



Research Note

Investigating the Effect of Different Additives on the Mechanical Properties of Cold Asphalt Produced with Emulsion Bitumen

Mohsen Amouzadeh Omrani¹, Hadi Azizi^{2*}

1. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Savadkooh Branch, savadkooh, Iran

2. PhD student, Department of Civil Engineering, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran

Received: 03 October 2022; Revised: 28 October 2022; Accepted: 28 October 2022; Published: 28 October 2022

Abstract

Some of the important benefits of cold asphalt include conservation of natural resources, cost and energy reduction. Meanwhile, warm asphalt mixtures have higher durability and resistance than cold mixtures, but the use of hot asphalt mixtures causes environmental pollution, the release of toxic and harmful gases, and also reduces the safety of workers. Therefore, today, the use of cold asphalt mixtures is increasing in order to protect the environment and also work risks, which is used with this type of asphalt along with emulsion bitumen. However, the use of cold asphalt produced in factories with emulsion bitumen leads to problems such as rutting, thermal cracks, reduction in strength, etc. Therefore, the need to use additives in order to improve the functional characteristics of this type of asphalt is felt. Considering the importance of the subject, in this research, a review of the studies conducted in the field of the effect of different additives on the functional characteristics of recycled cold asphalt produced with emulsion bitumen has been done. Finally, according to the results of the studies, it can be said that asphalt mixtures produced with emulsion bitumen have very low resistance to environmental factors and humidity, and therefore the use of additives is recommended. The results showed that the use of different additives improves the resistance of the asphalt mixture against moisture, which is more evident in the samples modified by combining polymer with cement and polymer with lime than other additives. Also, due to creating a three-dimensional network in the bitumen and actually reinforcing the bitumen, polymer materials can increase the asphalt resistance and Marshall endurance.

Keywords:

Cold asphalt, Emulsion bitumen, Additives, Mechanical properties.

Cite this article as: Azizi H, Amouzadeh Omrani M. (2022). Investigating the Effect of Different Additives on the Mechanical Properties of Cold Asphalt Produced with Emulsion Bitumen. *Civ Proj J*;4(5):31–46. <https://doi.org/10.22034/cpj.2022.364307.1161>

ISSN: 2676-511X / **Copyright:** © 2022 by the author.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

*Corresponding author E-mail address: hadi.azizi@yahoo.com



نشریه عمران و پروژه

<http://www.cpjournals.com/>

بررسی تاثیر افزودنی‌های مختلف بر مشخصات مکانیکی آسفالت سرد تولید شده با قیر امولسیون

محسن عموزاده عمرانی^۱، هادی عزیزی^{۲*}

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد سوادکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، سوادکوه، ایران

۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد آیت الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران

تاریخ دریافت: ۱۱ مهر ۱۴۰۱؛ تاریخ بازنگری: ۰۶ آبان ۱۴۰۱؛ تاریخ پذیرش: ۰۶ آبان ۱۴۰۱؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۶ آبان ۱۴۰۱

چکیده

فواید بسیار مهم آسفالت سرد شامل حفظ منابع طبیعی، کاهش هزینه و انرژی است. در این بین مخلوط‌های آسفالتی گرم دارای دوام و مقاومت بالاتری نسبت به مخلوط‌های سرد هستند ولی استفاده از مخلوط‌های آسفالتی گرم سبب آلودگی‌های زیست محیطی، انتشار گازهای سمی و مضر و همچنین کاهش ایمنی کارگران می‌گردد. بنابراین امروزه استفاده از مخلوط‌های آسفالت سرد به منظور حفظ محیط زیست و همچنین خطرات کار رو به افزایش است، که از این نوع آسفالت به همراه قیر امولسیون استفاده می‌گردد. با این وجود استفاده از آسفالت سرد تولید شده در کارخانه با قیر امولسیون مشکلاتی مانند شیارشدگی، ترک‌های حرارتی، کاهش مقاومت و ... را در پی دارد. بنابراین نیاز به استفاده از مواد افزودنی به منظور بهبود خصوصیات عملکردی این نوع آسفالت احساس می‌گردد. با توجه به اهمیت موضوع، در این تحقیق مروری بر مطالعات صورت گرفته در زمینه تاثیر افزودنی‌های مختلف بر مشخصات عملکردی آسفالت سرد باز یافتی تولید شده با قیر امولسیون انجام شده است. در نهایت با توجه به نتایج مطالعات صورت گرفته می‌توان گفت که مخلوط‌های آسفالتی تولید شده با قیر امولسیون نسبت به عوامل محیطی و رطوبت، مقاومت بسیار پایینی دارند و بنابراین استفاده از افزودنی‌ها توصیه می‌گردد. نتایج نشان داد که استفاده از افزودنی‌های مختلف سبب بهبود مقاومت مخلوط آسفالتی در مقابل رطوبت می‌گردد که این موضوع در مورد نمونه‌های اصلاح شده با ترکیب پلیمر با سیمان و پلیمر با آهک نسبت به سایر افزودنی‌ها نمود بیشتری از خود نشان داد. همچنین مواد پلیمری به علت ایجاد شبکه‌ای سه‌بعدی در قیر و در واقع مسلح کردن قیر می‌توانند موجب افزایش مقاومت آسفالت و استقامت مارشال شوند.

کلمات کلیدی:

آسفالت سرد، قیر امولسیون، مواد افزودنی، مشخصات مکانیکی

۱- مقدمه

یکی از شاخصه های رشد اقتصادی و توسعه یک کشور شبکه راه های آن کشور است. با توجه به رشد اقتصادی کشورها و افزایش نیاز به حمل و نقل، حجم و بارگذاری ترافیکی راهها افزوده شده و این موجب می شود که روند فرسایش و خرابی روسازی راهها سریعتر شود (Kim and Lee, 2012). به منظور تردد وسایل نقلیه، یکی از متداول ترین انواع روسازی، روسازی آسفالتی می باشد. آسفالت که معنی دقیق تر آن، بتن آسفالتی می باشد از اختلاط مصالح سنگی و قیر به عنوان ماده چسبنده ایجاد می شود. در این میان نوع قیر مصرفی در تولید مخلوط آسفالتی، جنس و دانه بندی مصالح سنگی استفاده شده در عملکرد و دوام مخلوط آسفالتی نیز نقش بسیار مهمی دارد (Strickland et al, 2008; Mehrara and Khodaii, 2013). آسفالت به دو بخش سازه ای و وظیفه ای تقسیم می گردد که نقش سازه ای هر لایه از روسازی که از لایه رویه آسفالتی، لایه اساس و لایه زیر اساس تشکیل شده است، توزیع تنش های ناشی از عبور وسایل نقلیه به لایه های زیرین به شکلی است که میزان تنش انتقالی به میزان کافی کاهش یابد و کمتر از حد تحمل لایه های زیرین گردد و در نتیجه گسیختگی در مصالح ایجاد نشود. نقش وظیفه ای سیستم روسازی، ایجاد یک سطح هموار به منظور تردد و تامین اصطکاک کافی به منظور حفظ ایمنی تردد وسایل نقلیه می باشد (Kavussi and Modarres, 2010a). روش ها و فناوری های نوین ساخت روسازی شامل آسفالت نیمه گرم، آسفالت سرد، آسفالت گرم، قیرهای امولسیون و استفاده از آنها در تولید مخلوط آسفالت و ... می باشد (Rogge et al, 1992).

به طور کلی امروزه به دلیل صرفه جویی در انرژی و زمان اجرا، احتمال حداقل شدن استفاده از منابع زمینی و کاهش اثرات مخرب زیست محیطی، استفاده از مصالح بدست آمده از بزرگراه های خراب شده برای بهسازی آنها بوسیله آسفالت سرد، گزینه ای است که بسیار مورد توجه قرار گرفته است (Kavussi and Modarres, 2010a; Taherkhani et al, 2016; Dołżycki and Jaskuła, 2019). مخلوط های آسفالت سرد کارخانه ای تولید شده با قیر امولسیونی، مخلوطی از مصالح سنگی گرم نشده و امولسیون قیری است که در کارخانه آسفالت تولید می شود. مخلوط های آسفالت سرد کارخانه ای تولید شده با قیر امولسیونی را می توان بلافاصله پس از تولید در سطح راه پخش یا آن را برای مدتی در کارگاه انبار نمود (Kavussi and Modarres, 2010a; Kavussi and Modarres, 2010b). به واسطه این ویژگی مخلوط آسفالتی سرد کارخانه ای را می توان در مسافت های طولانی حمل و پخش نمود. این مخلوط ها ممکن است برای اساس قیری، آستر، رویه، تراز نمودن، تعریض و لایه های روکش استفاده شوند و خصوصاً برای ارتقای درجه و تقویت روسازی های با ضخامت کم به کار می روند (Brown and Needham, 2000; Thomas et al, 2000; Thanaya, 2007).

به طور کلی هزینه سنگین احداث راههای جدید و خسارتهای ناشی از خرابی راههای موجود و نقایص متعدد روشهای متداول، نیاز به ارائه روشهای نوین بهسازی را نمایان می سازد. همانطور که گفته شد یکی از روشهای آسفالت به روش سرد با قیر امولسیونی است. در این روش تولیدات حاصل از تخریب لایه های قیری روسازی قدیمی یک راه به صورت ذرات آسیاب شده (خرده آسفالت) که معمولاً RAP گفته می شود، برای ساختن اساس یا آستر آسفالتی بوسیله روشهای تثبیت با قیر امولسیون و سیمان و سایر افزودنی ها استفاده می شود که این روش در سال های اخیر در کشورهای اروپایی که آب و هوای معتدل دارند مثل ایتالیا و اسپانیا کاربرد زیادی پیدا کرده است (Kavussi and Modarres, 2010a; Kavussi and Modarres, 2010b). این حال هنوز روش های طرح اختلاط و جنبه های زیادی از طراحی مخلوط آسفالت سرد کاملاً تعریف نشده است (Dołżycki and Jaskuła, 2019). بنابراین در این مطالعه تاثیر افزودنی های مختلف بر مشخصات عملکردی آسفالت سرد کارخانه ای تولید شده با قیر امولسیون مورد بررسی قرار خواهد گرفت. به همین منظور در ابتدا مخلوط آسفالت سرد کارخانه ای تولید شده با قیر امولسیون معرفی خواهد شد و در ادامه مطالعات مختلف انجام شده بر روی تاثیر مواد افزودنی مختلف بر روی این نوع آسفالت ارزیابی خواهد شد.

۲- آسفالت سرد کارخانه‌ای تولید شده با قیر امولسیون

به‌طور کلی آسفالت سرد از تاریخچه اجرایی طولانی‌ای برخوردار نمی‌باشد و میزان مقبولیت و به‌کارگیری این روش نسبت به سایر روشهای روسازیهای آسفالتی کمتر می‌باشد (Kavussi and Modarres, 2010a; Kavussi and Modarres, 2010b). این روش زمانی مطرح می‌شود که حجم مصالح مورد نیاز جهت اجرای پروژه بسیار زیاد باشد و یا در تهیه مخلوط سرد نیاز به کنترل دقیق موارد اجرایی باشند. در روش سرد کارخانه‌های آسفالت، مصالح RAP با قیرهای امولسیونی و یا کف قیر و یک ماده احیاکننده جوانسازی و یا در صورت نیاز درصدی از مصالح سنگی جدید ترکیب شده و در یک کارخانه آسفالت مرکزی و یا یک کارخانه آسفالت قابل حمل جهت تولید مخلوطهای آسفالت سرد، مخلوط می‌گردد (Brown and Needham, 2000; Thomas et al, 2000; Thanaya, 2007). مصالح سرد خردده آسفالتی مورد نیاز برای این کار از شخم زدن و خرد کردن سطح روسازی به وسیله ماشین آلات مناسب و با آسفالت تراشی سطح راه به کمک دستگاههای آسفالت تراش بدست می‌آید سپس مصالح خردده آسفالتی بارگیری شده و به کارخانه مرکزی حمل می‌شود (Kavussi and Modarres, 2010a; Kavussi and Modarres, 2010b). یک کارخانه مناسب جهت چنین عملیاتی باید مجهز به دستگاهها و ادوات مختلفی باشد از جمله این دستگاه ها می‌توان به تسمه نقاله های سنگ شکن، سیلوی تغذیه RAP، سیستمهای مکانیزه و دقیق به منظور افزودن آب و سایر مواد افزودنی، سرندهای مختلف، سیلوهای ذخیره، وسایل مناسب جهت بارگیری کامیونها و سایر دستگاههای مورد نیاز اشاره نمود.

۲-۱- قیر امولسیونی

قیرابه یا امولسیون قیر به‌طور ساده ملکول های کوچک قیر است که به کمک یک عامل امولسیون ساز (مثل صابون) در آب معلق است. عامل امولسیون ساز به وسیله القا کردن یک بار الکتریکی در سطح ملکول های قیر به طوری که آنها منعقد نشوند به ساخت امولسیون کمک می‌کند. امولسیون ها از این رو که به‌طور مؤثری ویسکوزیته را در دماهای پایین کم می‌کنند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. امولسیون ها معمولاً یا آنیونیک اند (قطرات قیر دارای بار منفی هستند) یا کاتیونیک اند (قطرات قیر دارای بار مثبت هستند). عموماً امولسیونها وقتی تازه ریخته شده اند به شکل یک مایع قهوه‌ای رنگ با ضخامت زیاد دیده می‌شود هنگامی که قیر شروع به چسبیدن به مواد اطراف (مصالح سنگی، لایه موجود، لایه اساس می‌کند رنگ از قهوه‌ای به مشکی تغییر می‌کند در این حالت گفته می‌شود امولسیون شکسته شده است هنگامی که آب تبخیر میشود امولسیون بیشتر رفتاری شبیه به قیر خاص نشان می‌دهد (Brown and Needham, 2000). وقتی تمام آب تبخیر شد می‌گویند امولسیون جا افتاده است مدت زمان لازم برای شکستن و جا افتادن امولسیون بستگی به نوع امولسیون، سرعت ریختن، دمای سطحی که امولسیون روی آن ریخته می‌شود و شرایط جوی دارد تحت اکثر شرایط یک امولسیون حدود ۱ تا ۲ ساعت طول می‌کشد تا جا افتد. شکلهای ۱ تا ۳ نشان دهنده وضعیت یک تک کت امولسیونی در مراحل قبل از شکست، در حال شکست و پس از شکسته شدن می‌باشند. شکل ۱ تک کت امولسیونی تازه اعمال شده را نشان می‌دهد. رنگ قهوه‌ای در این شکل نشان می‌دهد که تک کت امولسیونی هنوز شکسته نشده است. شکل ۲ همان تک کت امولسیونی را بعد از ۲۳ دقیقه نشان می‌دهد که در این شکل رنگ قهوه‌ای به شکل لکه لکه دیده می‌شود که حاکی از آغاز شدن فرایند شکستن می‌باشد. شکل ۳ تک کت با استفاده از امولسیون را نشان می‌دهد که رنگ مشکلی حاکی از شکسته شدن امولسیون می‌باشد.



شکل ۱- یک تک کت امولسیون در مراحل قبل از شکست



شکل ۲- یک تک کت امولسیون در حال شکست



شکل ۳- یک تک کت امولسیون در مراحل بعد از شکست

۲-۲- مزایای آسفالت سرد کارخانه‌ای تولید شده با قیر امولسیون

الف- مقرون به صرفه بودن

میزان تولید بالای این مخلوط‌ها با تجهیزات سیار و سرمایه گذاری کم استفاده از آن را به ویژه برای پروژه های مناطق دور افتاده مقرون به صرفه می نماید.

ب- غیر آلاینده بودن

به استثنای گرد و غبار مصالح سنگی، هیچ آلودگی دیگری در مراحل تولید حمل و پخش مخلوط آسفالت سرد کارخانه ای وجود ندارد.

ج- ایمنی

در نواحی با خطر آتش سوزی زیاد مثل جنگل ها و مراتع، خطر آتش سوزی به علت خشک نکردن مصالح سنگی و دمای کم مخلوط یا قیر مورد استفاده کاهش می یابد.

۲-۳- انواع مخلوط های آسفالت سرد کارخانه ای

در تهیه مخلوط های آسفالت سرد کارخانه ای می توان از کارخانه های تولید آسفالت به روش مرحله ای یا پیوسته استفاده نمود. ملزومات کارخانه آسفالت سرد به کیفیت و نوع مخلوط آسفالت که قرار است تولید شود بستگی دارد. معمولاً کارخانه آسفالت سرد شامل مخلوط کن، مخزن ذخیره، وسیله اندازه گیری، لوله های ارتباطی و تجهیزات پاشش قیر امولسیون، لوله های تغذیه آب، کنترل هایی برای تنظیم و ثبت اجزای مختلف، دستگاه تنظیم و توزین مصالح سنگی مختلف، سیستم تسمه نقاله، مخازن مصالح سنگی، سرندهای لرزنده و مخازن ذخیره مخلوط آسفالت می باشد. برای تولید مخلوط های آسفالت سرد با کیفیت بالا، لازم است کلیه مراحل تولید آسفالت به دقت کنترل گردد. مخلوط های آسفالت سرد کارخانه ای از نظر دانه بندی باز بوده و در لایه های اساس قیری و رویه مورد استفاده قرار می گیرند. تولید این مخلوط ها به تجهیزات پیچیده ای نیاز ندارد و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است. دوام و عملکرد مخلوط های آسفالت با دانه بندی باز با انواع دیگر مخلوط های آسفالت برابری می کند (Kavussi and Modarres, 2010a; Kavussi and Modarres, 2010b). انعطاف پذیری و درصد فضای خالی زیاد این نوع مخلوط ها باعث افزایش مقاومت آن ها در برابر ترک های ناشی از خستگی و ترک های انعکاسی می گردد. به علت نفوذپذیری زیاد مخلوط های آسفالتی سرد با دانه بندی باز، هنگامی که به عنوان لایه های رویه استفاده می شوند باعث خارج شدن سریع آب های سطحی از سطح راه شده لذا مشکلات مربوط به پدیده ایستایی آب کاهش می یابد. هنگامی که مخلوط های آسفالت سرد با دانه بندی باز به عنوان لایه اساس قیری مورد استفاده قرار می گیرند و همچنین مصالح بستر روسازی در مقابل آب حساس باشند، به منظور جلوگیری از نفوذ آب و ضعیف شدن مصالح بستر روسازی باید عایق رطوبتی در زیر یا در حدود لایه اساس قیری با دانه بندی باز اجرا شود. دانه بندی مصالح سنگی مخلوط های آسفالت سرد کارخانه ای با دانه بندی باز در جداول و مشخصات فنی ارائه شده است (Kavussi and Modarres, 2010a; Kavussi and Modarres, 2010b). به طور معمول قیرهای امولسیونی از نوع CMS-2 یا CMS-2h در تهیه مخلوط های آسفالت سرد کارخانه ای با دانه بندی باز مورد استفاده قرار می گیرند. در شکل ۴ آسفالت سرد مخلوط در محل با قیر امولسیونی نشان داده شده است.



شکل ۴- آسفالت سرد مخلوط در محل با قیر امولسیونی

۲-۴- مخلوط های آسفالتی سرد کارخانه ای با ماسه

همان اصول اساسی که برای تولید مخلوط های آسفالت سرد کارخانه ای با دانه بندی پیوسته و مصالح سنگی درشت دانه ذکر گردید به استثنای دانه بندی مصالح سنگی، برای مخلوط های سرد کارخانه ای با ماسه نیز به کار می رود. مخلوط آسفالتی سرد کارخانه ای با ماسه را می توان برای قشرهای آستر و رویه استفاده نمود (Thomas et al, 2000; Yan et al, 2010 a; Yan et al, 2010b; Thanaya, 2007). افزودن یک تا دو درصد سیمان پرتلند به مخلوط به حصول مقاومت اولیه آن کمک خواهد کرد. در حین اختلاط، پخش یکنواخت سیمان در تمامی مخلوط مهم است. حداقل ارزش ماسه ای مصالح سنگی برای مخلوط های سرد کارخانه ای با ماسه برابر با ۳۵ و از نقطه نظر خصوصیات خمیری (دامنه خمیری) باید غیر خمیری باشند. برای اینگونه مخلوط ها، امولسیون های قیری CSS-1h و CSS-1 مورد استفاده قرار می گیرند. علاوه بر قیر امولسیونی، مقداری آب برای مخلوط کردن که در آزمایشگاه تعیین می گردد به ماسه افزوده می شود. میزان قیر امولسیونی معمولاً در محدوده ۶ تا ۱۵ درصد وزن مخلوط تغییر می کند.

۲-۵- آسفالت سرد مخلوط در محل با قیر امولسیونی

آسفالت مخلوط در محل از اختلاط مصالح سنگی با قیر مایع (قیر محلول یا قیر امولسیونی) در سطح آماده شده راه بدون گرم کردن مصالح سنگی ساخته می شود. از مزایای این نوع مخلوط استفاده از مصالح سنگی که در کنار راه، ریشه یا در نزدیکی های آن انبار شده می باشد. آسفالت سرد مخلوط در محل را می توان به عنوان قشر رویه یا لایه های اساس و زیر اساس در ساختمان راه به کار برد. از این نوع مخلوط فقط می توان در راه های با حجم آمد و شد کم یا متوسط به عنوان رویه استفاده نمود. لیکن آسفالت سرد مخلوط در محل به عنوان لایه های اساس و زیر اساس قابل استفاده برای راه های با هر نوع آمد و شد می باشد. مصالح سنگی آسفالت سرد مخلوط در محل باید از سنگ یا شن شکسته یا شن و ماسه رودخانه ای و یا مخلوطی از آن دو تهیه شده باشد. این مصالح بایستی سخت، مقاوم و تمیز باشند. مصالح سنگی آسفالت مخلوط در محل ممکن است دارای دانه بندی باز یا پیوسته باشند. گاهی اوقات در اجرای آسفالت مخلوط در محل از مصالح سنگی در لایه رویه شنی راه موجود اعم از شکسته یا نشکسته استفاده می شود. مصالح سنگی مصرفی آسفالت سرد مخلوط در محل باید با مشخصات فنی مشخص شده مطابقت داشته باشد. حدود مشخصات مورد نیاز با توجه به نوع پروژه در دفترچه مشخصات فنی خصوصی قید می گردد. سازگاری مصالح سنگی با امولسیون قیری باید بررسی شود. نوع کانی های مصالح سنگی نقش مهمی در عملکرد این مخلوط ها دارد. به منظور تعیین نوع قیر امولسیونی که باید مورد استفاده قرار گیرد، ساخت مخلوط های آزمایشی با مصالح سنگی مصرفی در پروژه در آزمایشگاه ضروری است (Ameri and Behnood, 2012). قیرهای امولسیونی مصرفی در آسفالت های سرد مخلوط در محل به خصوصیات مصالح سنگی، شرایط جوی، نوع روسازی و نوع ماشین آلات مورد استفاده بستگی دارد. معمولاً قیرهای امولسیونی CMS-2h و CMS-2 برای آسفالت های سرد مخلوط در محل با مصالح سنگی با دانه بندی باز و قیرهای امولسیونی CSS-1h و CSS-1 برای آسفالت های سرد مخلوط در محل با مصالح سنگی با دانه بندی پیوسته استفاده می شوند. درجه حرارت پخش قیرهای امولسیونی در ساخت آسفالت های سرد مخلوط در محل در محدوده ۲۰ تا ۷۰ درجه سانتیگراد می باشد.

۲-۶- ساخت آسفالت های سرد مخلوط در محل

قبل از اجرای آسفالت سرد مخلوط در محل باید سطح راه از هر گونه مواد خارجی و دانه های لقی و کنده شده پاک و ناهمواری های آن برطرف شود. سپس سطح راه به مقدار لازم متراکم میگردد. اگر آسفالت سرد مخلوط در محل بر روی رویه شنی انجام گیرد، باید سطح راه اندود نفوذی و چنانچه آسفالت سرد مخلوط در محل روی رویه آسفالتی اجرا شود باید قبل از پخش آسفالت

سرد مخلوط در محل سطح راه، اندود سطحی شود. مصالح سنگی آسفالت سرد مخلوط در محل معمولاً مصالح موجود در سطح راه یا مصالحی است که به محل مصرف حمل و به مقدار لازم در سطح آماده شده راه، ریسه یا کپه می شود. ابعاد ریسه یا فاصله کپه های مصالح سنگی باید به گونه ای باشد که بتوان مقدار قیر امولسیونی که روی آن پخش می گردد را تعیین نمود. همچنین بتوان ضخامت مورد نیاز را در طول راه پس از اختلاط با قیر امولسیون و پخش آسفالت سرد مخلوط در محل بدست آورد. قیر امولسیون مورد نیاز با دستگاه قیر پاش روی مصالح سنگی پاشیده می شود. برای تعیین مقدار قیر امولسیون ابتدا باید حجم مصالح سنگی کپه شده یا ریسه شده در هر متر طول راه تعیین گردد. سپس با توجه به حجم مصالح سنگی ریسه شده، درصد امولسیون قیری برای هر متر طول راه و سرعت حرکت ماشین قیرپاش مشخص و تنظیم شود. اجرای آسفالت سرد مخلوط در محل نباید به هیچ وجه در هوای سرد انجام شود. زمان مناسب برای اجرای این مخلوط ها، موقعی از سال است که هوای محلی که آسفالت سرد مخلوط در آن اجرا می شود گرم و خشک بوده و حداقل به مدت چند هفته پس از اجرا نیز گرم و خشک باقی بماند.

۲-۷- آسفالت ماکادام نفوذی با قیر امولسیون

آسفالت ماکادام نفوذی به نوعی از روسازی راه اطلاق می شود که از مصالح سنگی شکسته درشت دانه با دانه بندی باز تشکیل شده و به وسیله غلتک کوبیده و درهم قفل و بست گردیده، سپس فضای خالی بین آنها ابتدا با قیر تحت فشار و بعد با مصالح سنگی ریزدانه پر شده باشد. اینگونه آسفالت ها معمولاً در مناطقی به کار می روند که مصالح سنگی رودخانه ای با دانه بندی پیوسته یافت نشود. آسفالت ماکادام نفوذی با قیر امولسیون را می توان با مصالح سنگی مرطوب یا خشک اجرا نمود. آسفالت ماکادام نفوذی به عنوان لایه اساس یا رویه بکار می رود. آسیب پذیری لایه آسفالت ماکادام نفوذی در اثر آمد و شد وسایط نقلیه و عوامل جوی به علت نفوذپذیری زیاد، ایجاب می نماید سطح حاصله با نوعی رویه پوشش گردد. نوع پوشش متناسب با حجم آمد و شد بوده و برای راه های با حجم آمد و شد کم تا متوسط، آسفالت سطحی و برای راه های با حجم آمد و شد سنگین تا خیلی سنگین بتن آسفالتی گرم خواهد بود.

۳- تاثیر مواد افزودنی در بهبود مشخصات عملکردی آسفالت سرد کارخانه ای تولید شده با قیر

امولسیون

۳-۱- قیر امولسیون

تحقیقات انجام شده نشان داده اند که نوع افزودنی عامل اصلی در بهبود خصوصیات عملکردی مخلوط آسفالت تولید شده در کارخانه با قیر امولسیون است (Behnood et al. 2015; Taherkhani et al, 2016; Dolzcki and Jaskula, 2019). همچنین در زمینه استفاده از افزودنی های مختلف و تاثیر آن بر روی مشخصات عملکردی آسفالت سرد کارخانه ای تولید شده با قیر امولسیون مطالعاتی به ویژه با استفاده از افزودنی هایی همچون سیمان (Issa et al. 2001; Oruc et al, 2007; Kavussi and Modarres, 2010a; Kavussi and Modarres, 2010b; Rutherford et al, 2014; Dolzcki and Jaskula, 2019)، آهک (Tarefder et al, 2006; Cross et al, 2008; Niazi and Jalili, 2009)، خاکستر بادی (Cross and Hicks, 2013)، بخار سیلیس (Chavez-Valencia et al, 2007)، خاکستر پوسته برنج (Young, 1997; Al-Hdabi et al, 2013)، و الیاف پلی پرولین (Taherkhani et al, 2016)، پلیمر (Gorkem and Sengoz, 2009)، گوگرد پلیمری (Yildirim et al, 2002) و یا ترکیب هر کدام از آنها انجام شده است (Niazi et al, 2007; Gorkem & Sengoz, 2009). جلیلی قاضی زاده، ۱۳۸۷؛ حقیقی مراد و همکاران، ۱۳۹۶؛ Issa et al. 2001؛ Cross, 2008; Niazi and Jalili, 2009). برخی از مطالعات نیز به بررسی عملکرد آسفالت امولسیون شده اصلاح شده با مواد افزودنی سیمان و پلیمر برای بهبود خواص دوام، مقاومت در برابر ترک

خوردگی و حساسیت به رطوبت آسیب دیده انجام شده است. (Issa et al., 2001; O'Leary and Williams, 1992; Niazi and Jalili, 2009; Behnood et al., 2015; Kavussi and Modarres, 2010a and 2010b).

۳-۲- سیمان

یکی از رایج‌ترین مواد افزودنی سیمان پرتلند می‌باشد (Issa et al. 2001; Oruc et al, 2007; Kavussi and Modarres, 2010a; Kavussi and Modarres, 2010b; Rutherford et al, 2014; Dolzcki and Jaskula, 2019). اهداف اصلی استفاده از سیمان در مخلوط‌های آسفالتی حاوی آسفالت امولسیون شده، بهبود مقاومت در برابر تغییر شکل‌های اولیه، کاهش زمان پخت و افزایش زمان گیرش مخلوط بوده است. با این حال، استفاده از سیمان ممکن است بر سایر خصوصیات مخلوط‌ها همچون پایداری، مقاومت کششی غیرمستقیم، مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی، مقاومت در برابر خستگی و ترک خوردگی حرارتی، آسیب رطوبت و غیره تأثیر بگذارد. افزودن سیمان به مخلوط باعث کاهش انعطاف پذیری و افزایش ترک خوردگی می‌گردد (Asphalt Institute, 1986). Issa و همکاران در سال ۲۰۰۱ اثرات استفاده از مقادیر مختلف سیمان را بر برخی از ویژگی‌های مخلوط‌های آسفالت سرد حاوی محتوای مختلف آسفالت امولسیون شده و در شرایط خشک و اشباع پخته شده بررسی نمود. آنها دریافتند که با افزایش محتوای سیمان، پایداری مخلوط‌های اندازه گیری شده افزایش می‌یابد. آنها همچنین دریافتند که تأثیر سیمان بر پایداری در مخلوط‌های پخته شده در شرایط اشباع بارزتر است. همچنین مشخص شد که با افزایش افزودنی سیمان، آسیب رطوبت کاهش می‌یابد (Issa et al, 2001). آنها مقاومت کششی غیر مستقیم و سطح کرنش را در هنگام خرابی اندازه گیری کردند و دریافتند که با افزایش محتوای سیمان مقاومت کششی غیر مستقیم افزایش می‌یابد و کرنش در هنگام خرابی کاهش می‌یابد. همچنین نتایج مطالعات دیگری در زمینه افزودن سیمان به مخلوط آسفالت سرد با قیر امولسیون نشان داد که چگالی و پایداری مارشال در مخلوط‌های آسفالت سرد افزایش می‌یابد و با افزایش محتوای سیمان، محتوای فضای خالی هوا و جریان آن کاهش می‌یابد. همچنین نتایج این مطالعه نشان داد که مدول انعطاف پذیر مخلوط با افزایش محتوای سیمان افزایش می‌یابد (Niazi and Jalili, 2009). نتایج این مطالعات در تأیید مطالعات قبلی، نشان داد که آسیب رطوبت مخلوط‌های آسفالت سرد با افزودن سیمان کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی با افزایش محتوای سیمان افزایش می‌یابد (Issa et al, 2001). همچنین نتایج مطالعه دیگری با استفاده از دوربین دیجیتال نشان داد که افزودن سیمان به مخلوط آسفالت باز یافتی سرد مقاومت در برابر ترک خوردگی خستگی را افزایش می‌دهد (Gao et al. 2016; Gao et al. 2015). برخی مطالعات نیز از آزمون‌های خستگی کششی غیرمستقیم، رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالت سرد در طیف وسیعی از دما و مقدار سیمان بررسی شد. نتایج این مطالعات نشان دادند که با افزایش مقدار سیمان و کاهش دما، میزان تغییر در طول عمر خستگی با فشار کششی کاهش می‌یابد (Kavussi and Modarres 2010a, 2010b). از طرف دیگر با افزایش مقدار سیمان و مدول انعطاف پذیر، شیب خط خستگی کاهش می‌یابد که نشان دهنده تغییر ویژگی‌های مخلوط از یک مخلوط آسفالت معمولی به ماده تیمار شده با سیمان می‌باشد (Modarres et al. 2011, Yan et al. 2010). همچنین مطالعات در زمینه مقایسه مقاومت در برابر کشش، مدول سختی و خستگی مخلوط‌های آسفالت باز یافتی که با سیمان و آسفالت امولسیون شده و کف شده نشان دادند که سختی آسفالت با افزایش دما و سطح تنش کاهش می‌یابد و مخلوط‌های دارای آسفالت امولسیون عمر خستگی بیشتری را در سطح تنش بالا نسبت به آنهايي که دارای آسفالت کف هستند، دارند (Modarres et al. 2011, Yan et al. 2010; inhai et al. 2010; Lesuerer et al. 2008). مطالعه‌ای جامع نیز در سال ۲۰۱۹ به بررسی و ارزیابی آسفالت سرد تولید شده با امولسیون قیر و سیمان برای بازسازی روسازی‌های قدیمی در لهستان انجام شد. نتایج این بررسی نشان داد در دهه ۱۹۹۰ جاده‌های زیادی در لهستان به دلیل تخریب قابل توجه آنها نیاز به تقویت فوری داشتند. اجرای فناوری آسفالت سرد یکی از راه حل‌های این مشکل بود. لذا اولین نیازهای لهستانی در دهه ۱۹۹۰ توسعه یافت. پس از چندین سال استفاده از این الزامات، شکافهای عرضی متعددی در پیاده‌روها ظاهر شد. بررسی‌های میدانی نشان

داد که فراوانی ترک خوردگی عرضی در همه بخشهای ارزیابی شده یکنواخت نبود و سرعت رشد تعداد ترک ها در حال کاهش بود که دلیل اصلی ترک خوردگی زیاد، مصرف بیش از حد زیاد سیمان پرتلند و مقدار ناکافی امولسیون قیری بود. این امر منجر به تولید مخلوط های بسیار سفت، با تسلط پیوندهای هیدرولیکی شد که رفتاری مشابه مخلوط های تیمار شده با سیمان داشتند. این تجربه انگیزه اداره راه لهستان برای ایجاد نیازهای جدید بود. روشهای آزمون جدید و همچنین الزامات مربوط به مقاومت در برابر سرما و آب در سال ۲۰۱۳ معرفی شدند. اجرای الزامات جدید منجر به کاهش قابل توجهی در سختی مخلوط های MCE و تغییر مقادیر مدول سختی حتی سه برابر کمتر بود (Dolzcki and Jaskula, 2019).

Modarres و Amouzadeh Omrani در سال ۲۰۱۸ به بررسی خصوصیات مکانیکی و زیست محیطی مخلوط های بازیافتی سرد امولسیونی با ۱۰۰٪ مصالح خرده آسفالتی (RAP) حاوی گرد کوره سیمان و خاکستر پسماند زغال سنگ پرداختند. این مطالعه نتایج مکانیکی و پیامدهای زیست محیطی استفاده از گرد کوره سیمان (CKD) را که محصول جانبی کارخانه تولید سیمان است و خاکستر پسماند ذغال سنگ (CWA) را که با احتراق پسماند زغال سنگ بدست می آید، در مخلوط بازیافتی سرد امولسیونی (ECRM) به عنوان مواد افزودنی بررسی نمودند. در این مطالعه تاثیرات مخلوط بدون افزودنی و مخلوط با میزان ۱ و ۲ سیمان مقایسه شد. برای ارزیابی خصوصیات مکانیکی، آزمایشات پایداری مارشال، مقاومت کششی غیرمستقیم و حساسیت به رطوبت روی نمونه های سنین مختلف در دماهای مختلف انجام شد. اثرات زیست محیطی با استفاده از روش تراوش مواد آلاینده اصلاح شده (MTCLP) ارزیابی شد. سرانجام یک تحلیل اقتصادی - زیست محیطی در روسازی های طراحی شده با هر نوع ECRM انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده ترکیبی از CKD و CWA باعث بهبود خواص مکانیکی به ویژه پس از دوره های طولانی مدت عمل آوری می شود. در برخی موارد، این بهبود حتی بیشتر از بهبود حاصل از افزودن سیمان بود. نتایج آزمون MTCLP نیز نشان داد که حتی پس از پنج بار استخراج، غلظت فلزات سنگین در شیرابه مخلوط های حاوی CKD و CWA زیر سطح استاندارد باقی مانده است. به طور کلی، مشخص شد که استفاده از CKD و CWA به عنوان مواد افزودنی در ECRM دارای مزایای اقتصادی و زیست محیطی قابل توجهی است، به ویژه اگر آنها با هم به کار گرفته شوند (Amouzadeh Omrani and Modarres, 2018).

Modarres و Amouzadeh Omrani در سال ۲۰۱۹ به بررسی سفتی و رفتار خستگی مخلوط بازیافتی سرد امولسیونی حاوی پودر پسماندها و مقایسه آنها با افزودنی سیمان به عنوان افزودنی متداول پرداختند. هدف از انجام این مطالعه معرفی یک افزودنی جدید در ECRM برای دستیابی به مخلوطی با خواص مکانیکی رضایت بخش (ترکیبی از گرد کوره سیمان (CKD)، و خاکستر پسماند ذغال سنگ (CWA)) بود. بنابراین مقاومت کششی غیرمستقیم، مدول برجهندگی و خستگی با روش کشش غیرمستقیم (ITF) این مخلوطها در دماهای مختلف و دوره های عمل آوری مورد مطالعه قرار گرفتند. همچنین این مخلوط ها با یک مخلوط بدون افزودنی و یک مخلوط حاوی سیمان به عنوان یک افزودنی متداول ECRM مقایسه شدند. رابطه بین رفتار مکانیکی و ریزساختاری ECRM ها از طریق میکروسکوپ الکترونی روبشی انتشار میدانی (FESEM) و پراش اشعه (XRD) بررسی شد. نتایج نشان داد که مخلوط حاوی ماده افزودنی جدید دارای ساختار متراکم و سفت و رفتار ITF بهتری در سطوح تنش کمتر نسبت به مخلوط بدون افزودنی به دلیل واکنش موثر بین CKD و CWA در حضور آب و تشکیل سیلیکات کلسیم است. با توجه به نتایج تجربی، ECRM می تواند برای استفاده در لایه اساس روسازی های جاده توصیه شود (Amouzadeh Omrani and Modarres, 2019).

۳-۳- آهک و الیاف پلی پروپیلن

همچنین موارد رایج دیگری که به منظور بررسی خصوصیات عملکردی آسفالت سرد تولید شده در کارخانه با استفاده از قیر امولسیونی استفاده شده است، شامل استفاده از آهک و الیاف پلی پروپیلن و مقایسه تاثیر آنها با یکدیگر و با سیمان بوده است.

به همین منظور آزمایشات مختلفی همچون آزمایشات مارشال، مدول برجهندگی، خستگی، دوام و تغییر شکل دائم بر روی نمونه های ساخته شده با سیمان پرتلند (بصورت پودر) و آهک (به دو صورت دوغاب آهک و پودر آهک شکفته)، الیاف پلی پروپیلن و نمونه های بدون افزودنی انجام گردیده است که نتایج این مطالعات نشان داده است که افزودن سیمان، آهک و الیاف پلی پروپیلن به آسفالت سرد کارخانه ای تولید شده با قیر امولسیون موجب افزایش استقامت مارشال، مدول برجهندگی، مقاومت کششی و همچنین افزایش مقاومت در برابر رطوبت، تغییر شکل های دائمی، عمر خستگی و سفتی دینامیکی می گردد (Niazi and Jalili Ghazizadeh, 2008; Taherkhani et al, 2016; Haghigi Murad et al, 2016). همچنین نتایج این مطالعات نشان داده است که افزودن سیمان پرتلند و دوغاب آهک در قیاس با آهک شکفته نتایج بهتری را در بردارد و در تعدادی از این مطالعات پیشنهاد شده است که از سیمان پرتلند به جای دوغاب آهک برای بهبود خصوصیات آسفالت سرد تولید شده با قیر امولسیون استفاده گردد که دلایل آن را وجود مشکلات تهیه دوغاب آهک نسبت به سیمان پرتلند ذکر نمودند (Niazi and Jalili Ghazizadeh, 2008). نتایج مطالعات انجام شده به منظور بررسی نتایج مدل های خستگی ارائه شده توسط محققین و موسسات مختلف برای مخلوط های آسفالتی متداول نشان می دهد که ارتباط بین مدول سختی و عمر خستگی همواره معکوس است. دلیل اصلی استفاده از سیمان در مخلوط های آسفالتی حاوی قیر امولسیون در واقع بهبود خصوصیات تغییر شکلی اولیه و کاهش زمان عمل آوری و افزایش گیرش مخلوط می باشد. این مطالعات بیان کردند که تاثیر سیمان بر سایر خصوصیات رفتاری و عملکردی مخلوط های آسفالتی بسیار حایز اهمیت می باشد (Tarefder et al, 2006; Abbasnejad Mousavi Bora and Modares, 2017).

همچنین جواهری و همکاران در سال ۱۳۹۶ به بررسی اثر سیمان و لاتکس بر آسفالت سرد امولسیون و تجربه اجرای آن در ایران پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که امکان تولید آسفالت سرد امولسیونی با مقاومت بسیار مناسب وجود داشته و همچنین استفاده از سیمان و لاتکس باعث بهبود مشخصات آسفالت سرد امولسیونی و افزایش مقاومت و طول عمر روسازی های استفاده از این نوع آسفالت می شود. همچنین در این تحقیق تجربه اجرای این آسفالت در محور سیرجان مورد بررسی قرار گرفت (Javaheri et al, 2016).

مطالعات پیشین نشان داده است که یکی از ضعف های مخلوط آسفالت سرد تولید شده، عملکرد خستگی آن است (O'Leary and Williams, 1992) که در گذشته مطالعات محدودی در مورد رفتار خستگی این نوع آسفالت انجام شده است. در برخی تحقیقات رفتار خستگی آسفالت سرد با کف یا قیر امولسیون از طریق آزمون خستگی کششی غیر مستقیم مقایسه شدند (Yan et al. 2010). همچنین در تحقیقات دیگری تلاش شده است تا تاثیر افزودنی سیمان بر رفتار خستگی آسفالت سرد به دست آید. به همین منظور محققان در تلاش کرده اند تا با اصلاح قیر امولسیون شده یا افزودن مواد افزودنی مانند سیمان، آهک سریع، ضایعات ذغال سنگ (خاکستر)، بخار سیلیس یا خاکستر بادی در مخلوط ها ضعف سرما را در محل مخلوط های آسفالتی جبران کنند (O'Leary and Williams, 1992; Oruc et al., 2007; Thanaya, 2007; Rotherforda et al. 2014; Chavez-Valencia, 2007, Ameri and Behnood, 2011; Cross and Young, 1997; Niazi and Jalili, 2009; Al-Hdabi et al. 2016, Gao et al. 2016, Behnood et al. 2015, Kim and Lee, 2012, al., 2013; Modarres and Ayar, 2014). نکته حائز اهمیت این است که در زمان انتخاب نوع افزودنی مناسب بایستی عواملی همچون هزینه، عملکرد و شرایط آب و هوایی را مد نظر قرار داد (Modarres and Ayar, 2014).

در مطالعه دیگری تاثیر سه افزودنی شیمیایی مختلف شامل سیمان پرتلند کامپوزیتی، آهک هیدراته و ترکیبی از آهک هیدراته و سرباره کوره بلند با یکدیگر مقایسه گردید. همچنین در این مطالعه از تصاویر میکروسکوپ الکترونیکی محیطی نیز به منظور بررسی روند دقیق تر واکنش این مواد افزودنی با مخلوط آسفالت سرد استفاده شد. نتایج این مطالعه نشان داد که بهبود خصوصیات عملکردی آسفالت سرد تولید شده با قیر به نوع ماده افزونی و مقدار آن بستگی دارد که نتایج مطالعات قبلی را نیز

تایید می‌نمود. همچنین نتایج این مطالعه نشان داد که مقدار سیمان پرتلند کامپوزیتی می‌تواند مقاومت آسفالت را افزایش دهد و این زمانی که ترکیبی از آهک هیدراته و سربار کوره وجود داشته باشد این تاثیر به مراتب بیشتر خواهد بود. لذا هیدراتاسیون حاصل از سیمان پرتلند کامپوزیتی یا ترکیبی از آهک هیدراته و سرباره کوره می‌تواند نقش ماده چسباننده در مخلوط آسفالتی با قیر امولسیون را ایفا نماید. همچنین این مواد موجب مقاومت آسفالت سرد در برابر رطوبت و افزایش مقاومت آن در برابر فرسایش گردد. در نهایت نتایج این مطالعه نشان داد که محصولات هیدراتاسیون قادر هستند میزان سختی و انسجام آسفالت سرد را افزایش دهند (Du, 2015).

۳-۴- افزودنی‌های غیر سنتی

مطالعاتی دیگری نیز به منظور مقایسه تاثیر مواد افزودنی سنتی همچون آهک با مواد افزودنی غیر سنتی همچون نانوسیلیس بر روی خواص مخلوط آسفالت سرد بازیافتی با امولسیون قیر نیز صورت گرفته است. نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که استفاده از آهک و یا نانوسیلیس به تنهایی تأثیر چندانی در افزایش مقاومت مارشال نمونه‌ها ندارد؛ اما با ترکیب ۱ درصد نانوسیلیس با ۲ درصد سیمان خواص مقاومتی آسفالت سرد بازیافتی با امولسیون قیر به میزان قابل توجهی بهبود می‌یابد (Gravand, 2013).

عاملی و همکاران در سال ۱۳۹۲ نیز به بررسی تاثیر سه ماده افزودنی سیمان، آهک و پلیمر SBS بر خواص عملکردی مخلوط‌های بازیافتی سرد با امولسیون قیر پرداختند. در این تحقیق از سیمان و آهک به صورت پودری و از پلیمر با و بدون سیمان و آهک استفاده شد. نتایج این مطالعه نشان داده که پلیمر SBS، سیمان و آهک هر سه موجب افزایش استقامت مارشال، مدول جهندگی و افزایش مقاومت در مقابل رطوبت و تغییر شکل‌های دائمی می‌گردند. همچنین نتایج نشان داد که مخلوط‌های حاوی سیمان و پلیمر SBS نسبت به سایر نمونه‌ها مقاومت بالاتری دارند. نتایج این مطالعه در تایید با مطالعه Sengoz and Isikyakar قرار گرفت. آن‌ها نیز مطرح کردند که پلیمر SBS که در گروه الاستومرها طبقه‌بندی می‌گردد، موجب انعطاف پذیری قیر امولسون می‌شود و آنها احتمال دادند که بهترین اصلاح کننده قیر همین ماده می‌باشد (Sengoz and Isikyakar, 2008).

در مطالعاتی نیز از مواد افزودنی غیر سنتی همچون گوگرد پلیمری (Lee et al, 2008; Strickland et al, 2008;) (Mehrra and Khodaii, 2013) نیز به منظور بررسی خصوصیات عملکردی آسفالت سرد با قیر امولسیون استفاده شده است. در ابتدا جهت بهبود خصوصیات مخلوط آسفالتی از گوگرد استفاده شد که ایده استفاده از این ماده افزودنی به سال ۱۹۷۰ میلادی برمی‌گردد که برای اولین بار توسط شرکت‌های بزرگ نفتی مانند شل مورد استفاده قرار گرفت (Timm et al, 2011). از مشکلات بزرگ استفاده از این افزودنی، متصاعد شدن گاز سولفید هیدروژن بود که در چند دقیقه سبب مرگ انسان می‌شد (Weber, 2003). بنابراین مطالعاتی در زمینه بر طرف کردن این مشکل انجام شد که در نهایت پیشنهاد شد که از گوگرد به همراه ترکیب سایر افزودنی‌های خاص همچون افزودنی‌های پلیمری استفاده شود. تاثیر مستقیم این افزودنی‌ها در مخلوط آسفالتی، افزایش مقاومت، افزایش مدول برجهندگی (Kandhal, 1982; Stuart, 1990)، افزایش سختی مخلوط، کاهش شیارشدگی، کاهش قیر مصرفی و انرژی و همچنین کاهش هزینه اعلام شده است (Lee et al, 2008; Strickland et al,) (Mehrra and Khodaii, 2008;) (Mehrra and Khodaii, 2013). افزودن گوگرد به همراه مواد پلیمری مقاومت کششی مرطوب و مقاومت خشک آسفالت را نیز کاهش می‌دهد که بر روی مقاومت مرطوب نسبت به مقاومت خشک تاثیر بیشتری دارد. اما نتایج مطالعات انجام شده نشان داده است که افزودن گوگرد پلیمری به مخلوط آسفالتی به تنهایی باعث افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در مقابل عریان شدگی نمی‌شود (Hicks, 2002; Gorkem and Sengoz, 2008) و در مقایسه افزودنی‌های دیگر مانند آهک هیدراته، سیمان، آمین‌ها و مواد پلیمری عملکرد بهتری بر افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در مقابل عریان شدگی دارند (Hicks, 2002; Gorkem and Sengoz, 2008). با توجه به مشکلات زیست محیطی انباشت گوگرد و پودر لاستیک، استفاده از این دو ماده به

عنوان مواد افزودنی در بهبود عملکرد مخلوط آسفالت سرد تولید شده کارخانه با قیر امولسیون مورد توجه محققان قرار گرفت که هدف از این ترکیب، اصلاح رفتار مکانیکی مخلوط آسفالت سرد و کاهش آلودگی محیط زیستی بود (Hicks, 2002; Lee et al, 2008). برای اولین در دهه ۱۹۶۰ در سوئد از پودر لاستیک به منظور بهبود خرابی آسفالت در شرایط آب و هوای سرد (روش خشک) استفاده شد و همزمان نیز در آمریکا نیز از قیر و پودر لاستیک در درمای بالا (روش تر) استفاده گردید (Presti, 2007; Xiao and Amirkhanian 2013). در مطالعه‌ای تاثیر پودر لاستیک بر حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی نشان داد که این افزودنی موجب کاهش خرابی ناشی از طوبت می‌شود (Xiao and Amirkhanian, 2007). همچنین در پژوهش دیگر بهبود حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی حاوی SBS و EVA گزارش شد (Gorkem & Sengoz, 2009). بنابراین پیشنهاد استفاده از قیر اصلاح شده با پودر پلاستیک به همراه گوگرد پلیمری به منظور افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر عریان شدگی مطرح شد (Yildirim et al, 2007; Gorkem & Sengoz, 2009) که نتایج این مطالعه نشان داد که افزودن قیر پلاستیکی به همراه گوگرد پلیمری موجب افزایش مقاومت مخلوط آسفالت سرد با قیر امولسیون در برابر عریان شدگی به میزان حدود ۱۵ درصد می‌گردد (Yan et al, 2010).

۴- نتیجه‌گیری

تحقیقاتی در زمینه بررسی مشخصات عملکردی آسفالت سرد کارخانه‌ای تولید شده با قیر امولسیون با استفاده از افزودنی‌های مختلف مانند سیمان، آهک، خاکستر بادی، بخار سیلیس، نانو سیلیس، خاکستر پوسته برنج و الیاف پلی پرولین، مواد پلیمری، گوگرد پلیمری و ترکیب افزودنی‌های مختلف انجام شده است که در این بین بیشترین ماده افزودنی مورد استفاده سیمان می‌باشد. به همین منظور آزمایش‌هایی مانند استقامت مارشال، ضریب برجهندگی، خزش دینامیکی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، خستگی و مقاومت مخلوط آسفالتی در مقابل عریان شدگی انجام شده است. که خلاصه نتایج این مطالعات به شرح زیر است:

استفاده از مواد افزودنی مانند سیمان و آهک سبب کاهش درصد فضای خالی و همچنین افزایش وزن مخصوص نمونه‌ها می‌گردد که دلیل این امر را پر شدن فضای خالی مخلوط آسفالتی توسط سیمان و آهک و همچنین واکنش‌های سیمان و آهک با آب ذکر نمودند.

مواد پلیمری به علت تورم در ترکیب با قیر امولسیون و افزایش گرانی قیر، می‌توانند سبب افزایش درصد فضای خالی مخلوط‌های آسفالتی می‌گردد.

چنانچه مقدار مواد افزودنی به صورت صحیحی انتخاب شوند می‌توانند موجب بهبود خصوصیات عملکردی آسفالت مانند مقاومت و استقامت مارشال گردند. این مطالعات دلیل افزایش در مقادیر استقامت مارشال را ناشی از عمل‌آوری سریع‌تر مخلوط در حضور مواد افزودنی به ویژه آهک و سیمان دانستند که البته این مطلب در مورد سیمان پرنرنگ تر می‌باشد.

نتایج آزمایش مقاومت کششی نشان داد که نمونه‌های اصلاح شده با مواد افزودنی‌های مختلف نسبت به نمونه‌های شاهد مقاومت کششی بالاتری دارند که علت آن را بهبود چسبندگی قیر و مصالح در حضور مواد افزودنی مورد استفاده بیان نمودند.

استفاده از افزودنی‌های مختلف سبب بهبود مقاومت مخلوط آسفالتی در مقابل رطوبت می‌گردد که این موضوع در مورد نمونه‌های اصلاح شده با ترکیب پلیمر با سیمان و پلیمر با آهک نسبت به سایر افزودنی‌ها نمود بیشتری از خود نشان داد.

مواد پلیمری به علت ایجاد شبکه‌ای سه‌بعدی در قیر و در واقع مسلح کردن قیر می‌توانند موجب افزایش مقاومت آسفالت و استقامت مارشال شوند.

مخلوط‌های آسفالتی تولید شده با قیر امولسیون نسبت به عوامل محیطی و رطوبت، مقاومت بسیار پایینی دارند و بنابراین استفاده از افزودنی‌ها توصیه می‌گردد

منابع

- Abbasnejad Mousavi Bora, S. Y., & Modares, A. (2017). Mechanical behavior of cold asphalt containing bitumen emulsion and cement, *The third international conference on civil engineering*, Architecture and urban design, Tabriz.
- Al-Hdabi, A., Al Nageim, H., Ruddock, F., & Seton, L. (2014). Development of sustainable cold rolled surface course asphalt mixtures using waste fly ash and silica fume. *Journal of materials in civil engineering*, 26(3), 536-543.
- Al-Mehthel, M., Wahhab, H. I. A., Al-Idi, S. H., & Baig, M. G. (2010, April). Sulfur extended asphalt as a major outlet for sulfur that outperformed other asphalt mixes in the Gulf. In *Sulfur world symposium, Qatar*.
- Ameli, A., Ziyari, H., Shahriari Holasu, H., Babagoli, R., & Aghapur, S. (2013). The effect of cement and lime on the functional properties of cold recycled mixes with polymer bitumen emulsion. *Transportation research paper*. 10 (4): 432-423. (In Persian).
- Ameri, M., & Behnood, A. (2012). Laboratory studies to investigate the properties of CIR mixes containing steel slag as a substitute for virgin aggregates. *Construction and Building Materials*, 26(1), 475-480.
- Amouzadeh Omrani, M., & Modarres, A. (2018). Emulsified cold recycled mixtures using cement kiln dust and coal waste ash-mechanical-environmental impacts. *Journal of cleaner production*, 199, 101-111.
- Amouzadeh Omrani, M., & Modarres, A. (2019). Stiffness and fatigue behavior of emulsified cold recycled mixture containing waste powder additives: mechanical and microstructural analysis. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(6), 04019061.
- Baskandi, D. (2017). Bituminous Pavement Recycling-Effective Utilization of Depleting Non-Renewable Resources. *International Journal of Engineering and Science (IJES)*, 6(3), 57-65.
- Behnood, A., Gharehveran, M. M., Asl, F. G., & Ameri, M. (2015). Effects of copper slag and recycled concrete aggregate on the properties of CIR mixes with bitumen emulsion, rice husk ash, Portland cement and fly ash. *Construction and Building Materials*, 96, 172-180.
- Brown, S., & Needham, D. (2000). A study of cement modified bitumen emulsion mixtures. *Asphalt Paving Technology*, 69, 92-121.
- Chávez-Valencia, L. E., Alonso, E., Manzano, A., Pérez, J., Contreras, M. E., & Signoret, C. (2007). Improving the compressive strengths of cold-mix asphalt using asphalt emulsion modified by polyvinyl acetate. *Construction and Building Materials*, 21(3), 583-589.
- Cross, S. A. (1999). Experimental cold in-place recycling with hydrated lime. *Transportation Research Record*, 1684(1), 186-193.
- Cross, S. A., & Young, D. A. (1997). Evaluation of type C fly ash in cold in-place recycling. *Transportation research record*, 1583(1), 82-90.
- Didier, L., Miguel, B. J., Luis, P. J., & Jiri, F. (2008). In-situ validation of the SCORE Project. *Carreteras*, 4(158), 84-91.
- Dolżycki, B., & Jaskuła, P. (2019). Review and evaluation of cold recycling with bitumen emulsion and cement for rehabilitation of old pavements. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 6(4), 311-323.
- Du, S. (2015). Performance characteristic of cold recycled mixture with asphalt emulsion and chemical additives. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015.
- Gao, L., Ni, F., Ling, C., & Yan, J. (2016). Evaluation of fatigue behavior in cold recycled mixture using digital image correlation method. *Construction and Building Materials*, 102, 393-402.

- Gao, L., Ni, F., Luo, H., & Charmot, S. (2015). Characterization of air voids in cold in-place recycling mixtures using X-ray computed tomography. *Construction and Building Materials*, 84, 429-436.
- Gómez-Meijide, B., Pérez, I., Airey, G., & Thom, N. (2015). Stiffness of cold asphalt mixtures with recycled aggregates from construction and demolition waste. *Construction and Building Materials*, 77, 168-178.
- Gorkem, C., & Sengoz, B. (2009). Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime. *Construction and Building Materials*, 23(6), 2227-2236.
- Gravand, E. (2013). The effect of using nano silica and lime on the properties of recycled cold asphalt mixture with bitumen emulsion. *Master's thesis*. Technical College. Non-Governmental and Non-Profit Institute of Higher Education Imran Va Tu. (In Persian).
- Haghigi Murad, E., Saidi Jam, S., Mohammadi, M. R., & Rokhzadpour, Sh. (2016). Comparison of mechanical behavior of recycled asphalt with bitumen emulsion containing cement and polypropylene fibers, *the third international conference and exhibition on sustainable development in road construction with an approach to environmental protection*, Shiraz. (In Persian).
- Hicks, R. G. (2002). Asphalt rubber design and construction guidelines. *Northern California Rubberized Asphalt Concrete Technology Center-California Integrated Waste Management Board, Sacramento, CA*.
- Issa, R., Zaman, M. M., Miller, G. A., & Senkowski, L. J. (2001). Characteristics of cold processed asphalt millings and cement-emulsion mix. *Transportation Research Record*, 1767(1), 1-6.
- Javaheri, S., Javaheri, A. G., & Latifi, A. (2016). *The 9th Iran Bitumen and Asphalt Conference*. Tehran
- Kavussi, A., & Modarres, A. (2010a). A model for resilient modulus determination of recycled mixes with bitumen emulsion and cement from ITS testing results. *Construction and Building Materials*, 24(11), 2252-2259.
- Kavussi, A., & Modarres, A. (2010b). Laboratory fatigue models for recycled mixes with bitumen emulsion and cement. *Construction and Building Materials*, 24(10), 1920-1927.
- Kim, Y., & Lee, H. D. (2012). Performance evaluation of Cold In-Place Recycling mixtures using emulsified asphalt based on dynamic modulus, flow number, flow time, and raveling loss. *KSCE journal of civil engineering*, 16(4), 586-593.
- Lee, S. J., Akisetty, C. K., & Amirhanian, S. N. (2008). The effect of crumb rubber modifier (CRM) on the performance properties of rubberized binders in HMA pavements. *Construction and Building Materials*, 22(7), 1368-1376.
- Mehrara, A., & Khodaii, A. (2013). A review of state of the art on stripping phenomenon in asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 38, 423-442.
- Modarres, A., Nejad, F. M., Kavussi, A., Hassani, A., & Shabanzadeh, E. (2011). A parametric study on the laboratory fatigue characteristics of recycled mixes. *Construction and Building Materials*, 25(4), 2085-2093.
- Niazi, Y., & Jalili Ghazizadeh, M. (2008). The effect of cement and lime on the properties of cold recycled asphalt mixtures using bitumen emulsion, *4th National Congress of Civil Engineering*, Tehran. (In Persian).
- Niazi, Y., & Jalili, M. (2009). Effect of Portland cement and lime additives on properties of cold in-place recycled mixtures with asphalt emulsion. *Construction and Building Materials*, 23(3), 1338-1343.
- O'Leary, M. D., & Williams, R. D. (1992). In situ cold recycling of bituminous pavements with polymer-modified high float emulsions. *Transportation Research Record*, (1342).
- Omran, M. A., & Modarres, A. (2018). Emulsified cold recycled mixtures using cement kiln dust and coal waste ash mechanical-environmental impacts. *Journal of cleaner production*, 199, 101-111.
- Oruc, S., Celik, F., & Akpinar, M. V. (2007). Effect of cement on emulsified asphalt mixtures. *Journal of materials engineering and performance*, 16(5), 578-583.
- Presti, D. L. (2013). Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixtures: A literature review. *Construction and Building Materials*, 49, 863-881.
- Rogge, D. F., Hicks, R. G., Scholz, T. V., & Allen, D. (1992). Case histories of cold in-place recycled asphalt pavements in central oregon. *Transportation Research Record*, (1337).

- Rutherford, T., Wang, Z., Shu, X., Huang, B., & Clarke, D. (2014). Laboratory investigation into mechanical properties of cement emulsified asphalt mortar. *Construction and Building Materials*, 65, 76-83.
- Sengoz, B., & Isikyakar, G. (2008). Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 22(9), 1897-1905.
- Strickland, D., Colange, J., Martin, M., & Deme, I. (2008). Performance properties of paving mixtures made with modified sulphur pellets. In *Proceedings of the international ISAP symposium on asphalt pavements and environment, ISAP, Zurich* (pp. 64-75).
- Stuart, K. (1990). Performance evaluation of sulfur-extended asphalt pavements: laboratory evaluation.
- Taherkhani, H., Firoozei, F., & Bolouri Bazaz, J. (2016). Evaluation of the mechanical properties of the cement treated cold-in-place recycled asphalt mixtures. *International Journal of Transportation Engineering*, 3(4), 301-312.
- Tarefder, R. A., Zaman, M., Sisson, R., & Ting, C. F. (2006). Field and laboratory properties of lime-treated cold in-place recycled asphalt pavements. *Journal of Testing and Evaluation*, 34(1), 31-41.
- Thanaya, I. N. A. (2007). Evaluating and improving the performance of cold asphalt emulsion mixes. *Civil Engineering Dimension*, 9(2), pp-64.
- Thomas, T., Kadrams, A., & Huffman, J. (2000). Cold in-place recycling on Kansas US-283. In *79th annual meeting of TRB*.
- Timm, D. H., Robbins, M. M., Willis, J. R., Tran, N. and Taylor, A. J. (2011). Evaluation of mixture performance and structural capacity of pavements using shell Thiopave: Phase II - Construction, laboratory evaluation, and full-scale testing of Thiopave test sections - one-year report. Report 11-03, National Center for Asphalt Technology, Auburn University,
- Xiao, F., & Amirhanian, S. N. (2009). Laboratory investigation of moisture damage in rubberised asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement. *International Journal of Pavement Engineering*, 10(5), 319-328.
- Yan, J., Ni, F., Yang, M., & Li, J. (2010). An experimental study on fatigue properties of emulsion and foam cold recycled mixes. *Construction and Building Materials*, 24(11), 2151-2156.
- Yildirim, Y. (2007). Polymer modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 21(1), 66-72.