معرفی آسفالت حفاظتی میکروسرفیسینگ و بررسی عوامل تأثیرگذار بر عملکرد آن

مقاله پژوهشی - کاربردی

مهدی زال‌نژاد، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

ابراهیم حسامی*، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Hesami@KTH.se

دریافت: ۹۷/۰۸/۲۸- پذیرش: ۹۸/۰۲/۰٤

صفحه ۱۰٤-۸۷

چکیده

شبکه حمل‌ونقل جاده‌ای در هر کشور نقشی حیاتی در اقتصاد آن جامعه بازی کرده، لذا شرایط فیزیکی زیرساخت‌ها بسیار مهم است. بدون شک، بدون نگهداری کافی و به‌موقع، راه‌ها به‌شدت دچار زوال و تخریب خواهند شد و نیاز به بهسازی و حتی بازسازی گسترده‌ای خواهد بود که اغلب هزینه‌ای بیشتر از تعمیر و نگهداری ساده‌ای که می‌توانست زودتر انجام شود، در بر خواهد داشت. با افزایش قیمت روسازی‌های آسفالتی، کاربرد آسفالت‌های حفاظتی به‌عنوان یک اقدام پیشگیرانه در تعمیر و نگهداری روسازی‌ها در ایران و جهان به شکل قابل چشمگیری رواج یافته است. در طی سال‌های گذشته، در بین انواع آسفالت‌های حفاظتی، میکروسرفیسینگ به‌عنوان روشی مؤثر و کارآمد در نگهداری پیشگیرانه‌ی روسازی‌ها به‌صورت گسترده مورد پذیرش قرار گرفته است. استفاده از میکروسرفیسینگ موجب حفاظت و به تأخیر انداختن خرابی روسازی‌ها، آب‌بندی سطح راه، درزگیری ترک‌های غیرفعال راه، افزایش مقاومت لغزندگی و اصلاح سطح روسازی می‌شود. در کنار مزایای ذکر شده، شیارشدگی، عریان‌شدگی و شن‌زدگی از جمله خرابی‌های رایج در میکروسرفیسینگ بوده که عموماً به دلیل تخریب سایشی سنگدانه‌ها، جابجایی مصالح و مواد، نبود چسبندگی کافی بین قیر و سنگدانه، عدم مقاومت سایشی مناسب سنگدانه‌ها و طرح اختلاط و اجرای نامناسب ایجاد می‌شوند. از این‌رو بررسی مدهای خرابی یا شکست در میکروسرفیسینگ امری حیاتی بوده و برای ادارات راه و شهرسازی این موضوع مهم است که آسفالت‌های حفاظتی طوری طراحی و بهینه‌سازی شده که دارای بهترین عملکرد و بیشترین عمر بهره‌وری باشند، سرعت اجرای آن‌ها سریع باشد تا تأخیر در بازگشایی ترافیک را به حداقل برساند، عمر خدمت‌دهی روسازی راه را افزایش، هزینه‌های دوره‌های نگهداری را کاهش و ایمنی راه را ارتقا دهند. از این‌رو در این مطالعه به بررسی عوامل تأثیرگذار بر عملکرد میکروسرفیسینگ پرداخته شده است.

واژه‌های کلیدی: نگهداری پیشگیرانه راه‌ها، آسفالت حفاظتی، میکروسرفیسینگ

۱- مقدمه

شبکه راه‌های کشور به‌عنوان بازوی شبکه حمل‌ونقل کشور از زیربناهای مؤثر و عمده در رشد و توسعه اقتصادی، فرهنگی و اجتماعی محسوب شده و به‌عنوان شریان‌های حیاتی و اقتصادی از جایگاه ویژه‌ای برخوردار هستند. بر اساس داده‌های ارائه شده توسط مجمع بین‌المللی حمل‌ونقل، ۸۳ درصد جابه‌جایی مسافر با استفاده از حمل‌ونقل جاده‌ای انجام می‌شود. لذا شرایط فیزیکی

زیرساخت‌ها و حراست و نگهداری کافی از آن‌ها برای حفظ و افزایش این منافع امری مهم و ضروری است. به‌عنوان مثال در کشوری مانند نیوزیلند، شبکه راه‌های ملی دارای ارزشی در حدود ۱۵ میلیارد یورو است که می‌توان آن را بزرگ‌ترین دارایی ملی عمومی آن کشور به‌حساب آورد (PIARC, 2014). سابقه راه (راه‌سازی و راهداری) در ایران به قریب یک قرن رسیده و در حال حاضر طول شبکه راه‌ها حدود ۲۲۰ هزار کیلومتر از انواع راه‌ها بوده که متشکل از ۲۲۳٤ کیلومتر آزادراه، ۱٤۱٤۹ کیلومتر بزرگراه، ٦۸۰۵۳ کیلومتر راه اصلی و فرعی و حدود ۱۳٤ هزار کیلومتر راه‌های روستایی است. این شبکه منسجم حداقل ۱۵۰۰۰۰ میلیارد تومان به نرخ روز ارزش دارد که سرمایه قابل‌توجهی محسوب می‌گردد. بر اساس برداشت‌های میدانی از حدود ۳٤٦٦۳ کیلومتر راه شریانی، ۲۳,۳۳ درصد از راه‌های شریانی کشور نیاز به بهسازی اساسی و روکش دارند و ۱۹,٦۸ درصد بایستی لکه‌گیری و روکش موضعی شود و ۱۳,۲۲ درصد نیاز به درزگیری و عملیات حفاظتی پیشگیرانه و در حدود ٤۳,۷۷ درصد از راه‌های شریانی کشور از نظر سازه‌ای و ساختاری سالم بوده و نیاز به عملیات نگهداری مستمر دارند (سازمان راهداری، ۱۳۹۳).

فرآیند زوال روسازی بلافاصله بعد از احداث و عبور ترافیک بر روی آن آغاز شده و عوامل گوناگون بسته به‌شدت و نوع اثر شروع به تخریب آن می‌نمایند. بارهای ناشی از ترافیک عبوری وسایل نقلیه به همراه عوامل زیست‌محیطی نظیر دما، تورم ناشی از یخبندان و رطوبت باعث از بین رفتن روسازی می‌شوند. بار چرخ ناشی از ترافیک عبوری در ارتباط با تنش و ترک‌های خستگی بوده و شیارشدگی را گسترش داده درحالی‌که عوامل زیست‌محیطی باعث ترک‌های حرارتی، بلوکی، هوازدگی و شن-زدگی می‌شوند (Uzarowski & Bashir, 2007). به عبارتی عملکرد یک روسازی فقط تابعی از روش طراحی نیست، بلکه موفقیت هر طرحی بستگی به مراحل ساخت، نگهداری و ترمیم‌های بعدی دارد. مطالعات نشان می‌دهند که روسازی‌ها معمولاً برای مدت ۲۰ سال طراحی می‌شوند، درحالی‌که در عمل دوره بهره‌برداری از روسازی‌ها به مدت ۱۰ الی ۲۰ سال محدود می‌شود و بعد از این دوره بدون ترمیم جدی قابلیت سرویس‌دهی ندارند. (Haas & Hudson, 1978). در سال ۱۹۷۰ گروهی از محققین مفهوم طراحی روسازی را یک گام توسعه دادند (Hudson, McCullough, Scrivner, & Brown, 1970). آن‌ها نشان دادند که نه‌تنها نگهداری یکی از قسمت‌های مهم و به‌عنوان داده‌های ورودی برای سیستم طراحی است، بلکه یک روسازی بدون توجه به مسئله نگهداری و ترمیم، نمی‌تواند به عمر خود ادامه دهد. به‌عنوان یک اصل می‌توان گفت که روسازی هرگز نمی‌تواند بیشتر از ۲۰ سال عمر داشته باشد مگر اینکه فعالیت‌های ترمیمی بر روی آن انجام شود (Haas & Hudson, 1978).

نیاز به نگهداری با افزایش سن زیرساخت راه و رشد سطوح ترافیک، افزایش می‌یابد چراکه زیرساخت شکننده‌تر شده، مقاومت آن کاهش یافته و سفرها نیز آن را در معرض خرابی بیشتری قرار می‌دهند. در صورتی که اقدامات ترمیمی صحیح در زمان مناسب روی این سطوح انجام نشود، خرابی‌ها گسترش یافته و لایه‌های زیرین روسازی نیز دچار آسیب می‌گردند. برای پیشگیری از تشدید خرابی سطح راه‌ها بایستی اقدامات اصولی و مقرون‌به‌صرفه، در ابتدای دوران شروع خرابی‌ها صورت گرفته تا ضمن حفاظت از روسازی موجود، سطح خدمت‌دهی راه نیز در یک حد مناسب تأمین شده و بهره‌برداری از آن به‌صورت ایمن صورت پذیرد (Robati, 2011; Uzarowski & Bashir, 2007). نگهداری راه کنترل کننده هزینه استهلاک و تعیین کننده اثرات شبکه بر کاربران راه و جامعه است. بدون شک، بدون نگهداری کافی و به‌موقع، ارزش بالای هر شبکه راه می‌تواند به‌سرعت از بین رفته و بزرگراه‌ها و راه‌های برون‌شهری به‌شدت دچار زوال و تخریب خواهند شد که این امر منجر به بیشتر شدن هزینه بهره‌برداری وسیله نقلیه، افزایش تعداد تصادفات، مختل شدن امور حمل‌ونقل و کاهش اعتماد به خدمات آن شده و همچنین نیاز به بهسازی و حتی بازسازی گسترده‌ای خواهد بود که اغلب هزینه‌ای بیشتر از تعمیر و نگهداری ساده‌ای که می‌توانست زودتر انجام شود، در بر خواهد داشت (PIARC, 2014). با توجه به محدودیت سرمایه و بودجه در کشور و نیز به‌منظور حفاظت از سرمایه‌های موجود، نگهداری رویه‌های آسفالتی امری ضروری و لازم است.

برای اجتناب از بروز چنین شرایطی بایستی با برنامه‌ریزی مناسب و تأمین منابع مالی و انسانی سعی در بهبود ارائه خدمات مطلوب به کاربران راه اقدام نمود. اهمیت نگهداری باید توسط

تصمیم‌گیرندگان تفهیم، به‌طور مناسبی تأمین مالی و به‌خوبی مدیریت شود تا از دستیابی به حداکثر ارزش اطمینان حاصل گردد. سطوح ناکافی سرمایه‌گذاری یا مدیریت ضعیف شبکه راه، پیامدهای خطیری برای اقتصاد و رفاه جامعه به همراه خواهد داشت (PIARC, 2014). مطالعه‌ای که توسط کوئیرز و همکارانش صورت گرفت، نشان داد که رابطه بین توسعه اقتصادی و رفاه کشور با کیفیت و کمیت زیرساخت‌های جاده آن وجود دارد (Bae & Stoffels, 2008; Benjamin Broughton & Lee, 2012).

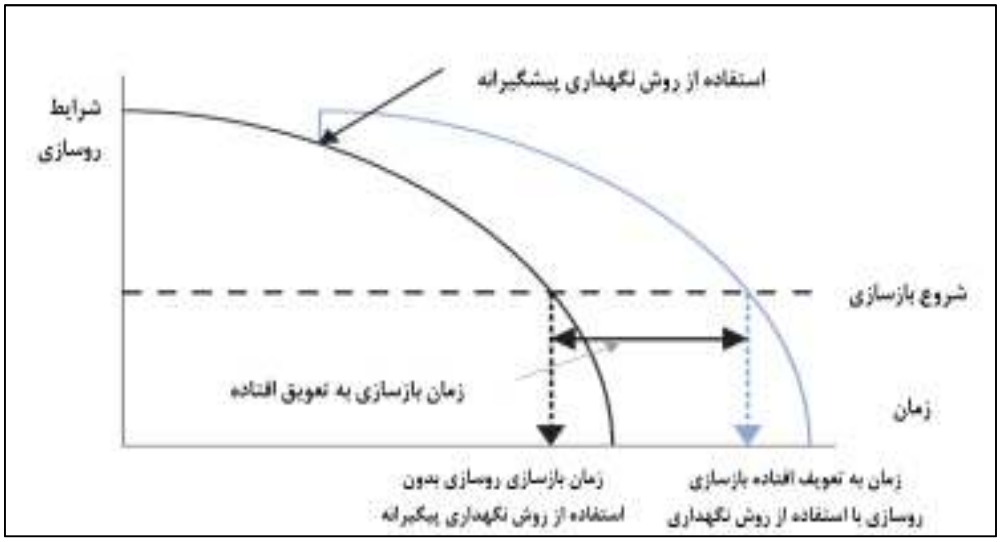
به‌منظور ایجاد و نگهداری زیرساخت‌های کشور، به‌ویژه در عصر حاضر که با محدودیت‌های شدید بودجه و حساسیت‌های زیست‌محیطی مواجه هستیم، بسیار مهم است که جاده‌های موجود تا زمانی که امکان دارد، به‌منظور بهره‌وری حداکثر از منابع، به‌طور مؤثر استفاده شوند (Benjamin Broughton & Lee, 2012). صرف‌نظر از اینکه آیا استراتژی مؤثر برای انتخاب بهترین عملیات در نظر گرفته شده است یا نه، اهمیت استفاده از عملیات نگهداری پیشگیرانه[1] به‌عنوان یک امر ضروری برای فراهم آوردن یک سیستم جاده‌ای مقرون‌به‌صرفه و مناسب مورد توافق قرار گرفته است (Benjamin Broughton & Lee, 2012; Labi & Sinha, 2005). نگهداری پیشگیرانه از جاده‌های موجود نشان داده است که از لحاظ مالی، مؤثرترین روش برای استفاده از منابع در دسترس و همچنین متداول‌ترین امر در حفظ عملکرد دراز مدت روسازی‌های آسفالتی است (Benjamin Broughton & Lee, 2012; Zhi, Wang, & Tsai, 2012). در ادامه به تعریف نگهداری پیشگیرانه پرداخته خواهد شد.

۲- نگهداری پیشگیرانه

اکثر روسازی‌های دارای ظرفیت باربری کافی بوده و از نظر سازه‌ای سالم می‌باشند اما دارای ویژگی‌های سطحی مطلوبی نیستند. مشخصات و ویژگی‌های مطلوب سطحی روسازی باعث حفظ یکپارچگی سازه‌ای و ساختاری روسازی شده و مقاومت در برابر سایش و ایمنی و راحتی در رانندگی را برای کاربران فراهم می‌سازد. روش‌های نگهداری پیشگیرانه به‌عنوان امری مؤثر، کم‌هزینه و با اثر دهی بالا از اوایل دهه ۹۰ و با هدف کاهش نرخ خرابی روسازی‌ها گسترش یافته و در طول دو دهه گذشته، به‌عنوان بهترین رویکرد مقرون‌به‌صرفه برای گسترش عمر بهره‌وری روسازی، حفظ و نگه‌داشتن ظرفیت ساختاری آن و ارائه خدمات با کیفیت در زمان مواجهه با محدودیت بودجه‌ای، معرفی شده است (Johannes, 2014; Wimsatt & Scullion, 2003). این نوع نگهداری در اوایل چرخه عمر روسازی انجام شده و یک برنامه‌ریزی راهبردی و مجموعه عملیات از پیش تعیین شده‌ای است که هدف آن ارتقای شاخص خدمت‌رسانی روسازی‌ها، متوقف کردن بدتر شدن خرابی‌های با شدت کم، به تعویق انداختن پیشرفت خرابی سطح راه و کاهش استفاده از تعمیر و نگهداری روزمره و اصلاحی است، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

(Ben Broughton, Lee, & Kim, 2012; Hunter, 2000). این عملیات تأثیر چندانی بر روی ظرفیت باربری و سازه‌ای روسازی‌ها نداشته و قبل از اینکه خرابی‌های روسازی به مرحله بحرانی برسند، اجرا شده و سطح روسازی را اصلاح می‌سازد (Ben Broughton et al., 2012; Johannes, 2014; Johanns & Craig, 2002). این روش‌ها باید بر روی روسازی‌هایی که از لحاظ سازه‌ای وضعیت مناسبی دارند به کار گرفته شود در غیر این صورت غیراقتصادی عمل نموده و دارای عملکرد مطلوبی نیست (Ali & Mohammadafzali, 2014; FHWA, 1999). بنابراین فلسفه انجام روش‌های نگهداری پیشگیرانه این‌طور تعریف می‌شود: اجرای روش مناسب بر روی روسازی‌های مناسب در زمان مناسب. تنها در این صورت است که فایده‌های روش‌های این نوع نگهداری قابل لمس است (FHWA, 1999). با به کار بردن روش‌های نگهداری پیشگیرانه مناسب در زمان مناسب، عمر خدمت‌دهی روسازی افزایش پیدا کرده و زمان بازسازی آن به تأخیر خواهد افتاد (J.-R. Chang, Chen, & Hung, 2005). به عبارتی هنگامی‌که نگهداری پیشگیرانه بر روی روسازی مناسب و در زمان صحیح اجرا شود، موجب صرفه‌جویی در هزینه تعمیرات و بازسازی به بیش از ۵۰ درصد خواهد شد. علاوه بر این به‌منظور پایین آوردن هزینه‌ها از بستن راه به مدت طولانی بر روی رفت‌وآمد وسایل نقلیه و ایجاد مسیرهای انحرافی جلوگیری خواهد شد. به‌طور خلاصه به اجرای

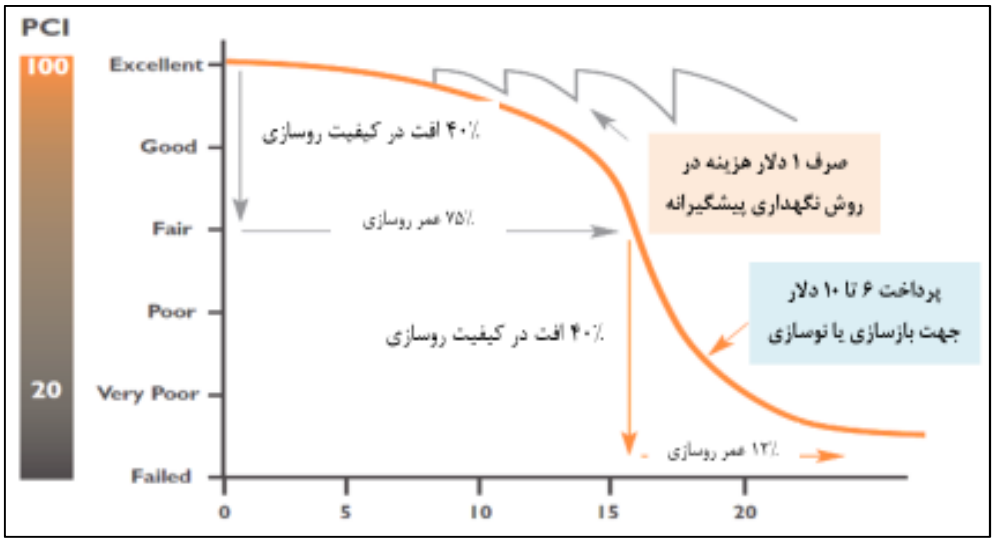
این عمل صرفاً نباید به‌صورت یک امر موقتی توجه شود بلکه باید آن را یک سرمایه‌گذاری بر روی روسازی دانست که موجب جلوگیری از صرف هزینه‌های هنگفت در امر بازسازی کامل آن به علت آسیب‌های شدید رخ داده می‌گردد (Asphalt Institute, 2007; Ali & Mohammadafzali, 2014; Zavitski et al., 2006). این موضوع در شکل ۱ نشان داده شده است. بدین منظور انجام روش‌های نگهداری پیشگیرانه حتماً باید در دو سطح پروژه و شبکه انجام شود. هدف اصلی در سطح شبکه تضمین این نکته است که روسازی‌های مناسب در زمان مناسب، روش نگهداری را دریافت کنند؛ اما هدف اصلی در سطح پروژه انتخاب روش مناسب برای روسازی‌هایی است که در سطح شبکه انتخاب شده‌اند (Hajek, Hein, & Chris, 2004).



شکل ۱ . **استفاده از نگهداری پیشگیرانه برای به تأخیر انداختن بازسازی روسازی** (Robati, 2011)

سیاست این روش بر این اصل استوار است که انجام مکرر روش‌های نگهداری کم‌هزینه و مقرون‌به‌صرفه، هزینه بسیار کمتری نسبت به انجام روش‌های پرهزینه اما دیربه‌دیر دارد (Hajek et al., 2004). بر اساس تحقیقات انجام شده اگر فقط دو درصد از کل هزینه‌های ساخت راه را به نگهداری پیشگیرانه اختصاص دهیم، باعث کاهش ٤٠ درصدی در هزینه‌های تعمیرات خواهد شد (Hunter, 2000). مطابق با برنامه تحقیقاتی NCHRP[۲]، به ازای هر دلاری که در نگهداری پیشگیرانه در زمان درست در چرخه عمر روسازی هزینه می‌شود، ۳-٤ دلار در هزینه‌های بازسازی و احیای روسازی در آینده، می‌تواند صرفه‌جویی گردد (Benjamin Broughton & Lee, 2012). در دیگر تحقیقات توسط گیلهوس و همکارانش مشخص شده است که به ازای هر دلاری که صرف تعمیر و نگهداری پیشگیرانه می‌شود، ٦ تا ۱۰ دلار در هزینه‌های بازسازی آینده صرفه‌جویی خواهد شد (Galehouse, Moulthrop, & Hicks, 2003). این موضوع در شکل ۲ نشان داده شده است. این شکل بیانگر این موضوع است که چگونه استفاده از روش مناسب بر روسازی مناسب در زمان مناسب می‌تواند باعث کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری روسازی شود. این شکل معرف جاده‌ای با عمر طراحی حدود ۲۰ سال است. نمودار (۱) نشان می‌دهد که شرایط روسازی در ۷۵٪ از عمر روسازی ٤٠٪ افت پیدا کرده است این در حالی است که ٤٠٪ افت دیگر در شرایط روسازی فقط در ۱۲ درصد باقی‌مانده عمر روسازی رخ می‌دهد. نکته جالب در اینجا این است که نرخ خرابی روسازی زمانی که مورد تعمیر قرار نمی‌گیرد با زمان افزایش چشمگیری پیدا می‌کند. بنابراین نگهداری و تعمیر روسازی باید قبل از شرایط نسبتاً خوب روسازی انجام گرفته تا به هزینه چرخه عمر کمتر منتهی شود. بنابراین با توجه به شکل دیده می‌شود که اگر تعمیر و نگهداری

دوره‌ای صورت پذیرد، عمر روسازی دو برابر نسبت به حالت عدم تعمیر و نگهداری مناسب افزایش پیدا خواهد کرد. در این شرایط هزینه تعمیر و نگهداری روسازی ۱ دلار در هر یارد مربع است. با این حال اگر تعمیر و نگهداری به تعویق بیافتد، بایستی روش بازسازی و نوسازی روسازی به کار گرفته شود که عموماً هزینه‌ای بالغ بر ٦ تا ۱۰ دلار در هر یارد مربع برای آن صرف می‌شود (Robati, 2011). به‌طور خلاصه به این امر صرفاً نباید به‌صورت یک امر موقتی نگاه کرد بلکه باید آن را یک سرمایه‌گذاری بر روی روسازی دانست که موجب جلوگیری از صرف هزینه‌های هنگفت در امر بازسازی کامل آن به علت آسیب‌های شدید رخ داده، می‌گردد (Asphalt Institute, 2007). با انجام عملیات نگهداری پیشگیرانه و به‌کارگیری روش‌های ترمیم سطح روسازی، ضمن حفظ شرایط عملکردی، کیفیت بهره‌برداری از راه بهبود یافته و با ارائه راه حل‌های کم‌هزینه، کیفیت بهره‌وری از روسازی نیز افزایش می‌یابد. در خصوص روسازی‌های که وضعیت موجود آن‌ها توان تحمل بارهای ترافیک طراحی شده را داشته ولی نیاز به اصلاح سطح رویه دارند، بهتر آن است که با آسفالت حفاظتی مورد بهسازی قرار گیرند زیرا استفاده از آسفالت‌های دیگر ضمن آن‌که موجب افزایش هزینه‌های اجرایی و طولانی شدن انجام پروژه‌ها می‌شود، باعث افزایش رقوم سطح راه نیز می‌گردد که خود مشکلات دیگری را به دنبال دارد (نظیر اختلاف ارتفاع با سطح شانه راه و کاهش ارتفاع حفاظ‌های ایمنی کناره راه‌ها و آزادراه‌ها) (پژوهشکده حمل و نقل، ۱۳۹۰).



شکل ۲ . **رابطه بین شرایط روسازی در زمان به کارگیری آسفالت حفاظتی و هزینه اجرای آن** (Galehouse et al., 2003)

۳- معرفی میکروسرفیسینگ و کاربرد آن

یکی از مهم‌ترین روش‌ها در نگهداری پیشگیرانه استفاده از انواع آسفالت‌های حفاظتی است. در میان روش‌های مختلف نگهداری پیشگیرانه، میکروسرفیسینگ در صورت استفاده درست به‌عنوان روشی که دارای مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی است، شناخته می‌شود (Benjamin Broughton & Lee, 2012; Takamura, Lok, Wittlinger, & Aktiengesellschaft, 2001).

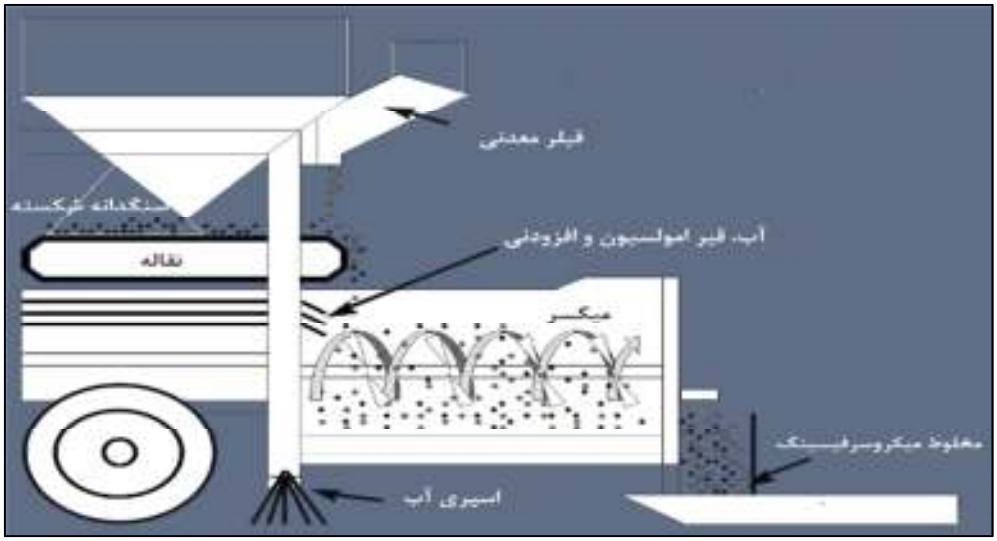
۳-۱- تعریف میکروسرفیسینگ

مخلوط میکروسرفیسینگ شامل مصالح صد در صد شکسته با دانه‌بندی مشخص، قیر امولسیون کاتیونی اصلاح‌شده با پلیمر، آب، فیلرهای معدنی و افزودنی‌های شیمیایی برای کنترل زمان شکست است (Asphalt Institute, 2009; Gransberg, 2010; Johannes, 2014). این نوع مخلوط‌ها از نوع مخلوط‌های سرد بوده که باید با ماشین‌آلات مخصوصی مخلوط و پخش شوند. در دستگاه اجرای این آسفالت، فیلر معدنی، مصالح سنگی، قیر امولسیون و آب در محفظه‌ای باهم مخلوط شده

و سپس وارد محفظه پخش می‌گردند. شکل ۳ نمایی از دستگاه ساخت و پخش مخلوط‌های میکروسرفیسینگ را نشان می‌دهد.

در این دستگاه مصالح در یک همزن مخلوط شده، سپس مخلوط حاصل با استفاده از جعبه پخش بر روی سطح راه پخش می‌شود. امولسیون‌های درون مخلوط با برخورد به سطح راه شکسته شده و فیلم‌هایی را در اطراف مصالح سنگی تشکیل می‌دهند. این فیلم‌ها باعث شده مخلوط میکروسرفیسینگ چسبندگی داخلی لازم را کسب نماید. سپس آب موجود در مخلوط تبخیر (مخلوط عمل‌آوری شده) و تبدیل به یک مخلوط سخت می‌شود که به سطح راه چسبیده است.

مزیت اصلی مخلوط میکروسرفیسینگ نسبت به دیگر آسفالت‌های حفاظتی روسازی این است که قیر امولسیون اصلاح‌شده با پلیمر موجب تسریع شیمیایی تبخیر رطوبت مخلوط شده و باعث می‌شود که گیرش مخلوط در اغلب موارد در کمتر از یک ساعت، تحت شرایط محیطی طبیعی و بدون نیاز به غلتک حاصل شود (Gransberg, 2010). با توجه به اینکه عمل شکست و گیرایی قیر امولسیون با استفاده از مواد شیمیایی صورت می‌گیرد، مرحله انتخاب مصالح و طرح اختلاط بسیار مهم است. در طرح اختلاط معمولاً مقدار قیر امولسیونی پلیمری و فیلر معدنی به‌صورت تابعی از مقدار مصالح سنگی تعیین می‌گردد. مقدار آب و افزودنی‌ها در محل، هنگام اجرا و در راستای کنترل زمان شکست قیر امولسیون و زمان بازگشایی راه برای عبور ترافیک، تنظیم می‌گردد. همچنین در صورتی که تغییر در دما و رطوبت هوا یا بافت سطحی روسازی به وجود آید، می‌توان مقادیر تنظیم شده از مواد فوق را در راستای بهبود کیفیت تغییر داد (اداره کل نگهداری راه‌ها، ۱۳۹۵).



شکل ۳ . طرحی از دستگاه پخش میکروسرفیسینگ (Gransberg, 2010)

۳-۲- هدف میکروسرفیسینگ

این نوع نگهداری یک راه‌حل بلند مدت برای افزایش عمر بهره‌وری روسازی بوده و مهم‌ترین دلیل استفاده از آن پر کردن شیارهای جای چرخ‌ها، رفع گود افتادگی‌ها و ناهمواری‌های عرضی و طولی، پر کردن درزها و ترک‌های کم‌عمق و سطحی، اصلاح عریان شدگی‌ها است، به‌شرط آن‌که روی سطوح پایدار اجرا شود. میکروسرفیسینگ به‌منظور از بین بردن اعوجاج‌های سطح جاده، می‌تواند در دو لایه اجرا شود. استفاده از این نوع آسفالت حفاظتی در شرایطی که نگرانی از معضلات ترافیکی وجود دارد، بسیار کارا است. همچنین این مخلوط را می‌توان در روسازی بتنی، عرشه پل‌ها، باند پروازی و در هنگام شب مورد استفاده قرار داد. اما این نوع آسفالت برای اهداف دیگری نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد که عمده آن‌ها شامل موارد زیر است

Ben Broughton et al., 2012; Gransberg, 2010;) (Johannes, 2014; Robati, Carter, & Perraton, 2015):

- ❖ اصلاح قیر زدگی
- ❖ رفع هوازدگی سطحی آسفالت و اصلاح شن‌زدگی
- ❖ آب‌بندی سطح در مقابل رطوبت و هوا
- ❖ تراز نمودن سطح راه
- ❖ پر کردن فضاهای خالی و چاله‌های کم‌عمق
- ❖ لکه‌گیری چاله‌های با ابعاد محدود
- ❖ افزایش اصطکاک و مقاومت در برابر لغزندگی

دوره‌ی خدمت قابل انتظار در صورت اجرای به‌موقع و مناسب از ۵ تا ۸ سال است (Ben Broughton et al., 2012; Chan, Lane, Kazmierowski, & Lee, 2011; Gransberg, 2010; Watson & Jared, 1998). این عمر به شرایط روسازی در زمان اجرای آسفالت میکروسرفیسینگ بستگی داشته و عواملی که عملکرد این نوع آسفالت حفاظتی را تحت تأثیر قرار می‌دهند عبارتند از: بارهای ترافیکی، شرایط محیطی، شرایط روسازی موجود، طرح اختلاط، کیفیت مصالح و ساخت و نحوه اجرا (Ben Broughton et al., 2012; Johannes, 2014).

هزینه‌های آسفالت حفاظتی ریزدانه به بسیاری از عوامل ازجمله شرایط محل، در دسترس بودن مصالح مرغوب و پیمانکاران باتجربه و نرخ اجرای کار در منطقه وابسته است امّا به‌طور کلی در متره هزینه تهیه و اجرای آسفالت حفاظتی موارد زیر باید برآورد گردد:

- ❖ اندازه‌گیری مقدار مصالح و قیر امولسیون اصلاح‌شده پلیمری
- ❖ اندازه‌گیری مقدار مخلوط
- ❖ اندازه‌گیری سطح پوششی

پرداخت بر اساس قیمت واحد مخلوط و اجزاء آن و یا بر اساس قیمت واحد هر مترمربع از کار صورت می‌گیرد. با آنکه مطالعات منسجم محدودی برای تعیین مقرون‌به‌صرفه بودن آسفالت‌های حفاظتی صورت گرفته است ولی بررسی تحقیقات انجام شده در آمریکا حاکی از آن است که در اکثر ایالت‌ها آسفالت‌های حفاظتی روشی مناسب و مقرون‌به‌صرفه برای پوشش و پر کردن شیار چرخ‌ها در راه‌های پرترافیک است (پژوهشکده حمل و نقل، ۱۳۹۰).

۳-۳- شرایط اجرای میکروسرفیسینگ

مشخصه‌های لازم جهت انتخاب یک محل مناسب برای استفاده از میکروسرفیسینگ در یک محور به شرح ذیل است (Johannes, 2014):

- ❖ داشتن اساس، سطح و شانه‌های خاکی مناسب و خوب زهکشی شده
- ❖ نداشتن خرابی‌های سازه‌ای مانند نشست، تورم
- ❖ نداشتن خرابی‌هایی مانند چاله و ترک‌خوردگی شدید

بنابراین این خرابی‌ها با وجود کاربرد میکروسرفیسینگ ادامه پیدا می‌کنند و در نتیجه میکروسرفیسینگ را نمی‌توان برای ترمیم هر نوع خرابی و ترک بکار برد. بنابراین چنانچه سطح راه دارای ترک‌هایی با شدت زیاد باشد، این روش قابل استفاده نیست. به لحاظ شرایط ترافیکی، مخلوط‌های میکروسرفیسینگ محدودیتی ندارند. روسازی‌هایی آسفالتی که به‌مرور زمان اکسیده و فرسوده شده‌اند، ولی نواقص اساسی و سازه‌ای ندارند، می‌توان با آسفالت حفاظتی و با صرف هزینه کمتری بهسازی کرد. بهترین زمان استفاده از این نوع مخلوط، موقعی است که شیارشدگی غیرپلاستیک از ۰,۶۲۵ اینچ تجاوز نکرده باشد و یا اصطکاک سطح جاده از حد قابل قبول کمتر نشده باشد. خرابی‌های قابل رؤیت در این حالت عبارتند از ترک‌خوردگی کم، شیارشدگی غیر پلاستیک، سطح صیقلی شده، دانه‌دانه شدن متوسط و هوازدگی متوسط تا شدید، وصله‌کاری در حد کم است ولی ترک‌ها باید قبل از انجام عملیات ترمیم و پر شوند (اداره کل نگهداری راه ها، ۱۳۹۵). به‌منظور ارتقای کیفیت محصول نهایی، باید مطمئن شد که سطح روسازی کاملاً تمیز بوده و تمامی اقدامات تعمیر و مرمت ضروری مانند تمیز کردن و پر کردن و آب‌بندی ترک‌های نازک، پر کردن ترک‌های عریض و پهن و تمیز کردن و زدودن روسازی از خاک‌ها و آلاینده‌های سست، قبل از اجرای مخلوط انجام شده باشد. همچنین در مورد روسازی‌های آسفالتی بتنی که به‌شدت هوازده شده و یا سطح آن‌ها بسیار خشک شده است، یک‌لایه‌ی تک کت باید قبل از اجرا، استفاده شود. در هوای گرم از آب برای خیس کردن سطح، قبل از میکروسرفیسینگ استفاده می‌شود تا از شکستن پیش از موعد امولسیون جلوگیری شده و باعث چسبندگی بهتر لایه‌ی جدید و روسازی قدیمی شود. پس

از اجرا ترافیک را باید تـا قبـل از گیرایـی کامل از مسیر انحرافی عبور داد (Benjamin Broughton & Lee, 2012; Gransberg, 2010). از منظر شرایط اقلیمی و دمایی عواملی از قبیل دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد و میزان بارش از جمله فاکتورهایی هستند که بر اجرا یا عدم اجرای میکروسرفیسینگ تأثیرگذار می‌باشند. شرایط آب و هوایی مطلوب برای اجرای لایه میکروسرفیسینگ عبارتند از: رطوبت کم، باد با سرعت بسیار کم و دمای بالا در روزهای آینده. از لحاظ شرایط آب و هوایی می‌توان با رعایت دماهای مشخص، برای مناطق سردسیر و یا در شب از میکروسرفیسینگ استفاده نمود. البته پیشنهاد می‌گردد اجرای میکروسرفیسینگ در شب انجام نگیرد و این به دلیل سرعت پایین تبخیر در شب و طولانی شدن مدت زمان شکستن و عمل آمدن امولسیون است. اگر دمای روسازی یا هوا در زیر ۱۰ درجه سانتی‌گراد قرار داشته و رو به کاهش باشد، نباید آسفالت میکروسرفیسینگ را پخش نمود تجربه نشان داده است که اغلـب پـروژه‌هـایی که در هوای سرد و یا مرطوب اجرا شده‌اند موفق نبوده‌اند اما زمانی که هم دمای روسازی و هم دمای هوا بیشتر از ۷ سانتی‌گراد بوده و رو به افزایش باشد، می‌توان اقدام به پخش آن نمود. تجربه نشان داده است که اغلـب پـروژه‌هـایی که در هوای سرد و یا مرطوب اجرا شده‌اند موفق نبوده‌اند. اگر آسفالت حفاظتی ریزدانه در هوای سرد اجرا شـود، ممکـن است دچار ترک‌خوردگی و تخریب شود. همچنین زمانی که تا ۲٤ ساعت آینده احتمال بارندگی یا یخ‌زدگی وجود دارد، نباید آسفالت میکروسرفیسینگ را پخش نمود. در ضمن زمانی که به دلیل شرایط جوی، بازگشایی ترافیک، بیش از زمان مورد نظر طولانی شود، نباید اقدام به پخش مخلوط نمود. برای تمامی مخلوط‌های میکروسرفیسینگ وجود رطوبت بالا در محیط یک عامل منفی و مخرب محسوب می‌شود. علت آن به تأخیر انداختن شکست قیر امولسیون است. ریختن مخلوط میکروسرفیسینگ تنها زمانی مجاز است که رطوبت هوا ٦۰ درصد و یا کمتر باشد. چنانچه دمای محیط بالا باشد فرآیند شکست قیر امولسیون سریع‌تر می‌شود. در این صورت می‌توان با روش‌هایی مانند: پایین آوردن دمای سطح رویه راه قبل از ریختن میکروسرفیسینگ از طریق اسپری نمودن آب و افزودن آب بیشتر به مخلوط میکروسرفیسینگ موجود در جعبه پخش استفاده کرد. استفاده از راهکارهای فوق در دمای بالای ٤۰ درجه سانتی‌گراد پیشنهاد می‌شود (Benjamin Broughton & Lee, 2012; Gransberg, 2010). در ادامه به بیان جزئیات بیشتری از این نوع آسفالت حفاظتی پرداخته خواهد شد.

۳-٤- روش‌های طراحی مخلوط

دستورالعمل‌های طراحی گوناگونی در دنیا به‌منظور طراحی میکروسرفیسینگ در گذشته بسط و گسترش یافته‌اند. ISSA[۳]، TTI[٤]، ASTM[٥] و کالترانس[٦] (اداره حمل‌ونقل کالیفرنیا) از مواردی هستند که دستورالعمل‌ها مخصوص به خود را داشته‌اند.

ASTM D6372، یکی از استانداردهایی است که به‌طور گسترده در این زمینه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در فرآیند طراحی مخلوط انتخاب نوع دانه‌بندی دقیقاً مشابه ISSA است. انستیتو حمل‌ونقل تگزاس فرآیند جدیدی را به‌منظور طراحی این نوع از مخلوط در اوایل ۱۹۹٤ ارائه داد. برای مثال دانه‌بندی پیشنهادی به‌وسیله TTI کامل متفاوت از دانه‌بندی ارائه شده به‌وسیله ASTM و ISSA است. دانه‌بندی سنگدانه‌ها در این روش از الک ۳/۸ تا الک نمره ۱٦ در مقایسه با دو روش دیگر ریزتر است. کالترانس یک روش طراحی یگانه را برای طراحی میکروسرفیسینگ و اسلاری‌سیل ارائه داده و فرآیندی مشابه برای هر دو مخلوط در نظر گرفته است. در این فرآیند بایستی کلیه ترکیبات مخلوط مورد آزمایش قرار گیرد. دانه‌بندی، قیر امولسیون و مشخصات شیمیایی مخلوط بایستی با مشخصات ISSA مربوط به اسلاری‌سیل و میکروسرفیسینگ مطابقت داشته باشد. کشورهایی همچون آلمان، انگلستان، فرانسه و آفریقای جنوبی تجربیاتی در این زمینه داشته و دستورالعمل‌هایی در این خصوص تدوین نموده‌اند. در میان روش‌های مذکور ISSA و ASTM به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند (Robati, Carter, & Perraton, 2013).

۴- فاکتورهای تأثیرگذار بر عملکرد میکروسرفیسینگ

عملکرد میکروسرفیسینگ تحت تأثیر عوامل زیادی است. عوامل اصلی تأثیرگذار بر عملکرد میکروسرفیسینگ به شرح زیر است (Johannes, 2014).

٤-١- انتخاب پروژه

میکروسرفیسینگ برای پوشش یا تقویت ضعف ساختاری در نظر گرفته نشده است. به‌طوری که نمی‌تواند مانع توقف ترک انعکاسی شده و در نهایت این نوع ترک‌ها به سطح میکروسرفیسینگ نیز خواهند رسید. همچنین دارای عملکرد خوبی بر روی روسازی با افت‌وخیزهای زیاد نیست (Gransberg, 2010). بنابراین انتخاب درست محل پروژه به‌طوری که از لحاظ سازه‌ای در وضعیت مطلوبی باشد، برای این نوع آسفالت‌های حفاظتی بسیار مهم است.

٤-٢- تجربه خدمه ساخت‌وساز

تجربه خدمه ساخت‌وساز در ارائه محصول نهایی مطلوب بسیار مهم است. به‌طوری که محصول نهایی به‌خوبی تجربه کارکنان مخلوط میکروسرفیسینگ خواهد بود. بنابراین آموزش کارکنان و خدمه در ارتباط با کار با این نوع آسفالت حفاظتی و اجرای آن بسیار مهم است.

٤-٣- کیفیت طراحی مخلوط و سازگاری مواد

روش و کیفیت طراحی مخلوط برای تعیین دقیق اجزای اختلاط نیازمند دقت کافی و برآورده کردن تمامی الزامات مندرج در آیین‌نامه برای دستیابی به عملکرد مطلوب این آسفالت حفاظتی است. سازگاری مصالح سنگی و قیر بر روی نرخ شکستن و عمل‌آوری مخلوط، پیوستگی امولسیون و سنگدانه، دوام و مشخصات سایشی مخلوط تأثیرگذار است. از این‌رو انجام دقیق و درست آزمایش‌های طرح اختلاط برای تأیید سنگدانه‌ها و امولسیون‌های مخلوط و شکستن آن‌ها در نرخ مناسب، مهم است.

٤-٤- شرایط آب و هوایی در زمان ساخت‌وساز

درجه حرارت در زمان ساخت‌وساز و بلافاصله پس از آن نباید به کمتر از ۱۰ درجه سانتی‌گراد برسد (Aema et al., 2008). درجه حرارت بر روی سرعت عمل‌آوری تأثیرگذار است به‌طوری که پائین بودن دما باعث عمل‌آوری نامناسب مخلوط، شکست و خرابی زود هنگام اندود می‌شود. رطوبت نیز بر عملکرد اولیه مخلوط مؤثر است به‌طوری که اگر رطوبت بیش از حد بالا باشد، بر روی نرخ تبخیر رطوبت از مخلوط تأثیر گذاشته و در نتیجه زمان عمل‌آوری افزایش می‌یابد.

٤-٥- زمان عبور و مرور

میکروسرفیسینگ به‌طور کلی ٦٠ دقیقه بعد از ساخت‌وساز در دمای بالای ۱۰ درجه سانتی‌گراد با مراقبت و نگهداری، قابلیت عبور و مرور پیدا می‌کنند (California Department of Transportation, 2004). چنانچه مخلوط قبل از اینکه عمل‌آوری شود، مورد رفت‌وآمد وسایل نقلیه قرار بگیرد، اندود دچار خرابی زودهنگام خواهد شد.

۵- خرابی‌های رایج میکروسرفیسینگ و علل عملکرد نامطلوب آن

خرابی‌های رایج میکروسرفیسینگ را می‌توان در سه گروه زیر طبقه‌بندی نمود (Johannes, 2014). هر کدام از موارد بالا به‌طور خلاصه در بخش‌های بعد مورد بحث قرار خواهد گرفت

- ❖ خرابی‌های مرتبط با ساخت‌وساز
- ❖ خرابی‌های کوتاه مدت
- ❖ خرابی‌های بلند مدت

٥-١- خرابی مرتبط با ساخت‌وساز

این خرابی در طی مرحله ساخت‌وساز قبل از این‌که سطح بر روی ترافیک باز شود، رخ می‌دهد. از جمله علت‌های این خرابی، طرح اختلاط ناصحیح و نامناسب، شیوه‌های ساخت‌وساز ضعیف و یا تغییر غیرمنتظره در شرایط آب و هوایی است.

۵-۱-۱- پایداری ناکافی مخلوط و غلظت و چسبندگی ضعیف برای پخش

زمان اختلاط ناکافی زمانی اتفاق می‌افتد که امولسیون در طی مخلوط شدن اجزا به صورت زودهنگام می‌شکند به‌طوری که پوشش رضایت‌بخش دور سنگدانه و همچنین چسبندگی و غلظت مناسب مخلوط برای قرار دادن و جایگذاری حاصل نمی‌شود (M.-S. Chang, 1979).

علت مکانیسم شکست نابهنگام شامل عوامل متعددی است. فاکتورهای تأثیرگذار در این مورد عبارتند از مشخصات امولسیون، مشخصات سنگدانه، مقدار آب اضافه شده به مخلوط، مقدار فیلر اضافه شده و درجه حرارت مخلوط در زمان اختلاط (Ackerson, 1957; C. R. Benedict, 1977). زمانی که آزمایش تعیین مخلوط سیمانی قیر امولسیونی مطابق با ASTM D977 انجام می‌گیرد، امولسیون با شاخص شکستن بالا مورد شناسایی قرار گرفته و به‌عنوان مشکل شکست زودهنگام در این زمینه گزارش می‌شود (Ackerson, 1957). آزمایش تعیین مخلوط سیمانی قیر امولسیونی نشان‌دهنده توانایی قیر امولسیونی کندشکن برای اختلاط با ذرات ریز با سطح مخصوص بالا بدون شکست قیر امولسیونی است. به همین علت دو استاندارد قیرهای امولسیونی آنیونیک (ASTM D977) و قیرهای امولسیونی کاتیونیک (ASTM D2397) نرخ شکستن امولسیون را با در نظر گرفتن حداکثر ۲٪ امولسیون به‌وسیله آزمایش مخلوط سیمانی، محدود نمودند. سنگدانه با خاصیت جذب بالا و دارای مقدار قابل‌توجه و بالای مواد ریز و پرکننده یا رس، به‌عنوان علت مشکل شکست زودهنگام معرفی شده است (Ackerson, 1957). زمان اختلاط ناکافی ممکن است به علت درجه حرارت و دمای بالای آب‌وهوا در طی اختلاط مواد تشکیل‌دهنده میکروسرفیسینگ رخ دهد. نرخ شکستن قیر امولسیونی به دما و درجه حرارت آب‌وهوا بستگی دارد (James, 2006). دمای بالا باعث افزایش نرخ شکستن امولسیون شده و این مورد عامل کارایی ناکافی مخلوط است. پیشنهاد می‌شود که برای اطمینان از یک شکست مناسب، دمای سطح بین ۱۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد باشد (Gransberg, 2010). از دیگر عوامل اصلی تأثیرگذار گزارش شده در زمان اختلاط، مقدار آبی است که قبل از اختلاط با درصد معین به مخلوط افزوده می‌شود (Ackerson, 1957; Hassan, 1994). آبی که در حین اختلاط عموماً به اسلاری‌سیل و میکروسرفیسینگ افزوده می‌شود برای دستیابی به یک سطح مطلوب از کارایی، غلظت، استحکام و ثبات مخلوط همگن است. اگر مقدار آب اضافه شده کافی نباشد، ممکن است شکست زودهنگام به وقوع بپیوندد. با این حال، باید توجه داشت که مقدار بیش از حد آب پیش از اختلاط باعث جدایی مواد از یکدیگر می‌شود که به‌نوبه خود منجر به خرابی نابهنگام آسفالت حفاظتی در مدت زمان کوتاهی در طی سرویس‌دهی می‌شود.

۵-۱-۲- جدایی مواد از یکدیگر

جدایی مواد از یکدیگر زمانی رخ می‌دهد که جدایی فاز فیزیکی بین اجزای مختلف مخلوط به دلیل تفاوت در غلظتشان بوجود آید (Barnes, 2000). امولسیون و ذرات ریز بر روی سطح شناور شده در حالی که ذرات درشت‌دانه در زیر ته‌نشین می‌شوند. قیر امولسیونی که به‌صورت خمیر در بالای سطح می‌بندد، یک سطح نرم و صاف در جاده‌ها ایجاد کرده که ممکن است در طی دماهای بالا به‌صورت لزج و چسبناک در آمده و باعث کاهش اصطکاک سطحی شود.

عمر آسفالت حفاظتی در نتیجه‌ی این جدایی مواد از یکدیگر می‌تواند به‌طور قابل توجهی به خطر بیافتد. قیری که به بالای سطح می‌آید معمولاً به علت سایش ترافیکی به‌تدریج مورد سایش قرار گرفته و می‌شود و یک سطح و مخلوط سخت و خشن به همراه قیر ناکافی برای چسباندن سنگدانه‌ها به یکدیگر زیر ترافیک جاده‌ای باقی گذاشته می‌شود (Lee, 1977). در نتیجه مخلوط پس از آن به‌سرعت به با از دست دادن سنگدانه‌ها، متلاشی شده و از هم می‌پاشد و ممکن است چسبندگی خود را با لایه زیرین از دست بدهد (SANRAL, 2007). عامل اصلی کمک به جداسازی مواد از یکدیگر، مقدار زیاد آب پیش از اختلاط است. لازم به ذکر است که استفاده بیش از حد افزودنی نیز به‌عنوان عامل جدایی مواد از یکدیگر در مخلوط گزارش شده است. برای جلوگیری از این رخداد استاندارد ISSA TB A105 توصیه می‌کند که آزمون اسلامپ[۸] انجام شود. نتیجه توصیه شده برای آزمایش اسلامپ بایستی بین ۱ تا ۲ سانتی‌متر باشد (SANRAL, 2007).

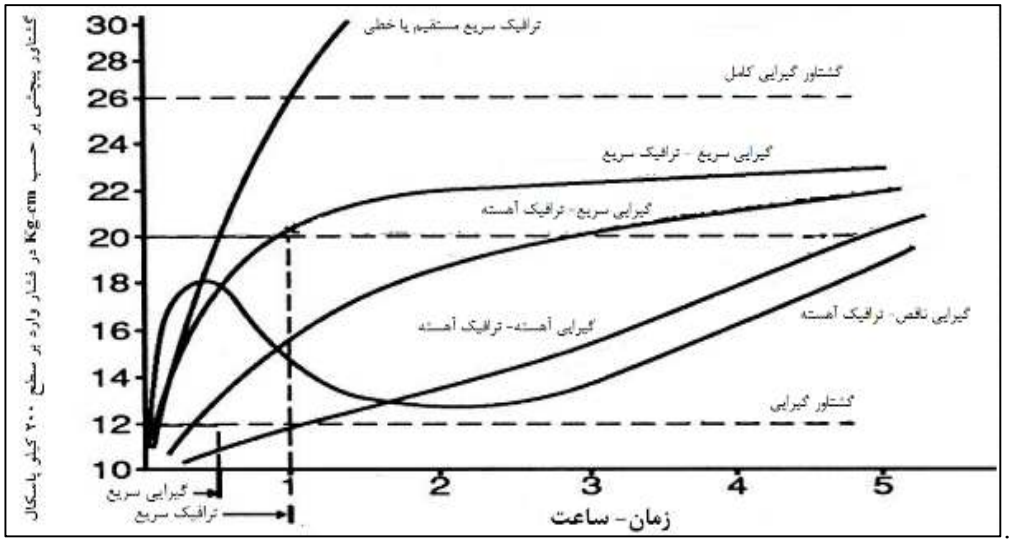
۵-۲- خرابی‌های کوتاه مدت

این نوع خرابی‌های بلافاصله پس از ساختن میکروسرفیسینگ به وقوع می‌پیوندد. معرفی این موارد در بخش‌های بعدی این فصل آمده است.

۵-۲-۱- شن‌زدگی زودهنگام

یکی از نگرانی‌های جدی در آسفالت‌های حفاظتی ساخته شده عموماً در ارتباط با زمان عمل‌آوری قیر امولسیونی قبل از بازگشایی بر روی ترافیک است. اگر آسفالت حفاظتی قبل از موعد مقرر یا به‌صورت نابهنگام قبل از عمل‌آوری کافی، بر روی ترافیک باز شود، نتیجه‌ی آن شن‌زدگی زودهنگام است (R. Benedict, 1985). شن‌زدگی یک اصطلاح مورد استفاده برای توصیف از دست رفتن پوشش سنگدانه از میکروسرفیسینگ است و هنگامی‌که به وقوع می‌پیوندد، ممکن است به‌وسیله قیرزدگی به از دست دادن مقاومت در برابر لغزندگی منجر شده و همچنین توانایی ایجاد مسیری برای نفوذ رطوبت و اکسیژن را به داخل لایه‌های زیرین فراهم می‌کند. فاکتورهای منجر به خرابی شن‌زدگی زودهنگام می‌شوند عبارتند از: بازگشایی قبل از موعد مقرر جاده بر روی ترافیک، مقدار قیر کم در مخلوط، ناسازگاری بین سنگدانه و قیر، مشخصات نامرغوب امولسیون، بارش باران قبل از اینکه سطح به‌اندازه کافی عمل بیاید، مقدار کم و ناکافی ریزدانه در مخلوط، عدم اتصال سنگدانه با کیفیت پایین، عمل سایش لاستیک، دما، رطوبت و شیوه‌های ساخت‌وساز ضعیف (R. Benedict, 1985). برای جلوگیری از شن‌زدگی زودهنگام، میکروسرفیسینگ نیازمند استحکام، دوام و بالأخص چسبندگی قوی در مخلوط بوده تا قادر به مقاومت در برابر تنش ترافیکی باشد. شکل ٤ نشان‌دهنده یک نمودار طبقه‌بندی شده، برای شناختن مخلوط‌هایی که آماده بازگشایی بر روی ترافیک با حداقل پتانسیل شن‌زدگی زودهنگام هستند، است.

دما، رطوبت، سرعت بالای باد، مقدار سیمان، زمان شکستن و عمل‌آوری، نوع امولسیون و افزودنی‌ها به‌عنوان عواملی که تأثیر مستقیم بر روی مقاومت شن‌زدگی دارند، گزارش شده است و با توجه به پروژه مدنظر، تمامی این عوامل تأثیرگذار، بایستی کنترل شده و مورد توجه قرار گیرند (Aema et al., 2008; ISSA, 2010). در دستورالعمل‌های ISSA و ASTM استفاده از آزمایش چسبندگی اصلاح شده، برای تعیین زمانی که سطح قابلیت عبور و مرور پیدا می‌کند، مشخص شده است. مخلوط‌هایی که نشان‌دهنده مقدار گشتاور ۲۰ کیلوگرم-سانتی‌متر در فشار وارد بر سطح ۲۰۰ کیلوپاسکال باشند، این‌گونه تلقی می‌شود که برای عبور و مرور آماده بوده و از این‌رو دچار شن‌زدگی زودهنگام نمی‌شوند.



شکل ٤ . **طبقه‌بندی نمودار چسبندگی- زمان حاصل از آزمایش چسبندگی مخلوط میکروسرفیسینگ** (Johannes, 2014)

۵-۲-۲- قیرزدگی

قیر زدگی زمانی اتفاق می‌افتد که بخشی از قیر موجود آسفالت حفاظتی اجرا شده، به سمت سطح روسازی حرکت کرده و در نهایت به‌صورت لایه‌ای نازک قیری در سطح روسازی نمایان می‌شود. بروز این خرابی پتانسیل لغزش وسایل نقلیه را در شرایط آب و هوایی مرطوب فراهم آورده و باعث کاهش ایمنی راه‌ها می‌گردد. قیرزدگی که در اوایل عمر آسفالت حفاظتی اتفاق می‌افتد می‌تواند منجر به خسارت قابل‌توجهی در روسازی شود. قیری که به بالای سطح روسازی می‌رسد، در دماهای بالا نرم شده که این امر موجب می‌شود، به‌آسانی به چرخ‌های روی روسازی چسبیده شده و آثار قابل‌توجهی از مسیر چرخ‌ها بر روی آسفالت نمایان می‌شود. عوامل اصلی که منجر به قیرزدگی در اوایل عمر آسفالت حفاظتی می‌شود شامل استفاده از قیر زیاد، انتخاب اشتباه نوع قیر، شرایط محیطی از قبیل دما و رطوبت، تأثیرات ترافیکی مانند ترافیک سنگین و ضعف در ساخت‌وساز است (King et al., 2010). مخلوط با مقدار آب پیش از اختلاط زیاد ممکن است همانند قیر، در بالای سطح روسازی به حالت کرم بسته شده و در نهایت در دمای بالا به‌صورت نرم و لزج درآمده و آثاری از مسیر چرخ بر روی روکاری باقی می‌ماند.

برای جلوگیری از قیرزدگی و نرم‌شدگی قیر در تابستان، میکروسرفیسینگ عموماً از قیر امولسیونی بر پایه قیر سفت ساخته می‌شود. در بعضی موارد در قیر امولسیونی از پلیمر اصلاح‌شده برای جلوگیری از قیرزدگی استفاده می‌شود به دلیل اینکه سفتی بالای پسماندشان، از نرم شدن زیاد آن‌ها در درجه حرارت بالا جلوگیری می‌کند (International Astm, 2018). در هر دو دستورالعمل ISSA و ASTM برای میکروسرفیسینگ استفاده از آزمایش چسبندگی ماسه به‌وسیله بارگذاری چرخ برای تعیین حداکثر مقدار مجاز قیر در مخلوط به‌منظور جلوگیری از قیرزدگی مشخص شده است.

۵-۲-۳- شیارشدگی

شیارشدگی یک تغییر شکل در مسیر چرخ بوده که در نتیجه عدم دقت در انتخاب جنس و دانه‌بندی مصالح روسازی آسفالتی و تخریب سایشی سنگدانه‌ها، تغییر شکل پلاستیک مخلوط میکروسرفیسینگ در آب‌وهوای گرم یا ناشی از فشردگی نامناسب در حین عمل ساخت و سازی ایجاد می‌شود (Huang, 2004). شیارشدگی‌های قابل‌توجه عمدتاً منجر به خرابی‌های ساختاری مهم و پدیده هیدروپلانینگ[۹] می‌شوند. شیارشدگی‌های زودهنگام به علت طراحی نامناسب مخلوط، استفاده از مقدار قیر امولسیونی زیاد، استفاده از قیر نرم (با درجه نفوذ بالا) در ساخت امولسیون یا ریختن و قرار دادن مخلوط بر روی سطح دارای شیارشدگی فعال پدیدار می‌شوند. در استاندارد ISSA به شماره TB A143 استفاده از آزمایش بارگذاری چرخ برای ارزیابی مقاومت مخلوط در برابر شیارشدگی مشخص شده است. در این آزمایش مخلوط با جابه‌جایی جانبی و عمودی به ترتیب بیشتر از ۵٪ و ۱۰٪ مستعد ابتلا به شیارشدگی تلقی می‌شود.

۵-۲-٤- ترک خوردگی (ترک خوردگی انعکاسی و حرارتی)

به‌طور کلی ترک‌های دمایی در مخلوط‌های آسفالتی به علت افت سریع در درجه حرارت و یا به علت سیکل‌های تکراری درجه حرارت به وقوع می‌پیوندد. در هر حالت، حرکت مهار شده‌ی سیستم میکروسرفیسینگ منجر به تجمع تنش در نتیجه کاهش دما می‌شود. اگر تنش‌های تجمعی بیش از مقاومت مواد باشند و یا اگر تنش‌ها به‌صورت مکرر رخ دهند، ترک‌خوردگی اتفاق خواهد افتاد. این ترک‌ها به‌صورت، ترک‌های عرضی نسبتاً مستقیم با فواصل منظم مشخص می‌شوند. هنگامی‌که چنین ترکی در روسازی به وقوع می‌پیوندد، آب می‌تواند در سیستم نفوذ پیدا کرده و به نرخ اضمحلال سرعت می‌بخشد (Huang, 2004). نوع دیگری از ترک‌خوردگی که ممکن است در سیستم میکروسرفیسینگ رخ دهد، ترک انعکاسی است و زمانی به وقوع می‌پیوندد که این سیستم بر روی سطح ترک‌خورده و یا بر روی روسازی درزدار اعمال شود. در این حالت ترک‌های سطح موجود به‌مرور زمان به سمت بالا گسترش پیدا کرده و در یک دوره نسبتاً کوتاه بر روی سطح جدید نمایان می‌شوند. با پیر شدن سیستم میکروسرفیسینگ این فرآیند تسریع می‌شود به این دلیل که آسفالت پیر شده، سفت و شکننده می‌شود. بنابراین توصیه می‌شود که مخلوط‌های میکروسرفیسینگ بر روی روسازی با ترک‌های ساختاری فعال قرار داده نشوند چراکه منجر به انعکاس سریع ترک بر روی سطح جدید می‌شود (Aema et al., 2008).

۵-۳- خرابی‌های بلند مدت

این خرابی‌ها عمدتاً در طول عمر خدمت‌دهی میکروسرفیسینگ و معمولاً بعد از ٦ ماه به وقوع می‌پیوندد (California Department of Transportation, 2004). برخی از خرابی‌های رایج در بخش‌های بعدی این پژوهش توضیح داده می‌شود.

۵-۳-۱- شن‌زدگی دیر هنگام

این خرابی مشابه با شن‌زدگی زودهنگام بوده که پیش‌تر در مورد آن بحث شد، با این تفاوت که در شرایط بلند مدت رخ می‌دهد. این خرابی مشابه با شن‌زدگی زودهنگام بوده که پیش‌تر در مورد آن بحث شد، با این تفاوت که در شرایط بلند مدت رخ می‌دهد. از عوامل وقوع آن می‌توان به مقدار قیر ناکافی، فقدان مصالح ریزدانه در مخلوط، سایش توسط ترافیک و همچنین به‌وسیله پیرشدگی و اکسیداسیون قیر، اشاره نمود (California Department of Transportation, 2004). طرح اختلاط درست و مناسب مخلوط و انتخاب دقیق اجزای سازنده آن به‌طوری که بتوان اطمینان حاصل کرد که مواد سازگار هستند، به‌عنوان عامل کاهش‌دهنده شن‌زدگی دیرهنگام گزارش شده است (Coyne & Ripple, 1975). آزمایش سایش در شرایط مرطوب که در ISSA TB100 مشخص شده است به‌منظور ارزیابی مقاومت در برابر شن‌زدگی دیرهنگام میکروسرفیسینگ استفاده می‌شود. در این آزمایش گسیختگی و چرخش ترافیک بر روی سطح شبیه‌سازی شده و همچنین مقدار از دست رفتن سنگدانه نمونه‌های ساخته شده بعد از سایش با لوله لاستیکی مشخص می‌شود.

۵-۳-۲- عریان‌شدگی

عریان شدن، شکست پیوند چسبندگی بین سطح مصالح سنگی و قیر بوده و عامل اصلی آن آب و رطوبت است. مکانیسم عمل به این ترتیب است که آب بین لایه نازک قیر و سطح مصالح سنگی نفوذ کرده و از آنجایی که سطح مصالح سنگی جاذبه بیشتری نسبت به آب دارند تا به قیر، پیوند چسبندگی شکسته می‌شود. معمولاً عریان شدن از زیر لایه آسفالتی شروع شده و به سمت بالا حرکت می‌کند و در نتیجه‌ی آن ساختمان روسازی ضعیف می‌شود زیرا با جریان ترافیک این ترک‌ها، ظاهر می‌شوند و در مراحل پیشرفته، روسازی شروع به خرد شدن می‌کند (Moraes, Velasquez, & Bahia, 2011). همان عواملی که منجر به شن‌زدگی شده، می‌تواند منجر به عریان‌شدگی نیز شود. بسیاری از تحقیقات گزارش کرده‌اند که عریان‌شدگی در میکروسرفیسینگ به‌طور گسترده مرتبط با سازگاری قیر و مصالح سنگی و همچنین مرتبط با اندازه ضخامت غشاء قیر پوششی سنگدانه است (Johannes, 2014). در شکل ۵ اثر نوع سنگدانه و قیر امولسیون بر توانایی مخلوط میکروسرفیسینگ به مقاومت در برابر خرابی رطوبتی مرتبط با شن‌زدگی نشان داده شده است. در شکل ٦ ۵-۳-٤- شکل ٦یک تصویر از تبادل یونی که بین قیر امولسیونی آنیونیک و سنگ آهک اتفاق افتاده، نشان داده شده است. همانطور که قابل ملاحظه است، ترکیب یونی که بر روی سطح سنگدانه باقی‌مانده، یک پیوند با آسفالت امولسیونی باقیمانده تشکیل داده است. زمانی که از سنگدانه‌های مختلف با یک قیر امولسیون مشابه یا برعکس استفاده می‌شود، اجزای درگیر در تشکیل پیوند با سنگدانه‌ها، دچار تغییر می‌شوند. از آنجا که هر ترکیب سنگدانه- امولسیون دارای ترکیبات شیمیایی منحصر به فرد است، این عامل در نتیجه پیوند بین سنگدانه و قیر امولسیونی تأثیرگذار بوده و همچنین باعث توانایی متفاوت ترکیبات در برابر خرابی‌های رطوبتی می‌شود. قیر امولسیون پلیمری اصلاح شده مورد استفاده در میکروسرفیسینگ CSS-1h و CQS-1h است. استفاده از سنگدانه با بار سطحی مشابه قیر امولسیون کاتیونیک CSS-1h مانند سنگ آهک، موجب چسبندگی ضعیف قیر و سنگدانه شده و نرخ شکست نیز به موجب آن به تأخیر می‌افتد.

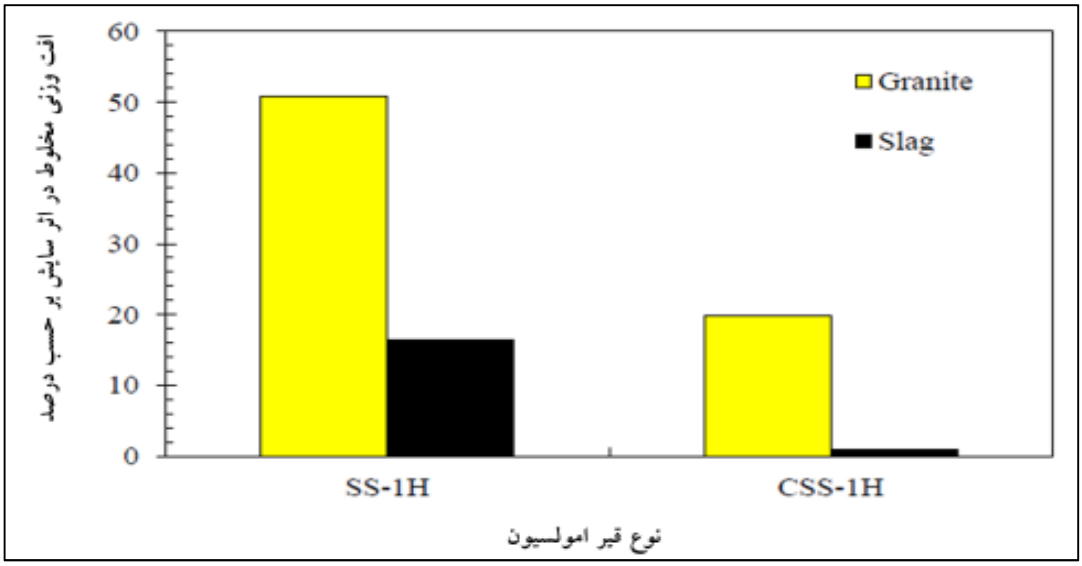
۵-۳-۳- قیر زدگی

فاکتورهایی که منجر به قیرزدگی بلندمدت می‌شوند شامل مقدار قیر بیش از حد و انتخاب نادرست درجه‌بندی قیر برای آب‌وهوای منطقه مورد نظر می‌باشند (Gransberg, 2010). در بلند مدت، قیرزدگی منجر به پیدایش اثر چرخ نمی‌شود ولی بیشتر باعث کاهش بافت سطح شده و مشکلاتی را از منظر ایمنی برای ناوگان عمومی حمل‌ونقل فراهم می‌کند. عواملی که باعث

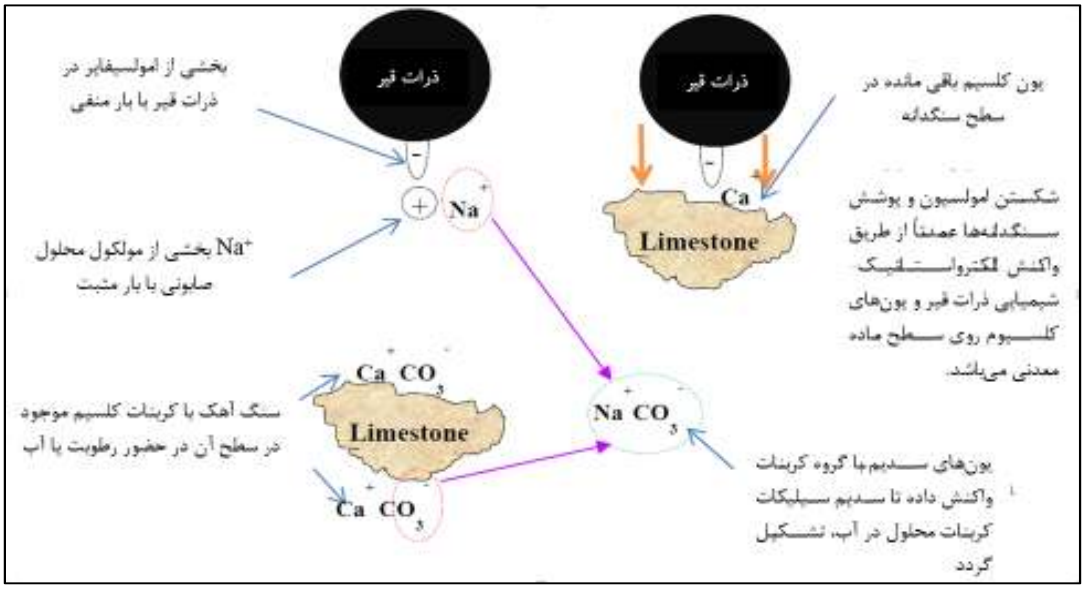
قیرزدگی زودهنگام شده‌اند، به‌عنوان عوامل قیرزدگی دیرهنگام نیز گزارش شده‌اند.

۵-۳-٤- شیارشدگی

شیارشدگی بلند مدت، در شرایطی مشابه با آنچه که در بند **۵-۳-۲** توضیح داده شد، به وقوع می‌پیوندد. فاکتورهایی که منجر به شیارشدگی بلندمدت می‌شوند عبارتند از مقدار قیر باقی‌مانده بالا، انتخاب نادرست درجه‌بندی قیر برای آب‌وهوای منطقه مورد نظر، حجم ترافیک بالا، استفاده از سنگدانه با مقاومت پایین و دانه بندی نامناسب سنگدانه (Johannes, 2014). نرخ شیارشدگی و عمق آن به عوامل خارجی و داخلی بستگی دارد. عوامل خارجی شامل بار و حجم ترافیک، فشار چرخ، دما و روش‌های ساخت بوده و عوامل داخلی شامل ضخامت روسازی، قیر، سنگدانه و مشخصات مخلوط است (Zaniewski & Srinivasan, 2004). یکی از عوامل تأثیرگذاری که در شیارشدگی مورد توجه است، مشخصات و ویژگی‌های سنگدانه است. آلریک (۱۹۹٦) اشاره داشته است که مشخصات آسفالت داغ به‌شدت تحت تأثیر مشخصات و ویژگی‌های سنگدانه‌های آن است. بوتون و همکارانش (۱۹۹۰) نه فاکتور احتمالی که باعث پدیده شیارشدگی می‌شود را گزارش کرده‌اند، اما اظهار داشتند که ویژگی و کیفیت سنگدانه عامل اصلی در مقدار شیارشدگی است. استک استون و باهیا (۲۰۰۳) نیز نشان دادند که مقاومت در برابر شیارشدگی بسیار وابسته به سنگدانه و درجه‌بندی آن است و مخلوط‌هایی با بهترین مواد، بدون یک درجه‌بندی مناسب، دچار خرابی می‌شوند (Ahlrich, 1996). پژوهش‌های آزمایشی و مدل‌سازی عددی نشان داده است که تنش‌های برشی ناشی از بار چرخ باعث ایجاد مقدار قابل توجهی از انرژی در مخلوط می‌شود که در نهایت منجر به تغییر شکل دائم می‌شود. سه مکانیسم متفاوت باعث ایجاد این نوع تغییر شکل‌ها می‌شود. اولین مکانیسم این است که اصطکاک بین سنگدانه‌های قیری (پوشش یافته با قیر) کاهش پیدا کند. مقاومت اصطکاکی در این سنگدانه‌ها وابسته به زبری و شکل سنگدانه است. مکانیسم دوم شکست و باز شدن قفل و بست بین سنگدانه‌ها بوده که باعث دور شدن آن‌ها از یکدیگر می‌شود. مکانیسم سوم این است که چسبندگی بین سنگدانه و قیر در مخلوط آسفالتی از بین می‌رود. میزان تأثیر هر کدام از مکانیسم‌ها به کیفیت طراحی مخلوط و ضخامت لایه آسفالتی بستگی دارد. برای آسفالت حفاظتی که ضخامت کمی دارند، اصطکاک سنگدانه‌ها بر روی یکدیگر و قفل و بست و چسبندگی آن‌ها نسبت به یکدیگر، اصلی‌ترین مکانیسم در برابر شیارشدگی است. با افزایش ضخامت لایه آسفالتی تأثیر اصطکاک و درگیری یا قفل و بست بین سنگدانه‌ها کمتر شده و از این‌رو خواص تغییر شکل و چسبندگی قیر و کیفیت اتصال و پیوستگی بین قیر و سنگدانه، بیشترین تأثیر را در برابر خرابی شیارشدگی دارد (Golalipour, Jamshidi, Niazi, Afsharikia, & Khadem, 2012).



شکل ۵ . **تأثیر نوع سنگدانه و خصوصیات شیمیایی امولسیون بر مقاومت در برابر عریان‌شدگی (آزمایش ٦ روز غرقاب)** (Johannes, 2014)



شکل ٦ . **فعل و انفعالات شیمیایی و الکترواستاتیکی بین قیر امولسیون آنیونی و سطح سنگدانه آهکی** (Johannes, 2014)

۶- نتیجه‌گیری

با افزایش سن شبکه‌های راه و با افزایش آسیب‌پذیری آن‌ها در برابر اثرات تغییرات آب و هوایی و افزایش سهم آن‌ها در بهبود رفاه مردم در طول زمان، نیاز بیشتری برای نگهداری راه احساس می‌شود. در نتیجه سهم هزینه‌های نگهداری راه در بودجه راه‌های ملی باید با گذشت زمان افزایش یابد، در عین حال مدیریت هزینه باید به صورت هوشمندانه، مؤثر، شفاف و بهینه انجام شود.

با توجه به موارد بیان شده در این پژوهش، استفاده از ترمیم و نگهداری پیشگیرانه در زمان مناسب می‌تواند با صرف هزینه‌های ناچیز در مقایسه با ترمیم روسازی و احداث روسازی جدید، موجب بهبودی وضعیت روسازی‌ها و طولانی‌شدن عمر بهره‌برداری آن‌ها شده و همچنین هزینه‌های تحمیلی بر استفاده‌کنندگان راه را کاهش دهد. در این پژوهش یکی از

کاربردی‌ترین روش‌های نگهداری پیشگیرانه به نام میکروسرفیسینگ معرفی و مختصری از مشخصات فنی و عوامل تأثیرگذار بر عملکرد آن ارائه گردید. استفاده از این سیستم به دلیل توانایی در رسیدن به سطح هموار مناسب، صرفه جویی در مصرف انرژی، توجیه مناسب اقتصادی و سرعت بالای اجرا، قابل توجیه و مناسب می‌باشد. از این‌رو برای ادارات راه و شهرسازی این موضوع مهم است که آسفالت‌های حفاظتی طوری طراحی و بهینه‌سازی شده که دارای بهترین عملکرد و بیشترین عمر بهره‌وری باشند، سرعت اجرای آن‌ها سریع باشد تا تأخیر در بازگشایی ترافیک را به حداقل برساند، عمر خدمت‌دهی روسازی راه را افزایش، هزینه‌های دوره‌های نگهداری را کاهش و ایمنی راه را ارتقا دهند. بنابراین ضروری است با استفاده از اصلاح و ارتقا عملکرد میکروسرفیسینگ، خرابی‌های اشاره شده برای این نوع آسفالت حفاظتی از قبیل شیار شدگی، عریان‌شدگی، شن‌زدگی و قیرزدگی کاهش و یا حذف گردند. لذا بررسی و جلوگیری از شکل‌گیری مدهای خرابی یا شکست در میکروسرفیسینگ امری حیاتی است.

۷- پی‌نوشت‌ها

1. Preventative maintenance treatments
2. National Cooperative Highway Research Program
3. International Slurry Surfacing Association
4. Texas Transportation Institute
5. American Society for Testing and Materials
6. California Department of Transportation
7. Lumps and balls
8. Slump Test
9. Hydroplaning

۸- مراجع

- اداره کل نگهداری راه‌ها، (۱۳۹۵)، "راهنمای مشخصات فنی و اجرایی روکش حفاظتی میکروسرفیسینگ".

-سازمان راهداری و حمل و نقل جاده‌ای، (۱۳۹۳)، "وضعیت رویه محورهای شریانی کشور".

-وضعیت رویه محورهای شریانی کشور، (۱۳۹۰)، " راهنمای طراحی و اجرای آسفالت حفاظتی به انضمام دستورالعمل پیشنهادی".

- South African National Roads Agency (SANRAL). (2007), "Design and Construction of Surfacing Seals (TRH3): Pretoria. South Africa".

-Ackerson, R. L. (1957), "Consistency tests on plain and bituminous slurries". Iowa State College.

-Aema, Asphalt Institute, Asphalt Emulsion Manufacturers Association. (2008), "MS-19 Basic Asphalt Emulsion Manual".

- Ahlrich, R. C. (1996), "Influence of aggregate gradation and particle shape/texture on permanent deformation of hot mix asphalt pavements".

-Ali, H., & Mohammadafzali, M. (2014), "Asphalt surface treatment practice in Southeastern United States".

-Bae, A., & Stoffels, S. M. (2008), "Economic effects of microsurfacing on thermally-cracked pavements", KSCE Journal of Civil Engineering, 12(3), pp.177-185. doi:10.1007/s12205-008-0177-y.

-Barnes ,H. A. (2000), "A handbook of elementary rheology", Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics. University of Wales, pp.5-130 .

-Benedict, C. R. (1977), "Design and Control of Slurry Seal Mixes", Paper presented at the Fourth Annual Meeting, Asphalt Emulsion Manufacturers Association, Phoenix, Arizona.

-Benedict, R. (1985), "New Trends in Slurry Seal Design Methods", Paper presented at the Proceedings of the 23rd Annual Convention of the International Slurry Seal Association.

-Broughton, B., & Lee, S.-J. (2012), "Microsurfacing in Texas", (FHWA/TX-12/0-6668-1).

- Broughton, B., Lee, S.-J., & Kim, Y.-J. (2012), "30 Years of Microsurfacing: A Review", ISRN Civil Engineering. doi:10.5402/2012/279643

-Chan, S., Lane, B., Kazmierowski, T., & Lee, W. (2011), "Pavement preservation: A solution for sustainability", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board(2235), pp.36-42 .

-Chang, J.-R., Chen, D.-H., & Hung, C.-T. (2005), "Selecting preventive maintenance treatments in Texas: using the technique for order preference by similarity to the ideal solution for specific pavement study-3 sites", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board(1933), pp.62-71 .

-Chang, M.-S. (1979), "The mixing stability and consistency of asphalt emulsion slurry seal", Iowa State University of Science and Technology.

-Coyne, L., & Ripple, R. (1975), "Emulsified Asphalt Mix Design and Construction", Paper presented at the Proceedings AAPT.

-Galehouse, L., Moulthrop, J. S., & Hicks, R. G . (2003), "Principles of pavement preservation: Definitions, benefits, issues, and barriers", TR News.

-Golalipour, A., Jamshidi, E., Niazi, Y., Afsharikia, Z., & Khadem, M. (2012), "Effect of aggregate gradation on rutting of asphalt pavements", Procedia-Social and Behavioral Sciences, 53, 440-449 .

-Gransberg, D. D. (2010), "NCHRP Synthesis 411: Microsurfacing; a synthesis of highway practices".

-Haas, R., & Hudson, W. R. (1978), "Pavement management systems".

-Hajek, D. J., Hein, D., & Chris, O. (2004), "Decision making for maintenance and rehabilitation of municipal pavements", Paper presented at the Annual Conference of the Transportation Association of Canada.

-Hassan, R. (1994), "Surface Rehabilitation Techniques: State of the Practice: Design, Construction, and Performance of Micro-surfacing", US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Office of Technology Applications.

-Huang, Y. H. (2004), "Pavement analysis and design".

-Hudson, W. R., McCullough, B. F., Scrivner, F., & Brown, J. L .(1970), "A Systems Approach Applied to Pavement Design and Research".

-Hunter, R. N. (2000), "Asphalts in road construction: Thomas Telford".

-Asphalt Institute, (2007), "The Asphalt Handbook".

-Asphalt Institute. (2009), "Asphalt in Pavement Preservation and Maintenance".

-ASTM International, (2018), "ASTM D977 - 17 Standard Specification for Emulsified Asphalt", In West Conshohocken, PA.

-ISSA. (2010), "A143- Recommended Performance Guideline for Micro Surfacing".

-James, A. (2006). Overview of asphalt emulsion. Transportation Research Circular EC102, pp.1-6 .

-Johannes, P. T. (2014), "Development of an Improved Mixture Design Framework for Slurry Seals and Micro-Surfacing Treatments", The University of Wisconsin-Madison.

-Johanns, M., & Craig, J. (2002), "Pavement maintenance manual", Nebraska Department of Roads .

-King, G., King, H., Galehouse, L., Voth, M., Lewandowski, L., Lubbers, C., & Morris, P. (2010), "Field validation of performance-based polymer-modified emulsion residue tests: The FLH study", Paper presented at the Proc., 1st International Conference on Pavement Preservation.

-U.S. Department of Transportation (FHWA), (1999), "Pavement Preservation: A Road Map for the Future", Performance Measures to improve Transportation Systems and Agency Operations .

-Uzarowski, L., & Bashir, I. (2007), "Rational Approach for Selecting the Optimum Asphalt Pavement Preventive and Rehabilitation Treatments-Two Practical Examples from Ontario". Paper presented at the Annual Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada: Transportation-An Economic Enabler (Less Transports: Un Levier Economique) Transportation Association of Canada.

-Watson, D., & Jared, D. (1998), "Georgia department of transportation's experience with microsurfacing", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board(1616), pp. 42-46 .

-Wimsatt, A., & Scullion, T. (2003), "Selecting Rehabilitation Strategies for Flexible Pavements in Texas", Paper presented at the Transportation Research Board 82nd Annual Meeting. Washington DC, USA.

-Zaniewski, J. P., & Srinivasan, G. (2004), "Evaluation of indirect tensile strength to identify asphalt concrete rutting potential". Asphalt Technology Program, Department of Civil and Environmental Engineering, West Virginia Univ., W. Va .

-Zavitski, J. L., Schvaneveldt, K., Baysinger, A., Wakil, A., Lawrence, B., Blake, D., . . . Neeley, L. R. (2006), "Good Roads Cost Less".

-Zhi, X.-l., Wang, W.-n., & Tsai, Y.-c. (2012), "Cost-benefit timing for applying slurry seal on actual roadway tests in China", Journal of Central South University, 19(8), pp.2394-2402.

-Labi, S., & Sinha, K. C. (2005), "Life-cycle evaluation of flexible pavement preventive maintenance". Journal of Transportation Engineering, 131(10), pp.744-751. doi:doi:10.1061/(ASCE)0733-947X(2005)131:10.

-Lee, D.-y. (1977), "Laboratory Study of Slurry Seal Coats".

-Moraes, R., Velasquez, R., & Bahia, H. (2011), "Measuring the effect of moisture on asphalt-aggregate bond with the bitumen bond strength test", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board(2209), 70-81 .

-PIARC. (2014), "The importance of road maintenance".

-Robati, M. (2011), "Evaluation of a modification of current micro-surfacing mix design procedures", (master's degree in construction engineering), Montréal, 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", International Journal on Pavemnet Engineering & Asphalt Technology, 14(2), pp.11-66 .

-Robati, M., Carter, A., & Perraton, D. (2015), "Evaluation of a modification of current microsurfacing mix design procedures", Canadian journal of civil engineering, 42(5), pp.319-328 .

-Takamura, K., Lok, K. P., Wittlinger, R., & Aktiengesellschaft, B. (2001), "Microsurfacing for preventive maintenance: eco-efficient strategy", Paper presented at the International Slurry Seal Association Annual Meeting, Maui, Hawaii.

-California Department of Transportation, (2004), "Slurry Seal / Micro-Surface Mix Design Procedure Phase II report".