

ارزیابی آزمایشگاهی مخلوط‌های آسفالت گرم حاوی سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی

سیدعلی ضیائی*، دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های
فنی دانشگاه تهران و عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
کامبیز بهنیا، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

Email: Sa.ziaee@ut.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۰۲ - پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۲۸

چکیده

کاهش آلودگی محیط‌زیست، حفظ منابع طبیعی و بهینه‌سازی مصرف انرژی، از اهداف اصلی توسعه پایدار می‌باشند که بایستی در روند توسعه زیرساخت‌های مختلف هر کشوری مورد توجه واقع شوند. توسعه زیرساخت‌های حمل و نقلی نیز از این قاعده مستثنی نبوده و بایستی با توجه به اصول توسعه پایدار انجام گیرند. کاهش دمای پخت و استفاده از مواد زاید در فرایند تولید مخلوط‌های آسفالتی از جمله مهم‌ترین این پتانسیل‌ها می‌باشند. در همین راستا، در این پژوهش، به ارزیابی خواص مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی حاوی ساسوبیت به عنوان افزودنی آسفالت گرم و سرباره کوره قوس الکتریکی به عنوان جایگزین مصالح سنگی درشت‌دانه پرداخته شد. سرباره فولادی به مقدار صفر، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد جایگزین مصالح سنگی طبیعی آهکی درشت‌دانه (مانده روی الک ۴/۷۵ میلی‌متر) شد و از ساسوبیت نیز به مقدار ۳٪ وزن قیر به عنوان افزودنی در تهیه مخلوط‌های آسفالتی گرم استفاده گردید. پس از بررسی خصوصیات مصالح سنگی و سرباره‌ای، قیر بهینه برای ۸ نوع مخلوط آسفالتی شامل ۴ مخلوط آسفالتی داغ و ۴ مخلوط آسفالتی گرم با مقادیر مختلف سرباره به روش مارشال اندازه‌گیری شد. سپس، به منظور ارزیابی خواص مکانیکی مخلوط‌ها، در درصد قیر بهینه مارشال، ۹۶ نمونه با دستگاه تراکم‌کننده چرخشی روسازی ممتاز ساخته شد و آزمایش‌های مقاومت کششی غیرمستقیم، مدول برجهنگی در دو دمای 25°C و 40°C و خزش دینامیک در دمای $^{\circ}\text{C}$ ۴۰ روی نمونه‌ها انجام گردید. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها نشان‌دهنده بهبود معنی‌دار خواص مکانیکی مخلوط‌ها تحت تأثیر استفاده از افزودنی ساسوبیت و سرباره فولادی می‌باشد. این تغییرات، تحت تأثیر سختی حاصل از ساسوبیت، قفل‌وبست بهتر مصالح سرباره‌ای و چسبندگی بهتر این مواد بازیافتی با قیر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آسفالت داغ، آسفالت گرم، سرباره، خزش دینامیک، مدول برجهنگی، مقاومت کششی غیرمستقیم

۱. مقدمه

معمولاً فعالیت‌های راه‌سازی همراه با مصرف انرژی و ایجاد آلودگی زیاد می‌باشند (به عنوان مثال، پخت مخلوط‌های آسفالتی). به همین دلیل، با هدف کاهش آلودگی و مصرف انرژی در فعالیت‌های راه‌سازی، راه-حل‌های مختلفی توسعه پیدا کرده است که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به کاهش دمای پخت مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از تکنولوژی مخلوط آسفالتی گرم^۱ اشاره کرد. در این نوع مخلوط‌های آسفالتی، دمای اختلاط تا 40°C کمتر از دمای اختلاط مخلوط‌های آسفالتی داغ^۲ می‌باشد و کارایی لازم با استفاده از افزودنی‌های شیمیایی، افزودنی‌های آروگانیک و یا تکنولوژی کف قیری تامین می‌گردد. بنابراین، با به‌کارگیری این تکنولوژی می‌توان به مقدار قابل توجهی مصرف انرژی و آزادسازی گازهای گلخانه‌ای را کاهش داد (روبیو و همکاران، ۲۰۱۲؛ یو و گو، ۲۰۰۸).

یک نمونه از این افزودنی‌ها، ساسوبیت است که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. ساسوبیت یک هیدروکربن آلیفاتیک با زنجیره طولانی است که از بخارسازی سرد با استفاده از فرایند تراپس-فیشتر^۳ به دست می‌آید. ساسوبیت در قیر در دمای 85°C تا 115°C حل می‌شود و موجب کاهش قابل توجه در کندروانی قیر می‌گردد و در دمای بین 65°C تا 115°C (۱۴۹ تا ۲۳۹ درجه فارنهایت) به صورت ذرات میله‌ای شکل میکروسکوپی با توزیع منظم در آسفالت، سخت می‌گردد. سازندگان این افزودنی مدعی کاهش 30°C تا 50°C در دمای تراکم و اختلاط هستند (هورلی و پروول، ۲۰۰۵؛ هرش، ۲۰۰۷؛ واکس، ۲۰۱۳).

استفاده از این افزودنی، کندروانی چسباننده‌ها را در دماهای زیاد کاهش می‌دهد و کندروانی را در دماهای گستره میانی (60°C) افزایش می‌دهد، که موجب می‌شود قیر در دماهای زیاد کارایی بیشتری داشته باشد و در

دماهای میانی سخت‌تر و بنابراین در مقابل شیارشدگی و تغییرشکل‌های ماندگار مقاوم‌تر باشد. ساسوبیت همچنین مدول مختلط و مقاومت در مقابل نفوذ قیر پایه را بهبود می‌بخشد (گانندی و امیرخانیان، ۲۰۰۷).

مخلوط آسفالتی گرم یکی از انواع مخلوط‌های آسفالتی بوده که به سبب استفاده از تکنولوژی‌های مخصوص در ساخت آن، دارای مزایای اجرایی و محیط‌زیستی نسبت به سایر مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد. مزایای محیط‌زیستی این نوع مخلوط به دلیل کاهش دمای اختلاط آن نسبت به مخلوط‌های آسفالتی داغ می‌باشد (جمشیدی و همکاران، ۲۰۱۳). معمولاً، گستره دمای اختلاط مخلوط‌های آسفالتی گرم بین 100°C تا 140°C می‌باشد. در حالی که دمای اختلاط مخلوط‌های آسفالتی داغ بین 150°C تا 180°C است (انجمن معابر آسفالتی استرالیا، ۲۰۰۱). بنابراین، مخلوط‌های آسفالتی گرم در سال‌های اخیر مقبولیت بیشتری یافته است. جدا از مزایای واضح مخلوط‌های آسفالتی گرم از قبیل کاهش مصرف انرژی و کاهش انتشار آلاینده‌ها، می‌توان به سایر مزایای این مخلوط‌ها از جمله: افزایش تعداد فصول اجرای آسفالت، افزایش فاصله حمل، کاهش فرسایش کارخانه‌ها، کاهش پیرشدگی قیر، کاهش سخت‌شدگی ناشی از اکسیداسیون قیر و در نتیجه کاهش ترک در روسازی، امکان باز کردن زودتر مسیر روی ترافیک و صرفه‌جویی اقتصادی اشاره کرد (هورلی و پروول، ۲۰۰۶). هرچند این مخلوط به عنوان مخلوطی سازگار با محیط‌زیست شناخته می‌شود، اما می‌توان با جایگزین کردن قسمتی از مصالح سنگی بکر با مواد زاید صنعتی، عملکرد زیست‌محیطی آن را بهبود بخشید.

از جمله مواد زائد صنعتی مورد استفاده در کاربردهای حمل و نقلی می‌توان به سرباره‌های فولادی اشاره نمود که طی فرایند تولید فولاد به دست می‌آید. سرباره‌های فولادی با توجه به نوع فرایند تولید، به انواع

³- Tropsch-Fischer

¹- Warm Mix Asphalt

²- Hot Mix Asphalt

فولادی به عنوان جایگزینی برای مصالح سنگی مخلوط-های آسفالتی، علاوه بر کاهش هزینه‌ها و ضررهای ناشی از استخراج معادن طبیعی مصالح سنگی، مخلوط‌هایی با عملکرد مکانیکی بهتر تولید کرد (اسکاف، ۲۰۱۷).

در ادامه، به پژوهش‌های انجام شده با هدف استفاده از این نوع سرباره به عنوان جایگزین مصالح سنگی در مخلوط‌های آسفالتی گرم اشاره شده و نتایج حاصل از آن‌ها به صورت خلاصه شرح داده شده است.

عامری و همکاران (۲۰۱۳) طی پژوهشی، به ارزیابی تأثیر استفاده از سرباره کوره قوس الکتریکی به عنوان سنگدانه در مخلوط‌های آسفالتی داغ و گرم پرداختند. سرباره‌ها در این پژوهش مطابق با سه سناریو، جایگزین ریزدانه، درشت‌دانه و کل مصالح سنگی مخلوط‌های آسفالتی داغ شدند و خواص مخلوط‌های حاصل با مخلوط کنترل که حاوی مصالح سنگی آهکی بود مقایسه شد. همچنین، دو مخلوط آسفالتی گرم حاوی سرباره درشت‌دانه و سرباره ریزدانه نیز تحت آزمایش قرار گرفتند. نتایج آزمایش‌های مارشال نشان داد که به دلیل تخلخل زیاد، بافت سطحی زیر و گوشه‌داری سرباره‌ها، درصد قیر بهینه، وزن مخصوص، جذب آب، استقامت و شاخص مارشال مخلوط‌های آسفالتی داغ حاوی سرباره افزایش یافته است. به دلیل افزایش سختی ناشی از وجود افزودنی ساسویت، عملکرد مخلوط‌های آسفالتی گرم نسبت به مخلوط‌های آسفالتی داغ در آزمایش‌های مدول برجهنگی، کشش غیرمستقیم و آزمایش خزش بهبود پیدا کرده است. اما از آنجا که چسبندگی قیر با مصالح آهکی نسبت به سرباره بیشتر می‌باشد، مخلوط‌های حاوی سرباره عملکرد ضعیف‌تری را در آزمایش‌های مدول برجهنگی و کشش غیرمستقیم نشان داده‌اند. در حالی که مطابق با نتایج آزمایش خزش دینامیک، عملکرد بهتری را نسبت به مخلوط‌های حاوی مصالح سنگی آهکی نشان می‌دهند. با توجه به نتایج این پژوهش، جایگزینی مصالح سنگی درشت‌دانه با سرباره کوره قوس الکتریکی می‌تواند

مختلفی تقسیم می‌شوند. اگر تولید فولاد با استفاده از منابع حاصل از استخراج معادن سنگ آهن باشد، سرباره-ها در کوره‌های بلند و کوره‌های پایه اکسیژن به وجود می‌آید. بازیافت ضایعات آهن در کوره‌های قوس الکتریکی، فرایند دیگری است که طی آن فولاد تولید می‌شود. در این فرایند، سرباره‌ها در کوره‌های قوس الکتریکی به وجود می‌آیند (توماس و همکاران، ۲۰۱۹).

استفاده از انواع سرباره به عنوان جایگزین مصالح سنگی در مخلوط‌های آسفالتی، بهبود خواص مکانیکی این مخلوط‌ها را در پی دارد. به صورتی که جایگزینی مصالح سنگی با این مواد باعث افزایش استقامت، مقاومت کششی غیرمستقیم، سختی و مدول برجهنگی مخلوط‌های آسفالتی می‌شود (امری، ۱۹۸۲؛ نورالدین و مک‌دانیل، ۱۹۹۰؛ هانت و بویل، ۲۰۰۰؛ احمدزاده و شینگز، ۲۰۰۹؛ پاستو و بالدو، ۲۰۱۱؛ سورلینی و همکاران، ۲۰۱۲؛ آلوواسولا و همکاران، ۲۰۱۵؛ کیم و همکاران، ۲۰۱۸). عربانی و آذرهوش (۲۰۱۲) گوشه‌داری و ویژگی‌های سطحی مناسب سرباره‌ها را به عنوان عامل اصلی افزایش مشخصات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی حاوی این مواد بازیافتی معرفی کرده‌اند. از طرفی، ضیائی و همکاران (۲۰۱۵) نشان دادند که استفاده از سرباره به عنوان جایگزینی برای مصالح سنگی درشت‌دانه در مخلوط‌های آسفالتی باعث افزایش درصد قیربهینه مخلوط‌ها می‌شود. آسی و همکاران (۲۰۰۷) فضای خالی و تخلخل سطحی زیاد مصالح سرباره را به عنوان دلیل افزایش درصد قیر بهینه مخلوط‌های حاوی این مواد بیان کرده‌اند.

سرباره کوره‌های قوس الکتریکی از انواع سرباره-هایی هستند که می‌توان از آن‌ها به عنوان جایگزینی برای مصالح سنگی مصرفی در ساخت مخلوط‌های آسفالتی استفاده نمود. نتایج حاصل از پژوهش‌های انجام شده در این رابطه نشان‌دهنده بهبود خواص مکانیکی و عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی این مواد می‌باشد. بنابراین، می‌توان با استفاده از این نوع خاص از سرباره

مشاهده شد که استقامت مارشال، مدول برجهندگی و مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی گرم در کوتاه‌مدت و بلندمدت با جایگزینی مصالح سنگی با سرباره کوره قوس الکتریکی بهبود پیدا کرده است. استفاده از سرباره به عنوان جایگزین مصالح سنگی باعث افزایش شاخص پیرشدگی مخلوط‌ها شده است؛ این در حالیست که مخلوط‌های آسفالتی گرم نسبت به مخلوط‌های آسفالتی داغ شاخص پیرشدگی کمتری را نشان داده‌اند.

مشاهده می‌شود که پژوهش‌های انجام شده در زمینه جایگزینی مصالح سنگی مخلوط‌های آسفالتی گرم با سرباره کوره قوس الکتریکی بسیار محدود بوده و عمدتاً با جایگزینی کل مصالح سنگی و یا بخش ریزدانه یا درشت‌دانه آن انجام شده است. بنابراین، در این پژوهش، به منظور پوشش محدوده وسیع‌تری از مخلوط‌ها، مصالح سنگی درشت‌دانه به مقدار صفر، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد با سرباره کوره قوس الکتریکی جایگزین شدند و مقاومت کششی غیرمستقیم، مدول برجهندگی و خزش مخلوط‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

۲. مواد و روش‌ها

در این پژوهش، مواد و مصالح مورد استفاده برای ساخت مخلوط‌ها مطابق با روش‌های استاندارد ارزیابی شدند تا از قرار گرفتن آن‌ها در محدوده‌های تعریف شده در آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌ها اطمینان حاصل گردد. پس از ارزیابی کامل مصالح، مخلوط‌ها نیز مطابق روش‌های استاندارد، مخلوط و متراکم شدند و درصد قیر بهینه آن‌ها مطابق با روش طرح اختلاط مارشال به دست آمد. در نهایت نیز نمونه‌های مناسب جهت انجام هر کدام از آزمایش‌ها توسط دستگاه متراکم‌کننده چرخشی روسازی ممتاز^۲ ساخته شد و هر کدام از آزمایش‌ها تحت شرایط استاندارد روی نمونه‌های مربوطه انجام گرفت. در ادامه،

خواص مکانیکی و دوام مخلوط‌های آسفالتی گرم را بهبود بخشید.

در پژوهش دیگری که توسط حسامی و همکاران (۲۰۱۵) انجام شد، حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی سرباره کوره قوس الکتریکی مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش نیز جایگزینی مصالح سنگی با سرباره کوره قوس الکتریکی مطابق با سه سناریوی جایگزینی با درشت‌دانه، ریزدانه و کل مصالح سنگی انجام گرفت. همچنین، مخلوط‌های آسفالتی گرم با استفاده از دو نوع افزودنی ساسوبیت و ردیست^۱ ساخته شدند. حساسیت رطوبتی به چهار روش نسبت پایداری مارشال، نسبت مدول برجهندگی، نسبت مقاومت کششی و نسبت انرژی شکست مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده عدم بهبود حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی داغ تحت تأثیر جایگزینی مصالح سنگی آن با سرباره کوره قوس الکتریکی می‌باشد. این در حالیست که این جایگزینی مصالح در مخلوط‌های آسفالتی گرم باعث بهبود حساسیت رطوبتی این مخلوط‌ها شده است.

مسعودی و همکاران (۲۰۱۷) به منظور ارزیابی تأثیر استفاده از سرباره کوره قوس الکتریکی به عنوان سنگدانه در مخلوط‌های آسفالتی داغ، مصالح سنگی درشت‌دانه را در این مخلوط با سرباره کوره قوس الکتریکی جایگزین کردند. همچنین، با هدف ارزیابی خواص مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی سرباره کوره قوس الکتریکی، از ۱/۵ درصد ساسوبیت به عنوان افزودنی در این مخلوط‌ها استفاده نمودند. در این پژوهش استقامت و روانی مارشال، مقاومت کششی غیرمستقیم و مدول برجهندگی مخلوط‌ها در دو حالت پیر شده و پیر نشده مورد ارزیابی قرار گرفت و با محاسبه نسبت آن‌ها، شاخص پیرشدگی مخلوط‌ها تعریف و با یکدیگر مقایسه شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان‌دهنده افزایش درصد قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره می‌باشد. همچنین،

^۲- Superpave Gyrotary Compactor (SGC)

^۱- Rediset

هر کدام از این مراحل به صورت کامل شرح داده شده است.

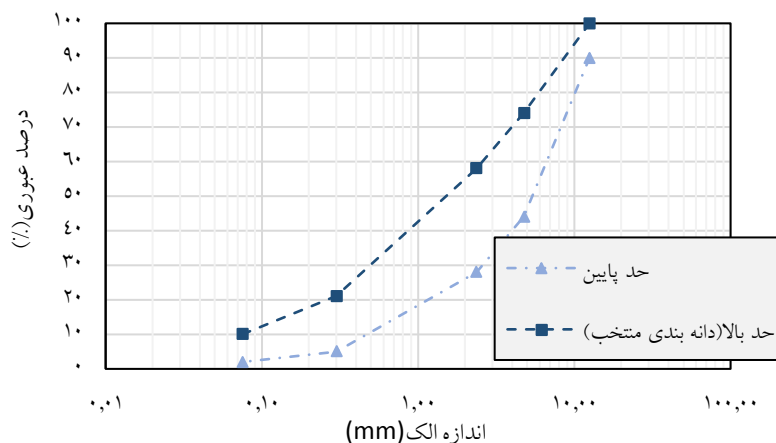
۱-۲. مواد

در این پژوهش، از سرباره کوره قوس الکتریکی فولاد مبارکه اصفهان به عنوان جایگزین بخشی از مصالح سنگی آهکی در مخلوط های آسفالتی داغ و گرم استفاده شد. مطابق با شکل ۱، حد بالای منحنی دانه بندی شماره ۴ آیین نامه روسازی آسفالتی راه های ایران (نشریه ۲۳۴) برای مخلوط ها انتخاب و صفر، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد از مصالح سنگی درشت دانه با سرباره جایگزین شد. مشخصات فیزیکی مصالح سنگی و سرباره ها مطابق با جدول ۱ می باشد. با توجه به تأثیر قابل توجه فازها و ترکیبات شیمیایی مصالح سنگی و سرباره ها در مقاومت و چسبندگی آنها با قیر، آزمایش XRF و XRD روی این مصالح انجام شد و نتایج آنها مطابق با شکل ۲ و جدول ۲ به دست آمد. XRD روشی غیرمخرب با کاربردهای متنوع است که اطلاعات جامعی در رابطه با ترکیبات شیمیایی و ساختار کریستالی مواد طبیعی و صنعتی ارائه می دهد. در این آزمایش، هدف تعیین زاویه های مربوط به هر پیک و سپس مشخص کردن فاصله صفحات اتمی (مقدار d) می باشد. با در دست داشتن ارقام مربوط به d که با دست کم سه رقم پس از اعشار ارائه می شود، می توان با مراجعه به جداول مربوطه، ماده مجهول را شناسایی کرد. در این پژوهش، تحلیل نتایج با

استفاده از نرم افزار X-PERT انجام و فازهای کریستالی و معدنی موجود در مصالح مورد شناسایی قرار گرفت. محورهای قائم و افقی طیف به ترتیب بیانگر شدت نسبی پیک و زاویه θ_2 هستند. الگوی طیف XRD سرباره فولادی کاملاً پیچیده و به همراه تعداد زیادی نقاط پیک است. نقاط زیاد برهم افتادگی پیک ها حکایت از حضور تعداد زیاد ترکیبات معدنی درون سرباره فولادی دارد.

مشاهده می شود که مهم ترین فازها و ترکیبات تشکیل دهنده مصالح سنگی کوارتز، کلسیت و اکسید منیزیم می باشد. بیشتر بودن مقدار کلسیت نشان دهنده آهکی بودن مصالح سنگی است. همچنین، مشاهده می شود که وجود مقدار قابل توجه اکسید آهن و آلومینیم در سرباره ها باعث بالا رفتن چگالی آنها شده است. بافت سطحی مواد عامل تعیین کننده دیگری برای ویژگی های تماسی آنها با سایر مواد می باشد. از همین رو، با تهیه عکس های میکروسکوپ الکترونی، بافت سطحی مصالح سنگی و سرباره ها مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به شکل ۳، مشاهده می شود که تخلخل سرباره ها نسبت به مصالح سنگی آهکی بیشتر می باشد. قیر مورد استفاده در این پژوهش نیز از رده عملکردی PG 64-22 بوده که از پالایشگاه نفت جی تهیه و مشخصات آن مطابق جدول ۳ می باشد. در این پژوهش، به منظور تولید مخلوط های آسفالتی گرم از افزودنی آلی ساسوبیت به مقدار ۰.۳٪ وزنی قیر استفاده شد.

ضیائی، بهنیا



شکل ۱. دانه بندی مصالح سنگی مورد استفاده

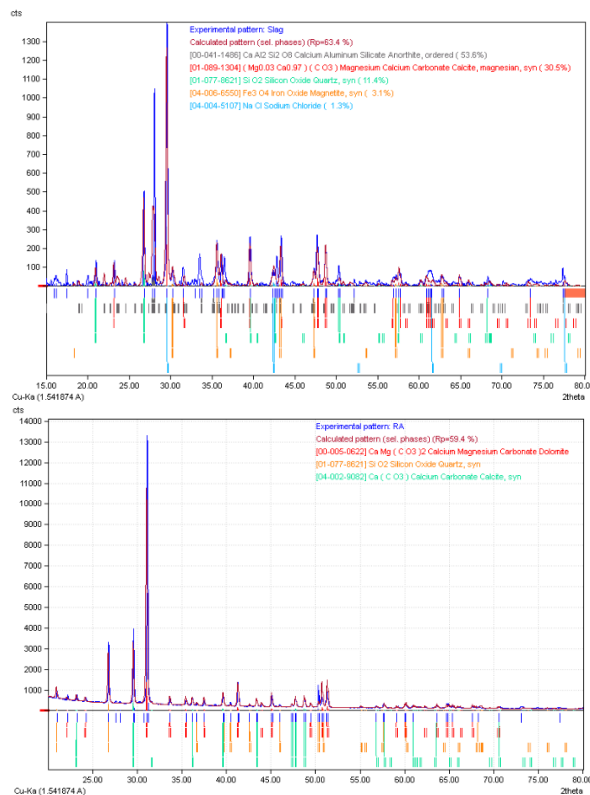
جدول ۱. مشخصات فیزیکی مصالح سنگی و سرباره های فولادی

سرباره فولادی		مصالح سنگی آهکی				استاندارد	مشخصه
فیلر	ریزدانه	درشت-دانه	فیلر	ریزدانه	درشت-دانه		
-	-	۳/۴۱	-	-	۲/۶۷	ASTM C127	
-	۲/۹۴	-	-	۲/۵۳	-	ASTM C128	وزن مخصوص (g/cm ³)
۲/۹۳	-	-	۲/۷۲	-	-	ASTM D854	
-	-	۱۴/۷	-	-	۲۴/۹۷	ASTM C131	سایش لُس آنجلس (%)
-	-	۹۸	-	-	۹۷	ASTM D5821	مصالح شکسته (%)
-	-	-	-	۴۲/۶	-	ASTM C1252	فضای خالی متراکم نشده (%)
غیر پلاستیک	غیر پلاستیک	-	غیر پلاستیک	غیر پلاستیک	-	ASTM D4318	حد پلاستیک
-	-	-	-	-	۰/۴	ASTM C142	کلوخه های رسی و ذرات سست (%)
-	-	۸	-	-	۹/۴۲	ASTM D4791	مصالح سوزنی (%)
-	-	۱۵	-	-	۲۳/۷	ASTM D4791	مصالح پولکی (%)

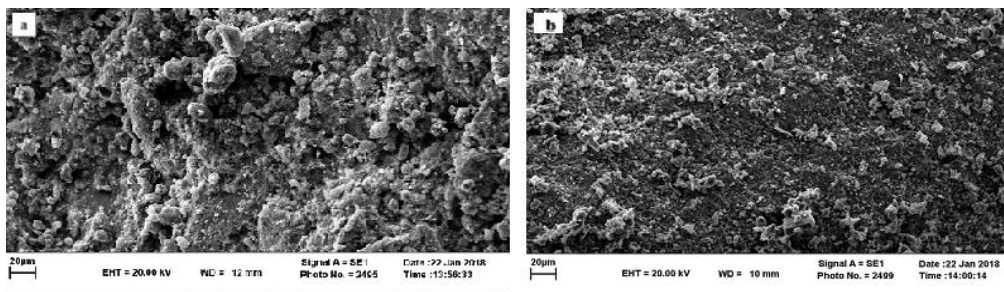
جدول ۲. ترکیبات شیمیایی مصالح سنگی و سرباره ها طبق نتایج آزمایش XRF

مصالح	مقدار اکسید (%)

Al ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MnO	TiO ₂	SiO ₂	
۱/۵۶	۰/۲۱	۸/۸۳	۰/۴۷	۰/۰۸	۳۶/۴۹	۱/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۹	۱۲/۱۱	مصالح سنگی آهکی
۵/۵۲	۰/۸۲	۵/۶۹	۰/۶۹	۰/۴۷	۲۷/۸۵	۲۵/۱۳	۰/۲۷	۰/۳۹	۰/۷۱	۲۱/۲۳	سرباره های فولادی



شکل ۲. نتایج آزمایش XRD: مصالح سرباره (چپ) و مصالح سنگی آهکی (راست)



شکل ۳. عکس های SEM با بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر: (a) مصالح سرباره فولادی و (b) مصالح سنگی آهکی

جدول ۳. مشخصات قیر مصرفی

استاندارد	محدوده مجاز		نتیجه	آزمایش
	پایین	بالا		
ASTM D5	۷۰	۶۰	۶۲	درجه نفوذ در 25 °C (0.1×mm)

ASTM D36	۵۶	۴۹	۴۹	نقطه نرمی (°C)
ASTM D2170	۱۰۰۰	۲۰۰	۳۶۳	کندروانی کینماتیک در 135 °C (ساتی استوکس)
ASTM D113	-	۱۰۰	>۱۰۰	شکل پذیری (cm)
ASTM D92	-	۲۳۲	۳۲۶	نقطه اشتعال (°C)
ASTM D70	-	-	۱/۰۱۴	وزن مخصوص در 25 °C (g/cm ³)

۲-۲. ساخت مخلوط‌ها

در این پژوهش، چهار نوع ترکیب مصالح سنگی و سرباره مطابق جدول ۴ برای ساخت مخلوط‌های آسفالتی داغ و گرم مورد استفاده قرار گرفت. درصد‌های جایگزینی ارائه شده در این جدول برای بخش درشت‌دانه مصالح سنگی می‌باشد. با توجه به منحنی دما-ویسکوزیته قیر مصرفی، دمای اختلاط و تراکم مخلوط‌های آسفالتی داغ به ترتیب برابر با ۱۶۰ °C و ۱۴۰ °C انتخاب شد. از آنجا که در ساخت مخلوط‌های آسفالتی گرم از ۳٪ ساسوبیت به عنوان افزودنی استفاده شد، اختلاط و تراکم این مخلوط‌ها نیز به ترتیب در دمای ۱۴۰ °C و ۱۲۰ °C انجام گرفت.

جدول ۴. مشخصات مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی

مخلوط	ساسوبیت (%)	سرباره درشت‌دانه (%)
H0	۰	۰
H25	۰	۲۵
H50	۰	۵۰
H75	۰	۷۵
W0	۳	۰
W25	۳	۲۵
W50	۳	۵۰
W75	۳	۷۵

۲-۳. برنامه آزمایشی

۱-۲-۳. آزمایش مارشال

طبق روش استاندارد ASTM D6926 تعداد ۱۵ عدد نمونه مارشال برای هر کدام از مخلوط‌ها (سه نمونه در

هر درصد قیر) ساخته شد و مطابق با استاندارد ASTM D2726 وزن مخصوص آن‌ها در حالت خشک و اشباع با سطح خشک اندازه‌گیری شد. همچنین، با انجام آزمایش ریس طبق استاندارد ASTM D2041، وزن مخصوص بیشینه مخلوط‌ها در هر درصد قیر نیز به دست آمد. در نهایت نیز با استفاده از روابط وزنی حجمی حاکم بر مخلوط‌های آسفالتی، مقادیر فضای خالی (Va)، فضای خالی مصالح سنگی و فضای خالی پر شده با قیر برای هر کدام از نمونه‌ها محاسبه شد. نمونه‌های استوانه‌ای مارشال پس از اندازه‌گیری وزن مخصوص خشک و اشباع، در حمام آب ۶۰ °C قرار گرفتند و سپس با استفاده از جک مارشال تحت بارگذاری قرار داده شدند تا استقامت و روانی آن‌ها اندازه‌گیری شود. سپس درصد قیر بهینه برای هر کدام از مخلوط‌ها مطابق با روش ناپا^۱ در هوای ۴٪ محاسبه شد. همچنین، نسبت سختی مارشال که نسبت استقامت (kN) به روانی (mm) می‌باشد و یک شاخص مناسب برای نشان دادن سختی مخلوط‌ها است محاسبه گردید. مقادیر بیشتر نسبت سختی مارشال نشان‌دهنده مخلوط سخت‌تر بوده و حاکی از آن است که احتمالاً مخلوط دارای مقاومت بیشتری در برابر تغییر شکل دائم می‌باشد (نیازی و جلیلی، ۲۰۰۹؛ کاوسی و مدرس، ۲۰۱۰).

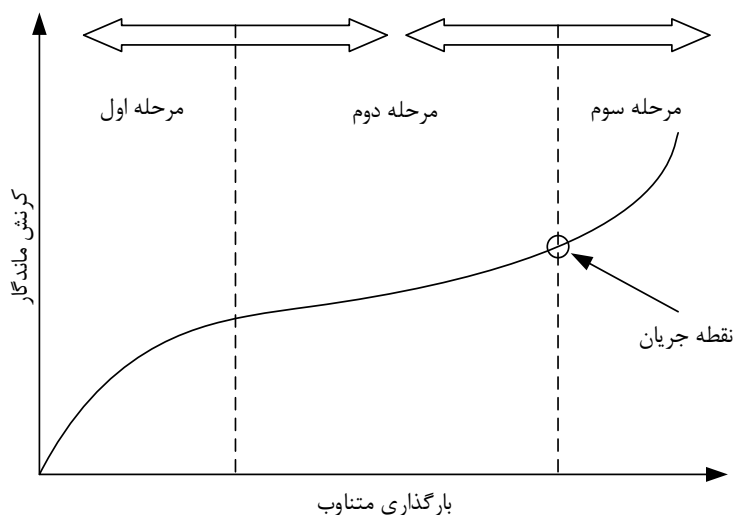
۲-۲-۳. آزمایش خزش دینامیک

شیارشدگی از خرابی‌های مهم روسازی‌های آسفالتی می‌باشد که رخ دادن تغییر شکل‌های برشی در مخلوط آسفالتی می‌تواند یکی از دلایل اصلی به وجود آمدن آن

^۱- NAPA

بارگذاری صعودی است. کرنش تجمعی در مرحله دوم نیز افزایش می یابد؛ اما نرخ رشد آن کمتر از مرحله اول است. در این مرحله، نرخ تغییرات کرنش در مقابل تعداد سیکل های بارگذاری ثابت است. کرنش تجمعی در این مرحله ناشی از تراکم و جریان برش می باشد. به طوری که در ابتدا نقش عامل تراکم بیشتر است و در انتهای این مقطع تأثیر جریان برش برتری می یابد. نقطه شروع مرحله سوم به عنوان عدد جریان^۱ شناخته شده و شاخصی از میزان مقاومت مخلوط در برابر شیارشدگی می باشد. در حقیقت، عدد جریان تعداد سیکل بارگذاری می باشد که سبب می شود مخلوط آسفالتی بدون تغییرات حجم دچار تغییر شکل برشی شود (ویتچاک، ۲۰۰۷). تحقیقات انجام شده نشان داده است که عدد جریان حاصل از خزش دینامیک، با مقاومت شیارشدگی مخلوط آسفالتی، نسبت مستقیم دارد (گوه و یو، ۲۰۰۹؛ حافظ و کمال، ۲۰۱۱).

باشد. آزمایش خزش دینامیک به عنوان یکی از روش های ارزیابی مقاومت مخلوط های آسفالتی در برابر این نوع خرابی می باشد. در این آزمایش، بارگذاری به صورت دینامیک به نمونه استوانه ای وارد شده و تغییر شکل های ناشی از آن توسط دستگاه اندازه گیری می گردد. با اندازه گیری تغییر شکل ها در اثر تکرار بارگذاری تا لحظه گسیختگی، منحنی خزش نمونه ترسیم شده و بر اساس آن عملکرد مخلوط در برابر تغییر شکل های دائمی مورد بررسی قرار می گیرد (شکل ۴). مطابق این منحنی، مخلوط تحت بارگذاری، سه مرحله را طی می کند که در مرحله ابتدایی و انتهایی آن تغییر شکل عمده ای در نمونه رخ می دهد. تغییر شکل های رخ داده در مرحله اول ناشی از تغییر بُعد و حجم نمونه بوده و نرخ تغییرات کرنش در مقابل تعداد سیکل های بارگذاری نزولی است. در حالی که تغییر شکل های رخ داده در مرحله سوم صرفاً ناشی از به وجود آمدن تغییر شکل های برشی در مخلوط می باشد و نرخ تغییرات کرنش در مقابل تعداد سیکل های



شکل ۴. رفتار مخلوط آسفالتی تحت بار دینامیک (ویتچاک، ۲۰۰۷)

دقیق تر شدن نتایج لازم می باشد. جهت ساخت نمونه ها در این پژوهش، با توجه به استاندارد NCHRP 9-19

به دلیل وجود اثرات انتهایی در نمونه های مورد استفاده در آزمایش، نسبت معینی از قطر به ارتفاع برای

^۱ - Flow Number

سپس، با استفاده از دستگاه آزمایش چندکاره^۱، بارگذاری نیمه‌سینوسی با تنش تماسی ۲۰ کیلوپاسکال و تنش انحرافی ۴۰۰ کیلوپاسکال با زمان بارگذاری ۰/۱ ثانیه و باربرداری ۰/۹ ثانیه به نمونه‌ها اعمال شد. این بارگذاری تا لحظه گسیختگی ادامه یافت و تغییرشکل تجمعی نمونه‌ها تحت این بارگذاری اندازه‌گیری شد. با ترسیم منحنی تغییرشکل تجمعی نمونه‌ها در مقابل سیکل‌های بارگذاری، نقطه عطف دوم منحنی به عنوان عدد جریان نمونه مشخص شد. شکل ۵ نشان‌دهنده دستگاه آزمایش چندکاره و دستگاه متراکم‌کننده چرخشی روسازی ممتاز مورد استفاده در این پژوهش برای ساخت و آزمایش نمونه‌ها می‌باشد.

نسبت قطر به ارتفاع، ۱ به ۱/۵ انتخاب گردید. برای آزمایش خزش دینامیک در درصد قیر بهینه مارشال، ۲۴ نمونه با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر با استفاده از دستگاه متراکم‌کننده چرخشی روسازی ممتاز ساخته شد. تعداد چرخش دستگاه برای رسیدن به وزن مخصوص توده‌ای متناظر با فضای خالی ۰/۴٪ متغیر در نظر گرفته شد و بار فشار قائم دستگاه ۶۰۰ کیلوپاسکال و زاویه چرخش ۱/۲۵ درجه انتخاب شد. آزمایش خزش دینامیک مطابق با روش مشروح در NCHRP 9-19 روی مخلوط‌ها در دمای ۴۰ °C انجام و عدد جریان برای هر کدام از نمونه‌ها محاسبه و با یکدیگر مقایسه شد. مطابق با این دستورالعمل، ابتدا بارگذاری به بزرگی ۱۰ کیلوپاسکال به مدت ۱۰ دقیقه به نمونه‌ها اعمال شد.



شکل ۵. دستگاه متراکم‌کننده چرخشی مورد استفاده برای ساخت نمونه‌ها (راست) و دستگاه آزمایش چندکاره مورد استفاده در آزمایش خزش (چپ)

مخلوط آسفالتی به عنوان ماده‌ای الاستیک در تحلیل و طراحی روسازی‌ها تعریف می‌گردد. از همین رو، مدول برجهنگی به عنوان نسبت تنش محوری انحرافی تکراری به کرنش برگشت‌پذیر محوری تعریف شده و از آن در تحلیل و طراحی روسازی‌ها استفاده می‌شود (هوانگ، ۱۹۹۳).

نمونه‌های مورد نیاز در این آزمایش (به تعداد ۴۸ نمونه) نیز با استفاده از دستگاه متراکم‌کننده چرخشی در درصد قیر بهینه مارشال و با ۰/۴٪ فضای خالی ساخته

۳-۲-۳. آزمایش مدول برجهنگی

مدول برجهنگی یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های لایه‌های روسازی می‌باشد که نقش اصلی را در عملکرد سازه‌ای روسازی در برابر بارگذاری دینامیک دارد. رفتار مخلوط‌های آسفالتی به دلیل وجود قیر در آنها به صورت ویسکوالاستیک می‌باشد. اما با توجه به وجود محدودیت در اندازه‌گیری ویژگی‌های ویسکوالاستیک مخلوط‌های آسفالتی و همچنین ماهیت دینامیک و تکراری بار ترافیک و برگشت‌پذیری بخش عمده تغییرشکل‌ها، معمولاً

^۱- Universal Testing Machine (UTM)

آسفالتی نیز بستگی کامل به میزان چسبندگی بین مصالح سنگی و قیر دارد که میزان این چسبندگی تأثیر مستقیمی روی مقاومت کششی مخلوطها می‌گذارد. از آنجایی که اندازه‌گیری مقاومت کششی مستقیم مخلوطهای آسفالتی از جهت ساخت نمونه و تجهیزات آزمایشگاهی با محدودیت‌هایی مواجه می‌باشد، معمولاً مقاومت کششی غیرمستقیم به عنوان معیاری مرسوم جهت ارزیابی این مشخصه از مخلوطهای آسفالتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این آزمایش، نمونه‌های استوانه‌ای ساخته شده توسط دستگاه متراکم‌کننده چرخشی، در دمای 20°C تحت بارگذاری با سرعت 50 میلی‌متر بر دقیقه در راستای شعاع خود قرار می‌گیرند. این بارگذاری تا لحظه ترک خوردگی و گسیختگی نمونه از صفحه تحت بارگذاری ادامه پیدا می‌کند. تنش ایجاد شده در صفحه‌ی تحت بارگذاری به صورت کششی بوده و عمود بر جهت اعمال بار می‌باشد و مقدار آن نیز با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌گردد.

$$ITS = \frac{2P_{max}}{\pi t d} \quad (2)$$

در این رابطه، P_{max} نیروی گسیختگی نمونه (kN)، t ضخامت نمونه (mm) و d قطر نمونه استوانه‌ای (mm) می‌باشد. در این پژوهش، به ازای هر مخلوط، حداقل سه نمونه به ابعاد نمونه‌های مارشال و فضای خالی 4% با استفاده از دستگاه متراکم‌کننده چرخشی تحت فشار 600 کیلو پاسکال و زاویه انحرافی $1/25$ درجه ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت و مقدار مقاومت آن‌ها به عنوان نتیجه آزمایش گزارش شد.

۳. نتایج و بحث

پس از انجام آزمایش‌ها روی هر یک از نمونه‌ها به روش‌های استاندارد مشروح، میانگین حاصل از حداقل سه نمونه برای هر مخلوط محاسبه شد. سپس نتایج مرتبط با هر کدام از آزمایش‌ها به صورت نمودارهای میله‌ای تهیه شد تا امکان تحلیل و ارزیابی آن‌ها وجود داشته باشد. در

شدند. این آزمایش برای هر مخلوط مطابق با استاندارد ASTM D4123 روی سه نمونه در دمای 25°C برای تحلیل خستگی و سه نمونه در دمای 40°C برای تحلیل شیارشدگی به شکل نیمه‌سینوسی انجام شد. مطابق با این استاندارد، پیش‌بارگذاری به تعداد 200 سیکل به هر نمونه اعمال شد و سپس تعداد 5 سیکل بارگذاری اصلی با زمان بارگذاری و استراحت به ترتیب برابر با $0/1$ و $0/9$ ثانیه به نمونه اعمال شد. این بارگذاری‌ها به صورت قطری به نمونه‌های استوانه‌ای اعمال می‌شود و تغییرشکل‌های نمونه در راستای عمود بر راستای اعمال بار با استفاده از ریزتغییرشکل‌سنج‌های خطی اندازه‌گیری می‌شود. بنابراین، با فرض ضریب پواسون $0/35$ برای مخلوطهای آسفالتی، مدول برجهنگی نمونه تحت آزمایش با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$M_r = \frac{P(\mu+0.27)}{t\delta_h} \quad (1)$$

در این رابطه، M_r مدول برجهنگی (MPa) نمونه‌ای به طول t (mm) و ضریب پواسون μ بوده که تحت حداکثر بار دینامیک P (N)، مقدار تغییرشکل افقی برگشت‌پذیر کلی δ_h (mm) را تجربه می‌کند. مقدار P در این پژوهش برای هر مخلوط متفاوت بوده و برابر با 15% مقاومت کششی مخلوط در شرایط دمایی و عمر مشابه انتخاب شد.

۴-۳. آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

ترک‌خوردگی به عنوان یکی از خرابی‌های روسازی، به انواع مختلفی تقسیم می‌شود (ترک‌های عرضی، طولی، پوست سوسماری، بلوکی و ترک‌خوردگی لبه). ترک‌خوردگی همچنین می‌تواند با گذشت زمان و در اثر وجود عوامل جوی، خرابی‌های شدیدتری را به دنبال داشته باشد (مانند به‌وجود آمدن چاله). مکانیسم اصلی انواع ترک‌خوردگی‌ها کششی بوده و بنابراین مقاومت روسازی در برابر آن‌ها کاملاً وابسته به مقاومت کششی مخلوطهای آسفالتی خواهد بود. از طرفی، عریان‌شدگی مخلوطهای

ادامه، به بحث و بررسی نتایج حاصل از هر آزمایش پرداخته می‌شود.

۳-۱. آزمایش مارشال

پس از ساخت نمونه‌های مارشال و اندازه‌گیری مقادیر فضای خالی، فضای خالی مصالح سنگی، فضای خالی پر شده با قیر، پایداری مارشال، روانی مارشال و وزن مخصوص توده‌ای، منحنی‌های مارشال ترسیم شد و با توجه به محدودیت‌های روش ناپا، درصد قیر بهینه مخلوط‌ها محاسبه گردید.

جدول ۵ نشان‌دهنده درصد قیر بهینه هر یک از مخلوط‌ها و ویژگی‌های مارشال آن‌ها در این درصد قیر می‌باشد. مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار سرباره در مخلوط‌های آسفالتی داغ و گرم، درصد قیر بهینه در این مخلوط‌ها افزایش می‌یابد که این افزایش به دلیل تخلخل بیشتر و در نتیجه جذب قیر بیشتر سرباره‌ها نسبت به مصالح سنگی آهکی می‌باشد. به دلیل بیشتر بودن گوشه‌داری و زاویه اصطکاک داخلی سرباره‌ها نسبت به مصالح سنگی آهکی، به‌کارگیری سرباره در مخلوط‌ها باعث افزایش استقامت آن‌ها تا ۲۶٪ در مخلوط H75 (نسبت به مخلوط

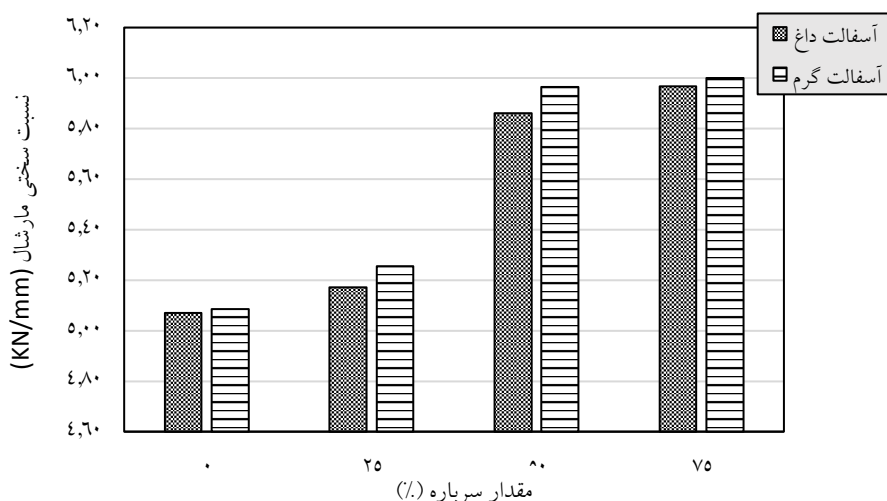
H0) شده است. علاوه بر افزایش استقامت مخلوط‌های حاوی سرباره، روانی این مخلوط‌ها نیز تا ۷٪ در مخلوط H75 (نسبت به مخلوط H0) افزایش یافته است. اما با محاسبه نسبت استقامت به روانی مشاهده می‌شود که این افزایش روانی، نسبت به افزایش استقامت از درصد کمتری برخوردار می‌باشد. این نسبت تجربی اصطلاحاً شاخص سختی مارشال نامیده می‌شود و بیشتر بودن آن نشان‌دهنده سختی بیشتر مخلوط است. نتایج آزمایش‌های مارشال به طور کلی نشان‌دهنده افزایش شاخص سختی با افزایش مقدار سرباره در مخلوط‌ها می‌باشد که این امر ناشی از همان جایگزینی مصالح سنگی با مصالحی با خواص سطحی و شکلی بهتر می‌باشد.

نحوه تغییرات استقامت، روانی و شاخص سختی مارشال مخلوط‌ها تحت تأثیر استفاده از ساسوبیت نیز به صورت مشابه می‌باشد. به این ترتیب که تحت تأثیر کریستاله شدن ساسوبیت در مخلوط‌های آسفالتی گرم، سختی قیر و در نتیجه سختی مخلوط افزایش یافته و متناسب با آن، شاخص سختی مارشال مخلوط‌ها بهبود یافته است (شکل ۶). این بهبود سختی، ناشی از افزایش بیشتر استقامت مارشال مخلوط‌ها نسبت به افزایش روانی آن‌ها می‌باشد.

جدول ۵. نتایج آزمایش‌های مارشال

مخلوط	قیر بهینه (%)	استقامت مارشال (KN)	روانی مارشال (mm)	وزن مخصوص توده‌ای (g/cm ³)	فضای خالی (%)	فضای خالی مصالح سنگی (%)	شاخص سختی مارشال (KN/mm)
H0	۴/۹	۱۴/۲	۲/۸	۲/۴۱۹	۴	۱۵/۲	۵/۰۷۱
H25	۵/۱۵	۱۵	۲/۹	۲/۴۳	۴	۱۵/۲	۵/۱۷۲
H50	۵/۴	۱۷	۲/۹	۲/۴۶۴	۴	۱۵/۶	۵/۸۶۲
H75	۵/۶	۱۷/۹	۳	۲/۵۰	۴	۱۶	۵/۹۶۷
W0	۴/۸۵	۱۵	۲/۹۵	۲/۴۳	۴	۱۴/۸	۵/۰۸۵

۵/۲۵۴	۱۵/۵	۴	۲/۴۴	۲/۹۵	۱۵/۵	۵/۱	W25
۵/۹۶۵	۱۶	۴	۲/۴۸	۲/۸۵	۱۷	۵/۴	W50
۶/۰۰	۱۶/۹	۴	۲/۵۵	۳	۱۸	۵/۷	W75

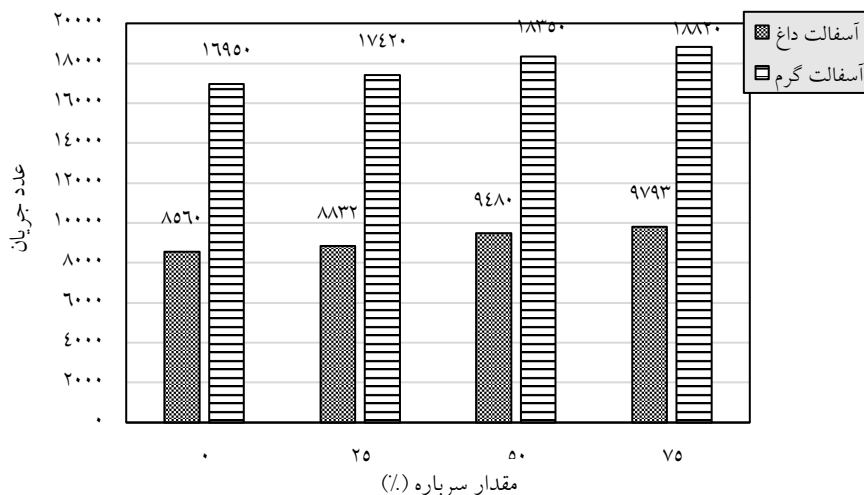


شکل ۶. نسبت سختی مارشال برای مخلوط های آسفالتی گرم و داغ

مشاهده می شود که به دلیل اصطکاک داخلی و قفل-وبست بیشتر سرباره ها نسبت به مصالح سنگی آهکی، استفاده از آن ها به عنوان جایگزین بخشی از مصالح سنگی باعث تأخیر در تغییر شکل های برشی شده است. البته این افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل های دائمی، نسبت به بهبود حاصل از افزودنی ساسوبیت بسیار کمتر بوده و حداکثر تا حدود ۱۴٪ رخ داده است (مخلوط H75 نسبت به HO). با توجه به تأثیر مثبت سرباره و ساسوبیت در نتایج آزمایش خزش، استفاده توأمان این دو ماده می-تواند مخلوطی با عملکرد بسیار مناسب در برابر تغییر شکل های دائمی به دنبال داشته باشد. از همین رو، با مقایسه عدد جریان بین مخلوط های W75 و HO مشاهده می شود که استفاده از ۳٪ افزودنی ساسوبیت در کنار جایگزینی ۷۵٪ مصالح سنگی درشت دانه با سرباره باعث افزایش عدد جریان تا ۱۲۰٪ شده است.

۳-۲. خزش دینامیک

در این پژوهش، عدد جریان به عنوان شاخص مقایسه نتایج آزمایش خزش دینامیک در نظر گرفته شد. به همین منظور، مقدار عدد جریان برای هر یک از نمونه ها در دمای ۴۰ °C محاسبه و میانگین سه نمونه برای هر مخلوط در شکل ۷ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می شود، استفاده از افزودنی ساسوبیت و جایگزینی مصالح سنگی با سرباره، هر دو باعث افزایش عدد جریان و در نتیجه به تأخیر افتادن تغییر شکل های برشی مخلوط-ها شده است. در این میان، استفاده از افزودنی ساسوبیت در مخلوط های آسفالتی، افزایش عدد جریان مخلوط ها را تا ۹۸٪ به دنبال داشته است (مخلوط W0 نسبت به HO). این افزایش قابل توجه عدد جریان در مخلوط ها، تحت تأثیر تشکیل ساختار کریستالی ساسوبیت در دمای کم و در نتیجه افزایش سختی مخلوط های آسفالتی می باشد.

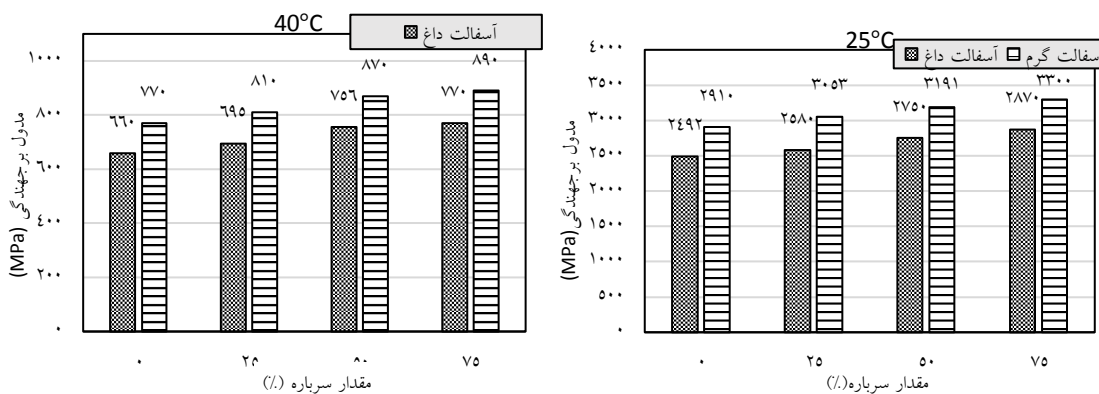


شکل ۷. عدد جریان برای مخلوط‌های آسفالتی گرم و داغ

تشکیل شده توسط افزودنی ساسویت می‌باشد. استفاده از سرباره به عنوان جایگزین مصالح سنگی درشت‌دانه نیز بهبود مدول برجهنگی مخلوط‌ها را به دنبال داشت. زبری و اصطکاک داخلی بیشتر سرباره‌ها نسبت به مصالح سنگی آهکی باعث قفل‌بست بهتر آن‌ها در مخلوط‌ها شده است. لذا، مخلوط تغییرشکل کمتری را تحت بارگذاری دینامیک متحمل شده و مدول برجهنگی بیشتری دارد.

۳-۳. مدول برجهنگی

شکل ۸ نشان‌دهنده مقادیر مدول برجهنگی مخلوط‌های مورد بررسی در این پژوهش می‌باشد. مشاهده می‌شود که استفاده از افزودنی ساسویت باعث بهبود مدول برجهنگی مخلوط‌ها تا ۱۸/۳ درصد (مخلوط W25 نسبت به H25) شده است. این بهبود مدول به دلیل افزایش سختی مخلوط‌ها تحت تأثیر ساختار بلوری



شکل ۸. مدول برجهنگی مخلوط‌های آسفالتی داغ و گرم در دماهای ۴۰ و ۲۵ درجه سلسیوس

کندروانی و سختی مخلوط‌ها، برگشت‌پذیری تغییرشکل-ها کمتر شده و تغییرشکل‌ها بیشتر به صورت پلاستیک رخ داده‌اند.

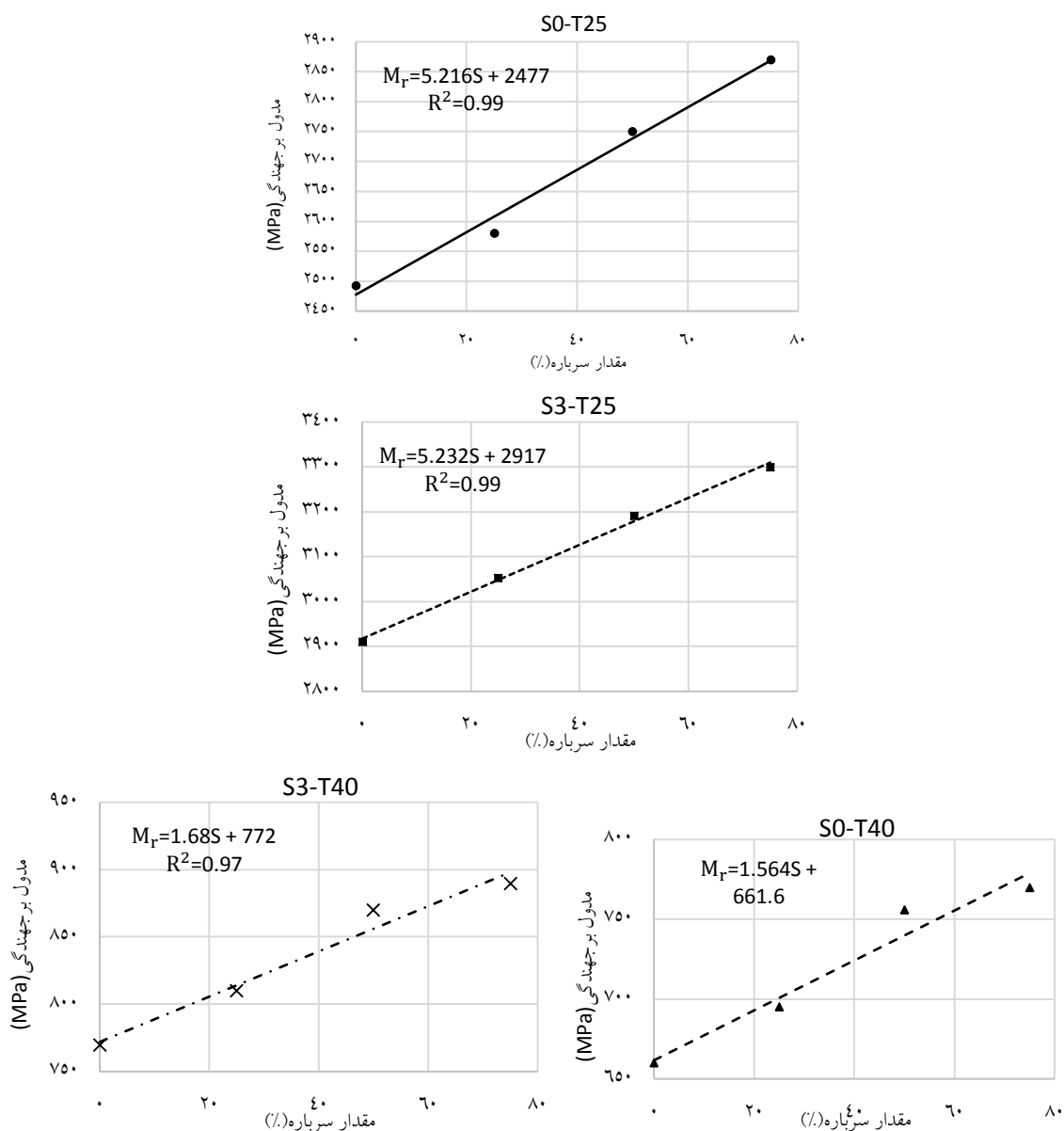
با توجه به اهمیت برآورد مدول برجهنگی مخلوط-های آسفالتی قبل از ساخت مخلوط‌ها به منظور طراحی

مشاهده می‌شود که افزایش دمای آزمایش نیز افت مدول برجهنگی مخلوط‌های آسفالتی داغ و گرم را به دنبال داشته است. به گونه‌ای که افزایش ۱۵ درجه‌ای دمای آزمایش باعث افت ۷۳ تا ۷۴ درصدی مدول برجهنگی مخلوط‌ها شده است. چرا که به دلیل کاهش

دماهای 25°C و 40°C به ترتیب به منظور تحلیل خستگی و شیارشدگی روسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند (مسعودی و همکاران، ۲۰۱۷).

با توجه به این مدل‌ها، مشاهده می‌شود که مدول برجهنگی مخلوط‌ها با افزایش مقدار سرباره تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابد و شیب این تغییرات با افزایش دما کاهش قابل توجهی پیدا می‌کند.

سازه روسازی، مدل‌های تخمین مدول برجهنگی بسیار مفید می‌باشند. به همین منظور، مدل‌های تخمین مدول برجهنگی مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی در این پژوهش در شکل ۹ ارائه شده‌اند. این مدل‌ها مدول برجهنگی مخلوط‌های آسفالتی داغ و گرم حاوی صفر تا ۷۵ درصد سرباره درشت‌دانه را در دو دمای 25°C و 40°C محاسبه می‌کنند. مقادیر مدول برجهنگی در



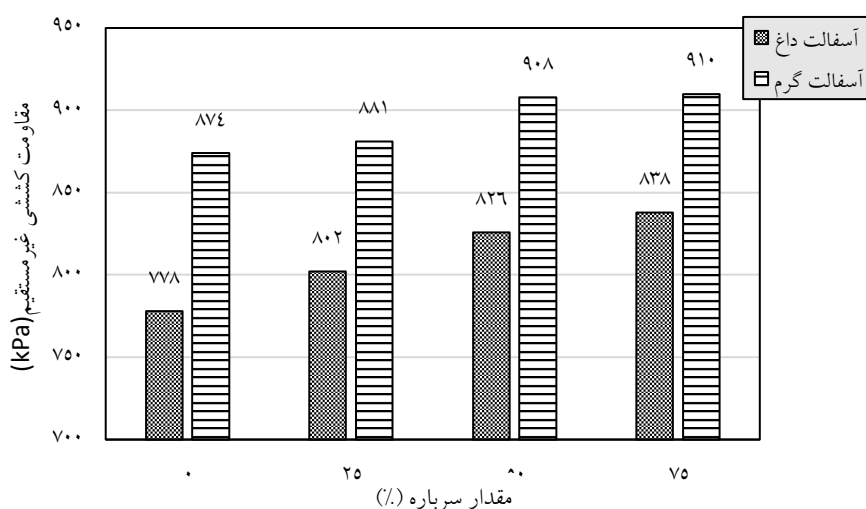
شکل ۹. مدل‌های تخمین مدول برجهنگی مخلوط‌های آسفالتی گرم و داغ در دماهای 25°C و 40°C

۴-۳. مقاومت کششی غیرمستقیم

با توجه به شکل ۱۰، که نشان‌دهنده نتایج آزمایش مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی داغ و گرم می‌باشد، مشاهده می‌شود که افزایش مقدار سرباره در مخلوط‌ها باعث بالا رفتن مقاومت کششی آن‌ها شده است (تا ۷/۷ درصد در مخلوط H75 نسبت به H0). این افزایش مقاومت به دلیل چسبندگی بیشتر بین مصالح سرباره و قیر در مقایسه با چسبندگی بین مصالح سنگی با قیر می‌باشد. از آنجایی که نسبت CaO/SiO_2 در مصالح سنگی آهکی بیشتر از مصالح سرباره می‌باشد، بنابراین افزایش چسبندگی میان قیر و سرباره نمی‌تواند ناشی از جنس سرباره‌ها باشد. عامل تأثیرگذار دیگری که می‌تواند باعث بهبود چسبندگی مصالح شده باشد، ویژگی‌های سطحی مصالح سرباره است. چرا که به دلیل تخلخل و زبری

بیشتر ذرات سرباره نسبت به مصالح سنگی آهکی، این مصالح سطح مخصوص بیشتری نسبت به مصالح سنگی آهکی دارد. در نتیجه، سطح تماس بیشتری داشته و قفل-وبست بیشتری بین قیر و سرباره به وجود می‌آید. افزایش درصد قیر بهینه مخلوط‌های حاوی سرباره نیز تأییدکننده این مسئله می‌باشد.

همچنین، مشابه با نتایج دیگر آزمایش‌ها، مشاهده می‌شود که تشکیل ساختار کریستالی در مخلوط‌ها به دلیل افزودن ۳٪ ساسوبیت به آن‌ها، افزایش مقاومت کششی را تا ۱۲/۳ درصد (در مخلوط W0 نسبت به H0) در پی داشته است. این افزایش مقاومت کششی در مخلوط‌های حاوی افزودنی ساسوبیت به دلیل افزایش چسبندگی میان مصالح سنگی (یا مصالح سرباره) با قیر حاوی ساسوبیت می‌باشد.



شکل ۱۰. مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های مورد بررسی

۵۰ و ۷۵ درصد صورت گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش به طور کلی نشان داد که استفاده از افزودنی ساسوبیت و جایگزینی مصالح سنگی با سرباره باعث افزایش سختی مخلوط‌ها شده و مقاومت آن‌ها را در برابر تغییرشکل‌های برشی افزایش می‌دهد. در ادامه، به نتایج و پیشنهادهای حاصل از این پژوهش پرداخته می‌شود.

۴. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، بخشی از مصالح سنگی مخلوط‌های آسفالتی داغ و WMA در حد بالای منحنی دانه‌بندی شماره ۴ با سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی فولاد مبارکه اصفهان جایگزین شد و خواص مکانیکی مخلوط‌های حاصل مورد ارزیابی قرار گرفت. این جایگزینی در قسمت درشت‌دانه مصالح سنگی و به مقدار صفر، ۲۵،

- نتایج آزمایش های مصالح سنگی نشان می دهد که سرباره خصوصیات لازم برای استفاده در لایه های روسازی را دارا بوده و در بسیاری از پارامترها مانند درصد شکستگی، سایش لس آنجلس، شاخص شکل، بافت سطحی و درصد فضای خالی متراکم نشده بهتر از مصالح سنگی آهکی می باشد. بنابراین، توصیه می شود که با هدف حفظ منابع طبیعی از این مصالح به عنوان جایگزین مصالح سنگی در لایه های روسازی استفاده شود.
- استفاده از ساسوبیت به عنوان افزودنی و جایگزینی مصالح سنگی درشت دانه با سرباره، هر دو باعث افزایش مقاومت کششی مخلوط های آسفالتی می شوند. بنابراین، می توان با استفاده از این مواد در مخلوط های آسفالتی داغ و گرم، مقاومت آن ها را در برابر انواع ترک خوردگی افزایش داد و از ایجاد خرابی های شدیدتر پیشگیری کرد.
- با توجه به افزایش عدد جریان در مخلوط های آسفالتی تحت تأثیر استفاده از افزودنی ساسوبیت و سرباره های درشت دانه، استفاده از این مواد می تواند به بهبود مقاومت این مخلوط ها در برابر تغییر شکل های دائمی کمک کند. این مسئله، مخصوصاً در مناطق گرمسیری که شیارشدگی به مراتب بیشتر اتفاق می افتد، می تواند بسیار مفید واقع گردد.
- افزایش مدول برجهنگی مخلوط های آسفالتی می تواند با تأثیر گذاشتن در طراحی سازه روسازی، باعث کاهش ضخامت نهایی رویه آسفالتی شده و صرفه جویی در هزینه های ساخت را به دنبال داشته باشد. بنابراین، استفاده از تکنولوژی آسفالت گرم علاوه بر کاهش دمای تولید آسفالت، با کاهش حجم آسفالت مصرفی، می تواند باعث صرفه جویی در مصرف انرژی و منابع طبیعی شود. این بهبود مدول برجهنگی با جایگزینی مصالح سنگی درشت دانه با سرباره نیز محقق می شود؛ اما مقدار آن کمتر می باشد.
- با توجه به عملکرد مناسب مخلوط های آسفالتی گرم، توصیه می شود با هدف کاهش آلودگی محیط زیست و مصرف کمتر انرژی در فرایند پخت مخلوط های آسفالتی، از تکنولوژی مخلوط های آسفالتی گرم برای تولید مخلوط های آسفالتی استفاده شود.
- با توجه به افزایش وزن مخصوص و قیر بهینه مخلوط های آسفالتی به دلیل استفاده از سرباره در آن ها، بایستی قبل از استفاده از این مواد به عنوان جایگزین مصالح سنگی، ارزیابی های اقتصادی لازم به منظور تحلیل هزینه- فایده انجام گیرد.

۵. مراجع

- Ahmedzade, P. and Sengoz, B. 2009. "Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete". *J. Hazard. Mater.*, 165(1): 300-305. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.09.105>
- Ameri, M., Hesami, S. and Goli, H. 2013. "Laboratory evaluation of warm mix asphalt mixtures containing electric arc furnace (EAF) steel slag". *Constr. Build. Mater.*, 49: 611-617. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.034>
- Arabani, M. and Azarhoosh, A. R. 2012. "The effect of recycled concrete aggregate and steel slag on the dynamic properties of asphalt mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 35: 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.036>
- Asi, I. M., Qasrawi, H. Y. and Shalabi, F. I. 2007. "Use of steel slag aggregate in asphalt concrete mixes". *Can. J. Civ. Eng.*, 34(8): 902-911. <https://doi.org/10.1139/107-025>
- Australian Asphalt Pavement Association. 2001. "Warm mix asphalt- A state of the art review". Advisory Note 17, Kew, Victoria, Australia.
- Emery, J. 1982. "Slag utilization in pavement construction". *In: Extending Aggregate Resources*, ASTM International.

- Gandhi, T. S. and Amirkhanian, S. N. 2007. "Laboratory investigation of warm asphalt binder properties—a preliminary analysis". The 5th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control (MAIREPAV5), Park City, Utah, USA.
- Goh, S. W. and You, Z. 2009. "A simple stepwise method to determine and evaluate the initiation of tertiary flow for asphalt mixtures under dynamic creep test". *Constr. Build. Mater.*, 23(11): 3398-3405. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.020>
- Hafeez, I. and Kamal, M. A. 2011. "Repeated load permanent deformation behavior of mixes with and without modified bitumens". *Mehran Univ. Res. J. Eng. Technol.*, 30(1) .
- Hesami, S., Ameri, M., Gooli, H. and Akbari, A. 2015. "Laboratory investigation of moisture susceptibility of warm-mix asphalt mixtures containing steel slag aggregates". *Int. J. Pavement Eng.*, 16(8): 745-759 .
- Hirsch, V. 2007. "Warm mix asphalt technologies". BAST, Germany, Presentation to WMA Scan Team .
- Huang, Y. H. 1993. "Pavement analysis and design". Second Edition, Pearson.
- Hunt, L. and Boyle, G. E. 2000. "Steel slag in hot mix asphalt concrete". Final Report, State Research Project #511, Oregon Department of Transportation, Salem, Oregon.
- Hurley, G. C. and Prowell, B. D. 2005. "Evaluation of Sasobit for use in warm mix asphalt". NCAT Report, 5(6): 1-27 .
- Hurley, G. C. and Prowell, B. D. 2006. "Evaluation of potential processes for use in warm mix asphalt". *J. Assoc. Asphalt Paving Technol.*, 75: 41-90 .
- Jamshidi, A., Hamzah, M. O. and You, Z. 2013. "Performance of warm mix asphalt containing Sasobit®: State-of-the-art". *Constr. Build. Mater.*, 38: 530-553. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.015>
- Kavussi, A. and Modarres, A. 2010. "A model for resilient modulus determination of recycled mixes with bitumen emulsion and cement from ITS testing results". *Constr. Build. Mater.*, 24(11): 2252-2259. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.031>
- Kim, K., Haeng Jo, S., Kim, N. and Kim, H. 2018. "Characteristics of hot mix asphalt containing steel slag aggregate according to temperature and void percentage". *Constr. Build. Mater.*, 188: 1128-1136. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.172>
- Masoudi, S., Abtahi, S. M. and Goli, A. 2017. "Evaluation of electric arc furnace steel slag coarse aggregate in warm mix asphalt subjected to long-term aging". *Constr. Build. Mater.*, 135: 260-266. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.177>
- Niazi, Y. and Jalili, M. 2009. "Effect of Portland cement and lime additives on properties of cold in-place recycled mixtures with asphalt emulsion". *Constr. Build. Mater.*, 23(3): 1338-1343. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.07.020>
- Noureldin, A. S. and McDaniel, R. S. 1990. "Evaluation of surface mixtures of steel slag and asphalt". *Transport. Res. Record*, 1269.
- Oluwasola, E. A., Hainin, M. R. and Aziz, M. M. A. 2015. "Evaluation of asphalt mixtures incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailings for road construction". *Transport. Geotech.*, 2: 47-55. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2014.09.004>
- Pasetto, M. and Baldo, N. 2011. "Mix design and performance analysis of asphalt concretes with electric arc furnace slag". *Constr. Build. Mater.*, 25(8): 3458-3468. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.037>
- Rubio, M. C., Martínez, G., Baena, L. and Moreno, F. 2012. "Warm mix asphalt: An overview". *J. Clean. Prod.*, 24: 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.11.053>
- Skaf, M., Manso, J. M., Aragón, Á., Fuente-Alonso, J. A. and Ortega-López, V. 2017. EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use. *Resour., Conserv. Recy.*, 120: 176-185. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.12.009>
- Sorlini, S., Sanzeni, A. and Rondi, L. 2012. "Reuse of steel slag in bituminous paving mixtures". *J. Hazard. Mater.*, 209-210: 84-91. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.12.066>
- Thomas, C., Rosales, J., Polanco, J. A. and Agrela, F. 2019. "7-steel slags". PP. 169-190. *In: De Brito, J. and Agrela, F. (Eds.), New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete*, Woodhead Publishing.
- Wax, S. 2013. Website: http://www.sasolwax.com/Sasobit_Technology.html. Accessed: October .
- Witczak, M. W. 2007. "Specification criteria for simple performance tests for rutting". Transportation Research Board.

- You, Z. and Goh, S. W. 2008. "Laboratory evaluation of warm mix asphalt: A preliminary study". *Int. J. Pavement Res. Technol.*, 1(1): 34-40.
- Ziaee, S. A., Kavussi, A., Jalili Qazizadeh, M. and Mohammadzadeh Moghadam, A. 2015. "Evaluation of long term ageing of asphalt mixtures containing EAF and BOF steel slags". *Int. J. Transport. Eng.*, 2(3): 245-265. doi:10.22119/ijte.2015.9608