

تأثیر پودر لاستیک و ساسوبیت بر پارامترهای مقاومتی آسفالت گرم

محسن ابوطالبی اصفهانی*، استادیار دانشکده عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان
اشکان رحیمی، کارشناس ارشد راه و ترابری، اداره کل راه و شهرسازی کرمان

Email: m.aboutalebi.e@eng.ui.ac.ir

دریافت: ۹۶/۰۲/۰۱ - پذیرش: ۹۶/۰۵/۰۸

چکیده

به منظور بهبود عملکرد و افزایش دوام مخلوط‌های آسفالتی در مقابل خرابی‌های مختلف، از افزودنی‌های متفاوتی استفاده می‌شود. از میان انواع این افزودنی‌ها، نتایج کاربرد پودر لاستیک نشان می‌دهد که این ماده به عنوان یک افزودنی شاخص، در جهت افزایش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر پدیده خستگی و شیارشدگی، تأثیرگذار بوده است. همچنین، استفاده از ساسوبیت به منظور کاهش دمای اختلاط و تراکم مخلوط آسفالتی و در نتیجه کاهش پیرشدگی حین تولید، مؤثر می‌باشد. هدف این پژوهش، بررسی تأثیر پودر لاستیک و ساسوبیت و تأثیر هم‌زمان این دو افزودنی بر پارامترهای مقاومتی نظیر استقامت مارشال در حالت خشک و مرطوب، خستگی در سطوح مختلف کرنش، شیارشدگی و مدول برجهندگی، می‌باشد. مخلوط‌هایی به طور مجزا با پودر لاستیک (۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد) و ساسوبیت (۱، ۲ و ۳ درصد) تهیه شد و سپس مخلوطی با مقدار بهینه هر یک از افزودنی‌ها که از مخلوط‌های مجزا به دست آمده، آماده گردید و آزمایش‌های مذکور روی آنها انجام شد. نتایج حاکی از آن است که افزودن پودر لاستیک و ساسوبیت به طور مجزا و هم‌زمان باعث افزایش پارامترهای مقاومتی بیان شده می‌شود. نسبت مارشال در حالت خشک با ۱٪ و ۱۰٪ و در حالت مرطوب با ۱٪ و ۱۵٪، به ترتیب با ساسوبیت و پودر لاستیک به حداکثر مقدار خود رسیده است. در آزمایش تیرچه خستگی و شیارشدگی، مقدار ساسوبیت و پودر لاستیک بهینه به ترتیب ۲٪ و ۱۵٪ نتیجه شده است که مقادیر شیارشدگی در ۲٪ و ۳٪ ساسوبیت به هم نزدیک هستند. افزایش مدول برجهندگی با مقادیر مختلف افزودنی‌های فوق قابل توجه نیست. بیشترین تأثیر این دو افزودنی بر مقاومت خستگی و شیارشدگی بوده است. اثر استفاده هم‌زمان این دو افزودنی بر افزایش مقاومت خستگی و شیارشدگی قابل توجه است.

واژه‌های کلیدی: پودر لاستیک، ساسوبیت، مقاومت مارشال و خستگی، شیارشدگی، مدول برجهندگی

۱. مقدمه

بهره‌بردی نیست. بدین ترتیب، شرایط مصرف آنها محدود شده و از این‌رو لازم است در خصوص تغییر خواص آنها اقدامات لازم صورت گیرد. پژوهش‌ها در این ارتباط منجر به ارائه روش‌های اصلاح قیرها و تولید افزودنی‌ها شده است. این موارد باعث افزایش دامنه

چسباننده قیری که از پالایش قیرهای خام و طبیعی به دست می‌آید دارای خواص شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی مناسب، مطابق با عملکرد مورد انتظار در

ماده بوده که می‌توانند مستقل از یکدیگر حرکت کنند. با ولکانیزاسیون این ماده با موادی چون سولفور، پیوندهای عرضی بین این زنجیره‌ها شکل گرفته که مانع حرکت مستقل آنها نسبت به هم می‌شود. در اثر این فرایند، تغییر شکل ناشی از اعمال بار روی لاستیک پس از بار برداری، حذف می‌شود. بدین ترتیب، این افزودنی در ترکیب با قیر می‌تواند خاصیت الاستیک آن را افزایش داده و در مقابل خستگی و شیارشدگی مقاومت کند (دپارتمان حمل و نقل کالیفرنیا، ۲۰۰۳).

ساسوبیت یک افزودنی هیدروکربنی خالص و بدون گروه عامل است که دارای ویژگی پایداری شیمیایی و مقاومت در برابر پیرشدگی است. اگر چه این افزودنی در حالت خالص در دمای تقریبی 100°C ذوب می‌شود، ولی در ترکیب با قیر، نقطه ذوب آن به کمتر از $80-85^{\circ}\text{C}$ می‌رسد که اجازه تراکم مخلوط آسفالتی را در دمای کمتر از 100°C می‌دهد و می‌تواند دمای اختلاط را 18°C تا 54°C کاهش دهد. در این حالت، چون دمای لازم برای روان کردن قیر کاهش می‌یابد پس پیرشدگی حین تولید و مصرف به علت جلوگیری بیشتر از تبخیر رزین‌ها و روغن‌ها کاهش می‌یابد. همچنین، در مصرف سوخت و کاهش آلودگی هوا تأثیر به‌سزایی دارد (کاووسی و همکاران، ۱۳۹۰؛ جمشیدی و همکاران، ۲۰۱۳؛ کوپر، ۲۰۰۹).

هدف و پرسش اصلی این پژوهش، ارزیابی تأثیر افزودنی‌های پودر لاستیک و ساسوبیت به طور مجزا و هم‌زمان بر مقاومت مارشال در حالت خشک و مرطوب، خستگی در سطوح مختلف کرنش، شیارشدگی و مدول برجهندگی می‌باشد. از جمله اهداف و پرسش‌های دیگر، میزان تأثیر به ازای مصرف درصد‌های مختلف دو افزودنی و تعیین درصد بهینه مصرف هر یک، برای پارامترهای مقاومتی بیان شده، می‌باشد. در این راستا، نمونه‌های آسفالتی با مقادیر متفاوتی از پودر لاستیک و ساسوبیت ساخته، تحت

کاربرد چسباننده قیری گشته است. لذا، برای داشتن یک روسازی با مشخصات فنی مناسب، عملکرد قابل قبول و اقتصادی، مصرف قیرهای اصلاح شده به روش‌های مختلف، محرز است (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، ۱۳۹۰).

مصرف قیر در مخلوط آسفالتی محدود به حدود ۵٪ می‌باشد. ولی این مقدار کم تعیین‌کننده رفتار اساسی کل مخلوط می‌باشد. علت آن این است که کل دانه‌های مصالح با این ماده چسباننده به یکدیگر متصل و مخلوطی یکپارچه ایجاد می‌کنند. در صورتی که طی تمام مراحل آماده‌سازی تا مصرف و یا حین بهره‌برداری، تغییری در خواص فیزیکی و مکانیکی چسباننده حاصل شود، کل مخلوط تحت تأثیر قرار می‌گیرد. برای افزایش پایداری و مقاومت در برابر عوامل مختلف که باعث کاهش خواص اولیه چسباننده می‌شود، از افزودنی‌ها و اصلاح‌کننده‌های مختلفی استفاده می‌شود که از جمله آنها می‌توان پودر لاستیک و ساسوبیت را نام برد (بهبهانی و همکاران، ۱۳۹۴).

بازیافت لاستیک‌های فرسوده دور انداخته شده با توجه به مسائل زیست‌محیطی و سلامت جامعه، مسئله مهمی است. ترکیبات لاستیک‌های فرسوده به صورتی است که برای تجزیه آنها در طبیعت نیاز به ۶۰۰۰ سال زمان است. از این‌رو، مراکز تحقیقاتی و علمی در پی چاره‌اندیشی برای آنها بوده و هستند. اهمیت توجه به آن وقتی مشخص می‌شود که فقط در آمریکا آمار ۲۸۵ میلیون حلقه لاستیک اسقاط شده در مطالعات مشاهده می‌شود (دپارتمان حمل و نقل کالیفرنیا، ۲۰۰۳؛ شالبای و خان، ۲۰۰۵؛ فرانسیسکو و همکاران، ۲۰۱۲).

لاستیک طبیعی به‌صورت ذاتی چسبنده بوده و با افزایش دما به سادگی تغییر شکل می‌دهد و نیز در دمای کم بسیار شکننده است. به همین دلیل، این ماده برای ساخت محصولی با الاستیسیته زیاد قابل استفاده نیست. دلیل این ویژگی، زنجیره‌های طولیل پلیمری سازنده این

برجهندگی با زیاد شدن مقدار بازیافتی، افزایش یافت. از طرف دیگر، مقاومت کششی غیرمستقیم و مدول برجهندگی مخلوط‌های حاوی پودر لاستیک کاهش، ولی مقاومت در برابر شیارشدگی آنها افزایش یافته است.

در مطالعه‌ای دیگر، به بررسی قیر اصلاح شده با پودر لاستیک بازیافتی و پودر لاستیک اصلاح شده پرداخته شده است. در این پژوهش، از آزمونی ابداعی (اندازه‌گیری نیروی خروج) جهت اندازه‌گیری و مقایسه نیروی برشی لایه‌ای بین قیر و سنگدانه، استفاده شده است. آنها تأثیر ذرات لاستیک، دمای اختلاط، زمان اختلاط، نوع سنگدانه‌های مصرفی و شرایط بهینه جهت عمل‌آوری را با نیروی خروج، مورد ارزیابی قرار دادند. همچنین، با آزمایش رئومتر برش دینامیک به این نتیجه رسیدند که استفاده از پودر لاستیک علاوه بر اینکه از نقطه نظر زیست‌محیطی مطلوب است، از نقطه نظر فنی و عملکردی بسیار مناسب و مطلوب خواهد بود (طائریان و همکاران، ۱۳۹۴).

در تحقیقی که توسط نیازی (۱۳۹۴) صورت گرفت، به مطالعه تأثیر کاهش دمای پخت با افزودنی‌های ساسوبیت و ژئولیت بر پیرشدگی و عمرخستگی مخلوط آسفالتی، پرداخته شده است. نتایج حاکی از آن است که عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی گرم بیشتر از مخلوط‌های آسفالتی داغ بوده و ساسوبیت نسبت به ژئولیت در افزایش عمر خستگی مؤثرتر است.

منصوریان و مولایی (۱۳۹۴) در پژوهش خود، با انجام آزمایش خزش دینامیک، به بررسی اثر افزودنی‌های خرده لاستیک و خرده شیشه بر مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگ‌دانه‌ای، پرداخته‌اند. خروجی این مطالعه نشان داد که به‌کار بردن افزودنی‌های فوق در مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگ‌دانه‌ای باعث بهبود شیارشدگی می‌شود.

آزمایش‌های مرتبط قرار گرفته و نتایج آزمایش‌ها با مقادیر نمونه شاهد مقایسه و ارزیابی گشته است. سپس، مخلوطی با درصد بهینه دو افزودنی تهیه و با انجام آزمایش‌های مذکور و مقایسه با نمونه شاهد، نتایج مورد تحلیل واقع شده است.

۲. مروری بر پیشینه تحقیقات

خصوصیات پودر لاستیک و ساسوبیت نظر محققین را به خود جلب نموده و بدین سبب مطالعات زیادی روی آنها در بخش‌های مختلفی صورت گرفته که پیوند بین مطالعه حاضر و مطالعات فوق ممکن است منجر به نتایج مطلوب‌تری شود. در ادامه برخی از این مطالعات مورد بررسی قرار می‌گیرد.

شفابخش و رضائیان (۱۳۸۹) در مطالعه خود، به بررسی جامعی در خصوص افزودنی‌های کف قیر، سیمان پرتلند، آهک مرده، آهک زنده، پوزولان، سرباره و پودر لاستیک در مخلوط‌های بازیافتی که به روش سرد و درجا با استفاده از مصالح خرده آسفالتی تهیه شده‌اند، پرداخته‌اند. در این پژوهش آزمایشگاهی، مدول برجهندگی، مقاومت مارشال و توانایی تحمل کشش غیر مستقیم، مورد ارزیابی قرار گرفته است. آنها از نتایج آزمایش‌های به‌دست آمده و با استفاده از نرم‌افزار SPSS، MATLAB و شبکه‌های عصبی مصنوعی RBF، اقدام به مدل‌سازی برای پیش‌بینی نتایج در حالت‌های مختلف نمودند.

بهبهانی و همکاران (۱۳۹۳) در تحقیق آزمایشگاهی خود به بررسی تأثیر پودر لاستیک و مصالح بازیافتی آسفالتی بر مقاومت کششی غیرمستقیم و مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی گرم، پرداختند. آنها از دانه-بندی شماره ۵ نشریه ۲۳۴، پودر لاستیک با مش ۴۰، مصالح بازیافتی و قیر خالص AC85/100 استفاده کردند. نتایج حاکی از آن است که مقاومت در برابر شیارشدگی، مقاومت کششی غیرمستقیم و مدول

مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که ساسوبیت نسبت به آهک هیدراته به‌طور مؤثری باعث بهبود مقاومت مخلوط‌های آسفالتی شاهد و مخلوط‌های حاوی گوگاس در برابر رطوبت و سیکل‌های ذوب و یخبندان می‌گردد.

در پژوهشی که توسط تقوی زواره و همکاران (۱۳۹۵) انجام شده، به بررسی پدیده‌ی عریان‌شدگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی گوگاس، که نوعی گوگرد پلیمری است، با استفاده از آزمایش لاتمن اصلاح شده و مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها در شرایط اشباع و خشک، پرداخته شده است. این مطالعه نشان داد که گوگاس به تنهایی باعث افزایش قابل توجه مقاومت در برابر عریان‌شدگی نشده و لازم است از قیر اصلاح شده با پودر لاستیک نیز استفاده شود. استفاده از قیر اصلاح شده با ۲۰٪ پودر لاستیک و گوگاس منجر به افزایش ۱۵ درصدی مقاومت در برابر عریان‌شدگی شده است.

در سال ۲۰۰۷ میلادی، اکیستی و همکاران در پژوهشی به بررسی رفتار مخلوط آسفالتی گرم حاوی پودر لاستیک در دمای زیاد پرداختند. نتایج مطالعه و آزمایش‌های آنها نشان داد که پودر لاستیک باعث افزایش ویسکوزیته و دمای اختلاط شده و ساسوبیت باعث کاهش دمای اختلاط شده که استفاده هم‌زمان آنها و عملکرد معکوس مواد افزودنی، باعث عملکرد بهتر پودر لاستیک خواهد شد. همچنین، در مقایسه دو ماده ساسوبیت و آسفامین به‌طور مجزا و ترکیب آنها با پودر لاستیک، مشاهده شد که روند پیر شدن آسفالت در دمای زیاد در مقایسه با این دو افزودنی نسبت به یکدیگر، تفاوت چندانی نداشت.

لی و همکاران (۲۰۰۸) تأثیر خرده لاستیک بر خواص آسفالت بایندر را با ترکیب چهار درصد متفاوت پودر لاستیک و دو نوع خرده لاستیک (تولید شده در دمای محیط و در دمای سرد) بررسی نمودند و

صفرزاده و طباطبایی (۱۳۹۴) با اندازه‌گیری کندروانی قیر در تراشه‌های آسفالت در نرخ برش کم و کارایی مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالت، به بررسی تأثیر ساسوبیت بر کاهش دمای تراکم پرداخته‌اند. آنها با این فرض که ساسوبیت راه‌حلی برای افزایش کارایی مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالتی است، این مطالعه را انجام داده‌اند. پژوهش آنها نشان می‌دهد که رده عملکردی قیر مخلوط شده با تراشه آسفالتی و ساسوبیت ملزم می‌کند که رده عملکردی قیر تازه اضافه شده، کمتر باشد و همچنین با استفاده از ساسوبیت، امکان تهیه مخلوط آسفالتی با ۲۵٪ تراشه وجود دارد.

در پژوهشی که توسط بهبهانی و همکاران (۱۳۹۵) روی نانوماده زایکوترم به عنوان یک افزودنی شیمیایی جدید و ساسوبیت به عنوان رایج‌ترین واکنش‌آلی انجام شد، به بررسی فناوری‌های ساخت مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم پرداخته شده است. آنها به عملکرد این دو افزودنی در مقابل حساسیت رطوبتی و شیارشدگی پرداختند. در این مطالعه، از آزمایش طیف‌سنج مادون قرمز فوریه برای بررسی خصوصیات عملکردی قیر خالص و قیر اصلاح شده با نانوماده زایکوترم، استفاده شده است. آزمایش‌های مقاومت کششی غیرمستقیم، مدول برجهنگی و خزش دینامیک روی نمونه‌های ساخته شده انجام گرفته است. نتایج حاکی از آن است که نانوماده زایکوترم علاوه بر کاهش دمای اختلاط و تراکم، باعث بهبود حساسیت رطوبتی شده و ساسوبیت منجر به افزایش سختی و کاهش میزان شیارشدگی شده است.

در مطالعه‌ای که توسط میر و همکاران (۱۳۹۵) انجام شده، تأثیر افزودنی‌های ساسوبیت و آهک هیدراته بر حساسیت رطوبتی، مقاومت مکانیکی و مقاومت در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان در مخلوط‌های آسفالتی حاوی گوگاس، با پارامترهای نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم و نسبت مارشال،

در تحقیق یو و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی تعامل میان اجزای مختلف آسفالت اصلاح شده با خرده لاستیک و افزودنی مخلوط‌های گرم از روش تحلیل حرارتی گرانی‌سنجی و آزمایش گرماسنجی روبشی تفاضلی، پرداخته شده است. نمونه‌ها به دو قسمت تقسیم شده و جداسازی ذرات برای انجام آزمایش‌ها صورت گرفته است. یافته‌های اصلی در این مطالعه نشان می‌دهد که تعامل بین خرده لاستیک و اجزای آسفالت یک فرایند تبادل جزء بوده و مواد افزودنی مخلوط‌های گرم در فرایند اختلاط به داخل خرده لاستیک نفوذ کرده است. همچنین، استفاده از مواد افزودنی مخلوط‌های گرم منجر به افزایش فرایند تبادل جزء شده است. این مطالعه تأثیر و فرایند میکروسکوپی خرده لاستیک و افزودنی مخلوط‌های گرم را روی مخلوط‌های آسفالتی نشان می‌دهد.

در مطالعه دیگری، بیان شده که ترک خوردگی خستگی، شیارشدگی و ترک‌های دمای کم، سه خرابی مهم مخلوط‌های آسفالتی می‌باشند. در این پژوهش، از دانش مکانیک شکست به منظور بررسی عملکرد مخلوط آسفالتی اصلاح شده استفاده شده است. نمونه‌هایی حاوی درصد‌های مختلف آسفالت بازیافتی، ساسویت و خرده لاستیک تهیه شده و آزمایش‌های مدول برجهنگی، خزش استاتیک و آزمون کشش غیر مستقیم، روی آنها انجام شده است. نتایج نشان داد که استفاده از آسفالت بازیافتی، ساسویت و خرده لاستیک به طور هم‌زمان باعث عملکرد خستگی مطلوب مخلوط می‌شود (بهروز زاده و همکاران، ۲۰۱۷).

در پژوهش یانگ و همکاران (۲۰۱۷) به تأثیرات زیست‌محیطی مصرف انرژی در مخلوط‌های حاوی خرده لاستیک و عملکرد مکانیکی مخلوط توجه شده است. مطالعات هم در آزمایشگاه و هم در سطح میدانی صورت گرفته است. عملکرد زیست‌محیطی شامل صرفه‌جویی در مصالح، سوخت و کاهش انتشار آلاینده-

به این نتیجه رسیدند که خرده لاستیک باعث افزایش ویسکوزیته و گرانیروی قیر و آسفالت بایندر شده و مقاومت در برابر شیارشدگی و ترک‌خوردگی افزایش یافته است. از طرف دیگر، با افزایش پودر لاستیک، سختی آسفالت کاهش یافته و مخلوط با خرده لاستیک تولید شده در دمای محیط واکنش بهتری نسبت به خرده لاستیک تولید شده در دمای سرد را دارد.

در تحقیق دیگری با عنوان تأثیر خرده لاستیک بر خواص آسفالت بایندر با ترکیب چهار مقدار متفاوت پودر لاستیک و دو نوع خرده لاستیک (تولیدی در دمای محیط و در دمای سرد) به این نتیجه رسیده شد که خرده لاستیک باعث افزایش ویسکوزیته و گرانیروی قیر و آسفالت بایندر شده و مقاومت در برابر شیارشدگی بالا می‌رود. همچنین، مخلوط با پودر لاستیک مقاومت بیشتری در برابر ترک‌خوردگی از خود نشان می‌دهد (امیرخانیان و همکاران، ۲۰۰۹).

اکیستی و همکاران (۲۰۱۱) در تحقیقی، به بررسی اثر افزودنی‌های پودر لاستیک و ساسویت بر رئولوژی و خواص مخلوط آسفالتی پرداخته و به این نتیجه رسیدند که استفاده از ساسویت و آسفامین (به طور جداگانه) و ترکیب هر یک با ۱۰٪ پودر لاستیک در قیر PG 64-22 باعث افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر تغییرشکل و کاهش دمای مخلوط و افزایش مقاومت در برابر خستگی شده است.

اولیویرا و همکاران (۲۰۱۳) در مطالعه‌ای که به بررسی تأثیر مواد افزودنی جهت کاهش دما و بهبود عملکرد آسفالت گرم تولید شده با پودر لاستیک پرداختند به این نتیجه دست یافتند که آسفالت گرم حاوی ۰/۳ الی ۰/۵ درصد ماده افزودنی باعث کاهش ۳۰ درصد سلسیوس دمای تولید شده و میزان حساسیت رطوبتی آسفالت تولید شده با پودر لاستیک و خرده لاستیک به میزان قابل توجهی بهبود یافت.

مخلوط‌های آسفالتی دارند، لازم است در خصوص مقادیر پارامترهای آنها بررسی لازم صورت گیرد.

۳-۱. مصالح سنگی و دانه‌بندی

برای اینکه بتوان نتایج آزمایش‌ها را تعمیم داد و با توجه به اینکه عمده معادن مصالح سنگی ایران از نوع آهکی می‌باشند، لذا، مصالح از معدنی آهکی در شهر کرمان تهیه شده که باید حداقل مشخصات فنی تعیین شده توسط ASTM, AASHTO و نشریه ۲۳۴ را تأمین کند. همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، مشخصات فنی مصالح منتخب مناسب می‌باشد.

دانه‌بندی از مشخصه‌های مهم مصالح سنگی در مخلوط‌های آسفالتی گرم است که تأثیر مستقیم بر پارامترهای مقاومتی دارد. توزیع اندازه دانه‌ها در مخلوط منجر به مخلوطی با دانه‌بندی پیوسته می‌شود. در این حالت، پس از تراکم لایه‌ها، فضای خالی مناسب به علت دانه‌بندی مناسب، در آسفالت گرم به‌وجود می‌آید. دانه‌بندی مصالح مصرفی در آزمایش‌های این پژوهش، دانه‌بندی D-4, ASTM D3515 می‌باشد که در جدول ۲ نشان داده شده است.

ها بوده و عملکرد مکانیکی شامل بررسی استحکام کششی، حساسیت رطوبتی، مقاومت شیارشدگی، عریان‌شدگی، عملکرد خستگی و عملکرد در دمای کم می‌باشد. نتایج حاکی از آن است که مقادیر صرفه‌جویی در مصالح ۵/۸ درصد، صرفه‌جویی در سوخت ۱۳٪ و کاهش انتشار آلاینده‌ها به راحتی قابل مشاهده است. همچنین، تمام عملکردهای مکانیکی به مقدار قابل توجهی بهبود یافتند و بین نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی و میدانی تطابق وجود دارد. اما در این تحقیق بین نتایج نسبت استحکام کششی و شیارشدگی هامبورگ در ارزیابی مقاومت در برابر رطوبت تطابقی وجود نداشت. همانطور که مشاهده می‌شود، تاکنون مطالعه کمی یا حداقل محدودی در خصوص کاربرد هم‌زمان دو افزودنی انجام شده است. لذا با توجه به خلأ موجود، مخصوصاً در داخل کشور، مطالعه حاضر برنامه‌ریزی و تدوین شد.

۳. مواد و مصالح مصرفی

برای انجام تحقیق و قبل از اقدام به اجرای آزمایش‌ها، ابتدا با توجه به اینکه نوع و جنس مصالح سنگی، فیلر و قیر تأثیر به‌سزایی بر خواص فیزیکی و مکانیکی

جدول ۱. مشخصات مصالح سنگی مورد استفاده در تحقیق (آشتو، ۲۰۰۱)

نتیجه آزمایش	مقدار مجاز آیین‌نامه		روش آزمایش	آزمایش
	حداقل	حداکثر		
۱۹	-	۲۵	ASTM C131	سایش به روش لس‌آنجلس (%)
۰/۶۲	-	۸	ASTM C88	افت وزنی ناشی از سولفات سدیم (%)
۹۲	۶۰	-	ASTM D 5821	شکستگی (%)
۱۰	-	۱۵	ASTM D4791	سنگدانه‌های پهن و دراز (%)
۱/۵۸	۲/۵	-	AASHTO T85	جذب آب (%)
۲/۶۲۸	-	-	AASHTO T85	وزن مخصوص ظاهری (gr/cm ³)
۲/۴۶۸	-	-	AASHTO T85	وزن مخصوص واقعی (gr/cm ³)

خصوصیات مصالح ریزدانه				
آزمایش	روش آزمایش	مقدار مجاز آیین نامه		نتیجه آزمایش
		حداقل	حداکثر	
دامنه خمیری PI (%)	ASTM D4318	NP	NP	NP
افت وزنی ناشی از سولفات سدیم (%)	ASTM C88	۱۲	-	۱/۱۷
ارزش ماسه‌ای (%)	ASTM D 2419	-	۵۰	۷۵
جذب آب (%)	AASHTO T85	-	۲/۵	۲/۶
وزن مخصوص ظاهری (g/cm ³)	AASHTO T85	-	-	۲/۶۵۰
وزن مخصوص واقعی (g/cm ³)	AASHTO T85	-	-	۲/۴۷۷
خصوصیات مصالح فیلر				
وزن مخصوص ظاهری (gr/cm ³)	ASTM C188	-	-	۲/۶۲۰

جدول ۲. دانه‌بندی ASTM D3515, D-4 برای مصالح سنگی آزمایش‌ها (ASTM, ۲۰۰۱)

اندازه الک (میلی‌متر)	درصد عبوری از هر الک	ASTM D3515
۲۵	۱۰۰	۱۰۰
۱۹	۱۰۰	۹۰-۱۰۰
۱۲/۵	۹۵	-
۹/۵	۷۳	۵۶-۸۰
(الک شماره ۴) ۴/۷۵	۶۴	۳۵-۶۵
(الک شماره ۸) ۲/۳۶	۳۸	۲۳-۴۹
(الک شماره ۵۰) ۰/۳	۱۱	۵-۱۹
(الک شماره ۲۰۰) ۰/۰۷۵	۵	۲-۸

۲-۳. قیر

است، لذا از قیر AC60/70 تولیدی پالایشگاه بندرعباس استفاده شده است. در جدول ۳، آزمایش‌های انجام شده و حداقل مشخصات لازم برای آنها طبق آیین‌نامه ارائه شده است.

میزان بار وارده و شرایط جوی دو عامل مهم در انتخاب رده قیر مصرفی هستند. با توجه به اینکه مطالعه حاضر برای شهر کرمان انجام شده و جزو مناطق نسبتاً گرم

جدول ۳. مشخصات قیر مورد استفاده در تحقیق (ASTM، ۲۰۰۱)

ردیف	نوع آزمایش	روش آزمایش	الزامات آیین نامه		نتیجه
			حداقل	حداکثر	
۱	درجه نفوذ (۰/۱۰ میلی متر)	ASTM D5	۶۰	۷۰	۶۳
۲	نقطه نرمی قیر (°C)	ASTM D36	۴۹	۵۶	۴۹
۳	قابلیت کشش در °C ۲۵ (سانتی متر)	D113 ASTM	۱۰۰	-	+۱۰۰
۴	وزن مخصوص قیر (g/cm ³)	D3289 ASTM	۱/۱۳	۱/۱۷	۱/۱۳
۵	ویسکوزیته کینماتیک در دمای °C ۱۳۵ (pa-s)	D2170 ASTM	۲۰۰	۱۰۰۰	۳۱۰
۶	خصوصیات پس از آزمایش لعاب نازک قیر (°C ۱۶۳ به مدت ۵ ساعت):				
۱-۶	تغییر جرم (%)		-	۱	۰/۲۰
۲-۶	درجه نفوذ پس از آزمایش لعاب نازک قیر (میلی متر)	D1754 ASTM	۳۱	-	۴۵
۳-۶	نسبت درصد درجه نفوذ بعد از آزمایش به درجه نفوذ اولیه		۵۴	-	۷۵
۴-۶	قابلیت کشش پس از آزمایش لعاب نازک قیر (سانتی متر)		۵۰	-	+۱۰۰

مذاب، مخلوط حاصل را بلافاصله با قیر مخلوط کرد. در روش دوم، که در سطح آزمایشگاهی بیشتر کاربرد دارد، ساسوبیت به صورت جامد و یا پس از ذوب شدن به قیر اضافه می شود و مخلوط حاصل با مصالح سنگی مخلوط می شود. در این پژوهش، از ساسوبیت به صورت افزودن مذاب آن به قیر قبل از اختلاط با مصالح سنگی استفاده شده است. همچنین، دمای اختلاط قیر، ساسوبیت و مصالح سنگی °C ۱۴۰ و دمای تراکم °C ۱۲۰ در نظر گرفته شد. مقدار پیشنهادی شرکت Sasol برای استفاده از ساسوبیت ۰/۴ تا ۴ درصد وزنی قیر می باشد (ساسول واکس؛ چن و هوانگ، ۲۰۰۷). ساسوبیت مصرفی از نوع گرانولی با رنگ سفید و نقطه اشتعال °C ۲۹۰ و چگالی متوسط ۶۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب می باشد. بر اساس تجارب گذشته، تأثیر ساسوبیت بر عملکرد مخلوط آسفالتی از ۱٪ شروع می-

۳-۳. ساسوبیت و پودر لاستیک

ساسوبیت: این افزودنی اُرگانیک که محصول شرکت Sasol در کشور آفریقای جنوبی است با فرمول شیمیایی CnH2n+2 ساخته می شود. این ماده که واکس پارافینی فیچر تراپس نیز نامیده می شود از ترکیب هیدروکربن-های زنجیره ای بلند که از احتراق ذغال سنگ به روش فیچر تراپس به دست می آید، تولید می شود. تشکیل یک شبکه کریستالی در دمای زیر نقطه ذوب از خصوصیات مهم این افزودنی بوده که منجر به استحکام و پایداری بیشتر قیر می شود. برای استفاده از ساسوبیت در مخلوط آسفالت گرم دو روش وجود دارد. در روش اول، ساسوبیت به صورت جامد و به صورت قرص و یا پس از ذوب شدن، قبل از اختلاط با قیر به مصالح سنگی افزوده می شود که باید در صورت استفاده از ساسوبیت

عمدتاً در آزمایش‌های مختلف، مقدار بهینه مصرف پودر لاستیک بین ۱۰ تا ۲۰ درصد به دست آمده است. بنابراین، در این تحقیق از سه مقدار ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد پودر لاستیک با مش ۴۰ که به روش آسیاب در دمای محیط از یک شرکت داخلی تهیه شده‌اند، به منظور بررسی تأثیر این ماده بر رفتارهای مختلف مخلوط آسفالتی استفاده شده و به اختصار با R15، R10 و R20 نشان داده شده است.

۴- آزمایش‌ها و نتایج

ابتدا آزمایش‌های مربوط به افزودن پودر لاستیک و ساسوبیت به طور مجزا انجام شده و سپس با توجه به نتایج هر یک و مقدار بهینه هر یک از افزودنی‌ها، با ترکیب دو افزودنی با مقدار بهینه به دست آمده، نمونه‌های آسفالتی جدیدی ساخته شده و آزمایش‌ها تکرار - گردید. نمونه‌های شاهد با علامت اختصاری CS و نمونه ساخته شده با ۲٪ ساسوبیت و ۱۵٪ پودر لاستیک با S2R15 (با توجه به مقدار بهینه ۲٪ ساسوبیت و ۱۵٪ پودر لاستیک برای نتایج آزمایش‌های شیارشدگی و خستگی، ترکیب فوق در نظر گرفته شد) نشان داده شده‌اند و نتایج آنها به صورت هم‌زمان با سایر نمونه‌ها ارائه شده است.

۴-۱. درصد قیر بهینه

برای ساخت نمونه‌ها با مواد افزودنی لازم است ابتدا درصد قیر بهینه تعیین گردد. بدین منظور از روش طرح اختلاط استقامت مارشال استفاده شد. در این راستا، نمودارهای مربوط به استقامت، روانی، وزن مخصوص واقعی، فضای خالی بین مصالح سنگی و فضای خالی نمونه‌های مترکم شده برای درصد‌های مختلف قیر ترسیم می‌گردند. بنابراین، با توجه به نمودارهای ترسیم شده، میانگین سه پارامتر میزان فضای خالی ۴٪ و مقادیر حداکثر استقامت و وزن مخصوص برای تعیین قیر

شود. بنابراین، برای ساخت نمونه‌های مخلوط آسفالتی آزمایشگاهی از ۱، ۲ و ۳ درصد وزنی قیر که به اختصار با S1، S2 و S3 نشان داده شده، استفاده شده است.

پودر لاستیک: این افزودنی به دو روش آسیاب در دمای محیط و آسیاب در دمای کم تهیه می‌شود. در روش اول، پودر تهیه شده نسبت به روش دوم شکلی نامنظم‌تر و سطح مخصوص بیشتری دارد. اما در روش دوم، لاستیک با استفاده از گاز نیتروژن تا دمایی بین $^{\circ}\text{C}$ ۸۷- تا $^{\circ}\text{C}$ ۱۹۸- سرد شده تا شکننده گردد. سپس، لاستیک منجمد شده به صورت ذرات ریز، که نسبت به روش اول نرم‌تر و با سطح مخصوص کمتری هستند، تولید می‌شود. شکل نامنظم و سطح مخصوص بیشتر به عنوان یک مزیت محسوب می‌شود، چرا که چسبندگی و تأثیر متقابل بیشتری روی قیر دارد. بنابراین، پودر تولید شده در دمای محیط رایج‌تر، و احتمالاً مؤثرترین نوع پودر لاستیک اضافه شده به قیر می‌باشد (دپارتمان حمل و نقل کالیفرنیا، ۲۰۰۳؛ لی و همکاران، ۲۰۰۸). طائریان و همکاران (۱۳۹۴) در تحقیق خود به خوبی تأثیر تغییرات دما و زمان اختلاط قیر با پودر لاستیک را نشان دادند و به این نتیجه رسیدند که دما و زمان بهینه اختلاط قیر با پودر لاستیک به ترتیب $^{\circ}\text{C}$ ۱۴۰ و ۶ دقیقه است. دما و زمان اختلاط، بر یک اختلاط همگن بیشتر و عدم تأثیرپذیری از غیر همگن بودن مخلوط را نتیجه می‌دهد. استفاده از دما و زمان بیشتر اختلاط، احتمالاً تأثیر معکوس بر پایداری خواص قیر داشته است. بنابراین، برای توزیع همگن پودر لاستیک در قیر از دستگاه اختلاط با برش بالا با سرعت ۳۵۰۰ دور در دقیقه و مدت ۳۰ دقیقه در دمای $^{\circ}\text{C}$ ۱۴۰ استفاده شد و سپس مخلوط حاصل، در تهیه نمونه‌های آسفالتی مصرف شد. در بیشتر تحقیقات انجام شده و ارائه شده در بخش پیشینه تحقیق، نشان داده شد که تأثیر مقدار پودر لاستیک بر خواص مخلوط‌ها از حدود ۱۰٪ شروع می‌شود و بعد از مقدار ۲۰٪ تأثیر منفی شدید شده و

مارشال، دو سری نمونه تهیه شدند. نمونه‌های سری اول که بیانگر حالت مرطوب آزمایش بودند، پس از تراکم با چکش مارشال و خنک شدن در دمای محیط، به مدت ۴۸ ساعت در آب با دمای 60°C قرار گرفته و سپس به مدت ۴۸ ساعت در دمای محیط قرار داده شدند. سپس، نمونه‌ها آماده آزمایش شده و به مدت ۳۰ دقیقه در حمام آب با دمای 60°C عمل‌آوری و سپس مورد آزمایش قرار گرفتند. نمونه‌های سری دوم که بیانگر حالت خشک آزمایش بودند، پس از تراکم با چکش مارشال و خنک شدن در دمای 25°C مورد آزمایش قرار گرفتند (آشتو، ۲۰۰۱؛ ASTM، ۲۰۰۱). نتایج حاصل از این آزمایش در جدول ۴ و شکل‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

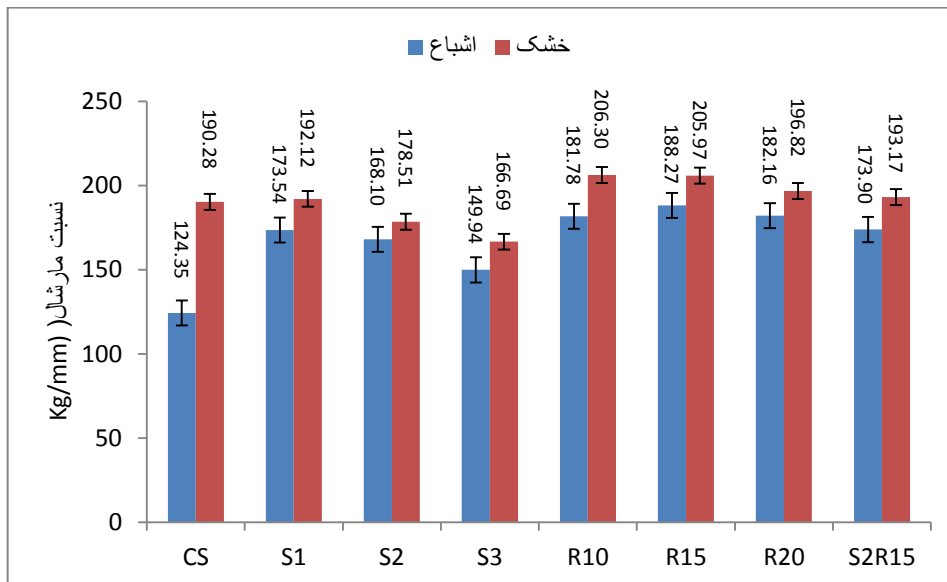
بهینه، در نظر گرفته می‌شوند (آشتو، ۲۰۰۱). در مطالعه حاضر، مقدار میانگینی که نشان‌دهنده درصد فیر بهینه است، $4/3$ درصد به‌دست آمد. در این بخش، با توجه به هدف مطالعه، از ارائه جزئیات نتایج تعیین درصد فیر بهینه خودداری شده است.

۲-۴. آزمایش مقاومت مارشال

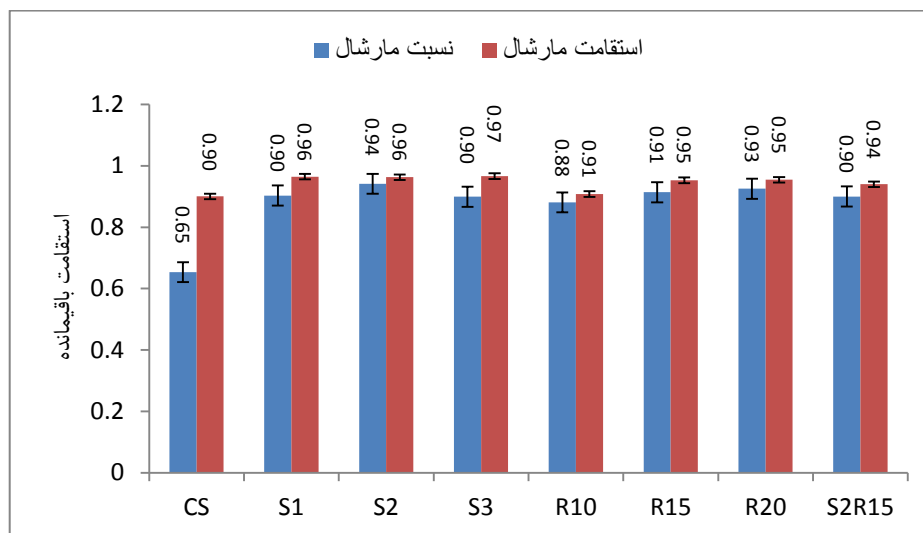
خروجی آزمایش مقاومت مارشال، دو ویژگی استقامت و روانی مارشال می‌باشد. شاخص نسبت مارشال، نسبت استقامت مارشال به روانی آن است. همچنین، استقامت باقی‌مانده برای استقامت مارشال و نسبت مارشال، نسبت دو پارامتر فوق در حالت اشباع و حالت خشک، تعریف شده است. جهت بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از آزمایش

جدول ۴. نتایج استقامت مارشال، روانی و نسبت مارشال در حالت خشک و اشباع برای طرح‌های اختلاط مختلف

پارامترهای به‌دست آمده از آزمایش مارشال						نوع مخلوط آسفالتی
نسبت مارشال		روانی (میلی‌متر)		استقامت (کیلوگرم)		
حالت مرطوب	حالت خشک	حالت مرطوب	حالت خشک	حالت مرطوب	حالت خشک	
۱۲۴/۳۴	۱۹۰/۲۸	۵/۶۵	۴/۱۰	۷۰۲/۵۶	۷۸۰/۱۶	CS
۱۷۳/۵۴	۱۹۲/۱۲	۴/۷۰	۴/۴۰	۸۱۵/۶۴	۸۴۵/۳۴	S1
۱۶۸/۰۹	۱۷۸/۵۰	۴/۹۵	۴/۸۴	۸۳۲/۰۹	۸۶۳/۹۷	S2
۱۴۹/۹۴	۱۶۶/۶۹	۵/۷۵	۵/۳۵	۸۶۲/۱۶	۸۹۱/۸۰	S3
۱۸۱/۷۸	۲۰۶/۲۹	۴/۳۷	۴/۲۴	۷۹۴/۳۸	۸۷۴/۷	R10
۱۸۸/۲۶	۲۰۵/۹۶	۴/۸۷	۴/۶۷	۹۱۶/۸۷	۹۶۱/۸۷	R15
۱۸۲/۱۶	۱۹۶/۸۲	۵/۲۳	۵/۰۷	۹۵۲/۷	۹۹۷/۹	R20
۱۷۳/۹۰	۱۹۳/۱۷	۵/۴۴	۵/۲۱	۹۴۶/۰۲	۱۰۰۶/۴۱	S2R15



شکل ۱. نسبت مارشال در حالت خشک و اشباع برای طرح‌های اختلاط مختلف



شکل ۲. مقادیر استقامت باقی‌مانده برای نسبت مارشال و استقامت مارشال برای طرح‌های اختلاط مختلف

۳-۴. آزمایش تیرچه خستگی

در این پژوهش، در تعیین پارامترهای ورودی مورد نیاز دستگاه UTM، از استانداردهای رایج در زمینه‌ی خستگی به روش تیرچه خمشی چهارنقطه‌ای، نظیر AASHTOT321 و ASTM D-4760 استفاده شد. روش انجام آزمایش خستگی نیز در حالت تغییرشکل کنترل شده (کنترل کرنش) انتخاب گردید. این حالت در واقع وضعیتی است که مورد قبول اکثر محققین و

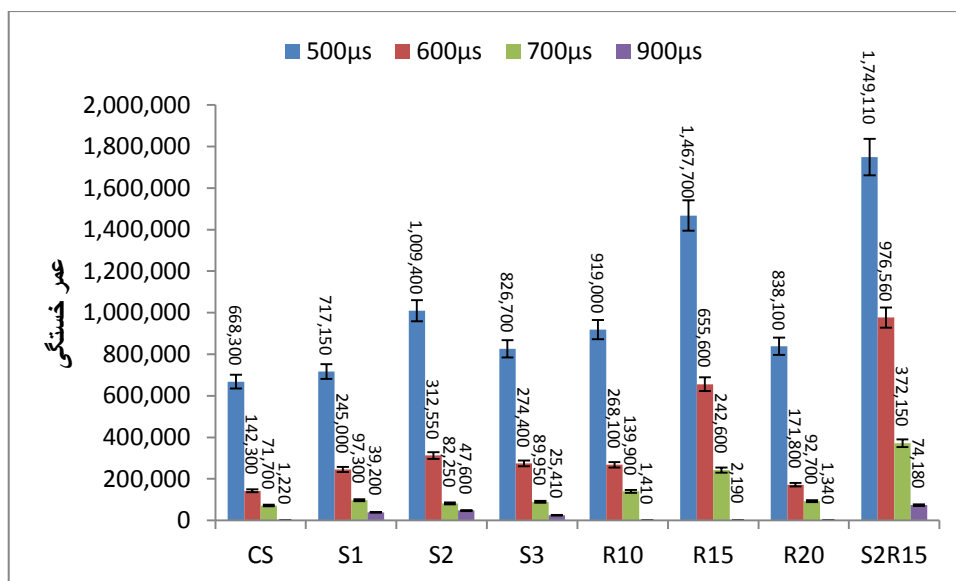
پیشنهاد اکثر استانداردهای انجام آزمایش خستگی به روش تیرچه خمشی، می‌باشد. بر طبق استاندارد AASHTO، سطح کرنش باید به گونه‌ای باشد که حداقل تعداد دفعات اعمال بار قبل از رسیدن به ۵۰ درصد سختی اولیه ۱۰۰۰۰ سیکل باشد. در مورد انتخاب سطح کرنش‌ها برای مخلوط‌های آسفالتی حاوی پودر لاستیک و ساسویت، از تجربیات مربوط به انتخاب سطح کرنش برای مخلوط‌های آسفالتی متداول

T321 موج بارگذاری سینوسی را پیشنهاد کرده است، حالت بارگذاری تغییرشکل کنترل شده سینوسی و بدون زمان استراحت برای انجام این آزمایش، انتخاب گردید. فرکانس بارگذاری با توجه به آیین‌نامه‌ها و نظرات محققین، ۱۰ هرتز که معادل سرعت تقریبی ۹۸ کیلومتر بر ساعت است، انتخاب شد (آشتو، ۲۰۰۱؛ ASTM، ۲۰۰۱).

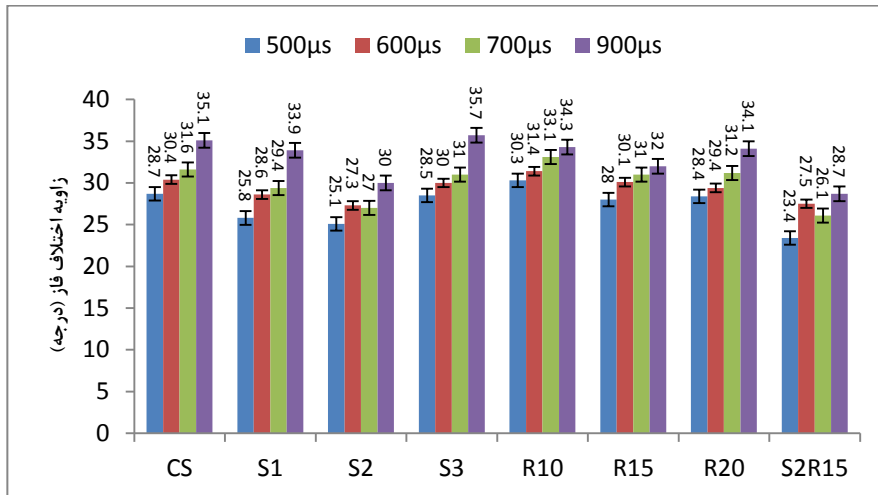
برخی از متغیرهای خروجی که از طریق رایانه متصل به دستگاه خستگی به صورت عددی قابل دسترسی است شامل عمر خستگی، زاویه اختلاف فاز، سختی خمشی و عمر خستگی به روش Rowe and Bouldin می‌باشد. نتایج این خروجی‌ها در شکل‌های ۳ تا ۶ ارائه شده است. شکل ۷ آزمایش تیر خستگی را روی نمونه ساخته شده نشان می‌دهد. عمر خستگی در روش Rowe and Bouldin به ازای تعداد سیکلی که حداکثر مقدار نسبت سختی را ارائه می‌دهد، با ترسیم نسبت سختی در برابر تعداد سیکل‌های بارگذاری، به دست می‌آید (رو و بولدین، ۲۰۰۰).

و محدوده‌ی پیشنهادی استانداردهای ASSHTO T321 و ASTM D7460 استفاده شده است. سطوح کرنش پیشنهادی استاندارد AASHTO T321، ۲۵۰ الی ۷۵۰ میکرون است و استاندارد ASTM D-7460 بازه‌ی سطح کرنش ۲۰۰ الی ۱۰۰۰ میکرون را مجاز دانسته است (آشتو، ۲۰۰۱؛ ASTM، ۲۰۰۱).

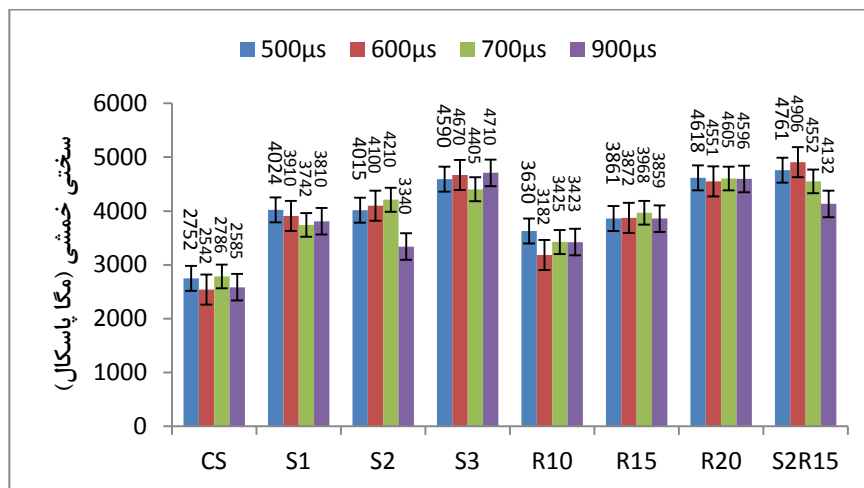
به منظور حصول اطمینان از انجام درست آزمایش و قضاوت بهتر در باره عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی و نظر به اینکه عمر خستگی رابطه عکس با سطح کرنش انتخابی دارد و لحاظ کردن بازه‌ی سطوح کرنش فوق‌الذکر، در این تحقیق، چهار سطح کرنش (۵۰۰، ۶۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ میکرون) مد نظر قرار گرفته است. همچنین، آزمایش‌های خستگی طبق پیشنهاد استاندارد در دمای 20 ± 0.5 سلسیوس انجام شد. این دما، پیشنهاد هر دو آیین‌نامه فوق می‌باشد و به دلیل اینکه خرابی خستگی معمولاً در دماهای میانی محیط (15°C الی 15°C) اتفاق می‌افتد، پیشنهادی منطقی به نظر می‌رسد. از طرف دیگر، با توجه به اینکه استاندارد AASHTO



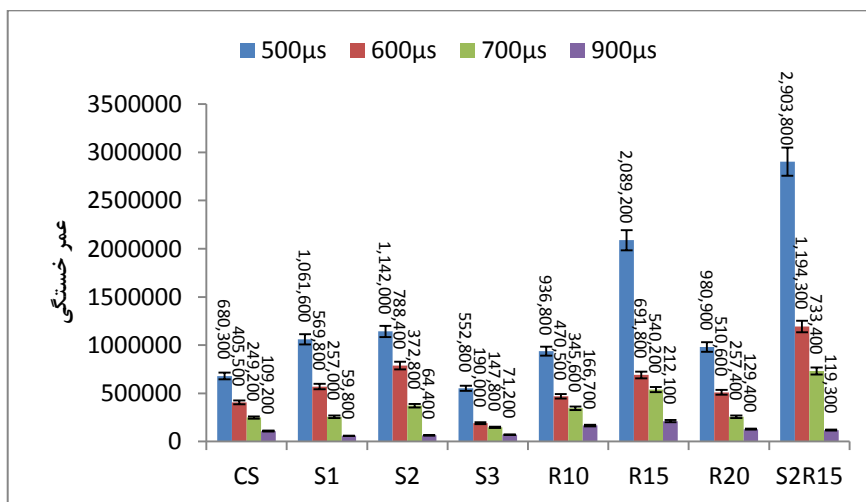
شکل ۳. تغییرات عمر خستگی در سطوح کرنش و طرح‌های اختلاط مختلف



شکل ۴. زاویه اختلاف فاز مخلوط‌های آسفالتی در سطوح کرنش و طرح‌های اختلاط مختلف



شکل ۵. تغییرات سختی خمشی در سطوح کرنش و طرح‌های اختلاط مختلف

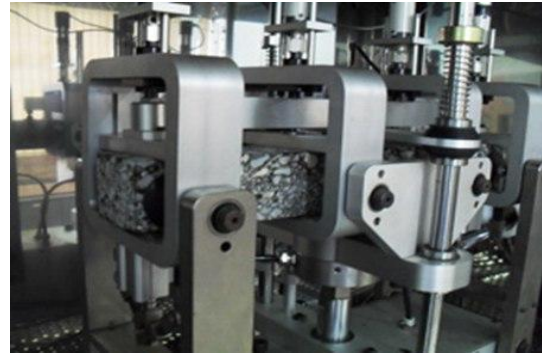


شکل ۶. تغییرات عمر خستگی در سطوح کرنش و طرح‌های اختلاط مختلف بر اساس روش Rowe and Bouldin

می‌باشد. ابزار تعیین اثر شیارشدگی مورد استفاده از نوع ماکروس بوده که تکامل یافته‌ی مدل هامبورگ است (آستو، ۲۰۰۱؛ ASTM، ۲۰۰۱).

در این آزمایش، نمونه‌ها با ابعاد $305 \times 305 \times 50$ میلی‌متر با قیر بهینه $4/3$ درصدی ساخته شده و هر یک از نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت قرار گرفتن در دمای محیط، به مدت ۵ ساعت در دو دمای 40 و 60 درجه سلسیوس و در داخل محفظه دستگاه مورد آزمایش، عمل‌آوری شدند. همچنین، بار وارده برابر 520 نیوتن، تعداد دفعات بارگذاری برای بررسی پدیده‌ی شیارشدگی 1200 سیکل رفت و برگشت و سرعت حرکت $26/5$ دور در دقیقه انتخاب شدند.

با انجام این آزمایش می‌توان پارامترهای عمق شیارشدگی، نرخ شیارشدگی (شیارشدگی در یک‌سوم انتهایی تقسیم بر یک سوم مدت زمان آزمایش)، نسبت شیارشدگی (نسبت عمق شیار به ضخامت کل لایه به صورت درصد) و پایداری دینامیک (براساس نیوتن بر میلی‌متر) را به‌دست آورد. نتایج حاصل از آزمایش در جدول ۵ و شکل‌های ۸ تا ۱۰ ارائه شده و شکل ۱۱ نمونه آسفالتی را بعد از انجام آزمایش شیارشدگی نشان می‌دهد.



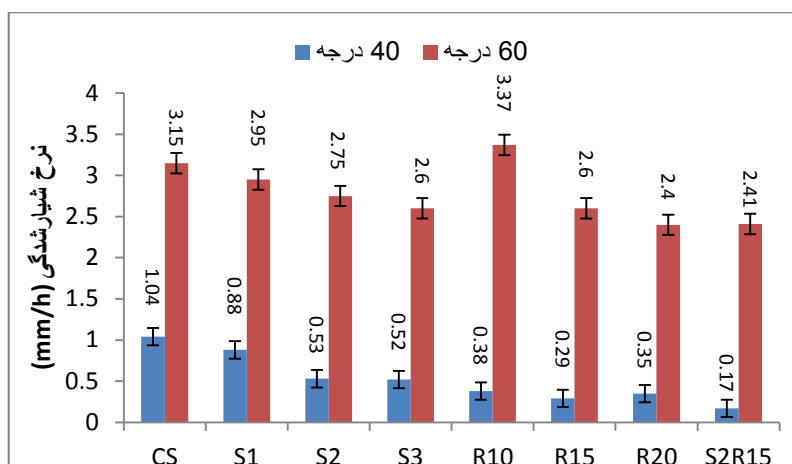
شکل ۷. نمونه آزمایش تیرچه خستگی

۴-۴. آزمایش شیارشدگی

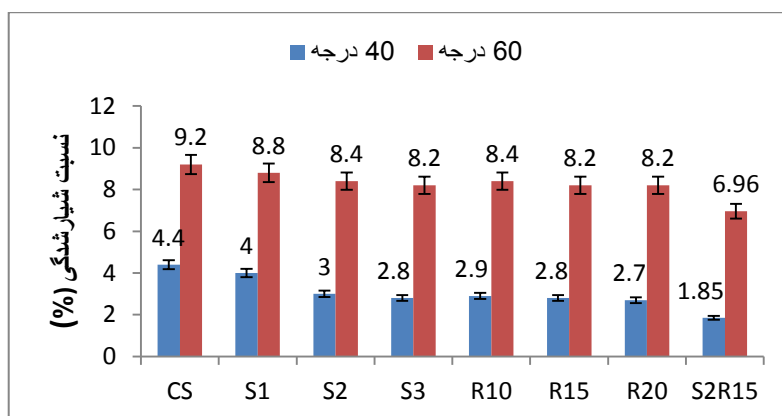
در این آزمایش، میزان اثر چرخ برای تعیین مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر تغییرشکل‌های دائمی در دماهای زیاد و تحت بارگذاری مشابه با شرایط جاده، اندازه‌گیری می‌شود. برای انجام آزمایش، یک چرخ لاستیکی با بار ثابت از روی نمونه‌ای که دمای پیرامونش ثابت می‌باشد عبور داده می‌شود. چرخ بارگذاری دستگاه، لاستیکی و با قطر 200 میلی‌متر و عرض 50 میلی‌متر می‌باشد. مقدار فشار چرخ بارگذاری قابل تنظیم بوده و می‌تواند بین $5/5$ تا $6/4$ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع باشد. سرعت حرکت چرخ بین 10 تا 30 دور در دقیقه است و مقدار جابجایی توسط یک گیج دیجیتالی اندازه‌گیری می‌شود. مقدار دقت این گیج $0/005$ میلی‌متر و بیشترین جابجایی آن 20 میلی‌متر

جدول ۵. اثر چرخ بر مخلوط‌های آسفالتی برای طرح‌های اختلاط مختلف در دماهای 40°C و 60°C

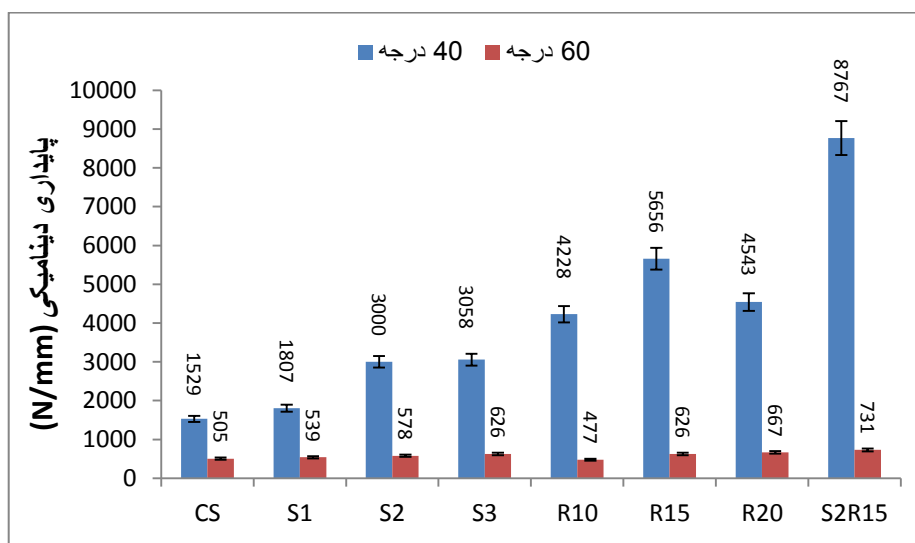
پارامترهای به‌دست آمده از آزمایش میزان اثر چرخ								نوع مخلوط آسفالتی
عمق شیارشدگی (mm)		نرخ شیارشدگی (mm/h)		نسبت شیارشدگی (%)		پایداری دینامیک (N/mm)		
60°C	40°C	60°C	40°C	60°C	40°C	60°C	40°C	
۲/۲۰	۴/۶	۱/۰۴	۳/۱۵	۴/۴	۹/۲	۱۵۲۹	۵۰۵	CS
۲/۰۰	۴/۴	۰/۸۸	۲/۹۵	۴/۰	۸/۸	۱۸۰۷	۵۳۹	S1
۱/۵۰	۴/۲	۰/۵۳	۲/۷۵	۳/۰	۸/۴	۳۰۰۰	۵۷۸	S2
۱/۴۰	۴/۱	۰/۵۲	۲/۶۰	۲/۸	۸/۲	۳۰۵۸	۶۲۶	S3
۱/۴۵	۴/۲۰	۰/۳۸	۳/۳۷	۲/۹	۸/۴	۴۲۲۸	۴۷۷	R10
۱/۴۱	۴/۱۰	۰/۲۹	۲/۶۰	۲/۸	۸/۲	۵۶۵۶	۶۲۶	R15
۱/۳۵	۴/۱۰	۰/۳۵	۲/۴۰	۲/۷	۸/۲	۴۵۴۳	۶۶۷	R20
۰/۸۹	۳/۸۶	۰/۱۷	۲/۴۱	۱/۸۵	۶/۹۶	۸۷۶۷	۷۳۱	S2R15



شکل ۸. تغییرات پارامتر نرخ شیارشدهگی با تغییر دما برای طرح‌های اختلاط مختلف



شکل ۹. تغییرات پارامتر نسبت شیارشدهگی با تغییر دما برای طرح‌های اختلاط مختلف



شکل ۱۰. تغییرات پارامتر پایداری دینامیکی با تغییر دما برای طرح‌های اختلاط مختلف

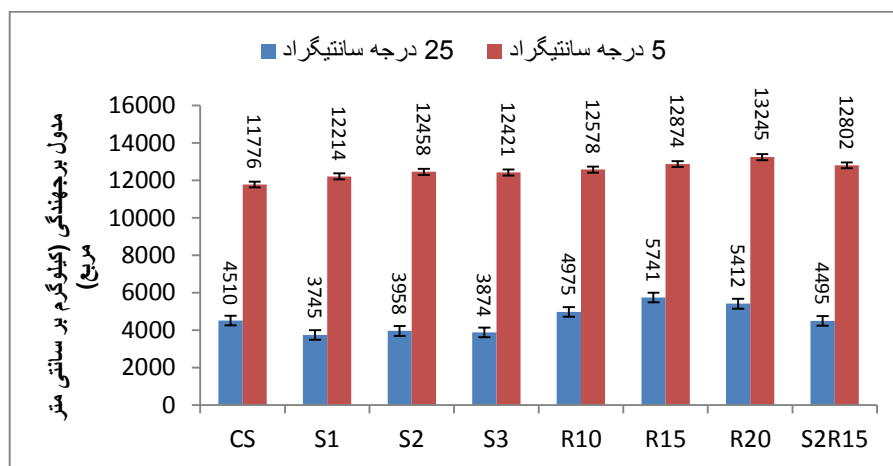


شکل ۱۱. نمونه آزمایش شیارشدگی

۴-۵. آزمایش مدول برجهندگی

مدول برجهندگی که متغیر مهمی در رویکردهای طراحی به روش مکانیستیک است، نشان‌دهنده اندازه پاسخ روسازی برحسب تنش‌های دینامیک و کرنش‌های متناظر می‌باشد. مدول برجهندگی، با اندازه‌گیری مقاومت کششی غیر مستقیم که به وسیله نیروی قطری در بارگذاری پالسی ایجاد شده، با استفاده از دستگاه UTM و نرم‌افزار مربوطه، طبق استاندارد ASTM D4123، به دست می‌آید. برای انجام آزمایش مدول برجهندگی، ابتدا نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای مورد نظر (۵ °C و ۲۵ °C) قرار گرفتند و سپس با اعمال بار زنگوله‌ای (۵۷۰ نیوتن)، به صورت نیمه سینوسی با فرکانس ۱ هرتز و دوره بارگذاری ۰/۱ ثانیه

(۰/۹ ثانیه استراحت)، مدول برجهندگی نمونه‌های آسفالتی اندازه‌گیری شد (آشتو، ۲۰۰۱؛ ASTM، ۲۰۰۱). براساس مشاهدات انجام شده در آزمایشگاه، بعد از حدود ۵۰ سیکل بارگذاری، تغییرات ایجاد شده در مقادیر تغییرشکل‌های برگشت‌پذیر بسیار اندک بوده و مقادیر مدول برجهندگی تقریباً ثابت می‌شوند (مقادیر ضریب تغییرات کوچکتر از ۱٪). بنابراین، تعداد سیکل‌های بارگذاری برای اطمینان از ثبات مقادیر تغییرشکل برابر با ۱۰۰ سیکل انتخاب گردید. نتایج آزمایش مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی شاهد و حاوی پودر لاستیک و ساسوبیت در شکل ۱۲ نشان داده شده است. شکل ۱۳ نمونه تحت آزمایش مدول برجهندگی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲. نمودارهای مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی با تغییر دما برای طرح‌های اختلاط مختلف

شده است. روش کنترل نرمال بودن بدین صورت است که اگر P-value یا همان Sig نرم افزار از سطح معنی داری ۰/۰۵ بزرگتر یا مساوی باشد، فرض H0 رد نمی شود و داده ها نرمال هستند و برعکس اگر P-value از سطح معنی داری ۰/۰۵ کوچکتر باشد، فرض H0 رد می شود و داده ها نرمال نیستند. سطح معنی داری ۰/۰۵ با توجه سطح اطمینان ۹۵٪ که در بیشتر مطالعات آزمایشگاهی و میدانی مورد تأیید اکثر محققین است انتخاب شده است. این آزمون برای تمام داده های آزمایشگاهی مطالعه موجود انجام شده، ولی با توجه به حجم داده ها و نتایج آزمایشگاهی فقط از هر دسته یک نمونه در جدول ۶ ارائه شده است. نتایج حاکی از آن است که مقادیر P-value همگی بزرگتر از ۰/۰۵ بوده و بنابراین با توجه به نرمال بودن داده ها، تحلیل ها و نتایج کسب شده معتبر هستند (نیکوکار و عربزاده، ۱۳۸۵).



شکل ۱۳. نمونه آزمایش مدول برجهندگی

۵. تحلیل آماری

اطمینان از نرمال بودن نتایج آزمایشها و یا داده های میدانی در مطالعات آزمایشگاهی و میدانی، منجر به صحت تفسیرها و نتایج به دست آمده می شود. در علم آمار، جهت بررسی نرمال بودن داده ها، آزمون های مختلفی ارائه شده است. در این پژوهش، از آزمون کولموگروف- اسمیرنوف استفاده می شود که آماره آزمون آن، به قرار زیر است:

داده ها نرمال هستند: H0 و داده ها نرمال نیستند: Ha
نرم افزار Spss از ابزارهای قدرتمند جهت انجام آزمون های مختلف می باشد که در این تحقیق نیز از آن استفاده

جدول ۶. نتایج تحلیل آماری نتایج آزمایشگاهی

		Marshal Wet	Fatigue 500 μ s	Delta 600 μ s	Stiffness 700 μ s	Fatigue Rowe 900 μ s	Rutting Rate 40°C	Rutting Ratio 60°C	Dynamic Stability 60°C	Resilient Modulus 25°C
N		8	8	8	8	8	8	8	8	8
Normal Parameters	Mean	902.7688	1.0244E6	29.3375	3961.625	116512.5	.5200	8.295	593.625	12546.0
	Std. Deviation	79.30853	3.83230E5	1.43819	625.5377	53276.0047	.29857	.64425	85.38641	445.49138
Most Extreme Differences	Absolute	.180	.266	.177	.154	.177	.237	.316	.148	.140
	Positive	.180	.266	.149	.152	.177	.237	.185	.114	.106
	Negative	-.147	-.176	-.177	-.154	-.144	-.136	-.316	-.148	-.140
Kolmogorov-Smirnov Z		.509	.751	.502	.437	.502	.669	.895	.418	.395
Asymp. Sig. (2-tailed)		.958	.625	.963	.991	.963	.762	.400	.995	.998
Monte Carlo Sig. (2-tailed)	Sig.	.750 ^c	.625 ^c	.875 ^c	.875 ^c	.875 ^c	.625 ^c	.500 ^c	.875 ^c	.875 ^c

۶. بحث و نتیجه گیری

رویکرد استفاده از افزودنی‌ها برای بهبود عملکرد خواص مخلوط‌های آسفالتی توسط تمام متولیان با توجه به تجارب راه‌های ساخته شده با مصالح معمول، پذیرفته شده و به طور جدی دنبال می‌شود. نتایج ارزنده‌ای از عملکرد افزودنی‌ها گزارش شده است. در این پژوهش، با استفاده از افزودنی پودر لاستیک و ساسوبیت، خواص مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از آزمایش‌های مارشال، خستگی، شیارشدگی و مدول برجهنگی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر در مقایسه با نمونه شاهد به دست آمد:

۱- نتایج آزمایش مارشال (جدول ۱، شکل‌های ۱ و ۲) با افزودنی‌ها، حاکی از بهبود تمام پارامترهای آزمایش می‌باشد. اما تأثیر پودر لاستیک نسبت به ساسوبیت بیشتر بوده است. تأثیر مواد افزودنی برای نسبت مارشال به صورت مجزا و ترکیبی در حالت خشک، حداکثر ۸/۴ درصد (مربوط به R10) بوده و در حالت مرطوب این تأثیر ۵۱/۴ درصد (مربوط به R15) است. همچنین، این تأثیر برای استقامت باقیمانده مارشال و نسبت مارشال به ترتیب ۷/۸ درصد (مربوط به S3) و ۴۴/۶ درصد (مربوط به S2) محاسبه شد. همانطور که ملاحظه می‌شود، تأثیر در حالت مرطوب، با افزودنی پودر لاستیک، قابل توجه است. دلیل آن را می‌توان به این صورت بیان نمود که افزودن پودر لاستیک منجر به افزایش خاصیت الاستیکی ملات قیری شده که در هنگام سرد شدن، ترک‌های مویی کمتری از نظر تعداد و بازشدگی ترک، در آن ایجاد شده و نفوذ آب به داخل مخلوط را مشکل‌تر نموده است.

۲- بهبود عمر خستگی در آزمایش خستگی برای هر دو افزودنی و ترکیب آنها قابل تعمق است. به عنوان نمونه، برای کرنش $500/\mu s$ ساسوبیت با مقدار ۲٪ منجر به افزایش ۵۱٪ و پودر لاستیک با ۱۵٪ منجر به افزایش ۱۱۹/۶ درصد و ترکیب این دو افزودنی با مقادیر فوق،

باعث افزایش ۱۶۱/۷ درصدی عمر خستگی شده است (شکل ۳). همانطور که ملاحظه می‌شود، افزایش الاستیسیته و کاهش دمای تولید که منجر به شکل‌پذیری بیشتر و کاهش از دست رفتن روغن‌ها و رزین‌های قیر می‌شود و یا به بیان دیگر افزایش بازه الاستیکی قیر نسبت به بازه ویسکوزی آن، در افزایش عمر خستگی بسیار مؤثر بوده‌اند؛ مخصوصاً ترکیب این دو افزودنی نتایج بهتری ارائه کرده است. همچنین، افزایش درصد بهبود، در کرنش‌های زیاد بسیار قابل توجه‌تر است.

۳- زاویه اختلاف فاز بین نیرو و تغییرشکل، معیاری از طبیعت ویسکوز یا الاستیک مواد است. نتایج تغییرات زاویه اختلاف فاز آزمایش خستگی (شکل ۴) دلالت بر افزایش الاستیسیته دارد، چرا که مقادیر اختلاف فاز کمتر شده و به سمت ناحیه الاستیک ماده ویسکوالاستیک میل کرده است. مانند حالت قبل، ترکیب دو افزودنی در کرنش‌های زیاد، مؤثرتر بوده است. این نتایج با نتایج شکل ۳ تطابق دارد. مشاهده می‌شود که در یک سطح کرنش مشخص، با جایگزینی بیشتر ساسوبیت، زاویه اختلاف فاز در ابتدا روند کاهشی (در مقادیر ۱ و ۲ درصد ساسوبیت) داشته و سپس افزایش (در مقدار ۳٪ ساسوبیت) می‌یابد. نکته قابل توجه در مقایسه‌ی بین نمودارها آن است که برای نمونه‌های حاوی ساسوبیت، در مقایسه با نمونه‌های حاوی پودر لاستیک، بجز نمونه‌های حاوی ۳٪ ساسوبیت، مقادیر زاویه اختلاف فاز کمتری در سطوح کرنش مختلف وجود دارد. به عبارت دیگر، مخلوط‌های حاوی ساسوبیت دارای رفتار الاستیک‌تری نسبت به مخلوط‌های حاوی پودر لاستیک هستند که به دلیل پیرشدگی کمتر مخلوط می‌باشد. در سطح کرنش $500/\mu s$ در ترکیب S2R15 کاهش اختلاف فاز ۱۸/۵ درصدی قابل توجه است.

۴- برای مقاومت در برابر شیارشدگی نیاز به افزایش سختی به همراه الاستیسیته بیشتری است. آزمایش

توان در افزایش سختی و زاویه اختلاف فاز نمونه‌ها بررسی کرد.

۶- نرخ شیارشدگی در مخلوط‌های دارای ساسویت با افزایش درصد ساسویت در هر دو حالت 40°C و 60°C کاهش می‌یابد (شکل ۸). تأثیر پودر لاستیک بر روند تغییرات نرخ شیارشدگی متفاوت است. بدین صورت که در دماهای 60°C و 40°C و در تغییر ماده افزودنی، رفتاری متفاوت مشاهده می‌شود. در نسبت شیارشدگی در هر دو دما، با افزایش افزودنی‌ها و ترکیب آنها، روند کاهشی مشاهده می‌شود (شکل ۹). در پایداری دینامیک، نتایج در S2R15، S3، S2 و R15 از کاهشی مشاهده می‌شود (شکل ۱۰). به طوری که در S2R15 و 40°C افزایش ۴۷۳/۴ درصدی و در دمای 60°C افزایش ۴۴/۷ درصدی اتفاق افتاده است. افزایش خاصیت الاستیکی و ارتجاعی با پودر لاستیک و همچنین کاهش پیرشدگی چسباننده در حین تولید با استفاده از ساسویت، دلیل افزایش پایداری دینامیک می‌باشد.

۷- نتایج آزمایش مدول برجهندگی نشان داد که افزودن ساسویت و پودر لاستیک در مخلوط‌های آسفالتی موجب افزایش نسبی مدول برجهندگی در دمای 5°C خواهد شد (شکل ۱۲). ولی در دمای 25°C نتایج متفاوت است. در این دما، ساسویت و ترکیب دو افزودنی باعث کاهش مدول ولی پودر لاستیک منجر به افزایش مدول شده است. این نشان می‌دهد که پاسخ مخلوط حاوی پودر لاستیک در تنش‌های دینامیک و کرنش‌های متناظر، بهتر شده ولی ساسویت در این پاسخ ناتوان بوده و منجر به کاهش مدول شده است. پاسخ بهتر روسازی با پودر لاستیک به دلیل افزایش خاصیت ارتجاعی مخلوط، حاصل شده است این در حالی است که افزودن ساسویت تقریباً در تغییر خاصیت ارتجاعی نقشی ندارد. بهترین وضعیت در R15

خستگی نشان داد که این دو افزودنی و ترکیب آنها باعث افزایش سختی شده است (شکل ۵). سختی بیشتر با S3 و R20 و S2R15 به دست آمده است. به طوری که مثلاً برای کرنش $500/\mu\text{s}$ در این سه مورد به ترتیب افزایش‌های ۶۶/۸، ۶۷/۸ و ۷۳/۰ درصدی مشاهده می‌شود. علت افزایش سختی را می‌توان در این دانست که پودر لاستیک در دمای متوسط از قیر سخت‌تر بوده و بنابراین افزودن آن به قیر منجر به افزایش سختی کل مخلوط می‌شود. این حالت در دمای‌های بیشتر، نمایان‌تر است. افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی در نمونه S2R15 ناشی از تأثیر پودر لاستیک و تأثیر پایداری و ماندگاری اجزای قیر، ناشی از کاهش دمای تولید می‌باشد.

۵- ارائه نتایج آزمایش خستگی برای عمر خستگی به روش Rowe and Bouldin حاکی از بهبود عمر خستگی در کرنش‌های مختلف و ترکیبات مختلف از افزودنی‌هاست (شکل ۶). نکته قابل توجه این است که نمونه‌های R20 در سطوح کرنش ۵۰۰ و ۶۰۰ میکرون در مقایسه با نمونه‌های R10 از عمر خستگی بیشتری برخوردارند. ولی در سطوح ۷۰۰ و ۹۰۰ میکرون دارای عمر خستگی کمتری می‌باشند. دلیل این رفتار را می‌توان در افزایش سختی خمشی نمونه‌های حاوی ۲۰٪ پودر لاستیک و حساسیت این مخلوط‌ها به سطح کرنش‌های زیاد بررسی کرد. به نظر می‌رسد در سطوح کرنش زیاد، مخلوط وارد ناحیه غیر خطی و کرنش‌های برگشت‌ناپذیر شده است. اما در سطوح کرنش ۵۰۰ و ۶۰۰ میکرون، به دلیل رفتار کاملاً الاستیک نتایج بهتری حاصل شده است. از طرف دیگر، در بین نمونه‌ها با یک افزودنی، نمونه S2 و R15 دارای بیشترین عمر خستگی می‌باشد. ترکیب S2R15 در افزایش عمر خستگی در سطوح کرنش مختلف (مثلاً در سطح کرنش $500/\mu\text{s}$ ، ۳۲۶/۸ درصد) قابل توجه است. دلیل این رفتار را می‌

پارامترهای دیگر نیز تا حدودی بهبود یافته‌اند. اما در محل‌هایی که این دو پارامتر به طور ویژه نیاز به اصلاح داشته باشند، مؤثرتر هستند.

۷. سپاسگزاری

با توجه به اینکه آزمایش‌های فوق در آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان تهران انجام شده، از مدیر عامل و پرسنل محترم که در انجام آزمایش‌ها همکاری لازم را مبذول داشته‌اند کمال قدردانی و تشکر را داریم.

با افزایش ۲۷ درصدی مدول برجهندگی اتفاق افتاده است.

اضافه کردن ساسوبیت منجر به حفظ خواص شکل-پذیری قیر و اضافه کردن پودر لاستیک موجب افزایش خاصیت ارتجاعی مخلوط مصالح می‌شود. استفاده هم‌زمان از هر دو افزودنی منجر به ایجاد مشخصات فنی بهتر، هم در چسباننده و هم در مخلوط مصالح، شده که نتیجه قابل توجه‌تر در ترکیب این دو در مخلوط آسفالتی نمایان شده است. روند نتایج ارائه شده نشان داد که ترکیب این دو افزودنی در افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی و خستگی بسیار مؤثر بوده، هرچند

۸. مراجع

- بهبهانی، ح.، آقاپور، م. و باباگلی، ر. ۱۳۹۳. "بررسی آزمایشگاهی خصوصیات عملکردی مخلوط‌های آسفالتی لاستیکی حاوی درصد بالای RAP". پژوهشنامه حمل و نقل، ۱۱(۳): ۲۱۵-۲۳۲.
- بهبهانی، ح.، محمد علیها، م. ر.، آقاجانی شهریور، س. و آسایش زارچی، ح. ۱۳۹۴. "بررسی مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با استفاده از آزمایش نیم‌دیسک تحت بار خمشی". مجله مهندسی عمران شریف، ۳۱(۱/۲): ۱۲۹-۱۳۵.
- بهبهانی، ح.، ایازی، م. ج. و شجاعی، م. ح. ۱۳۹۵. "ارزیابی آزمایشگاهی حساسیت رطوبتی و پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم". فصلنامه مهندسی حمل و نقل، ۷(۳): ۴۰۵-۴۱۸.
- تقوی زواره، ح.، آذرینا، م. و کاووسی، ا. ۱۳۹۵. "ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی حاوی گوگرد پلیمری با بکارگیری قیر لاستیکی". فصلنامه مهندسی حمل و نقل، ۲۸: ۶۸۹-۶۹۷.
- شفابخش، غ. ع. و رضائیان، م. ر. ۱۳۸۹. "بررسی تأثیر درصد و نوع افزودنی‌ها بر پارامترهای مقاومتی مخلوط‌های بازیافت سرد با کف قیر". پژوهشنامه حمل و نقل، ۷(۱): ۵۳-۶۶.
- صفارزاده، ف. و طباطبایی، ن. ۱۳۹۴. "ارزیابی تأثیر ساسوبیت بر مشخصات رفتاری و کارایی مخلوط‌های آسفالتی حاوی تراشه‌های آسفالت". دوفصلنامه پژوهش‌های تجربی در مهندسی عمران، ۲(۱): ۱۵-۲۳.
- طائریان، ا.، ابطحی، س. م.، کوشا، ب. و حجازی، س. م. ۱۳۹۴. "بررسی مکانیکی اثر کاربرد ذرات لاستیک در قیر". فصلنامه مهندسی حمل و نقل، ۶(۳): ۴۷۹-۴۹۲.
- کاووسی، ا.، عباسی، ع. ا. و دیندار، م. ۱۳۹۰. "بررسی آزمایشگاهی مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم با استفاده از ساسوبیت". ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.
- معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور. ۱۳۹۰. "آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران". نشریه ۲۳۴، وزارت راه و شهرسازی، پژوهشکده حمل و نقل، مؤسسه قیر و آسفالت ایران، تجدید نظر اول.

منصوریان، ا. و مولایی، م. ۱۳۹۴. "ارزیابی مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگ‌دانه‌ای حاوی افزودنی‌های خرده لاستیک و شیشه". مجله مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۱(۲): ۷۷-۸۶.

میر، ع. ع.، امینیان، پ. و آقایان، ا. ۱۳۹۵. "تعیین پتانسیل مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی افزودنی پلیمری و معدنی در برابر خرابی‌های رطوبتی". مجله مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۲(۲): ۹۱-۱۰۶.

نیازی، ی. ۱۳۹۴. "تأثیر کاستن از دمای پخت بر عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی". پژوهشنامه حمل و نقل، ۱۲(۴). نیکوکار، م. و عربزاده، ب. ۱۳۸۵. "آمار و احتمالات کاربردی". نشر آزاده.

- AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. 2001. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Akisetty, C. K., Lee, S. J. and Amir Khanian, S. N. 2009. "High temperature properties of rubberized binders containing warm asphalt additives". J. Constr. Build. Mater., 23: 565-573.
- Akisetty, C., Xiao, F., Gandhi, T. and Amir Khanian, S. N. 2011. "Estimating correlations between rheological and engineering properties of rubberized asphalt concrete mixtures containing warm mix asphalt additive". J. Constr. Build. Mater., 25: 950-956.
- American Society for Testing and Materials. 2001. ASTM.
- Amir Khanian, S. N., Lee, S. J., Park, N. and Kim, K. W. 2009. "Characterization of warm mix asphalt binders containing artificially long-term aged binders". J. Constr. Build. Mater., 23: 2371-2379.
- Behroozikhah, A., Morafa, S. H. and Aflaki, S. 2017. "Investigation of fatigue cracks on RAP mixtures containing Sasobit and crumb rubber based on fracture energy". J. Constr. Build. Mater., 141: 526-532.
- California Department of Transportation. 2003. "Asphalt rubber usage guide". Office of Flexible Pavement.
- Chen, J. S. and Huang, C. C. 2007. "Fundamental characterization of Sasobit-modified asphalt mixed with sulfur". J. Appl. Polym. Sci., 103: 2817-2825.
- Cooper, S. B. 2009. "Evaluation of asphalt mixtures containing Sasobit". Louisiana Transportation Research Center, Report No. 06-ITA.
- Francisco De Almeida Júnior, A., Battistelle, R. A., Bezerra, B. S. and De Castro, R. 2012. "Use of scrap tire rubber in place of SBS in modified asphalt as an environmentally correct alternative for Brazil". J. Clean. Prod., 12: 236-238.
- Jamshidi, A., Hamzah, M. and You, Z. 2013. "Performance of warm mix asphalt containing Sasobit®: State-of-the-art". J. Constr. Build. Mater., 38: 530-553.
- Lee, S. J., Akisetty, C. K. and Amir Khanian, S. N. 2008. "The effect of crumb rubber modifier (CRM) on the performance properties of rubberized binders in HMA pavements". J. Constr. Build. Mater., 22: 1368-1376.
- Oliveira, J. R. M., Silva, H. M. R. D., Abreu, L. P. F. and Fernandes, S. R. M. 2013. "Use of a warm mix asphalt additive to reduce the production temperatures and to improve the performance of asphalt rubber mixtures". J. Clean. Prod., 41: 15-22.
- Rowe, G. M. and Bouldin, M. G. 2000. "Improved techniques to evaluate the fatigue resistance of asphaltic mixtures". Proc. of 2nd Euroasphalt and Eurobitume Congress, Barcelona, Spain.
- Sasol Wax: http://www.sasolwax.com/Sasobit_Technology.html.
- Shalaby, A. and Khan, R. A. 2005. "Design of unsurfaced roads constructed with large-size shredded rubber tires: A case study". Resour., Conserv. Recycl. J., 44(4): 318-332.
- Yang, X., You, Z., Hasan, M. R. M., Diab, A., Shao, H., Chen, S. and Ge, D. 2017. "Environmental and mechanical performance of crumb rubber modified warm mix asphalt using Evotherm". J. Clean. Prod., 159: 346-358.
- Yu, H., Leng, Z. and Gao, Z. 2016. "Thermal analysis on the component interaction of asphalt binders modified with crumb rubber and warm mix additives". J. Constr. Build. Mater., 125: 168-174.

