

ارزیابی خصوصیات عملکردی مخلوط آسفالتی حاوی روغن خوراکی بازیافتی و روغن موتور ضایعاتی

مقاله علمی - پژوهشی

امین فرج اللهی*، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران

سارا چوبدار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: AminFarajollahi@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۵ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۵

صفحه ۵۱۹-۵۰۵

چکیده

در راه سازی، انواع مختلفی از روغن های پسماند برای غلبه بر اثر سفت کننده درصد مخلوط آسفالتی توصیه شده است. با این حال، انتخاب یک جوان کننده موثر بر اساس یک مطالعه تطبیقی می تواند منجر به استفاده کارآمدتر از منابع شود. در این پژوهش، روغن های آشیزی و روغن موتور پسماند برای جوان سازی سه درصد مختلف (۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد) روسازی آسفالت بازیافتی به دنبال حداکثر سازگاری صنعتی فعلی استفاده می شوند. مخلوط های جوان سازی شده با روغن های زاید با مخلوط تازه و مخلوط هایی که با جوان کننده های تجاری جوان سازی شده اند، مقایسه می شوند. حساسیت به رطوبت، استحکام کششی غیرمستقیم و مدول ارتجاعی مخلوط های آسفالتی مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد. بر اساس تحلیل های آماری و رتبه بندی کلی، نتیجه گیری می شود که ۷ درصد روغن های ضایعاتی موتور تا ۴۰ درصد روسازی آسفالت بازیافت شده عملکرد بهتری دارند. در حالی که ۱۳ درصد روغن های ضایعاتی را می توان تا ۵۰ درصد روسازی آسفالت بازیافتی استفاده کرد.

واژه های کلیدی: قیر، روسازی آسفالت احیا شده، جوان کننده، ضایعات روغن پخت و پز، روغن موتور ضایعاتی

۱- مقدمه

(Mamun et al, 2018). استفاده کنترل نشده از RAP می تواند منجر به یک مخلوط سفت تر شود و متعاقباً به شکست زودرس ختم شود (Mogawer et al, 2012). بنابراین استفاده از RAP در روسازی آسفالتی جدید مستلزم جوان سازی خواص از دست رفته است. فرآیند سنتی بازیابی خواص از دست رفته با افزودن یک عامل بازیافت شیمیایی انجام می شود که با ترکیب تغییر یافته آسفالت پیر مقابله می کند (Lins et al, 2008). افزودنی های شیمیایی که به عنوان جوان کننده در مخلوط آسفالت ترکیب می شوند، به عنوان عوامل بازیافت شناخته می شوند. عامل

مشخص شده است که استفاده از روسازی آسفالت احیا شده (RAP) در ساخت روسازی آسفالت منجر به صرفه جویی در هزینه های مواد، انتشار کربن کمتر، مصرف انرژی کمتر مورد نیاز، استفاده کمتر از آب و غیره می شود (Giani et al, 2015; Jahanbakhsh et al, 2020; Zaumanisa et al, 2014). با این حال، استفاده از درصد بالاتری از ماده RAP (معمولاً بیش از ۲۰٪) در روسازی آسفالتی به دلیل افزایش سختی آن چالش برانگیز می شود. سفتی RAP به دلیل پیری نتیجه تغییر اجزاء تشکیل دهنده، یعنی نسبت آسفالتین به مالتن در قیر است

استفاده شده. مخلوط‌ها توسط آزمایشات استحکام کششی غیرمستقیم، مدول ارتجاعی و حساسیت به رطوبت مخلوط تازه و مخلوط‌های جوان‌سازی شده توسط جوان‌کننده‌های مورد نظر ارزیابی می‌شوند. بر اساس مقایسه، برای درصد مشخصی از RAP، مقدار بهینه روغن پسماند توصیه می‌شود.

۲- روش تحقیق

مواد جمع‌آوری شده از منابع مختلف بر اساس آزمایش‌های استاندارد مربوطه ارزیابی می‌شوند. این شامل مشخصات قیر (قیر تازه و استخراج شده، CR، WCO و WEO) و سنگدانه (تازه و احیا شده) است. درصد قیر بهینه همه مخلوط‌ها با RAP جوان‌سازی شده توسط هر یک از جوان‌کننده‌ها (CR، WCO، WEO) یا بدون RAP (با علامت SM) با استفاده از روش طراحی مخلوط مارشال برآورد شد. مخلوط‌های RAP شامل سه سطح مجزا از RAP (30٪، ۴۰٪ و ۵۰٪) بود. در اینجا، ۵۰ درصد از RAP به عنوان حداکثر با در نظر گرفتن حد صنعتی انتخاب می‌شود. مخلوط با درصد معینی از RAP شامل سه سطح مختلف از هر روغن زباله (L1، L2، L3) است. در نهایت، مخلوط‌ها در آزمایشگاه برای سه آزمایش مختلف ارزیابی می‌شوند: استحکام کششی غیرمستقیم، مدول برجهنگی، و حساسیت رطوبت. بر اساس این ویژگی‌های ارزیابی شده، مخلوط‌های ترکیب شده RAP با مخلوط بدون RAP مقایسه شدند و برای یافتن مؤثرترین جوان‌کننده و درصد آن رتبه‌بندی شدند. جزئیات بیشتر در بخش‌های بعدی مورد بحث قرار می‌گیرد.

۲-۱- مواد و مصالح

تمام مواد مورد استفاده در این مطالعه از کارخانه آسفالت محلی در تهران تهیه شد. RAP با آزمایش احتراق (ASTM D6307) ارزیابی می‌شود و سطح قیر آن ۵٪ است. خواص مختلف قیرها در جدول ۱ ارائه شده است. نمودار اختلاط و ویسکوزیته قیر (قیر، WCO، WEO، CR) مقدار مورد نیاز قیر مربوطه را در مخلوط تعیین می‌کند. ویسکوزیته مورد نظر قیر نهایی، ویسکوزیته قیر تازه است که به ترتیب با افزودن ۷٪، ۱۳٪

بازیافت در مخلوط ترکیب شده با RAP، ترکیب شیمیایی آسفالت را بازیابی می‌کند و قوام را فراهم می‌کند. احیای خواص از دست رفته آسفالت با مقابله با اثر سخت شدن RAP ممکن است با استفاده از انواع مختلف جوان‌کننده‌های تجاری (CR^۲) حاصل شود (García et al, 2011). علاوه بر CRهای مختلف، استفاده از مواد زاید با ویژگی‌های مشابه نیز گزارش شده است (Antunes et al, 2019). عوامل بازیافت بالقوه زیادی وجود دارند که می‌توانند RAP را جوان کنند و یکی از عوامل بسیار توصیه شده روغن زباله است. روغن‌های باطله را می‌توان با توجه به ترکیبات و منبع آن‌ها دسته‌بندی کرد. در میان انواع مختلف روغن‌های زائد، پتانسیل روغن موتور پسماند (WEO^۳) و روغن آشپزی زباله (WCO^۴) توسط بسیاری از محققان مورد بررسی قرار گرفته است (Devulapalli et al, 2019; Hugener et al, 2019; Jia et al, 2015; Li et al, 2019). این مطالعات به این نتیجه رسیدند که WCO و WEO می‌توانند به طور قابل توجهی بر ویژگی‌های مختلف مخلوط آسفالت تأثیر بگذارند (Mamun et al, 2018; Taherkhani et al, 2019; Xingyu et al, 2018; Zhang et al, 2019). سایر مطالعات قبلی به این نتیجه رسیدند که با ارائه مقدار قابل توجهی فراکسیون‌های معطر یا رزین (Roberts et al, 1991) می‌توان به اثر جوان‌سازی بهتری دست یافت و بر اساس خواص مختلف، پایه WEO و WCO را توصیه کرد. با این حال، بیشتر این مطالعات قبلی در مورد WEO و WCO مستقل هستند و WEO و WCO را به طور مقایسه‌ای تجزیه و تحلیل نکرده‌اند. تنها مطالعاتی که اقدام به تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای کردند، یا تجزیه و تحلیل خود را بر اساس درصد جوان‌کننده از پیش تعیین شده به جای بهینه انجام دادند، یا تجزیه و تحلیل نتایج را به طور مستقل انجام دادند، بدون توجه به مقایسه نسبی. انتخاب روغن پسماند مؤثر به عنوان یک جوان‌کننده می‌تواند منجر به استفاده کارآمد از منابع و کمک به ساخت روسازی پایدارتر شود. با این حال، انتخاب یک روغن پسماند از بین این روغن‌ها مستلزم مطالعه مقایسه‌ای عملکرد آنها برای خواص مختلف است. بنابراین، هدف اصلی این مطالعه ارزیابی و مقایسه خواص مختلف مخلوط‌های بتن آسفالتی جوان‌سازی شده WCO و WEO برای درصد بالای RAP است. برای ارزیابی نسبی اثربخشی RAP

است. بنابراین، مطالعات قبلی استفاده از مقدار بیشتری از بخش درشت RAP را برای دانه بندی نهایی یک مخلوط پیشنهاد کردند. جدول ۳ دانه بندی نهایی را برای تمام مخلوطها نشان می‌دهد با افزودن دانه‌بندی ثابت RAP و درصدهای مختلف سنگدانه تازه به دست آمد. همان دانه‌بندی نیز برای مخلوط بدون RAP اتخاذ شد.

و ۲۰٪ CR، WEO و WCO به دست می‌آید. علاوه بر آن، دو درصد دیگر WCO (۱۳٪ و ۲۷٪) و WEO (۷٪ و ۲۰٪) نیز معرفی شده است. تمام درصدهای اعمال شده WEO و WCO بر اساس وزن کل قیر احیا شده است. در جدول ۲، خواص به دست آمده از سنگدانه از RAP متعاقب روش استخراج با حلال (ASTM D2172) است. RAP با دانه‌های ریزتر غنی شده

جدول ۱. مشخصات قیر خالص

ویسکوزیته در دمای ۶۰ (پواز)	وزن مخصوص	خصوصیات قیر
۳۹۷۷	۱,۰۱۷	قیر پایه
۴۲۹۰۰	-	قیر بازیافتی
۰,۱۲۷	۰,۹۱۶	WCO
۰,۴	۰,۸۷۳	WEO
۰,۳۷۱۹	۰,۸۵۹	CR

جدول ۲. مشخصات مصالح سنگی

مصالح سنگی RAP	مصالح سنگی تازه	نوع مصالح سنگی	نوع وزن مخصوص
۲.۴۲۵	۲.۵۰۴	درشت دانه	حقیقی
۲.۵۷۶	۲.۵۳	ریزدانه	
-	۲.۶۷۸	درشت دانه	ظاهری
-	۲.۵۷۶	ریزدانه	

جدول ۳. دانه بندی مصالح سنگی

اندازه الک	مصالح سنگی RAP	مصالح تازه	ترکیب مصالح
۳/۴	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۱/۲	۱۵	۷۳	۸۶
۳/۸	۰,۵	۴۱	۷۰
۴	۰	۱۳	۵۰
۱۰	۰	۷	۳۳
۴۰	۰	۵	۱۹
۸۰	۰	۳	۱۲
۲۰۰	۰	۰,۵	۶,۵

۲-۲-آماده سازی نمونه

RAP به مدت ۲ ساعت به صورت جداگانه در دمای ۱۴۶ درجه سانتیگراد حرارت داده شد. دوره گرمایش به عنوان روش استاندارد در نظر گرفته می‌شود. در پایان ۲ ساعت مواد تشکیل دهنده به خوبی توسط میکسر مخلوط شده و در نهایت با ۷۵ ضربه از هر طرف متراکم شد درصد CM، WEO و WCO استفاده شده در مخلوط‌ها به ترتیب ۷، ۱۳ و ۲۰ درصد بود. سطح قیر بهینه بسته به نوع جوان کننده قابل تغییر است. با این حال، برای درصد معینی از RAP در مخلوط، تفاوت‌های ناچیز مشاهده شده در سطوح بهینه قیر به دلیل جوان کننده‌های مختلف با حفظ سطح قیر مشابه تنظیم شد. سطح قیر بهینه برای مخلوط تازه ۶٫۱٪ است، در حالی که مقدار آن به ترتیب ۵٫۵٪، ۵٫۲٪ و ۵٫۰٪ برای ۳۰٪، ۴۰٪ و ۵۰٪ RAP است. تمام مخلوط‌ها از مشخصات ذکر شده در جدول ۴ پیروی کردند.

این مطالعه شامل چهار نوع مختلف مخلوط است. همه مخلوط‌های ترکیب شده با RAP شامل جوان کننده مربوطه و مقدار مورد نیاز قیر، دانه‌های تازه پس از درصد RAP در مخلوط بودند. این مطالعه از روش طراحی مخلوط مارشال (ASTM-D1559) در تهیه نمونه‌ها پیروی می‌کند و جزئیات در زیر خلاصه می‌شود.

۲-۲-۱-آماده سازی مخلوط

این مطالعه مخلوط را با پیروی از روش طراحی مخلوط مارشال (ASTMD1559) بهینه می‌کند که مخلوط را بر اساس معیارهای مارشال بهینه می‌کند. هر یک از مخلوط‌های RAP شامل درصد از پیش تعریف شده اصلاح کننده، RAP، قیر تازه و سنگدانه است. برای تهیه مخلوط، ابتدا سنگدانه و قیر تازه و

جدول ۴. الزامات آزمایش مارشال

مشخصات	وزن مخصوص
استقامت (کیلوگرم)	۸۰۰
درصد کاهش مقاومت	۲۰
درصد فضای خالی مصالح سنگی	۱۴
فضای خالی پر شده با قیر	۷۰-۸۰
درصد هوا (%)	۳-۵
روانی (میلیمتر)	۲-۴

کششی غیرمستقیم (ITS^۵) به عنوان یکی از آزمایش‌های اساسی در نظر گرفته می‌شود که نشان‌دهنده مقاومت در برابر انواع مختلف خرابی مانند ترک خوردگی خستگی در دمای متوسط و غیره است. بنابراین، شناسایی ITS پارامتر مهمی برای روغن‌های پسماند جوان‌سازی شده خواهد بود. مخلوط‌ها مقدار ITS در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد مطابق با ASTM D6931 اندازه‌گیری می‌شود. در راه اندازی آزمایشی، نمونه استوانه‌ای (قطر ۱۰۱ میلی‌متر) تنش کششی یکنواخت (۵۱ میلی‌متر در دقیقه) را در سراسر نیروی کششی محور قطری تا زمانی که از

۳- برنامه آزمایشگاهی

بر اساس سطح بهینه آسفالت به دست آمده از طرح مخلوط مارشال، نمونه‌ها برای آزمایش‌های مختلف با رعایت مشخصات و استاندارد آماده می‌شوند. تست‌های انجام شده در این مطالعه به شرح زیر است.

۳-۱-مقاومت کششی غیرمستقیم

خاصیت کششی پارامتر مهمی است که نقش مهمی در شناسایی رفتار ترک خوردگی روسازی آسفالت دارد. استحکام

کار بیفتند، تجربه می‌کند. استحکام کششی در نقطه شکست با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$ITS = P_{max} / 3.14 \times H \times D$$

در اینجا، P_{max} حداکثر بار قابل اعمال است و H و D هستند ارتفاع و قطر نمونه به ترتیب.

۳-۲- مدول برجهندگی

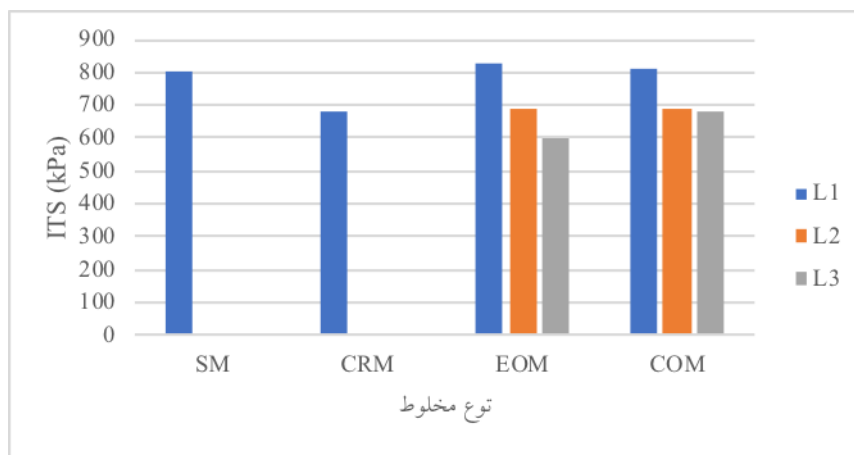
مدول ارتجاعی (MR) توانایی حمل بار و مقاومت در برابر شیار شدن روسازی آسفالت را تعیین می‌کند مطالعات قبلی به این نتیجه رسیدند که تغییر در درصد عامل بازیافت و RAP در مخلوط می‌تواند مقادیر MR^6 را تنظیم کند. بنابراین، انتظار می‌رود که آزمایش نشانه مهمی را برای مخلوط مورد نظر دیکته کند. در این مطالعه، آزمایش بر روی دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد با فرکانس بارگذاری ۰,۳۳ هرتز بر اساس ASTM D-4123 انجام شده است. MR مخلوط با شبیه سازی دینامیک ترافیک توسط یک شکل موج مبتنی بر کامپیوتر اندازه‌گیری می‌شود. شبیه سازی توسط "ماشین تست یونیورسال سروو پنوماتیک" انجام شده است.

۳-۳- حساسیت رطوبتی

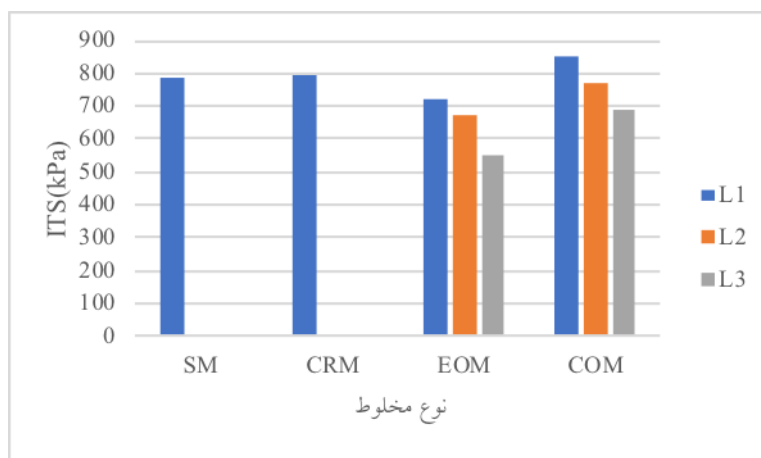
دوام روسازی آسفالتی با ارزیابی مقاومت در برابر اثرات نامطلوب محیطی اندازه‌گیری می‌شود. یکی از عوامل محیطی مهم که عملکرد روسازی انعطاف پذیر را به خطر می‌اندازد، رطوبت است. از بین تعداد زیادی از مشکلاتی که روسازی آسفالتی در طول عمر خود تجربه می‌کند، رطوبت به عنوان یکی از عوامل مهمی در نظر گرفته می‌شود که متعاقباً منجر به شکست روسازی آسفالت می‌شود. عملکرد ایمن یک سازه برای طول عمر مشخص به افزایش دوام در برابر آسیب‌های ناشی از آب بستگی دارد. استفاده از RAP در مخلوط‌ها آسیب رطوبت را کاهش می‌دهد، در حالی که عکس آن نیز توسط مطالعه دیگری به نتیجه رسید. در این مطالعه، حساسیت به رطوبت (دوام) با استفاده از روش AASHTO T245 ارزیابی شده است. برای تجزیه و تحلیل نتایج، میانگین استحکام کششی مرطوب و خشک نمونه‌ها به نام نسبت مقاومت کششی (TSR) در نظر گرفته می‌شود.

$$TSR = ITS_{wet} / ITS_{dry}$$

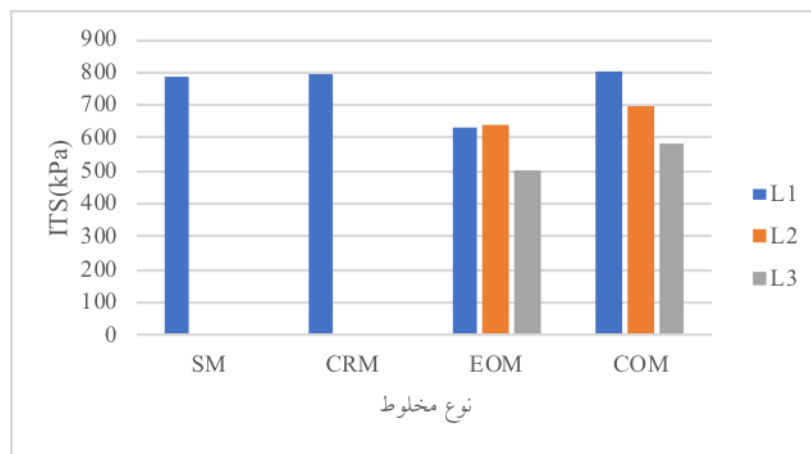
در اینجا، ITS_{wet} و ITS_{dry} به ترتیب مقادیر ITS نمونه‌های مرطوب و خشک هستند و حداقل مقدار توصیه شده ۸۰٪ است.



(الف)

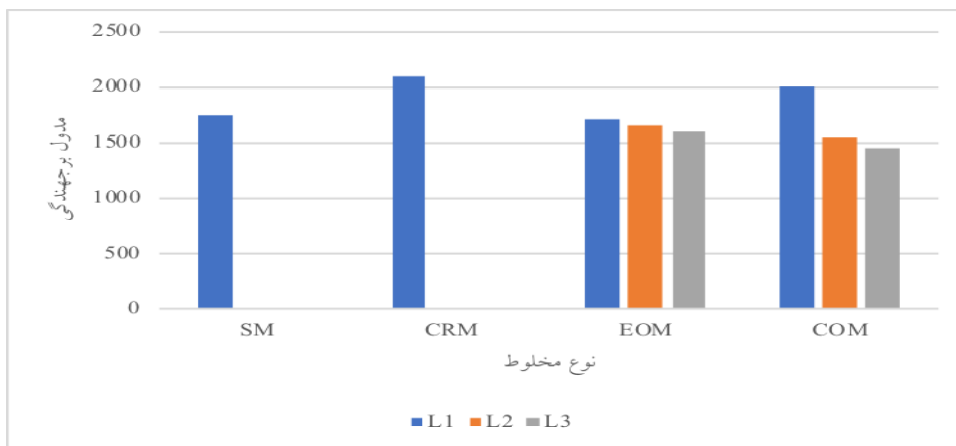


(ب)

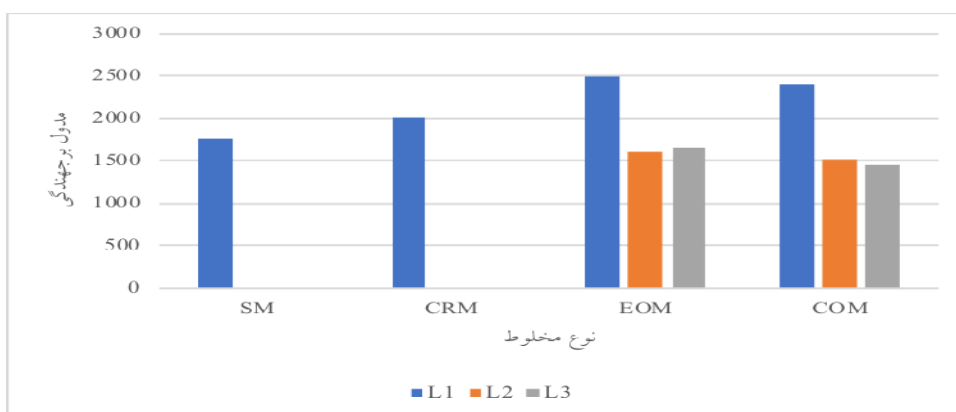


(ج)

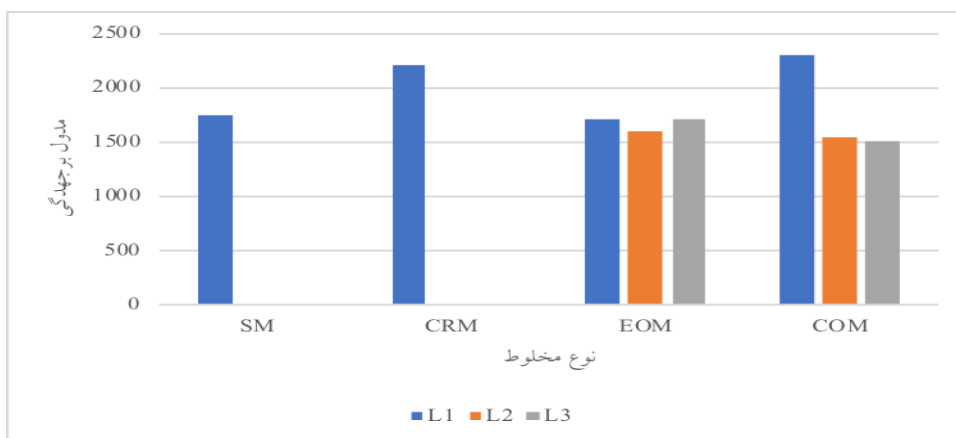
شکل ۱. مقادیر ITS برای ترکیبات مختلف RAP. الف) ۳۰٪، ب) ۴۰٪، ج) ۵۰٪



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲. مقادیر Mr برای ترکیبات مختلف RAP، الف) ۳۰٪، ب) ۴۰٪، ج) ۵۰٪

۴- بحث

۴-۱- نتایج آزمایشات فیزیکی قیر

آزمایش‌های ذکر شده در بالا برای ارزیابی اثربخشی خواص مختلف مخلوط‌های جوان‌سازی شده WCO، WEO، CR، انجام می‌شوند و با مخلوط‌های بدون RAP که با SM مشخص می‌شود مقایسه می‌شوند. مقایسه در دو بخش مختلف مورد بحث قرار گرفته است.

اثر جوان‌کننده‌های درصدی برای درصدهای مختلف RAP مشاهده می‌شود. در اینجا، مخلوط‌های جوان شده توسط CR، WEO و WCO به ترتیب به عنوان CRM، EOM و COM نشان داده می‌شوند.

سه سطح مختلف از جوان‌کننده‌ها به عنوان L1، L2، L3 نشان داده می‌شوند، که در آن L1 نشان دهنده کمترین درصد جوان‌کننده مربوطه و L3 نشان دهنده بالاترین درصد جوان‌کننده است.

۴-۲- تاثیر RAP و ماده جوان‌ساز بر مقاومت کششی

غیرمستقیم

شکل ۱ مقادیر ITS مخلوط‌های EOM و COM را در سطوح مختلف جوان‌کننده نشان می‌دهد و با SM و CRM مقایسه می‌شود. شکل ۱ نشان می‌دهد که درصد و نوع جوان‌کننده و درصد RAP به طور قابل توجهی بر مقادیر ITS مخلوط‌ها تأثیر می‌گذارد. افزایش درصد جوان‌کننده (L1-L3) برای WCO و WEO منجر به کاهش ارزش ITS می‌شود. این تمایل معمول برای کاهش مقادیر ITS برای EOM و COM بدون توجه به درصد RAP در مخلوط‌ها مشاهده می‌شود. افزایش درصد جوان‌کننده‌ها با کاهش ویسکوزیته باعث ایجاد قیر نرم‌تر می‌شود و منجر به ظرفیت چسبندگی کمتری می‌شود که می‌تواند مقادیر ITS را کاهش دهد. علاوه بر آن، افزایش درصد RAP نیز مقادیر ITS را کاهش می‌دهد. با این حال، نرخ کاهش برای EOM و COM متفاوت است. برای هر درصد RAP و جوان‌کننده، COM مقادیر ITS بالاتری نسبت به EOM مربوطه نشان می‌دهد. پیوند نامنسجم با مواد تازه به دلیل افزایش RAP

می‌تواند منجر به یک مخلوط همگن کمتر شود و متعاقباً منجر به کاهش ITS شود.

۴-۳- تاثیر RAP و ماده جوان ساز بر مدول برجهندگی

در شکل ۲، تأثیر درصد RAP و جوان‌کننده بر MR برای مخلوط‌های CRM، EOM و COM نشان داده شده و با SM مقایسه شده است. مخلوط با ۴۰ درصد RAP و جوان‌سازی شده توسط درصد WEO L1 با SM و CRM قابل مقایسه است. برعکس، تمام مخلوط‌هایی که با درصد L1 و WCO L2 جوان شده‌اند، با SM و CRM قابل مقایسه هستند. برای هر درصد RAP و جوان‌کننده، COM مقادیر MR نسبتاً بالاتری نسبت به EOM مربوطه نشان می‌دهد. تغییر درصد جوان‌کننده از L1 به L3 باعث کاهش مقادیر MR می‌شود. با این حال، نرخ کاهش برای EOM و COM متفاوت است.

افزایش جوان‌کننده‌ها منجر به یک مخلوط نرم می‌شود و در نتیجه، اثر نرم‌کنندگی جوان‌کننده‌ها انتظار می‌رود مقادیر MR را کاهش دهد. درصدهای بالاتر RAP به دلیل ماهیت سفت RAP قدیمی، MR مخلوط را افزایش داد. افزایش درصد RAP می‌تواند منجر به یک مخلوط همگن کمتر شود و متعاقباً منجر به مقادیر کمتر MR شود. به طور کلی، افزایش ترکیبی در جوان‌کننده و RAP اثرات دوگانه را نشان می‌دهد: اثر سخت شدن RAP و اثر نرم‌کنندگی جوان‌کننده‌ها.

۴-۴- تاثیر RAP و ماده جوان ساز بر پارامتر TSR

برای درصد معینی از RAP، EOM و COM با CRM و SM مقایسه شده و بر اساس ویژگی‌های به دست آمده رتبه بندی می شوند. موثرترین مخلوط به عنوان ۱ رتبه بندی می شود، در حالی که کم اثرترین مخلوط رتبه ۸ است. به عنوان مثال، برای مخلوط ۳۰٪ RAP، EOM-7 میانگین مقدار ITS 822 کیلو پاسکال را نشان می دهد و از سایر مخلوطها بهتر عمل می کند، و بنابراین رتبه بندی شد. ۱. با این حال، برای مخلوط ۳۰٪ RAP، EOM-7 یک مقدار MR متوسط ۱۷۲۶ مگاپاسکال را نشان می دهد که کمتر از مقادیر MR مشاهده شده CRM، COM-13، و SM است و بنابراین در رتبه ۴ قرار گرفت. به طور مشابه، رتبه بندی مخلوطها برای ۴۰٪ و ۵۰٪ مخلوطهای RAP انجام شد. لازم به ذکر است که جدول ۶ مقادیر گرد شده برای ITS و MR و حداکثر دو رقم برای TSR را نشان می دهد، اما رتبه بندی بر اساس مقادیر واقعی انجام شده است. مشاهده می شود که خواص هر یک از مخلوطها پس از آزمایش در معرض تغییر است. بنابراین، برای ارزیابی اثربخشی کلی هر یک از مخلوطها، باید آن را برای خواص مشاهده شده که در جدول ۷ مشاهده می شود، رتبه بندی کرد.

۴-۵- آنالیز عددی

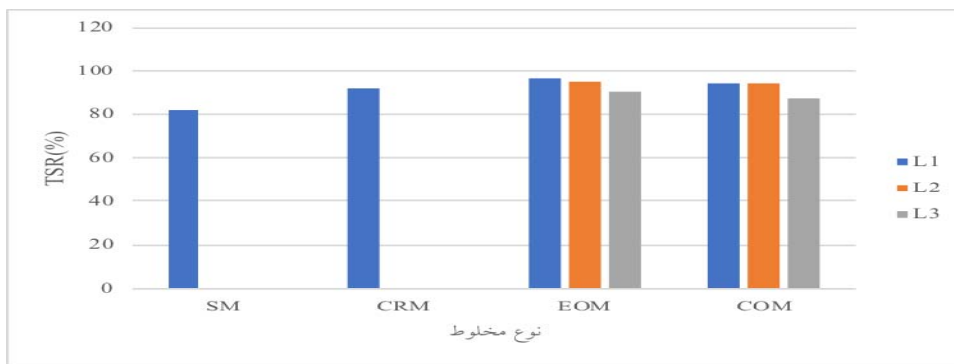
تاثیر درصد RAP و جوان کننده و نوع جوان کننده به صورت آماری مورد ارزیابی قرار گرفت و رتبه بندی آنها در بخش بعدی آورده شده است.

مقادیر TSR مخلوطهای مختلف را می توان در شکل ۳ مشاهده کرد. مشاهده می شود که حساسیت به آسیب رطوبت به دلیل افزایش درصد RAP و جوان کننده‌ها در مخلوطها افزایش می یابد. برای هر دو جوان کننده، مخلوطهای جوان سازی شده توسط L1 و L2 با مخلوطهای SM و CRM قابل مقایسه هستند. با این حال، پس از ۴۰٪ RAP در مخلوطها، سطح L3 یک مقدار TSR بسیار نزدیک به حد مجاز را ارائه می دهد که نشان دهنده دوام کمتر به دلیل افزایش درصد جوان کننده‌ها در مخلوطها است. انتظار می رود که چسبندگی و چسبندگی کمتر به دلیل درصد بیشتر جوان کننده‌ها باعث افزایش آسیب رطوبت شود. به طور مشابه، افزایش درصد RAP نیز مقادیر TSR را کاهش می دهد، با این حال مخلوطها در اکثر موارد معیار حداقل TSR را پاس کردند. اگرچه وجود RAP دوام را به طور نسبی افزایش داده است، افزایش تدریجی آن به دلیل انسجام کمتر با مواد تازه، بر مخلوطها تأثیر منفی می گذارد و متعاقباً منجر به مقادیر TSR پایین تر می شود.

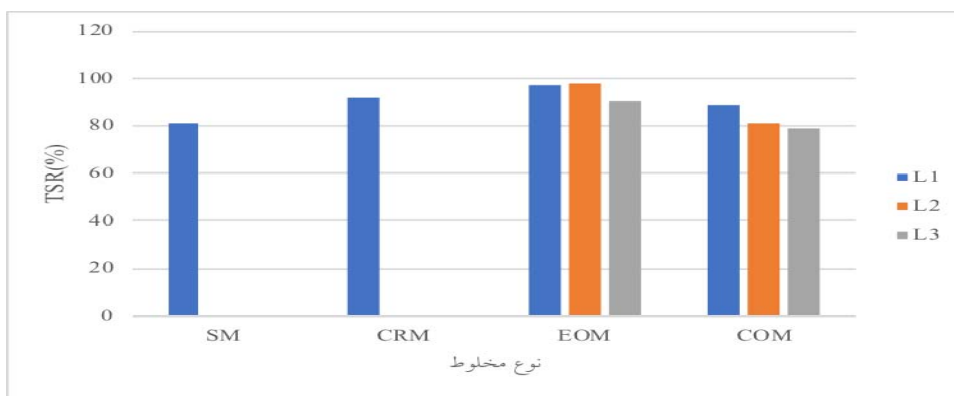
بحث بالا نشان دهنده اثربخشی WCO و WEO برای درصدهای مختلف RAP است. با این حال، ظرفیت جوانسازی این روغنهای ضایعاتی به دنبال درصدهای RAP، درصد جوان کننده و نوع آزمایش قابل تغییر است. بنابراین، برای درصد معینی از RAP، موثرترین جوان کننده و درصد مربوطه باید مورد توجه قرار گیرد. در اینجا، مخلوطها بر اساس درصد RAP گروه بندی می شوند (جدول ۶).

جدول ۵. نتایج آنالیز واریانس پارامتر p

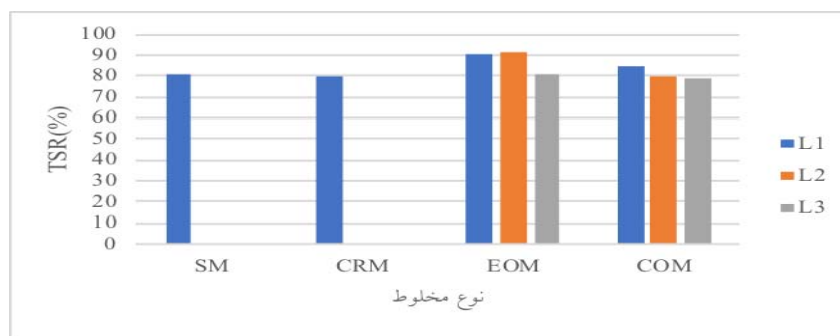
درصد RAP	ITS	Mr	TSR
نوع مخلوط	۰	۰.۰۸۱	۰
درصد RAP	۰	۰.۰۰۵	۰
درصد جوانساز	۰	۰	۰



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳. مقادیر TSR برای ترکیبات مختلف RAP، الف) ۳۰٪، ب) ۴۰٪، ج) ۵۰٪

۴-۵-۱-آنالیز آماری

نوع جوان کننده (WCO/WEO) بر تمام ویژگی‌ها به جز MR تأثیر می‌گذارد. نتایج ANOVA همچنین نشان می‌دهد که WCO و WEO تأثیر متفاوتی بر مخلوط دارند. با این حال، نمی‌توان استنباط کرد که کدام یک از آنها باید با توجه به ویژگی‌هایشان در اولویت قرار گیرند.

تأثیر درصد RAP و جوان کننده و نوع جوان کننده در انواع مختلف تست‌ها با استفاده از آنالیز واریانس (ANOVA) ارزیابی می‌شود. ارزیابی بر اساس مقدار P حاشیه‌ای ۰,۰۵ است، که نشان می‌دهد عوامل با مقدار P کمتر از ۰,۰۵ قابل توجه هستند. جدول ۵ نشان می‌دهد که درصد RAP و جوانسازی به طور قابل توجهی بر تمام خواص مورد نظر تأثیر گذاشته است.

COM و EOM رتبه بندی ۲-۵-۴

جدول ۶. رتبه بندی نمونه‌های مختلف

رتبه	TSR	رتبه	Mr	رتبه	ITS (kPa)	نوع مخلوط	RAP درصد
۸	۸۲.۶۵	۳	۱۷۶۴	۳	۷۷۹	SM	
۴	۹۲.۵۷	۱	۲۰۵۳	۷	۶۵۷	CRM	
۱	۹۶.۲۳	۴	۱۷۲۵	۱	۸۲۱	EOM-7	
۲	۹۵.۹۸	۵	۱۶۲۸	۴	۶۸۲	EOM-13	۳۰
۶	۸۹.۷۶	۷	۱۳۹۷	۸	۵۹۵	EOM-20	
۳	۹۳.۶۷	۲	۲۰۱۶	۲	۸۰۴	COM-13	
۵	۹۲.۶۵	۶	۱۵۶۵	۵	۶۸۲	COM-20	
۷	۸۶.۴۳	۸	۱۳۶۵	۶	۶۵۷	COM-27	
۶	۸۲.۶۵	۴	۱۷۶۴	۳	۷۷۹	SM	
۳	۹۱.۵۲	۳	۱۹۹۵	۲	۷۸۵	CRM	
۱	۹۶.۷۹	۱	۲۲۳۴	۵	۷۲۰	EOM-7	
۲	۹۶.۲۱	۶	۱۵۸۹	۷	۶۶۷	EOM-13	۴۰
۴	۹۰.۲۸	۷	۱۴۷۵	۸	۵۴۹	EOM-20	
۵	۸۸.۱۵	۲	۲۱۶۹	۱	۸۴۷	COM-13	
۷	۸۲.۲	۵	۱۶۲۴	۴	۷۷۲	COM-20	
۸	۸۲.۱۴	۸	۱۴۱۲	۶	۷۰۹	COM-27	
۴	۸۲.۶۵	۴	۱۷۶۴	۳	۷۷۹	SM	
۶	۸۱.۳۵	۲	۲۱۹۷	۲	۷۸۰	CRM	
۲	۹۰.۹۸	۵	۱۷۶۱	۵	۶۴۵	EOM-7	
۱	۹۰.۹۸	۶	۱۷۳۰	۶	۶۳۷	EOM-13	۵۰
۵	۸۲.۵۷	۷	۱۵۵۲	۸	۵۱۹	EOM-20	
۳	۸۴.۴۵	۱	۲۲۲۶	۱	۷۹۱	COM-13	
۷	۷۸.۸۴	۳	۱۸۳۱	۴	۷۰۳	COM-20	
۸	۷۵.۸۷	۸	۱۴۸۱	۷	۵۷۱	COM-27	

مخلوط روغن پسماند جوان شده با رتبه کمتر از SM به عنوان یک مخلوط موثر در نظر گرفته می‌شود. جدول نشان می‌دهد که برای ۳۰ درصد RAP، EOM-7 از همه مخلوط‌ها برتری دارد و مخلوط‌هایی با ۱۳ درصد WCO و ۱۳ تا ۲۰ درصد WEO ویژگی‌های بهتری نسبت به SM ارائه می‌دهند. به طور مشابه،

از این رو، رتبه‌بندی کلی مخلوط‌ها با جمع‌بندی رتبه‌بندی مشاهده شده برای هر آزمون انجام شد. در نهایت، مخلوط با کمترین مقدار جمع به عنوان ۱ رتبه بندی شد. به عنوان مثال، برای مخلوط ۳۰٪ RAP، جمع رتبه بندی برای EOM-7 و EOM-13 رتبه بندی کلی ۱ است. برای درصد معینی از RAP، هر یک از

COM-13 از همه مخلوطها برای ۵۰ درصد RAP بهتر عمل می‌کند و برای ۵۰ درصد RAP، ویژگی‌های کلی EOM کمتر از SM و CRM رضایت‌بخش است.

برای ۴۰٪ از RAP، از همه مخلوطها بهتر عمل می‌کند، در حالی که COM-13 ویژگی‌های بهتری نسبت به SM ارائه می‌دهد و با CRM قابل مقایسه است. با این حال،

جدول ۷. رتبه بندی نهایی مخلوطها

رتبه بندی کلی	مجموع رتبه ها	نوع مخلوط	درصد RAP
۵	۱۴	SM	
۴	۱۲	CRM	
۱	۶	EOM-7	
۳	۱۱	EOM-13	۳۰
۷	۲۱	EOM-20	
۲	۷	COM-13	
۶	۱۶	COM-20	
۸	۲۱	COM-27	
۴	۱۳	SM	
۲	۸	CRM	
۱	۷	EOM-7	
۵	۱۵	EOM-13	۴۰
۷	۱۹	EOM-20	
۲	۸	COM-13	
۶	۱۶	COM-20	
۸	۲۲	COM-27	
۳	۱۱	SM	
۲	۱۰	CRM	
۴	۱۲	EOM-7	
۵	۱۳	EOM-13	۵۰
۷	۲۰	EOM-20	
۱	۵	COM-13	
۶	۱۴	COM-20	
۸	۲۳	COM-27	

۵- نتیجه گیری

CRM مقایسه شد. بر اساس تجزیه و تحلیل نتایج مشاهده شده، نتایج به دست آمده، حاصل می‌شود.

اثر بخشی درصدهای مختلف RAP و روغن پسماند WCO و WEO برای انواع مختلف آزمایشها ارزیابی شد و با SM و

به طور کلی، ۷٪ از WEO را می‌توان تا ۴۰٪ RAP استفاده کرد، در حالی که ۱۳٪ از WCO را می‌توان تا ۵۰٪ RAP استفاده کرد. با این حال، یک مقایسه گسترده بر اساس تست‌های عملکرد پیشرفته مانند خستگی و شیار نیز توصیه می‌شود. مواد تشکیل دهنده روغن زباله ممکن است بر یکپارچگی فاز، ظرفیت پیوند جدید و ساختار کریستالی آسفالت تازه و کهنه تأثیر بگذارد. یک ارزیابی در مقیاس نانو از این عوامل می‌تواند بیش از پیش را در مورد چسب آسفالت جوان‌سازی شده با روغن‌های زاید ارائه کند. علاوه بر آن، قبل از استفاده از آسفالت احیا شده با روغن زباله در صنعت، یک تحلیل اقتصادی کامل مورد نیاز است. بنابراین، تجزیه و تحلیل هزینه چرخه زندگی (LCCA) آسفالت کهنه شده توسط WCO و WEO توصیه می‌شود.

مخلوط‌هایی با ۷ درصد WEO برای ۳۰ درصد مخلوط‌های RAP از همه مخلوط‌های دیگر بهتر عمل کردند. مخلوط‌های جوان شده توسط ۱۳ WEO % و WCO عملکرد بهتری نسبت به SM و CRM ارائه می‌دهند. مخلوط‌هایی با ۷ WEO % عملکرد بهتری نسبت به سایر مخلوط‌ها برای ۴۰ RAP % ارائه می‌دهند. مخلوط‌های جوان شده توسط ۱۳ WCO % عملکرد بهتری نسبت به SM ارائه می‌دهند و با مخلوط‌های جوان شده CR قابل مقایسه هستند. مخلوط‌هایی که با ۱۳ درصد WCO جوان‌سازی شده‌اند، برای ۵۰ درصد مخلوط‌های RAP از همه مخلوط‌های دیگر بهتر عمل کردند.

۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Reclaimed Asphalt Pavement
- 2- Crumb Rubber
- 3- Waste Engine Oil
- 4- Waste Cooking Oil
- 5- Indirect Tensile Strength
- 6- Resilient Modulus
- 7- Tensile Strength Ratio

۷- مراجع

pavements using reclaimed asphalt, warm mix technology and cold in-place recycling. *Resour. Conserv. Recycl.* 104, 224–238.

doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.08.006

-Hugener, M. Partl, M.N. Morant, M. (2014). Cold asphalt recycling with 100% reclaimed asphalt pavement and vegetable oil-based rejuvenators. *Road Mater. Pavement Des.* 15(2), 239–258. doi.org/10.1080/14680629.2013.860910

-Jia, X. Huang, B. Moore, J.A. Zhao, S. (2015). Influence of waste engine oil on asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement. *J. Mater. Civ. Eng.* 27(12), 04015042 (2015).

[doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001292](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001292)

-Antunes, V. Freire, A.C. Neves, J. (2019). A review on the effect of RAP recycling on bituminous mixtures properties and the viability of multi-recycling. *Constr. Build. Mater.* 211, 453–469. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.258

-Devulapalli, L. Kothandaraman, S. Sarang, G. (2019). Evaluation of rejuvenator's effectiveness on the reclaimed asphalt pavement incorporated stone matrix asphalt mixtures. *Constr. Build. Mater.* 224, 909–919.

doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.126

-García, A. Schlangen, E. Van de Ven, M. (2011). Properties of capsules containing rejuvenators for their use in asphalt concrete. *Fuel* 90, (2), 583–591.

-Giani, M.I. Dotelli, G. Brandini, N. Zampori, L. (2015). Comparative life cycle assessment of asphalt

-Mogawer, W. Bennert, T. Daniel, J.S. Bonaquist, R. Austerman, A. Booshehrian, A. (2012). Performance characteristics of plant produced high rap mixtures. *Road Mater. Pavement Des.* 13(sup1), 183–208.

-Roberts, F.L. Kandhal, P.S. Brown, E.R. Lee, D. Y. Kennedy, T.W. (1991). Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction.

-Taherkhani, H. Noorian, F. (2019). Laboratory investigation on the properties of asphalt concrete containing reclaimed asphalt pavement and waste cooking oil as recycling agent. *Int. J. Pavement Eng.* **doi.org/10.1080/10298436.2019.1626387**

-Xingyu, Y. Ruikun, D. Naipeng, T. (2020). Development of a novel binder rejuvenator composed by waste cooking oil and crumb tire rubber. *Constr. Build. Mater.* 236, 117621.

doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117621

-Zaumanisa, M. Mallicka, R.B. Frankb, R. (2014). 100% recycled hot mix asphalt: a review and analysis. *Resour. Conserv. Recycl.* 92, 230–245. **doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.07.007**

-Zhang, J. Sun, H. Jiang, H. Xu, X. Liang, M. Hou, Y. et al. (2019). Experimental assessment of reclaimed bitumen and RAP asphalt mixtures incorporating a developed rejuvenator. *Constr. Build. Mater.* 215, 660–669.

doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.202

-Jahanbakhsh, H. Karimi, M.M. Naseri, H. Nejad, F.M. (2020). Sustainable asphalt concrete containing high reclaimed asphalt pavements and recycling agents: performance assessment, cost analysis, and environmental impact. *J. Clean. Prod.* 244, 118837.

doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118837

-Lins, V. Araújo, M. Yoshida, M. Ferraz, V. Andrada, D. Lameiras, F. (2008). Photodegradation of hot-mix asphalt. *Fuel* 87, (15–16), 3254–3261.

-Li, Y. Shen, A. Lyu, Z. Wang, S. Formela, K. Zhang, G. (2019). Ground tire rubber thermomechanically devulcanized in the presence of waste engine oil as asphalt modifier. *Constr. Build. Mater.* 222, 588–600.

doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.162

-Mamun, A.A. Wahhab, H.I.A. A. (2018). Comparative laboratory evaluation of waste cooking oil rejuvenated asphalt concrete mixtures for high contents of reclaimed asphalt pavement. *Int. J. Pavement Eng.*

doi.org/10.1080/10298436.2018.1539486

-Mamun, A. Arifuzzaman, M. Taha, R. (2018). Nano scale aging characterization of carbon nanotube modified asphalt binders. In: *Advances in Materials and Pavement Prediction, Papers from the International Conference on Advances in Materials and Pavement Performance Prediction (am3p 2018)*, 16–18 Apr, Doha, Qatar, 403–404.

Evaluation of Performance Characteristics of Asphalt Mixture Containing Recycled Cooking Oil and Waste Engine Oil

*Amin Farajollahi, Department of Civil Engineering, Malard Branch,
Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.*

*Sara Choubdar, Department of Civil Engineering, Iran University of Science
and Technology, Tehran, Iran.*

E-mail: AminFarajollahi@gmail.com

Received: June 2024- Accepted: September 2024

ABSTRACT

In road construction, different types of waste oils have been recommended to overcome the hardening effect of the percentage of asphalt mixture. However, choosing an effective rejuvenator based on a comparative study can lead to a more efficient use of resources. In this research, cooking oils and waste motor oil are used to rejuvenate three different percentages (30, 40 and 50%) of recycled asphalt pavement following the maximum current industrial compatibility. Blends rejuvenated with waste oils are compared with fresh blends and blends rejuvenated with commercial rejuvenators. Moisture sensitivity, indirect tensile strength and modulus of elasticity of different asphalt mixtures are analyzed. Based on statistical analysis and overall ranking, it is concluded that 7% of waste motor oils perform better than 40% recycled asphalt pavement, while 13% of waste oils can be used for up to 50% recycled asphalt pavement.

Keywords: Bitumen, Reclaimed Asphalt Pavement, Rejuvenator, Waste Cooking Oil, Waste Engine Oil