

ارزیابی مبتنی بر عملکرد و پایداری افزودنی‌های سازگار با محیط زیست در روسازی‌های آسفالتی

مقاله علمی - پژوهشی

* الهام ابراهیمی (نویسنده مسئول)، گروه مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

نادر صولتی‌فر، گروه مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: e.brahim@urmia.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۱ - پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۵

صفحه ۵۵۶-۵۳۹

چکیده

به دلیل محدودیت منابع طبیعی و افزایش جمعیت، مصرف روزافزون منابع تجدیدناپذیر، کاهش آنها را تسریع کرده است. روسازی‌ها یکی از مصرف‌کنندگان اصلی منابع به شمار می‌روند. در این پژوهش، افزودنی‌های سازگار با محیط زیست شامل فوتوکاتالیست‌ها، مواد بازیافتی و الیاف طبیعی، نانومواد و مواد پلیمری، بر اساس مرور مطالعات دو دهه اخیر تحلیل شده‌اند. یافته‌ها نشان می‌دهد دی‌اکسید تیتانیوم با راندمان بالای حذف اکسیدهای نیتروژن، مؤثرترین فوتوکاتالیست است. پودر لاستیک با ۱۵ درصد وزنی، پارامتر شیارشدگی ($G^*/\sin\delta$) را تا ۶۸۰ درصد افزایش می‌دهد، اما پارامتر خستگی ($G^*\times\sin\delta$) را تا ۳۲۰ درصد بدتر می‌کند. پلیمر SBS با ۴ درصد وزنی، ضمن بهبود ۱۴۰ درصدی مقاومت شیارشدگی، مقاومت خستگی را نیز ۵ درصد افزایش می‌دهد. الیاف طبیعی (کنف، نارگیل و پشم بز) با افزایش چقرمگی تا ۳۰ درصد، جایگزین مناسبی برای الیاف سنتتیک هستند. از میان نانومواد، نانوسیلیکا با ۷ درصد وزنی، پارامتر شیارشدگی را تا ۳۱۹ درصد بهبود می‌بخشد. افزودنی‌های گلیسونایت و اسید پلی‌فسفریک نیز به ترتیب با افزایش ۴۵۰ و ۲۰۰ درصدی پارامتر شیارشدگی، گزینه‌های مؤثری برای کاربردهای سنگین محسوب می‌شوند. با این حال، نانوسیلیکا و گلیسونایت به ترتیب باعث کاهش ۲۸ و ۹۵ درصدی مقاومت خستگی می‌شوند؛ در حالی که اسید پلی‌فسفریک تأثیر منفی بر خستگی ندارد. انتخاب آگاهانه افزودنی بر اساس شرایط و توجه به تعارض عملکردی، کلید دستیابی به روسازی پایدار است و می‌توان ضمن کاهش فشار بر منابع طبیعی، اثرات اقتصادی و محیط زیستی مثبتی در صنعت روسازی ایجاد کرد.

واژه‌های کلیدی: افزودنی‌های سازگار با محیط زیست، روسازی آسفالتی، مواد بازیافتی، مقاومت شیارشدگی، مقاومت خستگی

۱- مقدمه

حمل و نقل کارآمد و سازمان‌یافته، یکی از ضرورت‌های گریزناپذیر هر جامعه در راستای دستیابی به پایداری توسعه است. توسعه پایدار به طور کلی و حمل و نقل پایدار به طور خاص، با لحاظ هزینه‌های محیطی و اجتماعی در تلاش برای ایجاد توازن بین نیازهای جابه‌جایی، ایمنی، دسترسی، مصرف منابع در دسترس و حفظ کیفیت محیط زیست در هر دو بازه زمانی حال و آینده هستند. این تلاش با تمرکز بر ظرفیت بُرد سیستم انجام می‌شود. با توجه به اهمیت استراتژیک سیستم حمل

برای مفهوم توسعه پایدار تعاریف متعددی ارائه شده است. به طور کلی، توسعه پایدار به معنای اداره و بهره‌برداری صحیح از منابع پایه، منابع مالی، نیروی انسانی و ایجاد امکانات فنی و ساختارهای مناسب برای رفع نیازهای نسل حاضر و آینده به طور مستمر و قابل قبول می‌باشد. از دیدگاهی دیگر، تعادل بین حفاظت از محیط زیست و منابع از یک سو و رشد اقتصادی از سوی دیگر نیز به عنوان توسعه پایدار شناخته می‌شود (Langston & Ding, 2007). در این میان، وجود سیستم

و نقل در ابعاد اقتصاد، صنعت، سیاست و امنیت ملی، این سیستم به عنوان زیربنای توسعه پایدار شناخته می‌شود. یک قاعده کلی آن است که هر چه حمل و نقل کارآمدتر باشد، توسعه فراگیرتر خواهد بود (Fay, 2012; Ahmad & de Oliveira, 2016; Wang et al., 2023).

هدف برنامه‌ریزی و طراحی حمل و نقل پایدار که منطبق بر مصرف بهینه انرژی و شرایط محیط زیستی (نظیر منابع در دسترس و تغییر اقلیم) است، دستیابی به راه‌حلی برای مقابله با چالش‌ها و کاهش عوارض محیط زیستی در بخش‌های مختلف می‌باشد. از این رو، با تلفیق سیاست‌های مدیریت محیط زیست و حمل و نقل، می‌توان به تحقق اهداف توسعه پایدار دست یافت. در این میان، حفظ محیط زیست به عنوان یکی از ارکان توسعه پایدار در کنار ایجاد یک شبکه حمل و نقل کارآمد، از معیارهای اصلی سنجش توسعه‌یافتگی جوامع محسوب می‌شود (Hassan & Lee, 2015).

حمل و نقل پایدار که گاهی حمل و نقل سبز نیز نامیده می‌شود، به شیوه‌های ایمنی از حمل و نقل گفته می‌شود که تأثیر محیط زیستی اندکی دارند. اولویت اصلی در این شیوه‌ها، استفاده از منابع تجدیدپذیر و جلوگیری از وارد شدن آسیب به اکوسیستم می‌باشد (Mihyeon Jeon & Amekudzi, 2005; Litman & Burwell, 2006; Shah et al., 2021). از سوی دیگر، راه‌ها به عنوان یکی از بخش‌های اصلی سیستم حمل و نقل، جزئی از سرمایه‌های زیرساختی حیاتی هستند که سالیانه بخش عمده‌ای از بودجه عمرانی به منظور ساخت، ترمیم و نگهداری آنها هزینه می‌شود. در این میان یکی از مباحث پر اهمیت، نوع و نحوه نگهداری روسازی راه‌ها می‌باشد. سیستم مدیریت روسازی با تبیین استراتژی‌های مدیریت کارآمد و فرایندهای ترمیم و نگهداری روسازی‌ها، می‌تواند ضمن کنترل و تحلیل هزینه‌ها، طول دوره عملکرد و خدمت‌دهی مناسب روسازی را در چرخه عمر به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش داده و نقشی اساسی در توسعه پایدار ایفا نماید (عموزاده عمرانی و همکاران، ۱۴۰۰).

صنایع مرتبط با ساخت، نگهداری و بهسازی زیرساخت‌های حمل و نقل به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب اکوسیستم‌ها و منابع، از منابع آلودگی‌های محیط زیستی و تولید گازهای گلخانه‌ای به شمار می‌روند. به گزارش بانک جهانی، صنعت حمل و نقل نه تنها به عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده

فرآورده‌های نفتی شناخته می‌شود (با مصرف سالیانه حدود ۴۰ درصد از کل فرآورده‌های نفتی)، بلکه بالاترین سرعت را در افزایش انتشار کربن در میان صنایع مختلف دارا بوده و می‌تواند بسته به شرایط منطقه، بین ۱۲ تا ۷۰ درصد در آلودگی هوای مناطق مؤثر باشد (Liaquat et al., 2010; Atabani et al., 2011). شایان ذکر است که قیرها به دلیل محتوای بالای هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای و سولفید هیدروژن، در دسته‌بندی مواد خطرناک قرار می‌گیرند. این ترکیبات و ویژگی‌های قیر خالص از یک سو بر انسان و محیط زیست تأثیر می‌گذارند و از سوی دیگر، قیر به عنوان یک منبع تجدیدناپذیر با سرعت زیادی در حال کاهش است. از این رو، علاوه بر توجه به بهبود خواص مکانیکی و ساختاری قیر، توجه به معیار سازگاری با محیط زیست نیز به عنوان یکی از خط‌مشی‌های اصلاح روسازی‌ها در جهان امروز از اقبال قابل توجهی برخوردار شده است. نکته مهم آن که در صورت استفاده از افزودنی‌های ضایعاتی، صنعت راهسازی می‌تواند با دو نقش کمک به مدیریت بهتر پسماند (کاهش هزینه، حفاظت از منابع و کاهش انتشار گازهای مضر) و نیز بهبود عملکرد روسازی، مشارکت قابل توجهی در پایداری محیط زیستی داشته باشد.

از منظر عملکردی نیز و به دلیل گستره اقلیمی متنوع و افزایش روزافزون ترافیک، قیرهای خالص تولیدی عموماً از بازدهی مناسبی برخوردار نیستند. از این رو، اصلاح قیر و مخلوط‌های آسفالتی در جهت بهبود عملکرد و حرکت به سوی اهداف توسعه پایدار و حفاظت از محیط زیست، امری ضروری به نظر می‌رسد. اگر چه برخی از روش‌های اصلاحی در قیر با بازده عملی مناسبی همراه هستند، اما عدم صرفه اقتصادی در بسیاری از طرح‌های اجرایی منجر به استفاده محدود از آن شده است (عامری و همکاران، ۱۳۹۷).

مدیریت پیشگیرانه، در اینجا به معنای به تأخیر انداختن خرابی‌های روسازی پیش از نیاز به تعمیر است. از این رو، در صورتی که اقدامات پیشگیرانه در زمان مناسب و با برنامه‌ریزی لازم صورت پذیرد، نه تنها صرفه‌جویی در هزینه‌ها و افزایش طول عمر روسازی حاصل می‌شود، بلکه برنامه‌های مناسب جهت توزیع هزینه‌ها در طول سال را نیز به دنبال خواهد داشت (فخری و همکاران، ۱۳۹۰). در مطالعات مختلف با توجه به دو عامل افزایش هزینه قیرهای بر پایه نفت و اثرات نامطلوب

۲-۱- افزودنی‌های جاذب آلاینده (فوتوکاتالیست‌ها)

فوتوکاتالیست‌ها دسته‌ای از مواد نیمه‌رسانا هستند که با فعال‌سازی نوری، قادر به تجزیه اکسایشی آلاینده‌های گازی خروجی از آگزوز خودروها (شامل هیدروکربن‌ها، منوکسید کربن و اکسیدهای نیتروژن) هستند. مکانیسم عملکرد این مواد به این صورت است که تحت تابش نور فرابنفش، الکترون‌های لایه ظرفیت برانگیخته شده و تولید رادیکال‌های آزاد بسیار واکنش‌پذیر (نظیر رادیکال هیدروکسیل) می‌کنند. این رادیکال‌ها آلاینده‌ها را به ترکیبات بی‌خطری چون کربنات، نترات و آب تبدیل می‌نمایند (Hoffmann et al., 1995). ترکیبات حاصل به دلیل ماهیت آب‌دوست، به راحتی توسط باران یا آب‌پاشی از سطح روسازی شسته شده و بدین ترتیب محیط زیست دچار آلودگی ثانویه نمی‌شود.

ویژگی کلیدی این مواد، نقش کاتالیستی آنها است؛ یعنی بدون مصرف شدن در واکنش، فقط سرعت تجزیه آلاینده‌ها را افزایش می‌دهند و در پایان فرآیند دوباره قابل استفاده هستند. از مهم‌ترین ترکیبات فوتوکاتالیستی قابل کاربرد در روسازی می‌توان به دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) و اکسید روی (ZnO) اشاره کرد. در این میان، TiO_2 به دلیل فعالیت فوتوکاتالیستی عالی، پایداری شیمیایی بالا، غیرسمی و مقرون به صرفه بودن، به طور گسترده‌تری مورد استفاده قرار می‌گیرد. TiO_2 به دو روش اصلی در بتن آسفالتی جهت تجزیه فوتوکاتالیستی آلاینده‌ها به کار می‌رود: (۱) پوشش سطحی: TiO_2 به صورت یک پوشش آب‌پایه مستقیماً روی سطح روسازی آسفالتی اعمال می‌شود. این روش به دلیل تماس مستقیم با نور و آلاینده‌ها، بیشترین بازده فوتوکاتالیستی را دارد، اما در معرض سایش ناشی از ترافیک و عوامل جوی است؛ (۲) اختلاط توده‌ای: TiO_2 به عنوان پركند (فیلر) در مرحله اختلاط به مخلوط آسفالتی افزوده می‌شود. این روش دوام بالاتری دارد، اما تنها ذرات نزدیک به سطح فعال بوده و در نتیجه راندمان کلی آن نسبت به روش پوشش سطحی کمتر است. برخی پژوهش‌ها به ترکیب هر دو روش (درصدی از TiO_2 در اختلاط توده‌ای همراه با یک لایه نازک پوشش سطحی) به عنوان راه‌حل بهینه اشاره می‌کنند که ضمن حفظ دوام، بازده حذف آلاینده‌ها را بهینه می‌سازد. در روش پوشش مستقیم، عملکرد فوتوکاتالیستی TiO_2 تحت تأثیر عوامل محیطی نظیر دما، رطوبت، شدت روشنایی و وجود آلاینده‌هایی مانند گرد و غبار و روغن قرار می‌گیرد. تحقیقات نشان داده‌اند که بهینه‌سازی این

مواد قیری بر محیط زیست، استفاده از محصولات سازگار با محیط زیست به جای چسبنده‌های قیری مورد ارزیابی قرار گرفته است. یافته‌ها نشان داده‌اند که استفاده از ماده افزودنی بر پایه گیاه (مانند سویا)، علاوه بر بهبود وضعیت ترک‌ها و کاهش آن، میزان نفوذپذیری آب و آسیب‌پذیری در برابر هوازدهی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد (Yang et al., 2020; Staver et al., 2023). با توجه به تغییر پارادایم توسعه و پذیرش گسترده مباحث پایداری در سیاست‌گذاری‌های عمرانی، هدف اصلی این مقاله تحلیل افزودنی‌های سازگار با محیط زیست در روسازی‌های آسفالتی است. این افزودنی‌ها عبارت‌اند از: فوتوکاتالیست‌ها، مواد بازیافتی (روغن‌ها، پودر لاستیک و پلیمرها)، نانومواد و الیاف طبیعی. در این بررسی، افزون بر عملکرد فنی هر دسته، جنبه‌های پایداری و چالش‌های پیش روی کاربرد عملی آنها نیز مورد بحث قرار گرفته است.

۲-۲ افزودنی‌های روسازی‌های آسفالتی

از آنجا که راه‌ها یکی از بزرگ‌ترین سرمایه‌های زیرساختی کشور هستند، برخورداری از یک مدیریت مهندسی شایسته برای بهبود عملکرد و همچنین یک سیستم مدیریت نگهداری برای حفظ آن ضروری است. با توجه به هزینه‌های سنگین ترمیم و بهسازی، روش‌های پیشگیرانه و افزایش طول عمر روسازی می‌تواند نقشی ویژه در کاهش هزینه‌های چرخه عمر روسازی ایفا نماید. خرابی رویه‌های آسفالتی در طول دوره بهره‌برداری عمدتاً به دلیل عوامل جوی مانند یخ‌زدگی، بارش، درجه حرارت و همچنین تأثیرات وارده از سوی وسایل نقلیه عبوری رخ می‌دهد. از جمله خرابی‌های اصلی می‌توان به ترک‌های خستگی، ترک‌های طولی و عرضی، قیرزدگی و شن‌زدگی اشاره کرد. اگر اقدامات پیشگیرانه ترمیمی به موقع روی این سطوح انجام نشود، خرابی‌ها گسترش پیدا کرده و به لایه‌های زیرین آسیب وارد می‌کنند (عموزاده عمرانی و همکاران، ۱۴۰۰). در جهان امروز، طراحی روسازی علاوه بر رویکرد سنتی خود که بر کارایی، ایمنی و دوام تأکید دارد، باید به چالش‌های محیط زیستی نیز پاسخ دهد. مهم‌ترین این چالش‌ها عبارت‌اند از: مدیریت نفوذ آب، جذب صدا، جذب حرارت در سطح جاده و آلودگی انتشاری از آگزوز خودروها. در این راستا، از افزودنی‌های مختلف اصلاح‌کننده روسازی‌ها به منظور بهبود خواص مکانیکی آنها استفاده می‌شود که عمدتاً ایجاد تغییرات در روسازی‌ها با تأثیر مستقیم بر آثار محیط زیستی همراه است.

گلخانه‌ای ناشی از سوزاندن لاستیک‌ها نیز کمک می‌کند. از سوی دیگر، یکی دیگر از چالش‌های اساسی مورد توجه محققان، انتشار دود ناشی از تولید مخلوط آسفالتی در دمای بالا است که منجر به تولید حجم زیادی از گازهای گلخانه‌ای می‌شود. کاهش این آلودگی به عنوان گامی مؤثر در جهت تحقق توسعه سبز و پایداری زیرساخت‌های راه، به یکی از اهداف کلیدی تبدیل شده است.

روغن‌های بازیافتی

چالش‌های محیط زیستی متناظر با روغن‌ها مربوط به مدیریت پسماند و بازیافت روغن‌های مختلف از جمله روغن‌های سوخته موتور، روغن‌های گیاهی مصرف‌شده و روغن‌های حاصل از پیرولیز می‌باشد. در سال‌های اخیر، این مواد به عنوان افزودنی جوان‌کننده یا نرم‌کننده در قیرهای پیرشده کاربرد زیادی یافته‌اند. به این ترتیب که روغن‌های بازیافتی با افزایش درصد فاز مالین در قیر، تعادل بین آسفالتین و مالین را بازگردانده و قیر سفت و شکننده را مجدداً نرم می‌کند. نتایج پژوهش‌های مختلف نشان داده است که افزودن روغن سوخته بازیافتی می‌تواند درجه نفوذ قیر را افزایش داده و دمای نرمی آن را به میزان قابل توجهی کاهش دهد (Yusoff et al., 2014; Moghaddam & Baaj, 2021). همچنین استفاده از روغن‌های گیاهی بازیافتی نظیر روغن خوراکی مصرف‌شده علاوه بر بهبود عملکرد در دمای پایین و کاهش ترک‌های حرارتی، به دلیل زیست‌تخریب‌پذیری بالا، سازگاری بیشتری با محیط زیست دارد (Zahoor et al., 2021). با وجود این، چالش اصلی کاربرد این افزودنی‌ها، کاهش مقاومت در برابر شیارشدگی در دماهای بالا و افزایش حساسیت به رطوبت است که با استفاده مناسب از اصلاح‌کننده‌های مختلف، قابل کنترل می‌باشد (Sabeti et al., 2018).

الیاف

الیاف طبیعی و بازیافتی به عنوان عوامل تقویت‌کننده پراکنده در مخلوط‌های آسفالتی عمل کرده و با پل زدن بر روی ریزترک‌ها و توزیع تنش، از گسترش ترک‌ها جلوگیری می‌کنند. از نقطه نظر پایداری، الیاف طبیعی به دلیل تجدیدپذیری، زیست‌تخریب‌پذیری و دسترسی آسان، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند. جدول ۱ خلاصه‌ای از متداول‌ترین الیاف مورد استفاده در مخلوط‌های آسفالتی ارائه می‌نماید.

فرآیند می‌تواند بازده تجزیه آلاینده‌ها را افزایش دهد. به طوری که Hassan et al. (2013) موفق به افزایش بهره‌وری از ۳۱ به ۵۵ درصد شدند. با این حال، کاربرد عملی این فناوری با چالش‌هایی مواجه است. مهم‌ترین محدودیت آن است که در شرایط واقعی روسازی، به دلیل شرایط محیطی نظیر شدت کم نور، دمای نامناسب محیط، رطوبت و وزش باد، تجزیه گاز آگروز کمتر از شرایط ایده‌آل است. افزون بر این، پوشش TiO_2 به دلیل سایش ناشی از تماس لاستیک‌ها، دوام کمتری داشته و می‌تواند مقاومت لغزشی سطح روسازی را کاهش دهد؛ بنابراین، ضروری است مطالعات آتی به ویژه بر بهبود دوام پوشش و ارزیابی دقیق اثرات آن بر روی مقاومت لغزشی متمرکز شود (Rocha Segundo et al., 2023). همچنین رعایت اصول ساخت و نگهداری مناسب برای بهره‌گیری عملی از این فناوری اجتناب‌ناپذیر است.

۲-۲- افزودنی‌های بازیافتی

مواد بازیافتی یکی از امیدبخش‌ترین انواع افزودنی‌های سازگار با محیط زیست هستند. این مواد ضمن کاهش فشار بر منابع طبیعی و مدیریت پسماند، در بسیاری از موارد بخش عمده‌ای از خواص مکانیکی و رئولوژیکی قیر و مخلوط‌های آسفالتی را نیز بهبود می‌بخشند.

پودر لاستیک

بازیافت لاستیک‌های زائد به عنوان یکی از چالش‌های مهم محیط زیستی، مورد توجه گسترده پژوهشگران جهانی قرار دارد. در میان راهکارهای مختلف، اختلاط این مواد با قیر جهت تولید مخلوط آسفالتی به عنوان یک راه حل مؤثر مطرح شده است. این رویکرد ضمن حل معضل دفع لاستیک‌های فرسوده، به دلیل بهبود خواص رئولوژیکی قیر نیز بسیار ارزشمند است. سابقه استفاده از لاستیک طبیعی به عنوان افزودنی در قیر و مخلوط آسفالتی برای افزایش دوام روسازی به اوایل دهه ۱۸۴۰ میلادی باز می‌گردد. در دهه‌های اخیر، پژوهشگران برای بهبود عملکرد قیر و مخلوط‌های آسفالتی، استفاده از مواد افزودنی حاصل از پسماندها نظیر خرده لاستیک/پودر لاستیک با مش‌های مختلف از لاستیک‌های کهنه و مستعمل، پلاستیک‌های بازیافتی و سایر مواد زائد را مورد مطالعه قرار داده‌اند. این فناوری ضمن افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی، حساسیت به رطوبت و ترک‌خوردگی، به بازیافت محیط زیست و کاهش انتشار گازهای

جدول ۱. الیاف مختلف به عنوان عوامل افزودنی در مخلوط‌های آسفالتی

نوع الیاف	منبع تأمین	بهبود عملکرد اصلی	مزیت محیط زیستی
الیاف پشم بز	ضایعات دامداری	افزایش چقرمگی و مقاومت خستگی	مدیریت پسماند آلی
الیاف کنف	گیاه کنف	افزایش مقاومت به ترک‌های حرارتی	جذب کربن در مرحله رشد
الیاف نارگیل	ضایعات کشاورزی	بهبود مقاومت در برابر شیارشدگی	تجدیدپذیر و ارزان
الیاف سلولزی	ضایعات کاغذ و مقوا	کاهش جداشدگی و جذب رطوبت	بازیافت پسماند خشک
الیاف پلیمری بازیافتی	بطری‌های PET	افزایش مدول الاستیسیته	کاهش پلاستیک در طبیعت

منابع: Usman et al. (2019); Pirmohammad et al. (2020); Sreelatha et al. (2020); Wu et al. (2024)

بر اساس تحقیقات صورت گرفته، افزودن تا ۰/۵ درصد الیاف طبیعی نسبت به وزن کل مخلوط می‌تواند مقاومت خستگی را تا ۳۰ درصد افزایش دهد. از چالش‌های متناظر با الیاف می‌توان به جذب رطوبت بالا و احتمال پوسیدگی در درازمدت اشاره کرد که با اصلاح سطحی الیاف (مانند اندود کردن با قیر یا مواد هیدروفوب) قابل رفع است (Gao et al. 2018).

۲-۳- نانومواد

نانومواد که به عنوان موادی با ابعاد بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر تعریف می‌شوند، به دلیل نسبت سطح به حجم بسیار بالا و اثرات قابل توجه‌شان، از افزودنی‌های نوین در اصلاح خواص قیر و مخلوط‌های آسفالتی محسوب می‌شوند. نانومواد ویژگی‌های قابل توجهی از جمله انعطاف‌پذیری بیشتر، سطح ویژه گسترده، استحکام کششی افزایش یافته و مقاومت الکتریکی کمتر از خود نشان می‌دهند که دامنه کاربرد آن‌ها را گسترش می‌بخشد. ادغام نانومواد در چسبنده‌های قیری (بایندرها) به طور قابل توجهی جنبه‌های مختلف عملکردی نظیر خواص ویسکوالاستیک، بازیابی الاستیک، مقاومت در برابر دمای بالا، خستگی، مقاومت در برابر پیرشدگی و آسیب ناشی از رطوبت را بهبود بخشیده است؛ بنابراین، اصلاح‌کننده‌های نانومقیاس نقشی محوری در مطالعات مربوط به اصلاح رفتار قیر و مخلوط‌های آسفالتی جهت دستیابی به راهکارهای روسازی پایدارتر و بادوام‌تر ایفا کرده‌اند (Caputo et al., 2020).

متداول‌ترین نانومواد مورد استفاده در صنعت روسازی شامل نانورس، نانوسیلیس، نانولوله کربنات کلسیم و نانواکسیدهای فلزی نظیر نانواکسید آلومینیوم هستند. بر اساس پژوهش‌های انجام شده، افزودن نانومواد به قیر، دمای نرمی را افزایش داده و مقاومت در برابر شیارشدگی را بهبود می‌بخشد (Jahromi & Ashish et al., 2016; Khodaii, 2009). نانوسیلیس نیز با

ایجاد پیوندهای قوی‌تر بین قیر و سنگدانه، مقاومت در برابر جداشدگی را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد (Bhat & Mir, 2021). از سوی دیگر استفاده از نانومواد به دلیل کاهش نیاز به قیر اضافی و افزایش طول عمر روسازی، به طور غیرمستقیم موجب صرفه‌جویی در منابع و کاهش انتشار کربن می‌شود. با این حال، چالش‌هایی نظیر هزینه بالای تولید برخی از انواع نانومواد، ملاحظات ایمنی مرتبط با استنشاق ذرات نانو نیازمند تحقیقات بیشتری است (Yusoff et al., 2014).

۲-۴- مواد پلیمری

پلیمرها مولکول‌های کوچکی هستند که به صورت زنجیره‌ای به هم متصل شده‌اند. استفاده از قیرهای اصلاح شده با مواد پلیمری موجب افزایش عمر مفید روسازی‌ها شده و به میزان قابل توجهی هزینه نگهداری راه‌ها را کاهش می‌دهد. قیرهای اصلاح شده با پلیمر با موفقیت در روسازی مکان‌هایی مانند تقاطع خیابان‌های با ترافیک بالا، فرودگاه‌ها، ایستگاه‌های وسایل نقلیه سنگین و مسیرهای مسابقه که تحت تنش ناشی از بارگذاری زیادی هستند، استفاده می‌شود. قیر اصلاح شده با پلیمر شامل خصوصیات از جمله بازیابی الاستیک، نقطه نرمی، ویسکوزیته، انسجام کششی و شکل‌پذیری بالایی بوده و در نتیجه دارای مقاومت زیادی در برابر شیارشدگی، ترک‌های حرارتی، ترک‌های خستگی و حساسیت دمایی است (Yildirim, 2007).

افزودن این اصلاح‌کننده‌ها به مخلوط آسفالتی در دو دسته کلی پلیمرهای آلی (مانند استایرن بوتادین استایرن (SBS)) و مواد پودر معدنی انجام می‌شوند. اگر چه پلیمرها کارایی مناسبی دارند، اما با چالش‌های عملکردی نظیر فرسایش در حین ذخیره‌سازی و حمل و نقل مواجه هستند. مواد پودر معدنی ضمن جلوگیری از انتشار دود مخلوط آسفالتی، تأثیر بیشتری در بهبود عملکرد روسازی در دماهای پایین دارند (Wang et al., 2018).

۳-۱- معیار شیارشدگی

به عنوان یکی از آسیب‌های رایج در لایه آسفالتی، ایجاد عارضه شیارشدگی یا تغییر شکل‌های دائمی در اثر انباشته شدن تغییر شکل‌های برگشت‌ناپذیر مخلوط آسفالتی ناشی از تکرار بار در دماهای بالا شکل می‌گیرد (Liu et al., 2025). شاخص $G^*/\sin\delta$ (ضریب شیارشدگی) که بیانگر سختی و مقاومت قیر در برابر تغییر شکل دائمی در دمای زیاد است، برای ارزیابی پاسخ قیر به بارهای مکرر به کار می‌رود (Taheri et al., 2026). هر چه مقدار این شاخص برای قیر اصلاح‌شده نسبت به قیر خالص بیشتر باشد، نشان‌دهنده مقاومت بالاتر آن در برابر شیارشدگی است. به طور کلی، قیرهایی با مدول برشی مرکب (G^*) بالاتر و زاویه فاز (δ) کوچک‌تر، عملکرد بهتری در مقابله با تغییر شکل‌های دائمی دارند؛ بنابراین برای کاهش این پدیده، استفاده از قیرهای سفت و با خاصیت الاستیک توصیه می‌شود (Abedali, 2017).

در این مطالعه، مقادیر پارامتر رئولوژیکی $G^*/\sin\delta$ برای ارزیابی مقاومت قیر در برابر شیارشدگی در دماهای بالا، برای قیر خالص و قیرهای اصلاح‌شده با انواع مختلف افزودنی‌ها در درصدهای متفاوت اندازه‌گیری بررسی شده و کلیه مقادیر بر اساس قیر خالص (مقدار پایه برابر ۱۰۰)، ارائه شده است.

شکل ۱ نشان می‌دهد که افزودنی‌های مورد بررسی منجر به افزایش چشمگیر ضریب شیارشدگی نسبت به قیر خالص شده‌اند، هر چند میزان این افزایش به طور قابل توجهی به نوع و غلظت ماده اصلاح‌کننده وابسته است. در بین افزودنی‌های پلیمری متداول، اصلاح‌کننده SBS در درصدهای ۲، ۳ و ۴ به ترتیب مقادیر ۱۸۰، ۲۰۰ و ۲۴۰ را به همراه داشته است که نشان‌دهنده یک روند افزایشی تقریباً خطی با افزایش درصد این پلیمر می‌باشد. حداکثر افزایش در این گروه، معادل ۱۴۰ درصد نسبت به قیر پایه، متعلق به نمونه حاوی ۴ درصد SBS است. در گروه اصلاح‌کننده لیگنین، علی‌رغم ماهیت زیست‌پایه و اقتصادی آن، عملکرد نسبتاً ضعیف‌تری مشاهده می‌شود. نمونه‌های حاوی ۵ و ۱۰ درصد لیگنین به ترتیب مقادیر ۱۲۰ و ۱۶۰ را نشان می‌دهند که حداکثر افزایش آن تنها ۶۰ درصد بوده و این مقدار حتی از کمترین غلظت SBS (یعنی ۲ درصد با افزایش ۸۰ درصد) نیز کمتر است؛ بنابراین، لیگنین به تنهایی برای کاربردهایی که نیاز به مقاومت بالای شیارشدگی دارند، گزینه مناسبی محسوب نمی‌شود. در مقابل، افزودنی‌های پودر

(Sha et al., 2021; Wang et al., 2022). در راستای اهداف توسعه پایدار، استفاده از پلیمرهای بازیافتی و زیست‌پلیمرها جایگزین پلیمرهای مرسوم شده است. از جمله افزودنی‌های پلیمری سازگار با محیط زیست می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: - پلیمر استایرن بوتادین استایرن بازیافتی: اگر چه SBS متداول یکی از مؤثرترین پلیمرها است، اما نسخه بازیافتی آن با کاهش قابل توجه ردپای کربنی نسبت به نوع اولیه، عملکردی نزدیک به آن دارد (Katanalp et al., 2024; Ibrahim et al., 2024). - پلی‌اتیلن با چگالی بالای بازیافتی حاصل از ظروف پلاستیکی: افزودن ۲ تا ۱۰ درصد پلی‌اتیلن با چگالی بالای بازیافتی، مقاومت در برابر شیارشدگی را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد (Lastra-González et al., 2016; Al- (Hosainat et al., 2024).

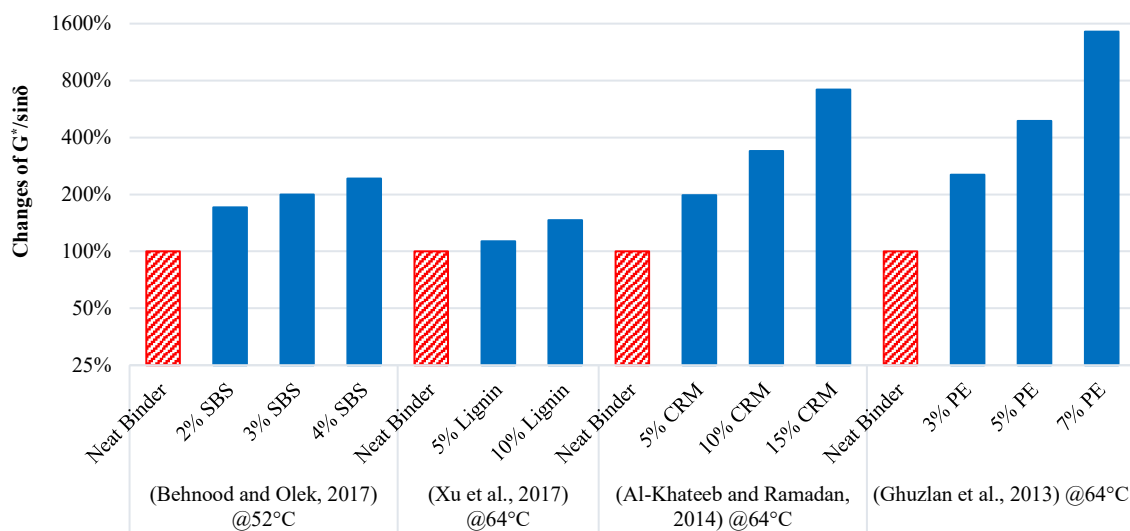
- پلی‌پروپیلن و پلی‌وینیل‌کلراید بازیافتی: این مواد با افزایش ویسکوزیته و بهبود مدول برجهندگی، عمر خستگی روسازی را افزایش می‌دهند.

- پلیمرهای زیست‌پایه نظیر لیگنین و نشاسته: این مواد که از ضایعات کشاورزی و صنایع چوب استخراج می‌شوند، تجدیدپذیر بوده و اثرات محیط زیستی کمتری دارند. مهم‌ترین چالش استفاده از پلیمرهای بازیافتی، ناسازگاری فازی بین پلیمر و قیر و تمایل به جداسازی در هنگام ذخیره‌سازی است که با استفاده از عوامل سازگارکننده نظیر گوگرد قابل بهبود می‌باشد (Behnood & Gharehveran, 2019).

۳-۲- اثرات افزودنی‌ها بر عملکرد روسازی

افزایش روزافزون ترافیک و بارهای محوری سنگین، روسازی‌های آسفالتی را با چالش‌های جدی مانند تغییر شکل دائم (شیارشده‌گی) و ترک‌های خستگی مواجه ساخته است. برای مقابله با این پدیده‌ها، استفاده از مواد افزودنی و اصلاح‌کننده‌های قیر یکی از راهکارهای مؤثر محسوب می‌شود. این افزودنی‌ها با تغییر خواص رئولوژیکی قیر، از جمله سختی و الاستیسیته آن در دماهای مختلف، می‌توانند مقاومت روسازی را در برابر خرابی‌ها بهبود بخشند. در این راستا، پارامترهایی مانند شاخص شیارشدگی ($G^*/\sin\delta$) و معیار مقاومت در برابر خستگی ($G^* \times \sin\delta$) به عنوان ابزارهایی کلیدی در ارزیابی عملکرد قیرهای اصلاح‌شده و مقایسه آنها با قیر خالص مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۴۴۰ به ۴۸۰ (افزایش حدود ۹ درصد) را موجب می‌شود که حاکی از وجود یک غلظت بهینه در حدود ۵ درصد برای این افزودنی می‌باشد. در مجموع، بر اساس یافته‌های این مطالعه، پودر لاستیک با ۱۵ درصد دارای بالاترین قابلیت در بهبود مقاومت در برابر شیارشدگی است و پس از آن پلی‌اتیلن ۷-۵ درصد و ۴ درصد SBS به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. اصلاح‌کننده لیگنین، علی‌رغم مزایای زیست‌محیطی، کمترین تأثیر را بر این پارامتر داشته و برای کاربردهای با ترافیک سنگین توصیه نمی‌شود. این نتایج می‌تواند راهنمای مناسبی برای انتخاب نوع و درصد افزودنی بهینه بر اساس شرایط بارگذاری و محدودیت‌های اقتصادی پروژه‌های روسازی باشد.



شکل ۱. پارامتر $G^*/\sin\delta$ قیرهای اصلاح شده پلیمری (استایرن بوتادین استایرن، لیگنین، پودر لاستیک، پلی اتیلن)

باعث بهبود $G^*/\sin\delta$ شده است؛ به طوری که ۰/۵ درصد نانولوله کربنی مقدار ۱۲۰، ۱ درصد افزودنی مقدار ۱۳۵، ۲ درصد افزودنی مقدار ۱۴۰ و در نهایت ۳ درصد افزودنی جهشی چشمگیر تا مقدار ۴۰۰ را به همراه داشته است که معادل افزایش ۲۶۴ درصدی نسبت به قیر خالص می‌باشد. این ناهم‌هنگی بین دو سری را می‌توان به تفاوت در نوع قیر پایه، روش اختلاط، دمای آزمایش یا عوامل دیگر نسبت داد. با این وجود، در هر دو سری مشاهده می‌شود که غلظت ۳ درصد نانولوله کربنی بهترین عملکرد را ارائه می‌دهد. نتایج مربوط به نانورس نشان می‌دهد که این افزودنی نیز تأثیر مثبتی بر افزایش مدول برشی مرکب دارد. با افزودن ۴ درصد نانورس، مقدار $G^*/\sin\delta$ از ۱۰۵ به ۱۳۰ رسیده است که افزایش ۲۴ درصدی را نشان می‌دهد. با افزایش غلظت به ۹ درصد، مقدار $G^*/\sin\delta$

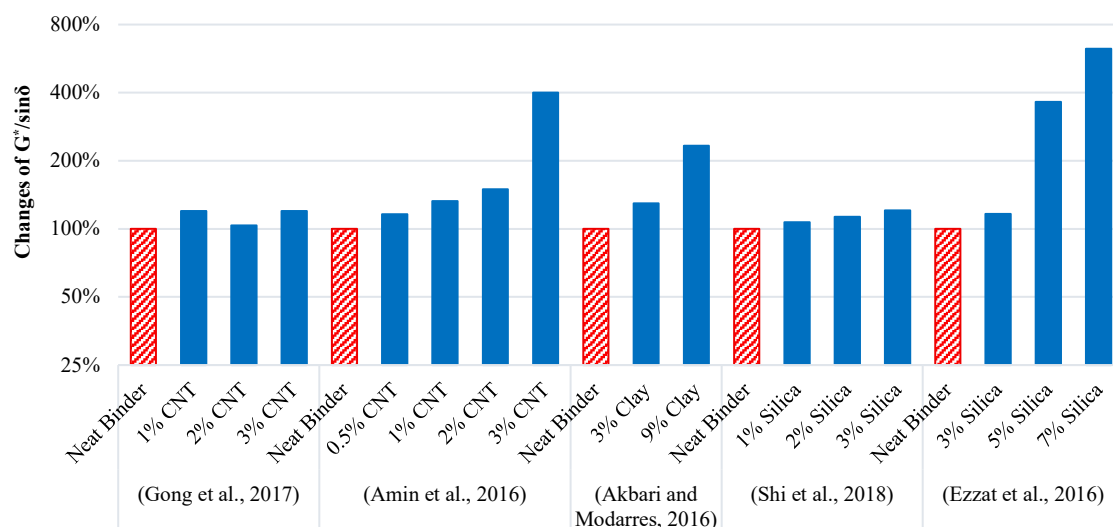
لاستیک و پلی‌اتیلن عملکرد بسیار برجسته‌تری از خود نشان داده‌اند. برای پودر لاستیک، افزایش غلظت از ۵ به ۱۰ درصد و سپس ۱۵ درصد به ترتیب مقادیر ۲۰۰، ۳۶۰ و ۷۸۰ درصد را به همراه داشته است. مقدار ۷۸۰ در نمونه ۱۵ درصد پودر لاستیک، معادل افزایش ۶۸۰ درصد نسبت به قیر خالص است که بالاترین مقدار ثبت شده در میان تمامی نمونه‌ها می‌باشد. این نتیجه مؤید تأثیر فوق‌العاده پودر لاستیک در افزایش سختی و رفتار الاستیک قیر به دلیل ماهیت پلیمری و شبکه‌ای آن است. پلی‌اتیلن نیز با مقادیر ۲۴۰، ۴۴۰ و ۴۸۰ به ترتیب برای درصدهای ۳، ۵ و ۷، عملکرد بسیار خوبی از خود نشان می‌دهد. نکته قابل توجه در این گروه، کاهش شیب افزایشی در غلظت‌های بالای ۵ درصد است؛ به طوری که افزایش درصد PE از ۵ به ۷، تنها جهشی از

در شکل ۲، تأثیر سه نوع افزودنی نانومقیاس شامل نانولوله کربنی، نانورس و نانوسیلیکا بر پارامتر شیارشدگی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج مربوط به نانوکربن حاوی نکات قابل توجهی است. در سری اول آزمایش‌ها، با افزودن ۱ درصد افزودنی، مقدار $G^*/\sin\delta$ از ۱۰۵ به ۱۲۰ افزایش یافته که بیانگر بهبود ۱۴ درصدی است. اما افزایش غلظت به ۲ درصد افزودنی نه تنها بهبودی ایجاد نکرده است، بلکه مقدار $G^*/\sin\delta$ را مجدداً به ۱۰۵ بازگردانده و در ۳ درصد افزودنی، مقدار آن به ۱۱۵ رسیده است که تنها ۱۰ درصد افزایش را نشان می‌دهد. این رفتار غیرخطی و کاهش عملکرد در غلظت ۲ درصد می‌تواند ناشی از پدیده تجمع یا توزیع نامناسب نانولوله کربنی در ماتریس قیر باشد. در مقابل، سری دوم نتایج الگوی کاملاً متفاوتی را نشان می‌دهد. در این سری، افزایش غلظت افزودنی به طور مداوم

ناگهانی بین غلظت ۳ درصد و ۵ درصد، می‌تواند نشان از وجود یک غلظت آستانه در حدود ۵ درصد برای نانوسیلیکا باشد. به عبارت دیگر، تا زیر این آستانه، نانوسیلیکا تأثیر قابل توجهی ندارد، اما پس از عبور از آن، ذرات قادر به تشکیل یک شبکه پایدار و افزایش چشمگیر سختی قیر می‌شوند.

به عنوان جمع‌بندی، هر سه نوع نانومواد مورد بررسی قادر به افزایش مدول برشی مرکب قیر هستند، اما میزان اثربخشی آنها به شدت به غلظت مورد استفاده وابسته است. نانورس رفتاری پایدار و قابل پیش‌بینی داشته و در غلظت ۹ درصد عملکرد بسیار خوبی ارائه می‌دهد. در مقابل، نانوکربن و نانوسیلیکا رفتاری غیرخطی و وابسته به آستانه غلظت نشان می‌دهند. برای نانولوله کربنی، غلظت ۳ درصد و برای نانوسیلیکا، غلظت‌های ۵ و ۷ درصد منجر به افزایش‌های چشمگیر تا بیش از ۲۵۰ درصد در $G^*/\sin\delta$ شده‌اند. غلظت‌های پایین این دو ماده تأثیر ناچیزی داشته و به دلیل احتمال توزیع نامناسب یا تجمع ذرات، قابل توصیه نیستند؛ بنابراین، در صورت استفاده از این نانومواد برای افزایش سختی و مقاومت قیر، رعایت غلظت‌های بالاتر از آستانه بحرانی ضروری به نظر می‌رسد.

به ۲۳۰ افزایش یافته که معادل بهبود ۱۱۹ درصدی نسبت به قیر خالص است. این رفتار صعودی و نسبتاً خطی نشان‌دهنده تأثیر پایدار و قابل پیش‌بینی نانورس بر سختی قیر می‌باشد. در مورد نانوسیلیکا نیز مانند نانولوله کربنی، دو سری نتایج با رفتارهای متفاوت مشاهده می‌شود. در سری اول که غلظت‌های پایین ۱، ۲ و ۳ درصد مورد بررسی قرار گرفته‌اند، تأثیر این افزودنی بسیار محدود است. مقدار $G^*/\sin\delta$ در ۱ درصد سیلیکا به ۱۱۵، در ۲ درصد به ۱۱۰ و در ۳ درصد مجدداً به ۱۱۵ رسیده است که حداکثر افزایش آن تنها ۱۰ درصد بوده و حتی در غلظت ۲ درصد نسبت به ۱ درصد کاهش جزئی نشان داده می‌شود. این نتایج حاکی از آن است که در غلظت‌های پایین، نانوسیلیکا قادر به تشکیل شبکه مؤثر درون قیر نبوده و تأثیر چندانی بر سختی آن ندارد. اما در سری دوم که غلظت‌های بالاتر ۵ و ۷ درصد مورد آزمایش قرار گرفته‌اند، نتایج کاملاً متفاوت است. در این سری، ۵ درصد سیلیکا مقدار $G^*/\sin\delta$ را به ۳۹۰ می‌رساند که افزایش ۲۷۱ درصدی را نشان می‌دهد و با افزایش به ۷ درصد، این مقدار به ۴۴۰ می‌رسد که معادل بهبود ۳۱۹ درصدی است. این رفتار غیرخطی و وجود یک جهش



شکل ۲. پارامتر $G^*/\sin\delta$ قیرهای اصلاح شده نانو مواد (نانولوله کربنی، نانورس، نانوسیلیکا)

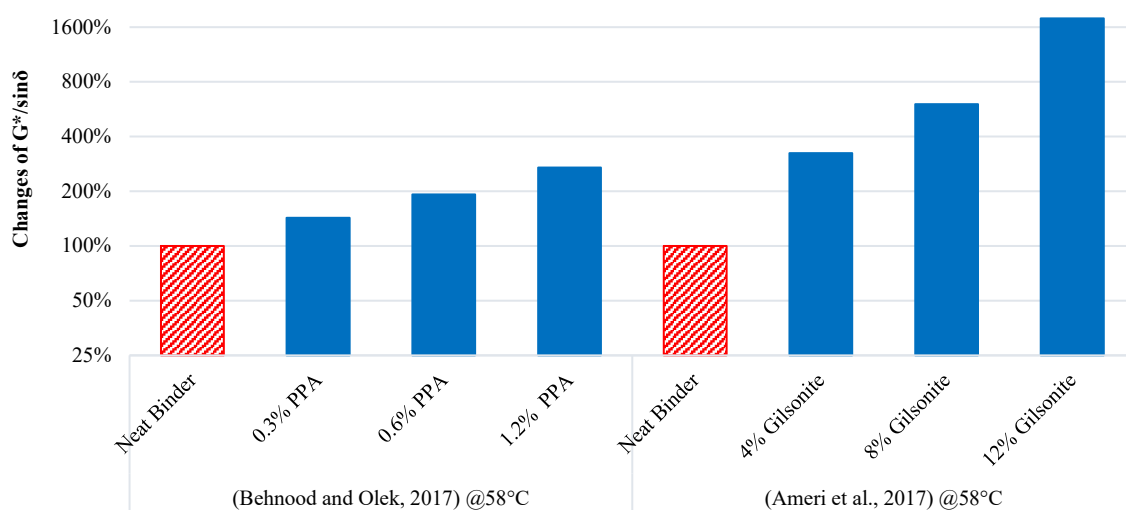
افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده بهبود ۱۰۰ درصدی نسبت به قیر خالص می‌باشد. در نهایت، با افزودن ۱/۲ درصد PPA، جهش قابل توجه دیگری رخ می‌دهد و مقدار این پارامتر به ۳۰۰ می‌رسد (معادل افزایش ۲۰۰ درصدی). این روند صعودی حاکی از آن است که PPA با افزایش غلظت، به طور مداوم و با شیبی تند، مقاومت قیر در برابر شیارشدگی را بهبود می‌بخشد.

شکل ۳ تأثیر دو نوع افزودنی اصلاح‌کننده قیر شامل اسید پلی فسفریک و گیلسونایت بر شیارشدگی را نشان می‌دهد. نتایج ارائه شده در این شکل مربوط به اسید پلی فسفریک نشان می‌دهد که این ماده تأثیر بسیار چشمگیری بر افزایش ضریب شیارشدگی دارد. با افزودن ۰/۳ درصد PPA، مقدار $G^*/\sin\delta$ از سطح پایه ۱۰۰ به ۱۴۰ می‌رسد که معادل افزایش ۴۰ درصدی است. با افزایش غلظت به ۰/۶ درصد، مقدار این شاخص به ۲۰۰

همچنین بالاترین غلظت PPA با افزایش ۲۰۰ درصدی، هنوز کمتر از کمترین غلظت گیلسونایت (۴ درصد با افزایش ۲۵۰ درصدی) می‌باشد. با این حال، نکته مهم در مورد گیلسونایت، کاهش بازدهی افزایشی در غلظت‌های بالا است؛ به طوری که افزایش غلظت از ۴ به ۸ درصد، جهشی ۱۰۰ درصدی (از ۳۵۰ به ۴۵۰) و افزایش از ۸ به ۱۲ درصد، جهشی ۱۰۰ درصدی دیگر (از ۴۵۰ به ۵۵۰) را به همراه دارد. این در حالی است که در PPA، افزایش غلظت از ۰/۳ به ۰/۶ درصد، افزایش ۶۰ درصدی و از ۰/۶ به ۱/۲ درصد، افزایش ۱۰۰ درصدی ایجاد کرده است که نشان‌دهنده بازدهی نسبتاً بهتر در غلظت‌های بالاتر این ماده می‌باشد. به عنوان جمع‌بندی می‌توان اشاره نمود که از منظر مقاومت در برابر شیارشدگی، هر دو افزودنی PPA و گیلسونایت عملکرد بسیار مطلوبی داشته و می‌توانند به عنوان گزینه‌های مؤثر برای بهبود این خرابی در روسازی‌های با ترافیک سنگین مورد استفاده قرار گیرند. گیلسونایت با افزایش تا ۴۵۰ درصدی در غلظت ۱۲ درصد، بیشترین تأثیر را دارد.

به عبارت دیگر، PPA یک سفت‌کننده بسیار مؤثر برای قیر محسوب می‌شود و می‌تواند به عنوان جایگزین یا مکمل پلیمرها در کاربردهای سنگین مورد توجه قرار گیرد.

در ادامه، نتایج مربوط به افزودنی گیلسونایت به عنوان یک نوع قیر طبیعی با درجه سفتی بسیار بالا، تأثیر چشمگیرتری را نشان می‌دهد. با افزودن ۴ درصد گیلسونایت، مقدار $G^*/\sin\delta$ از ۱۰۰ به ۳۵۰ می‌رسد که بیانگر افزایش ۲۵۰ درصدی است. با افزایش غلظت به ۸ درصد، مقدار این شاخص به ۴۵۰ افزایش می‌یابد که معادل بهبود ۳۵۰ درصدی نسبت به قیر خالص می‌باشد. در نهایت، با افزودن ۱۲ درصد گیلسونایت، مقدار این پارامتر به ۵۵۰ می‌رسد که نشان‌دهنده افزایش ۴۵۰ درصدی است. این مقادیر بسیار بالا حاکی از تأثیر فوق‌العاده گیلسونایت در افزایش سختی و مقاومت قیر در برابر تغییر شکل‌های دائمی می‌باشد. مقایسه این دو افزودنی نشان می‌دهد که هر دو ماده قادر به افزایش قابل توجه $G^*/\sin\delta$ هستند، اما گیلسونایت در تمام غلظت‌ها عملکرد بهتری نسبت به PPA دارد. برای نمونه، در حالی که ۰/۶ درصد PPA افزایش ۱۰۰ درصدی ایجاد می‌کند، ۴ درصد گیلسونایت افزایش ۲۵۰ درصدی به همراه دارد.



شکل ۳. پارامتر $G^*/\sin\delta$ قیرهای اصلاح شده سایر مواد (پلی فسفریک اسید و گیلسونایت)

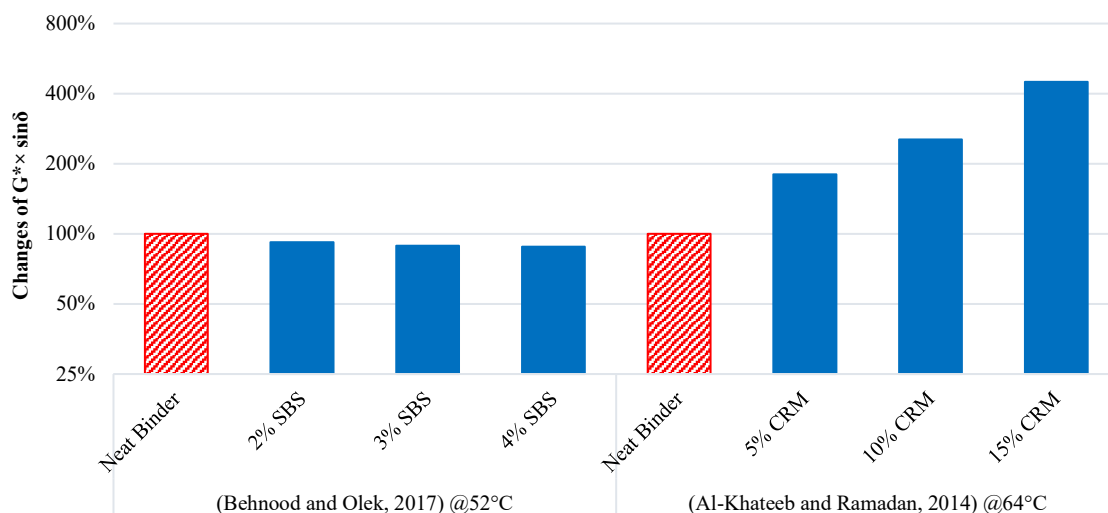
۳-۲- معیار خستگی

(DSR) دو کمیت اساسی یعنی مدول برشی مرکب (G^*) و زاویه فاز (δ) را اندازه‌گیری می‌کند. حاصل ضرب این دو پارامتر در یکدیگر با در نظر گرفتن سینوس زاویه فاز، شاخص $G^*\sin\delta$ می‌دهد که به عنوان معیاری برای سنجش مقاومت قیر در برابر ترک‌های خستگی شناخته می‌شود (Kucharek et al., 2020). بر اساس الزامات آیین‌نامه AASHTO، مقدار این شاخص برای

پدیده ترک‌خوردگی ناشی از خستگی در لایه آسفالتی معمولاً در بازه دمایی متوسط تا پایین و در نتیجه اعمال مکرر بارهای ترافیکی ظاهر می‌شود. برای شبیه‌سازی و ارزیابی این نوع خرابی در شرایط آزمایشگاهی، لازم است نمونه‌های قیر تحت فرآیندهای پیرشدگی کوتاه‌مدت و بلندمدت قرار گیرند (Xie et al., 2018). در این راستا، آزمون رئومتر برشی دینامیکی

(2023). در ادامه، تأثیر افزودنی‌های اصلاح‌کننده قیر بر پارامتر $G^* \times \sin \delta$ مورد ارزیابی قرار گرفته است. شکل ۴ تأثیر دو نوع افزودنی متداول شامل پلیمر SBS و پودر لاستیک را بر پارامتر $G^* \times \sin \delta$ نشان می‌دهد.

تمامی قیرهای عملکردی در دمای طراحی مربوط به هر رده، نباید از حد مجاز ۵۰۰۰ کیلوپاسکال فراتر رود. به عبارت دیگر، هر چه مقادیر مدول برشی مرکب و زاویه فاز یک قیر کمتر باشد، انتظار می‌رود که آن قیر عملکرد بهتری در مقابله با گسترش ترک‌های ناشی از خستگی از خود نشان دهد (Pandey et al.,



شکل ۴. پارامتر $G^* \times \sin \delta$ قیرهای اصلاح شده پلیمری (استایرن بوتادین استایرن، پودر لاستیک)

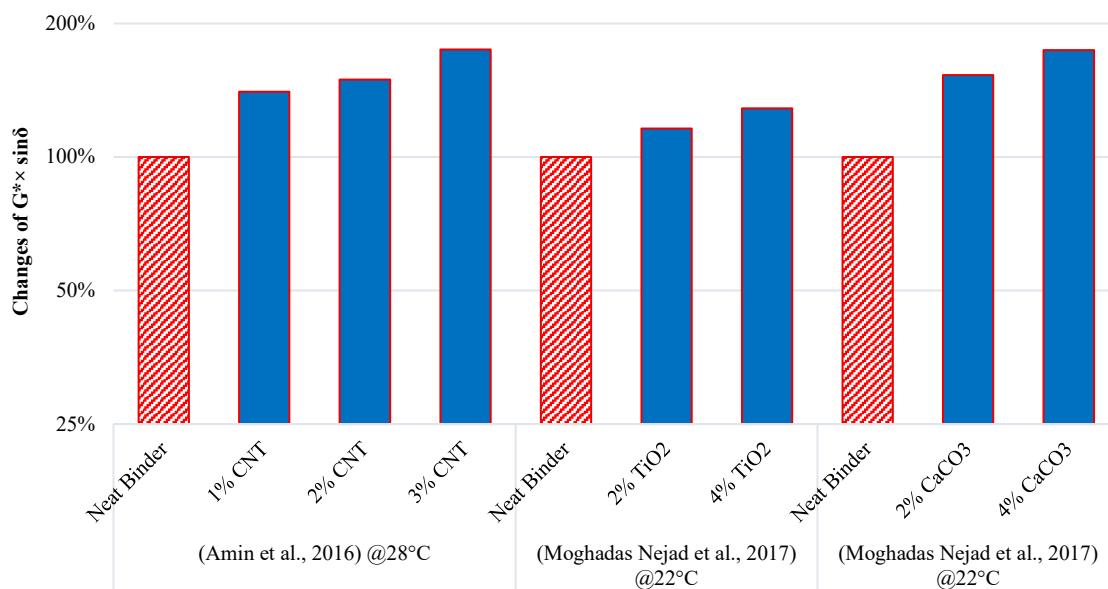
افزایش ۹۰ درصدی است. با افزایش غلظت به ۱۰ درصد، این شاخص به ۲۴۰ می‌رسد که نشان‌دهنده افزایش ۱۴۰ درصدی نسبت به قیر خالص می‌باشد. در نهایت، با افزودن ۱۵ درصد افزودنی، مقدار این پارامتر به ۴۲۰ افزایش چشمگیری می‌یابد (معادل بهبود ۳۲۰ درصدی). این روند صعودی و شدید نشان می‌دهد که پودر لاستیک، بر خلاف SBS، تأثیر قابل توجهی بر افزایش پارامتر $G^* \times \sin \delta$ دارد. هر چند که در بخش‌های پیشین مشاهده شد که پودر لاستیک عملکرد فوق‌العاده‌ای در بهبود مقاومت در برابر شیارشدگی دارد، اما از منظر مقاومت در برابر ترک‌های خستگی در دماهای متوسط، این افزودنی وضعیت نامطلوبی ایجاد می‌کند. افزایش $G^* \times \sin \delta$ به معنای سخت‌تر و شکننده‌تر شدن قیر است که این امر آن را مستعد ترک‌خوردگی ناشی از خستگی می‌سازد. مقایسه این دو افزودنی حاکی از یک تضاد اساسی در عملکرد آنها است. SBS به عنوان یک پلیمر الاستومری، ضمن حفظ خاصیت ارتجاعی قیر از افزایش بیش از حد سختی آن جلوگیری می‌کند و می‌تواند $G^* \times \sin \delta$ را کاهش دهد. در مقابل، پودر لاستیک با افزایش بسیار چشمگیر سختی قیر (که ناشی از ذرات لاستیک نامحلول و جذب‌کننده قیر است)، هم‌زمان با بهبود شیارشدگی، مقاومت در برابر خستگی را به شدت کاهش می‌دهد. این یافته نشان می‌دهد که انتخاب افزودنی صرفاً بر اساس عملکرد در برابر شیارشدگی کافی نبوده و باید اثرات آن بر خستگی نیز به دقت مورد بررسی قرار گیرد.

بر اساس شکل ۴، بر خلاف انتظار رایج که افزودن پلیمرها معمولاً باعث افزایش سختی قیر می‌شود، نتایج مربوط به پلیمر SBS نشان می‌دهد که با افزودن ۲، ۳ و ۴ درصد SBS، مقدار پارامتر $G^* \times \sin \delta$ از سطح پایه ۱۰۰ به ۹۵ کاهش می‌یابد. این کاهش ۵ درصدی در هر سه غلظت به طور یکسان رخ داده و نشان می‌دهد که افزودن SBS نه تنها باعث افزایش این شاخص نمی‌شود، بلکه آن را اندکی کاهش نیز می‌دهد. این رفتار از منظر مقاومت در برابر ترک‌های خستگی بسیار مطلوب است، زیرا کاهش $G^* \times \sin \delta$ به معنای کاهش تنش در نوک ترک و در نتیجه افزایش مقاومت قیر در برابر گسترش ترک‌های ناشی از خستگی می‌باشد. به عبارت دیگر، SBS علاوه بر مزیت شناخته شده خود در بهبود مقاومت در برابر شیارشدگی در دماهای بالا، اثر مثبتی نیز بر رفتار خستگی قیر در دماهای متوسط دارد. این ویژگی منحصر به فرد SBS را به یک اصلاح‌کننده متوازن تبدیل می‌کند که قادر است هم‌زمان دو خرابی مهم روسازی یعنی شیارشدگی و ترک‌های خستگی را بهبود بخشد. نکته قابل توجه دیگر، عدم تأثیر غلظت SBS بر میزان کاهش این پارامتر است؛ بدین معنی که حتی ۲ درصد SBS نیز همان کاهش ۵ درصدی را ایجاد می‌کند و افزایش غلظت تا ۴ درصد تأثیر بیشتری بر این شاخص ندارد. در مقابل، نتایج مربوط به پودر لاستیک الگوی کاملاً متفاوتی را نشان می‌دهد. با افزودن ۵ درصد از این افزودنی، مقدار $G^* \times \sin \delta$ از ۱۰۰ به ۱۹۰ افزایش می‌یابد که معادل

است. این روند صعودی نشان می‌دهد که نانولوله کربنی با افزایش غلظت، مقاومت در برابر خستگی را به طور پیوسته کاهش می‌دهد و این کاهش در غلظت ۳ درصد به حداکثر می‌رسد. دی‌اکسید تیتانیوم نیز تأثیر مشابهی بر این پارامتر دارد، هر چند میزان آن کمتر از نانولوله کربنی است. با افزودن ۲ درصد TiO_2 ، مقدار $G^* \times \sin \delta$ از ۱۰۰ به ۱۱۸ و با افزایش به ۴ درصد، به ۱۲۸ می‌رسد که معادل کاهش ۲۸ درصدی مقاومت در برابر خستگی می‌باشد. در مقایسه با نانولوله کربنی در غلظت مشابه، نانولوله کربنی اثر منفی بیشتری دارد. کربنات کلسیم نیز الگویی مشابه نشان می‌دهد. با افزودن ۲ درصد CaCO_3 ، مقدار $G^* \times \sin \delta$ به ۱۳۸ و با افزایش به ۴ درصد، به ۱۴۲ می‌رسد. عملکرد ۲ درصد CaCO_3 معادل ۱ درصد نانولوله کربنی بوده و افزایش غلظت از ۲ به ۴ درصد تنها افزایش ۴ واحدی در این پارامتر ایجاد می‌کند که نشان‌دهنده وجود غلظت بهینه در حدود ۲ درصد برای کمینه کردن اثر منفی این افزودنی است. در جمع‌بندی، هر سه افزودنی مقاومت در برابر خستگی را کاهش می‌دهند. نانولوله کربنی با کاهش ۸۵ درصدی بدترین عملکرد را دارد، پس از آن CaCO_3 با کاهش ۴۲ درصدی و در نهایت TiO_2 با کاهش ۲۸ درصدی قرار می‌گیرد. از نظر کاربردی، برای پروژه‌هایی که خستگی یک نگرانی جدی است، استفاده از این نانومواد توصیه نمی‌شود و در صورت اجبار به استفاده، CaCO_3 با غلظت ۲ درصد کمترین اثر منفی را دارد.

جمع‌بندی این موارد نشان می‌دهد که از منظر پارامتر $G^* \times \sin \delta$ و مقاومت در برابر ترک‌های خستگی، پلیمر SBS عملکرد بسیار مطلوبی داشته و حتی با کاهش ۵ درصدی این شاخص، موجب بهبود رفتار خستگی قیر می‌شود. در مقابل، پودر لاستیک به ویژه در غلظت‌های بالای ۱۰ درصد، افزایش بسیار چشمگیری در $G^* \times \sin \delta$ ایجاد کرده و پتانسیل بالایی برای کاهش مقاومت در برابر ترک‌های خستگی دارد؛ بنابراین، در پروژه‌هایی که ترک‌های خستگی یک نگرانی جدی هستند (مانند روسازی‌های با ترافیک سنگین در مناطقی با دماهای متوسط)، استفاده از SBS به عنوان اصلاح‌کننده اولویت دارد و در صورت استفاده از پودر لاستیک، لازم است تمهیداتی برای جبران اثرات منفی آن بر خستگی، مانند ترکیب با مواد نرم‌کننده یا محدود کردن غلظت حداکثر به ۵ درصد، در نظر گرفته شود.

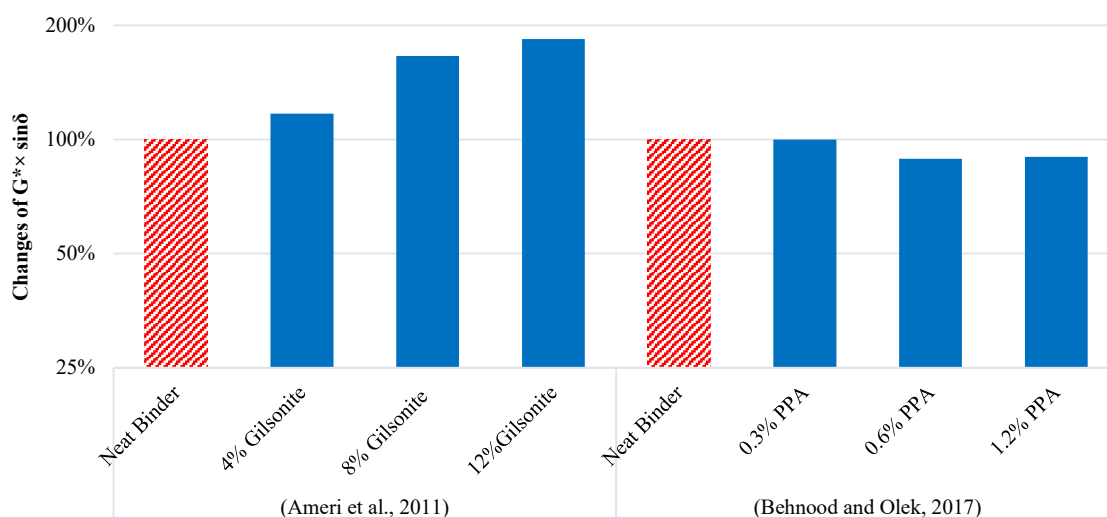
در شکل ۵، اثر سه ماده اصلاح‌کننده مختلف شامل نانوکربن، دی‌اکسید تیتانیوم و کربنات کلسیم بر دو شاخص رئولوژیکی مهم قیر ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که نانوکربن تأثیر مثبت و قابل توجهی بر افزایش پارامتر خستگی دارد. با افزودن ۱ درصد نانولوله کربنی، مقدار $G^* \times \sin \delta$ از ۱۰۰ به ۱۳۸ افزایش می‌یابد. با افزایش غلظت به ۲ درصد، این مقدار به ۱۴۰ می‌رسد و در نهایت با افزودن ۳ درصد نانولوله کربنی جهش قابل توجهی رخ داده و مقدار به ۱۸۵ افزایش می‌یابد که معادل کاهش ۸۵ درصدی مقاومت در برابر خستگی نسبت به قیر خالص



شکل ۵. پارامتر $G^* \times \sin \delta$ قیرهای اصلاح شده با نانو مواد (نانولوله کربنی، نانوتیتانیوم دی اکسید، نانولوله کربنات کلسیم)

با افزودن ۰/۳ درصد PPA، مقدار $G^* \times \sin \delta$ بدون تغییر و دقیقاً برابر با مقدار قیر خالص باقی می‌ماند. با افزایش غلظت به ۰/۶ درصد، مقدار این شاخص از ۱۰۰ به ۹۰ کاهش می‌یابد (معادل کاهش ۱۰ درصدی). با افزایش بیشتر غلظت به ۱/۲ درصد، مقدار شاخص در همان سطح ۹۰ باقی می‌ماند و کاهش بیشتری مشاهده نمی‌شود. این رفتار از منظر مقاومت در برابر ترک‌های خستگی بسیار مطلوب است، زیرا کاهش $G^* \times \sin \delta$ به معنای افزایش مقاومت قیر در برابر گسترش ترک‌های خستگی می‌باشد. بر خلاف انتظار رایج که PPA عمدتاً به عنوان یک سفت‌کننده قیر شناخته می‌شود، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که در غلظت‌های ۰/۶ و ۱/۲ درصد، این افزودنی نه تنها $G^* \times \sin \delta$ را افزایش نمی‌دهد، بلکه آن را کاهش نیز می‌دهد. به طور کلی، از منظر مقاومت در برابر ترک‌های خستگی، اسید پلی فسفریک با کاهش ۱۰ درصدی این شاخص در غلظت‌های ۰/۶ و ۱/۲ درصد، عملکرد بسیار مطلوبی داشته و حتی موجب بهبود رفتار خستگی قیر می‌شود. در مقابل، گیلسونایت با افزایش تا ۹۵ درصدی $G^* \times \sin \delta$ ، تأثیر نامطلوبی بر مقاومت در برابر خستگی داشته و آن را به شدت کاهش می‌دهد؛ بنابراین، در پروژه‌هایی که ترک‌های خستگی یک نگرانی جدی هستند، استفاده از PPA به عنوان اصلاح‌کننده اولویت دارد و استفاده از گیلسونایت باید با احتیاط و ترجیحاً در غلظت‌های حداکثر ۴ درصد انجام شود.

در شکل ۶، تأثیر دو نوع افزودنی اصلاح‌کننده قیر شامل گیلسونایت و اسید پلی فسفریک بر پارامتر $G^* \times \sin \delta$ مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج مربوط به افزودنی گیلسونایت نشان می‌دهد که این ماده تأثیر قابل توجهی بر افزایش پارامتر $G^* \times \sin \delta$ دارد. با افزودن ۴ درصد گیلسونایت، مقدار این شاخص از سطح پایه ۱۰۰ به ۱۱۵ می‌رسد که معادل افزایش ۱۵ درصدی است. با افزایش غلظت به ۸ درصد، مقدار شاخص به ۱۸۰ می‌رسد که نشان‌دهنده افزایش ۸۰ درصدی نسبت به قیر خالص می‌باشد. در نهایت، با افزودن ۱۲ درصد گیلسونایت، مقدار این پارامتر به ۱۹۵ افزایش می‌یابد که معادل بهبود ۹۵ درصدی است. این روند صعودی و نسبتاً پایدار نشان می‌دهد که گیلسونایت با افزایش غلظت، به طور مداوم سختی قیر را افزایش داده و در نتیجه مقدار $G^* \times \sin \delta$ را بالا می‌برد. از منظر مقاومت در برابر خستگی، این افزایش مطلوب نبوده و مقادیر بالاتر این شاخص به معنای کاهش مقاومت در برابر گسترش ترک‌های خستگی می‌باشد. نکته قابل توجه، شیب نسبتاً ملایم افزایش بین غلظت‌های ۸ و ۱۲ درصد است؛ به طوری که افزایش غلظت از ۸ به ۱۲ درصد، تنها جهشی از ۱۸۰ به ۱۹۵ را به همراه داشته که حاکی از کاهش بازدهی این افزودنی در غلظت‌های بالا می‌باشد. در مقابل، نتایج مربوط به اسید پلی فسفریک الگوی کاملاً متفاوتی را نشان می‌دهد.



شکل ۶. پارامتر $G^* \times \sin \delta$ قیرهای اصلاح شده با سایر مواد (پلی فسفریک اسید و گیلسونایت)

۴- نتایج و بحث

بررسی مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که افزودنی‌های سازگار با محیط زیست را می‌توان از منظر عملکردی به سه دسته کلی تقسیم نمود: الف) افزودنی‌های با اثر غالب بر بهبود خواص مکانیکی: پلیمرهای بازیافتی و الیاف طبیعی در این دسته قرار می‌گیرند. این مواد عمدتاً با افزایش ویسکوزیته، مدول برجهندگی و چقرمگی، مقاومت در برابر شیارشدگی و ترک‌خوردگی را بهبود می‌بخشند. ب) افزودنی‌های با اثر غالب بر کاهش اثرات محیط زیستی: فوتوکاتالیست‌هایی نظیر TiO_2 و تورمالین در این دسته قرار دارند. این مواد مستقیماً آلاینده‌های هوا را تجزیه کرده و یا آلاینده‌های لایه آسفالتی را جذب می‌کنند. ج) افزودنی‌های دومنظوره با بهبود خواص عملکردی و کاهش اثرات محیط زیستی: روغن‌های بازیافتی و پودر لاستیک در این دسته جای می‌گیرند. این مواد ضمن مدیریت پسماندهای

خطرناک یا حجیم، خواص رئولوژیکی و مکانیکی قیر را نیز بهبود می‌بخشند. نکته حائز اهمیت آن که عملکرد هر افزودنی به شدت به نوع قیر پایه، شرایط اقلیمی، حجم ترافیک و روش اختلاط وابسته است؛ بنابراین، نمی‌توان یک افزودنی واحد را به عنوان راهکار بهینه برای تمامی شرایط معرفی کرد. همچنین در بسیاری از موارد، استفاده از ترکیب دو یا چند افزودنی (مانند روغن بازیافتی و پلیمر) نتایج هم‌افزایی به مراتب بهتری نسبت به کاربرد تکی آنها به همراه دارد. البته بایستی توجه داشت که ترکیب افزودنی‌ها در راستای تقویت تأثیرات مثبت هر یک (بهبود خواص و کاهش آثار محیط زیستی) بوده و تأثیر منفی بر مکانیسم اثر افزودنی نداشته باشد. به علاوه اگر چه برخی افزودنی‌های نوین مانند نانومواد در کوتاه‌مدت هزینه اولیه بالاتری دارند، اما افزایش طول عمر روسازی و کاهش هزینه‌های نگهداری در بلندمدت، می‌تواند این روش‌ها را توجیه‌پذیر سازد.

جدول ۲. بررسی افزودنی‌های قیر در روسازی‌های آسفالتی

افزودنی	درصد بهینه (نسبت به وزن کل مخلوط)	تأثیر عملکردی	اثر محیط زیستی	چالش اصلی
فوتوکاتالیست (مانند TiO_2 , ZnO) Hassan et al. (2013); Chen & Liu (2019)	۳-۵ (سطحی)	تجزیه HC و CO , NO_x	کاهش آلودگی هوا	سایش و کاهش دوام پوشش
پودر لاستیک (مانند لاستیک فرسوده) Yousefi Kebria et al. (2015); Wang et al. (2018)	۱۰-۲۰	افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی	مدیریت پسماند لاستیک‌های فرسوده	افزایش ویسکوزیته و انتشار دود
روغن بازیافتی (مانند WCO، روغن سوخته) Zahoor et al. (2021); Mohi Ud Din et al. (2023)	۳-۱۲	نرم کردن قیر پیرشده	بازیافت روغن‌های زائد	کاهش مقاومت در دمای بالا
پلیمر بازیافتی (مانند HDPE, PET, SBS) Lastra-González et al. (2016); Tauste-Martínez et al. (2021); Al-Hosainat et al. (2024)	۲-۱۰	افزایش مدول برجهندگی، مقاومت خستگی	کاهش پلاستیک در طبیعت و زباله‌سوزی	جداشدگی فازی و لایه‌لایه شدن
نانومواد (مانند نانورس، نانوسیلیس) Ashish et al. (2016); Bhat & Mir (2021)	۱-۵	افزایش مقاومت جداشدگی، شیارشدگی و پیری	کاهش مصرف قیر خام و افزایش دوام	هزینه بالا و چالش پراکندگی
الیاف طبیعی (مانند کنف، نارگیل) Wu et al. (2024)	۰/۳ - ۰/۵	افزایش چقرمگی، مقاومت ترک	تجدیدپذیر، زیست‌تخریب‌پذیر و محلی	جذب رطوبت و پوسیدگی احتمالی

۵- نتیجه گیری

بررسی سیستماتیک افزودنی‌های سازگار با محیط زیست در صنعت روسازی منجر به استخراج سه دسته‌بندی عملکردی شد: افزودنی‌های با اثر غالب بر بهبود خواص مکانیکی (پلیمرهای بازافزایی و الیاف طبیعی) که مقاومت در برابر شیارشدگی و چقرمگی (تا ۳۰ درصد) را افزایش می‌دهند؛ افزودنی‌های با اثر غالب بر کاهش آلودگی هوا (فوتوکاتالیست‌هایی نظیر دی‌اکسید تیتانیوم با راندمان بالای حذف آلاینده‌هایی نظیر اکسیدهای نیتروژن)؛ و افزودنی‌های دومنظوره (پودر لاستیک و روغن‌های بازافزایی) که ضمن مدیریت پسماند، خواص رئولوژیکی قیر را نیز بهبود می‌بخشند. در این میان، پودر لاستیک یکی از گزینه‌های امیدبخش از منظر اقتصاد چرخشی محسوب می‌شود که علاوه بر حل معضل دفع زباله‌های حجیم، مقاومت در برابر شیارشدگی را افزایش می‌دهد. با این حال، تأیید قطعی این ادعاها مستلزم تحلیل چرخه عمر (LCA) و هزینه‌های چرخه عمر (LCCA) منطبق با شرایط است، زیرا مهم‌ترین محدودیت مطالعه حاضر، فقدان اعتبارسنجی میدانی بلندمدت و عدم لحاظ تنوع اقلیمی و ترافیکی می‌باشد. بسیاری از افزودنی‌هایی که در مقیاس آزمایشگاهی عملکرد عالی نشان داده‌اند، در عمل با چالش‌هایی نظیر کاهش دوام در برابر سایش، جداشدگی فازی در حین حمل و نقل، یا افت عملکرد در دماهای حدی مواجه می‌شوند. به این ترتیب، تحقق اهداف توسعه پایدار نیازمند رویکرد چندوجهی شامل انتخاب آگاهانه افزودنی بر اساس شرایط محلی، تدوین آیین‌نامه‌های ملی متناسب با مصالح بومی ایران، توسعه نسل جدید مواد سازگار (زیست‌پلیمرهای تجدیدپذیر و نانوکاتالیست‌های طبیعی) و سرمایه‌گذاری در انتقال دانش از مراکز پژوهشی به صنعت است.

علی‌رغم پژوهش‌های گسترده، شش شکاف تحقیقاتی اصلی همچنان وجود دارد که مسیر پژوهش‌های آتی را ترسیم می‌نماید: نخست، فقدان اعتبارسنجی میدانی بلندمدت در شرایط اقلیمی و بارگذاری‌های مختلف؛ دوم، کمبود مطالعات ترکیبی هم‌افزا میان افزودنی‌ها (مانند پودر لاستیک با نرم‌کننده‌های زیستی برای جبران اثر منفی بر خستگی، یا ترکیب فوتوکاتالیست‌ها با الیاف طبیعی برای دستیابی به عملکرد چندگانه)؛ سوم، نبود پایگاه‌های داده بومی برای ارزیابی هم‌زمان LCA و LCCA؛ چهارم، ناشناخته ماندن رفتار درازمدت نانومواد در معرض هوازدهی و فقدان مطالعات ارزیابی ریسک

برای کارگران و محیط زیست؛ پنجم، عدم قطعیت در مورد عملکرد زیست‌پلیمرها و روغن‌های گیاهی بازافزایی در دماهای حدی و مقاومت در برابر پیری بلندمدت؛ و ششم، نبود مدل‌های پیش‌بینی عملکرد قابل اعتماد (مانند مدل‌های هوشمند مبتنی بر یادگیری ماشین) برای تخمین رفتار قیرهای اصلاح‌شده در شرایط مختلف. پر کردن این شکاف‌ها نیازمند همکاری بین‌رشته‌ای میان مهندسی عمران، علم مواد، محیط زیست و بهداشت حرفه‌ای است.

با وجود عملکرد مطلوب آزمایشگاهی، تحقق عملی افزودنی‌ها با چالش‌های اجرایی نظیر کاهش دوام پوشش‌های فوتوکاتالیستی در برابر سایش، جداشدگی فازی پلیمرهای بازافزایی، جذب رطوبت و پوسیدگی الیاف طبیعی، هزینه‌های بالای نانومواد، و افت عملکرد روغن‌های بازافزایی در دمای بالا مواجه است. از این رو، ترکیب هوشمندانه افزودنی‌ها (مانند پودر لاستیک با نرم‌کننده‌های زیستی برای جبران اثر منفی بر خستگی) می‌تواند راهگشای تعارضات عملکردی باشد. با این حال، رفع شکاف‌های تحقیقاتی یادشده از جمله اعتبارسنجی میدانی بلندمدت در اقلیم‌های متنوع ایران، تدوین پایگاه‌های داده LCA و LCCA مناسب برای ایران، بررسی رفتار درازمدت نانومواد و زیست‌پلیمرها و توسعه مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر یادگیری ماشین، نیازمند همکاری بین‌رشته‌ای و سرمایه‌گذاری در انتقال دانش به صنعت است.

در نهایت، گذار از رویکردهای سنتی به سمت کاربرد آگاهانه، ترکیبی و میدانی‌محور افزودنی‌های سازگار با محیط زیست، نه تنها یک انتخاب فنی، بلکه ضرورتی راهبردی برای دستیابی به روسازی‌های پایدار و همسو با حفاظت از منابع طبیعی و سلامت زیست‌بوم‌های کنونی و آینده است.

۶- مراجع

-عامری، محمود، چاوشیان نائینی، سیدفرهاد، وامق، مصطفی (۱۳۹۷). ارزیابی عملکرد حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی آمیخته پلیمری. مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۴(۱)، ۱-۱۶.

-عموزاده عمرانی، محسن، حفظ اله، رضا، زینال زاده، مسلم (۱۴۰۰). مطالعه کاربرد چپ سیل و فوگ سیل در مدیریت روسازی راه‌ها و مشاهدات کاربردی در محورهای شریانی استان بوشهر، جاده، ۳۰(۱۱۰)، ۱۱۸-۱۰۳.

- Hassan, M., Al-abdul Wahhab, H. I., Ali, M. F., & Aslam, F. (2013). Sustainable photocatalytic asphalt pavements for mitigation of nitrogen oxide and sulfur dioxide vehicle emissions. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(3), 365-371.
- Hoffmann, M. R., Martin, S. T., Choi, W., & Bahnemann, D. W. (1995). Environmental applications of semiconductor photocatalysis. *Chemical Reviews*, 95(1), 69-96.
- Ibrahim, H., Alam, G., & Faheem, A. (2024). Eco-economic analysis of utilizing high volumes of recycled plastic and rubber waste for green pavements: a comparative life cycle analysis. *Case Studies in Construction Materials*, 21, e03690.
- Jahromi, S. G., & Khodaii, A. (2009). Effects of nanoclay on rheological properties of bitumen binder. *Construction and Building Materials*, 23(8), 2894-2904.
- Katanalp, B. Y., Tastan, M., & Ahmedzade, P. (2024). Recycling the electric arc furnace waste after geopolymerization in bitumen: experimental analyses and LCA study. *Materials and Structures*, 57(5), 103.
- Langston, C., & Ding, G. (2007). Sustainability and environmental assessment. In *Workplace Strategies and Facilities Management*, Routledge. 337-351.
- Lastra-González, P., Calzada-Pérez, M. A., Castro-Fresno, D., & Indacoechea-Vega, I. (2016). Comparative analysis of the performance of asphalt mixes with different percentages of recycled HDPE. *Road Materials and Pavement Design*, 17(4), 859-875.
- Liaquat, A. M., Kalam, M. A., Masjuki, H. H., & Jayed, M. H. (2010). Potential emissions reduction in road transport sector using biofuel in developing countries. *Atmospheric Environment*, 44(32), 3869-3877.
- Litman, T., & Burwell, D. (2006). Issues in sustainable transportation. *International Journal of Global Environmental Issues*, 6(4), 331-347.
- Liu, Z., Nian, T., & Wang, P. (2025). Prediction of the dynamic viscoelastic shear parameters of asphalt binder before and after freeze-thaw cycles using ACO-BPNN. *Construction and Building Materials*, 486, 142037.
- Mihyeon Jeon, C., & Amekudzi, A. (2005). Addressing sustainability in transportation systems: definitions, indicators, and metrics. *Journal of Infrastructure Systems*, 11(1), 31-50.
- Moghaddam, T. B., & Baaj, H. (2021). The use of rejuvenating agents in production of recycled asphalt mixtures: A literature review. *Construction and Building Materials*, 280, 122476.
- Mohi Ud Din, I., Bhat, F. S., & Mir, M. S. (2023). A study investigating the impact of waste cooking oil and waste engine oil on the performance properties of RAP binders. *Road Materials and Pavement Design*, 24(1), 295-309.
- Pandey, A., Singh, S. K., Islam, S. S., Ransingchung RN, G. D., Raju, S., & Ravindranath, S. S. (2023). -فخری، منصور، ظفری، آیت، مصطفوی، مجید (۱۳۹۰). بررسی راهکارهای مدیریت پیشگیرانه و مقایسه رویکردهای مختلف از لحاظ کاربرد در مدیریت و نگهداری روسازی. ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
- Abedali, A. H. (2017). Evaluation of rutting susceptibility of modified asphalt binder. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 21(4), 105-121.
- Ahmad, S., & de Oliveira, J. A. P. (2016). Determinants of urban mobility in India: Lessons for promoting sustainable and inclusive urban transportation in developing countries. *Transport Policy*, 50, 106-114.
- Al-Hosainat, A., Nazzal, M. D., Kaya, S., & Reza, T. (2024). Nano-Scale and Macro-Scale Characterizations of the Effects of Recycled Plastics on Asphalt Binder Properties. *Buildings*, 14(3), 642.
- Ashish, P. K., Singh, D., & Bohm, S. (2016). Rheological characteristics of nan silica/polymer modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 126, 1225-1235.
- Atabani, A. E., Badruddin, I. A., Mekhilef, S., & Silitonga, A. S. (2011). A review on global fuel economy standards, labels and technologies in the transportation sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4586-4610.
- Behnood, A., & Gharehveran, M. M. (2019). Morphology, rheology, and physical properties of polymer-modified asphalt binders. *European Polymer Journal*, 112, 766-791.
- Bhat, F. S., & Mir, M. S. (2021). Rheological investigation of asphalt binder modified with nanosilica. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 14, 276-287.
- Caputo, P., Porto, M., Angelico, R., Loise, V., Calandra, P., & Rossi, C. O. (2020). Bitumen and asphalt binder modified by nanotechnological materials: A comprehensive review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 7(5), 625-644.
- Chen, M., & Liu, Y. (2019). NOx removal from vehicle emissions by photocatalysis with nano-TiO2 incorporated into asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 212, 1026-1034.
- Fay, M. (2012). *Inclusive green growth: The Pathway to Sustainable Development*. World Bank Publications.
- Gao, J., Wang, H., Liu, C., Ge, D., You, Z., & Yu, M. (2018). Laboratory evaluation on comprehensive performance of polyacrylonitrile fiber reinforced asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 182, 627-636.
- Hassan, A. M., & Lee, H. (2015). Toward the sustainable development of urban areas: An overview of global trends in trials and policies. *Land Use Policy*, 48, 199-212.

International Journal of Pavement Engineering, 20(7), 782–791.

-Wang, C., Yin, F., Zhao, Y., & Yin, L. (2023). Making Transportation Systems in US Cities Smarter and More Inclusive: A Synthesis of Challenges and Evaluation of Strategies. *ISPRS International Journal of Geo Information*, 12(2), 72.

-Wang, C., Zhao, Y., Wang, H., Liu, Z., & Chen, X. (2022). Basic performance and asphalt smoke absorption effect of environment-friendly asphalt to improve pavement construction environment. *Journal of Cleaner Production*, 333, 130142.

-Wang, J., Xiong, Y., Li, Q., Jin, D., Hu, Y., & Che, T. (2023b). Experimental investigation on the preparation and surface treatment of biomass fibers for stone mastic asphalt mixtures modification. *Construction and Building Materials*, 408, 133667.

-Wang, T., Sun, L., Yu, H., & Tao, G. (2018). Energy consumption and environmental impact of rubberized asphalt pavement. *Journal of Cleaner Production*, 180, 139-158.

-Wu, J., Zhao, Z., Jiang, C., Yang, Y., Sun, Z., Yuang, J., & Xiao, F. (2024). Recent development and application of natural fiber in asphalt pavement. *Journal of Cleaner Production*, 449, 141832.

-Xie, Z. (2018). *Relationship between asphalt binder fatigue properties and mixture fatigue performance* (Doctoral dissertation, Auburn University).

-Yang, B., Zhang, Y., Zhang, Y. and Kim, S., (2020). Evaluation of bio-based fog seal for low-volume road preservation. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 13, 303–312.

-Yildirim, Y. (2007). Polymer modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 21(1), 66-72.

-Yousefi Kebria, D., Moafimadani, S. R. and Goli, Y. (2015). Laboratory investigation of the effect of crumb rubber on the characteristics and rheological behaviour of asphalt binder. *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 16, No. 4, 946-956.

-Yusoff, N. I. M., Breem, A. A. S., Alattug, H. N. M., Hamim, A., & Ahmad, J. (2014). The effects of moisture susceptibility and ageing on nanomaterial-modified asphalt. *The Scientific World Journal*, 2014.

-Zahoor, M., Nizamuddin, S., Madapusi, S., & Giustozzi, F. (2021). Sustainable asphalt rejuvenation using waste cooking oil: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123304.

Rheological analysis of performance grade rutting and fatigue cracking criteria in asphalt binders. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 16(1), 66-81.

-Pirmohammad, S., Majd Shokorlou, Y., & Amani, B. (2020). Influence of natural fibers (kenaf and goat wool) on mixed mode I/II fracture strength of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 239, 117850.

-Rocha Segundo, I., Afonso, C., Lima, O., Landi, S., Freitas, E. F., & Carneiro, J. A. O. (2023). Are there new ways to improve the asphalt mixtures' surface functions? For sure! By functionalization process. In *Roads and Airports Pavement Surface Characteristics*, CRC Press, 346-353.

-Saber, K. F., Fakhri, M., & Azami, A. (2018). Evaluation of warm mix asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement and crumb rubber. *Journal of Cleaner Production*, 195, 1297-1309.

-Sha, A., Liu, Z., Jiang, W., Qi, L., Hu, L., Jiao, W., & Barbieri, D. M. (2021). Advances and development trends in eco-friendly pavements. *Journal of Road Engineering*, 1, 1-42.

-Shah, K. J., Pan, S. Y., Lee, I., Kim, H., You, Z., Zheng, J. M., & Chiang, P. C. (2021). Green transportation for sustainability: Review of current barriers, strategies, and innovative technologies. *Journal of Cleaner Production*, 326, 129392.

-Sreelatha, T., & Raju, S. (2020). A study on the performance of coir fiber reinforced asphalt concrete. *Materials Today: Proceedings*, 33(1), 567–573.

-Staver, M., Podolsky, J., Williams, R. C., et al. (2023). Soybean Oil-Derived Additives Evaluated for Use in Bio-cutback and Bio-fog Seal Treatment. *International Journal of Pavement Research & Technology*, 16(5), 1327–1338.

-Taheri, A., Khodaii, A. & Hajikarimi, P. Correlations among chemical and rheological aging indices/indicators of asphalt binder at high temperatures. *Sci Rep* 16, 9186 (2026). doi.org/10.1038/s41598-026-40007-6

-Tauste-Martínez, R., Moreno-Navarro, F., Sol-Sánchez, M., & Rubio-Gámez, M. C. (2021). Multiscale evaluation of the effect of recycled polymers on the long-term performance of bituminous materials. *Road Materials and Pavement Design*, 22(11), 2604-2625.

-Usman, N., Masirin, M. I. M., Ahmad, K. A., & Waziri, A. U. (2019). Performance evaluation of asphalt mixture reinforced with recycled PET fiber.

Performance and Sustainability Assessment of Environmentally Friendly Additives in Asphalt Pavements

Elham Ebrahimi, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Urmia University, Urmia, Iran.

Nader Solatifar, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Urmia University, Urmia, Iran.

E-mail: e.ebrahimi@urmia.ac.ir

Received: March 2026- Accepted: August 2026

ABSTRACT

Due to the limitation of natural resources and population growth, the increasing consumption of non-renewable resources has accelerated their rapid depletion. Pavements are one of the main consumers of resources. In this study, several environmentally friendly additives including photocatalysts, recycled materials, natural fibers, nanomaterials, and polymer materials have been analyzed based on a review of studies from the last two decades. The findings show that titanium dioxide, with its high nitrogen oxide removal efficiency, is the most effective photocatalyst. Crumb rubber at 15% by weight increases the rutting parameter ($G^*/\sin\delta$) by up to 680%, but worsens the fatigue parameter ($G^*\times\sin\delta$) by up to 320%. SBS polymer at 4% improves rutting resistance by 140% while also increasing fatigue resistance by 5%. Natural fibers (hemp, coconut, goat wool) increase toughness by up to 30%, making them a suitable alternative to synthetic fibers. Among nanomaterials, nanosilica at 7% improves the rutting parameter by up to 319%. Gilsonite and polyphosphoric acid additives, with 450% and 200% increases in the rutting parameter respectively, are effective options for heavy-duty applications. However, nanosilica and gilsonite reduce fatigue resistance by 28% and 95% respectively, while polyphosphoric acid has no negative effect on fatigue. The conscious selection of additives based on local conditions and attention to the rutting-fatigue trade-off is the key to achieving sustainable pavements, and it can create positive economic and environmental impacts in the pavement industry while reducing pressure on natural resources.

Keywords: Environmentally Friendly Additives, Asphalt Pavement, Recycled Materials, Rutting Resistance, Fatigue Resistance