

ارزیابی مشخصات رئولوژی و قیرزدگی باقی‌مانده قیرهای امولسیون اصلاح‌شده با پلیمر به روش‌های مختلف ساخت

محمودرضا کی‌منش*، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه پیام نور

تهران شمال، تهران

حسن زیاری، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

حسین زال‌نژاد، دانشجوی دکتری، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه پیام نور تهران شمال، تهران

مهدی زال‌نژاد، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

Email: mrkeymanesh@pnu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۱۳ - پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۱۱

چکیده

در سال‌های اخیر، مطالعات مختلف توجه خود را بر روش ساخت قیر امولسیونی به‌منظور بالا بردن ویژگی آسفالت سرد متمرکز کرده‌اند. بر این اساس، اصلاح قیرهای امولسیونی با پلیمر به خاطر بهبود بعضی ویژگی‌ها همچون حساسیت دمایی، شکل‌پذیری و مقاومت در برابر قیرزدگی برای آسفالت‌های سرد بسیار مناسب است. در حالت کلی، فرمولاسیون قیرهای امولسیونی اصلاح‌شده پلیمری به نحوه اضافه کردن لاتکس به قیر امولسیونی بستگی دارد. بر این اساس، در این تحقیق، قیر امولسیون پلیمری اصلاح‌شده بر پایه روش‌های مختلف تولید شامل اختلاط در آسیاب کلونیدی (حین اختلاط محلول امولسیفایری و قیر)، پیش‌اختلاط با محلول امولسیفایری و پس‌اختلاط با قیر امولسیونی در حضور دو نوع امولسیفایر ساخته شدند. نتایج نشان داد که روش پیش‌اختلاط پلیمر در قیر امولسیون نوع ۲ و روش حین اختلاط در قیر امولسیون نوع ۱ در ویژگی‌های فیزیکی قیر همچون ویسکوزیته سی بولت فیورل، نقطه نرمی و درجه نفوذ و البته ویژگی‌های رئولوژی قیر همچون مدول مختلط، زاویه فاز و نمره عملکرد سطحی نسبت به سایر روش‌های اصلاح پلیمری، عملکرد بهتری داشته است. در نتیجه، نوع امولسیفایر نیز در انتخاب روش ساخت قیر امولسیون پلیمری نقش مهمی دارد. لذا، فرایند طراحی جهت بهینه‌سازی ساخت قیر امولسیون پلیمری برای هر نوع امولسیفایر متفاوت است.

واژه‌های کلیدی: قیر امولسیونی، لاتکس، امولسیفایر، رئولوژی

۱. مقدمه

در اوایل قرن بیستم، اولین قیر امولسیونی در ساخت جاده مورد استفاده قرار گرفت. امروزه حدود ۳ میلیون تن قیر امولسیونی در ایالات متحده به منظور تأمین حدود ۵ تا ۱۰ درصد مصارف آسفالتی تولید می‌شود. بیش از ۸ میلیون تن قیر امولسیونی نیز در دیگر نقاط جهان تولید می‌شود. در کشورهای تولیدکننده قیر امولسیونی مانند ایالات متحده، فرانسه، مکزیک و برزیل، تولید این محصول تا حد زیادی متحول شده است (کینگ و همکاران، ۲۰۱۰). با ادامه توسعه انواع جدید قیر امولسیونی و درجه‌های آن، همراه با بهبود ساخت تجهیزات و شیوه‌های آزمایشی، در حال حاضر محدوده وسیعی از انواع آسفالت سرد ساخته شده با قیر امولسیونی شامل اسکارب‌سیل، چیپ‌سیل، فاگ‌سیل، سندسیل، کپ‌سیل، اسلاری‌سیل و میکروسرفیسینگ قابل استفاده است (عابدینی و همکاران، ۲۰۱۷؛ هو و همکاران، ۲۰۱۹؛ جین و همکاران، ۲۰۱۹؛ یانگ و همکاران، ۲۰۲۰). البته در ۲۰ سال گذشته، پیشرفت‌های قابل توجهی در درک چگونگی تأثیر شیمیایی قیر امولسیون بر عملکرد آن اتفاق افتاده است. در نتیجه، فرمولاسیون‌ها به منظور بهینه‌سازی مواد تشکیل‌دهنده یا فرایند ساخت توسعه یافته تا اینکه صرفاً مشخصات استاندارد را تأمین کنند. واضح است که فرایند تولید نه تنها بر خواص فیزیکی قیر امولسیون تأثیر می‌گذارد بلکه بر عملکرد قیر امولسیون نیز تأثیر می‌گذارد. قیر امولسیون ترکیبی از قیر، آب و امولسیفایر است که به طور معمول برای کاهش ویسکوزیته قیر و بهبود کارایی آن در دمای طبیعی تولید می‌شود. یکی از روش‌هایی که اجازه می‌دهد قیر و آب مخلوط شود، استفاده از امولسیفایر است. امولسیفایرها همچون پلیمرها از متغیرهای تأثیرگذار بر کیفیت و عملکرد قیرهای امولسیونی هستند (مؤسسه آسفالت، ۲۰۰۸). بر طبق آخرین تحقیقات، انواع مختلف امولسیفایر و حتی مقدار

آمین چرب امولسیفایرها بر مشخصات قیرهای امولسیونی پلیمری و البته چسبندگی بین قیر و سنگدانه مؤثر است (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۲؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۴؛ پنگ و همکاران، ۲۰۱۵). امولسیفایرها مواد شیمیایی فعال‌کننده سطح هستند که بارهای هم‌نام را در سطح قیر ایجاد می‌کنند و منجر به ایجاد نیروی دافعه در بین ذرات قیر می‌شوند. مقدار و عامل نیروی دافعه (امولسیفایر) باعث می‌شود قیر به حالت تعلیق درآید و زمان شکست قابل کنترل باشد. در رایج‌ترین فرایند، امولسیفایر در فاز آب امولسیون حل می‌شود و این محلول آبی یا صابونی با قیر داغ در یک همزن کلونیدی مخلوط می‌شود (جین و همکاران، ۲۰۱۹؛ عابدینی و همکاران، ۲۰۲۰؛ اصفهانی و خطائی، ۲۰۲۰). همچنین، در سال‌های اخیر، تلاش‌های زیادی برای بهبود خواص مکانیکی، فیزیکی، عملکرد و دوام قیرهای امولسیونی با افزودن پلیمرها انجام شده است. اصلاح قیر با افزودنی‌های پلیمری باعث بهبود حساسیت حرارتی، شکنندگی کمتر آن در دمای کم، افزایش مقاومت در برابر ترک خوردگی و شیارشدگی روسازی می‌شود. در مورد نوع پلیمر مورد استفاده در قیرهای امولسیونی تحقیقات زیادی انجام شده است. پژوهش خدیور و کاوسی (۲۰۱۳) در مورد خواص پلیمرهای لاتکس طبیعی (NRL^۱) و لاستیک استایرن-بوتادین (SBR^۲) روی قیر امولسیون نشان داد که میزان تأثیرگذاری لاتکس SBR نسبت به NRL در کاهش درجه نفوذ و افزایش نقطه نرمی و انعطاف‌پذیری در دمای کم بیشتر است. به طور کلی، برای قیر اصلاح‌شده با استایرن-بوتادین-استایرن (SBS^۳) یا اتیلن وینیل استات (EVA^۴) بسیار دشوار است تا امولسیونی گردد. ولی لاتکس SBR، به دلیل فرم مایع آن، دارای یک مزیت عمده در فرمولاسیون قیر امولسیون است (تاکامورا و هکمن، ۲۰۰۱). الاستومر مایع SBR، قابلیت نگهداری و ذخیره‌سازی در قیرهای

^۲- Styrene Butadiene Styrene (SBS)

^۴- Ethylene Vinyl Acetate (EVA)

^۱- Natural Rubber Latex (NRL)

^۳- Styrene Butadiene Rubber (SBR)

کرده است. اولین روش، اضافه کردن لاتکس به طور مستقیم در داخل همزن کلوئیدی^۶ یا اضافه کردن لاتکس در فاز مایع^۷ است و دومین روش اضافه کردن لاتکس به طور مستقیم به قیر امولسیون در مخزن نگهداری یا دقیقاً قبل از استفاده^۸ است. البته، به دلیل اهمیت یکنواختی و سازگاری با عملکرد، توصیه می‌شود که پلیمر به قیر امولسیون در حالت میدانی اضافه نشود. در این راستا، منحصراً آژانس‌های بزرگراه‌های دولتی^۹ و ذینفعان صنعت، آشکارا این عمل را متوقف کرده‌اند (کینگ و جانستون، ۲۰۱۲). اگرچه در مقابل، بعضی از محققان، روش پس‌اختلاط را برای پلیمرهای مایع جهت کاهش اثر حرارت بر تغییر یا آسیب پلیمر پیشنهاد می‌کنند (شفیعی و همکاران، ۲۰۱۱). تاکامورا و همکن (۲۰۰۱) پلیمر لاتکس SBR را به جای پلیمر جامد SBS پیشنهاد کردند، چون لاتکس SBR را می‌توان در حالت‌های پیش‌اختلاط، حین اختلاط و پس‌اختلاط در فرمولاسیون قیر امولسیونی استفاده نمود. در حالی که استفاده از پلیمر جامد SBS تنها به روش پیش‌اختلاط با قیر در فرمولاسیون قیر امولسیونی امکان‌پذیر است. شبکه پلیمری لاتکس SBR می‌تواند ساختار خود را حتی در دماهای بیش از ۱۵۰ تا ۱۸۰ درجه سلسیوس حفظ کند و همچنین دمای مقاومت در برابر شیارشدگی را بالا می‌برد و سازگار با قیر امولسیون است. همچنین، در گزارش بزرگراه‌های ایالتی توسط جانستون و کینگ (۲۰۰۸)، برتری پلیمر لاتکس SBR نسبت به سایر پلیمرها همچون NRL، SBS و EVA در آزمایش‌های آسفالت سرد میکروسرفیسینگ نشان داده شد. با توجه به این تحقیقات، پلیمر لاتکس SBR بهترین نوع پلیمر برای

امولسیونی را بهبود می‌بخشد. همچنین، بر طبق نتایج، ویژگی‌های قیری و آسفالتی مخلوط‌های اصلاح‌شده با SBR بهتر از مخلوط‌های اصلاح‌شده SBS است (کینگ و جانستون، ۲۰۱۲). بدین ترتیب، معمولاً از پلیمرهای مایع همچون SBR و NRL برای تهیه قیرهای امولسیونی اصلاح‌شده با پلیمر استفاده می‌شود. در مجموع، قیر امولسیون اصلاح‌شده با پلیمر یکی از راه‌حل‌های مؤثر جهت بهبود زمان گیرش، مقاومت زودرس بیشتر، انسجام و چسبندگی بهتر در مخلوط‌های آسفالت سرد است (عابدینی و همکاران، ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷؛ هو و همکاران، ۲۰۱۹؛ جین و همکاران، ۲۰۱۹؛ پن و همکاران، ۲۰۱۹). عملکرد قیر امولسیونی به روش ترکیب قیر امولسیون با پلیمر نیز بستگی دارد (سالومون، ۲۰۰۶؛ جین و همکاران، ۲۰۱۹). به طور کلی، چهار روش جهت ساخت قیر امولسیونی پلیمری شامل افزودن مستقیم پلیمر به قیر قبل از فرآیند امولسیون‌سازی^۱ (پیش‌اختلاط با قیر)، افزودن پلیمر در حین اختلاط محلول امولسیفایری و قیر در آسیاب کلوئیدی^۲ (حین اختلاط)، افزودن پلیمر به محلول امولسیفایری پیش از اختلاط با قیر در آسیاب کلوئیدی^۳ (پس‌اختلاط) و افزودن پلیمر به قیر امولسیونی^۴ (پس‌اختلاط) وجود دارد (فوربس و همکاران، ۲۰۰۱؛ شفیعی و همکاران، ۲۰۱۱؛ جین و همکاران، ۲۰۱۹). فوربس و همکاران (۲۰۰۱) با بررسی عکس‌های میکروسکوپی با لیزر به این نتیجه رسیدند که روش پس‌اختلاط، روش پیش‌اختلاط و روش حین اختلاط برخلاف روش پیش‌اختلاط با قیر دارای شبکه پلیمری هستند. همچنین، در تحقیقات دیگری، لسور (۲۰۱۱) دو روش جامع‌تر برای ساخت قیر امولسیونی اصلاح‌شده پلیمری (PMBE^۵) از طریق لاتکس معرفی

^۶- Latex co-emulsification

^۷- Latex pre-addition

^۸- Latex post-addition

^۹- State Highway Administration (SHA)

1- Pre-blending

۲- Co-milling

۳- Soap Pre-batching

۴- Post-blending

5 - Polymer Modified Bitumen Emulsion (PMBE)

امولسیفایر و روش‌های اصلاح پلیمری بر قیر امولسیون مورد ارزیابی قرار گیرد. در نهایت، از جمله اهداف این تحقیق، ارتقاء ویژگی‌های کیفی و فنی قیر امولسیون با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی است.

۲. مواد و مصالح آزمایشگاهی

هر قیر امولسیونی از سه جزء اصلی قیر، آب و امولسیفایر تشکیل شده است. در بعضی از موارد ممکن است قیرهای امولسیونی حاوی افزودنی دیگری همچون پایدارکننده‌ها، بهبوددهنده‌های پوششی، پلیمرها، مواد ضدعریان‌شدگی و یا مواد کنترل‌کننده شکست باشند (مؤسسه آسفالت، ۲۰۰۸). ویژگی‌های قیر، پلیمر، امولسیفایر، آب و اسید برای ساخت قیر امولسیونی پلیمری در ادامه ارائه شده است.

۲-۱. امولسیفایر

در این تحقیق، برای تهیه قیر امولسیونی پلیمری از امولسیفایرهای دیرشکن^۱ نوع ۱ با نام تجاری CECA ساخت کشور فرانسه با مقادیر ۵ درصد آمین چرب و نوع ۲ با نام تجاری MQT-III ساخت کشور چین با مقدار ۸۰ درصد آمین چرب استفاده شده است. مشخصات تکمیلی هر کدام از امولسیفایرها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات امولسیفایرهای مورد استفاده

مشخصات	نوع ۱	نوع ۲
وضعیت ظاهری و فیزیکی	مایع زرد رنگ	مایع کهربایی رنگ
آمین چرب	۵ درصد	۸۰ درصد
درجه اسیدی/قلیایی، pH	-	۱۱/۲
نقطه اشتعال، °C	بیشتر از ۱۰۰	بیشتر از ۱۰۰
چگالی در °C ۲۰، گرم بر سانتی متر مکعب	۱/۰۵	۱/۰۳۴

اصلاح قیر امولسیونی و البته آسفالت حفاظتی میکروسرفیسینگ است.

به طور کلی، قیرهای امولسیونی اصلاح شده با پلیمر تأثیر قابل توجهی بر خصوصیات رئولوژی و مکانیکی آسفالت‌های سرد دارند. علاوه بر این، عملکرد قیر امولسیون پلیمری عمدتاً به خصوصیات فنی باقی مانده قیر امولسیون پس از تبخیر رطوبت بستگی دارد. باقی مانده قیر امولسیون به عنوان یک عامل مهم و پارامتر کنترل کیفیت آسفالت‌های سرد محسوب شده و عملکرد آن مرتبط با مشخصات طول دوره خدمت است (سانجیوان و همکاران، ۲۰۱۴؛ طاهرخانی و همکاران، ۲۰۱۶؛ شنگ و همکاران، ۲۰۱۸؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۸؛ شیائو و همکاران، ۲۰۱۹؛ سان و همکاران، ۲۰۲۰). بنابراین، لازم است خصوصیات باقی مانده قیر امولسیون پلیمری بررسی شود. همان‌طور که در بالا نیز اشاره شد، اختلاف نظر میان محققان در مورد چگونگی افزودن لاتکس پلیمری به قیر امولسیونی وجود دارد. از سوی دیگر، در مورد تأثیر امولسیفایر بر انواع روش افزودن لاتکس پلیمری به قیر امولسیون نیز تاکنون مطالعه مشخصی صورت نگرفته است. لذا، در این تحقیق، پلیمر لاتکس SBR در روش‌های حین اختلاط، پیش اختلاط و پس اختلاط در حضور دو نوع امولسیفایر در فرمولاسیون قیرهای امولسیونی اضافه شده و تحت آزمایش‌های مشخص فیزیکی و رئولوژیک قرار گرفت تا تأثیر

^۱- Cationic Slow Setting (CSS)

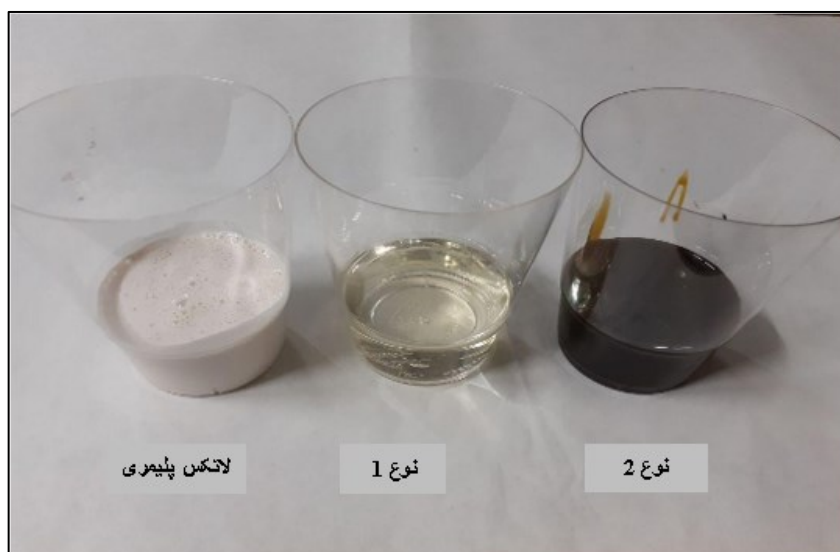
۲-۲. لاتکس پلیمری SBR

مکعب و ۶۳٪ جامد برای ساخت قیر امولسیون پلیمری استفاده گردیده است. سایر مشخصات این پلیمر در جدول ۲ مشخص گردیده است. در شکل ۱، امولسیفایرها به همراه لاتکس مورد استفاده در این تحقیق نشان داده شده است.

در این پژوهش، از پلیمر لاتکس کاتیونی SBR با نام اختصاری Polylatex C ساخت کشور اسپانیا با رنگ سفید، مقدار اسیدیته ۲-۴، چگالی ۰/۹۸ گرم بر سانتی متر

جدول ۲. مشخصات پلیمر لاتکس مورد استفاده

مشخصات	لاتکس
وضعیت فیزیکی	مایع سفید رنگ
وضعیت حل در آب	قابل حل
درجه اسیدی/قلیایی، pH	۲-۴
چگالی در ۲۰ °C، گرم بر سانتی متر مکعب	۰/۹۸



شکل ۱. امولسیفایرها و پلیمر مورد استفاده در این تحقیق

۳-۲. قیر

در این تحقیق، از قیر پایه ۶۰-۷۰ تهیه شده از شرکت نفت پاسارگاد استفاده شده است. مشخصات قیر مصرفی مطابق جدول ۳ است.

ارزیابی مشخصات رئولوژی و قیرزدگی باقی مانده قیرهای امولسیون اصلاح شده با پلیمر به روش‌های مختلف ساخت

جدول ۳. مشخصات قیر مصرفی

آزمایش	روش آزمایش	قیر ۶۰-۷۰
چگالی، کیلوگرم بر متر مکعب	ASTM D7	۱۰/۰۶ - ۱/۱
درجه نفوذ در ۲۵ °C، ۱۰۰ گرم، ۵ ثانیه	ASTM D5	۶۳
نقطه نرمی، °C	ASTM D36	۵۶-۴۹
کشش پذیری در ۲۵ °C، سانتی‌متر	ASTM D113	حداقل ۱۰۰
نقطه اشتعال، °C	ASTM D92	حداقل ۲۵۰
حلالیت در دی سولفید، %	ASTM D4	۹۹/۵
تست لکه	AASHTO T102	منفی
افت وزنی بر اثر حرارت، %	ASTM D6	حداکثر ۰/۲
افت نفوذ بر اثر حرارت، %	ASTM D6 & D5	حداکثر ۲۰

۲-۴. اسید

(HCl^۱) محصول شرکت Merk آلمان بوده است.

مشخصات این نوع اسید در جدول ۴ نشان داده شده است.

اسیدی که در این تحقیق برای پایین آوردن درصد pH محلول آبی مورد استفاده قرار گرفته هیدروکلریک اسید

جدول ۴. مشخصات اسید مصرفی در این تحقیق

مشخصات	اسید
وضعیت فیزیکی	مایع سفید رنگ
وضعیت حل در آب	قابل حل
نقطه انجماد، °C	-۳۰
درجه اسیدی/قلیایی، pH	<۱

۲-۵. آب

لاتکس SBR در سه روش حین اختلاط، پیش اختلاط و پس اختلاط در دستگاه آسیاب کلونیدی آزمایشگاهی شرکت عمارت گستر پیشگامان نوین مطابق شکل ۲ با سرعت ۲۸۴۰ دور در دقیقه به مدت ۳ دقیقه ترکیب شدند. روش تولید قیر امولسیون با پژوهش‌های دیگر محققان و استاندارد ASTM D2397 برای قیرهای امولسیونی کاتیونی دیرشکن مطابقت داشته است (فوربس و همکاران، ۲۰۰۱؛ سالومون، ۲۰۰۶؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۲؛ خدیور و کاووسی، ۲۰۱۳؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۴؛ پنگ و همکاران، ۲۰۱۵؛ ASTM D2397، ۲۰۱۶؛ جین و همکاران، ۲۰۱۹؛ عابدینی و همکاران، ۲۰۲۰؛ اصفهانی و خطائی، ۲۰۲۰). روند

آب مصرفی مورد استفاده در این پژوهش از نوع آشامیدنی و درجه اسیدی/قلیایی (pH) آن ۷ بوده است.

۳. روند طراحی و آزمایش‌ها

۳-۱. روش ساخت و طراحی پروژه

در این تحقیق، برای ساخت قیرهای امولسیونی پلیمری دیرشکن، مقدار ۶۳٪ قیر در دمای ۱۴۰ درجه سلسیوس با محلول امولسیفایری در دمای ۶۰ درجه سلسیوس شامل آب به مقدار ۳۲٪، اسید به مقدار مورد نیاز، ۲/۵ درصد امولسیفایر نوع ۱ و نوع ۲ و ۵/۱۲ درصد پلیمر

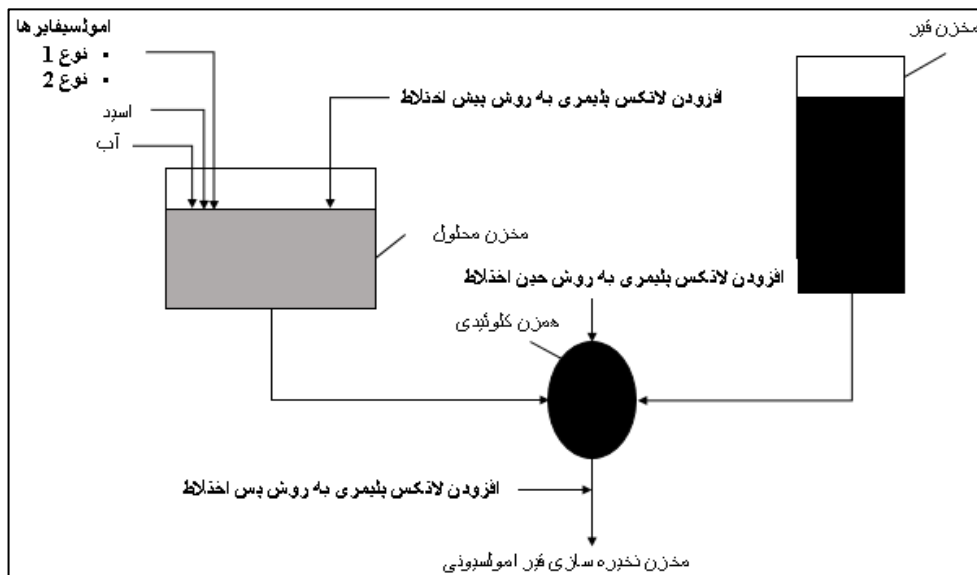
^۱- Hydrochloric acid

پسماند قیر امولسیون نمی‌تواند عمل‌آوری میدانی را شبیه‌سازی کند و سبب آسیب رساندن به اصلاح‌کننده‌های پلیمری قیر امولسیون، جدایی پلیمر از قیر و پیرشدگی و اکسیداسیون بیشتر از نمونه‌های واقعی میدانی می‌گردد (پراپایتراکول و همکاران، ۲۰۱۰). نمونه‌های آماده‌سازی شده برای تقطیر سرد قیر امولسیون در شکل ۴ ارائه شده است.

طراحی قیر امولسیون پلیمری در آسیاب کلوئیدی و درجه‌بندی نمونه‌های پلیمری اصلاح‌شده با لاتکس SBR به ترتیب در شکل ۳ و جدول ۵ ارائه شده است. لازم به ذکر است که آزمایش تقطیر سرد قیر امولسیون مطابق با استاندارد ASTM D7497 (۲۰۱۶) روی قبرهای امولسیونی انجام گرفته است. در حقیقت، با توجه به کاربرد قیر امولسیون در آسفالت‌های حفاظتی به صورت سرد، فرآیند تقطیر و تبخیر در دماهای زیاد برای بازیابی



شکل ۲. دستگاه امولسیون‌ساز آزمایشگاهی شرکت عمارت گستر پیشگامان نوین



شکل ۳. روند طراحی قیر امولسیون پلیمری در همزن کلوئیدی (کینگ و جانستون، ۲۰۱۲)

جدول ۵. درجه بندی نمونه‌های پلیمری اصلاح شده با لاتکس SBR

روش اختلاط	روش اختلاط قیرهای امولسیونی نوع ۱ و نوع ۲ با پلیمر لاتکس SBR
پیش اختلاط با محلول امولسیفایری	پیش اختلاط
پس اختلاط با قیر امولسیونی در مخزن ذخیره سازی	پس اختلاط
اختلاط در حین ترکیب محلول امولسیفایری و قیر در آسیاب کلوئیدی	حین اختلاط



شکل ۴. قیر امولسیونی برای آزمایش تقطیر در دمای کم در ظروف سیلیکونی

۳-۲-۱. ویژگی‌های فیزیکی قیر

تکنیک‌های آزمایشی رایج برای ارزیابی مشخصات فیزیکی قیر امولسیونی شامل تعیین ویسکوزیته، درجه نفوذ، شکل پذیری و نقطه نرمی می‌باشند (کینگ و جانستون، ۲۰۱۲). در این مطالعه، مقدار ویسکوزیته قیرهای امولسیونی با استفاده از آزمایش سی بولت فیورل (ASTM D7496) و ویژگی‌های حساسیت قیر به دمای زیاد و میزان سختی نسبی باقی مانده قیرهای امولسیونی با آزمایش‌های نقطه نرمی (ASTM D36) و درجه نفوذ (ASTM D5) به ترتیب مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، شاخص درجه نفوذ^۵ (PI) قیرها با استفاده از رابطه (۱) مطابق نتایج درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و نقطه نرمی محاسبه شد (رید و همکاران، ۲۰۰۳).

$$PI = \quad (1)$$

$$\frac{1952 - 500 \times \log(Pen_{25}) - 20 \times SP}{50 \times \log(Pen_{25}) - SP - 120}$$

4- Surface Performance Grade (SPG)

5- Penetration Index

۳-۲. آزمایش‌ها

آزمایش‌های فیزیکی و رئولوژی زیر به منظور ارزیابی قیرهای امولسیونی پلیمری تعیین شده‌اند:

- انجام آزمایش‌های پایه قیر و قیر امولسیونی شامل آزمایش‌های سی بولت فیورل، درجه نفوذ و نقطه نرمی به همراه تعیین شاخص حساسیت حرارتی (PI) برای نمونه‌ها.
- آزمایش‌های رئولوژی دما-متغیر^۱ (ASTM D7175) با استفاده از دستگاه رئومتر برشی دینامیک برای تعیین شاخص‌های رئولوژی همچون مدول مختلط^۲ (G*)، زاویه فاز^۳ (δ)، پارامتر G*/sinδ و شاخص درجه عملکردی روسازی^۴ (SPG).

۱- Temperature Sweep

۲- Complex Modulus

۳- Phase Angles

که، Pen₂₅ درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و SP دمای نقطه نرمی بر حسب سلسیوس است.

۲-۲-۳. ارزیابی ویژگی‌های رئولوژی قیر با استفاده از

آزمایش جاروب دما متغیر

پارامترهای رئولوژیک قیر شامل مدول مختلط (G^*) برای مقاومت در برابر تغییر شکل، مدول اتلاف^۱ یا ویسکوز (G')، مدول ذخیره‌سازی^۲ یا الاستیک (G'')، پارامتر $G^*/\sin\delta$ ، پارامتر SPG و زاویه فاز (δ) نمونه‌های قیری بر طبق استاندارد ASTM D7175 با استفاده از دستگاه رئومتر برشی دینامیک smartpave301 شرکت نفت جی محاسبه شد. این آزمایش در فرکانس ثابت ۱۰ رادیان بر ثانیه (۱/۵۹ هرتز)، در محدوده دمایی ۳۰ تا ۹۰ درجه سلسیوس و در صفحه ای با قطر ۲۵ میلی‌متر انجام شده است. مشخصات رئولوژیک قیر با استفاده از فرمول‌های زیر محاسبه شده است (ASTM D7175، ۲۰۱۵؛ مزگر، ۲۰۲۰).

$$G' = |G^*| \sin \delta \quad (۲)$$

$$G'' = |G^*| \cos \delta \quad (۳)$$

نمودارهای مدول مختلط و زاویه فاز تحت اثر ضریب جابجایی با استفاده از ضریب جابجایی ($a(T)$)، عملکرد دمایی ($\log a(T)$)، فرکانس کاهش (ωR)، دمای آزمایش (T) و دمای تعریف شده (T_d) مطابق فرمول‌های ۴ و ۵ در ترکیب اصل زمان-دما (TTS^3) تعریف شده‌اند. ضریب جابجایی نشان داده شده در فرمول (۴) توسط ویلیامز لندل فری برای قیر آسفالتی تعریف شده است (اندرسون و همکاران، ۱۹۹۱؛ کیم و همکاران، ۲۰۱۱؛ بوشهریان و همکاران، ۲۰۱۳). در این مطالعه، دمای ۲۵ درجه سلسیوس برای دمای تعریف شده (T_d) در نمونه‌های قیری فرض شده است.

$$\log a(T) = \frac{-19(T-T_d)}{92+T-T_d} \quad (۴)$$

(۵)

$$\omega_R = \omega \times 10^{\log a(T)}$$

پارامتر $G^*/\sin\delta$ به معنای تأثیر همزمان G^* و زاویه فاز و معادل سفتی قیر در دماهای زیاد است. این پارامتر در سیستم نمره عملکردی (PG) به عنوان فاکتور شیارشدگی برای آسفالت‌های ضخیم تحت بارگذاری تکراری است و معرف دمایی است که مقدار پارامتر $G^*/\sin\delta$ آن حداقل ۱ کیلوپاسکال است. با توجه به کاربرد قیر امولسیون در آسفالت‌های حفاظتی و نازک بودن ضخامت این رویه‌ها، موضوع شیارشدگی مطرح نمی‌باشد. بنابراین، پارامتر $G^*/\sin\delta$ در سیستم نمره عملکردی سطحی (SPG) که مخصوص روکش‌های آسفالت حفاظتی است، بیانگر پارامتر قیرزدگی رویه است که مشخص‌کننده مقاومت در برابر قیرزدگی در هوای گرم (دمای زیاد) است و مقدار حداقل پیشنهادی بر اساس جدیدترین تحقیقات محققان برای کنترل قیرزدگی ۰/۶۵ کیلوپاسکال می‌باشد. در حقیقت، با افزایش پارامتر $G^*/\sin\delta$ ، احتمال وقوع قیرزدگی کاهش می‌یابد (ویجی کومار و همکاران، ۲۰۱۲؛ عابدینی و همکاران، ۲۰۱۶).

۴. نتایج و بحث

۴-۱. آزمایش‌های فیزیکی قیر

در این تحقیق، آزمایش فیزیکی قیر شامل ویسکوزیته سی بولت فیورل، درجه نفوذ و نقطه نرمی انجام شده است.

۴-۱-۱. ویسکوزیته قیر امولسیون

طبق شکل ۵، روش حین اختلاط قیرهای امولسیونی نوع ۱ و روش پیش‌اختلاط قیرهای امولسیونی نوع ۲ به ترتیب با مقادیر ۲۱ و ۳۰ ثانیه دارای بیشترین مقادیر ویسکوزیته هستند. البته مقدار ویسکوزیته سی بولت همه نمونه‌ها بیشتر از حداقل مقدار ۲۰ ثانیه بر اساس استاندارد

^۳- Time-Temperature Superposition (TTS)

^۱- Loss Modulus

^۲- Storage Modulus

مقدار ۳۰ ثانیه است. بر طبق این نتایج، مقدار ویسکوزیته نمونه پیش اختلاط قیرهای امولسیونی نوع ۲ به اندازه ۴۲ درصد بیشتر از نمونه حین اختلاط قیرهای امولسیونی نوع ۱ است. لذا امولسیفایر و روش اصلاح پلیمری در کاهش یا افزایش ویسکوزیته قیر امولسیونی تأثیرگذار است.

ASTM D2357 بوده است. همچنین، این شکل نشان می‌دهد که حداقل مقدار ویسکوزیته سی‌بالت فیورل قیرهای امولسیونی نوع ۱ و نوع ۲ با استفاده از روش‌های حین اختلاط و پیش اختلاط به ترتیب به اندازه ۵ و ۳۰/۴۳ درصد افزایش یافته است. همچنین، حداکثر مقدار ویسکوزیته در میان همه قیرهای امولسیونی نوع ۱ و نوع ۲ متعلق به روش پیش اختلاط قیر امولسیونی نوع ۲ با



شکل ۵. نتایج ویسکوزیته سی بولت فیورل در ۲۵ درجه سلسیوس بر اساس استاندارد ASTM D2357

۱ و ۲ نیز به ترتیب به اندازه ۳۸/۱ و ۱۳/۶ درصد بیشتر شده است. همچنین، نتایج جدول ۶ و نمودار شکل ۶ نشان می‌دهد که مقادیر درجه نفوذ، نقطه نرمی و شاخص PI قیرهای امولسیونی نوع ۲ بیشتر از قیرهای امولسیونی نوع ۱ با امولسیفایر متفاوت است. بر طبق این نتایج، درجه نفوذ، نقطه نرمی و شاخص PI نمونه پیش اختلاط قیر امولسیونی نوع ۲ به ترتیب به اندازه ۶/۴، ۸/۸ و ۴۳/۹۶ درصد بیشتر از نمونه حین اختلاط قیر امولسیونی نوع ۱ است. این نتایج حاکی از آن است که قیرهای اصلاح شده پلیمری نوع ۲ عملکرد بهتری از قیرهای اصلاح شده پلیمری نوع ۱ داشته‌اند.

۴-۱-۲. ویژگی‌های فیزیکی قیر باقیمانده

همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌گردد، روش‌های اصلاح پلیمری حین اختلاط و پیش اختلاط در قیرهای امولسیونی نوع ۱ و نوع ۲ موجب بهبود حداکثر مقدار درجه نفوذ به اندازه ۷/۲ و ۳/۱۳ درصد و همچنین حداقل مقدار نقطه نرمی به اندازه ۴/۳۴ و ۲/۴ شده است. در نتیجه، حداقل مقادیر ویژگی‌های قیر امولسیونی نوع ۱ با استفاده از روش حین اختلاط نسبت به قیر امولسیونی نوع ۲ با استفاده از روش پیش اختلاط بیشتر بهبود یافته است. از سوی دیگر، مطابق شکل ۶، شاخص PI دو روش حین اختلاط و پیش اختلاط قیرهای امولسیونی نوع

جدول ۶. ویژگی‌های قیر باقیمانده بر اساس استاندارد ASTM D2357

کد استاندارد انجام آزمایش	محدوده مجاز بر اساس ASTM D2357	نوع ۲	نوع ۱	نمونه	آزمایش‌های قیر امولسیونی
ASTM D36	۵۷	۶۲/۵	۵۹/۵	پس اختلاط	نقطه نرمی قیر
		۶۲	۶۰	حین اختلاط	
		۶۳/۵	۵۷/۵	پیش اختلاط	
ASTM D5	۹۰-۴۰	۵۰/۵	۵۳/۹	پس اختلاط	درجه نفوذ
		۵۱	۵۲/۸	حین اختلاط	
		۴۹/۴	۵۶/۹	پیش اختلاط	



شکل ۶. نتایج ویسکوزیته سی بولت فیورل در ۲۵ درجه سلسیوس

۴-۲-۱. ویژگی‌های رئولوژیکی قیر

بر طبق شکل‌های ۷، ۸، ۹ و ۱۰، بیشترین روند مدول مختلط (G^*)، پارامتر $G^*/\sin \delta$ ، مدول اتلاف و مدول ذخیره‌سازی و کمترین روند زاویه فاز (δ) به قیرهای اصلاح شده به روش‌های حین اختلاط قیرهای امولسیونی نوع ۱ و پیش اختلاط قیرهای امولسیونی نوع ۲ اختصاص دارد. همچنین، نتایج نمودار مدول مختلط و زاویه فاز در شکل ۸ حاکی از آن بود که نمونه‌های اصلاح شده به روش حین اختلاط قیرهای امولسیونی نوع ۱ و روش

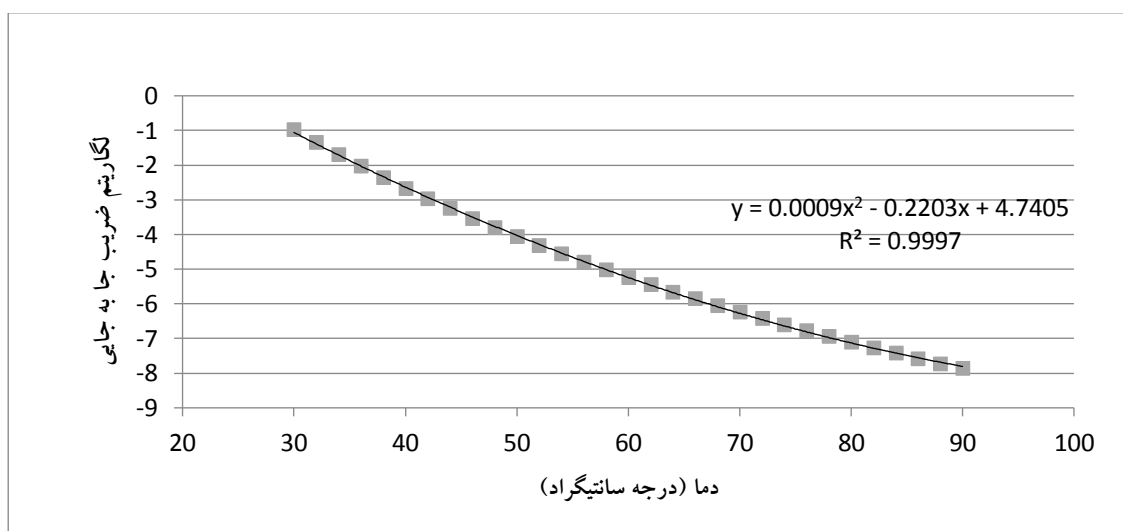
۴-۲. آزمایش جاروب دما متغیر

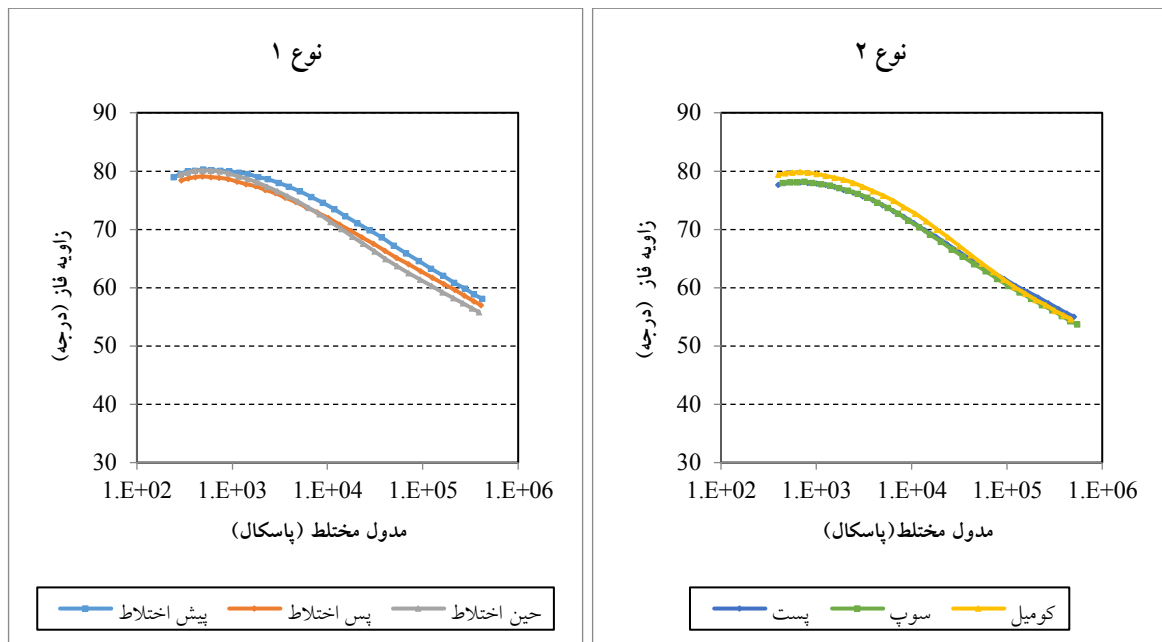
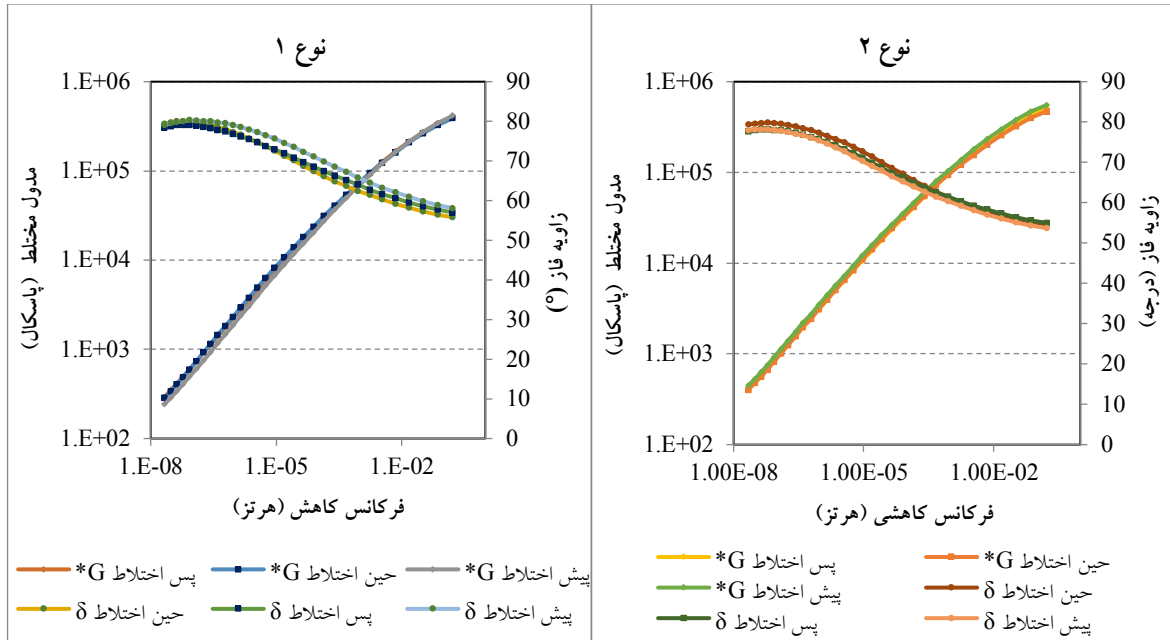
نتایج آزمایش رئولوژی در شکل ۷ (مدول مختلط و زاویه فاز تحت اثر ضریب جابجایی)، شکل ۸ (مدول مختلط - زاویه فاز)، شکل ۹ (مدول اتلاف - دما)، شکل ۱۰ (مدول ذخیره‌سازی - دما) و شکل ۱۱ (پارامتر $G^*/\sin \delta$ - دما) نشان داده شده است.

اصلاح پلیمری حین اختلاط و پیش‌اختلاط به ترتیب ۲۲/۱۰ و ۲۲/۱۵ درصد رشد داشته است. در مقابل، حداکثر مقدار زاویه فاز قیرهای امولسیونی نوع ۱ و نوع ۲ در نمونه‌های در حین اختلاط و پیش‌اختلاط به مقدار ۳/۹۷ و ۳/۱۶ درصد کاهش یافته است. از سوی دیگر، بررسی این نتایج نشان می‌دهد که عملکرد قیر امولسیونی نوع ۲ از قیر امولسیونی نوع ۱ بهتر است. به طوری این حداکثر مقدار مدول مختلط، مدول ذخیره‌سازی و مدول اتلاف در نمونه پیش‌اختلاط قیرهای امولسیونی نوع ۲ به اندازه ۴۵/۸۱، ۴۳/۷۶، ۶۴/۲۳ درصد از مقادیر مشابه در نمونه حین اختلاط قیرهای امولسیونی نوع ۱ بیشتر است. همچنین، مقدار حداقل مقدار زاویه فاز نمونه پیش‌اختلاط قیرهای امولسیونی نوع ۲ نیز به اندازه ۳/۰۳ درصد کمتر از نمونه حین اختلاط قیرهای امولسیونی نوع ۱ است.

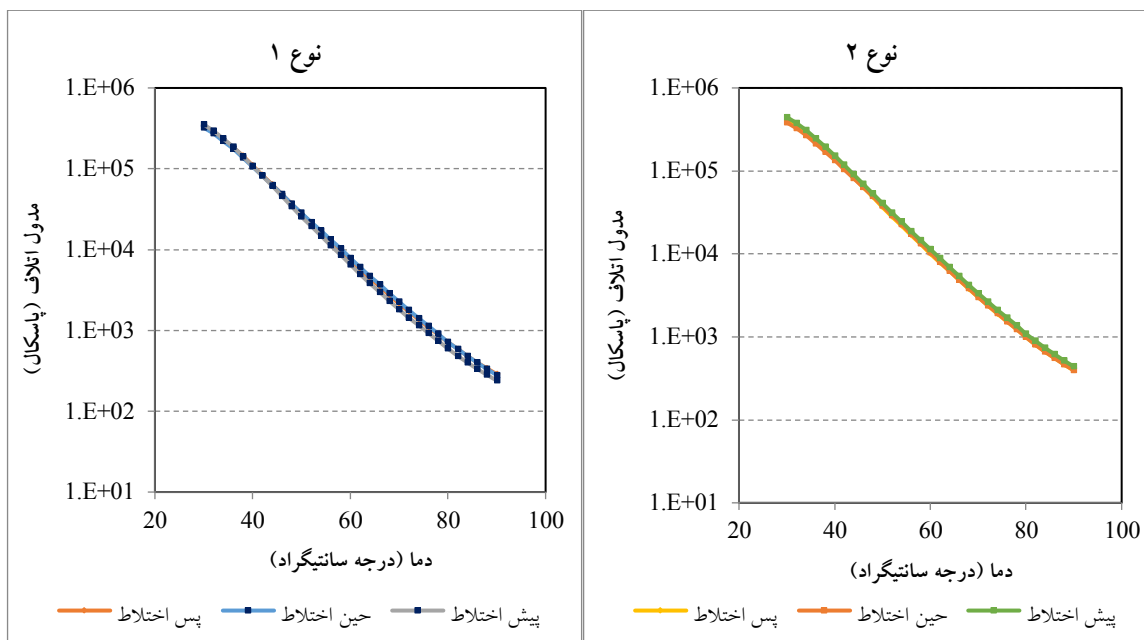
پیش‌اختلاط قیرهای امولسیونی نوع ۲ بیشتر از بقیه روش‌های پلیمری، الاستیک هستند.

نتایج آنالیز این شکل‌ها در جدول ۷ برای دمای روسازی در تابستان (۶۰°C) نشان داده شده است. بر طبق این جدول، بیشترین مقدار مدول مختلط (G^*) و کمترین مقدار زاویه فاز در قیرهای امولسیونی نوع ۱ و نوع ۲ به ترتیب متعلق به روش حین اختلاط با مقادیر ۸/۲۳ کیلوپاسکال و ۷۲/۶ درجه و روش پیش‌اختلاط با مقادیر ۱۲ کیلوپاسکال و ۷۰/۴ درجه است. مطابق آن، نمونه‌های حین اختلاط و پیش‌اختلاط در نمونه‌های قیر امولسیون نوع ۱ و نوع ۲ حداقل مقدار مدول ذخیره‌سازی (G') را به اندازه ۶۶/۴ و ۱۱/۹ درصد و همچنین حداقل مقدار مدول اتلاف (G'') را به اندازه ۲۴/۶ و ۲۰/۵ درصدی افزایش دادند که سبب عملکرد بهتر آن‌ها نسبت سایر نمونه شده است. همچنین، حداقل مقدار مدول مختلط (G^*) در نمونه‌های نوع ۱ و نوع ۲ با استفاده از روش‌های

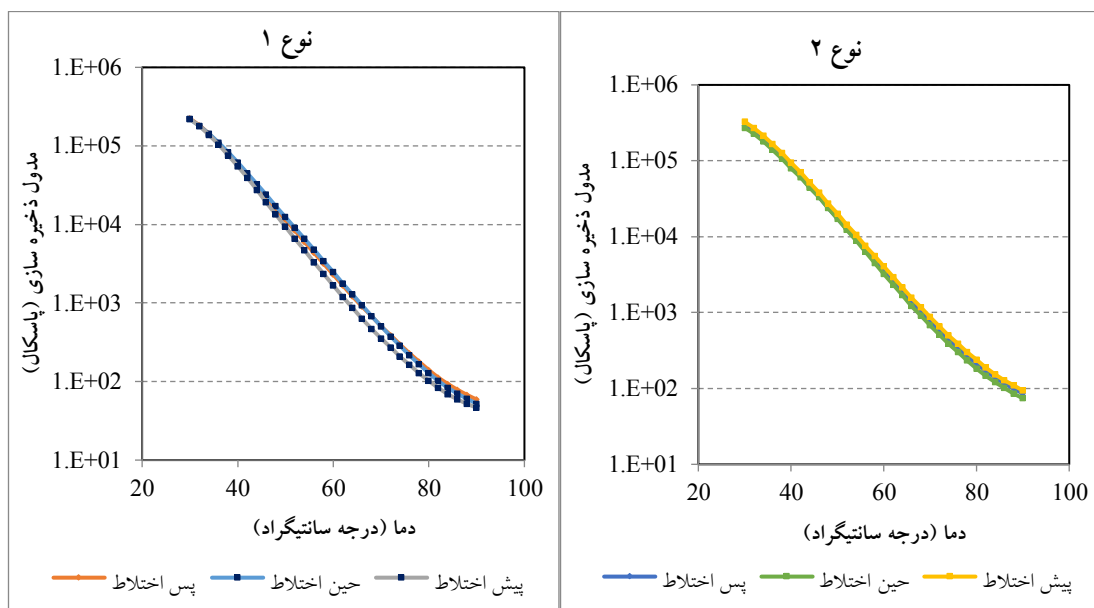




ارزیابی مشخصات رئولوژی و قیرزدگی باقی مانده قیرهای امولسیون اصلاح شده با پلیمر به روش‌های مختلف ساخت



شکل ۹. نمودارهای تغییرات مدول اتلاف-دما



شکل ۱۰. نمودارهای تغییرات مدول ذخیره‌سازی-دما

جدول ۷. نتایج نمودارهای رئولوژیک از امولسیفایرهای نوع ۱ و نوع ۲ در دمای ۶۰ درجه سلسیوس

نوع ۲			نوع ۱			روش اصلاح قیر پلیمری
زاویه فاز	مدول اتلاف	مدول ذخیره‌سازی	زاویه فاز	مدول اتلاف	مدول مختلط ذخیره‌سازی	
درجه	(کیلو پاسکال)	(کیلو پاسکال)	درجه	(کیلو پاسکال)	(کیلو پاسکال)	
۷۰/۴	۴/۰۴	۱۱/۳	۷۵/۶	۱/۶۸	۶/۵۲	پیش اختلاط

۷۱/۱	۳/۴۶	۱۰/۱	۱۰/۷	۷۲/۹	۲/۲۹	۷/۴۴	۷/۷۹	پس اختلاط
۷۲/۷	۳/۲۴	۱۰/۴	۱۰/۹	۷۲/۶	۲/۴۶	۷/۸۶	۸/۲۳	حین اختلاط

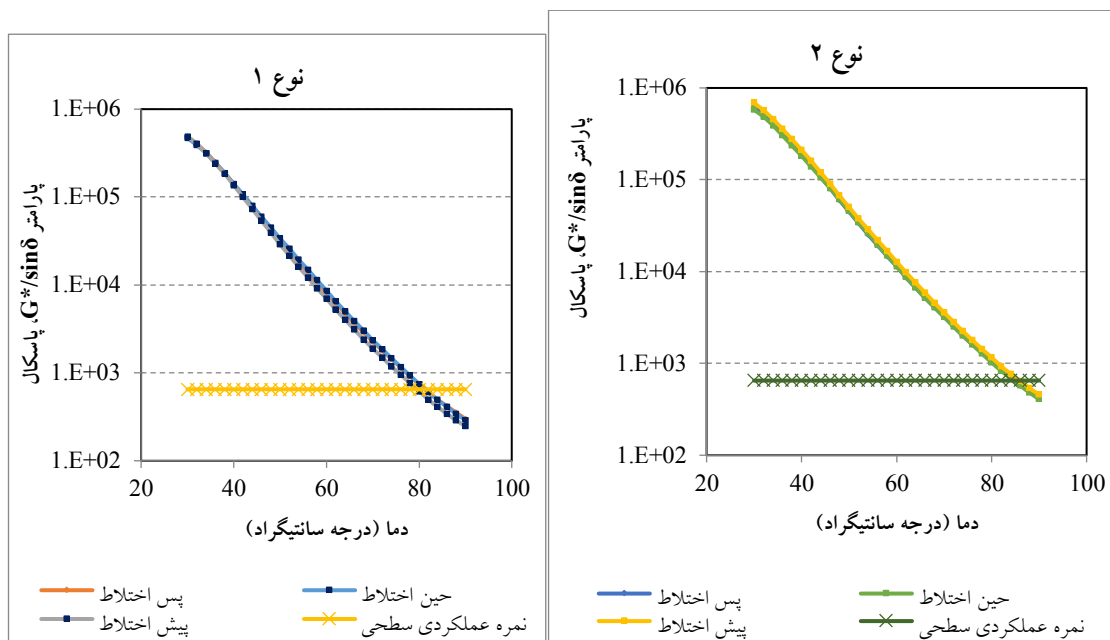
۴-۲-۲. مقادیر سیستم درجه بندی عملکرد SPG

به طور کلی، از سیستم درجه بندی عملکرد SPG برای چسباننده قیری آسفالت های حفاظتی استفاده می گردد (اپس و همکاران، ۲۰۰۱). در این پژوهش، از پارامتر نمره عملکرد سطحی روسازی SPG که نشان دهنده مقاومت در برابر خرابی قیرزدگی با مقدار حد مجاز ۶۵۰ پاسکال است، برای قیرهای امولسیونی مطابق نمودار شکل ۱۱ و جدول ۸ استفاده گردید. بر طبق نمودار شکل ۱۱ و جدول ۸، نمونه های حین اختلاط و پیش اختلاط از قیرهای امولسیون نوع ۱ و نوع ۲ با مقادیر ۸۱/۳۴ و ۸۵/۸۷ درجه سلسیوس دارای بیشترین مقدار SPG و پارامتر $G^*/\sin\delta$ است. مطابق نتایج جدول ۸، مقدار SPG

قیرهای امولسیون نوع ۱ در روش حین اختلاط نسبت به پیش اختلاط به اندازه ۲/۳ درصد رشد داشته است. در مقابل، مقدار SPG قیرهای امولسیون نوع ۲ در روش پیش اختلاط نسبت به حین اختلاط به اندازه ۱/۲ درصد افزایش یافته است. در نتیجه، نرخ رشد مقدار SPG در قیرهای امولسیون نوع ۱ نسبت به قیرهای امولسیون نوع ۲ بیشتر بوده است. در نهایت این نتایج نشان داد که قیرهای اصلاح شده نوع ۲ با محدوده ۸۴/۶۴-۸۵/۸۷ درجه سلسیوس دارای SPG بیشتری از قیرهای امولسیون نوع ۱ با محدوده ۷۹/۵۱-۸۱/۳۴ درجه سلسیوس هستند.

جدول ۸. نتایج SPG قیرهای امولسیون نوع ۱ و نوع ۲

پارامتر SPG = ۶۵۰ پاسکال معیار نمره عملکرد سطحی روسازی، درجه سلسیوس		روش اصلاح قیر پلیمری
نوع ۲	نوع ۱	
۸۵/۸۷۴	۷۹/۵۱	پیش اختلاط
۸۴/۷۱۹	۸۱/۳۳۸	پس اختلاط
۸۴/۶۴۳	۸۱/۳۴۳	حین اختلاط



شکل ۱۱. نمودارهای تغییرات $(G^*/\sin\delta)$ - دما و نمره عملکردی سطحی قیرهای امولسیونی نوع ۱ و نوع ۲

۵. نتیجه گیری

- نتایج آزمایش‌های فیزیکی و رئولوژی قیر نشان‌دهنده آن بود که قیرهای امولسیونی پلیمری نوع ۲ با مقدار بیشتر آمین چرب عملکرد بهتری از قیر امولسیونی پلیمری نوع ۱ با مقدار کمتر آمین چرب داشته است. بر طبق این نتایج، درجه نفوذ، نقطه نرمی، ویسکوزیته سی بولت فیورل، پارامتر $G^*/\sin\delta$ و پارامتر SPG نمونه پیش‌اختلاط به‌عنوان نمونه بهینه قیر امولسیونی نوع ۲ به ترتیب به اندازه $6/4$ درصد، $5/8$ درصد، $42/86$ درصد و $5/57$ درصد بهتر از نمونه حین اختلاط به‌عنوان نمونه بهینه قیر امولسیونی نوع ۱ است.
- به لحاظ اقتصادی، قیرهای اصلاح‌شده پلیمری به روش پس‌اختلاط در همه قیرهای امولسیونی نیاز به درصد امولسیفایر کمتری نسبت به سایر روش‌های اصلاحی بوده است و نیازی به تغییر در کارخانه‌های قیر امولسیونی برای آن نیست. این دلایل باعث می‌گردد که قیمت تمام شده تولید قیر امولسیونی به روش پس‌اختلاط تقریباً به میزان 50 درصد نسبت به سایر روش‌های اصلاح پلیمری کمتر شود. همچنین، نوع امولسیفایر نیز در قیمت تمام شده قیر امولسیونی

در این تحقیق، تأثیر انواع روش‌های اصلاح پلیمری بر قیرهای امولسیونی با هدف ارتقاء ویژگی‌های فیزیکی و رئولوژی قیر امولسیونی مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفت. در نهایت، بررسی و تحلیل نتایج آزمایش‌های انجام شده به‌صورت زیر جمع‌بندی می‌شود:

- بر طبق نتایج آزمایشگاهی، روش اصلاح پلیمری بر ویژگی‌های فیزیکی و رئولوژی قیر امولسیون تأثیرگذار است. این نتایج نشان داد که استفاده از روش‌های اصلاح پلیمری حین اختلاط در قیرهای امولسیونی نوع ۱ و پیش‌اختلاط در قیرهای امولسیونی نوع ۲، حداقل مقادیر برخی از ویژگی‌های قیر همچون درجه نفوذ به میزان $7/2$ و $3/13$ درصد، نقطه نرمی به میزان $4/34$ و $2/4$ درصد، ویسکوزیته سی بولت فیورل به میزان 5 و $30/43$ درصد و پارامتر SPG به میزان $2/3$ و $1/2$ درصد بهبود داده است. این امر نشان‌دهنده آن است که در مجموع روش حین اختلاط قیرهای امولسیونی نوع ۱ نرخ رشد بیشتری از روش پیش‌اختلاط قیرهای امولسیونی نوع ۲ داشته است.

۶. پیشنهادها

این تحقیق با توجه پژوهش انجام شده، موارد زیر را برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌دهد:

- بررسی ویژگی‌های آسفالت سرد پوششی تحت اثر روش‌های مختلف تولید قیرهای امولسیون اصلاح‌شده با پلیمر
- بررسی امکان استفاده همزمان از دو پلیمر مایع در جهت اصلاح قیر امولسیونی
- بررسی امکان استفاده و خواص رئولوژی باقی‌مانده قیر امولسیون اصلاح‌شده با رزین جایگزین پلیمر لاتکس SBR

۷. تشکر و قدردانی

به این وسیله مراتب سپاس خود را از تلاش و زحمات ارزشمند شرکت نفت جی و شرکت عمارت گستر پیشگامان نوین در زمینه‌ی انجام آزمایش‌های فیزیکی و رئولوژی قیر جهت پیشبرد اهداف اینجانب تقدیم می‌دارم. از درگاه ایزد منان دوام، عزت، سلامت و موفقیت رو افزون را برای تمامی افراد آنها مسئلت دارم.

مؤثر است. مطابق نتایج به‌دست آمده، نمونه با قیر امولسیون پلیمری نوع ۲ از نمونه قیر امولسیون پلیمری نوع ۱، در حداقل و حداکثر درصد امولسیفایر مورد نیاز برای اصلاح پلیمری ارزان‌تر است. اختلاف قیمت این دو قیر امولسیونی در قیمت تمام شده حداکثر درصد پلیمر (۴ درصد) روش‌های پس‌اختلاط، پیش‌اختلاط و حین اختلاط به میزان ۱۸/۷۴ درصد بوده است. اگرچه مخلوط‌ها و قیرهای سرد اصلاح‌شده به روش پس‌اختلاط دارای مشخصات قابل قبول حداقلی بوده است و الزامات آیین‌نامه‌ای قیری و آسفالتی را رعایت کرده است ولی نمی‌توان از کیفیت دیگر انواع قیر امولسیونی پلیمری پیش‌اختلاط و حین اختلاط صرفاً به دلیل مسائل اقتصادی چشم‌پوشی کرد. در نتیجه، قیر امولسیونی با امولسیفایر مشخص رفتار رئولوژیک ویژه‌ای در روش اصلاح پلیمر با لاتکس از خود نشان می‌دهد. لذا جهت ارتقاء کیفیت، بایستی برای هر نوع قیر امولسیونی، روش اصلاح پلیمری مشخص مطابق با امولسیفایر آن انتخاب و تعیین گردد.

۸. مراجع

- Abedini, M., Hassani, A., Kaymanesh, M. R. and Yousefi, A. A. 2016. "The rheological properties of a bitumen emulsion modified with two types of SBR latex". *Petrol. Sci. Technol.*, 34(17-18): 1589-1594.
- Abedini, H., Naimi, S. and Abedini, M. 2017a. "Rheological properties of bitumen emulsion modified with NBR latex". *Petrol. Sci. Technol.*, 35(15): 1576-1582.
- Abedini, M., Hassani, A., Kaymanesh, M. R. and Yousefi, A. A. 2017b. "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
- Abedini, M., Hassani, A., Kaymanesh, M. R., Yousefi, A. A. and Abedini, H. 2020. "Multiple stress creep and recovery behavior of SBR-modified bitumen emulsions". *J. Test. Eval.*, 48(4).
- Anderson, D. A., Christensen, D. W. and Bahia, H. 1991. "Physical properties of asphalt cement and the development of performance-related specifications". *J. Assoc. Asphalt Paving Technol.*, 60.
- Booshehrian, A., Mogawer, W. S. and Bonaquist, R. 2013. "How to construct an asphalt binder master curve and assess the degree of blending between RAP and virgin binders". *J. Mater. Civ. Eng.*, 25(12): 1813-1821.
- ASTM D7175. 2015. "Standard test method for determining the rheological properties of asphalt binder using a dynamic shear rheometer". Retrieved from ASTM International, West Conshohocken, PA: <https://www.astm.org/Standards/D7175.htm>
- ASTM D2397. 2016. "Standard specification for cationic emulsified asphalt". Retrieved from ASTM International, West Conshohocken, PA. <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D7497-09R16>

- ASTM D7497. 2016. "Practice for recovering residue from emulsified asphalt using low temperature evaporative technique". Retrieved from ASTM International, West Conshohocken, PA. <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D7497-09R16>
- Epps, A. L., Glover, C. J. and Barcena, R. 2001. "A performance-graded binder specification for surface treatments". Research Report 1710-1. <http://tti.tamu.edu/documents/1710-1.pdf>
- Esfahani, M. A. and Khatayi, A. 2020. "Effect of type and quantity of emulsifier in bitumen polymer emulsion on microsurfacing performance". *Int. J. Pavement Eng.* <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1784416>
- Forbes, A., Haverkamp, R. G., Robertson, T., Bryant, J. and Bearsley, S. 2001. "Studies of the microstructure of polymer-modified bitumen emulsions using confocal laser scanning microscopy". *J. Microscopy*, 204(3): 252-257.
- 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.
- Institute, A. 2008. "A basic asphalt emulsion manual". Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- 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*.
- Johnston, J. B. and King, G. 2008. "Using polymer modified asphalt emulsions in surface treatments". A Federal Lands Highway Interim Report, Federal Highway Administration, Washington DC, USA.
- Khadivar, A. and Kavussi, A. 2013. "Rheological characteristics of SBR and NR polymer modified bitumen emulsions at average pavement temperatures". *Constr. Build. Mater.*, 47: 1099-1105.
- Kim, Y. R., Underwood, B., Sakhaei Far, M., Jackson, N. and Puccinelli, J. 2011. "LTPP computed parameter: Dynamic modulus". Federal Highway Administration Research and Technology.
- King, G. and Johnston, J. 2012. "Polymer modified asphalt emulsions composition, uses, and specifications for surface treatments". Federal Highway Administration.
- King, G. N., King, H., Galehouse, L., Voth, M. D., Lewandowski, L. H., Lubbers, C. and Morris, P. 2010. "Field validation of performance-based polymer-modified emulsion residue tests: The FLH study". First International Conference on Pavement Preservation, California Department of Transportation, Federal Highway Administration, Foundation for Pavement Preservation.
- Lesueur, D. 2011. "Polymer modified bitumen emulsions (PMBEs). In: *Polymer Modified Bitumen*", Elsevier, pp. 25-42.
- Mezger, T. 2020. "The rheology handbook: For users of rotational and oscillatory rheometers". <https://doi.org/10.1515/9783748603702>
- Pan, C., Liang, D., Mo, L., Riara, M. and Lin, J. 2019. "Influence of different modifiers on bonding strength and rheological performance of bitumen emulsion". *Mater.*, 12(15): 2414.
- Pang, J., Du, S., Chang, R., Pei, Q. and Cui, D. 2015. "Effect of emulsifier content on the rheological properties of asphalt emulsion residues". *J. Appl. Polym. Sci.*, 132(15).
- Prapaitrakul, N., Han, R., Jin, X., Martin, A. E. and Glover, C. J. 2010. "Comparative study on recovered binder properties using three asphalt emulsion recovery methods". *J. Test. Eval.*, 38(6): 653-659.
- Read, J., Whiteoak, D. and Hunter, R. N. 2003. "The Shell bitumen handbook". Thomas Telford.
- Salomon, D. R. 2006. "Asphalt emulsion technology". Transportation Research Board.
- Sanjeevan, S., Piratheepan, M., Hajj, E. Y. and Bush, A. K. 2014. "Cold in-place recycling in Nevada: Field performance evaluation over the past decade". *Transport. Res. Record*, 2456(1): 146-160.
- Shafii, M., Rahman, M. A. and Ahmad, J. 2011. "Polymer modified asphalt emulsion". *ULTRAPAVE*.
- 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.
- 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: 4672413.
- Taherkhani, H., Firoozi, F. and Bolouri Bazaz, J. 2016. "Evaluation of the mechanical properties of the cement treated cold-in-place recycled asphalt mixtures". *Int. J. Transport. Eng.*, 3(4): 301-312.
- Takamura, K. and Heckmann, W. 2001. "Polymer network formation in the pavement using SBR latex modified asphalt emulsions". *Stud. Surf. Sci. Catal.*, 132: 271-274.
- Vijaykumar, A., Arambula, E., Freeman, T. J. and Martin, A. E. 2012. "Revision and further validation of surface-performance graded specification for surface treatment binders". Research Report, Texas A&M Transportation Institute, 128 p.
- 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. Build. Mater.*, 220: 577-586.
- Yang, J., Zhang, Z., Fang, Y. and Luo, Y. 2020. "Performance characterization of waterborne epoxy resin and styrene-butadiene rubber latex composite modified asphalt emulsion (WESAE). *Coatings*, 10(4): 352.

- Zhang, Q., Fan, W., Wang, T., Nan, G. and Sunarso, J. 2012. "Influence of emulsification on the properties of styrene-butadiene-styrene chemically modified bitumens". *Constr. Build. Mater.*, 29: 97-101.
- Zhang, Q., Fan, W., Wang, T., Sunarso, J. and Nan, G. 2014. "The influence of emulsifier type on conventional properties, thermal behavior, and microstructure of styrene-butadiene-styrene polymer modified bitumen". *Petrol. Sci. Technol.*, 32(10): 1184-1190.
- Zhang, J., Fan, Z., Hu, D., Hu, Z., Pei, J. and Kong, W. 2018. "Evaluation of asphalt-aggregate interaction based on the rheological properties". *Int. J. Pavement Eng.*, 19(7): 586-592.

