

ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر اصلاح قیر امولسیون با محلول نانوالیاف سلولزی بر بهبود عملکرد آسفالت حفاظتی اسلاری سیل

مهدی ولی زاده*، دانشجوی دکتری راه و ترابری، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور

تهران، ایران

شاهین شعبانی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور تهران، صندوق پستی ۳۶۹۷-۱۹۳۹۵،

ایران

علیرضا خاوندی خیای، گروه مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، ایران

Email: mehdivalizadeh6339@yahoo.com

دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۷ - پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۸

چکیده

یکی از اقدامات مؤثر در نگهداری پیشگیرانه راه‌ها، استفاده از آسفالت حفاظتی اسلاری سیل است. در این پژوهش، از محلول نانوالیاف سلولزی به میزان صفر (به‌عنوان نمونه شاهد)، ۳، ۵، ۷ و ۹ درصد بر اساس وزن جامد قیر جهت اصلاح قیر امولسیون استفاده گردید. ابتدا، ارزیابی قیرهای امولسیون اصلاح‌شده پلیمری با استفاده از شاخص‌های فیزیکی همچون ویسکوزیته سیپولت‌فیورل، نقطه نرمی و درجه نفوذ انجام شد. سپس، از قیرهای امولسیون اصلاح‌شده پلیمری در مخلوط‌های اسلاری سیل استفاده گردید. ارزیابی مخلوط‌های آسفالتی به‌واسطه آزمایش‌های چسبندگی مرطوب، سایش در شرایط مرطوب، بارگذاری چرخ-جابه‌جایی و بارگذاری چرخ-چسبندگی ماسه انجام شد. نتایج آزمایش‌های قیری نشان داد که استفاده از محلول نانوالیاف سلولزی منجر به بهبود خواص قیر شامل کاهش درجه نفوذ، افزایش نقطه نرمی و افزایش ویسکوزیته می‌شود. با افزایش میزان محلول نانوالیاف سلولزی از صفر به ۵ درصد، تغییرات درجه نفوذ و نقطه نرمی قابل توجه بود. این در حالی است که با افزایش مقدار محلول نانوالیاف سلولزی از ۵ به ۹ درصد، تغییرات درجه نفوذ و نقطه نرمی محسوس نبود. نتایج آزمایش‌های آسفالتی روی نمونه‌ها به‌وضوح نشان داد که مخلوط‌های حاوی قیر امولسیون اصلاح‌شده موجب بهبود عملکرد مخلوط اسلاری سیل خواهد شد. به‌طور کلی، عملکرد اسلاری سیل حاوی محلول نانوالیاف سلولزی به میزان ۵ درصد، در چسبندگی مرطوب، مقاومت در برابر سایش و مقاومت در برابر جابه‌جایی به ترتیب به میزان ۲۳/۱، ۴۲/۷ و ۴۲ درصد بیشتر از مخلوط شاهد بود.

واژه‌های کلیدی: اسلاری سیل، قیر امولسیون اصلاح‌شده، نانوالیاف سلولزی.

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، بسیاری از کشورها افزایش حجم ترافیک را تجربه کرده و این افزایش به معنای آن است که روسازی‌ها در معرض تنش‌های بیشتری قرار دارند. تراکم بیشتر ترافیک از نظر وسایل نقلیه تجاری، بار بیش از حد کامیون‌ها و تغییر قابل توجه در دمای روزانه و فصلی روسازی‌ها سبب ایجاد خرابی‌هایی از قبیل شن زدگی، شیارشدگی، ترک‌های خستگی و قیرزدگی شده‌اند (زال نژاد و حسامی، ۱۳۹۸). به منظور حفاظت از سرمایه‌های موجود و نیز به دلیل محدود بودن بودجه و سرمایه در کشور، نگهداری و حفاظت رویه‌های آسفالتی امری ضروری است. حفاظت از روسازی یک سیستم برنامه‌ریزی شده است که در زمان مناسب برای به حداکثر رساندن عمر مفید روسازی استفاده شده و طول عمر روسازی را افزایش می‌دهد (ابوطالبی اصفهانی و ختائی، ۲۰۲۲؛ پیتنجر و گرانسبرگ، ۲۰۲۰؛ باس و کلیپول، ۲۰۲۲). یکی از اساسی‌ترین و رایج‌ترین روش‌ها برای حفظ عملکرد طولانی‌مدت روسازی آسفالت، تعمیر و نگهداری پیشگیرانه است. نگهداری پیشگیرانه باعث به تأخیر انداختن روند خرابی، حفظ ساختار روسازی از شرایط محیطی و کاهش نیاز به ترمیم اساسی می‌شود. این نوع نگهداری زمانی انجام می‌شود که هنوز آسیب قابل توجهی به روسازی نرسیده و به مرحله حساس نرسیده باشد (ابوطالبی اصفهانی و ختائی، ۲۰۲۰؛ زال نژاد و حسامی، ۲۰۲۰). یکی از اقدامات مؤثر در نگهداری پیشگیرانه راه‌ها، استفاده از اسلاری سیل بوده که شامل ترکیبی از امولسیون اصلاح‌شده پلیمری، سنگدانه معدنی، فیلر فعال (معمولاً سیمان)، آب و مواد افزودنی (در صورت نیاز جهت کنترل شکست قیر امولسیون) است و اغلب به‌عنوان مخلوط سطحی با هدف بهبود اصطکاک سطح، اصلاح شیارشدگی و افزایش عمر روسازی مورد استفاده واقع می‌شود (بهارگاو و همکاران، ۲۰۲۰؛ کی-منش و همکاران، ۲۰۲۱ a، ۲۰۲۱ b).

برای ارتقاء عملکرد آسفالت حفاظتی و به حداقل رساندن خرابی‌های آن، استفاده از قیر امولسیون اصلاح‌شده پیشنهاد شده است. قیر امولسیون اصلاح‌شده یکی از راه‌حل‌های مؤثر جهت انسجام و چسبندگی بهتر، مقاومت زودرس بیشتر و بهبود زمان گیرش در مخلوط‌های آسفالت سرد است (عابدینی و همکاران، ۲۰۱۷؛ هو و همکاران، ۲۰۱۹؛ جین و همکاران، ۲۰۱۹؛ پن و همکاران، ۲۰۱۹). قیر امولسیون اصلاح‌شده در آسفالت‌های سرد مورد استفاده واقع شده و سازگار با محیط‌زیست است زیرا قبل از استفاده روی سطح جاده به گرمای اضافی نیاز ندارد. فرآیند گرمایش باعث آلودگی محیط‌زیست خواهد شد زیرا گردوغبار و بخار سمی طی فرآیند گرمایش تولید می‌شود. یکی از اجزای مهم و تأثیرگذار بر عملکرد مخلوط اسلاری سیل، استفاده از انواع پلیمر در قیر امولسیون جهت اصلاح و بهبود خواص آن است (پولیوت و همکاران، ۲۰۰۳؛ کی‌منش و همکاران، ۲۰۲۱ a). در سال‌های گذشته، تحقیقات وسیعی روی نانومواد به‌عنوان اصلاح‌کننده قیر و مخلوط آسفالتی صورت گرفته است. تحقیقات اخیر در مورد کاربرد نانومواد در توسعه ویژگی عملکردی قیر و مخلوط آسفالتی بیان داشته که نانومواد به علت دارا بودن سطح مخصوص وسیع و ایجاد شبکه‌های قوی در قیر، در بیشتر مواقع باعث سخت‌شدگی قیر، افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی، افزایش مدول برجهندگی آسفالت و در برخی موارد افزایش عمر خستگی قیر و مخلوط آسفالتی شده است. یکی از انواع این نانومواد، نانوالیاف سلولزی، الیافی مشتق شده از چوب است که از طریق خرد کردن الیاف چوب تا مقیاس نانو تهیه می‌شود (آدا و همکاران، ۲۰۱۲). استفاده از منابع تجدیدپذیر برای کاربردهای صنعتی به دلیل افزایش تقاضا برای جایگزین شدن با مواد نفتی تجدیدناپذیر و کمیاب در حال افزایش است. در این راستا، نانوالیاف سلولزی مشتق شده از سلولز، که یکی از فراوان‌ترین نانوپلیمرهای موجود روی زمین است،

اقتصادی در آن شود. سلولز می تواند باعث بهبود ظرفیت اتصال مخلوط های آسفالت حفاظتی شود و بر خصوصیات دینامیک آن تأثیر گذارد. استفاده از نانوسلولز به عنوان افزودنی سبب بهبود عملکرد شیارشدگی، توانایی مقاومت در برابر ترک خستگی و مقاومت در برابر آسیب های رطوبتی می گردد.

تأثیر مهم افزودنی های اصلاح کننده قیر در چسباننده های قیری و مخلوط های آسفالتی گرم مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته، اما مطالعات محدودی در مورد تأثیرپذیری آن در مخلوط های سرد آسفالتی، به خصوص اسلاری سیل، صورت گرفته است (احمدزاده و همکاران، ۲۰۱۷). عملکرد قیر امولسیون اصلاح شده عموماً به ویژگی های فنی باقی مانده قیر امولسیون بعد از تبخیر رطوبت وابسته است. به طور کلی، قیرهای امولسیونی اصلاح شده با محلول نانوالیاف سلولزی تأثیر مهمی بر خصوصیات مکانیکی و رئولوژی آسفالت های سرد دارند. باقی مانده قیر امولسیون به عنوان یک عامل با اهمیت و پارامتر کنترل کیفیت آسفالت های سرد در نظر گرفته شده و عملکرد آن مرتبط با مشخصات طول دوره خدمت است (شنگ و همکاران، ۲۰۱۸؛ شیائو و همکاران، ۲۰۱۹؛ سان و همکاران، ۲۰۲۰). بنابراین، یکی از اهداف این تحقیق، ارائه آسفالت حفاظتی سردی است که در مصرف انرژی و در مدیریت تعمیر و نگهداری گزینه ای مقرون به صرفه محسوب می شود. لذا، در این تحقیق، با ساخت نمونه هایی از مخلوط اسلاری سیل، به بررسی اثر محلول نانوالیاف سلولزی بر خواص این نوع آسفالت حفاظتی در مقایسه با نمونه شاهد پرداخته شده است. در این راستا، ابتدا خصوصیات فیزیکی باقی مانده قیر امولسیون اصلاح شده مقایسه و بررسی شده و سپس عملکرد هر یک از مخلوط ها در آسفالت حفاظتی اسلاری سیل مورد مطالعه قرار گرفته است.

بیشترین توجه را به خود جلب کرده است. نانوالیاف سلولزی به دلیل ویژگی های منحصر به فرد و جالب از جمله فراوانی منابع آن، تجدیدپذیری، زیست تخریب پذیری، خواص مکانیکی و ابعاد نانویی، طیف گسترده ای از خصوصیات قابل کشف را ارائه می دهند. نانوسلولز به عنوان یکی از نانومواد جدید با قابلیت های زیاد همچون پایداری مناسب، خواص مکانیکی و اثر تقویتی قوی بسیار قابل توجه است و کاربردهای متعدد و قابل دسترسی پیدا کرده است (ایچهورن، ۲۰۲۰). اهمیت این دسته از مواد باعث حرکت حیاتی توسعه نانوسلولزها در صنایع کاغذ و مقوا، صنایع نانوکامپوزیت ها، تجهیزات پزشکی، دارویی، تجهیزات الکترونیکی، صنایع چوب و مواد ساختمانی، بازیافت نفت و خودروسازی شده است. مطالعه روی نانوالیاف سلولزی به عنوان فاز تقویت کننده در نانوکامپوزیت ها در چند سال اخیر آغاز شده است. از آن زمان به بعد پژوهش های گوناگونی در این مورد منتشر شده است. از بهترین ویژگی های نانوالیاف سلولزی می توان به فراوانی منابع آن، تجدیدپذیری، زیست تخریب پذیری، مصرف کم انرژی و به ازای هر واحد محصول، سایش کم، طول عمر بیشتر، انعطاف پذیری مناسب و کشش خوب، مقاومت و مدول زیاد و قیمت نسبتاً مناسب اشاره کرد (ایچهورن، ۲۰۲۰). برخی از سنگدانه های مورد استفاده در مخلوط آسفالتی آب دوست هستند و در هنگام بارندگی آب را جذب کرده و منجر به ایجاد خرابی رطوبتی و در ادامه با شدت گرفتن دیگر خرابی ها منجر از بین رفتن روسازی های آسفالتی می شوند (خان و جین، ۲۰۲۰). تحقیق حاضر، به منظور تولید نتایج آزمایش های مفید، از نانوالیاف سلولزی به عنوان افزودنی در قیر امولسیون استفاده می کند. انتظار می رود که نتایج آزمون به توسعه مخلوط آسفالت حفاظتی (اسلاری سیل) بر پایه نفتی کمک کند تا سبب پایداری سیستم حمل و نقل و صرفه

۲. مصالح

اجزای آسفالت حفاظتی شامل مصالح، قیر امولسیون کاتیونی اصلاح شده با پلیمر، آب، فیلر فعال معدنی و در صورت لزوم افزودنی‌های شیمیایی برای کنترل زمان شکست قیر امولسیون است. هر کدام از مواد مطابق با استاندارد ASTM D63910 و دستورالعمل JSSA A105، بایستی دارای ویژگی‌هایی باشند که در ادامه بررسی می‌گردد.

۱-۲. قیر امولسیون اصلاح شده با پلیمر

در این تحقیق، برای تهیه قیر امولسیون پلیمری، از قیر با رده نفوذ ۶۰ - ۷۰ تهیه شده از شرکت نفت پاسارگاد و امولسیفایر کاتیونی کندشکن با نام تجاری CECA ساخت کشور فرانسه استفاده گردید. در ادامه، جهت اصلاح قیر امولسیون از محلول نانوالیاف سلولزی با نام اختصاری CNF ساخت کشور چین با درجه خلوص ۹۹/۳ درصد، استفاده شده که در شکل ۱ نشان داده شده است. در این مطالعه، از یک آسیاب کلونیدی با سرعت

چرخشی ۲۸۴۰ دور در دقیقه برای تهیه قیر امولسیون اصلاح شده استفاده گردید. جهت اصلاح قیرهای امولسیون از فرمولاسیون ثابت و روش پیش‌اختلاط استفاده شد. به طوری که در این روش، افزودنی بر اساس وزن جامد قیر به محلول صابونی حاوی آب، اسید و امولسیفایر اضافه شده و به مدت ۶۰ ثانیه در دستگاه امولسیون ساز مخلوط شد. سپس، قیر به مقدار ۵۷ درصد در دمای ۱۴۰ درجه سلسیوس به آن اضافه شده و مورد اختلاط و امولسیون سازی قرار گرفت. تولید قیر امولسیون مطابق استاندارد ASTM D2397 و مطالعات دیگر پژوهشگران انجام شد (ایزدی و همکاران، ۱۳۹۹؛ کی-منش و همکاران، ۱۳۹۹). مشخصات قیر امولسیون مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ آمده است. بیان این موضوع ضروری است که آزمایش تبخیر سرد قیر امولسیون اصلاح شده با پلیمر مطابق با ASTM D7497 روی قیرهای امولسیونی انجام گرفته است (ASTM D7497، ۲۰۲۱). سپس، آزمایش‌های نقطه نرمی قیر و درجه نفوذ روی قیر باقیمانده حاصل از روش تبخیر در دمای کم انجام شده است.



شکل ۱. محلول نانوالیاف سلولزی

جدول ۱. مشخصات قیر امولسیون مورد استفاده در این پژوهش (بدون افزودنی)

آزمایش	استاندارد آزمایش	نتیجه آزمایش
کندروانی سیبولت فیورل در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، ثانیه	AASHTO T59	۲۸
نشست (پایداری) در انبارکردن قیر امولسیون، ۲۴ ساعت (%)	ASTM D6930	۰/۲
تقطیر قیر امولسیون، جرم وزنی (%)	ASTM D7497	۵۷
الک (%)	ASTM D244	۰/۲
اندود (%)	AASHTO T59	۹۸
بار ذرات	AASHTO T59	مثبت

۲-۲. مصالح سنگی، فیلر فعال معدنی (سیمان) و آب

مصالح در برابر تغییرات شرایط جوی و آب‌وهوایی و همچنین عملکرد مصالح در برابر سایش و ضربه مناسب باشد. در ادامه، در این پژوهش، از سیمان پرتلند نوع II تهیه شده از کارخانه سیمان فیروزکوه به میزان ۱ درصد وزنی به‌عنوان فیلر معدنی فعال جهت افزایش چسبندگی بین مصالح سنگی و تسریع زمان گیرش و عمل‌آوری، در مخلوط‌های اسلاری سیل استفاده شد. منظور از آب اضافه شده، آبی است که در هنگام هم زدن مخلوط اضافه شده و علاوه بر آبی است که در قیر امولسیونی وجود دارد. آب اضافه شده، هیدراسیون سیمان را تسریع کرده و باعث پوشش بهتر مصالح و بهبود کارآیی مخلوط می‌شود (یوهانس، ۲۰۱۴؛ کی‌منش و همکاران، ۲۰۲۱ b).

در این پژوهش، مصالح سنگی کوهی در اندازه ۵-۰ میلی‌متر مورد استفاده واقع شد. دانه‌بندی مورد استفاده، دانه‌بندی نوع II مطابق با دستورالعمل ISSA A105 بوده و محدوده آن مطابق جدول ۲ است. ویژگی سنگدانه‌های مخلوط پس از آزمایش در این پژوهش در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است، ارزش ماسه‌ای، سلامت در برابر سولفات سدیم و سایش به‌وسیله لس‌آنجلس مصالح سنگی قابل قبول بوده، و به همین جهت انتظار می‌رود پایداری مشخصات آسفالت، به‌خصوص در هنگام یخبندان و حضور رطوبت، عملکرد

جدول ۲. دانه‌بندی مصالح سنگی اسلاری سیل

اندازه الک	دانه‌بندی انتخابی نوع II	محدوده نوع II دستورالعمل ISSA A105	درصد عبور کرده از الک
۴/۷۵ میلی‌متر (شماره ۴)	۱۰۰	۱۰۰-۹۰	
۲/۳۶ میلی‌متر (شماره ۸)	۷۲	۹۰-۶۵	
۱/۱۸ میلی‌متر (شماره ۱۶)	۴۶	۷۰-۴۵	
۶۰۰ میکرون (شماره ۳۰)	۳۰	۵۰-۳۰	
۳۰۰ میکرون (شماره ۵۰)	۲۱	۳۰-۱۸	
۱۵۰ میکرون (شماره ۱۰۰)	۱۶	۲۱-۱۰	
۷۵ میکرون (شماره ۲۰۰)	۱۰	۱۵-۵	

جدول ۳. خصوصیات مصالح سنگی

مشخصات مطابق ISSA A105	ریزدانه	درشت دانه	استاندارد	آزمایش‌ها
-	۲/۶۴	۲/۶۳	ASTM C127 & C128	وزن مخصوص حقیقی (gr/cm ³)
-	۱/۳۷	۱/۱۱	ASTM C127 & 128	درصد جذب آب
حداقل ۴۵	۶۷	-	ASTM D2419	ارزش ماسه‌ای مصالح ریزدانه و خاک‌ها (%)
حداکثر ۱۵	۲	۰/۲	ASTM C88	سلامت مصالح با سولفات سدیم (%)
حداکثر ۳۵	-	۲۶	ASTM C131	مقاومت سایشی در ماشین لس آنجلس (%)

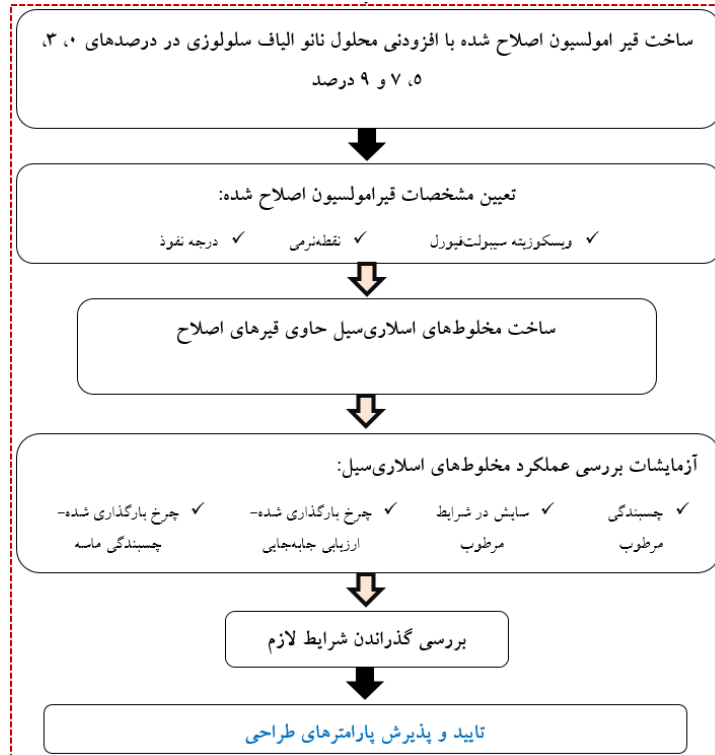
۳. برنامه آزمایشگاهی و آزمایش‌ها

در این مطالعه، از قیر امولسیون معمولی به‌عنوان نمونه شاهد استفاده شده و در ادامه محلول نانوالیاف سلولزی هر کدام به میزان ۳، ۵، ۷ و ۹ درصد بر اساس وزن جامد قیر با نمونه شاهد مقایسه شدند. کدگذاری هر یک از نمونه‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. ابتدا ارزیابی قیرهای امولسیون اصلاح‌شده پلیمری با استفاده از شاخص‌های فیزیکی همچون درجه نفوذ، نقطه نرمی و ویسکوزیته سیولت‌فیورل انجام شد. سپس، از قیرهای امولسیون اصلاح‌شده پلیمری در مخلوط‌های اسلاری سیل استفاده گردید. طراحی اسلاری سیل و آزمایش‌های مرتبط با آن

به ترتیب در دستورالعمل و آیین‌نامه ISSA A105 و ASTM D3910 ارائه شده است. طرح اختلاط و ارزیابی عملکرد مخلوط‌ها با آزمایش‌های زمان اختلاط، چسبندگی مرطوب، سایش در شرایط مرطوب، تعیین حداکثر قیر به‌وسیله چرخ بارگذاری شده- چسبندگی ماسه و ارزیابی میزان جابه‌جایی عمودی با چرخ بارگذاری شده انجام می‌شود (زال نژاد و حسامی، ۲۰۲۰؛ کی‌منش و همکاران، ۲۰۲۱ b). مقدار بهینه قیر امولسیونی توسط نتایج آزمایش‌های چرخ بارگذاری شده- چسبندگی ماسه و سایش در شرایط مرطوب مشخص می‌شود. روند کلی آزمایش‌ها در این پژوهش در شکل ۲ ارائه شده است.

جدول ۴. درجه‌بندی مخلوط‌های اسلاری سیل حاوی قیرهای امولسیون با انواع پلیمر در درصد‌های مختلف

نام‌گذاری اختصاری قیر امولسیون اصلاح‌شده با محلول نانوالیاف سلولزی	مقدار محلول نانوالیاف سلولزی اضافه شده بر اساس وزن جامد قیر (%)
CNF0	۰
CNF3	۳
CNF5	۵
CNF7	۷
CNF9	۹



شکل ۲. روند پژوهش در این مطالعه

۳-۱. آزمایش‌های تعیین مشخصات قیر امولسیون پلیمری

در این مطالعه، قیر امولسیون و باقی‌مانده آن با استفاده از آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی و سیبولت فیورل به ترتیب برای اندازه‌گیری سفتی (میزان نفوذ)، نقطه نرمی و ویسکوزیته مورد بررسی قرار گرفت.

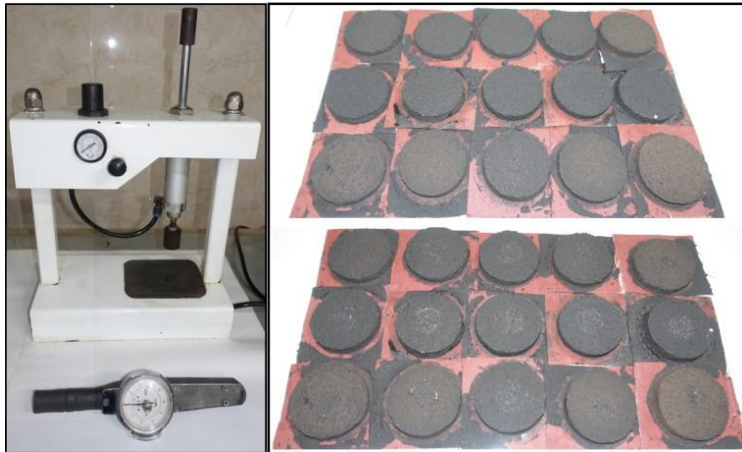
۳-۲. آزمایش‌های طرح اختلاط و عملکرد مخلوط اسلاری سیل

آزمایش‌های طرح اختلاط و ارزیابی عملکرد مخلوط‌های اسلاری سیل در این پژوهش زمان اختلاط، چسبندگی مرطوب، سایش در شرایط مرطوب، چرخ بارگذاری شده- چسبندگی ماسه و چرخ بارگذاری شده-

جابه‌جایی بوده که هر کدام از آن‌ها در ادامه شرح داده شده است.

آزمایش زمان اختلاط در طراحی مخلوط شامل اختلاط قیر امولسیون کاتیونی اصلاح شده با پلیمر، مصالح سنگی، فیلر فعال (معمولاً سیمان) و آب است. در آسفالت حفاظتی اسلاری سیل ضروری است تا از شکست زودهنگام قیر امولسیونی جلوگیری شود (ISSA, 2017e).

جهت تعیین چسبندگی اولیه، عمل‌آوری و همچنین تعیین حداقل زمان مناسب برای بازگشایی ترافیک عبوری از روی آسفالت حفاظتی اسلاری سیل، از آزمایش چسبندگی مرطوب استفاده می‌شود (ISSA, 2017d). نمایشی از دستگاه ارزیابی چسبندگی و نمونه‌های قبل و بعد از آزمایش در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳. نمایی از دستگاه آزمایش چسبندگی و نمونه‌ها بعد از آزمایش

با دستورالعمل ISSA A105، به ۸۰۷ گرم بر متر مربع محدود می‌شود.

ویژگی‌های تغییر شکل مخلوط‌های اسلاری سیل تحت بار ترافیک شبیه‌سازی شده با آزمایش چرخ بارگذاری شده-جابه‌جایی نشان داده می‌شود (ISSA، b ۲۰۱۷). نمایی از دستگاه چرخ بارگذاری و نمونه‌های آن در شکل ۵ نشان داده شده است.

مخلوط‌های اسلاری سیل، تعیین می‌شود (ISSA، a ۲۰۱۷).

حداقل مقدار قیر امولسیون در آزمایش سایش در شرایط مرطوب به دلیل جلوگیری از وقوع خرابی شن‌زدگی اندازه‌گیری می‌شود. سپس، مقدار از دست رفتن سنگدانه نمونه‌ها، بعد از سایش مشخص می‌شود (ISSA، c ۲۰۱۷). دستگاه آزمایش سایش در شرایط مرطوب و نمونه‌های آن در شکل ۴ ارائه شده است. حداکثر افت وزنی ناشی از سایش در یک ساعت مطابق در آزمایش چرخ بارگذاری شده-چسبندگی ماسه، حداکثر قیر جهت جلوگیری از خرابی قیرزدگی در



شکل ۴. نمایی از دستگاه آزمایش WTAT و نمونه‌های آن



شکل ۵. دستگاه چرخ بارگذاری- ارزیابی جابه‌جایی و نمونه‌های آن

جدول ۶ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش محلول نانوالیاف سلولزی از صفر به ۵ درصد، نقطه نرمی افزایش می‌یابد. افزایش نقطه نرمی مطلوب است، به دلیل آنکه قیر با نقطه نرمی زیاد ممکن است کمتر نسبت به تغییرات دمایی حساس باشد و می‌توان انتظار داشت که آسفالت ساخته شده با این نوع قیرها در مقابل تغییرشکل‌های دائمی و شیار شدگی مسیر چرخ در دمای زیاد شرایط عملکردی روسازی مقاوم‌تر باشد و در نهایت پایداری آن‌ها نسبت به تغییرات دمای محیط بیشتر خواهد بود. در حقیقت، به دلیل کاربرد قیر امولسیون در آسفالت‌های سرد، فرآیند تقطیر و تبخیر در دماهای زیاد برای بازیابی قیر باقی‌مانده نمی‌تواند عمل‌آوری میدانی را شبیه‌سازی کند و باعث پیرشدگی، جدایی پلیمر از قیر، آسیب رساندن به اصلاح‌کننده‌ها و اکسیداسیون بیشتر از نمونه‌های واقعی میدانی می‌گردد (پراپیتراکول و همکاران، ۲۰۱۰؛ زال نژاد و حسامی، ۲۰۲۰).

۴. نتایج و بحث

۴-۱. نتایج مشخصات قیر امولسیون اصلاح شده با انواع پلیمر

مطابق جدول ۵، CNF3، CNF5، CNF7 و CNF9 و ویسکوزیته قیر را به ترتیب ۱۴، ۳۲، ۲۳ و ۱۸ درصد نسبت به قیر شاهد (CNF0) افزایش داده و درجه نفوذ را به ترتیب ۵، ۱۳، ۹ و ۸ درصد نسبت به قیر شاهد کاهش می‌دهند. افزایش ویسکوزیته و کاهش درجه نفوذ به ترتیب نشان‌دهنده کندروانی و سفتی زیاد قیرهای امولسیونی اصلاح‌شده با محلول نانوالیاف سلولزی می‌باشد. با افزایش مقدار محلول نانوالیاف سلولزی از صفر به ۵ درصد، تغییرات درجه نفوذ و نقطه نرمی قابل توجه است. این در حالی است که با افزایش آن از ۵ به ۹ درصد، تغییرات درجه نفوذ و نقطه نرمی محسوس نیست. تأثیر افزایش درصد افزودنی بر نقطه نرمی در

جدول ۵. خصوصیات فیزیکی قیر امولسیون

استاندارد	محدوده آزمایش	CNF9	CNF7	CNF5	CNF3	CNF0	نمونه
ASTM D88	۱۰۰-۲۰	۲۶	۲۸	۲۹	۲۵	۲۲	سیبولت فیورل
ASTM D5	۹۰-۴۰	۵۹	۵۷	۵۶	۶۱	۶۴	درجه نفوذ
ASTM D36	-	۵۸	۶۱	۶۲	۵۷	۵۴	نقطه نرمی

۴-۲. نتایج عملکرد مخلوط‌های اسلاری سیل

۴-۲-۱. آزمایش زمان اختلاط

در جدول ۶، مقادیر مناسب آب، سیمان و مقادیر اولیه قیر امولسیون در سه سطح مشخص گردیده است. در این آزمایش، برای هر یک از مخلوط‌های حاوی درصد‌های مختلف قیر امولسیون، حداقل زمان اختلاط ۱۸۰ ثانیه مورد بررسی واقع شده است. همان‌طور که مشاهده

می‌شود، با افزایش درصد قیر امولسیون در همه مخلوط‌ها، به دلیل رطوبت بیشتر، میزان آب برای رساندن زمان اختلاط به حد مشخص شده ۱۸۰ ثانیه در دستورالعمل ISSA TB113 کاهش یافته است. از سوی دیگر، با افزایش درصد محلول نانوالیاف سلولزی، میزان آب برای رساندن زمان اختلاط به محدوده دستورالعمل ISSA کاهش یافت. به عبارت دیگر، با افزودن نانوالیاف محلول، کارایی تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

جدول ۶. آزمایش زمان اختلاط برای مخلوط‌های اسلاری سیل

CNF9			CNF7			CNF5			CNF3			CNF0			نوع مخلوط
۸/۵	۸/۰	۷/۵	۸/۵	۸/۰	۷/۵	۸/۵	۸/۰	۷/۵	۸/۵	۸/۰	۷/۵	۸/۵	۸/۰	۷/۵	درصد قیر باقی‌مانده
۷	۷	۷/۵	۷	۷/۵	۸	۷/۵	۷/۵	۸	۸	۸/۵	۸/۵	۸	۹	۹	درصد آب
۱۸۵	۱۸۲	۱۸۳	۱۸۴	۱۸۴	۱۸۳	۱۸۳	۱۸۵	۱۸۵	۱۸۳	۱۸۷	۱۸۴	۱۸۲	۱۸۴	۱۸۳	زمان اختلاط به دست آمده

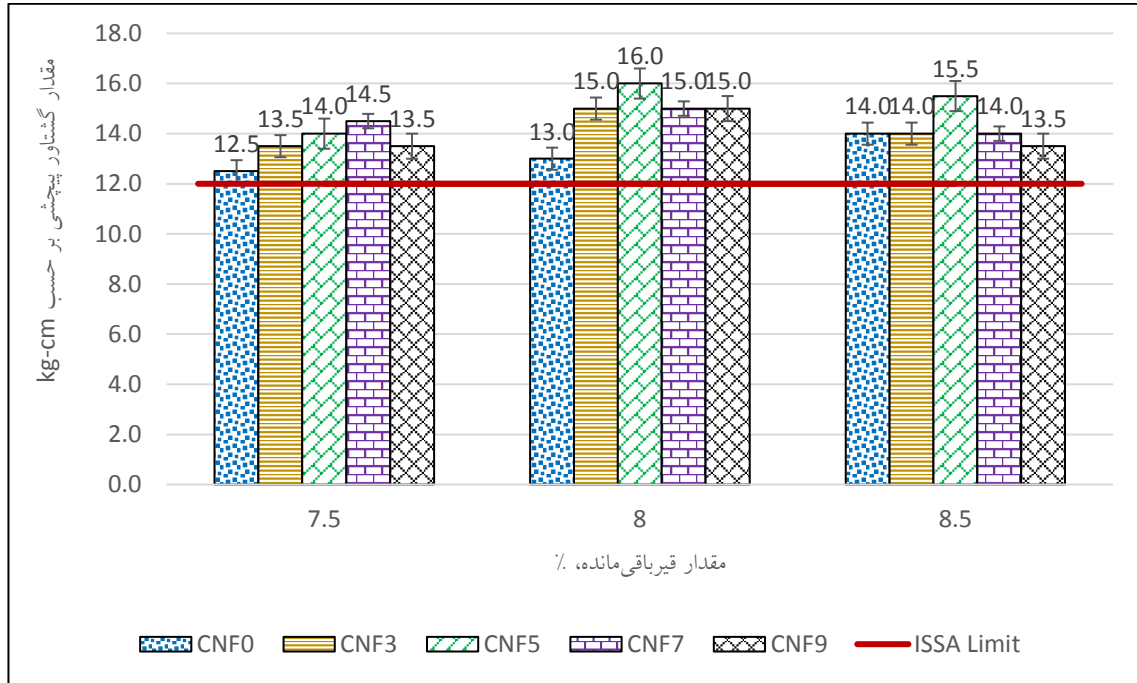
۴-۲-۲. آزمایش چسبندگی مرطوب

برای مخلوط‌های آسفالتی، نتایج آزمایش چسبندگی مرطوب در زمان‌های ۳۰ و ۶۰ دقیقه مطابق شکل‌های ۶ و ۷ است. با توجه به نتایج به دست آمده، تمامی مخلوط‌ها با توجه به محدوده مشخص دستورالعمل، گیرش و مقاومت لازم برای بازگشایی ترافیک به ترتیب در مدت زمان ۳۰ و ۶۰ دقیقه را کسب کرده‌اند. به طوری که در قیر باقی‌مانده ۸ درصد، مخلوط‌های CNF5، CNF3، CNF7 و CNF9 نسبت به نمونه شاهد (CNF0) به ترتیب موجب افزایش چسبندگی در مدت زمان ۳۰ دقیقه به میزان ۳/۸، ۲۳/۱، ۱۵/۴ و ۱۵/۴ و در مدت زمان یک ساعت به میزان ۴/۵، ۲۲/۷، ۱۸/۲ و ۱۳/۶ شده‌اند. در این خصوص، بیشتر مقدار چسبندگی در این آزمایش مربوط

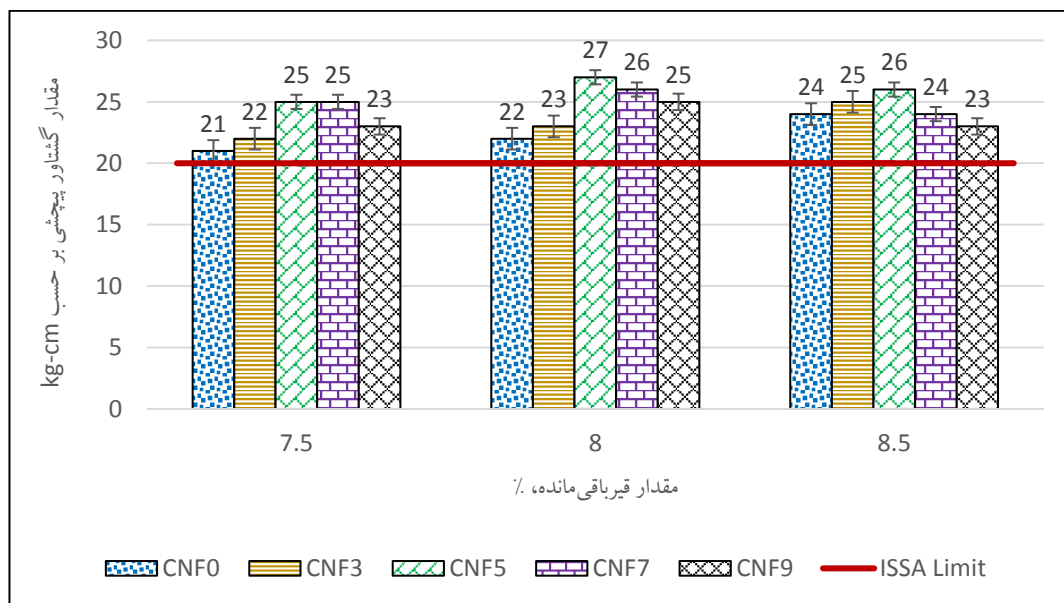
به نمونه‌های CNF5 و CNF7 در تیمار قیر امولسیون ۸ درصد به ترتیب برابر ۲۷ و ۲۶ کیلوگرم- سانتی‌متر بوده است. مقدار بهینه افزودنی قیر در بالا بردن چسبندگی با توجه به نتایج ۵ درصد بوده و افزایش مقدار آن به بیش از ۵ درصد در اصلاح قیر امولسیون، تفاوت معنی‌داری در نتایج ایجاد نخواهد کرد. نکته دیگر که در شکل حائز اهمیت است این است که در مدت زمان یک ساعت در مخلوط‌های CNF5، CNF7، CNF9 با افزایش قیر از ۷/۵ به ۸ درصد، چسبندگی به بیشترین مقدار رسیده و سپس با افزایش قیر به ۸/۵ درصد، مقدار چسبندگی کاهش می‌یابد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش درصد قیر تا مقدار معینی، چسبندگی در این نمونه‌ها افزایش یافته و سپس با افزایش بیشتر مقدار قیر

مقدار چسبندگی با افزایش درصد قیر امولسیون CNF3 سیر صعودی داشته است.

امولسیون و به تبع آن افزایش زمان عمل‌آوری، چسبندگی کاهش می‌یابد. در حالی که در نمونه‌های CNF0 و



شکل ۶. نتایج آزمایش چسبندگی در ۳۰ دقیقه برای هر یک از مخلوط‌های اسلاری سیل

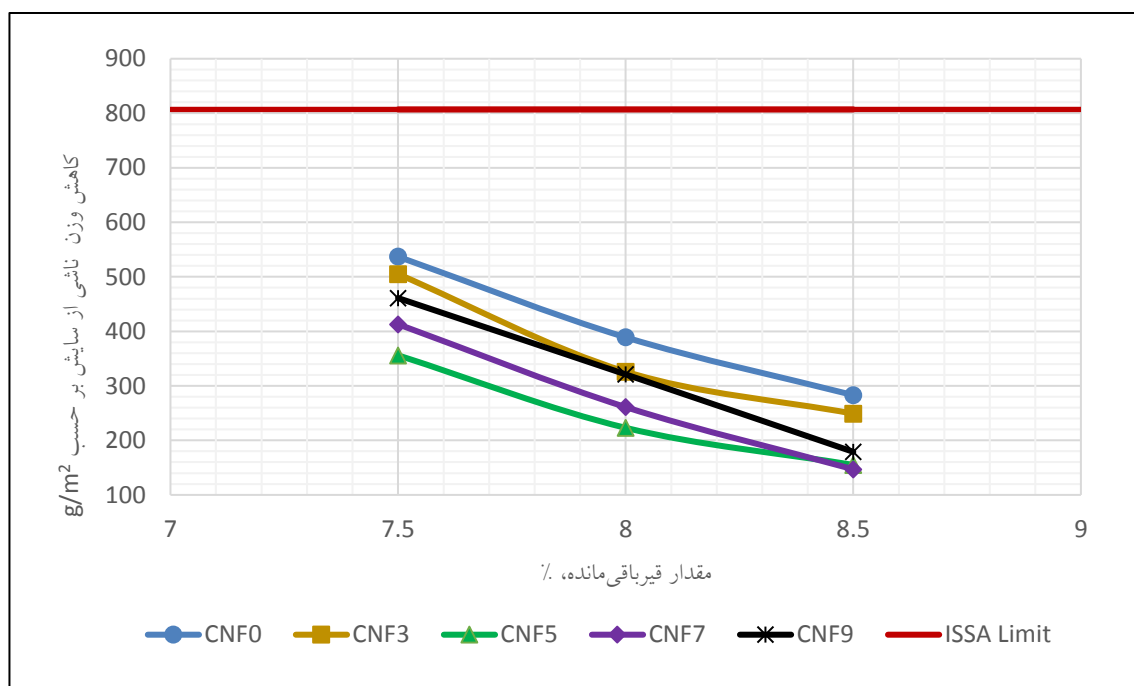


شکل ۷. نتایج آزمایش چسبندگی در ۶۰ دقیقه برای هر یک از مخلوط‌های اسلاری سیل

۴-۲-۳. آزمایش سایش در شرایط مرطوب

نتایج این آزمایش در مدت زمان یک ساعت غوطه‌وری مخلوط‌ها در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۸، افزایش مقدار قیر باقی‌مانده در همه نمونه‌ها سبب بهبود عملکرد در مقابل خرابی رطوبتی و سایش می‌شود. البته، در همه درصدهای قیر، عملکرد مخلوط‌های اصلاح‌شده با نانو نسبت به نمونه شاهد در برابر سایش بهتر بوده است. به طوری که با افزایش میزان قیر از ۷/۵ به ۸ درصد و از ۸ به ۸/۵ درصد، عملکرد سایشی مخلوط‌های اسلاری سیل اصلاح‌شده به ترتیب با سرعت بیشتر و کمتری بهبود داشته است. این روند برای مخلوط شاهد با افزایش درصد قیر تقریباً ثابت بوده است. نتایج این شکل نشان داد که نمونه CNF5 در قیرهای ۷/۵ و ۸ درصد و نمونه CNF7 با اختلاف ناچیز نسبت به

CNF5 عملکرد بهتری را در مقابل سایش نشان دادند. مطابق این نتایج، مخلوط‌های اصلاح‌شده با نانو ۳، ۵، ۷ و ۱۰ درصد در قیر ۸ درصد عملکرد سایش نمونه شاهد را به ترتیب به مقدار ۱۶/۲، ۴۲/۷، ۳۲/۹ و ۱۷/۵ درصد بهبود داده‌اند. همچنین، کمترین مقدار افت وزنی نمونه‌ها متعلق به نمونه‌های CNF5 و CNF7 در ۸/۵ درصد قیر به ترتیب ۱۵۵ و ۱۴۷ گرم بر سانتی‌متر مربع است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که در صورت اصلاح قیر امولسیون با نانو در حدود ۵ تا ۷ درصد، با در نظر گرفتن مقدار قیر متناسب، می‌توان پدیده عریان شدگی را به میزان محسوسی در مخلوط‌های اسلاری سیل کاهش داد. به طور خلاصه، قیر امولسیونی اصلاح‌شده با محلول نانوالیاف سلولزی با افزایش چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی و افزایش قفل بست میان‌دانه‌ای، مقاومت در برابر رطوبت را بهبود می‌دهد.

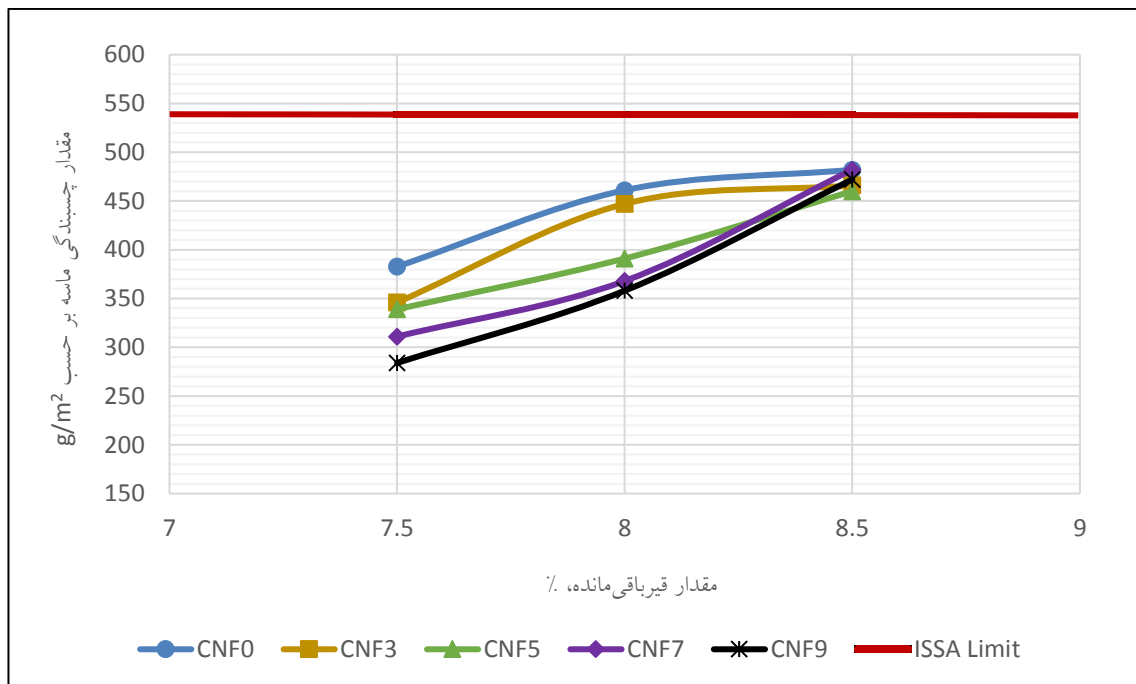


شکل ۸. نتایج آزمایش سایش در شرایط مرطوب در یک ساعت برای هر یک از مخلوط‌های اسلاری سیل

۴-۲-۴. آزمایش تعیین حداکثر قیر به وسیله چرخ بارگذاری شده و چسبندگی ماسه

نتایج آزمایش بارگذاری چرخ- چسبندگی ماسه (ارزیابی پتانسیل قیر زدگی) برای مخلوط‌های آسفالتی اسلاری سیل در شکل ۹ ارائه شده است. همان‌طور که در نمودارها مشاهده می‌شود، با افزایش درصد قیر و نانو، قیرزدگی مخلوط‌ها به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. از این جهت، بهترین عملکرد را مخلوط‌های CNF7 و CNF9 با ۷ و ۱۰ درصد نانو با فاصله ناچیز در قیر ۷/۵ و ۸ درصد و مخلوط CNF5 در قیر ۸/۵ درصد داشته است. در نتیجه، در درصد قیر کمتر، با افزایش درصد

نانو، عملکرد قیرزدگی مخلوط‌های اسلاری سیل بهتر است. در حالی که با افزایش درصد قیر، به‌ویژه در قیر ۸ درصد، تفاوت مقدار قیرزدگی نمونه‌های اصلاح‌شده و اصلاح نشده کاهش می‌یابد. به‌طور مثال، در قیر ۷/۵ درصد، نمونه‌های ۳، ۵، ۷ و ۹ درصد، عملکرد قیرزدگی نمونه شاهد را به ترتیب ۹/۹، ۱۱/۷، ۱۹ و ۲۶ درصد کاهش داده است. لذا، استفاده از نانو باعث بهبود چشمگیر عملکرد مخلوط‌های آسفالت سرد در درصدهای کمتر قیر می‌گردد. لذا، بایستی میزان مناسب قیر بهینه برای این نوع مخلوط‌های اصلاح‌شده برای تأثیرگذاری بر کاهش مقدار قیرزدگی تعیین گردد.



شکل ۹. حداکثر قیر در مخلوط‌های اسلاری سیل به وسیله آزمایش چرخ بارگذاری و چسبندگی ماسه

۴-۲-۵. تعیین مقدار بهینه قیر امولسیون مخلوط‌های اسلاری سیل

با رسم نتایج حاصل از آزمایش‌های سایش در شرایط مرطوب و چرخ بارگذاری شده- چسبندگی ماسه و تلفیق نمودارهای این دو آزمایش، مقدار بهینه و محدوده مجاز قیر امولسیون به دست می‌آید. در تلفیق دو نمودار، نتایج

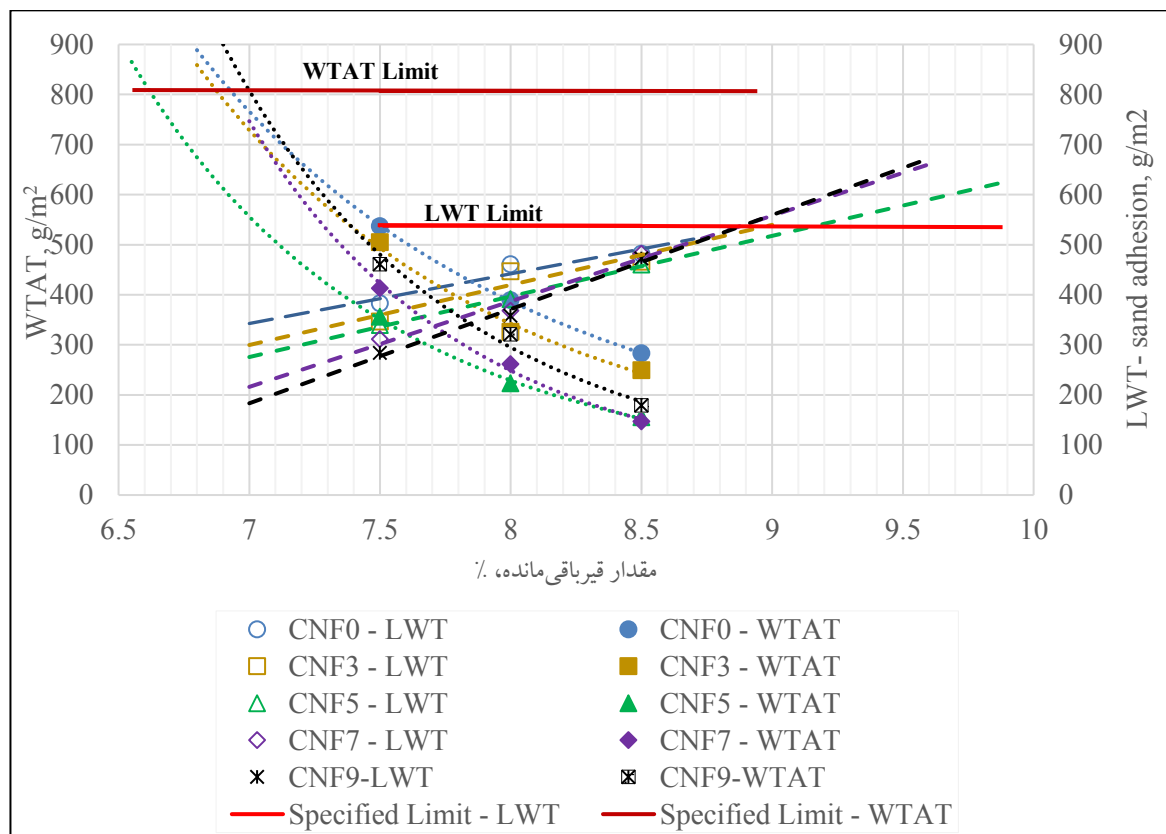
آزمایش ماسه چسبیده به صورت یک نمودار خطی و نتایج آزمایش سایش مرطوب به صورت نمودارهای توابع توانی نشان داده می‌شوند (کی منش و همکاران، ۲۰۲۱). با توجه به الزام‌های مشخص شده برای حداکثر و حداقل قیر امولسیون، اگر اختلاف بین حداکثر و حداقل قیر از ۳ درصد بیشتر باشد، مقدار قیر امولسیون بهینه در وسط

جدول ۷ و شکل ۱۰ ارائه شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، درصد بهینه قیر امولسیون مخلوط‌های اصلاح‌شده CNF3، CNF5، CNF7 و CNF9 نسبت به مخلوط شاهد به ترتیب به میزان ۰/۲۶، ۰/۳۶، ۰/۱۱ و ۰/۱۴ افزایش داشته است.

دامنه، ۳ درصد از بیشترین مقدار محدودیت است. همچنین، اگر مقدار حداکثر و حداقل قیر از ۳ درصد کمتر باشد، مقدار قیر امولسیون نمونه در وسط دامنه مذکور انتخاب گردد (کی‌منش و همکاران، ۲۰۲۱ b؛ زال نژاد و حسامی، ۲۰۲۰). درصد بهینه قیر امولسیون اصلاح‌شده با نانوالیاف سلولزی برای تمامی مخلوط‌ها در

جدول ۷. محدوده مجاز قیر امولسیون و درصد بهینه آن

نوع مخلوط	حداقل مقدار قیر امولسیون به دست آمده از آزمایش سایش (%)	حداکثر مقدار قیر امولسیون به دست آمده از چسبندگی ماسه (%)	دامنه قابل قبول قیر امولسیون (%)	مقدار بهینه قیر امولسیون (%)
CNF0	۱۳/۱۶	۱۵/۳۰	۱۵/۱۳-۳۰/۱۶	۱۴/۲۳
CNF3	۱۳/۱۶	۱۵/۷۷	۱۵/۱۳-۷۷/۱۶	۱۴/۴۶
CNF5	۱۳/۱۶	۱۶/۰۲	۱۶/۱۳-۰۲/۱۶	۱۴/۵۹
CNF7	۱۳/۱۶	۱۵/۵۳	۱۵/۱۳-۵۳/۱۶	۱۴/۳۴
CNF9	۱۳/۱۶	۱۵/۵۸	۱۵/۱۳-۵۳/۱۶	۱۴/۳۷



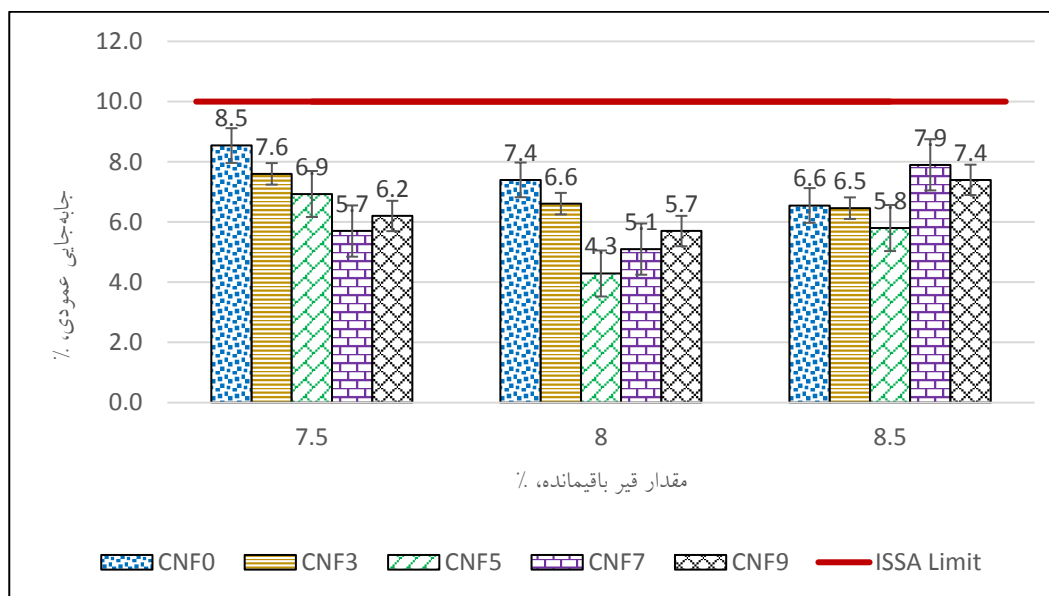
شکل ۱۰. ترکیب نتایج آزمایش سایش در شرایط مرطوب و آزمایش چرخ بارگذاری شده- چسبندگی ماسه جهت تعیین قیر بهینه

۳-۴. تعیین میزان جابه‌جایی مخلوط با آزمایش

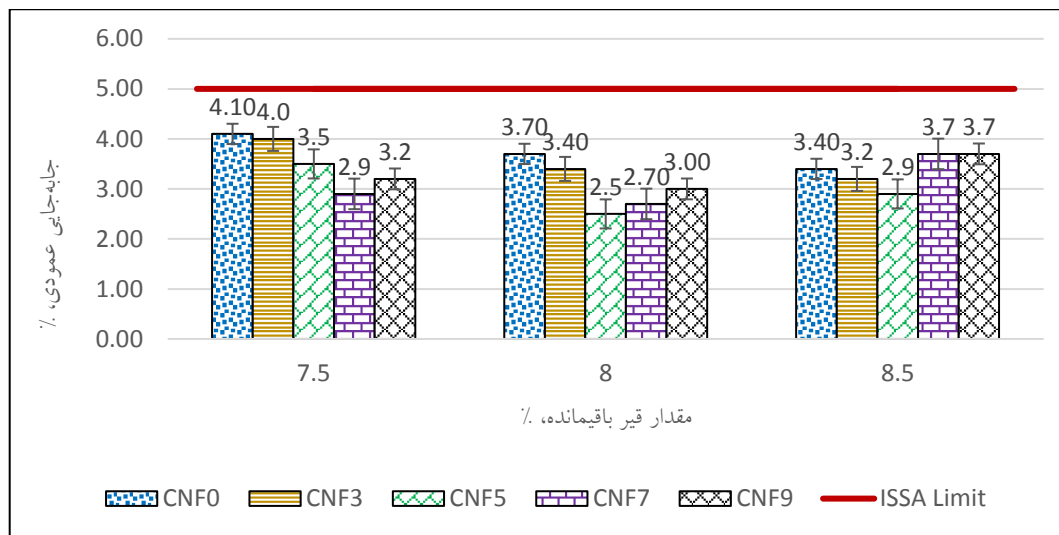
چرخ بارگذاری شده

نتایج این آزمایش از لحاظ مقدار قیر امولسیون و مقدار نانو در مخلوط‌ها در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ قابل بررسی است. از منظر قیر امولسیون در مخلوط‌های CNF0 و CNF3، با افزایش قیر باقی‌مانده از ۷/۵ به ۸ درصد و سپس از ۸ به ۸/۵ درصد، مقدار شیارشدگی افزایش می‌یابد. ولی در مخلوط‌های CNF5، CNF7 و CNF9، همان‌طور که مشاهده می‌شود، ابتدا میزان جابه‌جایی در قیر باقی‌مانده ۷/۵ به ۸ درصد کاهش و سپس از قیر باقی‌مانده ۸ به ۸/۵ درصد به صورت افزایشی تغییر می‌کند. به‌طور کلی، در مخلوط‌های CNF0 و CNF3، قیر ۸/۵ درصد بهترین عملکرد را داشته و برای مخلوط‌های CNF5، CNF7 و CNF9، قیر ۸ درصد بهترین عملکرد را داشته است. این بدان معناست که در هر یک از مخلوط‌ها، تعیین میزان قیر مناسب برای کاهش میزان جابه‌جایی‌ها امری لازم و ضروری است. از منظر میزان نانو، با توجه به نتایج حاصله در قیر ۷/۵ و ۸ درصد، با

افزایش میزان نانو تا ۵ و ۷ درصد، (مخلوط‌های CNF5 و CNF7) از جابه‌جایی عمودی و جانبی کاسته شده و کمترین میزان جابه‌جایی مربوط به نمونه‌های CNF5 و CNF7 است. این در حالی است که برای قیر ۸/۵ درصد، با افزایش میزان نانو تا ۵۰ درصد (مخلوط CNF7) از جابه‌جایی عمودی و جانبی کاسته می‌شود، ولی پس از آن، با افزایش نانو تا ۷ و ۹ درصد (مخلوط‌های CNF7 و CNF9) به جابه‌جایی عمودی و جانبی افزوده می‌شود. این بدین معناست که در مخلوط‌هایی که مستعد شیارشدگی هستند، می‌توان پس از تأمین قیر کافی، احتمال وقوع خرابی شیارشدگی را با اصلاح قیر امولسیون توسط مقدار بهینه نانو به میزان مؤثری کاهش داد. به‌عنوان نمونه، برای قیر باقی‌مانده ۸ درصد، مخلوط‌های CNF0، CNF3، CNF5، CNF7 و CNF9 نسبت به نمونه شاهد به ترتیب موجب کاهش جابه‌جایی عمودی به میزان ۱۰/۷، ۴۲، ۳۱/۱ و ۲۳ درصد و کاهش جابه‌جایی جانبی به میزان ۸/۱، ۳۲/۴، ۲۷ و ۱۸/۹ درصد شده است.



شکل ۱۱. میزان جابه‌جایی عمودی مخلوط‌ها در درصدهای مختلف قیر



شکل ۱۲. میزان جابه‌جایی افقی مخلوط‌ها در درصد‌های مختلف قیر

۵. تحلیل آماری

نتایج به دست آمده از خصوصیات عملکردی آسفالت حفاظتی اسلاری سیل شامل چسبندگی مرطوب، سایش در شرایط مرطوب، چرخ بارگذاری شده- چسبندگی ماسه و چرخ بارگذاری شده- جابه‌جایی با استفاده از آنالیز واریانس (ANOVA) مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. نتایج ANOVA با استفاده از تجزیه و تحلیل دو عاملی در سطح اطمینان ۹۵٪ به منظور بررسی اهمیت اثرات افزودن محلول نانوالیاف سلولزی و درصد قیر باقی مانده بر خصوصیات عملکردی مخلوط‌های اسلاری سیل با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شده است. به منظور انجام ANOVA، در ابتدا کنترل نرمال بودن داده‌ها به کمک آزمون کولموگروف- اسمیرنوف بررسی شده و سپس تحلیل روی داده‌های نرمال انجام شده است. نتایج میزان تأثیرگذاری نوع مخلوط و درصد قیر باقی مانده بر عملکرد مخلوط آسفالتی اسلاری سیل در جدول ۹ قابل مشاهده است. فاکتور اول شامل سه درصد قیر باقی مانده یعنی ۷/۵، ۸ و ۸/۵ درصد و فاکتور دوم شامل پنج مخلوط یعنی CNF0، CNF3، CNF5، CNF7 و CNF9 است. بر این اساس، فرض H_0 به معنی عدم وجود اثر معنی دار متغیر عامل (مستقل) بر متغیر پاسخ بوده و در صورت رد آن، فرض H_1 به معنی وجود اثر معنی دار متغیر عامل بر متغیر پاسخ تأیید می‌شود. این موضوع در رابطه (۱) ارائه شده است.

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k \quad (1)$$

$$H_1 : \exists i, j, s, t, u_i \neq u_j \quad (i, j = 1, 2, \dots)$$

مطابق نتایج حاصل از تحلیل واریانس در خصوص تأثیر درصد قیر باقی مانده و مسبار بر خصوصیات اسلاری سیل، مقدار p مخلوط‌ها کمتر از ۰/۰۵ بود که نشان‌دهنده آن است که قیر باقیمانده و نوع مخلوط، تأثیر قابل توجهی بر تمام آزمایش‌های انجام شده از قبیل چسبندگی مرطوب و چرخ بارگذاری شده- چسبندگی ماسه دارند. نوع مخلوط در آزمایش چسبندگی ۳۰ و ۶۰ دقیقه و آزمایش جابه‌جایی عمودی و جانی عامل تأثیرگذارتری نسبت به درصد قیر باقی مانده بوده است. این موضوع از پارامتر $\text{Partial eta squared}$ در تحلیل واریانس قابل مشاهده است که به ترتیب مقادیر ۸۸/۳ و ۹۱/۵، ۹۵/۲ و ۸۱/۰ درصد را به دلیل مقدار محلول نانوالیاف سلولزی در مخلوط کسب کردند. بنابراین، در این آزمایش‌ها، بهبود نوع مخلوط با استفاده از اصلاح قیر امولسیون منجر به نتایج بهتری نسبت به تغییر مقدار قیر باقیمانده خواهد شد. این در

حالی است که اثر درصد قیر باقی مانده در آزمایش چسبندگی ماسه عامل تأثیر گذارتری نسبت به نوع مخلوط بوده است که مقدار واریانس ۹۸/۳ درصد را کسب نموده است. همچنین، در آزمایش سایش در شرایط مرطوب تفاوت معنی داری میان اثر نوع مخلوط و قیر باقی مانده مشاهده نشد.

جدول ۹. نتایج تحلیل آماری مخلوط‌های اسلاری سیل

Source of variation	Type III sum of squares	df	Mean square	F	P-value	Partial eta squared
(a) Cohesion at 30 minutes						
Corrected Model	42.376	14	3.027	34.310	0.000	0.941
Intercept	8991.627	1	8991.627	101920.204	0.000	1.000
bitumen	8.974	2	4.487	50.859	0.000	0.772
blend type	20.008	4	5.002	56.696	0.000	0.883
bitumen * blend type	13.395	8	1.674	18.979	0.000	0.835
Error	2.647	30	0.088			
Total	9036.650	45				
Corrected Total	45.023	44				
(b) Cohesion at 60 minutes						
Corrected Model	122.800	14	8.771	37.808	0.000	0.946
Intercept	26064.200	1	26064.200	112345.690	0.000	1.000
bitumen	17.200	2	8.600	37.069	0.000	0.712
blend type	74.800	4	18.700	80.603	0.000	0.915
bitumen * blend type	30.800	8	3.850	16.595	0.000	0.816
Error	6.960	30	0.232			
Total	26193.960	45				
Corrected Total	129.760	44				
(c) WTAT						
Corrected Model	636814.000	14	45486.714	974.367	0.000	0.998
Intercept	4617605.000	1	4617605.000	98913.352	0.000	1.000
bitumen	481526.800	2	240763.400	5157.374	0.000	0.997
blend type	146794.000	4	36698.500	786.116	0.000	0.991
bitumen * blend type	8493.200	8	1061.650	22.742	0.000	0.858
Error	1400.500	30	46.683			
Total	5255819.500	45				
Corrected Total	638214.500	44				
(d) LWT-Sand adhesion						
Corrected Model	190617.539	14	13615.539	204.823	0.000	0.990
Intercept	7319854.681	1	7319854.681	110114.951	0.000	1.000
bitumen	146770.494	2	73385.247	1103.958	0.000	0.987
blend type	27812.190	4	6953.048	104.597	0.000	0.933
bitumen * blend type	16034.855	8	2004.357	30.152	0.000	0.889
Error	1994.240	30	66.475			
Total	7512466.460	45				
Corrected Total	192611.779	44				
(e) LWT-Vertical displacement						
Corrected Model	101.810	14	7.272	64.673	0.000	0.968
Intercept	1822.777	1	1822.777	16210.466	0.000	0.998
bitumen	28.945	4	7.236	64.355	0.000	0.896
blend type	66.819	2	33.410	297.121	0.000	0.952
bitumen * blend type	6.045	8	0.756	6.720	0.000	0.642
Error	3.373	30	0.112			
Total	1927.960	45				
Corrected Total	105.183	44				

(f) LWT-Lateral displacement						
Corrected Model	9.206	14	0.658	21.288	0.000	0.909
Intercept	498.668	1	498.668	16143.914	0.000	0.998
bitumen	3.504	4	0.876	28.356	0.000	0.791
blend type	3.963	8	0.495	16.038	0.000	0.810
bitumen * blend type	1.739	2	0.870	28.151	0.000	0.652
Error	0.927	30	0.031			
Total	508.800	45				
Corrected Total	10.132	44				

۶. نتیجه گیری

در این پژوهش، به بررسی استفاده از محلول نانوالیاف سلولزی جهت اصلاح قیر امولسیون در طرح اختلاط اسلاری سیل برای سنجش عملکرد آن پرداخته شد. در این راستا، ابتدا مشخصات قیر امولسیون مورد بررسی قرار گرفته و سپس به منظور ارزیابی عملکرد مخلوط، از پنج ترکیب مختلف حاوی صفر، ۳، ۵، ۷ و ۹ درصد محلول نانوالیاف سلولزی بر اساس وزن جامد قیر، مخلوطها ساخته شدند. نتایج آزمایشهای انجام شده به طور خلاصه در ادامه ارائه شده است:

قیر امولسیون، تفاوت معنی داری در نتایج ایجاد نخواهد کرد.

- در آزمایش سایش در شرایط مرطوب، مشخص گردید که افزایش مقدار قیر باقی مانده در همه نمونهها سبب بهبود عملکرد در مقابل خرابی رطوبتی و سایش می شود. البته، در همه درصدهای قیر، عملکرد مخلوطهای اصلاح شده با نانو نسبت به نمونه شاهد در برابر سایش بهتر بوده است. به طوری که با افزایش مقدار قیر از ۷/۵ به ۸ درصد و از ۸ به ۸/۵ درصد، عملکرد سایشی مخلوطهای اسلاری سیل اصلاح شده به ترتیب با سرعت بیشتر و کمتری بهبود داشته است. همچنین، کمترین مقدار افت وزنی نمونهها متعلق به نمونههای CNF5 و CNF7 در ۸/۵ درصد قیر به ترتیب ۱۵۵ و ۱۴۷ گرم بر سانتیمتر مربع بوده است.
- در آزمایش تعیین حداکثر قیر به وسیله چرخ بارگذاری - چسبندگی ماسه معلوم گردید که با افزایش درصد قیر و نانو، قیرزدگی مخلوطها به ترتیب افزایش و کاهش می یابد. از این جهت، بهترین عملکرد را مخلوطهای CNF7 و CNF9 با مقدار ۷ و ۹ درصد نانو با فاصله ناچیز در قیر ۷/۵ و ۸ درصد و مخلوط CNF5 در قیر ۸/۵ درصد داشته است. در نتیجه، در درصد قیر کمتر، با افزایش درصد نانو، عملکرد قیرزدگی مخلوطهای اسلاری سیل بهتر است.

- نتایج آزمایشهای قیری نشان داد که استفاده از محلول نانوالیاف سلولزی منجر به افزایش ویسکوزیته و کاهش درجه نفوذ می شود. با افزایش درصد محلول نانوالیاف از صفر به ۵ درصد، تغییرات درجه نفوذ و نقطه نرمی قابل توجه است. این در حالی است که با افزایش آن از ۵ به ۹ درصد، تغییرات درجه نفوذ و نقطه نرمی محسوس نیست.

- در آزمایش چسبندگی مرطوب، مشخص گردید که تمامی مخلوطها مقاومت لازم جهت عبور بار ترافیک را کسب کردند. بیشترین مقدار چسبندگی در این آزمایش مربوط به نمونههای CNF5 و CNF7 در ۸ درصد قیر امولسیون به ترتیب ۲۷ و ۲۶ کیلوگرم- سانتی متر بوده است. همچنین، مقدار بهینه افزودنی قیر در بالا بردن چسبندگی با توجه به نتایج ۵ درصد بوده و افزایش مقدار آن به بیش از ۵ درصد در اصلاح

- در تعیین درصد بهینه قیر امولسیون، درصد بهینه قیر امولسیون مخلوط‌های اصلاح‌شده CNF5، CNF3، CNF7 و CNF9 نسبت به مخلوط شاهد به ترتیب به میزان ۰/۲۶، ۰/۳۶، ۰/۱۱ و ۰/۱۴ افزایش داشته است.
- به‌عنوان نتیجه‌گیری کلی، با توجه به دلایل فنی و عملکردی، استفاده از محلول نانوالیاف سلولزی به‌عنوان اصلاح‌کننده قیر امولسیون به میزان ۵ درصد پیشنهاد می‌شود.

۷. مراجع

۱. ایزدی، ا.، زال نژاد، م.، زال نژاد، ح. و بزرگی، پ. (۱۳۹۹). "ارزیابی آزمایشگاهی عملکرد آسفالت حفاظتی اسلاری سلی رنگی حاوی رنگدانه‌های قرمز اکسید آهن". مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۶(۴): ۹۹-۱۲۰. doi:10.22075/jtie.2020.20189.1449
۲. زال نژاد، م. و حسامی، ا. (۱۳۹۸). "ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر استفاده از سرباره فولاد بر مشخصات آسفالت حفاظتی اسلاری سلی". مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۵(۱): ۱۶-۳۵. doi:10.22075/jtie.2018.16145.1345
۳. کی منش، م. ر.، زیاری، ح.، زال نژاد، ح. و زال نژاد، م. (۱۳۹۹). "ارزیابی مشخصات رئولوژی و قیرزدگی باقی‌مانده قیرهای امولسیون اصلاح‌شده با پلیمر به روش‌های مختلف ساخت". مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۷(۳): ۵۹-۷۸. doi:10.22075/jtie.2020.20509.1459
4. Abedini, M., Hassani, A., Kaymanesh, M. R. and Yousefi, A. A. 2017. "Low-temperature adhesion performance of polymer-modified bitumen emulsion in chip seals using different SBR latexes". *Petrol. Sci. Technol.*, 35(1): 59-65. doi:10.1080/10916466.2016.1238932
5. Aboutalebi Esfahani, M. and Khatayi, A. 2022. "Effect of type and quantity of emulsifier in bitumen polymer emulsion on microsurfacing performance". *Int. J. Pavement Eng.*, 23(4): 957-971. doi:10.1080/10298436.2020.1784416
6. Ahmedzade, P., Günay, T., Grigoryeva, O. and Starostenko, O. 2017. "Irradiated recycled high density polyethylene usage as a modifier for bitumen". *J. Mater. Civ. Eng.*, 29(3): 04016233. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001757
7. ASTM D7497. 2021. "Standard practice for recovering residue from emulsified asphalt using low-temperature evaporative technique". American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
8. Bhargava, N., Siddagangaiah, A. K. and Rynthiang, T. L. 2020. "State of the art review on design and performance of microsurfacing". *Road Mater. Pavement Des.*, 21(8): 2091-2125. doi:10.1080/14680629.2019.1607771
9. Buss, A. F. and Claypool, B. S. 2022. "Analytical methods to determine effectiveness of slurry seals in wet/freeze climate using pavement management information systems". *Road Mater. Pavement Des.*, 23(5): 992-1010. doi:10.1080/14680629.2020.1868327
10. Chen, W., Yu, H., Liu, Y., Hai, Y., Zhang, M. and Chen, P. 2011. "Isolation and characterization of cellulose nanofibers from four plant cellulose fibers using a chemical-ultrasonic process". *Cellulose*, 18(2): 433-442.
11. Eichhorn, S. J. 2020. 1000 at 1000: reflecting on "Review: Current international research into cellulose nanofibres and nanocomposites". 55; 12637-12641, Springer.
12. Hu, C., Zhao, J., Leng, Z., Partl, M. N. and Li, R. 2019. "Laboratory evaluation of waterborne epoxy bitumen emulsion for pavement preventative maintenance application". *Constr. Build. Mater.*, 197: 220-227.
13. ISSA. 2017a. "Test method for measurement of excess asphalt in bituminous mixtures by use of a loaded wheel tester and sand adhesion". Technical Bulletin 109, International Slurry Surfacing Association.
14. ISSA. 2017b. "Test method for measurement of stability and resistance to compaction, vertical and lateral displacement of multilayered fine aggregate cold mixes". Technical Bulletin 147, International Slurry Surfacing Association.
15. ISSA. 2017c. "Test method for wet track abrasion of slurry surfacing systems". Technical Bulletin 100, International Slurry Surfacing Association.

16. ISSA. 2017d. "Test method to classify emulsified asphalt/aggregate mixture systems by modified cohesion tester measurement of set and cure characteristics". Technical Bulletin 139, International Slurry Surfacing Association.
17. ISSA. 2017e. "Trial mix procedure for slurry seal design". Technical Bulletin 113, International Slurry Surfacing Association.
18. ISSA A105. 2020. "Recommended performance guideline for emulsified asphalt slurry seal". International Slurry Surfacing Association.
19. Jin, T., Warid, M., Idham, M., Hainin, M., Yaacob, H., Hassan, N., . . . and Afiqah, R. 2019. "Modification of emulsified bitumen using styrene-butadiene rubber (SBR)". IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
20. Johannes, P. T. 2014. "Development of an improved mixture design framework for slurry seals and micro-surfacing treatments". The University of Wisconsin, Madison.
21. Keymanesh, M. R., Ziari, H., Zalnezhad, H. and Zalnezhad, M. 2021a. "Effects of lead time and manufacturing methods applied for polymer-modified bitumen emulsion (PMBE) on microsurfacing performance". Road Mater. Pavement Des., 23(10): 2271-2292. doi:10.1080/14680629.2021.1963818
22. Keymanesh, M. R., Ziari, H., Zalnezhad, H. and Zalnezhad, M. 2021b. "Mix design and performance evaluation of microsurfacing containing electric arc furnace (EAF) steel slag filler". Constr. Build. Mater., 269: 121336. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121336
23. Khan, A. and Jain, S. 2020. "Assessment of strength characteristics of bituminous concrete modified using HDPE". Transport. Res. Proc., 48: 3734-3755.
24. Oda, S., Fernandes Jr., J. L. and Ildefonso, J. S. 2012. "Analysis of use of natural fibers and asphalt rubber binder in discontinuous asphalt mixtures". Constr. Build. Mater., 26(1): 13-20.
25. Pan, C., Liang, D., Mo, L., Riar, M. and Lin, J. 2019. "Influence of different modifiers on bonding strength and rheological performance of bitumen emulsion". Mater., 12(15): 2414.
26. Pittenger, D. M. and Gransberg, D. D. 2020. "Life cycle cost analysis of Portland cement slurry seal and microsurfacing to correct rutting". J. Struct. Integ. Mainten., 5(1): 1-7. doi:10.1080/24705314.2019.1692166
27. Pouliot, N., Marchand, J. and Pigeon, M. 2003. "Hydration mechanisms, microstructure, and mechanical properties of mortars prepared with mixed binder cement slurry-asphalt emulsion". J. Mater. Civ. Eng., 15(1): 54-59.
28. Prapaitrakul, N., Han, R., Jin, X., Martin, A. and Glover, C. 2010. "Comparative study on recovered binder properties using three asphalt emulsion recovery methods". J. Test. Eval., 38(6): 653-659. doi:10.1520/JTE102739
29. Sheng, X., Wang, M., Xu, T. and Chen, J. 2018. "Preparation, properties and modification mechanism of polyurethane modified emulsified asphalt". Constr. Build. Mater., 189: 375-383.
30. Sun, Y., Yue, J. C., Wang, R. R., Li, R. X. and Wang, D. C. 2020. "Investigation of the effects of evaporation methods on the high-temperature rheological and fatigue performances of emulsified asphalt residues". Adv. Mater. Sci. Eng., 2020.
31. Xiao, J., Jiang, W., Ye, W., Shan, J. and Wang, Z. 2019. "Effect of cement and emulsified asphalt contents on the performance of cement-emulsified asphalt mixture". Constr. and Build. Mater., 220: 577-586.
32. Zalnezhad, M. and Hesami, E. 2020. "Effect of steel slag aggregate and bitumen emulsion types on the performance of microsurfacing mixture. J. Traffic Transport. Eng., 7(2): 215-226.