امکان‌سنجی استفاده از روغن سبوس برنج به‌عنوان جوانساز در مخلوط‌های آسفالتی حاوی تراشه آسفالت بازیافتی

مقاله علمی – پژوهشی

محمود عامری، استاد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
محمد امین حسین زاد درخشان*، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول:amin.derakhshan96@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۱۵- پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۸
صفحه ۲۵۰-۲۳۷

چکیده

استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی در روسازی به علت کاهش هزینه و حفظ منابع طبیعی به‌عنوان یکی از راهکارهای موجود در زمینه نگهداری و بهسازی راه‌ها بوده است. درعین‌حال استفاده از این مصالح به علت قیر پیر شده موجود در تراشه آسفالت، باعث عملکرد نامناسب مخلوط آسفالتی ازجمله کاهش مقاومت در برابر ترک‌خوردگی می‌شود. امروزه برای ارتقای عملکرد مخلوط آسفالتی حاوی تراشه آسفالت از مواد جوانساز استفاده می‌شود. ایران ازجمله کشورهای فعال در حوزه کاشت برنج بوده درحالی‌که ۷۰ درصد سبوس برنج در کشور بی‌استفاده است. این پژوهش به بررسی امکان استفاده از روغن سبوس برنج به‌عنوان جوانساز در مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد تراشه آسفالت به‌وسیله آزمایش‌های خرش دینامیکی، مدول برجهندگی و خمش نیم‌دایره پرداخته است. نتایج نشان دادند که اضافه کردن روغن سبوس برنج در مخلوط‌های آسفالتی حاوی تراشه آسفالت به طور متوسط باعث کاهش ۳۱ درصدی عدد روانی، کاهش ۲۷ درصدی مدول برجهندگی و همچنین افزایش ۲۴ درصدی انرژی شکست و کاهش ۱۳ درصدی چقرمگی شکست شده است. همچنین نمونه‌های آسفالتی حاوی روغن سبوس برنج عملکرد به‌مراتب بهتری نسبت به نمونه‌های بدون روغن سبوس برنج و کنترل داشته‌اند. در نتیجه استفاده از روغن سبوس برنج به‌عنوان جوانساز در مخلوط آسفالتی به علت استفاده از ضایعات برنج و هزینه و آلودگی کمتر می‌تواند راه‌حل مناسبی برای ارتقای عملکرد روسازی آسفالتی به نظر می‌رسد.

واژه‌های کلیدی: جوانساز، روسازی آسفالتی بازیافتی، روغن سبوس برنج

۱- مقدمه

امروزه بیش از ۹۰ درصد از کل راه‌های موجود در دنیا از روسازی آسفالتی تشکیل‌شده است، مخلوط آسفالتی از سنگدانه‌ها، چسباننده قیری تشکیل یافته است. به‌طوری که بخش عمده‌ای از وزن مخلوط آسفالتی را مصالح سنگی تشکیل می‌دهند. درعین‌حال مصالح سنگی و قیر از منابع تجدید ناپذیر محسوب می‌شوند. مخلوط آسفالتی باگذشت زمان تحت عوامل مختلفی همچون رطوبت، تغییرات دما و بارگذاری ناشی از ترافیک مشخصات اولیه خود را ازدست‌داده و رو به اضمحلال پیش می‌رود؛ درنتیجه برای تعمیر و بازسازی رویه پیر شده موجود، تراشه آسفالت به‌دست‌آمده از روسازی قدیمی به همراه مصالح جدید به مقدار موردنیاز جهت قرار گرفتن در دانه‌بندی مطلوبی که در آیین‌نامه ذکرشده، مخلوط می‌شوند که به این فرایند اصطلاحاً بازیافت گفته می‌شود (Huang, Bird, & Heidrich, 2007). استفاده از تراشه آسفالت در احداث

روسازی آسفالتی جدید علاوه بر مقرون به صرفه بودن از نظر اقتصادی (Kandhal & Mallick, 1998) و حفظ منابع طبیعی و محیط‌زیست(Lee, Chou, & Chen, 2012)، می‌تواند رفتار عملکردی یکسانی با مخلوط آسفالتی جدید داشته باشد؛ در نتیجه بررسی عملکرد مکانیکی روسازی‌های آسفالتی حاوی تراشه آسفالت همواره موردتوجه پژوهشگران روسازی بوده است(Sargious & Mushule, 1991). مواد جوانساز با هدف ارتقاء خواص مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی حاوی تراشه آسفالت بازیافتی استفاده می‌شوند. استفاده از جوانسازها باعث کاهش سختی و ویسکوزیته قیر پیر شده موجود در تراشه آسفالت بازیافتی می‌شود (Veeraragavan et al., 2017). معمولاً از روغن‌های نفتنی، عصاره‌های آروماتیک، روغن‌های پارافینی و یا اسیدهای چرب با درصد مالتن بالا، به‌عنوان جوانساز استفاده می‌شود(Im, Zhou, Lee, & Scullion, 2014; Zaumanis, Mallick, & Frank, 2013). امروزه در بسیاری از مطالعات اخیر استفاده از جوانسازهایی همچون روغن سیلندر(Borhan, Suja, Ismail, & Rahmat, 2007)، روغن‌موتور ضایعاتی (Dokandari, Kaya, Sengoz, & Topal, 2017) ، روغن گیاهی ضایعاتی(Zaumanis, Mallick, Poulikakos, & Frank, 2014)، روغن آلی(Zaumanis et al., 2014)، عصاره آروماتیک(Zamhari, Hermadi, & Fun, 2009)، همچنین روغن‌های گیاهی مانند روغن آفتابگردان(Garcia, Austin, & Jelfs, 2016)، روغن پالم(Rafiq et al., 2021)، روغن پونگامیا(Nayak & Sahoo, 2017) جهت ارتقای عملکرد مخلوط آسفالتی حاوی تراشه آسفالت مورد بررسی قرارگرفته است. در این میان استفاده از روغن‌های گیاهی به علت هزینه و آلودگی زیست‌محیطی اندک می‌تواند گزینه‌ی مناسبی جهت استفاده به‌عنوان جوانساز در مخلوط آسفالتی باشد(Wen, Bhusal, & Wen, 2013). مطالعات گسترده‌ای در مورد تأثیر جوانسازهای مختلف بر مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی تراشه آسفالت انجام‌شده است(Moniri, Ziari, Aliha, & Saghafi, 2021; Nabizadeh, Haghshenas, Kim, & Aragão, 2017; Nsengiyumva, Haghshenas, Kim, & Kommidi, 2020). طاهرخانی و همکاران از روغن‌موتور و روغن خوراکی ضایعاتی به‌عنوان جوانساز در مخلوط آسفالتی استفاده کرده و کاهش عدد روانی را گزارش کردند(Taherkhani & Noorian, 2020). همچنین باجاج و همکاران با بررسی تأثیر جوانسازهای گیاهی در عملکرد شیارشدگی مخلوط حاوی آسفالت بازیافتی، افزایش عمق شیار را گزارش کردند(Bajaj et al., 2020). عموماً سختی مخلوط آسفالتی حاوی تراشه آسفالت در مقایسه با مخلوط عادی بیشتر است که باعث کاهش مقاومت در برابر ترک‌خوردگی و آسیب‌پذیری بیشتر در برابر خرابی‌های نهایی می‌شود (Al-Qadi, Aurangzeb, Carpenter, Pine, & Trepanier, 2012). زیاری و همکاران با بررسی عملکرد ترک‌خوردگی در دمای پایین مخلوط آسفالتی حاوی جوانساز روغن پخت‌وپز بازیافتی، افزایش چقرمگی شکست را گزارش کردند (Ziari, Moniri, Bahri, & Saghafi, 2019). جهانبخش و همکاران با استفاده از روغن‌موتور ضایعاتی به‌عنوان جوانساز در مخلوط آسفالتی حاوی تراشه آسفالت بازیافتی عملکرد مخلوط آسفالتی را بررسی کرده و افزایش انرژی شکست را گزارش کردند(Jahanbakhsh, Karimi, Naseri, & Nejad, 2020). Xie و همکاران با بررسی تأثیر جوانسازهای پایه زیستی ساخته‌شده روغن خام و درخت کاج، روغن تولیدشده از صنعت کاغذسازی و روغن‌موتور تصفیه‌شده به میزان ۱۰ درصد قیر پیرشده در مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۳۰ و ۴۰ درصد، افزایش انرژی شکست را گزارش کردند (Xie, Tran, Taylor, & Turnera, 2020). کشور ما از معدود کشورهایی است که در آن از محصولات فرعی کشت برنج ازجمله سبوس برنج استفاده مطلوب و اقتصادی به عمل نمی‌آید، استفاده از روغن سبوس برنج در مخلوط آسفالتی باعث جلوگیری از هدر رفتن منابع طبیعی کشور، هزینه تولید کمتر و به‌این‌علت که این روغن پایه گیاهی دارد، درنتیجه کاملاً دوستدار محیط‌زیست است. این تحقیق به امکان‌سنجی استفاده از روغن سبوس برنج به‌عنوان جوانساز در مخلوط آسفالتی حاوی تراشه آسفالت بازیافتی پرداخته است.

۲- روش تحقیق

در این مطالعه برای انجام تحقیق از روش آزمایشگاهی استفاده‌شده است. در ابتدا به معرفی مصالح مصرفی و آزمایش‌های انجام‌شده بر روی آن‌ها پرداخته می‌شود سپس نحوه‌ی ساخت نمونه‌های آسفالتی توضیح داده می‌شود. درنهایت تجزیه‌وتحلیل داده‌های حاصل از آزمایش‌ها انجام‌شده و نتایج ارایه می‌شود.

۲-۱- مواد و مصالح

۲-۱-۱- قیر

قیر مصرفی مورداستفاده در این مطالعه، قیر خالص با درجه عملکرد PG 58-22 بوده که از شرکت نفت پاسارگاد تهران تهیه‌شده است. مشخصات فیزیکی و رئولوژیکی قیر و استاندارد آن در جدول ۱ بیان‌شده است.

۲-۱-۲- سنگدانه

مصالح سنگی مورداستفاده در این تحقیق از معدن اسبچران واقع در شمال شرق تهران تهیه‌شده است. دانه‌بندی مصالح سنگی در این تحقیق دانه‌بندی شماره ٤ آیین‌نامه در نظرگرفته شده است. نتایج آزمایش‌های مصالح سنگی و مقادیر مجاز نیز در جدول ۲ ارایه‌شده است.

جدول ۱. خواص قیر مورداستفاده در این مطالعه

خصوصیات	قیر	روش آزمایش
درجه عملکردی	PG 58-22	ASTM D-6373
وزن مخصوص در ۲۵ درجه سانتی‌گراد	۱/۰۲	ASTM D-70
درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی‌گراد	۱۲٤/۸	ASTM D-5
نقطه نرمی (درجه سانتی‌گراد)	٤۳	ASTM D-36
انگمی در ۲۵ درجه سانتی‌گراد (سانتی متر)	۱۰۲	ASTM D-113
نقطه اشتعال (درجه سانتی‌گراد)	۳۰۲	ASTM D-92
نقطه احتراق (درجه سانتی‌گراد)	۳۱۷	ASTM D-70
ویسکوزیته در ۱۳۵ درجه (مگا پاسکال بر ثانیه)	۲٦۲/۵	ASTM D-4402

جدول ۲. مشخصات فیزیکی مصالح سنگی مورداستفاده در این مطالعه

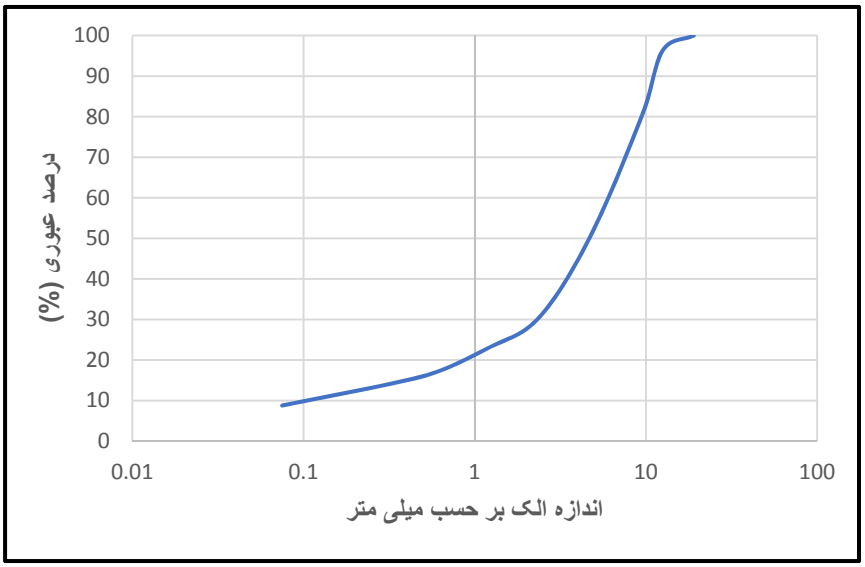
عنوان آزمایش	نتایج آزمایش	حدود مجاز طبق نشریه ۲۳٤		استاندارد آزمایش	
		آستر	رویه	AASHTO	ASTM
حداکثر سایش به روش لوس‌آنجلس (درصد)	۸/۵	٤۰	۳۰	T96	-
حداکثر ضریب تورق	۱۲	۳۰	۲۵	-	-
حداکثر درصد شکستگی در دو وجه روی الک شماره ٤	۹٤	۸۰	۹۰	-	D5821
حداکثر درصد جذب آب (مصالح درشت‌دانه)	۲/۲	۲/۵	۲/۵	T85	-
حداکثر درصد جذب آب (مصالح ریزدانه)	۲/٤	۲/۸	۲/۵	T84	-

۲-۱-۳- تراشه آسفالت بازیافتی

تراشه‌های آسفالتی مورداستفاده در این مطالعه از معدن اسبچران در شمال شرق تهران تهیه شد. تراشه‌های آسفالت پس از دپو در مرکز تحقیقات قیر و مخلوط‌های آسفالتی دانشگاه علم و صنعت ایران، نمونه‌برداری شده و مشخصات آن به شرح زیر ارایه می‌شود. در این تحقیق از ۳ حالت، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد تراشه آسفالتی استفاده شد. برای تعیین دانه‌بندی و درصد قیر تراشه آسفالتی از آزمایش محفظه احتراق طبق استاندارد AASHTO-T 308 استفاده شد که درصد قیر موجود در تراشه‌های آسفالتی ۵/۲ درصد محاسبه شد. مشخصات قیر تراشه آسفالتی مورداستفاده در این تحقیق در جدول ۳ و دانه‌بندی مصالح سنگی تراشه آسفالتی در شکل ۱ ارایه‌شده است.

جدول۳. مشخصات قیر موجود در تراشه آسفالتی مورداستفاده در این تحقیق

مشخصات	نتیجه	واحد	استاندارد
درجه نفوذ	۳۱	۰/۱ میلی‌متر	ASTM D5
نقطه نرمی	۵۹	□	ASTM D36
انگمی	۷/۲	سانتی متر	ASTM D113
ویسکوزیته دورانی در دمای ۱۳۵ درجه	۲۷۶۰	مگاپاسکال	ASTM D4402



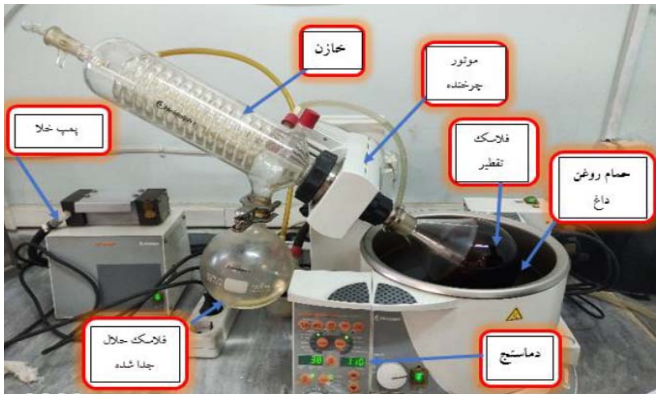
شکل ۱. دانه‌بندی مصالح تراشه آسفالتی مورداستفاده در این تحقیق

۲-۱-۴-روغن جوانساز

جوانساز مورداستفاده در این تحقیق، روغن سبوس برنج بوده و مشخصات آن در جدول ۴ ارائه‌شده است. برای درصد بهینه جوانساز، قیر موجود در مصالح خرده آسفالتی با استفاده از حلال تری کلرو اتیلن مطابق با استاندارد ASTM D2172 جداشده و سپس مطابق با شکل ۲ با استفاده از روش تقطیر دورانی ASTM D5404، بازیافت شد و سپس با گام‌های ۲ درصد، جوانساز به قیر بازیافتی اضافه‌شده و نمونه‌های حاصل تحت آزمایش درجه نفوذ و نقطه نرمی قرار گرفتند. مطابق با مطالعات پیشین درصد جوانسازی که باعث تبدیل درجه‌ی نفوذ ترکیب‌های قیری همراه با جوانساز به درجه نفوذ قیر خالص

شود، به عنوان درصد جوانساز مناسب انتخاب می‌گردد. (Oliveira, Silva, Jesus, Abreu, & Fernandes, 2013; Zaumanis et al., 2013; Ziari et al., 2019)

مقادیر درصد جوانساز بهینه برای مخلوط آسفالتی حاوی ۳۰،۲۰ و ۴۰ درصد تراشه آسفالتی به ترتیب ۴/۷، ۷/۳ و ۹/۶ درصد محاسبه شد. همچنین برای بررسی اثر جوانساز روغن سبوس برنج در مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالتی نمونه‌های بدون جوانساز نیز در این تحقیق در نظر گرفته شد.



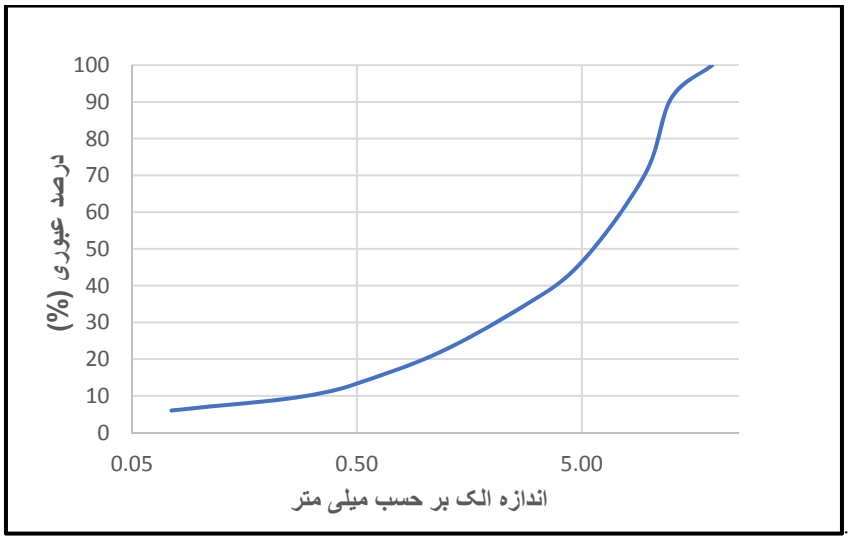
شکل ۲. دستگاه تبخیر دورانی

جدول ٤. مشخصات جوانساز مورداستفاده در تحقیق

خصوصیات	واحد	مقدار
ویسکوزیته دینامیکی در دمای ۲۵ درجه	مگاپاسکال بر ثانیه	۲۸۱
ویسکوزیته کینماتیکی در دمای ٤۰ درجه	میلی‌متر مربع بر ثانیه	٤۳/٤۷
نقطه اشتعال	سانتی‌گراد	۲٤۸
وزن مخصوص در دمای ۲۵ درجه	g/mL	۰/۹۱۷
نقطه دود	سانتی‌گراد	۲۳۲
رنگ	–	عسلی

۲-۲- ساخت نمونه‌های آسفالتی

ساخت نمونه از مهم‌ترین مراحل تولید مخلوط‌های آسفالت بازیافتی به شمار می‌رود. برای ساخت نمونه ابتدا مصالح سنگی طبیعی که مطابق با دانه‌بندی شکل ۳ (دانه‌بندی شماره ٤ آیین‌نامه) وزن کشی شده است، به مدت ۸ ساعت در دمای ۱۷۰ درجه قرارگرفته و تراشه‌های آسفالتی با توجه به این‌که در دمای بالا ممکن است به قیر موجود در RAP آسیب برسد به مدت دو ساعت در دمای ۱۷۰ درجه قرار گرفتند. سپس جوانساز بهینه برای هر یک از حالت‌ها به تراشه‌های آسفالتی اضافه شد و کاملاً مخلوط شده، سپس برای عمل‌آوری این مخلوط به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۱۷۰ درجه قرار گرفت. سپس مصالح سنگی جدید و قیر جدید مخلوط شدند و ۱ دقیقه پس از اختلاط تراشه و جوانساز به مخلوط اضافه‌شده و به‌صورت کامل مخلوط شدند. نهایتاً مخلوط به‌منظور عمل‌آوری مطابق با شکل ٤ به مدت دو ساعت در دمای ۱٤۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. سپس مخلوط برای تراکم به داخل قالب مربوطه ریخته شد.



شکل۳. دانه‌بندی مصالح سنگی مورداستفاده در این تحقیق

شکل٤. عمل‌آوری مخلوط آسفالتی

۲-۳- آزمایش خزش دینامیکی

یکی از مشکلات استفاده از جوانسازها در مخلوط‌های آسفالتی حاوی تراشه آسفالت کاهش مقاومت شیار شدگی مخلوط در دمای بالا است. ازاین‌رو در این تحقیق با استفاده از آزمایش خزش دینامیکی رفتار مخلوط‌های مختلف در برابر تغییر شکل‌های ماندگار بررسی شد. تغییر شکل‌های ماندگار که به شیارشدگی شناخته می‌شوند، یکی از اصلی‌ترین خرابی‌های ایجادشده در روسازی‌های آسفالتی می‌باشند. این آزمایش بر اساس استاندارد AS۲۸۹۱-۱۲-۱ Dynamic Creep و با استفاده از دستگاه UTM۲۵ انجام شد. در جدول ۵ داده‌های ورودی به دستگاه UTM در آزمایش خزش دینامیکی ارایه‌شده است.

جدول ۵. داده‌های ورودی به دستگاه UTM در آزمایش خزش دینامیکی

داده‌های ورودی به دستگاه UTM	نوع یا مقدار
تنش (کیلو پاسکال)	۴۰۰
فرکانس (هرتز)	۰/۵
زمان بارگذاری (میلی‌ثانیه)	۵۰۰
زمان استراحت (میلی‌ثانیه)	۱۵۰۰
ارتفاع نمونه (میلی‌متر)	۵۰
فضای خالی	۵ درصد
دمای آزمایش (سانتی‌گراد)	۵۰

۲-۴- آزمایش مدول برجهندگی

مدول برجهندگی یکی از پارامترهای مهم در تعیین عملکرد روسازی برای آنالیز پاسخ روسازی به بارگذاری ترافیکی است. ازآنجاکه در آزمایش مدول برجهندگی معمولاً بارهای اعمال‌شده کوچک هستند این آزمایش غیر مخرب محسوب می‌شود و از نمونه‌های ساخته‌شده موجود می‌توان در آزمایش‌های دیگر نیز استفاده نمود. در جدول ٦ مشخصات آزمایش مدول برجهندگی ارایه‌شده است.

جدول ٦. داده‌های ورودی به دستگاه UTM در آزمایش مدول برجهندگی

داده‌های ورودی به دستگاه UTM	نوع یا مقدار
نوع بارگذاری	نیمه سینوسی
زمان بارگذاری (ثانیه)	۰/۱
مدول برجهندگی پیش‌بینی‌شده (مگا پاسکال)	۲۰۰۰ تا ٦۰۰۰
ضریب پواسون	۰/۳۵
دوره بارگذاری (میلی‌ثانیه)	۱۰۰۰
دمای آزمایش (سانتی‌گراد)	۲۵

آزمایش خمش نیم‌دایره

برای ابتدا نمونه‌های استوانه‌ای بزرگ با توجه به استاندارد BS EN 12697-44 تهیه شدند و سپس این نمونه‌ها به دیسک‌ها با ضخامت ۵ سانتی‌متر برش داده شدند که با نصف‌کردن آن‌ها قطعات نیم دیسک حاصل شد و در انتها برشی به طول ۱ سانتی‌متر برش داده‌شده و نمونه قطعه موردنظر برای آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای تهیه گردید. نمونه‌های خمش نیم دایره به دلیل هندسه و بارگذاری آسان و سهولت ایجاد ترک لبه‌ها، قطعات مناسبی جهت انجام آزمایش‌های مبتنی بر چقرمگی و انرژی شکست در مخلوط‌های آسفالتی هستند؛ چقرمگی و انرژی شکست نمونه‌های آسفالتی با استفاده از آزمایش خمش نیم‌دایره (SCB) طبق استاندارد BS EN 12697-44 اندازه‌گیری شد. بدین منظور نمونه‌ها به مدت ٤ ساعت قبل از آزمایش، در دمای ۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند (هدف از این کار جلوگیری از تغییر شکل خزشی زیاد و ایجاد شکست ترد و یکنواخت در تمام نمونه‌ها بود). بارگذاری نمونه‌ها با نرخ ۵ میلی‌متر بر دقیقه به‌وسیله دستگاه UTM25 اعمال گردید. بارگذاری خطی در مرکز نمونه دقیقاً در بالای شکاف نمونه انجام شد. از بارگذاری تا لحظه گسیختگی نمونه (دو نیم شدن) ادامه پیدا کرد و تغییر شکل

عمودی و نیروی خمشی در طول آزمایش ثبت گردید. در این حالت با توجه به بار بحرانی شکست و تغییر شکل عمودی در هنگام شکست، چقرمگی شکست و انرژی شکست قابل‌محاسبه است.

چقرمگی شکست

با توجه به استاندارد BS EN 12697-44 یکی از معیارهای بررسی مقاومت ترک‌خوردگی در مخلوط آسفالتی معیار چقرمگی شکست است. این معیار وابسته به هندسه بارگذاری و هندسه نمونه است. چقرمگی شکست با استفاده از روابط زیر محاسبه شد.

$$\frac{K}{\sigma_{\cdot}\sqrt{\pi a}} = Y_{I(\cdot.\wedge)} \quad (۱)$$

$$\sigma_0 = \frac{P}{2rt} \quad (۲)$$

$$Y_{I(0.8)} = 4.782 + 1.219\left(\frac{a}{r}\right) + 0.063\exp\left(7.045\left(\frac{a}{r}\right)\right) \quad (۳)$$

که در روابط فوق:K چقرمگی شکست ($MPa \times \sqrt{m}$)، P: نیروی اعمالی (مگا نیوتون) ،r : شعاع نمونه (متر) ،a : طول تیغه (متر) ،t: ضخامت نمونه (متر) ،Y_I: ضریب شکل بوده که با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس محاسبه می‌شود. این پارامتر درصورتی‌که نسبت فاصله مرکز تا مرکز تکیه‌گاه‌ها به قطر نمونه برابر با ۰/۸ باشد با معادله۳ قابل‌محاسبه بوده و مقدار آن برابر ۵/۲۸۳ است.

انرژی شکست

همچنین با توجه به نمودار نیرو جابجایی به‌دست‌آمده، از روابط زیر برای محاسبه انرژی شکست نمونه‌ها می‌توان استفاده کرد.

$$G_f = \frac{W_f}{A_{lig}} \quad (٤)$$

$$w_f = \int P du \quad (٥)$$

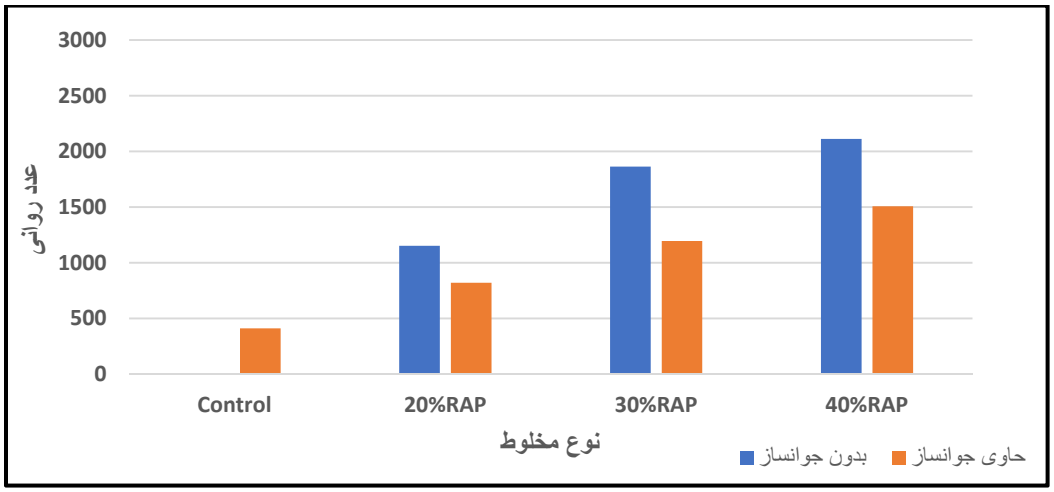
$$A_{lig} = (r - a) \times t \quad (٦)$$

که در روابط فوق:G_f: انرژی شکست نمونه (ژول بر مترمربع)، W_f: کار نیروی شکست (ژول)،P: نیروی اعمالی (نیوتون)،u:مقدار جابجایی (متر)، A_{lig}: مساحت ناحیه شکست (ناحیه‌ای که شکست در آن اتفاق می‌افتد) (مترمربع)، r: شعاع نمونه (متر)،a: طول تیغه (متر)،t: ضخامت نمونه (متر).

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آزمایش خزش دینامیکی

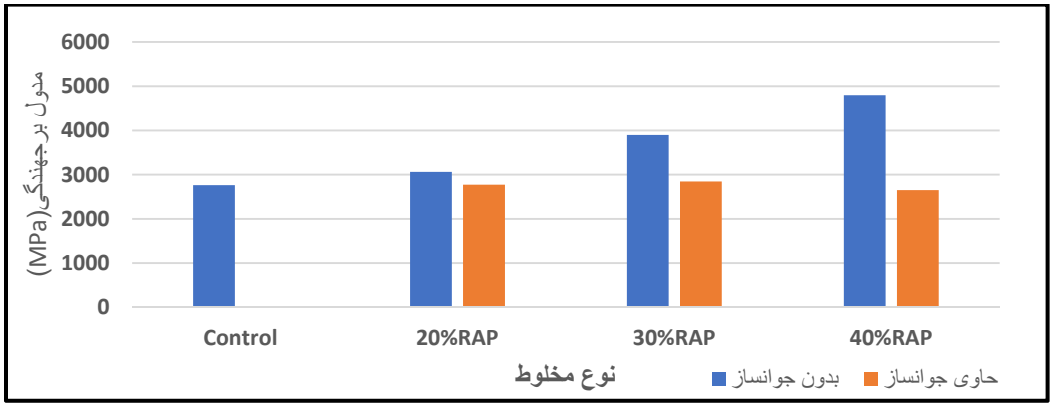
با توجه به شکل ۵ مشاهده می‌شود در مخلوط‌های بدون جوانساز، اضافه کردن ۲۰،۳۰ و ٤۰ درصد تراشه آسفالتی به ترتیب موجب افزایش ۲/۸ ،٤/۵ و ۵/۱ برابری عدد روانی نسبت به مخلوط کنترل‌شده است. با توجه به اینکه روسازی‌های آسفالتی ساخته‌شده با تراشه آسفالتی به‌عنوان روسازی سخت شناخته می‌شوند و چون روسازی‌های سخت‌تر کمتر متحمل شیارشدگی هستند، بنابراین انتظار می‌رود با افزایش سختی مخلوط به دلیل استفاده از تراشه آسفالت (قیر پیرشده موجود در تراشه آسفالت) شیارشدگی کمتری رخ دهد (DeDene & You, 2014). از طرفی می‌توان گفت که افزودن جوانساز روغن سبوس برنج به مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالتی مقدار عدد جریان را کاهش داده است. این کاهش را می‌توان به دلیل کاهش سختی مخلوط به علت کاهش ویسکوزیته و همچنین نرمی قیر دانست. علاوه بر این، ممکن است به دلیل اضافه کردن جوانساز به مخلوط، سطح لغزنده بین سنگدانه‌ها ایجاد شده و منجر به افزایش شیارشدگی شود. بنابراین افزودن عامل‌های بازیافتی می‌تواند شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی را بیشتر کند که سایر محققین نیز به این نتیجه‌ی مهم رسیده‌اند (Espinoza-Luque, Al-Qadi, & Ozer, 2018; Nabizadeh et al., 2017; Nsengiyumva et al., 2020).



شکل۵. عدد روانی برای مخلوط‌های آسفالتی مختلف

۳-۲- آزمایش مدول برجهندگی

همان‌طور که در شکل ٦ مشاهده می‌شود در مخلوط‌های بدون جوانساز با افزایش درصد تراشه آسفالت مدول برجهندگی افزایش‌یافته است که این افزایش می‌تواند ناشی از تأثیر قیر پیر و سفت موجود در تراشه آسفالت باشد. همچنین مطالعات متعددی نیز افزایش مقدار مدول برجهندگی را در صورت استفاده از تراشه آسفالت تأیید کرده‌اند (Behnood, 2019; Daryaee, Ameri, & Mansourkhaki, 2020; Mallick, Kandhal, & Bradbury, 2008; Ziari et al., 2019). نتایج نشان می‌دهند که استفاده از روغن سبوس برنج به‌عنوان عامل جوانساز در مخلوط‌های آسفالتی حاوی تراشه آسفالت به دلیل نرم‌تر کردن قیر موجود در مصالح تراشه آسفالتی، مقدار مدول برجهندگی را کاهش داده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار کاهش مدول برجهندگی در مخلوط حاوی ٤٠ درصد تراشه آسفالت به دلیل درصد جوانساز بیشتر است. بسیاری از مطالعات قبلی نیز کاهش مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی را در صورت استفاده از جوانساز اشاره‌کرده‌اند (Daryaee et al., 2020; Kaseer, Yin, Arámbula-Mercado, & Epps Martin, 2017; Moniri et al., 2021; Munoz, Kaseer, Arambula, & Martin, 2015).



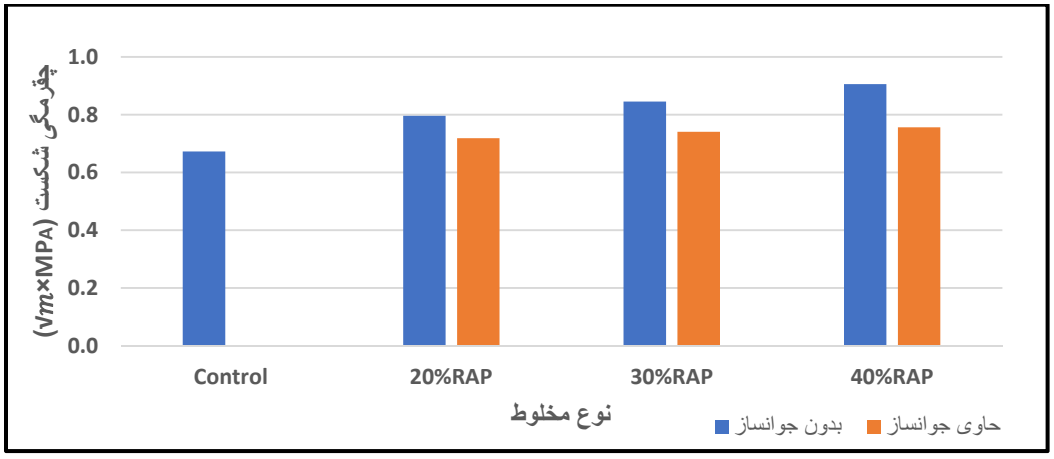
شکل ٦. مدول برجهندگی برای مخلوط‌های آسفالتی مختلف

۳-۳- آزمایش خمش نیم‌دایره

با توجه به بار بحرانی شکست و تغییر شکل عمودی در هنگام شکست در آزمایش خمش نیم‌دایره، نتایج آزمایش خمش نیم‌دایره در دو بخش چقرمگی شکست و انرژی شکست ارایه شده است.

چقرمگی شکست

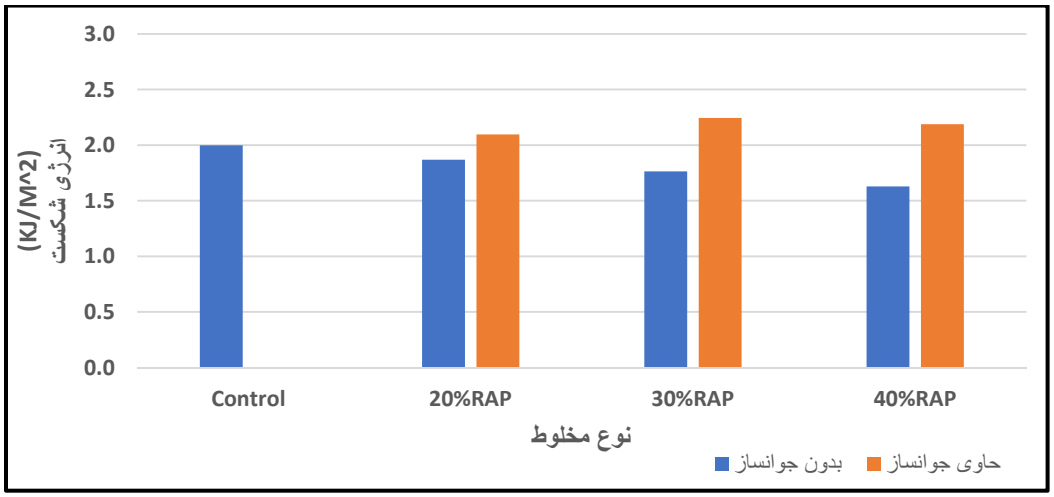
همان‌طور که در شکل۷ ملاحظه می‌شود، چقرمگی شکست با افزایش درصد تراشه آسفالت بازیافتی افزایش‌یافته است. علت این امر عمدتاً به این دلیل است که پارامتر چقرمگی شکست بسیار به بار بیشینه وابسته است. همچنین با افزایش درصد تراشه آسفالت، سختی نمونه‌ها به علت تأثیر قیر پیر شده و سفت‌تر افزایش‌یافته، درنتیجه بار بیشینه در نمونه‌ها افزایش پیدا می‌یابد. این امر منجر به افزایش چقرمگی شکست در نمونه‌ها می‌شود. مطالعات قبلی نیز به افزایش چقرمگی شکست مخلوط آسفالتی در صورت استفاده از RAP اشاره‌کرده‌اند (Falchetto, Moon, Wang, Riccardi, & Wistuba, 2018; Ozer et al., 2009). با توجه به نتایج با اضافه کردن جوانساز روغن سبوس برنج در مخلوط آسفالتی، چقرمگی شکست کاهش می‌یابد. علت این امر را می‌توان به تأثیر جوانساز بر قیر پیر و سفت موجود در تراشه آسفالت دانست. همچنین مطالعات نیز کاهش مقدار چقرمگی شکست را در صورت استفاده از جوانساز در مخلوط آسفالتی تأیید کرده‌اند (Falchetto et al., 2018; Ozer et al., 2009).



شکل۷. چقرمگی شکست برای مخلوط‌های آسفالتی مختلف

انرژی شکست

انرژی شکست تأثیرپذیر از دو پارامتر بار بیشینه و تغییر شکل است. با توجه به شکل ۸ ملاحظه می‌شود با افزایش درصد تراشه آسفالت در مخلوط‌های بدون جوانساز انرژی شکست کاهش پیدا می‌کند. علت این امر کاهش شکل‌پذیری مخلوط به علت قیر پیرشده موجود در تراشه آسفالت و درنتیجه کاهش سطح زیر نمودار بار تغییر شکل است، همچنین بسیاری از مطالعات به کاهش انرژی شکست در مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالت اشاره کرده‌اند (Behnood, 2019; Kaseer, Martin, & Arámbula-Mercado, 2019). همچنین اضافه کردن جوانساز روغن سبوس برنج به دلیل کاهش ویسکوزیته قیر باعث کاهش بار بیشینه و افزایش تغییر شکل مخلوط آسفالتی و درنهایت افزایش انرژی شکست شده است. بسیاری از محققان نیز به افزایش شکست مخلوط آسفالتی را در صورت استفاده از عوامل جوانساز (Jahanbakhsh et al., 2020; Mogawer et al., 2015; Podolsky, Saw, Elkashef, Williams, & Cochran, 2021; Tran et al., 2017; Xie et al., 2020; Zhou, Gu, Li, Ni, & Yuan, 2016) اشاره‌کرده‌اند.



شکل۸ انرژی شکست برای مخلوط‌های آسفالتی مختلف

٤- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف امکان‌سنجی استفاده از روغن سبوس برنج به‌عنوان جوانساز در مخلوط‌های آسفالتی حاوی تراشه آسفالت بازیافتی با بررسی نتایج آزمایش‌های خزش دینامیکی، مدول برجهندگی و خمش نیم‌دایره انجام شد. در آزمایش خزش دینامیکی استفاده از جوانساز روغن سبوس برنج باعث کاهش عدد روانی مخلوط‌های آسفالتی حاوی تراشه آسفالت شد، به‌طوری که در مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۲۰،۳۰ و ٤۰ درصد تراشه آسفالت استفاده از روغن سبوس برنج باعث کاهش ۲۷،۳٤ و۲۸ درصدی روانی شد، درعین‌حال مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالت از مخلوط کنترل بیشتر است. در آزمایش مدول برجهندگی، اضافه کردن روغن سبوس برنج باعث کاهش مدول برجهندگی مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالت شد، به‌طوری که در مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۲۰،۳۰ و ٤۰ درصد تراشه آسفالت استفاده از روغن سبوس برنج به ترتیب باعث کاهش ۹،۲۷ و ٤٥ درصدی مدول برجهندگی شده است؛ اما استفاده از تراشه آسفالت باعث افزایش سختی مخلوط آسفالتی شده و در نتیجه مدول برجهندگی مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالت از مدول برجهندگی مخلوط کنترل بیشتر است.

در نهایت برای بررسی ترک‌خوردگی که مهم‌ترین معضل مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالت است، از آزمایش خمش نیم‌دایره استفاده شد. نتایج آزمایش خمش نیم‌دایره نشان دادند که استفاده از تراشه آسفالت به دلیل افزایش سختی مخلوط، باعث افزایش چقرمگی شکست و کاهش انرژی شکست می‌شود، همچنین اضافه کردن جوانساز روغن سبوس برنج به دلیل کاهش ویسکوزیته قیر پیر موجود در تراشه آسفالت موجب کاهش چقرمگی شکست و افزایش تغییر شکل مخلوط درنتیجه انرژی شکست شده است. به‌طوری که در مخلوط‌های آسفالتی درصد تراشه آسفالت استفاده از روغن سبوس برنج موجب افزایش ۲٤ درصدی انرژی شکست و کاهش ۱۳ درصدی چقرمگی شکست شده است. درنهایت با توجه به نتایج حاصل مشاهده می‌شود که استفاده از روغن سبوس برنج به‌عنوان جوانساز باعث بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی حاوی تراشه آسفالت بازیافتی شده است. با توجه به این‌که سبوس برنج محصول نسبتاً ضایعاتی برنج محسوب شده و در کشور استفاده مطلوب و اقتصادی از آن به عمل نمی‌آید، در نتیجه استفاده از روغن سبوس برنج به‌عنوان جوانسازراهکار مناسبی برای بهسازی راه‌های موجود در کشور است.

٥-پی‌نوشت‌ها

1-Dynamic Creep Test
2-Rutting Resistance
3-Resilient Modulus Test
4-Semi Circular Beam Test
5-Fracture Toughness
6-Fracture Energy

٦- مراجع

-Al-Qadi, I. L., Aurangzeb, Q., Carpenter, S. H., Pine, W. J., & Trepanier, J., (2012), "Impact of high RAP contents on structural and performance properties of asphalt mixtures (0197-9191).
-Bajaj, A., Martin, A. E., King, G., Glover, C., Kaseer, F., & Arámbula-Mercado, E., (2020), "Evaluation and classification of recycling agents for asphalt binders", Construction and Building Materials, 260, 119864 .
-Behnood, A., (2019), "Application of rejuvenators to improve the rheological and mechanical properties of asphalt binders and mixtures: A review", Journal of Cleaner Production, 231, pp.171-182.
-Borhan, M. N., Suja, F., Ismail, A., & Rahmat, R., (2007), "Used cylinder oil modified cold-mix asphalt concrete", Journal of Applied Sciences, 7(22), pp.3485-3491.
-Daryaee, D., Ameri, M., & Mansourkhaki, A., (2020), "Utilizing of waste polymer modified bitumen in combination with rejuvenator in high reclaimed asphalt pavement mixtures", Construction and Building Materials, 235, 117516 .
-DeDene, C. D., & You, Z., (2014), "The Performance of Aged Asphalt Materials Rejuvenated with Waste Engine Oil", International Journal of Pavement Research & Technology, 72.
-Dokandari, P. A., Kaya, D., Sengoz, B., & Topal, A., (2017), "Implementing waste oils with reclaimed asphalt pavement", Paper presented at the Proceedings of the 2nd World congress on civil, structural and environmental engineering (CSEE'17).
-Espinoza-Luque, A. F., Al-Qadi, I. L., & Ozer, H., (2018), "Optimizing rejuvenator content in asphalt concrete to enhance its durability", Construction and Building Materials, 179, pp.642-648.
-Falchetto, A. C., Moon, K. H., Wang, D., Riccardi, C., & Wistuba, M. P., (2018), "Comparison of low-temperature fracture and strength properties of asphalt mixture obtained from IDT and SCB under different testing configurations", Road Materials and Pavement Design, 19(3), pp.591-604 .
-Garcia, A., Austin, C. J., & Jelfs, J., (2016), "Mechanical properties of asphalt mixture containing sunflower oil capsules", Journal of Cleaner Production, 118, pp.124-132 .
-Huang, Y., Bird, R. N., & Heidrich, O. (2007), A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements. Resources, conservation and recycling, 52(1), pp.58-73.
-Im, S., Zhou, F., Lee, R., & Scullion, T., (2014), "Impacts of rejuvenators on performance and engineering properties of asphalt mixtures containing recycled materials", Construction and Building Materials, 53, pp.596-603.
-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", Journal of Cleaner Production, 244, 118837.
-Kandhal, P. S., & Mallick, R. B., (1998), "Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments: Participant's Reference Book", Retrieved from .
-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, pp.974-987.
-Kaseer, F., Yin, F., Arámbula-Mercado, E., & Epps Martin, A., (2017), "Stiffness characterization of asphalt mixtures with high recycled material content and recycling agents", Transportation Research Record, 2633(1), pp.58-68.
-Lee, N., Chou, C.-P., & Chen, K. Y. (2012), "Benefits in energy savings and CO2 reduction by using reclaimed asphalt pavement", Retrieved from.
-Mallick, R. B., Kandhal, P. S., & Bradbury, R. L., (2008), "Using warm-mix asphalt technology to incorporate high percentage of reclaimed asphalt pavement material in asphalt mixtures", Transportation Research Record, 2051(1), pp.71-79 .
-Mogawer, W. S., Austerman, A., Roque, R., Underwood, S., Mohammad, L., & 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, 16(sup2), pp.1-28 .
-Moniri, A., Ziari, H., Aliha, M., & Saghafi, Y., (2021), "Laboratory study of the effect of oil-based recycling agents on high RAP asphalt mixtures", International Journal of Pavement Engineering, 22(11), pp.1423-1434.
-Munoz, J. S. C., Kaseer, F., Arambula, E., & Martin, A. E., (2015), "Use of the resilient modulus test to characterize asphalt mixtures

-Tran, N., Xie, Z., Julian, G., Taylor, A., Willis, R., Robbins, M., & Buchanan, S., (2017), "Effect of a recycling agent on the performance of high-RAP and high-RAS mixtures: Field and lab experiments, Journal of materials in Civil Engineering, 29(1), 04016178.
-Veeraragavan, R. K., Mallick, R. B., Tao, M., Zaumanis, M., Frank, R., & Bradbury, R. L., (2017), "Laboratory comparison of rejuvenated 50% reclaimed asphalt pavement hot-mix asphalt with conventional 20% RAP mix", Transportation research record, 2633(1), pp.69-79.
-Wen, H., Bhusal, S., & Wen, B., (2013), "Laboratory evaluation of waste cooking oil-based bioasphalt as an alternative binder for hot mix asphalt", Journal of Materials in Civil Engineering, 25(10), pp.1432-1437.
-Xie, Z., Tran, N., Taylor, A. J., & Turnera, P., (2020), "Laboratory evaluation of effect of addition methods of rejuvenators on properties of recycled asphalt mixtures", Journal of Materials in Civil Engineering, 32(5), 04020101.
-Zamhari, K., Hermadi, M., & Fun, C., (2009), "Characteristics of rejuvenated bitumen with used lubricating oil as rejuvenating agent", Paper presented at the Inter-national Conference On Sustainable Infrastructure and Built Environment In Developing Countries. Bandung, West Java, Indonesia.
-Zaumanis, M., Mallick, R. B., & Frank, R., (2013), "Evaluation of rejuvenator's effectiveness with conventional mix testing for 100% reclaimed Asphalt pavement mixtures, Transportation research record, 2370(1), pp.17-25.
-Zaumanis, M., Mallick, R. B., Poulikakos, 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, pp.538-550.
-Zhou, Z., Gu, X., Li, Q., Ni, F., & Yuan, R., (2016), "Use of rejuvenator, styrene-butadiene rubber latex, and warm-mix asphalt technology to achieve conventional mixture performance with 50% reclaimed asphalt pavement", Transportation Research Record, 2575(1), pp.160-167.
-Ziari, H., Moniri, A., Bahri, P., & Saghafi, Y., (2019), "Evaluation of performance properties of 50% recycled asphalt mixtures using three types of rejuvenators", Petroleum Science and Technology, 37(23), pp.2355-2361.
with recycled materials and recycling agents", Transportation Research Record, 2506(1), pp.45-53.
-Nabizadeh, H., Haghshenas, H. F., Kim, Y.-R., & Aragão, F. T. S., (2017), "Effects of rejuvenators on high-RAP mixtures based on laboratory tests of asphalt concrete (AC) mixtures and fine aggregate matrix (FAM) mixtures", Construction and Building Materials, 152, pp.65-73 .
-Nayak, P., & Sahoo, U. C., (2017), "Rheological, chemical and thermal investigations on an aged binder rejuvenated with two non-edible oils", Road Materials and Pavement Design, 18(3), pp.612-629.
-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), pp.126-138.
-Oliveira, J. R., Silva, H., Jesus, C. M., Abreu, L. P., & Fernandes, S. R., (2013), "Pushing the asphalt recycling technology to the limit", International Journal of Pavement Research and Technology, 6, pp.109-116.
-Ozer, H., Al-Qadi, I., Carpenter, S., "Aurangzeb, Q., Roberts, G., & Trepanier, J., (2009), "Evaluation of RAP impact on hot-mix-asphalt design and performance", Asphalt Paving Technology-Proceedings, 28, pp.317-318.
-Podolsky, J. H., Saw, B., Elkashef, M., Williams, R. C., & Cochran, E. W., (2021), "Rheology and mix performance of rejuvenated high RAP field produced hot mix asphalt with a soybean derived rejuvenator", Road Materials and Pavement Design, 22(8), pp.1894-1907.
-Rafiq, W., Napiah, M., Habib, N .Z., Sutanto, M. H., Alaloul, W. S., Khan, M. I., Memon, A. M., (2021), "Modeling and design optimization of reclaimed asphalt pavement containing crude palm oil using response surface methodology. Construction and Building Materials, 291, 123288.
-Sargious, M., & Mushule, N., (1991), "Behaviour of recycled asphalt pavements at low temperatures", Canadian Journal of Civil Engineering, 18(3), pp.428-435.
-Taherkhani, H., & Noorian, F., (2020), "Comparing the effects of waste engine and cooking oil on the properties of asphalt concrete containing reclaimed asphalt pavement (RAP)", Road Materials and Pavement Design, 21(5), pp.1238-1257.

Feasibility of Using Rice Bran Oil as a Rejuvenator in Asphalt Mixtures Containing RAP Material

Mahmoud Ameri, Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.
Mohammad Amin Hosseinzad Derakhshan, M.Sc., Student, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.

E-mail: ameri@iust.ac.ir

Received: March 2023- Accepted: August 2023

ABSTRACT
The use of recycled asphalt pavement (RAP) has been one of the available solutions in road maintenance due to cost reduction and preservation of natural resources. On the other hand,by using RAP materials, aged binder in the RAP causes improper performance of the asphalt mixture, including reducing the cracking resistance. Nowadays, rejuvenators are used to improve the performance of asphalt mixtures containing RAP. Iran is one of the active countries in rice cultivation, while 70% of rice bran is unused. This study investigated rice bran oil as a rejuvenator in asphalt mixtures containing 20%, 30%, and 40% RAP materials by dynamic creep test, resilient modulus test, and semicircular bending (SCB) test. The results show that using rice bran oil in asphalt mixtures as a rejuvenator causes a decrease in the flow number, resilient modulus, and fracture toughness values by an average of 31%, 27%, and 13%, respectively, also increase in fracture energy values by an average of 24%. The results show that using rice bran oil improves the performance of asphalt mixtures containing RAP by reducing the viscosity of aged binder in RAP. As a result, implying rice bran oil as a rejuvenator in asphalt mixture due to the using rice waste and low cost and environmentally friendly can be a good way to enhance asphalt pavement performance.

Keywords: Rejuvenator; Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Materials; Rice Bran Oil