

کاربرد انواع آسفالت و الیاف آسفالتی در جاده‌ها و معابر شهری و لزوم به کارگیری روش‌های نوین روسازی آسفالتی در موارد تخریبی، تعمیر و نگهداری

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۸

کد مقاله: ۷۲۵۴۹

امین رضائی^{*۱}

چکیده

توسعه روز افزون راه‌های ارتباطی و مواصلاتی و حمل و نقل درون شهری و لزوم به کارگیری روش‌های نوین اجرای روسازی جاده‌ها و معابر شهری و به کارگیری روش‌های نوین روسازی آسفالتی، توسعه و نگهداری شبکه راه‌ها بر افزایش کیفیت خدمات رسانی تاکید داشته و باعث پائین آمدن هزینه‌های چرخه عمر و نگهداری و تعمیر در روسازی جاده‌ها و معابر شهری خواهد بود. روش تحقیق تحلیلی - توصیفی بوده و با گردآوری و استناد به مطالعات میدانی و کتابخانه‌ای و مقایسه‌ای، و با در نظر گرفتن کاربرد انواع آسفالت و الیاف آسفالتی در جاده‌ها و معابر شهری و لزوم به کارگیری روش‌های نوین روسازی آسفالتی در موارد تخریبی، تعمیر و نگهداری در شهرداری‌ها و انتخاب گزینه بهتر در امر اجرایی، انجام شده است. در پژوهش انجام گرفته سعی شده تا روش‌های نوین و قدیمی در رابطه با سنجش مشخصات قیر مصرفی و آسفالت و انواع آسفالت به کار گرفته شده و الیاف آسفالتی و روش‌های نوین اجرایی آسفالت و فناوری‌های نوین در صنعت روسازی آسفالتی به کار گرفته شود و در راستای اجرای روش‌های نوین ساخت روسازی معابر و جاده‌ها آسفالت‌های گرم و سرد و بازیافتی و قیرهای مورد استفاده و امولسیون‌ها و استفاده از پودر لاستیک و مخلوط‌های مختلف با استخوان بندی (SMA) بررسی و تشریح شود، که در ادامه مزایا و معایب هر کدام از فناوری‌ها بررسی شده و امید است یافته‌های این تحقیق سبب آشنایی مدیران و تصمیم‌گیرندگان شهری با فناوری‌های پر کاربرد درون شهری در زمینه رو سازی، باشد.

واژگان کلیدی: آسفالت، الیاف آسفالتی، روش‌های نوین روسازی، جاده و معابر، تخریب، تعمیر و نگهداری.

۱- کارشناسی ارشد عمران - راه و ترابری، کارشناس عمران (کنترل پروژه) شهرداری، خوی، ایران.

(aminrezaei.64m@gmail.com)

۱- مقدمه

از اختلاط قیر و مصالح سنگی جسمی چسبانده و متراکمی به دست می‌آید که بتن آسفالتی نام دارد که بسته به نوع قیر مورد استفاده در مخلوط آن و جنس مصالح و دانه بندی سنگدانه های مصرفی در انواع متفاوتی تولید می‌شود و موارد بیان شده نقش مهمی در عملکرد و دوام بتن آسفالتی به دست آمده دارد و استفاده از الیاف آسفالتی نیز در برخی موارد به عنوان مقاوم سازی در بتن آسفالتی می‌تواند کارائی بهتری داشته باشد. قیر از پالایش نفت خام بدست می‌آید و در واقع می‌توان گفت به عنوان پسماندهای ستون های اتمسفریک و خلاء پالایشگاه نفتی است. با پیشرفت تکنولوژی های نوین و پالایش نفت و تقطیر های بدست آمده و قیرهای دریافتی حاصل از آن کیفیت ماده باقی مانده که همان قیر می‌باشد در راه سازی ها کاربرد داشته و با داشتن حالت چسبندگی و دوام بالا در آسفالت معابر و جاده های شهری نقش بسزائی دارد. با توجه به کیفیت آسفالت های تولیدی و افزایش تردد و حمل و نقل شهری و بار ترافیکی حاصل از آن در راستای روسازی جاده ها و معابر شهری عملکرد و دوام ساخت روسازی آسفالتی در اولویت کار قرار می‌گیرد که طبق تحقیقات و مطالعات انجام یافته راهبردی در زمینه راه ها (Strategic Highway Research Program) است که در مباحث علمی به اختصار به پروژه شارپ معروف است. مطالعات و تحقیقات انجام یافته پروژه شارپ برای اولین بار در بین سال های ۱۹۸۷ الی ۱۹۹۳ میلادی در ایالات متحده آمریکا پایه گذاری شد که بعدها هم با نتایج مثبت به دست آمده و روش های جدید در رده بندی قیرهای مصرفی و مورد استفاده در راه سازی مبتنی بر عملکرد بهینه و روش های جدید طراحی در این خصوص منجر به وجود آمدن روش 'Superpave' شد که این روش نیز به مرور زمان و با روی کار آمدن روش های دیگر مثل روش آشتو که برای اولین بار در سال ۱۹۶۰ میلادی مورد آزمایش قرار گرفت بر اساس یک روش تجربی و استفاده از مصالح و فناوری های نوین از تولید تا اجرا برخوردار بود که هدف اصلی تمامی این روش ها و روش های نوین دیگر به وجود آمده تا آن زمان و در آینده نیز می‌تواند جایگزینی مصالح و روش های نوین با افزایش دوام و عملکرد بهینه و کاهش هزینه ها از تولید تا مصرف و اجرا باشد که تعدادی از این فناوری های به کار رفته تا به امروز می‌تواند کاربرد انواع آسفالت های گرم، نیمه گرم و آسفالت سرد و نیمه سرد، آسفالت های بازبافتی سرد و گرم و امولسیون های قیری و انواع مخلوط های به کار رفته در تولید روسازی های آسفالتیاً آسفالت حاوی از کاربرد پودر لاستیک ماشین های فرسوده و استفاده از مخلوط های آسفالتی با دانه بندی سنگدانه ای SMA^۲ باشد که روز به روز شاهد کاربرد آنها در جاده ها و معابر شهری شهرمان هستیم (سیدحمودی و شهری، ۱۳۹۶).

۲- روش تحقیق

روش تحقیق تحلیلی-توصیفی بوده و با گردآوری و استناد به مطالعات میدانی و کتابخانه ای و مقایسه ای، و با در نظر گرفتن کاربرد انواع آسفالت و الیاف آسفالتی در جاده ها و معابر شهری و لزوم به کارگیری روش های نوین روسازی آسفالتی در موارد تخریبی، تعمیر و نگهداری در شهرداری ها و انتخاب گزینه بهتر در امر اجرایی، انجام شده است.

۳- پیشینه پژوهش

هاشمی پور و عادلی (۱۳۹۶)، در مقاله ارزیابی علل کاهش عمر لایه های آسفالتی سطوح معابر شهری و ارایه راه حل ها و پیشنهادات (مطالعه موردی شهرستان لالی)، عامل صحت و کیفیت تولید، موثرترین گزینه در کیفیت ساخت روسازی آسفالت شهر لالی است. سایر عوامل موثر به ترتیب اولویت عبارتند از صحت و کیفیت اجرا، کنترل کیفیت اجرا، دستورالعمل های موجود، کنترل کیفیت تولید، و مطابقت عملی با دستورالعمل ها. نیازی و نیشابوری (۱۳۸۲)، در مقاله خود به تأثیر نوع فیلر بر خواص مکانیکی و دوام بتن آسفالتی روسازی ها اشاره داشته اند، نتایج نشان می‌دهد که خواص سفت کنندگی فیلر ها در مخلوط های فیلر- قیر بسته به نوع و نسبت فیلر در مخلوط تغییر می‌کند. همچنین، نوع فیلر یا ریز دانه ترین مصالح سنگی مصرف شده بر خواص مکانیکی و دوام بتن آسفالتی تأثیر دارد. آیین نامه روسازی آسفالتی راه های ایران (۱۳۹۰) (معاونت نظام راهبردی وزارت راه و شهرسازی، ۱۳۹۰)، در برگزیده ضوابط و معیار های طراحی روسازی راه های آسفالتی است، که مراحل بهره برداری، اجرا و نگهداری روسازی معابر شهری را شرح می‌دهد. کتاب مخلوط های آسفالتی با مقاومت بالا در بابر شیار شدگی از سوی دبیرخانه مجمع جهانی راه تدوین شده و ترجمه آن کیوان بمانا (۱۳۸۵)، این کتاب که از سوی آسفالت کشور آمریکا تدوین شده است شرح روش ها در طرح ضخامت روسازی و در بردارنده ی این موضوعات است: ملاحظات طراحی، اصول طراحی، تحلیل ترافیکی، ارزیابی مصالح، روش های طراحی سازه ای، برنامه ریزی ساخت مرحله ای و تحلیل اقتصادی. کتاب لکه گیری رویه های آسفالتی (۱۳۸۶)، تهیه کننده وزارت راه و شهرسازی، پژوهشکده حمل و نقل نیز به خرابی های رایج در روسازی آسفالتی و دانه بندی و جنس فیلرهای مصرفی پرداخته اند. هانگ و همکاران (۲۰۲۰)، به ارزیابی آسفالت ماستیک سنگی حاوی ضایعات سرمایی برای خنک

۱. یک روش طراحی مخلوط جایگزین روش قدیمی مارشال است که در نتیجه پروژه شارپ پیشنهاد شده است.

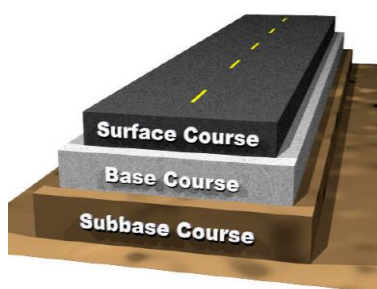
سازی روسازی آسفالتی، پرداخته اند. نتایج نشان می‌دهد که CASMA با کاهش مقاومت شیاردار، حساسیت به رطوبت، و عملکرد ضد ترک مواجه شد، در حالی که هنوز الزامات فنی با محتوای CA تا ۴۰٪ را برآورده می‌کند. از سوی دیگر، CASMA ها می‌توانند دمای روسازی را تا ۱۱٫۵ درجه سانتی گراد در کف لایه های آسفالت خنک کنند. تغییر شکل شیاردار دائمی روسازی آسفالت خنک کننده ۴۵٫۳۶ درصد کمتر از روسازی آسفالت معمولی بدون CASMA بود. بر اساس نتایج آزمایش و نتایج شبیه سازی عددی، محتوای بهینه ضایعات سرامیکی در آسفالت ماستیک سنگی ۴۰ درصد توصیه شد (Huang, et al., 2020, p.2). بالیار سینگ (۲۰۲۰)، در پژوهشی تحت عنوان آسفالت مخلوط داغ پراکنده از خرده لاستیک ساندویچ شده با گرافن، نتایج نشان می‌دهد که خرده لاستیک و اکسید گرافن کاملاً با قیر سازگار هستند. ۹٫۸٪ محتوای خرده لاستیک در آسفالت مخلوط داغ قیر اصلاح شده با لاستیک خرده نان نتیجه بهینه را نشان می‌دهد. عملکرد آسفالت مخلوط گرم قیر اصلاح شده با اکسید گرافن در مقایسه با نمونه‌های آسفالت مخلوط داغ قیر اصلاح شده با مخلوط کنترل و خرده لاستیک اصلاح شده، عملکرد برتری را نشان می‌دهد. خواص افزایش یافته آسفالت مخلوط گرم قیر اصلاح شده با اثر ترکیبی اکسید گرافن و خرده لاستیک، برای ساخت و ساز جاده مناسب است (Baliyar Singh et al., 2020, p.652). رحمان، مهاجرانی و جوستوزی (۲۰۲۰)، به صورت موردی به مطالعه بازیافت مواد زائد برای آسفالت بتن و قیر، پرداخته اند. صنعت روسازی یکی از بخش‌های امیدوارکننده است، زیرا انواع مختلفی از زباله‌ها در بتن آسفالت و قیر بازیافت می‌شوند و جزء روش‌های نوین برای روسازی و استفاده در جاده‌ها و معابر شهری به حساب می‌آیند. برخی از ضایعات امیدوارکننده مانند پلی اتیلن با چگالی بالا، ضایعات معدن سنگ مرمر، ضایعات تخریب ساختمان، لاستیک تایر زمینی، روغن پخت و پز، خاکستر سوخت روغن نخل، نارگیل، سیزال، سلولز و الیاف پلی استر، نشاسته، بطری‌های پلاستیکی، ضایعات شیشه، آجرهای باطله، ضایعات سرامیک، خاکستر بادی زباله و ته سیگار و استفاده از آنها در بتن آسفالت و قیر هستند (Rahman, Mohajerani & Giustozzi, 2020, p.2).

۴- مبانی نظری پژوهش

نتیجه تحقیقات بدست آمده در آمریکا در سال ۱۹۸۷ میلادی روش رده بندی بر اساس عملکرد بوده است که به اختصار (PG) نمایش داده می‌شود. طبق این روش برای هر قیر راه سازی یک محدوده دمای عملکردی تعیین می‌شود و فرض می‌شود که قیر مورد نظر در محدوده تعریف شده دارای عملکرد مناسب در مخلوط آسفالتی است. به عنوان مثال یک قیر PG58-28 برای استفاده در مخلوط آسفالتی که دمای آن به ۸۵ درجه سانتی گراد در گرم ترین فصل و به ۲۸- درجه سانتی گراد در سردترین فصل سال می‌رسد مناسب است. در این روش مکانیزم شکل گیری و توسعه خرابی در دماهای مختلف هر کدام به طور جداگانه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. تجهیزات مورد استفاده در این روش رده بندی نسبتاً گران بوده و در حال حاضر تنها چند مرکز تحقیقاتی در داخل کشور مجهز به دستگاه‌های ارزیابی قیر طبق پروتکل‌های بدست آمده PG هستند. در ابتدا رده بندی قیرها به صورت کلاسیک با توجه به قوام آن‌ها انجام می‌شده است. یکی از روش‌های متداول مبتنی بر قوام یافتن روش درجه نفوذ قیر مصرفی است، در این روش قیرها بر اساس میزان نفوذ یک سوزن استاندارد در قیر در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد طبقه بندی می‌شوند، قیر ۵۰-۴۰، ۷۰-۶۰ و ۱۰۰-۸۵ در این روش که در طی دهه ۱۹۳۰ میلادی پایه گذاری شده و هنوز هم در بعضی کشورها مانند ایران مورد استفاده قرار می‌گیرد، انتخاب قیر مناسب راه سازی بر اساس قوام آن است. به عنوان مثال برای آب و هوای گرم قیر ۵۰-۴۰، معتدل ۷۰-۶۰ و سرد ۱۰۰-۸۵. این روش دسته بندی و انتخاب قیر بسیار ساده است ولی هیچ شاخص عملکردی روسازی راه و معابر شهری را مد نظر قرار نمی‌دهد. روش رده بندی دیگر، رده بندی بر اساس گرانیوی^۱ قیر بوده است، این روش برای رفع نقایص روش قبلی در دهه ۱۹۵۰-۱۹۶۰ میلادی پیشنهاد شد ولی به رغم اینکه از شاخص گرانیوی که یک پارامتر مکانیکی است بهره می‌برد، همچنان عملکرد مخلوط‌های آسفالتی را مد نظر قرار نداده بود و در بعضی موارد روسازی‌هایی که با استفاده از این روش کاملاً یکسان برآورد می‌شدند، در عمل رفتار متفاوتی داشتند. بر اساس مطالعات تحقیقاتی راهبردی شارپ در سال ۱۹۸۷ میلادی و آشتو در سال ۱۹۶۰ میلادی که بر روی خواص قیرها و شرایط بار ترافیکی در موقع بهره برداری و ارائه راهکارهای مناسب برای طرح‌های مخلوط آسفالتی برنامه ریزی شد تا بتواند پاسخگوی بار ترافیکی و نیاز روسازی جاده‌ها و معابر شهری باشد که با صرف کردن هزینه‌های میلیون دلاری در آمریکا و اروپا با هدف بهبود عملکرد بتن آسفالتی و ایمن سازی راه‌ها به نتایج مطلوبی رسیده است که منجر به ارائه گزارش مبتنی بر خواص قیر مصرفی و عملکرد آن در روسازی آسفالتی بود و بعدها معیارهایی نیز برای آن در نظر گرفته شد که در طبقه بندی گرانیوی قیرها با توجه مقدار گرانیوی مطلق در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد و گرانیوی روبه بالا با کینماتیک در دمای ۱۳۵ درجه سانتی گراد رده بندی شد که هر کدام مشخصات فنی و استانداردهای خود را دارد (سیدمحمودی و شهری، ۱۳۹۶؛ افلاکی، ۱۳۸۷؛ مرکز مطالعات و برنامه ریزی شهر تهران، ۱۳۹۴).

1. Viscosity

۴-۱- انواع آسفالت



تصویر ۱: ساختار معمولی اجرا و روسازی آسفالتی با انواع آسفالت ها، مأخذ: Mashaan, et al, 2014

آسفالت به صورت کلی به سه دسته آسفالت گرم و سرد و حفاظتی تقسیم می‌شود. آسفالت به ماده ای گفته می‌شود که سیاه رنگ و چسبناک بوده و به علت چسبندگی زیادی که دارد عایق خوبی برای رطوبت نیز هست. این ماده شبه جامد ترکیبی از مخلوط شن و ماسه و ماده سیاه رنگ به نام قیر است که در ساخت جاده ها عایق پشت بام ها زیر سازی ها و باند فرودگاه ها کاربرد دارد. آسفالت به صورت کلی از هیدروکربن ها و مشتقات آن ها تشکیل می‌شود و به صورت کامل در کربن دی سولفید حل می‌شود. آسفالت به فرانسوی: Asphalte ماده‌ای ترکیبی است که از مخلوط کردن شن و ماسه و قیر ساخته می‌شود و در ساخت جاده، باند فرودگاه و پشت بام ساختمان‌ها به کار گرفته می‌شود. اصلی‌ترین کاربرد آسفالت در ساخت جاده ها است (نزدیک به ۷۰٪)، که در آن از ترکیب شن و ماسه و قیر برای ساخت بتن آسفالتی استفاده می‌شود. آسفالت به طور ۱۰۰٪ قابل بازیافت بوده و بیشترین ماده ساخت و ساز بازیافت شده می‌باشد (نیکی رشیدی، ۱۳۸۸).

آسفالت در زبان فرانسه به معنای «قیر» نیز می‌باشد و باید توجه داشت که منظور از آسفالت در زبان فارسی «بتن آسفالتی» است که به طور خلاصه به آن آسفالت گفته می‌شود. واژه آسفالت از زبان یونانی باستانی ασφαλτος asphaltos گرفته شده است (حاج محمدرضایی، ۱۳۷۷؛ زیاری، ۱۳۸۵). بتن آسفالت مخلوطی از سنگدانه و قیر است. مخلوط بتن آسفالتی را می‌توان بر اساس درجه بندی سنگدانه ها به دو دسته عمده طبقه بندی کرد: آسفالت مخلوط داغ (HMA) و آسفالت ماستیک سنگی (SMA).

۴-۱-۱- آسفالت گرم

آسفالت گرم به آن دسته از آسفالت ها گفته می‌شود که به صورت گرم با قیر ترکیب می‌شوند و به صورت گرم نیز در سطح پخش شده و متراکم می‌گردند آسفالت گرم مخلوطی چندین ماده مختلف از جمله مصالح سنگی مثل شن و ماده اصلی یعنی قیر است که بر اساس نوع قیر مصرفی در دمایی مابین ۱۰۵ تا ۱۶۳ درجه سانتیگراد در کارخانه ساخته می‌شود و برای کشیده شدن روی محدوده مورد نظر فرستاده می‌شود. این ماده به صورت خمیری داغ روی ناحیه کشیده می‌شود و با دستگاه های مخصوصی کوبیده و فشرده می‌شوند. پس از سرد شدن به شکل جامد و بسیار مقاوم در می‌آیند. در کف خیابان ها و فرودگاه ها و بسیاری از پشت بام ها از این نوع آسفالت استفاده می‌شود. در بین انواع آسفالت های گرم، برترین نوع از نظر مقاومت و دوام، بتن آسفالتی است. بتن آسفالتی از مخلوط کردن سنگ های مرغوب و شکسته شده و قیر خالص بدست می‌آید. بتن آسفالتی در تمامی کاربردها مثل روسازی راه ها و باند فرودگاه ها کاربرد دارد و در برابر شرایط مختلف و سخت جوی و یا ترافیک بسیار با دوام است. همچنین در قسمت های ایستگاه خطوط اتوبوس واحد ها از این لایه پوشش استفاده می‌کنند. این نوع از آسفالت به چند قسمت تقسیم می‌شود:

آسفالت رویه (توپکا): آسفالت رویه آخرین لایه ای است که در روی تمام آنچه برای آسفالت کردن یک ناحیه انجام شده است قرار می‌گیرد و ما آن را می‌بینیم. این لایه به صورت مستقیم با هوا و با عوامل جوی در ارتباط است. ما پایمان را روی این لایه می‌گذاریم و همچنین بارها و اتومبیل ها و ترافیک ها روی این لایه قرار می‌گیرند. طبیعی است این لایه از اهمیت فراوانی برخوردار است و علاوه بر این که باید زیبا و صاف باشد باید در برابر بارندگی ها و سیل و برف و سرما و یخبندان بتواند مقاومت از خودش نشان دهد و شسته نشود و یا نشکند. حداکثر اندازه سنگ های مورد استفاده در آن باید در محدوده ای ما بین ۹/۵ تا ۱۹ میلی متر باشد.

آسفالت آستر: این لایه حساس ما بین لایه رویه و لایه های زیرین آسفالتی و یا مابین لایه اصلی و لایه رویه قرار می‌گیرد. در صورتی که ترافیک بسیار سنگینی در محل ایجاد شود آسفالت باید توان مقاومت در برابر آن را داشته باشد. مثلاً در بندرگاه ها و یا ایستگاه های تاکسی و اتوبوس و ترمینال ها باید از سنگ هایی که در برابر فشارهای زیاد تغییر شکل نمی‌دهند و از مقاومت بیشتری در برابر شکسته شدن و خرد شدن و یا حل شدن و تغییر حجم دارند برای این لایه استفاده کنیم. اندازه سنگ های خرد شده برای استفاده در این لایه بین ۱۹ تا ۳۷/۵ میلی متر است.

اساس قیری: اولین قشر رو سازی بعد از انجام گرفتن تمامی مراحل زیر سازی این مرحله یعنی اساس قیری است. دانه های سنگ مورد استفاده در این لایه بسیار بزرگ تر هستند که در این مرحله سنگ ریزه های مورد استفاده باید در ابعادی ما بین ۵۰ میلیمتر تا حدود ۷۵ میلیمتر داشته باشند. استفاده از این لایه در شرایط جوی خاص مانند مناطقی با یخبندان و بارش های شدید و سیل توصیه می‌شود و در دیگر شرایط لازم نیست.

ماسه آسفالت: ماسه آسفالت به مخلوط ماسه شکسته و یا ماسه طبیعی شسته شده با قیر خالص گفته می‌شود. این ترکیب را می‌توان در لایه‌های با ضخامت بیشتر از ۱۵ میلیمتر پخش کرد. کاربرد اصلی این لایه مسطح سازی لایه‌های آسفالت قدیمی است (<https://sepdbamalborz.ir>).

۴-۱-۲- آسفالت حفاظتی

آسفالت حفاظتی همان ترکیب سنگ‌های خرد شده با قیر است که در این نوع از آسفالت اندازه سنگ‌ها بسیار کوچک تر است و هدف از ساخت این آسفالت حفاظت از محدوده مورد نظر است. کاربردهای این نوع آسفالت در پشت بام‌ها برای حفاظت و به عنوان روکش برای ایزوگام برای جلوگیری از آسیب رسیدن به آن است و یا معابری است که فشار در آن‌ها کمتر است. مقاومت این نوع آسفالت زیاد نیست و از قیر زیادی برخوردار است. همچنین ضخامت آسفالت حفاظتی معمولاً ۲/۵ سانتی‌متر است. انواع آسفالت‌های حفاظتی به شرح زیر است:

- | | |
|--|------------------------------------|
| (۱) آسفالت حفاظتی از نوع یک لایه ^۱ | (۵) نوع تک کت ^۵ |
| (۲) آسفالت حفاظتی از نوع چند لایه ^۲ | (۶) نوع سیل کت‌ها ^۶ |
| (۳) آسفالت حفاظتی سرد پیش اندود ^۳ | (۷) حفاظتی نوع ردمیکس ^۷ |
| (۴) نوع پریمکت ^۴ | |

۴-۱-۳- آسفالت سرد

آسفالت سرد که با اصطلاح (Cold Mix) شناخته می‌شوند همانند آسفالت گرم از مصالح سنگی خرد شده و قیر خالص بدست می‌آید و تفاوت آن با آسفالت گرم در این است که در آسفالت سرد این مواد در دمای محیط باهم مخلوط می‌شوند و پس از کوبیده شدن در دمای عادی محیط سفت می‌شوند و حالت جامد می‌گیرند. یکی از خوبی‌های استفاده از آسفالت سرد به جای گرم این است که شما می‌توانید در مصافت بسیار زیادی این آسفالت را حمل کنید و سپس آن را روی ناحیه پخش کنید و آن را فشرده کنید و بکوبید بدون آن که خراب شود و یا دیگر قابل استفاده نباشد. لازم به ذکر است کاربرد این نوع آسفالت در ساختن راه‌ها و تعمیر و نگهداری روسازی‌ها و همچنین در کف سازی سالن‌ها و مکان‌های ورزشی است (<https://fa.wikipedia.org>). معاونت نظام راهبردی وزارت راه و شهرسازی، (۱۳۹۰).

۴-۲- کاربرد الیاف آسفالتی

- کاهش و تاخیر (بهبود و جلوگیری از گسترش) عریان شدگی در زمان استفاده از سنگدانه‌های مخلوط آسفالتی و خرابی رطوبتی فیزیکی (تخریب ناشی از بخارات آب بالخصوص در زمان استفاده از مصالح سیلیسی) که توسط فیلرهای آهکی هیدراته قابل اصلاح نمی‌باشد توسط الیاف با پوشش‌های نانویی هیدروفوبیک و هیدروفوبیک الیاف (T283).

- کاهش و تاخیر (بهبود و جلوگیری از گسترش) عریان شدگی در زمان استفاده سنگدانه‌های مخلوط آسفالتی و خرابی رطوبتی مکانیکی (تخریب ناشی از آب اشباع شده به صورت انفجاری).

- افزایش مقاومت مارشال (استقامت لایه‌های آسفالتی) بالخصوص روسازی و با شرایط ترافیک سنگین؛

- افزایش مقاومت در برابر مکانیزم خستگی و ترک خوردگی ناشی از آن؛

- بهبود خستگی توسط الیاف که به مراتب دارای تاثیر مناسب تری نسبت به پلیمر بسیار مناسب تر می‌باشد.

- کاهش و تاخیر (بهبود و جلوگیری از گسترش) ترک بردتی و انقباضی رویه آسفالتی که متأثر از جسم خود آسفالت و لایه‌های اساس و زیرین با کیفیت نامناسب نباشد.

- کاهش و تاخیر (بهبود و جلوگیری از گسترش) و رو آمدن ترک‌های آسفالتی (ناشی از خستگی، موج افتادگی، انعکاسی و شیار افتادگی)؛

- کاهش و تاخیر (بهبود و جلوگیری از گسترش) تغییر شکل دائمی (شیار افتادگی) قیر زدگی روسازی آسفالتی در شرایط آب و هوایی و ترافیکی ایران (۳۰ + / -۴۰)؛

- کاهش پدیده سخت شدن و پیر شدگی قیر؛

- مناسب جهت مصرف با مصالح اعم از سیلیسی و آهکی (کربناتی) به صورت نسخه پیچی شده با بررسی انتظارات و اهداف مصرف الیاف در مخلوط؛

1. single surface Treatment
2. Multiple Surface
3. pre mix coated macadam
4. prime coat
5. Tack Coat
6. seal coats
7. Road Mix

- صرفه اقتصادی به دلیل افزایش طول عمر آسفالت (Life cycle)؛
- توزیع تنش‌ها به دلیل سه بعدی قرار گرفتن در مخلوط آسفالتی (مسلح کننده سه بعدی)؛
- افزایش مدول بر چسبندگی که یکی از معیارهای مهم در تعیین ضخامت در طراحی‌های اولیه روسازی است (ASTM 4123 UTM).
- افزایش کشش غیر مستقیم و چسبندگی بهتر قیر به مصالح سنگی؛
- کاهش CO₂ و دوستدار محیط زیست Eco-friendly (www.sirjannano.com).

۵- بحث و یافته‌های پژوهش

۵-۱- روش‌های نوین روسازی جاده‌ها و معابر شهری

۵-۱-۱- آسفالت نیمه گرم^۱

خستگی و شیارشدگی دو عامل اصلی شکست در روسازی‌های انعطاف پذیر هستند (Sikdar et al., 1999). افزایش بار ترافیکی، شرایط محیطی، رطوبت، استحکام زیربنایی، کیفیت مصالح مورد استفاده و ملاحظات طراحی در طول زمان بر روسازی تأثیر می‌گذارد (Salama et al., 2006). در آسفالت نیمه گرم تلاش برای کاهش دمای ساخت و تراکم آسفالتی به وجود آمده بود که برای بار اول در سال ۱۹۹۶ میلادی در کشور آلمان مورد تحقیق و تفحص قرار گرفت و بعداً در آمریکا رد بین سالهای ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۴ و سپس در کشور کانادا در سال ۲۰۰۵ میلادی در دمای پائین و بین ۱۰ تا ۵۰ درجه سانتی گراد آسفالتی با مخلوط نیمه گرم به اجرا رسید که حاصل تحقیقات متخصصین در این حوزه می‌باشد. در ساخت آسفالت‌های نیمه گرم بر اساس تحقیقات انجام یافته از تراشه‌ها در مخلوط‌های قیری استفاده شد که به دلیل دارا بودن مقادیر قیر مصرفی در کاهش قیر تازه در حین ساخت مفید واقع می‌شد و در این راستا استفاده از ماده‌ای که در صنایع دیگر کاربرد نداشته و آسیب جدی به محیط زیست وارد نکند و در نهایت منجر به کاهش مصرف سنگدانه‌های طبیعی استفاده شده در آسفالت باشد، در اولویت استفاده قرار گرفت که از نظر اقتصادی نیز می‌تواند توجیه پذیر باشد. از مزایای استفاده از آسفالت نیمه گرم می‌توان به کاهش اثرات حاصل شده در برابر مخاطرات زیست محیطی و کاهش تولید گازهای سمی و کربن دی اکسید موجود در هوا و بخارهای ناشی از تبخیر و تقطیر قیر و فرآورده و مخلوط‌های آسفالتی، سهولت و راندمان بالا در ساخت و استفاده بهینه از سنگدانه‌های مصرفی طبیعی موجود در طبیعت و تراشه‌های در دسترس با توجه متراکم پذیری بهتر و امکان تولید آسفالت در نزدیکی مراکز شهری با در نظر گرفتن میزان آلودگی‌ها و خسارت وارده بر محیط زیست، ترام پذیری بهتر و سهولت اجرایی با توجه به شرایط محیطی و حاکم بر منطقه که در برخی موارد راحتی کار با بالا رفتن سردی هوا مشکل است، بهتر صورت می‌گیرد و با کاهش گرانوری قیر امکان اجرای سریع و حمل در فولصل طولانی با کاهش تبادل دمایی بین مخلوط‌های آسفالتی و تماس هوای دریافتی به حداقل می‌رسد و کارگران در دمای پائین و سرد با کم شدن ساعات کاری مواجه می‌شوند که باعث ارائه بهتر و با کیفیت و کاهش هزینه‌های اقتصادی و پروژه را به همراه دارد، اشاره نمود. در راستای بیان موارد مطلوب و مزایای آن باید نگرانی پیش آمده از اجرای آسفالت نیمه گرم را نیز بر طرف نمود که شامل شیار شدگی زود رس، کمبود اطلاعات کافی و ارزیابی دقیق برای مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم به دلیل عدم تجربه کافی در این زمینه و نوین بودن آن، مقاومت کم در برابر آب و عملکرد ضعیف آن در برابر مخلوط‌های ریخته شده در دمای پائین تر و بخصوص گران بودن بسیاری از افزودنی‌های آسفالت نیمه گرم و حمل و ساخت آن در محل کارخانه تا به مرحله اجرایی برسد (سیدمحمودی و شهری، ۱۳۹۶؛ بهروزی خواه، ۱۳۹۱).

۵-۲-۲- بازیافت سرد آسفالت

کلیه عملیات تخریب و تراشیدن و برداشتن مصالح لایه‌های آسفالتی که در برگیرنده لایه اساس و زیر اساس و برخی موارد بدون آن می‌باشند بازیافت آسفالت سرد است. پس از برداشتن و حمل مصالح بازیافتی از محل پروژه و سطح جاده‌ها و معابر شهری به کارخانه بازیافت حمل و با مواد قیری و با امولسیون‌های قیری، کف قیر و یا با موادی بدون مصالح از قبیل سیمان، آهک و خاکستر بادی و مصالح سنگی نوین و سنگدانه‌ای در دمای محیط کارخانه پس از حرارت دهی و اختلاط به سازه‌ای با عملکرد مثبت در راه سازی تبدیل می‌شود و به صورت روکش سطحی با توجه شرایط ترافیکی به کار می‌رود و برای لکه گیری‌ها و اصلاح سازه‌ای رویه‌های سطحی با توجه به مقرون به صرفه بودن نسبت آسفالت تازه، هم در مصرف انرژی و حفظ محیط زیست و در نهایت باعث پائین آمدن هزینه‌های کلی در ساخت رویه‌های سطحی آسفالتی و لکه گیری‌های مربوطه می‌شود. از مزایای آن می‌توان به کاهش آلودگی‌های زیست محیطی و حفظ منابع طبیعی و استفاده مجدد و بازگشت دوباره آن به چرخه تولید با شرایطی همچون مقرون به صرفه بودن و انرژی کم در تولید و سهولت اجرا و بهره‌مندی از مصالح سنگی سرد و مرطوب با توجه به شرایط اقلیمی حاکم بر منطقه و افزایش کیفیت روسازی و تثبیت و تقویت آسفالت با مصالح سنگدانه‌ای و افزودن مواد قیری و هیدرولیکی و حذف کردن تمامی ترک‌های انعکاسی و حرارتی که برداشت رویه سطحی و جایگزین کردن آن از بین می‌

1 . Warm Mix Asphalt (WMA)

رود و با توجه به فوریت تبدیل آن به آسفالت سرد بازیافتی امکان حمل و تخلیه و نگهداری به شدت پائین آمده و سرعت در اجرای کار نیز خود باعث پائین آمدن هزینه های بهره برداری و نگهداری بعد اجرا می باشد (سیدمحمودی و شهری، ۱۳۹۶؛ سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، ۱۳۸۵).

۵-۲-۳- باز یافت آسفالت گرم

آسفالت برداشته شده از روسازی جاده ها و معابر شهری با مصالح آسفالتی یا بدون آن طبق نقشه ها و ضوابط اجرایی مصوبی که تعیین شده است به محل کارخانه یا در محل پروژه حمل می شود و پس از خرد و دانه بندی شدن با مواد قیری یا ترکیبات جوان و الیاف های معدنی و مصالح سنگی جدید و آسفالت تازه و گرم تولید و در سطح راه ها و معابر شهری پخش و کوبیده می شود و در مقایسه با بازیافت آسفالت سرد از افزایش مقاومت بالایی برخوردار است و بدون تغییر شکل در ضخامت روسازی و تاب لغزشی است و کلیه آسیب های سطحی را اصلاح می نماید که شامل قیر زدگی و پدیده جدا شدن سنگدانه ها از رویه های آسفالتی و شیارافتادگی بیشتر و جبران ناهمواری هاست. کاهش آلودگی و کمترین مخاطرات زیست محیطی را به همراه دارد و در اصلاح خواص فیزیکی و شیمیایی قیر سخت شده روسازی ها با ترکیبات جوان کننده هماهنگی کامل داشته و به خوبی در سطوح مورد نظر پخش می شود و برای بهبود تاب خستگی و دوام رویه آسفالتی مناسب است (سیدمحمودی و شهری، ۱۳۹۶؛ سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، ۱۳۸۵).

۵-۲-۴- استفاده از امولسیون های قیری در راه سازی

از قیر به عنوان چسباننده خیلی قوی در بسیاری از موارد و پروژه های راه سازی استفاده می شود که بسته به دمای محیط به حالت های جامد و نیمه جامد وجود دارد که به تنهایی آنچنان کارائی هم ندارند اما با حرارت دادن و مخلوط نمودن با قیر و یا امولسیون های قیری و دیگر افزودنی های مجاز قابل استفاده در جاده ها و معابر شهری در روسازی خواهد بود. استفاده از امولسیون های قیری که روش جدیدی نیز به حسال نمی آید، در ساخت و نگهداری راه ها و معابر شهری برای بار نخست در اوایل قرن ۲۰ و قبل از آن یعنی در سال های ۱۹۲۰ میلادی نیز از امولسیون های قیری استفاده می شده است که در آن زمان تنها محدود به قیرپاشی و تثبیت گرد و غبار در راه های ارتباطی شنی مورد استفاده قرار گرفته است که از سال ۱۹۵۳ میلادی به بعد با افزودن مواد و امولسیون های قیری گسترش بیشتری یافت که در حال حاضر کلیه راه های ارتباطی داخل کشور با مصرف قیر و ساخت آسفالت به روش سرد و گرم و با کمک گرفتن از الیاف های دیگر و امولسیون ها در اندوهای سطحی و بهسازی کلیه راه ها و تثبیت راه های شنی و زیر ساخت ها و از بین بردن گرد و غبار ناشی از پروژه راه سازی ها به کار می رود و از مزایای آن علاوه بر موارد مطرح شده می توان مواردی را بیان نمود که شامل امان کار بر روی سطوح نمناک و مرطوب بدون از دست دادن خاصیت چسبندگی و صرفه جویی در مصرف انرژی و هزینه ها و ایمنی و کاربرد بیشتر و تنوع و تعدد کار بیشتر با آن و از نظر اقتصادی در مقایسه با قیرهای معمولی کارائی بهتری دارد که آن هم ناشی از عدم حرارت دهی زیاد و خشک نمودن بیش از حد دارد و برخلاف دیگر قیرهای مصرفی و محلول، تنها آب موجود در آن تبخیر می شود و این به نوبه خود باعث کاهش مخاطرات زیست محیطی شده و آلودگی هوا را به کمترین حد ممکن می رساند (سیدمحمودی و شهری، ۱۳۹۶؛ سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، ۱۳۸۵).

۵-۲-۵- آسفالت حاوی پودر لاستیک و مصالح بازیافتی

استفاده از لاستیک های فرسوده ماشین آلات و بازیافت آنها و کاربرد آن در صنعت آسفالت که یکی از معضل ترین عناصر در تخریب محیط زیست می باشند و بازگشت آنها نیز به چرخه تولید متحمل هزینه زیاد و عدم کیفیت محصول تولیدی خواهد بود که با بازیافت آن و تبدیل به پودر لاستیک و به کار گیری آن در مصالح بازیافتی سنگی و حاوی قیر در روسازی جاده ها و معابر شهری کارائی بهتری از خود نشان داده است. فرآیند بازیافت لاستیک های فرسوده به دو صورت خشک و تر بوده که در روش خشک با مصالح سنگدانه ای و قیر و دیگر محلول ها و امولسیون های قیری و دیگر افزودنی ها مخلوط می شود و در روش تر نیز برخلاف روش قبلی پودر لاستیک ها اول با قیر مخلوط می شوند و اصلاح شده و در دمای بالای ۱۸۰ درجه به مدت چند ساعت با هم مخلوط می شوند که این امر در بهبود خواص قیری که در راه سازی ها به کار می رود بهتر است و با افزودن پودر لاستیک خواص جذب انرژی مخلوط های آسفالتی نیز رو به بهبود می رود و بر کیفیت آسفالت ریخته شده تأثیر گذار است و مقدار افزودن پودر لاستیک بر اساس تحقیقات انجام یافته در این زمینه بین ۱۵ تا ۲۰ درصد وزنی مصرف قیر می باشد. از مزایای آن می توان به افزایش عمر روسازی های جاده ای و پائین آمدن هزینه های چرخه تولید و نگهداری را نام برد (سیدمحمودی و شهری، ۱۳۹۶؛ دیبایی، ۱۳۹۱).

انواع مختلفی از ضایعات سرامیکی مانند سرامیک های روزانه، سرامیک های حمام، کاشی و سرامیک و سرامیک های عایق وجود دارد. ضایعات سرامیک استفاده شده از ضایعات کاشی و سرامیک ناشی از تخریب ساختمان ها به دست آمده است که در دسته زباله های جامد ساختمانی قرار می گیرد. سرامیک جمع آوری شده شسته، خشک شده، با سنگ شکن فکی خرد شده، به

صورت خشک الک شده و در اندازه های ۱۰/۵، ۱۳/۱۰ و ۱۶/۱۳ میلی متر برای آماده سازی بعدی مخلوط آسفالتی نگهداری می شود. از سنگدانه درشت بازالت طبیعی به عنوان شاهد با حداکثر اندازه اسمی ۱۳،۲ میلی متر استفاده شد. علاوه بر این، سنگدانه ریز مورد استفاده در مخلوط آسفالت، بازالت طبیعی بود، در حالی که پرکننده مورد استفاده سنگ آهک بود. الیاف مورد استفاده در آسفالت ماستیک سنگی الیاف لیگنین بود. مورفولوژی سنگدانه بازالت و CA در شکل زیر نشان داده شده است.



تصویر ۲: سنگدانه مورد استفاده در آسفالت: (الف) سنگدانه بازالت. (ب) سنگدانه های ضایعات سرمایی خرد شده. مأخذ: Huang, et al., 2020, p.3

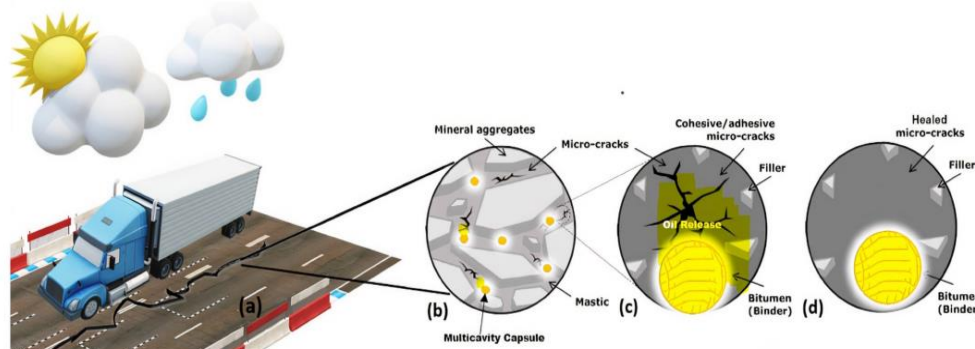
۵-۲-۶- مخلوط آسفالتی با استخوان بندی دانه ای SMA

استفاده از مخلوط های آسفالتی با دانه بندی SMA به قبل از سال ۱۹۶۰ میلادی بر می گردد که محققان کشور آلمان در راستای مقابله با تخریب های ناشی از کاربرد لاستیک های دارای میخ در لاستیک های یخ شکن که آسیب های جدی به راه ها و جاده های شهری می رسانند، به این نتیجه دست یافتند که می توان با استفاده از سنگدانه های SMA و درشت دانه بر دوام و مقاومت نهایی آسفالت ریخته شده افزود. مخلوط آسفالتی با استخوان بندی دانه ای SMA متشکل از قیر و فیلر پر شده است که نوعی دانه بندی میان تهی هم خوانده می شود. روش اجرای آن بدین صورت بود که ابتدا مخلوط قیر پاشیده می شد و سپس فیلر به صورت گرم و پشت سر آن نیز مخلوط درشت دانه ای و یا SMA پاشیده می شد و غلتک زنی بر روی آن شروع می شد که از ترکیب ۷۰ درصد دانه بندی درشت یا SMA و ۱۰ درصد ماسه شکسته و خرد شده و ۱۲ درصد فیلر پر کننده و در نهایت ۸ درصد قیر تشکیل می شد. استفاده از این سنگدانه ها با توجه به نرم بودن آنها و قیر مصرفی در برابر شیار شدگی و دیگر خرابی های آسفالتی مقاومت خوبی از خود نشان داده و راه های با بار ترافیکی زیاد و سنگین با عمر مفید بالا مورد استفاده قرار گرفت که بعدها در دهه ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ میلادی به کشورهای اسکاندیناوی و آمریکا و... راه یافت و در پروژه های متعددی مورد استفاده قرار گرفت. از مزایای آن می توان به مواردی همچون طول عمر بالا، عدم تغییر شکل، مقاوم در برابر ترک خوردگی ها با افزایش قیر مصرفی، قابلیت استفاده در تمامی راه های ارتباطی به دلیل تحمل بار ترافیکی بالا و سنگین و دوام مطلوب در برابر سایش های ایجاد شده و عدم پاشش آب در هنگام رانندگی ها و موقع باریدن باران به علت درشت و زبر بودن سنگدانه های مصرفی و کاهش در خور توجه در آلودگی های صوتی و سر و صدای به وجود آمده از تردد وسائط نقلیه و عبور چرخ ماشین آلات (سیدمحمودی و شهری، ۱۳۹۶؛ Blazejowski, 2011؛ Taylor & Francis Group, 2011).

۵-۲-۷- خود ترمیم آسفالت با جوان کننده محصور شده در سطوح مختلف

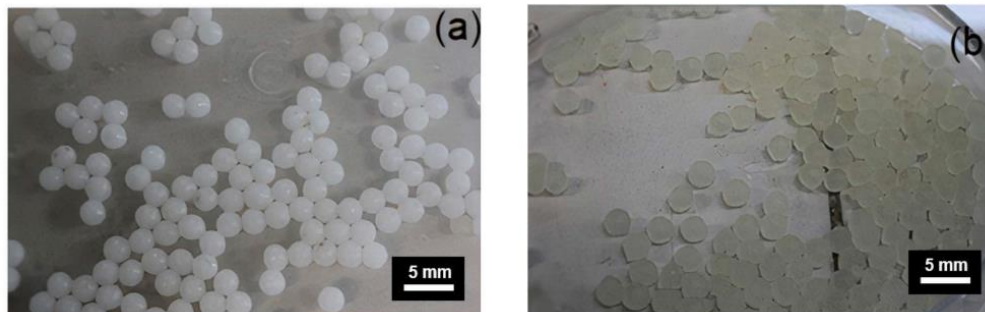
جوان کننده ها می توانند خواص بکر قیر را بازیابی کنند و ترکیبات فرار را برای بازگرداندن نسبت آسفالتین به مالتن اصلی القا کنند. (Zargar et al., 2012, pp.234-25; Boyer & Engineer, 2000). چندین روغن گیاهی و روغن معدنی توسط محققان برای جوان سازی آسفالت قدیمی استفاده شده است (Ji et al., 2017; Zhang et al., 2017). این روغن ها و جوان کننده ها دارای خواصی برای بهبود خواص از دست رفته قیر هستند (Mirhosseini et al., 2019; Pradhan & Sahoo, 2020). با این حال، جوان کننده ها ممکن است مقاومت برشی را کاهش داده و وقتی روی سطوح اعمال می شوند، محیط را آلوده کنند. در مطالعات اخیر نشان داده شده است که استفاده از جوان کننده های تعبیه شده در مخلوط آسفالت در خود ترمیم آسفالت نسبت به استفاده از روش های سنتی جوان کننده های سطح مفیدتر است (García et al., 2010, pp. 603-611). افزایش جریان قیر برای پر کردن ترک های ماتریس آسفالت ضروری است. بنابراین، محققان فناوری های ترمیم ترک در محل را ابداع کردند که زه کشی قیر را به داخل ترک ها بهبود می بخشد. گرمایش القایی یا میکروویو شامل ترکیب مواد رسانا در آسفالت بود تا میدان های الکترومغناطیسی برای تولید گرما در روسازی استفاده شود که باعث انبساط قیر و پر کردن شکاف ها می شد (Apostolidis et al., 2016, pp. 9-25). تصویر زیر تکنیک دوم را نشان می دهد که جوان کننده های بسته بندی شده در ساختار پوسته را در مخلوط آسفالتی ترکیب می کند. هنگامی که پوسته به دلیل بار ترافیکی شکسته شد، ترکیب فرار (روغن) نشت کرد و در سراسر مخلوط پراکنده شد. در نتیجه، ویسکوزیته قیر اطراف کپسول کاهش یافت، اما محتوای روغن بالا باقی ماند و به قیر اجازه داد آزادانه تر به داخل شکاف ها جریان یابد. این ترکیبات فرار از کپسول ها خارج می شوند و به قیر همراه

اجازه می دهند تا شکاف ها را نرم کرده و ببندند. هیچ الزامی برای اختلاط مجدد برای قیر جوان وجود ندارد، زیرا این قیر زودتر عمل می کند و بر تسریع فرایند ترمیم شکستگی در محل در روسازی آسفالت تمرکز می کند. با وجود اینکه شکستگی ها ترمیم شده اند، کاهش قابل توجهی نیز در نظر گرفته می شود و از ایجاد ترک های جدید جلوگیری می شود.



تصویر ۳: خود ترمیم آسفالت با جوان کننده محصور شده در سطوح مختلف. (الف) ترک های ایجاد شده در روسازی به دلیل بار ترافیکی و عوامل محیطی؛ (ب) کپسول های چند حفره ای حامل جوان کننده موجود در مخلوط ترک که منجر به آزاد شدن جزئی جوان کننده در ناحیه ترک می شود. (ج) جوان کننده از کپسول ها خارج می شود و در ترک ها پخش می شود و خواص قیر آسیب دیده را بازیابی می کند. (د) ریز ترک ها را بهبود بخشید و قیر را جوان سازی کرد. مأخذ: Zain Ul Abadeenet al., 2022, p.2

جوان کننده های کپسوله شده در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد با تهیه امولسیون آلژینات سدیم با آب و روغن در دور ۴۰۰ به مدت ۱۰ دقیقه تولید شدند. برای تهیه یک دسته امولسیون از آلژینات سدیم (۲٪ وزنی)، روغن آفتابگردان (۲۰ گرم) و آب (۸۰ گرم) استفاده شد. محلول کلرید کلسیم (۲٪ w/v) در یک فلاسک تهیه شد و امولسیون $C_6H_9NaO_7$ در قیف قطره ای قرار گرفت. قطرات امولسیون $C_6H_9NaO_7$ از طریق فرآیند ژل شدن یونی در محلول $CaCl_2$ همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، به جوان کننده محصور شده تبدیل شدند. کپسول ها جمع آوری، تخلیه و برای استفاده در مخلوط آسفالتی خشک شدند. شکل زیر کپسول های تخلیه شده را نشان می دهد که از محلول کلرید کلسیم خارج شده و با خشک کردن آنها در فر در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت به کپسول های خشک تبدیل شده اند.



تصویر ۴: (الف) کپسول های ریخته شده و (ب) کپسول های خشک شده، مأخذ: Zain Ul Abadeenet al., 2022, p.5

۵-۳- ویژگی ها و موارد استفاده از الیاف آسفالتی در جاده ها و معابر شهری

آسفالت الیافی HMA: مخلوط آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه ای مخلوط با دانه بندی میان تهی و مقدار زیاد سنگدانه های ریز و درشت؛

مسلح سازی با الیاف کورتا؛

- SMA
- Micro Surfacing (قیر ۲۰٪ + سنگدانه ۸۰٪ + لاتکس)؛
- Slurry Seal (بدون لاتکس)؛
- SAMI (Stress Absorbing Membrane)
- Chip Seal

آسفالت الیافی SMA: مخلوط آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه ای مخلوط با دانه بندی میان تهی و مقدار زیاد سنگدانه های درشت می باشد.

با توجه به یافته‌های تحقیق می‌توان از ویژگی‌ها و موارد استفاده از الیاف آسفالتی در جاده‌ها و معابر شهری موارد زیر را نام برد:

- سهولت استعمال و کاربرد؛
- تولید طول الیاف مناسب با سنگدانه (آب و هوای سردتر با طول الیاف کوتاه تر ۱۹ - ۵/۱۲ میلی متر)؛
- نداشتن مشکلات حمل و انبار؛
- کنترل و کاهش از به وجود آمدن و جلوگیری از گسترش کامل ترک به دلیل ژئومتری و مدول الاستیسیته بالا؛
- عدم تغییر مراحل عملیات اجرا و عدم تغییر مشخصات طرح آسفالت؛
- جذب انرژی بسیار بالای الیاف به منظور مصرف در آب و هوای گرم و سرد؛
- امکان روکش‌های نانویی الیاف به منظور جلوگیری از خرابی‌های رطوبتی فیزیکی ناشی از بخارات آب؛
- صرفه اقتصادی و کاهش هزینه؛
- کاهش ضخامت با افزایش مدول بر جهندگی و فتیک به همراه تغییر سایز مصالح و طرح اختلاط به صورت نسخه پیچی شده و تعیین اهداف و انتظارات مشخص با در نظر گرفتن رئولوژی (سیالیت)، شکست، خرابی، بار ترافیکی و شرایط آب و هوایی به همراه افزایش طول عمر آسفالت (Life cycle)؛
- اصلاح و ارتقاء کیفی خصوصیات پلاستومری و الاستومری قیر؛
- کاهش CO2 و دوستدار محیط زیست Eco - friendly؛
- مسلح کننده سه بعدی و ضد آتش Flame retardant؛
- مقاومت سایشی بسیار بالا و بدون خوردگی و نیز عاری از مواد خطرناک و آلاینده؛
- عدم تغییر تجهیزات کارخانه آسفالت؛



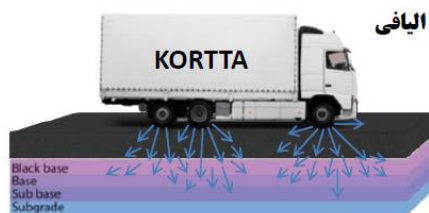
تصویر ۷: الیاف آسفالتی، برای آسفالت لکه گیری کلیه دماها (PAT Blend for HOT/COLD PATCH)، مأخذ: www.sirjannano.com



تصویر ۶: الیاف آسفالتی، برای آسفالت گرم دمای مخلوط ۲۰۰ - ۱۲۰ درجه سانتی گراد (HMA Blend for HOT MIX ASPHALT)، مأخذ: www.sirjannano.com



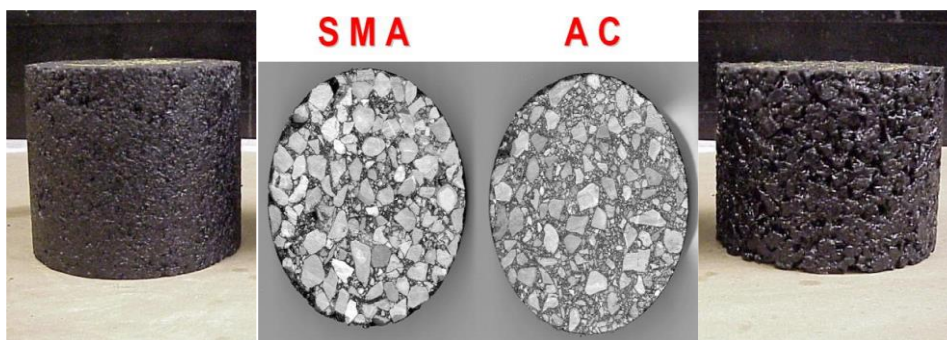
تصویر ۵: الیاف آسفالتی، برای آسفالت نیمه گرم دمای مخلوط ۱۰۰ درجه سانتی گراد و بالاتر (WMA Blend for WARM MIX ASPHALT)، مأخذ: www.sirjannano.com



تصویر ۹: آسفالت الیافی، توزیع تنش و نیروها توسط الیاف میکرو دوجزئی و پارا آراماید در سرتاسر لایه آسفالت مسلح شده = کاهش تنش‌ها و ترک خوردگی، مأخذ: www.sirjannano.com



تصویر ۸: آسفالت معمولی، ورود نیروها به درون لایه آسفالتی و لایه‌های زیرین = ایجاد تنش و ترک خوردگی، مأخذ: www.sirjannano.com



تصویر ۱۰: مقایسه آسفالت معمولی و الیافی با دانه بندی متفاوت، مأخذ: www.sirjannano.com

جدول ۱: ارزیابی مقایسه ای با سایر فناوری ها، مأخذ: نگارنده، ۱۴۰۱

فناوری	آسفالت مسلح شده با الیاف نانو	آسفالت پلیمری	آسفالت نیمه گرم
نام افزودنی	آسفالت الیافی HMA، آسفالت الیافی SMA، الیاف کورتا- مرکب پاراآراماید و دو جزئی مدول و مقاومت بالا و پلی الفین میکرو و فیبرله شده	پلیمر استایرن بوتادین استایرن SBS	اصلاح کننده هیدروکربن آلفاتیک(واکس های پارافینی)
مقدار مصرف بهینه	۰/۵ کیلوگرم در هر تن آسفالت	۵ درصد وزنی قیر	۳ - ۲ درصد وزنی قیر
عملکرد افزودنی	- افزایش مقاومت در برابر شیار افتادگی، - افزایش عمر ترک خوردگی خستگی، - افزایش مقاومت در برابر ترک های حرارتی، - افزایش مقاومت در برابر ترک انعکاسی و گسترش ترک، - افزایش مقاومت کششی آسفالت، - افزایش مدول و سفتی آسفالت، - کاهش خرابی های رطوبتی مکانیکی، - کاهش خرابی های رطوبتی فیزیکی در صورت نسخه پیچی شده الیاف پوشش دار نانویی هیدروفوبیک و هیدروفوبیک،	-	- افزایش مقاومت در برابر شیار افتادگی، - افزایش عمر ترک خوردگی خستگی، - کاهش پیر شدگی اکسیداسیون قیر،
	مثبت	منفی	مثبت
جنبه های مثبت و جنبه های منفی	- قابلیت اختلاط یکنواخت و کامل در میکسر کارخانه آسفالت در زمان کوتاه، - عدم نیاز به کنترل وزن به طور بسته بندی شده و حذف خطای توزین، - عدم تغییر مشخصات طرح آسفالت و تجهیزات کارخانه آسفالت و تاثیر ناچیز بر و عملیات پخش و تراکم، - کاهش ضخامت لایه آسفالتی (کاهش ضخامت با افزایش مدول بر جهندگی و فتیک به همراه تغییر سازه مصالح و طرح اختلاط به صورت نسخه پیچی شده و تعیین اهداف و انتظارات مشخص با در نظر گرفتن رتولوژی (سیالیت)، شکست، خرابی، بار ترافیکی و شرایط آب و هوایی به همراه افزایش طول عمر آسفالت Life cycle - قیمت مناسب و اصلاح کننده فیزیکی - پلیمری، - کاهش CO2 و دوستدار محیط زیست Eco - friendly - مسلح کننده سه بعدی و ضد آتش Flame retardant	- نیاز به میکسر قیر و افزودنی، - جدا شدن فازی قیر و پلیمر در دماهای بسیار بالای تولید و اجرای آسفالت، - افزایش ویسکوزیته قیر و در نتیجه افزایش دمای اختلاط و تراکم آسفالت، - کاهش امکان اجرای آسفالت در روز های سرد سال و کاهش فواصل حمل آسفالت، - افزایش زیاد سفتی و در نتیجه کاهش میزان تراکم پذیری آسفالت، - شرایط اجرایی دشوار و افزایش هزینه ها و اصلاح کننده شیمیایی و پلیمری،	- نیاز به دوزینگ پمپ و توزیع یکنواخت و اختلاط کامل قیر با ساسوبیت، - کاهش دمای اختلاط و تراکم آسفالت و در نتیجه کاهش هزینه های اجرا، - افزایش امکان اجرای اسفالت در روز های سرد و افزایش فاصله حمل، - کاهش آلودگی گاز CO2 و بخارات قیر افزایش تراکم پذیری در طی پروسه پخش آسفالت، - امکان کلوخه شدن در زمان میکس، - اصلاح کننده شیمیایی و پلیمری،

۶- نتیجه گیری

آسفالت به صورت کلی به سه دسته آسفالت گرم و سرد و حفاظتی تقسیم می شود. آسفالت به ماده ای گفته می شود که سیاه رنگ و چسبناک بوده و به علت چسبندگی زیادی که دارد عایق خوبی برای رطوبت نیز هست. این ماده شبه جامد ترکیبی از مخلوط شن و ماسه و ماده سیاه رنگ به نام قیر است. آسفالت الیافی SMA مخلوط آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه ای مخلوط با دانه بندی میان تهی و مقدار زیاد سنگدانه های درشت می باشد و آسفالت الیافی HMA نیز با مخلوط آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه ای مخلوط با دانه بندی میان تهی و مقدار زیاد سنگدانه های ریز و درشت درست شده است. کاهش و تاخیر (بهبود و جلوگیری از گسترش) عریان شدگی در زمان استفاده از سنگدانه های مخلوط آسفالتی و خرابی رطوبتی فیزیکی و مکانیکی و شرایط آب و هوایی از جمله مزایای استفاده از الیاف های آسفالتی می باشد که به صورت آسفالت الیافی HMA، آسفالت الیافی SMA، الیاف کورتا، مرکب پارا آراماید و دو جزئی مدول و مقاومت بالا و پلی الفین میکرو و فیبرله شده هستند، که بیشترین کاربرد را دارند. می توان چنین بیان نمود که با افزایش ادغام ضایعات سرامیکی، و دیگر مصالح بازیافتی در آسفالت، مقدار آسفالت بهینه و مقدار جریان آسفالت ماستیک سنگی به تدریج افزایش یافت، در حالی که پایداری و چگالی مارشال آسفالت ماستیک سنگی به تدریج کاهش یافت. استفاده از انواع روسازی های آسفالتی باید با در نظر گرفتن شرایط محیطی و ترافیکی و به کارگیری و امکانات و تجهیزات محل مصرف پیش بینی گردد که هر یک به نوبه خود دارای معایب و مزایاهایی هستند که باید در اجرا به آنها توجه کافی نمود تا بعد اجرا با مواردی همچون تعمیر، ترمیم و نگهداری بعد اجرا مواجه نباشیم که این امر در بهبود شرایط فنی و نگهداری و هزینه های پائین با توجه به مقرون به صرفه بودن برخی از انواع روسازی های آسفالتی می تواند به شهرداری ها کمک شایانی نماید. با کاربرد مخلوط های آسفالتی نیمه گرم بسته به شرایط محیطی می توان در مصرف انرژی و هزینه ها شاهد کاهش چشمگیری بود که با توجه اینکه در دمای پائین مخلوط صورت می گیرد، علاوه بر کارایی بیشتر موجب افزایش دوام و کیفیت و سرعت اجرا و افزایش فصل کاری را نیز به همراه داشته باشد. افزایش استفاده از قیرهای امولسیون و حاوی پودر لاستک و جوان کننده ها و دیگر محصولات و افزودنی های مجاز دیگر می تواند در جلوگیری از نشت بیش از مواد نفتی به سفره های آب زیر زمینی کمک کند و به عنوان اندوذهای سطحی و حفاظتی به کار رود و روسازی جاده ها و معابر شهری را در برابر ترک خوردگی ها و خرابی های متداول پیش آمده ایمن سازد و عمر روسازی ها را افزایش داده و هزینه چرخه عمر نیز کاهش پیدا کند که بر اساس یافته های تحقیق و مباحث مطرح شده می توان به مقایسه روش های نوین روسازی معابر بر اساس آن یافته پرداخت و راهکارهای مناسب را ارائه داد.

جدول ۲: مقایسه روش های نوین روسازی معابر، مأخذ: نگارنده، ۱۴۰۱

روش روسازی معابر	مزایای ساخت و اجرا	معایب ساخت و اجرا	مزایای نگهداری	معایب نگهداری
آسفالت نیمه گرم	- پیر شدگی کمتر قیر در فرآیند ساخت مخلوط - امکان احداث کارخانه تولید آسفالت در نزدیکی مناطق شهری به واسطه آلودگی کمتر - کارپذیری راحت به واسطه کاهش گرانی قیر - امکان اجرا در هوای سرد - امکان حمل در فواصل طولانی تر به دلیل کاهش تبادل دمایی بین مخلوط و هوا - کاهش زمان سرد شدن مخلوط و امکان خدمت دهی در ساعات اولیه پس از ساخت - بهبود شرایط کاری برای کارگران - به دلیل قیمت کمتر تراشه نسبت به سنگ دانه های طبیعی، استفاده از این ماده از نظر اقتصادی نیز توجیه پذیر است.	- کمبود داده های میدانی برای ارزیابی عملکرد طولانی مدت مخلوط های آسفالتی به دلیل نوظهور بودن این فن آوری - نامناسب بودن خواص فیزیکی و مکانیکی برخی مخلوط های نیمه گرم نسبت به مخلوط های گرم - گران بودن برخی افزودنی های آسفالت نیمه گرم یا هزینه بر بودن برخی اصلاحات در کارخانه ساخت آسفالت - نیاز به افزایش زمان اختلاط در برخی روش ها	- با توجه به کاهش حرارت تولید، پیرشدگی کمتری در قیر پدید می آید	- شیار شدگی زودرس - افزایش پتانسیل عریان شدگی به دلیل وجود رطوبت در سنگ دانه ها با قیر - دوام کم مخلوط در مجاورت آب - عملکرد نسبتاً ضعیف تر مخلوط در دماهای پایین
	- حفظ منابع طبیعی از طریق استفاده مجدد از مصالح موجود - کاهش و جلوگیری از آلودگی زیست محیطی - صرفه جویی در مصرف انرژی - امکان استفاده از مصالح سنگی سرد و مرطوب - امکان استفاده و اصلاح مصالح سنگی	- ایجاد اختلال در جریان ترافیک در حین اجرا - این روش برای روسازی های با ضخامت کم و ظرفیت سازه ای ضعیف قابل استفاده نمی باشد. - چنانچه روسازی قدیم ترک خورده باشد و قطعات ترک خورده به یکدیگر نزدیک باشند با ابعاد آن ها از فاصله	- تأمین اهداف بهسازی - افزایش کیفیت روسازی با حفظ رقوم پروژه و بدون افزایش ضخامت روسازی - عدم نیاز به احداث راه دسترسی و انحرافی از طریق باز نگه داشتن راه بر روی استفاده کنندگان	-

آسفالت بازیافتی سرد

لایه های غیر چسبنده روسازی با دامنه خمیری زیاد
- تثبیت و تقویت مصالح دانه ای و غیر آسفالتی روسازی از طریق افزودن مواد قیری و یا هیدرولیکی و یا ترکیب هردو
- عدم نیاز به محل تخلیه و انبار کردن مواد زائد
- سرعت اجرای طرح
- در برخی موارد عرض راه، ضخامت لایه های روسازی، رقوم خط پروژه و وجود مستحذات مختلف در اطراف محور موجود. محدودیت هایی به وجود می آورد که عملاً احداث راه جدید به معنای تخریب کامل راه موجود و ایجاد قشرهای جدید در محل راه قدیمی خواهد بود. در چنین شرایطی استفاده از روش بازیافت سرد درجا راه حل مناسبی برای فائق آمدن بر مشکلات فوق محسوب می شود.

میان ناخن های دستگاه بازیافت کمتر باشد امکان اینکه بتوان آن ها را به اندازه های مناسب و یکنواخت خرد کرد و در نتیجه دانه بندی حاصل از روند خرد کردن مصالح همگن باشد وجود ندارد.
- برای بازیافت سرد، طرح های با مساحت کم مقرون به صرفه نیست. این طرح ها باید از نظر امکان سنجی و ایجاب مطالعه شود.
- تغییر عرض اجرای عملیات در حین بازیافت سرد درجا عملی نمی باشد ضمن آنکه توصیه هم نمی شود زیرا با وسایل و تجهیزاتی که نوعاً در این فرآیند مورد استفاده قرار می گیرد نمی توان تقاطع ها، ورودی ها و خروجی ها، فواصل و سطوح کم و بیش کوتاه و کم عرض موجود در مسیر را به سهولت با روش بازیافت سرد درجا بهسازی نمود.

- حذف کلیه ترک های انعکاسی و حرارتی روسازی
- کاهش مخارج بهره برداری و نگهداری راه

آسفالت بازیافتی گرم

- کاهش آلودگی زیست محیط باز منظر کاهش تولید ضایعات و مواد زائد و عدم نیاز به محل تخلیه برای این مواد و همچنین مصرف بخش عمده ای مصالح سنگی و مواد قیری روسازی قدیمی در روسازی جدید و حفظ منابع طبیعی
- اصلاح آسیب دیدگی های سطحی شامل قیر زدگی، پدیده جدا شدن سنگ دانه ها از رویه آسفالتی، شیارافتادگی، ناهمواری ها و تغییر شکل ها
- ثابت نگه داشتن رقوم سطح راه و یا تغییر جزئی این رقوم و در نتیجه سازگاری با شرایط هندسی راه
- صرفه جویی در هزینه و انرژی و افزایش سرعت اجرای عملیات
- افزایش توان سازه ای راه
- مرمت ترک های انعکاسی و انقباضی با شدت متوسط
- اصلاح تغییر شکل طولی و عرضی شامل شیار افتادگی و موج های ایجاد شده در جهت حرکت وسایل نقلیه، اصلاح شیب عرضی زهکشی سطحی
- مرمت ترک های ناشی از بارگذاری و ترک های حرارتی با شدت خیلی کم
- احیاء قیر اکسید شده آسفالت موجود با مصرف جوان سازه ها بدون افزایش قیر آسفالت
- مرمت ترک های لغزشی
- اصلاح تاب لغزشی و قیرزدگی
- اصلاح دانه بندی و افزایش کیفیت آسفالت

- ایجاد اختلال در جریان ترافیک در حین اجرا
- آلودگی زیست محیطی ناشی از گرم کردن مصالح آسفالتی و تولید گازهای سرطان زا

- افزایش مقاومت روسازی بدون تغییر و یا تغییر جزئی در ضخامت روسازی
- افزایش تاب لغزشی
- اصلاح خواص فیزیکی و شیمیایی قیر سخت شده موجود روسازی با جوان سازها و انطباق آن با مشخصات قیر خالص و در نتیجه افزایش دوام رویه آسفالتی و بهبود تاب خستگی آن
- کاهش حساسیت ناشی از یخبندان لایه های غیر آسفالتی روسازی
- مرمت ترک های طولی و عرضی ناشی از بارگذاری با شدت کم
- مرمت و اصلاح معایب و آسیب دیدگی های سطحی

- حذف موقت ترک های انعکاسی
- احتمال به وجود آمدن آثار ناشی از سوختگی قیر در مرحله پیش گرم کردن و تخریب زود هنگام روسازی ناشی از این سوختگی

آسفالت

- آسفالت های حفاظتی که به طور مناسب ساخته شده اند از نظر اقتصادی مقرون به صرفه بوده و بادوام می باشند
- امکان اجرای آسفالت حفاظتی در هوای سرد
- تطابق بیشتر با محیط زیست و آلاینده گی کمتر هوا

- معمولاً آسفالت سطحی تک لایه ای پس از اجرا در حدود یک ماه شرایط هوایی گرم نیاز دارد تا ذرات مصالح سنگی به طور مناسبی قرار گرفته و کاملاً در غشای قیری فرو روند
- احتمال کاهش پوشش مصالح سنگی

- آسفالت حفاظتی سطح راه را آبدی و عمر آن را طولانی می کند
- آسفالت حفاظتی سطح راه را آب بندی و عمر آن را طولانی می کند
- آسفالت حفاظتی اگر بجا و صحیح مورد استفاده قرار گیرد، می تواند سطحی با کیفیت قابل قبول برای راه تأمین نماید

- آسفالت حفاظتی را نمی توان از نقطه نظر سازه ای به عنوان سازه باربر در نظر گرفت
- احتمال خسارت ناشی از پرتاب مصالح سنگی کننده شده از آسفالت حفاظتی تک لایه که در غشای قیری فرو نرفته اند.

امولسیون			- آسفالت سطحی مقاومت باربری را اندکی افزایش می‌دهد - در آسفالت های چند لایه ای به دلیل اینکه اندازه مصالح سنگی لایه دوم کوچک تر می باشند، احتمال کنده شدن ذرات مصالح سنگی به مقدار زیادی کاهش می یابد - آسفالت حفاظتی در برابر سایش ناشی از آلودشد وسایل نقلیه مقاومت کرده، پوشش نفوذپذیری را برای لایه های زیرین فراهم می آورد.
آسفالت حاوی پودر لاستیک	- عملکرد بهتر نسبت به مخلوط های آسفالتی معمولاً در برابر شیار شدگی، خستگی و ترک های برودتی - استفاده مطلوب از مواد ضایعاتی	- امکان بروز مشکل و گرفتگی مجاری عبور قیر در کارخانه های آسفالتی - عدم وجود منابع مکتوب آیین نامه ای - عدم وجود تجربه کافی برای کنترل کیفی پخش و تراکم - هزینه اختلاط پودر لاستیک در فرآیند اصلاح تر به سبب دمای بالا و زمان مورد نیاز	- استفاده از آسفالت های پودر لاستیکی در صورت طراحی و اجرای درست می تواند عمر روسازی را به میزان زیادی افزایش و هزینه های چرخه عمر آسفالت را کاهش دهد.
مخلوط آسفالتی HMA, SMA	- مقاومت بیشتر در برابر بارهای ترافیکی سنگین	- الزام استفاده از افزودنی جهت افزایش قوام قیر و جلوگیری جدایی قیر از سنگ دانه - آشنا نبودن کارخانه های آسفالت با طرح اختلاط مخلوط های SMA, HMA - حساسیت بیشتر به نحوه و میزان تراکم	- طول عمر مفید بیشتر نسبت به دیگر مخلوط های آسفالتی - مقاومت بسیار بالا در برابر تغییر شکل - مقاومت بیشتر در برابر ترک های خستگی، به علت وجود قیر بیشتر در مخلوط - دوام خیلی خوب در برابر سایش حاصل از تردد وسایل نقلیه به سبب وجود سنگ دانه های درشت در ترکیب مخلوط - وجود بافت درشت زبر که باعث جلوگیری از پاشش آب از زیر چرخ وسایل نقلیه عبوری در زمان بارندگی می شود - کاهش آلودگی صوتی و سروصدای ناشی از عبور چرخ

منابع

۱. افلاکی، ساسان؛ (۱۳۸۷)، بررسی انطباق پذیری قیر های ایران با روش رده بندی بر اساس عملکرد و تولید قیر های منطبق، تهران، دانشگاه صنعتی شریف.
۲. بهروزی خواه، عبدالحمید؛ (۱۳۹۱)، بررسی تأثیر افزودنی های آسفالت نیمه گرم و پودر لاستیک بر خستگی نمونه های آسفالت بازیافتی، تهران، دانشگاه تهران.
۳. حاج محمدرضایی، عباس؛ (۱۳۷۷)، راه و آسفالت، تهران: نشر آدنا.
۴. دیبایی، محمد مهدی؛ (۱۳۹۱)، بررسی تأثیر افزودنی های مختلف قیر بر عملکرد مخلوط آسفالتی، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

۵. دبیر خانه مجمع جهانی راه؛ ترجمه: کیون بمانا؛ (۱۳۸۵)، مخلوط های آسفالتی با مقاومت بالا در برابر شیارشدگی، ناشر: وزارت راه و ترابری، معاونت آموزش تحقیقات و فناوری، پژوهشکده حمل و نقل، تهران.
۶. زیاری، حسن؛ (۱۳۸۵)، راهنمای کاربردی آزمایش های قیر و آسفالت، تهران: انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.
۷. سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور؛ (۱۳۸۵)، مشخصات فنی اجرایی بازیافت سرد آسفالت، تهران، دفتر تدوین و معیارها و کاهش خطر پذیری ناشی از زلزله، معاونت امور فنی، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، ص ۲۲۹.
۸. سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور؛ (۱۳۸۵)، مشخصات فنی اجرایی بازیافت گرم آسفالت، تهران، دفتر تدوین و معیارها و کاهش خطر پذیری ناشی از زلزله، معاونت امور فنی، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، ص ۲۴۱.
۹. سازمان مدیریت و برنامه ریزی؛ (۱۳۸۱)، دستورالعمل استفاده از امولسیون های قیری در راه سازی، تهران، سازمان مدیریت و برنامه ریزی، ص ۲۰۷.
۱۰. سید محمودی؛ سیدرضا؛ شهری، رضا؛ (۱۳۹۶)، بررسی و مقایسه روش های نوین روسازی معابر شهری با آسفالت از جنبه شرایط به کارگیری، اجرا و نگهداری آن، مجله نخبگان علوم مهندسی، جلد دوم، شماره ۹.
۱۱. معاونت نظام راهبردی وزارت راه و شهرسازی؛ (۱۳۹۰)، آیین نامه روسازی آسفالتی راه های ایران، دفتر نظام فنی اجرایی، موسسه قیر و آسفالت ایران، پژوهشکده حمل و نقل، نشریه شماره ۲۳۴.
۱۲. مرکز مطالعات و برنامه ریزی شهر تهران؛ (۱۳۹۴)، بررسی و مقایسه روش های نوین روسازی معابر، معاونت مطالعات و برنامه ریزی امور زیر ساخت و طرح جامع، تهران، تهیه کننده: ساسان افلاکی، گزارش شماره ۲۹۸.
۱۳. نیازی، یونس؛ عباسی نیشابوری، رامین؛ (۱۳۸۲)، تأثیر نوع فیلر بر خواص مکانیکی و دوام بتن آسفالتی روسازیها، تهران، نشریه دانشکده مهندسی، سال پانزدهم، شماره دوم.
۱۴. نیکی رشیدی، محمد هادی؛ (۱۳۸۸)، آسفالت از تولید تا پخش، تهران: نشر جهاد دانشگاهی.
۱۵. وزارت راه و ترابری - پژوهشکده حمل و نقل؛ (۱۳۸۶)، لکه گیری رویه های آسفالتی، معاونت آموزش، تحقیقات و فناوری (دبیرخانه شورای عالی فنای امور زیربنایی حمل و نقل)، چاپ اول، تهران، انتشارات کانون تفکر.
۱۶. هاشمی پور، جهانپخش؛ مهدوی عادل، مهدی؛ (۱۳۹۶)، ارزیابی علل کاهش عمر لایه های آسفالتی سطوح معابر شهری و ارایه راه حل ها و پیشنهادات (مطالعه موردی شهرستان لالی)، اولین کنفرانس ملی رویکردهای نو در مهندسی عمران، معماری و شهرسازی، خرم آباد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خرم آباد.
17. Apostolidis, P.; Liu, X.; Scarpas, A.; Kasbergen, C.; van de Ven, M. Advanced evaluation of asphalt mortar for induction healing purposes. *Constr. Build. Mater.* 2016, 126, 9–25.
18. Blazejowski, Krzysztof. 2011. *Stone Matrix Asphalt, Theory and Practice*. s.l.: CRC Press Taylor& Francis Group
19. Baliyar Singh, B. Mohanty, F. Sekhar Das, S. Kumar Swain, S. (2020), Graphene sandwiched crumb rubber dispersed hot mix asphalt, *J. Traffic Transp. Eng. (Engl. Ed.)*; 7 (5): 652e667
20. Boyer, R.E.; Engineer, P. Asphalt rejuvenators fact, or fable. *Transp. Syst.* 2000, 58, 11.
21. García, A.; Schlangen, E.; van de Ven, M.; Sierra-Beltrán, G. Preparation of capsules containing rejuvenators for their use in asphalt concrete. *J. Hazard. Mater.* 2010, 184, 603–611.
22. Huang, Q. Qian, Z. Hu, J. Zheng, D. 2020. Evaluation of Stone Mastic Asphalt Containing Ceramic Waste Aggregate for Cooling Asphalt Pavement, *Materials* 2020, 13, 2964; doi:10.3390/ma13132964
23. Ji, J.; Yao, H.; Suo, Z.; You, Z.; Li, H.; Xu, S.; Sun, L. Effectiveness of Vegetable Oils as Rejuvenators for Aged Asphalt Binders. *J. Mater. Civ. Eng.* 2017, 29, D4016003.
24. Rahman, T. Mohajerani, A. Giustozzi, F. 2020, Recycling of Waste Materials for Asphalt Concrete and Bitumen: A Review, *Materials* 2020, 13, 1495; doi:10.3390/ma13071495
25. Mashaan, N.S.; Ali, A.H.; Karim, M.R.; Abdelaziz, M. A, 2014, review on using crumb rubber in reinforcement of asphalt pavement. *Sci. World J.*
26. Mirhosseini, A.F.; Tahami, S.A.; Hoff, I.; Dessouky, S.; Ho, C.-H. Performance evaluation of asphalt mixtures containing high-RAP binder content and bio-oil rejuvenator. *Constr. Build. Mater.* 2019, 227, 116465.
27. Pradhan, S.K.; Sahoo, U.C. Evaluation of recycled asphalt mixtures rejuvenated with *Madhuca longifolia* (Mahua) oil. *Int. J. Pavement Res. Technol.* 2020, 14, 43–53.
28. Salama, H.K., Chatti, K., Lyles, R.W., 2006. Effect of heavy multiple axle trucks on flexible pavement damage using in-service pavement performance data. *Journal of Transportation Engineering* 132 (10), 763e770.
29. Sikdar, P.K., Jain, S.S., Bose, S., et al., 1999. Premature cracking of flexible pavements. *Journal of Indian Roads Congress* 60 (3), 355e398.

30. Taylor & Francis Group, 2011, Stone Matrix Asphalt, Theory and Practice CRC Press
31. Zain Ul Abadeen, A. Hussain, A. Sathish Kumar, V. Murali, G. Ivanovich Vatin, N. Riaz, H. 2022, Comprehensive Self-Healing Evaluation of Asphalt Concrete Containing Encapsulated Rejuvenator, Materials, 15, 3672. <https://doi.org/10.3390/ma15103672>
32. Zhang, D.; Chen, M.; Wu, S.; Liu, J.; Amirkhanian, S. Analysis of the Relationships between Waste Cooking Oil Qualities and Rejuvenated Asphalt Properties. Materials 2017, 10, 508.
33. Zargar, M.; Ahmadiania, E.; Asli, H.; Karim, M.R. Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen. J. Hazard. Mater. 2012, 233–234, 254–258.
34. <https://sepidbamalborz.ir/>
35. <https://fa.wikipedia.org>
36. www.sirjannano.com