جوانسازها و آینده روسازی‌های پایدار: از احیای قیر پیرشده تا بهبود عملکرد مخلوط آسفالت بازیافتی

مقاله علمی – پژوهشی

ساجد برادران، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

*محمود عامری (نویسنده مسئول)، استاد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Ameri@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۲– پذیرش:۱۴۰۵/۰۳/۰۲

صفحه ۵۴۸-۵۲۷

چکیده

استفاده از مصالح آسفالتی بازیافتی در مخلوط‌های آسفالتی، به‌عنوان راهکاری مؤثر برای کاهش مصرف مصالح خام، صرفه‌جویی اقتصادی و کاهش پیامدهای زیست‌محیطی صنعت راه‌سازی، در سال‌های اخیر مورد توجه گسترده قرار گرفته است. با این حال، وجود قیر پیرشده در مصالح آسفالتی بازیافتی می‌تواند به افزایش سختی و ویسکوزیته قیر، کاهش شکل‌پذیری، افت مقاومت در برابر ترک‌خوردگی و بروز چالش‌های دوام در روسازی منجر شود. در این مقاله، سازوکارهای اصلی پیرشدگی قیر و نقش جوان‌سازها در بازگرداندن تعادل میان اجزای مالتنی و آسفالتنی قیر تبیین شده است. همچنین، انواع جوان‌سازها از جمله بایو روغن‌ها، روغن‌های پسماند، روغن‌های روان‌کننده و محصولات تجاری، همراه با روش‌های تعیین مقدار بهینه و شیوه‌های اختلاط آن‌ها با مصالح آسفالتی بازیافتی مرور شده‌اند. نتایج مطالعات پیشین نشان می‌دهد که جوان‌سازها عموماً موجب افزایش نفوذپذیری و شکل‌پذیری و کاهش ویسکوزیته، نقطه نرمی و مدول مختلط قیر پیرشده می‌شوند. از نظر عملکرد مکانیکی، استفاده از جوان‌سازها می‌تواند مقاومت در برابر خستگی و ترک‌خوردگی و همچنین دوام رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی را بهبود دهد؛ با این حال، مصرف بیش از حد آن‌ها ممکن است مقاومت در برابر شیارشدگی و چسبندگی قیر و مصالح سنگی را کاهش دهد. بنابراین، انتخاب نوع مناسب جوان‌ساز، تعیین دوز بهینه و کنترل شرایط اختلاط، عوامل کلیدی در دستیابی به مخلوط آسفالتی بازیافتی با عملکرد پایدار و قابل‌قبول محسوب می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: مصالح آسفالتی بازیافتی، قیر پیرشده، جوان‌ساز، خصوصیات رئولوژیکی، خصوصیات مکانیکی

۱- مقدمه

آسفالت که به‌طور گسترده در صنعت راه‌سازی به کار می‌رود، یکی از پرمصرف‌ترین مصالح در صنعت ساخت‌وساز محسوب می‌شود (Al-Atroush et al., 2023; Baradaran & Ameri, 2023). تولید سالانه جهانی آسفالت برای فعالیت‌های روسازی بیش از چهار میلیارد تن برآورد شده است (Aziez et al., 2023). استفاده از مواد بازیافتی، پسماندها، مواد هیبریدی و مواد خام سازگار با محیط‌زیست، مانند خرده‌لاستیک، روغن‌ها و پلاستیک‌ها، به‌عنوان راهکاری عملی برای تولید روسازی‌های آسفالتی پایدار مطرح شده است (Bilema et al., 2021; Khan et al.,2023; Al-Atroush et al., 2024; Baradaran et al., 2025a, Ayar, Baradaran & Abdipour Vosta, 2022). با توجه به مصرف بالای مصالح سنگی و قیر در روسازی‌های انعطاف‌پذیر، تلاش‌ها برای تولید آسفالت سازگار با محیط‌زیست منجر به استفاده از مواد جایگزین شده است. مخلوط آسفالتی در طول عمر بهره‌برداری خود در معرض شرایط جوی مختلف و بارگذاری‌های تکرارشونده قرار می‌گیرد که می‌تواند موجب بروز خرابی‌های دائمی مانند شیارشدگی، دانه‌کنی سطحی و ترک‌خوردگی شود (Al-Saffar et al., 2023). برداشت و بازیافت روسازی‌های

آسفالتی پیرشده، حجم قابل‌توجهی از مصالح آسفالتی بازیافتی (RAP[1]) را تولید می‌کند. استفاده از RAP در پروژه‌های جدید روسازی، راهکاری مؤثر برای صرفه‌جویی در مصرف مواد خام و کاهش پیامدهای زیست‌محیطی به شمار می‌آید. امروزه بسیاری از سازمان‌های راه‌سازی استفاده از RAP را مجاز دانسته‌اند (Ahmad et al., 2018).

با این حال، به‌کارگیری RAP در مخلوط‌های آسفالتی می‌تواند چالش‌هایی از نظر دوام ایجاد کند؛ از جمله افزایش حساسیت رطوبتی و کاهش مقاومت در برابر ترک‌خوردگی که عمدتاً ناشی از وجود قیر پیرشده (AB) در RAP است (Dughaishi et al., 2022; Baradaran et al., 2025b). قیر در معرض دو نوع پیرشدگی قرار می‌گیرد: پیرشدگی کوتاه‌مدت (STA) که در مرحله تولید، اختلاط و اجرای مخلوط رخ می‌دهد، و پیرشدگی بلندمدت (LTA[2]) که در طول دوره بهره‌برداری قیر در روسازی اتفاق می‌افتد. این پدیده پیرشدگی که عمدتاً تحت تأثیر اکسیداسیون و از دست رفتن ترکیبات فرّار است، باعث افزایش ویسکوزیته قیر می‌شود و در نتیجه، قیری سخت‌تر از قیر تازه تولیدشده ایجاد می‌کند.

اگرچه قیر پیرشده ممکن است مقاومت مخلوط‌ها را در برابر شیارشدگی افزایش دهد، از سوی دیگر می‌تواند روند آغاز و گسترش ترک‌ها را تسریع کند (Al-Saffar et al, 2021). فرایند احیای قیر موجود در آسفالت بازیافتی (RAP) با هدف بازگرداندن ویژگی‌های آن به سطحی مشابه قیر بکر انجام می‌شود (Al-Saffar et al, 2022). مشکلات مرتبط با استفاده از درصدهای بالای RAP در مخلوط آسفالتی معمولاً از طریق فرایند احیا یا جوان‌سازی قابل کنترل است. جوان‌سازی می‌تواند نسبت اولیه آسفالتن‌ها به مالتن‌ها را تا حدی بازیابی کند و اثر سخت‌شدگی قیر پیرشده را کاهش دهد؛ این امر موجب بهبود کیفیت روسازی آسفالتی قدیمی، به‌ویژه از نظر خواص قیری، می‌شود. مواد جوان‌ساز معمولاً شامل روغن‌های نفتی، روغن‌های آلی یا ترکیبات صنعتی مختلف هستند (Ziari, Hajiloo & Ayar, 2022).

در سال‌های اخیر، محصولات متعددی مانند ترکیبات صنعتی و روغن‌های آلی با قیر پیرشده موجود در RAP ترکیب شده‌اند. این مواد مزایای مختلفی از جمله امکان افزایش سهم RAP در مخلوط آسفالتی، بهبود رفتار مخلوط آسفالتی گرم (HMA[3]) و کاهش پیامدهای اقتصادی و زیست‌محیطی ناشی از مصرف روغن‌های نفتی را به همراه دارند (Zahoor et al., 2021). افزودن عامل احیاکننده به قیر پیرشده موجود در RAP می‌تواند ویژگی‌هایی مشابه قیر بکر ایجاد کند. بنابراین، استفاده از جوان‌سازها در پروژه‌های راه‌سازی حاوی RAP ضروری است تا مقاومت کافی روسازی آسفالتی در برابر شیارشدگی و ترک‌خوردگی تأمین شود (Zheng, Xu & Wang, 2023). تحقیقات پیشین نشان داده‌اند که استفاده از جوان‌سازها ممکن است مقاومت در برابر شیارشدگی را در دماهای بالا کاهش دهد؛ در حالی‌که مقاومت در برابر ترک‌خوردگی حرارتی در دماهای پایین و مقاومت خستگی در دماهای میانی را بهبود می‌بخشد. با این حال، مخلوط‌های حاوی جوان‌ساز همچنان می‌توانند از مقاومت قابل‌قبولی در برابر شیارشدگی برخوردار باشند (Ahmed & Hossain, 2020; Baradaran et al., 2024a, Baradaran et al., 2024b).

مواد خودترمیم‌شونده، که قادرند پس از ایجاد آسیب‌های مشخص به‌صورت خودکار فرایند ترمیم را آغاز کنند، به‌دلیل کاربردهای امیدبخش در اجزای مهندسی، به‌ویژه آسفالت، به یکی از حوزه‌های مهم پژوهشی تبدیل شده‌اند (Castro & Sanchez, 2006). محققان قابلیت خودترمیمی آسفالت را تأیید کرده‌اند (Kim et al., 2003)؛ قابلیتی که عمدتاً ناشی از ویژگی‌های ویسکوالاستیک آن است (Gacia, 2012). هنگامی که بین دو چرخه بارگذاری یک فاصله زمانی ایجاد می‌شود، آسفالت تمایل دارد ترک‌های موجود را از طریق نفوذ، انتشار و ترشوندگی در نواحی آسیب‌دیده ترمیم کند و هم‌زمان سختی و مقاومت آن به‌تدریج بازیابی می‌شود (Shen & Carpenter, 2006).

روش کپسوله‌سازی عامل احیاکننده، فناوری پیشرفته‌ای برای نگهداری هوشمند روسازی است. عوامل احیاکننده کپسوله‌شده در سال‌های اخیر به‌دلیل قابلیت اجرایی و کاربردهای بالقوه در تولید آسفالت‌های خودترمیم‌شونده، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند و انتظار می‌رود این روند در آینده نیز ادامه یابد. شرط اساسی در این روش آن است که ترک از میان کپسول یا الیاف عبور کند و باعث شکست پوسته و آزادسازی کنترل‌شده عامل احیاکننده شود. پس از تعبیه کپسول‌ها یا الیاف حاوی عامل احیاکننده در مخلوط آسفالتی، روش کپسوله‌سازی به تحریک یا پشتیبانی خارجی نیاز ندارد. کپسول‌ها یا الیاف باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که در طول فرایند تولید و اجرا بتوانند تنش‌های

فیزیکی و حرارتی را تحمل کنند و در عین حال، حساسیت کافی برای آزادسازی خودکار عامل احیاکننده در پاسخ به ایجاد ترک را داشته باشند. این ویژگی‌ها نشان‌دهنده پتانسیل قابل‌توجه این فناوری در توسعه راه‌های آسفالتی هوشمند است (Garcia et al., 2010, Baradaran & Ziaee, 2025).

تحول روش کپسوله‌سازی ابتدا با استفاده از کپسول‌ها آغاز شد؛ اما این کپسول‌ها مقدار زیادی از عامل احیاکننده را آزاد می‌کردند. این موضوع می‌توانست موجب افزایش شیارشدگی و کاهش سختی آسفالت شود. در ادامه، فناوری ریزکپسول‌ها توسعه یافت (Su et al, 2013) تا میزان آزادسازی جوان‌ساز در آسفالت کاهش یابد؛ اما مشخص شد که این روش هنگام ایجاد ترک، ناحیه وسیعی از آسفالت را پوشش نمی‌دهد. برای رفع محدودیت‌های روش‌های مبتنی بر کپسول و ریزکپسول، فناوری ریزآوندی[4] توسعه یافت (Tabaković et al., 2016). با این حال، فناوری ریزآوندی همچنان عمدتاً در مقیاس آزمایشگاهی در حال بررسی است.

با وجود این، روش کپسوله‌سازی عامل احیاکننده باید به‌درستی توسعه یافته و ارزیابی شود تا کاربرد مؤثر آن در آسفالت تضمین گردد. قابلیت نفوذ عامل احیاکننده در قیر پیرشده برای اثربخشی فرایند خودترمیمی بسیار حیاتی است و نیازمند توجه ویژه است (Shu et al., 2018). فرایند تولید نیز برای اطمینان از عملکرد مناسب کپسول‌ها یا الیاف حاوی عامل احیاکننده اهمیت زیادی دارد. همچنین، شناسایی و ارزیابی کپسول‌ها یا الیاف سنتزشده برای تعیین قابلیت اجرایی آن‌ها هنگام ادغام در مخلوط آسفالتی ضروری است (Sun et al., 2017).

۲-مکانیزم پیرشدگی

به‌دلیل فرایند پیرشدگی قیر و افزایش متناظر ویسکوزیته آن، سختی روسازی آسفالتی در طول عمر بهره‌برداری افزایش می‌یابد. توصیف کلی و مرتبه‌صفر پیرشدگی را می‌توان در قالب یک سازوکار کلی بیان کرد که طی آن بخشی از محیط مالتنی به فاز آسفالتنی تبدیل می‌شود و در نتیجه، مقدار آسفالتن افزایش و مقدار مالتن کاهش می‌یابد. این امر، به‌دلیل برهم‌کنش‌های قطبی-قطبی قوی‌تر میان آسفالتن‌ها، موجب افزایش ویسکوزیته و کاهش شکل‌پذیری می‌شود. به بیان ساده‌تر، همان‌گونه که جی. پیترسن (Peterson, 2000) به‌زیبایی تشریح کرده است: هنگامی که میسل‌های آسفالتی تحرک کافی برای عبور و لغزش از کنار یکدیگر تحت تنش اعمال‌شده را نداشته باشند، مقاومت قیر آسفالتی در برابر ترک‌خوردگی یا شکست کاهش می‌یابد.

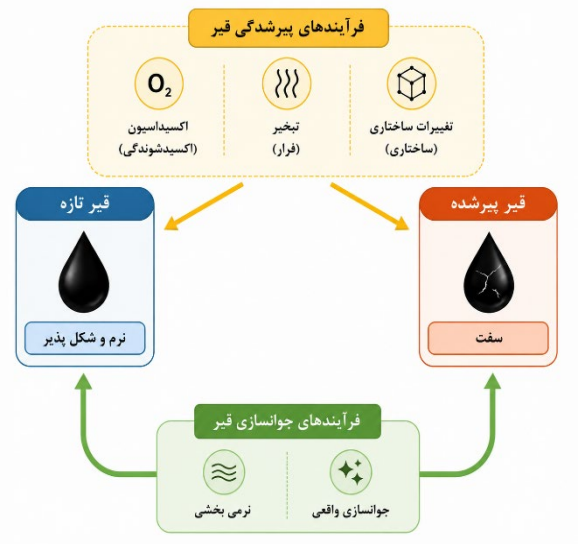
با این حال، پیرشدگی فرایندی پیچیده‌تر است که شامل زیرسازوکارهای مختلفی می‌شود و این زیرسازوکارها معمولاً در مقیاس‌های زمانی متفاوتی رخ می‌دهند. این فرایند می‌تواند از همان مرحله اجرای آسفالت، از طریق تبخیر اجزای سبک موجود در مالتن، آغاز شود. سپس پیرشدگی بلندمدت در شرایط میدانی، در نتیجه فرایندهای مختلف زیر رخ می‌دهد:

-پیرشدگی اکسیداتیو، ناشی از تغییر در ترکیب شیمیایی به‌واسطه واکنش میان اجزای قیر و اکسیژن اتمسفر.

-پیرشدگی تبخیری، ناشی از تبخیر اجزای با وزن مولکولی پایین موجود در مالتن. این ترکیبات فشار بخار بالاتری دارند و تا حدی فرّار هستند؛ بنابراین می‌توانند از فاز مالتنی خارج شوند و نه‌تنها موجب تغییر ترکیب آن، بلکه باعث کاهش کلی مقدار مالتن در قیر شوند.

-پیرشدگی ساختاری، ناشی از واکنش شیمیایی میان اجزای مولکولی که منجر به پلیمریزاسیون و در پی آن تشکیل ساختاری درون قیر می‌شود؛ پدیده‌ای که با عنوان تیکسوتروپی شناخته می‌شود (Roberts et al., 1996).

فرایندهای دخیل در این پدیده به‌صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.



شکل ۱. شماتیک فرآیندهای اصلی مؤثر در پیرشدگی قیر و احیای آن

۳-مکانیزم جوان‌سازی قیر

جوان‌ساز[۵] به ماده‌ای گفته می‌شود که توانایی بازگرداندن خواص رئولوژیکی اولیه قیر را داشته باشد. بنابراین، انتظار می‌رود عملکرد اصلی یک جوان‌ساز، کاهش سفتی و گرانروی قیر و افزایش شکل‌پذیری یا کشسانی آن باشد. با توجه به اینکه فرایند پیرشدگی قیر شامل سازوکارهای مختلف و تا حدی وابسته به یکدیگر است، نخستین اقدام برای بازیابی خواص رئولوژیکی قیر، اصلاح نسبت میان آسفالتن‌های جامد و مالتن‌های سیال است؛ به‌گونه‌ای که مقدار مالتن‌ها افزایش یافته و تعادل اولیه ساختار قیر تا حدی بازگردانده شود (Peterson, 2000; Roberts et al., 1996; Fernandez-Gomez, Randon Quintana & Reyes Lizcano, 2013; Baradaran et al., 2023).

با این حال، مواد جوان‌ساز رئولوژیکی می‌توانند از طریق سازوکارهای متفاوتی عمل کنند. به طور کلی، این مواد را می‌توان به دو گروه اصلی تقسیم کرد:

-عامل نرم‌کننده یا فلاکسینگ: وادی مانند روغن‌های فلاکس، روغن‌های روانکار، روغن‌های دوغابی و ترکیبات مشابه که عمدتاً باعث کاهش گرانروی قیر پیرشده می‌شوند.

-جوان‌ساز واقعی: ماده‌ای که علاوه بر بهبود خواص رئولوژیکی، می‌تواند بخشی از خواص فیزیکی و شیمیایی قیر را نیز بازسازی کند.

در بسیاری از منابع علمی، تفاوت دقیقی میان این دو نوع سازوکار قائل نمی‌شوند و معمولاً هر افزودنی‌ای که بتواند تا حدی خواص رئولوژیکی قیر پیرشده را بهبود دهد، «جوان‌ساز» نامیده می‌شود. با این حال، برای درک دقیق‌تر عملکرد این مواد، لازم است میان «جوان‌ساز رئولوژیکی» و «جوان‌ساز واقعی» تمایز قائل شویم. جوان‌ساز رئولوژیکی به هر نوع افزودنی گفته می‌شود که بتواند بخشی از ویژگی‌های رئولوژیکی قیر، مانند گرانروی، سختی و شکل‌پذیری را بهبود بخشد. اما اگر این ماده بتواند ساختار داخلی قیر، به‌ویژه ساختارهای سلسله‌مراتبی آسفالتن‌ها را نیز بازسازی کند، در آن صورت به عنوان جوان‌ساز واقعی شناخته می‌شود(Peterson, 2000; Roberts et al., 1996; Fernandez-Gomez, Randon Quintana & Reyes Lizcano, 2013; Baradaran & Ameri, 2025).

از سوی دیگر، اگر افزودنی تنها با وارد کردن ترکیبات روغنی به بخش مالتنی قیر باعث نرم‌تر شدن، افزایش شکل‌پذیری و کاهش شکنندگی قیر شود، بدون آنکه ساختار پیچیده اولیه قیر را بازسازی کند، بهتر است آن را عامل نرم‌کننده یا فلاکسینگ بنامیم. بنابراین، اصطلاح «جوان‌ساز رئولوژیکی» مفهومی گسترده‌تر دارد و همان معنایی را پوشش می‌دهد که معمولاً در ادبیات علمی برای واژه «جوان‌ساز» به کار می‌رود. در مقابل، زمانی که هدف اشاره به ماده‌ای باشد که واقعاً ساختار قیر را بازسازی می‌کند، باید از اصطلاح «جوان‌ساز واقعی» استفاده شود.

جوان‌سازهای رئولوژیکی معمولاً بر پایه روغن‌ها ساخته می‌شوند؛ مانند عصاره‌های روغن روانکار و روغن‌های توسعه‌دهنده. این مواد حاوی مقدار مناسبی از اجزای مالتنی، به‌ویژه ترکیبات نفتنیک یا آروماتیک قطبی هستند. این ترکیبات می‌توانند ترکیب شیمیایی قیر پیرشده را به نفع اجزایی که در طول ساخت، اجرا و بهره‌برداری از دست رفته‌اند، دوباره متعادل کنند (Peterson, 2000; Roberts et al., 1996; Fernandez-Gomez, Randon Quintana & Reyes Lizcano, 2013; Baradaran & Ziaee, 2025b).

یک ماده جوان‌ساز مناسب باید دو ویژگی اصلی داشته باشد:

-دارای مقدار بالایی از ترکیبات آروماتیک باشد، زیرا این ترکیبات برای پراکنده نگه داشتن آسفالتن‌ها در قیر ضروری هستند.

-دارای مقدار کمی از ترکیبات اشباع باشد، زیرا ترکیبات اشباع با آسفالتن‌ها سازگاری کمی دارند و می‌توانند پایداری ساختار قیر را کاهش دهند.

در نتیجه، عملکرد مؤثر یک جوان‌ساز تنها به نرم کردن قیر محدود نمی‌شود، بلکه به توانایی آن در بازگرداندن تعادل میان اجزای شیمیایی قیر، بهبود خواص رئولوژیکی و در حالت ایده‌آل، بازسازی ساختار داخلی قیر بستگی دارد (Peterson, 2000; Roberts et al., 1996; Fernandez-Gomez, Randon Quintana & Reyes Lizcano).

٤-جوان‌سازها و انواع آن

عامل‌های بازیافت از بایو روغن‌ها یا روغن‌های روان‌کننده تهیه می‌شوند. نوع بایو روغن، منبع مناسبی برای مالتن‌ها به شمار می‌آید. اهمیت ایجاد محیط زیست پایدار، باعث محبوبیت بایو روغن‌ها شده است، زیرا این روغن‌ها دوستدار محیط زیست

بوده و به رشد اقتصادی مثبت کمک می‌کنند (Raouf & Wiliams, 2010).

در یک مطالعه مروری، منابع مختلف بایو روغن هادر قیرها و مخلوط‌های آسفالتی ارزیابی شدند. نتایج نشان دادند که بسیاری از بایو روغن هامورد استفاده در فناوری بیو–آسفالت، میزان رطوبت بالایی دارند، به‌ویژه آن‌هایی که منشاء گیاهی دارند. این میزان بالای رطوبت بر ویژگی‌های چسبندگی و انسجام بیو–آسفالت و مخلوط‌ها تأثیر می‌گذارد و در نتیجه حساسیت آن‌ها به رطوبت افزایش می‌یابد. تحقیقات بیشتری توصیه می‌شود تا روش‌های پایدار برای کاهش قابل‌توجه رطوبت در بایو روغن هامورد استفاده در فناوری بیو–آسفالت توسعه یابد (Al-Sabaeei et al., 2020).

روغن پخت و پز را می‌توان از منابع مختلف بازیافت کرده و با مخلوط آسفالت ترکیب نمود. این روغن بسته به منطقه جغرافیایی متفاوت است؛ به‌عنوان مثال در ایالات متحده، روغن سویا موجود است، چربی‌های حیوانی در چین و کانادا، روغن سویا و کانولا در انگلستان و روغن نخل در مالزی و اندونزی تولید می‌شود (Kamaruddin et al., 2014a). در یک مطالعه پیشین، انواع مختلفی از روغن‌ها، شامل روغن زیتون خام (VOO)، روغن پخت و پز خام و ضایعات و روغن موتور خام و ضایعات، با قیر PEN ۴۰/۳۰ در درصد ثابت ٤ درصد برای همه انواع روغن‌ها ترکیب شدند. برای ادغام این عوامل جوانساز با قیر پیرشده، روش مرطوب به کار گرفته شد و آزمایش‌های متعددی در آزمایشگاه انجام گردید. نتایج مربوط به خواص فیزیکی نشان دادند که VOO، روغن‌های پخت و پز خام و ضایعات در بازگرداندن قیر پیرشده مؤثر بودند. از سوی دیگر، روغن‌های موتور خام و ضایعات نیاز به دوز بالاتری برای بازیابی قیر پیرشده داشتند. همان مطالعه توصیه کرد که پیش از استفاده از روغن در صنعت آسفالت، خواص فیزیکی آن مانند ویسکوزیته، نقطه اشتعال و از دست رفتن حین حرارت‌دهی بررسی شود تا ایمنی و سازگاری آن تضمین گردد (Bilema et al., 2021).

روغن موتور از تقطیر نفت خام تولید می‌شود و می‌تواند به‌عنوان جوانساز برای بازیابی قیر پیرشده مورد استفاده قرار گیرد (Kamaruddin et al., 2014b). برای بازگرداندن قیر پیرشده، هر دو نوع روغن موتور خام و ضایعات به‌عنوان عامل بازیافت با دوز بالاتر نسبت به سایر جوانسازها استفاده می‌شوند (Baradaran & Aliha, 2025 ;Bilema et al., 2021).

سایر انواع جوانسازها، شامل Hydrogreen، Road Science، Arizona Chemical، SonneWarmix RJT، BituTech RAP و Sonne-Warmix RJ توسط بخش تجاری تولید می‌شوند تا فرآیند بازیابی آسفالت پیرشده را بهبود بخشند (Im, Karki & Zhou, 2016; Mogawer et al., 2013). جداول ۱، ۲ و ۳ تأثیرات عوامل بازیافت مختلف بر قیر و مخلوط آسفالتی را نشان می‌دهند.

یک مطالعه نتیجه‌گیری کرده است که افزایش سطح اسیدی در جوانسازها کیفیت آن‌ها را کاهش داده و عملکرد قیر را به‌طور منفی تحت تأثیر قرار می‌دهد (Zhang et al., 2017).

میزان بهینه جوان‌سازها

دوز بهینه جوانساز ها باید انتشار مؤثر بین قیر بدون اصلاح و قیر RAP را فراهم کند تا رفتار آسفالت بهبود یابد. دوز ناکافی عامل بازیافت می‌تواند منجر به سفت شدن مخلوط شود، در حالی که مصرف بیش از حد جوانساز ممکن است باعث مشکلاتی مانند جداشدگی، شیارشدگی و کاهش چسبندگی شود. افزایش میزان جوانساز به‌طور خطی مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط RAP را کاهش می‌دهد. این موضوع اهمیت تعیین مقدار بهینه جوانساز برای ترکیب در مخلوط آسفالت را نشان می‌دهد (Nabizadeh et al., 2017; Cong et al., 2016).

طبق نظر Lin و همکاران (Lin et al., 2011)، یک جوانساز مناسب باید به‌طور مؤثر با قیر پیرشده RAP واکنش دهد و هم‌زمان یک مخلوط RAP با عملکرد بالا ایجاد کند و معیارهای انتشار کوتاه‌مدت و بلندمدت را برآورده سازد. لازم است تأکید شود که استفاده از مقدار مناسب جوانساز می‌تواند زاویه فاز و مدول پیچیده قیر احیاشده را نزدیک به قیر بدون اصلاح قرار دهد. برعکس، مقدار بالای عوامل بازیافت ممکن است مقاومت قیر در برابر شیارشدگی و توانایی آن برای بازیابی الاستیک را کاهش دهد. علاوه بر این، دوز بالای جوانساز ممکن است خواص چسبندگی قیر را تحت تأثیر قرار دهد و مشکلاتی مانند جداشدگی قیر از مصالح سنگی ایجاد کند (Zaumanis, Mallick & Frank, 2013).

این رویکرد با یک روش پایه در سال ۲۰۱۲ توسط Zagar و همکاران آغاز شد (Zargar et al., 2012)، که پیشنهاد می‌داد دوز بهینه جوانساز می‌تواند بر اساس میانگین نتایج آزمون‌های فیزیکی و رئولوژیکی محاسبه شود. در همان سال، پژوهشگران دیگر (Asli et al., 2012) از همان روش استفاده کرده و با تحلیل یک‌طرفه ANOVA توانایی تکنیک در بازیابی قیر پیرشده با دوز بهینه جوانساز را تأیید نمودند. در سال ۲۰۱٤، دو روش جدید توسط Zaumanis و همکاران ایجاد شد (Zaumanis, Mallick & Frank, 2014).

روش اول بر اساس نتایج نفوذپذیری بود و دوز جوانساز می‌توانست با استفاده از معادله (۱) محاسبه شود.

که در آن D نشان‌دهنده درصد دوز عامل بازیافت است؛ PEN میزان نفوذ را با واحد 10^{-1} میلی‌متر نشان می‌دهد؛ A نتیجه نفوذ بدون اصلاح است که متناظر با عرض از مبدأ تابع نمایی با واحد 10^{-1} میلی‌متر است و B یک ثابت است که از طریق روش کمترین مربعات با استفاده از نقاط داده موجود به‌دست آمده است.

روش دوم بر اساس آزمایش‌هایی در دماهای بالا، متوسط و پایین انجام شد که محاسبات به شرح زیر است:

حداکثر دوز عامل بازیافت باید تعیین شود تا دمای PG بالا مشخص‌شده مطابق معادله (۲) تأمین شود. دمای PG متوسط مطابق معادله (۳) محاسبه می‌شود و حداقل دوز عامل بازیافت باید برای تأمین دمای PG پایین مورد نیاز طبق معادله (٤) تعیین شود. مقدار بزرگ‌تر بین معادلات (۳) و (٤) به‌عنوان حداقل دوز در نظر گرفته می‌شود.

Max% نشان‌دهنده حداکثر دوز عامل بازیافت مورد نیاز برای دستیابی به هدف PG بالا به درصد وزن قیر است؛ Min% حداقل دوز عامل بازیافت مورد نیاز برای رسیدن به هدف PG پایین به درصد وزن قیر است؛ intermediate%حداقل دوز عامل بازیافت برای دستیابی به پارامتر PG متوسط، مجدداً به درصد جرم قیر است R% .دوز عامل بازیافت برای مخلوط آزمایشی را نشان می‌دهد.

M PG target دمای PG بالا مشخص‌شده به درجه سانتی‌گراد، M PG RAP دمای PG بالای RAP به درجه سانتی‌گراد، M PG trial دمای PG بالای مخلوط آزمایشی به درجه سانتی‌گراد، L PG target دمای PG پایین مشخص‌شده به درجه سانتی‌گراد، L PG RAP دمای PG پایین RAP به درجه سانتی‌گراد، L PG trial دمای PG پایین مخلوط آزمایشی به درجه سانتی‌گراد، I PG RAP مقدار Gsinδ در دمای PG متوسط Superpave برای RAP به کیلوپاسکال و I PG trialمقدار Gsinδ برای مخلوط آزمایشی در دمای PG متوسط Superpave به کیلوپاسکال است (Zaumanis, Mallick & Frank, 2014).

یک روش پیشرفته با استفاده از دماهای پایین قیر پیرشده (AB) توسعه یافته است، همان‌طور که در معادله (۵) نشان داده شده است. پیرشدگی عمدتاً بر رفتار قیر در دماهای پایین تأثیر منفی می‌گذارد؛ بنابراین، محدوده‌های ادغام بین ۰ و ٤ تعیین شد تا بر مقادیر مدول پیچیده در دماهای پایین با فرکانس‌های بالا تمرکز شود. در این معادله، RIشاخص احیا، G مدول پیچیده برای قیر احیاشده و Gمدول پیچیده برای قیر خام را نشان می‌دهد (Martin, Kaseer & Zhou, 2015).

جزئیات بیشتر درباره دوز جوانساز در جداول ۱ تا ۳ ارائه شده است.

$$D = \frac{\log \frac{PEN}{A}}{B} \quad (۱)$$

$$Max\,\% = \frac{(MPGtraget - MPGRAP) \times (-R\%)}{(MPGRAP - MPGtrial)} \quad (۲)$$

$$Intermediate\,\% = \frac{(5000 - IPG\ RAP) \times (-R\%)}{(I\ PGRAP - I\ PGtrial)} \quad (۳)$$

$$Min\,\% = \frac{(LPGtraget - LPGRAP) \times (-R\%)}{(LPGRAP - LPGtrial)} \quad (٤)$$

$$RI = \int_0^4 Log\ G\ rejuvenated \div \int_0^4 Log\ G\ Virgin \quad (۵)$$

روش‌های اختلاط جوانساز

ترکیب جوانساز با مخلوط RAP از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا اختلاط نامناسب می‌تواند اثربخشی جوانساز را کاهش دهد. بر اساس چندین مطالعه، انواع مختلفی از جوانسازها و روش‌های اختلاط برای مخلوط RAP وجود دارد. به‌طور کلی، سه تکنیک برای احیای قیر پیرشده وجود دارد: اختلاط عامل

بازیافت با RAP، کپسوله‌سازی و اسپری کردن عامل بازیافت روی سطح روسازی آسفالتی RSM[۶].

فرآیند اول که در دمای بالا (۱۳۰–۱۶۰ درجه سانتی‌گراد) انجام می‌شود، پرکاربردترین روش میان پژوهشگران و سازمان‌ها است. برای بهره‌گیری از مزایای عامل‌های بازیافت در کارخانه آسفالت، این مواد باید تحت شرایطی از جمله ویسکوزیته مناسب و نقطه اشتعال بالا مخلوط شوند (Zaumanis et al., 2019). پیشنهاد شده است که برای جبران کاهش ۳۰ درجه‌ای دمای اختلاط، مدت زمان اختلاط را دو تا سه برابر طول اصلی افزایش دهند تا سطح اختلاط مشابهی حاصل شود (Zhao et al., 2016).

فرآیند اختلاط، به‌ویژه مدت زمان آن، عامل حیاتی در تسهیل انتشار جوانساز در داخل قیر پیرشده و در نهایت بهبود خواص آن است. دوره کوتاه اختلاط می‌تواند منجر به عملکرد ضعیف مخلوط شود. بر اساس وضعیت RAP و نوع عامل بازیافت، انتشار کامل ممکن است به بازه زمانی ۴۸ تا ۱۴۴ ساعت نیاز داشته باشد. به‌طور کلی، طراحی ترکیب قیر شامل عامل بازیافت، یک کار حساس است که نیازمند توجه به عوامل متعدد برای جلوگیری از مشکلات عملکردی احتمالی در مخلوط آسفالتی می‌باشد (Xie et al., 2017).

فرآیند دوم، کپسوله‌سازی عامل‌های بازیافت برای خودترمیمی، می‌تواند گزینه‌ای مؤثر برای افزایش طول عمر روسازی‌های آسفالتی باشد. کپسول‌های مقاوم به حرارت قبل از فرآیند تراکم به‌HMA اضافه می‌شوند و هرگاه تنش در کپسول‌ها به آستانه تعیین‌شده برسد، شکسته شده و جوانساز را آزاد می‌کنند. کپسول‌ها باید به‌طور یکنواخت در مخلوط آسفالت پخش شوند و در برابر روش‌های اختلاط و تراکم مقاومت داشته باشند (Garcia, Austin & Jelfs, 2016).

فرآیند سوم، اسپری کردن، می‌تواند به‌عنوان استراتژی نگهداری پیشگیرانه بر روی روسازی‌های تازه ایجادشده زمانی که عمر روسازی پیرشده ۳–۴ سال است، به کار رود. این روش می‌تواند در تأخیر یا کند کردن پیشرفت ترک‌های سطحی مؤثر باشد. با نفوذ به فضاهای خالی روسازی، RSM می‌تواند به کاهش اکسیداسیون قیر کمک کند (Lin et al., 2012).

مکانیزم نفوذ اصلاح‌کننده‌ها در قیر پیرشده (AB) از طریق یک فرآیند مشخص انجام می‌شود: در ابتدا، جوانساز یک لایه با ویسکوزیته بسیار پایین در اطراف RAP تشکیل می‌دهد که منجر به ایجاد یک لایه پیرامونی کم‌ویسکوز می‌شود. سپس عامل جوانساز شروع به نفوذ در داخل قیر پیرشده می‌کند و آن را نرم می‌نماید. با پیشرفت نفوذ، ویسکوزیته لایه داخلی کاهش یافته، در حالی که لایه بیرونی افزایش می‌یابد. پس از یک بازه زمانی مشخص، تعادل ویسکوزیته حاصل می‌شود. میزان نفوذ جوانساز در قیر با افزایش دما و زمان افزایش می‌یابد. درجه نفوذ عامل جوانساز در داخل قیر از طریق ارزیابی نفوذپذیری و ترکیب شیمیایی قیر احیاشده اندازه‌گیری شد (Kuang et al., 2011). شناسایی ساختار شیمیایی پیچیده جوانساز با استفاده از آنالیز شیمیایی معمولی امکان‌پذیر نیست، که این موضوع نیاز به اتکا بر اندازه‌گیری خواص فیزیکی برای تعیین قابلیت اجرایی و قابلیت اعتماد جوانسازها را توجیه می‌کند (Tayh et al., 2014). جزئیات بیشتر در مورد روش اختلاط در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.

دو چالش اصلی مرتبط با افزودن جوانسازها به مخلوط‌های دارای مقدار بالای RAP عبارتند از: نفوذ جوانسازها به داخل قیر پیرشده و دستیابی به توزیع یکنواخت جوانسازها در مخلوط‌های با RAP زیاد (Baek, Underwood & Kim, 2012).

نفوذ جوانساز به قیر پیرشده در طول مراحل اختلاط و تراکم رخ می‌دهد، اما پس از یک بازه زمانی مشخص متوقف می‌شود. نرخ نفوذ در داخل قیر با ویسکوزیته مالتن افزایش می‌یابد که باعث افزایش حضور روغن می‌شود. با این حال، قیر سطح آسفالت که در معرض ترافیک خودرو قرار دارد، نیازمند مدت زمان قابل توجهی است تا روغن به‌طور کامل جذب شود (Raouf & Wiliams, 2010).

عملکرد قیر و مخلوط‌های احیاشده با جوان‌ساز

خصوصیات فیزیکی

آزمایش ویژگی‌های فیزیکی قیرهای آسفالتی بازیافتی، مانند ویسکوزیته، شکل پذیری، نقطه نرمی و نفوذپذیری، اهمیت زیادی دارد. چندین عامل بر ویژگی‌های قیر و مخلوط احیاشده تأثیر می‌گذارند، از جمله:

–نوع، منشاء و ویژگی‌های قیر بدون اصلاح،

–ویژگی‌های قیر پیرشده

–نوع و مقدار عامل جوانساز

–شرایط اختلاط و آماده‌سازی، شامل زمان اختلاط، دما، نرخ و روش ترکیب، ویژگی‌ها و مقدار مواد بازیافتی.

علاوه بر این، با توجه به اینکه هر دو ماده، قیر و جوانساز، نسبت به زمان و دما حساس هستند، اثرات جوانساز ممکن است تحت شرایط مختلف دما و بارگذاری متفاوت باشد. همچنین، سازگاری بین عامل جوانساز و قیر پیرشده و همچنین قیر بدون اصلاح، نقش محوری در تعیین ویژگی‌های محصول نهایی دارد (Elkashef, Wiliams & Cochran, 2019).

روغن پخت و پز ضایعاتی (WCO) به‌عنوان یک عامل جوانساز بالقوه برای قیر پیرشده به کار گرفته شد. تأثیر نسبت‌های مختلف روغن پخت و پز ضایعاتی (۱ تا ۵ درصد بر وزن قیر) بر ویژگی‌های قیر پیرشده ارزیابی شد. آزمایش‌هایی برای سنجش ویژگی‌های فیزیکی قیر پیرشده و احیاشده انجام شد. نتایج نشان داد که در قیر PEN۵۰/۴۰ ، افزودن ۳ الی ٤ درصد WCOمی‌تواند ویژگی‌های فیزیکی قیر تازه PEN ۱۰۰/۸۰ را تقریباً شبیه‌سازی کند (Elkashef, Wiliams & Cochran, 2019).

یک مطالعه مقایسه‌ای میان قیرهای متداول و قیرهای اصلاح‌شده با مواد زیستی نشان داد که این دو گروه از نظر خواص رئولوژیکی با یکدیگر تفاوت دارند. به‌طور خاص، قیرهای بیوآسفالتی دارای درجه نفوذ ۱۵۰/۱۰۰ بودند که نشان‌دهنده ماهیت نرم آن‌هاست. نتایج نشان داد که قیر بیوآسفالتی برای جایگزینی کامل قیر متداول مناسب نیست؛ اما به‌دلیل رفتار بسیار نرم خود، می‌تواند گزینه مناسب‌تری برای استفاده به‌عنوان اصلاح‌کننده قیرهای سفت باشد (Guarin et al., 2016).

جدول ۱ ویژگی‌های اصلی قیرهای احیاشده را نشان می‌دهد که شامل تمامی آزمایش‌های فوق است. تحلیل جدول ۱ نشان می‌دهد که افزودن عامل‌های بازیافت موجب افزایش شکل پذیری و نفوذپذیری و کاهش ویسکوزیته و نقطه نرمی می‌شود.

خواص رئولوژیکی

افزایش سفتی ناشی از اکسیداسیون را می‌توان به‌عنوان سخت‌شدگی اکسیداتیو یا پیرشدگی قیر توصیف کرد؛ فرایندی که تغییرات قابل‌توجهی در خواص رئولوژیکی ماده ایجاد می‌کند. دما بر نرخ پیرشدگی قیر و ویسکوزیته جوان‌سازها تأثیر می‌گذارد (Blanc et al., 2019). برای مثال، نرخ پیرشدگی روسازی در مناطق گرمسیری افزایش می‌یابد. اثر پیرشدگی موجب افزایش ویسکوزیته قیر می‌شود. همچنین، احتمال وقوع جدایش فازی می‌تواند به بروز مشکلات ناپایداری منجر شود که ناشی از شکست ریزاملوسیون و اثر واکنش‌های شیمیایی است (Quintana et al., 2013). وضعیت پیرشدگی قیرها را می‌توان به‌طور مؤثری از طریق ارزیابی خواص رئولوژیکی آن‌ها بررسی کرد.

خواص رئولوژیکی قیرهای آسفالتی با استفاده از رئومتر برشی دینامیکی یا DSR، قابل اندازه‌گیری است و نتایج معمولاً به‌صورت مدول برشی مختلط، یاG^* ، و زاویه فاز، یاδ ، گزارش می‌شوند. G^* بیانگر سختی و مقاومت قیر در برابر تغییر شکل تحت تنش برشی است، در حالی‌که δ نشان‌دهنده اختلاف فاز میان کرنش برشی اعمال‌شده و تنش برشی حاصل است. نسبت $G^*/\sin\delta$ به‌طور رایج به‌عنوان شاخص مقاومت قیر در برابر شیارشدگی در دماهای بالا به‌کار می‌رود (Fini et al., 2015).

در یک پروژه تحقیقاتی، سه نوع قیر اصلاح‌شده با بایوروغن تولید شد: بایو روغن اصلی (OB) بایو روغن آب‌زدایی‌شده (DWB) و قیر اصلاح‌شده با پلیمر (PMB). در این پژوهش از قیر پایه PG 58-28 و مقادیر ۵ و ۱۰ درصد وزنی بایو روغن تولیدشده از ضایعات چوب استفاده شد. برای ارزیابی عملکرد هر نمونه، معیارهای Superpave به‌کار گرفته شد. نتایج نشان داد که عملکرد قیر در دماهای بالا بهبود یافته است. قیر PMB بیشترین سختی را نشان داد و پس از آن، به‌ترتیب قیر DWB و قیر OB قرار گرفتند. قیر OB کمترین اثر را بر قیر پایه داشت (Yang, You & Dai, 2013).

در مطالعه مقایسه‌ای دیگری، سه نوع قیر با مواد جوانساز مختلف، شامل عامل بازیافت، روغن پسماند پخت‌وپز (WCO) و روغن بذر پنبه، در نسبت‌های مختلف صفر، ۵ و ۱۰ درصد بررسی شدند. نتایج نشان داد که پس از استفاده از جوان‌ساز، پارامترهای مقاومت در برابر شیارشدگی قیرهای احیاشده، که با نسبت $G^*/\sin\delta$ بیان می‌شوند، کاهش یافتند. به‌طور کلی، قیرهای حاوی عامل بازیافت از نظر مقاومت در برابر تغییر شکل و بازیابی الاستیک عملکرد بهتری نسبت به قیرهای حاوی WCOو روغن بذر پنبه نشان دادند. مقدار بهینه برای دستیابی به قیر با درجه عملکردی PG 64 ، برای هر دو ماده WCO و روغن بذر پنبه، برابر با ۵ درصد تعیین شد.

روغن آروماتیک (AO) روغن گیاهی (VO) و قیر نرم (SB) با درجه نفوذ ۲۲۰/۱۶۰، هر یک با سهم ٤۰ درصد، به‌عنوان عوامل جوان‌ساز برای قیر بازیافتی حاصل از RAP استفاده شدند. پیرشدگی تمام قیرها با استفاده از روش‌های پیرشدگی کوتاه‌مدت ($STA^{۷}$) و پیرشدگی بلندمدت (LTA) انجام شد. مقدار آسفالتن در قیرهای پیرشده معمولاً بسته به نوع قیر متفاوت است. یافته‌ها نشان داد که قیر RAP را می‌توان با استفاده از این عوامل به‌طور مؤثری برای کاربردهای بازیافت گسترده احیا کرد. در تمام نمونه‌های قیری، با افزایش دما، مقدار G^* کاهش و مقدار δ افزایش یافت. علاوه بر این، نتایج نشان داد که خواص خستگی قیرهای احیاشده نسبت به قیر اصلاح‌نشده بهبود یافته است (Dony et al., 2013). ویژگی‌های قیرهای احیاشده مختلف در جدول ۲ ارائه شده است.

از جدول ۲ می‌توان یک الگوی مشخص را مشاهده کرد: بیشتر جوان‌سازها موجب کاهشG^* ، افزایشδ ، کاهش مقاومت در برابر شیارشدگی و بهبود مقاومت در برابر خستگی می‌شوند.

جدول ۱. جمع‌بندی مطالعات پیشین در خصوص اثر نوع جوانساز و شرایط اختلاط بر خواص رئولوژیکی و فیزیکی قیر پیر و قیر پایه

جوانساز	نوع قیر	شرایط اختلاط	میزان استفاده شده (درصد وزنی قیر)	درجه نفوذ	نقطه نرمی	شکل پذیری	ویسکوزیته	مرجع
روغن خوراکی ضایعاتی	درجه نفوذی ۴۰/۵۰	۱۶۰ درجه سانتی گراد ۲۰۰ دور بر دقیقه ۳۰ دقیقه	۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ درصد وزنی کل قیر	افزایش	کاهش	–	کاهش	Su et al., 2015
روغن گیاهی روغن آروماتیک	قیر تراشه آسفالت بازیافتی	–	۳۰-۰ درصد وزنی کل قیر	افزایش	کاهش	–	–	Dony et al., 2013
روغن خوراکی ضایعاتی	درجه نفوذی ۴۰/۶۰	۱۳۵ درجه سانتی گراد ۵۰۰۰ دور بر دقیقه ۴۰ دقیقه	۲، ۴، ۶، ۸ درصد وزنی کل قیر	افزایش	کاهش	افزایش	کاهش	Sun et al., 2016
روغن گیاهی خوراکی ضایعاتی	قیرپیر شده	۱۳۰ درجه سانتی گراد ۱۲۰۰ دور بر دقیقه ۱۵ دقیقه	۳، ۴، ۵، ۶، ۷ درصد وزنی کل قیر	افزایش	کاهش	افزایش	کاهش	Chen et al., 2014
روغن گیاهی ضایعاتی	درجه نفوذی ۶۰/۷۰	۱۴۵ درجه سانتی گراد ۱۶۰۰ دور بر دقیقه ۵ دقیقه	۱، ۲، ۴، ۶، ۸ درصد وزنی کل قیر	افزایش	کاهش	افزایش	کاهش	Al-Omari, Khedaywi & Khasawneh, 2018
روغن ماهی روغن کلزا	درجه نفوذی ۱۶۰/۲۲۰	–	۷، ۷/۵، ۸ درصد وزنی کل قیر	افزایش	–	–	افزایش	Guarin et al., 2016
روغن گیاهی ضایعاتی	قیرپیر شده	۱۳۵ درجه سانتی گراد ۲۰۰۰ دور بر دقیقه ۱۵ دقیقه	۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی قیرپیر شده	افزایش	کاهش	افزایش	کاهش	Cao et al., 2018
روغن جاتروفا کورکاس[11]	درجه نفوذی ۴۰/۵۰	۱۵۵ درجه سانتی گراد ۶۰۰ دور بر دقیقه ۲۵ دقیقه	۱، ۳، ۵ درصد وزنی قیرپیر شده	افزایش	کاهش	کاهش	کاهش	Abdullahi Ahmad et al., 2017

جوانساز	نوع قیر	شرایط اختلاط	میزان استفاده شده (درصد وزنی قیر)	درجه نفوذ	نقطه نرمی	شکل پذیری	ویسکوزیته	مرجع
روغن خوراکی ضایعاتی	درجه نفوذی ۸۰/۱۰۰	۱۶۳ درجه سانتی گراد ۱۰۰۰ دور بر دقیقه ۶۰ دقیقه	درصد ۱، ۲، ۳ وزنی کل قیر	افزایش	–	–	کاهش	Rasman et al., 2018
روغن خوراکی ضایعاتی	قیرپیر شده	۱۳۰ درجه سانتی گراد ۲۰۰ دور بر دقیقه ۳۰ دقیقه	۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ درصد وزنی قیرپیر شده	افزایش	کاهش	–	کاهش	Raman et al., 2015
روغن خوراکی ضایعاتی	درجه نفوذی ۴۰/۵۰	۱۶۰ درجه سانتی گراد ۲۰۰ دور بر دقیقه ۳۰ دقیقه	۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ درصد وزنی قیرپیر شده	افزایش	کاهش	–	کاهش	Zargar et al., 2012

جدول ۲. مقایسه مطالعات پیشین در زمینه بهبود عملکرد مکانیکی قیر پیر و بازیافتی تحت تأثیر انواع جوانسازها و پارامترهای اختلاط

جوانساز	نوع قیر	شرایط اختلاط	میزان استفاده شده (درصد وزنی قیر)	مدول مختلط	زاویه فاز	مقاومت دربرابر شیارشدگی	عمر خستگی	مرجع
روغن سرخ‌کردنی ضایعاتی	قیر ترینیداد	۲۰۰ درجه سانتی گراد ۳۰۰۰ دور بر دقیقه	۲، ۴، ۶، ۸ و درصد ۱۰ وزنی کل قیر	کاهش	کاهش	کاهش	کاهش	Singh-Ackbarali et al., 2017
روغن بایو اصلی روغن بایو بدون آب روغن بایو پلیمری	PG ۵۸-۲۸	۱۳۰ درجه سانتی گراد ۵۰۰۰ دور بر دقیقه ۲۰ دقیقه	۵ و ۱۰ درصد وزنی کل قیر	–	–	افزایش	افزایش	Yang, You & Dai, 2013
مالتن[۱۲] و روغن موتور ضایعاتی	قیر تراشه آسفالت بازیافتی	۱۳۵ درجه سانتی گراد ۱۰۰۰ دور بر دقیقه ۱۵ دقیقه	۷/۵ درصد وزنی کل قیر	کاهش	افزایش	کاهش	–	Al-Saffar et al., 2020

جوانساز	نوع قیر	شرایط اختلاط	میزان استفاده شده (درصد وزنی قیر)	مدول مختلط	زاویه فاز	مقاومت دربرابر شیارشدگی	عمر خستگی	مرجع
روغن جاتروفا کورکاس	قیر پیرشده	–	۱، ۳، ۵ درصد وزنی قیرپیر شده	کاهش	افزایش	کاهش	–	Ahmad et al., 2018
روغن بایو	PG ۶۴-۲۲	–	۵ درصد وزنی کل قیر	کاهش	کاهش	افزایش	افزایش	
روغن بایو	قیر پیرشده	۱۳۵ درجه سانتی گراد ۷۵۰ دور بر دقیقه ۳۰ دقیقه	۱۰ درصد وزنی کل قیر	کاهش	افزایش	کاهش	–	Mills-Beale et al., 2014
روغن موتور روغن موتور ضایعاتی	قیر تراشه آسفالت بازیافتی	۱۵۰ درجه سانتی گراد ۶۰۰ دور بر دقیقه	۱۵ درصد وزنی کل قیر	کاهش	کاهش	کاهش	–	Kamaruddin et al., 2014
روغن خوراکی ضایعاتی	قیر تراشه آسفالت بازیافتی	۱۳۵ درجه سانتی گراد ۱۰دقیقه	۷ درصد وزنی کل قیر	کاهش	–	–	–	Orešković et al., 2017
روغن پولانگا[۱۳]	قیر تراشه آسفالت بازیافتی و قیرپیرشده	۱۵۰ درجه سانتی گراد ۵ دقیقه	۵، ۱۰، ۱۵ درصد وزنی کل قیر	کاهش	–	کاهش	–	Pradhan & Sahoo, 2019
روغن گیاهی ضایعاتی	قیر پیر شده	۱۳۵ درجه سانتی گراد ۲۰۰۰ دور بر دقیقه ۱۵ دقیقه	۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی قیرپیر شده	کاهش	–	کاهش	افزایش	Cao et al., 2018

عملکرد مکانیکی

مقاومت، دوام، عمر خستگی، شیارشدگی، سختی و آسیب رطوبتی در مخلوط آسفالتی گرم، HMA، همگی تحت تأثیر قیر قرار دارند؛ زیرا قیر یکی از مهم‌ترین اجزای تشکیل‌دهنده روسازی آسفالتی محسوب می‌شود. عملکرد مخلوط آسفالتی را می‌توان از طریق آزمون‌های مختلفی ارزیابی کرد؛ از جمله آزمون ردیابی چرخ هامبورگ (HWTT[۸]) آزمون مقاومت کششی غیرمستقیم، یاIDT/ITS ، آزمون خمش نیم‌دایره‌ای (SCB[۹]) آزمون تنش و کرنش حرارتی تک محوره (UTSST[۱۰]) آزمون خزش دینامیکی، آزمون خستگی تیر و سایر آزمون‌های عملکردی که در شرایط و دماهای مختلف انجام می‌شوند.

مطالعات متعددی بر ارزیابی آزمایشگاهی مخلوط‌های آسفالتی احیاشده متمرکز بوده‌اند و آزمون‌هایی را برای بررسی پاسخ مکانیکی آن‌ها در برابر انواع مهم خرابی، از جمله شیارشدگی، ترک‌خوردگی و خستگی، انجام داده‌اند. نتایج نشان داده است که افزودن جوان‌سازها امکان تولید مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۱۰۰ درصد RAP را فراهم می‌کند. این امر می‌تواند موجب بهبود رفتار خستگی مخلوط‌ها شود؛ هرچند در برخی موارد مقاومت آن‌ها در برابر شیارشدگی کاهش می‌یابد. پژوهشگران گزارش کرده‌اند که ترکیب روغن پسماند و جوان‌ساز با مخلوط‌های حاوی RAP می‌تواند عملکرد بهتری نسبت به مخلوط‌های متداول ارائه دهد (Kaseer et al., 2020; Im et al., 2014; Nazzal et al., 2015). جدول ۳ اثر انواع مختلف جوان‌سازها بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی را خلاصه کرده است.

مقاومت در برابر شیارشدگی

شیارشدگی یکی از خرابی‌های رایج و قابل‌توجه در روسازی‌های آسفالتی است و از دیدگاه ایمنی راه، یکی از نگرانی‌های اصلی محسوب می‌شود. مقاومت قیر بیوآسفالتی در برابر شیارشدگی با افزودن انواع مختلف جوان‌سازها کاهش یافت (Foroutan et al., 2019). تاکنون آزمایش‌های محدودی برای پیش‌بینی عملکرد شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی احیاشده انجام شده است؛ از جمله آزمون ردیابی چرخ در دماهای مختلف و آزمون تغییر شکل دائمی. با این حال، تنها تعداد اندکی از پژوهشگران عملکرد شیارشدگی این مخلوط‌ها را بررسی کرده‌اند.

Im و همکاران (Im, Karki & Zhou, 2016) آزمون ردیابی چرخ هامبورگ (HWTT) را در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام دادند و نتایج آن‌ها نشان‌دهنده کاهش مقاومت شیارشدگی در اثر افزودن جوان‌ساز بود. Kaseer و همکاران (Kaseer et al., 2020) نیز مشاهده کردند که استفاده از جوان‌سازها موجب کاهش مقاومت مخلوط در برابر شیارشدگی می‌شود. این یافته با نتایج Foroutan و همکاران (Foroutan et al., 2019) همخوانی داشت؛ آنان نشان دادند که افزایش غلظت روغن هسته خرما باعث کاهش مقاومت در برابر شیارشدگی می‌شود.

استفاده از روغن روان‌کار به‌عنوان جوان‌ساز می‌تواند حساسیت مخلوط آسفالتی به شیارشدگی را افزایش دهد. تحت شرایط شبیه‌سازی‌شده پیرشدگی کوتاه‌مدت (STA) سختی و پایداری مخلوط کاهش یافته و در نتیجه، میزان تغییر شکل دائمی و شیارشدگی افزایش می‌یابد. این اثر به‌ویژه در مقادیر مصرف بالاتر جوان‌ساز برجسته‌تر است (Espinoza-Luque, Al-Qadi & Ozer, 2018).

در یک مطالعه، از ۶۰ درصد و ۱۰۰ درصد RAP تفکیک‌شده در ترکیب با روغن پسماند پخت‌وپز (WCO) و خرده‌لاستیک برای ارزیابی مقاومت در برابر شیارشدگی استفاده شد. تحلیل نتایج نشان داد که افزایش مقدار جوان‌سازها در مخلوط‌های حاوی درصد بالای RAP موجب کاهش مقاومت در برابر شیارشدگی می‌شود (Majidifard, Tabatabaee & Buttler, 2019). بنابراین، جوان‌سازها ممکن است احتمال بروز شیارشدگی را افزایش دهند؛ با این حال، این اثر را می‌توان از طریق اصلاح جوان‌سازها با پلیمرها یا نانومواد کاهش داد.

جدول ۳. مقایسه اثر انواع جوانسازها بر بهبود یا تضعیف عملکرد مکانیکی، دوام رطوبتی و رفتار تغییرشکل دائمی مخلوط‌های آسفالتی در مطالعات پیشین

جوانساز	میزان استفاده شده (درصد وزنی قیر)	خصوصیات مکانیکی	مرجع
روغن موتور ضایعاتی روغن تال تقطیرشده هیدروگرین روغن گیاهی ضایعاتی گریس گیاهی ضایعاتی عصاره آروماتیک	۱۲ درصد وزنی مخلوط	بهبود مقاومت در برابر رطوبت، افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی، تولید مخلوط آسفالت مشابه مخلوط دست‌نخورده، افزایش کارایی مخلوط	Zaumanis et al., 2014
هیدروگرین[14]	۲، ۵ و ۱۰ درصد وزنی قیر	کاهش مقاومت در برابر شیارشدگی	Im, Karki & Zhou, 2016
سایکلوژن[15]	۱۲ و ۲۰ درصد وزنی قیر تراشه آسفالت بازیافتی	اثر قابل توجه روی مقاومت در برابر رطوبت، کاهش مقاومت در برابر شیارشدگی	Tran, Taylor & Willis, 2014
روغن سرخ‌کردنی ضایعاتی	۲۵ درصد وزنی قیر	کاهش مقاومت کششی غیرمستقیم با افزودن روغن سرخ‌کردنی ضایعاتی، رعایت الزاماتTSR	Eriskin et al., 2017
روغن آروماتیک روغن پارافینی روغن آلی	٤، ۹ و ۱۳ درصد	اثر قابل توجه روی مقاومت در برابر رطوبت، کاهش مقاومت در برابر شیارشدگی، تولید مخلوط آسفالتی مشابه مخلوط تازه	Mogawer et al., 2016
روغن بایو اصلی روغن بایو بدون آب روغن بایو پلیمری	۵ و ۱۰ درصد وزنی قیر	تأثیر جزئی روی مقاومت کششی غیرمستقیم، بدون اثر قابل توجه روی مدول دینامیک و مقاومت در برابر شیارشدگی، بهبود رفتار خستگی	Yang et al., 2014
روغن هسته خرما[16]	۵ و ۱۰ درصد وزنی مخلوط	حداقل تأثیر روی مقاومت در برابر رطوبت، کاهش مقاومت در برابر شیارشدگی و مدول سفتی، که منجر به تولید مخلوط آسفالتی با کیفیت مشابه مخلوط تازه می‌شود.	Foroutan et al., 2019
روغن گیاهی ضایعاتی روغن تال عصاره آروماتیک	۰/۸، ۱/۲، ۲، ۲/۷، ۳/۵، ۵/۵، ٦، ٦/۵، ۸، ۹، ۹/۵ و ۱۰ درصد	کاهش مقاومت در برابر شیارشدگی و مدول برجهندگی	Kaseer et al., 2020
روغن موتور ضایعاتی	٤ و ۸ درصد وزنی مخلوط	کاهش مقاومت کششی غیرمستقیم، رعایت الزامات TSR، کاهش مقاومت در برابر شیارشدگی	DeDene & You, 2014
روغن آفتابگردان	۵ درصد وزنی مخلوط	کاهش مقاومت کششی غیرمستقیم، کاهش مدول سفتی	Garcia, Austin & Jelfs, 2016
روغن سرخ‌کردنی ضایعاتی	۲/۷ و ٤/٦ درصد وزنی مخلوط	کاهش مقاومت کششی غیرمستقیم و مدول برجهندگی در حالی که مقاومت در برابر شیارشدگی و رفتار تغییر شکل دائمی به سطحی مشابه مخلوط آسفالتی تازه بازگردانده می‌شود، رعایت الزاماتTSR	Bilema et al., 2021
روغن خوراکی ضایعاتی	۱۰، ۱۳ و ۱٦ درصد وزنی قیر	افزایش کارایی مخلوط و عملکرد در دماهای پایین، رعایت حداقل الزامات TSR	Majidifard, Tabatabaee & Buttlar, 2019
روغن آفتابگردان ضایعاتی	٤، ۸، ۱٦، ۱۸ و ۲۰ درصد وزنی قیر	رعایت الزامات TSR، کاهش مقاومت در برابر خستگی	Rodrigues et al., 2020

جوانساز	میزان استفاده شده (درصد وزنی قیر)	خصوصیات مکانیکی	مرجع
روغن خوراکی ضایعاتی تصفیه شده روغن خوراکی ضایعاتی تصفیه نشده	۵ درصد وزنی قیر	افزایش سفتی خزشی با روغن تصفیه‌شده، روغن بدون تصفیه منجر به کاهش سفتی خزشی می‌شود.	Lopa et al., 2018
روغن خوراکی ضایعاتی	۱۰ و ۳۰ درصد وزنی قیر	کاهش همزمان مدول دینامیکی و مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط، رعایت حداقل الزامات TSR	Wen, Bhusal & Wen, 2013
روغن سویا اپوکسیده	۷ درصد وزنی مخلوط	افزایش مقاومت در برابر خستگی، ترک خوردگی و رطوبت، کاهش مقاومت در برابر شیارشدگی	Kuang et al., 2018
روغن پارافینی روغن آلی	۰/۵ درصد وزنی مخلوط	تأثیر منفی روی مقاومت در برابر شیارشدگی، بهبود طول عمر خستگی مخلوط	Nazzal et al., 2015

مقاومت در برابر رطوبت

وجود آب یا رطوبت در روسازی می‌تواند موجب بروز آسیب رطوبتی در مخلوط آسفالتی گرم یاHMA، شود. این شرایط ممکن است به عریان‌شدگی مصالح سنگی، یعنی جداشدگی قیر از سطح مصالح سنگی، منجر شود و در نهایت باعث ایجاد چاله‌زدگی و کاهش ایمنی ترافیک گردد. نسبت مقاومت کششی (TSR[۱۷]) شاخصی برای ارزیابی مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر آسیب ناشی از رطوبت است. بنابراین، مخلوط‌های آسفالتی باید از مقاومت کافی در برابر آسیب رطوبتی برخوردار باشند (Eriskin et al., 2017).

در یک مطالعه، اثر انواع مختلف جوان‌سازها بر ویژگی‌های عملکردی مخلوط‌های HMA حاوی مصالح آسفالتی بازیافتی، یاRAP ، بررسی شد. نتایج نشان داد که افزودن جوان‌سازها می‌تواند مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی حاوی RAP را بهبود بخشد Majidifard و همکاران (Majidifard, Tabatabaee & Buttler, 2019) نشان دادند که مخلوط آسفالتی احیاشده مقاومت کافی در برابر آسیب رطوبتی دارد و حداقل معیارهای مربوط به TSR را برآورده می‌کند Rodriguesو همکاران (Rodrigues et al., 2020) از روغن پسماند آفتابگردان برای احیای قیر پیرشده استفاده کردند و گزارش دادند که مخلوط احیاشده توانست معیار TSR ≥ ۸۰٪ را تأمین کند.

در پژوهش‌های مشابه، بررسی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی با درصدهای مختلف RAP و جوان‌سازها نشان داد که افزودن RAP می‌تواند دوام رطوبتی مخلوط را افزایش دهد (Yan et al., 2014). بنابراین، همان‌گونه که در جدول ۳ نشان داده شده است، افزودن جوان‌سازها موجب بهبود مقاومت رطوبتی مخلوط و افزایش آن فراتر از حداقل مقدار مورد نیاز TSRمی‌شود.

مقاومت در برابر خستگی

خرابی خستگی یکی از رایج‌ترین شکل‌های تخریب در روسازی‌های آسفالتی، به‌ویژه در مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی، محسوب می‌شود. مقاومت در برابر ترک‌خوردگی خستگی معمولاً با افزودن مصالح آسفالتی پیرشده و بازیافتی کاهش می‌یابد. بنابراین، بررسی رفتار مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی احیاشده با جوان‌سازهای بایو در برابر ترک‌خوردگی خستگی از اهمیت بالایی برخوردار است (Yang et al., 2014).

Nazzal و همکاران (Nazzal et al., 2015) مطالعه‌ای را در زمینه مقاومت خستگی مخلوط‌های آسفالتی احیاشده انجام دادند. در این پژوهش، از آزمون خستگی در فرکانس ۱۰ هرتز و دمای ۲۱ درجه سانتی‌گراد استفاده شد. نتایج نشان داد که استفاده از جوان‌سازها، مقاومت مخلوط‌های حاوی ۵۰ درصد مصالح آسفالتی بازیافتی،RAP، را در برابر ترک‌خوردگی خستگی به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. نمونه مشابهی از بهبود مقاومت خستگی توسط Yang و همکاران (Yang et al.,

2014) نیز گزارش شد؛ به‌طوری‌که افزودن بایو روغن موجب افزایش چشمگیر مقاومت خستگی مخلوط آسفالتی شد.
مطالعه‌ای دیگر نشان داد که استفاده از RAP و جوان‌سازها در ابتدا موجب افزایش عمر خستگی مخلوط می‌شود، اما با افزایش درصدRAP ، عمر خستگی روند کاهشی پیدا می‌کند (Yan et al., 2014). استفاده از روغن سویای اپوکسی‌شده (ESO) همراه با جوان‌ساز متداول، از طریق تسهیل نفوذ جوان‌ساز متداول در قیر پیرشده، موجب بهبود عمر خستگی مخلوط بازیافتی شد. هنگامی که ESO به میزان ۷ درصد نسبت به وزن جوان‌ساز متداول به مخلوط آسفالتی افزوده شد، عمر خستگی آن تقریباً به عمر خستگی مخلوط شاهد اصلاح‌نشده، ساخته‌شده با همان قیر بکر و مصالح سنگی، نزدیک شد (Kuang et al., 2018). جدول ۳ نشان می‌دهد که استفاده از جوان‌سازها موجب بهبود عملکرد مخلوط در برابر ترک‌خوردگی خستگی می‌شود.

۵-نتیجه‌گیری

بررسی جامع مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که استفاده از مصالح آسفالتی بازیافتی در مخلوط‌های آسفالتی، یکی از رویکردهای مؤثر و راهبردی برای حرکت به‌سوی روسازی‌های پایدار، کاهش مصرف مصالح خام، کاهش هزینه‌های اجرایی و محدود کردن پیامدهای زیست‌محیطی صنعت راه‌سازی است. با این حال، حضور قیر پیرشده در مصالح آسفالتی بازیافتی، به دلیل افزایش ویسکوزیته، کاهش اجزای مالتنی، افزایش سهم آسفالتن‌ها و کاهش شکل‌پذیری، می‌تواند موجب افزایش سفتی مخلوط، افت مقاومت در برابر ترک‌خوردگی و بروز چالش‌های دوام در روسازی شود. از این رو، استفاده از جوانسازها نه یک انتخاب جانبی، بلکه ضرورتی فنی برای بهره‌گیری مؤثر از درصدهای بالای مصالح آسفالتی بازیافتی محسوب می‌شود. نتایج مرور منابع نشان می‌دهد که جوانسازها با اصلاح تعادل شیمیایی و رئولوژیکی قیر پیرشده، می‌توانند بخشی از خواص از دست‌رفته قیر را بازیابی کنند. این مواد معمولاً موجب افزایش نفوذپذیری و شکل‌پذیری، کاهش ویسکوزیته، کاهش نقطه نرمی و کاهش مدول مختلط قیر پیرشده می‌شوند و از این طریق، رفتار قیر را به قیر تازه نزدیک‌تر می‌کنند. از دیدگاه عملکردی نیز افزودن جوانسازها می‌تواند مقاومت مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی را در برابر ترک‌خوردگی، خستگی و آسیب رطوبتی بهبود دهد و امکان استفاده گسترده‌تر از مصالح بازیافتی را در پروژه‌های روسازی فراهم سازد.با وجود مزایای یادشده، عملکرد جوانسازها کاملاً وابسته به نوع ماده، ترکیب شیمیایی، مقدار مصرف، روش اختلاط، دمای فرایند و زمان لازم برای نفوذ در قیر پیرشده است. مصرف ناکافی جوانساز نمی‌تواند سفتی قیر پیرشده را به‌طور مؤثر اصلاح کند، در حالی که مصرف بیش از حد آن ممکن است باعث کاهش مقاومت در برابر شیارشدگی، افت چسبندگی میان قیر و مصالح سنگی، افزایش حساسیت به تغییر شکل دائمی و حتی بروز جداشدگی در مخلوط شود. بنابراین، دستیابی به عملکرد مطلوب تنها زمانی امکان‌پذیر است که دوز بهینه جوانساز بر اساس آزمون‌های فیزیکی، رئولوژیکی و مکانیکی تعیین شود و فرآیند اختلاط به گونه‌ای کنترل گردد که توزیع یکنواخت و نفوذ کافی جوانساز در قیر پیرشده حاصل شود. در مجموع، می‌توان نتیجه گرفت که جوانسازها ابزار مؤثری برای ارتقای عملکرد مخلوط‌های آسفالتی حاوی مصالح بازیافتی هستند، اما کارایی آنها وابسته به طراحی علمی و کنترل‌شده مخلوط است. استفاده موفق از این مواد مستلزم ایجاد توازن میان بهبود انعطاف‌پذیری و مقاومت در برابر ترک‌خوردگی از یک سو، و حفظ مقاومت در برابر شیارشدگی و دوام رطوبتی از سوی دیگر است. همچنین، توسعه جوانسازهای بایو، استفاده از روش‌های نوین مانند کپسوله‌سازی و ارزیابی دقیق رفتار بلندمدت مخلوط‌های احیاشده می‌تواند مسیر آینده تحقیقات را به سمت تولید روسازی‌های هوشمند، پایدار و بادوام هدایت کند. بر این اساس، انتخاب جوانساز مناسب، تعیین مقدار بهینه و کنترل شرایط اجرایی باید به عنوان سه محور اصلی در طراحی مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی مورد توجه قرار گیرد.

۶-پی‌نوشت‌ها

1. Reclaimed Asphalt Pavements
2. Long-Term Aging
3. Hot Mix Asphalt
4. Microvascular
5. Rejuvenators
6.Rejuvenator Seal Material
7. Short-Term Aging
8. Hamburg Wheel Tracking Test
9. Semicircular Bending Test
10. Uniaxial Thermal Stress and Strain Test
11.Jatropha Curcas oil
12.Maltene
13. Polanga
14.Hydrogreen
15. Cyclogen
16.Date seed oil
17.Tensile Strength Ratio

۷-مراجع

-Abdullahi Ahmad, K., Ezree, A. M., Abdul Hassan, N., Usman, N., & Ambak, K. (2017). Investigating the feasibility of using jatropha curcas oil (JCO) as bio based rejuvenator in reclaimed asphalt pavement (RAP). In MATEC Web of Conferences - International Symposium on Civil and Environmental Engineering. *Malaysia. EDP Sciences.*

-Ahmad, K. A., Abdullah, M. E., Hassan, N. A., Usman, N., Mohd Hassan, M. R., Bilema, M. A. M., et al. (2018). Effect of bio based rejuvenator on mix design, energy consumption and GHG emission of high RAP mixture. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science - 4th International Conference on Civil and Environmental Engineering for Sustainability. Langkawi, Malaysia. *IOP Publishing.*

-Ahmad, K. A., Abdullah, M. E., Nda, M., Usman, N., & Hassan, N. A. (2018). Effect of bio based rejuvenator on permanent deformation of aged bitumen. *Int J Integr Eng,* 10, 48-52.

-Ahmed, R. B., & Hossain, K. (2020). Waste cooking oil as an asphalt rejuvenator: a state-of-the-art review. *Constr Build Mater,* 230, 116985.

-Al-Atroush, M. E., Bala, N., & Adamu, M. (2024). Prefabricated plastic pavement for high-traffic and extreme weather conditions. *Stud Syst Decis Control,* 487, 709-21.

-Al-Atroush, M. E., Marouf, A., Aloufi, M., & Marouf, M. (2023). A novel application of the geothermal asphalt pavement: a feasible E-fuel source. *Transport Eng,* 12, 100183.

-Al-Omari, A. A., Khedaywi, T. S., & Khasawneh, M. A. (2018). Laboratory characterization of asphalt binders modified with waste vegetable oil using SuperPave specifications. *Int J Pavement Res Technol,* 11, 68-76.

-Al-Sabaeei, A. M., Napiah, M. B., Sutanto, M. H., Alaloul, W. S., & Usman, A. (2020). A systematic review of bio-asphalt for flexible pavement applications: coherent taxonomy, motivations, challenges and future directions. *J Clean Prod,* 249, 119357.

-Al-Saffar, Z. H., Mohammed Hasan, H. G., Abdulmawjoud, A. A., Bilema, M., & Alharthai, M. (2023). Tailored enhancement of reclaimed asphalt pavement with waste engine oil/vacuum residue blend as rejuvenating agent. *Constr Build Mater,* 409, 133936.

-Al-Saffar, Z. H., Yaacob, H., Katman, H. Y., Satar, M. K. I. M., Bilema, M., Jaya, R. P., et al. (2021). A review on the durability of recycled asphalt mixtures embraced with rejuvenators. *Sustainability,* 13, 8970.

-Al-Saffar, Z. H., Yaacob, H., Mohd Satar, M. K. I., Saleem, M. K., Jaya, R. P., Lai, C. J., et al. (2020). Evaluating the chemical and rheological attributes of aged asphalt: synergistic effects of maltene and waste engine oil rejuvenators. *Arab J Sci Eng,* 45, 8685-97.

-Al-Saffar, Z. H., Yaacob, H., Saleem, M. K., Mohd Satar, M. K. I., Putra Jaya, R., Bilema, M., et al. (2022). A new approach to enhance the reclaimed asphalt pavement features: role of maltene as a rejuvenator. *Road Mater Pavement Des,* 23, 2507-30.

-Asli, H., Ahmadinia, E., Zargar, M., & Karim, M. R. (2012). Investigation on physical properties of waste cooking oil - rejuvenated bitumen binder. *Constr. Build Mater,* 37, 398-405.

-Ayar, P., Baradaran, S., & Abdipour Vosta, S. (2022). A review on the effect of various additives on mechanical properties of stone mastic asphalt (SMA). *Road,* 30(110), 57-86.

-Aziez, M. N., Achour, A., Bahaz, A., & Lakhdari, Z. (2023). Effect of waste brick powder rich in SiO2 on the physical and mechanical properties of Portland cement concrete containing coarse recycled asphalt pavement aggregates (RAP). *J Build Eng,* 76, 107337.

-Baek, C., Underwood, B., & Kim, Y. (2012). Effects of oxidative aging on asphalt mixture properties. *Transp. Res Rec,* 2296, 77-85.

-Baradaran, M. S., Qazanfari, R., & Baradaran, S. (2023). Study of soil reinforcement in the east of Mashhad using glass granule. *Materials Research Express,* 10(5), 055202.

doi.org/10.1088/2053-1591/acd5af

-Baradaran, S., & Aliha, M. R. M. (2025). Mode I and Mode II fracture assessment of green asphalt pavements containing plastic waste and RAP at low and intermediate temperature. *Results in Engineering,* 25, 103734.

-Baradaran, S., & Ameri, M. (2023). Investigation of rutting failure in asphalt mixtures and its improvement strategies. *Road,* 31(114), 53-70.

-Baradaran, S., & Ameri, M. (2025). Durable and sustainable warm mix asphalt pavement using value-added recycled PET. Case Studies in Construction Materials, e05362.

doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05362

-Castro, M., & Sánchez, J. A. (2006). Fatigue and healing of asphalt mixtures: discriminate analysis of fatigue curves. *J Transport Eng,* 132, 168-74.

-Chen, M., Leng, B., Wu, S., & Sang, Y. (2014). Physical, chemical and rheological properties of waste edible vegetable oil rejuvenated asphalt binders. *Constr Build Mater*, 66, 286-98.

-Cong, P., Hao, H., Zhang, Y., Luo, W., & Yao, D. (2016). Investigation of diffusion of rejuvenator in aged asphalt. *Int J Pavement Res Technol,* 9, 280-8.

-DeDene, C. D., & You, Z. (2014). The performance of aged asphalt materials rejuvenated with waste engine oil. *Int J Pavement Res Technol,* 7, 145.

-Dony, A., Colin, J., Bruneau, D., Drouadaine, I., & Navaro, J. (2013). Reclaimed asphalt concretes with high recycling rates: changes in reclaimed binder properties according to rejuvenating agent. *Constr Build Mater,* 41, 175-81.

-Dughaishi, H. A., Al, L. J., Bilema, M., Babalghaith, A. M., Mashaan, N. S., Yusoff, N. I. M., et al. (2022). Encouraging sustainable use of RAP materials for pavement construction in Oman: a review. *Recycling,* 7, 35.

-Elkashef, M., Williams, R. C., & Cochran, E. W. (2019). Thermal and cold flow properties of bio-derived rejuvenators and their impact on the properties of rejuvenated asphalt binders. *Thermochim Acta,* 671, 48-53.

-Eriskin, E., Karahancer, S., Terzi, S., & Saltan, M. (2017). Waste frying oil modified bitumen usage for sustainable hot mix asphalt pavement. *Arch Civ Mech Eng,* 17, 863-70.

-Espinoza-Luque, A. F., Al-Qadi, I. L., & Ozer, H. (2018). Optimizing rejuvenator content in asphalt concrete to enhance its durability. *Constr Build Mater,* 179, 642-8.

-Fernández-Gómez, W. D., Rondón Quintana, H., & Reyes Lizcano, F. (2013). A review of asphalt and asphalt mixture aging: *Una revisión. Ingenieria e investigacion,* 33(1), 5-12.

-Fini, E. H., Oldham, D., Buabeng, F. S., & Nezhad, S. H. (2015). Investigating the aging susceptibility of bio-modified asphalts. In Airfield and Highway Pavements 2015: Innovative and Cost-Effective Pavements for a Sustainable Future - Proceedings of the 2015 International Airfield and Highway Pavements Conference. Reston, VA, USA. *American Society of Civil Engineers.*

-Foroutan, M. A., Tahami, S. A., Hoff, I., Dessouky, S., & Ho, C. H. (2019). Performance evaluation of asphalt mixtures containing high-RAP binder content and bio-oil rejuvenator. *Constr Build Mater,* 227, 116465.

-Baradaran, S., & Ziaee, S. A. (2025). Comprehensive evaluation of cracking performance in modified HMA and WMA asphalt mixtures using the SCB test. *Alexandria Engineering Journal,* 133, 349-369. **doi.org/10.1016/j.aej.2025.11.029**

-Baradaran, S., & Ziaee, S. A. (2025). Review of the Mechanical Properties of Asphalt Pavement Reinforced with Natural Plant Fibers as an Eco-Friendly Solution in Pavement Engineering. *Road.*

-Baradaran, S., Aliha, M. R. M., Ameri, M., Erarslan, N., & Sadowski, T. (2025). Evaluation of crack resistance in asphalt mixtures modified with recycled PET granules at low and intermediate temperatures. *In 4th International Civil Engineering & Architecture Conference*, (Vol. 1).

-Baradaran, S., Aliha, M. R. M., Maleki, A., & Underwood, B. S. (2024). Fracture properties of asphalt mixtures containing high content of reclaimed asphalt pavement (RAP) and eco-friendly PET additive at low temperature. *Construction and Building Materials,* 449, 138426.

doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138426

-Baradaran, S., Rahimi, J., Ameri, M., & Maleki, A. (2024). Mechanical performance of asphalt mixture containing eco-friendly additive by recycling PET. Case Studies in Construction Materials, 20, e02740. **doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02740**

-Baradaran, S., Ziaee, S. A., Ameri, M., & Aliha, M. R. M. (2025). Mode I and II fracture behavior of green warm mix asphalt containing recycled plastic at various temperatures using ENDB testing method. Case Studies in Construction Materials, e05549. **doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05549**

-Bilema, M., Aman, M. Y., Hassan, N. A., Memon, Z. A., Omar, H. A., Izzi, N., et al. (2021). Mechanical performance of reclaimed asphalt pavement modified with waste frying oil and crumb rubber. *Materials,* 14, 2781.

-Bilema, M., Bin Aman, Y., Hassan, N. A., Al-Saffar, Z., Ahmad, K., & Rogo, K. (2021). Performance of aged asphalt binder treated with various types of rejuvenators. *Civ. Eng. J,* 7, 502-17.

-Blanc, J., Hornych, P., Sotoodeh-Nia, Z., Williams, C., Porot, L., Pouget, S., et al. (2019). Full-scale validation of bio-recycled asphalt mixtures for road pavements. *J Clean Prod,* 227, 1068-78.

-Cao, X., Wang, H., Cao, X., Sun, W., Zhu, H., &Tang, B. (2018). Investigation of rheological and chemical properties asphalt binder rejuvenated with waste vegetable oil. *Constr Build Mater,* 180, 455-63.

-Kim, Y. R., Little, D. N., & Lytton, R. L. (2003). Fatigue and healing characterization of asphalt mixtures. *J Mater Civ Eng,* 15, 75-83.

-Kuang, D., Feng, Z., Yu, J., Chen, X., & Zhou, B. (2011). A new approach for evaluating rejuvenator diffusing into aged bitumen. *J Wuhan Univ Technol Materials Sci Ed,* 26, 43-6.

-Kuang, D., Jiao, Y., Ye, Z., Lu, Z., Chen, H., Yu, J., et al. (2018). Diffusibility enhancement of rejuvenator by epoxidized soybean oil and its influence on the performance of recycledhotmix asphalt mixtures. *Materials,* 11, 833.

-Lin, J., Guo, P., Wan, L., & Wu, S. (2012). Laboratory investigation of rejuvenator seal materials on performances of asphalt mixtures. *Constr. Build Mater,* 37, 41-5.

-Lin, P. S., Wu, T. L., Chang, C. W., & Chou, B. Y. (2011). Effects of recycling agents on aged asphalt binders and reclaimed asphalt concrete. *Mater Struct Materiaux Constr,* 44, 911-21.

-Lopa, R. S., Jaya, R. P., Mashros, N., Hassan, N. A., Yaacob, H., Hainin, M. R., et al. (2018). Creep stiffness and voids characteristic of asphalt mixture with waste cooking oil after aging. In AIP Conference Proceedings. Ho Chi Minh, Vietnam. *American Institute of Physics Inc,* 020181 p.

-Majidifard, H., Tabatabaee, N., & Buttlar, W. (2019). Investigating short-term and long-term binder performance of high-RAP mixtures containing waste cooking oil. *J Traffic Transp Eng Engl.* Ed, 6, 396-406.

-Martin, A. E., Kaseer, F., & Zhou, F. (2015). The effects of recycling agents on asphalt mixtures with high RAS and RAP binder ratios. *In Thermochimica Acta.* Texas. Elsevier, 509.

-Mills-Beale, J., You, Z., Fini, E., Zada, B., Lee, C. H., & Yap, Y. K. (2014). Aging influence on rheology properties of petroleum-based asphalt modified with biobinder. *J Mater Civ Eng,* 26, 358-66.

-Mogawer, W. S., Austerman, A. J., Kluttz, R., & Puchalski, S. (2016). Using polymer modification and rejuvenators to improve the performance of high reclaimed asphalt pavement mixtures. *Transp Res Rec,* 2575, 10-18.

-Mogawer, W. S., Booshehrian, A., Vahidi, S., & Austerman, A. J. (2013). Evaluating the effect of rejuvenators on the degree of blending and performance of high RAP, RAS, and RAP/RAS mixtures. *Road Mater Pavement Des,* 14, 193-213.

-García, Á. (2012). Self-healing of open cracks in asphalt mastic. *Fuel,* 93, 264-72.

-Garcia, A., Austin, C. J., & Jelfs, J. (2016). Mechanical properties of asphalt mixture containing sunflower oil capsules. *J Clean Prod,* 118, 124-32.

-García, Á., Schlangen, E., van de Ven, M., & Sierra-Beltrán, G. (2010). Preparation of capsules containing rejuvenators for their use in asphalt concrete. *J Hazard Mater,* 184, 603-11.

-Guarin, A., Khan, A., Butt, A. A., Birgisson, B., & Kringos, N. (2016). An extensive laboratory investigation of the use of bio-oil modified bitumen in road construction. *Constr Build Mater*, 106, 133-9.

-Guarin, A., Khan, A., Butt, A. A., Birgisson, B., & Kringos, N. (2016). An extensive laboratory investigation of the use of bio-oil modified bitumen in road construction. *Constr Build Mater,* 106, 133-9.

-Im, S., Karki, P., & Zhou, F. (2016). Development of new mix design method for asphalt mixtures containing RAP and rejuvenators. *Constr Build Mater,* 115, 727-34.

-Im, S., Zhou, F., Lee, R., & Scullion, T. (2014). Impacts of rejuvenators on performance and engineering properties of asphalt mixtures containing recycled materials. *Constr Build Mater,* 53, 596-603.

-Kamaruddin, N. H. M., Hainin, M. R., Hassan, N. A., & Abdullah, M. E. (2014). Rutting evaluation of aged binder containing waste engine oil. In Advanced Materials Research. Switzerland. *Trans Tech Publications.*

-Kamaruddin, N. H. M., Hainin, M. R., Hassan, N. A., & Abdullah, M. E. (2014). Rutting evaluation of aged binder containing waste engine oil. In Advanced Materials Research. Switzerland. *Trans Tech Publications.*

-Kamaruddin, N. H. M., Hainin, M. R., Hassan, N. A., Abdullah, M. E., & Yaacob, H. (2014). Evaluation of pavement mixture incorporating waste oil. *J Teknol,* 71. **doi.org/10.11113/jt.v71.3766**

-Kaseer, F., Arámbula-Mercado, E., Cucalon, L. G., & Martin, A. E. (2020). Performance of asphalt mixtures with high recycled materials content and recycling agents. *Int J Pavement Eng,* 21, 863-77.

-Khan, M. I., Sutanto, M. H., Khahro, S. H., Zoorob, S. E., Nur, N. I., Al-Sabaeei, A. M., et al. (2023). Fatigue prediction model and stiffness modulus for semi-flexible pavement surfacing using irradiated waste polyethylene terephthalate-based cement grouts. *Coatings,* 13, 76.

-Shen, S., & Carpenter, S. (2006). Dissipated energy concepts for HMA performance: fatigue and healing Illinois. *Technical Report of Research,* University of Illinois, Illinois, USA.

-Shu, B., Zhang, L., Wu, S., Dong, L., Liu, Q., & Wang, Q. (2018). Synthesis and characterization of compartmented Ca-alginate/silica self-healing fibers containing bituminous rejuvenator. *Constr Build Mater,* 190, 623-31.

-Singh-Ackbarali, D., Maharaj, R., Mohamed, N., & Ramjattan-Harry, V. (2017). Potential of used frying oil in paving material: solution to environmental pollution problem. *Environ Sci Pollut Control Ser,* 24, 12220-6.

-Su, J. F., Qiu, J., & Schlangen, E. (2013). Stability investigation of self-healing microcapsules containing rejuvenator for bitumen. *Polym Degrad Stabil,* 98, 1205-15.

-Su, J. F., Qiu, J., Schlangen, E., & Wang, Y. Y. (2015). Investigation the possibility of a new approach of using microcapsules containing waste cooking oil: in situ rejuvenation for aged bitumen. *Constr Build Mater,* 74, 83-92.

-Sun, D., Yu, F., Li, L., Lin, T., & Zhu, X. Y. (2017). Effect of chemical composition and structure of asphalt binders on self-healing. *Constr Build Mater,* 133, 495-501.

-Sun, Z., Yi, J., Huang, Y., Feng, D., & Guo, C. (2016). Properties of asphalt binder modified by bio-oil derived from waste cooking oil. *Constr Build Mater,* 102, 496-504.

-Tabaković, A., Post, W., Cantero, D., Copuroglu, O., Garcia, S. J., & Schlangen, E. (2016). The reinforcement and healing of asphalt mastic mixtures by rejuvenator encapsulation in alginate compartmented fibres. *Smart Mater Struct,* 25, 084003.

-Tayh, S., Muniandy, R., Hassim, S., Mohd Jakarni, F., & Aburkaba, E. (2014). An overview of utilization of bio-oil in hot mix asphalt. *Walia J,* 30, 131-41.

-Tran, N., Taylor, A., & Willis, R. (2014). Effect of rejuvenator on performance properties of HMA mixtures with high RAP contents. In Asphalt Pavements - Proceedings of the International Conference on Asphalt Pavements, *ISAP 2014.* Alabama, USA. Auburn University.

-Wen, H., Bhusal, S., & Wen, B. (2013). Laboratory evaluation of waste cooking oil-based bioasphalt as an alternative binder for hot mix asphalt. *J Mater Civ Eng,* 25, 1432-7.

-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. *Constr Build Mater,* 152, 65-73.

-Nazzal, M. D., Mogawer, W., Austerman, A., Qtaish, L. A., & Kaya, S. (2015). Multi-scale evaluation of the effect of rejuvenators on the performance of high RAP content mixtures. *Constr Build Mater,* 101, 50-6.

-Orešković, M., Bressi, S., Di Mino, G., & Lo, P. D. (2017). Influence of bio-based additives on rap clustering and asphalt binder rheology. In Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields - Proceedings of the 10th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, BCRRA 2017. *London. Taylor and Francis.*

-Petersen, J. C. (2000). Chemical composition of asphalt as related to asphalt durability. In Developments in petroleum science, Vol. 40, *Elsevier,* 363-399.

-Pradhan, S. K., & Sahoo, U. C. (2019). Performance assessment of aged binder rejuvenated with polanga oil. *J Traffic Transp Eng Engl Ed,* 6, 608-20

-Quintana, H. R., Lizcano, F. R., & Fernández-Gómez, W. D. (2013). A review of asphalt and asphalt mixture aging. *Ing Invest,* 33, 5-12.

-Raman, N. A. A., Hainin, M. R., Hassan, N. A., Ani, F. N., Warid, M. N. M., Idham, M. K., et al. (2015). Effect of bio-oil from empty fruit bunch on penetration index of asphalt binder. *J Teknol,* 77. **doi.org/10.11113/jt.v77.6680**

-Raouf, M. A., & Williams, R. C. (2010). Temperature and shear susceptibility of a nonpetroleum binder as a pavement material. *Transp Res Rec,* 2180, 9-18.

-Rasman, M., Hassan, N. A., Hainin, M. R., Putra Jaya, R., Haryati, Y., Shukry, N. A. M., et al. (2018). Engineering properties of bitumen modified with bio-oil. In MATEC Web of Conferences - The 12th International Civil Engineering Post Graduate Conference. Langkawi, Malaysia. *EDP Sciences.*

-Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D. Y., & Kennedy, T. W. (1996). Hot mix asphalt materials, *Mixture Design and Construction.*

-Rodrigues, C., Capitão, S., Picado-Santos, L., & Almeida, A. (2020). Full recycling of asphalt concrete with waste cooking oil as rejuvenator and LDPE from urban waste as binder modifier. *Sustainability,* 12, 8222.

-Xie, Z., Tran, N., Julian, G., Taylor, A., & Blackburn, L. D. (2017). Performance of asphalt mixtures with high recycled contents using rejuvenators and warm-mix additive: field and lab experiments. *J Mater Civ Eng,* 29, 04017190.

-Yan, J., Zhang, Z., Zhu, H., Li, F., & Liu, Q. (2014). Experimental study of hot recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement and different recycling agents. *J Test Eval,* 42, 1183-90.

-Yang, X., You, Z., & Dai, Q. (2013). Performance evaluation of asphalt binder modified by bio-oil generated from waste wood resources. *Int J Pavement Res Technol,* 6, 431.

-Yang, X., You, Z., Dai, Q., & Mills-Beale, J. (2014). Mechanical performance of asphalt mixtures modified by bio-oils derived from waste wood resources. *Constr Build Mater,* 51, 424-31.

-Zahoor, M., Nizamuddin, S., Madapusi, S., & Giustozzi, F. (2021). Sustainable asphalt rejuvenation using waste cooking oil: A comprehensive review. *J Clean Prod,* 278, 123304.

-Zargar, M., Ahmadinia, E., Asli, H., & Karim, M. R. (2012). Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen. *J Hazard Mater,* 233-234, 254-8.

-Zaumanis, M., Boesiger, L., Kunz, B., Cavalli, M. C., & Poulikakos, L. (2019). Determining optimum rejuvenator addition location in asphalt production plant. *Constr Build Mater,* 198, 368-78.

-Zaumanis, M., Mallick, R. B., & Frank, R. (2014). Determining optimum rejuvenator dose for asphalt recycling based on superpave performance grade specifications. *Constr Build Mater,* 69, 159-66.

-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. *Constr Build Mater,* 71, 538-50.

-Zaumanis, M., Mallick, R., & Frank, R. (2013). Evaluation of rejuvenator's effectiveness with conventional mix testing for 100% reclaimed asphalt pavement mixtures. *Transp Res Rec,* 2370, 17-25.

-Zhang, D., Chen, M., Wu, S., Liu, J., & Amirkhanian, S. (2017). Analysis of the relationships between waste cooking oil qualities and rejuvenated asphalt properties. *Materials,* 10, 508.

-Zhao, S., Huang, B., Shu, X., & Woods, M. E. (2016). Quantitative evaluation of blending and diffusion in high RAP and RAS mixtures. *Mater Des,* 89, 1161-70.

-Zheng, K., Xu, J., & Wang, J. (2023). Viscoelasticity of recycled asphalt mixtures with high content reclaimed SBS modified asphalt pavement. *Sustainability,* 15, 2515.

-Ziari, H., Hajiloo, M., & Ayar, P. (2022). Influence of recycling agents addition methods on asphalt mixtures properties containing reclaimed asphalt pavement (RAP). *Sustainability,* 14, 16717.

Rejuvenators and the Future of Sustainable Pavements: From the Rejuvenation of Aged Asphalt Binder to the Enhanced Performance of Recycled Asphalt Mixtures

Sajed Baradaran, M.Sc., Grad., School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Mahmoud Ameri, *Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

E-mail: Ameri@iust.ac.ir

Received: February 2026- Accepted: May 2026

ABSTRACT

The use of reclaimed asphalt pavement materials in asphalt mixtures has received considerable attention in recent years as an effective strategy for reducing the consumption of virgin materials, achieving economic savings, and mitigating the environmental impacts of the road construction industry. However, the presence of aged asphalt binder in reclaimed asphalt pavement can increase binder stiffness and viscosity, reduce ductility, decrease cracking resistance, and create durability-related challenges in pavement performance. This paper explains the main mechanisms of asphalt binder aging and the role of rejuvenators in restoring the balance between the maltene and asphaltene fractions of asphalt binder. In addition, different types of rejuvenators, including bio-oils, waste oils, lubricant oils, and commercial products, are reviewed along with methods for determining their optimum dosage and mixing procedures with reclaimed asphalt pavement materials. The findings of previous studies indicate that rejuvenators generally increase the penetration and ductility of aged asphalt binder while reducing its viscosity, softening point, and complex modulus. In terms of mechanical performance, the use of rejuvenators can improve fatigue resistance, cracking resistance, and moisture durability of recycled asphalt mixtures. However, excessive use of rejuvenators may reduce rutting resistance and weaken the adhesion between asphalt binder and aggregates. Therefore, selecting an appropriate type of rejuvenator, determining its optimum dosage, and controlling mixing conditions are key factors in achieving recycled asphalt mixtures with stable and acceptable performance.

Keywords: Reclaimed Asphalt Pavement, Aged Asphalt Binder, Rejuvenator, Rheological Properties, Mechanical Properties