

حساسیت رطوبتی و خواص مکانیکی مخلوط آسفالتی سبز شامل آسفالت بازیافتی، سرباره و ضایعات پلاستیک

سجاد امیری، دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشگاه صنعتی شاهرود
سید علی حسینی*، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود
مهسا روحی فریمان، دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشگاه صنعتی شاهرود

E-mail: ahosseini@shahroodut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۸/۰۵ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۰۶

چکیده

تجدیدنابذیر بودن مصالح طبیعی و جلوگیری از تخریب محیط‌زیست جهت تولید مصالح سنگی، باعث افزایش تمایل استفاده از مواد دورریز در مخلوط‌های آسفالتی در چند دهه اخیر شده است. سرباره‌های قوس الکتریکی و تراشه‌های آسفالتی به عنوان مهمترین مصالح بازیافتی مورد استفاده در مخلوط‌های آسفالتی معرفی شده‌اند. ارزیابی خواص مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی گرم (WMA) شامل تراشه آسفالتی (RAP)، سرباره کوره قوس الکتریکی (EAFS) و پودر پلاستیک‌های بازیافتی (WP) به طور جداگانه انجام شده است. با این حال، مطالعات بسیار کمی تأثیر حضور همزمان تراشه آسفالتی، سرباره و پودر پلاستیک‌های بازیافتی بر خواص مکانیکی و حساسیت رطوبتی مخلوط‌های WMA را ارزیابی کرده‌اند. این تحقیق، به بررسی تأثیر همزمان تراشه آسفالتی، سرباره و پودر پلاستیک‌های بازیافتی در مخلوط‌های WMA می‌پردازد. مشخصات مکانیکی مخلوط‌های WMA حاوی درصد‌های مختلف تراشه آسفالتی (صفر، ۳۵ و ۵۵ درصد حجمی سنگ‌دانه، جایگزین سنگ‌دانه ریز)، سرباره (صفر، ۲۰ و ۴۰ درصد حجمی سنگ‌دانه، جایگزین درشت‌دانه) و پودر پلاستیک‌های بازیافتی (صفر و ۱۰ درصد وزن قیر) با استفاده از آزمایش‌های مقاومت فشاری، مدول کششی غیرمستقیم، خزش استاتیک، ضربه مارشال و حساسیت رطوبتی بررسی شدند. از ساسوبیت به مقدار ۱/۵ درصد وزنی قیر برای تهیه مخلوط‌های WMA استفاده شد. نتایج به‌دست آمده، بهبود حساسیت رطوبتی، مقاومت شیارشدگی و مدول برجهندگی را با افزایش درصد تراشه آسفالتی، کاهش مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی و بهبود مقاومت فشاری مخلوط‌ها با افزایش درصد سرباره و کاهش مقاومت فشاری و مدول برجهندگی با افزایش پودر پلاستیک را نشان می‌دهد. استفاده همزمان از تراشه آسفالتی، سرباره و پودر پلاستیک‌های بازیافتی، مخلوطی سازگار با محیط‌زیست و با حداقل مشخصات مکانیکی لازم را تولید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالتی گرم، تراشه آسفالتی، سرباره کوره قوس الکتریکی، حساسیت رطوبتی، مقاومت شیارشدگی.

۱. مقدمه

علاوه بر این، کاهش هزینه سنگ‌دانه‌ها و قیر، صرفه‌جویی در منابع طبیعی تجدیدنپذیر مانند سنگ‌دانه و قیر و کاهش مشکل دفع مواد ضایعاتی جامد به عنوان مزایای استفاده از RAP در مخلوط آسفالتی گزارش شده است (دینیس آلمیدا و همکاران، ۲۰۱۲؛ شو و همکاران، ۲۰۱۲). مواد ضایعاتی دیگری که به طور گسترده در مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار می‌گیرند، پلاستیک-های بازیافتی است. پلاستیک‌ها بخش عمده‌ای از زباله-های جامد شهری را در کشورهای با درآمد زیاد تشکیل می‌دهند (هورنوگ و بادا تاتا، ۲۰۱۲). به جای ریختن این مواد در محل‌های دفن زباله، بازیابی این زباله‌های مضر محیطی باید مورد توجه قرار گیرد (گالان و همکاران، ۲۰۱۹؛ حیدر و همکاران، ۲۰۲۰). به همین دلیل، استفاده از ضایعات پلاستیکی در دهه‌های گذشته در روسازی‌ها افزایش یافته است (آلمیدا و همکاران، ۲۰۲۰). محققین، با روش خشک (به دلیل سهولت کار در آزمایشگاه) ضایعات پلاستیکی که مخلوطی از چند نوع پلیمر ضایعاتی بود، را به مقدار ۱۰ و ۲۰ درصد جایگزین قیر کردند و نتیجه گرفتند که افزودن ضایعات پلاستیکی باعث کاهش حساسیت رطوبتی، افزایش درصد هوا و کاهش تغییر شکل پلاستیک می‌شود (موویا کسدا و همکاران، ۲۰۱۹). حساسیت رطوبتی قابل قبول، مقاومت بهتر در برابر تراکم ترافیکی، سختی بیشتر، مقاومت بیشتر در برابر شیارشدگی و ترک‌خوردگی خستگی به دلیل استفاده از پلاستیک در مخلوط آسفالتی در مطالعات قبلی گزارش شده است (واسودوان و همکاران، ۲۰۱۲). بنابراین، استفاده از ضایعات پلاستیکی در مخلوط‌های آسفالتی دارای مزایای فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی است. سرباره کوره قوس الکتریکی، که بیشتر در محل دفن زباله دفع می‌شود، مواد زائد دیگری است که برای

افزایش آلودگی و گرمایش جهانی و معرفی صنعت روسازی به عنوان آلاینده محیط‌زیست مهمترین دلایل ظهور فناوری WMA^۱ است. متوسط کاهش دمای مخلوط و درصد صرفه‌جویی در قیر مرتبط با تولید WMA به ترتیب ۲۷ درجه سلسیوس و ۲۲/۱ درصد گزارش شده است (پروول و همکاران، ۲۰۱۴). علاوه بر این، در دهه‌های اخیر، استفاده از ضایعاتی مانند تراشه آسفالتی (RAP^۲)، سرباره کوره قوس الکتریکی (EAFS^۳) و پودر پلاستیک‌های بازیافتی (WP^۴) در مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. استفاده از این مواد در مخلوط‌های آسفالتی موجب صرفه‌جویی قابل توجهی در منابع طبیعی تجدیدنپذیر مانند سنگ‌دانه و قیر می‌شود. فناوری WMA و استفاده از مواد ضایعاتی، پایداری محیطی صنعت روسازی را بهبود می‌بخشد (هیل و همکاران، ۲۰۱۳؛ معقول و همکاران، ۲۰۱۷؛ بهیج و همکاران، ۲۰۲۰؛ پیانو و همکاران، ۲۰۲۰). در دهه‌های گذشته، تراشه آسفالتی به طور گسترده‌ای در مخلوط‌های آسفالتی مصرف شده است. در تحقیقی، افزودن تراشه آسفالتی تا ۵۰ درصد به مخلوط آسفالتی گرم با تکنولوژی کف قیر (افزودن مقداری کمی آب، به وسیله تزریق آن در قیر داغ یا افزودن مستقیم به مخلوط که باعث تولید حجم زیادی کف می‌شود) مورد ارزیابی قرار گرفت که این امر سبب بهبود حساسیت رطوبتی مخلوط شد (شو و همکاران، ۲۰۱۲). در تحقیقی دیگر، با افزودن ۰/۳ درصد وزنی مخلوط، الیاف شیشه و ۲۰، ۴۰ و ۵۰ درصد RAP به مخلوط آسفالتی گرم و با انجام آزمایش‌های ویل تراک و حساسیت رطوبتی، دریافتند که مقاومت در برابر شیارشدگی و حساسیت رطوبتی مخلوط بهبود یافته است (فخری و همکاران، ۲۰۱۷).

^۳- Electric arc furnace slag

^۴- Waste plastic

^۱- Warm mix asphalt

^۲- Reclaimed asphalt pavement

بیشتر سرباره‌ها با هم و همچنین قیر پیرشده در تراشه آسفالتی می‌باشد. از طرفی، این مواد باعث ارتقای حساسیت رطوبتی و مدول ارتجاعی می‌شوند (فخری و همکاران، ۲۰۱۷).

در کنار مزایای زیادی که در بالا ذکر شد، مصرف زیاد قیر به یکی از مهمترین مشکلات مخلوط‌های حاوی سرباره تبدیل شده است. استفاده همزمان تراشه آسفالتی و سرباره فولاد در مخلوط آسفالتی گرم (WMA) در مطالعات قبلی برای از بین بردن این مشکل به عنوان راهکار اشاره شده بود (فخری و همکاران، ۲۰۱۷).

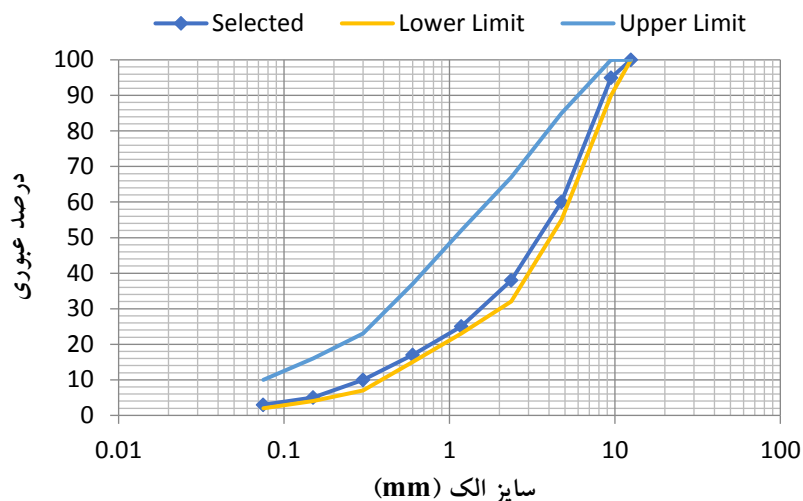
این تحقیق، به بررسی اثرات استفاده همزمان تراشه آسفالتی، سرباره و پودر پلاستیک‌های بازیافتی در مخلوط‌های WMA می‌پردازد. برای این منظور، WMA با درصدهای مختلف تراشه آسفالتی (صفر، ۳۵ و ۵۵ درصد حجمی سنگ‌دانه، جایگزین سنگ‌دانه ریز)، سرباره (صفر، ۲۰ و ۴۰ درصد حجمی سنگ‌دانه، جایگزین سنگ‌دانه‌های درشت‌دانه) و پودر پلاستیک‌های بازیافتی (صفر و ۱۰ درصد وزن قیر) مورد بررسی قرار گرفت.

۲. مواد و آماده‌سازی نمونه

۲-۱. مواد

دانه‌بندی مصالح سنگی آهکی استفاده شده براساس منحنی دانه‌بندی شماره ۵ آیین‌نامه روسازی راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴) مخصوص دانه‌بندی لایه توپکا انتخاب شده است (شکل ۱). جدول ۱، ویژگی‌های مهندسی سنگ‌دانه را فهرست می‌کند. قیر PG58-16 (درجه نفوذ ۶۰/۷۰) در این مطالعه استفاده شد. خواص فیزیکی قیر در جدول ۲ ارائه شده است.

جایگزینی سنگ‌دانه‌های طبیعی مورد استفاده قرار می‌گیرد (عاملیان و همکاران، ۲۰۱۸). زبری، زاویه‌دار بودن، سختی و مقاومت در برابر صیقلی شدن از ویژگی‌های اساسی است که به دلیل استفاده از سرباره در مخلوط آسفالتی، افزایش می‌یابد. محققان، سرباره کوره قوس الکتریکی را به عنوان جایگزین ۷۵ درصد درشت‌دانه مخلوط آسفالت ماستیک برای ارزیابی عملکرد آن به عنوان یک ماده بازیافتی، استفاده کردند و نتیجه گرفتند که با توجه به سختی بیشتر و انعطاف پذیری کمتر مخلوط حاوی سرباره (به دلیل به هم پیوستگی بهتر سرباره‌ها و افزایش چسبندگی بین سرباره و قیر) در مقایسه با مخلوط شاهد حاوی سنگ‌دانه‌های آهکی طبیعی، باعث افزایش طول عمر خستگی و بهبود خواص مکانیکی مخلوط آسفالتی می‌شود (علینژاد و صحاف، ۲۰۱۹). در تحقیقی دیگر، از سرباره کوره آهن‌گدازی به عنوان درشت‌دانه در مخلوط آسفالتی گرم استفاده شد، که باعث بهبود حساسیت رطوبتی مخلوط شد و این بهبود را با چسبندگی بیشتر قیر و سرباره مرتبط دانستند. همچنین، آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که سطوح سرباره‌ها حفره‌دارتر است که منجر به افزایش قیر بهینه و پوشاندن بیشتر سرباره با قیر می‌شود (حسامی و همکاران، ۲۰۱۴). در پژوهشی، تأثیر تراشه آسفالتی با میزان صفر، ۲۰ و ۴۰ درصد و سرباره کوره قوس الکتریکی به مقدار صفر و ۴۰ درصد بر مخلوط آسفالتی گرم بررسی شد و نتیجه گرفته شد که افزودن این دو ماده همزمان عمر خستگی را بهبود می‌دهد و بیشترین عمر خستگی مربوط به نمونه حاوی ۴۰ درصد تراشه آسفالتی و ۴۰ درصد سرباره بود. همچنین، نمونه‌های حاوی سرباره و تراشه آسفالتی مقاومت در برابر شیارشدگی را بهبود می‌بخشد؛ که این امر به دلیل درگیری



شکل ۱. دانه بندی مصالح سنگی

جدول ۱. مشخصات سنگ دانه ها

استاندارد	مقدار	مشخصات قیر
ASTM C-127	۲/۱	جذب آب درشت دانه (%)
ASTM C-128	۲/۴	جذب آب ریزدانه (%)
ASTM C-131	۲۰/۲	سایش لس آنجلس (%)
ASTM D-2419	۷۱	سنگ دانه ریز معادل ماسه (%)
ASTM D-5821	۹۲	شکستگی مصالح سنگی در دو جبهه (%)
ASTM C-127	۲/۵۸۸	وزن مخصوص حقیقی درشت دانه (>2.36)
ASTM C-128	۲/۴۶۷	وزن مخصوص حقیقی ریزدانه (0.075-2.36 mm)
ASTM D-854	۲/۶۹۵	وزن مخصوص حقیقی پرکننده (< 0.075mm)

جدول ۲. مشخصات قیر ۶۰/۷۰

استاندارد	مقدار	مشخصات قیر
ASTM-D5	۶۲	درجه نفوذ (۰/۱ میلی متر)
ASTM-D36	۵۰	نقطه نرمی (°C)
ASTM-D113	۱۰۰	شکل پذیری (سانتی متر)
ASTM-D92	۳۲۰	درجه اشتعال (°C)
ASTM-D2170	۴۰۰	ویسکوزیته در دمای ۱۳۵ درجه سلسیوس (سانتی استوکس)
ASTM-D70	۱/۰۳۲	وزن مخصوص (g/cm ³)

به میزان ۱۸ تا ۵۴ درجه سلسیوس می‌گردد. این افزودنی به دو شکل گرانول و پودری و به میزان ۰/۸ تا ۳ درصد وزن قیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقدار ساسوبیت، ۱/۵ درصد وزن قیر انتخاب شد. استفاده از این مقدار بر اساس مطالعات قبلی است (موگاور و همکاران، ۲۰۱۱).

برای تولید مخلوط‌های WMA، از ساسوبیت که یک افزودنی آلی است، استفاده شد (شکل ۲). نقطه ذوب ساسوبیت حدود ۱۰۰ درجه سلسیوس بوده و در دمای بیشتر از ۱۲۰ درجه سلسیوس، به طور کامل در قیر حل می‌گردد. این محصول به دلیل قابلیتی که در کاهش ویسکوزیته قیر دارد، سبب کاهش دمای اختلاط و اجرا



شکل ۲. ساسوبیت

مخلوط‌های WMA با توجه به کاهش دمای تولید و تراکم و در نتیجه کاهش میزان پیرشدگی قیر امکان استفاده از درصد‌های بالاتر RAP در این مخلوط‌ها فراهم می‌شود (شیائو و همکاران، ۲۰۰۹). مقدار RAP در مخلوط صفر، ۳۵ و ۵۵ درصد حجمی مصالح سنگی ریزدانه انتخاب شده است. RAP به عنوان جایگزین نسبی به سنگ‌دانه‌های ریز اضافه شد.

RAP مورد استفاده در این مطالعه از جاده اصلی شاهرود میامی به دست آمده است (شکل ۳). خصوصیات RAP در جدول ۳ نشان داده شده است. صرفه‌جویی اقتصادی و مزایای زیست‌محیطی دو فاکتور اصلی و تأثیرگذار در استفاده از تراشه‌های آسفالتی در روسازی-های آسفالتی می‌باشند. با توجه به وجود قیر پیرشده در مصالح تراشه آسفالتی، میزان استفاده از این مصالح در مخلوط‌های آسفالتی داغ محدود شده است. اما در



شکل ۳. مصالح RAP

جدول ۳. مشخصات قیر به دست آمده از تراشه آسفالتی

استاندارد	مقدار	مشخصات قیر
ASTM-D5	۹/۲	درجه نفوذ (۲۵ درجه سلسیوس، ۰/۱ میلی متر)
ASTM-D36	۸۰/۱	نقطه نرمی (°C)
ASTM-D2172	۵/۷	درصد قیر (%)

آزاد (CaO) در سرپاره فولاد ۰/۲ درصد است که این رقم خیلی کمتر از میزان این ترکیب در سرپاره‌های تازه تولید شده است و می‌توان گفت که این سرپاره به خوبی دوره عمل‌آوری را طی کرده است و خطر افزایش حجم ندارد.

سرپاره کوره قوس الکتریکی در سه درصد مختلف، یعنی صفر، ۲۰ و ۴۰ درصد حجمی، برای جایگزینی سنگ‌دانه‌های طبیعی درشت در مخلوط‌های WMA استفاده شد (شکل ۴). خواص سرپاره مورد استفاده در تحقیق در جدول ۴ ارائه شده است. همچنین، ترکیبات شیمیایی سرپاره در جدول ۵ ارائه شده است. میزان آهک



شکل ۴. سرپاره کوره قوس الکتریکی

جدول ۴. مشخصات سرپاره

استاندارد	مقدار	مشخصات قیر
ASTM C-127	۳/۰۲	چگالی حقیقی (g/cm ³)
ASTM C-131	۱۱	ضریب لس آنجلس (%)

جدول ۵. ترکیبات شیمیایی سرپاره

Others	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MnO	P ₂ O ₅	Free CaO	
۳/۴	۴۰	۵	۱۶	۲۷	۵	۱	۲	۰/۲	سرپاره

است، از تأسیسات بازیافت در شاهرود به دست آمد. به گفته تولیدکنندگان این نوع پلی اتیلن، درصد کربنات کلسیم موجود در آنها حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد وزن آنها

در این مطالعه آزمایشگاهی، ضایعات پلاستیک که از نوع پلی اتیلن سنگین گرید فیلم می باشد و بیشتر شامل کیسه های پلاستیک خرید و سفره های یکبار مصرف

کسادا، ۲۰۱۹). خصوصیات ضایعات پلاستیک در جدول ۶ نشان داده شده است.

می‌باشد. شکل ۵، این نوع پلیمر را قبل و بعد از فرآیند خرد شدن نشان می‌دهد. مقدار پلاستیک براساس مطالعات قبلی، ۱۰ درصد وزن قیر انتخاب شد (موویا و



شکل ۵. پلی اتیلن‌های ضایعاتی قبل و بعد از خرد شدن

جدول ۶. مشخصات ضایعات پلاستیک

مقدار	مشخصات
۰/۵-۲	ابعاد (میلی متر)
$\leq 0/1$	ضخامت (میلی متر)
۱۱۸	نقطه ذوب ($^{\circ}\text{C}$)
۰/۸۶	چگالی (g/cm^3)

نمونه حاوی ۲۰ و ۴۰ درصد سرپاره، به ترتیب ۵/۳، ۵/۵ و ۵/۸ درصد انتخاب شد. در این مطالعه، پلاستیک بازیافتی به میزان ۱۰ درصد وزن قیر از طریق فرآیند مخلوط خشک، بر اساس نتایج مطالعات محققین قبلی، برای اصلاح مخلوط اضافه شد (موویا کسادا و همکاران، ۲۰۱۹). در نمونه‌های حاوی RAP، رابطه (۱) برای تعیین میزان مورد نیاز قیر استفاده می‌شود (مقدس نژاد و همکاران، ۲۰۱۴؛ فخری و همکاران، ۲۰۱۷):

در این تحقیق، هر یک از مخلوط‌ها به عنوان یک کد منحصر به فرد مشخص شده است. جدول ۷، به طور خلاصه، نام مخلوط‌ها، درصد سنگ‌دانه و ضایعات مورد استفاده برای هر نوع مخلوط را نشان می‌دهد.

۲-۲. آماده سازی نمونه‌ها

از روش طراحی مارشال با ۷۵ ضربه در هر طرف نمونه-های استوانه‌ای مطابق ASTM D1559 برای تعیین درصد بهینه قیر استفاده شد. درصد بهینه قیر برای نمونه شاهد،

در مخلوط بازیافتی و ۲ برابر با ۱۰۰ منهای درصد RAP مورد استفاده در مخلوط بازیافتی است. نتایج به دست آمده برای درصد قیر مورد نیاز در نمونه‌های دارای RAP در جدول ۷ ارائه شده است.

$$P_{nb} = \frac{(100^2 - rP_{sb})P_b}{100(100 - P_{sb}) - (100 - r)P_{sb}} \quad (1)$$

که در آن، P_b درصد کل قیر مورد نیاز، P_{sb} درصد قیر موجود در تراشه آسفالتی، P_{nb} درصد قیر تازه مورد نیاز

جدول ۷. مشخصات مخلوط‌ها

کد مخلوط												سنگ‌دانه
R55			R35			C						
درصد مواد استفاده شده (%)												
پلاستیک بازیافتی	سرباره	تراشه آسفالتی	سنگ‌دانه طبیعی	پلاستیک بازیافتی	سرباره	تراشه آسفالتی	سنگ‌دانه طبیعی	پلاستیک بازیافتی	سرباره	تراشه آسفالتی	سنگ‌دانه طبیعی	
۰	۰	۰	۴۰	۰	۰	۰	۴۰	۰	۰	۰	۴۰	درشت دانه
۰	۰	۵۵	۵	۰	۳۵	۲۵	۰	۰	۰	۰	۶۰	ریزدانه
۲/۲			۰	۳/۳			۰	۵/۳			قیر تازه	درصد قیر
۳/۱				۲				۰			قیر موجود در تراشه آسفالتی	
کد مخلوط												
R55+			R35+			C+						
درصد مواد استفاده شده (%)												
پلاستیک بازیافتی	سرباره	تراشه آسفالتی	سنگ‌دانه طبیعی	پلاستیک بازیافتی	سرباره	تراشه آسفالتی	سنگ‌دانه طبیعی	پلاستیک بازیافتی	سرباره	تراشه آسفالتی	سنگ‌دانه طبیعی	
۰	۰	۰	۴۰	۰	۰	۰	۴۰	۰	۰	۰	۴۰	درشت دانه
۰	۰	۵۵	۵	۰	۳۵	۲۵	۰	۰	۰	۰	۶۰	ریزدانه
۲/۲			۱۰	۳/۳			۱۰	۵/۳			قیر تازه	درصد قیر
۳/۱				۲				۰			قیر موجود در تراشه آسفالتی	
کد مخلوط												
S20R35			S40			S20						
درصد مواد استفاده شده (%)												
پلاستیک بازیافتی	سرباره	تراشه آسفالتی	سنگ‌دانه طبیعی	پلاستیک بازیافتی	سرباره	تراشه آسفالتی	سنگ‌دانه طبیعی	پلاستیک بازیافتی	سرباره	تراشه آسفالتی	سنگ‌دانه طبیعی	
۰	۲۰	۰	۲۰	۰	۴۰	۰	۰	۰	۲۰	۰	۲۰	درشت دانه
۰	۰	۳۵	۲۵	۰	۰	۰	۶۰	۰	۰	۰	۶۰	ریزدانه
۳/۵			۰	۵/۸			۰	۵/۵			قیر تازه	درصد قیر
۲				۰				۰			قیر موجود در تراشه آسفالتی	
کد مخلوط												
S20R35+			S40+			S20+						
درصد مواد استفاده شده (%)												
پلاستیک بازیافتی	سرباره	تراشه آسفالتی	سنگ‌دانه طبیعی	پلاستیک بازیافتی	سرباره	تراشه آسفالتی	سنگ‌دانه طبیعی	پلاستیک بازیافتی	سرباره	تراشه آسفالتی	سنگ‌دانه طبیعی	
۰	۲۰	۰	۲۰	۰	۴۰	۰	۰	۰	۲۰	۰	۲۰	درشت دانه
۰	۰	۳۵	۲۵	۰	۰	۰	۶۰	۰	۰	۰	۶۰	ریزدانه
۳/۵			۱۰	۵/۸			۱۰	۵/۵			قیر تازه	درصد قیر
۲				۰				۰			قیر موجود در تراشه آسفالتی	

حساسیت رطوبتی و خواص مکانیکی مخلوط آسفالتی سبز شامل آسفالت بازیافتی، سرباره و ضایعات پلاستیک

کد مخلوط												سنگدانه
S40R55				S40R35				S20R55				
درصد مواد استفاده شده (%)												
پلاستیک بازیافتی	سرباره	تراشه آسفالتی	سنگدانه طبیعی	پلاستیک بازیافتی	سرباره	تراشه آسفالتی	سنگدانه طبیعی	پلاستیک بازیافتی	سرباره	تراشه آسفالتی	سنگدانه طبیعی	
	۴۰	۰	۰		۴۰	۰	۰		۲۰	۰	۲۰	درشت دانه
	۰	۵۵	۵		۰	۳۵	۲۵		۰	۵۵	۵	ریزدانه
	۲/۷				۳/۸				۲/۴			درصد
	۳/۱				۲				۳/۱			قیر تازه
												قیر موجود در تراشه آسفالتی
کد مخلوط												سنگدانه
S40R55+				S40R35+				S20R55+				
درصد مواد استفاده شده (%)												
پلاستیک بازیافتی	سرباره	تراشه آسفالتی	سنگدانه طبیعی	پلاستیک بازیافتی	سرباره	تراشه آسفالتی	سنگدانه طبیعی	پلاستیک بازیافتی	سرباره	تراشه آسفالتی	سنگدانه طبیعی	
	۴۰	۰	۰		۴۰	۰	۰		۲۰	۰	۲۰	درشت دانه
	۰	۵۵	۵		۰	۳۵	۲۵		۰	۵۵	۵	ریزدانه
	۲/۷				۳/۸				۲/۴			درصد
	۳/۱				۲				۳/۱			قیر تازه
												قیر موجود در تراشه آسفالتی

گرم می‌شود. سپس ساسوبیت و پلاستیک بازیافتی با سنگدانه آهکی، سرباره و تراشه آسفالتی مخلوط شدند. در نهایت قیر به مخلوط اضافه شد. سه نمونه برای هر مخلوط برای تعیین تکرارپذیری نتایج ساخته شد (شکل ۶).

در این مطالعه، برای تهیه نمونه‌ها، سنگدانه‌های آهکی و سرباره در دمای ۱۲۵ درجه سلسیوس به مدت ۶ ساعت در آون گرم شدند. قیر قبل از فرآیند اختلاط به مدت ۱/۵ ساعت در دمای ۱۴۹ درجه سلسیوس در آون نگهداری می‌شود. تراشه آسفالتی قبل از فرآیند اختلاط به مدت ۲ ساعت در آون با دمای ۱۲۵ درجه سلسیوس



شکل ۶. تعدادی از نمونه‌های ساخته شده

۳. روش‌های آزمایش

برای ارزیابی عملکرد مکانیکی مخلوط آسفالتی حاوی تراشه آسفالتی، سرباره فولاد و پلاستیک بازیافتی، آزمایش‌های ذکر شده در جدول ۸ انجام شد.

جدول ۸. آزمایش‌های مورد بررسی در این پژوهش

نام آزمایش	استاندارد آزمایش	اهداف آزمایش
شاخص مارشال	ASTM D1559	بررسی مقاومت در مقابل شیارشدگی، بررسی سختی
مدول کششی غیرمستقیم	ASTM: D4123-82	تعیین مدول برجهندگی
مقاومت فشاری مخلوط‌های آسفالتی	AASHTO T167-05	بررسی مقاومت فشاری
خزش استاتیک	Tex-231-F	بررسی رفتار شیارشدگی، تعیین سختی خزشی
حساسیت رطوبتی (کشش غیرمستقیم لاتمن اصلاح شده)	AASHTO T283	بررسی حساسیت رطوبتی

۳-۱. پایداری مارشال و ضریب مارشال

ضریب مارشال^۱ (MQ) در این تحقیق برای شناسایی عملکرد شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی، یعنی پایداری مارشال بر روانی استفاده می‌شود (زوروب و سوپارما، ۲۰۰۰). ضریب مارشال یک شاخص برای سختی مخلوط‌های آسفالتی است و از آن می‌توان برای قضاوت در مورد مقاومت در برابر تنش برشی و شیارشدگی بهره برد. هرچه مقدار MQ بیشتر باشد، می‌توان دریافت که مخلوط سختی بیشتری دارد و بار بیشتری تحمل می‌کند و مقاومت بیشتری در مقابل شیارشدگی دارد (عربانی و آذرهوش، ۲۰۱۲).

هر نمونه در مقابل سیکل رسم می‌شود. بخشی از این تغییرشکل ماندگار و بخش دیگر آن برگشت پذیر است. مدول مخلوط آسفالتی با رابطه (۲) محاسبه می‌شود (ASTM D. 4123-82، ۱۹۹۵؛ کاربونو و همکاران، ۲۰۰۳):

$$M_r = \frac{P(v + 0.27)}{t\Delta H} \quad (2)$$

که در آن، M_r مدول کششی غیرمستقیم (مگاپاسکال)، ΔH کل تغییرشکل برگشت پذیر نمونه در جهت افقی (میلی متر)، v ضریب پواسون (۰/۳۵) و t طول نمونه (میلی متر) است.

۳-۳. مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری برای تعیین مناسب بودن مخلوط‌های آسفالتی در میدان در برابر بارهای محورهای سنگین ترافیک انجام می‌شود. این آزمایش مطابق استاندارد ASTM D1074-17 انجام می‌گیرد. نمونه‌های مارشال برای آزمایش مقاومت فشاری برای تولید نمونه‌هایی با قطر ۱۰۰ میلی متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی متر برش داده شدند. نمونه‌های آماده شده در دمای ۲۵ درجه سلسیوس به مدت ۴ ساعت نگه داشته شدند و سپس، آزمایش با اعمال بار فشاری با سرعت ثابت ۰/۰۵ میلی متر

۳-۲. مدول کششی غیرمستقیم

آزمون مدول کششی غیرمستقیم، غیرمخرب است. این آزمایش روی نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۴ اینچ و ارتفاع ۲ اینچ انجام شد. در این آزمایش، نمونه بین ۵۰ تا ۲۰۰ سیکل تحت بار مکرر نیم‌سینوسی (یا موج دیگری) با فرکانس‌های ۰/۳، ۰/۵ و ۱ هر تیز و در دماهای ۵، ۲۵ و ۴۰، تحت باری به اندازه‌ی ۱۰ تا ۵۰ درصد مقاومت کششی نمونه قرار می‌گیرد، تغییرشکل افقی نمونه تحت اثر بار توسط کرنش سنج‌ها ثبت می‌گردد و نمودار تغییرشکل

¹- Marshall Quotient

و سپس باربرداری می‌شود و ریزسنگ‌ها تمام جابه‌جایی-های نمونه‌ها در طول پیش بارگذاری، بارگذاری و باربرداری را ثبت می‌کنند. از تقسیم بیشترین تغییرشکل به طول نمونه، کرنش حاصل می‌شود (رابطه ۳) و سختی خزشی از رابطه (۴) محاسبه می‌شود (تام و همکاران، ۲۰۰۰):

$$\text{Strain} = \frac{\text{تغییر شکل}}{\text{طول نمونه}} \quad (۳)$$

که در آن، Strain کرنش نمونه (میلی‌متر) است.

$$\text{Creep Stiffness} = \frac{69\text{KPa}(10\text{psi})}{\text{total strain}} \quad (۴)$$

که در آن، Creep Stiffness سختی خزشی (KPa) و total strain کرنش نهایی (میلی‌متر) است.

در دقیقه به ازای هر میلی‌متر از ارتفاع نمونه، برای اندازه-گیری حداکثر بار تا شکست نمونه انجام شد (سراسم و همکاران، ۲۰۱۴؛ ASTM D. 1074-17، ۲۰۱۷).

۳-۴. خزش استاتیک

آزمایش خزش استاتیک روی نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۴ اینچ و ارتفاع ۲ اینچ انجام می‌شود تا عملکرد شیارشدگی و سختی نمونه‌ها را بررسی کنند (شکل ۷). این آزمایش در دمای ۴۰ درجه سلسیوس و با اعمال ۳ سیکل بارگذاری به اندازه‌ی ۵۵۶ نیوتن و موج مربعی با زمان یک دقیقه بارگذاری، یک دقیقه استراحت به عنوان پیش‌بارگذاری و برای بارگذاری اصلی همین میزان بار به طور ثابت به مدت یک ساعت روی نمونه اعمال می‌شوند



شکل ۷. آزمایش خزش استاتیک

ی آنها تعیین و در نهایت تعداد ضربه بهینه مشخص می‌شود. نمونه‌ها به دو دسته خشک و اشباع تقسیم می‌شوند. نمونه‌های اشباع ابتدا ۷۰ تا ۸۰ درصد تحت فشار خلأ، اشباع شده و به مدت ۱۶ ساعت در دمای ۱۸- درجه سلسیوس و بعد از آن به مدت ۲۴ ساعت در آب ۶۰ درجه سلسیوس و سپس ۲ ساعت در آب ۲۵ درجه سلسیوس قرار می‌گیرند. در حالی که نمونه‌های خشک

۳-۵. حساسیت رطوبتی

در این مطالعه، آسیب ناشی از رطوبت نمونه با نسبت مقاومت کششی^۱ (TSR) مطابق با AASHTO T283 ارزیابی می‌شود. این آزمایش روی نمونه‌های متراکم شده با هوای ۷ درصد انجام می‌گردد. برای رسیدن به این درصد هوا در نمونه‌ها، با استفاده از روش سعی و خطا، نمونه‌ها را با ضربات مختلف ساخته و سپس درصد هوا

¹- Tensile strength ratio

که در آن، TSR مقاومت نمونه‌ها در برابر رطوبت می‌کند. حساسیت رطوبتی مخلوط با مقایسه مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های خشک و اشباع مشخص می‌شود.

آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم روی نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۰۱,۶ میلی‌متر و ارتفاع تقریباً ۶۳,۵ میلی‌متر تحت بارگذاری با نرخ ثابت (۵۰/۸ میلی‌متر بر دقیقه) انجام شد. نسبت مقاومت کششی (TSR) به عنوان نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم^۱ (ITS) نمونه اشباع به نمونه‌های خشک تعریف می‌شود. ITS و TSR نمونه به ترتیب از روابط (۵) و (۶) محاسبه شد.

تنها مدت دو ساعت را در آب ۲۵ درجه سلسیوس سپری می‌کند. حساسیت رطوبتی مخلوط با مقایسه مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های خشک و اشباع مشخص می‌شود.

آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم روی نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۰۱,۶ میلی‌متر و ارتفاع تقریباً ۶۳,۵ میلی‌متر تحت بارگذاری با نرخ ثابت (۵۰/۸ میلی‌متر بر دقیقه) انجام شد. نسبت مقاومت کششی (TSR) به عنوان نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم^۱ (ITS) نمونه اشباع به نمونه‌های خشک تعریف می‌شود. ITS و TSR نمونه به ترتیب از روابط (۵) و (۶) محاسبه شد.

$$ITS = \frac{2000P}{\pi t D} \quad (5)$$

که در آن، ITS مقاومت کششی (کیلوپاسکال)، P حداکثر بار (نیوتن)، t ضخامت نمونه (میلی‌متر) و D قطر نمونه (میلی‌متر) است.

$$TSR = \frac{ITS_{\text{اشباع}}}{ITS_{\text{خشک}}} \quad (6)$$

۴. نتایج و بحث

۴-۱. پایداری مارشال و ضریب مارشال
نتایج پایداری مارشال و مقدار روانی در آزمایش مارشال در جدول ۹ ارائه شده است. در این آزمایش، حداکثر نیروی قابل تحمل برای نمونه تا زمان گسیختگی (استقامت مارشال) و کرنش تا زمان رسیدن به این نیرو (روانی) ثبت می‌گردد. علاوه بر اینکه استقامت مارشال، خود پارامتری برای بررسی مقاومت نمونه‌ها است، از تقسیم استقامت مارشال بر کرنش، پارامتر شاخص مارشال (MQ) به دست می‌آید، که از آن می‌توان برای ارزیابی مقاومت شیارشدگی نیز بهره برد.

جدول ۹. پایداری مارشال و مقدار روانی

MQ	قیر بهینه (درصد)		روانی (میلی‌متر)	پایداری مارشال (کیلونیوتن)	نام نمونه	قیر بهینه (درصد)		MQ	روانی (میلی‌متر)	پایداری مارشال (کیلونیوتن)	نام نمونه
	قیر تازه	قیر تراشه				قیر تازه	قیر تراشه				
۵/۲۷	-	۵/۸	۲/۷۵	۱۴/۵		-	۵/۳	۲/۳۲	۳/۶	۸/۳۴	
۵/۳۷	-	۵/۸	۲/۷	۱۴/۵	S40+	-	۵/۳	۲/۴۳	۳/۴	۸/۲۸	C
۵/۰۶	-	۵/۸	۲/۹۵	۱۴/۹۵		-	۵/۳	۲/۳۵	۳/۵	۸/۲۵	
۵/۳۹	۱/۷۵	۳/۷۵	۲/۹۵	۱۵/۹		-	۵/۳	۳/۲۵	۳	۹/۷۵	
۵/۲۴	۱/۷۵	۳/۷۵	۳/۰۵	۱۶	S20R35	-	۵/۳	۲/۸۸	۳/۴	۹/۸	C+
۵/۲۸	۱/۷۵	۳/۷۵	۳	۱۵/۸۶		-	۵/۳	۲/۸۴	۳/۵	۹/۹۴	
۵/۷۵	۱/۷۵	۳/۷۵	۳/۳	۱۸/۹۹		۱/۷۵	۳/۵۵	۲/۷	۳/۶	۹/۷۴	
۵/۷۲	۱/۷۵	۳/۷۵	۳/۳	۱۸/۸۷	S20R35+	۱/۷۵	۳/۵۵	۲/۹۱	۳/۳	۹/۶	R35
۵/۷۳	۱/۷۵	۳/۷۵	۳/۳	۱۸/۹		۱/۷۵	۳/۵۵	۳/۱۹	۳	۹/۵۸	

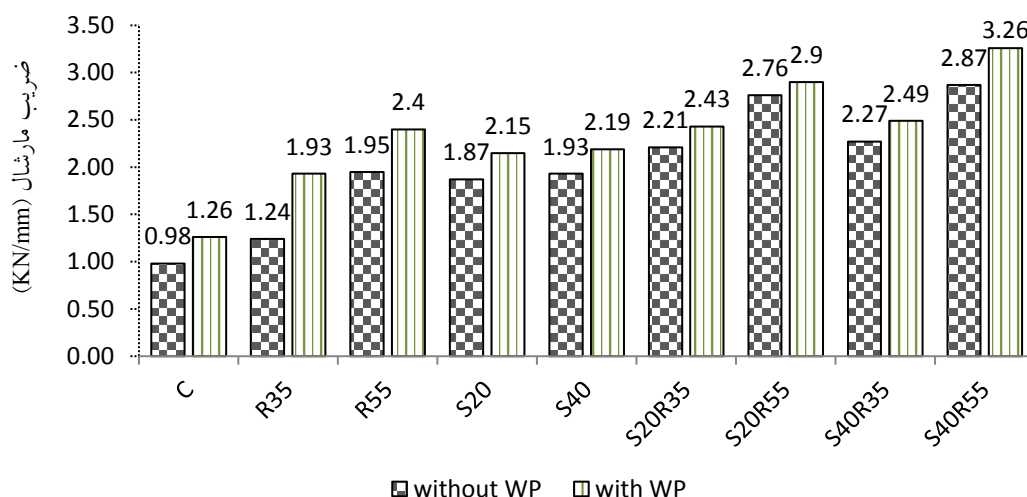
¹ - Indirect tensile strength

۶/۴۷	۲/۷۵	۲/۷۵	۲/۸	۱۸/۱۲		۱/۷۵	۳/۵۵	۴/۶۴	۲/۸	۱۳	
۶/۸۸	۲/۷۵	۲/۷۵	۲/۶۱	۱۷/۹۸	S20R55	۱/۷۵	۳/۵۵	۴/۶۸	۲/۷	۱۲/۶۵	R35+
۶/۷۶	۲/۷۵	۲/۷۵	۲/۶۹	۱۸/۲		۱/۷۵	۳/۵۵	۴/۴۵	۲/۹	۱۲/۹	
۷/۰۲	۲/۷۵	۲/۷۵	۳	۲۱/۰۸		۲/۷۵	۲/۵۵	۴/۸۲	۳/۳	۱۵/۹	
۷/۳۴	۲/۷۵	۲/۷۵	۲/۸۶	۲۱	S20R55+	۲/۷۵	۲/۵۵	۴/۴۸	۳/۶	۱۶/۱۳	R55
۶/۷۸	۲/۷۵	۲/۷۵	۳/۱۴	۲۱/۳۱		۲/۷۵	۲/۵۵	۴/۸۵	۳/۳	۱۶	
۵/۶۶	۱/۷۵	۴/۰۵	۲/۹	۱۶/۴۲		۲/۷۵	۲/۵۵	۵/۹۱	۳/۱	۱۸/۳۳	
۵/۲۹	۱/۷۵	۴/۰۵	۳/۲	۱۶/۹۳	S40R35	۲/۷۵	۲/۵۵	۵/۴	۳/۵	۱۸/۹	R55+
۵/۲۵	۱/۷۵	۴/۰۵	۳/۲	۱۶/۸۱		۲/۷۵	۲/۵۵	۶/۱۵	۳	۱۸/۴۵	
۶/۳۳	۱/۷۵	۴/۰۵	۳/۱۵	۱۹/۹۵		-	۵/۵	۴/۵۷	۲/۵	۱۱/۴۲	
۵/۹۷	۱/۷۵	۴/۰۵	۳/۳۵	۲۰	S40R35+	-	۵/۵	۴/۲۷	۲/۶	۱۱/۱	S20
۵/۸۵	۱/۷۵	۴/۰۵	۳/۴	۱۹/۹		-	۵/۵	۴/۶۶	۲/۴	۱۱/۲	
۶/۵۶	۲/۷۵	۳/۰۵	۳/۴	۲۲/۴		-	۵/۵	۵/۱۲	۲/۹	۱۴/۸۶	
۶/۷۷	۲/۷۵	۳/۰۵	۳/۳	۲۲/۳۵	S40R55	-	۵/۵	۵/۲۹	۲/۷۵	۱۴/۵۷	S20+
۶/۹۹	۲/۷۵	۳/۰۵	۳/۲	۲۲/۳۹		-	۵/۵	۵/۲۶	۲/۷۵	۱۴/۴۶	
۷/۸۱	۲/۷۵	۳/۰۵	۲/۸	۲۱/۸۶		-	۵/۸	۴/۵۲	۳/۱	۱۴/۰۱	
۷/۸۲	۲/۷۵	۳/۰۵	۲/۸	۲۱/۹۱	S40R55+	-	۵/۸	۵/۰۲	۲/۷	۱۳/۵۵	S40
۷/۸۵	۲/۷۵	۳/۰۵	۲/۸	۲۱/۹۹		-	۵/۸	۴/۳۶	۳/۲	۱۳/۹۶	

دلیل این افزایش را می‌توان افزایش قفل و بست سنگ‌دانه‌ها در نمونه به دلیل زبری سطح سرباره و زاویه-دار بودن آن عنوان نمود. همچنین، با افزایش درصد تراشه آسفالتی در مخلوط، میزان قیر پیر شده در نمونه‌ها افزایش می‌یابد که باعث افزایش شاخص مارشال می‌شود. این افزایش در مقدار شاخص مارشال بیانگر آن است که با افزودن تراشه آسفالتی به مخلوط آسفالتی می‌توان مقاومت آن را در مقابل خرابی شیارشدگی بالابرد. همچنین، مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار MQ مربوط به نمونه S40R55+ است. همانطور که مشخص است، RAP، سرباره و پلاستیک مطابق انتظار بر MQ مخلوط تأثیر مثبت می‌گذارند.

با توجه به جدول ۹، یک نتیجه کلی به دست می‌آید که حضور پلیمر ضایعاتی باعث بهبود شاخص مارشال (MQ) شده است. همچنین، در اکثر موارد باعث افزایش استقامت مارشال شده است. این افزایش مقاومت را می‌توان به سخت‌تر شدن قیر در اثر ترکیب با پلیمر ضایعاتی نسبت داد. افزایش شاخص مارشال بیانگر مقاومت بیشتر در مقابل خرابی شیارشدگی است. هرچند در خصوص عدد روانی اظهار نظر قطعی نمی‌توان کرد، به طوری که در برخی نمونه‌ها افزوده شدن پلیمر ضایعاتی باعث افزایش عدد روانی و در برخی دیگر باعث کاهش این پارامتر شده است.

همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، افزایش درصد سرباره باعث افزایش شاخص مارشال می‌شود.



شکل ۸. ضریب مارشال

در اثر افزودن پلاستیک در دمای ۶۰ درجه سلسیوس می‌تواند دلیل اصلی افزایش شاخص MQ باشد.

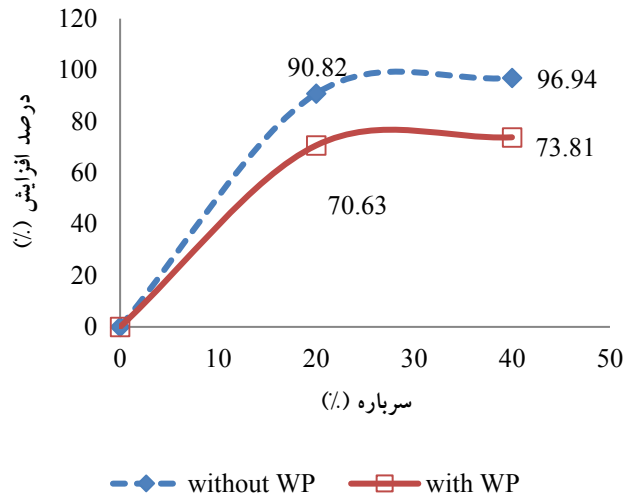
درصد افزایش MQ ناشی از اثر پلاستیک در نمونه‌های مختلف در جدول ۱۰ ارائه شده است. به عنوان مثال، در نمونه C+ و R35+، MQ به ترتیب ۲۸/۵۷ و ۵۵/۶۵ درصد افزایش یافته است. کاهش ویسکوزیته قیر

جدول ۱۰. درصد افزایش ضریب مارشال با اثر پلاستیک بازیافتی

نام نمونه	C+	R35+	R55+	S20+	S40+	S20R35+	S20R55+	S40R35+	S40R55+
افزایش (%)	۲۸/۵۷	۵۵/۶۵	۲۳/۰۸	۱۴/۹۷	۱۳/۴۷	۹/۹۵	۵/۰۷	۹/۶۹	۱۳/۵۹

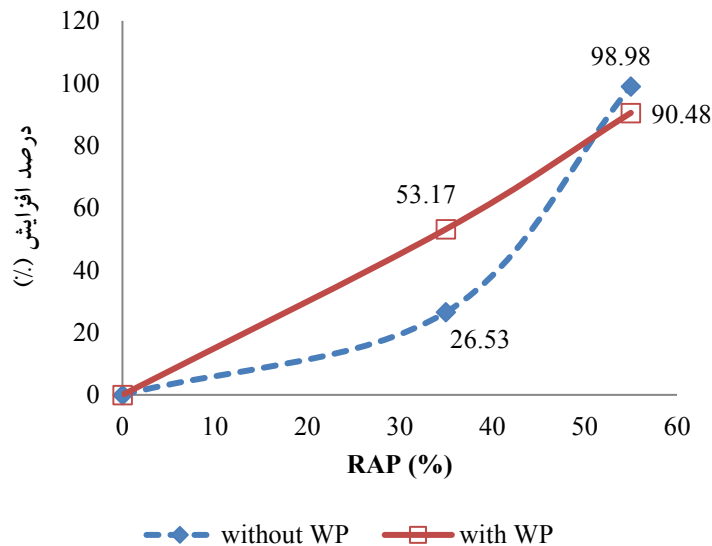
S40+ و S40 به ترتیب ۷۳/۸۱ و ۹۶/۹۴ درصد ضریب مارشال بیشتر از C+ و C دارند (شکل ۱۰). خواص سرباره مانند شکل ذرات، زاویه‌دار بودن و زبری سطح عوامل اصلی در افزایش MQ مخلوط‌ها هستند.

درصد افزایش MQ ناشی از اثر سرباره و RAP در نمونه‌ها به ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰ ارائه شده است. با توجه به شکل‌های ۹ و ۱۰، با افزایش درصد سرباره و RAP در مخلوط در هر دو حالت نمونه پلیمری و غیرپلیمری، مقدار MQ افزایش یافته است. به عنوان مثال،



شکل ۹. مقایسه درصد افزایش ضریب مارشال C یا C+ با اثر سرپاره

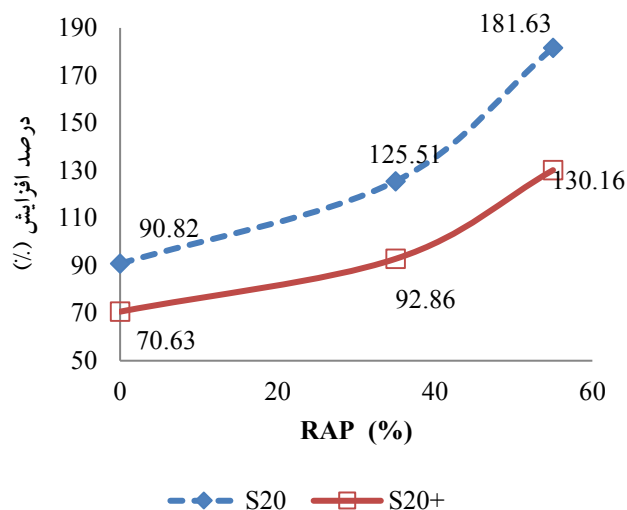
افزایش MQ ناشی از اثر RAP برای R55+ و R55 به ترتیب ۹۰/۴۸ و ۹۸/۸ درصد در مقایسه با C+ و C به دست آمد (شکل ۱۰). این افزایش به دلیل افزودن آسفالت بازیافتی در مخلوط و افزایش مقدار قیر پیر شده در مخلوط است.



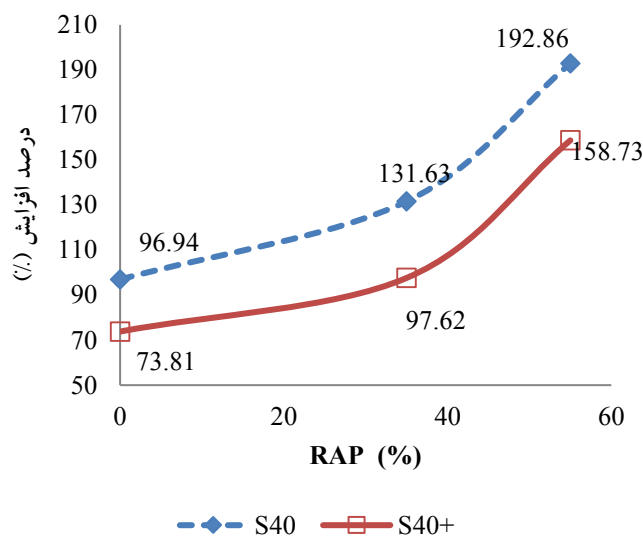
شکل ۱۰. مقایسه درصد افزایش ضریب مارشال C یا C+ با اثر تراشه آسفالتی

در حالی که این مقادیر برای S40+ و S40 به ترتیب معادل ۷۳/۸۱ و ۹۶/۹۴ درصد بوده است. سرپاره و تراشه آسفالتی در کنار یکدیگر عملکرد مثبتی در پارامتر MQ نشان داده‌اند.

همانطور که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده، افزایش RAP در مخلوط حاوی ۲۰ و ۴۰ درصد سرپاره منجر به افزایش MQ شده است. به عنوان مثال، ضریب مارشال S40R55+ و S4055، به ترتیب ۱۵۸/۷۳ و ۱۹۲/۸۶ درصد نسبت به C+ و C افزایش یافته است،



شکل ۱۱. مقایسه درصد افزایش ضریب مارشال C یا C+ با اثر تراشه آسفالتی در نمونه‌های با ۲۰ درصد سرباره



شکل ۱۲. مقایسه درصد افزایش ضریب مارشال C یا C+ با اثر تراشه آسفالتی در نمونه‌های با ۴۰ درصد سرباره

کوچکتر از ۰/۰۵، برای Sig، بیانگر این است که فرض صفر (بی‌اثر بودن متغیر در مدل)، رد می‌شود. همانطور که از جدول مشخص است، Sig مربوط به درصد RAP و سرباره کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد و فرض صفر برای این متغیرها رد می‌شود؛ یعنی در مدل باقی می‌مانند. ولی می‌توان گفت ضرورتی برای وجود درصد پلاستیک در مدل وجود ندارد.

نتایج همبستگی پیرسون ارائه شده در جدول ۱۱ نشان می‌دهد که درصد RAP و سرباره در سطح معنی‌داری ۵ درصد، تأثیر قابل توجهی بر شاخص MQ دارند. ضریب همبستگی پیرسون، همبستگی خطی بین متغیرهای وابسته و مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل است. هر چه این ضریب به ۱ (یا -۱) نزدیکتر باشد، مدل توانسته سهم بیشتری از تغییرات متغیر وابسته را نشان دهد. مقدار

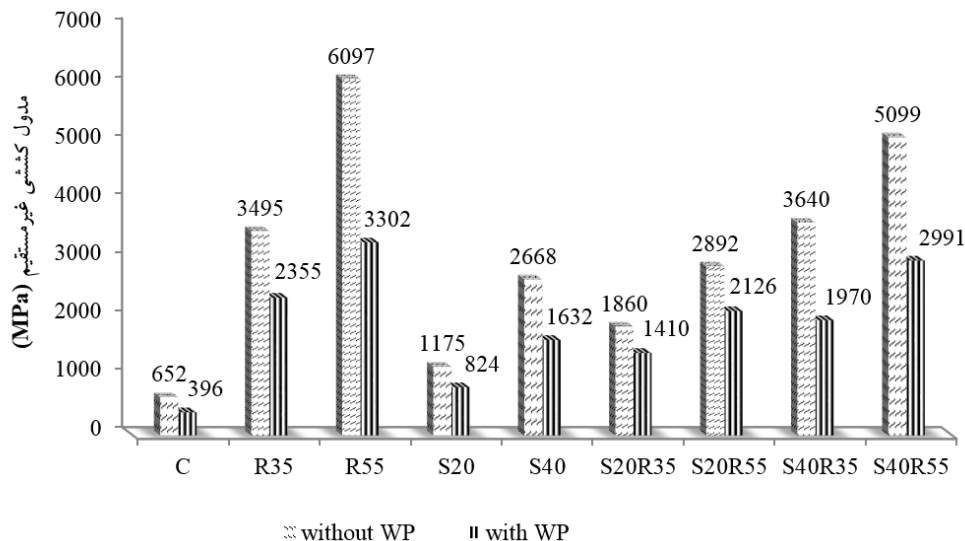
جدول ۱۱. همبستگی بین درصد RAP، سرباره، پلاستیک و شاخص مارشال

پلاستیک (%)	سرباره (%)	RAP (%)		
۰/۲۸	۰/۵۹۶	۰/۶۵۹	همبستگی پیرسون	
۰/۰۴	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	Sig.(2-tailed)	MQ
۵۴	۵۴	۵۴	تعداد داده‌ها	

۲-۴. مدول کششی غیرمستقیم

طور قابل توجهی افزایش یافته است. این افزایش را می‌توان با افزایش قفل و بست سنگ‌دانه‌ها در اثر افزایش زیری سطح سرباره مرتبط دانست. همچنین، مشاهده می‌شود که افزودن پلاستیک در مخلوط‌ها باعث کاهش مقدار مدول کششی غیرمستقیم می‌شود. این کاهش به دلیل افزایش ویسکوزیته قیر در دمای ۲۵ درجه سلسیوس در اثر افزودن پلاستیک و خاصیت ارتجاعی پلاستیک است.

نتایج مدول کششی غیرمستقیم در شکل ۱۳ ارائه شده است. با توجه به شکل ۱۳، با افزایش درصد RAP در نمونه‌های پلیمری و غیرپلیمری، به دلیل قیر پیرشده موجود در تراشه آسفالتی است که باعث افزایش سختی می‌شود، مدول کششی می‌یابد. به طور مشابه، با افزایش درصد سرباره در مخلوط در هر دو حالت نمونه‌های پلیمری و غیرپلیمری، مقدار مدول کششی غیرمستقیم به



شکل ۱۳. مدول کششی غیرمستقیم

کاهش، به دلیل ویسکوزیته بیشتر پلاستیک نسبت به قیر و سفت شدن سریع‌تر در دمای ۲۵ درجه سلسیوس بوده است.

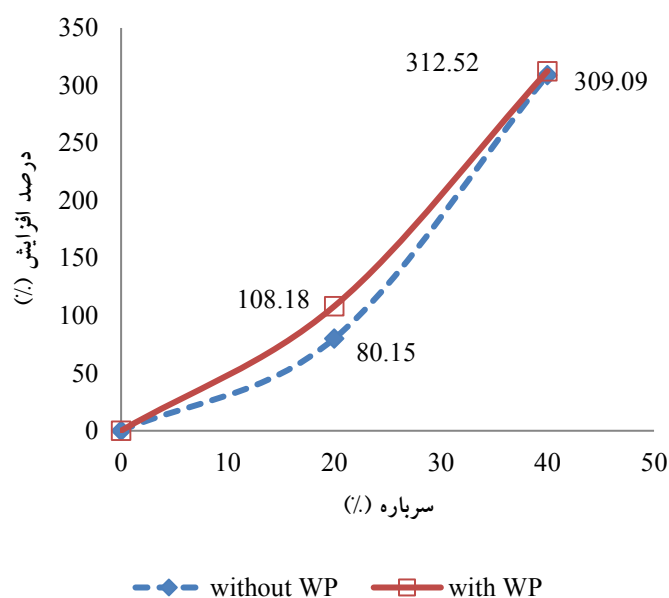
درصد کاهش مدول کششی غیرمستقیم ناشی از اثر پلاستیک در نمونه‌های مختلف در جدول ۱۲ موجود است. به عنوان مثال، در نمونه شاهد و R35+، مدول به ترتیب ۳۹/۳۳ و ۳۲/۶۱ درصد کاهش می‌یابد. این

جدول ۱۲. درصد کاهش مدول کششی غیرمستقیم با اثر پلاستیک بازیافتی

نام نمونه	C+	R35+	R55+	S20+	S40+	S20R35+	S20R55+	S40R35+	S40R55+
افزایش (%)	۳۹/۳۳	۳۲/۶۱	۴۵/۸۴	۲۹/۸۹	۳۸/۸۲	۲۴/۱۷	۲۶/۴۸	۴۵/۸۸	۴۱/۳۴

است. به عنوان مثال، مدول کششی غیر مستقیم S40+ و S40 به ترتیب ۳۱۲/۵۲ و ۳۰۹/۰۹ درصد بیشتر از C+ و C است (شکل ۱۴). قفل و بست سنگ‌دانه‌ها ناشی از ترکیب سربراره در مخلوط، عامل اصلی در افزایش مدول کششی غیرمستقیم است.

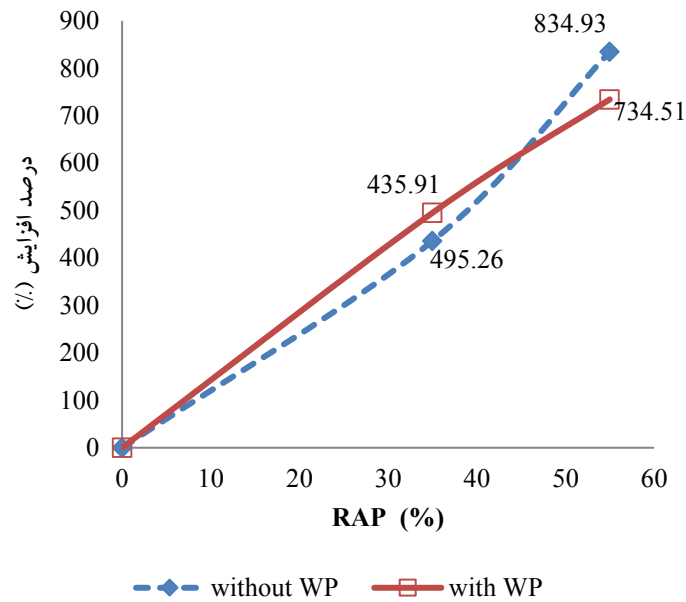
درصد‌های افزایش مدول کششی غیرمستقیم به دلیل سربراره و اثر RAP در نمونه‌ها به ترتیب در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ ارائه شده است. همانطور که در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است، با افزایش درصد سربراره و RAP در مخلوط در هر دو حالت نمونه‌های پلیمری و غیرپلیمری، مدول به میزان قابل توجهی افزایش یافته



شکل ۱۴. مقایسه درصد افزایش مدول کششی غیرمستقیم C یا C+ با اثر سربراره

مقدار مدول کششی غیرمستقیم داشته است، که این امر می‌تواند به ریزدانه بودن تراشه آسفالتی و درشت‌دانه بودن سربراره و همچنین اثر بیشتر قیر پیرشده تراشه‌ها، مرتبط باشد.

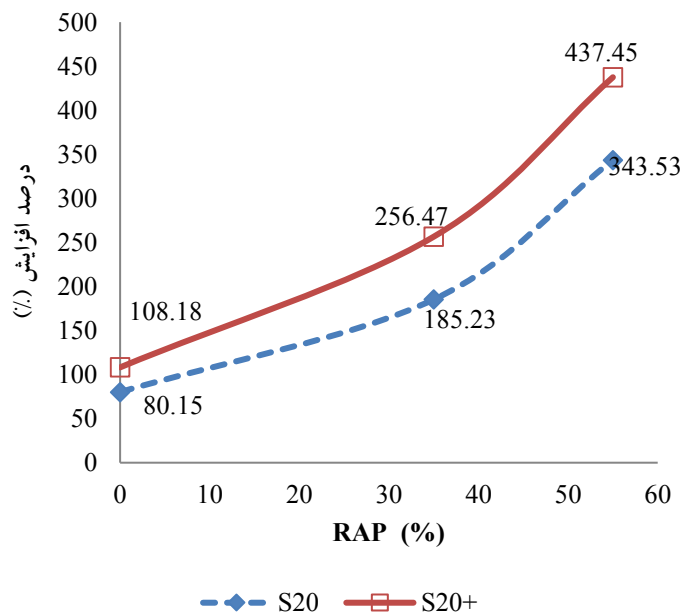
افزایش مدول به دلیل اثر RAP برای R55+ و R55 به ترتیب ۷۳۴/۵۱ و ۷۳۴/۹۳ درصد در مقایسه با C+ و C بود (شکل ۱۵). این افزایش به دلیل قیر پیرشده موجود در تراشه آسفالتی است که باعث افزایش سختی می‌شود. افزودن تراشه آسفالتی (نسبت به سربراره) تأثیر بیشتری بر



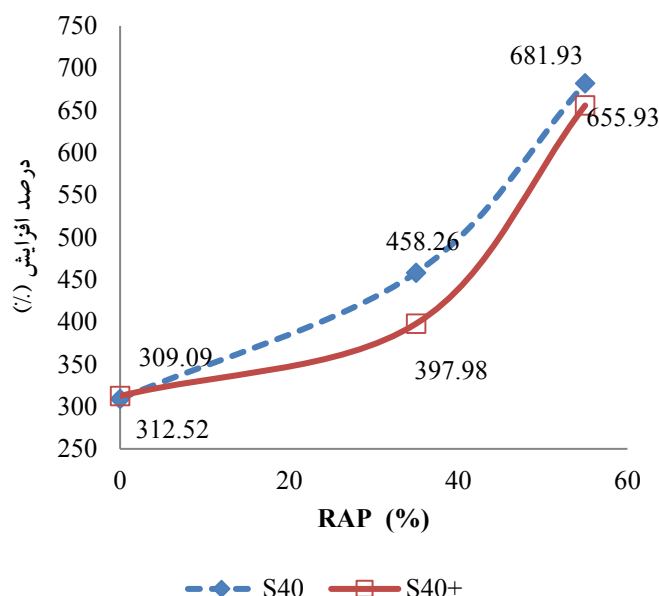
شکل ۱۵. مقایسه درصد افزایش مدول کششی غیرمستقیم C یا C+ با اثر تراشه آسفالتی

در S40+، مدول در مقایسه با C+، ۶۵۵/۹۳ درصد افزایش می‌یابد، در حالی که این مقادیر برای S40+ برابر ۳۱۲/۲ درصد بود.

همانطور که در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ نشان داده شده، افزایش درصد RAP در مخلوط حاوی ۲۰ و ۴۰ درصد سرباره باعث افزایش مدول کششی غیرمستقیم شده است. به عنوان مثال، به دلیل ترکیب ۵۵ درصد RAP



شکل ۱۶. مقایسه درصد افزایش مدول کششی غیرمستقیم C یا C+ با اثر تراشه آسفالتی در نمونه‌های با ۲۰ درصد سرباره



شکل ۱۷. مقایسه درصد افزایش مدول کششی غیرمستقیم C یا C+ با اثر تراشه آسفالتی در نمونه‌های با ۴۰ درصد سرباره

برای Sig، نشانگر ارائه مدل مناسب رگرسیون است و می‌توان نتیجه گرفت که متغیرهای مستقل، متغیر وابسته را پیش بینی می‌کنند. مقدار ۰/۰۵، همان خطای نوع اول یا سطح آزمون در نظر گرفته می‌شود، که در این مدل، تنها Sig مربوط به درصد RAP کمتر از ۰/۰۵ است.

نتایج همبستگی پیرسون در جدول ۱۳ نشان داده شده است. می‌توان استنباط کرد که درصد RAP در سطح معنی‌داری ۵ درصد تأثیر قابل توجهی دارد. اما رابطه بین سرباره، پلاستیک و مدول کششی غیرمستقیم در سطح اهمیت ۵ درصد معنی‌دار نبود. مقدار کوچکتر از ۰/۰۵،

جدول ۱۳. همبستگی بین درصد RAP، سرباره، پلاستیک و مدول کششی غیرمستقیم

پلاستیک (%)	سرباره (%)	RAP (%)	همبستگی پیرسون	Mr
-۰/۰۹۹	۰/۱۸۶	۰/۳۹۹	Sig.(2-tailed)	
۰/۴۷۶	۰/۱۷۹	۰/۰۰۳	تعداد داده‌ها	
۵۴	۵۴	۵۴		

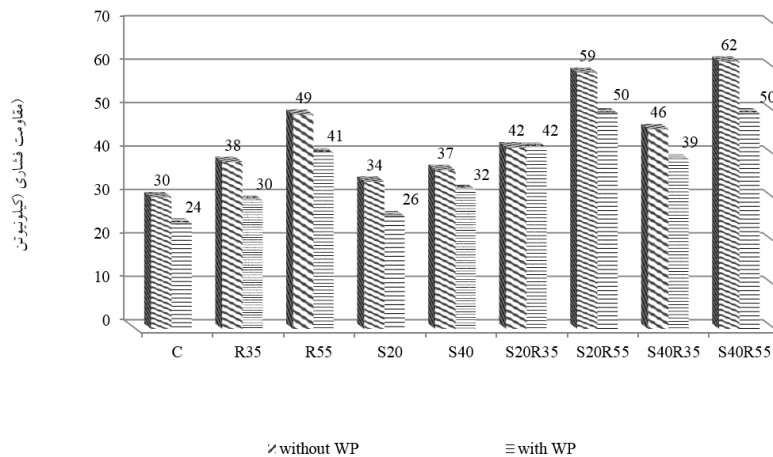
۳-۴. مقاومت فشاری

افزایش مقاومت فشاری می‌گردد، که این تأثیر را می‌توان به دلیل چفت و بست بهتر سرباره‌ها در یکدیگر دانست. مقاومت فشاری با افزایش درصد تراشه آسفالتی نیز افزایش می‌یابد. این افزایش با قیر پیرشده درون تراشه آسفالتی مرتبط است. قیر پیرشده باعث مستحکم‌تر شدن مخلوط در مقابل بار فشاری می‌گردد. ترکیب پلاستیک در مخلوط‌ها بر مقاومت فشاری نمونه‌ها تأثیر منفی داشته و باعث کاهش آن شده است. کمترین مقاومت فشاری

برای بررسی تأثیر تراشه، سرباره و پلیمر ضایعاتی بر مخلوط آسفالتی، نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر ساخته شد. حداکثر نیرویی که نمونه‌ها تا قبل از گسیخته شدن تحمل می‌کنند به عنوان مقاومت فشاری در نظر گرفته می‌شود. شکل ۱۸ مقاومت فشاری انواع مختلف مخلوط‌ها را برای نمونه‌های پلیمری و غیرپلیمری نشان می‌دهد. افزایش درصد سرباره باعث

مقاومت فشاری در نمونه‌ها می‌گردد. همچنین، این افزایش با افزایش درصد تراشه آسفالتی و سرباره رابطی معناداری دارد.

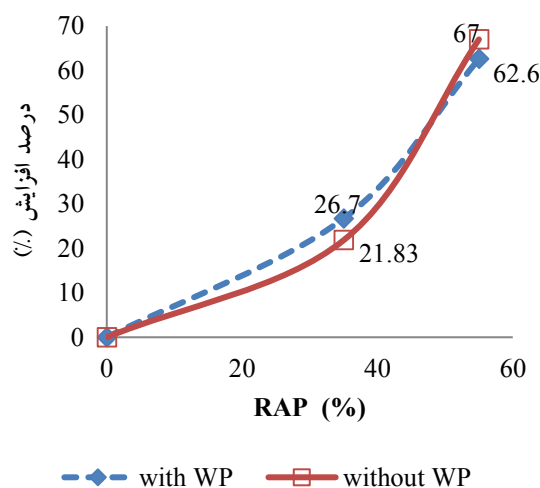
در نمونه C+ مشاهده شده است. بیشترین مقدار این مقاومت نیز در نمونه S40R55 رخ داده که بیانگر آن است که افزودن تراشه آسفالتی و سرباره باعث افزایش



شکل ۱۸. مقاومت فشاری

راستا، مخلوط WMA حاوی ۵۵ درصد RAP در نمونه-های پلیمری و غیرپلیمری به ترتیب ۶۲/۶ و ۶۷ درصد مقاومت فشاری بیشتری در مقایسه با C و C+ دارند.

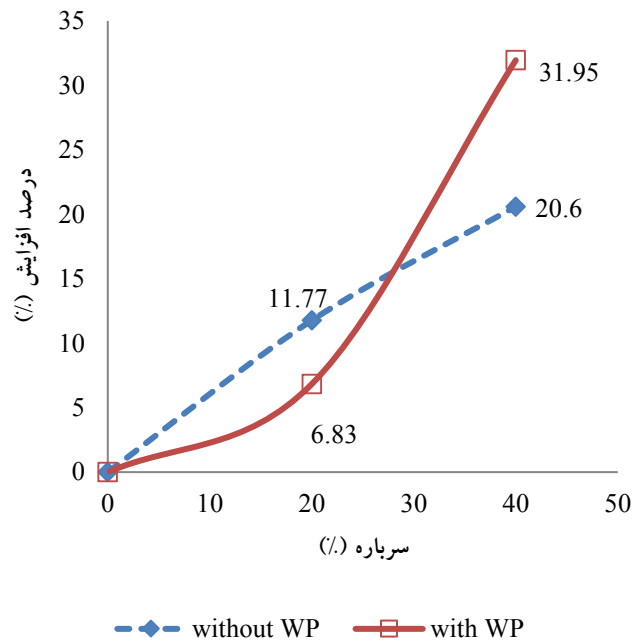
همانطور که در شکل ۱۹ نشان داده شده است، با افزایش درصد RAP، مقاومت فشاری به دلیل ترکیب آسفالت بازیافتی در نمونه‌ها افزایش یافته است. در این



شکل ۱۹. مقایسه درصد افزایش مقاومت فشاری C یا C+ با اثر تراشه آسفالتی

۲۰). یکی از عوامل حیاتی که بر قدرت مخلوط آسفالتی تأثیر می‌گذارد، قفل و بست سنگ‌دانه‌ها است. بنابراین، با افزایش درصد سرباره، انتظار می‌رود مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش یابد.

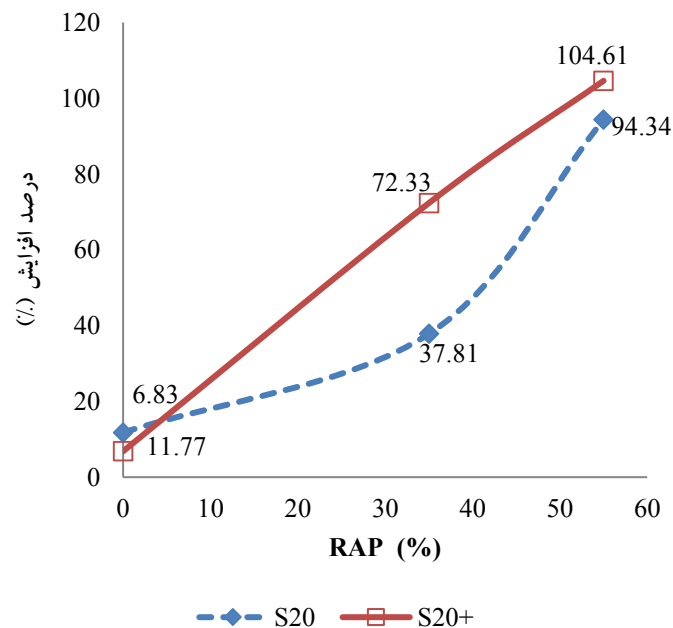
همچنین می‌توان استنباط کرد که با افزایش درصد سرباره در مخلوط، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. در S40 و S40+، مقاومت فشاری به ترتیب ۳۱/۹۵ و ۲۰/۶ درصد در مقایسه با C و C+ افزایش یافته است (شکل



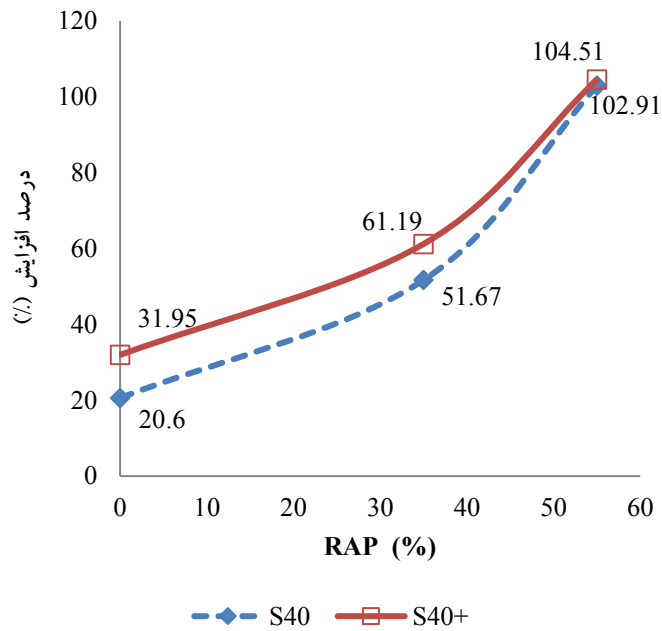
شکل ۲۰. مقایسه درصد افزایش مقاومت فشاری C یا C+ با اثر سربراره

فشاری در مقایسه با C+ به ترتیب ۱۰۴/۵۱ و ۶۱/۱۹ درصد افزایش می‌یابد. در مقایسه، این مقادیر برای S40+ برابر ۳۱/۹۵ درصد بود

همانطور که در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ نشان داده شده، افزایش درصد RAP در مخلوط حاوی ۲۰ و ۴۰ درصد سربراره باعث افزایش مقاومت فشاری شده است. با توجه به ترکیب ۵۵ و ۳۵ درصد RAP در S40+، مقاومت



شکل ۲۱. مقایسه درصد افزایش مقاومت فشاری C یا C+ با اثر تراشه آسفالتی در نمونه‌های با ۲۰ درصد سربراره



شکل ۲۲. مقایسه درصد افزایش مقاومت فشاری C یا C+ با اثر تراشه آسفالتی در نمونه‌های با ۴۰ درصد سرباره

که فرض صفر (بی‌اثر بودن متغیر در مدل)، رد می‌شود. همانطور که از این جدول مشخص است، Sig مربوط درصد RAP، سرباره و پلاستیک کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد و فرض صفر برای این متغیرها رد می‌شود.

بر اساس نتایج همبستگی پیرسون ارائه شده در جدول ۱۴ می‌توان استنباط کرد که درصد RAP، سرباره و پلاستیک در سطح معنی‌داری ۵ درصد تأثیر قابل توجهی دارند. مقدار کوچکتر از ۰/۰۵، برای Sig، بیانگر این است

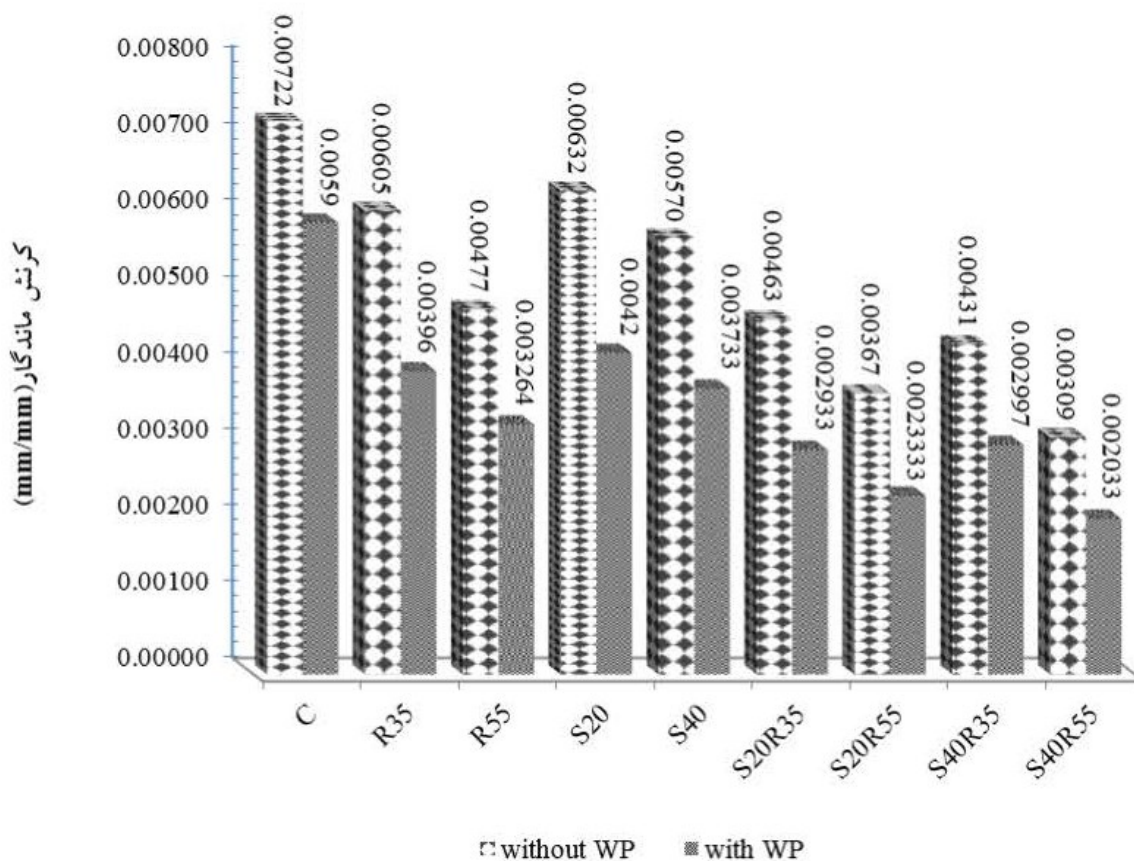
جدول ۱۴. همبستگی بین درصد RAP، سرباره، پلاستیک و مقاومت فشاری

پلاستیک (%)	سرباره (%)	RAP (%)	
-۰/۴۱۹	۰/۳۷۶	۰/۷۱۷	همبستگی پیرسون
۰/۰۰۲	۰/۰۰۵	۰/۰۰۱	Sig.(2-tailed) مقاومت فشاری
۵۴	۵۴	۵۴	تعداد داده‌ها

مخلوط S40R55+ کمترین مقدار تغییرشکل دائمی را نشان می‌دهد که مقاومت مواد را در برابر شیارشدگی اندازه‌گیری می‌کند. کمترین مقدار تغییرشکل دائمی، مخلوط سخت‌تری را نشان می‌دهد و بنابراین، این مخلوط در برابر شیارشدگی مقاوم‌تر است.

۴-۴. خزش استاتیک

شکل ۲۳ نشان دهنده نتایج تغییرشکل دائمی است که در مطالعه حاضر برای هر مخلوط به دست آمده است. در این شکل، می‌توان تشخیص داد که RAP، سرباره و پلاستیک بر عملکرد تغییرشکل دائمی تأثیر مثبت دارند.



شکل ۲۳- کرنش ماندگار

شکل ۲۳ نشان داده شده است، افزودن پلیاستیک در مخلوطها باعث کاهش تغییرشکل دائمی می شود. این کاهش به دلیل افزایش ویسکوزیته قیر در دمای ۴۰ درجه سلسیوس در اثر افزودن پلیاستیک است. درصد کاهش تغییرشکل دائمی ناشی از اثر پلیاستیک در نمونه های مختلف در جدول ۱۵ ارائه شده است. به عنوان مثال، در R55 و R35، تغییرشکل دائمی به ترتیب ۳۴/۵۷ و ۳۱/۵ درصد کاهش می یابد.

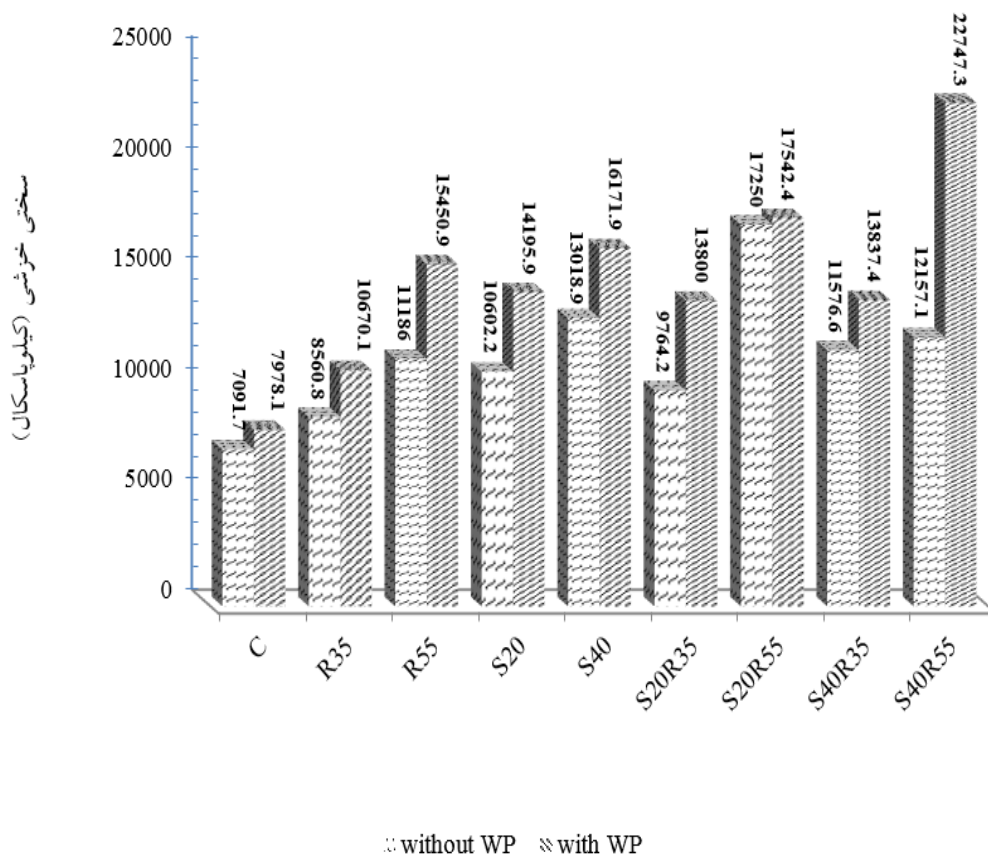
مقایسه نتایج مخلوط با و بدون پلیاستیک نشان می دهد که با افزایش درصد RAP و سرباره، تغییرشکل دائمی کاهش می یابد. قیر پیرشده موجود در تراشه این کاهش را با افزایش دادن مقدار سختی توجیه می کند. همچنین، با افزایش مقدار سرباره، مقدار کرنش ماندگار کاهش می یابد و این نشان می دهد که سرباره مقاومت شیارشدگی را بالا می برد. علت این امر می تواند درگیری بیشتر سرباره ها با یکدیگر باشد که منجر به تغییرشکل کمتر در نمونه می شود. به طور مشابه، همانطور که در

جدول ۱۵. درصد کاهش تغییرشکل دائمی با اثر پلیاستیک بازیافتی

نام نمونه	C	R35	R55	S20	S40	S20R35	S20R55	S40R35	S40R55
درصد کاهش	۱۸/۲۸	۳۴/۵۷	۳۱/۵۱	۳۳/۵	۳۴/۵۱	۳۶/۶۹	۳۶/۳۶	۳۰/۴۱	۳۴/۲۹

بودند. سختی خزشی با افزایش درصد RAP، سرباره و پلاستیک افزایش می‌یابد؛ که می‌تواند شیارشدگی را کاهش دهد. طبق رابطه (۴)، سختی خزشی و کرنش ماندگار رابطه عکس دارند.

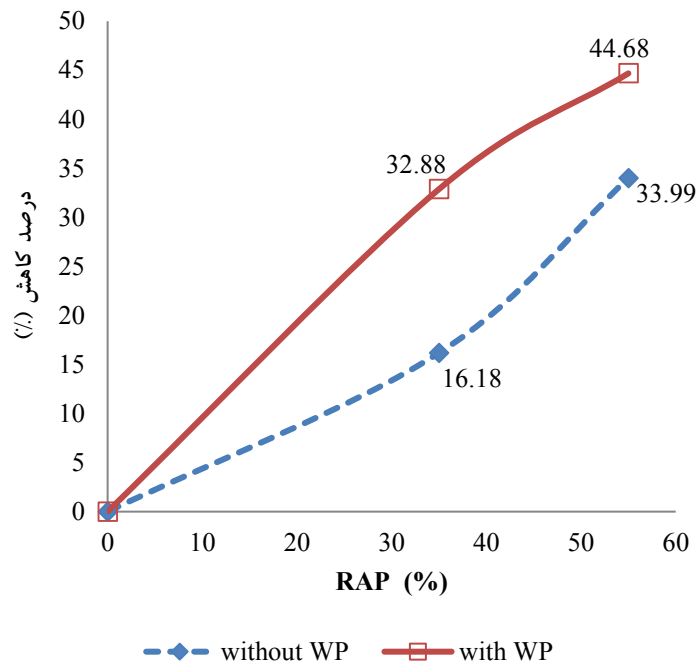
رابطه بین سختی خزشی و نوع مخلوط در شکل ۲۴ ارائه شده است. مخلوط‌های ضعیف (C) کمترین سختی خزشی را داشتند. از سوی دیگر، مخلوط‌های مناسب برای اجرا دارای بیشترین سختی خزشی (S40R55+) را داشتند.



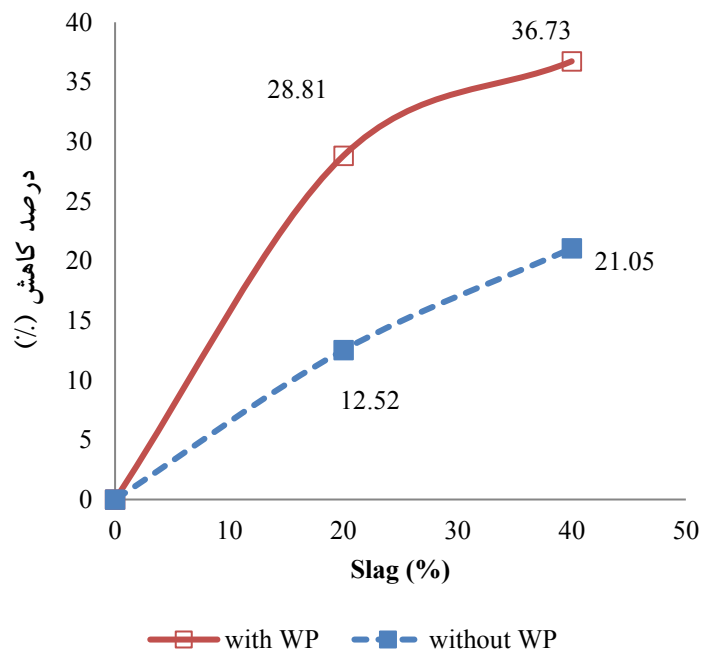
شکل ۲۴. سختی خزشی (کیلوپاسکال)

دارند. قیر پیرشده موجود در تراشه آسفالتی باعث افزایش سختی و در نتیجه کاهش تغییرشکل دائمی می‌شود. در مخلوط S40 و S40+، درصد کاهش تغییرشکل دائمی نسبت به C+ و C به ترتیب ۳۶/۷۳ و ۲۱/۰۵ درصد است. تغییرشکل دائمی کمتر مخلوط‌های سرباره ممکن است از قفل و بست شدن بهتر سنگ‌دانه سرباره در مقایسه با سنگ‌دانه طبیعی ناشی شود.

همانطور که در شکل‌های ۲۵ و ۲۶ نشان داده شده است، درصد کاهش تغییرشکل دائمی در مقایسه با C یا C+ به دلیل اثر RAP و سرباره برای همه مخلوط‌ها مقایسه می‌شود. مشاهده شد که با افزایش درصد RAP و سرباره در مخلوط، تغییرشکل دائمی کاهش می‌یابد. مخلوط‌های R55 و R55+ به ترتیب ۳۲/۸۸ و ۱۶/۱۸ درصد کاهش تغییرشکل دائمی را در مقایسه با C و C+ مشاهده شد.



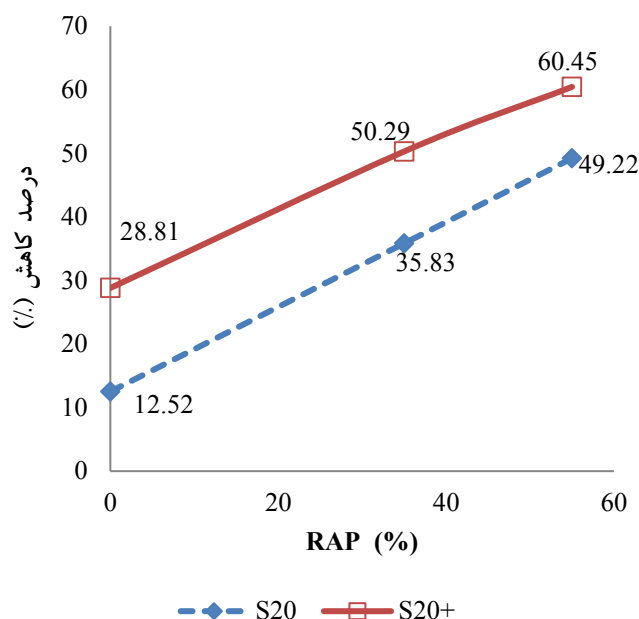
شکل ۲۵. مقایسه درصد کاهش تغییر شکل دائمی C یا C+ با اثر تراشه آسفالتی



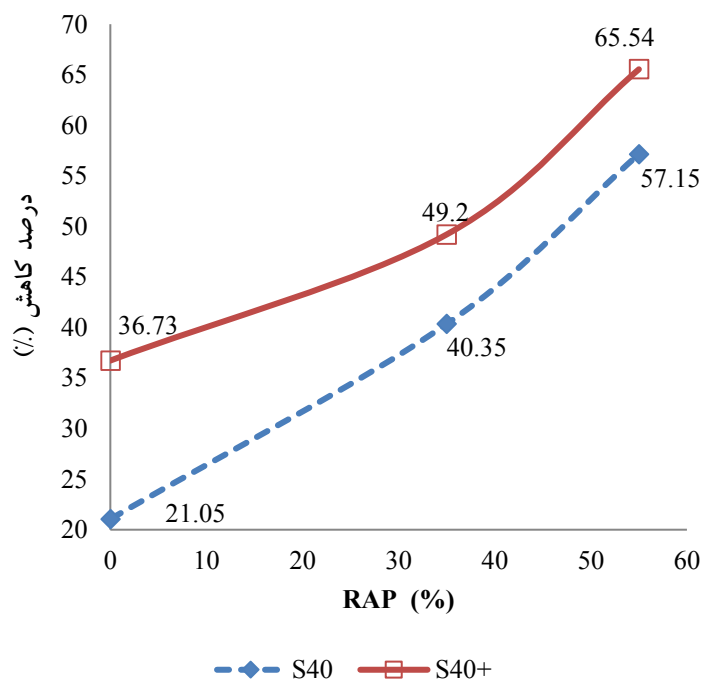
شکل ۲۶. مقایسه درصد کاهش تغییر شکل ماندگار C یا C+ با اثر سرباره

دائمی در مقایسه با C+ به ترتیب ۶۵/۵۴ و ۴۹/۲ درصد کاهش یافت. این مقادیر برای S40+ برابر ۳۶/۷۳ درصد بود.

همانطور که در شکل‌های ۲۷ و ۲۸ نشان داده شده، افزایش درصد RAP در مخلوط حاوی ۲۰ و ۴۰ درصد سرباره باعث کاهش تغییر شکل دائمی شده است. با توجه به ترکیب ۵۵ و ۳۵ درصد RAP به S40+، تغییر شکل



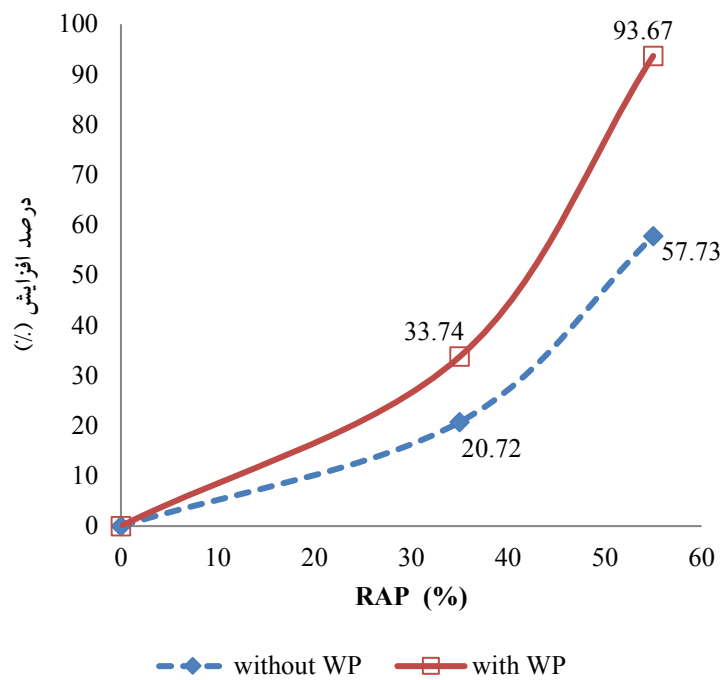
شکل ۲۷. مقایسه درصد کاهش تغییرشکل دائمی C یا C+ با اثر تراشه آسفالتی در نمونه‌های با ۲۰ درصد سرپاره



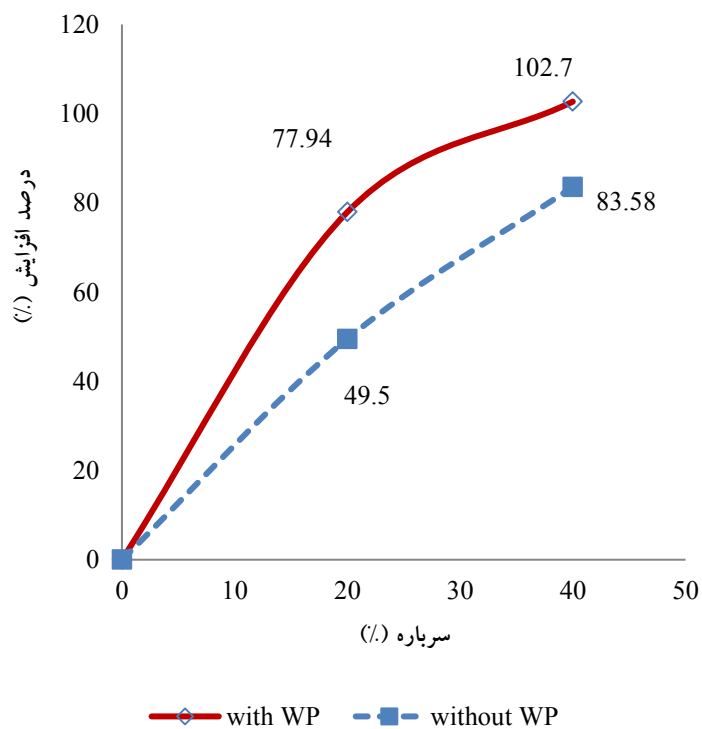
شکل ۲۸. مقایسه درصد کاهش تغییرشکل دائمی C یا C+ با اثر تراشه آسفالتی در نمونه‌های با ۴۰ درصد سرپاره

نسبت به C+ و C به ترتیب ۹۳/۶۷ و ۵۷/۷۳ درصد افزایش سختی خزشی دارند. در مخلوط S40 و S40+، درصد افزایش سختی خزشی نسبت به C+ و C به ترتیب ۱۰۲/۷ و ۸۳/۵۸ درصد است.

شکل‌های ۲۹ و ۳۰، درصد افزایش سختی خزشی را نسبت به C یا C+ به دلیل افزودن RAP و سرپاره نشان می‌دهند. مشاهده شد که با افزایش مقدار RAP و سرپاره در مخلوط، سختی خزشی افزایش می‌یابد. R55 و R55+



شکل ۲۹. مقایسه درصد افزایش سختی خزشی C یا C+ با اثر تراشه آسفالتی



شکل ۳۰. مقایسه درصد افزایش سختی خزشی C یا C+ با اثر سرباره

قابل توجهی بر تغییرشکل دائمی نمونه‌ها دارد. مقدار کوچکتر از ۰/۰۵، برای Sig، بیانگر این است که فرض

از نتایج همبستگی پیرسون ارائه شده در جدول ۱۶ مشخص است که درصد RAP، سرباره و پلاستیک تأثیر

صفر (بی‌اثر بودن متغیر در مدل)، رد می‌شود. همانطور که از جدول مشخص است، Sig مربوط درصد RAP، سرباره و پلاستیک کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد و فرض صفر برای این متغیرها رد می‌شود.

جدول ۱۶. همبستگی بین درصد RAP، سرباره، پلاستیک و تغییرشکل دائمی

پلاستیک (%)	سرباره (%)	RAP (%)	
-۰/۵۵۰	-۰/۴۶۳	-۰/۶۰۶	همبستگی پیرسون
۰/۰۰۲	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱	Sig.(2-tailed) تغییرشکل دائمی
۵۴	۵۴	۵۴	تعداد داده‌ها

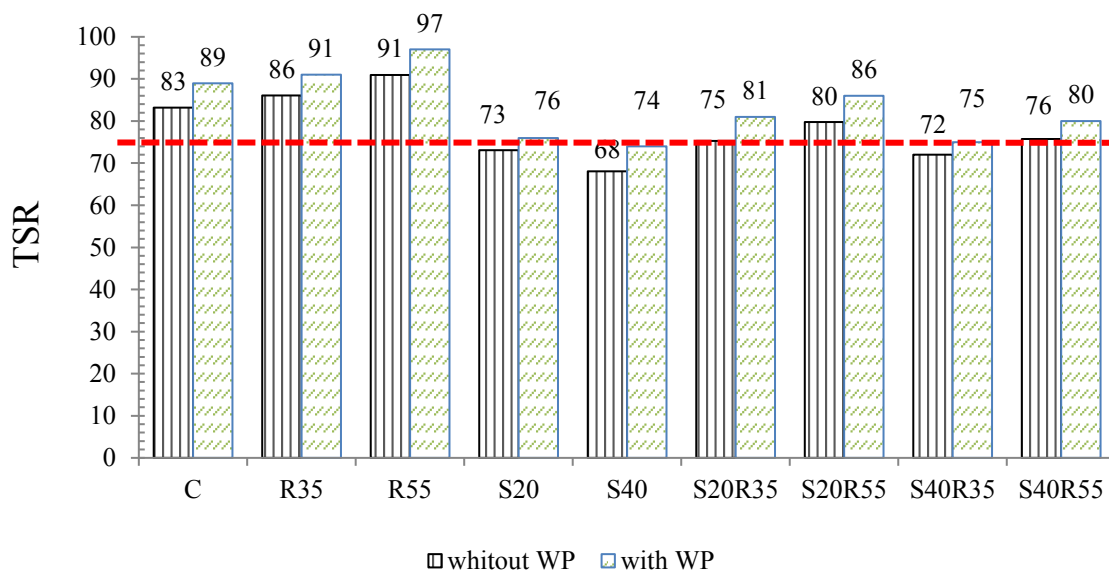
۵-۴. حساسیت رطوبتی

آهکی خاصیت بازی کمتری دارند. یعنی نسبت عناصر بازی مانند CaO و MgO به عناصر اسیدی مانند SiO₂ و Al₂O₃ در سنگ‌دانه طبیعی بیشتر از سرباره است و از آنجا که قیر، خاصیت اسیدی دارد، پیوند بهتری با سنگ‌دانه با خاصیت بازی برقرار می‌کند. در نتیجه، نمونه‌های حاوی سرباره در برابر حساسیت رطوبتی، عملکرد ضعیف‌تری دارند. افزایش درصد تراشه آسفالتی در نمونه‌ها باعث بهبود حساسیت رطوبتی می‌شود. بهبود TSR در نمونه‌های حاوی RAP به دلیل وجود یک لایه قیر پیرشده روی مصالح سنگی تراشه‌های آسفالتی است که در مخلوط آسفالتی با یک لایه قیر تازه جدید هم پوشش داده خواهند شد و از نفوذ آب و قرارگیری رطوبت بین سنگ‌دانه و قیر جلوگیری می‌کند (استیمیلی و همکاران، ۲۰۱۷). هنگامی که سرباره و تراشه آسفالتی هم‌زمان به نمونه افزوده می‌شود، از یک طرف تراشه آسفالتی باعث بهبود مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی می‌شود و از طرف دیگر سرباره باعث کاهش این مقاومت خواهد شد. تراشه آسفالتی تأثیر منفی سرباره را کاهش می‌دهد، اما کامل نتوانسته اثر منفی آن را خنثی کند و به مقدار نسبت مقاومت کششی در نمونه شاهد برسد. البته باید به این نکته اشاره نمود که در نمونه‌هایی که حاوی تراشه آسفالتی، سرباره و پلاستیک ضایعاتی می‌باشند، حداقل معیار آیین‌نامه (TSR=75%) در مورد حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی کسب شده است.

میانگین مقادیر ITS اشباع و خشک برای همه مخلوط‌ها در جدول ۱۷ ارائه شده است. شکل ۳۱ نسبت مقاومت کششی مخلوط‌ها در حالت اشباع به خشک را نشان می‌دهد. برای داشتن مقاومت کافی در برابر حساسیت رطوبتی، حداقل مقدار مجاز TSR برابر ۷۵ درصد توصیه می‌شود (تونیکلیف و روت، ۱۹۹۵). همانطور که در شکل ۳۱ نشان داده شده است، افزایش درصد RAP و افزودن پلاستیک به مخلوط مقاومت رطوبتی مخلوط‌ها را افزایش می‌دهد. از آنجا که کربنات کلسیم می‌تواند باعث بهبود حساسیت رطوبتی شود (سهرابی و همکاران، ۲۰۱۹). می‌توان افزایش و بهبود حساسیت رطوبتی تحت تأثیر افزودن پلیمر ضایعاتی را به حضور کربنات کلسیم در پلاستیک‌های ضایعاتی مرتبط دانست. کربنات کلسیم باعث کاهش اجزای قطبی سنگ‌دانه‌ها می‌شود. این کاهش (یا افزایش جزء غیر قطبی) باعث افزایش تمایل سنگ‌دانه‌ها به روغن و کاهش چسبندگی و خیس شدن آن‌ها توسط ماده قطبی مانند آب می‌شود (سهرابی و همکاران، ۲۰۱۹؛ دواساهاپام و همکاران، ۲۰۱۹). برعکس، با افزایش درصد سرباره، مقدار TSR نمونه‌ها کاهش می‌یابد. از شکل ۳۱ نیز مشاهده می‌شود که S20، S40+، S40 و S40R35 دارای مقادیر TSR کمتر از ۷۵ هستند. دلیل این امر را می‌توان به ترکیب شیمیایی سرباره (جدول ۵) مربوط دانست، سرباره نسبت به سنگ‌دانه‌های

جدول ۱۷. مقادیر مقاومت کششی غیرمستقیم

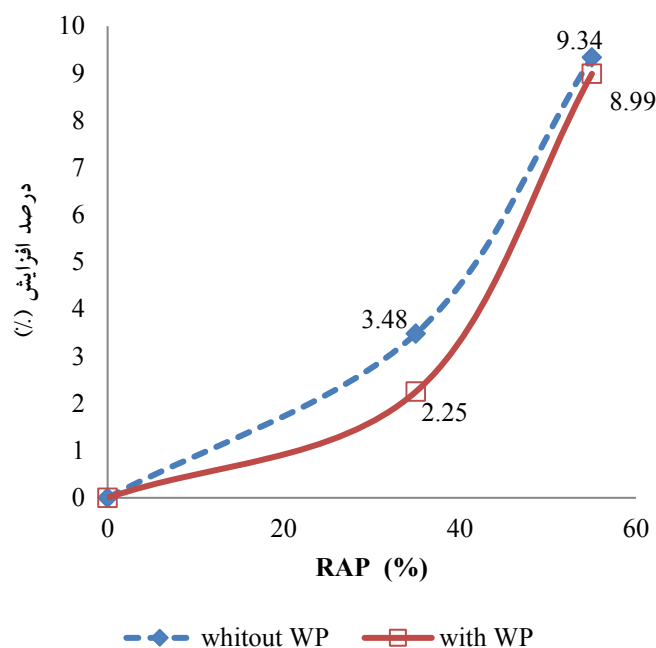
نام نمونه	C	R35	R55	S20	S40	S20R35	S20R55	S40R35	S40R55
ITS(GPa)	شرایط اشباع	۴۱۰	۶۷۹	۸۷۲	۴۴۸	۴۱۱	۵۴۹	۴۸۳	۷۹۴
	شرایط خشک	۴۹۳	۷۸۹	۹۵۹	۶۱۳	۶۰۴	۷۲۹	۶۸۳	۱۰۴۸
نام نمونه	C+	R35+	R55+	S20+	S40+	S20R35+	S20R55+	S40R35+	S40R55+
ITS(GPa)	شرایط اشباع	۵۲۴	۵۷۳	۸۲۲	۴۲۰	۳۹۱	۶۵۰	۶۸۲	۱۱۸۲
	شرایط خشک	۵۸۷	۶۳۰	۸۵۰	۵۵۵	۵۳۰	۸۰۰	۹۱۱	۱۴۸۰



شکل ۳۱. مقادیر TSR

RAP قوی تر از پیوند بین قیر دست نخورده و سنگدانه می باشد و همچنین تراشه های آسفالتی در مخلوط آسفالتی با یک لایه قیر تازه جدید هم پوشش داده خواهند شد و از نفوذ آب و قرارگیری رطوبت بین سنگدانه و قیر جلوگیری می کند.

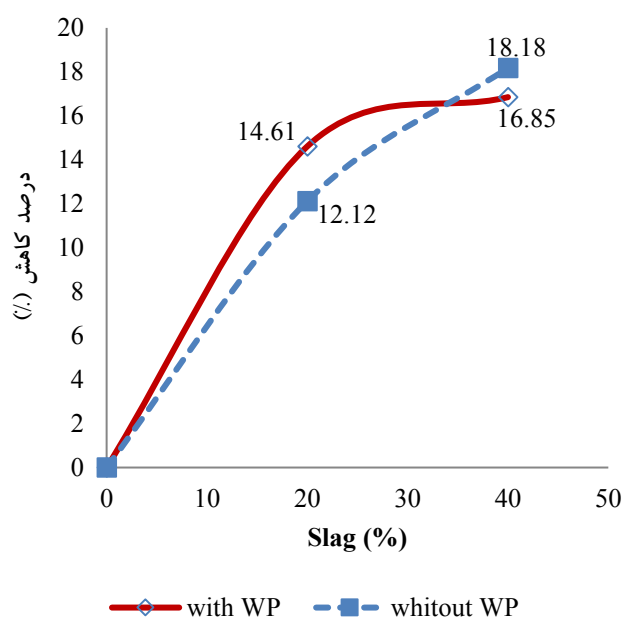
همانطور که در شکل ۳۲ نشان داده شده است، ترکیب ۳۵ و ۵۵ درصد RAP در مخلوط های حاوی پلاستیک باعث افزایش ۲/۲۵ و ۸/۹۹ درصدی TSR در مقایسه با C+ می شود. این روند برای نمونه های بدون پلاستیک به ترتیب ۳/۴۸ و ۹/۳۴ درصد در مقایسه با C بود. دلیل این افزایش این است که پیوند بین قیر پیر شده و سنگدانه در



شکل ۳۲. مقایسه درصد افزایش TSR C یا C+ با اثر تراشه آسفالتی

از آنجا که قیر خاصیت اسیدی دارد، پیوند بهتری با سنگدانه با خاصیت بازی، برقرار می‌کند. در نتیجه نمونه‌های حاوی سرباره در برابر حساسیت رطوبتی، عملکرد ضعیف‌تری دارند.

همانطور که شکل ۳۳ نشان می‌دهد، ورود سرباره مقاومت رطوبتی را تضعیف می‌کند. به عنوان مثال، S40+ دارای TSR برابر ۱۶/۸۵ درصد پایین‌تر از C+ است. این نتایج ممکن است به این دلیل باشد که سنگدانه سرباره نسبت به سنگدانه آهکی خاصیت قلیایی کمتری دارد و



شکل ۳۳. مقایسه درصد افزایش TSR C یا C+ با اثر سرباره

تغییرات متغیر وابسته را نشان دهد. مقدار کوچکتر از ۰/۰۵، برای Sig، بیانگر این است که فرض صفر (بی اثر بودن متغیر در مدل)، رد می شود. همانطور که از این جدول مشخص است، Sig مربوط درصد RAP و سرباره کمتر از ۰/۰۵ می باشد و فرض صفر برای این متغیرها رد می شود.

همانطور که در جدول ۱۸ نشان داده شده است، بر اساس نتیجه همبستگی پیرسون، درصد RAP و سرباره به طور قابل توجهی بر TSR تأثیر می گذارد. ضریب همبستگی پیرسون، همبستگی خطی بین متغیرهای وابسته و مقدار پیش بینی شده توسط مدل است. هر چه این ضریب به ۱ (یا -۱) نزدیکتر باشد، مدل توانسته سهم بیشتری از

جدول ۱۸. همبستگی بین درصد RAP، سرباره، پلاستیک و TSR

پلاستیک (%)	سرباره (%)	RAP (%)		
۰/۳۲۸	-۰/۸۰۳	۰/۴۰۲	همبستگی پیرسون	
۰/۰۱۶	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳	Sig.(2-tailed)	TSR
۵۴	۵۴	۵۴	تعداد داده ها	

افزودن سرباره به عنوان جایگزین ۴۰ درصد بخش درشت دانه به مخلوط، به علت درگیر شدن بیشتر سرباره ها با یکدیگر که باعث قفل و بست بهتر سنگ دانه ها در هم می شود، تغییر شکل دائمی را کاهش می دهد، و همچنین وسیله مؤثری برای بهبود سختی خزشی، ضریب مارشال، مقاومت فشاری و مدول کششی غیرمستقیم باشد.

- پلاستیک ضایعاتی در این پژوهش، به گفته تولیدکنندگان آن، حاوی حدود ۵۰ درصد کربنات کلسیم بوده و با اندازه ی کوچکتر از ۱/۱۸ میلی متر استفاده شده است. از آنجا که تأثیر این افزودنی بر درصد قیر بهینه مد نظر این پژوهش نبوده است، در مورد تأثیر این ماده بر درصد قیر بهینه نمی توان اظهار نظر کرد. اما این ماده به خاطر دارا بودن کربنات کلسیم، باعث بهبود حساسیت رطوبتی شده است. با این حال، کاهش مدول کششی غیرمستقیم و مقاومت فشاری دو نقطه ضعف ضایعات پلاستیک در مخلوط است. این مشکلات با استفاده همزمان RAP، سرباره و پلاستیک در مخلوط های WMA کاهش می یابد.

۵. نتیجه گیری

در این مطالعه، اثرات استفاده همزمان از سه ماده ضایعاتی (RAP، سرباره کوره قوس الکتریکی و پلاستیک بازیافتی) بر مخلوط WMA از نظر ضریب مارشال، مدول کششی غیرمستقیم، مقاومت فشاری، خزش استاتیک و حساسیت رطوبتی مورد بررسی قرار گرفت. موارد زیر بر اساس نتایج به دست آمده در مطالعه حاضر استنباط می شود:

- جایگزینی RAP تا ۵۵ درصد بخش ریزدانه، مصرف قیر را کاهش می دهد، به دلیل اینکه حاوی قیر پیر شده است، حساسیت رطوبتی را بهبود می بخشد، سختی خزشی، مقاومت فشاری، ضریب مارشال و مدول کششی غیرمستقیم مخلوطها را افزایش می دهد.
- مصرف قیر و حساسیت رطوبتی دو مشکل اصلی استفاده از سرباره در مخلوط آسفالتی هستند. استفاده همزمان RAP و سرباره در مخلوط های WMA این مشکلات را از بین می برد. مخلوط S40R55+ مصرف قیر را بیش از ۴۹ درصد در مقایسه با C کاهش می دهد و مقدار TSR برابر با ۸۰ درصد است.

حساسیت رطوبتی و خواص مکانیکی مخلوط آسفالتی سبز شامل آسفالت بازیافتی، سرباره و ضایعات پلاستیک

استفاده از پلاستیک در مخلوط WMA حاوی RAP و سرباره را می‌توان به عنوان یک راه‌حل ایمن و سازگار با محیط‌زیست برای دفع پلاستیک معرفی کرد.

۶. مراجع

- Alinezhad, M. and Sahaf, A. 2019. "Investigation of the fatigue characteristics of warm stone matrix asphalt (WSMA) containing electric arc furnace (EAF) steel slag as coarse aggregate and Sasobit as warm mix additive". *Case Studies in Construction Mater.*, 11: e00265.
- Almeida, A., Capitão, S., Bandeira, R., Fonseca, M. and Picado-Santos, L. 2020. "Performance of AC mixtures containing flakes of LDPE plastic film collected from urban waste considering ageing". *Constr. Build. Mater.*, 232: 117253.
- Amelian, S., Manian, M., Abtahi, S. M. and Goli, A. 2018. "Moisture sensitivity and mechanical performance assessment of warm mix asphalt containing by-product steel slag". *J. Clean. Prod.*, 176: 329-337.
- 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.
- ASTM D4123-8. 1995. "Standard test method for indirect tension test for resilient modulus of bituminous mixtures". ASTM, USA.
- ASTM D1074-17. 2017. "Standard test method for compressive strength of asphalt mixtures". ASTM, USA.
- Bahij, S., Omary, S., Feugeas, F. and Faqiri, A. 2020. "Fresh and hardened properties of concrete containing different forms of plastic waste— A review". *Waste Manag.*, 113: 167-175.
- Carbonneau, X., Le Gal, Y. and Bense, P. 2003. "Evaluation of the indirect tensile stiffness modulus test". Sixth International RILEM Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials.
- Devasahayam, S., Bhaskar Raju, G. and Mustansar Hussain, C. 2019. "Utilization and recycling of end of life plastics for sustainable and clean industrial processes including the iron and steel industry". *Mater. Sci. Energy Technol.*, 2(3): 634-646.
- Dinis-Almeida, M., Castro-Gomes, J. and de Lurdes Antunes, M. 2012. "Mix design considerations for warm mix recycled asphalt with bitumen emulsion". *Constr. Build. Mater.*, 28: 687-693.
- Fakhri, M., Maleki, H. and Hosseini, S. A. 2017. "Investigation of different test methods to quantify rutting resistance and moisture damage of GFM-WMA mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 152: 1027-1040.
- 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". *Constr. Build. Mater.*, 134: 626-640.
- Fakhri, M. and Ahmadi, A. 2017. "Evaluation of fracture resistance of asphalt mixes involving steel slag and RAP: Susceptibility to aging level and freeze and thaw cycles". *Constr. Build. Mater.*, 157: 748-756.
- Galan, J. J., Silva, L. M., Pérez, I. and Pasandín, A. R. 2019. "Mechanical behavior of hot-mix asphalt made with recycled concrete aggregates from construction and demolition waste: A design of experiments approach". *Sustain.*, 11(13): 3730.
- Haider, S., Hafeez, I. and Ullah, R. 2020. "Sustainable use of waste plastic modifiers to strengthen the adhesion properties of asphalt mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 235: 117496.
- Hesami, S., Ameri, M., Goli, H. and Akbari, A. 2014. "Laboratory investigation of moisture susceptibility of warm-mix asphalt mixtures containing steel slag aggregates". *Int. J. Pavement Eng.*, 16(8): 1-15.
- Hill, B., Behnia, B., Buttlar, W. G. and Reis, H. 2013. "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.
- Hoornweg, D. and Bhada-Tata, P. 2012. "What a waste: A global review of solid waste management". Urban development series; knowledge papers no. 15, World Bank, Washington, DC.
- Maghool, F., Arulrajah, A., Du, Y. J., Horpibulsuk, S. and Chinkulkijniwat, A. 2017. "Environmental impacts of utilizing waste steel slag aggregates as recycled road construction materials". *Clean Technol. Environ. Policy*, 19: 949-958.
- Mogawer, W. S., Austerman, A. J., 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". *Transport. Res. Record*, 2208(1).
- Moghadas Nejad, F., Azarhoosh, A., Hamed, G. H. and Roshani, H. 2014. "Rutting performance prediction of warm mix asphalt containing reclaimed asphalt pavements". *Road Mater. Pavement Design*, 15(1): 207-219.
- Movilla-Quesada, D., Raposeiras, A. C., Silva-Klein, L. T., Lastra-Gonzalez and Castro-Fresno, D. 2019. "Use of plastic scrap in asphalt mixtures added by dry method as a partial substitute for bitumen". *Waste Manag.*, 87: 751-760.

- Piao, Z., Mikhailenko, P., Kakar, M. R., Bueno, M., Hellweg, S. and Poulidakos, L. D. 2020. "Urban mining for asphalt pavements: A review". *J. Clean. Prod.*, 280(2): 124916.
- Prowell, B., Frank, B., Osborne, L., Kriech, T. and West, R. 2014. "Effects of WMA on plant energy and emissions and worker exposures to respirable fumes". National Cooperative Highway Research Program, Washington, DC, USA.
- Sarsam, S. I., Ali, I. and Al-Janabi, H. 2014. "Assessing shear and compressive strength of reclaimed asphalt concrete". *Int. J. Sci. Res. Knowledge*, 2: 352-361.
- 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". *Constr. Build. Mater.*, 35: 125-130.
- Sohrabi, M., Shirmohammadi, H. and Hamed, G. H. 2019. "Investigating the effect of modifying aggregate surface by micronized calcium carbonate on increasing the moisture resistance of asphalt mixtures". *Period. Polytech. Civ. Eng.*, 63(1): 63-76.
- Stimilli, A., Virgili, A., Giuliani, F. and Canestrari, F. 2017. "Mix design validation through performance-related analysis of in plant asphalt mixtures containing high RAP content". *Int. J. Pavement Res. Technol.*, 10(1): 23-37.
- Tam, W. O., Solaimanian, M. and Kennedy, T. W. 2000. "Development and use of static creep test to evaluate rut resistance of superpave mixes". FHWA-1250-4, Texas Department of Transportation.
- Texas D. 1993. "Test method Tex-231-F, revised". Texas Department of Transportation, Division of Materials and Tests.
- Tunncliffe, D. G. and Root, R. E. 1995. "Use of antistripping additives in asphaltic concrete mixtures". *Transport. Res. Board*.
- Vasudevan, R., Ramalinga Chandra Sekar, A., Sundarakannan, B. and Velkennedy, R. 2012. "A technique to dispose waste plastics in an ecofriendly way– Application in construction of flexible pavements". *Constr. Build. Mater.*, 28(1): 311-320.
- Xiao, F., Wenbin Zhao, P. E. and Amirkhanian, S. N. 2009. "Fatigue behavior of rubberized asphalt concrete mixtures containing warm asphalt additives". *Constr. Build. Mater.*, 23(10): 3144-3151.
- Zoorob, S. and Suparma, L. 2000. "Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded asphaltic concrete containing recycled plastics aggregate replacement (Plastiphalt)". *Cement Concrete Compos.*, 22(4): 233-242.