

بررسی درصدهای مختلف تراشه آسفالت در عملکرد حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای SMA گرم با استفاده از سیستم استنتاج عصبی - فازی سازگار (ANFIS)

نریمان برازی جمور، مربی، بخش فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران
محمودرضا کی‌منش*، استادیار، بخش فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران
منصور فخری، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

Email: mrkeymanesh@pnu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۲۸ - پذیرش: ۱۳۹۷/۰۷/۱۲

چکیده

در سال‌های اخیر، با توجه به کمبود مصالح تازه و اهمیت حفاظت از محیط‌زیست، میزان استفاده از مصالح بازیافتی، از جمله تراشه آسفالت، در راستای کاهش تولید آلاینده‌های ناشی از تهیه مخلوط‌های آسفالتی افزایش یافته است. همچنین، جهت کاهش میزان انرژی مصرفی، فناوری‌های نوینی در زمینه تولید و اجرای مخلوط‌های آسفالتی گرم در حال گسترش هستند تا مخلوط‌های آسفالتی با دمایی به مراتب کمتر از مخلوط‌های متداول تولید گردند. در این پژوهش، از تراشه آسفالت بازیافتی در ساخت مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای (SMA) جهت انجام آزمایش حساسیت رطوبتی همراه با افزودنی‌های گرم زیکوترم و ساسوبیت و همچنین از الیاف TOPCEL در جهت جلوگیری از ریزش قیر این نوع مخلوط آسفالتی، استفاده شده است. هدف از انجام این پژوهش، ارائه یک مدل بر پایه سیستم استنتاج عصبی - فازی سازگار (ANFIS)، برای پیش‌بینی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی با دانه‌بندی سنگدانه‌ای (SMA) حاوی درصدهای مختلف تراشه آسفالت با داشتن افزودنی‌های مختلف گرم می‌باشد. پارامترهای ورودی به مدل ANFIS شامل درصدهای مختلف تراشه آسفالت حاوی افزودنی گرم و نسبت مقاومت کششی نمونه در حالت اشباع به مقاومت کششی نمونه در حالت خشک به عنوان خروجی مدل می‌باشد. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده دقت بالای مدل با ضرایب تعیین ۱ و ۰/۹۸۲ به ترتیب برای مجموعه داده‌های آموزش و آزمایشی و ۰/۷۷۴ برای داده‌های ارزیابی می‌باشد. همچنین، مخلوط‌های نیمه گرم حاوی ۵۰٪ تراشه آسفالت رفتار مناسب‌تری از خود نشان دادند.

واژه‌های کلیدی: تراشه آسفالت، حساسیت رطوبتی، الیاف TOPCEL، سیستم استنتاج عصبی - فازی

۱. مقدمه

افزایش قابل توجه حجم ترافیک و بار محوری و عدم به‌کارگیری روش‌های مناسب اجرا و نگهداری روسازی، منجر به ایجاد خرابی‌های زودرس و فرسودگی سریع روسازی راه‌های کشور شده است. مرمت و بهسازی این دسته از راه‌ها، افزایش قابل توجه مصرف مصالح سنگی و قیر و تولید حجم گسترده مصالح تراشه آسفالت ناشی از تراش روسازی‌های فرسوده را در پی داشته است. از طرف دیگر، با افزایش قیمت نفت و مشتقات آن، مانند قیر، و محدودیت منابع و مصالح سنگی مرغوب، لزوم توسعه و نگهداری شبکه راه‌ها به کمک روش‌های نوین و نیز حل معضلات زیست‌محیطی ناشی از تولید مصالح فرسوده، موجب شده است تا بهره‌برداری مجدد از مصالح موجود جزو مباحث مهم در صنعت روسازی قرار گیرد.

نکته حائز اهمیت در هنگام استفاده از درصدهای مختلف تراشه آسفالت در مخلوط‌های آسفالتی گرم، مقدار و نوع قیر موجود در تراشه آسفالت و همچنین خصوصیات مصالح سنگی آن می‌باشد. زیرا قیر موجود در تراشه آسفالت، در مدت اجرا و همچنین مدت خدمت‌دهی، به دلیل واکنش با اکسیژن هوا به تدریج فرسوده و سخت (پیر) می‌گردد. به همین دلیل، ممکن است مصالح سنگی تراشه آسفالت از لحاظ دانه‌بندی و یا از لحاظ خصوصیات فیزیکی آن، در مدت خدمت‌دهی دچار تغییراتی گردند. لذا، مقدار تراشه آسفالت مورد استفاده در مخلوط‌های آسفالتی در فرایند بازیافت باید کنترل گردد تا علاوه بر تأمین دانه‌بندی هدف (طرح مورد نظر)، هم از لحاظ قیر ترکیبی (قیر مصالح خرده آسفالت و قیر جدید) و هم از لحاظ استحکام مشابه مخلوط‌های آسفالتی متداول باشند. با توجه به مطالبی که گفته شد، هنوز استفاده از تراشه

آسفالت، در تهیه مخلوط‌های آسفالتی همچنان محدود است و مهم‌ترین نگرانی در افزایش درصد تراشه در مخلوط، سختی بالای قیر آن در نتیجه پیرشدگی در طول سال‌های سرویس‌دهی است که این سختی، کارایی مخلوط را به شدت کاهش می‌دهد (بهبهانی و همکاران، ۱۳۹۵).

بر اساس دمای تولید، مخلوط‌های آسفالتی را می‌توان به چند دسته طبقه‌بندی نمود. معمولاً محدوده‌ی دمای تولید مخلوط آسفالتی گرم، اندکی بیشتر از ۱۰۰ درجه سلسیوس یا ۲۰ تا ۴۰ درجه سلسیوس کمتر از مخلوط آسفالتی داغ می‌باشد. مخلوط‌های آسفالت نسبتاً گرم دارای دمای تولید کمتری نسبت به مخلوط‌های آسفالت گرم می‌باشند. این نوع مخلوط‌ها دارای دمای تولید ۳۵ تا ۱۰۰ درجه سلسیوس بوده و دمای تولید کمتر، مختص مخلوط‌های سرد می‌باشد (FHWA, ۲۰۰۸). نظر به اینکه تکنولوژی آسفالت گرم نسبتاً جدید و نو می‌باشد، از این رو، مطالعات نسبتاً محدودی به ارزیابی تأثیر افزودنی‌های گرم از جمله ساسویت، رئوفالت و افزودنی نانوماده زایکوترم در بهبود کارایی مخلوط آسفالتی داغ^۲ با درصدهای زیاد تراشه پرداخته است. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از ساسویت کارایی مخلوط را افزایش می‌دهد. ولی مقاومت مخلوط را در برابر حساسیت رطوبتی کاهش می‌دهد (صفازاده و طباطبایی، ۱۳۹۴). همچنین، بایستی تأثیر سایر افزودنی‌های گرم را بر کارایی و مقاومت مخلوط در برابر خرابی‌های رطوبتی ارزیابی نمود که جهت تحقق این اهداف بایستی مخلوط‌های آسفالتی جدیدی با این تکنولوژی ساخته شوند که بتوان روی آنها عملکرد رفتاری آسفالت حاوی درصدهای مختلف تراشه آسفالت حاوی این نوع افزودنی‌ها را مطالعه نمود. این موضوع از این نظر حائز اهمیت است که تحقیقات انجام شده روی آسفالت گرم نشان می‌دهد که این نوع مخلوط

^۲- Hot mix asphalt

^۱- Warm mix asphalt

اولین روسازی حاوی تراشه آسفالتی، در اوایل دهه ۱۹۷۰ در ایالت نوادا ساخته شد. در مدت زمان کوتاهی، استفاده از آن مورد قبول بسیاری از ایالت‌های دیگر آمریکا نیز قرار گرفت. حدود ۸۰٪ از تراشه آسفالت تولید شده در هر سال برای اجرای شانه جاده، اساس راه و ساخت روسازی‌های جدید استفاده می‌شود (کاپلند، ۲۰۱۱). مطابق آمار، بسیاری از ایالت‌ها اجازه استفاده از حداکثر ۳۰٪ تراشه آسفالت در مخلوط لایه رویه آسفالتی را می‌دهند. با این وجود، در مجموع، در حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد از تراشه‌های موجود در مخلوط رویه استفاده می‌شود. محدودیت‌های ایالت‌ها تنها بخشی از مشکلات موجود در ارتباط با استفاده از درصد‌های زیاد تراشه است. مشکل دیگر، پیمانکارها هستند که عمدتاً مشتاق به استفاده از درصد‌های زیاد نیستند. مطالعات انجام شده توسط کاپلند (۲۰۱۱) نشان می‌دهد که محدودیت‌های اعمال شده توسط ایالت‌های مختلف آمریکا منجر به عدم قطعیت، در خصوص تعیین کیفیت منابع تراشه آسفالت، نامعلوم بودن رده قیر و میزان امتزاج بین قیر تازه و قیر تراشه می‌گردد که این مشکلات ممکن است منجر به تغییراتی در طراحی مخلوط حاوی درصد‌های زیاد تراشه، کنترل خصوصیات حجمی مورد نیاز این مخلوط‌ها و در دسترس نبودن اطلاعات مربوط به عملکرد بلندمدت این مخلوط‌ها می‌گردد. همچنین، معیارهای ایالت‌های مختلف در خصوص انتخاب درصد مصرف تراشه آسفالت و همچنین لزوم کنترل کیفیت بیش از اندازه مخلوط به دست آمده، عواملی هستند که مانع استفاده از درصد‌های زیاد تراشه آسفالت توسط پیمانکاران می‌گردد.

در تحقیق انجام شده توسط فخری و حسینی (۲۰۱۷)، نتایج مثبتی مبنی بر افزایش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های گرم حاوی ساسوبیت و درصد زیاد تراشه آسفالت گزارش شده است. همچنین، مگااور و همکاران

از نظر عملکرد دارای نتایج خوبی در مقایسه با نمونه‌های آسفالتی داغ می‌باشد. همچنین، با افزایش روزافزون بارهای ترافیکی و میل به حمل بار بیشتر و در نتیجه ازدیاد بار وارده بر رویه آسفالتی، ضرورت طرح و اجرای لایه‌های آسفالتی مقاوم‌تر در برابر خرابی‌های مختلف (از جمله پدیده خستگی و شیارشدگی) به عنوان پدیده‌های رایج در خرابی لایه آسفالتی قابل تأمل است که همان طرح مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگ-دانه‌ای^۱ می‌باشد. آنچه در این میان هنوز به درستی مشخص نشده است بررسی نتایج خصوصیات عملکرد آزمایشگاهی و درازمدت این نوع مخلوط آسفالتی حاوی تراشه آسفالت مانند خستگی، شیارشدگی و حساسیت رطوبتی است. لذا، در این پژوهش، به تأثیر درصد‌های مختلف تراشه آسفالت در عملکرد آزمایشگاهی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگ‌دانه‌ای حاوی افزودنی گرم ساسوبیت و زایکوترم پرداخته شده که تأثیر همزمان افزودنی گرم با درصد‌های مختلف تراشه آسفالت بررسی گردد.

با توجه به اینکه روسازی‌های موجود در ایران اکثراً انعطاف‌پذیر می‌باشند، می‌توان از حساسیت رطوبتی به عنوان یکی از مهمترین خرابی‌های متداول و تأثیرگذار بر عملکرد، خدمت‌دهی و ایمنی در این نوع روسازی، بخصوص مخلوط‌های گرم، نام برد. از متعارف‌ترین آزمایش‌های ارزیابی حساسیت رطوبتی می‌توان به آزمایش AASHTO T283 اشاره نمود. بسیاری از محققان با توجه به تطابق بهتر نتایج آزمایش چرخ محرک با نتایج میدانی، نسبت به آزمایش AASHTO T283 معتقد می‌باشند (دویل و هوارد، ۲۰۱۳؛ آشنبرنر و کریر، ۱۹۹۷؛ بناکیست، ۲۰۱۱).

۲. تاریخچه و مروری بر ادبیات فنی

^۱ - Stone matrix asphalt

بررسی درصد‌های مختلف تراشه آسفالت در عملکرد حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای SMA گرم با استفاده از سیستم استنتاج عصبی-فازی سازگار (ANFIS)

ارزیابی قرار گرفته است. در این راستا، مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها روی نمونه‌های پیرشده و پیرنشده مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان‌دهنده این است که TSR نمونه‌های WMA با اضافه شدن درصد تراشه آسفالت تا ۲۵٪، بیشتر از ۸۰٪ و نمونه‌های ۵۰ و ۷۰ درصد تراشه آسفالت کمتر از ۷۰٪ می‌باشد.

در تحقیق انجام شده توسط ژائو و همکاران (۲۰۱۳) روی نمونه‌های WMA و HMA در لایه‌های اساس و رویه، عدم حساسیت رطوبتی نمونه‌های WMA حاوی درصد زیاد تراشه آسفالت گزارش شده است.

تناقض‌هایی در نتایج تحقیقات گذشته، درباره تأثیر تراشه آسفالت بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی دیده شده است. نتایج تحقیق آزمایشگاهی انجام شده توسط گو و همکاران (۲۰۱۴)، به منظور ارزیابی عملکرد حساسیت رطوبتی روی نمونه‌های پیرنشده و پیرشده، حاکی از مقاومت بهتر نمونه‌های WMA بدون تراشه آسفالت در برابر رطوبت در مقایسه با نمونه‌های دارای تراشه آسفالت می‌باشد. همچنین، در این تحقیق، افزایش مقاومت رطوبتی نمونه‌ها با اعمال پیرشدگی کوتاه‌مدت و کاهش مقاومت رطوبتی نمونه‌ها با اعمال پیرشدگی بلندمدت نتیجه‌گیری شده است.

از دیگر نتایج کاهش مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی نمونه‌های گرم با افزایش درصد تراشه آسفالت می‌توان به نتایج ارائه شده در تحقیق ما و همکاران (۲۰۱۵) اشاره نمود. در این تحقیق، کاهش مقدار TSR با افزایش درصد تراشه آسفالت در مخلوط گزارش شده است. همچنین، در تحقیق آزمایشگاهی، توسط هیل و همکاران (۲۰۱۲)، کاهش حساسیت رطوبتی این مخلوط آسفالتی با استفاده از درصد‌های مختلف تراشه آسفالت در مخلوط‌های WMA نتیجه‌گیری شده است.

همچنین، در کار تحقیقاتی انجام شده توسط مقدس‌نژاد و همکاران (۲۰۱۴)، کاهش مقاومت در برابر

(۲۰۱۱) در تحقیق خود، با استفاده از آزمایش‌های مدول دینامیک و ویل تراک روی نمونه‌های حاوی RAP و RAS، افزایش سختی مخلوط و بهبود حساسیت رطوبتی نمونه‌های ساخته شده را نتیجه‌گیری کرده‌اند. در پژوهش انجام شده توسط ایازی و همکاران (۲۰۱۷) روی نمونه‌های حاوی ساسوبیت و زایکوترم، افزایش مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، با افزایش درصد تراشه آسفالت نتیجه‌گیری شده است. در تحقیق آزمایشگاهی انجام شده توسط شو و همکاران (۲۰۱۲)، با هدف ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط WMA و HMA حاوی درصد‌های زیاد تراشه آسفالت، افزایش مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها با افزایش درصد تراشه آسفالت نشان داده شده است. در تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده توسط دوئل و همکاران (۲۰۱۱) روی مخلوط‌های WMA حاوی تراشه آسفالت، افزایش مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های گرم حاوی تراشه آسفالت با افزایش درصد تراشه آسفالت نتیجه‌گیری شده است.

در تحقیق آزمایشگاهی انجام شده توسط شیائو و امیرخانیان (۲۰۰۹)، با هدف ارزیابی عملکرد حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی خرده لاستیک و تراشه آسفالت، بهبود قابل توجه مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی نمونه‌ها، در ازای افزایش درصد تراشه آسفالت به‌دست آمده است. بر اساس تحقیقات آزمایشگاهی و میدانی انجام شده توسط وو و همکاران (۲۰۱۱) روی نمونه‌های WMA و HMA حاوی درصد‌های مختلف تراشه آسفالت، در مقایسه با نتایج نمونه‌های کنترلی بدون تراشه آسفالت، تأثیر مثبت بر حساسیت رطوبتی نمونه‌های WMA با افزایش درصد‌های مختلف تراشه آسفالت نتیجه‌گیری شده است. در تحقیق انجام شده توسط لو و صالح (۲۰۱۶)، عملکرد مخلوط‌های WMA حاوی درصد‌های مختلف صفر تا ۷۰٪ تراشه آسفالت با نمونه شاهد HMA مورد

اسمی ۱۹ میلی‌متر و یک نوع قیر خالص ۷۰-۶۰ و یک منبع ذخیره تراشه آسفالت در شش سطح افزایش (صفر، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد) در نمونه‌های ساخته‌شده SMA داغ و SMA گرم دارای درصدهای مختلف تراشه آسفالت با نمونه‌های شاهد از لحاظ میزان مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی مصابق استاندارد آزمایش AASHTO T283 استفاده شده است.

۳-۱. مصالح سنگی

در این پژوهش، مصالح مصرفی درشت‌دانه و ریزدانه از جنس آهکی می‌باشند و از کارگاهی واقع در یکی از بزرگراه‌های شهر اصفهان تهیه شده است. همچنین، لازم به ذکر است که فیلر مصرفی آهک می‌باشد. مشخصات مهندسی مصالح مصرفی در این تحقیق در جداول ۱ و ۲ و همچنین مشخصات دانه‌بندی در شکل ۱ آمده است.

حساسیت رطوبتی مخلوط‌های WMA با افزایش درصد تراشه آسفالت نتیجه‌گیری شده است. هرچند در این تحقیق، با افزایش درصد تراشه آسفالت تا ۵۰٪ مقدار TSR در حد استاندارد باقی مانده است.

۳. مواد و روش‌ها

اولین گام در طراحی مخلوط آسفالتی با دانه‌بندی سنگدانه‌ای، انتخاب مصالح مورد نیاز آن می‌باشد بنابراین، مصالح مصرفی و دیگر مواد بایستی حداقل مقادیر مجاز آیین‌نامه‌ها را کفایت نماید. در این پژوهش، از راهنمای NCHRP Report 425- Project 8-9 همزمان با نشریه ۲۰۶ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، که همان آیین‌نامه طراحی مخلوط‌های با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای در ایران است، استفاده شده است. همچنین، در این پژوهش، از یک نوع دانه‌بندی با حداکثر اندازه

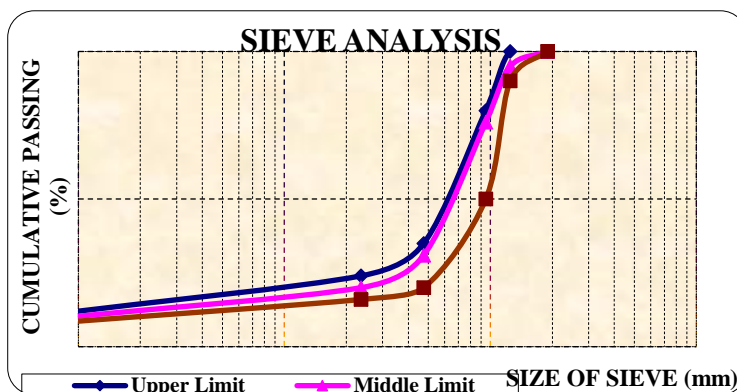
جدول ۱. مشخصات مهندسی مصالح مصرفی در این پژوهش

نتایج			استاندارد روش انجام آزمایش	نوع آزمایش
فیلر (کوچکتر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر)	ریزدانه (کوچکتر از ۲/۳۶ میلی‌متر)	درشت‌دانه (بزرگتر از ۲/۳۶ میلی‌متر)		
-	۶۶	-	(AASHTO-T 176)	ارزش ماسه‌ای
-	-	۲۵	(AASHTO-T96)	درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لوس آنجلس
N.P	N.P	-	(AASHTO-T89,90)	دامنه خمیری PI
-	-	-		حد خمیری PL
غیر قابل تعیین	غیر قابل تعیین	-		حد روانی LL
-	-	۱۰۰	(ASTM-D5821)	درصد شکستگی مصالح سنگی روی الک شماره ۴ در یک جبهه
-	-	۱۰۰		درصد شکستگی مصالح سنگی روی الک شماره ۴ در دو جبهه
-	-	بیش از ۹۵	(ASTM D3625)	درصد اندود قیر به مصالح سنگی
-	-	۳۳	(BS-812)	درصد تطویل
-	-	۲۴		درصد تورق
-	۴۶	-	ASTM C 1252	گوشه‌داری

بررسی درصد‌های مختلف تراشه آسفالت در عملکرد حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌های SMA گرم با استفاده از سیستم استنتاج عصبی-فازی سازگار (ANFIS)

جدول ۲. مشخصات وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی آسفالت SMA

درصد جذب آب	وزن مخصوص		مشخصه
	حقیقی	ظاهری	
۰/۸	۲/۶۴۷	۲/۷۰۲	مصالح سنگی مانده روی الک شماره ۸
۱/۳	۲/۶۲۹	۲/۷۲۱	مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۸ و مانده روی الک شماره ۲۰۰
-	۲/۷۳۰		مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۲۰۰
۱۶۴۰			وزن واحد حجم متراکم میله خورده مصالح سنگی درشت دانه (مانده روی الک نمرة ۸) در حالت خشک (kg/m^3)
۲/۶۵۳			وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی (G_{sb})



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی مصالح مصرفی با حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلی‌متر

۲-۳. قیر مصرفی

قیر مصرفی در این پژوهش، قیر خالص ۶۰-۷۰ است که از شرکت پالایش نفت جی اصفهان تهیه شده است. مشخصات فیزیکی قیر مصرفی در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳. مشخصات فیزیکی قیر مصرفی

مشخصات استاندارد قیرهای خالص AC 60-70	نتایج	روش آزمایش		آزمایش‌های قیرهای خالص	
		AASHTO	ASTM		
حداقل	حداکثر				
-	-	۱/۰۱۱	T228	D70	وزن مخصوص در 25°C
۶۰	۷۰	۶۴	T49	D5	درجه نفوذ، (دهم میلی‌متر) در 25°C
۱۰۰	-	+۱۵۰	T53	D36	مقدار کشش در 25°C (سانتی‌متر)
۴۹	۵۶	۵۱/۲	T51	D113	نقطه نرمی (گوی -حلقه) بر حسب سلسیوس
۹۹	-	۹۹/۸۸	T44	D2042	حلالیت در تترا کلرید کربن
۲۳۲	-	۳۱۲	T48	D92	درجه اشتعال (روپاز-کلولند) بر حسب سلسیوس
-	-	۷۴۰	T201	D2170	کندروانی کینماتیک در 120°C (سانتی استوکس)
-	-	۳۲۸			کندروانی کینماتیک در 135°C (سانتی استوکس)

-	-	۱۶۴			کندروانی کینماتیک در 160°C (سانتی استوکس)
-	۰/۸	-	T179	D1754	افت وزنی در اثر حرارت، در دمای 163°C (درصد)
۵۴	-	-	-	-	نسبت درصد درجه نفوذ بعد از آزمایش به درجه نفوذ اولیه
۵۰	-	-	-	-	مقدار کشش قیر بعد از آزمایش در 25°C
		-۰/۳			حساسیت حرارتی قیر (PI) (بر حسب درجه نفوذ در دمای 25°C و نقطه نرمی قیر)
		-۰/۹۹	-	-	PVN(25-135) - (برحسب درجه نفوذ در دمای 25°C و غلظت بر حسب سانتی استوکس در 135°C)
					PVN(25-60) - (برحسب درجه نفوذ در دمای 25°C و غلظت بر حسب پواز در 60°C)

۳-۳. فیبر مصرفی

در این پژوهش، برای جلوگیری از ریزش قیر نمونه‌های ساخته شده با مخلوط با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای SMA از دو نوع الیاف TOPCEL و TOPCEL ADD استفاده گردید. این الیاف ساخته شده توسط شرکت CFF آلمان توسط نمایندگی آن شرکت به نام دانش‌آوران فاتح در ایران تهیه گردید (شکل ۲).

الیاف سلولزی TOPCEL پلت شده مرغوب با پوشش وکس برای تثبیت قیر و افزایش عمر مخلوط آسفالت با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای SMA بر اساس

پیشنهاد کشور سازنده با ۳ مصرفی کیلوگرم در هر تن مخلوط آسفالتی داغ که به صورت دستی به میکسر اضافه گردید. همچنین، الیاف سلولزی TOPCEL FT-75 ADD پلت شده مرغوب با پوشش ۲۵٪ وزنی نمونه با ساسوبیت و مابقی ۷۵٪ وزنی به صورت سلولز، برای تثبیت قیر و افزایش عمر مخلوط آسفالت استخوان‌بندی سنگدانه‌ای SMA بر اساس پیشنهاد کشور سازنده با ۳ مصرفی کیلوگرم در هر تن مخلوط آسفالتی گرم که به صورت دستی به میکسر اضافه گردید. مشخصات این نوع الیاف در جدول ۴ آمده است.



شکل ۲. انواع فیبر TOPCEL

جدول ۴. مشخصات الیاف سلولزی TOPCEL

مقدار	مشخصات
۳±۹۵	میزان درصد سلولز
۸۰	میزان درصد فیبر
۴۲۰-۴۸۰ گرم بر لیتر	چگالی
۶/۸-۵/۵	pH
۱۱۰۰ میکرومتر	طول فیبر
۱۵	درصد خاکستر
کمتر از ۶	درصد رطوبت

بررسی درصد‌های مختلف تراشه آسفالت در عملکرد حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای SMA گرم با استفاده از سیستم استنتاج عصبی-فازی سازگار (ANFIS)

۳-۳. قیر تراشه آسفالت

که جنس مصالح سنگی تراشه آسفالت از نوع سیلیسی می‌باشد. همچنین، مشخصات قیر بازیافتی و میزان درصد آن که از آزمایش اکسترکشن به‌دست آمده در جدول ۵ آمده است.

تراشه آسفالت مصرفی در این پژوهش، از یکی از بزرگراه‌های شهر تهران تهیه شده است. لازم به‌ذکر است

جدول ۵. مشخصات قیر تراشه آسفالت

مقادیر به‌دست آمده	استاندارد آزمایش	مشخصات قیر
۹/۸	ASTM D5	درجه نفوذ (دهم میلی‌متر) در ۲۵ °C
۷۸/۵	ASTM D36	نقطه نرمی (گوی -حلقه) بر حسب سلسیوس
۴/۸	ASTM D2172	درصد قیر

طولانی در انبار ذخیره کرد. بر اساس مطالعات گذشته، مقدار درصد افزودنی ساسوبیت در تهیه مخلوط‌های آسفالتی گرم بین ۱ تا ۳ درصد وزنی قیر می‌باشد که در این پژوهش ۱/۵ درصد انتخاب شده است (میدلتون و فورفیلو، ۲۰۰۹؛ مگاور و همکاران، ۲۰۱۱). شکل ۳ نمونه‌ای از افزودنی گرم ساسوبیت را نشان می‌دهد.



شکل ۳. ساسوبیت استفاده شده در این پژوهش

۳-۵. افزودنی‌های گرم

در این پژوهش، جهت ساخت نمونه‌های گرم، از دو نوع محصول افزودنی گرم شامل ساسوبیت و نانوماده زایکوترم استفاده شده است. علت انتخاب این دو نوع افزودنی، بر اساس تحقیقات گذشته و همچنین ایجاد نوآوری در نتایج میزان حساسیت رطوبتی مخلوط‌های مختلف ساخته شده، زمانی که از این دو نوع افزودنی گرم و درصد‌های مختلف تراشه آسفالت به‌صورت همزمان استفاده شود، است.

۱-۳-۵. ساسوبیت

ساسوبیت محصولی است از کمپانی بین‌المللی ساسول وکس که از سال ۱۹۹۷ در بازارهای اروپا و آسیا عرضه می‌شود. ساسوبیت ترکیبی است از هیدروکربن‌های زنجیره‌ای بلند که از احتراق ذغال سنگ به روش فیچر تراپس به‌دست می‌آید و معمولاً به نام واکس پارافینی فیچر تراپس شناخته می‌شود. کمپانی سازنده مدعی است که این محصول از ترکیب اتم‌های کلورین، سولفور، نیتروژن و اکسیژن ساخته شده است. همچنین، عنوان شده که این ماده پایداری خوبی در برابر اکسیداسیون و پیرشدگی دارد و می‌توان آن را به مقدار زیاد و طی زمان

۳-۵-۲. نانوماده زایکوترم
زایکوترم یک نانوماده افزودنی گرم می‌باشد که محصولی دوستدار محیط‌زیست است و امکان تولید آسفالت در دمای کمتر (۱۰ تا ۱۵ درجه سلسیوس) و نیز تراکم آسفالت در دمای کمتر (۳۰ تا ۴۰ درجه سلسیوس) را فراهم می‌نماید. این محصول می‌بایست قبل از اختلاط قیر با مصالح سنگی جهت تولید آسفالت اضافه گردد که باعث مقاوم شدن رویه آسفالتی در برابر صدمات عریان

شدگی، اکسیداسیون (پیرشدگی) و خستگی می‌گردد. بر اساس مطالعات گذشته، مقدار درصد افزودنی زایکوترم در تهیه مخلوط‌های آسفالتی گرم بین ۰/۱ تا ۰/۱۵ درصد وزنی قیر می‌باشد که در این پژوهش ۰/۱ درصد وزنی

قیر انتخاب شده است (روهیت و همکاران، ۲۰۱۳). مشخصات فیزیکی این دو نوع افزودنی در جدول ۶ آمده است.

جدول ۶. مشخصات افزودنی‌های گرم استفاده شده

نوع افزودنی نیمه‌گرم		مشخصات ماده
ساسوبیت	زایکوترم	حالت فیزیکی
	ماع	رنگ
سفید شیری تا قهوه‌ای کم-رنگ	زرد کم‌رنگ	بو
عملاً بدون بو	بدون بو	وزن مخصوص (گرم بر مول در °C
۰/۹	۱/۰۱	(۲۵
خشتی	۱۰٪ حل شده در آب یا اندکی اسیدی	pH

آنها مطابق جدول ۷ نام‌گذاری شده استفاده گردیده است. در این پژوهش، برای انجام حساسیت رطوبتی مطابق استاندارد آزمایش AASHTO T283، از هر نوع مخلوط آسفالتی ۶ نمونه (۳ نمونه برای حالت اشباع و ۳ نمونه برای حالت خشک) به روش ژیراتوری تهیه گردید و شرایط عمل‌آوری هر نمونه در حالت اشباع و خشک برای انجام این آزمایش مطابق استاندارد فوق‌الذکر اعمال گردید. سپس، از دستگاه UTM 25 موجود در دانشگاه پیام نور برای به‌دست آوردن میزان مقاومت کششی مخلوط‌های تهیه شده در حالت خشک و حالت اشباع استفاده گردید و در نهایت، با متوسط‌گیری از سه مقدار به‌دست آمده، پارامتر TSR هر نوع مخلوط به‌دست آمد. پارامتر TSR از تقسیم مقاومت کششی حالت اشباع به مقاومت کششی حالت خشک به‌دست می‌آید که این پارامتر، مطابق استاندارد نباید کمتر از ۸۵٪ باشد. در نهایت، جهت مدل‌سازی نتایج حاصل از این آزمایش، از

۴. آزمایش‌های انجام شده

در این پژوهش، از راهنمای NCHRP Report 425- Project 8-9 که توسط NCAT^۱ جهت طراحی مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای SMA توسعه داده شده است، همزمان با نشریه ۲۰۶ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور استفاده شده است. لازم به ذکر است که درصد قیر بهینه برای نمونه شاهد به روش فوق، به میزان ۶/۳ درصد وزن کل نمونه به‌دست آمده است که به‌خاطر حفظ یکنواختی در تمام نتایج آزمایش‌های این پژوهش، همین درصد قیر نیز برای نمونه‌های گرم حاوی درصد‌های مختلف تراشه آسفالت در نظر گرفته شده است. همچنین، به‌دلیل شرایط آب و هوایی ایران و انجام آزمایش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، از ۱±۶ درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی استفاده شده است. در این پژوهش، از ۱۷ نوع مخلوط آسفالتی که مشخصات

^۱- National Center for Asphalt Technology

بررسی درصد‌های مختلف تراشه آسفالت در عملکرد حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای SMA گرم با استفاده از سیستم استنتاج عصبی-فازی سازگار (ANFIS)

قیر در این نوع مخلوط با استفاده از فرمول فوق ۴/۳۸ درصد می‌باشد.

نام‌گذاری مخلوط‌های استفاده شده در این پژوهش بدین صورت می‌باشد که هر مخلوط دارای یک کد اختصاصی است. اولین رقم این کد، S به معنای نمونه مخلوط با دانه‌بندی سنگدانه‌ای SMA و WS به معنای نمونه مخلوط با دانه‌بندی سنگدانه‌ای SMA گرم است. دومین رقم T به معنای داشتن الیاف TOPCEL می‌باشد. سومین رقم از این کد نشان‌دهنده یک عدد بین ۱ تا ۵ می‌باشد که نشان‌دهنده درصد تراشه آسفالت از ۱۰٪ تا ۵۰٪ می‌باشد. Z به معنای نمونه‌های حاوی زایکوترم و دومین S به معنای نمونه‌های حاوی ساسوبیت می‌باشد. به عنوان مثال، S2R نمونه مخلوط SMA دارای ۲۰٪ تراشه آسفالت RAP می‌باشد و WS5RSZT مخلوط نیمه گرم SMA دارای ۵۰٪ تراشه آسفالت و همزمان دارای ساسوبیت و زایکوترم و الیاف TOPCEL می‌باشد.

روش سیستم استنتاجی عصبی-فازی سازگار (ANFIS)، که یکی از جعبه‌افزارهای نرم‌افزار متلب است، استفاده شده است.

لازم به ذکر می‌باشد که در این پژوهش به دلیل استفاده از مصالح بازیافتی تراشه آسفالت، مقدار وزنی قیر مصرفی با توجه به مقدار قیر تراشه از فرمول (۱) مقدار قیر مورد نیاز در هر مخلوط با توجه به درصد تراشه آسفالت استفاده شده در آن به دست می‌آید.

$$Pb_N = Pb_T - Pb_R \times TR \quad (1)$$

که در آن Pb_N درصد قیر در نمونه ساخته شده تازه، Pb_T درصد قیر بهینه مخلوط آسفالتی که از آزمایش ۶/۳ درصد به دست آمده، Pb_R درصد قیر تراشه آسفالت که از جدول به میزان ۴/۸ درصد به دست آمده و TR درصد تراشه آسفالت استفاده شده در هر مخلوط است. به عنوان مثال، اگر مخلوط دارای ۴۰٪ تراشه آسفالت باشد، میزان درصد

جدول ۷. مشخصات نمونه‌های ساخته شده در این پژوهش

مشخصات نمونه	تعریف
S	مخلوط کنترل SMA
ST	مخلوط SMA + الیاف TOPCEL
S1R	مخلوط SMA + ۱۰٪ تراشه آسفالت RAP
WS1RZT	مخلوط گرم SMA + ۱۰٪ تراشه آسفالت RAP + زایکوترم + الیاف TOPCEL
WS1RSZT	مخلوط گرم SMA + ۱۰٪ تراشه آسفالت RAP + ساسوبیت + زایکوترم + الیاف TOPCEL
S2R	مخلوط SMA + ۲۰٪ تراشه آسفالت RAP
WS2RZT	مخلوط گرم SMA + ۲۰٪ تراشه آسفالت RAP + زایکوترم + الیاف TOPCEL
WS2RSZT	مخلوط گرم SMA + ۲۰٪ تراشه آسفالت RAP + ساسوبیت + زایکوترم + الیاف TOPCEL
S3R	مخلوط SMA + ۳۰٪ تراشه آسفالت RAP
WS3RZT	مخلوط گرم SMA + ۳۰٪ تراشه آسفالت RAP + زایکوترم + الیاف TOPCEL
WS3RSZT	مخلوط گرم SMA + ۳۰٪ تراشه آسفالت RAP + ساسوبیت + زایکوترم + الیاف TOPCEL
S4R	مخلوط SMA + ۴۰٪ تراشه آسفالت RAP
WS4RZT	مخلوط گرم SMA + ۴۰٪ تراشه آسفالت RAP + زایکوترم + الیاف TOPCEL
WS4RSZT	مخلوط گرم SMA + ۴۰٪ تراشه آسفالت RAP + ساسوبیت + زایکوترم + الیاف TOPCEL
S5R	مخلوط SMA + ۵۰٪ تراشه آسفالت RAP
WS5RZT	مخلوط گرم SMA + ۵۰٪ تراشه آسفالت RAP + زایکوترم + الیاف TOPCEL
WS5RSZT	مخلوط گرم SMA + ۵۰٪ تراشه آسفالت RAP + ساسوبیت + زایکوترم + الیاف TOPCEL

بررسی درصد‌های مختلف تراشه آسفالت در عملکرد حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای SMA گرم با استفاده از سیستم استنتاج عصبی-فازی سازگار (ANFIS)

به مخلوط شاهد دیده نمی‌شود. به طوری که پارامتر TSR، تا افزودن مقدار ۱۰٪ تراشه آسفالت، ابتدا کاهش و سپس تا افزودن ۳۰٪ تراشه آسفالت، پارامتر TSR افزایش و مجدداً کاهش پیدا می‌کند.

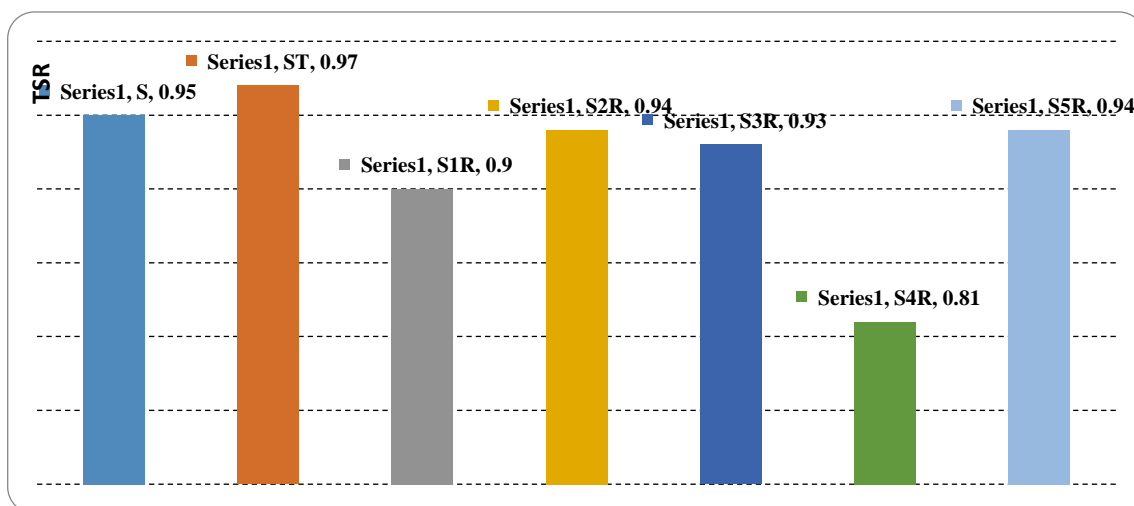
ب) مطابق شکل ۵، از مقایسه پارامتر TSR نمونه شاهد و نمونه گرم دارای زایکوترم و درصد‌های مختلف تراشه آسفالت به این نتیجه رسیده شد که پارامتر TSR، تا افزودن مقدار ۲۰٪ تراشه آسفالت، ابتدا کاهش و سپس مقدار آن تا ۴۰٪ تراشه آسفالت افزایش و مجدداً کاهش پیدا می‌کند. در واقع، با افزودن زایکوترم، پارامتر TSR مخلوط گرم در مقایسه با نمونه شاهد و یا نمونه‌های دارای درصد‌های مختلف تراشه آسفالت افزایش پیدا می‌کند.

ج) مطابق شکل ۶، از مقایسه پارامتر TSR نمونه شاهد و نمونه گرم دارای همزمان زایکوترم و ساسوبیت و درصد‌های مختلف تراشه آسفالت به این نتیجه رسیده شد که پارامتر TSR، تا میزان ۲۰٪ افزایش تراشه آسفالت ابتدا کاهش و سپس افزایش پیدا می‌کند. در واقع، با افزودن ساسوبیت و زایکوترم به صورت همزمان به مخلوط، پارامتر TSR مخلوط آسفالتی گرم در مقایسه با نمونه شاهد و یا نمونه‌های دارای درصد مختلف تراشه آسفالت، کاهش پیدا می‌کند.

۵. نتایج

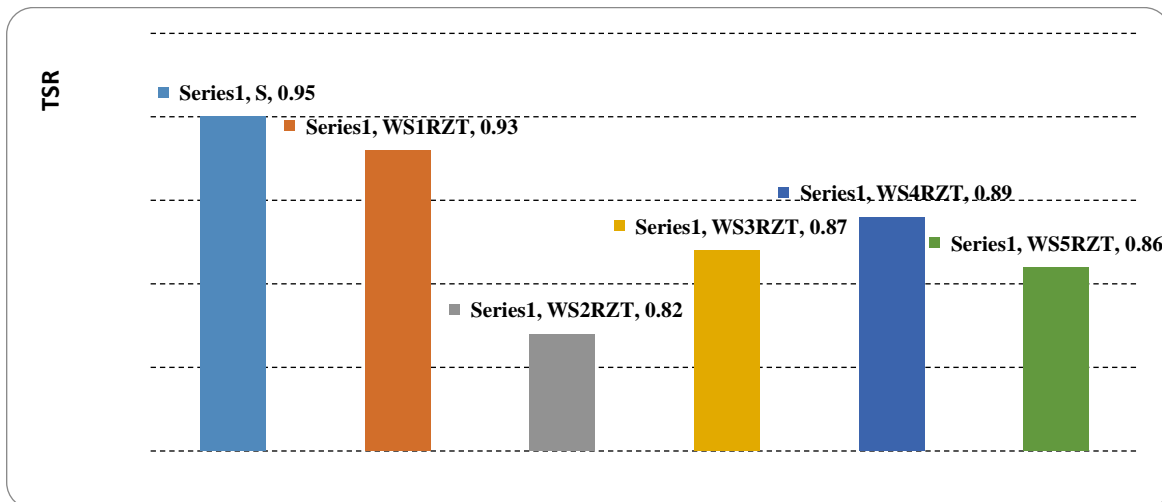
بر اساس بررسی‌های انجام شده در این پژوهش، مطابق نتایج به دست آمده از مشخصات پارامتر TSR مخلوط‌های آسفالتی مختلف و مشخصات فنی مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای SMA موجود در نشریه ۲۰۶ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور و راهنمای NCHRP شامل تعداد ضربات لازم برای رسیدن به درصد فضای خالی 6 ± 1 جهت انجام آزمایش حساسیت رطوبتی و همچنین میزان ریزش قیر بر اساس استاندارد AASHTO T305 در ۱۷ نوع مخلوط ساخته شده مطابق جدول ۷ بر اساس دسته‌بندی‌های مختلف شامل نمونه‌های شاهد، نمونه‌های ساخته شده با درصد‌های مختلف تراشه آسفالت و همچنین نمونه‌های نیمه‌گرم دارای زایکوترم و تراشه آسفالت و نمونه‌های نیمه‌گرم دارای همزمان زایکوترم و ساسوبیت و تراشه آسفالت، نتایج زیر حاصل شده و در نهایت جهت مدل-سازی و ارزیابی نتایج از روش ANFIS استفاده شده است.

الف) مطابق شکل ۴، از مقایسه پارامتر TSR نمونه شاهد و نمونه دارای درصد‌های مختلف تراشه آسفالت مشاهده گردید که روند خاصی در افزایش میزان تراشه آسفالت

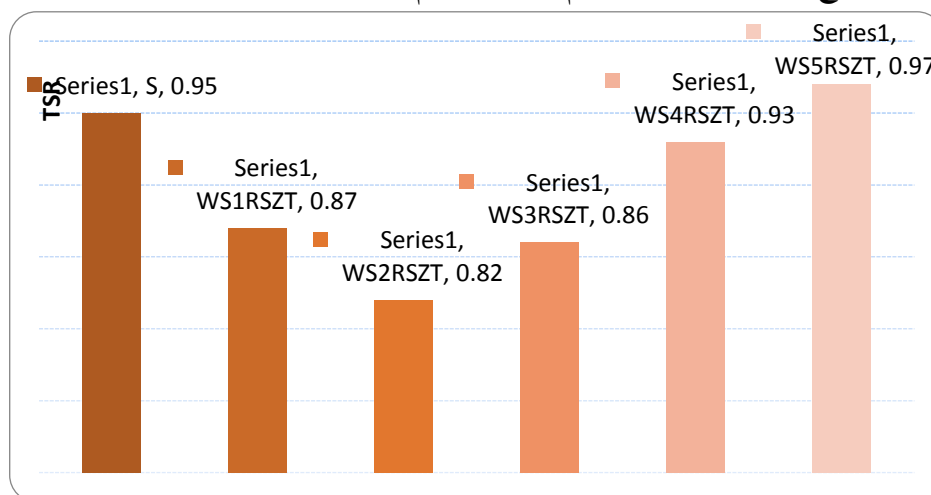


شکل ۴. مقایسه نتایج میزان TSR نمونه‌های دارای درصد‌های مختلف تراشه آسفالت با نمونه شاهد

بررسی درصد‌های مختلف تراشه آسفالت در عملکرد حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌های SMA گرم با استفاده از سیستم استنتاج عصبی-فازی سازگار (ANFIS)

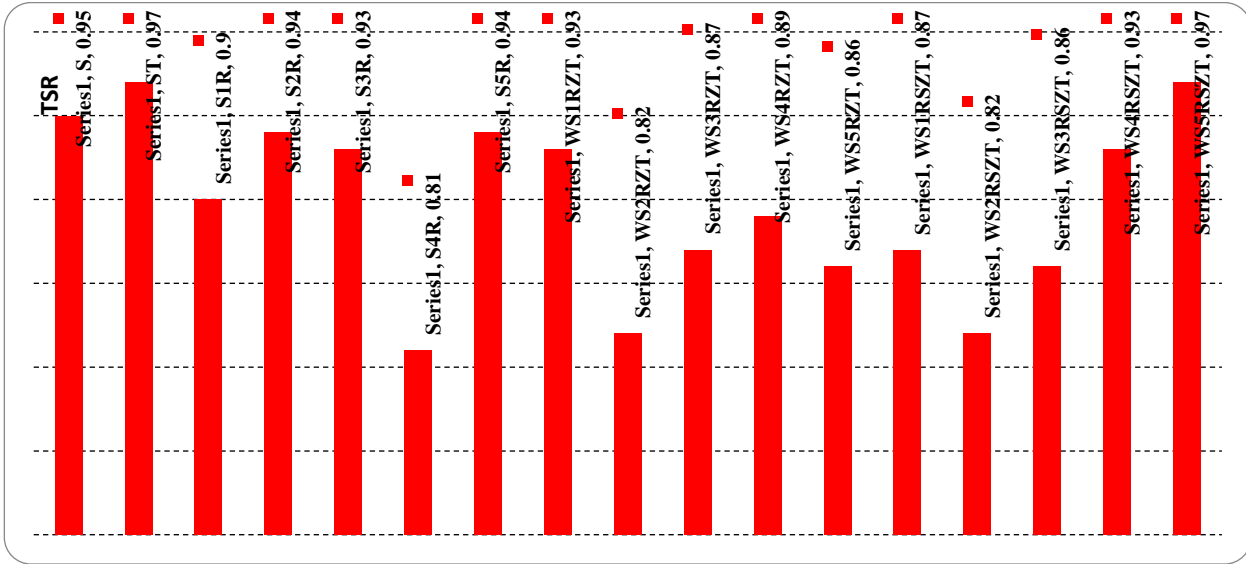


شکل ۵. مقایسه نتایج میزان TSR نمونه‌های گرم دارای زایکوترم و درصد‌های مختلف تراشه آسفالت با نمونه شاهد



شکل ۶. مقایسه نتایج پارامتر TSR نمونه‌های گرم دارای زایکوترم همزمان با ساسویت و درصد‌های مختلف تراشه آسفالت با نمونه شاهد

(د) مطابق شکل ۷، از مقایسه کلی پارامتر TSR تمامی ۱۷ نمونه ساخته شده نتیجه گرفته شد که بیشترین مقدار پارامتر TSR مربوط به WS5RSZT و ST و کمترین مقدار TSR مربوط به S4R یعنی مخلوط دارای ۴۰٪ تراشه آسفالت می‌باشد.

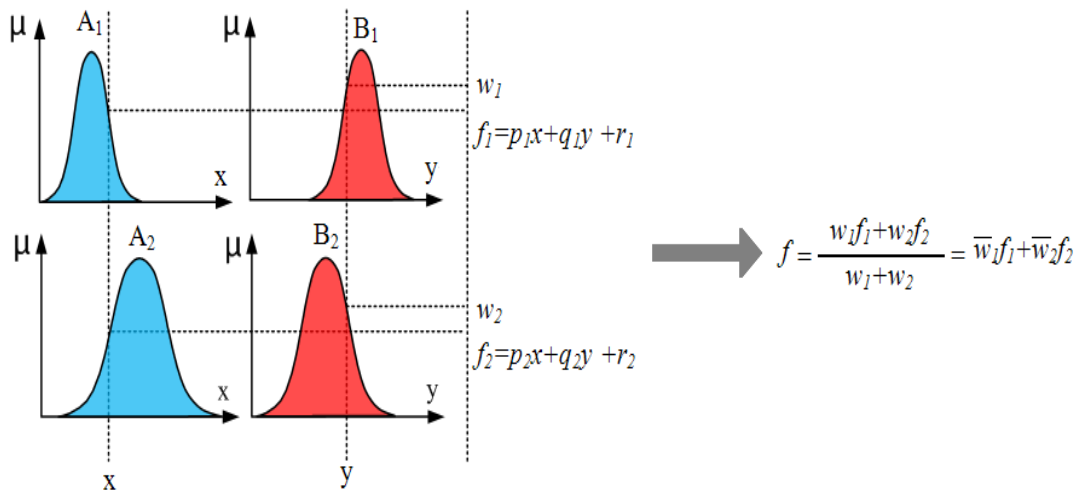


شکل ۷. مقایسه نتایج میزان TSR تمامی نمونه‌های ساخته شده

سازی) است. اولین بار، جانگ در سال ۱۹۹۳ توانست از قدرت زبانی سیستم‌های فازی و آموزش شبکه‌های عصبی استفاده نماید و سیستمی تحت عنوان سیستم‌های فازی بر پایه شبکه عصبی تطبیقی ارائه نماید. غالباً سیستم‌های ANFIS را با استفاده از یک سیستم فازی تاکاگی- سوگنو -کانگ (TSK) به صورت ساختار شبکه‌ای پیش‌رونده به کار می‌برند (شکل ۸).

ه) نتایج مدل‌سازی با ANFIS

اساس ANFIS بر پایه‌ی مجموعه داده‌های ورودی- خروجی یک سیستم استنتاج فازی (FIS) است. این سیستم بر پایه قوانین ترکیبی از سه جزء: توابع عضویت متغیرهای ورودی و خروجی (فازی کردن)، قوانین فازی (پایگاه قواعد)، استنتاج مکانیزم (ترکیب قواعد با ورودی فازی) و مشخصه‌های خروجی و نتایج سیستم (غیر فازی



شکل ۸. سیستم استنتاجی بر اساس مدل سوگنو

بررسی درصد‌های مختلف تراشه آسفالت در عملکرد حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای SMA گرم با استفاده از سیستم استنتاج عصبی-فازی سازگار (ANFIS)

لایه چهارم: (گره‌های نتیجه) در این لایه، خروجی هر گره برابر است با:

$$O_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i), \quad i = 1, 2 \quad (9)$$

لایه پنجم: (گره‌های خروجی) در این لایه، هر گره مقدار خروجی نهایی را به صورت زیر محاسبه می‌نماید (تعداد گره‌ها برابر تعداد خروجی هاست):

$$O_{5,i} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i}, \quad i = 1, 2 \quad (10)$$

آموزش این سیستم‌ها به این مفهوم است که با استفاده از داده‌های آموزشی، پارامترهای غیرخطی مربوط به توابع عضویت فازی در لایه اول و پارامترهای خطی لایه چهارم طوری تعیین شوند که به ازای ورودی دلخواه، خروجی مطلوب حاصل شود. روش آموزش هیبرید یکی از مهمترین روش‌های آموزش سیستم‌های استنتاج فازی برپایه شبکه عصبی تطبیقی می‌باشد. در این روش، جهت آموزش در لایه اول از روش پس‌انتشار خطا و در لایه چهارم سیستم از روش تخمین کمترین مربعات استفاده می‌شود. در این پژوهش، جهت تعیین مقاومت کششی هر نمونه در حالت خشک و اشباع که به ترتیب با S1 و S2 نشان داده می‌شود، یک شبکه استنتاجی تطبیقی عصبی-فازی تعمیم می‌یابد. در واقع، یک شبکه ANFIS با ۱۶ ورودی و دو خروجی، تعداد قوانین فازی ۶، تعداد پارامترهای خطی ۲۸، تعداد پارامترهای غیرخطی ۱۷ و تعداد تکرارها ۶۴۰ ساخته شد. جهت تعمیم شبکه مفروض، تعداد ۳۲ داده آزمایشگاهی استفاده گردید. تعداد ۱۷ داده معادل ۵۳٪ کل داده‌ها به عنوان داده‌های آموزشی، ۱۰ داده معادل ۳۱٪ به عنوان داده‌های آزمایشی و ۵ داده معادل ۱۶٪ از داده‌ها به عنوان داده‌های ارزیابی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج ساختار شبکه ANFIS در جدول ۸ و شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ آورده شده است.

برای سادگی کار فرض می‌شود که سیستم فازی ما دو ورودی X و Y دارد و خروجی آن Z است. حال اگر قوانین به صورت زیر باشند:

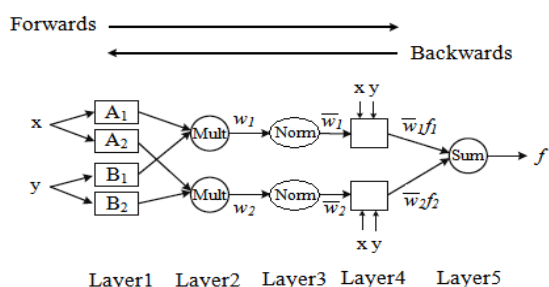
$$\text{Rule1: if } x \text{ is } A_1 \text{ and } y \text{ is } B_1, \text{ then } f_1 = p_1 x + q_1 y + r_1 \quad (2)$$

$$\text{Rule2: if } x \text{ is } A_2 \text{ and } y \text{ is } B_2, \text{ then } f_2 = p_2 x + q_2 y + r_2 \quad (3)$$

اگر برای غیرفازی سازی (تبدیل خروجی نهایی سیستم به یک عدد کلاسیک) از روش میانگین مراکز استفاده شود، خروجی به صورت زیر خواهد بود:

$$f = \frac{w_1 f_1 + w_2 f_2}{w_1 + w_2} = \bar{w}_1 f_1 + \bar{w}_2 f_2 \quad \text{st} \quad \bar{w}_1 = \frac{w_1}{w_1 + w_2}, \quad \bar{w}_2 = \frac{w_2}{w_1 + w_2} \quad (4)$$

ساختار معادل ANFIS که از پنج لایه تشکیل شده است به صورت زیر خواهد بود (شکل ۹).



شکل ۹. مدل فازی مرتبه اول سوگنو

لایه اول: (گره‌های ورودی) در این لایه، درجه عضویت گره‌های ورودی به بازه‌های مختلف فازی با استفاده از تابع عضویت، مشخص می‌گردد:

تابع عضویت گوسین به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(x), \quad i = 1, 2, \quad (5)$$

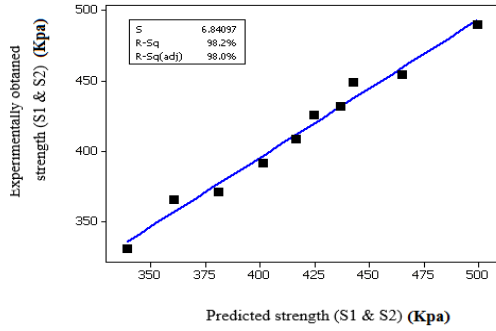
$$O_{1,i} = \mu_{B_{i-2}}(y), \quad i = 3, 4 \quad (6)$$

لایه دوم: (گره‌های قاعده) هر گره در این لایه درجه فعالیت یک قانون را محاسبه می‌کند:

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{A_i}(x) \mu_{B_i}(y), \quad i = 1, 2 \quad (7)$$

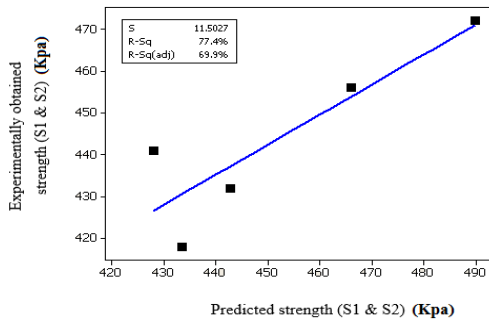
لایه سوم: خروجی این لایه نرمالیزه شده لایه قبلی است:

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, \quad i = 1, 2 \quad (8)$$



شکل ۱۱. منحنی مقایسه داده‌های آزمایشی در مقابل

مقادیر تخمین زده شده با سیستم ANFIS



شکل ۱۲. منحنی مقایسه داده‌های ارزیابی در مقابل مقادیر

تخمین زده شده با سیستم ANFIS

همچنین، در این پژوهش، برای مقایسه نتایج به دست آمده از روش ANFIS یک تحلیل آماری ANOVA با نرم افزار SPSS بر اساس برازش معادله خطی انجام شده که نتایج این تحلیل آماری در جداول ۹ تا ۱۱ آورده شده است.

جدول ۹. خلاصه مدل خطی برازش داده شده برای مقادیر پارامتر TSR واقعی و TSR تخمین زده شده با روش ANFIS

خلاصه مدل				
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	0.937 ^a	0.877	0.869	0.01949612

a. Predictors: (Constant), Predicted TSR

جدول ۱۰. خلاصه تحلیل ANOVA برای مقادیر پارامتر TSR واقعی و TSR تخمین زده شده با روش ANFIS

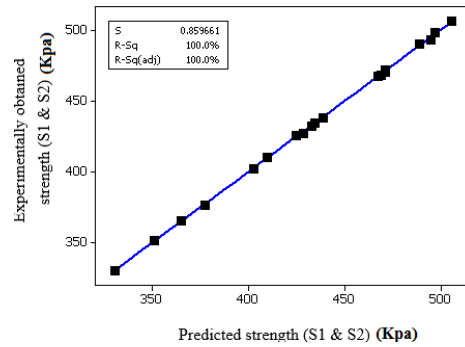
Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1 Regression	0.041	1	0.041	107.135	0.000 ^b
1 Residual	0.006	15	0.000		
Total	0.046	16			

a. Dependent Variable: Actual TSR

b. Predictors: (Constant), Predicted TSR

جدول ۸. مشخصات آماری مدل عصبی فازی سازگار برای آزمایش حساسیت رطوبتی

پارامترهای آماری			مرحله توسعه
R ² (adj)	R ²	S	مدل
۱۰۰	۱۰۰	۰/۸۶۹۶۶۱	مرحله آموزش
۹۸	۹۸/۲	۶/۸۴۰۹۷	مرحله آزمایشی
۶۹/۹	۷۷/۴	۱۱/۵۲۷	مرحله ارزیابی



شکل ۱۰. منحنی مقایسه داده‌های آموزش در مقابل مقادیر

تخمین زده شده با سیستم ANFIS

بررسی درصد‌های مختلف تراشه آسفالت در عملکرد حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای SMA گرم با استفاده از سیستم استنتاج عصبی-فازی سازگار (ANFIS)

جدول ۱۱. ضرایب مدل خطی از تحلیل ANOVA برای مقادیر پارامتر TSR واقعی و TSR تخمین زده شده با روش ANFIS

ضرایب مدل خطی از تحلیل ANOVA						
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	Constant	0.036	0.083		0.433	0.671
	Predicted TSR	0.957	0.092	0.937	10.351	0.000

a. Dependent variable: Actual TSR

مقادیر تخمین زده شده با مدل به دست آمده با ضریب رگرسیون ۱ و ۰/۹۸۲، به ترتیب برای مجموعه داده‌های آموزش و آزمایشی، و ۰/۷۷۴ برای داده‌های ارزیابی بود. همچنین، از ضریب رگرسیون ($R^2=0.877$) به دست آمده از تحلیل ANOVA حاصل از برازش خطی مقادیر واقعی نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی و نتایج تخمین زده شده با روش ANFIS به این نتیجه رسیده شد که اعداد تخمینی به دست آمده از روش ANFIS از دقت مناسبی برخوردار می‌باشند. این امر، از ضریب رگرسیون خطی به دست آمده از تحلیل ANOVA کاملاً پیداست و می‌توان گفت که روش ANFIS دارای کارایی خوبی در بهینه‌سازی قابل تطبیق در تخمین اطلاعات نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد.

۶. نتیجه‌گیری

این پژوهش، به بررسی درصد‌های مختلف تراشه آسفالت در آزمایش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای SMA گرم با استفاده از سیستم استنتاج عصبی-فازی سازگار (ANFIS) می‌پردازد. در این پژوهش، پارامترهای ورودی به مدل ANFIS شامل درصد‌های مختلف تراشه آسفالت حاوی افزودنی گرم و نسبت مقاومت کششی نمونه در حالت اشباع به مقاومت کششی نمونه در حالت خشک به عنوان خروجی مدل می‌باشد. نتایج به دست آمده از مدل‌سازی ANFIS نشان‌دهنده دقت مناسب بین یافته‌های آزمایشگاهی و

۷. مراجع

- بهبهانی، ح.، ایازی، م. ج. و شجاعی، م. ح. ۱۳۹۵. "ارزیابی آزمایشگاهی حساسیت رطوبتی و پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم". مجله مهندسی حمل و نقل، ۷(۳): ۴۰۵-۴۱۸.
- سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور. ۱۳۷۹. "طراحی و ارزیابی آزمایشگاهی مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای". وزارت راه و ترابری، نشریه شماره ۲۰۶.
- صفازاده، ف. و طباطبائی، ن. ۱۳۹۴. "ارزیابی تأثیر ساسوبیت بر مشخصات رفتاری و کارایی مخلوط‌های آسفالتی حاوی تراشه‌های آسفالت". نشریه علمی پژوهش‌های تجربی در مهندسی عمران، ۲: ۲۳-۱۵.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). 2000. "Standard specification for resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage". Designation: T283, Washington, D. C.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). 2000. "Standard specification for determination of draindown characteristics in uncompacted asphalt". Designation: T305, Washington, D. C.
- Aschenbrenner, T., and Currier, G. 1993. "Influence of testing variables on the results from the Hamburg wheel tracking device: Final report". Report No. COOT -D1D-R-93-22.
- Ayazi, M. J., Moniri, A. and Barghabaani, P. 2017. "Moisture susceptibility of warm mixed-reclaimed asphalt pavement containing Sasobit and Zycotherm additives". J. Petrol. Sci. Technol., 35(9): 890-895.
- Bonaquist, R. F. 2011. "NCHRP 9-43 Mix design practices for warm mix asphalt". Second International Warm Mix Conference, St. Louis, Missouri, Sept. 27.
- Brown, E. R. and Cooley Jr., L. A. 1999. "Designing stone matrix asphalt mixtures for rut-resistant pavements". National Center for Asphalt Technology, NCHRP Report 425, Project 8-9.
- Copeland, A. 2011. "Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: State of the practice". Report No. FHWA-HRT-11-021, Federal Highway Administration, Washington, D. C.
- Das, P. K., Tasdemir, Y. and Birgisson, B. 2012. "Evaluation of fracture and moisture damage performance of wax modified asphalt mixtures". J. Road Mater. Pavement Design, 13(1): 142-155.
- Doyle, J. D. and Howard, I. L. 2013. "Rutting and moisture damage resistance of high reclaimed asphalt pavement warm mixed asphalt: loaded wheel tracking vs. conventional methods". J. Road Mater. Pavement Design, 14(2): 148-172.
- Doyle, J. D., Mejias-Santiago, M., Brown, E. and Howard, I. L. 2011. "Performance of high RAP-WMA surface mixtures". J. Assoc. Asphalt Paving Technol., Vol. 80.
- Fakhri, M. and Hosseini, S. A. 2017. "Laboratory evaluation of rutting and moisture damage resistance of glass fiber modified warm mix asphalt incorporating high RAP proportion". J. Constr. Build. Mater., 134(1): 626-640.
- Federal Highway Administration FHWA-PL-08-007. 2008. "Warm-mix asphalt: European practice". International Technology Scanning Program, Department of Transportation, Washington, D. C.
- Guo, N., You, Z., Zhao, Y., Tan, Y. and Diab, A. 2014. "Laboratory performance of warm mix asphalt containing recycled asphalt mixtures". J. Constr. Build. Mater., 64: 141-149.
- Hill, B., Behnia, B., Buttlar, W. and Reis, H. 2012. "Evaluation of warm mix asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement through mechanical performance tests and an acoustic emission approach". J. Mater. Civ. Eng., 25(12): 1887-1897.
- Hurley, G. C. and Prowell, B. D. 2005. "Evaluation of Sasobit for use in warm mix asphalt". NCAT Report No 5-6.
- Kvasnak, A. N. and West, R. C. 2009. "Case study of warm-mix asphalt moisture susceptibility in Birmingham, Alabama". Transportation Research Board, 88th annual meeting, Washington D. C.
- Lu, D. X. and Saleh, M. 2016. "Laboratory evaluation of warm mix asphalt incorporating high RAP proportion by using evotherm and sylvaroad additives". J. Constr. Build. Mater., 114(1): 580-587.
- Ma, T., Wang, H., Hunag, X., Wang, Z. and Xiao, F. 2015. "Laboratory performance characteristics of high modulus asphalt mixture with high content RAP". J. Constr. Build. Mater., 101(1): 975-982.
- Medeiros Jr., M. S., Daniel, J. S., Bolton, H. L. and Meagher, W. C. 2012. "Evaluation of moisture and low-temperature cracking susceptibility of warm mixture asphalt". Int. J. Pavement Eng., 13(5): 395-400.
- Middleton, B. and Forfylyow, R. W. 2009. "Evaluation of warm-mix asphalt produced with the double barrel green process". Transport. Res. Record, 2126: 19-26.

بررسی درصدهای مختلف تراشه آسفالت در عملکرد حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌های SMA گرم
با استفاده از سیستم استنتاج عصبی-فازی سازگار (ANFIS)

- Mogawer, W., Austerman, A., Bonaquist, R. and Roussel, M. 2011. "Performance characteristics of thin-lift overlay mixtures: High reclaimed asphalt pavement content, recycled asphalt shingles, and warm-mix asphalt technology". *J. Transport. Res. Board*, 2208: 17-25.
- Moghadas Nejad, F., Azarhoosh, A., Hamedi, Gh. and Roshani, H. 2014. "Rutting performance prediction of warm mix asphalt containing reclaimed asphalt pavements". *J. Road Mater. Pavement Design*, 15(1): 207-219.
- Prowell, B., Hurley, G. and Crews, E. 2007. "Field performance of warm mix asphalt technology at National Center for Asphalt Technology test track". *Transport. Res. Record J. Transport. Res. Board*, 1998(1): 96-102.
- Rohith, N. and Ranjitha, J. 2013. "A study on Marshall stability properties of warm mix asphalt using Zycotherm a chemical additive". *Int. J. Eng. Res. Technol.*, 2(7): 19-27.
- Shu, X., Huang, B., Shrum, E. D. and Jia, X. 2012. "Laboratory evaluation of moisture susceptibility of foamed warm mix asphalt containing high percentages of RAP". *J. Constr. Build. Mater.*, 35: 125-130.
- Wu, Y., Guo, Y. and Zhang, X. 2011. "Performance evaluation of recycled asphalt mixture using warm mix asphalt technology". *GeoHunan International Conference, Hunan, China, June 9-11*, pp. 26-34.
- Xiao, F., and Amirkhanian, S. N. 2009. "Laboratory investigation of moisture damage in rubberized asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement". *Int. J. Pavement Eng.*, 10(5): 319-328.
- Zhao, S., Huang B., Shu, X. and Woods M. 2013. "Comparative evaluation of warm mix asphalt containing high percentages of reclaimed asphalt pavement". *J. Constr. Build. Mater.*, 44: 92-100.