مروری بر نقش انواع جوان‌سازها در اصلاح خواص شیمیایی و رفتار رئولوژیکی قیر پیر شده تراشه‌های آسفالت بازیافتی

مقاله علمی – پژوهشی

علی بابازاده نادینلو، دانشجوی دکترا، گروه مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
حسن طاهرخانی*، دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: taherkhani.hasan@znu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۲۵– پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۵
صفحه ۱۰۶-۸۷

چکیده

امروزه برای حل مسائل و بحران‌های زیست محیطی، مفاهیم اقتصاد دایره‌ای و پایداری بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته و در حوزه احداث و نگهداری راه‌ها به منظور بازیافت یا استفاده مجدد از منابع تجدیدناپذیر تلاش‌های گسترده‌ای در حال انجام است. در زمینه روسازی راه‌ها، تشویق به استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی از جمله ساده ترین راه‌ها برای ترویج اقتصاد دایره‌ای است. یکی از مسائل اصلی در مورد استفاده از این ماده بازیافتی، قیر پیر شده موجود در آن است. فرآیند پیرشدگی و جوان‌سازی روسازی‌های قیری بر دوام و عمر مفید آنها به طور قابل توجهی تأثیرگذار است. لذا دستیابی به دانش کامل در زمینه خواص شیمیایی و رفتار رئولوژیکی ضروری است. در این تحقیق، ضمن بررسی فرایند پیرشدگی، با معرفی روش‌های مختلف احیای قیر پیر شده، انواع جوان‌سازهای زیستی و مشتق شده از نفت مورد مطالعه در تحقیقات مختلف معرفی و عملکرد آنها مرور گردیده است. همچنین، آنالیزهای مختلف شیمیایی به عنوان ابزار بررسی فرآیندهای پیرشدگی و جوان‌سازی قیر معرفی و توصیف شدند. در نهایت، به منظور جوان‌سازی قیر پیر شده تراشه آسفالت بازیافتی و انتخاب نوع، دوز و روش افزودن جوان‌سازها، توصیه شده است که دوز بهینه جوان‌ساز بر اساس داده‌های عملکرد بلندمدت میدانی و در کاربردهای با مقیاس کامل تعیین شود. همچنین بررسی تأثیر اجزای شیمیایی جوان‌ساز بر ویژگی‌های قیر جوان شده، انجام مطالعات عملکرد میدانی روسازی‌های آسفالتی جوان‌سازی شده و امکان ترکیب اثر جوان‌سازی عامل بازیافتی با سایر اصلاح‌کننده‌ها برای بهبود عملکرد آسفالت در شرایط اقلیمی خاص توصیه شده است.

واژه‌های کلیدی: تراشه آسفالت بازیافتی، پیرشدگی، جوان‌ساز، خواص شیمیایی، رفتار رئولوژیکی

۱- مقدمه

امروزه، بشر به دلیل از دست رفتن تنوع زیستی، آلودگی هوا، خاک و آب؛ فرسودگی منابع و استفاده نامناسب از زمین در سخت‌ترین بحران زیست‌محیطی زندگی می‌کند. برای رویارویی با این مسائل، مفاهیم اقتصاد دایره‌ای[1] و پایداری[2] بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است (Prosperi and Bocci, 2021). اقتصاد دایره‌ای مدلی از تولید و مصرف و شامل به اشتراک‌گذاری، اجاره، استفاده مجدد، تعمیر، نوسازی و بازیافت مواد و محصولات موجود تا حد امکان بوده و در عمل، به معنای کاهش ضایعات به حداقل مقدار ممکن و افزایش چرخه عمر محصولات است (Prosperi and Bocci, 2021). اهمیت فزاینده مفاهیمی مانند اقتصاد پایدار و استفاده از منابع پایدار در حوزه احداث و نگهداری راه‌ها ایجاب می‌کند که در جهت بازیافت یا استفاده مجدد از منابع تجدیدناپذیر تلاش‌های گسترده‌ای صورت گیرد. در بخش مهندسی روسازی راه، ساده ترین راه برای ترویج اقتصاد دایره‌ای، تشویق به استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی(RAP[3]) است (Moins et al., 2022). بازسازی روسازی‌های آسفالتی، از طریق تخریب کلی، برش و یا تراش آسفالت موجود، دفع

مصالح حاصل از آن و تهیه و اجرای رویه آسفالتی جدید صورت می‌گیرد. امروزه، بازیافت روسازی‌های آسفالتی تراشیده شده، به عنوان کارآمدترین و مقرون به صرفه‌ترین فناوری دفع این مصالح در صنعت روسازی آسفالتی محسوب می‌شود. کاهش قابل ملاحظه نیاز به مواد اولیه و هزینه‌های ساخت و بازسازی روسازی، از نتایج بازیافت مصالح آسفالتی بازیافتی است (Chen et al., 2021).

استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی نه تنها باعث صرفه‌جویی در مواد و هزینه‌ها می‌شود، بلکه برخی از جنبه‌های عملکردی مخلوط‌های آسفالتی را نیز بهبود می‌بخشد و باعث کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی می‌گردد. در ادامه، شرح مختصری از فناوری‌های استفاده از مخلوط‌های بازیافتی ارائه می گردد.

۲- انواع فناوری استفاده از مخلوط‌های بازیافتی

به طور کلی، فناوری‌های بازیافت تراشه آسفالت را با توجه به دماهای مختلف ساخت آنها می‌توان به فناوری مخلوط بازیافتی داغ (HRM[۴])، فناوری مخلوط بازیافتی گرم (WRM[۵]) و فناوری مخلوط بازیافتی سرد (CRM[۶]) تقسیم کرد (Chen et al., 2021).

۲-۱- فناوری مخلوط بازیافتی داغ

فناوری HRM شامل فناوری مخلوط بازیافتی داغ در کارخانه و فناوری مخلوط بازیافتی داغ در محل است. متداول‌ترین فناوری مورد استفاده جهت بکارگیری تراشه آسفالت بازیافتی‌در مخلوط آسفالتی، فناوری مخلوط بازیافتی داغ در کارخانه است که امکان بهره‌برداری از سنگدانه‌ها و قیرهای موجود در تراشه آسفالت بازیافتی را فراهم می‌کند (Prosperi and Bocci, 2021). مخلوط بازیافتی داغ از تراشه آسفالت بازیافتی، سنگدانه‌های بکر، عامل جوان‌ساز و قیر جدید تشکیل شده و فرآیند تولید آن شبیه به مخلوط آسفالت داغ جدید است. بر این اساس، عملکرد آن می‌تواند تقریباً برابر با آسفالت مخلوط داغ جدید، به ویژه برای مخلوط بازیافتی داغ در کارخانه باشد. لذا، مخلوط بازیافتی داغ برای تعمیر و نگهداری اکثر خرابی‌های روسازی و ساخت تمامی لایه‌های سازه روسازی مناسب و رضایت‌بخش می باشد، اما هنوز چالش‌های زیادی در کاربرد این مخلوط‌ها وجود دارد. اولین چالش، نحوه کنترل کیفیت تراشه آسفالت بازیافتی به دلیل تغییرات در ترکیب، مانند دانه‌بندی، میزان قیر و غیره است. بنابراین، ویژگی‌های تراشه آسفالت بازیافتی باید به خوبی مشخص شود تا تنوع و تغییرات مخلوط بازیافتی داغ به حداقل برسد. توصیه می‌شود که حداقل پنج و ترجیحاً ده نمونه یا بیشتر از هر دپوی تراشه آسفالت بازیافتی برای مشخص کردن ثبات و یکدستی تراشه آسفالت بازیافتی جمع‌آوری و آزمایش شود (Chen et al., 2021). علاوه بر این، میزان قیر و دانه‌بندی هر نمونه باید بررسی شود. چالش دوم میزان استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی است. آسیاب و خرد کردن تراشه آسفالت بازیافتی به حداکثر اندازه سنگدانه‌های کوچک‌تر، منجر به تولید بیش از حد ریزدانه‌های عبوری از الک ۲۰۰ شده و به دلیل لزوم تأمین معیارهای درصد فضای خالی مصالح سنگی (VMA[۷]) و نسبت فیلر به قیر، میزان مصرف تراشه آسفالت بازیافتی محدود خواهد شد (Copeland, 2011). همچنین، مخلوط بازیافتی داغ با مقادیر بالای تراشه آسفالت بازیافتی می‌تواند بیش از حد سفت، شکننده و مستعد ترک‌خوردن باشد. به همین دلیل، معمولاً حداکثر مقدار تراشه آسفالت بازیافتی در مخلوط‌های داغ جدید محدود شده است. در حال حاضر، اکثر ایالت‌های امریکا بکارگیری حداکثر ۴۰ تا ۵۰ درصد تراشه آسفالت بازیافتی را در انواع اولیه مخلوط‌های آسفالتی مجاز می‌دانند (Nsengiyumva et al., 2020). با هدف حل این مشکل، محصولات متنوع بسیاری در سراسر جهان با عملکرد جوان‌سازی استفاده شده‌اند که امکان بازیابی (کامل یا جزئی) خواص مکانیکی از دست رفته قیر تراشه آسفالت بازیافتی را فراهم می‌سازد (Prosperi and Bocci, 2021). با این حال، میزان بالای عامل جوان‌ساز ممکن است عملکرد جاده، به ویژه استحکام در دمای بالا را کاهش دهد (Devulapalli et al., 2020; Ahmed et al., 2021). مسأله دیگر در مورد مخلوط‌های بازیافتی داغ، تولید و انتشار بالای گازهای مضر در طول ساخت است. دمای تولید این مخلوط‌ها، معمولاً ۵ تا ۱۵ درجه سانتیگراد بالاتر از مخلوط آسفالت داغ سنتی است (Li et al., 2021; Ma et al., 2020). دمای تولید بالا باعث پیرشدگی ثانویه تراشه آسفالت در طول فرآیند گرمایش و اختلاط با مخلوط آسفالت داغ می‌شود. این فرآیند پیرشدگی، روسازی آسفالتی را در معرض ترک‌های زودرس تحت بار ترافیکی قرار می‌دهد(Chen et al., 2021). قیر پیر، سفت و

شکننده تراشه آسفالت بازیافتی، با افزایش سفتی مخلوط، باعث خستگی و آسیب در دمای پایین شده و دوام آن در صورت اختلاط با قیر بکر، بدون اصلاح خواص آن کاهش می‌یابد (Prosperi and Bocci, 2020; Nsengiyumva et al., 2020).

۲-۲- فناوری مخلوط بازیافتی گرم

در مهندسی روسازی به منظور کاهش انتشار گازهای گلخانه ای و مصرف انرژی در تولید مخلوط‌های بازیافتی داغ، فناوری مخلوط‌های بازیافتی گرم به صورت تلفیقی از فناوری احیا کننده قیر و فناوری مخلوط آسفالت گرم پیشنهاد شده است. تفاوت اساسی بین مخلوط بازیافتی گرم و مخلوط بازیافتی داغ در این است که دمای تولید مخلوط آسفالتی گرم را می‌توان تقریباً ۲۰ تا ۶۰ درجه سانتیگراد به دلیل تأثیر افزودنی مخلوط گرم کاهش داد. به دلیل دمای تولید نسبتاً پایین‌تر، فناوری مخلوط بازیافتی گرم در مقایسه با فناوری مخلوط بازیافتی داغ، باعث صرفه‌جویی از ۱۸٪ تا ۳۰٪ در مصرف انرژی می شود (Costa and Benta, 2016). علاوه بر این، مطالعات ارزیابی هزینه چرخه عمر نشان می‌دهد که فناوری مخلوط بازیافتی گرم می‌تواند هزینه‌ها را ۱۰٪ تا ۳۰٪ با توجه به فناوری‌های مختلف کاهش دهد (Saboundjian et al., 2011).

در حال حاضر، فناوری‌های مختلفی برای تولید مخلوط آسفالت گرم توسعه داده شده که از جمله آنها افزودنی‌های آلی، افزودنی‌های شیمیایی و فناوری کف سازی است (Cheraghian et al., 2020). افزودنی های مخلوط آسفالت گرم، ویسکوزیته قیر را در محدوده دمای تولید کاهش می‌دهند، بنابراین سازگاری و کارایی مخلوط بازیافتی گرم از مخلوط بازیافتی داغ بیشتر است. این ویژگی برای پخش و تراکم مخلوط های بازیافتی گرم بسیار مفید بوده و بر همین اساس، مقدار تراشه آسفالت بازیافتی در مخلوط بازیافتی گرم می‌تواند بیشتر از مخلوط بازیافتی داغ باشد (Chamod et al., 2019).

گرچه فناوری مخلوط بازیافتی گرم به طور گسترده در ترمیم و ساخت روسازی استفاده شده است، با این وجود هنوز در کاربرد این فناوری، موضوعات حل نشده وجود دارد. به دلیل دمای پایین تولید، ممکن است که تراشه آسفالت بازیافتی و سنگدانه‌های بکر، مقداری از آب را در خود نگه دارند. بنابراین استحکام مخلوط بازیافتی گرم در مقابل آب باید به دقت مورد توجه قرار گیرد. علاوه بر این، بسیاری از محققان معتقدند که به دلیل دمای تولید پایین مخلوط بازیافتی گرم می‌توان تراشه آسفالت بازیافتی بیشتری را بکار گرفت. با این حال، در صورت استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی بیشتر، عملکرد این مخلوط‌ها در دمای پایین و عمر خستگی می‌تواند کاهش یابد (Babagoli et al., 2021).

۲-۳- فناوری مخلوط بازیافتی سرد

فناوری‌های مخلوط بازیافتی داغ و گرم به طور گسترده در مهندسی روسازی استفاده شده‌اند و عملکرد کلی آنها می‌تواند تقریباً با عملکرد مخلوط آسفالت سنتی برابر باشد. با این حال، به منظور دستیابی به عملکرد مطلوب، مقدار تراشه آسفالت بازیافتی باید در این دو فناوری محدود شود. برای استفاده حداکثری از تراشه آسفالت بازیافتی، فناوری مخلوط بازیافتی سرد پیشنهاد شده است. این فناوری بازیافت در مقایسه با دو فناوری پیشین، اقتصادی بوده و سازگاری بیشتری با محیط زیست دارد. همچنین، انتشار کربن و مصرف انرژی در این فناوری، به دلیل دمای پایین تولید به حداقل می‌رسد. نرخ استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی در مخلوط بازیافتی سرد معمولاً بین ۷۰ تا ۱۰۰ درصد است (Wang et al., 2021; Flores et al., 2020). با توجه به انواع مختلف قیر، این فناوری‌ها به مخلوط بازیافتی سرد با کف قیر و مخلوط بازیافتی سرد با امولسیون قیر تقسیم می‌شود. برخی تحقیقات نشان دهنده عملکرد کلی برتر مخلوط بازیافتی سرد با امولسیون قیر نسبت به مخلوط بازیافتی سرد با کف قیر است (Flores et al., 2020). با توجه به خواص مکانیکی و عملکرد روسازی نسبتاً ضعیف‌تر مخلوط بازیافتی سرد نسبت به مخلوط آسفالت داغ، استفاده از این مخلوط‌ها به لایه‌های زیراساس و اساس در بزرگراه‌های اکثر کشورها محدود شده و بیشتر تراشه آسفالت بازیافتی لایه‌های رویه در لایه‌های زیرین استفاده می‌شود. تلاش سالیان اخیر مهندسان و محققان روسازی برای استفاده از مخلوط بازیافتی سرد به عنوان مصالح لایه رویه، معطوف به یافتن راه حل ارتقای عملکرد مخلوط بازیافتی سرد است. دلایل عمده عملکرد نسبتاً ضعیف مخلوط بازیافتی سرد شامل درصد فضای خالی بسیار بالای مخلوط

بازیافتی سرد (بیش از ۸٪) و پوشش ضعیف سنگدانه‌ها توسط قیر امولسیونی یا کف قیر در مقایسه با مخلوط‌های آسفالتی داغ معمول است (Chen et al., 2021).

۳- کاربرد و عملکرد تراشه آسفالت بازیافتی

مصالح تراشه آسفالت بازیافتی از اواخر دهه ۱۹۷۰ برای احداث جاده مورد استفاده قرار گرفته و استفاده از آن در بسیاری از کشورهای جهان در محدوده ۱۰٪ تا ۵۰٪ پذیرفته شده است. تراشه آسفالت بازیافتی از آسیاب روسازی‌های آسفالتی در شرف بازسازی یا تخریب استحصال می‌شود. گاهی اوقات از ضایعات کارخانه آسفالت نیز به عنوان تراشه آسفالت بازیافتی استفاده می‌شود. از آنجایی که ذرات تراشه آسفالت بازیافتی آسیاب شده دارای اندازه‌های مختلفی هستند، مصالح آسیاب شده باید قبل از استفاده، پردازش شود. این پردازش، شامل خرد کردن ذرات تراشه آسفالت بازیافتی و الک کردن با توجه به اندازه مصالح دپوهای ذخیره است. تفکیک و جداسازی بر اساس اندازه مصالح باعث افزایش کنترل و کاهش تغییرات شده و به طراحان مخلوط کمک می‌کند تا با تغییر مقادیر تراشه آسفالت بازیافتی، مصالح بکر و قیر، خواص آسفالت را کنترل کنند (Copeland 2011; Randy and West, 2015).

مقدار مصرف تراشه آسفالت بازیافتی در یک مخلوط آسفالتی به عوامل زیادی بستگی داشته، کیفیت و میزان در دسترس بودن تراشه آسفالت بازیافتی، مشخصات کارخانه آسفالت، هزینه و الزامات کیفی به عنوان عوامل موثر در تعیین درصد تراشه آسفالت بازیافتی هستند. به طور کلی، ۱۰٪ تا ۳۰٪ از مخلوط‌های تراشه آسفالت بازیافتی، عملکردی برابر یا بهتر از مخلوط‌های آسفالتی معمولی دارند (Chamod et al., 2019). تلاش‌های موفقیت‌آمیز بسیاری بر مصرف درصد بالاتر تراشه آسفالت بازیافتی در مخلوط‌های آسفالتی گزارش شده است. با این حال، افزایش مقدار استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی، اثر مخربی بر عملکرد مخلوط آسفالتی داغ دارد (Randy and West, 2015). اختلاط ناکامل قیر پیر شده تراشه آسفالت بازیافتی و قیر بکر در دماهای معین، قیری با ساختار بسیار پیچیده و خواص غیرقابل پیش‌بینی ایجاد می‌کند که بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی تأثیر می‌گذارد. در ادامه، تأثیر افزایش مقدار استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی در مخلوط‌های آسفالتی بر روی خواص عملکردی مخلوط‌ها، تشریح می‌شود.

۳-۱- خستگی

بسیاری از مطالعات نشان دادند که عملکرد خستگی با افزایش درصد تراشه آسفالت بازیافتی در مخلوط، کاهش پیدا می‌کند (Zhu et al., 2018). الکاشف و همکاران وی از جوان‌سازهای پایه زیستی (گیاهی یا حیوانی) برای اصلاح قیر سفت شده تراشه آسفالت بازیافتی و افزایش خواص خستگی مخلوط‌های تراشه آسفالت بازیافتی استفاده کردند(Elkashef et al., 2017).

۳-۲- عملکرد در دمای پایین

به دلیل فرآیند اکسیداسیون، قیر موجود در تراشه آسفالت بازیافتی، در طول عمر مفید آن سفت می‌شود. تراشه آسفالت بازیافتی، به دلیل افزایش سفتی مخلوط‌های حاوی این تراشه‌ها، کاهش چسبندگی قیر پیر شده و کاهش زاویه‌دار بودن سنگدانه‌های تراشه آسفالت بازیافتی در مقایسه با سنگدانه‌های بکر، عملکرد ترک‌خوردگی در دمای پایین مخلوط‌های آسفالتی را کاهش می‌دهد (Abdollahi et al., 2022). شکنندگی تراشه آسفالت بازیافتی اثر منفی بر خواص وادادگی و مقاومت در برابر شکست مخلوط در دمای پایین دارد.

مدول دینامیکی بالاتر و کاهش قابل توجه انرژی شکست مخلوط حاوی تراشه آسفالت بازیافتی در دمای پایین مشاهده شده است. سختی خزشی مخلوط تراشه آسفالت بازیافتی در دماهای پایین توسط چندین محقق مورد مطالعه قرار گرفت و تأثیر قابل توجه تراشه آسفالت بازیافتی، بر سختی خزش در دماهای پایین تأیید شد. همچنین، عملکرد مخلوط‌های تراشه آسفالت بازیافتی در دمای پایین، تحت بارگذاری استاتیکی و نوسانی، نسبتاً ضعیف گزارش گردیده است (Chamod et al., 2019).

۳-۳- عملکرد در دمای بالا

نرخ پیرشدگی مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالت بازیافتی در طی بهره‌برداری، در مقایسه با مخلوط‌های معمولی نسبتاً کند است. با این حال، مخلوط‌های با تراشه آسفالت بازیافتی بیشتر، پتانسیل بالاتری برای خرابی فیتیله شدن[۸] نشان داده‌اند (Chamod et al., 2019).

۳-۴- حساسیت رطوبتی

حساسیت به رطوبت تراشه آسفالت بازیافتی به دلیل پوشش سنگدانه‌های بازیافتی با قیر آسفالت کمتر است. لذا به دلیل محدودیت نفوذ آب در ذرات تراشه های آسفالت بازیافتی، این

مخلوط‌ها نسبت به مخلوط‌های آسفالتی معمولی در برابر عریان شدگی مقاوم‌تر هستند. سنگدانه‌های تراشه آسفالت بازیافتی با یک لایه قیر پیرشده قوی اندود شده و در ترکیب با قیر تازه، پیوند قوی‌تری ایجاد می‌شود. بهبود مقاومت در برابر عریان شدگی به همین دلیل است. اگر آسفالت بازیافتی به دلیل عریان شدگی دچار اضمحلال شده باشد، در صورت عدم استفاده از مواد ضد عریان شدگی مناسب در مخلوط، ممکن است مشکل عریان شدگی مشابه در آسفالت جدید دوباره بروز کند.

۳-۵- شیارشدگی

سختی قیر تراشه آسفالت بازیافتی، مقاومت بهتری در برابر تغییر شکل پلاستیکی روسازی ایجاد می‌کند. نشان داده شده است که مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالت بازیافتی از ۱۰٪ تا ۵۰٪ بهتر از مخلوط آسفالت داغ است. استحکام مارشال مخلوط‌های آسفالتی با مقادیر متغیر تراشه آسفالت بازیافتی تا میزان ۱۰۰٪ مطالعه شده و افزایش استحکام مارشال به صورت خطی با افزایش میزان تراشه آسفالت بازیافتی تأیید شده است. مقدار استحکام مارشال نمونه‌های با ۱۰۰٪ تراشه آسفالت بازیافتی، دو برابر نمونه شاهد مخلوط آسفالتی بکر گزارش گردیده است (Hussain and Yanjun, 2012).

٤- پیرشدگی قیر

پیرشدگی قیر مجموعه‌ای از دگرگونی‌های شیمیایی است که منجر به تغییر ویژگی‌های فیزیکی آن می‌شود. به طور کلی، دو فرآیند مختلف پیرشدگی، قابل شناسایی است (Prosperi and Bocci, 2021; Taghavi et al., 2018).

-پیرشدگی کوتاه مدت به علت دمای بالا (بیش از ۱۵۰ درجه سانتیگراد) و در دوره تولید، اختلاط، حمل، پخش و تراکم رخ می-دهد. این فرآیند، عمدتاً متأثر از اکسیداسیون سریع قیر، تبخیر و فرار روغن موجود در قیر در اثر گرما و کاهش ترکیبات روغنی از طریق جذب شدن توسط سنگدانه‌ها است. پیری کوتاه مدت مخلوط آسفالتی در زمان کم و با سرعت زیاد رخ می‌دهد؛ به طوری که در طول فرآیند پیری کوتاه‌مدت، ویسکوزیته قیر حدود ۱/۵ تا ٤ برابر افزایش می‌یابد.

-پیرشدگی بلندمدت با سرعت کم در طول عمر خدمت دهی روسازیو بیشتر در لایه‌های فوقانی اتفاق می افتد. پیرشدگی آسفالت این لایه‌ها، تحت ترافیک و تنش‌های محیطی و در اثر هوازدگی و اکسیداسیون رخ می‌دهد و میزان آن به مقدار فضای خالی مخلوط بستگی دارد.

شناخته‌شده‌ترین مکانیسم‌های موثر بر پیرشدگی قیر شامل موارد زیر است (Prosperi and Bocci, 2021).

الف- سخت‌شدن فیزیکی و استریک[۹] (مکانیسم برگشت‌پذیر)

سخت شدن فیزیکی با تغییرات در خواص ویسکوالاستیک قیر به دلیل خنک شدن مواد در زیر ناحیه انتقال شیشه[۱۰] سروکار دارد. با این حال، در این فرآیند هیچ تغییری در ساختار شیمیایی قیر رخ نمی‌دهد و زمانی که قیر دوباره تا دمای محیط گرم می‌شود، فرایند معکوس خواهد بود. با فرض اینکه حجم ماده شامل حجم مولکول‌های نوسانی و حجم آزاد بین مولکول‌ها می‌شود، وقتی دمای قیر کاهش می‌یابد، تحرک مولکولی و حجم آزاد هر دو کاهش می‌یابد و نسبت یکسانی بین حجم اشغال شده و آزاد حفظ می‌شود. پس از رسیدن به دمای انتقال شیشه‌ای، کاهش حجم آزاد کندتر از کاهش نوسان مولکول می‌شود که منجر به نوعی "سخت شدن بیش از حد" قیر می‌شود. سخت شدن فیزیکی را نباید با سخت شدن استریک اشتباه گرفت. سخت شدن استریک یک فرآیند شیمیایی است که در آن مولکول‌های قیر به دلیل وجود لکان‌های خطی در آسفالتین، مجدداً مرتب شده و ترکیبات مومی را در مالتن تشکیل می‌دهند. این فرآیند در دماهای متوسط اتفاق می‌افتد اما سه برابر سخت شدن فیزیکی طول می‌کشد. در حالی که سخت شدگی فیزیکی طی ۱ تا ۲ روز در دماهای کمتر از دمای انتقال شیشه‌ای قیرها (۳۵-/۱۵- درجه سانتیگراد) رخ می‌دهد، سختی استریک در دمای اتاق رخ داده و به روزها یا حتی هفته‌ها زمان نیاز دارد. سخت شدن استریک مربوط به سازماندهی مجدد درونی مولکول‌های قیر بوده و فرآیندی برگشت‌پذیر است زیرا می‌توان آن را با حرارت دادن یا کار مکانیکی حذف کرد.

ب- از دست دادن اجزای سبک (مواد فرار) در اثر تبخیر

تبخیر اجزای اشباع و آروماتیک نیز به عنوان مکانیزم پیرشدگی قیر گزارش شده است. به طور خاص، این پدیده عمدتاً مربوط به پیرشدگی کوتاه مدت است، زیرا بستگی به دمایی دارد که قیر در مراحل اختلاط، پخش و تراکم در معرض آن قرار

می‌گیرد. با افزایش ۱۰ درجه سانتیگراد در دمای تولید مخلوط آسفالت داغ در کارخانه، میزان تبخیر مواد فرار دو برابر می‌شود. تبخیر مواد فرار باعث عدم تعادل اجزا SARA[11] شده و موجب برتری رزین‌ها و آسفالتین‌ها بر مواد اشباع و آروماتیک می‌شود. لذا قیر به دست آمده سخت‌تر، سفت‌تر، ویسکوزتر و شکننده‌تر است. تبخیر ترکیبات فرار یک مکانیسم برگشت ناپذیر است که به طور قابل توجهی بر پیری قیر تأثیر می‌گذارد، حتی اگر به میزان کمتری از فرآیند اکسیداسیون باشد.

ج- اکسیداسیون و تغییرات اجزای SARA

مهم‌ترین مکانیسمی که در طول پیرشدگی اتفاق می‌افتد؛ فرآیند جذب اتم‌های اکسیژن توسط اجزای قیر به ویژه آسفالتین‌ها و رزین‌ها است. اکسیداسیون قیر یک فرآیند برگشت ناپذیر است. از آنجایی که اکسیداسیون به وجود اکسیژن و دسترسی به آن در مخلوط بستگی دارد، درصد فضای خالی، ضخامت لایه مخلوط آسفالتی، مقدار قیر و وجود ترک عواملی هستند که بر مقدار قیر هوازده و مقدار بالقوه قیر پیرشده تأثیرگذار هستند. به طور کلی، مولکول‌های قیر آسفالت را بر اساس قطبیت به دو گروه آسفالتن و مالتن تقسیم بندی می‌کنند (Ahmed, 2021). آسفالتن بخش جامد قیر و تشکیل دهنده ساختمان آن بوده و با ته‌نشینی آن، مالتن باقی می‌ماند. به عبارت دیگر آسفالتن‌ها، مولکول‌های بزرگ‌تر قیر آسفالت هستند که به سختی آن کمک می‌کنند. مالتن‌ها از ترکیبات آروماتیک، رزین‌ها و هیدروکربنهای اشباع (پارافین) تشکیل شده‌اند. برخلاف آسفالتن‌ها، مالتن‌ها تشکیل دهنده بخش ویسکوز قیر هستند و به نوعی، شکل‌پذیری قیرها به این بخش بستگی دارد. در دوره بهره برداری، ترکیب مولکولی قیر آسفالت به دلیل اکسیداسیون، قرار گرفتن در معرض اشعه ماوراء بنفش و گرما تغییر کرده و خواص رئولوژیکی قیر به سمت رفتار سفت‌تر و شکننده‌تر تغییر می‌کند. روند پیرشدگی به این صورت است که آروماتیک‌ها به رزین تبدیل شده و با ادامه پیدا کردن فرآیند، رزین‌ها به آسفالتن تبدیل می‌شوند. این تغییر در ترکیب مولکولی آسفالت پیرشده باعث افزایش نسبت آسفالتن به مالتن و در نهایت منجر به سفت و شکننده بودن قیر و ایجاد ترک خستگی در مخلوط آسفالتی می‌شود (Pradhan,2022). با توجه به اینکه ترکیبات اشباع تمایل کمی به واکنش دارند، مقدار آن در طول واکنش ثابت باقی می‌ماند (Prosperi and Bocci, 2021). آسفالتن ناشی از اکسیداسیون قیر با آسفالتن‌های ابتدایی موجود در ساختار قیر کمی متفاوت هستند (Taghavi et al., 2018).

در مورفولوژی قیر، اکسیداسیون شامل هیدروژن‌زدایی، واکنش سولفیدهای آلکیل به سولفوکسیدها و واکنش کربن‌های بنزیل به کتون است که به نوبه خود اسیدهای کربوکسیلیک را با انیدرید دی کربوکسیلیک تشکیل می‌دهند. این واکنش‌ها با تجزیه و تحلیل گروه عاملی از طریق طیف‌سنجی FTIR[12] به صورت کمی تعیین می‌شود (Prosperi and Bocci, 2021). یک طیف‌نگار مادون قرمز معمولی در شکل ۱ نشان داده شده است. نوارهای جذب در حدود cm^{-1} ۱۶۹۰مربوط به افزایش پیوندهای C=O (گروه‌های کربونیل) و نوار جذب حدود cm^{-1} ۱۰۳۰ سانتی‌متر مربوط به افزایش پیوندهای S=O (گروه‌های سولفوکسید) است.

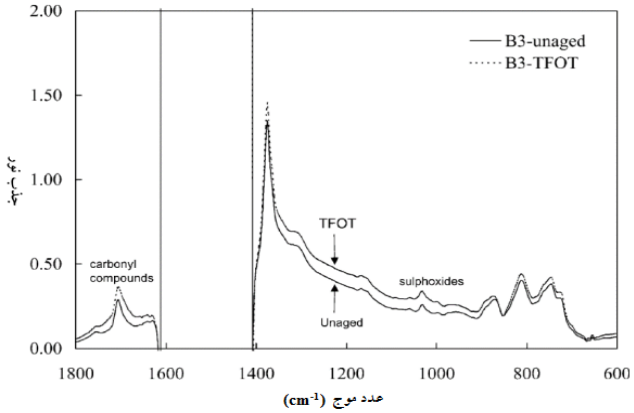
در نتیجه، مناطق اوج دو عدد موج را می‌توان به ترتیب به عنوان اندازه‌گیری غلظت ترکیبات کربونیل و سولفوکسیدها در نظر گرفت.

کربونیل‌ها، کتون‌ها و سولفوکسیدهای تولید شده از طریق اکسیداسیون، با قطبیت مشخصی توصیف شده، با گروه‌های قطبی آگلومراهای با وزن مولکولی بالای تشکیل دهنده قیر ارتباط دارند. این خوشه‌های بزرگ و «سنگین» که معمولاً بخش آسفالتین را درگیر می‌کنند، کاهش تحرک مولکولی را در سیستم کلوئیدی قیر تعیین می‌کنند و منجر به افزایش ویسکوزیته، سفتی و شکنندگی قیر می‌شوند (Prosperi and Bocci, 2021).

دما یک عامل کلیدی در پدیده اکسیداسیون است. به ویژه، درجه اکسیداسیون با هر بار افزایش دما به میزان ۱۰ درجه سانتیگراد (پس از ۱۰۰ درجه سانتیگراد) دو برابر می‌شود. اثر دما بر پیرشدگی قیر بررسی و نشان داده شده است که مدت زمان لازم برای رسیدن به پیری یکسان در آزمایش محفظه تسریع پیری (PAV[13]) با کاهش دما از ۱۰۰ به ۷۵ درجه سانتی‌گراد، ٤ تا ۸ برابر خواهد شد (Prosperi and Bocci, 2021).

با تحریک گروه‌های عاملی قیر توسط اشعه ماوراء بنفش، واکنش اکسیداسیون تقویت و تسریع می‌شود. این موضوع با توجه به قابلیت اندک نفوذ امواج در عمق و

اثربخشی عمده آن در لایه فوقانی روسازی، برای سال‌های متمادی مورد غفلت قرار گرفته است. با این حال، اثر تابش اشعه ماوراء بنفش به ویژه در مناطق جغرافیایی با سطوح بالای تابش خورشیدی و رطوبت بر روی پیرشدگی قیر باید در نظر گرفته شود. مطالعات بسیاری، افزایش ویسکوزیته قیر در اثر اکسیداسیون را با تعداد تشعشعاتی که این ماده در معرض آن قرار گرفته است، مرتبط می‌داند (Prosperi and Bocci, 2021). جدول ۱ خلاصه تغییرات اصلی مشاهده شده در طیف FTIR قیر در نتیجه پیرشدگی را نشان می‌دهد.



شکل ۱. اثر پیرشدگی بر طیف‌نگار FTIR قیر (Prosperi and Bocci, 2021)

جدول ۱. تغییرات طیف‌های کلیدی FTIR در اثر پیرشدگی (Prosperi and Bocci, 2021)

گروه شیمیایی	پیوند	عدد موج تقریبی (cm^{-1})	تغییر با پیرشدگی
سولفوکسید	S=O	۱۰۳۰	افزایش
کربونیل	C=O	۱۶۹۰	افزایش
آلیفاتیک‌ها (تغییر شکل صفحه ای)	CH_2 و CH_3	۱۴۶۰ و ۱۳۷۵	کاهش اندک
آروماتیک‌ها	C=C	۱۶۰۰	کاهش اندک
آلیفاتیک‌ها (کشش نامتقارن یا متقارن)	CH_2 و CH_3	۲۹۲۳ و ۲۸۵۳	کاهش اندک
قطبیت	O-H	۳۴۵۰	افزایش

۵- روش‌های احیای قیر پیر شده RAP

قیر تراشه آسفالت بازیافتی در مقایسه با قیر تازه، بسیار اکسید شده و دارای کندروانی بالا است. به دلیل وجود قیر پیر شده، مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالت بازیافتی زیاد در قیاس با مخلوط‌های با قیر تازه، نسبت به خرابی خستگی و ترک خوردگی حرارتی حساس‌تر هستند.

روش‌های جبران پیرشدگی قیر و اطمینان از عملکرد مناسب روسازی، شامل موارد زیر است:

۱-استفاده از افزودنی‌های جوان‌ساز

۲-استفاده از افزودنی‌های نرم کننده

۳-استفاده از قیر تازه با درجه نرم‌تر

۴-افزایش میزان قیر کل مخلوط

جوان‌سازی قیر پیر شده یک روش معمول برای بازگرداندن خواص قیر به شرایطی مشابه قیر تازه است. مواد جوان‌ساز برای مخلوط‌های به شدت اکسیدشده و حاوی درصد بالای تراشه آسفالت (بیش از ۲۵ درصد تراشه آسفالت) مناسب هستند. در تولید آسفالت بازیافتی، نوع و مقدار جوان‌ساز باید بدرستی تعیین شود، تا بتوان بدون تحت تأثیر قرار گرفتن خواص مخلوط در دماهای بالاتر، خواص دمای پایین آن را بهبود بخشید (فیروزآبادی و خانی سانیج، ۱۳۹۸). عوامل بازیافت کننده، به سه گروه تقسیم می‌شوند (Prosperi and Bocci, 2021; Loise et al., 2019).

- نرم‌کننده‌های ناسازگار که عمدتاً اثر کاهش ویسکوزیته دارند. نرم‌کننده‌های ناسازگار به دلیل دخالت مواد اشباع و پارافینیک، سازگاری کمتری با آروماتیک‌های نفتنیک با قطبیت پایین و

بخش‌های قطبی دارند. این نرم‌کننده‌ها، کندروانی و مدول سختی قیر را کاهش می‌دهند، اگرچه افزایش دوز نرم‌کننده‌های نامحلول منجر به افزایش بی‌ثباتی کلوئیدی می‌شود و در طولانی مدت قیر را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

- نرم‌کننده‌های محلول که تعادل را به اجزای SARA قیر با غنی‌سازی مجدد جزء مالتن باز می‌گرداند. این نرم‌کننده‌ها، مکمل فاز حلال بوده و اغلب از بخش‌های با قطبیت پایین آروماتیک نفتنیک ساختار کلوئیدی قیر تشکیل شده‌اند. این نوع افزودنی‌ها مدول و کندروانی قیر را کاهش می‌دهند. با این حال، امکان متأثر نمودن خودآرایی میسل‌های قطبی و تجمع بین مولکولی وجود دارد.

- جوان‌سازها یا سازگارکننده‌های واقعی که به نوسازی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی قیر از طریق اختلال در ارتباطات بین مولکولی بین آسفالتین‌ها کمک می‌کنند. سازگار کننده‌ها محصولات مهندسی شده‌ای هستند که تمایل به ترکیب با چندین جزء دارند. این مواد، کندروانی قیر و مقدار اجزای با وزن مولکولی بالا را کاهش می‌دهند. اولین اقدام برای بازیابی خواص رئولوژیکی قیر اصلی، تغییر نسبت بین آسفالتین‌های جامد و مالتن‌های سیال به مقادیر بالاتر مالتن است (Loise et al., 2019). جوان‌ساز به عنوان عامل بازیافت، خواص «نرم‌تر» و «سازگارکننده» قیر را موجب گردیده و در عین حال تأثیر پیر شدگی روی آسفالت را معکوس می‌کند. اثر ماده جوان‌ساز، بازیابی خواص مکانیکی، شیمیایی و رئولوژیکی قیر پیر شده با تأمین عمر خدمت جدید معادل با عمر خدمت قیر بکر است (Zahoor et al., 2021).

به طور کلی، هدف از استفاده از جوان‌ساز شامل بازگرداندن ویژگی‌ها و خصوصیات قیر پیر شده به سطح سازگاری مناسب برای بکارگیری در مخلوط آسفالتی مورد استفاده در جاده‌ها، بازگرداندن ویژگی‌های شیمیایی قیر پیر شده به حد بهینه جهت تأمین دوام کافی و تأمین قیر اضافی کافی برای پوشش سنگدانه‌های جدید و برآوردن الزامات طراحی مخلوط است (Zhou et al., 2019).

نوع جوان‌ساز باید به منظور برآورده ساختن معیارهای کوتاه مدت و بلندمدت به دقت انتخاب شود. در معیار کوتاه مدت جوان‌ساز باید به سرعت به قیر تراشه آسفالت نفوذ کرده و آن را روان و آماده کند. لازم است با ساخت مخلوط با اندود شدگی یکنواخت از کاهش اصطکاک و قابلیت تغییرشکل دائمی (شیارشدگی) مخلوط جوان‌سازی شده اجتناب شود. علاوه بر این، رسیدن به هم‌آمیزی کامل جوان‌ساز در قیر پیر شده دشوار بوده و عدم هم‌آمیزی کامل موجب توزیع و خواص غیریکنواخت در مخلوط بازیافتی می‌شود. فرآیند هم‌آمیزی یک جوان‌ساز شامل چهار مرحله است (Zhou et al., 2019). ابتدا، جوان‌ساز یک لایه با کندروانی بسیار کم در اطراف سنگدانه‌های پوشیده از قیر پیرشده تشکیل می‌دهد. در مرحله دوم، جوان‌ساز شروع به نفوذ در قیر پیرشده و نرم کردن آن می‌کند و مقدار آن در لایه بیرونی کم می‌شود. در مرحله سوم، جوان‌ساز به قیر پیر نفوذ کرده و ضمن کاهش کندروانی لایه داخلی، کندروانی لایه بیرونی به تدریج افزایش می‌یابد. در نهایت، با گذشت زمانی مشخص، توازن در اکثر لایه‌های قیر بازیافتی بدست می‌آید.

در معیار بلندمدت، خواص شیمیایی باید به منظور اصلاح رئولوژی قیر و به حداقل رساندن ترک‌های خستگی و دمای پایین تغییر کند. این تغییرات باید بدون هیچگونه تأثیر منفی روی خصوصیات شیارشدگی که معمولاً در رابطه با بکارگیری قیرهای نرم است، ایجاد شود. علاوه بر این، قیر جوان‌شده باید چسبندگی و پیوستگی کافی بین دانه‌های سنگدانه را برای جلوگیری از آسیب رطوبتی و جداشدگی فراهم کند. یکی دیگر از مسائل در بلندمدت مربوط به پیرشدگی قیر جوان‌شده است. گزارش شده است که پیرشدگی قیر جوان‌شده سریع‌تر از قیر تازه است. در مقابل، برخی مطالعات نیز روند مشابهی را برای هر دو قیر تازه و قیر جوان‌شده نشان داده‌اند (Borghi et al., 2017). به طور کلی، پیرشدگی دوم در یک قیر جوان شده نسبت به پیرشدگی یک قیر بکر ضرر کمتری دارد و حساسیت به پیری مخلوط‌های بازیافتی به طور قابل‌توجهی کمتر از قیر اصلی است. در واقع، مخلوط‌های بازیافتی (که قبلاً حاوی مقدار معینی از قیر اکسید شده هستند) کمتر مستعد پیرشدگی طولانی‌مدت هستند (Prosperi and Bocci, 2021).

٦- روش‌های بررسی پیرشدگی و جوان‌سازی قیر

امروزه روش‌های بسیار متنوعی برای تجزیه و تحلیل خواص شیمیایی قیر موجود است. هر روش دارای محدودیت‌ها و اشکالاتی است، زیرا نتایج به عنوان تابعی از ماهیت قیر و شرایط فرآیند تجزیه و تحلیل متفاوت است. بنابراین، برای بررسی عمیق خواص شیمیایی قیر و داشتن یک دید کلی دقیق و روشن از نحوه پیرشدگی و جوان‌سازی قیر، ترکیب آزمایش‌های شیمیایی متعدد، همراه با خصوصیات رئولوژیکی و سنتی، مناسب است. لذا، تعریف یک دستورالعمل چند

آزمایشی برای توصیف اثرات پیرشدگی و جوان‌سازی در سطح شیمیایی می‌تواند مبنایی برای کاربردهای آتی بر روی قیرهای پیچیده‌تر (قیرهای اصلاح‌شده با پلیمر، قیرهای شامل نانوذرات و ...) باشد. متداول‌ترین روش‌های مورد استفاده برای آنالیز شیمیایی قیر در جدول ۲ خلاصه شده و در ادامه توضیح داده شده است.

جدول ۲. متداول‌ترین روش‌های مورد استفاده برای آنالیز شیمیایی قیر

روش	نوع آنالیز	پارامترهای مورد استفاده
میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM[14])	میکروسکوپی	خواص ریزساختاری و میکرومکانیکی قیر
طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR)	شیمیایی	تعداد گروه‌های کربونیل و سولفوکسید
کروماتوگرافی لایه نازک با تشخیص یونیزاسیون شعله (TLC-FID[15])	شیمیایی	میزان روغن اشباع، آروماتیک، آسفالتین و رزین
کروماتوگرافی نفوذ ژل با فشار بالا (HP-GPC[16])	شیمیایی	تعداد گروه‌های شیمیایی و وزن مولکولی

٦-١- میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)

تست AFM یک آنالیز غیر مخرب است که امکان نمایش مورفولوژی سطح یک نمونه قیر و همچنین اطلاعات مربوط به سفتی، پیوستگی و برهم‌کنش‌های مولکولی را در سطح میکروسکوپی فراهم می‌کند. درک اصل اساسی که این آزمون بر آن استوار است بسیار آسان است. این دستگاه مجهز به یک کنسول انعطاف‌پذیر است که به یک جزء پیزوالکتریک متصل است و انتهای آن دارای نوک است. در طول آزمایش، با لغزش نوک روی سطح قیر، موقعیت آن از طریق یک سیستم لیزری اندازه‌گیری شده و مقاومت در برابر حرکت -که وابسته به فاصله بین اتم‌ها است- ثبت می‌شود. با تطبیق این اطلاعات، اسکن دقیقی از سطح نمونه قیر در مقیاس اتمی جمع‌آوری می شود.

٦-٢- طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR)

طیف‌سنجی FTIR یک فناوری گسترده برای شناسایی و تجزیه و تحلیل ترکیبات آلی است. به طور خاص، FTIR روشی برای تعیین ساختار مولکولی یک ماده با اندازه‌گیری نوسانات اتم (چرخش‌ها و ارتعاشات) است. در طول آزمایش، تشعشعات مادون قرمز به نمونه برخورد می‌کند که گروه‌های عاملی اتمی آن بخشی از این تشعشعات را جذب می‌کنند. به طور خاص، عدد موج ویژه تابش جذب شده تابعی از حالت ارتعاش گروه عملکردی است. از طریق اعمال تبدیل فوریه، طیف جذب شده نمونه به دست می‌آید.

هر گروه عملکردی حالت‌های ارتعاشی مختلفی دارد که تعداد آنها به تعداد اتم‌ها و نوع پیوند مربوط می‌شود. ارزیابی خصوصیات قیر از طریق طیف‌سنجی FTIR اطلاعات مختلفی را ارائه می‌دهد. تجزیه و تحلیل موقعیت اوج در طیف، امکان شناسایی گروه‌های عملکردی را فراهم می‌کند. علاوه بر این، ارتفاع قله‌ها، امکان کمّی‌سازی غلظت گروه عملکردی را فراهم می‌کند.

٦-٣- کروماتوگرافی لایه نازک با تشخیص یونیزاسیون شعله (TLC-FID)

کروماتوگرافی لایه نازک با تشخیص یونیزاسیون شعله برای تعیین مقدار هر جزء SARA در قیر استفاده می‌شود. قیر در ابتدا با حلال سیکلوهگزان مخلوط شده و مقدار کمی از محلول روی یک میله کوارتزی قرار می‌گیرد. سپس، این روش با استفاده از سه حلال دیگر (n-هگزان، تولوئن، دیکلرومتان) تکرار می‌شود. و اجزای جدا شده (یعنی آسفالتین‌ها، رزین‌ها، مواد آروماتیک و اشباع) در سری میله کوارتزی به ترتیب در ۰، ۲/۵، ۵ و ۱۰ سانتیمتر قرار دارند که تابعی از کاهش قطبیت است. در نهایت، میله کوارتزی با تشخیص یونیزاسیون شعله تجزیه و تحلیل می شود که گام به گام مناطق مختلف مربوط به چهار جزء SARA را یونیزه کرده و امکان تخمین درصد آنها را در قیر فراهم می‌کند.

٦-٤- کروماتوگرافی نفوذ ژل با فشار بالا (HC-GPC)

کروماتوگرافی نفوذ ژل با فشار بالا، روش آزمایشی است که امکان تعیین کمّیت توزیع اندازه مولکولی قیر را فراهم می‌کند. نمونه قیر در تتراهیدروفوران (THF) حل شده و محلول برای آنالیز کروماتوگرافی در یک ستون قرار می‌گیرد. ژل (فاز ثابت) به عنوان یک عامل تثبیت کننده استفاده می‌شود که نفوذ اجزای سبک را کاهش می‌دهد، در حالی که فشار بالا باعث افزایش سرعت آزمایش و راندمان جداسازی می‌شود. به طور معمول، سیزده برش از الگوی کروماتوگرافی به منظور تمایز بین اندازه‌های مولکولی بزرگ (برش‌های ۱-۵)، متوسط (برش‌های ٦-۹)، و کوچک (برش‌های ۱۰-۱۳) در نظر گرفته می‌شود.

وزن مولکولی را می‌توان بر حسب متوسط وزنی وزن مولکولی(M_w) و متوسط عددی وزن مولکولی (M_n) نشان داد. علاوه بر M_w وM_n ، نسبت آنها (M_w/M_n) به عنوان "شاخص پراکندگی وزن مولکولی" نیز اغلب در مطالعه توزیع اندازه مولکولی قیر در نظر گرفته می‌شود.

به منظور بررسی خواص شیمیایی قیر و تغییرات آن در فرایند پیرشدگی و جوان‌سازی قیر، ترکیبی از روش‌های معرفی شده فوق به منظور رفع معایب و کاستی‌های هر کدام و دستیابی به داده‌های اطلاعاتی کافی ضرورت دارد. در جدول شماره ۳، خلاصه‌ای از مزایا و معایب هر یک از روش‌ها ارائه شده است.

جدول ۳. مزایا و محدودیت‌های روش‌های مختلف برای مطالعه پیرشدگی و جوان‌سازی قیر

روش		مطالعه پیرشدگی	مطالعه جوان‌سازی
میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)	مزیت	مطالعه تجزیه شیمیایی- مورفولوژیکی قیر پیر شده	تأثیرگذاری فرآیند جوان‌سازی بر مورفولوژی سطح قیر پیر شده، به ویژه ساختارهای زنبور عسلی
	محدودیت	وجود شکاف علمی در رابطه با تکامل فاز AFM با سایر خواص شیمیایی و مکانیکی، به دلیل بسیار جدید بودن این رویکرد	در مرحله اولیه بودن رویکرد تجربی و ضرورت تحقیقات بیشتر برای درک عمیق نحوه بهره‌برداری از این ابزار قدرتمند
طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR)	مزیت	امکان تعیین شدت پیرشدگی از طریق تغییر طیف‌های خاص (به‌ویژه سولفوکسید و کربونیل)	امکان تشخیص وجود ماده جوان کننده در HMA با مقایسه طیف افزودنی خالص و قیر بازیافتی
	محدودیت	عدم متمایز و برجسته نمودن تغییرات سیستم کلوئیدی قیر و عمدتاً تمرکز بر روی اثرات اکسیداسیون	دشواری تعیین مقدار جوانساز در قیر بازیافتی به دلیل داشتن طیف خاص در اکثر مواد افزودنی در تناظر با طیف‌های سولفوکسید و کربونیل
کروماتوگرافی لایه نازک با تشخیص یونیزاسیون شعله (TLC-FID)	مزیت	امکان برآورد شدت پدیده‌ها با توجه به سیر تغییرات اجزای SARAبا پیرشدگی قیر	امکن درک اثربخشی فرآیند جوان‌سازی در بازیابی تناسب SARA
	محدودیت	عدم وجود ارتباط واضح بین نسبت SARA و رفتار مکانیکی قیر	ارتباط ضعیف بین نسبت SARA پس از جوان‌سازی و بهبود مؤثر خواص رئولوژیکی قیر پیر شده
کروماتوگرافی نفوذ ژل با فشار بالا (HP-GPC)	مزیت	امکان کمّی سازی اثرات جابجایی اجزاء SARA و تجمع آسفالتین‌ها به دلیل پیرشدگی	امکان شناسایی قابلیت یک جوان‌کننده در جداسازی جزء آسفالتین یا داشتن اثر رقیق‌سازی از طریق تجزیه و تحلیل توزیع وزن مولکولی
	محدودیت	عدم قطعیت در مورد چگونگی اثرگذاری پدیده‌های مختلف پیرشدگی (اکسیداسیون، از دست دادن مواد فرار و غیره) بر توزیع وزن مولکولی	عدم تعریف روشی دقیق برای تخمین درجه اختلاط بین قیر پیر شده و بکر با/بدون جوان‌ساز تاکنون

انواع جوان‌سازها، خواص و ویژگی‌های آنها

به طور کلی، جوان‌سازها با توجه به ماهیت خود، به دو گروه افزودنی‌های نفتی و افزودنی‌های بیولوژیکی طبقه‌بندی می‌شوند. هر دو افزودنی به طور موفقیت‌آمیزی برای نرم کردن قیر پیر شده استفاده شده و امکان برآوردن الزامات از نظر نفوذ، نقطه نرمی و ویژگی‌های رئولوژیکی را فراهم می‌کنند.

طبق استاندارد طبقه‌بندی عامل بازیافت مخلوط داغ (ASTM D4552)؛ جوان‌سازها عمدتاً از طریق ویسکوزیته اندازه‌گیری شده در ۶۰ درجه سانتیگراد به شش گروه طبقه‌بندی می‌شوند که در جدول ٤ نشان داده شده است. به طور کلی، هر چه عدد ویسکوزیته کوچکتر باشد، جوان‌ساز مؤثرتر است.

جدول ٤. خصوصیات فیزیکی عامل بازیافت مخلوط داغ طبق ASTM D4552

آزمایش	روش آزمایش ASTM	RA1	RA5	RA25	RA75	RA250	RA500
ویسکوزیته، ٦٠°C ، mm^2/s (cSt)	D2170 یا D2171	٥٠–١٧٥	١٧٦–٩٠٠	٩٠١–٤،٥٠٠	٤،٥٠١–١٢،٥٠٠	١٢،٥٠١–٣٧،٥٠٠	٣٧،٥٠١–٦٠،٠٠٠
نقطه اشتعال، درجه سانتیگراد	D92	٢١٩	٢١٩	٢١٩	٢١٩	٢١٩	٢١٩
اشباع‌ها، حداکثر درصد وزنی	D2007	٣٠	٣٠	٣٠	٣٠	٣٠	٣٠
آزمایش‌ها روی باقیمانده RTFO یا TFO در دمای 163°C ١- حداکثر نسبت ویسکوزیته ٢- حداکثر درصد تغییر وزنی	D2872 یا D1754	٣	٣	٣	٣	٣	٣
		٤	٤	٣	٣	٣	٣
وزن مخصوص	D7 یا D1298	گزارش	گزارش	گزارش	گزارش	گزارش	گزارش

نسبت ویسکوزیته: نسبت ویسکوزیته باقیمانده قیر پس از آزمایش RTFO یا اون TFO به ویسکوزیته قیر بکر

علاوه بر سوخت‌ها و قیرها، جوان‌سازهایی که می‌توانند خواص قیر پیر شده را بهبود بخشند، اغلب از فرآوری نفت خام تولید می‌شوند. این محصولات شامل فراورده‌های آروماتیک، روغن‌های پارافینیک، روغن‌های نفتنیک و روغن موتورهای مصرف‌شده است. این فرآورده‌های نفتی برای سالیان متمادی عامل اصلی مورد استفاده برای بهبود ویژگی‌های قیر پیر شده بوده‌اند. در دهه‌های اخیر، تحقیقات به سمت یافتن موادی با اثرات جوان‌ساز برای قیر پیر شده که هزینه کمتری داشته و از نظر زیست‌محیطی پایدار هستند، حرکت کرده است. این مواد، جوان‌سازهای زیستی نامیده شده و محصولاتی مانند روغن چوب، روغن کلزا، روغن سویا، روغن آفتابگردان، روغن ذرت، روغن استفاده شده جهت پخت و پز، باقی‌مانده‌های روغن کرچک و روغن‌های ارگانیک از جمله آنها هستند. مطالعات متعدد نشان داده که این جوان‌سازها قادر به بازیابی خواص اصلی قیر بوده و سازگار با محیط زیست هستند (Prosperi and Bocci, 2021).

جوان‌سازهای زیستی را نمی‌توان بر اساس مشخصات مبتنی بر ویسکوزیته طبقه‌بندی کرد. لذا، شاخص‌های جدید برای طبقه‌بندی و انتخاب این جوان‌سازها تعریف شده‌اند. در همین راستا، مقدار کل اسید چرب، به عنوان یک شاخص عملکردی تعریف شده است. در حالت کلی، مقدار اسید چرب بیشتر، نشان دهنده موثرتر بودن جوان‌ساز زیستی است. در انتخاب جوان‌ساز زیستی نیز، تأمین مشخصات زیر توصیه می‌شود (Zhou et al., 2019).

١) میزان اسید چرب کل بیش از ٩٧٪. در صورت کاهش مقدار کل اسید چرب جوان‌ساز زیستی به کمتر از ٩٧٪، خرابی شیار شدگی مخلوط آسفالتی حاوی این جوان‌ساز، تحت بارگذاری ترافیکی سنگین و در شرایط آب و هوایی گرم، موجب نگرانی خواهد بود.

٢) میزان اسید چرب اشباع کمتر از ٥٠٪ برای جلوگیری از اثرات منفی بالقوه واکس

٣) نقطه اشتعال بالا برای تأمین ایمنی کافی در حین تولید کارخانه‌ای مخلوط (بیش از ٢١٩ درجه سانتیگراد)

٤) ویسکوزیته دینامیکی (یا سینماتیکی) در دمای ٦٠ درجه سانتیگراد برای پمپاژ جوان‌ساز زیستی به درام اختلاط

٥) نسبت ویسکوزیته دینامیکی یا سینماتیکی باقیمانده آزمایش RTFO[١٧] به جوان‌ساز اولیه جهت غربال کردن جوانسازهای زیستی حساس به پیر شدگی کوتاه‌مدت (حداکثر برابر ٢)

٦) درصد افت وزنی پس از انجام آزمایش RTFO یا TFO[١٨]. از دست دادن گسترده مواد فرار (مولکول‌های کوچکتر)، منجر به افت وزنی بالاتر می‌شود. لذا توصیه می‌شود که افت وزنی کمتر از ٥٪ باشد.

٧) وزن مخصوص

مشخصات ویسکوزیته دینامیکی در ٦٠ درجه سانتیگراد و وزن مخصوص فقط جهت بهره‌گیری در زمان تولید در کارخانه و خرید مفید هستند.

مرکز ملی فناوری آسفالت (NCAT[١٩])، عوامل بازسازی کننده را بر اساس منشأ آنها به پنج گروه عمده طبقه‌بندی می‌کند:

روغن پارافینیک: روغن‌های پارافینیک، روغن‌های روانکاری شده دوباره تصفیه شده هستند. این روغن‌ها، هیدروکربن‌های اشباع شده‌ای هستند که از به هم پیوستن هیدروژن و کربن تشکیل شده‌اند. این روغن‌ها را هیدروکربن‌های نرمال (هیدروکربن‌های راست زنجیر بلند) و هیدروکربن‌های ایزو (شاخه‌دار) تشکیل می‌دهند. ممکن است در ساختمان این روغن‌ها مقادیری روغن‌های نفتیک نیز وجود داشته باشد. در مقایسه با روغن‌های نفتنیک، روغن‌های پارافینیک دارای خواص مقاومت بالا در مقابل اکسید شدن، ویسکوزیته بالاتر، فراریت کم، نقطه اشتعال بالاو وزن مخصوص پایین هستند. مقادیر زیاد هیدروکربن‌های آروماتیک و غلظت کم آسفالتن‌ها، روغن پارافینیک را به جوان‌سازی جذاب تبدیل می‌کند. در مقایسه ۵ جوان‌ساز مختلف روغن نفتنیک، روغن پارافینیک، عصاره آروماتیک، روغن چوب و اولئیک اسید و در بازیابی درجه عملکردی دمای بالا و پایین قیر پیر شده، روغن پارافینیک در کاهش درجه عملکردی دمای بالای قیر پیر شده و کاهش درجه عملکردی دمای پایین، بهترین عملکرد را داشت (Ali et al., 2016).

عصاره آروماتیک: عصاره‌های آروماتیک، فرآورده‌های نفتی تصفیه شده با ترکیب شیمیایی حاوی حلقه‌های آروماتیک قطبی غیراشباع سرطان‌زا هستند. عصاره‌های آروماتیک حاوی تقریباً ۷۵ درصد روغن‌های آروماتیک و ترکیبات رزینی با روغن‌های اشباع متعادل هستند (Zaumanis et al., 2015).

روغن نفتنیک: روغن‌های نفتنیک، هیدروکربن‌های طراحی شده برای اصلاح قیر هستند. **این** روغن‌ها، هیدروکربن‌های حلقوی سیرشده یک یا چند حلقه‌ای بوده و هر حلقه می‌تواند دارای ۵ تا ٦ کربن باشد. این روغن‌ها در مقایسه با روغن‌های پارافینیک دارای خواص مقاومت نه چندان خوب در مقابل اکسید شدن، ویسکوزیته پایین‌تر، فراریت بالا، نقطه اشتعال پایین، خاصیت حل کنندگی بهتر و وزن مخصوص بالاتر هستند.

اسیدهای چرب: متفاوت از جوان‌سازهای سنتی مبتنی بر نفت، جوان‌سازهای زیستی یک جزء مشترک دارند: اسید چرب (یا لیپید). اسید چرب یک اسید کربوکسیلیک با زنجیره آلیفاتیک با دم آلیفاتیک ۱۳ تا ۲۱ کربن است. اسیدهای چرب بدون پیوندهای دوگانه کربن-کربن به عنوان اشباع شناخته می‌شوند. آنهایی که دارای پیوندهای دوگانه هستند غیراشباع نامیده می‌شوند. اسیدهای چرب غیراشباع بیشتر به دو دسته تک غیراشباع (دارای یک پیوند دوگانه) و چند غیر اشباع (دارای بیش از یک پیوند دوگانه) طبقه‌بندی می‌شوند. مقدار اسید چرب به طور مستقیم بر عملکرد جوان‌سازهای زیستی تأثیر می‌گذارد.

تری‌گلیسیرید: تری‌گلیسیریدها مولکول‌هایی هستند که از سه زنجیره اسیدهای چرب (آزاد) تشکیل شده‌اند که به طور کووالانسی از طریق پیوندهای استری به یک نیمه گلیسرول متصل شده‌اند. زنجیره‌های اسید چرب بسته به تعداد پیوندهای دوگانه می‌توانند اشباع یا غیراشباع باشند. پیوندهای غیراشباع بیشتر مستعد اکسید شدن، شکست و پلیمریزاسیون هستند (Santos et al., 2022).

-روغن چوب: روغن چوب، محصول جانبی تولید کاغذ بوده و به صورت خام و یا به صورت فرآورده‌های تصفیه شده موجود است. روغن چوب خام، بسته به نوع درخت مورد استفاده، حاوی اسیدهای چرب، اسیدهای رزینی و غیرصابونی با نسبت‌های مختلف است. استفاده از روغن چوب در تولید مخلوط داغ با بسیاری از مواد امولسیون‌ساز، عوامل ضدعریان شدگی و افزودنی‌های مخلوط گرم دارای سابقه طولانی است (Zaumanis et al., 2015).

نتایج یک تحقیق نشان داده است که ماهیت شیمیایی تری‌گلیسیریدها، اسیدهای چرب و روغن‌های چوب ممکن است حساسیت رطوبتی را افزایش داده و باعث افزایش سرعت تخریب قیر شوند. همچنین، مقدار بالای اکسیژن تری گلیسیریدها، اسیدهای چرب و روغن‌های چوب ممکن است باعث کاهش عملکرد بلند مدت قیر و مخلوط اصلاح شده توسط این مواد شود (Haghshenas et al., 2020).

جداول ۵ و ٦، مطالعات اخیر در مورد استفاده از مواد افزودنی برای جوان‌سازی قیر پیر شده تراشه‌های آسفالت بازیافتی و شرح مختصری از ماهیت افزودنی‌های آزمایش شده را نشان می‌دهد. اغلب جوان‌سازها تجاری بوده و استفاده از آنها موجب افزایش هزینه فرآیند بازیافت می‌شود. همواره گرایش به یافتن جوان‌سازهای کم‌هزینه موجود در محل وجود دارد.

جدول ۵. مواد افزودنی بیولوژیکی مورد استفاده برای جوان‌سازی قیر پیر شده (Prosperi and Bocci, 2021)

افزودنی	میزان مصرف	توضیح	مراجع
روغن چوب	٪۲۰-٤	روغن چوب یک محصول ارگانیک است که از فرآیند کرافت[۲۰]، روشی برای تبدیل چوب به خمیر چوب، جزء اصلی کاغذ، به دست می‌آید و حاوی اسیدهای چرب، رزین‌های اسیدی و سورفکتانت[۲۱] است.	(Mokhtari et al., 2017; Cavalli et al., 2018)
ضایعات روغن خوراکی گیاهی (ترکیب روغن های اصلی سرخ کردنی)	٪۲۰-۱	ترکیب شیمیایی این افزودنی‌ها عمدتاً حاوی اسیدهای چرب و متیل استرها[۲۲] با هر دو ویژگی اولئوفیلیک[۲۳] و آب‌دوست است. به دلیل استحصال آن از روغن سرخ کردنی غذای سریع و راحت، به آن «گریس زرد» نیز می گویند.	(Noor et al., 2019; Gokalp and Emre, 2019; Li et al., 2019; Almamnun et al., 2020; Majidifard et al., 2019)
روغن آفتابگردان	٪۹-۵	روغنی است که از دانه‌های آفتابگردان استخراج می‌شود و حاوی تری‌گلیسیرید، با مقدار بالای اسید لینولئیک[۲۴] و دارای درصد بالایی از اسیدهای چرب غیراشباع چندگانه است.	(Cavalli et al., 2018)
روغن بَزرَک یا روغن کتان	٪۹-٦	روغنی است که از فشردن دانه‌های کتان که قبلاً خشک شده یا برشته شده‌اند به دست می‌آید. عمدتاً از تری‌گلیسیرید تشکیل شده است. یکی از روغن های گیاهی با بالاترین غلظت اسید ولینولنیک اسید است.	(Krol et al., 2016)
روغن سویا	٪۹ -٦	این ماده با استخراج از سویا از طریق فرآیند خاصی به نام "خرد کردن[۲۵]" با استفاده از حلال های شیمیایی به دست می‌آید. همچنین عمدتاً از تری‌گلیسیرید تشکیل شده است.	(Elkashef et al., 2019)
روغن کلزا	٪۹ - ۱/۵	این روغن گیاهی است که از دانه‌های کلزا تولید می‌شود و به طور طبیعی دارای گونه‌های بسیاری است. بنابراین روغن حاصل به ویژگی‌های کلزای که از آن استخراج می‌شود بستگی دارد. ترکیب شیمیایی شامل اسیدهای چرب و متیل استرها است.	(Krol et al., 2016; Kowalski et al., 2017)
روغن کرچک	٪۵۰ -۵	روغن گیاهی بسیار با ارزشی که از دانه‌های گیاه کرچک استخراج شده، عمدتاً از آسیل گلیسریدها[۲۶] تشکیل شده و اسید چرب اصلی موجود، اسید ریسینولئیک[۲۷] است.	(Zeng et al., 2018;Nayak etal., 2015)
روغن پوسته بادام هندی	٪۵	این روغنی است که از رزین‌های طبیعی مشتق می‌شود که فضاهای بین بافتی ساختار لانه زنبوری پوسته بادام هندی را پر می‌کند. رزین از ۸۰ تا ۸۵ درصد اسیدهای آنکاردیال[۲۸] تشکیل شده است و باقیمانده آن کاردول و متیل کاردول[۲۹] است.	(Cavalli et al., 2018)
روغن ذرت	٪۹ - ۱/۵	این روغنی است که از جوانه ذرت استخراج می‌شود. ترکیبی مشابه روغن آفتابگردان داشته و بسیار غنی از اسید لینولئیک است. عمدتاً از تری‌گلیسیرید تشکیل شده است.	(Zhao et al., 2018)
روغن پنبه دانه	٪۱۲	این روغن گیاهی است که از دانه‌های گیاهان پنبه استخراج می‌شود. عمدتاً از تری‌گلیسیرید تشکیل شده است.	(Nogueira et al., 2019; Chen et al., 2014)
اسید اولئیک	٪٤/۵ - ۲/۵	یک کربوکسیلیک اسید تک غیراشباع ۱۸ کربنی از سری امگا ۹ است. به شکل تری‌گلیسیرید، جزء مهم چربی‌های حیوانی است و فراوان‌ترین ترکیب اکثر روغن‌های گیاهی است.	(Ali et al., 2016)
روغن آلی از ضایعات چوب	٪ ۱۲/٤– ۲	طیف بسیار وسیعی از انواع الوار مانند افرا قرمز، مگنولیا، بلسان، صنوبر، لیندن، راش و کاج قابل استفاده است.	(Yang et al., 2017; Borghi etal., 2017)
چربی گیاهی ضایعاتی	٪۱۲	مواد متشکل از گریس ضایعاتی آلی صنایع غذایی بوده که در دمای محیط به دلیل غلبه تری‌گلیسیریدهای اشباع لوریک و میریستیک[۳۰] نیمه جامد است و در بیشتر مواقع سال نیاز به حرارت دارد (Zaumanis et al., 2014).	(Zaumanis et al., 2014)

جدول ٦. مواد افزودنی مشتق شده از نفت مورد استفاده برای جوان‌سازی قیر پیر شده (Prosperi and Bocci, 2021)

افزودنی	میزان مصرف	توضیح	مراجع
روغن موتور ضایعاتی	۱-٪۲۰	روغن ضایعاتی که در موتورها استفاده می‌شود و عمدتاً از روغن پارافینیک تولید می‌شود.	(Li et al., 2019; Almamnun et al., 2020)
پودر لاستیک حاصل از تجزیه در اثر حرارت لاستیک‌های مستعمل	۵-٪۱۲	پیرولیز[۳۱] یک فرآیند تجزیه ترموشیمیایی مواد آلی است که با اعمال گرما در غیاب کامل عامل اکسید کننده به دست می‌آید. محصول پیرولیتیک حاصل از تجزیه در اثر حرارت لاستیک‌ها، حاوی غلظت بالایی از هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای است.	(Rzek et al., 2020; Avsenik et al., 2016)
عصاره‌های آروماتیک	۵-٪۹	عصاره‌های آروماتیک، محصولات تصفیه شده نفت خام و از سنتی‌ترین گروه-های جوان‌ساز هستند. ساختار شیمیایی آنها شامل حلقه‌های قطبی آروماتیک است.	(Ali et al., 2016;Yousefi et al., 2021)
روغن نفتنیک	۵۰-٪۴۰۰	روغن‌های نفتنیک، روغن‌های پایه معدنی نفتنیک خالص با کیفیت بالا هستند که از تصفیه هیدروژنی نفت خام منتخب به دست می‌آیند.	(Ali et al., 2016)
قیر نرم	٪۵	قیر با درجه نفوذ بالا و سفتی کم. این ماده معمولاً به عنوان یک عامل روان کننده طبقه بندی می‌شود، زیرا خواص فیزیکی و شیمیایی قیر پیر شده را بازیابی نمی‌کند. با این حال، قیر نرم می‌تواند منجر به کاهش ویسکوزیته مخلوط قیر شود.	(Pradhan et al., 2022)

عملکرد انواع جوان‌سازها

به طور کلی، در مخلوط‌های آسفالت گرم، افزایش میزان تراشه آسفالت بازیافتی و افزودن جوان‌سازها باعث بهبود عملکرد شیارشدگی می‌شود. جوان‌ساز می‌تواند حد بالایی میزان مصرف تراشه آسفالت بازیافتی را افزایش دهد. با این حال، افزایش مقدار جوان‌ساز، به دلیل نرم کردن بیش از حد قیر آسفالت بازیافتی، عملکرد شیارشدگی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مقاومت ترک‌خوردگی در دمای پایین مخلوط‌های آسفالت گرم حاوی تراشه آسفالت بازیافتی، با استفاده از جوان‌سازها، قابل بهبود است (Guo et al., 2020).

کاوالی و همکاران (Cavalli et al., 2018) ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و عملکردی قیر پیر شده تراشه آسفالت بازیافتی را با استفاده از ۳ جوان‌ساز زیستی صنعتی (روغن دانه گیاهی، روغن پوسته بادام هندی و روغن چوب) بررسی کرده و نشان دادند که با استفاده از دوزهای مناسب افزودنی، می‌توان به عملکرد قابل قبول مشابه قیر بکر دست یافت. نتایج DSR[۳۲] نشان داد که همه جوان‌سازهای بررسی‌شده قادر به افزایش خواص مکانیکی قیر تراشه آسفالت بازیافتی در حالت پیر نشده هستند. با این حال، تنها دو جوان‌ساز روغن دانه گیاهی و روغن چوب توانستند خواص مکانیکی قیر پیر شده تراشه آسفالت بازیافتی را به سطحی مشابه قیر بکر پیر شده با تفاوت قابل توجه در نتایج مدول مختلط و زاویه فاز بازگردانند. علاوه بر این، با استفاده از شاخص کلوئیدی (COI[۳۳]) – که نسبت وزنی مجموع اجزای آروماتیک و رزین به مجموع اجزای آسفالتین و اشباع است، نشان داده شد که تغییرات مکانیکی ناشی از جوان‌سازها در اثر تغییرات در سطح پیوندهای شیمیایی/گروه‌های عملکردی نیست، بلکه به دلیل بازآرایی در مقیاس مولکولی بالاتر مانند اجزای قطبی/غیر قطبی است. در همین راستا، شاخص پیرشدگی شیمیایی (CAI[۳۴]) به صورت مجموع شاخص کربونیل (CI[۳۵]) و شاخص سولفوکسید (SI[۳۶]) پیشنهاد شد و نشان داده شد که با وجود افزودن جوان‌سازها، اکسیداسیون فیزیکی و شیمیایی معکوس نمی‌شود؛ چرا که این جوان‌سازها، علیرغم نرم کردن قیر تراشه آسفالت بازیافتی، قادر به شکستن پیوند شیمیایی بین مولکول‌ها نیستند. جوان‌سازها، به تنهایی، از پیرشدگی متأثر نشده و افزایش گروه‌های کربونیل و سولفوکسید در نتیجه پیرشدگی قیر تراشه آسفالت بازیافتی است. در طول سال‌های گذشته، مطالعات زیادی جهت ارزیابی امکان‌پذیری استفاده از روغن خوراکی ضایعاتی به عنوان جوان‌ساز انجام پذیرفته که نتایج آن به شرح ادامه است (Zahoor et al., 2021).

– خواص قیر جوان شده با روغن خوراکی ضایعاتی، به طور قابل توجهی متأثر از غلظت روغن است. افزایش دوز مصرف روغن خوراکی ضایعاتی، خواص فیزیکی قیر را تحت تاثیر قرار داده و کاهش ویسکوزیته کلی قیر، منجر به درجه نفوذ بیشتر، شکل پذیری و کاهش نقطه نرمی و وزن مخصوص می‌شود. همچنین، افزودن روغن خوراکی ضایعاتی به قیر، از یک سو انعطاف‌پذیری آن را در دمای پایین‌تر افزایش داده و منجر به مقاومت حرارتی بالاتر می‌شود و از سوی دیگر باعث می‌شود که قیر مستعد تغییر شکل دائمی باشد؛ مگر آنکه اصلاح‌کننده پلیمری بکار گرفته شود.

– ارزیابی رئولوژیکی قیر جوان شده با روغن خوراکی ضایعاتی، نشان دهنده کاهش کلی سفتی است. افزایش دوز این جوان‌ساز و کاهش ویسکوزیته، موجب کاهش مدول برشی پیچیده G^* و سختی خزشی قیر و بهبود زاویه فازی و مقدار m می‌شود. بنابراین، کاهش مقاومت شیارشدگی و بهبود مقاومت در برابر خستگی و ترک حرارتی، با افزودن روغن خوراکی ضایعاتی به قیر پیر شده تأیید شده است.

– کارایی فرآیند جوان‌سازی به طور قابل توجهی متأثر از مقدار اسید، میزان آب و کیفیت کلی روغن خوراکی ضایعاتی است به طوری که با بدتر شدن کیفیت، مقدار اسید و میزان آب به‌تدریج افزایش یافته و پتانسیل جوان‌سازی کاهش می‌یابد.

ارزیابی آزمایشگاهی صورت گرفته توسط مجیدی فرد و همکاران وی بر روی مخلوط آسفالتی با ۶۰٪ و ۱۰۰٪ تراشه آسفالت بازیافتی جوان شده با افزودنی روغن خوراکی ضایعاتی و شامل افزودنی پودر لاستیک نشان داد که افزایش مقدار عامل جوان‌ساز در مخلوط‌های با تراشه آسفالت بازیافتی بالا، از یک طرف کارایی و عملکرد دمای پایین آن‌ها را بهبود می‌بخشد و از طرف دیگر آسیب رطوبتی و مقاومت شیارشدگی را کاهش می‌دهد. بر این اساس، روشی جهت تعیین درصد بهینه جوان‌ساز برای ایجاد تعادل بین خصوصیات عملکردی مخلوط‌های با درصد بالای تراشه آسفالت بازیافتی ارائه کرده‌اند (Majidifard et al., 2019). در تحقیقی دیگر تأیید شد که استفاده از ضایعات روغن خوراکی منجر به بهبود شاخص نفوذ، ویسکوزیته و مقاومت در برابر خستگی می‌شود (Gokalp and Emre, 2019).

طی مطالعه‌ای، پتانسیل شش جوان‌ساز با منشا متفاوت برای بازگرداندن خواص مطلوب قیر با استفاده از روش‌های معمول آزمایش قیر ارزیابی شد و نتایج آن با نتایج آزمایش مربوط به عملکرد مخلوط با ۱۰۰٪ تراشه آسفالت بازیافتی مقایسه شد. نتایج آزمایش قیر نشان داد که با استفاده از دوز بسیار پایین افزودنی‌های آلی در مقایسه با فرآورده‌های نفتی، اثر نرم‌کنندگی مشابه در دسترس است. همچنین ثابت شد که مخلوط‌های جوان شده با همه جوان‌سازها، در برابر شیارشدگی بسیار مقاوم بوده، عملکرد در دمای پایین و مقاومت در برابر خستگی قیر و مخلوط با ۱۰۰٪ تراشه آسفالت بازیافتی بهبود یافته است (Zaumanis et al., 2015). جدول ۷، خلاصه عملکرد عوامل بازسازی کننده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

جدول ۷. خلاصه عملکرد عوامل بازسازی کننده (Zaumanis et al., 2015)

معیار	روش آزمایش	مخلوط/ قیر بکر	مخلوط/ قیر RAP	روغن خوراکی ضایعاتی	گریس ضایعاتی گیاهی	روغن ارگانیک	روغن چوب تقطیری	عصاره آروماتیک	روغن موتور ضایعاتی
نرمی قیر	نفوذ، نرمی، ویسکوزینه	√	×	√	√	√	√	√	√
شیار شدگی	ویل تراک هامبورگ	×	√	√	√	√	√	√	√
خستگی	جاروب دامنه خطی در کرنش ۵٪، سیکل	۱،۰۷۸	۵۹۳	+۲	+۲	+۱	+۱	−۱	−۱
	افت و خیز سنج وزنه افتان FWD، kPa	۸	۵،۵	۰	+۱	+۱	۰	+۱	−۱
ترک خوردگی در دمای پایین	وادادگی خزشی، 1/GPa	۰/۲۵۳	۰/۰۶۷	+۲	+۲	+۱	+۱	+۱	+۱
	مقاومت کششی، kPa	۳،۶۵۰	۳،۹۱۹	−۱	−۱	+۲	+۲	+۲	−۱
	شاخص نفوذ	−۱/۲۹	۲/۵۵	+۱	+۱	+۱	+۱	+۱	+۱
کارایی	ویسکوزیته، cSt	۴۲۵	۲،۵۹۷	+۱	+۱	+۱	+۱	+۱	+۱
	قابلیت تراکم، gyr	۱۰	۳۹	+۱	+۱	+۱	+۱	+۱	+۱
سرجمع (جمع نتایج متوسط معیارها)				۲/۶۷	۳/۱۷	۳/۳۳	۲/۸۳	۲/۳۳	۰/۳۳

۲+: عملکرد نمونه بهتر از مخلوط/قیر بکر و RAP است.

۱+: عملکرد نمونه بهتر از مخلوط/قیر است.

۰: عملکرد نمونه مشابه مخلوط/قیر RAP است.

۱−: عملکرد نمونه ضعیف‌تر از مخلوط/قیر RAP است.

برقی و همکاران وی عملکرد کوتاه‌مدت و بلندمدت قیر پیر شده حاوی جوان‌ساز زیستی مشتق شده از درخت کاج را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که خواص فیزیکی و رئولوژیکی قیر پیر شده با افزودن دوز مناسب جوان‌ساز به طور کامل احیا می‌شود؛ در حالی که ترکیب شیمیایی باید با جزئیات بیشتری بررسی شود. قیرهای جوان‌شده عملکرد طولانی‌مدت بسیار خوبی به ویژه در دماهای بالا و پایین و همچنین مقاومت قابل توجه در برابر خستگی در دماهای متوسط نشان دادند (Borghi et al., 2017).

توصیه می‌شود برای انتخاب مقدار بهینه عامل جوان‌ساز، آب و هوا و شرایط جاده در نظر گرفته شود. در محیط با آب و هوای گرم، به منظور برآورده نمودن مشخصات دمای پایین قیر عملکردی، مقدار عامل بازیافت باید بهینه باشد. در شرایط آب و هوای سرد نیز، میزان بالاتری از عامل جوان‌ساز به منظور تحقق مشخصات لازم در دمای بالا باید انتخاب شود. همچنین پیشنهاد می‌شود برای اطمینان از عملکرد کوتاه‌مدت روسازی، حداقل مقدار مناسب عامل جوان‌ساز برای تولید مخلوط تعیین و استفاده شود. با گذشت زمان و در طول عمر مفید روسازی، با پاشیدن عامل جوان‌ساز بر روی روسازی، حفظ ویژگی‌های مطلوب عملکرد طولانی‌مدت در سطح ممکن است (Majidifard et al., 2019).

۷-نتیجه‌گیری

در بخش مهندسی روسازی راه، ساده‌ترین راه برای ترویج اقتصاد دایره‌ای، تشویق به استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی است. یکی از مسائل اصلی در مورد استفاده از این ماده بازیافتی، قیر پیر شده موجود در آن است. فرآیند پیرشدگی و جوان‌سازی روسازی‌های قیری بر دوام و عمر مفید آنها به طور قابل توجهی تأثیرگذار است. لذا دستیابی به دانش کامل در زمینه خواص شیمیایی و رفتار رئولوژیکی ضروری است. پیرشدگی قیر شامل از بین رفتن مواد فرار، اکسیداسیون و سخت شدن فیزیکی و استریک است. پیرشدگی منجر به عدم تعادل اجزای SARA و تشکیل آگلومراهای مولکولی بزرگ می‌شود که به نوبه خود بر تحرک اجزا در سیستم کلوئیدی تأثیر گذاشته و موجب شکنندگی قیر می‌شود. برای بازگرداندن خواصی که قیر پیر شده از دست می‌دهد، از جوان‌سازها استفاده می‌شود. جوان‌ساز خوب اجزای SARA را دوباره متعادل کرده و علیرغم اینکه اکسیداسیون عمدتاً برگشت‌ناپذیر است، قادر به ایجاد اختلال در ترکیب آسفالتین و برقراری دوباره تحرک مولکولی مناسب است. در واقع جوان‌ساز، عامل بازیافتی با خواص نرم کننده و سازگار است که علیرغم عدم توانایی در برگشت‌پذیری پیرشدگی اکسیداتیو، قادر است با بهبود خواص فیزیکی، رئولوژیکی و شیمیایی قیر و ارائه رفتار پیرشدگی برابر یا بهتر نسبت به قیر بکر، تأثیر پیرشدگی قیر را معکوس کند.

به منظور جوان‌سازی قیر تراشه آسفالت بازیافتی و انتخاب نوع، دوز و روش افزودن جوان‌سازها، ضروری است که دوز بهینه جوان‌ساز بر اساس داده‌های عملکرد بلندمدت میدانی و در کاربردهای با مقیاس کامل تعیین شود. بر این اساس بررسی تأثیر اجزای شیمیایی جوان‌ساز بر ویژگی‌های قیر جوان شده، انجام مطالعات عملکرد میدانی روسازی‌های آسفالتی جوان‌سازی شده و بررسی امکان ترکیب اثر جوان‌سازی عامل بازیافتی با سایر اصلاح‌کننده‌ها برای بهبود عملکرد آسفالت در شرایط اقلیمی خاص توصیه می‌شود.

پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی

علیرغم تحقیقات گسترده انجام شده در مورد انواع قیرهای اصلاح شده و بهبود یافته با افزودنی‌ها و اصلاح‌کننده‌ها، هنوز برای درک کامل شیمی قیر و پیش‌بینی رفتار مخلوط‌های قیری در زمان بهره‌برداری نیاز به مطالعات بیشتری هست. در همین رابطه، ضرورت دارد که با ترکیب نتایج آزمایش‌های شیمیایی قیر با نتایج آزمایش‌های مکانیکی و رئولوژیکی قیر و مخلوط، علاوه بر درک مورفولوژی قیر، ارتباط اثرات مربوطه بر عملکرد قیر و مخلوط شناسایی شود تا نتایج عملی از تحقیقات حاصل شود. همچنین، بررسی‌های بیشتری برای دستیابی به راه‌حل‌های جدید برای پیشگیری، محدود کردن یا کند کردن پیرشدگی قیر باید صورت گیرد. چندین بررسی نشان داد که استفاده از پسماند حاصل از تقطیر نفت خام[۳۷]، به جای یک قیر کندروانی شکن[۳۸]، می‌تواند حساسیت پیری مخلوط آسفالت داغ را در کوتاه‌مدت و بلندمدت کاهش دهد (Camargo et al., 2021). در حوزه مشابه، تحقیقات بیشتر باید روی افزودنی‌هایی با اثر آنتی‌اکسیدانی، یعنی با توانایی کاهش تمایل قیر به اکسیداسیون، متمرکز شود. در حال حاضر، برخی از محصولات با ادعای جلوگیری از اکسیداسیون قیر در بازار موجود هستند، اما مطالعات علمی برای درک عمیق رفتار آنها در هر دو سطح شیمیایی و مکانیکی مورد نیاز است.

بررسی و درک اثر متقابل بین قیر پیر شده و تازه شامل موضوعات درجه فعال‌سازی (DoA) قیر تراشه آسفالت بازیافتی و درجه اختلاط (DoB) قیر بکر با قیر تراشه آسفالت بازیافتی از جمله موضوعاتی هستند که در سراسر جهان مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. با این حال، به دلیل پیچیدگی بسیار زیاد مسأله (که تحت تأثیر عوامل زیادی مانند مقدار قیر تراشه آسفالت بازیافتی، ماهیت و وضعیت پیرشدگی؛ فرآیند تولید مخلوط آسفالت داغ؛ نوع، دوز و روش افزودن جوان‌سازها؛ حمل، پخش و روش تراکم و غیره قرار دارد)، دستورالعمل‌های هم‌خوان برای طبقه‌بندی مصالح مختلف تراشه آسفالت بازیافتی بر اساس درجه فعال‌سازی یا تخمین درجه اختلاط در زمان ساخت روسازی تعریف نشده‌اند.

تعریف و شناسایی روش‌های کنترل دقیق کیفیت مخلوط آسفالت داغ بازیافتی به عنوان یکی از حیاتی‌ترین اهداف بلندپروازانه مطرح است. در حال حاضر، مشخصات فنی کنترل‌هایی را بر عملکرد مکانیکی مخلوط آسفالت داغ برای محدود کردن مقدار تراشه آسفالت بازیافتی در مخلوط و تشویق استفاده از جوان‌سازها ارائه می‌دهد. با این حال، برای تخمین مقدار تراشه آسفالت بازیافتی و مقدار ماده جوان‌ساز در مخلوط، راه حل احتمالی شامل مجموعه‌ای از تجزیه و تحلیل فیزیکی، شیمیایی، میکروسکوپی و رئولوژیکی بر روی مواد و مصالح خام (تراشه آسفالت بازیافتی و اجزای آن، جوان‌ساز، قیر بکر)، آزمایشگاه و مخلوط‌های اولیه تولید شده در کارخانه آسفالت برای ساخت کامل جاده خواهد بود.

۸- پی‌نوشت‌ها

1- Circular Economy
2- Sustainability
3- Reclaimed Asphalt Pavement
4- Hot Recycled Mixture
5- Warm Recycled Mixture
6- Cold Recycled Mixture
7- Voids in the Mineral Aggregates
8- Shoving Distress
9- Physical and Steric Hardening
10- Glass Transition Region
11- Saturated, Aromatic, Resins, and Asphaltenes
12- Fourier Transform Infrared Spectroscopy
13- Pressure Aging Vessel
14- Atomic Force Microscope
15- Thin Film Chromatography with Flame Ionization Detection
16- Gel Permeation High-Pressure Chromatography
17- Rolling Thin Film Oven
18- Thin Film Oven
19- National Center for Asphalt Technology
20- Kraft Process
21- Surfactant
22- Methyl Ester
23- Oleophilic
24- Acidolinolenic Acid
25- Crushing
26- Acylglycerides
27- Ricinoleic Acid
28- Anacardial Acid
29- Cardol and Methylcardol
30- Saturated Lauric and Myristic Triglycerides
31- Pyrolysis
32- Dynamic Shear Rheometer
33- Colloidal Index
34- Chemical Aging Index
35- Carbonyl Index
36- Sulfoxide Index
37- Straight-Run Bitumen
38- Visbreaker Bitumen

۸- مراجع

- دهقانی فیروزآبادی، مهدی و خانی سانیج، خانی (۱۳۹۸). کاربرد مواد جوانساز برای احیای قیر خرده آسفالت. *یازدهمین همایش ملی و نمایشگاه قیر، آسفالت و ماشین آلات*، تهران.

-Abdollahi, S. F. Karimi, M. M. Jahanbakhsh, H. and Tabatabaee, N. (2022). Cracking performance of rubberized RAP mixtures with Sasobit. *Construction and Building Materials,* Vol. 319, No. 126090.

Ahmed, R., Hossain, K., Aurilio, M. and Hajj, R. (2021). Effect of rejuvenator type and dosage on rheological properties of short-term aged binders. *Materials and Structures,* Vol. 54, No. 109.

-Ali, A. W., Mehta, Y. A., Nolan, A., Purdy, C. and Bennert, T.(2016). Investigation of the impacts of aging and RAP percentages on effectiveness of asphalt binder rejuvenators. *Construction and Building Materials,* Vol. 110, 211-217.

-Al Mamun, A., Al-Abdul, Wahhab, H. I. and M. A. Dalhat, M. A. (2020). Comparative Evaluation of Waste Cooking Oil and Waste Engine Oil Rejuvenated Asphalt Concrete Mixtures. *Arabian Journal for Science and Engineering,* Vol. 45, 7987–7997.

-Avsenik, L., Klinar, D., Tušar, M. and Perše, L. S. (2016). Use of modified slow tire pyrolysis product as a rejuvenator for aged bitumen. *Construction and Building Materials,* Vol. 120, 605–616.

-Babagoli, R., Norouzi, N. and Ameli, A. (2021). Laboratory investigation of the influence of aging and compaction effort on low temperature performance of asphalt mixture containing different percentage of RAP. *Construction and Building Materials,* Vol. 298, No. 123899.

Building Materials, Vol. 227, 116695.

-Guo, M., Liu, H., Jiao, Y., Mo, L., Tan, Y., Wang, D. and Liang, M. (2020). Effect of WMA-RAP technology on pavement performance of asphalt mixture: A state-of-the-art review. *Journal of Cleaner Production,* Vol. 266, 121704-121705.

-Haghshenas, H. F., Rea, R., Reinke, G. and Fatmehsari Haghshenas, D. (2020). Chemical Characterization of Recycling Agents. *Journal of Materials in Civil Engineering,* Vol. 32, No. 5, 06020005.

-Hussain, A. and Yanjun, Q. (2012). laboratory evaluation of asphalt mixtures containing various percentage of reclaimed asphalt pavement," *Asian Journal of natural and applied science,* Vol. 1, No. 2, 156-163.

-Kowalski, K. J., Król, J. B., Wnkowski, B., Radziszewski, P. and Sarnowski, M. (2017). Thermal and Fatigue Evaluation of Asphalt Mixtures Containing RAP Treated with a Bio-Agent. *Applied Science,* Vol. 7, No. 216.

-Król, J. B., Kowalski, K. J., Niczke, L. and Radziszewski, P. (2016). Effect of bitumen fluxing using a bio-origin additive. *Construction and Building Materials,* Vol. 114, 194-203.

-Li, H., Dong, B., Wang, W., Zhao, G., Guo, P. and Ma, Q. (2019). Effect of Waste Engine Oil and Waste Cooking Oil on Performance Improvement of Aged Asphalt. *applied sciences,* Vol. 9, 1767.

-Li, M., Liu, L., Xing, C., Liu, L. and Wang, H. (2021). Influence of rejuvenator preheating temperature and recycled mixture's curing time on performance of hot recycled mixtures. *Construction and Building Materials,* Vol. 295, No. 123616.

-Loise, V., Caputo, P., Porto, M., Calandra, P., Angelico, R. and Oliviero Rossi, C. (2019). A Review on Bitumen Rejuvenation: Mechanisms, Materials, Methods and Perspectives. *Applied Science,* Vol. 9, No. 20, 4316.

-Ma, X., Leng, Z.,Wang, L. and Zhou, P. (2020). Effect of Reclaimed Asphalt Pavement Heating Temperature on the Compactability of Recycled Hot Mix Asphalt. *Materials,* Vol. 13 , No. 16:3621.

-Majidifard, H.,Tabatabaee, N. and Buttlar, W. (2019). Investigating short-term and long-term binder performance of high-RAP mixtures containing waste cooking oil. *Journal of Traffic and Transportation Engineering,* Vol. 6, No. 4, 396-406.

-Moins, B., Hernando, D., Buyle, M., France, C. and Van den bergh, W. (2022). On the road again! An economic and environmental break-even and hotspot analysis of reclaimed asphalt pavement and rejuvenators. *Resources, Conservation & Recycling,* Vol. 177, No. 106014.

-Borghi, A., Barco Carrion, A. J. D., Presti, D. L. and Giustozzi, F.(2017). Effects of Laboratory Aging on Properties of Biorejuvenated Asphalt Binders. *Journal of Materials in Civil Engineering,* Vol. 29, No. 10, 04017149.

-Camargo, I. G. D. N., Dhia, T. B., Loulizi, A., Hofko, B. and Mirwald, J. (2021). Anti-aging additives: proposed evaluation process based on literature review. *Road Materials and Pavement Design,* Vol. 22, No. 1, 134-153.

-Cavalli, M., Zaumanis, M., Mazza, E., Partl, M. and L. Poulikakos, L.(2018). Effect of ageing on the mechanical and chemical properties of binder from RAP treated with bio-based rejuvenators. *Composites Part B,* Vol. 141, 174–181.

-Chamod, H., Xiangdao, H. and Jiayum, W. A.. F. X. (2019). A comprehensive review on the utilization of reclaimed asphalt material with warm mix asphalt technology. *Construction and Building Materials,* Vol. 227, no. 117096.

-Chen, M., Xiao, F. G., Putman, B., Leng, B. and Wu, S. (2014). High temperature properties of rejuvenating recovered binder with rejuvenator, waste cooking and cotton seed oils. *Construction and Building Materials,* Vol. 59, 10-16.

-Cheraghian, G., Cannone, F. A., You, Z., Chen, S., Kim, Y. and Westerhoff, Y. (2020). Warm mix asphalt technology: An up to date review. *Journal of Cleaner Production,* Vol. 268, No. 122128.

-Copeland, A. (2011). Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice. FHWA-HRT-11-021, McLean, VA.

-Costa, A. and Benta, A. (2016). Economic and environmental impact study of warm mix asphalt compared to hot mix asphalt. *Journal of Cleaner Production,* Vol. 112, No. 4, 2308-2317.

-Devulapalli, L., Kothandaraman, S. and Sarang, G. (2020). Effect of rejuvenating agents on stone matrix asphalt mixtures incorporating RAP. *Construction and Building Materials 254,* Vol. 254, No. 119298.

-Elkashef, M., Christopher Williams, R. and Cochran, E. (2017). Investigation of fatigue and thermal cracking behavior of rejuvenated reclaimed asphalt pavement binders and mixtures. *International Journal of Fatigue,* vol. 108, 90-95.

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

-Flores, G., Gallego, J., Miranda, L. and Marcobal, J. R. (2020). Cold asphalt mix with emulsion and 100% rap: Compaction energy and influence of emulsion and cement content. *Construction and Building Materials,* Vol. 250, No. 118804.

-Gökalp and V. Emre Uz, V. (2019). Utilizing of Waste Vegetable Cooking Oil in bitumen: Zero tolerance aging approach. *Construction and*

(in persian). *Journal of Transportation Infrastructure Engineering,* Vol. 4, No. 1, 59-70.

-Wang, D., Yao, H., Yue, J., Hu, S., Liu, J. and Xu, M. A. C. S. (2021). Compaction Characteristics of Cold Recycled Mixtures with Asphalt Emulsion and Their Influencing Factors. *Frontiers in Materials,* Vol. 8, No. 575802.

-Yang, X., Mills-Beale, J. and You, Z. (2017). Chemical characterization and oxidative aging of bio-asphalt and its compatibility with petroleum asphalt. *Journal of Cleaner Production,* Vol. 142, No. 4, 1837-1847.

-Yousefi, A. A., Sobhi, S., Aliha, M., Pirmohammad, S. and Haghshenas, H. F. (2021). Cracking Properties of Warm Mix Asphalts Containing Reclaimed Asphalt Pavement and Recycling Agents under Different Loading Modes. *Construction and Building Materials,* Vol. 300, 124-130.

-Zahoor, M., Nizamuddin, S., Madapusi, S. and Giustozzi, F. (2021). Sustainable asphalt rejuvenation using waste cooking oil: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production,* Vol. 278, No. 123304.

-Zaumanis, M., Mallick, R. B. and Frank, R. (2015). Evaluation of different recycling agents for restoring aged asphalt binder and performance of 100 % recycled asphalt. *Materials and Structures,* Vol. 48, 2475–2488.

-Zaumanis, M., Mallick, R. B., Poulikakos, L. and 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,* Vol. 71, 538-550.

--Zhao, K., Wang, Y., Chen, L. and Li, F. (2018). Diluting or dissolving? The use of relaxation spectrum to assess rejuvenation effects in asphalt recycling. *Construction and Building Materials,* Vol. 188, 143-152.

-Zeng, M., Li, J., Zhu, W. and Xia, Y. (2019). Laboratory evaluation on residue in castor oil production as rejuvenator for aged paving asphalt binder. *Construction and Building Materials,* Vol. 193, 276-285.

-Zhou, F. and Karki, P. A. H. S. (2019). Rejuvenator Laboratory Characterization and Field Performance. Texas A&M Transportation Institute, Texas.

-Zhu, Y., Wang, X., Qiao, Y. and Shu, J. (2018). Thermal Cracking and Fatigue Analysis of Recycled Asphalt Mixture Using DCT Test and S-VECD Model. in *Proceedings of GeoShanghai 2018 International Conference: Transportation Geotechnics and Pavement Engineering*, Shanghai.

-Mokhtari, A., Lee, H. D., Williams, C., Guymon, C. A., Scholte, J. P. and Schram, S. (2017). A novel approach to evaluate fracture surfaces of aged and rejuvenator-restored asphalt using cryo-SEM and image analysis techniques, *Construction and Building Materials,* Vol. 133 , 301- 313.

-Nayak, P. and Sahoo, U. C. (2015). A rheological study on aged binder rejuvenated with Pongamia oil and Composite castor oil. *International Journal of Pavement Engineering,* Vol. 18, No. 7, 595–607.

-Noor, L., Wasiuddin, N., Mohammad , L. and Salomon, D. (2019). Use of Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectroscopy to Determine the Type and Quantity of Rejuvenator Used in Asphalt Binder. In *Proceedings of the 3rd GeoMEast International Congress and Exhibition*, Mansoura, Egypt.

-Nogueira, R. L., Soares, J. B. and Soares, S. D. A. (2019). Rheological evaluation of cotton seed oil fatty amides as a rejuvenating agent for RAP oxidized asphalts. *Construction and Building Materials,* Vol. 223 , 1145-1153.

-Nsengiyumva, G. H. H. F. and Kim, Y. R. A. K. S. (2020). Mechanical-Chemical Characterization of the Effects of Type, Dosage, and Treatment Methods of Rejuvenators in Aged Bituminous Materials. *Transportation Research Record,* Vol. 2674, No. 3, 126-138.

-Pradhan, S. K. and Sahoo, U. C. (2022). Influence of softer binder and rejuvenator on bituminous mixtures containing reclaimed asphalt pavement (RAP) material. *International Journal of Transportation Science and Technology,* March.Vol. 11, No. 1, 46-59.

Prosperi, E. and Bocci, E. (2021). A Review on Bitumen Aging and Rejuvenation Chemistry: Processes, Materials and Analyses. *Sustainability,* Vol. 13, No. 12: 6523.

-Randy, P. P. and West, C. (2015). Best Practices for RAP And RAS Management. National Asphalt Pavement Association, *Washington*.

Rzek, L., Turk, M. R. and Tušar, M. (2020). Increasing the rate of reclaimed asphalt in asphalt mixture by using alternative rejuvenator produced by tire pyrolysis. *Construction and Building Materials,* Vol. 232, No. 117177.

-Saboundjian, S., Liu, J., Li, P. and e. al., (2011). Late-season paving of a low-volume road with warm-mix asphalt. *Transportation Research Record,* Vol. 2205, No. 1, 40-47.

-Santos, D., Kakar, M. R., Partl, M. N. and Poulikakos, L. D. (2022). Thermal Aging of Bitumen and Biorejuvenator Blends: Triglyceride versus Free Fatty Acids. *Journal of Materials in Civil Engineering,* Vol. 34, No. 7, 04022134.

-Taghavi, M., Hesami, S. and Hesami, E. (2018). Modification of Aged Pavement by Rejuvenators and Investigation of the Changes in Its Properties

A Review on the Role of Rejuvenators in Modifying the Chemical Properties and Rheological Behavior of Aged Bitumen of Recycled Asphalt Pavements

Ali Babazadeh Nadinloei, Ph.D. Student, Civil Engineering Department, University of Zanjan, Zanjan, Iran.
Hasan Taherkhani, Associate Professor, Civil Engineering Department, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

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

Received: February 2024- Accepted: June 2024

ABSTRACT
Nowadays, to solve environmental problems and crises, the concepts of circular economy and sustainability have been given more attention. Extensive efforts are being made in the field of road construction and maintenance in order to recycle or reuse non-renewable resources. In the field of road pavement engineering, encouraging the use of recycled asphalt pavements is one of the easiest ways to promote a circular economy. One of the main issues regarding the use of this recycled material is the aged bitumen contained in it. The aging and rejuvenation process of bituminous pavements can affect significantly their durability and service life. Therefore, achieving complete knowledge of these aspects from a chemical and rheological point of view is essential. In this research, while studying the aging process, by introducing different methods of aged bitumen reclaiming, the types of biological and oil-derived rejuvenators studied in different researches have been introduced and their performance has been reviewed. Also, different chemical analyses were introduced and described as tools to investigate bitumen aging and rejuvenation processes. Finally, in order to rejuvenate the aged bitumen of recycled asphalt pavements and choose the type, dose and method of adding rejuvenators, it is recommended that the optimal dose of rejuvenator is determined based on long-term field performance data and in full-scale applications. It is also recommended to investigate the effect of rejuvenating chemical components on the characteristics of rejuvenated bitumen, perform field performance studies of rejuvenated asphalt pavements, and the possibility of combining the rejuvenating effect of recycled agent with other modifiers to improve asphalt performance in specific climatic conditions.

Keywords: Recycled Asphalt Pavements, Aging, Rejuvenator, Chemical Properties