-366.
- Taherkhani, H., Afroozi, S. and Javanmard, S. (2017). Comparative Study of the Effects of Nanosilica and Zyco-Soil Nanomaterials on the Properties of Asphalt Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. American Society of Civil Engineers, 29(8), 4017054-4017055.
- 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.
- Taherkhani, H., & Noorian, F. (2020). Comparing the effects of waste engine and cooking oil on the properties of asphalt concrete

# **Evaluation and Comparison of Durability and Fracture Properties of Recycled Asphalt Concrete Rejuvenated with Two Types of Waste Oils and Anti-Striping Agents of Hydrated Lime and Zychotherm**

*Ali Shakori, 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: May 2025- Accepted: August 2025

## **ABSTRACT**

This research has investigated the comparison of two types of anti-stripping additives, namely, hydrated lime filler and zychotherm, and two types of rejuvenating oils including waste engine oil and waste cooking oil, on the performance of recycled asphalt concrete containing 50% of reclaimed asphalt pavement (RAP). The samples of mixtures were undergone indirect tensile strength test in dry and conditioned after applying 1, 5 and 7 cycles of freeze-thaw, Cantabro loss test in dry and wet condition, and semi-circular bending test at 25°C. The results show that the indirect tensile strength of recycled mixtures containing waste cooking oil is more than the mixtures containing waste engine oil, and, the effect of anti-stripping agent depends on the rejuvenating agent. Furthermore, the waste engine oil results in higher moisture damage resistance than waste cooking oil, and, hydrated lime leads to more resistance against moisture damage than zychotherm. In terms of resistance against freeze-thaw cycles, hydrated lime results in better performance than zychotherm; while type of rejuvenating oil is significant. SCB test results reveal that the mixtures containing hydrated lime results in higher fracture energy than zychotherm; and, the waste engine oil performs better than waste cooking oil. However, in terms of cracking resistance index, zychotherm has resulted better performance than hydrated lime and waste cooking oil has resulted better than waste engine oil.

**Keywords:** Recycled Asphalt Concrete, Waste Cooking Oil, Waste Engine Oil, Zychotherm, Hydrated Lime