طرح اختلاط میکروسرفیسینگ و تجارب آزمایشگاهی

مصطفی نخعی، علی‌اصغر اکبری نسرکانی و سیاوش کردی

شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک

چکیده

با توجه به گسترش کاربرد میکروسرفیسینگ در کشور به عنوان یکی از گزینه‌های تعمیر و نگهداری پیشگیرانه، شناخت این نوع مخلوط و آزمایش‌های ارزیابی آن ضروری است. میکروسرفیسینگ یکی از ابزارهای نگهداری راه شامل لایه‌ای از مخلوط مصالح سنگی، قیر امولسیون، آب، پلیمر و فیلر معدنی (نظیر سیمان و آهک) است که برای اصلاح یا جلوگیری از خرابی روسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. آزمایش چسبندگی به منظور تعیین زمان بازگشایی ترافیک بر روی مخلوط میکروسرفیسینگ انجام می‌شود. همچنین آزمایش‌های سایش در شرایط مرطوب و چسبندگی ماسه با درصدهای قیر برای تعیین قیر بهینه مخلوط میکروسرفیسینگ انجام می‌شود. با توجه به استفاده از مواد مختلف نظیر سیمان، پلیمر، آب، سنگدانه و قیر امولسیون در این مخلوط، نیاز است سازگاری این مواد با یکدیگر بررسی شود تا از خرابی‌های زودرس جلوگیری گردد. آزمایش رده‌بندی به ارزیابی همخوانی مواد به کار رفته در مخلوط میکروسرفیسینگ می‌پردازد. در این یادداشت فنی ضمن معرفی اجمالی مخلوط میکروسرفیسینگ، الگوریتم طرح اختلاط میکروسرفیسینگ و آزمایش‌های مربوط به آن به تفصیل بیان شده است. همچنین تجارب برخی طرح اختلاط‌های انجام شده ارائه شده است.

۱- مقدمه

میکروسرفیسینگ، آسفالت سرد حفاظتی است که از اختلاط ماسه صد در صد شکسته و خوب دانه‌بندی شده با قیر امولسیون کاتیونیک پلیمری، فیلر، آب و در صورت لزوم افزودنی‌های کنترل‌کننده جهت تنظیم زمان شکست قیر امولسیون تهیه می‌شود و منشأ اولیه آن اسلاری‌سیل است. یکی از راه‌های افزایش طول عمر راه استفاده از میکروسرفیسینگ است. در این روش مقاومت سازه‌ای افزایش چندانی نمی‌یابد و بنابراین مورد استفاده آن در شرایطی است که مقاومت کافی سازه‌ای وجود دارد [۱]. بعضی مواقع به اشتباه از میکروسرفیسینگ با عنوان اسلاری‌سیل اصلاح شده با پلیمر یاد می‌شود. تفاوت‌های متعددی بین این دو نوع مخلوط وجود دارد، اما بزرگ‌ترین تفاوت در نوع فرایند عمل‌آوری می‌باشد به این ترتیب که در میکروسرفیسینگ این فرایند به‌صورت شیمیایی کنترل می‌شود، درصورتی‌که در اسلاری‌سیل از تبخیر به منظور انجام این فرایند استفاده می‌شود [۲].

در بسیاری از ایالت‌های آمریکا از میکروسرفیسینگ به‌منظور حفاظت از روسازی و پر کردن شیارشدگی جاده‌های با حجم ترافیک متوسط تا زیاد استفاده شده است [۳]. میکروسرفیسینگ مزایای متعددی دارد که می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- توانایی بازگشایی سریع ترافیک
- توانایی اجرا در شب
- توانایی اجرا در چند لایه
- کمتر بودن مخاطرات زیست‌محیطی
- تأمین اصطکاک بیشتر و ایمنی بیشتر مسافرین

به صورت کلی میکروسرفیسینگ در اصلاح شن زدگی، تسطیح سطح، وصله کردن چاله‌های کوچک و کم عمق و افزایش اصطکاک سطح روسازی استفاده می‌شود. در جدول ۱ کاربردهای میکروسرفیسینگ به صورت اجمالی ارائه شده است.

گزارش‌ها نشان می‌دهد که میانگین عمر میکروسرفیسینگ در ایالت‌های مختلف آمریکا در حدود ۵ سال می‌باشد و این در حالی است که عمر گزارش شده توسط مؤسسات و سازمان‌های متولی تحقیقات آسفالت به ۵ تا ۷ سال می‌رسد. به هر حال می‌توان عمر ۵ سال را به عنوان میانگین عمر میکروسرفیسینگ پذیرفت. باید به این نکته توجه کرد که عمر بهره برداری بالا منوط به این است که سطحی که مخلوط میکروسرفیسینگ بر روی آن اجرا می‌شود فاقد هرگونه خرابی سازه‌ای و یا ترک شدید باشد[٤].

جدول ۱- موارد استفاده از میکروسرفیسینگ

شرایط آب و هوایی	ترافیک	استفاده شود	استفاده نشود	توضیحات
در تمامی شرایط آب و هوایی می‌توان اجرا نمود، اما بهترین عملکرد را در آب و هوای معتدل تا گرم دارد.	در تمامی ترافیک‌های سبک و سنگین قابل استفاده است.	قیرزدگی با سطح شدت کم تا متوسط	گسیختگی سازه‌ای	
		کم بودن اصطکاک سطحی و ناهمواری با شدت کم	خرابی وسیع در سطح روسازی اگر عمر باقی‌ماندهٔ روسازی کم باشد.	
		آبند کردن رویه ترک‌های طولی، عرضی با شدت کم	ترک‌های عرضی با شدت زیاد تا متوسط	
		پرکنندهٔ شیار افتادگی جای چرخ، چنانچه شیار افتادگی ناپایدار نباشد	در شیار افتادگی‌های ناپایدار	
		در روسازی‌های هوازده یا شن‌زده (مصالح سنگی سست شده باید از سطح راه برداشته شوند)	در یخبندان	پخش مخلوط در شرایط آب و هوایی سرد می‌تواند باعث بروز شن‌زدگی شود. درصورت پیش‌بینی بروز یخبندان، نباید این مخلوط پخش گردد.

۲- مواد و مصالح

میکروسرفیسینگ مخلوطی شامل امولسیون اصلاح‌شده با پلیمر، سنگدانه‌های معدنی شکسته شده و دارای دانه‌بندی مناسب، فیلر (معمولاً سیمان پرتلند)، آب و افزودنی‌های شیمیایی (به‌منظور کنترل زمان شکست) می‌باشد. به دلیل فرایند شیمیایی شکست امولسیون، انتخاب مصالح و طرح اختلاط اهمیت ویژه‌ای دارد.

به‌طور معمول مقادیر قیر امولسیون پلیمری و فیلر به صورت درصدی از مقدار مصالح سنگی بیان می‌شود. می‌توان مقادیر آب، فیلر و افزودنی را در اجرا برای کنترل

زمان شکست امولسیون تا حدودی تغییر داد. همچنین این مقادیر را می‌توان با توجه به مواردی مانند دما، رطوبت و بافت سطحی آسفالت موجود تغییر داد [۵]. در ادامه مشخصات مورد نیاز مواد و مصالح میکروسرفیسینگ مطابق با دستورالعمل ISSA A143 بیان می‌گردد.

۲-۱- مصالح سنگی

مصالح سنگی حدود ۸۲ تا ۹۰ درصد از وزن مخلوط میکروسرفیسینگ را شامل می‌شود. برای نتایج بهتر، مصالح باید صد در صد شکسته، تمیز و عاری از هرگونه موادی که دوام و چسبندگی مخلوط را دچار مشکل سازد، باشد [۵]. حدود مشخصات دانه‌بندی و نتایج آزمایش‌های مرغوبیت مصالح سنگی مطابق دستورالعمل ISSA A143 در جدول ۲ ارائه شده است. دانه‌بندی نوع ۲ معمولاً برای درزبندی و رفع ترک‌های با عرض متوسط، آب‌بندی و ایجاد روکش سطحی با دوام استفاده می‌شود. دانه‌بندی نوع ۳، روکش سطحی بهبود یافته دارای بافت درشت‌تر با حداکثر مقاومت لغزشی را ایجاد می‌کند. اگرچه مقدار حداکثر افت وزنی مجاز در آزمایش سولفات سدیم و سولفات منیزیم در این جدول ذکر شده است، اما انجام یکی از آن‌ها کافی است.

جدول ۲- مشخصات مصالح سنگی میکروسرفیسینگ

آزمایش	روش استاندارد انجام آزمایش	حدود مشخصات		
		الک	درصد عبوری	
			نوع ۲	نوع ۳
دانه‌بندی	ASTM C136 و ASTM C117	$\frac{3}{8}$ اینچ	۱۰۰	۱۰۰
		#٤	۹۰-۱۰۰	۷۰-۹۰
		#۸	۹۰-۱۰۰	٤۵-۷۰
		#۱٦	٤۵-۷۰	۲۸-۵۰
		#۳۰	۳۰-۵۰	۱۹-۳٤
		#۵۰	۱۸-۳۰	۱۲-۲۵
		#۱۰۰	۱۰-۲۱	۷-۱۸
		#۲۰۰	۵-۱۵	۵-۱۵
افت وزنی در مقابل سایش به روش لس‌آنجلس (درصد)	ASTM C131	< ۳۰		
افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (درصد)	ASTM C88	< ۱۵		
افت وزنی در مقابل سولفات منیزیم (درصد)	ASTM C88	< ۲۵		
ارزش ماسه‌ای (درصد)	ASTM D2419	> ٦۵		

۲-۲- فیلر معدنی

می‌توان فیلرهایی نظیر سیمان، آهک شکفته، پودر سنگ‌های آهکی یا هر نوع فیلر دیگری که مشخصات ذکر شده برای فیلر مصرفی در آسفالت گرم را داشته باشد، در مخلوط‌های میکروسرفیسینگ مصرف کرد. استفاده از فیلرها موجب افزایش کارایی و تنظیم زمان شکست مخلوط شده و عمل‌آوری آن در زمان کوتاه‌تری میسر می‌گردد. مطابق دستورالعمل ISSA A143 میزان فیلر مصرفی باید بین ۰ تا

۳ درصد وزن مصالح سنگی باشد. همچنین می‌توان از فیلر معدنی به عنوان جزئی از دانه‌بندی مصالح سنگی استفاده نمود.

۲-۳- آب

آب مهمترین عامل تأثیرگذار در پیوستگی مخلوط میکروسرفیسینگ است. آب‌های قابل شرب را می‌توان در میکروسرفیسینگ به کار برد. آب مورد استفاده برای تهیه امولسیون و آب مصرفی در تهیه مخلوط‌های میکروسرفیسینگ باید عاری از مواد مضر مانند نمک، مواد آلی و مواد معدنی باشد. اما معمولاً کمیت آب بیشتر از کیفیت آن اهمیت دارد. بر اساس شرایط آب و هوایی و میزان جذب آب مصالح سنگی، کل رطوبت موجود در مخلوط مصالح سنگی حدود ٤ الی ۱۲ درصد از وزن مصالح سنگی می‌باشد. در شرایط آب و هوایی سرد مقدار کمتر و در شرایط گرم آب بیشتری مورد نیاز است. مخلوط‌های حاوی رطوبت کم ممکن است خیلی سخت باشند و قابلیت پخش را نداشته باشند و چسبندگی کمی به سطح روسازی موجود داشته باشند. از سوی دیگر، مخلوط‌های حاوی ۱۲ درصد آب ممکن است خیلی روان باشند و سبب جدایی سنگدانه‌ها شوند. مقدار آب مصرفی برای تهیه میکروسرفیسینگ باید به اندازه‌ای باشد تا یک مخلوط روان و یکنواخت تهیه شود [۵].

۲-۳- قیر امولسیون

باقیمانده قیر امولسیونی میکروسرفیسینگ معمولاً بین ۵/۵ تا ۱۰/۵ درصد وزنی مصالح سنگی خشک می‌باشد. خصوصیات شیمیایی امولسیفایر معمولاً تعیین کننده خواص قیر می‌باشد. به عنوان مثال این امولسیفایر است که قیر را به انواع آنیونیک، کاتیونیک و غیر آنیونیک دسته‌بندی می‌نماید. هر قدر مقدار امولسیفایر بیشتر باشد زمان شکست افزایش می‌یابد [۵]. قیر امولسیون باید از نوع سریع‌شکن کاتیونی با کندروانی پایین[1] یا دیرشکن کاتیونی با کندروانی پایین[2] و اصلاح‌شده با پلیمر باشد و با مشخصات قیرهای امولسیونی آئین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران انطباق داشته باشد. این مشخصات در جدول ۳ ارائه شده است.

۲-۴- پلیمر

افزایش پلیمر سبب افزایش چسبندگی مخلوط می‌شود و حساسیت حرارتی آن را بهبود می‌بخشد. چسبندگی بیشتر سبب بهبود مقاومت در برابر شیارافتادگی می‌گردد و عملکرد قیر را در دماهای پایین بهبود می‌بخشد و انعطاف‌پذیری آن را بهتر می‌کند. پلیمر را می‌توان پیش از ساخت قیر امولسیون، به قیر خالص افزود و یا در حین ساخت امولسیون اضافه نمود که روش دوم ترجیح داده می‌شود، زیرا دمای بالا سبب خرابی برخی لاتکس‌ها می‌گردد. دستورالعمل ISSA A143 تنها اضافه کردن پلیمر در حین ساخت امولسیون را مجاز می‌داند. حداقل مقدار پلیمر لازم برای میکروسرفیسینگ ۳ درصد وزن باقیمانده قیر امولسیون است. معمولاً در میکروسرفیسینگ از لاتکس طبیعی استفاده می‌شود، ولی سایر پلیمرها اعم از استایرن بوتادین استایرن (SBS)، استایرن بوتادین رابر (SBR) و اتیل وینیل استات (EVA) نیز استفاده شده است [۵-٤].

[1] Cationic quick set (CQS-1h)
[2] Cationic slow set (CSS-1h)

جدول ۳- مشخصات قیر امولسیونی پلیمری میکروسرفیسینگ

آزمایش	روش استاندارد انجام آزمایش	حدود مشخصات	
		حداقل	حداکثر
قیر امولسیونی			
بار ذره‌ای	ASTM D7402	مثبت	
دانه‌بندی (الک) (٪)	ASTM D6933	–	۰/۱
کندروانی سیبولت- فیورل در دمای ۲۵ °C (ثانیه)	ASTM D7496	۲۰	۱۰۰
پایداری در برابر ته نشینی در ۲٤ ساعت (٪)	ASTM D6930	–	۱
مقدار قیر باقیمانده از تقطیر (٪)	ASTM D6997	٦۲	–
قیر پسماند حاصل از تقطیر در خلأ (طبق ASTM D7403)			
نقطه نرمی (درجه سانتیگراد)	ASTM D36	۵۷	–
درجه نفوذ (۰/۱ میلیمتر)	ASTM D5	٤۰	۹۰
کشش‌پذیری (سانتیمتر)	ASTM D113	٤۰	–
درجه حلالیت در تری کلرو اتیلن (٪)	ASTM D2042	۹۷/۵	–

۳- آزمایش‌های مخلوط میکروسرفیسینگ

مشابه سایر مخلوط‌های آسفالتی، کیفیت اجزای تشکیل دهنده مخلوط برای داشتن رویه با کیفیت ضروری است، ولی لزوماً تضمین کننده کیفیت روسازی نمی‌باشد. زیرا با توجه به اینکه میکروسرفیسینگ از مواد و مصالح مختلف تشکیل شده است، ممکن است مصالح استفاده شده با یکدیگر ناسازگار باشند. به همین دلیل انجام آزمایش‌های مختلف بر روی مخلوط میکروسرفیسینگ ضروری است تا علاوه بر تعیین نسبت اختلاط بهینه، عملکرد مخلوط در برابر خرابی‌های مختلف مورد سنجش قرار گیرد.

۳-۱- آزمایش زمان اختلاط

آزمایش زمان اختلاط مطابق با دستورالعمل ISSA TB113 انجام می‌شود. هدف از انجام آن تعیین نسبت مناسب مصالح سنگی، فیلر معدنی، آب و قیر امولسیونی جهت تهیه مخلوط میکروسرفیسینگ با کارایی و روانی قابل قبول برای اجرای در محل است.

در این آزمایش، مواد و مصالح مذکور در دمای پروژه یا دمای اتاق به طور مداوم با نرخ ثابت مخلوط و مدت زمان لازم تا شکست مخلوط درون ظرف اختلاط، تحت عنوان زمان اختلاط اندازه‌گیری می‌شود. بخشی از مخلوط میکروسرفیسینگ ۳۰ ثانیه پس از شروع اختلاط، بر روی کاغذ ریخته می‌شود و مدت زمان لازم تا سخت شدن کامل آن به عنوان زمان سخت شدن اندازه‌گیری می‌شود. دستورالعمل ISSA A143 حداقل زمان اختلاط مورد نیاز را ۱۲۰ ثانیه بیان کرده است. لازم به ذکر است به منظور برآورده ساختن حداقل گشتاور پیچشی مورد نیاز در آزمایش چسبندگی (بخش ۳-۲) نیاز است مخلوطی انتخاب گردد که زمان اختلاط بالاتر از ۱۲۰ ثانیه و نزدیک به آن داشته باشد. باید توجه داشت نسبت اختلاطی انتخاب گردد که در آن مصالح سنگی دارای پوشش کافی و یکنواخت از قیر امولسیون باشد.

شکل ۱- آزمایش زمان اختلاط

۳-۲- آزمایش آب جوشان

آزمایش آب جوشان مطابق دستورالعمل ISSA TB114 انجام می‌پذیرد. نمونه‌های این آزمایش با نسبت‌های مناسب به دست آمده از آزمایش زمان اختلاط، ساخته شده و پس از ۲٤ ساعت عمل‌آوری در دمای محیط، به مدت ۳ دقیقه در آب جوش قرار داده می‌شود و به منظور بررسی مقدار پوشش قیری مصالح سنگی، مورد بازرسی چشمی قرار می‌گیرد. طبق این دستورالعمل، مقدار پوشش قیری نباید کمتر از ۹۰ درصد باشد.

۳-۳- آزمایش چسبندگی

آزمایش چسبندگی مطابق دستورالعمل ISSA TB139 انجام می‌پذیرد. هدف اصلی از این آزمایش، تعیین حداقل زمان مورد نیاز برای بازگشایی ترافیک است. گیرش مخلوط میکروسرفیسینگ زمانی حاصل می‌شود که چسبندگی و انسجام کامل بین سنگدانه‌های پوشیده از قیر برقرار شده باشد.

برای انجام آزمایش، قالب نمونه با قطر ۷۰ میلیمتر و ارتفاع متناسب با اندازه بزرگترین سنگدانه روی پوشش قیر اندود قرار گرفته و مخلوط میکروسرفیسینگ آماده شده مطابق دستورالعمل ISSA TB113 درون آن ریخته می‌شود. پس از اینکه مخلوط شکسته شد، از داخل قالب خارج می‌شود و توسط یک کفشک لاستیکی به قطر ۲۵/٤ میلیمتر و ضخامت ٦ میلیمتر تحت بارگذاری قرار می‌گیرد. نمونه میکروسرفیسینگ توسط کفشک لاستیکی که به یک جک بادی متصل است به مدت ۵ ثانیه، تحت فشار ۲۰۰ کیلوپاسکال قرار می‌گیرد. سپس کفشک لاستیکی در مدت زمان ۰/۵ ثانیه به مقدار ۹۰ تا ۱۲۰ درجه مورد پیچش قرار می‌گیرد و گشتاور پیچشی وارده به نمونه تعیین می‌شود. در شکل ۲ نمونه میکروسرفیسینگ در حال انجام آزمایش نشان داده شده است. دمای آزمایشگاه در هنگام انجام آزمایش می‌بایست ثبت گردد.

شکل ۲- آزمایش چسبندگی

۳-۴- آزمایش سایش در شرایط مرطوب

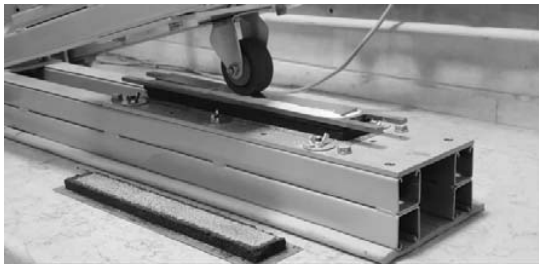
آزمایش سایش در شرایط مرطوب مطابق دستورالعمل ISSA TB100 انجام می‌پذیرد. در این آزمایش مقاومت سایشی میکروسرفیسینگ در شرایط مرطوب بررسی می‌شود. هدف از این آزمایش تعیین حداقل درصد قیر

امولسیونی برای ساخت مخلوط میکروسرفیسینگ است، به نحوی که از جداشدگی دانه‌ها و سایش بیش از حد میکروسرفیسینگ جلوگیری شود. برای انجام آزمایش، مخلوط میکروسرفیسینگ با نسبت اختلاط مناسب مواد به دست آمده از آزمایش زمان اختلاط و با درصدهای مختلف قیر(دو درصد بالاتر و دو درصد پائین‌تر) درون قالب با قطر ۲۵۰ و عمق ٦ میلیمتر ریخته می‌شود و بعد از یک ساعت عمل‌آوری در دمای محیط، به مدت ۱۸ ساعت درون آون با دمای ٦۰ درجه سانتیگراد و یک ساعت درون آب با دمای ۲۵ درجه سانتیگراد قرار داده می‌شود. نمونه درون آب به صورت چرخشی تحت سایش مکانیکی یک لاستیک با وزن سربار مشخص قرار می‌گیرد و پس از آن در دمای ٦۰ درجه سانتیگراد خشک و توزین می‌شود. مطابق دستورالعمل ISSA A143 اختلاف وزن نمونه قبل و بعد از فرآیند سایش (عدد سایش) باید کمتر از ۵۳۸ گرم بر متر مربع باشد. در شکل ۳ نمونه میکروسرفیسینگ در حال انجام این آزمایش نشان داده شده است.

شکل ۳- آزمایش سایش در شرایط مرطوب

۳-۵- آزمایش بارگذاری چرخ (مقدار ماسه چسبیده)

آزمایش بارگذاری چرخ (تعیین مقدار ماسه چسبیده) مطابق دستورالعمل ISSA TB109 انجام می‌پذیرد. هدف از آزمایش بارگذاری چرخ، تعیین مقدار حداکثر قیر امولسیونی مخلوط میکروسرفیسینگ است، به گونه‌ای که از وقوع قیرزدگی در میکروسرفیسینگ جلوگیری شود. در این آزمایش، مخلوط میکروسرفیسینگ با نسبت اختلاط مناسب مواد به دست آمده از آزمایش زمان اختلاط و درصدهای مختلف قیر (دو درصد بالاتر و دو درصد پائین‌تر) درون قالب استاندارد به ضخامت ۱۲٫۷ میلیمتر ریخته می‌شود و بعد از یک ساعت عمل‌آوری در دمای محیط، به مدت ۱۸ ساعت درون آون با دمای ٦۰ درجه سانتیگراد قرار داده می‌شود. سپس به مدت ۲ ساعت در دمای محیط خنک می‌شود و در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد تحت ۱۰۰۰ سیکل رفت و برگشت چرخ حامل بار استاندارد قرار می‌گیرد. پس از پایان سیکل‌های بارگذاری، سطح نمونه تمیز و توزین می‌شود. سپس مقدار ۳۰۰ گرم ماسه اتاوا با دمای ۸۲ درجه سانتیگراد روی نمونه پخش و نمونه تحت ۱۰۰ سیکل بارگذاری اضافی قرار می‌گیرد. پس از این مرحله سطح نمونه تمیز و مجدداً توزین می‌شود. مطابق دستورالعمل ISSA A143 اختلاف وزن نمونه قبل و بعد از ریختن ماسه (میزان ماسه چسبیده) باید کمتر از ۵۳۸ گرم بر متر مربع باشد. در شکل ٤ نمونه میکروسرفیسینگ در حال انجام این آزمایش نشان داده شده است.

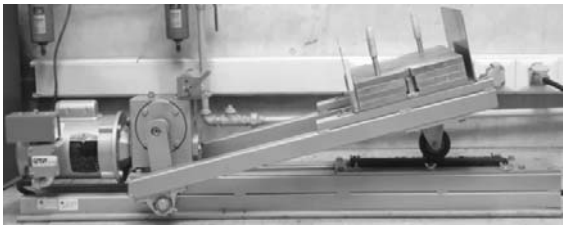


شکل ٤- آزمایش بارگذاری چرخ (مقدار ماسه چسبیده)

۳-۶- آزمایش بارگذاری چرخ (جابجایی افقی و قائم)

آزمایش بارگذاری چرخ (تعیین جابجایی افقی و قائم) مطابق دستورالعمل ISSA TB147 انجام می‌پذیرد. هدف از

این آزمایش بررسی مقدار جابجایی افقی و قائم مخلوط میکروسرفیسینگ تحت بارگذاری شبیه‌سازی شده ترافیک است. در این آزمایش مخلوط میکروسرفیسینگ با استفاده از قالب استاندارد، قالب‌گیری می‌شود و پس از گیرش کامل، در دمای ۲۲ درجه سانتیگراد، تحت ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری چرخ با ۵۷ کیلوگرم بار قرار می‌گیرد. سطح نمونه پس از پایان سیکل‌های بارگذاری تمیز و مقادیر جابجایی جانبی و عمق شیار در مرکز مسیر چرخ اندازه‌گیری می‌شود. جابجایی جانبی نمونه برابر مقدار افزایش عرض نسبت به مقدار اولیه است که حداکثر مقدار مجاز آن برای مخلوط میکروسرفسینگ برابر ۵ درصد است. جابجایی نسبی قائم برابر نسبت عمق شیار به ضخامت اولیه نمونه است. مخلوط میکروسرفیسینگ را در صورتی می‌توان در چند لایه اجرا کرد که جابجایی نسبی قائم آن کمتر از ۱۰ درصد باشد. معیار ۱۰ درصد در آخرین ویرایش دستورالعمل ISSA A143 حذف شده است و به جای آن از معیار چگالی حداکثر ۲٫۱ گرم بر سانتیمتر مکعب استفاده شده است که طبق دستورالعمل ISSA TB147 تعیین می‌شود. در شکل ۵ نمونه میکروسرفیسینگ در حال انجام این آزمایش نشان داده شده است.



شکل ۵- آزمایش بارگذاری چرخ (جابجایی افقی و قائم)

۳-۷- آزمایش رده‌بندی (سازگاری)

آزمایش رده‌بندی طبق دستورالعمل ISSA TB144 به منظور بررسی سازگاری و همخوانی مواد به کار رفته در ساخت آسفالت حفاظتی میکروسرفیسینگ انجام می‌شود. نمونه‌های این آزمایش با دانه‌بندی استاندارد، ۱ درصد سیمان، مقدار کافی آب و ۸٫۱۲۵ درصد قیر پسماند ساخته می‌شود و پس از یک ساعت عمل‌آوری در دمای محیط، به مدت ۱۸ ساعت در آون با دمای ۶۰ درجه سانتیگراد قرار داده می‌شود. سپس ۴۰ گرم از مخلوط عمل‌آوری شده را در قالب مخصوص ریخته، به مدت ۱ دقیقه در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد با اعمال نیروی ۱۰۰۰ کیلوگرم متراکم می‌گردد. در ادامه، پس از عمل‌آوری به مدت شش روز درون حمام آب ۲۵ درجه سانتیگراد، نمونه‌ها داخل شاتل‌های دستگاه آزمایش به همراه ۷۵۰ میلی‌لیتر آب قرار داده می‌شود و در معرض ۳۶۰۰ سیکل دوران به مدت ۳ ساعت قرار می‌گیرد.

پس از پایان این مرحله، وزن اشباع با سطح خشک نمونه‌ها اندازه گرفته می‌شود. سپس آزمایش آب جوشان به مدت ۳۰ دقیقه بر روی نمونه‌ها انجام و مجدداً وزن اشباع با سطح خشک نمونه‌ها اندازه گرفته می‌شود. در نهایت به منظور بررسی مقدار پوشش قیری مصالح سنگی بازرسی چشمی انجام می‌شود. امتیاز و رده مخلوط مورد آزمایش با توجه به دستورالعمل ISSA TB144 تعیین می‌گردد. در شکل ۶ دستگاه آزمایش نشان داده شده است.

شکل ۶- آزمایش رده‌بندی (سازگاری)

۴- مراحل تهیه طرح اختلاط مخلوط میکروسرفیسینگ

۱. انتخاب مواد اولیه مناسب بر اساس الزامات استاندارد ISSA A143 (مورد اشاره در جداول ۲ و ۳ و بخش‌های ۲-۱ تا ۲-٤)

۲. انتخاب دانه‌بندی مصالح سنگی بر اساس اهداف، محل اجرا و فرمول کارگاهی مصالح پروژه

۳. انتخاب درصد فیلر معدنی، پلیمر و افزودنی

٤. انتخاب سه درصد مختلف برای قیر امولسیون (معمولاً ۱۰، ۱۲ و ١٤ درصد امولسیون). در طرح اختلاط میکروسرفیسینگ درصدهای فیلر معدنی، آب و قیر امولسیون نسبت به وزن خشک مصالح سنگی بیان می‌شوند.

۵. انجام آزمایش زمان اختلاط و تعیین میزان اولیه آب مخلوط (حداقل آب لازم) برای هر کدام از سه مقدار قیر امولسیون به طوری که زمان اختلاط حداقل برابر ۱۲۰ ثانیه به دست آید.

تذکر ۱: در صورتی که زمان اختلاط برای هر کدام از سه مقدار قیر امولسیون کمتر از ۱۲۰ ثانیه به دست آید، می‌بایست اجزای مخلوط (مقادیر فیلر معدنی، پلیمر، افزودنی (مرحله ۳) و یا مقدار قیر امولسیون (مرحله ٤)) اصلاح شود.

٦. انجام آزمایش آب جوشان بر روی نمونه حاصل از آزمایش زمان اختلاط

تذکر ۲: در صورت برآورده نشدن معیار آزمایش آب جوشان، می‌بایست احتمالاً مقدار قیر امولسیون را افزایش و یا اجزای مخلوط را تغییر داد.

۷. انجام آزمایش چسبندگی در دمای پروژه و تعیین میزان بهینه آب مخلوط برای هر کدام از سه مقدار قیر امولسیون به طوری که حداکثر گشتاور در زمان‌های ۳۰ و ٦۰ دقیقه پس از ساخت نمونه به دست آید. بدین منظور، برای هر کدام از سه مقدار قیر امولسیون مقادیر درصد آب تغییر داده می‌شود و مقادیر گشتاور پیچشی در زمان‌های ۳۰ و ٦۰ دقیقه پس از ساخت نمونه به دست می‌آید. با رسم منحنی‌های گشتاور ۳۰ و ٦۰ دقیقه، مقدار آب مورد نیاز برای هر کدام از سه مقدار قیر امولسیون به طوری که حداکثر گشتاور در زمان‌های ۳۰ و ٦۰ دقیقه پس از ساخت نمونه به دست آید، تعیین می‌شود.

تذکر ۳: برای هر کدام از سه مقدار قیر امولسیون، میزان آب بهینه می‌بایست طوری به دست آید که حداکثر گشتاور در زمان‌های ۳۰ و ٦۰ دقیقه، حداقل برابر ۱۲ و ۲۰ کیلوگرم‌سانتیمتر باشند. در غیر این صورت، اجزای مخلوط (مقادیر فیلر، پلیمر، افزودنی (مرحله ۳) و یا مقدار قیر (مرحله ٤)) اصلاح می‌شود.

تذکر ٤: در صورتی که بر اساس میزان آب بهینه به دست آمده، زمان اختلاط برای هر کدام از سه مقدار قیر امولسیون کمتر از ۱۲۰ ثانیه به دست آید (مقدار آب بهینه کمتر از حداقل آب لازم به دست آمده از مرحله ۵ تعیین شود)، می‌بایست اجزای مخلوط اصلاح شود.

۸. رسم نمودار مقدار قیر امولسیون در برابر مقدار آب بهینه متناظر

۹. انجام آزمایش سایش یک ساعته در شرایط مرطوب در آب ۲۵ درجه سانتیگراد برای هر کدام از سه مقدار قیر امولسیون به منظور تعیین حداقل قیر امولسیون لازم برای مخلوط میکروسرفیسینگ

۱۰. انجام آزمایش چرخ بارگذاری (مقدار ماسه چسبیده) در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد برای هر کدام از سه مقدار قیر امولسیون به منظور تعیین حداکثر قیر امولسیون ممکن برای مخلوط میکروسرفیسینگ

۱۱. رسم نتایج آزمایش‌های مراحل ۸ و ۹ در برابر مقدار قیر امولسیون و تعیین میزان قیر بهینه مخلوط میکروسرفیسینگ بر اساس نمودار در ٤ حالت زیر:

۱۱-۱- در صورتی که هر دو منحنی، زیر مقدار ۵۳۸ گرم بر متر مربع قرار بگیرند و با یکدیگر تلاقی داشته باشند، محل تلاقی دو نمودار، قیر امولسیون بهینه را به دست می‌دهد.

۱۱-۲- در صورتی که هر دو منحنی زیر مقدار ۵۳۸ گرم بر متر مربع قرار بگیرند اما با یکدیگر تلاقی نداشته باشند، طراح مجاز است با توجه به نتایج سایر آزمایش‌ها و شرایط پروژه، مقدار قیر امولسیون بهینه را مقدار یا بازه‌ای بین کمترین و بیشترین مقدار قیر امولسیون آزمایش‌شده، اعلام کند.

۱۱-۳- در صورتی که بخشی از هر دو منحنی از مقدار ۵۳۸ گرم بر متر مربع تجاوز نمایند و اختلاف قیرهای امولسیون حداقل و حداکثر (محل تقاطع منحنی‌ها با مقدار ۵۳۸ گرم بر متر مربع) از ۳ درصد بیشتر باشد، میزان بهینه قیر امولسیون برابر قیر حداکثر منهای ۱/۵ درصد به دست می‌آید.

۱۱-٤- اگر اختلاف قیرهای امولسیون حداقل و حداکثر کوچکتر و یا مساوی ۳ درصد باشد، میزان بهینه قیر امولسیون برابر میانگین قیرهای امولسیون حداقل و حداکثر تعیین می‌گردد.

۱۲.تعیین میزان آب بهینه مورد نیاز قیر بهینه از طریق نمودار مرحله ۷

۱۳.انجام آزمایش‌های کنترلی بر روی مخلوط میکروسرفیسینگ بهینه شامل:

۱۳-۱- آزمایش زمان اختلاط

۱۳-۲- آزمایش آب جوشان

۱۳-۳- آزمایش چسبندگی

۱۳-٤- آزمایش سایش در شرایط مرطوب پس از شش روز عمل‌آوری در حمام آب ۲۵ درجه سانتیگراد (به جای یک ساعت). عدد سایش در این حالت نباید از ۸۰۷ گرم بر متر مربع بیشتر شود.

۱۳-۵- آزمایش بارگذاری چرخ (جابجایی افقی و قائم).

۱٤.انجام آزمایش رده‌بندی و بررسی سازگاری مواد و مصالح میکروسرفیسینگ با یکدیگر

تذکر ۵: با توجه به مستقل بودن این آزمایش از سایر آزمایش‌های طرح اختلاط، می‌توان این آزمایش را از ابتدای شروع طرح اختلاط (پس از بند ۱) انجام داد. در صورتی که مخلوط میکروسرفیسینگ امتیاز لازم را در این آزمایش کسب ننماید، می‌بایست به بند ۱ بازگشت و مواد و مصالح را تغییر داد.

۵- تجارب آزمایشگاهی

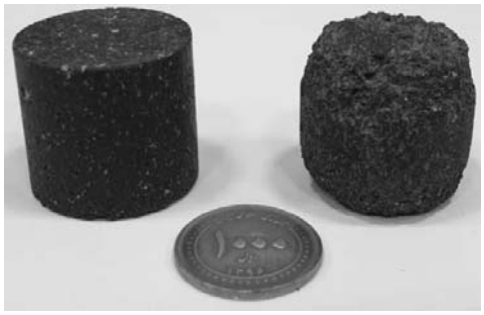
گام اول در تهیه طرح اختلاط میکروسرفیسینگ، بررسی مواد و مصالح میکروسرفیسینگ است. تجربه آزمایشگاه قیر و آسفالت شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک وزارت راه و شهرسازی نشان می‌دهد در صورتی که ویژگی‌های هر یک از اجزای مخلوط میکروسرفیسینگ در محدوده مشخصات نباشد باید در همین مرحله نسبت به اصلاح و یا تعویض آن اقدام گردد. بخشی از درخواست‌های طرح اختلاط ارسالی برای این آزمایشگاه در این مرحله با مشکل مواجه شدند. از رایج‌ترین مشکلات پیش آمده در این مرحله می‌توان به قرار نگرفتن دانه‌بندی مصالح سنگی ارسالی در محدوده مشخصات نوع ۲ و یا نوع ۳، کمتر از ٦۲ درصد بودن مقدار قیر باقیمانده امولسیون، بسیار دیرشکن بودن قیر امولسیون (زیاد بودن امولسیفایر) و آنیونیک بودن قیر امولسیون ارسالی اشاره کرد.

در گام بعدی مهم‌ترین مسأله، سازگار بودن اجزای مخلوط میکروسرفیسینگ با یکدیگر است. با توجه به این‌که در مخلوط میکروسرفیسینگ از مواد مختلفی نظیر مصالح سنگی، سیمان، آب، قیر امولسیون، لاتکس و احتمالاً افزودنی‌ها استفاده می‌شود و گیرش مخلوط

میکروسرفیسینگ با اندرکنش این مواد و به صورت شیمیایی انجام می‌شود، نیاز است همخوانی و سازگاری مواد میکروسرفیسینگ با استفاده از آزمایش رده‌بندی بررسی شود. بخش قابل توجهی از درخواست‌های طرح اختلاط ارسالی برای این آزمایشگاه، در این آزمایش، امتیاز لازم را کسب ننمودند. نمونه آزمایش رده‌بندی، بایستی پس از انجام آزمون تقریباً شکل اولیه خود را حفظ نماید. شکل ۷- الف تا ۷-د چهار نوع مخلوط میکروسرفیسینگ مختلف را قبل و پس از آزمون نشان می‌دهد که به ترتیب امتیاز ۱۲، ٦، ٤ و صفر را در آزمایش رده‌بندی بدست آوردند.

آزمایش سازگاری به نحوی بیانگر دوام مخلوط میکروسرفیسینگ نیز می‌باشد و نمی‌توان از آن صرف‌نظر نمود. به عنوان مثال شکل ۸-الف نمونه آزمایش سایش در شرایط مرطوب ساخته شده با مواد مخلوط میکروسرفیسینگ شکل ۷-ج (که هیچ امتیازی را از آزمایش رده‌بندی به دست نیاورد) نشان می‌دهد. در شکل ۸-ب پس از انجام آزمایش سایش مرطوب پس از یک ساعت غرقاب نمودن نمونه در حمام آب ۲۵ درجه سانتیگراد همه چیز عادی به نظر می‌رسد و عدد سایش حدود ٤۰۰ گرم بر متر مربع حاصل شد، در حالی که انجام آزمایش سایش پس از ٦ روز غرقاب بر روی نمونه مشابه نشان می‌دهد نمونه کاملاً ساییده شده و از هم گسیخته شد (شکل ۸-ج و ۸-د).

الف – کسب ۱۲ امتیاز در آزمایش رده بندی



ب – کسب ٦ امتیاز در آزمایش رده بندی

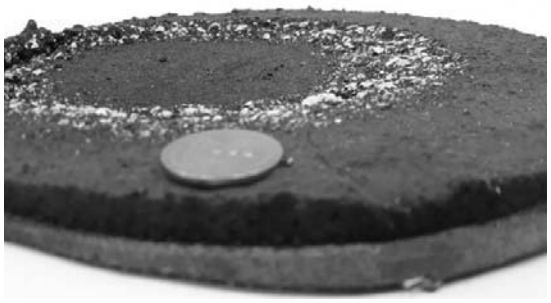
ج – کسب ٤ امتیاز در آزمایش رده بندی

د – کسب صفر امتیاز در آزمایش رده بندی

شکل ۷- نمونه‌های آزمایش رده‌بندی قبل از انجام آزمایش (سمت چپ)و بعد از انجام آزمایش (سمت راست)

الف- مخلوط میکروسرفیسینگ قبل از انجام آزمایش سایش مرطوب

ب- مخلوط میکروسرفیسینگ بعد از انجام آزمایش سایش مرطوب پس از عمل‌آوری یک ساعته



ج- مخلوط میکروسرفیسینگ بعد از انجام آزمایش سایش مرطوب پس از عمل‌آوری شش روزه

شکل ۸- اهمیت سازگاری اجزای مخلوط میکروسرفیسینگ در آزمایش سایش شش روزه

تجارب این آزمایشگاه نشان می‌دهد در صورتی که مواد و مصالح مخلوط میکروسرفیسینگ در محدوده مشخصات قرار داشته باشند و با یکدیگر سازگار باشند، غالباً با تغییر نسبت اجزای مخلوط می‌توان به طرح اختلاط مناسب دست یافت. در جدول ٤ نتایج ٤ مورد طرح اختلاط میکروسرفیسینگ ارائه شده است. مقایسه مقادیر بهینه اجزای مخلوط نشان می‌دهد:

- **درصد سیمان از کمترین مقدار (صفر درصد) تا بیشترین مقدار (۳ درصد) در طرح‌های مختلف استفاده شده است. درصد آب نیز در طرح‌های مختلف، تغییر می‌کند. بنابراین با توجه به ترکیب پیچیده میکروسرفیسینگ و تأثیرگذار بودن هر یک از اجزا در مشخصات آن، لازم است با توجه به الگوریتم بیان شده در بند ٤ نسبت به تعیین مقادیر بهینه اجزا اقدام نمود.**
- **در طرح ۱ از مقدار پلیمر بیشتری نسبت به سایر طرح‌ها استفاده شده است. با توجه به سفت‌تر شدن قیر با افزایش درصد پلیمر، مشاهده می‌شود افزایش درصد پلیمر تغییر مکان جانبی را کاهش می‌دهد.**
- **قیر امولسیون بهینه طرح اختلاط‌های انجام شده در این جدول که دانه‌بندی مصالح سنگی آنها نوع ۳ بوده است، حدود ۱۱ درصد تعیین شده است که نشان می‌دهد قیر امولسیون بهینه مخلوط‌های میکروسرفیسینگ رایج، معمولاً بین ۱۰ تا ۱۲ درصد قرار می‌گیرد.**

جدول ٤- نتایج برخی طرح اختلاط‌های میکروسرفیسینگ

	طرح ١	طرح ٢	طرح ٣	طرح ٤	محدوده مجاز
دانه‌بندی، درصد عبوری از الک‌های:					
$\frac{3}{8}$ اینچ	١٠٠	١٠٠	١٠٠	١٠٠	١٠٠
#٤	٩٠	٨٢	٨٣	٨٨	٧٠ – ٩٠
#٨	٥٩	٥٧	٥٥	٥٧	٤٥ – ٧٠
#١٦	٣٨	٣٧	٣٧	٣٦	٢٨ – ٥٠
#٣٠	٢٧	٢٥	٢٧	٢٦	١٩ – ٣٤
#٥٠	٢١	١٩	٢٠	١٧	١٢ – ٢٥
#١٠٠	١٧	١٣	١٥	١١	٧ – ١٨
#٢٠٠	١٤٫١	١٠٫٤	١٢٫٥	٩٫٤	٥ – ١٥
فیلر معدنی (سیمان)، ٪	٣	٠/٥	٠	١	٠ – ٣
قیر امولسیونی، ٪	١٠٫٥ ± ١	١٠٫٥	١١	١٠٫٧	–
آب، ٪	٥	١٠	١٠	٨	–
پلیمر (لاتکس)، ٪	٥	٣	٣	٣	٣ – ٥
زمان اختلاط، ثانیه	٣٣٠	١٢٠	٢٧٥	٢١٠	حداقل ١٢٠
پوشش قیری باقیمانده مصالح سنگی، ٪	> ٩٠	> ٩٠	> ٩٠	> ٩٠	> ٩٠
چسبندگی پس از ٣٠ دقیقه، کیلوگرم‌سانتی‌متر	١٣	١٢	١٢	١٣	حداقل ١٢
چسبندگی پس از ٦٠ دقیقه، کیلوگرم‌سانتی‌متر	٢٠	٢٠	٢٠	٢١	حداقل ٢٠
چسبندگی ماسه، گرم بر متر مربع	٤١٣	٤٢٣	٥١٥	٤٢٨	حداکثر ٥٣٨
عدد سایش (١ ساعت غرقاب)، گرم بر متر مربع	٧٢	٢١١	٥٣٠	٤٤٣	حدکثر ٥٣٨
عدد سایش (٦ روز غرقاب)، گرم بر متر مربع	١٨٤	٤٥٥	٧٩٥	٧٨٣	حدکثر ٨٠٧
تغییر مکان جانبی، ٪	٠/٦	٤/٨	٤/٥	٣/٧	حداکثر ٥
چگالی، گرم بر سانتی‌متر مکعب	١/٩٣	١/٩٥	٢/٠٨	١/٩٥	حداکثر ٢/١٠
رده‌بندی (سازگاری)	١١	١١	١١	١٢	حداقل ١١

۶- نتیجه گیری

میکروسرفیسینگ یکی از روش‌های نگهداری روسازی راه شامل لایه‌ای از مخلوط مصالح سنگی، قیر امولسیون، آب، پلیمر و فیلر معدنی (نظیر سیمان و آهک) است که برای اصلاح سطح یا جلوگیری از خرابی روسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این یادداشت فنی ضمن معرفی اجمالی مخلوط میکروسرفیسینگ، الگوریتم طرح اختلاط میکروسرفیسینگ و آزمایش‌های مربوط به آن بیان شده است. همچنین تجارب به دست آمده از برخی طرح‌های اختلاط انجام شده ارائه شده است.

۷- مراجع

1. Hein, David, et al. "Impact of recent technology advancements on pavement life." Proceedings of the Annual Conference of the Transportation Association of Canada. St. John's, 2003.
2. Campbell, R. "Asphalt in pavement maintenance." The Asphalt Handbook (2007): 569-616.
3. Broughton, Benjamin, and Soon-Jae Lee. Micro-surfacing in Texas. No. FHWA/TX-12/0-6668-1. Texas Transportation Institute, Texas A & M University System, 2012.
4. Gransberg, D. D. "NCHRP Synthesis 411: Micro-surfacing; a synthesis of highway practices. "Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC (2010).
5. Raza, Hassan. STATE-OF-THE-PRACTICE DESIGN, CONSTRUCTION, AND PERFORMANCE OF MICRO-SURFACING. FINAL REPORT. No. FHWA-SA-94-051. 1994.