

مروری بر عملکرد مخلوط‌های آسفالت گرم حاوی تراشه‌های آسفالت بازیافتی

مقاله علمی - مروری

علی بابازاده، دانشجوی دکتری، 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: ۱۴۰۳/۰۲/۲۸ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۱

صفحه ۶۰-۴۳

چکیده

گرایش به استفاده از مصالح آسفالت بازیافتی در فناوری مخلوط آسفالت گرم به دلیل هزینه تولید پایین تر، کاهش تأثیر بر محیط زیست، بهبود عملکرد و بسیاری دلایل دیگر افزایش یافته است. در صورت استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی در مخلوط‌های آسفالت گرم، این دو، به عنوان مکمل همدیگر عمل کرده و روشی کارا برای غلبه بر محدودیت‌های ذاتی جداگانه مخلوط آسفالت گرم و تراشه آسفالت بازیافتی ایجاد می‌شود. دمای پایین تولید باعث کاهش پیری ثانویه مخلوط تراشه آسفالت بازیافتی در طول تولید شده و ویسکوزیته پایین مخلوط آسفالت گرم باعث استفاده از درصد بالای تراشه آسفالت بازیافتی بدون به خطر انداختن کارایی آسفالت شده است. در این تحقیق، ضمن ارزیابی مقایسه ای انواع فناوری‌های بازیافت تراشه‌های آسفالت بازیافتی با توجه به دماهای ساخت آنها، مزایا، معایب، محدودیت‌ها و عملکرد مخلوط‌های آسفالت گرم حاوی تراشه آسفالت بازیافتی در شرایط رطوبتی و برودتی مختلف، مورد بررسی قرار می‌گیرد. بررسی مطالعات انجام پذیرفته بر روی مخلوط‌های آسفالت گرم حاوی تراشه آسفالت بازیافتی نشان می‌دهد که مطالعات آزمایشگاهی و میدانی بایستی بر روی عملکرد خستگی در دماهای میانی و ترک خوردگی در دمای پایین این مخلوط‌ها، متمرکز گردد. همچنین، با توجه به اینکه بهبود خواص رئولوژیکی این مخلوط‌ها در دماهای میانی و پایین با استفاده از جوانسازها یا سایر افزودنی‌ها، بر روی خصوصیات مخلوط در دمای بالا و حساسیت رطوبتی آنها موثر بوده و نیازمند بررسی هم‌زمان پارامترهای مربوط به آنها است، تصویری اجمالی از افق‌های تحقیقاتی پیش رو جهت رفع کاستی‌های عملکردی این مخلوط‌ها ارائه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالت گرم، تراشه آسفالت بازیافتی، خواص عملکردی، جوانسازی فیر

۱- مقدمه

"ساخت و ساز محور" در ساخت راه‌ها به رویکرد "توجه برابر به ساخت و ساز و نگهداری" تغییر یافته است. در فناوری مخلوط آسفالت گرم، به منظور کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی محیط زیست، آسفالت در دماهای کاهش یافته ساخته می‌شود. مخلوط آسفالت داغ معمولی در دماهای بسیار بالا و در محدوده ۱۴۰ تا ۱۸۰ درجه سانتیگراد تولید و متراکم می‌شود، در حالی که استفاده از مخلوط آسفالت گرم، دمای اختلاط و تراکم را ۲۰ تا ۶۰ درجه سانتیگراد کاهش می‌دهد (Diab, Sangiorgi, Ghabchi, Zaman, & Wahaballa, 2016) فناوری مخلوط آسفالت گرم از دماهای پایین‌تر برای

امروزه روسازی‌های آسفالتی به عنوان سرمایه‌ای مهم در راستای تسهیل رفت و آمد و افزایش رفاه عمومی در کشورهای توسعه یافته و یا در حال توسعه تلقی می‌شود. این روسازی‌ها، با گذشت زمان و به دلیل تأثیر ترافیک عبوری و شرایط محیطی، به تدریج دچار اضمحلال می‌شوند. به منظور پیشگیری از پیدایش و توسعه خرابی‌ها و اطمینان از شاخص کیفی خدمت رسانی مطلوب روسازی‌ها، مجموعه‌ای از اقدامات پیشگیرانه، اصلاحی، ترمیمی و بازسازی پیش‌بینی می‌شود. بر این اساس، امروزه در کشورهای با توسعه اقتصادی شتابان، رویکرد

۲- انواع فناوری استفاده از مخلوط های بازیافتی

به طور کلی، فناوری های بازیافت تراشه آسفالت را با توجه به دماهای مختلف ساخت آنها می توان به فناوری مخلوط بازیافتی داغ، فناوری مخلوط بازیافتی گرم و فناوری مخلوط بازیافتی سرد تقسیم کرد (Chen, Dan, & 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. مخلوط بازیافتی داغ از تراشه آسفالت بازیافتی، سنگدانه های بکر، عامل جوان کننده و قیر جدید تشکیل شده و فرآیند تولید آن شبیه به آسفالت مخلوط داغ جدید است. بر این اساس، عملکرد آن می تواند 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 خرابی های روسازی و ساخت تمامی لایه های سازه روسازی مناسب و رضایت بخش می باشد، اما هنوز چالش های زیادی در کاربرد این مخلوط ها وجود دارد. اولین چالش، نحوه کنترل کیفیت تراشه آسفالت بازیافتی به دلیل تغییرات در ترکیب، مانند دانه بندی، میزان قیر و غیره است. بنابراین، ویژگی های تراشه آسفالت بازیافتی باید به خوبی مشخص شود تا تنوع و تغییرات مخلوط بازیافتی داغ به حداقل برسد. توصیه می شود که حداقل پنج و ترجیحاً ده نمونه یا بیشتر از هر دپوی تراشه آسفالت بازیافتی برای مشخص کردن ثبات و یکدستی تراشه آسفالت بازیافتی جمع آوری و آزمایش شود (Chen, Dan, & al, 2021). علاوه بر این، میزان قیر و دانه بندی هر نمونه باید بررسی شود. چالش دوم میزان استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی است. آسیاب و خرد کردن تراشه آسفالت بازیافتی به حداکثر اندازه سنگدانه های کوچکتر، منجر به تولید بیش از حد ریزدانه های عبوری از الک ۲۰۰ شده و به دلیل لزوم تأمین معیارهای درصد فضای خالی مصالح سنگی و نسبت فیلر به قیر، میزان مصرف تراشه آسفالت بازیافتی محدود خواهد شد (Copeland, 2011).

علاوه بر این، مخلوط بازیافتی داغ با مقادیر بالای تراشه آسفالت بازیافتی می تواند بیش از حد سفت، شکننده و مستعد ترک خوردن باشد. برای بهبود این عملکردها، به عوامل جوان کننده بیشتری برای فعال کردن قیر پیر شده نیاز است. با این حال، میزان بالای عامل جوان کننده ممکن است عملکرد

تولید آسفالت با کمک افزودنی ها استفاده می کند. این افزودنی ها، ویسکوزیته قیر را کاهش داده و کارایی را بهبود می بخشد. مرکز ملی فناوری آسفالت (NCAT)، حداکثر دمای اختلاط ۱۳۵ درجه سانتیگراد را به عنوان الزام مشخصاتی معمول برای مخلوط آسفالت گرم در نظر گرفته است. محدوده دمایی عملیاتی مخلوط های آسفالتی گرم از ۱۱۵ تا ۱۳۵ درجه سانتیگراد گزارش شده است (Jiayum, 2019 & Chamod, Xiangdao).

بازسازی روسازی های آسفالتی، از طریق تخریب کلی، برش و یا تراش آسفالت موجود و دفع مصالح حاصل از آن و تهیه و اجرای رویه آسفالتی جدید صورت می گیرد. امروزه، بازیافت روسازی های آسفالتی تراشیده شده، به عنوان کارآمدترین و مقرون به صرفه ترین فناوری دفع این مصالح در صنعت روسازی آسفالتی محسوب می شود. کاهش قابل ملاحظه نیاز به مواد اولیه و هزینه های ساخت و بازسازی روسازی، از نتایج بازیافت مصالح آسفالتی بازیافتی است. استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی نه تنها باعث صرفه جویی در مواد و هزینه ها می شود، بلکه برخی از جنبه های عملکردی مخلوط های آسفالتی را نیز بهبود می بخشد و باعث کاهش اثرات مخرب زیست محیطی می گردد. با این حال، محدودیت های ذاتی برای استفاده از درصد بالای تراشه آسفالت بازیافتی در مخلوط های آسفالت داغ وجود دارد. تراشه آسفالت بازیافتی از قیرهای آسفالت قدیمی تشکیل شده است. از این رو، یکی از مشکلات اصلی در مورد تراشه آسفالت بازیافتی، پیر شدگی ثانویه قیر تراشه آسفالت بازیافتی در طول فرآیند گرمایش و اختلاط با مخلوط آسفالت داغ است. این فرآیند پیرشدگی، روسازی آسفالتی را در معرض ترک های زودرس تحت بار ترافیکی قرار می دهد. برای غلبه بر این محدودیت ها و بهبود عملکرد مخلوط های آسفالتی، تراشه آسفالت بازیافتی با موفقیت در فناوری مخلوط آسفالت گرم بکار گرفته شده است. دمای پایین تولید باعث کاهش پیری ثانویه مخلوط تراشه آسفالت بازیافتی در طول تولید شده است. ویسکوزیته بالای مخلوط آسفالت گرم باعث استفاده از درصد بالای تراشه آسفالت بازیافتی بدون به خطر انداختن کارایی آسفالت شده است. علاوه بر این، در صورت استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی در مخلوط های آسفالت گرم، این دو، به عنوان مکمل همدیگر عمل کرده و روشی کارا برای غلبه بر محدودیت های ذاتی جداگانه مخلوط آسفالت گرم و تراشه آسفالت بازیافتی ایجاد می شود.

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, Norouzi, & Ameli, 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, Gallego, Miranda, & Marcobal, 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 (Marcobal, 2020 & Flores, Gallego, Miranda). 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 می‌شود. لذا بیشتر تراشه آسفالت بازیافتی لایه‌های رویه در لایه‌های زیرین استفاده می‌شود. تلاش‌های سالیان اخیر مهندسان و محققان روسازی برای استفاده از مخلوط

جاده، به ویژه استحکام در دمای بالا را کاهش دهد (Devulapalli, Kothandaraman, & Sarang, 2020; Ahmed, Hossain, Aurilio, & Hajj, 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, Liu, Xing, Liu, & Wang, 2021; Ma, Leng, Wang, & Zhou, 2020). علاوه بر این، دمای تولید بالا ممکن است باعث پیرشدگی ثانویه تراشه آسفالت بازیافتی شده و برای عملکرد مخلوط آسفالتی داغ مضر باشد.

۲-۲- فناوری مخلوط بازیافتی گرم

به منظور کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و مصرف انرژی در تولید مخلوط‌های بازیافتی داغ، فناوری مخلوط‌های بازیافتی گرم که تلفیقی از فناوری احیا کننده قیر و فناوری مخلوط آسفالت گرم است، در مهندسی روسازی 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 صرفه جویی از ۱۸٪ تا ۳۰٪ در مصرف انرژی می‌شود (Costa & 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, Liu, Li, & 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 کف‌سازی است (Cheraghian, و غیره, ۲۰۲۰). افزودنی‌های مخلوط آسفالت گرم می‌توانند ویسکوزیته قیر آسفالت را در محدوده دمای تولید کاهش دهند، بنابراین سازگاری و کارایی مخلوط بازیافتی گرم از مخلوط بازیافتی داغ بیشتر است. این ویژگی برای پخش و تراکم مخلوط‌های 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, Xiangdao, & Jiayun, 2019). گرچه فناوری مخلوط

بازیافتی سرد به عنوان مصالح لایه رویه، معطوف به یافتن راه حل ارتقای عملکرد مخلوط بازیافتی سرد است.

۳- فناوری مخلوط آسفالت گرم

فناوری مخلوط آسفالت گرم فرآیندی است که در آن به منظور کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی محیط زیست، آسفالت در دماهای کاهش یافته ساخته می‌شود. استفاده از مخلوط آسفالت گرم، دمای اختلاط و تراکم را ۲۰ تا ۶۰ درجه سانتیگراد کاهش می‌دهد (Diab, Sangiorgi, Ghabchi, Zaman, & Wahaballa, 2016) مرکز ملی فناوری آسفالت، حداکثر دمای اختلاط ۱۳۵ درجه سانتیگراد را به عنوان الزام مشخصاتی معمول برای مخلوط آسفالت گرم در نظر گرفته است. محدوده دمایی عملیاتی مخلوط‌های آسفالتی گرم از ۱۱۵ تا ۱۳۵ درجه سانتیگراد گزارش شده است (Chamod, Jiayum, 2019 & Xiangdao).

۳-۱- مزایای استفاده از مخلوط آسفالت گرم در راهسازی

مزایای استفاده از مخلوط آسفالت گرم عبارت است از:

- ۱- کاهش مصرف انرژی برای فرآیند گرمایش کاهش نیاز به مصرف انرژی در فرآیند گرمایش، باعث صرفه جویی در مصرف سوخت فسیلی می‌شود. بسیاری از مطالعات نشان دادند که استفاده از مخلوط آسفالت گرم در مقایسه با مخلوط آسفالت داغ معمولی، منجر به صرفه جویی ۱۸٪ تا ۳۰٪ در مصرف انرژی می‌شود (Chamod, Xiangdao, & Jiayum, 2019). علاوه بر این، مطالعات ارزیابی هزینه چرخه عمر نشان داده است که استفاده از فناوری مخلوط آسفالت گرم، بسته به فناوری، می‌تواند هزینه‌ها را ۱۰٪ تا ۳۰٪ کاهش دهد. تخمین زده شده است که تقریباً ۱/۵-۲/۰ لیتر سوخت در هر تن تولید آسفالت قابل صرفه جویی است. مطالعات مشابه در سراسر جهان نشان داد که در صورت تولید مخلوط آسفالت گرم کارخانه‌ای، بسته به فناوری بکار رفته، درصد رطوبت سنگدانه‌ها و نوع و کارایی کارخانه، صرفه جویی کلی انرژی از ۲۰٪ تا ۳۵٪ متغیر است (Croteau & Tessier, 2008).

۲- کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای

کاهش دمای تولید مخلوط آسفالتی، موثرترین راه برای کاهش انتشار گاز دی اکسید کربن در حین ساخت روسازی و تولید

مخلوط آسفالتی است (Mallick & Bergendahl, 2009). مخلوط آسفالتی گرم در دو مرحله منجر به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود:

- کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به دلیل کاهش مصرف سوخت
 - کاهش مقادیر گازهای گلخانه‌ای ناشی از قیر گرم شده
- کاهش دمای گرمایش توسط افزودنی اوترم، انتشار CO_2 ، NO_x و SO_x را به ترتیب ۴۶٪، ۵۸٪ و ۸۱٪ کم می‌کند (Jiayum, 2019 & Chamod, Xiangdao). طی تحقیقی نشان داده شده است که استفاده از مخلوط آسفالت گرم می‌تواند آلودگی هوا را تا ۲۴٪ کاهش دهد (Chamod, Xiangdao, Jiayum, 2019 & Jiayum, 2019). همچنین استفاده از مخلوط آسفالت گرم نسبت به مخلوط آسفالت داغ، به ترتیب کاهش ۱۸٪، ۱۵٪ و ۲۴٪ را در مصرف سوخت فسیلی، اثرات آلودگی هوا و اثرات زیست محیطی نشان داده است (Cheraghian, 20۲۰). به دلیل کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، استقرار کارخانه‌های مخلوط آسفالت گرم در نزدیکی مناطق شهری امکان‌پذیر است.

۳- کاهش قابل ملاحظه انتشار دود قیر و گرد و غبار در مقایسه با مخلوط آسفالت داغ

مطالعه انجام شده توسط وزارت حمل و نقل اونتاریو کانادا نشان می‌دهد که گرد و غبار و ذرات محلول در بنزن تولید شده در پشت فینیش ۳۰٪ و ۶۳٪ کاهش یافته است. به طور مشابه، گرد و غبار و ذرات محلول در بنزن تولید شده در محل اپراتور فینیش به ترتیب ۸۵٪ و ۷۲٪ کاهش می‌یابد (Politano, 2012). بسته به روش مطالعه، کاهش دود آسفالت پشت فینیش از ۳۰٪ تا ۹۰٪ متغیر است (Tessier, 2008 & Croteau). چندین مطالعه انجام شده توسط انجمن قیر آلمان روی دود آسفالت و ذرات آئروسل نشان می‌دهد که تبعات قرار گرفتن در معرض مخلوط آسفالت گرم (۱۳۰ درجه سانتیگراد) می‌تواند ۵۰٪ کمتر از مخلوط آسفالت داغ (۱۶۰ درجه سانتیگراد) باشد (Jiayum, 2019 & Chamod, Xiangdao). در نتیجه، شرایط کار، ایمنی و بهداشت برای پرسنل و کارگران در محل ساخت بهبود می‌یابد.

۴- افزایش قابلیت بکارگیری مقادیر بالاتر تراشه آسفالتی بازیافتی در مخلوط

مخلوط آسفالتی گرم در مقایسه با مخلوط آسفالت داغ، کارایی بالاتری دارد. لذا نرخ بالاتری از بازیافت آسفالت را فراهم آورده و امکان پوشش سنگدانه‌ها و تراکم مصالح تراشه آسفالت

توانایی کار در دماهای نسبتاً پایین‌تر باعث می‌شود مخلوط آسفالتی گرم در طیف وسیعی از دمای محیط (تا دمای ۳- درجه سانتیگراد) قابلیت اجرا داشته و بازه زمانی فصلی پخش و تراکم مخلوط در طول سال طولانی‌تر شود.

۱۰- امکان بازگشایی سریع‌تر جاده به روی ترافیک عبوری، به دلیل دمای پایین‌تر

استفاده از مخلوط آسفالت گرم با امکان بازگشایی سریع‌تر جاده به روی ترافیک عبوری به دلیل دمای پایین‌تر، باعث صرفه‌جویی در وقت استفاده‌کنندگان راه و کاهش هزینه‌های تأخیر در صف، مصرف سوخت و انتشار گازهای گلخانه‌ای مرتبط با بسته شدن خطوط در دست ساخت می‌شود.

۲-۳- فناوری‌های مخلوط آسفالتی گرم

فناوری‌های مختلف تولید مخلوط آسفالت گرم را می‌توان به سه دسته اصلی دسته‌بندی کرد. افزودنی‌های آلی، افزودنی‌های شیمیایی و فناوری کف‌سازی که هم افزودنی‌های حاوی آب و هم فرایندهای پایه آبی را در بر می‌گیرد (Diab, Sangiorgi, Wahaballa, 2016 & Ghabchi, Zaman). این مواد افزودنی تأثیر قابل توجهی بر خواص رئولوژیکی و مکانیکی مخلوط آسفالتی ندارند (Cheraghian, 2020) و غیره.

افزودنی‌های آلی

افزودنی‌های آلی از موم‌هایی تشکیل شده‌اند که در طی فرآیند اختلاط به مخلوط آسفالت اضافه می‌شوند. موم‌ها، ویسکوزیته مخلوط را در دماهای بالاتر از نقطه ذوب خود کاهش می‌دهند و با سرد شدن مخلوط، با توزیع یکنواخت به ذرات میکروسکوپی کوچک جامد تبدیل شده و باعث افزایش سفتی مخلوط می‌شوند. با این وجود، نوع و مقدار موم انتخابی باید با دمای حین کار مخلوط آسفالت تنظیم شود تا از رفتار مکانیکی رضایت‌بخش مخلوط اطمینان حاصل شود. اگر دمای حین کار از نقطه ذوب واکس استفاده شده بیشتر باشد، نمی‌توان رفتار مکانیکی رضایت‌بخش را تضمین کرد (Cheraghian, 2020) و غیره.

افزودنی‌های شیمیایی

برخلاف افزودنی‌های آلی، افزودنی‌های شیمیایی برای دستیابی به دمای اختلاط و تراکم پایین‌تر به کاهش ویسکوزیته متکی نیستند. افزودنی‌های شیمیایی را می‌توان برای دستیابی به اهداف

بازیافتی را در دماهای پایین‌تر فراهم می‌کند. بازیافت روسازی آسفالت پیر شده از نظر زیست محیطی موجب حفاظت از منابع طبیعی تجدیدناپذیر، احیا و استفاده مجدد از منابع موجود و پیشگیری از دفن مواد قابل استفاده مجدد در محل دپوی مصالح نامناسب می‌شود. استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی، همچنین باعث صرفه‌جویی در انرژی از طریق کاهش هزینه‌های تولید مصالح آسفالتی بکر و کاهش حمل و نقل مواد جدید به محل روسازی می‌شود (Politano, 2012).

۵- افزایش تراکم پذیری و کارایی نسبت به مخلوط آسفالتی داغ

به دلیل استفاده از مواد افزودنی برای کاهش ویسکوزیته قیر در دماهای پایین‌تر، تراکم پذیری و کارایی این مخلوط‌ها بیشتر از مخلوط‌های آسفالت داغ بوده و کیفیت درزهای اجرایی نیز بهبود می‌یابد. افزودنی‌های مخلوط آسفالتی گرم؛ خواص روانی قیر را بهبود بخشیده و امکان تراکم مناسب در شرایط محیطی سرد و توأم با باد را فراهم می‌آورد. از آنجایی که مخلوط آسفالتی گرم در دماهای پایین‌تر تهیه و اجرا می‌شود، نرخ اتلاف گرما نیز کمتر بوده و زمان کافی برای دستیابی به تراکم مورد نیاز آسفالت وجود دارد. علاوه بر این، برخی از افزودنی‌ها با ایجاد اثر چرب‌کنندگی، روانی و کارایی را بهبود بخشیده و امکان تراکم آسفالت را به راحتی و بدون تلاش زیاد فراهم می‌آورند (Politano, 2012).

۶- کاهش پیرشدگی قیر آسفالت

دمای پایین تولید، پخش و تراکم مخلوط‌های آسفالت گرم منجر به کاهش اکسیداسیون، پیری و سخت‌شدگی قیر شده و کاهش پیرشدگی قیر آسفالت باعث طول عمر بیشتر مخلوط آسفالت گرم نسبت به مخلوط آسفالت داغ می‌شود.

۷- مقاومت بهبود یافته در برابر ترک حرارتی و مقاومت شیارشدگی قابل مقایسه با مقاومت مخلوط آسفالت داغ (Politano, 2012)

۸- مسافت طولانی‌تر بدون حمل بدون دست دادن دمای تراکم یکی از نگرانی‌های مهم در مخلوط‌های آسفالتی داغ، از دست دادن گرما به دلیل حمل و نقل است. در مخلوط‌های آسفالتی گرم، سرعت کم اتلاف حرارت به دلیل دمای تراکم پایین‌تر، حمل و نقل این مخلوط‌ها را در مسافت‌های طولانی‌تر بدون دست دادن دمای تراکم مشخص شده آسان‌تر می‌کند. از این رو، مسافت طولانی‌تر از دیگر مزایای مخلوط آسفالت گرم است.

۹- مدت زمان طولانی‌تر در دسترس در طول سال جهت اجرا

مختلف استفاده کرد، به عنوان نمونه، افزودنی‌های شیمیایی می‌توانند به عنوان عوامل امولسیون کننده یا تقویت کننده چسبندگی عمل کنند. ترکیب با مواد فعال سطحی^۲، پلیمرها یا افزودنی‌های مختلف، منجر به بهبود خواص پوشش دهی، کارایی بهتر مخلوط و تراکم موثرتر در دماهای پایین تر می‌شود. کاهش دما با استفاده از افزودنی‌های شیمیایی به محصولات انتخاب شده بستگی دارد (Cheraghian, و غیره, ۲۰۲۰). علاوه بر این، مقدار افزودنی خاص در کاهش دمای مورد نظر بسیار موثر است (Khani Sanij, Afkhamy Meybodi, Amiri, Hormozaky, Hosseini, & Olazar, 2019).

فناوری کف قیر

فرآیندهای کف‌سازی شامل دو گروه متمایز فناوری‌های غیرمستقیم (حاوی آب) و مستقیم (پایه آبی) است. فناوری‌های حاوی آب، معمولاً از ژئولیت مصنوعی استفاده می‌کنند که

حاوی آبی است که آزاد می‌شود و با افزایش دما باعث ایجاد اثر کف‌کننده می‌شود. از سوی دیگر، فناوری‌های پایه آبی با تزریق مستقیم آب به قیر داغ از طریق نازل‌های مخصوص، از آب استفاده می‌کنند. در دماهای بالا، آب تبدیل به بخار شده و حباب‌های ریز متعددی در قیر ایجاد می‌شود. این کف تولید شده با کاهش کشش سطحی و افزایش مساحت سطح قیر آسفالت در حجم واحد، ویسکوزیته قیر را تا حد زیادی کاهش می‌دهد و اجازه می‌دهد تا ذرات سنگدانه، حتی در دمای اختلاط پایین تر، به راحتی توسط قیر آسفالت پوشش داده شوند. با این حال، به دلیل افت ناگهانی دمای قیر و گرمای نهان زیاد آب، رطوبت داخل آسفالت و سنگدانه‌ها ممکن است به طور کامل دفع نشده و منجر به افزایش پتانسیل آسیب‌های رطوبتی، مانند عریان شدگی شود (Zhang, 2019). جدول ۱، مشخصات افزودنی یا فناوری استفاده شده در این مخلوط‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مشخصات نوع افزودنی یا فناوری استفاده شده در مخلوط آسفالت گرم (Cheraghian, و غیره, ۲۰۲۰)

کشور	نوع افزودنی	افزودنی یا فناوری خاص	مقدار (درصد)	دمای تولید/ میزان کاهش دما (درجه سانتیگراد)
کشورهای مختلف	ساسوبیت	آلی	۱/۵-۴	۲۰-۳۰ کاهش دما
آلمان	آسفالتن B	آلی	۲-۴	۲۰-۳۰ کاهش دما
آلمان	لیکومنت BS	آلی	۳	۲۰-۳۰ کاهش دما
فرانسه	Ecoflex	آلی	-	۳۰-۴۰ کاهش دما
کشورهای مختلف	Evotherm	شیمیایی	۰/۵	۱۱۵ دمای تولید
ایتالیا	Iterlow T	شیمیایی	۰/۳ - ۰/۵	۱۲۰ دمای تولید
ایالات متحده - فرانسه	Cesabase RT	شیمیایی	۰/۲ - ۰/۴	۳۰ کاهش دما
ایالات متحده	Revix	شیمیایی	-	۱۵-۲۵ کاهش دما
ایالات متحده	Advera	کف ساز	۰/۲۵	۱۰-۳۰ کاهش دما
ایالات متحده	Terex WMA	کف ساز	۲	۱۳۰ دمای تولید
کشورهای مختلف	WAM-Foam	کف ساز	۲-۵	۱۰۰-۱۲۰ دمای تولید
هلند - ایتالیا	LT Asphalt	کف ساز	۰/۵-۱	۹۰ دمای تولید

۴- عملکرد مخلوط آسفالت گرم

هدف اصلی استفاده از مخلوط آسفالت گرم، جایگزینی مخلوط آسفالت داغ با گزینه سبتر و سازگارتر با محیط زیست است. لذا عملکرد مخلوط آسفالت گرم حائز اهمیت فراوانی است. مطالعات زیادی در مورد عملکرد خستگی مخلوط‌های آسفالت گرم انجام شده است. دمای پایین‌تر مورد استفاده در این مخلوط‌ها ممکن است مقاومت در برابر خستگی را افزایش دهد (Rondón-Quintana, Hernández-Noguera, & Reyes-Lizcano, 2015) با این حال، مرور مطالعات انجام شده، نشان‌دهنده مغایرت زیاد در گزارش عملکرد خستگی این مخلوط‌ها است. برخی از مطالعات نشان دادند که عمر خستگی کمتر از مخلوط آسفالتی داغ است. در حالی که برخی از مطالعات گزارش می‌دهند که عملکرد خستگی مخلوط آسفالت گرم در مقایسه با مخلوط آسفالت داغ بهبود یافته است (Abdollahi, Karimi, Jahanbakhsh & Tabatabaee, 2022).

عامل دیگر تعیین کننده عملکرد آسفالت، تغییر شکل دائمی است. مطالعات زیادی توسط محققین مختلف برای تعیین تغییر شکل دائمی مخلوط آسفالت گرم انجام شده است. با این حال، به دلیل فناوری نسبتاً جدید و در حال توسعه، تنوع در تعدد فن‌آوری‌های تهیه مخلوط آسفالت گرم و استفاده از روش‌های مختلف آزمایش، نتایج مبهمی در مورد تغییر شکل دائمی مخلوط آسفالت گرم نشان داده شده است. برخی از محققین گزارش کرده‌اند که به دلیل نرخ کند فرایند سفت شدگی قیر در طول ساخت، مقاومت شیارشدگی در فرایند پیرشدگی طولانی مدت کاهش می‌یابد. در مقابل، چندین محقق گزارش کردند که برخی از مواد افزودنی که برای تولید مخلوط آسفالت گرم استفاده می‌شوند، می‌توانند مقاومت شیارشدگی آسفالت را پس از تبلور^۲ افزایش دهند. ناسازگاری نتایج اغلب به دلیل نوع افزودنی مورد استفاده در تولید مخلوط آسفالت گرم است (Raab, Camargo, & Partl, 2017).

حساسیت مخلوط آسفالت گرم به رطوبت، عمدتاً به این دلیل که برخی از فناوری‌های مخلوط آسفالت گرم از آب یا به عنوان افزودنی حاوی آب یا به عنوان کف‌ساز پایه آبی استفاده می‌کنند،

بیشتر از مخلوط آسفالت داغ است. همچنین، دماهای پایین مورد استفاده برای تولید مخلوط آسفالت گرم، پشتیبانی کافی از سنگدانه‌ها برای حذف کامل رطوبت را فراهم نمی‌کند. رطوبت روی سنگدانه مرطوب در تماس با قیر می‌تواند حساسیت رطوبتی را در مخلوط آسفالت گرم به دلیل عدم وجود میل ترکیبی الکتروشیمیایی بین قیر و سطح سنگدانه افزایش دهد. از این رو، قیر به دلیل شکستن پیوند بین قیر و سنگدانه از سنگدانه جدا می‌شود. رطوبت داخل قیر آسفالت، قیر را نرم کرده و استحکام مخلوط را کاهش می‌دهد. با این حال، این مشکل را می‌توان با استفاده از عوامل پیوندزا کاهش داد. افزودنی‌هایی مانند مواد فعال سطحی، پیوند بین قیر و سنگدانه را بهبود بخشیده و قیر را در برابر حساسیت رطوبتی مقاوم‌تر می‌کنند (Capitão, Picado-Santos, & Martinho, 2012). استفاده از آهک هیدراته با اندازه نانو به عنوان یک عامل افزودنی در مخلوط‌های آسفالت گرم با کف قیر، حساسیت به رطوبت را کاهش می‌دهد (Diab, Sangiorgi, Ghabchi, Zaman, Hashemian, & Kavussi; Wahaballa, 2016 & Hashemian, 2012).

جدا از معیارهای عملکرد اصلی مانند شیار شدگی، خستگی و حساسیت به رطوبت، مخلوط آسفالت گرم به دلیل عملکرد تراکم پذیری آن شناخته شده است. عملکرد تراکم میدانی مخلوط‌های آسفالت گرم، مشابه یا بهتر از مخلوط‌های آسفالت داغ است (Hashemian, 2012 & Kavussi).

مقاومت در برابر ترک خوردگی در دمای پایین یکی دیگر از نگرانی‌های موجود در شرایط آب و هوایی سرد است. چندین مطالعه نشان داده‌اند که مخلوط آسفالت گرم در شرایط دمای پایین عملکرد خوبی دارد و مقاومت بسیار خوبی در برابر ترک خوردگی در دمای پایین نشان می‌دهد.

وجود فناوری‌های متعدد تولید مخلوط آسفالت گرم، درک ویژگی‌های عملکردی این مخلوط‌ها را به صورت کلی دشوار کرده است. هر فناوری محاسن و معایب خاص خود را دارد. از این رو، درک عملکرد هر فناوری به طور جداگانه مهم است. جدول ۲ عملکرد ۱۲ فناوری مختلف مخلوط آسفالت گرم را نشان می‌دهد.

جدول ۲. ارزیابی عملکرد فناوری های مختلف مخلوط آسفالت گرم (Jiayum, 2019 & ,Chamod, Xiangdao)

تراکم	عملکرد در دمای بالا	مقاومت در برابر ترک خوردگی در دمای پایین	مقاومت در برابر رطوبت	مقاومت خستگی	مقاومت شیارشدگی	نوع فناوری مخلوط آسفالت گرم	
+	+	-	=	+	-	Aspha - min	کف ساز
+	+	+	-	+	-	Advera	
+	+	+	=	=-	=-	Doublr Barrel Green	
+	=	+	-	=	=	Ultrafoam GX	
+	=	-	-	+	+	WAM-Foam	
+	=	-	=	=	=	Aqua Black	
+	+	+	+	+	-	Rediset WMX	افزودنی آلی
+	+	=	=	=	+	ساسوبیت	
+	=	=	+	=	+	آسفالتن B	
+	+	=	+	=	+	Licomont BS 100	
+	+	+	-	=	+	Evotherm	افزودنی شیمیایی
+	=	=	-	-	-	Cesabase RT	

توجه: + عملکرد مثبت، - عملکرد منفی، = عملکرد معادل، +عملکرد اندکی بهتر، -= عملکرد اندکی منفی (مقایسه با نمونه کنترلی مخلوط آسفالت داغ)

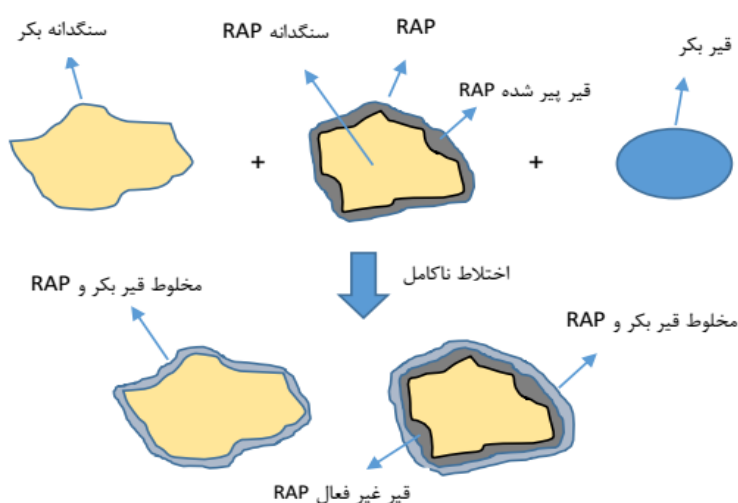
۵- کاربرد و عملکرد تراشه آسفالت بازیافتی

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 روسازی های آسفالتی در شرف بازسازی یا تخریب استحصال می شود. گاهی اوقات از ضایعات کارخانه آسفالت نیز به عنوان تراشه آسفالت بازیافتی استفاده می شود. از آنجایی که ذرات تراشه آسفالت بازیافتی آسیاب شده دارای اندازه های 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 می کند تا با تغییر مقادیر تراشه آسفالت بازیافتی، مصالح بکر و قیر، خواص آسفالت را کنترل کنند (Copeland, 2011; Randy C. West, 2015).

مقدار مصرف تراشه آسفالت بازیافتی در یک مخلوط آسفالتی به عوامل زیادی بستگی داشته و 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 مخلوط های تراشه آسفالت بازیافتی، عملکردی برابر یا بهتر از مخلوط های آسفالتی معمولی دارند (Jiayum, 2019 & ,Chamod, Xiangdao). تلاش های موفقیت آمیز بسیاری بر مصرف درصد بالاتر تراشه آسفالت بازیافتی در مخلوط های آسفالتی گزارش شده است. در تحقیقی دیگر، خواص روسازی های آسفالتی دارای ۴۰ تا ۶۰ درصد تراشه آسفالت بازیافتی ارزیابی شد و نتیجه گیری شد که با تفکیک و مدیریت صحیح دپوهای ذخیره تراشه آسفالت بازیافتی، می توان درصدهای بالاتری را با موفقیت در مخلوط های آسفالتی گرم به کار گرفت (Jiayum, 2019 & ,Chamod, Xiangdao).

پذیرتر می‌کند. تراشه آسفالت بازیافتی، به دلیل افزایش سفتی مخلوط‌های حاوی این تراشه‌ها، کاهش چسبندگی قیر پیر شده و کاهش زاویه دار بودن سنگدانه‌های تراشه آسفالت بازیافتی در مقایسه با سنگدانه‌های بکر، عملکرد ترک‌خوردگی در دمای پایین مخلوط‌های آسفالتی را کاهش می‌دهد (Abdollahi, Karimi, Jahanbakhsh, & Tabatabaee, 2022). شکل ۱ سناریوی اختلاط ناکامل مخلوط‌های تراشه آسفالت بازیافتی و قیر بکر را نشان می‌دهد. بوضوح مشخص است که اختلاط قیر پیر شده با قیر بکر کارآمد نیست (Ding, Huang, & Shu, 2017).

افزایش مقدار استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی، اثرات مخربی بر عملکرد مخلوط آسفالتی داغ دارد (Randy C. West, 2015). اختلاط ناکامل قیر پیر شده تراشه آسفالت بازیافتی و قیر بکر در دماهای معین، قیری با ساختار بسیار پیچیده و خواص غیرقابل پیش بینی ایجاد می‌کند که بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی تأثیر می‌گذارد. به دلیل فرآیند اکسیداسیون، قیر موجود در تراشه آسفالت بازیافتی، در طول عمر مفید آن سفت می‌شود. به طور معمول، سفتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی تراشه آسفالت بازیافتی در مقایسه با مخلوط‌های معمولی بیشتر است. این امر مقاومت آسفالت در برابر ترک خوردگی را کاهش داده و آن را در برابر خستگی، ترک‌خوردگی و خرابی‌های نهایی آسیب



شکل ۱. نمایش اختلاط ناکامل مخلوط‌های با قیر بکر و قیر تراشه آسفالت بازیافتی RAP (Ding, Huang, & Shu, 2017)

حساسیت به رطوبت تراشه آسفالت بازیافتی به دلیل پوشش سنگدانه‌های بازیافتی با قیر آسفالت کمتر است. لذا به دلیل محدودیت نفوذ آب در ذرات تراشه‌های آسفالت بازیافتی، این مخلوط‌ها نسبت به مخلوط‌های آسفالتی معمولی در برابر عریان شدگی مقاوم‌تر هستند. سنگدانه‌های تراشه آسفالت بازیافتی با یک لایه قیر پیر شده قوی اندود شده اند و در ترکیب با قیر تازه، پیوند قوی‌تری ایجاد می‌شود و 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.

بسیاری از مطالعات نشان دادند که عملکرد خستگی با افزایش درصد تراشه آسفالت بازیافتی در مخلوط، کاهش پیدا می‌کند. زو و همکاران وی برای شش مخلوط آسفالتی، عملکرد ترک خوردگی حرارتی و خستگی را ارزیابی کردند و نتیجه گرفتند که با افزایش درصد تراشه آسفالت بازیافتی، عملکرد مخلوط آسفالتی در دمای پایین و مقاومت در برابر خستگی کاهش می‌یابد (Zhu, Wang, Qiao, & Shu, 2018). کاشف و همکاران وی از جوان‌کننده‌های پایه زیستی (گیاهی یا حیوانی) برای اصلاح قیر سفت شده تراشه آسفالت بازیافتی و افزایش خواص خستگی مخلوط‌های تراشه آسفالت بازیافتی استفاده کردند (Elkashaf, Christopher Williams, & Cochran, 2017).

بازیافتی را در مخلوط‌های آسفالتی گرم مطالعه کرده‌اند. از یک سو، مخلوط آسفالتی گرم با کاهش دمای تولید با استفاده از افزودنی و از سوی دیگر تراشه آسفالت بازیافتی با استفاده از مواد بازیافتی، هزینه‌های تولید و آلودگی محیط زیست را کاهش می‌دهد. لذا استفاده از این دو در کنار هم، علاوه بر کاهش هزینه‌های تولید و آلودگی محیطی، باعث بهبود عملکرد نیز می‌شود. با این حال، هر دو تراشه آسفالت بازیافتی و مخلوط آسفالتی گرم به طور جداگانه دارای اشکالاتی نیز هستند. مقاومت ضعیف در برابر خستگی، سختی بالاتر - ترک خوردگی در دمای پایین - و کاهش عملکرد در دمای بالا از جمله معایب استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی در مخلوط‌های آسفالتی داغ است. به طور مشابه، استفاده از مخلوط آسفالت گرم منجر به حساسیت بالای رطوبتی و خرابی شیار افتادگی می‌شود. از این رو، برای غلبه بر این معایب و بهبود بیشتر عملکرد، استفاده از مصالح آسفالت بازیافتی همراه با مخلوط آسفالت گرم به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است.

یکی از نگرانی‌های اصلی استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی در مخلوط آسفالت داغ آن است که تراشه آسفالت بازیافتی پیر شده، در مرحله اختلاط با دمای بالا به راحتی دچار پیرشدگی ثانویه شده و این امر منجر به افزایش قابل توجه پتانسیل ترک خوردگی زودرس روسازی‌ها می‌شود. استفاده از دماهای پایین‌تر در مخلوط‌های آسفالت گرم، از این پیرشدگی ثانویه قیر تراشه آسفالت بازیافتی در فرایند تولید جلوگیری کرده و آن را در برابر ترک خوردگی‌های اولیه، انعطاف‌پذیرتر می‌کند (Ayazi, Barghabany, 2017 & Moniri). همچنین، افزودنی‌های مخلوط آسفالت گرم، با کاهش ویسکوزیته قیر سخت تراشه آسفالت بازیافتی در مخلوط‌های آسفالت گرم، امکان استفاده از درصد بالای تراشه آسفالت بازیافتی را در این مخلوط‌ها میسر می‌سازد. در نتیجه، تراکم پذیری مخلوط آسفالت گرم حاوی تراشه آسفالت بازیافتی، بیشتر از مخلوط آسفالت داغ حاوی تراشه آسفالت بازیافتی بوده و طول عمر روسازی افزایش می‌یابد. پیرشدگی کمتر در طول فرایند تولید به دلیل دمای پایین باعث بهبود انعطاف‌پذیری و در نتیجه، کاهش ترک خوردگی خستگی و ترک خوردگی حرارتی می‌شود و به بهبود قابل توجه در عملکرد طولانی مدت میدانی روسازی و افزایش عمر روسازی می‌انجامد.

سختی قیر تراشه آسفالت بازیافتی، مقاومت بهتری در برابر تغییر شکل پلاستیکی روسازی ایجاد می‌کند. مطالعات زیادی برای تعیین تغییر شکل پلاستیک مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالت بازیافتی در چندین دهه گذشته انجام شده و 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 حاوی مقادیر متغیر تراشه آسفالت بازیافتی تا میزان ۱۰۰٪ مورد مطالعه قرار گرفته 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 & Yanjun, 2012). نرخ پیرشدگی مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالت بازیافتی در طی سال‌های بهره‌برداری، در مقایسه با مخلوط‌های معمولی نسبتاً کند است. با این حال، مخلوط‌های با تراشه آسفالت بازیافتی بیشتر، پتانسیل بالاتری برای خرابی فیتیل شدن^۴ نشان داده‌اند (Jiayum, & Chamod, Xiangdao, 2019).

شکندگی 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 مخلوط‌های 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 (Jiayum, 2019, Chamod, Xiangdao, & Jiayum, 2019).

۶- قابلیت استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی در

مخلوط‌های آسفالتی گرم و محدودیت‌های آن

با توسعه و گسترش سریع شبکه‌های جاده‌ای در سراسر جهان، صنعت آسفالت با چالش‌های زیادی از جمله کمبود مصالح، نگرانی‌های زیست‌محیطی، افزایش هزینه‌های مواد، تقاضا برای مصالح سازگار با محیط زیست و غیره مواجه است. از این رو، برای پرداختن به این مسائل، محققان استفاده از تراشه آسفالت

تراشه آسفالت بازیافتی موجود، معمولاً به دلیل فرآیند آسیاب و خرد کردن، سنگدانه‌های ریز بوده و استاندارد مشخص شده برای سنگدانه‌های بکر را برآورده نمی‌کنند. موفقیت افزایش سهم تراشه آسفالت بازیافتی در مخلوط‌ها نیازمند انجام تحقیقات بیشتر در مورد سنگدانه‌های ریز تراشه آسفالت است.

۷- عملکرد مخلوط‌های آسفالت گرم حاوی تراشه آسفالت بازیافتی

مطالعات زیادی توسط محققان مختلف در سراسر جهان با استفاده از مقادیر مختلف تراشه آسفالت بازیافتی و افزودنی‌های مخلوط آسفالت گرم انجام شده است. به طور کلی، به دلیل در دسترس بودن انواع افزودنی‌ها و فناوری‌های مخلوط آسفالت گرم، درک عملکرد مخلوط‌های آسفالت گرم حاوی تراشه آسفالت بازیافتی دشوار است. هر فناوری، محدودیت‌ها و نقاط قوت خود را دارد. در ادامه، عملکرد مخلوط‌های آسفالت گرم حاوی تراشه آسفالت بازیافتی بر اساس بررسی گسترده مطالعات انجام شده برای درک رفتار WMA+RAP تشریح می‌شود.

۷-۱- مقاومت در برابر شیارشدگی / تغییر شکل دائمی

نتایج تحقیقات انجام گرفته در مورد مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالت گرم، مبهم و متناقض است. با این حال، افزودن تراشه آسفالت بازیافتی به مخلوط‌های آسفالت گرم، مقاومت شیارشدگی این مخلوط‌ها را بهبود بخشیده است. مقدس نژاد و همکاران وی عملکرد شیار شدگی مخلوط آسفالت گرم حاوی ۰ تا ۶۰٪ تراشه آسفالت بازیافتی را بررسی کردند و با آزمایش مارشال و آزمایش خزش دینامیکی برای ارزیابی عملکرد شیارشدگی مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالت بازیافتی نشان دادند که عملکرد شیارشدگی مخلوط آسفالت گرم با ۶۰٪ تراشه آسفالت بازیافتی، به طور قابل توجهی بهبود یافته است، زیرا تراشه آسفالت بازیافتی، ویسکوزیته قیر آسفالت را به عنوان عامل اصلی شیار شدن، به ویژه در دماهای بالا افزایش می‌دهد (Moghadas Nejada, Azarhoosh, Hamedi & Roshani, 2014). فخری و همکاران، با مطالعه آزمایشگاهی مخلوط‌های آسفالت گرم اصلاح شده با الیاف شیشه و مقادیر ۰ تا ۵۰٪ تراشه آسفالت بازیافتی نشان دادند که افزایش میزان مصرف تراشه آسفالت بازیافتی، مقاومت شیارشدگی مخلوط را افزایش می‌دهد (Hosseini, 2017 & Fakhri). در تحقیقی

بسیاری از مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی در مخلوط آسفالت گرم، نه تنها خواص این مخلوط را بهبود می‌بخشد، بلکه امکان استفاده از درصد بالاتری از تراشه آسفالت بازیافتی با عملکردی برابر یا بهتر از مخلوط آسفالت گرم بدون تراشه آسفالت بازیافتی را فراهم می‌آورد. کارایی بالاتر در مخلوط‌های آسفالت گرم به عنوان مکملی برای جبران کارایی کمتر در تراشه آسفالت بازیافتی است. لذا، مقادیر بسیار بالایی از تراشه آسفالت بازیافتی را می‌توان در مخلوط‌های آسفالت گرم استفاده کرد. کاربرد مخلوط‌های آسفالت گرم و تراشه آسفالت بازیافتی توسط بسیاری از محققین مورد بررسی قرار گرفته است. عملکرد مخلوط‌های آسفالت گرم و تراشه آسفالت بازیافتی برای گنجاندن حداکثر مقدار RAP مورد مطالعه قرار گرفته و بسیاری از مطالعات نشان داده‌اند که می‌توان به طور موثر، فناوری‌های مخلوط آسفالت گرم با بیش از ۶۰٪ تراشه آسفالت بازیافتی و با ویژگی‌های کارایی بهبود یافته را مورد استفاده قرار داد. معمولاً سه محدودیت اصلی در طرح اختلاط مخلوط با تراشه آسفالت بازیافتی بالا وجود داد (Chaoyang, 2020).

- تغییر خواص مهندسی در اثر پیرشدگی قیر منجر به کاهش شکل‌پذیری و خاصیت ارتجاعی مخلوط می‌شود. احیای قیر پیر شده، یکی از کاربردی‌ترین روش‌ها برای رفع این مشکل و افزایش میزان تراشه آسفالت بازیافتی در مخلوط آسفالتی است. - دومین محدودیتی در طرح مخلوط با تراشه آسفالت بازیافتی بالا دشواری کنترل در فرآیند اختلاط و پخش است. برای بازیابی مؤثر خواص مهندسی قیر پیر شده، دستیابی به سطح مناسبی از اختلاط و ترکیب قیر پیر شده و افزودنی‌های جدید مانند قیر نرم یا جوان‌کننده بسیار مهم است. عامل کلیدی برای اطمینان از ترکیب موفقیت آمیز بین آنها، منبع و ویژگی تراشه آسفالت بازیافتی و دما و زمان اختلاط مناسب انتخاب شده است. با توجه به تحقیقات انجام یافته، به طور کلی درجه‌بندی فرآیند اختلاط بین تراشه آسفالت بازیافتی و قیر بکر به سه سطح تقسیم می‌شود. بدون ترکیب، اختلاط جزئی و اختلاط کامل.

-آخرین محدودیت مربوط به ویژگی مصالح سنگی تراشه آسفالت بازیافتی است. نکته کلیدی برای اطمینان از عملکرد یکسان روسازی آسفالتی حاوی تراشه آسفالت بازیافتی و روسازی معمولی، انطباق دانه‌بندی تراشه آسفالت بازیافتی با دانه‌بندی مصالح سنگی بکر است. با این حال، سنگدانه‌های

۷-۳- ویژگی‌های خستگی

در ارزیابی عملکرد خستگی مخلوط‌های آسفالت گرم حاوی تراشه آسفالت بازیافتی بالا، وجود قیر پیر شده از دلایل اصلی عملکرد ضعیف این مخلوط‌ها است. تحقیقات انجام شده بر روی روسازی آسفالتی با تراشه آسفالت بازیافتی کم در مقایسه با روسازی آسفالت معمولی، هیچ تغییر آشکاری در خواص مهندسی نشان نداده است، اما با افزایش میزان تراشه آسفالت بازیافتی در مخلوط، تفاوت در عملکرد به طور فزاینده‌ای آشکار می‌شود (Chaoyang, 2020). مطالعه انجام یافته بر روی مخلوط آسفالت گرم حاوی ۴۰٪ تراشه آسفالت بازیافتی نشان داد که افزودن تراشه آسفالت بازیافتی اثر زیانباری بر مقاومت خستگی و ترک انعکاسی دارد (Mogawera, Austermana, & Mohammad, 2013). با توجه به گزارش‌های متعدد بررسی رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالت گرم حاوی تراشه آسفالت بازیافتی، شامل عملکرد مثبت و منفی، نتیجه‌گیری نهایی در این مورد صریح و قطعی نیست.

۷-۴- مدول ارتجاعی و سختی

مخلوط آسفالت گرم حاوی تراشه آسفالت بازیافتی در مقایسه با مخلوط آسفالت گرم، دارای مدول ارتجاعی برابر یا بهبود یافته است. بسیاری از مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی، بدون توجه به فناوری مخلوط آسفالت گرم، بر مدول ارتجاعی مخلوط‌ها تأثیر مثبت گذاشته است. افزودن قیر سخت شده تراشه آسفالت بازیافتی، سختی مخلوط‌های آسفالت گرم حاوی تراشه آسفالت بازیافتی را بهبود بخشیده است. این بهبود سختی به طور مثبت بر مقاومت شیار شدگی، مقاومت در برابر خستگی و مدول برجهنگدگی مخلوط‌ها تأثیر گذاشته است (Jiayum, & Chamod, Xiangdao, 2019; Behbahani, Ayazi, & Moniri, 2017). با این حال، سخت و شکننده بودن، اثر عکس در عملکرد مخلوط‌های آسفالت گرم حاوی تراشه آسفالت بازیافتی در دمای پایین داشته است. مخلوط آسفالت گرم با تراشه آسفالت بازیافتی، دارای مقادیر روانی کم و استحکام بالا و در نتیجه، دارای مقادیر بالای ضریب مارشال بوده که نشان دهنده سختی بیشتر و مقاومت بالاتر در برابر تغییر شکل خزشی مخلوط‌ها است (Oner & Sengoz, 2015). در مقابل، مخلوط‌های سخت به دلیل

دیگر، صبوری و همکاران وی نشان دادند که استفاده از جوان‌کننده بر عملکرد شیارشدگی مخلوط‌ها تأثیر منفی دارد (Sabouri M., 2016). نتایج تحقیقات مختلف، بهبود مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالت گرم حاوی تراشه آسفالت بازیافتی را در مقایسه با مخلوط آسفالت داغ تأیید می‌کند. همچنین، افزایش تراشه آسفالت بازیافتی، به افزایش استحکام مارشال و بالطبع، به بهبود مقاومت در برابر اعوجاج از نظر شیارشدگی و برش منجر می‌شود (Chamod, Jiayum, 2019 & Xiangdao).

۷-۲- حساسیت رطوبتی

در شرایط آب و هوایی مرطوب، تحت بار دینامیکی ترافیک عبوری، رطوبت به لایه‌های روسازی نفوذ کرده و فشار آب منفذی در لایه‌های آسفالت ایجاد می‌شود. در نتیجه، اندود قیری از ذرات سنگدانه‌ها جدا شده و عریان شدگی مصالح اتفاق می‌افتد. آسیب رطوبتی، معضلی پیچیده در روسازی‌های آسفالتی بوده که منجر به کاهش سختی و کاهش مقاومت سازه می‌شود (Razavi & Kavussi, 2020).

دمای پایین تولید مخلوط آسفالت گرم، ممکن است حساسیت به رطوبت مخلوط‌های آسفالت گرم حاوی تراشه آسفالت بازیافتی را افزایش دهد. مقاومت رطوبتی بالای تراشه آسفالت بازیافتی مکمل مقاومت رطوبتی ضعیف مخلوط آسفالتی گرم برای تولید مخلوط‌های آسفالتی مقاوم در برابر آسیب رطوبتی است (Barghabany, 2017 & Ayazi, Moniri). تحقیقات زیادی برای تعیین حساسیت به رطوبت مخلوط‌های آسفالت گرم حاوی درصدهای مختلف تراشه آسفالت بازیافتی انجام شده است. با بررسی تحقیقات انجام شده، مشخص شد که اغلب مطالعات، نتایج یکسان یا بهبود یافته را در مقایسه با مخلوط آسفالت داغ گزارش کردند (Hosseini, & Fakhri, 2017; Howard, 2013 & Doyle). همچنین، عامل جوانساز می‌تواند به طور قابل توجهی حساسیت به رطوبت مخلوط‌های آسفالت گرم حاوی تراشه آسفالت بازیافتی را بهبود بخشد (Moghadas Nejada, Azarhoosh, Hamedi, & Roshani, 2014).

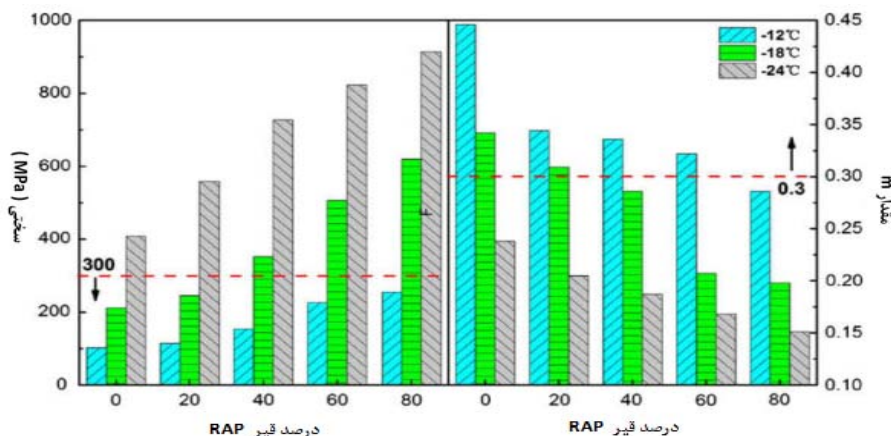
۶-۷- عملکرد در دمای پایین

طی بررسی عملکرد مخلوط آسفالت گرم حاوی تراشه آسفالت بازیافتی در دمای پایین، نشان داده شد که افزایش میزان تراشه آسفالت بازیافتی، مقاومت ترک خوردگی در دمای پایین را کاهش می‌دهد. همچنین، نتیجه‌گیری شد که معرفی عامل جونساز می‌تواند به طور قابل توجهی مقاومت ترک خوردگی در دمای پایین مخلوط آسفالت گرم حاوی تراشه آسفالت بازیافتی را افزایش دهد (Guo, You, & Tan, 2016). به دلیل شکنندگی مخلوط‌های آسفالت گرم و تراشه آسفالت بازیافتی، روسازی ممکن است در دماهای پایین‌تر دچار ترک‌های اولیه شود. محققان نشان دادند که عملکرد مخلوط‌های آسفالت گرم حاوی تراشه آسفالت بازیافتی در دمای پایین در مقایسه با مخلوط‌های کنترل کاهش یافته است (Xiao, Li, Zhang, & Amirhanian, 2017). سختی و مقادیر m مخلوط‌های آسفالت گرم کف قیری با مقادیر مختلف قیر تراشه آسفالت بازیافتی در شکل ۲ ارائه شده است. عملکرد مخلوط آسفالت گرم بدون تراشه آسفالت بازیافتی در دمای پایین بهتر از مخلوط آسفالت گرم با تراشه آسفالت بازیافتی است. با افزودن تراشه آسفالت بازیافتی، سختی مخلوط افزایش یافته و مقدار m کاهش می‌یابد که برای عملکرد در دماهای پایین نامطلوب است.

ظرفیت کرنش کششی کمتر، در معرض ترک خوردن قرار دارند (Jiayum, 2019 & Chamod, Xiangdao).

۵-۷- عملکرد در دمای بالا

اگرچه مطالعات زیادی در مورد عملکرد مخلوط‌های آسفالت گرم حاوی تراشه آسفالت بازیافتی در دمای پایین وجود دارد، تحقیقات اندکی در مورد ویژگی‌های مخلوط‌ها در دمای بالا انجام شده است. طی تحقیقی، مقایسه عملکرد مخلوط‌های آسفالت گرم کف قیری و داغ حاوی تراشه آسفالتی بازیافتی به عمل آمد و نتایج نشان داد که عملکرد مخلوط آسفالت داغ حاوی تراشه آسفالت بازیافتی در دمای بالا بهتر از مخلوط آسفالت گرم کف قیری حاوی تراشه آسفالت بازیافتی است (Dong, Yu, Xu, & Wang, 2017). در تحقیقی مشابه، عملکرد مخلوط آسفالت گرم کف قیری در دمای بالا با استفاده از آزمایش بازگشت خزشی در چند سطح تنش ($MSCR^*$) ارزیابی شد و نشان داده شد که افزودن تراشه آسفالت بازیافتی، دمای گسیختگی مخلوط آسفالت گرم کف قیری را بهبود می‌بخشد (Yu, Dong, Xu, & Ding, 2017). بر اساس مطالعات محدود انجام شده، می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد مخلوط‌های آسفالت گرم حاوی تراشه آسفالت بازیافتی در دمای بالا رضایت‌بخش است. با این حال، تحقیقات بیشتر برای تأیید عملکرد این مخلوط‌ها در دمای بالا توصیه می‌شود.



شکل ۲. سختی و مقدار m آسفالت بازیافتی مخلوط گرم کف قیری در دماهای مختلف (Jiayum, 2019 & Chamod, Xiangdao)

کلی مخلوط‌ها را بهبود می‌بخشند. صبوری و همکاران وی منحنی‌های اصلی مدول دینامیکی مخلوط‌های آسفالت داغ و گرم حاوی ۴۰٪ تراشه آسفالت بازیافتی را مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که افزودنی‌های مخلوط آسفالت گرم، کارایی

۷-۷- کارایی

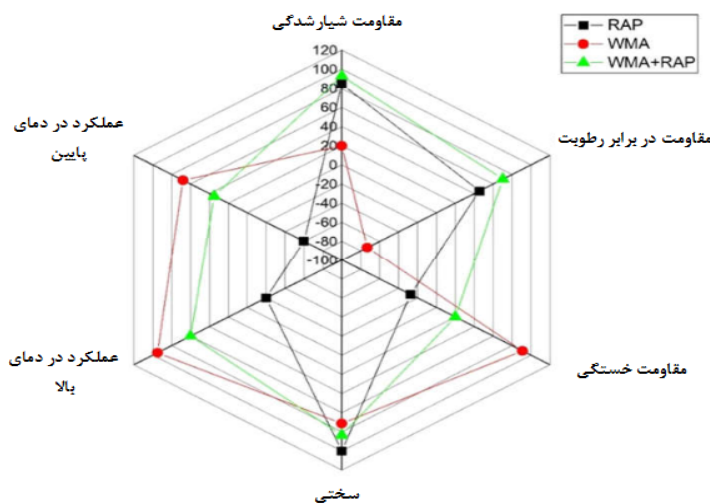
افزودنی‌های مخلوط آسفالت گرم با کاهش ویسکوزیته قیر سخت شده تراشه آسفالت بازیافتی در این مخلوط‌ها، کارایی

مطالعه برای تجزیه و تحلیل در نظر گرفته شده و هر پارامتر عملکردی به طور جداگانه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. تعداد مطالعات با نتایج مثبت برای هر پارامتر خاص به صورت درصدی از کل مطالعات در نظر گرفته شده است. به همین ترتیب، تعداد مطالعات با نتایج منفی برای همان پارامتر به صورت درصدی در نظر گرفته شده است. با تفریق درصد منفی از درصد مثبت، مقدار پارامتر مشخص شده است (Jiayum, 2019 & Chamod, Xiangdao). نتایج تجزیه و تحلیل شکل ۳ نشان می‌دهد که مخلوط‌های آسفالت گرم حاوی تراشه آسفالت بازیافتی، دربرگیرنده ویژگی‌های ترکیبی مخلوط آسفالت گرم و تراشه آسفالت بازیافتی است. تجزیه و تحلیل مشابهی برای شناسایی عملکرد تراشه آسفالت بازیافتی در مخلوط‌های آسفالت گرم با توجه به افزودنی‌های آلی، افزودنی‌های شیمیایی و فناوری کف قیر انجام شده است. نتایج در شکل ۴ ارائه شده است. افزودنی‌های آلی عملکرد بهتری را از نظر مقاومت در برابر رطوبت، عملکرد خستگی و عملکرد در دمای پایین در مقایسه با فناوری‌های شیمیایی و کف قیر نشان می‌دهند. با این حال، هر دو مخلوط آسفالت گرم با افزودنی شیمیایی و کف قیر در مقایسه با افزودنی‌های آلی، اندکی عملکرد بهبود یافته از نظر سختی، کارایی و مقاومت شیارشدگی را نشان می‌دهند. عملکرد افزودنی‌های آلی در دمای بالا به طور قابل توجهی کمتر از مخلوط‌های شیمیایی و کف قیر است.

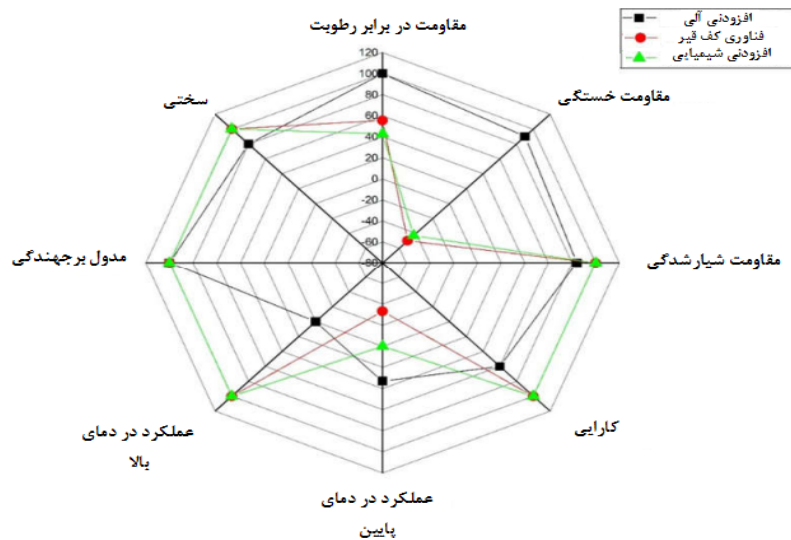
مخلوط‌ها را بهبود می‌بخشد (Sabouri M., 2016). به طور مشابه، در تحقیقی دیگر از یک گشتاورسنج برای اندازه‌گیری کارایی مخلوط‌های آسفالت گرم حاوی تراشه آسفالت بازیافتی استفاده شد و مشخص شد که افزودن ساسوبیت و ادوراویسکوزیته مخلوط‌های با ۱۰٪ تراشه آسفالت بازیافتی را کاهش داده و منجر به بهبود کارایی مخلوط در دماهای پایین تا ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد می‌شود (Tao & Mallick, 2009). با افزایش مقدار تراشه آسفالت بازیافتی در مخلوط، پیشنهاد شده است که به منظور تأمین کارایی با توجه به حداکثر گشتاور توصیه شده ۲۰ نیوتن - متر، دمای تراکم ۱۰ تا ۲۰ درجه سانتیگراد افزایش یابد. با وجود کارایی بهتر مخلوط‌های آسفالت گرم حاوی تراشه آسفالت بازیافتی در مقایسه با مخلوط آسفالت داغ حاوی تراشه آسفالت بازیافتی، کارایی کلی مخلوط‌های آسفالت گرم با افزایش مقدار تراشه آسفالت بازیافتی کاهش می‌یابد. در مجموع، کارایی مخلوط‌های آسفالت گرم حاوی تراشه آسفالت بازیافتی، رضایت‌بخش گزارش می‌شود (Jiayum, 2019 & Chamod, Xiangdao).

۸- جمع‌بندی تجزیه و تحلیل عملکردی

تجزیه و تحلیل عملکرد تراشه آسفالت بازیافتی، مخلوط آسفالت گرم و تراشه آسفالت بازیافتی در مخلوط‌های آسفالت گرم بر اساس یافته‌های مطالعات دهه اخیر انجام شده است (Jiayum, 2019 & Chamod, Xiangdao). حداقل ۱۰



شکل ۳. عملکرد تراشه آسفالت بازیافتی، مخلوط آسفالت گرم و مخلوط آسفالت گرم حاوی تراشه آسفالت بازیافتی (Jiayum, 2019 & Chamod, Xiangdao)



شکل ۴. عملکرد انواع مخلوط های آسفالت گرم حاوی تراشه آسفالت بازیافتی (Jaiyum, 2019 & Chamod, Xiangdao)

۸- نتیجه گیری

کرده و روشی کارا برای غلبه بر محدودیت‌های ذاتی جداگانه مخلوط آسفالت گرم و تراشه آسفالت بازیافتی ایجاد می‌شود. بررسی مطالعات انجام پذیرفته بر روی مخلوط‌های آسفالت گرم حاوی تراشه آسفالت بازیافتی نشان می‌دهد که مطالعات آزمایشگاهی و میدانی بایستی بر روی عملکرد خستگی در دماهای میانی و ترک‌خوردگی در دمای پایین این مخلوط‌ها، متمرکز گردد. ضمن آنکه، بهبود خواص رئولوژیکی این مخلوط‌ها در دماهای میانی و پایین با استفاده از جوانسازها یا سایر افزودنی‌ها، بر روی خصوصیات مخلوط در دمای بالا و حساسیت رطوبتی آنها موثر بوده و نیازمند بررسی هم‌زمان پارامترهای مربوط به آنها نیز می‌باشد.

امروزه در کشورهای با توسعه اقتصادی شتابان، رویکرد "ساخت و ساز محور" در ساخت راه‌ها به رویکرد "توجه برابر به ساخت و ساز و نگهداری" تغییر یافته و دغدغه کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی محیط زیست همراه با صرفه اقتصادی و بهبود شاخصه‌های عملکردی گرایش به سمت استفاده از مخلوط‌های آسفالت گرم حاوی درصد‌های بالاتر تراشه آسفالت بازیافتی را موجب شده است. دمای پایین تولید مخلوط آسفالت گرم باعث کاهش پیری ثانویه مخلوط تراشه آسفالت بازیافتی در طول تولید شده و ویسکوزیته بالای مخلوط آسفالت گرم باعث استفاده از درصد بالای تراشه آسفالت بازیافتی بدون به خطر انداختن کارایی آسفالت شده است. علاوه بر این، در صورت استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی در مخلوط‌های آسفالت گرم، این دو، به عنوان مکمل همدیگر عمل

۹- پی‌نوشت‌ها

۱۰- مراجع

- Abdollahi, S. F., Karimi, M. M., Jahanbakhsh, H., & Tabatabaee, N. (2022). Cracking performance of rubberized RAP mixtures with Sasobit. *Construction and Building Materials*, 319(126090).
- Ahmed, R., Hossain, K., Aurilio, M., & Hajj, R. (2021). Effect of rejuvenator type and dosage on rheological properties of short-term aged binders. *Materials and Structures*, 54(109).
- Ayazi, M., Moniri, A., & Barghabany, P. (2017). Moisture susceptibility of warm mixed-reclaimed

1. Warm Mix Asphalt
2. Reclaimed Asphalt Pavement
3. Hot Recycled Mixture
4. Warm Recycled Mixture
5. Cold Recycled Mixture
6. Evotherm
7. Surfactant
8. Crystallization
9. Raveling
10. Multi Stress Creep Recovery
11. Advera

- Ding, Y., Huang, B., & Shu, X. (2017). Utilizing Fluorescence Microscopy for Quantifying Mobilization Rate of Aged Asphalt Binder. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(12), 04017243(1-8).
- Dong, F., Yu, X., Xu, B., & Wang, T. (2017). Comparison of high temperature performance and microstructure for foamed WMA and HMA with RAP binder. *Construction and Building Materials*, 134, 594-601.
- Doyle, J. D., & Howard, I. L. (2013). Rutting and moisture damage resistance of high reclaimed asphalt pavement warm mixed asphalt: loaded wheel tracking vs. conventional methods. *Road Materials and Pavement Design*, 14(S2), 148-172.
- Elkashef, M., Christopher Williams, R., & Cochran, E. (2017). Investigation of fatigue and thermal cracking behavior of rejuvenated reclaimed asphalt pavement binders and mixtures. *International Journal of Fatigue*, 108, 90-95.
- Fakhri, M., & Hosseini, S. A. (2017). Laboratory evaluation of rutting and moisture damage resistance of glassfiber modified warm mix asphalt incorporating high RAP proportion. *Construction and Building Materials*, 134, 626-640.
- Flores, G., Gallego, J., Miranda, L., & 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*, 250(118804).
- Guo, N., You, Z., & Tan, Y. a. (2016). Performance evaluation of warm mix asphalt containing reclaimed asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, 18(11), 981-989.
- Hussain, A., & Yanjun, Q. (2012). laboratory evaluation of asphalt mixtures containing various percentage of reclaimed asphalt pavement. *Asian Journal of natural and applied science*, 1(2), 156-163.
- Kavussi, A., & Hashemian, L. (2012). Laboratory evaluation of moisture damage and rutting potential of WMA foam mixes. *International Journal of Pavement Engineering*, 13(5), 415-423.
- Khani Sanij, H., Afkhamy Meybodi, P., Amiri Hormozaky, M., Hosseini, S., & Olazar, M. (2019). Evaluation of performance and moisture sensitivity of glass-containing warm mix asphalt modified with zycothermTM as an anti-stripping additive. *Construction and Building Materials*, 197, 185-194.
- Li, M., Liu, L., Xing, C., Liu, L., & Wang, H. (2021). Influence of rejuvenator preheating temperature and recycled mixture's curing time on performance of hot recycled mixtures. *Construction and Building Materials*, 295(123616).
- Ma, X., Leng, Z., Wang, L., & Zhou, P. (2020). Effect of Reclaimed Asphalt Pavement Heating asphalt pavement containing Sasobit and Zycotherm additives. *Petroleum Science and Technology*, 35(9), 890-895.
- Babagoli, R., Norouzi, N., & 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*, 298(123899).
- Behbahani, H., Ayazi, M. J., & Moniri, A. (2017). Laboratory investigation of rutting performance of warm mix asphalt containing high content of reclaimed asphalt pavement. *Petroleum Science and Technology*, 35(15), 1556-1561.
- Capitão, S., Picado-Santos, L., & Martinho, F. (2012). Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 36, 1016-1024.
- Chamod, H., Xiangdao, H., & Jiayum, W. a. (2019). A comprehensive review on the utilization of reclaimed asphalt material with warm mix asphalt technology. *Construction and Building Materials*, 227(117096).
- Chaoyang, J. (2020). Recent Development in High-Content Reclaimed Asphalt Use. *ISCEG 2020*. Chengdu.
- Chen, J., Dan, H., & al, e. (2021). New innovations in pavement materials and engineering: A review on pavement engineering research 2021. *Journal of traffic and transportation engineering (English edition)*, 8(6), 815-999.
- Cheraghian, G., Cannone, F. A., You, Z., Chen, S., Kim, Y., & Westerhoff. (2020). Warm mix asphalt technology: An up to date review. *Journal of Cleaner Production*, 268(122128).
- Copeland, A. (2011). *Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice*. McLean, VA: FHWA-HRT-11-021.
- Costa, A., & Benta, A. (2016). Economic and environmental impact study of warm mix asphalt compared to hot mix asphalt. *Journal of Cleaner Production*, 112(4), 2308-2317.
- Croteau, J.-M., & Tessier, B. (2008). Warm Mix Asphalt Paving Technologies: a Road Builder's Perspective. *Annual Conference of the Transportation Association of Canada*. Toronto.
- Devulapalli, L., Kothandaraman, S., & Sarang, G. (2020). Effect of rejuvenating agents on stone matrix asphalt mixtures incorporating RAP. *Construction and Building Materials* 254, 254(119298).
- Diab, A., Sangiorgi, C., Ghabchi, R., Zaman, M., & Wahaballa, A. M. (2016). Warm Mix Asphalt (WMA) technologies: Benefits and drawbacks-a literature review. *Functional Pavement Design*. London.

- asphalt technology: Technical, economical and environmental aspects. *Ingeniería e Investigación*, 35(3), 5-18.
- Saboundjian, S., Liu, J., Li, P., & al., e. (2011). Late-season paving of a low-volume road with warm-mix asphalt. *Transportation Research Record*, 2205(1), 40-47.
- Sabouri M., C. Y. (2016). Effect of Rejuvenator on Performance Properties of WMA Mixtures with High RAP Content. *8th RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials*.
- Tao, M., & Mallick, R. (2009). Effects of warm-mix asphalt additives on workability and mechanical properties of reclaimed asphalt pavement material. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2126(1), 151-160.
- Wang, D., Yao, H., Yue, J., Hu, S., Liu, J., & Xu, M. a. (2021). Compaction Characteristics of Cold Recycled Mixtures with Asphalt Emulsion and Their Influencing Factors. *Frontiers in Materials*, 8(575802).
- Xiao, F., Li, R., Zhang, H., & Amirkhanian, S. (2017). Low Temperature Performance Characteristics of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Mortars with Virgin and Aged Soft Binders. *Applied Sciences*, 7(3): 304).
- Yu, X., Dong, F., Xu, B., & Ding, G. (2017). RAP Binder Influences on the Rheological Characteristics of Foamed Warm-Mix Recycled Asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(9): 04017145).
- Zhu, Y., Wang, X., Qiao, Y., & Shu, J. (2018). Thermal Cracking and Fatigue Analysis of Recycled Asphalt Mixture Using DCT Test and S-VECD Model. *Proceedings of GeoShanghai 2018 International Conference: Transportation Geotechnics and Pavement Engineering*. Shanghai.
- Temperature on the Compactability of Recycled Hot Mix Asphalt. *Materials*, 13 (16:3621).
- Mallick, R. B., & Bergendahl, J. (2009). A laboratory study on CO2 emission from asphalt binder and its reduction with the use of warm mix design. *International Journal of Sustainable Engineering*, 2(4), 275-283.
- Mogawera, W., Austermana, A., & Mohammad, L. a. (2013). Evaluation of high RAP-WMA asphalt rubber mixture. *Road Materials and Pavement Design*, 14(S2), 129-147.
- Moghadas Nejada, F., Azarhoosh, A., Hamed, G. H., & Roshani, H. (2014). Rutting performance prediction of warm mix asphalt containing reclaimed asphalt pavements. *Road Materials and Pavement Design*, 15(1), 207-219.
- Mohd Hasan, M. R., You, Z., Yin, H., You, L., & Zhang, R. (2019). Characterizations of foamed asphalt binders prepared using combinations of physical and chemical foaming agents. *Construction and Building Materials*, 204, 94-104.
- Oner, J., & Sengoz, B. (2015). Utilization of Recycled Asphalt Concrete with Warm Mix Asphalt and Cost-Benefit Analysis. *PLOS ONE*, 10(1).
- Politano, L. (2012). *Warm Mix Asphalt - A Greener Alternative to Hot Mix Asphalt -2012*. ontario: Ministry of Transportation of Ontario.
- Raab, C., Camargo, I., & Partl, M. N. (2017). Ageing and performance of warm mix asphalt pavements. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 4(4), 388-394.
- Randy C. West, P. P. (2015). *Best Practices for RAP And RAS Management*. Washington: National Asphalt Pavement Association.
- Razavi, S.-H., & Kavussi, A. (2020). The role of nanomaterials in reducing moisture damage of asphalt mixes. *Construction and Building Materials*, 239(117827).
- Rondón-Quintana, H., Hernández-Noguera, J., & Reyes-Lizcano, F. (2015). A review of warm mix

A Review of the Performance of Warm Mix Asphalts Containing Reclaimed 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: June 2024- Accepted: September 2024

ABSTRACT

The tendency to use reclaimed asphalt materials in warm mix asphalt technology has increased due to lower production cost, reduced environmental impact, improved performance and many other reasons. If reclaimed asphalt pavements (RAP) are used in warm mix asphalts (WMA), these two will act as complements to each other and an efficient method will be created to overcome the separate inherent limitations of warm mix asphalts and reclaimed asphalt pavements. The low production temperature reduces the secondary aging of the reclaimed asphalt mixtures during production, and the low viscosity of the warm mixture allows the use of a high percentage of reclaimed asphalt pavement without compromising the workability of the asphalt mixture. In this research, in addition to the comparative evaluation of various recycling technologies of recycled asphalt mixtures according to their manufacturing temperatures, the advantages, disadvantages, limitations and performance of warm mix asphalts containing reclaimed asphalt pavements in different moisture and cold conditions are investigated. The review of studies conducted on warm mixtures containing recycled asphalt pavements shows that laboratory and field studies should be focused on the fatigue performance at intermediate temperatures and cracking at low temperatures of these mixtures. Also, considering that the improvement of the rheological properties of these mixtures at medium and low temperatures using rejuvenators or other additives is effective on the properties of the mixture at high temperatures and their moisture susceptibility, and it requires simultaneous examination of the parameters is related to them, a brief picture of the future research horizons to solve the performance deficiencies of these mixtures is presented.

Keywords: Warm Mix Asphalt, Reclaimed Asphalt Pavement, Performance Properties, Bitumen Rejuvenation