

مروری بر تأثیر اجزای تشکیل دهنده آسفالت‌های حفاظتی بر عملکرد و دوام آن‌ها

مقاله علمی - مروری

پویان ایاز*، استادیار، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
علیرضا بیات، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
حسین توکلی، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
محمود عامری، استاد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: ayar@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۱ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱

صفحه ۲۹۷-۳۲۲

چکیده

آسفالت‌های حفاظتی به‌عنوان یکی از راهکارهای کلیدی در نگهداری پیشگیرانه روسازی، با افزایش عمر مفید و کاهش هزینه‌های بازسازی، نقش مهمی در بهبود عملکرد راه‌ها دارند. روش‌های رایج مانند فوک سیل، چپ سیل، اسلاری سیل و میکروسرفیسینگ، بسته به شرایط ترافیکی و اقلیمی مورد استفاده قرار می‌گیرند. عملکرد این سیستم‌ها به عوامل متعددی از جمله ویژگی‌های قیر امولسیون، مصالح سنگی، فیلرها و افزودنی‌ها بستگی دارد. قیر امولسیونی به‌عنوان عامل چسباننده اصلی، نقش مهمی در چسبندگی، دوام و مقاومت در برابر شرایط محیطی ایفا می‌کند. مصالح سنگی با ویژگی‌هایی مانند اندازه، شکل و بافت سطحی، بر مقاومت لغزشی و پایداری تأثیرگذار هستند. فیلرهایی مانند سیمان، آهک و پودرهای معدنی، با کاهش فضای خالی و افزایش انسجام، مقاومت مخلوط را در برابر رطوبت و خرابی‌های مکانیکی بهبود می‌بخشند. به‌کارگیری قیرهای امولسیونی اصلاح‌شده با پلیمرها، نانومواد و سایر افزودنی‌ها نشان داده است که می‌تواند خواص مکانیکی و دوام را به میزان قابل‌توجهی افزایش دهد. با وجود این پیشرفت‌ها، چالش‌هایی مانند بهینه‌سازی ترکیب مواد، تأثیر شرایط اقلیمی و بهبود روش‌های اجرایی همچنان مطرح هستند. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که انتخاب صحیح نوع قیر امولسیونی، دانه‌بندی مصالح و ترکیب اصلاح‌کننده‌ها تأثیر بسزایی در افزایش مقاومت در برابر جداشدگی، خستگی و شیارشدگی دارد. مطالعات آینده باید بر توسعه فرمولاسیون‌های نوآورانه، روش‌های اجرایی بهینه و ارتقای پایداری این فناوری‌ها متمرکز شوند تا سیستم‌های آسفالت حفاظتی بادوام‌تر و مقرون‌به‌صرفه‌تری ایجاد گردد.

واژه‌های کلیدی: آسفالت حفاظتی، میکروسرفیسینگ، فوک سیل، اسلاری سیل، چپ سیل

۱- مقدمه

در جابه‌جایی مسافران و کالاها ایفا می‌کنند و به همین دلیل، مدیریت و نگهداری آن‌ها از اصول بنیادی زیرساختی کشورها محسوب می‌شود. در طول زمان، روسازی راه‌ها تحت تأثیر

پس از جنگ جهانی دوم و رشد سریع صنعتی‌شدن کشورها، حمل‌ونقل جاده‌ای به یکی از ارکان اساسی توسعه اقتصادی تبدیل شد. راه‌ها و بزرگراه‌ها به‌عنوان زیرساخت‌های حیاتی نقش مهمی

مقاومت در برابر ترک خوردگی و افزایش عمر مفید روسازی می‌شود. فیلر نیز به‌عنوان عاملی تأثیرگذار بهینه‌سازی رفتار مکانیکی آسفالت حفاظتی شناخته می‌شود (Johnson, 2000; Robati, 2014; Senadheera, 2007). همچنین، افزودنی‌هایی مانند پلیمرها و نانوذرات به‌منظور بهبود چسبندگی، افزایش مقاومت در برابر رطوبت و بهبود عملکرد این سیستم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند (Kim et al., 2013; Nair, Lane, & McGhee, 2020; Robati, 2014).

با توجه به اهمیت این عوامل، عملکرد آسفالت‌های حفاظتی به شدت تحت تأثیر ویژگی‌های مواد تشکیل‌دهنده آن‌ها، شرایط محیطی و روش‌های اجرایی قرار دارد. با افزایش عمر روسازی‌ها و قرارگیری مداوم در معرض بارهای ترافیکی و عوامل محیطی، این سیستم‌ها دچار فرسایش و خرابی می‌شوند. اگرچه آسفالت‌های حفاظتی به‌عنوان یک راهکار نگهداری پیشگیرانه نقش مهمی در کاهش هزینه‌های تعمیر و افزایش عمر مفید راه‌ها ایفا می‌کنند، اما چالش‌هایی نظیر انتخاب بهینه ترکیب مواد، کنترل کیفیت در فرآیند اجرا و ارزیابی عملکرد تحت شرایط محیطی مختلف همچنان مطرح هستند. بررسی دقیق این چالش‌ها و تأثیر ویژگی‌های اجزای تشکیل‌دهنده آسفالت‌های حفاظتی، می‌تواند به بهبود عملکرد و افزایش پایداری این سیستم‌ها کمک کند.

بر این اساس، این پژوهش با هدف بررسی تأثیر ویژگی‌های قیر امولسیون، مصالح سنگی، فیلرها و افزودنی‌ها بر عملکرد آسفالت‌های حفاظتی انجام شده است. در این مطالعه، تأثیر عوامل کلیدی بر دوام و عملکرد انواع مختلف آسفالت‌های حفاظتی مورد بررسی قرار گرفته و راهکارهایی برای بهینه‌سازی ترکیب مواد و فرآیندهای اجرایی ارائه خواهد شد.

۲- انواع آسفالت‌های حفاظتی

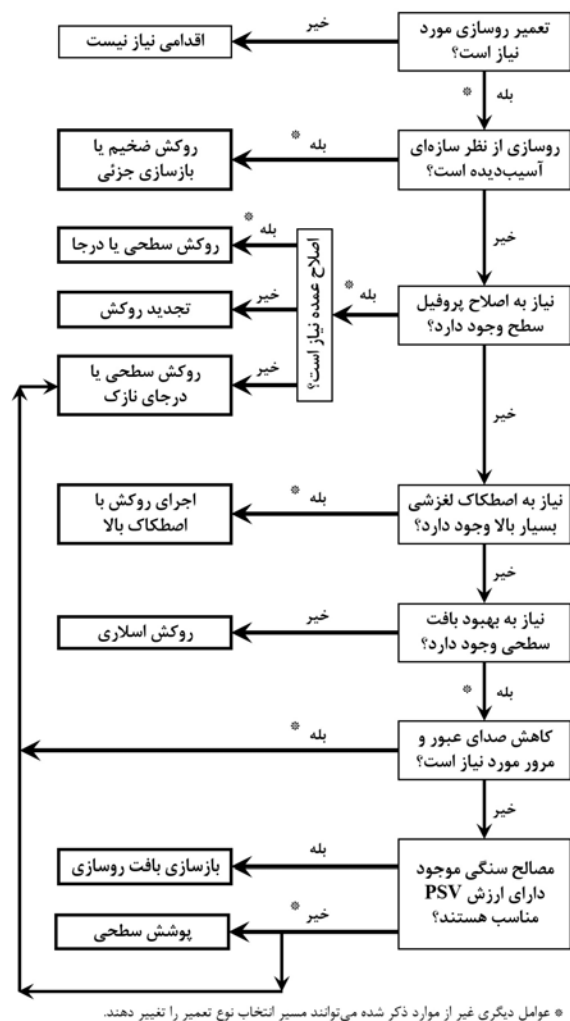
آسفالت حفاظتی به مجموعه‌ای از روش‌های نگهداری سطحی اطلاق می‌شود که با هدف محافظت، بهبود عملکرد و افزایش دوام راه‌ها به کار می‌رود. این روش‌ها شامل پخش قیر بر روی بسترهای خاکی، شنی، آسفالتی یا بتنی هستند و در برخی موارد با

بارهای ترافیکی و شرایط محیطی مانند دما، یخبندان و رطوبت دچار تخریب و فرسایش می‌شود. عدم انجام به‌موقع اقدامات تعمیر و نگهداری، منجر به گسترش خرابی‌ها و آسیب به لایه‌های زیرین روسازی می‌شود که در نهایت هزینه‌های بازسازی را به‌شدت افزایش می‌دهد. از این رو، اجرای روش‌های نگهداری پیشگیرانه، به‌عنوان یک راهکار مقرون‌به‌صرفه برای افزایش عمر مفید روسازی و جلوگیری از هزینه‌های سنگین بازسازی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Anderson et al., 2017; Johnson, 2000; Nair, Lane, & McGhee, 2020; Nicholls, 1998).

آسفالت‌های حفاظتی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین روش‌های نگهداری و بهسازی راه‌ها شناخته می‌شوند. این روش‌ها با اجرای لایه‌های نازک بر سطح روسازی، از آن در برابر عوامل محیطی مخرب محافظت کرده و موجب افزایش عمر مفید آن می‌شوند. این روش‌ها شامل انواع مختلفی مانند فوگ سیل^۱، چپ سیل^۲، اسلاری سیل^۳ و میکروسرفیسینگ^۴ هستند که هر یک با توجه به شرایط ترافیکی، اقلیمی و سازه‌ای راه، کاربردهای خاص خود را دارند. عملکرد مطلوب این سیستم‌های حفاظتی به عوامل متعددی بستگی دارد که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به ویژگی‌های قیر امولسیونی، سنگدانه‌ها، فیلرها و افزودنی‌های مورد استفاده اشاره کرد (Ali & Mohammadafzali, 2014; Johnson, 2000; Lee et al., 2013; Nair & McGhee, 2022).

قیر امولسیونی، به‌عنوان جزء کلیدی آسفالت‌های حفاظتی، نقش مهمی در چسبندگی لایه‌ها، مقاومت در برابر شرایط محیطی و بهبود عملکرد سطحی ایفا می‌کند (McHattie, 2001; Robati, 2014; Senadheera, 2007). ترکیب قیر امولسیونی شامل قیر، امولسیفایر و آب است که به‌صورت ذرات معلق پایدار شده و پس از پخش، از طریق فرایند شکست و گیرش، لایه‌ای مقاوم تشکیل می‌دهد. علاوه بر قیر، خواص سنگدانه‌ها از جمله اندازه، شکل و بافت سطحی تأثیر مستقیمی بر دوام و پایداری آسفالت حفاظتی دارند، به‌ویژه در سیستم‌های میکروسرفیسینگ که استفاده از سنگدانه‌های با دانه‌بندی کنترل‌شده منجر به بهبود

هستند. انتخاب چسباننده قیری به عواملی مانند شرایط آب‌وهوایی، وضعیت روسازی و میزان ترافیک بستگی دارد. امولسیون‌های قیری رایج شامل RS-1، RS-2، CRS-1، CRS-2، MS-1 و HFMS-1 هستند. سنگدانه‌ها باید دارای دانه‌بندی یکنواخت و مقاوم در برابر سایش باشند (Ali & Mohammadafzali, 2014; Buss et al., 2016; Guirguis & Buss, 2017; Hajj et al., 2018; Karasahin et al., 2015). جدول‌های ۱ و ۲ ضرایب اصلاحی بر اساس شرایط روسازی و مقادیر توصیه‌شده قیر و سنگدانه را ارائه می‌دهند.



شکل ۱. فلوچارت انتخاب نوع آسفالت حفاظتی مورد استفاده (Nicholls, ۱۹۹۸)

سنگدانه یا مخلوط‌های آسفالتی آماده مانند اسلاری سیل و میکروسرفیسینگ ترکیب می‌شوند. هدف اصلی این پوشش‌ها کاهش نفوذپذیری، افزایش مقاومت سطح در برابر عوامل محیطی و بهبود اصطکاک و مقاومت سایشی است. به دلیل ضخامت کم (معمولاً کمتر از ۲۵ میلی‌متر)، آسفالت‌های حفاظتی بخشی از سازه باربر روسازی محسوب نمی‌شوند و بیشتر به عنوان یک لایه محافظتی جهت افزایش دوام سطح مورد استفاده قرار می‌گیرند (Johnson, 2000; McHattie, 2001; نشریه ۲۳۴ - آیین نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران).

انتخاب نوع آسفالت حفاظتی وابسته به عوامل مختلفی از جمله وضعیت فعلی روسازی، شدت ترک‌ها، میزان آسیب‌دیدگی، نوع ترافیک، شرایط اقلیمی، هزینه‌ها و زمان اجرا است. این روش‌ها با وجود هزینه پایین، اجرای سریع و نیاز محدود به تجهیزات سنگین، به عنوان گزینه‌ای مقرون‌به‌صرفه برای بهسازی راه‌های با ترافیک سبک تا متوسط شناخته می‌شوند. سیستم‌های مدیریت روسازی از طریق ارزیابی این عوامل، موثرترین روش را از نظر هزینه و عملکرد پیشنهاد می‌کنند. شکل ۱ فلوچارتی ساده را نمایش می‌دهد که به انتخاب مناسب‌ترین نوع آسفالت حفاظتی بر اساس نیازهای پروژه و ویژگی‌های هر یک از آن‌ها کمک می‌کند (Johnson, 2000; Nicholls, 1998; نشریه ۲۳۴ - آیین نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران). در ادامه، انواع متداول آسفالت‌های حفاظتی و کاربردهای هر یک مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۲-۱- چپ سیل

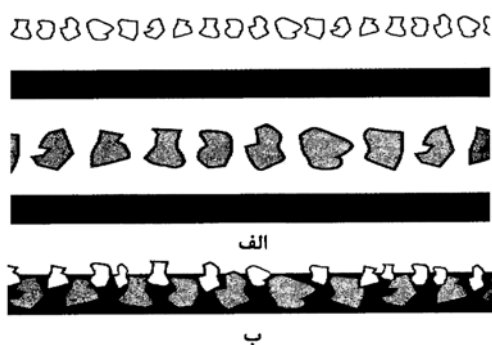
چپ سیل، که با عنوان سیل کت^۵ نیز شناخته می‌شود، یک روش نگهداری پیشگیرانه روسازی است که با هدف افزایش دوام، بهبود مقاومت لغزشی، و کاهش نفوذ آب به سطح راه اجرا می‌شود. این فرآیند شامل پخش یک لایه چسباننده قیری و سپس پخش یک لایه سنگدانه یکنواخت است که از روسازی در برابر تخریب ناشی از شرایط محیطی و بارگذاری ترافیکی محافظت می‌کند (Ali & Mohammadafzali, 2014; Buss et al., 2016; Guirguis & Buss, 2017; Hajj et al., 2018; Jalali & Vargas-Nordbeck, 2021; Karasahin et al., 2015). مواد اصلی شامل چسباننده‌های قیری و سنگدانه‌ها

جدول ۱. ضرایب اصلاحی چپ سیل بر اساس شرایط روسازی (Ali & Mohammadafzali, ۲۰۱۴)

روسازی موجود	میزان اصلاح (لیتر بر متر مربع)
روسازی قیرزده	۰ تا ۰.۰۰۱
	(بسته به شدت قیرزدگی)
سطح صاف و غیر متخلخل	۰.۰۰۰
سطح کمی متخلخل و اکسید شده یا مات	+۰.۰۰۳
سطح با تخلخل متوسط و اکسید شده	+۰.۰۰۶
سطح با تخلخل شدید و اکسید شده	+۰.۰۰۹

جدول ۲. مقادیر قیر و سنگدانه برای یک لایه چپ سیل (Ali & Mohammadafzali, ۲۰۱۴)

اندازه اسمی سنگدانه	شماره اندازه	مقدار سنگدانه (کیلوگرم بر متر مربع)	مقدار امولسیون (لیتر بر متر مربع)	نوع قیر امولسیونی
$\frac{3}{4}$ تا $\frac{3}{8}$ اینچ	۶	۲۷/۰ - ۲۱/۶	۲/۲۷ - ۱/۸۲	HFRS-2, CRS-2L, CRS-2P, CRS-2, RS-2
$\frac{1}{2}$ اینچ تا الک شماره ۴	۷	۲۱/۶ - ۱۳/۵	۲/۰۴ - ۱/۳۶	HFRS-2, CRS-2L, CRS-2P, CRS-2, RS-2
$\frac{3}{8}$ اینچ تا الک شماره ۸	۸	۱۳/۵ - ۱۰/۸	۱/۵۹ - ۱/۰۰	HFRS-2, CRS-2L, CRS-2P, CRS-2, RS-2
الک شماره ۴ تا ۱۶	۹	۱۰/۸ - ۸/۱	۰/۹۱ - ۰/۶۸	HFRS-2, MS-1, CRS-1, RS-1
ماسه	AASHTO M-6	۸/۱ - ۵/۴	۰/۶۸ - ۰/۴۵	HFRS-2, MS-1, CRS-1, RS-1



شکل ۲. شماتیک از چپ سیل چند لایه ای (الف) لایه های مختلف

چپ سیل (ب) لایه چپ سیل تکمیل شده

(Ali & Mohammadafzali, ۲۰۱۴)

مراحل اجرای چپ سیل شامل آماده سازی سطح، پخش چسباننده قیری، پخش سنگدانه، متراکم سازی با غلتک و جاروب زنی مصالح اضافی است. استفاده از ماشین آلات تخصصی مانند پخش کننده قیر و سنگدانه، غلتک و جاروب مکانیکی برای یکنواختی و عملکرد بهتر ضروری است. دمای بهینه برای عملیات غلتک زنی بین ۳۰ تا ۴۳/۵ درجه سانتی گراد توصیه می شود. حداقل عمق بافت سطحی اولیه باید ۹ میلی متر باشد تا عملکرد طولانی مدت تضمین شود (Ali & Mohammadafzali, 2014; Brenes-Calderón & Vargas-Nordbeck, 2023; Mousa et al., 2020). شکل ۲ نمایی شماتیک از چپ سیل چند لایه ای^۶ را نشان می دهد.

مشکلات را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، روش‌هایی مانند اسکراب سیل برای بهبود چسبندگی پیشنهاد شده‌اند (Ali & Mohammadafzali, 2014; Buss, Guirguis, & Gransberg, 2018; Guirguis & Buss, 2017).

انواع مختلف چپ سیل شامل چپ سیل تک‌لایه^۷، چپ سیل چندلایه^۸، رکد-این سیل^۹، کپ سیل^{۱۰}، اینورتن سیل^{۱۱}، ساندویچ سیل^{۱۲} و چپ سیل تقویت‌شده با ژئوتکستایل^{۱۳} است. هر نوع متناسب با شرایط خاص روسازی، حجم ترافیک و محدودیت‌های بودجه‌ای طراحی شده است. شکل ۴ نمای کلی از انواع چپ سیل و کاربردهای آن را ارائه می‌کند. سازمان‌های راهسازی باید بر اساس سطح خرابی روسازی و پیش‌بینی عملکرد، روش تعمیر و نگهداری مناسبی را انتخاب کنند (Buss, Guirguis, & Gransberg, 2018; Buss et al., 2016).

چپ سیل یک راهکار اقتصادی و مؤثر در نگهداری روسازی است که طول عمر راه‌ها را افزایش داده و ویژگی‌های سطحی آن را بهبود می‌بخشد. اگرچه چالش‌هایی مانند افت سنگدانه و حساسیت به شرایط محیطی همچنان مطرح است، اما تحقیقات و نوآوری‌های جدید در طراحی چسباننده و روش‌های اجرا به بهبود عملکرد این روش کمک کرده است. انتخاب رویکرد طراحی مناسب و رعایت اصول اجرایی، موفقیت این روش را در بلندمدت تضمین می‌کند.

۲-۲- اسلاری سیل

اسلاری سیل یک روش پرمصرف برای نگهداری و ترمیم سطحی روسازی است که با ترکیب قیر امولسیون، سنگدانه‌های ریز، فیلر معدنی و آب، به‌صورت یک لایه نازک بر روی سطح راه اجرا می‌شود. این روش باعث بهبود مقاومت لغزشی، آب‌بندی سطح و افزایش دوام روسازی می‌شود. با این حال، اسلاری سیل برای روسازی‌های دارای خرابی‌های سازه‌ای مناسب نیست و نیاز به اقدامات ترمیمی اولیه مانند وصله‌زنی و درزگیری ترک‌ها دارد (Ali & Mohammadafzali, 2014; Ghodrati et al., 2025; Grilli et al., 2019; Saghafi et al., 2019).

چپ سیل به دلیل هزینه پایین و کارایی اقتصادی، عمر روسازی را بسته به شرایط اقلیمی و نوع ترافیک بین ۳ تا ۱۵ سال افزایش می‌دهد. این روش از اکسیداسیون و آسیب‌های رطوبتی جلوگیری کرده و مقاومت لغزشی سطح را بهبود می‌بخشد. مطالعات نشان می‌دهند که استفاده از چپ سیل می‌تواند عمر سرویس روسازی را ۲۴ تا ۳۲ درصد افزایش دهد و استفاده از چپ سیل چندلایه‌ای موجب افزایش این مزایا می‌شود (Brenes-Calderón & Vargas-Nordbeck, 2023; Hajj et al., 2018; Jalali & Vargas-Nordbeck, 2021). شکل ۳ فرآیند اجرای گام‌به‌گام چپ سیل را نشان می‌دهد.



شکل ۳. فرآیند اجرای چپ سیل (Jalali & Vargas-Nordbeck, ۲۰۲۱)

با وجود مزایای چپ سیل، چالش‌هایی مانند افت سنگدانه، قیرزدگی و نویز سطحی وجود دارد. شرایط محیطی، به‌ویژه دماهای بالا، می‌توانند موجب نرم شدن چسباننده و کاهش چسبندگی سنگدانه‌ها شوند. تحقیقات نشان داده‌اند که استفاده از چسباننده‌های اصلاح‌شده و تکنیک‌های جدید غلتک‌زنی این

باشد. جدول ۳ دانه‌بندی سنگدانه‌های انواع مختلف اسلاری سیل را نشان می‌دهد (Ali & Mohammadafzali, 2014; Kucharek et al., 2010).

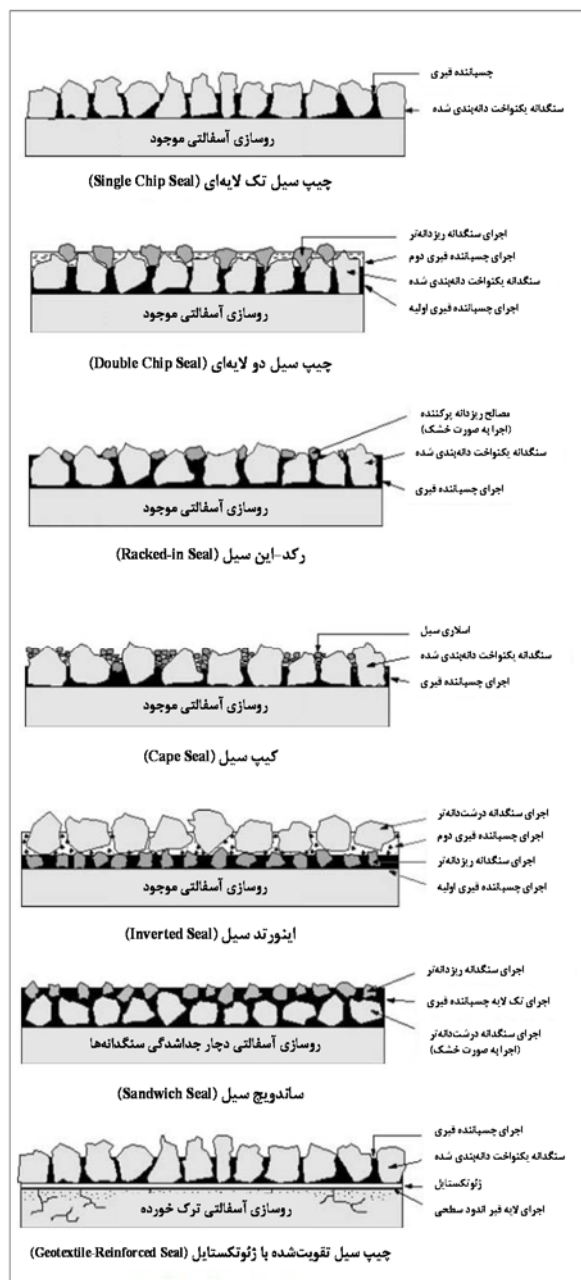
جدول ۳. دانه‌بندی سنگدانه‌های انواع مختلف اسلاری سیل (Ali & Mohammadafzali, ۲۰۱۴)

اندازه الک	درصد عبوری		
	نوع ۱	نوع ۲	نوع ۳
۳/۸ اینچ (۹/۵ میلیمتر)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
الک شماره ۴ (۴/۷۵ میلی‌متر)	۱۰۰	۹۰-۱۰۰	۷۰-۹۰
الک شماره ۸ (۲/۳۶ میلی‌متر)	۹۰-۱۰۰	۶۵-۹۰	۴۵-۷۰
الک شماره ۱۶ (۱/۱۸ میلی‌متر)	۶۵-۹۰	۴۵-۷۰	۲۸-۵۰
الک شماره ۳۰ (۶۰۰ میکرومتر)	۶۵-۹۰	۳۰-۵۰	۱۹-۳۴
الک شماره ۵۰ (۳۳۰ میکرومتر)	۴۲-۶۵	۳۰-۴۲	۱۲-۲۵
الک شماره ۱۰۰ (۱۵۰ میکرومتر)	۳۰-۴۲	۱۰-۲۱	۷-۱۸
الک شماره ۲۰۰ (۷۵ میکرومتر)	۲۰-۳۰	۵-۱۵	۵-۱۵

برای امولسیون‌ها، انواعی مانند SS-1h، CSS-1h، QS-1h و CQS-1h مناسب هستند که باید با سنگدانه‌ها سازگار بوده و الزامات طراحی مخلوط را برآورده کنند. استفاده از اصلاح‌کننده‌های پلیمری، دوام و مقاومت در برابر تنش‌های ترافیکی را افزایش می‌دهد. ویژگی‌های امولسیون‌های مناسب در جدول ۴ ارائه شده است (Ali & Mohammadafzali, 2014; Kucharek et al., 2010). اجرای اسلاری سیل توسط ماشین‌آلات ویژه انجام می‌شود که ترکیب دقیق مواد و پخش یکنواخت آن‌ها را تضمین می‌کند. شکل ۵ نمای شماتیک دستگاه اجرای اسلاری سیل را نشان می‌دهد (Ali & Mohammadafzali, 2014).

قبل از اجرا، سطح روسازی باید کاملاً تمیز شود. دمای محیطی باید بالاتر از ۱۰ درجه سانتی‌گراد باشد تا از گیرش زودهنگام جلوگیری شود. مدت زمان گیرش امولسیون‌های سریع معمولاً بین ۱ تا ۴ ساعت است و در این مدت، تردد وسایل نقلیه باید محدود شود. چالش‌های اجرایی و راهکارهای مرتبط در جدول ۵ خلاصه شده‌اند (Ali & Mohammadafzali, 2014; Hajj et al., 2011; Saghafi et al., 2019).

Saghafi, Tabatabaee, & Nazarian, 2019; Shabani, Valizadeh, & Khavandi, 2024).



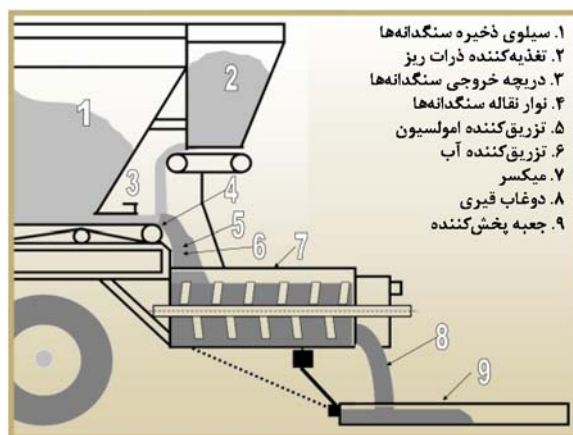
شکل ۴. انواع مختلف چپ سیل (Buss et al., ۲۰۱۶)

عملکرد اسلاری سیل به کیفیت مصالح بستگی دارد. سنگدانه‌ها باید زبر، مقاوم در برابر سایش و یکنواخت باشند. طبق استاندارد ASTM D 2419، حداقل هم‌ارز ماسه باید ۴۵ باشد و افت سایش لوس آنجلس طبق ASTM C 131 نباید بیش از ۳۵

جدول ۴. ویژگی‌های معمول امولسیون برای اسلاری سیل پلیمری

با گیرش سریع (Ali & Mohammadafzali, ۲۰۱۴)

آزمایش	مقدار استاندارد امولسیون	استاندارد آزمایش
باقیمانده (Residue)	حداقل ۶۲ درصد	AASHTO T 59
مقدار عبوری از الک (Sieve Content)	حداکثر ۰/۳ درصد	AASHTO T 59
ویسکوزیته در ۲۵ درجه سانتی‌گراد (SSF)	۱۵ - ۹۰	AASHTO T 59
پایداری (۱ روزه)	حداکثر ۱ درصد	ASTM D244
پایداری ذخیره‌سازی (۵ روزه)	حداکثر ۵ درصد	ASTM D244
نفوذ باقیمانده در ۲۵ درجه سانتی‌گراد	۴۰ - ۹۰	ASTM D244
نقطه نرمی (R&B SP, °C)	حداقل ۵۷ درجه سانتی‌گراد	AASHTO T 53
بازیابی پیچشی (Torsional Recovery)	حداقل ۱۸ درصد (LMCQS-1h)	CT 331
مقدار پلیمر (Polymer Content)	حداقل ۲/۵ درصد (LMCQS-1h)	CT 401



شکل ۱. نمای شماتیک دستگاه اجرای اسلاری سیل (Ali & Mohammadafzali, ۲۰۱۴)

جدول ۵. مشکلات رایج در اجرای اسلاری سیل و راهکارهای مرتبط (Ali & Mohammadafzali, ۲۰۱۴)

مشکل	راه‌حل
سطح ناصاف (Uneven Surface) موج‌دار شدن (Wash Boarding)	حصول اطمینان از تنظیم صحیح جعبه پخش‌کننده بررسی عدم بالا بودن بیش از حد ویسکوزیته (گران‌روی) مخلوط اعمال تنظیمات لازم برای جلوگیری از شکست سریع مخلوط انتظار تا کاهش دمای محیط به سطح مناسب استفاده از پاشش آب در جلوی پخش‌کن
اتصال نامناسب در درزها (Poor Joints)	کاهش مقدار آب اولیه مصرفی استفاده از پاشش آب در صورت حرکت تیغه‌های جعبه پخش‌کننده بر روی مصالح تازه
شسته شدن بیش از حد سنگدانه‌ها (Excessive Raveling)	افزودن سیمان و کاهش مقدار افزودنی جهت تسریع در شکست و سفت شدن مخلوط بررسی مصالح سنگی از نظر میزان ریزدانه‌های رسی ادامه کنترل ترافیک برای مدت طولانی‌تر و با سرعت پایین ممانعت از عبور ترافیک تا زمان سفت شدن کامل مخلوط خودداری از جاروکنشی یا بازگشایی مسیر به ترافیک تا زمان تنظیم کامل مخلوط

با وجود این محدودیت‌ها، اسلاری سیل همچنان یک روش مؤثر و اقتصادی برای تعمیر و نگهداری روسازی است و مزایای قابل توجهی در بهسازی سطح، آب‌بندی و بهبود مقاومت لغزشی ارائه می‌دهد. تحقیقات مستمر در حال بهبود طراحی مخلوط، بهینه‌سازی ترکیبات مواد و گسترش دامنه کاربرد اسلاری سیل از طریق اصلاح‌کننده‌های پیشرفته و سنگدانه‌های جایگزین هستند. انتخاب صحیح مواد، رعایت استانداردهای طراحی مخلوط و اجرای به‌موقع، از عوامل کلیدی برای حداکثرسازی کارایی این روش هستند.

۲-۳- میکروسرفیسینگ

میکروسرفیسینگ یک روش پیشرفته برای نگهداری پیشگیرانه روسازی‌های آسفالتی است که باعث بهبود دوام سطح، افزایش مقاومت لغزشی و کاهش نفوذپذیری می‌شود و درعین حال از مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی برخوردار است. این روش که از فناوری اسلاری سیل توسعه یافته، شامل امولسیون‌های اصلاح‌شده با پلیمر و سنگدانه‌های با کیفیت بالا برای بهبود عملکرد روسازی است. میکروسرفیسینگ در اصلاح شیارشدگی، جداشدگی سنگدانه‌ها، ترک‌های جزئی و خرابی‌های ناشی از اکسیداسیون مؤثر است (Ali & Mohammadafzali, 2014; Bhargava, Siddagangaiah, & Ryntathiang, 2021b; Broughton, Lee, & Kim, 2012; do Nascimento et al., 2023; Esfahani & Khatayi, 2022; Tyagi, Kumar, & Kapoor, 2021; Zulu & Mukendi, 2018).

مخلوط میکروسرفیسینگ شامل امولسیون کاتیونیک زودگیر اصلاح‌شده با پلیمر، سنگدانه‌های خردشده، فیلر معدنی، آب و افزودنی‌ها است که به بهبود عملکرد سطح روسازی کمک می‌کند. امولسیون‌های مورد استفاده مانند CSS-1hP, CSS-1h و CQS-1h مطابق با استانداردهای AASHTO M208 و ASTM D2397 هستند (Ali & Mohammadafzali, 2014; Bhargava, Siddagangaiah, & Ryntathiang, 2021b; Tyagi, Kumar, & Kapoor, 2021).

اسلاری سیل موجب افزایش مقاومت لغزشی، کاهش نفوذ رطوبت و اصلاح نواقص سطحی مانند جداشدگی سنگدانه‌ها و فرورفتگی‌های جزئی می‌شود (Saghafi et al., 2019; Shabani, Valizadeh, & Khavandi, 2024). مطالعات نشان داده‌اند که این روش از نظر نسبت فایده به هزینه، گزینه‌ای اقتصادی برای نگهداری روسازی است (Hajj et al., 2011; Saghafi, Tabatabaee, & Nazarian, 2019). علاوه بر این، اجرای به‌موقع آن، معمولاً سه سال پس از ساخت روسازی و سپس هر هفت سال، عملکرد بهتری را تضمین می‌کند. شاخص وضعیت روسازی^{۱۴} مناسب برای اجرای اسلاری سیل برابر با ۹۰ برای روسازی‌های جدید و ۸۷ برای روکش‌های آسفالتی است (Ali & Mohammadafzali, 2014).

با وجود مزایای متعدد، این روش محدودیت‌هایی دارد. برای راه‌های پرتراфик و روسازی‌های دارای آسیب‌های ساختاری مناسب نیست. ضخامت اجرای اسلاری سیل نباید بیش از ۱/۵ برابر بزرگ‌ترین سنگدانه باشد، زیرا ممکن است منجر به خرابی زودرس شود (Kucharek et al., 2010). همچنین، شرایط جوی تأثیر زیادی بر عملکرد آن دارد، بنابراین اجرای آن در دماهای بسیار بالا، پایین یا شرایط مرطوب توصیه نمی‌شود (Ali & Mohammadafzali, 2014; Hajj et al., 2011).

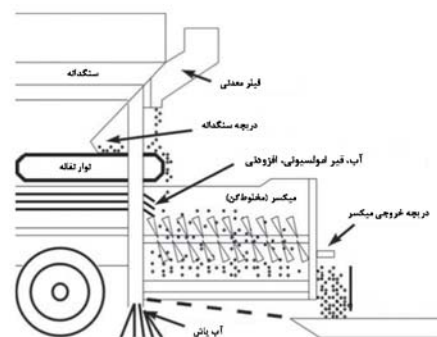
تحقیقات جدید به بهبود عملکرد اسلاری سیل پرداخته‌اند. امولسیون‌های اصلاح‌شده با پلیمر مقاومت بیشتری در برابر بارهای ترافیکی و عوامل محیطی دارند (Ghodrati et al., 2025). استفاده از نانو الیاف سلولزی موجب بهبود ویژگی‌های رئولوژیکی و افزایش دوام شده است (Shabani, Valizadeh, & Khavandi, 2024). همچنین، امکان استفاده از روسازی آسفالتی بازیافتی بررسی شده و نشان داده شده که این روش می‌تواند یک راهکار پایدار بدون کاهش عملکرد باشد (Saghafi, Tabatabaee, & Nazarian, 2019). نوآوری‌ها می‌توان به افزودنی‌های پودری شیشه‌ای برای بهبود مقاومت سایشی و سنگدانه‌های بازالتی برای افزایش مقاومت لغزشی اشاره کرد (Algburi & Hesami, 2025; Ghodrati et al., 2025).

اصلاح پلیمر باعث افزایش مقاومت میکروسرفیسینگ در برابر تغییر شکل و افزایش عمر مفید روسازی به ۵ تا ۷ سال می‌شود (Bhargava, Siddagangaiah, & Ryntathieng, 2020; Broughton, Lee, & Kim, 2012). از نظر زیست‌محیطی، این روش ۴۰٪ انرژی کمتری نسبت به پوشش آسفالتی داغ مصرف کرده و آلاینده‌های کمتری تولید می‌کند (جدول ۶) (Bhargava, Siddagangaiah, & Ryntathieng, 2021a; Broughton & Lee, 2012; Tyagi, Kumar, & Kapoor, 2021).

هزینه اجرای میکروسرفیسینگ حدود ۱۷,۶۰۰ دلار در هر مایل در هر خط است که در مقایسه با ۵۰,۰۰۰ دلار برای آسفالت‌تراشی و روکش آسفالت داغ، یک گزینه اقتصادی محسوب می‌شود (Broughton & Lee, 2012). میکروسرفیسینگ مزایای متعددی را به همراه دارد که شامل اثرات مستقیم و غیرمستقیم می‌شود. از جمله مزایای مستقیم آن می‌توان به بهبود عملکرد سطح روسازی از طریق اصلاح بافت و پروفیل، افزایش اصطکاک، و ارتقای کیفیت سطح راه اشاره کرد. از سوی دیگر، این روش به طور غیرمستقیم به پایداری زیست‌محیطی کمک می‌کند، زیرا علاوه بر سازگاری با محیط زیست، از نظر اقتصادی نیز مقرون‌به‌صرفه بوده و ایمنی کاربران راه را بهبود می‌بخشد (De Rose et al., 2023).

سنگدانه‌های مورد استفاده باید دارای دانه‌بندی مشخص و حداقل هم‌ارز ماسه‌ای ۶۰٪ باشند. همچنین افزودن فیلرهایی مانند سیمان و آهک هیدراته (تا ۳٪) به بهبود چسبندگی و سختی مخلوط کمک می‌کند (Fooladi & Hesami, 2021).

میکروسرفیسینگ با استفاده از ماشین‌های خودران مجهز به جعبه‌های پخش‌کننده اجرا می‌شود تا لایه‌ای یکنواخت ایجاد گردد (شکل ۲). (Ali & Mohammadafzali, 2014). مخلوط در لایه‌های نازک ۴ تا ۸ میلی‌متر پخش می‌شود و امولسیون زودشکن باعث می‌شود که سطح در مدت حدود دو ساعت برای ترافیک بازگشایی شود (Bhargava, Siddagangaiah, & Ryntathieng, 2021b; Tyagi, Kumar, & Kapoor, 2021).



شکل ۲. شماتیک ماشین اجرای میکروسرفیسینگ (Ali & Mohammadafzali, ۲۰۱۴)

جدول ۶. مقایسه تاثیرات زیست محیطی روکش میکروسرفیسینگ و مخلوط آسفالتی داغ (Broughton & Lee, ۲۰۱۲)

نوع عملیات	ترکیب	مصرف انرژی		انتشار گازهای گلخانه‌ای		طول عمر (سال)	صرفه‌جویی سالانه در مقایسه با روکش آسفالتی ۵ سانتی‌متری
		MJ/CM	BTU/CY	Kg/SM	Lbs/SY		
روکش آسفالتی داغ	۱/۵ اینچ (۳/۸ سانتیمتر)	۵۹	۴۶۳۰۰	۴/۹	۹/۰	۱۰-۵	کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای
	۲ اینچ (۵/۱ سانتیمتر)	۷۷	۶۱۵۰۰	۶/۷	۱۲/۳	۱۰-۵	صرفه‌جویی در مصرف انرژی
میکروسرفیسینگ	نوع ۳	۶/۵	۵۱۳۰	۰/۳	۰/۶	۵-۳	۹۰-۹۲ درصد
	نوع ۲	۴/۹	۳۸۷۰	۰/۲	۰/۴	۴-۲	۹۱-۹۲ درصد

راه‌سازی و مهندسان حمل‌ونقل در سراسر جهان تبدیل شده است. مطالعات اخیر بر بهینه‌سازی طراحی مخلوط، استفاده از افزودنی‌های جدید و افزایش پایداری زیست‌محیطی متمرکز شده‌اند. پژوهش‌های آتی باید تأثیر نانومواد و سایر فناوری‌های نوین را بر عملکرد میکروسرفیسینگ بررسی کنند (Bhargava, Siddagangaiah, & Ryntathiang, 2021a; De Rose et al., 2023; do Nascimento et al., 2023).

۲-۴- فوگ سیل

فوگ سیل یک روش نگهداری پیشگیرانه است که با استفاده از قیر امولسیون رقیق شده، به بهبود عملکرد روسازی‌های آسفالتی کمک می‌کند. این روش موجب پر کردن ترک‌های کوچک، کاهش نفوذپذیری و تأخیر در اکسیداسیون و پیرشدگی می‌شود و در نتیجه عمر مفید روسازی را افزایش می‌دهد. با این حال، فوگ سیل توانایی اصلاح نقص‌های سازه‌ای جدی مانند چاله‌ها و ترک‌های بزرگ را ندارد (Ali & Mohammadafzali, 2014; Cui et al., 2019; Fan et al., 2024; Fan et al., 2025; Jiang et al., 2020; Xu, Jiang, & Xiao, 2022; Yan et al., 2024; Yang et al., 2020).

این روش از قیرهای امولسیونی با ویسکوزیته پایین، مانند SS-1h, RS-a, SS-1h, CSS-1h و CRS-1 استفاده می‌کند که به داخل حفره‌های روسازی نفوذ کرده و آن‌ها را پر می‌کند. نسبت رقیق‌سازی معمولاً ۱:۱ آب به امولسیون است، اما بسته به شرایط، می‌تواند تا ۵:۱ نیز افزایش یابد (Ali & Mohammadafzali, 2014). شکل ۷ تغییرات ویسکوزیته امولسیون CSS-1H را با درصدهای مختلف رقیق‌سازی نشان می‌دهد.

میکروسرفیسینگ تأثیری بر ظرفیت سازه‌ای روسازی ندارد و برای سطوح دارای ترک‌های شدید مناسب نیست (Ali & Mohammadafzali, 2014; Broughton & Lee, 2012). این روش حساس به شرایط آب‌وهوایی بوده و اجرای آن در دمای کمتر از ۱۰ درجه سانتی‌گراد و در شرایط بارانی یا یخبندان توصیه نمی‌شود (Broughton, Lee, & Kim, 2012; Zulu & Mukendi, 2018). همچنین محدودیت‌هایی در هم‌سطح‌سازی سطوح داشته و در اصلاح برجستگی‌ها چندان مؤثر نیست (Broughton & Lee, 2012; Broughton, Lee, & Kim, 2012). نقص‌هایی مانند شسته شدن مصالح، قیرزدگی و جداشدگی سنگدانه‌ها ممکن است در اثر طراحی نامناسب یا استفاده از مصالح بی‌کیفیت رخ دهند (Fooladi & Hesami, 2021). مطالعات میدانی نشان داده‌اند که میکروسرفیسینگ در شرایط مختلف عملکرد مطلوبی دارد. در پروژه‌ای در پل بروکلین، این روش روی عرشه فولادی اجرا شد و مقاومت بالایی در برابر ترافیک سنگین نشان داد. همچنین در استان انتاریو، بخشی از مسیری که تحت عملیات میکروسرفیسینگ قرار گرفته بود، پس از ۱۱ سال همچنان کارایی خود را حفظ کرد (Hafezzadeh & Kavussi, 2021). همچنین، مطالعه‌ای که توسط وزارت حمل‌ونقل جورجیا^{۱۹} انجام شد، نشان داد که میکروسرفیسینگ توانسته است مقاومت در برابر لغزش را افزایش داده و سطح روسازی را بدون افزایش سطح صدا آب‌بندی کند. این نتایج تأییدی بر اثربخشی این روش به عنوان یک استراتژی نگهداری روسازی محسوب می‌شود (Broughton & Lee, 2012).

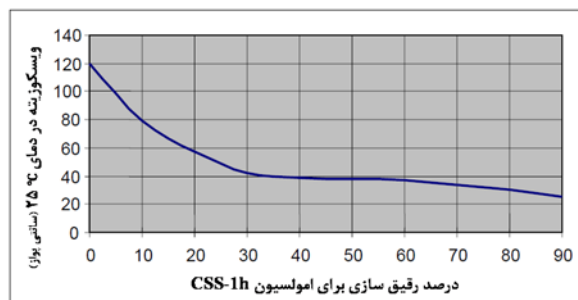
میکروسرفیسینگ یک روش نگهداری روسازی چندمنظوره، مقرون‌به‌صرفه و سازگار با محیط زیست است که باعث افزایش عمر راه‌ها و ارتقای ایمنی می‌شود. هرچند این روش موجب تقویت سازه‌ای روسازی نمی‌شود، اما توانایی آن در بازیابی کیفیت سطح و جلوگیری از تخریب زودهنگام، آن را به یک روش ارزشمند در مدیریت مدرن روسازی‌ها تبدیل کرده است. در صورت طراحی و اجرای صحیح، میکروسرفیسینگ توازن مناسبی میان کاهش هزینه‌ها، عملکرد مطلوب و پایداری زیست‌محیطی ایجاد کرده و به گزینه‌ای مناسب برای سازمان‌های

تنظیم صحیح زاویه نازل‌ها. بررسی و تنظیم ارتفاع مناسب نوار اسپری. جلوگیری از تنظیم بیش از حد بالای فشار نوار اسپری. اطمینان از عدم انسداد نازل‌ها.	
کنترل نرخ پاشش امولسیون برای جلوگیری از افزایش بیش از حد. بررسی و تنظیم مجدد نرخ پاشش و رقیق‌سازی. کالیبراسیون مجدد دستگاه اسپری در صورت نیاز.	قیرزدگی یا اشباع شدن سطح با قیر
اعمال یک لایه ماسه خشک و تمیز. استفاده از جاروی دوار برای جذب قیر اضافی. انجام آزمایش CT 342 برای ارزیابی ضریب اصطکاک. تکرار فرآیند تا دستیابی به حداقل ضریب اصطکاک ۰/۳۰.	ضریب اصطکاک سطحی پایین (مطابق استاندارد CT 342)

جدول ۸. مقادیر اصطکاک سطحی اندازه گیری شده قبل و بعد از اجرای فوگ سیل (Ali & Mohammadafzali, ۲۰۱۴)

بعد	قبل		
	میانگین	انحراف معیار	
۴/۰	۲۸	۱۰/۸	۶۱
۳/۵	۲۳	۹/۹	۵۸
			US-36 EB
			US-231 NB

فوگ سیل یک روش مقرون به صرفه است که هزینه اجرای آن بین ۰/۳۵ تا ۰/۵۰ دلار به ازای هر یارد مربع و تقریباً ۰/۶۰ دلار به ازای هر متر مربع تخمین زده می‌شود (Ali & Mohammadafzali, 2014; Yang et al., 2020). همچنین، این روش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای را نسبت به روش‌هایی مانند میکروسرفیسینگ کاهش می‌دهد (Fan et al., 2024). با این حال، فوگ سیل‌های سنتی به دلیل استفاده از سوخت‌های فسیلی و زمان خشک شدن طولانی، نگرانی‌های زیست‌محیطی دارند و به همین دلیل تحقیقات بر روی جایگزین‌های پایدار افزایش یافته است (Yang et al., 2020). برای حل چالش‌های فوگ سیل، فناوری‌های جدیدی معرفی شده‌اند. امولسیون‌های اصلاح‌شده با پلیمر باعث بهبود پیوند و



شکل ۳. نمودار تغییرات ویسکوزیته با درصد رقیق سازی برای امولسیون CSS-1h (Ali & Mohammadafzali, ۲۰۱۴)

نرخ اجرای فوگ سیل معمولاً بین ۰/۰۳ تا ۰/۲۲ گالن در یارد مربع است و تحت تأثیر بافت و شرایط روسازی قرار دارد. اجرای بیش از حد آن می‌تواند سطح را لغزنده کند و به یک دوره توقف ترافیکی ۱ تا ۳ ساعت نیاز دارد (Ali & Mohammadafzali, 2014; Cui et al., 2019; Yang et al., 2020). مشکلات رایج فوگ سیل و راه‌حل‌های مرتبط با آن را نشان می‌دهد. یکی از مشکلات اصلی فوگ سیل، کاهش اصطکاک سطحی پس از اجرا است که ممکن است خطرات ایمنی ایجاد کند. تحقیقات نشان داده‌اند که مقادیر اصطکاک از ۶۱ و ۵۸ به ۲۸ و ۲۳ کاهش می‌یابد، اگرچه این مقادیر معمولاً در عرض ۱۸ ماه به سطح اولیه بازمی‌گردند (Ali & Mohammadafzali, 2014; Jiang et al., 2020). جدول ۸ مقادیر اصطکاک سطحی را قبل و بعد از اجرای فوگ سیل نشان می‌دهد (Ali & Mohammadafzali, 2014).

جدول ۷. مشکلات رایج فوگ سیل و راه حل مرتبط با هر کدام (Ali & Mohammadafzali, ۲۰۱۴)

مشکل	راه‌حل
پاشش نامناسب امولسیون	کاهش نرخ رقیق‌سازی. تنظیم دقیق ارتفاع نوار اسپری. جلوگیری از تنظیم بیش از حد بالای فشار اسپری.
ایجاد خطوط (رگه‌ها) در امولسیون	اطمینان از دمای مناسب امولسیون (عدم سرمای بیش از حد). کنترل ویسکوزیته امولسیون برای جلوگیری از افزایش بیش از حد.

۳-۱- قیر امولسیون

قیر امولسیون شامل قیر، آب و یک عامل امولسیون‌ساز است که پایداری ذرات قیر در آب را حفظ می‌کند. این قیرها به سه دسته کاتیونی، آنیونی و غیر یونی تقسیم شده و بسته به نوع بار الکتریکی خود، با سنگدانه‌های مختلف سازگاری دارند (Senadheera, 2007; Takamura & James, 2015; Usman et al., 2019). استفاده از قیر امولسیون موجب اجرای آسفالت حفاظتی در دماهای پایین‌تر، کاهش مصرف انرژی و بهبود چسبندگی می‌شود. از کاربردهای آن می‌توان به چپ سیل، اسلاری سیل، میکروسرفیسینگ و فوگ سیل اشاره کرد که هر یک نقش متفاوتی در نگهداری روسازی دارند (Hesami & Zalnezhad, 2019; McHattie, 2001; Senadheera, 2007).

۳-۲- سنگدانه

سنگدانه‌ها به دو دسته درشت (۹/۵ تا ۲۵ میلی‌متر) و ریز (کمتر از ۴/۷۵ میلی‌متر) تقسیم می‌شوند که به ترتیب استحکام سازه‌ای و انسجام مخلوط را تأمین می‌کنند (Hesami & Zalnezhad, 2007; Senadheera, 2019). دانه‌بندی مناسب تأثیر قابل توجهی بر پایداری مخلوط دارد و انتخاب صحیح آن می‌تواند ظرفیت باربری و مقاومت در برابر خرابی را افزایش دهد. علاوه بر این، شکل و بافت سنگدانه‌ها نیز بر عملکرد روسازی مؤثر است، به طوری که سنگدانه‌های زاویه‌دار، قفل‌شدگی مکانیکی بهتری ایجاد کرده و مقاومت در برابر لغزش را افزایش می‌دهند (McHattie, 2001; Robati, Carter, & Perraton, 2013; Senadheera, 2007).

۳-۳- افزودنی

افزودنی‌های مختلف برای بهبود ویژگی‌های خاص آسفالت، از جمله دوام، انعطاف‌پذیری و مقاومت در برابر پیرشدگی، به کار می‌روند. پلیمرها مانند SBS^{۱۶} و EVA^{۱۷} باعث افزایش خاصیت ارتجاعی مخلوط می‌شوند، در حالی که پودر لاستیک بازیافتی

دوام فوگ سیل شده‌اند (Yang et al., 2020). همچنین، افزودنی‌هایی مانند پلیمرهای رزین سیلیکونی، جوانسازها و کاتالیست‌های دی‌اکسید تیتانیوم (TiO₂) به افزایش عمر و سازگاری زیست‌محیطی کمک کرده‌اند (Cui et al., 2019; Fan et al., 2024; Xu, Jiang, & Xiao, 2022). استفاده از افزودنی‌های پیشرفته مانند پودرهای ترموکرومیک، رزین‌های اپوکسی آبی و کربن فعال نیز برای بهبود عملکرد در شرایط محیطی سخت پیشنهاد شده است (Yan et al., 2024).

فوگ سیل در صنعت هوانوردی نیز به عنوان یک روش نگهداری پذیرفته شده است، زیرا می‌تواند ریزترک‌ها را پر کرده و از نفوذ آب جلوگیری کند. این ویژگی به افزایش عمر مفید روسازی کمک می‌کند و امکان بازگشت سریع به بهره‌برداری را فراهم می‌سازد، که در باند فرودگاه‌ها و راه‌های پرتراфик اهمیت ویژه‌ای دارد (Li et al., 2023).

به طور کلی، فوگ سیل همچنان یک راه‌حل نگهداری پرکاربرد و مقرون به صرفه برای روسازی‌های آسفالتی است. در حالی که این تکنیک مزایای قابل توجهی در پر کردن ترک‌ها، به تأخیر انداختن اکسیداسیون و افزایش زیبایی راه ارائه می‌دهد، کاربرد آن با چالش‌هایی نظیر کاهش مقاومت لغزش، مسائل دوام و تغییرپذیری عملکرد همراه است. تحقیقاتی که در حال انجام است، به بهبود فناوری فوگ سیل ادامه می‌دهد و مواد پیشرفته و افزودنی‌های کاربردی را برای افزایش کارایی بلندمدت آن، به ویژه در شرایط ترافیکی سنگین و محیط‌های شدید زیست‌محیطی ادغام می‌کند.

۳- اجزای تشکیل دهنده آسفالت‌های حفاظتی

آسفالت‌های حفاظتی ترکیبی از اجزای مختلف هستند که عملکرد و دوام آن‌ها را تضمین می‌کنند. این اجزا شامل قیر امولسیون، سنگدانه‌ها، افزودنی‌ها و فیلرهای معدنی می‌باشند که هر یک نقش خاصی در بهبود خواص مکانیکی و شیمیایی مخلوط آسفالتی ایفا می‌کنند.

۴- تاثیر ویژگی های اجزای مختلف بر عملکرد

آسفالت های حفاظتی

عملکرد آسفالت های حفاظتی به شدت تحت تأثیر ویژگی های اجزای تشکیل دهنده آنها، از جمله قیر، سنگدانه، افزودنی ها و فیلر، قرار دارد. هر یک از این اجزا نقش منحصر به فردی در تعیین ویژگی های مکانیکی، چسبندگی و مقاومت در برابر عوامل محیطی ایفا می کنند. انتخاب صحیح مواد و کنترل مشخصات آنها می تواند منجر به بهبود عملکرد و افزایش طول عمر آسفالت حفاظتی شود. در ادامه، تأثیر ویژگی های هر یک از این اجزا بر عملکرد کلی این نوع آسفالت بررسی خواهد شد.

۴-۱- قیر

قیر امولسیون به عنوان یکی از اجزای مهم تشکیل دهنده آسفالت های حفاظتی، نقش کلیدی در عملکرد آنها به ویژه در مواجهه با شرایط محیطی مختلف دارد. بررسی اثر نوع و مقدار قیر امولسیونی بر چسبندگی، مقاومت در برابر رطوبت و سایر ویژگی های عملکردی می تواند به بهبود طراحی و اجرای این نوع آسفالت کمک کند.

تحلیل تطبیقی نتایج آزمون های WTAT^{۱۸} و CAT^{۱۹} در شرایط خشک (شکل ۸) و مرطوب (شکل ۹) نشان می دهد که نوع امولسیون بر مقاومت در برابر رطوبت تأثیر دارد. به طور خاص، مخلوط هایی که از امولسیون CSS-1H استفاده کردند، افت سنگدانه کمتری نسبت به SS-1H نشان دادند، که این موضوع نشان می دهد CSS-1H دوام بهتری در برابر رطوبت دارد (Johannes, 2014).

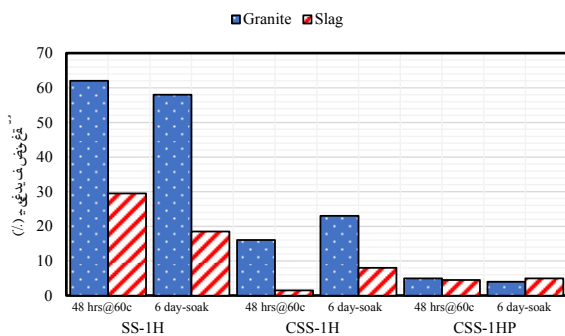
مقاومت در برابر ترک خوردگی را تقویت می کند (Ataollahi, 2018; McHattie, 2001; Usman et al., 2019; Zarrinpour shali, 2019; Ziari, Mahdizadeh, & Zalnejad, 2023). همچنین، عوامل ضد عریان شدگی برای بهبود چسبندگی قیر و سنگدانه ها مورد استفاده قرار می گیرند. نانومواد مانند نانولوله های کربنی، گرافن اکسید و نانو اکسید تیتانیوم نیز باعث افزایش مقاومت در برابر پیرشدگی، بهبود استحکام مکانیکی و افزایش پایداری حرارتی آسفالت می شوند (Golchin, Allahverani, & Meshkabadi, 2023; Hesami & Zalnejad, 2019; Mazroudi, 2019; Usman et al., 2019).

۳-۴- فیلر

فیلرها از دیگر اجزای مهم آسفالت های حفاظتی هستند که معمولاً از موادی مانند گرد سنگ معدنی (مانند گرد آهک)، آهک هیدراته و خاکستر بادی تشکیل شده اند. فیلرها ویژگی های عملکردی مخلوط های آسفالتی را بهبود بخشیده و با افزایش ویسکوزیته، کاهش فضای خالی و افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل و پیرشدگی، کیفیت مخلوط را ارتقا می دهند. استفاده از فیلرها به کاهش ترک خوردگی حرارتی و افزایش دوام کمک کرده و مقاومت روسازی در برابر سایش را افزایش می دهد (Fooladi, 2020; Kamboozia et al., 2022; Robati, Carter, & Perraton, 2015).

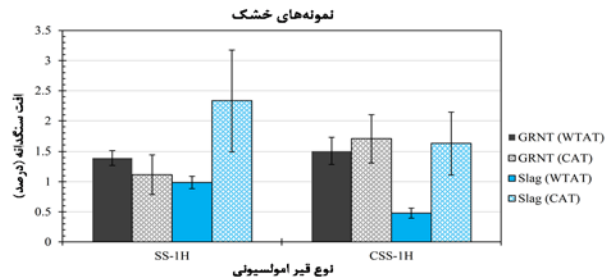
شناخت اجزای تشکیل دهنده آسفالت های حفاظتی شامل قیر امولسیونی، سنگدانه ها، افزودنی ها و فیلرها برای توسعه راهکارهای موثر و بادوام در روسازی راه ها ضروری است. هر یک از این اجزا نقش مهمی در دستیابی به ویژگی های عملکردی مطلوب و افزایش طول عمر روسازی دارند. با انتخاب مواد و فرمولاسیون های مناسب، مهندسان می توانند روش های تعمیر و نگهداری روسازی آسفالتی را برای شرایط محیطی مختلف و بارهای ترافیکی بهینه کنند. این دانش برای اجرای راهبردهای نگهداری روسازی پایدار و اقتصادی از اهمیت بالایی برخوردار است.

بررسی تأثیر انواع قیر امولسیون بر سنگدانه‌های گرانیتی و سرباره‌ای نشان داد که سنگدانه‌های گرانیتی حساسیت بیشتری نسبت به رطوبت دارند. باین حال، انتخاب امولسیون مناسب، مانند CSS-IHP، می‌تواند تخریب ناشی از رطوبت را کاهش داده و عملکرد هر دو نوع سنگدانه را به سطحی مشابه برساند. شکل ۱۱ تأثیر انواع مختلف قیر امولسیون را در مواجهه با دو روش آسیب رطوبتی، شامل نگهداری نمونه در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت و غوطه‌وری ۶ روزه در آب، برای سنگدانه‌های گرانیتی و سرباره‌ای نشان می‌دهد (Johannes, 2014).

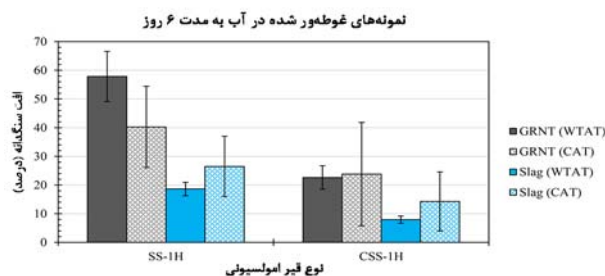


شکل ۷. نتایج آسیب رطوبتی در ۴۸ ساعت در ۶۰ درجه سانتی‌گراد در مقایسه با نتایج آزمون غوطه‌وری ۶ روزه برای گرانیت و سرباره (Johannes, ۲۰۱۴)

مطالعه‌ای توسط (Rahman et al., 2020) نشان داد که افزایش میزان مصرف امولسیون باعث کاهش افت سنگدانه می‌شود. این روند نشان می‌دهد که مقادیر بالاتر قیر امولسیون، چسبندگی را افزایش داده و حفظ سنگدانه را بهبود می‌بخشد و از آسیب‌های زودرس مانند شن‌زدگی جلوگیری می‌کند. باین حال، مصرف بیش‌ازحد امولسیون ممکن است منجر به قیرزدگی شود، بنابراین تنظیم دقیق میزان امولسیون بر اساس شرایط پروژه ضروری است. در مطالعه‌ای دیگر (Lonbar, Nasrazadani, Shafaghat, 2015)، تأثیر نوع و مقدار قیر امولسیونی بر عملکرد میکروسرفیسینگ از طریق آزمون رد چرخ (ISSA TB147) بررسی شد. نتایج، که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، نشان داد که نمونه‌های مبتنی بر رزین مقاومت شیارشدگی

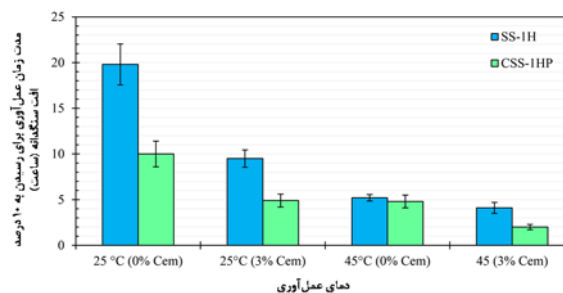


شکل ۴. نتایج شن‌زدگی نمونه‌های خشک در آزمون‌های WTAT و CAT (Johannes, ۲۰۱۴)



شکل ۵. نتایج شن‌زدگی نمونه‌های غوطه‌ور شده به مدت ۶ روز در آب در آزمون‌های WTAT و CAT (Johannes, ۲۰۱۴)

نوع و مقادیر قیر امولسیونی در آسفالت‌های حفاظتی بر زمان عمل‌آوری نیز تأثیرگذار است. همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، امولسیون‌های مختلف برای رسیدن به سطح قابل قبول افت سنگدانه (کمتر از ۱۰ درصد) به مدت زمان‌های متفاوتی نیاز دارند که این مورد در دماهای پایین‌تر کاملاً مشهود است. در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، زمان عمل‌آوری بین ۶ تا ۲۴ ساعت بسته به نوع امولسیون و مقدار سیمان متغیر است، در حالی که در دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد، صرف‌نظر از نوع امولسیون، این زمان کمتر از ۵ ساعت است (Johannes, 2014).



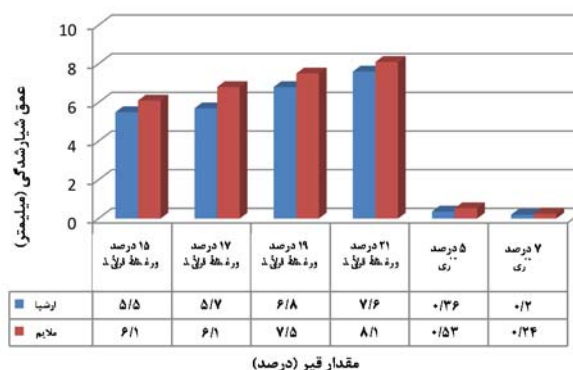
شکل ۶. زمان موردنیاز برای رسیدن به افت سنگدانه کمتر از ۱۰٪ در ترکیبات مختلف (Johannes, ۲۰۱۴)

نانومقیاس می‌تواند مسیرهای جدیدی برای بهبود عملکرد آسفالت‌های حفاظتی ارائه دهد.

۴-۲- سنگدانه

ویژگی‌های سطح سنگدانه نقش مهمی در ماندگاری چپ سیل دارند. در یک مطالعه، تأثیر این ویژگی‌ها با استفاده از آزمایش شبیه‌سازی چپ سیل تسریع شده (HSKSC) بررسی شد که طی آن سه نوع سنگ خرد شده، شامل بازالت نوع (CB)، سنگ آهک نوع (CK) و بازالت نوع (BB) ارزیابی شدند. ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی این سنگدانه‌ها در جدول ۹ خلاصه شده است. نتایج نشان داد که افت سنگدانه عمدتاً تحت تأثیر چسبندگی بین قیر و سنگدانه است. در این راستا، سنگدانه‌های پیش‌پوشش‌شده عملکرد بهتری نسبت به سنگدانه‌های غبارآلود و تمیز داشتند. همچنین، قیرهای اصلاح‌شده با پلیمر کاهش قابل توجهی در از دست رفتن سنگدانه نسبت به قیرهای معمولی نشان دادند (شکل ۱۳). بررسی‌ها نشان دادند که نمونه‌های CB به دلیل مقدار بالای سیلیکا (۶۰/۶٪)، بیشترین میزان افت سنگدانه را داشتند که نشان‌دهنده تأثیر منفی سیلیکا بر چسبندگی قیر-سنگدانه است. علاوه بر این، محدود کردن مقدار گرد و غبار سنگدانه به ۱ تا ۲ درصد به کاهش افت چسبندگی کمک کرد. همچنین، پارامترهای فیزیکی نظیر عمق نفوذ سنگدانه و دانه‌بندی تأثیر مهمی بر ماندگاری چپ سیل داشتند. در این زمینه، سنگدانه‌های BB به دلیل بعد متوسط بزرگ‌تر ۲۰ افت کمتری را تجربه کردند (Aktaş et al., 2013).

بهتری نسبت به نمونه‌های امولسیون دارند. همچنین، کاهش مقدار چسباننده به کاهش عمق شیارشدگی منجر شد، اما برای حفظ تعادل میان مقاومت در برابر شیارشدگی و سایر ویژگی‌های عملکردی، تعیین مقدار بهینه قیر با آزمون‌های آزمایشگاهی مانند افت سایش در شرایط مرطوب (ISSA TB100) و روش مارشال توصیه می‌شود.



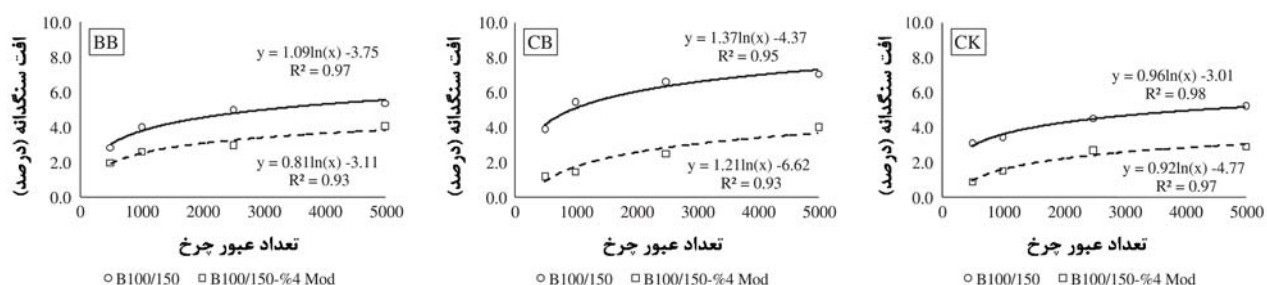
شکل ۸. عمق شیار نمونه‌های ساخته‌شده از دو نوع سنگدانه و دو

نوع چسباننده قیری (Lonbar, Nasrazadani, & Shafaghat, ۲۰۱۵)

نتایج مطالعات نشان می‌دهد که انتخاب مناسب قیر امولسیونی و تعیین مقدار بهینه آن تأثیر بسزایی در عملکرد آسفالت‌های حفاظتی دارد. با کنترل صحیح میزان قیر و توجه به شرایط محیطی، می‌توان ضمن بهبود چسبندگی و کاهش آسیب‌های ناشی از رطوبت و شیارشدگی، از مشکلاتی مانند قیرزدگی جلوگیری کرد. با این حال، تحقیقات بیشتری برای بررسی رفتار درازمدت این مخلوط‌ها تحت شرایط اقلیمی مختلف، بهینه‌سازی فرمولاسیون قیرهای امولسیونی جدید، و توسعه روش‌های نوین برای افزایش مقاومت در برابر رطوبت و شیارشدگی توصیه می‌شود. همچنین، بررسی ترکیب قیر امولسیونی با افزودنی‌های

جدول ۹. ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگدانه‌ها (Aktaş et al., ۲۰۱۳)

کد سنگدانه	وزن مخصوص و مقدار جذب آب		سایش لسانجلس (%)	ذرات تخت و کشیده (%)	دوام (%)	میزان گرد و غبار (%)	آزمون عریان شدگی (%)
	جذب آب	چگالی ظاهری خشک (g/cm³)					
CB	۲/۱	۲/۵۶۰	۱۸/۲	۱۰/۴	۰/۳	۱/۰۵	۲۵
CK	۰/۲	۲/۶۸۱	۲۵/۲	۲۲/۱	۱/۲	۱/۴۸	۸۰
BB	۱/۳	۲/۶۵۷	۱۱/۰	۹/۴	۲/۶	۱/۳۰	۸۵



شکل ۱۳. عملکرد از دست رفتن سنگدانه برای سنگدانه‌های BB، CB و CK با قیرهای معمولی و اصلاح شده (Aktaş et al., ۲۰۱۳)

ضایعاتی به عنوان جایگزین سنگدانه مزایایی مانند افزایش مقاومت لغزشی را نشان داد، اما جایگزینی بیش از ۲۰٪ منجر به کاهش مقاومت در برابر شیارشدگی شد. نتایج آزمایش‌های جداسازی مرطوب نشان داد که مقاومت در برابر آسیب‌های ناشی از آب کاهش یافته، اما در محدوده استانداردهای قابل قبول باقی ماند. مطالعه پیشنهاد کرد که جایگزینی شیشه ضایعاتی به ۱۵٪ برای ذرات ریز و ۱۰٪ برای درشت محدود شود تا تعادل بین پایداری و عملکرد مکانیکی حفظ گردد (Cheng et al., 2021). بررسی تأثیر سنگدانه‌های سرباره فولاد بر میکروسرفیسینگ نشان داد که این مصالح در مقایسه با سنگدانه‌های سیلیسی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی برتری دارند. آزمایش‌های عملکردی نشان داد که مخلوط‌های حاوی ۶۰٪ سرباره فولاد بهترین عملکرد را از نظر انسجام، کاهش وزن در آزمایش سایش مسیر مرطوب و مقاومت در برابر تغییر شکل ارائه دادند. این نتایج نشان می‌دهد که سرباره فولاد می‌تواند جایگزین مناسبی برای سنگدانه‌های طبیعی باشد و عملکرد میکروسرفیسینگ را از طریق افزایش اصطکاک، دوام و سختی بهبود بخشد (Zalnezhad & Hesami, 2020).

امکان استفاده از سرباره مس^{۲۲} به عنوان جایگزین سنگدانه‌های طبیعی در میکروسرفیسینگ نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش میزان سرباره مس باعث بهبود انسجام مخلوط‌ها شد، به‌ویژه مخلوط‌های حاوی ۳۰٪ سرباره مس که افزایش ۲۵٪ در انسجام نسبت به نمونه‌های کنترل داشتند. آزمایش‌های مکانیکی نشان داد که این مخلوط‌ها کاهش جداسازی و تغییر شکل را تجربه کردند، اما مقادیر بالاتر سرباره مس چسبندگی ماسه را افزایش داده و خطر قیرزدگی را افزایش

تحقیقات نشان داده‌اند که ویژگی‌های سنگدانه، از جمله مقاومت لغزشی، صیقل و سایش، تأثیر قابل توجهی بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی دارند. در یک مطالعه، چهار نوع سنگدانه (بوکسیت کلسینه‌شده، ریولیت، مرامک و فلینت) مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که سنگدانه‌های با زاویه‌داری و بافت سطحی بالاتر، اصطکاک بهتری را حفظ کرده و سنگدانه‌های ریز مقادیر^{۲۱} BPN بالاتری نسبت به سنگدانه‌های درشت دارند. پس از صیقل، بافت سطحی به عامل اصلی در مقاومت لغزشی تبدیل شد (Roshan & Abdelrahman, 2024).

در مطالعه‌ای دیگر، تأثیر نوع سنگدانه بر مخلوط‌های میکروسرفیسینگ با مقایسه سنگدانه‌های رودخانه‌ای و کوهستانی بررسی شد. نتایج نشان داد که سنگدانه‌های رودخانه‌ای انسجام اولیه بالاتری دارند، در حالی که سنگدانه‌های کوهستانی مقاومت بهتری در برابر سایش و جابجایی جانبی ارائه می‌دهند. این یافته‌ها بر اهمیت انتخاب نوع سنگدانه برای بهینه‌سازی عملکرد مخلوط‌ها تأکید دارند (Lonbar & Nazirizad, 2016).

تحلیل اثر شکل سنگدانه و درصد نفوذ آن در عملکرد چپ سیل نشان داد که سنگدانه‌های مکعبی با نفوذ بیش از ۵۰٪ پایداری بهتری دارند، در حالی که سنگدانه‌های پولکی به دلیل حساسیت به نیروهای اهرمی و گوه‌ای بیشتر مستعد جداسازی هستند. همچنین، نرخ کاربرد بیش از حد سنگدانه موجب افزایش تنش‌های کششی در فصل مشترک قیر و سنگدانه شد که بر اهمیت بهینه‌سازی میزان کاربرد تأکید دارد (Kumbarger et al., 2020).

با توجه به مسائل زیست‌محیطی، استفاده از مواد جایگزین در میکروسرفیسینگ مورد بررسی قرار گرفته است. ترکیب شیشه

محیطی^{۲۴} تأیید کرد که اصلاح با پلیمر باعث افزایش چسبندگی بین قیر و سنگدانه شده است. با این حال، هزینه امولسیون‌های اصلاح شده با پلیمر حدود ۳۰ درصد بیشتر از امولسیون‌های معمولی است، اما طول عمر بالاتر این هزینه را جبران می‌کند (Kim & Lee, 2007).

مطالعات نشان داده‌اند که اصلاح سطحی میکروپودر سرباره فسفر^{۲۵} با ۲/۵ درصد TM-P (در ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۵ دقیقه) مقاومت در برابر شیارشدگی، خستگی و ترک‌خوردگی را بهبود داده است. همچنین، این اصلاح حساسیت به پیرشدگی را کاهش داده و توزیع مناسب‌تری از میکروپودر در قیر ایجاد کرده است. نتایج نشان می‌دهند که این نوع اصلاح برای میکروسرفیسینگ و اسلاری سیل مناسب است (Yu et al., 2020).

افزودن ۱/۵ درصد الیاف بامبو اصلاح‌شده با روش‌های سیلان، قلیایی و حرارتی، چسبندگی و خواص مکانیکی قیر را بهبود بخشیده است. آزمایش‌های رئولوژیکی نشان دادند که اصلاح با سیلان، چسبندگی را تا ۶۶/۷ درصد افزایش داده و طول عمر خستگی را بهبود داده است. بررسی‌های میکروسکوپی نیز نشان دادند که سطوح زیرتر الیاف اصلاح‌شده جذب قیر را افزایش داده‌اند (Cui et al., 2022).

توسعه روش اختلاط حرارتی دوگانه برای ترکیب چند پلیمر در امولسیون‌های قیری منجر به توزیع یکنواخت پلیمرها و بهبود خواص مکانیکی شده است. مطالعات نشان داده‌اند که این رویکرد چسبندگی، انعطاف‌پذیری و مقاومت محیطی را نسبت به امولسیون‌های تک‌پلیمر افزایش داده و باعث بهبود عملکرد میکروسرفیسینگ، چپ سیل و اسلاری سیل شده است (Abd El-Rahman et al., 2017).

استفاده از کامپوزیت‌های $g-C_3N_4/TiO_2$ در آسفالت حفاظتی به‌عنوان روشی نوآورانه برای بهبود عملکرد معرفی شده است. در روش پخش، این کامپوزیت روی سطح قیر پیش از افزودن سنگدانه اعمال شده و عملکرد فوتوکاتالستی را افزایش داده است. بیشترین بازده حذف NO (معادل ۳۱/۴۱ درصد) در مقدار ۰/۰۹۲ کیلوگرم بر مترمربع حاصل شده است (شکل ۱۴). افزایش مقدار کامپوزیت به بیش از ۰/۱۳۸ کیلوگرم بر مترمربع

داد. تحلیل آماری نتایج نشان داد که سرباره مس تأثیر معنی‌داری بر انسجام و رفتار جابجایی دارد و می‌تواند به عنوان جایگزینی پایدار برای سنگدانه‌های طبیعی استفاده شود، در حالی که عملکرد میکروسرفیسینگ را بهبود داده و مزایای زیست‌محیطی ارائه می‌کند (Zalnezhad et al., 2022).

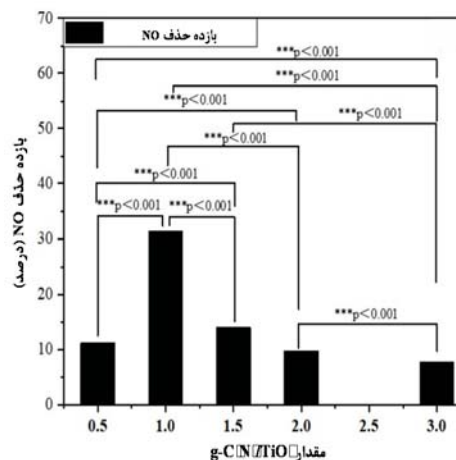
به طور کلی، تحقیقات درباره آسفالت‌های حفاظتی بر تأثیر حیاتی ویژگی‌های سنگدانه‌ها، روش‌های اجرا و اصلاحات مواد بر عملکرد روسازی تأکید می‌کند. انتخاب سنگدانه‌های باکیفیت و نفوذ بهینه باعث بهبود ماندگاری و دوام آسفالت‌های حفاظتی می‌شود. گنجاندن مواد جایگزین مانند شیشه ضایعاتی، سرباره فولاد و سرباره مس در مخلوط‌های میکروسرفیسینگ، فرصت‌هایی برای راه‌حل‌های پایدار در روسازی ارائه می‌دهد، در حالی که استانداردهای عملکردی را حفظ می‌کند. با این حال، در نظر گرفتن دقیق محدودیت‌های مواد، مانند کاهش مقاومت در برابر آسیب‌های رطوبتی و افزایش احتمال قیرزدگی، برای توسعه‌ی آسفالت حفاظتی مؤثر و بادوام ضروری است.

۴-۳- افزودنی

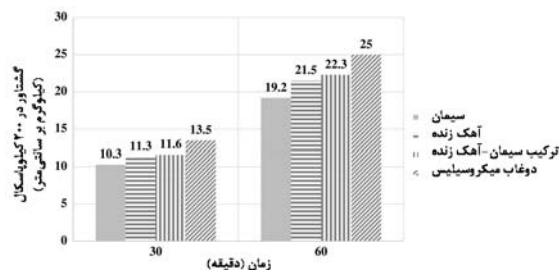
آسفالت‌های حفاظتی با استفاده از امولسیون‌های اصلاح‌شده با پلیمر، نانومواد و الیاف اصلاح‌شده سطحی پیشرفت‌های قابل توجهی داشته‌اند. تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که این نوآوری‌ها دوام روسازی، مقاومت در برابر تنش‌های محیطی و عملکرد کلی را بهبود می‌بخشند. در ادامه یافته‌های کلیدی برخی از مطالعات در رابطه با استفاده از افزودنی‌ها در آسفالت‌های حفاظتی خلاصه شده و آن‌ها را در دسته‌های امولسیون‌های اصلاح‌شده با پلیمر، میکروپودرهای اصلاح‌شده سطحی، قیرهای تقویت‌شده با الیاف، امولسیون‌های چندپلیمری و چپ سیل‌های فوتوکاتالستی طبقه‌بندی می‌شود.

استفاده از امولسیون‌های اصلاح‌شده با پلیمر، به‌ویژه حاوی SBR^{۲۳}، باعث تشکیل یک شبکه پلیمری پیوسته شده و عملکرد قیر را بهبود می‌بخشد. در یک مطالعه، چپ سیل‌های حاوی ۳ درصد SBR در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد بیش از ۸۰ درصد از سنگدانه‌ها را حفظ کرده و عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌های اصلاح‌نشده نشان دادند. بررسی با میکروسکوپ الکترونی

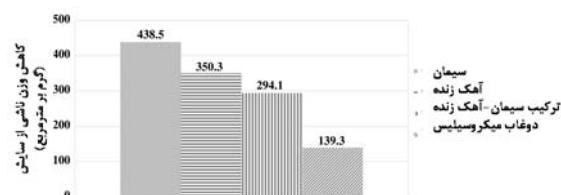
Figure 1 is a line graph showing the effect of different concentrations of ZnO nanoparticles (0.5g, 1.0g, 1.5g, 2.0g, and 3.0g) on the growth of Arabidopsis thaliana seedlings over 30 days. The Y-axis represents the height of the seedlings in cm, and the X-axis represents time in days. The 1.0g concentration shows the highest growth, reaching approximately 32 cm by day 15. The 0.5g concentration shows the lowest growth, reaching approximately 10 cm by day 30. The 1.5g, 2.0g, and 3.0g concentrations show intermediate growth rates, with the 3.0g concentration showing the lowest growth among the higher concentrations.



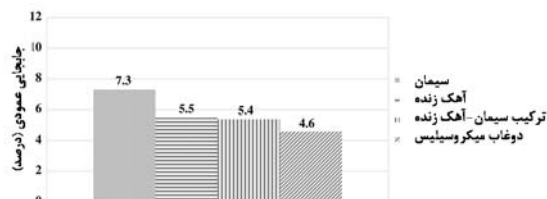
۳۱۴



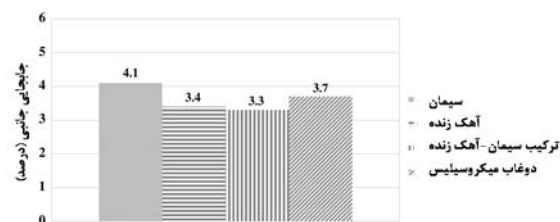
شکل ۱۷. نتایج آزمون چسبندگی مرطوب برای مخلوط‌های میکروسرفیسینگ در ۳۰ و ۶۰ دقیقه (Fooladi & Hesami, ۲۰۲۱)



شکل ۱۸. نتایج آزمون سایش خط مرطوب برای مخلوط‌های میکروسرفیسینگ (Fooladi & Hesami, ۲۰۲۱)

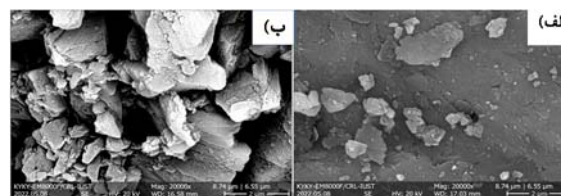


شکل ۱۹. میزان جابجایی عمودی در مخلوط‌های میکروسرفیسینگ حاوی فیلرهای مختلف (Fooladi & Hesami, ۲۰۲۱)



شکل ۲۰. میزان جابجایی جانبی در مخلوط‌های میکروسرفیسینگ حاوی فیلرهای مختلف (Fooladi & Hesami, ۲۰۲۱)

افزودن ۵ درصد پودر ضایعات زغال سنگ^{۲۹} باعث افزایش چسبندگی قیر تا ۶/۱۳ درصد پس از ۶۰ دقیقه و کاهش ۳۴ درصد و ۲۶ درصد در جابجایی عمودی و جانبی شده است. تصاویر SEM نشان داد که ذرات پودر ضایعات زغال سنگ به



شکل ۱۶. تصاویر FESEM از فیلرها (الف) فیلر طبیعی با ساختار پوسته‌ای (ب) فیلر بازالت با سطح زیر و منافذ ریز (Algburi & Hesami, ۲۰۲۵)

در مخلوط‌های اسلاری سیل اصلاح شده با پلیمر، استفاده از پودر ضایعات سرامیک تأثیر مثبتی بر چسبندگی، مقاومت سایشی و کاهش پتانسیل قیرزدگی داشته است. مخلوط‌های حاوی ۱۰ درصد پودر ضایعات سرامیک، چسبندگی ۳۳/۳ درصد بالاتر، مقاومت سایشی ۶۲ درصد بیشتر و پتانسیل قیرزدگی ۳۱ درصد کمتر را نسبت به نمونه کنترل نشان دادند. آنالیزهای XRF و FTIR^{۲۸} نشان داد که سیلیس بالای ۷۶ درصد در پودر ضایعات سرامیک باعث تشکیل پیوندهای قوی Si-O-Si و افزایش خاصیت ارتجاعی و چسبندگی شده است. میزان بهینه قیر در این مخلوط‌ها تا ۱۳/۶ درصد افزایش یافت (Jalalian Khoshnood et al., 2023)

استفاده از رنگدانه‌های قرمز که حاوی ۶۷ درصد Fe_2O_3 و ۲۵ درصد SiO_2 هستند، باعث افزایش ۹/۵ درصد در چسبندگی، کاهش ۴۰/۱ درصد در حساسیت به رطوبت و کاهش ۱۴/۵ درصد در جابجایی عمودی شده است. افزودن ۱ درصد TiO_2 به این ترکیب، افت وزنی را تا ۴۰ درصد کاهش داده و مقاومت در برابر آسیب رطوبتی را افزایش داده است (Ziari et al., 2024).

دوغاب میکروسیلیس به عنوان یک فیلر باعث افزایش چسبندگی، مقاومت سایشی و مقاومت در برابر شیارشدگی شده است. نتایج آزمون چسبندگی مرطوب (شکل ۱۷) نشان داد که اسلاری میکروسیلیس، چسبندگی ۳۱/۱ درصد بیشتر در ۳۰ دقیقه و ۳۰/۲ درصد بیشتر در ۶۰ دقیقه نسبت به مخلوط سیمان کنترل دارد. آزمون WTAT (شکل ۱۸) نشان داد که این مخلوط کمترین افت وزنی را داشته است. همچنین، آزمون بار چرخ (شکل‌های ۱۹ و ۲۰) کاهش چشمگیری در جابجایی عمودی و جانبی را نشان داد (Fooladi & Hesami, 2021).

بهتری در شرایط مرطوب نشان داده و دوام بالاتری دارند. زمان عمل‌آوری به دما و نوع امولسیون وابسته است و ضخامت فیلم قیر باقی‌مانده می‌تواند بر قیرزدگی یا بافت سطحی تأثیر بگذارد. امولسیون‌های پلیمری بهبود چشمگیری در دوام و چسبندگی نشان داده‌اند. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سنگدانه‌ها مانند پیش‌پوشش دهی، اندازه، زاویه‌داری، درصد سیلیکا و مقاومت در برابر صیقلی شدن، نقش مهمی در دوام، چسبندگی و مقاومت لغزندگی چپ سیل دارند. سنگدانه‌های سرباره و کوهستانی عملکرد بهتری در برابر سایش و لغزندگی ارائه داده‌اند، درحالی‌که سنگدانه‌های رودخانه‌ای انسجام اولیه بهتری فراهم می‌کنند. انتخاب مناسب سنگدانه‌ها می‌تواند پایداری و طول عمر چپ سیل را بهبود بخشد.

استفاده از افزودنی‌های پلیمری مانند SBR و میکروپودرهای اصلاح‌شده، چسبندگی، مقاومت در برابر شیارشدگی، ترک‌خوردگی و خستگی را افزایش می‌دهند. استفاده از افزودنی‌های چندپلیمری و فوتوکاتالیستی مانند $g-C_3N_4/TiO_2$ در چپ سیل‌های حفاظتی باعث افزایش عملکرد فوتوکاتالیستی و بهبود حذف NO به میزان ۳۱/۴۱ درصد شده، اما افزایش بیش از حد این ترکیب منجر به کاهش چسبندگی سنگدانه‌ها می‌شود. همچنین، اصلاح الیاف بامبو با روش‌های مختلف باعث افزایش ۶۶/۷ درصدی طول عمر خستگی در مقایسه با الیاف اصلاح‌نشده شده است. فیلرها نقش مهمی در بهبود چسبندگی قیر به سنگدانه‌ها و افزایش مقاومت مکانیکی و دوام چپ سیل دارند.

به‌طور خاص، فیلر بازالت با افزایش چسبندگی ۳۱/۴ درصدی و مقاومت در برابر تغییر شکل ۳۶/۷ درصدی عملکرد مطلوبی نشان داده است. فیلر پودر ضایعات سرامیک به دلیل پیوندهای قوی $Si-O_2$ باعث بهبود ۶۲ درصد مقاومت سایشی و کاهش ۳۱ درصد قیرزدگی شده است. به‌طور کلی، بررسی مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که عملکرد آسفالت‌های حفاظتی به عواملی نظیر نوع امولسیون، ویژگی‌های سنگدانه، افزودنی‌های اصلاحی و نوع فیلر وابسته است. انتخاب بهینه این اجزا می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر دوام، مقاومت در برابر رطوبت، چسبندگی و عملکرد سطحی مخلوط‌های حفاظتی داشته باشد. درک صحیح

دلیل شکل زاویه‌دار و سطح زبر، جذب و چسبندگی بهتری دارند. نتایج ANOVA تأثیر قابل توجه پودر ضایعات زغال سنگ بر چسبندگی، حساسیت به رطوبت و مقاومت در برابر تغییر شکل را تأیید کرد (Ziari et al., 2022). همچنین استفاده از پودر ضایعات شیشه ۳۰ به‌عنوان جایگزین فیلرهای معدنی به بهبود چسبندگی، مقاومت سایشی و مقاومت در برابر تغییر شکل منجر شده است. بررسی مخلوط‌های حاوی ۷۵ و ۱۰۰ درصد پودر ضایعات شیشه نشان داد که این ترکیب علاوه بر بهبود عملکرد روکش‌های سطحی، به توسعه پایدار در ساخت‌وساز کمک می‌کند (Ghodrati et al., 2025).

فیلرهای جایگزینی مانند بازالت، پودر ضایعات سرامیک، رنگدانه‌های طبیعی، اسلاری میکروسیلیس، پودر ضایعات زغال‌سنگ و پودر شیشه به‌طور قابل توجهی عملکرد روکش‌های آسفالتی را بهبود بخشیده‌اند. این فیلرها با بهبود چسبندگی، مقاومت در برابر تغییر شکل، مقاومت سایشی و مقدار بهینه قیر، به ساخت‌وساز روسازی‌هایی بادوام‌تر و مقرون‌به‌صرفه‌تر کمک می‌کنند. تحقیقات آینده باید بر بهینه‌سازی اندازه ذرات فیلر، ارزیابی عملکرد بلندمدت در شرایط میدانی و بررسی تأثیرات زیست‌محیطی فیلرهای جایگزین تمرکز داشته باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، نتایج حاصل از مطالعه تأثیر اجزای مختلف تشکیل‌دهنده آسفالت‌های حفاظتی بر عملکرد آن‌ها مورد تحلیل قرار گرفته است. به‌طور خاص، تأثیر نوع و ویژگی‌های قیر امولسیونی، خواص فیزیکی و مکانیکی سنگدانه‌ها، افزودنی‌های اصلاحی مانند پلیمرها و نانوذرات، و نقش فیلرهای معدنی و صنعتی بر ویژگی‌هایی همچون دوام، چسبندگی، مقاومت در برابر رطوبت و پایداری این مخلوط‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه، نتایج مطالعات پیشین در این زمینه مرور شده و تحلیل جامعی از تأثیر این عوامل بر عملکرد روسازی‌های حفاظتی ارائه خواهد شد. نوع امولسیون تأثیر قابل‌توجهی بر مقاومت در برابر رطوبت، شن‌زدگی و پایداری مخلوط‌های آسفالتی دارد. امولسیون‌های اصلاح‌شده پلیمری مانند CSS-1HP عملکرد

-بررسی تأثیر استفاده از مواد نوین به عنوان فیلر مانند پلیمرها، پودر ضایعات صنعتی و ترکیبات معدنی جدید بر عملکرد مکانیکی و دوام مخلوط‌های حفاظتی.

-تحلیل رفتار مکانیکی مخلوط‌های حفاظتی در مقیاس‌های میکرو و ماکرو با استفاده از تصویربرداری پیشرفته و مدل‌سازی عددی برای درک بهتر تعامل اجزای مختلف و بهینه‌سازی طراحی.

-تحقیقات آینده باید بر توسعه راهکارهای نوین و پایدار برای بهبود عملکرد آسفالت‌های حفاظتی متمرکز شوند. استفاده از فناوری‌های پیشرفته مانند هوش مصنوعی، نانومواد و روش‌های ارزیابی زیست‌محیطی می‌تواند به بهینه‌سازی ترکیبات و اجرای آسفالت‌های حفاظتی منجر شود. در نهایت، این مطالعات می‌توانند به افزایش عمر مفید روسازی‌ها، کاهش هزینه‌های نگهداری و ارتقای پایداری زیرساخت‌های حمل‌ونقل کمک کنند.

۶- پی‌نوشت‌ها

1. Fog Seal
2. Chip Seal
3. Slurry Seal
4. Micro-surfacing
5. Seal Coat
6. Multiple Chip Seal
7. Single Chip Seal
8. Multiple Chip Seal
9. Racked-in Seal
10. Cape Seal
11. Inverted Seal
12. Sandwich Seal
13. Geotextile-Reinforced Seal
14. Pavement Condition Index (PCI)
15. Georgia DOT
16. Styrene-Butadiene-Styrene
17. Ethylene Vinyl Acetate
18. Wet Track Abrasion Test
19. Cohesion Abrasion Test
20. Average Least Dimension
21. British Pendulum Number
22. Copper Slag
23. Styrene-Butadiene Rubber
24. Environmental Scanning Electron Microscope (ESEM)
25. Phosphorus Slag
26. Ceramic Waste Powder (CWP)
27. X-ray Fluorescence spectroscopy
28. Fourier-transform infrared spectroscopy
29. Coal Waste Powder
30. Waste Glass Powder
31. Life Cycle Assessment

این عوامل و به‌کارگیری ترکیبات مناسب، نه‌تنها موجب افزایش عمر مفید این روسازی‌ها می‌شود، بلکه هزینه‌های نگهداری و تعمیرات را نیز کاهش می‌دهد.

با توجه به نتایج این مطالعه و مرور تحقیقات پیشین، مشخص شد که عملکرد آسفالت‌های حفاظتی تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند نوع امولسیون، ویژگی‌های سنگدانه، افزودنی‌های اصلاحی و نوع فیلر قرار دارد. اگرچه پیشرفت‌های قابل‌توجهی در این زمینه صورت گرفته، اما همچنان جنبه‌های متعددی نیاز به بررسی و تحقیق بیشتر دارند. در این راستا، پیشنهادات زیر برای تحقیقات آینده ارائه می‌شود:

-بررسی نقش افزودنی‌های نوین از جمله نانومواد مانند نانوسیلیس، نانورس و نانولوله‌های کربنی در بهبود چسبندگی، دوام و مقاومت آسفالت‌های حفاظتی در برابر عوامل محیطی مختلف.

-استفاده از هوش مصنوعی و یادگیری ماشین برای پیش‌بینی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی و بهینه‌سازی ترکیبات آن‌ها از طریق تحلیل داده‌های آزمایشگاهی و میدانی.

-تحلیل چرخه عمر^{۳۱} جهت ارزیابی تأثیر زیست‌محیطی مواد و فرآیندهای مورد استفاده و ارائه راهکارهای پایدارتر برای انتخاب مواد اولیه و روش‌های اجرا.

-توسعه قیرهای امولسیونی جدید با مقاومت بالاتر در برابر رطوبت، پیرشدگی و تغییرات دمایی برای افزایش دوام آسفالت‌های حفاظتی.

-ارزیابی روش‌های نوین اجرا از جمله به‌کارگیری تجهیزات پیشرفته برای کنترل دقیق میزان قیر و توزیع سنگدانه‌ها به‌منظور افزایش یکنواختی و دوام مخلوط‌های حفاظتی.

-مطالعه تأثیر تغییرات اقلیمی بر عملکرد آسفالت‌های حفاظتی و شبیه‌سازی رفتار آن‌ها تحت شرایط جوی مختلف به‌منظور بهبود طراحی و اجرا.

-توسعه افزودنی‌های پایدار و بازیافتی مانند ضایعات صنعتی و مواد زیست‌تخریب‌پذیر برای کاهش تأثیرات زیست‌محیطی روسازی‌های حفاظتی.

۷- مراجع

- Broughton, B., & Lee, S. J. (2012). *Microsurfacing in Texas*.
- Broughton, B., Lee, S.-J., & Kim, Y. J. (2012). 30 years of microsurfacing: A review. *International Scholarly Research Notices*, 2012(1), 279643.
- Buss, A., Guirguis, M., & Gransberg, D. (2018). Chip seal aggregate evaluation and successful roads preservation. *Construction and Building Materials*, 180, 396-404.
- Buss, A. F., Guriguig, M., Claypool, B., Gransberg, D. D., & Williams, R. C. (2016). Chip seal design and specifications.
- Cao, X., Deng, M., Tang, B., Ding, Y & ,Yang, X. (2021). Development of photocatalytic chip seal for nitric oxide removal on the surface of pavement using g-C3N4/TiO2 composite. *Road Materials and Pavement Design*, 22(5), 1178-1194.
- Cheng, M., Chen, M., Wu, S., Yang, T., Zhang, J., & Zhao ,Y. (2021). Effect of waste glass aggregate on performance of asphalt micro-surfacing. *Construction and Building Materials*, 307, 125133.
- Cui, P., Wu, S., Xu, H., & Lv, Y. (2019). Silicone resin polymer used in preventive maintenance of asphalt mixture based on fog seal. *Polymers*, 11(11), 1814.
- Cui, S., Sheng, Y., Wang, Z., Jia, H., Qiu, W., Temitope, A. A., & Xu, Z. (2022). Effect of the fiber surface treatment on the mechanical performance of bamboo fiber modified asphalt binder. *Construction and Building Materials*, 347, 128453.
- De Rose, M., Iuele, T., Perri, G., & Vaiana, R. (2023). On the Mix Design Advances in Microsurfacing: A Systematic Surface Performance-Oriented Literature Review. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 1-20.
- do Nascimento, M. d. V., Neto, O. d. M. M., Lucena, A. E. d. F. L., Guerra, T. D., da Silva Lopes, A. M., & do Nascimento, E. P. (2023). Investigation of the adhesion conditions of the micro-surfacing applied on asphalt concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e02155.
- Esfahani, M. A., & Khatayi, A. (2022). Effect of type and quantity of emulsifier in bitumen
- Abd El-Rahman, A., El-Shafie, M., Abo-Shanab, Z., & El-Kholy, S. (2017). Modifying asphalt emulsion with different types of polymers for surface treatment applications. *Petroleum Science and Technology*, 35(14), 1473-1480.
- Aktaş, B., Karaşahin, M., Saltan ,M., Güreç, C., & Uz, V. E. (2013). Effect of aggregate surface properties on chip seal retention performance. *Construction and Building Materials*, 44, 639-644.
- Algburi, K. T. K., & Hesami, S. (2025). Optimizing slurry seal asphalt with basalt: an analysis of performance and durability. *Innovative Infrastructure Solutions*, 10(1), 23.
- Ali, H., & Mohammadafzali, M. (2014). Asphalt surface treatment practice in southeastern United States.
- Anderson, K. W., Weston, J., Russell, M., Uhlmeier, J. S., Willoughby, K. A., Luhr, D., & Dominguez, M. (2017). Preventive maintenance study: interim report.
- Ataollahi, A. (2018). Performance Evaluation of microsurfacing protective asphalt with rubber powder Babol Noshirvani University of Technology.
- Bhargava, N., Siddagangaiah, A. K., & Ryntathiang, T. L. (2020). State of the art review on design and performance of microsurfacing. *Road Materials and Pavement Design*, 21(8), 2091-2125.
- Bhargava, N., Siddagangaiah, A. K., & Ryntathiang, T. L. (2021a). Sustainable development with microsurfacing: A review. *Journal of Testing and Evaluation*, 49(2), 1284-1306.
- Bhargava, N., Siddagangaiah, A. K., & Ryntathiang, T. L. (2021b). Systematic approach to address challenges in microsurfacing mix design. *Construction and Building Materials*, 270, 121759.
- Brenes-Calderón, A., & Vargas-Nordbeck, A. (2023). Use of chip seal treatments to mitigate pavement roughness progression in cold regions. *International Journal of Pavement Engineering*, 24(1), 2241963.

- Hajj, E. Y., Loria, L., Sebaaly, P. E., Borroel, C. M., & Leiva, P. (2011). Optimum time for application of slurry seal to asphalt concrete pavements. *Transportation Research Record*, 2235(1), 66-81.
- Hesami, E., & Zalnezhad, M. (2019). Introduction of Microsurfacing and Investigating Factors Affecting Its Performance. *Road*, 27(98), 87-104.
- Jalali, F., & Vargas-Nordcbeck, A. (2021). Life-extending benefit of chip sealing for pavement preservation. *Transportation Research Record*, 2675(6), 104-116.
- Jalalian Khoshnood, A., Kamboozia, N., Ziari, H., & Zalnezhad, M. (2023). Evaluation of performance characteristics of polymer-modified slurry seal (PMSS) by replacing filler with ceramic waste powder. *Road Materials and Pavement Design*, 24(9), 2174-2191.
- Jiang, Y., Yi, Y., Tian, T., Fan, J., Yuan, K., Deng, C., & Xue, J. (2020). Development and application of skid resistance fog seal for pavements. *Coatings*, 10(9), 867.
- Johannes, P. T. (2014). Development of an improved mixture design framework for slurry seals and micro-surfacing treatments The University of Wisconsin-Madison.
- Johnson, A.M. (2000). Best Practices Handbook on Asphalt Pavement Maintenance. Retrieved from the University Digital Conservancy.
- Kamboozia, N., Ziari, H., Zalnezhad, M., & Jalalian Khoshnood, A. (2022). Investigation of the Effect of Waste Ceramic Filler on the Performance of Microsurfacing. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 8(1), 1-22 .
- Karasahin, M., Aktas, B., Gungor, A., Orhan, F., & Gurer, C. (2015). Laboratory and in situ investigation of chip seal surface condition improvement. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 29(2), 04014047.
- Kim, Y., & Lee, J. (2007). Performance-based Analysis of Polymer Modified Emulsions in Asphalt Surface Treatments. Final Report.
- Kim, Y. J., Lim, J. K., Son, H. J., Kwon, S. A., Hong, J. C., & Shin, H. J. (2013). Field evaluation of surface treatments on existing asphalt pavement in national highway. *Advanced Materials Research*, 723, 745-752 .
- polymer emulsion on microsurfacing performance. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(4), 957-971 .
- Fan, Z., Wang, C., Li, Y., Feng, L., & Chen, Q. (2024). State of the art review on fog seal for asphalt pavement: Material composition, classification, performance evaluation, and mechanism analysis. *Progress in Organic Coatings*, 194, 108573 .
- Fan, Z., Wang, C., Wang, Z., Li, Y., Feng, L., & Tan, S. (2025). Fog seal with polymer composite modified emulsified asphalt: Road performance and environmental adaptability. *Wear*, 562, 205672 .
- Fooladi, A. (2020). Evaluation of the Effect of Fillers on the Performance of Microsurfacing Asphalt Mixture Babol Noshirvani University of Technology.
- Fooladi, A., & Hesami, S. (2021). Experimental investigation of the effect of types of fillers on the performance of microsurfacing asphalt mixture. *Journal of Materials in Civil Engineering*.
- Ghodrati, A., Asadi Azadgoleh, M., Zalnezhad, M., Mohammadi, M. M., Ayar, P., & Vahidi, E. (2025). Performance improvement of slurry seal by glass powder: mechanical evaluation and life cycle assessment. *Road Materials and Pavement Design*, 1-23.
- Golchin, B., Allahverani, S., & Meshkabadi, R. (2023). Evaluation of the Performance of the Microsurfacing Incorporating a Latex Adhesive. *Road*, 31(115), 155-166 .
- Grilli, A., Graziani, A., Carter, A., Sangiorgi, C., Specht, L. P., & Callai, S. C. (2019). Slurry surfacing: a review of definitions, descriptions and current practices. *RILEM Technical Letters*, 4, 103-109.
- Guirguis, M., & Buss, A. (2017). Performance evaluation of emulsion and hot asphalt cement chip seal pavements. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(11), 04017202 .
- Hafezzadeh, R., & Kavussi, A. (2021). Application of microsurfacing in repairing pavement surface rutting. *Road Materials and Pavement Design*, 22(5), 1219-1230 .
- Hajj, E., Graham, L., Heitzman, M. A., Hand, A.J., Weitzel, D., & Tran, N. H. (2018). State of the practice in chip seal, slurry seal, micro surfacing, and thin lift asphalt overlay construction quality assurance.

- Rahman, M. N., Sarkar, M. T. A., Elseifi, M. A., Mayeux, C., & Cooper III, S. B. (2020). Effects of emulsion types, application rates, and crumb rubber on the laboratory performance of chip seal. *Construction and Building Materials*, 260, 119787.
- Robati, M. (2014). Evaluation and improvement of micro-surfacing mix design method and modelling of asphalt emulsion mastic in terms of filler-emulsion interaction École de technologie supérieure.
- Robati, M., Carter, A., & Perraton, D. (2013). Evaluation of test methods and selection of aggregate grading for type III application of micro-surfacing. *The International Journal of Pavement Engineering & Asphalt Technology (PEAT)*.
- Robati, M., Carter, A., & Perraton, D. (2015). New conceptual model for filler stiffening effect on asphalt mastic of microsurfacing. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(11), 04015033.
- Roshan, A., & Abdelrahman, M. (2024). Influence of Aggregate Properties on Skid Resistance of Pavement Surface Treatments. *Coatings*, 14(8), 1037.
- Saghafi, M., Asgharzadeh, S. M., Fathi, A., & Hosseini, A. (2019). Image processing method to estimate the wearing condition of slurry seal mixtures. *International Airfield and Highway Pavements Conference*.
- Saghafi, M., Tabatabaee, N., & Nazarian, S. (2019). Performance evaluation of slurry seals containing reclaimed asphalt pavement. *Transportation Research Record*, 2673(1), 358-368.
- Senadheera, S. (2007). Constructability Review of Surface Treatments Constructed on Base Courses.
- Shabani, S., Valizadeh, M., & Khavandi, A. (2024). Evaluation of the sensitivity of the rheology characteristics of bitumen and slurry seal modified with cellulose nanofiber solution. *Construction and Building Materials*, 422, 135318.
- Takamura, K., & James, A. (2015). Paving with asphalt emulsions. In *Advances in Asphalt Materials* (pp. 393-426). Elsevier.
- Tyagi, A., Kumar, R., & Kapoor, K. (2021). Characterisation of microsurfacing mix design: a
- Kucharek, A. S., Keith Davidson, J., Moore, T., & Linton, T. (2010). Performance review of micro surfacing and slurry seal applications in Canada. CTA Annual Conference Proceedings Canadian Technical Asphalt Association.
- Kumbarger, Y., Boz, I., Kutay, M. E., & Heidelberg, A. (2020). A study on the effects of aggregate shape and percent embedment on chip seal performance via image-based finite element analysis. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(8), 1002-1011.
- Lee, J., Hastak, M., Harris, D., & Ahn, H. J. (2013). Subsurface Condition Evaluation for Asphalt Pavement Preservation Treatments.
- Li, P., Xiao, X., Peng, W., Kong, L., Liu, Z., Mao, J., & Han, Y. (2023). Performance test and evaluation index recommendation of fog seal on airport asphalt pavement. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e0260.4.
- Lonbar, M. S., Nasrazadani, S. M., & Shafaghat, A. (2015). Investigation of aggregate and binder types effects on the microsurfacing rutting properties. ICICA15 Annual Meeting.
- Lonbar, M. S., & Nazirizad, M. (2016). Laboratory investigation of materials type effects on the microsurfacing mixture. *Civil Engineering Journal*, 2(3), 86-94.
- Mazroudi, F. N. (2019). Evaluation the Effect of Modified Bitumen by Nano Material on the Performance of Microsurfacing Surface Treatment Shomal University.
- McHattie, R. L. (2001). Asphalt surface treatment guide.
- Mousa, M. R., Elseifi, M. A., Bashar, M. Z., Zhang, Z., & Gaspard, K. (2020). Short and long-term field performances and optimal timing of chip seal in hot and humid climates. *Transportation Research Record*, 2674(1), 33-43.
- Nair, H., Lane, D. S., & McGhee, K. K. (2020). Use of Surface Treatments to Extend Pavement Life: A Case Study on US 301, Sussex County, Virginia.
- Nair, H., & McGhee, K. (2022). Evaluation of different surface treatments to extend pavement life. *Transportation Research Record*, 2676(8), 312-321.
- Nicholls, J. C. (1998). Asphalt surfacings. CRC Press.

- Zalnezhad, M., & Hesami, E. (2020). Effect of steel slag aggregate and bitumen emulsion types on the performance of microsurfacing mixture. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 7(2), 215-226 .
- Zarrinpour shali, Y. (2019). Evaluation of the application of latex in performance of microsurfacing mixes, (*Publication Number 10001073*) Tarbiat Modares University.
- Ziari, H., Mahdizadeh, M. J., & Zalnejad, M. (2023). Experimental Performance Evaluation of Microsurfacing Surface Treatment Containing Polypropylene Fibers. *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, 14(4), 2937-2958.
- Ziari, H., Zalnezhad, M., Ziari, M. A., & Amiri, E. N. (2022). Substitution of the natural aggregate filler by coal waste powder (CWP) in microsurfacing surface treatment: Mix design and performance evaluation. *Construction and Building Materials*, 354, 129132 .
- Ziari, H., Zalnezhad, M., Zomorodian, Z. S., & Ziari, M. A. (2024). Utilising natural pigments as a filler replacement on the mix design, performance and colorimetric characteristics of the microsurfacing mixture: laboratory evaluation. *Road Materials and Pavement Design*, 1-27 .
- Zulu, K., & Mukendi, K. K. (2018). An in-depth evaluation of micro-surfacing treatment. *Civil Engineering Journal*, 4(9), 2242-2251.
- review. *Indian Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Conference*.
- Usman, K., Hainin, M., Idham, M., Warid, M., Yaacob, H., Hassan, N., Azman, M., & Puan, O. (2019). Performance evaluation of asphalt micro surfacing—a review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.
- Xu, L., Jiang, C., & Xiao, F. (2022). Application of fog-seal technology with waterborne thermosetting additive in asphalt pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(8), 04022160 .
- Yan, C., Wang, J., Weng, B., Li, Q., & Li, G. (2024). Cooling characteristics of thermochromic powder modified sand fog seal on asphalt pavement in summer high-temperature environment. *Case Studies in Construction Materials*, e03391 .
- Yang, B., Zhang, Y., Ceylan, H., & Kim, S. (2020). Evaluation of bio-based fog seal for low-volume road preservation. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 13, 303-312 .
- Yu, H., Li, S., Qian, G., Gong, X., & Wang, K. (2020). Experiment evaluation on the surface treatment of phosphorus slag (PS) micropowder for asphalt modification. *Construction and Building Materials*, 262, 119931 .
- Zalnezhad, A., Hosseini, S. A., Shirinabadi, R., & Korandeh, M. E. (2022). Feasibility of using copper slag as natural aggregate replacement in microsurfacing for quality enhancement: Microscopic and mechanical analysis. *Construction and Building Materials*, 354, 129175 .

A Review of the Effects of Asphalt Surface Treatment Components on Their Performance and Durability

Pooyan Ayar, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.

Alireza Bayat, M.Sc., Student, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.

Hossein Tavakoli, M.Sc., Student, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.

Mahmood Ameri, Professor, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.

E-mail: ayar@iust.ac.ir

Received: May 2025- Accepted: August 2025

ABSTRACT

Asphalt surface treatments play a crucial role in preventive pavement maintenance by extending service and reducing reconstruction costs, thereby improving road performance. Common methods such as fog seal, chip seal, slurry seal, and micro-surfacing are employed based on traffic and climatic conditions. The performance of these systems depends on various factors, including the characteristics of asphalt emulsions, aggregates, fillers, and additives. Asphalt emulsion serves as the primary bonding agent, significantly impacting adhesion, durability, and resistance to environmental conditions. Aggregates, with properties such as size, shape, and surface texture, influence skid resistance and overall stability. Fillers like cement, lime, and mineral powders enhance the mixture's resistance to moisture and mechanical failures by reducing void spaces and increasing cohesion. Using polymer-modified asphalt emulsions, nanomaterials, and other additives has been shown to improve mechanical properties and durability significantly. Despite these advancements, challenges such as optimizing material compositions, assessing climatic impacts, and improving execution methods remain pertinent. Findings indicate that the proper selection of asphalt emulsion type, aggregate gradation, filler content and type, and modifier composition significantly enhances resistance to stripping, fatigue, and rutting. Additionally, polymer-modified emulsions and nano-additives improve cohesion and extend pavement service life. Despite significant advancements, further research is required to develop climate-specific mix designs, optimize the role of fillers, and refine long-term performance evaluation methods. Future studies should focus on advanced formulations, innovative construction techniques, and sustainability aspects to develop more durable and cost-effective asphalt surface treatment systems.

Keywords: Asphalt Surface Treatment, Microsurfacing, Fog Seal, Slurry Seal, Chip Seal