تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۱۵
تاریخ تصویب مقاله: ۱۳۹۴/۷/۲۵
پایگاه نشریه: http://jerce.srttu.edu

نشریه علمی
پژوهش‌های تجربی در مهندسی عمران
جلد ۳ شماره ۱ بهار و بابستان ۱۳۹۵ صص ۲۹ الی ۳۹

ترمیم خرابی شیارشدگی با استفاده از آسفالت حفاظتی ریزدانه (میکروسرفیسینگ)

امیر کاووسی[1*] و راهب حافظزاده [2]

[1] **دانشیار**، گروه مهندسی راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
[2] **کارشناس ارشد**، گروه مهندسی راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
kavussia@modares.ac.ir

چکیده: تردد وسایل نقلیه و وارد آمدن بارهای محوری زیاد به روسازی، به مرور زمان باعث بوجود آمدن خرابی‌هایی از جمله شیارشدگی می‌شود. شیارشدگی، خرابی طولی در مسیر چرخ‌ها است که باعث ایجاد ناهمواری می‌گردد. از جمله روش‌هایی که برای رفع خرابی مذکور می توان نام برد استفاده از مخلوط آسفالت حفاظتی ریزدانه (میکروسرفیسینگ) است. میکروسرفیسینگ به دلیل داشتن قیر امولسیونی پلیمری و مصالح صد در صد شکسته، سبب افزایش مقاومت برشی، مقاومت در برابر سایش و شیارشدگی سطوح آسفالتی می‌شود. در این تحقیق نمونه-های مخلوط میکروسرفیسینگ با مقادیر قیر باقی‌مانده ۶/۳، ۸/۲ و ۱۰ درصد و شیره لاستیک در مقادیر ۳، ۴ و ۵ درصد وزنی قیر باقی‌مانده ساخته شده و جهت بررسی عملکرد آن‌ها آزمایش‌های روانی، چسبندگی، سایش در شرایط مرطوب و آزمایش بارگذاری چرخ انجام شد. مطابق نتایج به‌دست آمده، خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های اصلاح شده با شیره لاستیک بهبود قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کند. بطوریکه افزودن ۵٪ شیره لاستیک در مخلوط میکروسرفیسینگ با مقدار قیر ۸/۲٪، تا ۵۰ درصد مقاومت سایشی و مقاومت شیارشدگی مخلوط را افزایش می‌دهد. همچنین اصلاح قیر امولسیون با شیره لاستیک موجب بهبود عمل‌آوری و تسریع در گیرش نمونه‌ها می‌شود.

کلمات کلیدی: میکروسرفیسینگ، شیره لاستیک، شیارشدگی، قیر باقی‌مانده، بارگذاری چرخ

The Application of Microsurfacing in Repairing Pavement Surface Rutting

A. Kavussi and R. Hafezzadeh

Abstract: Rutting is one of the pavement distresses that mainly occur as a result of excessive loading on roads and it can cause roughness on the surface of pavements. The accumulation of water in rutted areas at rainy conditions results in reduced skid resistance, creating accident risk conditions for road users. One of the rapid and cost effective practices in filling ruts is using Microsurfacing mixes. Microsurfacing is a road maintenance tool that consists of laying a mixture of dense-graded bitumen emulsion mix, water, polymer additive, and mineral filler to correct deficiencies of pavement surfaces. In this research, a rather coarse size microsurfacing mix was designed and tested under load wheel, cohesiometer and wet track abrasion tests. The content of bitumen binders varies from 6.3 to 10% (i.e. percentage of the remained bitumen) and various amounts of latex was applied, ranging from 3 to 5%. Based on the above testing results it was revealed that microsurfacing mixes containing latex provided enhanced mechanical properties in the field. In addition, it was shown that among the above mentioned testing methods, abrasion and rutting tests were the most promising ones. The addition of latex modified binders resulted in improving characteristics of surface treatment mixes. In summary, it was resulted that the addition of 5% latex to emulsion mix containing 8.2% residual bitumen resulted in optimum conditions. With this formulation the mix showed almost 50% increase in both abrasion resistance and wheel load rut testing.

Keywords: Microsurfacing, Latex, Rutting, Residual Bitumen, Loaded Wheel.

۱ - مقدمه

رویه راه‌ها در اثر عوامل جوی نظیر بارندگی، یخ زدگی، تابش نور خورشید و اثرات سایشی وسایل نقلیه، لاستیک یخ‌شکن و دیگر عوامل در طول دوران بهره-برداری دچار فرسایش می‌شود[۱]. همچنین تردد وسایل نقلیه و وارد آمدن بار محوری زیاد به روسازی، به مرور زمان باعث به‌وجود آمدن خرابی‌ها و شیارشدگی در مسیر چرخ‌ها می‌شود که خساراتی را متوجه روسازی و حمل و نقل می‌کند. در صورتی که اقدامات ترمیمی صحیح در زمان مناسب روی این سطوح انجام نشود، خرابی‌ها گسترش یافته و لایه‌های زیرین روسازی نیز دچار آسیب می‌شود[۱, ۲].

برای پیشگیری از تشدید فرسودگی و تخریب سطح راه‌ها، اقدامات اصولی نسبتاً ارزان قیمتی را می‌توان در ابتدای دوران شروع خرابی‌ها و یا حتی قبل از آن انجام داد تا ضمن حفاظت از روسازی موجود، میزان خدمت‌دهی راه نیز در یک حد مناسب تامین شده و بهره‌برداری از آن بصورت ایمن صورت پذیرد. بدین سبب در دهه‌های اخیر، انجام عملیات نگهداری پیشگیرانه و بکارگیری روش‌های ترمیم سطح روسازی مورد توجه پژوهشگران و دست‌اندرکاران صنعت راهسازی قرار گرفته است تا ضمن حفظ شرایط عملکردی، کیفیت بهره‌برداری از معابر نیز بهبود یافته و با ارائه راه‌حل‌های کم هزینه، بهره‌وری روسازی افزایش یابد[۲]. در خصوص روسازی‌هایی که وضعیت موجود آن‌ها توان تحمل بارهای ترافیکی طراحی شده را داشته ولی نیاز به اصلاح سطح رویه دارد بهتر آن است که با آسفالت‌های حفاظتی مورد بهسازی قرار گیرد. زیرا استفاده از آسفالت‌های دیگر ضمن آن‌که موجب افزایش هزینه‌های اجرایی و تطویل زمان انجام پروژه می‌شود باعث افزایش رقوم سطح راه نیز می‌گردد که خود مشکلات دیگری نظیر اختلاف ارتفاع با سطح شانه راه و کاهش ارتفاع حفاظ‌های ایمنی کناره راه‌ها و آزاد-راه‌ها را به دنبال دارد[۱].

در میان انواع آسفالت‌های حفاظتی می‌توان به آسفالت حفاظتی ریزدانه (مایکروسرفیسینگ) اشاره کرد که از جمله کارآمدترین مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد. امکان پرکردن شیارشدگی، پرکردن ترک‌ها و رفع عیوب سطح روسازی، نفوذناپذیر کردن روسازی در برابر آب، فراهم کردن مقاومت لغزشی مناسب، امکان برقراری سریع ترافیک پس از اجرا، امکان اجرا درشب به دلیل گیرش سریع و از همه مهم‌تر اثرات سوء زیست محیطی کمتر، باعث شده است تا آسفالت حفاظتی ریزدانه گزینه‌ای مناسب و مقرون به‌صرفه جهت تعمیر خرابی‌های مذکور برای خیابان‌ها، مسیرهای با ترافیک سنگین و ترمیم و بهسازی فرودگاه‌ها باشد[۳].

آسفالت حفاظتی ریزدانه به عنوان یکی از روش‌های نوین مرمت رویه‌های آسفالتی، از دهه ۱۹۸۰میلادی کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه مورد استفاده قرار گرفته است. این آسفالت یک نوع مخلوط آسفالت امولسیونی اصلاح شده با پلیمر است که معمولاً به صورت سرد تهیه و پخش می‌گردد. در صورتی که این آسفالت حفاظتی ریزدانه به خوبی طراحی شده و از مصالح مرغوب و تجهیزات مناسب برای تهیه و اجرای آن استفاده شود، از نظر فنی و اقتصادی عملکرد بسیار مناسبی در اصلاح رویه راه‌ها خواهد داشت[۴, ۵].

در سال ۱۹۹۳، استفاده از آسفالت حفاظتی ریزدانه برای پر کردن شیارشدگی‌های روسازی مقطعی از جاده تیکسون ویتبی– اونتاریو در نظر گرفته شده است. روسازی از نظر سازه‌ای در وضعیت خوبی قرار داشته و دارای شیارشدگی و ترک‌های طولی و عرضی با شدت کم بود. ارزیابی روسازی پس از گذشت ۱۱ سال از عمر خدمت‌دهی، نشانگر همواری و کیفیت قابل قبول روسازی می‌باشد[۶]. مطالعه دیگر مربوط به ترمیم شیارشدگی‌های یکی از مسیرهای استانی افریقای جنوبی است که به مدت بیش از ۲۰ سال تحت خدمت‌دهی بود و در سال ۲۰۰۰ با آسفالت حفاظتی ریزدانه ترمیم شد. ارزیابی مسیر پس از گذشت ۴ سال از تعمیر و نگهداری نشانگر افت محسوس میزان شیار-افتادگی بخصوص برای شیارهای با عمق بیش از ۳۰ میلی‌متر بوده است[۷]. به منظور کاهش سایش در شرایط مرطوب و کاهش تغییر شکل قائم، تحقیقاتی با استفاده از شیره لاستیک SBR[۱] و EVA[۲] در مخلوط آسفالت حفاظتی ریزدانه و در مقادیر ۱ تا ۵ درصد

انجام گرفت که طبق مشاهدات، مقادیر ۳ تا ۵ درصد بیشترین بهبود را داشته است[۸]. همچنین طبق تحقیقات جونز، نتایج مشابهی با اصلاح‌کننده‌های SBR ، NRL و SBS به دست آمده است. بطوری‌که بهبود-هایی در کاهش تغییر شکل قائم برای مخلوط آسفالت حفاظتی ریزدانه مشاهده می‌شود[۹]. در این تحقیق به منظور دستیابی به خصوصیات مناسب مخلوط آسفالت حفاظتی ریزدانه از قیر امولسیون اصلاح‌شده با شیره لاستیک SBR و سیمان معمولی استفاده شده و چسبندگی مخلوط، سایش در شرایط مرطوب و شیارافتادگی مسیر مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- مواد و مصالح

میکروسرفیسینگ مخلوطی است که شامل مصالح سنگی صد در صد شکسته، قیر امولسیون، آب، افزودنی‌های پلیمری و فیلرهای معدنی می‌باشد[۱۰]. اهم ترکیبات و ویژگی‌های این آسفالت به شرح زیر می‌باشد.

۲-۱- قیر امولسیون

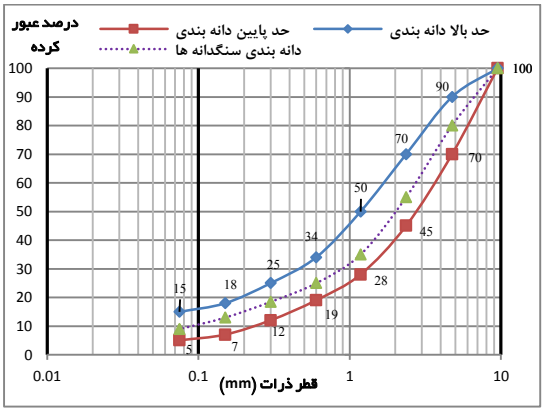
قیر امولسیون که حدوداً ۱۰ تا ۱۵ درصد وزن مصالح خشک را در این نوع مخلوط شامل می‌شود[۱۱] از نوع قیر امولسیون اصلاح‌شده با پلیمر می‌باشد. در این تحقیق قیر امولسیون CSS-1h با درصد قیر ۶۳ درصد و کندروانی ۲۵cSt استفاده شده است. لازم به ذکر است که اصلاح قیر امولسیون با درصدهای مختلف شیره لاستیک SBR و به روش پس‌افزوده[۳] (افزودن شیره لاستیک به قیر امولسیون پس از تولید آن) انجام گرفته است.

۲-۲- سنگدانه

سنگدانه‌هایی که در مخلوط استفاده می‌شود باید کیفیت مناسبی داشته باشد و تا حد امکان از سنگدانه-هایی با وجوه صددرصد شکسته باید استفاده شود. در این تحقیق جهت بهبود پوشش سطح و تامین حداکثر مقاومت سایشی از مصالح آهکی با دانه‌بندی نوع ۳ برای ساخت نمونه‌ها استفاده شده است که منحنی آن در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین در جدول ۱ ترکیبات تشکیل‌دهنده سنگدانه‌های مورد استفاده آورده شده که از طیف‌سنج پرتو ایکس[۴] حاصل شده است.

جدول ۱: درصد تقریبی اجزاء تشکیل‌دهنده سنگدانه‌ها

ترکیب	L.O.I	Br	Fe_2O_3	CaO	SO_3	SiO_2	Al_2O_3	MgO
درصد	۴۱/۵	۱/۶۰	۰/۸۸	۵۳/۶	۰/۱۱	۱/۴۹	۰/۳۷۹	۰/۲۶۳



شکل ۱: منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی مورد استفاده

۲-۳- فیلر

فیلر مورد استفاده در این تحقیق از نوع مصالح آهکی رد شده از الک ۲۰۰ می‌باشد. همچنین برای بهبود روانی و تنظیم خصوصیات شکستن و عمل‌آوری مخلوط از سیمان معمولی (تیپ ۱) به عنوان جایگزین بخشی از فیلر آهکی استفاده شده است.

۲-۴- پلیمر

از شیره لاستیک کاتیونیک SBR در این تحقیق جهت اصلاح قیر امولسیون استفاده شده است. رنگ این شیره لاستیک سفید شیری بوده و عدد pH و مقدار ماده جامد آن به ترتیب ۲/۵ و ۶۰ درصد گزارش شده است.

۲-۵- آب

آب مصرفی باید فاقد هرگونه مواد مضر، نمک و مواد معدنی و آلی باشد. آب استفاده شده در این تحقیق آب لوله‌کشی شهری تهران است.

۳- روش تحقیق و طرح اختلاط

روش معمول در طرح اختلاط مخلوط حفاظتی ریزدانه شامل تهیه مصالح با کیفیت برای ساخت مخلوط و بررسی روانی مخلوط، زمان گیرش، زمان عمل‌آوری، افت سایش و بارگذاری می‌باشد. در این تحقیق نیز روشی مشابه با آنچه ذکر شد، در نظر گرفته شده است. مطابق با توصیه‌های ذکر شده در آیین‌نامه‌ها و استانداردهای مخلوط حفاظتی ریزدانه (ISSA A-143)، مقدار مصرف قیر باقی‌مانده از امولسیون برای مخلوط حفاظتی ریزدانه اصلاح‌شده ۵/۵ تا ۱۰/۵ درصد و برای مخلوط حفاظتی ریزدانه اصلاح‌نشده ۶/۵ تا ۱۲درصد وزنی سنگدانه‌های خشک می‌باشد. با توجه به تحقیقات پیشین انجام شده[۱۲,۱۳] و امکان مقایسه بین مخلوط‌ها، مقادیر ۶/۳، ۸/۲ و۱۰ درصد قیر باقی-مانده برای ساختن نمونه‌ها انتخاب شده است. همچنین درصد استفاده از شیره لاستیک ۳ تا ۵ درصد وزنی قیر باقی‌مانده توصیه شده است که در تحقیق انجام شده قیر امولسیون با مقادیر ۳، ۴ و ۵ درصد وزنی قیر باقی-مانده از امولسیون و با روش پس‌افزوده اصلاح‌شده است و از آنجائی‌که مقدار مصرف توصیه‌شده برای سیمان ۳-۰ درصد وزنی مصالح خشک می‌باشد، مقادیر ۱/۵ و ۳ درصد به عنوان جایگزین بخشی از فیلر جهت ارزیابی روانی مخلوط استفاده گردیده است.

در این تحقیق با در نظر گرفتن ۳ درصد مختلف برای هریک از مواد اولیه شامل، قیر امولسیون، شیره لاستیک و فیلر معدنی، درکل تعداد ۳۶ نمونه برای مخلوط حفاظتی ریزدانه محاسبه گردید. برای به‌دست آوردن پیچش و سایش نمونه مخلوط آسفالت حفاظتی ریزدانه در هر نقطه، تعداد ۳ تکرار و برای تعیین مقدار عمق شیار نمونه در آزمایش بارگذاری فقط ۱ نمونه در نظر گرفته شده است. حالت‌های مختلف آزمایش‌ها در جداول زیر نشان داده شده است.

۴– آزمایش‌های طرح اختلاط

برای ارزیابی عملکرد مخلوط حفاظتی ریزدانه آزمایش-های طرح اختلاط براساس آیین‌نامه ASTM D-3910 انجام می‌شود. نخست برای تعیین نسبت بهینه بین مصالح سنگی، فیلر، آب و قیرامولسیونی آزمایش-های روانی مطابق شکل ۲ انجام می‌گیرد. پس از دست‌یابی به مخلوط بهینه (مخلوطی با روانی ۳-۲ سانتی‌متر)، مطابق شکل‌های ۳ تا ۵ آزمایش‌های گیرش و چسبندگی جهت تعیین چسبندگی اولیه و مقاومت در برابر ترافیک و زمان عمل‌آوری مخلوط، آزمایش سایش در شرایط مرطوب برای اندازه‌گیری کیفیت پوشش مخلوط دوغاب قیری تحت شرایط سائیدگی مرطوب و آزمایش بارگذاری (شیارشدگی) برای تعیین مقدار قیر بهینه و عمق شیارافتادگی انجام می‌گیرد.

جدول ۲: نمونه‌های مختلف برای آزمایش‌های طراحی شده

سیمان (٪)	پلیمر (٪)	قیر (٪)
۰/۰	۰	۶/۳، ۸/۲، ۱۰
۱/۵		
۳		
۰،۰	۳	
۱/۵		
۳		
۰/۰	۴	
۱/۵		
۳		
۰/۰	۵	
۱/۵		
۳		

شکل ۲: نحوه انجام آزمایش روانی

شکل ۳: نحوه انجام آزمایش چسبندگی

شکل ۴: دستگاه انجام آزمایش سایش در شرایط مرطوب

شکل ۵: نحوه انجام آزمایش بارگذاری

۵– جمع‌بندی و تحلیل

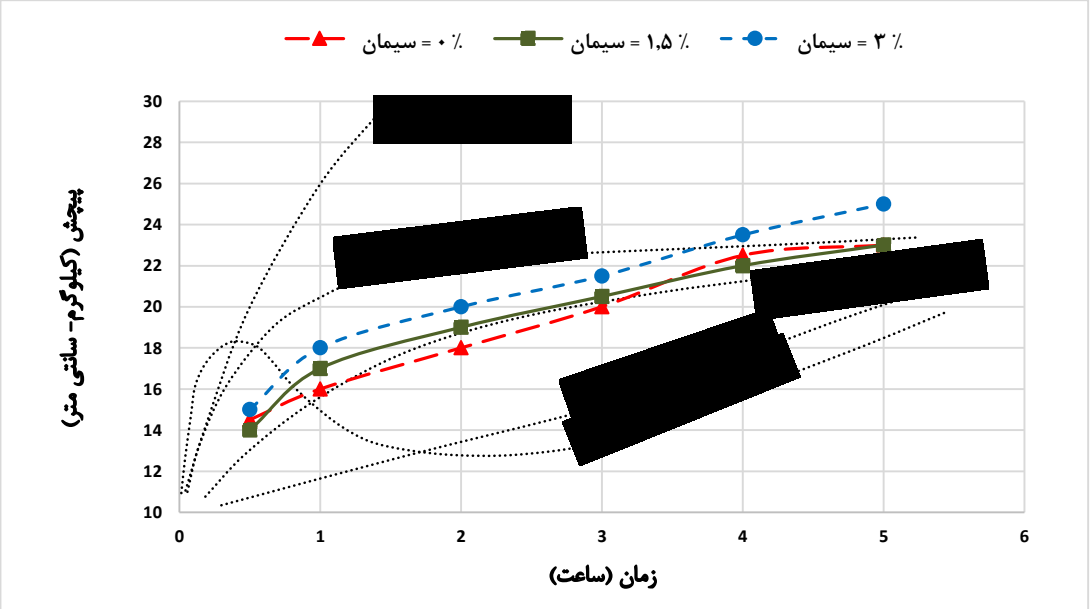
۵–۱–آزمایش چسبندگی و اثر شیره لاستیک

برای بررسی تاثیر شیره لاستیک بر روند عمل‌آوری مخلوط‌های حفاظتی ریزدانه، نمودارهای عمل‌آوری در مقادیر مختلف قیر باقی‌مانده (۶/۳، ۸/۲ و۱۰ درصد)، برای مخلوط‌های فاقد سیمان در شکل‌های ۶ تا ۸ آورده شده است.

همانطور که در شکل ۶ و شکل‌های دیگر آورده شده است، منحنی‌های نقطه چین فاقد علامت محدوده‌های ذکر شده در آیین‌نامه می‌باشد که روند عمل‌آوری مخلوط‌های حفاظتی ریزدانه را نشان می‌دهد. بطوری‌که با در دست داشتن مقادیر پیچش یک نمونه در زمان‌های مختلف و مقایسه آن‌ها با منحنی‌های آیین‌نامه تقریباً می‌توان نوع گیرش و نحوه عبور وسایل نقلیه از روی روسازی ترمیم شده را مشخص کرد. منحنی‌های دارای علامت مربوط به نتایج به دست آمده از آزمایش چسبندگی برای مقادیر مختلف شیره لاستیک می‌باشد. اصولاً انتظار می‌رود که اصلاح قیر امولسیون با شیره لاستیک باعث بهبود روند عمل‌آوری و چسبندگی مخلوط آسفالت حفاظتی ریزدانه گردد. مطابق با آنچه که از نمودار شکل ۶ قابل مشاهده است برای مخلوط‌های فاقد شیره لاستیک روند عمل‌آوری به‌صورت آهسته انجام می‌گیرد. گیرش برای مخلوط‌های حاوی شیره لاستیک در مقایسه با مخلوط‌های فاقد شیره لاستیک بهتر و سریع‌تر انجام می‌شود، بطوری‌که هرچقدر مقدار شیره لاستیک موجود در مخلوط بیشتر می‌شود، این روند سریع‌تر انجام می‌گیرد. نکته دیگری که قابل توجه می‌باشد این است که همه مخلوط‌ها در محدوده بین منحنی‌های عمل‌آوری گیرش سریع - ترافیک آرام و گیرش آرام – ترافیک آرام واقع شده‌اند ولی با وجود این، مخلوط با ٪۵ شیره لاستیک در مقایسه با دیگر مخلوط‌ها در وضعیت مناسبی از نظر عمل‌آوری قرار دارد. با پخش شدن شیره لاستیک در امولسیون، شبکه‌های الاستیک حین عمل‌آوری داخل قیر شکل می‌گیرد. مخصوصاً وقتی که آب داخل امولسیون بخار می‌شود، قطرات در امتداد سطح ذرات قیر منعقد شده و منجر به شکل‌گیری یک شبکه لانه‌زنبوری پیوسته پلیمری می‌شود که در سرتاسر قیر گسترش می‌یابد و بین ذرات قیر چسبندگی و پیوستگی بهتری را ایجاد می‌کند.

۵–۱– آزمایش چسبندگی و اثر سیمان

مطابق با آنچه که قبلاً ذکر شده است، انتظار می‌رود استفاده از سیمان باعث تنظیم گیرش و زمان عمل‌آوری مخلوط گردد. روند عمل‌آوری در بررسی اثر سیمان نیز همانند روندعمل‌آوری اثر شیره لاستیک می‌باشد و با افزایش مقدار سیمان مخلوط، گیرش با سرعت بیشتری صورت می‌گیرد. در زمان‌های اولیه عمل‌آوری و در نیم ساعت ابتدایی تفاوت چشمگیری بین مخلوط‌های با مقادیر مختلف سیمان مشاهده نمی‌شود ولی با گذشت زمان، مخلوط با درصد سیمان بیشتر به عمل‌آوری بهتری در مقایسه با دیگر مخلوط‌ها دست پیدا می‌کند و مخلوط حاوی ٪۳ سیمان بیشترین تاثیر را دارد. با وجود اینکه انتظار می‌رود بهبود عمل‌آوری در مخلوط‌های حاوی مقادیر مختلف سیمان چشمگیرتر باشد، ولی باید خطای مربوط به انجام آزمایش به صورتی دستی را نیز در نظر گرفت. منحنی‌های حاصل از نتایج به دست‌آمده از آزمایش نیز در محدوده بین گیرش آرام – ترافیک آرام و گیرش سریع - ترافیک آرام قرار دارد.



شکل۶: منحنی های مربوط به عمل‌آوری نمونه‌ها (حاوی قیر باقی‌مانده ۸/۲ درصد و شیره لاستیک ۳ درصد)

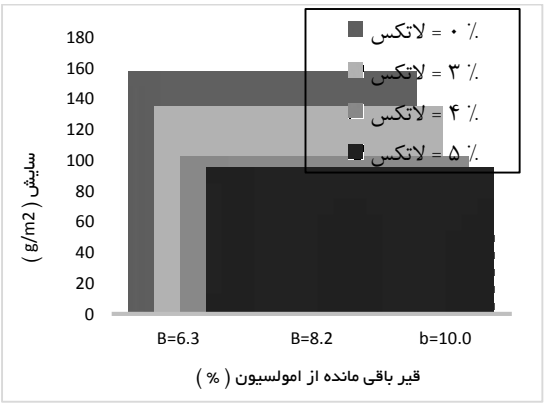
۲-۵- آزمایش سایش در شرایط مرطوب

آزمایش سایش در شرایط مرطوب روی نمونه‌های مختلف انجام گرفته است که نتایج آن برای درصدهای مختلف قیر باقی‌مانده و شیره لاستیک در نمودارهای شکل ۷ تا ۹ در زیر نشان داده شده است. طبق این نمودارها، برای درصدهای مختلف قیر مخلوط، سایش نمونه‌ها در آزمایش سایش در شرایط مرطوب، با افزایش مقدار شیره لاستیک کاهش پیدا می‌کند. برای مثال اگر نمودار مربوط به مخلوط حاوی قیر ٪۶/۳ و سیمان ٪۱/۵ (حالت بحرانی) در نظر گرفته شود مقدار سایش نمونه‌های حاوی ۳، ۴ و ۵ درصد شیره لاستیک به ترتیب ۸۵، ۶۴ و ۶۰ درصد سایش نمونه شاهد می-باشد. به عبارتی دیگر مقاومت سایشی هر کدام به ترتیب ۱۵، ۳۶ و ۴۰ درصد بهبود داشته است. این کاهش مقدار سایش نسبت به نمونه شاهد برای نمونه-های حاوی ۸/۲ درصد قیر به ترتیب ۷۳، ۶۴ و ۵۰ درصد (بهبود مقاومت سایشی به ترتیب ۲۷، ۳۶ و ۵۰ درصد) و برای نمونه‌های با ۱۰ درصد قیر به ترتیب ۸۷، ۷۸ و ۷۴ درصد (بهبود مقاومت سایشی به ترتیب ۲۲،۱۳و ۲۶ درصد) می‌باشد. لازم به ذکر است که نتایج برای نمونه‌هایی که طرح اختلاط آن‌ها شامل ٪۳ سیمان می‌باشد نیز صادق است.

برای مخلوط دارای قیر ٪۶/۳ و سیمان ٪۳ و نمونه‌های حاوی ۳، ۴ و ۵ درصد شیره لاستیک به ترتیب ۹۰، ۶۳ و ۵۳ درصد سایش نمونه شاهد می‌باشد. به عبارتی دیگر مقاومت سایشی هر کدام به ترتیب بهبود ۱۰، ۳۷ و ۴۷ درصدی داشته است. این کاهش مقدار سایش نسبت به نمونه شاهد برای نمونه‌های حاوی ٪۸/۲ قیر به ترتیب ۶۹، ۵۷ و۴۵ درصد (بهبود مقاومت سایشی به ترتیب ۳۱،۴۳ و ۵۵ درصد) و برای نمونه های با ٪۱۰ قیر به ترتیب ۹۱، ۸۳ و ۷۱ (بهبود مقاومت سایشی به ترتیب ۹، ۱۷و ۲۹ درصد) می‌باشد. البته نمونه‌های حاوی ٪۳ سیمان سایش کمتری را از نمونه های حاوی ۱/۵ درصد سیمان داشته‌اند.

آن‌چنان که مشاهده می‌شود مخلوط حاوی ٪۸/۲ قیر و ٪۵ شیره لاستیک بهترین عملکرد را در افت سایش از خود نشان داده است. آن‌چنان که در نتایج مربوط به آزمایش چسبندگی نیز ذکر شد، افزایش شیره لاستیک منجر به شکل‌گیری یک شبکه لانه زنبوری پیوسته پلیمری می‌شود که در سرتاسر قیر گسترش می یابد و بین ذرات قیر چسبندگی و پیوستگی بهتری را ایجاد می‌کند. همچنین افزایش مقدار قیر مخلوط تا یک حدی می‌تواند باعث چسبندگی بهتر بین سنگدانه‌ها و قیر شود. با افزایش بیش از حد قیر امکان لغزندگی در

سطح نمونه نیز ایجاد شده که مانع سایش بیشتر می‌شود.



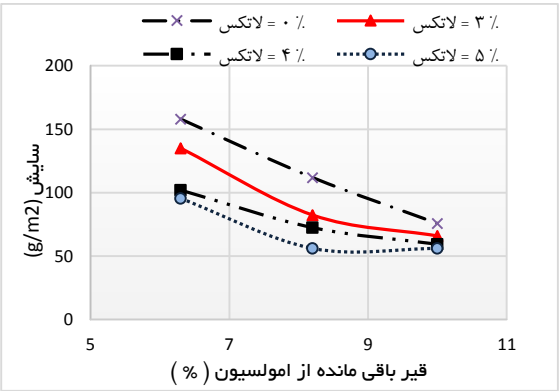
شکل ۷: نمودار افت سایش آسفالت حفاظتی ریزدانه برای درصدهای مختلف شیره لاستیک و ۱/۵٪ سیمان

در جدول ۳ نتایج حاصل از افزایش مقاومت در برابر سایش برای مخلوط‌های مختلف آسفالت حفاظتی ریزدانه در مقایسه با مخلوط شاهد (بدون شیره لاستیک) و برای مقادیر مختلف شیره لاستیک و سیمان نشان داده شده است. برای مثال، همان‌طور که از نتایج جدول قابل مشاهده است، برای مخلوط حاوی ۶/۳ درصد قیر باقی‌مانده و بدون سیمان، افزایش مقاومت سایشی در مقادیر ۳، ۴ و ۵ درصد شیره لاستیک به ترتیب برابر ۲۳، ۳۰/۴ و ۴۰/۹ درصد می‌باشد. همچنین حداکثر بهبود مقاومت در برابر سایش بین مخلوط‌های مختلف، حداقل ۵۰ درصد حاصل شده است. البته قابل ذکر است که به دلیل حساسیت بسیار بالا در این آزمایش، ممکن است نتایج بعضی از مخلوط‌ها کمی شک برانگیز باشد.

مطابق شکل۸، با افزایش مقدار قیر مخلوط به ٪۱۰، از تاثیر شیره لاستیک در کاهش مقدار سایش مخلوط کاسته شده است؛ بطوریکه در مخلوط حاوی ٪۱۰ قیر سایش نمونه‌های حاوی درصدهای مختلف شیره لاستیک، نزدیک به هم بوده و به سمت یک نقطه میل می‌کند. به نظر می‌رسد هر اندازه درصد قیر مخلوط افزایش پیدا می‌کند، از نقش شیره لاستیک بر کاهش مقدار افت سایش کاسته می‌شود. دلیل این رخداد می‌تواند آن باشد که با افزایش مقدار قیر در مخلوط، چسبندگی بین قیر و سنگدانه‌های مخلوط حاکمیت بیشتری را نسبت به تاثیر شیره لاستیک بر کاهش سایش به جای می‌گذارد.

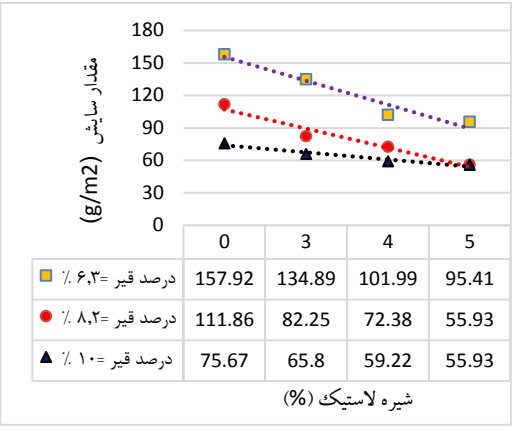
جدول ۳: افزایش مقاومت در برابر سایش نمونه‌ها

قیر (٪)	شیره لاستیک = ٪ ۳		
	بدون سیمان	سیمان= ٪۱/۵	سیمان= ٪۳
۶,۳	۲۳	۱۵	۱۰
۸,۲	۲۱/۷	۲۷	۳۱
۱۰	۱۴/۳	۱۳	۹
قیر (٪)	شیره لاستیک = ٪ ۴		
	بدون سیمان	سیمان= ٪۱/۵	سیمان= ٪۳
۶,۳	۳۰/۴	۳۶	۳۷
۸,۲	۴۰/۲	۳۶	۴۳
۱۰	۱۷/۸۵	۲۲	۱۷
قیر (٪)	شیره لاستیک = ٪ ۵		
	بدون سیمان	سیمان= ٪۱/۵	سیمان= ٪۳
۶,۳	۴۰,۹	۴۰	۴۷
۸,۲	۵۷/۵	۵۰	۵۵
۱۰	۱۷/۸۵	۲۶	۲۹



شکل۸: منحنی‌های افت سایش آسفالت حفاظتی ریزدانه برای درصدهای مختلف شیره لاستیک و ۱/۵٪ سیمان

منحنی‌های شکل ۹، روند کاهش مقدار سایش مخلوط ریزدانه حفاظتی را در درصدهای مختلف شیره لاستیک نشان می‌دهد. مطابق شکل، با افزایش شیره لاستیک، روند شیب نمودارها با افزایش مقدار قیر مخلوط کاهش می‌یابد. بطوریکه می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش مقدار قیر مخلوط از اثر شیره لاستیک بر کاهش مقدار سایش کاسته می‌شود.



شکل ۹: منحنی‌های افت سایش مخلوط آسفالت حفاظتی ریزدانه برای مقادیر مختلف شیره لاستیک و ۱/۵٪ سیمان

تحلیل آماری نتایج حاصل از تاثیر شیره لاستیک بر سایش آسفالت حفاظتی برای مقدار قیر ۶/۳ درصد (شرایط بحرانی) مطابق آزمون واریانس[۵] و آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار[۶] در جداول ۴ و ۵ نشان داده شده است.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$$
$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4$$

مطابق جدول ۴، از آنجائی‌که سطح معنی داری کمتر از سطح خطای ۰/۰۵ می‌باشد و همچنین با توجه به آماره F فرض H_0 را نمی توان تائید کرد و و اختلاف معناداری بین میانگین‌ها وجود دارد. در واقع مقدار سایش تحت تاثیر درصدهای مختلف شیره لاستیک متفاوت است. همچنین مطابق جدول۵ در سطح خطای ۰/۰۵، بین مخلوطهای با درصدهای مختلف شیره لاستیک و مخلوط تفاوت معنی‌داری وجود دارد. تاثیر شیره لاستیک بر مقدار سایش برای مقادیر ۸/۲ و ۱۰ درصد نیز معنی‌دار می‌باشد.

۵-۳- آزمایش بارگذاری

برای مخلوطهای با مقادیر قیر ۶/۳٪، ۸/۲٪ و ۱۰٪ و شیره لاستیک ٪ ۰، ۳ و ٪۵ آزمایش بارگذاری انجام شده است و نتایج آن مطابق با نمودارهای نشان داده شده در شکل ۱۰ می‌باشد. همانطور که از منحنی‌های شکل ۱۰، می‌توان استنتاج کرد، محدوده عمق شیارشدگی بین ۱ تا ۲ میلی‌متر می‌باشد.

جدول ۴: نتایج آزمون مقایسه واریانس‌ها

ANOVA					
	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	معنی داری
بین گروه‌ها	۷۸۲۵/۸۲	۳	۲۶۰۸/۶۱	۱۸۰/۸	۰/۰۰
داخل گروه‌ها	۱۱۵/۴۵۷	۸	۱۴/۴۳۲		
کل	۷۹۴۱/۲۸	۱۱			

جدول ۵: نتایج آزمون حداقل تفاوت معنی دار

متغیر وابسته : سایش LSD						
شیره لاستیک (I)	شیره لاستیک (J)	تفاوت میانگین (I-J)	خطای استاندارد	معنی داری	سطح اطمینان ۹۵٪	
					حد پایین	حد بالا
۰	۳	۲۳/۰۳*	۳/۱	۰/۰	۱۵/۸۷	۳۰/۱۸
	۴	۵۷/۰۲*	۳/۱	۰/۰	۴۹/۸۷	۶۴/۱۷
	۵	۶۵/۵۱*	۳/۱	۰/۰	۵۵/۳۵	۶۹/۶۶
۳	۰	-۲۳/۰۳*	۳/۱	۰/۰	-۳۰/۱۸	-۱۵/۸۷
	۴	۳۳/۹۹*	۳/۱	۰/۰	۲۶/۸۴	۴۱/۱۴
	۵	۳۹/۴۸*	۳/۱	۰/۰	۳۲/۳۲	۴۶/۶۳
۴	۰	-۵۷/۰۲*	۳/۱	۰/۰	-۶۴/۱۷	-۴۹/۸۷
	۳	-۳۳/۹۹*	۳/۱	۰/۰	-۴۱/۱۴	-۲۶/۸۴
	۵	۵/۴۸	۳/۱	۰/۱	-۱/۶۶	۱۲/۶۳
۵	۰	-۶۲/۵۱*	۳/۱	۰/۰	-۶۹/۶۶	-۵۵/۳۵
	۳	-۳۹/۴۸*	۳/۱	۰/۰	-۴۶/۶۳	-۳۲/۳۲
	۴	-۵/۴۸	۳/۱	۰/۱	-۱۲/۶۳	۱/۶۶
*. تفاوت میانگین ها در سطح ۰/۰۵ معنی دار است						

از آنجایی‌که شیره لاستیک مورد نظر از نوع الاستومر ترموپلاست می‌باشد، می‌تواند بدون اینکه بشکند تا ۱۰ برابر خود تحت کشش قرار داده شود و پس از برداشتن بار خیلی سریع به شکل اولیه خود برگردد، انتظار می‌رود عمق شیارشدگی با افزایش مقدار شیره لاستیک مخلوط کاهش پیدا کند بطوریکه برای مخلوطهای با مقادیر مختلف قیر، مقدار عمق شیار برای نمونه‌های حاوی ٪۵ شیره لاستیک کمتر از مقدار عمق شیار برای نمونه‌های حاوی ٪۳ و نمونه های مخلوط شاهد می‌باشد. در صورتی که مقادیر عمق شیارشدگی برای مخلوطهای حاوی ۶/۳٪ قیر باقی‌مانده بصورت کمّی مورد بحث قرار گیرد، می‌توان نتیجه گرفت که عمق

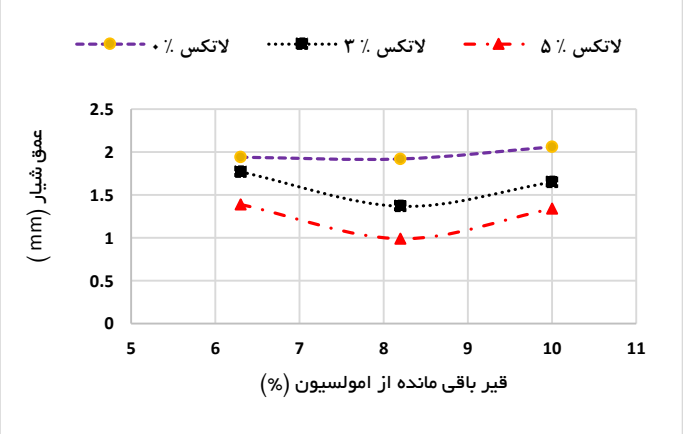
شیارشدگی برای مخلوط‌های حاوی ٪۵ و ٪۳ شیره لاستیک در مقایسه با عمق شیارشدگی نمونه‌های مخلوط شاهد به ترتیب ٪۲۸/۴ و ٪۹ کاهش یافته است. این روند کاهش وقتی که مقدار قیر مخلوط برابر ٪۸/۲ می‌باشد بیشتر مشهود بوده و نتایج آن برای مخلوط‌های حاوی ٪۵ و ٪۳ شیره لاستیک در مقایسه با عمق شیارشدگی نمونه‌های مخلوط شاهد به ترتیب برابر ٪۴۹ و ٪۲۸/۷ به دست آمده است. برای مخلوط با قیر باقی‌مانده ٪۱۰، این مقادیر به ترتیب برابر ٪۳۵ و ٪۲۰ درصد به دست آمده است. بیشترین مقدار کاهش عمق (مقاومت در برابر شیارافتادگی) در نمونه‌های مخلوط با ٪۸/۲ قیر بود. همچنین به نظر می‌رسد که مقدار قیر ٪۱۰در مخلوط، باعث ایجاد عمق شیار بیشتری نسبت به دیگر مخلوط‌ها شده است. نکته دیگر، روند افزایش عمق شیار با افزایش درصد قیر در مخلوط‌های حاوی درصدهای متفاوت شیره لاستیک می‌باشد. در همه مخلوط‌ها روند افزایش عمق شیار بصورت نموداری مقعر می‌باشد بطوریکه با افزایش درصد قیر باقی‌مانده تا ٪۸/۲، مقدار عمق شیار ابتدا کاهش پیدا می‌کند و سپس با افزایش مقدار قیر مخلوط از ٪۸/۲ به ٪۱۰ عمق شیار بیشتر شده و روند حالت صعودی پیدا می‌کند. روند تغییرات عمق شیار در مخلوط‌های فاقد شیره لاستیک چشمگیر نیست ولی در مخلوط حاوی شیره لاستیک این روند بیشتر و نزدیک به هم می‌باشد.

برای مخلوط‌های حاوی ٪۳ سیمان نیز روند تغییرات عمق شیار نظیر منحنی‌های شکل ۱۰می‌باشد، بطوریکه مخلوط‌هایی که مقدار قیر باقی‌مانده آن‌ها ٪۸/۲ بود بیشترین کاهش عمق شیار شدگی را نشان داده است. با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها، عمق شیارشدگی برای مخلوط‌های حاوی ٪۵ و ٪۳ شیره لاستیک در مقایسه با عمق شیارشدگی نمونه‌های مخلوط شاهد به ترتیب ٪۴۳/۵ و ٪۱۳/۵ کاهش یافته است. این روند کاهش وقتی که مقدار قیر مخلوط برابر ٪۸/۲ بود بیشتر مشهود بوده و نتایج آن برای مخلوط-های حاوی ٪۵ و ٪۳ شیره لاستیک، در مقایسه با عمق شیارشدگی نمونه‌های مخلوط شاهد، به ترتیب برابر ٪۵۴/۵ و ٪۵۰/۳ به دست آمده است. همچنین برای مخلوط با قیر باقی‌مانده ٪۱۰ این مقادیر به ترتیب برابر ٪۴۶ و ٪۲۷/۵ به دست آمد.

تحلیل آماری نتایج حاصل از تاثیر شیره لاستیک بر عمق شیارشدگی آسفالت حفاظتی برای مقدار قیر ۶/۳ درصد مطابق آزمون واریانس و آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار در جداول ۶ و ۷ نشان داده شده است.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$$
$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4$$

مطابق جدول ۷، از آنجائیکه سطح معنی‌داری کمتر از سطح خطای ۰/۰۵ می‌باشد و همچنین با توجه به آماره F فرض H_0 را نمی توان تائید کرد و اختلاف معناداری بین میانگین ها وجود دارد. در واقع مقدار عمق شیار تحت تاثیر درصدهای مختلف شیره لاستیک متفاوت است. همچنین مطابق جدول۶ در سطح خطای ۰/۰۵، بین مخلوط‌های با درصدهای مختلف شیره لاستیک و مخلوط تفاوت معنی‌داری وجود دارد.



شکل ۱۰: منحنی‌های مربوط به تاثیر شیره لاستیک بر عمق شیارشدگی مخلوط (بدون سیمان)

جدول ۶: نتایج آزمون حداقل تفاوت معنی دار

متغیر وابسته :عمق شیارشدگی						
شیره لاستیک (I)	شیره لاستیک (J)	تفاوت میانگین (I-J)	خطای استاندارد	معنی داری	سطح اطمینان ٪۹۵	
					حد پایین	حد بالا
۰	۳	۰/۱۷*	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۳
	۵	۰/۵۵*	۰/۰۵	۰	۰/۴۱	۰/۶۸
۳	۰	-۰/۱۷*	۰/۰۵	۰/۰۲	-۰/۳	-۰/۰۳
	۵	۰/۳۸*	۰/۰۵	۰	۰/۲۴	۰/۵۱
۵	۰	-۰/۵۵	۰/۰۵	۰	-۰/۶۸	-۰/۵۱
	۳	-۰/۳۸*	۰/۰۵	۰	-۰/۵۱	-۰/۲۴
*. تفاوت میانگین ها در سطح ۰/۰۵ معنی دار است.						

جدول ۷: نتایج آزمون مقایسه واریانس‌ها

عمق شیارشدگی					
	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	معنی داری
بین گروه‌ها	۰/۴۷۶	۲	۰/۲۳۸	۴۸/۸۸	۰۰/۰
داخل گروه‌ها	۰/۰۲۹	۶	۰/۰۰۵		
کل	۰/۵۰۵	۸			

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای بالا بردن خصوصیات مکانیکی مخلوط حفاظتی ریزدانه (مایکروسرفیسینگ) از شیره لاستیک SBR که از خانواده پلیمرهای الاستومری ترموپلاست می‌باشد استفاده شد برای مقایسه تاثیر قیر در روند عمل‌آوری و بالابردن خصوصیات مخلوط مقادیر ٪ ۶/۳، ۸/۲ و ۱۰٪ برای قیر تعیین شد. نتایج به دست آمده از این تحقیق را بطور خلاصه می‌توان در موارد زیر جمع‌بندی نمود:

– افزایش مقدار قیر مخلوط تا یک حدی می‌تواند باعث چسبندگی بهتر بین سنگدانه‌ها و قیر و احتباس سنگدانه ها شده و در نتیجه باعث کاهش شیار افتادگی می‌شود ولی افزایش بیش از حد مقدار قیر (در این تحقیق ۱۰ درصد) باعث می‌شود که قیر مانعی برای تحمل بار توسط سنگدانه‌ها شود و در نتیجه عمق شیار بیش‌تر می‌شود.

– اصلاح قیر امولسیون با شیره لاستیک نتایج مثبتی را همراه دارد بطوری‌که پخش‌شدن شیره لاستیک در امولسیون، منجر به شکل‌گیری یک شبکه لانه‌زنبوری پیوسته پلیمری می‌شود که در سرتاسر قیر گسترش یافته و بین ذرات قیر چسبندگی و پیوستگی بهتری را ایجاد می‌کند. هر چقدر مقدار شیره لاستیک موجود در اصلاح قیر امولسیون افزایش می‌یابد شبکه‌های پیوسته بیشتری شکل گرفته و چسبندگی و پیوستگی بیشتر و بهتری در مخلوط ایجاد می‌گردد. بطوریکه در این تحقیق افزایش مقدار شیره لاستیک تا ۵ درصد وزنی مقدار قیر باقی‌مانده، بهترین عملکرد را در بهبود خواص مذکور دارد. همچنین به دلیل خاصیت کشسانی شیره لاستیک و امکان برگشت به حالت اولیه پس از باربرداری عمق شیارشدگی با افزایش مقدار شیره لاستیک در مخلوط کاهش پیدا کند.

پی نوشت

[1] Styrene Butadiene Rubber
[2] Ethyl Vinyl Acetate
[3] Post Addition
[4] X-ray fluorescence
[5] ANOVA
[6] LSD

تشکر و قدردانی

از شهرداری تهران (مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران) بخاطر حمایت مالی این مقاله تشکر و قدردانی می شود.

مراجع

[1] Pittenger, D. "*Comparative Analysis of Microsurfacing and Portland Cement Slurry Seal for Rut Filling*", Transportation Research Board 93rd Annual Meeting, Washington, D.C, USA, **2014**.

[۲] کاووسی امیر، زایرزاده علی، *" پارامترهای مؤثر بر*

روش طرح و اجرای مخلـوط آسـفالت حفـاظتی ریزدانه"، سومین همایش قیر و آسـفالت ایـران، انتشارات بوم سـازه (پایگـاه سـیویلیکا)، تهـران، **۱۳۸۵**.

[3] Kumar, R., "*Rural Road Preventive Maintenance with Microsurfacing*", International Conference on Emerging Frontiers in Technology for Rural Area (EFITRA), pp. 4-8, **2012**.

[4] Robati, M., "*Evaluation of test methods and selection of aggregate grading for type III application of micro-surfacing*", International Journal on Pavemnet Engineering & Asphalt Technology, p.p 11-66, **2013**.

[5] Broughton, B., "*30 Years of Microsurfacing: A Review*" International Scholarly Research Notices (ISRN), **2012**.

[6] Uzarowski, L. "*A Rational Approach for Selecting the Optimum Asphalt Pavement Preventive and Rehabilitation Treatments-Two Practical Examples from Ontario*", Annual Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada, Saskatchewan, Canada, **2007**.

[7] Ducasse, K. "*The Use of Microsurfacing as a Cost Effective Remedial Action for Surface Rutting*", Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA), Sun City, South Africa, **2004**.

[8] Holleran, G. "*The Use of Polymer Modification in Slurry Surfacings*", ISSA Users Workshop, Columbus, Ohio, **2006**.

[9] Jones, D.R. "*Effects of Various Polymers on Quick-Set/Quick-Traffic Emulsified Asphalt Micro-Surfacing Mixes–Part I and II*", Annual Convention of the ISSA, Kona, Hawaii, **1989**.

[10] Association, I.S.S.A, "*Recommended Performance Guideline for Micro Surfacing*" Annapolis, Maryland, USA, **2010**.

[11] Raza, H., "*State of the Practice Design, Construction and Performance of Microsurfacing*", Washington, D.C. USA, p48, **1994**.

[12] Lim, J., "*Effect of water and emulsion contents for Microsurfacing Mix Properties*", CSCE, Rome, Italy, **2014**.

[13] Imran Khan, M., "*Improving slurry seal performance in Eastern Saudi Arabia using steel slag*", Construction and Building Materials, Vol12 p195-201, **199**