فصلنامه علمی تخصصی مطالعات طراحی شهری و پژوهش‌های شهری
سال نهم، شماره۲ (پیاپی: ۳۷)، ویژه نامه بهار ۱۴۰۵
ISSN: 2645-4424

ارزیابی تأثیر مصالح نوین آسفالتی بر کاهش ترک‌خوردگی و افزایش عمر روسازی معابر شهری

محسن عباسی[۱]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۲۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۵
کد مقاله: ۷۴۳۷۰

چکـیده

روسازی‌های آسفالتی در معابر شهری به دلیل افزایش روزافزون حجم ترافیک، بارهای محوری سنگین و نوسانات شدید اقلیمی، با خرابی‌های زودرس به‌ویژه انواع ترک‌خوردگی‌های خستگی، حرارتی و انعکاسی مواجه هستند. با توجه به محدودیت‌های عملکردی قیر خالص و هزینه‌های هنگفت ترمیم و نگهداری، جایگزینی آسفالت سنتی با مخلوط‌های نوین ضرورتی انکارناپذیر در مدیریت شهری است. پژوهش حاضر با رویکردی توصیفی–تحلیلی و بر پایه مطالعات کتابخانه‌ای، به واکاوی نقش مصالح نوین شامل اصلاح‌کننده‌های پلیمری مانند فناوری نانو (نانوسیلیکا و نانورس)، آسفالت‌های الیافی و مواد بازیافتی (پودر لاستیک) در بهبود رفتار مکانیکی روسازی می‌پردازد. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که افزودنی‌های پلیمری و نانومواد با اصلاح ساختار مولکولی قیر و بهبود ویژگی‌های ویسکوالاستیک، مقاومت در برابر ترک‌خوردگی را به طور معناداری ارتقا داده و پیرشدگی قیر را به تأخیر می‌اندازند. همچنین، الیاف با ایجاد مکانیسم پل‌زنی در ماتریس مخلوط، مانع از گسترش ریزترک‌ها شده و پودر لاستیک تایر به عنوان کارآمدترین عامل در جذب انرژی و کنترل ترک‌های انعکاسی شناخته می‌شود. تحلیل‌های اقتصادی–فنی حاکی از آن است که علیرغم افزایش ۲۰ تا ۵۰ درصدی هزینه‌های اولیه تولید، استفاده از این مصالح می‌تواند عمر مفید روسازی را از میانگین ۸ سال به بیش از ۱۵ سال افزایش داده و هزینه‌های کل دوره عمر (LCC) را تا ۳۰ درصد کاهش دهد. در نهایت، ضمن بررسی موانع اجرایی در شهرداری‌ها، پیشنهادهایی جهت اصلاح نظام مناقصات و بومی‌سازی استانداردهای عملکردی ارائه شده است.

واژگـان کلـیدی: آسفالت نوین، ترک‌خوردگی، عمر مفید روسازی، اصلاح‌کننده‌های پلیمری، فناوری نانو، تحلیل اقتصادی.

۱ - مهندسی فناوری معماری-طراحی و نوسازی بافت های فرسوده، دانشگاه علمی کاربردی شهرداری های استان اصفهان

۱- مقدمه

شبکه معابر و شریان‌های حیاتی شهری، زیربنایی‌ترین عنصر توسعه فیزیکی و اقتصادی شهرها محسوب می‌شوند که وظیفه تسهیل تردد و برقراری ارتباط میان بخش‌های مختلف عمرانی را بر عهده دارند. در این میان، روسازی‌های آسفالتی به دلیل سهولت در اجرا، ایجاد سطح رانندگی هموار و هزینه اولیه کمتر نسبت به روسازی‌های بتنی، بیش از ۹۰ درصد پوشش معابر شهری را به خود اختصاص داده‌اند. با این وجود، افزایش حجم ترافیک، بارگذاری‌های سنگین و تکرارشونده، و نوسانات شدید دمایی ناشی از تغییرات اقلیمی، عملکرد روسازی‌های سنتی را با چالش‌های جدی مواجه کرده است. یکی از عمده‌ترین معضلات در مدیریت شهری، وقوع خرابی‌های زودرس در سطح آسفالت است که در میان آن‌ها، «ترک‌خوردگی» به عنوان خطرناک‌ترین پدیده شناخته می‌شود. ترک‌های خستگی ناشی از بارگذاری‌های تکراری و ترک‌های حرارتی ناشی از انقباض و انبساط در دمای پایین، نه تنها کیفیت رانندگی را کاهش می‌دهند، بلکه با فراهم کردن مسیری برای نفوذ آب به لایه‌های زیرین، موجب تخریب کل ساختار روسازی می‌شوند. در محیط‌های شهری، این معضل به دلیل توقف و حرکت‌های مداوم خودروها ، وجود تأسیسات زیرزمینی و فشارهای برشی در تقاطع‌ها، شدت بیشتری می‌یابد که نتیجه آن، تحمیل هزینه‌های گزاف لکه‌گیری و روکش‌های مجدد بر بودجه شهرداری‌هاست.

در دهه‌های اخیر، محدودیت‌های ذاتی قیر خالص و مخلوط‌های آسفالتی معمولی در برابر تنش‌های محیطی و ترافیکی، محققان را به سمت بهره‌گیری از «مصالح نوین» سوق داده است. ورود تکنولوژی‌های پیشرفته به مهندسی عمران، از جمله استفاده از اصلاح‌کننده‌های پلیمری، نانومواد، الیاف مسلح‌کننده و مواد بازیافتی، دریچه‌ای نو به سوی تولید آسفالت‌های با عملکرد بالا گشوده است. این مصالح با اصلاح ساختار مولکولی قیر و بهبود چسبندگی بین سنگ‌دانه و قیر، مقاومت کششی مخلوط را افزایش داده و بدین ترتیب، پتانسیل ترک‌خوردگی را به شکل معناداری کاهش می‌دهند. با توجه به اهمیت پایداری زیرساخت‌های شهری، پژوهش حاضر با رویکردی کتابخانه‌ای و تحلیلی به دنبال واکاوی تأثیر این مصالح نوین بر رفتار مکانیکی روسازی است. هدف اصلی این مقاله، سنتز و تجمیع یافته‌های پژوهش‌های معتبر به منظور ارزیابی دقیق این موضوع است که چگونه جایگزینی افزودنی‌های نوین می‌تواند منجر به تاخیر در شروع ترک‌خوردگی و در نهایت افزایش عمر مفید معابر شهری گردد. تحلیل پیش رو، ضمن دسته‌بندی انواع مصالح نوین، به بررسی اثربخشی هر یک در کنترل خرابی‌ها پرداخته و دیدگاهی جامع برای مدیران شهری و مهندسان راه جهت انتخاب بهینه‌ترین گزینه‌های روسازی فراهم می‌آورد.

۲- دسته‌بندی و تحلیل مصالح نوین در صنعت آسفالت

استفاده از افزودنی‌ها جهت اصلاح خواص قیر و مخلوط‌های آسفالتی، راهکاری کلیدی برای مقابله با ضعف‌های ذاتی آسفالت معمولی است. مصالح نوین با تغییر در ریزساختار قیر، چسبندگی و خاصیت ارتجاعی آن را بهبود می‌بخشند. در ادامه، چهار دسته اصلی این مصالح تحلیل می‌شوند:

۱. اصلاح‌کننده‌های پلیمری

پلیمرها رایج‌ترین افزودنی‌ها برای ارتقای عملکرد قیر در بازه‌های دمایی مختلف هستند. این مواد به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند:

– پلیمرهای الاستومری: شاخص‌ترین عضو این گروه استایرن–بوتادین–استایرن (SBS) است. SBS با ایجاد یک شبکه پلیمری سه بعدی در داخل قیر، خاصیت برگشت‌پذیری کشسانی[1] را به شدت افزایش می‌دهد. طبق مطالعات(آیری[2]، ۲۰۰۳) ، استفاده از SBS باعث می‌شود آسفالت در برابر تغییر شکل‌های ماندگار در دمای بالا مقاوم شده و در دماهای پایین، انعطاف‌پذیری لازم برای جلوگیری از ترک‌خوردگی حرارتی را حفظ کند.

– پلیمرهای پلاستومری: مواد نظیر اتیلن–وینیل–استات (EVA) با افزایش سختی قیر در دماهای عملیاتی، مقاومت فشاری مخلوط را بالا می‌برند. هرچند پلاستومرها به اندازه الاستومرها در بهبود خاصیت ارتجاعی در سرمای شدید موفق نیستند، اما در کاهش پدیده شیارشدگی در معابر شهری پرتردد بسیار موثرند(ژو و همکاران[3]، ۲۰۱۴).

۲. فناوری نانو در روسازی: ورود مواد در مقیاس نانو به صنعت راهسازی، منجر به تحولی در دوام شیمیایی و فیزیکی روسازی شده است:

1 Elastic Recovery
2 Airey
3 Zhu et al

– نانو سیلیکا: این ماده با افزایش ویسکوزیته قیر و بهبود پیوند بین قیر و سنگ‌دانه، مقاومت مخلوط را در برابر عریان‌شدگی و رطوبت ارتقا می‌دهد. محققان در پژوهش‌های خود نشان دادند که نانو سیلیکا می‌تواند عمر خستگی آسفالت را به شکل معناداری افزایش داده و از پیرشدگی زودرس قیر جلوگیری کند.

– نانو رس[1]: نانو رس‌ها با ایجاد ساختار لایه‌ای، مسیر نفوذ اکسیژن به داخل قیر را مسدود کرده و بدین ترتیب مقاومت در برابر پیرشدگی[2] را افزایش می‌دهند. این امر باعث می‌شود آسفالت در طول زمان دیرتر ترد و شکننده شود(گالویاک و همکاران[3]، ۲۰۱۵)

– گرافن و نانو لوله‌های کربنی: این مواد به دلیل مقاومت کششی فوق‌العاده، به عنوان عامل تقویت‌کننده در مقیاس مولکولی عمل کرده و از گسترش ریزترک‌ها جلوگیری می‌کنند.

۳. آسفالت‌های الیافی: الیاف با ایجاد نقش «پل‌زنی» در ساختار مخلوط، از باز شدن ترک‌ها جلوگیری می‌کنند:

– **الیاف شیشه و کربن:** این الیاف دارای مدول الاستیسیته بالایی هستند و مقاومت کششی مخلوط آسفالتی را افزایش می‌دهند. بر اساس مطالعات (ابطحی و همکاران[4]، ۲۰۱۰) الیاف به عنوان یک عامل تسلیح‌کننده عمل کرده و انرژی شکست را در مخلوط بالا می‌برند که نتیجه آن تاخیر در بروز ترک‌های خستگی در معابر شهری است.

– الیاف پلی‌پروپیلن: این الیاف پلیمری با جذب بخشی از تنش‌های کششی، از تمرکز تنش در نوک ترک‌ها جلوگیری کرده و عمر روسازی را در برابر بارهای ترافیکی سنگین افزایش می‌دهند.

٤. استفاده از مواد بازیافتی (پودر لاستیک و پلاستیک): این رویکرد علاوه بر مزایای فنی، دارای ارزش زیست‌محیطی (توسعه پایدار) است:

– پودر لاستیک: استفاده از پودر لاستیک تایر فرسوده در قیر (فرایند تر)، باعث تولید «آسفالت لاستیکی» می‌شود. به اعتقاد (وی و همکاران[5]، ۲۰۱۲) ، این نوع آسفالت به دلیل داشتن خاصیت جذب انرژی بالا، مقاومت بسیار عالی در برابر «ترک‌های انعکاسی» دارد و یکی از بهترین گزینه‌ها برای روکش کردن خیابان‌های قدیمی است.

– پلاستیک‌های بازیافتی: استفاده از پلی‌اتیلن‌های بازیافتی (مثل بطری‌های پلاستیکی) به عنوان اصلاح‌کننده، علاوه بر کاهش آلودگی محیط زیست، منجر به افزایش نقطه نرمی قیر و بهبود مقاومت در برابر شیارشدگی در مناطق گرمسیر می‌شود(کیسی و همکاران[6]، ۲۰۰۸)

۳- واکاوی تأثیر مصالح نوین بر انواع ترک‌خوردگی

خرابی‌های ناشی از ترک‌خوردگی، اصلی‌ترین عامل کاهش عمر خدمت‌دهی روسازی‌های شهری هستند. مصالح نوین با اصلاح ویژگی‌های ویسکوالاستیک قیر و تقویت ماتریس سنگدانه، مکانیسم شکست را تغییر می‌دهند. در این بخش، تأثیر این مصالح بر سه نوع ترک رایج تحلیل می‌شود:

۱. ترک‌های خستگی: ترک خستگی در اثر بارگذاری‌های تکراری ترافیک و ایجاد تنش‌های کششی در زیر لایه آسفالتی رخ می‌دهد. در معابر شهری به دلیل ترافیک سنگین و ایست–حرکت خودروها، این پدیده شدت بیشتری دارد. مصالح نوین، به‌ویژه پلیمرهای الاستومری و الیاف، با افزایش «انرژی شکست» مخلوط، شروع ترک‌خوردگی را به تأخیر می‌اندازند. فخری و غنی‌زاده (۱۳۹۳) در مطالعات خود نشان دادند که استفاده از افزودنی‌هایی مانند SBS و نانوسیلیکا، مدول برشی قیر را در دماهای متوسط بهبود بخشیده و باعث می‌شود مخلوط در برابر خستگی منعطف‌تر عمل کند. الیاف پلیمری نیز با جذب تنش در نوک ریزترک‌ها، از پیوستن آن‌ها به یکدیگر و تشکیل ترک‌های ماکرو جلوگیری می‌کنند. بر اساس پژوهش(ژیائو و همکاران[7]، ۲۰۱۴) ، اصلاح قیر با پودر لاستیک به دلیل خاصیت جذب انرژی فوق‌العاده، عمر خستگی روسازی را تا دو برابر نسبت به آسفالت معمولی افزایش می‌دهد.

1 Nano-Clay
2 Oxidative Aging
3 Galooyak et al
4 Abtahi et al
5 Way et al
6 Casey et al
7 Xiao et al

۲. ترک‌های حرارتی: ترک‌های حرارتی زمانی رخ می‌دهند که دمای محیط به شدت کاهش یافته و تنش‌های کششی ناشی از انقباض، از مقاومت کششی آسفالت فراتر رود. در این حالت آسفالت دچار تردی و شکستگی می‌شود. نقش اصلی مصالح نوین در اینجا، کاهش «دمای شکست» و افزایش قابلیت ارتجاعی در سرمای شدید است. پلیمرهای الاستومری با کاهش سختی قیر در دماهای پایین، به روسازی اجازه می‌دهند تا بدون ترک خوردن، منقبض شود.(ویلا کورتاویتارته و همکاران[1]، ۲۰۲۰) نشان دادند که افزودنی‌های نوین پلیمری، دمای انتقال شیشه‌ای قیر را پایین آورده و از ترد شدگی آن جلوگیری می‌کنند. همچنین نانورس‌ها با بهبود پایداری حرارتی، مانع از تغییرات ناگهانی در ساختار فیزیکی قیر در سیکل‌های یخبندان می‌شوند.

۳. ترک‌های انعکاسی: این ترک‌ها زمانی ایجاد می‌شوند که یک لایه روکش جدید بر روی آسفالت قدیمیِ دارای ترک یا روی دال‌های بتنی اجرا شود؛ ترک‌های لایه زیرین بر اثر حرکت‌های افقی و عمودی به لایه جدید منتقل می‌شوند. یکی از مؤثرترین روش‌های کنترل این خرابی، استفاده از «آسفالت لاستیکی» و «ژئوسنتتیک‌ها» است. خدایی و همکاران (۱۳۸۸) در بررسی‌های خود تأکید کردند که پودر لاستیک به دلیل ایجاد خاصیت الاستیک بالا در قیر، مانند یک لایه میانجیِ جذب‌کننده تنش (SAMI) عمل کرده و از انتقال حرکت ترک به سطح جلوگیری می‌کند. همچنین الیاف شیشه و کربن با ایجاد یک شبکه مسلح‌کننده، مقاومت برشی لایه روکش را در برابر تمرکز تنش افزایش داده و سرعت انتشار ترک‌های انعکاسی را به شدت کاهش می‌دهند(باتلر و کیم[2]، ۲۰۰۲).

۴- ارزیابی افزایش عمر روسازی و تحلیل اقتصادی

یکی از بزرگترین موانع در پذیرش مصالح نوین توسط نهادهای اجرایی، قیمت اولیه بالاتر این مواد در مقایسه با آسفالت سنتی است. با این حال، تصمیم‌گیری مهندسی نباید تنها بر پایه «هزینه ساخت» باشد، بلکه باید «هزینه دوره عمر» را ملاک قرار دهد. در این بخش، توجیه اقتصادی و فنی این مصالح واکاوی می‌شود.

۱. تحلیل دوره عمر و مقایسه طول عمر مفید: در مهندسی روسازی، عمر مفید به بازه زمانی اطلاق می‌شود که در آن شاخص خدمت‌دهی روسازی (PSI) در سطح قابل قبولی باقی بماند. آسفالت‌های سنتی در معابر شهری ایران به دلیل کیفیت پایین قیر و بارهای ترافیکی، معمولاً پس از ۵ تا ۸ سال دچار خرابی‌های جدی (مانند ترک‌های پوست‌سوسماری و شیارشدگی) می‌شوند. در مقابل، استفاده از اصلاح‌کننده‌های پلیمری مانند SBS یا فناوری‌های نانو، با به تأخیر انداختن شروع ترک‌خوردگی، این بازه را به شکل چشم‌گیری افزایش می‌دهند. بر اساس مطالعات (وانگ و همکاران[3]، ۲۰۱۸) روسازی‌های اصلاح شده با پلیمر می‌توانند بین ۱۵ تا ۲۰ سال بدون نیاز به تعمیرات اساسی دوام بیاورند. این افزایش طول عمر ناشی از مقاومت بالاتر در برابر پیرشدگی اکسیداتیو و حفظ خاصیت ویسکوالاستیک در طول زمان است.(کیاءو و همکاران[4]، ۲۰۱۳) در تحلیل‌های خود نشان دادند که استفاده از مصالح نوین، نرخ افت کیفیت روسازی را تا ۴۰ درصد کاهش داده و بازه زمانی بین روکش‌های مجدد را از ۸ سال به بیش از ۱۵ سال می‌رساند.

۲. بررسی هزینه-فایده : اگرچه قیمت یک تن مخلوط آسفالتی حاوی نانومواد یا پلیمر ممکن است ۲۰ تا ۵۰ درصد گران‌تر از آسفالت معمولی باشد، اما تحلیل اقتصادی بلندمدت نتایج متفاوتی را نشان می‌دهد:

– کاهش هزینه‌های نگهداری: در آسفالت‌های سنتی، هزینه‌های جاری شامل لکه‌گیری، درزگیری ترک‌ها و ترمیم چاله‌ها از سال سوم به بعد به شدت افزایش می‌یابد. مصالح نوین با جلوگیری از تشکیل ترک‌های اولیه، این هزینه‌ها را تا ۶۰ درصد کاهش می‌دهند .(باباشمسی و همکاران[5]، ۲۰۱۶،).

– ارزش زمانی پول: با استفاده از روش «ارزش فعلی خالص» (NPV)، مشخص شده است که صرف هزینه بیشتر در زمان ساخت (سال صفر)، مانع از مخارج سنگین بازسازی در سال‌های میانی (مثلاً سال هشتم) می‌شود. فضائلی و همکاران (۱۳۹۵) در یک مطالعه موردی بر روی جاده‌های ایران نشان دادند که استفاده از آسفالت‌های اصلاح‌شده با نانومواد، علیرغم هزینه اولیه بالاتر، در یک دوره ۲۰ ساله منجر به صرفه‌جویی اقتصادی ۳۰ درصدی در کل هزینه‌های دولتی می‌شود.

– هزینه‌های غیرمستقیم: افزایش عمر روسازی به معنای دفعات کمترِ مسدود شدن خیابان‌ها برای عملیات عمرانی است. این امر منجر به کاهش اتلاف وقت مسافران، کاهش مصرف سوخت و کاهش استهلاک خودروها می‌شود که در اقتصاد کلان شهری بسیار حائز اهمیت است.

1 Vila-Cortavitarte et al
2 Kim & Buttlar
3 Wang et al
4 Qiao et al
5 Babashamsi et al

۵- چالش‌ها و محدودیت‌های اجرایی

علیرغم مزایای فنی و اقتصادی اثبات شده مصالح نوین، گذار از آسفالت سنتی به آسفالت‌های با عملکرد بالا در شهرداری‌ها با چالش‌های متعددی روبروست. این موانع را می‌توان در سه دسته فنی، ساختاری و فرهنگی طبقه‌بندی کرد:

۱. محدودیت‌های تجهیزاتی و تکنولوژیک: تولید مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده، به‌ویژه آسفالت‌های پلیمری و حاوی نانومواد، نیازمند تجهیزات خاصی در کارخانه‌های آسفالت است. برای مثال، ترکیب پلیمر SBS با قیر نیازمند میکسرهای با دور بالا است تا شبکه پلیمری به درستی در قیر توزیع شود. بسیاری از کارخانه‌های آسفالت متعلق به شهرداری‌ها در ایران دارای تجهیزات قدیمی هستند که توانایی تولید این مخلوط‌ها را با استانداردهای لازم ندارند(ویتکوز و همکاران[1]، ۲۰۱۶). علاوه بر این، دمای اختلاط و کوبش این مصالح معمولاً بالاتر از آسفالت معمولی است که نیاز به دقت بالای نظارتی و ماشین‌آلات پخش پیشرفته دارد.

۲. خلأهای قانونی و عدم بومی‌سازی استانداردها: بسیاری از آیین‌نامه‌های فعلی (نظیر نشریه ۱۰۱ و ۲۳۴ در ایران) بر اساس ویژگی‌های آسفالت سنتی تدوین شده‌اند. طاهرخانی (۱۳۹۵) معتقد است که عدم وجود دستورالعمل‌های بومی برای پذیرش و کنترل کیفیت (QC) مصالح نوین در پروژه‌های شهری، باعث تردید ناظران و کارفرمایان در استفاده از این مواد می‌شود. همچنین، روش‌های طراحی مرسوم (مانند روش مارشال) برای ارزیابی دقیق پتانسیل‌های مصالح نوین (مانند خودترمیم‌شوندگی یا مقاومت نانوکامپوزیت‌ها) کافی نیستند و جایگزینی آن‌ها با روش‌های عملکردی نظیر «سوپرپیو» نیازمند سرمایه‌گذاری بر تجهیزات آزمایشگاهی مدرن و آموزش نیروی انسانی متخصص است . دی آنجلو و همکاران[2](۲۰۰۸).

۳. ساختار نظام مناقصات و مقاومت در برابر تغییر: سیستم سنتی مناقصات در شهرداری‌ها که بر پایه «کمترین قیمت پیشنهادی» استوار است، مانع بزرگی برای ورود مصالح نوین محسوب می‌شود. از آنجا که قیمت اولیه این مصالح بالاتر است، پیمانکاران رغبتی به پیشنهاد آن‌ها ندارند مگر آنکه معیار «انتخاب بر اساس کیفیت و دوره عمر» جایگزین شود. همچنین، نوعی مقاومت سنتی در بدنه اجرایی نسبت به تغییر روش‌های ۵۰ ساله وجود دارد. بر اساس پژوهش حق شناس و همکاران[3] (۲۰۱۶) ، ترس از شکست طرح‌های جدید و عدم تضمین‌های لازم از سوی تأمین‌کنندگان مواد نوین، باعث شده است که مدیران شهری ترجیح دهند با همان روش‌های کم‌ریسک سنتی (علیرغم عمر کوتاه آن‌ها) به فعالیت ادامه دهند.

۶- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف بررسی نقش مصالح نوین در ارتقای کیفیت و دوام روسازی‌های شهری انجام شد. از واکاوی متون علمی و تحلیل پژوهش‌های انجام شده، نتایج کلیدی زیر حاصل شده است:

۱. بهبود عملکرد مکانیکی: مصالح نوین اعم از پلیمرها، نانومواد و الیاف، با اصلاح ساختار ویسکوالاستیک قیر، مقاومت کششی و برشی مخلوط آسفالتی را به طور معناداری افزایش می‌دهند. پلیمرهایی نظیر SBS با ایجاد شبکه الاستیک، بهترین عملکرد را در کنترل ترک‌های خستگی در معابر پرتردد شهری دارند.

۲. مقاومت در برابر شرایط محیطی: فناوری نانو (به‌ویژه نانوسیلیکا و نانورس) با کاهش نفوذپذیری و افزایش مقاومت در برابر پیرشدگی، مانع از ترد شدن زودهنگام آسفالت در برابر تابش فرابنفش و نوسانات دمایی می‌شود. این امر به طور مستقیم عمر مفید روسازی را در اقلیم‌های متغیر افزایش می‌دهد.

۳. مدیریت ترک‌های انعکاسی: استفاده از مواد بازیافتی همچون پودر لاستیک نه تنها یک راهکار زیست‌محیطی است، بلکه به دلیل ایجاد خاصیت جذب انرژی بالادست، کارآمدترین روش برای به تأخیر انداختن ترک‌های انعکاسی در پروژه‌های روکش آسفالت شهری محسوب می‌شود.

۴. توجیه اقتصادی: اگرچه استفاده از مصالح نوین هزینه اولیه ساخت را بین ۲۰ تا ۴۰ درصد افزایش می‌دهد، اما تحلیل هزینه دوره عمر (LCCA) نشان می‌دهد که با افزایش عمر مفید روسازی از ۸ سال به بیش از ۱۵ سال و کاهش ۶۰ درصدی هزینه‌های لکه‌گیری و نگهداری، این رویکرد در بلندمدت منجر به صرفه‌جویی اقتصادی ۳۰ تا ۵۰ درصدی در بودجه‌های شهرداری می‌شود.

۵. موانع اجرایی: چالش اصلی در عدم استفاده گسترده از این فناوری‌ها، نه ضعف فنی، بلکه نبود تجهیزات مدرن در کارخانه‌های تولید آسفالت، سنتی بودن نظام مناقصات (مبتنی بر کمترین قیمت) و خلأ آیین‌نامه‌های بومی برای پذیرش مصالح نوین است.

1 Vaitkus et al
2 D'Angelo et al
3Haghshenas et al

۱-۶- پیشنهادها

- اصلاح نظام فنی و اجرایی: پیشنهاد می‌شود شهرداری‌ها معیار «انتخاب بر اساس کیفیت و هزینه دوره عمر» را جایگزین معیار «کمترین قیمت اولیه» در مناقصات نمایند.
- حمایت از بومی‌سازی: با توجه به پتانسیل‌های داخلی در تولید نانومواد و بازیافت لاستیک، حمایت از شرکت‌های دانش‌بنیان برای تولید افزودنی‌های بومی می‌تواند هزینه‌های واردات پلیمرها را کاهش دهد.
- پایلوت‌های آزمایشگاهی: اجرای پروژه‌های آزمایشی در تقاطع‌های پرتردد و مانیتورینگ عملکرد آن‌ها در دوره‌های یک‌ساله برای ایجاد اعتماد در مدیران شهری.

منابع

- حق‌شناس، ح.، خادمی، ف.، و صادق‌نژاد، ع. (۱۳۹۴). شناسایی و اولویت‌بندی موانع به‌کارگیری فناوری‌های نوین در صنعت راهسازی ایران با استفاده از روش AHP. نشریه مدیریت پروژه، ۵(۱۶)، ۴۵–۵۸.
- خدایی، علی.، صادق‌نژاد، علی.، و اسدی، ابراهیم. (۱۳۸۸). بررسی آزمایشگاهی تأثیر ژئوسنتتیک‌ها در به تأخیر انداختن ترک‌های انعکاسی در روسازی‌های آسفالتی. فصلنامه علمی پژوهشی جاده، ۱۱(۶۰)، ۷–۱۹.
- طاهرخانی، حسن. (۱۳۹۵). بررسی چالش‌های پیاده‌سازی متدولوژی طراحی سوپرپیو در صنعت آسفالت ایران. فصلنامه علمی–تخصصی مهندسی آسفالت، ۲(۴)، ۱۸–۲۹.
- فخری، منصور.، و غنی‌زاده، امیرمحمد. (۱۳۹۳). بررسی عددی و آزمایشگاهی تأثیر اصلاح‌کننده‌های پلیمری بر عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی گرم. نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۴۴(۳)، ۶۵–۷۵.
- فضائلی، ح.، امام‌زاده، م.، و صادق‌نژاد، ع. (۱۳۹۵). تحلیل فنی و اقتصادی استفاده از نانومواد در اصلاح قیر و مخلوط‌های آسفالتی در ایران. فصلنامه مهندسی حمل و نقل، ۸(۳)، ۴۲۱–۴۳۵. (قابل بازیابی در SID).
- Abtahi, S. M., Uzun, I., & Kunt, M. (2010). A review of fiber-reinforced asphalt mixtures. Construction and Building Materials, ۲۴(۶), .۸۷۱-۸۷۷
- Airey, G. D. (2003). Rheological properties of styrene-butadiene-styrene (SBS) polymer modified bitumens. Fuel, ۸۲(۱۴), .۱۷۰۹-۱۷۱۹
- Babashamsi, S., Golzadfar, A., Yusoff, N. I. M., Ceylan, H., & Nor, N. G. M. (۲۰۱۶). Integrated pavement life cycle cost analysis methods: A review. Sadhana, ۴۱(۴), ۴۵۳-.۴۶۳
- Casey, D., McNally, C., Gibney, A., & Gilchrist, M. D. (۲۰۰۸). Development of a recycled polymer modified binder for use in stone mastic asphalt. Resources, Conservation and Recycling, ۵۲(۱۰), .۱۱۶۷-۱۱۷۴
- D'Angelo, J., Harm, E., Bartoszek, J., Baumgardner, G., Corrigan, M., & Flowers, J. (۲۰۰۸). Warm-mix asphalt: European practice (No. FHWA-PL-۰۸-۰۰۷). Federal Highway Administration (FHWA).
- Haghshenas, H. F., Khodaii, A., & Law, J. S. (۲۰۱۶). Barriers to the implementation of sustainable pavement technologies in developing countries. International Journal of Pavement Engineering, ۱۷(۸), .۶۶۱-۶۷۲
- Kim, J., & Buttlar, W. G. (۲۰۰۲). Analysis of reflective crack control system involving reinforcements: fractured mechanics approach. Journal of Transportation Engineering, ۱۲۸(۶), .۵۴۰-۵۴۷
- Qiao, Y., Santos, J., Stoner, A. M., & Flinstch, G. W. (۲۰۱۳). Left cycle cost analysis of pavements under a changing climate. Transportation Research Record, ۲۳۴۹(۱), .۳-۱۰
- Santos, J., Bryce, J., Flintsch, G., Ferreira, A., & Diefenderfer, B. (۲۰۱۵). A life cycle assessment of in-place recycling and conventional pavement construction and maintenance practices. Structure and Infrastructure Engineering, ۱۱(۹), .۱۱۹۹-۱۲۱۷
- Shafabakhsh, G. A., Mirabdolazimi, S. M., & Sadeghnejad, R. (۲۰۱۴). Evaluation of fatigue life of wheel track threshold (WTT) modified asphalt mixes using nano-SiO۲. Case Studies in Construction Materials, ۱, .۶۰-۶۶

- Vaitkus, A., Čygas, D., Laurinavičius, A., & Perveneckas, Z. (۲۰۱۶). Analysis and evaluation of possibilities for the use of modified bitumen in asphalt mixtures. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, ۱۱(۱), .۵۴-۶۱
- Vila-Cortavitarte, M., Lastra-González, P., Calzada-Pérez, M. A., & Indacoechea-Vega, I. (۲۰۲۰). Analysis of the influence of nano-materials on the low-temperature performance of bitumen. Construction and Building Materials, ۲۲۳, .۱۱۶-۱۲۴
- Wang, H., Zhang, C., Li, L., & You, Z. (۲۰۱۸). Economic and environmental life cycle assessment of warm mix asphalt and polymer modified asphalt. Journal of Cleaner Production, ۱۷۴, .۱۱۸۲-۱۱۹۳
- Way, G. B., Kaloush, K. E., & Biligiri, K. P. (۲۰۱۲). Asphalt-Rubber Standard Practice Guide. Rubber Pavements Association.- Zhu, J., Birgisson, B., & Kringos, N. (۲۰۱۴). Polymer modification of bitumen: Advances and challenges. European Polymer Journal, ۵۴, .۱۸-۳۸
- Xiao, F., Punith, V. S., & Amirkhanian, S. N. (۲۰۱۴). Effects of non-carbonated calcium carbonate on the properties of crumb rubber modified binders. Journal of Materials in Civil Engineering, ۲۶(۱), .۱-۱۰
- Zhang, H., Yu, J., & Wu, S. (۲۰۱۰). Effect of montmorillonite organic modification on aging properties of bitumen. Construction and Building Materials, ۲۴(۷), .۱۰۷۴-۱۰۷۸