بررسی تأثیر انواع پلیمر ترموپلاستیک الاستومر بر حساسیت رطوبتی مخلوطهای آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه ای

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

حمید بهبهانی ، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

جواد ارجمندپور (مسئول مکاتبات)، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

E-mail: j.arjmandpoor@yahoo.com

دریافت:۱۳۹۲/۰۸/۱۸ پذیرش:۱۳۹۳/۰۵/۲۶

چکیده:

رطوبت همواره به عنوان یکی از عوامل عریان شدگی آسفالت مطرح است. از بین بردن یا کاهش آثار رطوبت در مخلوطهای آسفالتی گرم از مهم‌ترین مسائل متداول روسازی است و یکی از راههای دستیابی به این هدف، استفاده از مواد افزودنی و تغییر در ساختار دانه بندی آسفالت است. تغییر در نوع دانه بندی به دلیل تغییر در میزان قیر بهینه و در واقع افزایش میزان قیر بهینه می‌تواند تأثیر بسزایی در کاهش نفوذ آب به سنگدانه‌ها و در نتیجه کاهش حساسیت رطوبتی داشته باشد. دانه بندی مورد استفاده در این تحقیق از نوع میان تهی و از نوع مخلوطهای آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه ای است. در این نوع از مخلوطها به دلیل مصرف قیر زیاد، پدیده ریزش قیر اتفاق می‌افتد که می‌تواند ضخامت قیر در اطراف سنگدانه‌ها را کاهش داده و موجب نفوذ آب و کاهش چسبندگی میان قیر و سنگدانه‌ها شود. از این رو به منظور تثبیت مخلوطهای آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه ای از الیاف یا اصلاح کننده های پلیمری استفاده می‌شود. پلیمرهای ترموپلاستیک الاستومر از دسته پلیمرهایی هستند که خواص الاستومری و پلاستومری را، همزمان در خود دارند و در این پژوهش سعی بر بررسی حساسیت رطوبتی مخلوطهای آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه ای اصلاح شده با دو نوع از این پلیمرها به نامهای Lucobit و WKR-2 با درصد های مختلف و مقایسه آن با SBS ٪۵ در آزمایش مدول برجهندگی، مقاومت کششی غیر مستقیم و نسبت استقامت مارشال شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش درصد پلیمر های مذکور، مدول برجهندگی و نسبت آن، مقدار ITS و TSR و همچنین استقامت مارشال و نسبت مستغرق به خشک آن افزایش یافته و نتایج بهتری در درصد های بالا نسبت به SBS ٪۵ از خود نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: حساسیت رطوبتی، مخلوطهای AMS، پلیمر SBS، مقاومت کششی غیرمستقیم، مدول برجهندگی

۱. مقدمه

راهها، نخستین و طبیعی‌ترین وسیله ارتباط انسانها هستند که به عنوان شریانهای حیاتی یک سرزمین، نقش اساسی در توسعه و پیشرفت جوامع ایفا می‌کنند. روسازی، یکی از اجزای مهم و زیربنایی جاده محسوب می‌شود و بایستی بر حسب اهمیت مسیر در شبکه حمل و نقل جاده ای کشور، از شرایط ویژه و مناسبی برخوردار باشد تا در طول عمر بهره برداری، ضمن تأمین عبور و مرور ایمن، جذابیت یک سفر مطمئن را برای استفاده کنندگان راه فراهم سازد. از این رو همواره تلاش محققین و مهندسان بر آن بوده است تا با افزایش کیفیت و دوام مخلوط‌های آسفالتی، مانع از ایجاد خرابی‌های زودرس در روسازی شوند و تا حد ممکن، این خرابی‌ها را به تعویق بیندازند [Huang, 2004]. آنها در تحقیقات خود سعی بر این دارند تا با ایجاد تغییراتی در قیر مصرفی، استفاده از مواد افزودنی مانند انواع پلیمرها و ایجاد تغییر در ساختار دانه بندی آسفالت، به اهداف خود دست یابند. اجرای رویه های آسفالتی با دانه بندی پیوسته، در راه های با آمد و شد زیاد و بار محوری سنگین به ویژه در مناطق گرمسیری گاهی خرابی‌هایی نظیر شیارشدگی مسیر چرخ و قیرزدگی را به دنبال دارد. این خرابی‌ها مستلزم اجرای عملیات تعمیر و بهسازی در فواصل زمانی نسبتاً کوتاه پس از بهره برداری است که هزینه های زیادی را در بر خواهد داشت. در سالهای اخیر، در برخی کشورهای اروپایی، ایالات متحده آمریکا و کانادا جهت تأمین برخی انتظارات خاص روسازی و تحمل بار محوری سنگین، از مخلوط‌های آسفالتی، با استخوان بندی سنگدانه‌ای (SMA[1]) استفاده شده‌است [Brown et al. 1999].

آسفالت SMA که از مقاوم‌ترین انواع مخلوط‌های آسفالتی شناخته شده تا به امروز است، فرآیند انتقال و تنزیل بار را از طریق تماس مستقیم سنگ روی سنگ صورت می‌دهد. به منظور فراهم نمودن تماس سنگ روی سنگ در این نوع از مخلوط‌های آسفالتی، می‌بایست دانه بندی از نوع میان تهی را به منظور طرح اختلاط ساخت این نوع مخلوط بکار بریم که در نتیجه این عمل مقدار فضای خالی این نوع مخلوط را بسیار زیاد خواهد شد. افزایش بیش از اندازه فضای خالی مخلوط آسفالتی باعث کاهش محسوس مقاومت آن خواهد شد. در نتیجه به منظور جلوگیری از این مشکل می‌بایست فضای خالی اضافی را با ملات قیر، فیلر و افزودنی پر کرده تا به مقدار مجاز درصد هوا برسیم. برخلاف آسفالت گرم معمولی که کلیه اجزای مخلوط آسفالتی در تحمل و انتقال بار موجود عمل می‌کنند، در مخلوط‌های SMA اسکلت سنگدانه ای عمده بار وارده را تحمل می‌کند و نقش ملات قیری در درجه دوم قرار دارد. البته این مسئله به این معنی نیست که ملات قیری در مخلوط‌های SMA از اهمیت کمی برخوردار است، بلکه اساساً در اولویت دوم قرار دارد .[Mokhtari, 2011] در مخلوط‌های آسفالتی متداول، عریان شدگی[2] سنگدانه‌ها از اندود قیری پدیده ای است که به علت اثرات رطوبت برمخلوط به وجود می‌آید. این پدیده به خاصیت چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی مربوط می‌شود و به عوامل دیگری نظیر میزان فضای خالی مخلوط رویه آسفالتی، مقدار قیر، دمای محیط و ... بستگی دارد. به منظور مقابله با این خرابی باید خاصیت چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی بهبود یابد .[Mokhtari, 2011] نیروی جاذبه مصالح نسبت به قیر، تمایل آنها برای جذب و چسبیده ماندن به قیر است. قیر بایستی مصالح سنگی را بپوشاند و از عریان شدگی آن در حضور آب جلوگیری کند. اگر چه تئوری‌های متعددی در رابطه با فعل و انفعال شیمیایی (که در پدیده عریان‌شدگی اتفاق می‌افتد)، وجود دارد ولی هیچ‌یک از آنها نمی‌تواند این پدیده را به طور کامل شرح دهد. جاذبه بیشتر بعضی از مصالح به سمت آب، نسبت به قیر (مصالح هیدروفیلیک[11]، از اهمیت بسیاری برخوردار است. این مصالح در حضور آب تمایل به عریان شدگی (جدا شدن قیر از سطح مصالح) دارند. مصالح سیلیسی مثل کوارتزیت و بعضی از گرافیت‌ها، نمونه‌هایی از مصالح هیدروفیلیک (آب‌دوست) هستند. از سوی دیگر مصالح هیدروفوبیک[12] (آب گریز)، جاذبه بیشتری نسبت به قیر دارند. سنگ آهک و دولومیت نمونه‌هایی از مصالح هیدروفوبیک هستند [Xiao et al. 2010].

از آنجا که در مخلوط‌های آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه‌ای، درصد فضای خالی کم و در صد قیر در مخلوط زیاد است،

احتمال وقوع پدیده عریان شدگی سنگدانه‌ها در صورت کم بودن درصد ریزش قیر مخلوط، اندک خواهد بود. از طرف دیگر چسبندگی قیر به سنگدانه و خواص فیزیکی و شیمیایی اجزاء قیر، به مرور زمان تحت تأثیر حرارت و فرآیندهای ناشی از پیرشدگی تغییر می‌کند. وقتی که قیر بتدریج و با گذشت زمان کهنه می‌شود، سخت‌تر و شکننده تر می‌گردد، در نتیجه چسبندگی و خاصیت چسبانیدن را از دست می‌دهد؛ بنابراین به منظور دستیابی به خدمت دهی دراز مدت قیر و افزایش پایایی و دوام آن، باید فرآیندهای کهنه شدن، اکسیداسیون و سایر تغییرات فیزیکی و شیمیایی حذف یا کاهش یابند. کاهش درصد فضای خالی و افزایش غشاء قیری اطراف سنگدانه‌ها در مخلوط‌های آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه ای، فرآیندهای اکسیداسیون و کهنه شدن را به تأخیر می‌اندازد و موجب دوام بیشتر رویه های آسفالتی می‌گردد. [Mokhtari, 2011]

اگر چه این مقدار زیاد قیر باعث دوام بیشتر مخلوط آسفالتی می‌شود، ولی از سوی دیگر در صورت استفاده نکردن از یک نگهدارنده مناسب به عنوان تثبیت کننده مخلوط، امکان وقوع پدیده ریزش قیر در مخلوط‌های SMA بسیار زیاد شده و در زمان بارگذاری ممکن است قیر از مصالح سنگی جدا شده و به صورت لکه های قیرزدگی در روی سطح آسفالت اجرا شده ظاهر شود که نتیجه معکوس خواهد داد. به این دلیل، از قیر اصلاح شده و یا افزودنی‌های نگهدارنده یا تثبیت کننده های قیر استفاده می‌شود. پلیمرها و الیاف از جمله تثبیت کننده‌هایی هستند که در آسفالت SMA بکار می‌روند. یکی از مشکلات استفاده از پلیمرها، نحوه اختلاط آنها در قیر است که نیازمند استفاده از همزن‌های با دور بالاست که علاوه بر صرف زمان، هزینه و انرژی زیاد، نیروی متخصص ویژه ای را در این زمینه نیازمند است. پلیمرهای Lucobit,WKR-2 بر خلاف دیگر پلیمرها برای اختلاط در قیر نیاز به همزن‌های با دور بالا ندارند و دمای اختلاط آنها نیز کمتر از دمای اختلاط مورد نیاز برای پلیمرهای دیگر است. از این رو هم صرفه جویی در زمان و هزینه‌ها را به همراه خواهد داشت و هم نیاز به نیروی متخصص برای اختلاط نیست. در این پژوهش از پلیمرهای Lucobit,WKR-2 و SBS[۳] به منظور اصلاح قیر مورد نیاز استفاده شده است. در واقع هدف از این تحقیق مقایسه تأثیر پلیمرهای مذکور در میزان کاهش حساسیت به رطوبت مخلوط‌های SMA و همچنین مقایسه اقتصادی پلیمرها و در پایان انتخاب پلیمری جایگزین برای SBS است. ضرورت طرح و انجام این پژوهش را می‌توان به اهمیت پدیده حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی گرم نسبت داد. استفاده از قیر زیاد در مخلوط‌های SMA می‌تواند مانع از نفوذ آب به سطح سنگدانه‌ها و کاهش میزان حساسیت رطوبتی شود، البته در صورتی که بتوان این مقدار قیر را با استفاده از افزودنی‌های مناسب در اطراف سنگدانه‌ها حفظ کرد. این نکته ضرورت استفاده از پلیمر را در مخلوط‌های SMA نشان خواهد داد. نیاز به طرح اختلاط استفاده از پلیمرها، علاوه بر تثبیت این گونه مخلوط‌ها و کاهش در میزان ریزش قیر، باعث بهبود رفتار و مشخصات فیزیکی مخلوط آسفالتی شده و عمر بهره برداری از روسازی را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد.

۲. مروری بر پیشینه تحقیق

برای تثبیت مخلوط‌های آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه ای، تا به امروز از انواع گوناگون افزودنی‌های پلیمری و غیر پلیمری استفاده شده است. این امر نشان دهنده اهمیت استفاده از افزودنی در این نوع از مخلوط‌های آسفالتی است. طبق تحقیقات صورت گرفته در سال ۲۰۰۷، مقایسه ای بین عملکرد مخلوط آسفالتی SMA حاوی مصالح خرده لاستیک و الیاف طبیعی صورت گرفت. در آن تحقیق، مصالح سنگی از جنس کوارتز انتخاب شدند و از قیر ۶۰/۷۰ نیز برای ساختن نمونه‌ها استفاده شد. نتایج در این تحقیق نشان دهنده آن است که خرده لاستیک هم در حساسیت رطوبتی و هم در میزان تغییر شکل دائمی عملکرده بهتری نسبت به الیاف طبیعی داشته است [Sharma and Goyal, 2007].

در تحقیقات دیگری در سال ۲۰۰۸، تأثیر پلی اتیلن سبک خطی (LDPE) بر عمر مخلوط‌های آسفالتی SMA صورت گرفت.

نتایج نشان دهنده آن است که با افزایش درصد پلی اتیلن، درجه نفوذ و درجه نرمی به ترتیب، کاهش و افزایش می‌یابد و در مورد خاصیت انگمی آسفالت در تمامی درصدهای پلی‌اتیلن، این مقدار بیشتر از ۱۰۰ سانتیمتر است، جز در ۸ درصد که میزان آن کمتر از ۹۱ سانتیمتر به دست آمده است. بیشترین مقدار استقامت مارشال و کمترین مقدار برای روانی، در ٦ درصد پلیمر به دست آمده است و با افزایش درصد پلی اتیلن، مقاومت کششی غیرمستقیم نیز افزایش می‌یابد [Yi-qiu and Al-hadidy, 2008]. در سال ۲۰۰۹ پروژه دیگری نیز توسط Al Hadidy و همکارانش صورت پذیرفت که در آن تحقیق، تأثیر افزودنی استارچ (ST[٦]) و SBS بر رفتار مخلوط آسفالتی SMA مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج بیانگر آن است که افزودن ۵ درصد ST خصوصیات فیزیکی و شیمیایی قیر را بهبود می‌بخشد، همچنین استقامت مارشال، شاخص حساسیت رطوبتی(TSR[۷]) و مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی را به ترتیب، به میزان ٪۱۱، ٪۳۸ و ٪۳۷/۷ ارتقاء می‌دهد همچنین افزودن ۵ درصد SBS به قیر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی قیر خالص را بهبود داده و مقادیر استقامت مارشال، شاخص حساسیت رطوبتی (TSR) و مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی SMA را به ترتیب به میزان ٪۸، ٪۱۲ و ٪۳۹/٤ افزایش می‌دهد [Al-hadidy et al. 2009]. در پژوهشی در سال ۱۳۹۰، بررسی آزمایشگاهی تأثیر قیر پلیمری SBS بر مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی SMA صورت پذیرفت که از مهم‌ترین نتایج آن می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. [Dehghan and Latifi, 2011]

– برای همه درصدهای پلیمر و در هر دو دمای ۵ و ۲۵ درجه سانتیگراد، مدول برجهندگی بیشینه در درصد قیر ٦.٤ اتفاق می‌افتد.

– نتیجه ۱ نشان می‌دهد که درصد پلیمر و دما تقریباً تأثیری روی درصد قیری که مدول برجهندگی بیشینه در آن اتفاق می‌افتد، ندارند.

– در دمای ۵ درجه سانتیگراد، در درصد پلیمر بین ۳ و ٤، بیشترین مقدار مدول برجهندگی اتفاق می‌افتد، ولی در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد، در درصد پلیمر بین ٤ و ۵، بیشترین مقدار مدول برجهندگی اتفاق می‌افتد. در نتیجه درصد پلیمر بهینه تابع دمای منطقه است.

– مقدار مدول برجهندگی در نمونه های ساخته شده با قیر اصلاح شده در درصد پلیمر بهینه، نسبت به نمونه های ساخته شده با قیر معمولی، ٤۰ درصد افزایش داشته است.

در پژوهشی دیگر در سال ۲۰۱۱ محققین نشان دادند که پلیمر SBS می‌تواند تأثیر بسیار زیادی بر روی مدول برجهندگی و مقاومت مارشال مخلوط‌های SMA بگذارد. با توجه به نتایج درصد بهبود مقاومت مارشال و مدول برجهندگی برای نمونه‌های اصلاح شده با ۵ درصد پلیمر SBS به ترتیب برابر ٪۷۰ و ٪۱۲۷ گزارش داده‌اند [Ghasemi and Marandi, 2011]. طبق تحقیقات صورت گرفته در سال ۱۳۹۲، مقایسه ای بین عملکرد مخلوط آسفالتی SMA حاوی مصالح خرده لاستیک و SBS صورت گرفت. در آن تحقیق، مصالح سنگی از جنس آهکی انتخاب شدند و از قیر ٦۰/۷۰ نیز برای ساختن نمونه‌ها استفاده کردند. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان تأثیر مثبت پودر لاستیک و همچنین SBS را در میزان مقاومت فشاری و کششی به وضوح مشاهده کرد. میزان بهبود در مقاومت مارشال برای دو پلیمر پودر لاستیک و SBS به ترتیب ٪٤۳/۸ و ٪۷۰ است و درصد بهبود در مقاومت کششی غیرمستقیم نیز به ترتیب قبل برابر ٪۳۱ و ٪۲٤ است [Shakeri et al. 2013].

۳. مشخصات مصالح

در این پژوهش از مصالح سنگی شکسته (کارخانه آسفالت ....) استفاده شده است. همچنین بخش عبوری از الک ۲۰۰ به عنوان فیلر از پودر سنگ به میزان ده درصد بکار گرفته شد. مشخصات فیزیکی و مکانیکی مصالح سنگی در جداول ۱ و ۲ آمده است. قیر بکار رفته در پژوهش از نوع ٦۰/۷۰ است که از شرکت نفت ..... تهیه شده است و مشخصات رئولوژیکی و فیزیکی آن در جدول ۳ آمده است. اصلاح کننده های پلیمری نیز شامل ، WKR-2 Lucobit و SBS هستند که مشخصات فیزیکی آنها به ترتیب در جداول ٤، ۵ و ٦ آمده است.

جدول ۱. مشخصات مصالح درشت دانه استفاده شده در مخلوط‌های SMA

نوع آزمایش	نتایج آزمایش	استاندارد آزمایش
درصد سایش به روش لس‌آنجلس	۲۵	AASHTO[5] T96
چگالی واقعی	۲/۶۳۵	ASTM C127
درصد شکستگی در یک وجه	۱۰۰	ASTM D5821
درصد شکستگی در دو وجه	۹۶	ASTM D5821
درصد جذب آب	۱/۲	AASHTO T85

جدول ۲. مشخصات مصالح ریزدانه استفاده شده در مخلوط‌های SMA

نوع آزمایش	استاندارد آزمایش	مقدار حداقل
شاخص خمیری	AASHTO T96	غیر خمیری
چگالی واقعی	ASTM C127	۲/۶۱۷
جذب آب(٪)	AASHTO T85	۱/٤
درصد حد روانی	AASHTO T89	۱۲

جدول ۳. مشخصات قیر مورد استفاده

مشخصات فیزیکی	استاندارد آزمایش	واحد	مقدار	محدوده مجاز
وزن مخصوص در ۲۳ درجه سانتیگراد	ASTM D792	g/l	۰/۹٤	۰/۹۲ – ۰/۹۵
Styrene content	ASTM D1416	%Wt	۳۲	۳۰/۵ – ۳۳/۵
Ash content	ASTM D1416	%Wt	۰/۹	≤۱
Oil content	ASTM D1416	Phr	۰	<۰/۲
شاخص روانی در ۲۰۰ درجه سانتیگراد	ASTM D1238	g/10min	۰/۳	۱۲
سختی	ASTM D2240	-	۷۵	<۱۰۰

جدول ٤. مشخصات فیزیکی WKR-2

حالت فیزیکی در ۲۰ درجه سانتیگراد	جامد
دمای ذوب(درجه سانتیگراد)	۱۰۵
نقطه اشتعال(درجه سانتیگراد)	۱۹۰
رنگ	زرد یا قوه ای

جدول ۵. مشخصات Lucobit استفاده شده در این تحقیق

مشخصات فیزیکی	واحد	مقدار
وزن مخصوص در ۲۳ درجه سانتیگراد	g/cm^3	۰/۹۷
چگالی ظاهری	g/l	۵۰۰
مدول الاستیسیته	Mpa	۱۷
محدوده نرمی	℃	۸۰-۱۰۰
محدوده شکنندگی	℃	<-۳۰

جدول ٦. مشخصات SBS استفاده شده در این تحقیق

	واحد	مقدار	محدوده مجاز
وزن مخصوص در ۲۳ درجه سانتیگراد	g/l	۰/۹٤	۰/۹۲ – ۰/۹۵
Styrene content	%Wt	۳۲	۳۰/۵ – ۳۳/۵
Ash content	%Wt	۰/۹	≤۱
Oil content	Phr	۰	<۰/۲
شاخص روانی در ۲۰۰ درجه سانتیگراد	g/10min	۰/۳	۱۲
سختی	-	۷۵	<۱۰۰

٤. روش انجام آزمایش‌ها و طرح اختلاط

در این تحقیق برای طرح مخلوط‌های SMA در گام اول، تعیین دانه بندی بهینه و سپس، از روش مارشال و طبق گزارش NCHRP425 تعیین میزان قیر بهینه صورت گرفته است. در ادامه آزمایش ریزش قیر برای نمونه های اصلاح شده و اصلاح نشده در درصد قیر بهینه انجام شد. همچنین برای تعیین حساسیت رطوبتی مخلوط‌های اصلاح شده و اصلاح نشده بر اساس استاندارد ASTM D4123 میزان مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم طبق استاندارد AASHTO T283 و همچنین مقاومت مارشال بر اساس استاندارد ASTM D1075 برای نمونه‌های تر و خشک صورت پذیرفته است.در پایان نیز آزمایش آب جوشان که نتایج آن به صورت تقریبی و نسبی است انجام شده است.

٤-۱ طرح مخلوط SMA

اولین قدم در طرح مخلوط‌های SMA تعیین دانه بندی بهینه است. برای این منظور، از آیین نامه NCHRP 425 استفاده شده است. ابتدا سه سری دانه بندی پیشنهادی به صورت حد بالا، حد وسط و حد پایین از جدول دانه بندی NCHRP با حد اکثر اندازه اسمی ۱۲/۵ میلی‌متر که در جدول ٦ آمده از مصالح موجود انتخاب شدند. دانه بندی مخلوط آسفالتی SMA بر اساس حجم و روابط مربوط به آن صورت می‌گیرد. وزن واحد خشک میله دار برای مصالح درشت دانه برای هر سری از دانه بندی می‌بایستی مطابق با آزمایش کد T19 آیین نامه آشتو صورت پذیرد. برای هر دانه بندی انتخاب شده، یک در صد قیر اولیه بین ٦ تا ٦/۵ در صد انتخاب می‌شود و حداقل دو نمونه مطابق با کد TP4 در صورت استفاده از متراکم کننده ژیراتوری و یا مطابق با T245 در صورت استفاده از چکش مارشال متراکم می‌گردند. دانه بندی مورد نظر بدین صورت انتخاب

می‌گردد که مینیمم VMA و همچنین تماس سنگدانه روی سنگدانه حاصل می‌شود. تماس سنگدانه روی سنگدانه در آسفالت SMA، به نقطه ای تعریف می‌شود که در آن درصد فضای خالی مصالح درشت دانه در نمونه ساخته شده (VCAMIX)، از در صد فضای خالی مصالح درشت دانه مانده روی الک نمره ٤ در آزمایش وزن مخصوص خشک میله دار (VCADRC) کمتر باشد. دانه بندی انتخابی نیز در جدول ٦ قابل مشاهده است.

جدول ٦. دانه بندی بکار رفته در طرح مخلوط SMA

اندازه الک (میلی‌متر)	بازه آیین نامه (درصد عبوری)	دانه بندی بکار رفته
١٩	١٠٠	١٠٠
١٢/٥	٩٠–١٠٠	٩٥
٩/٥	٢٦–٧٨	٧٠
٤/٧٥	٢٠–٢٨	٢٧
٢/٣٦	١٦–٢٤	٢٠
١/١٨	١٣–٢١	١٨
٠/٦	١٢–١٨	١٦
٠/٣	١٢–١٥	١٣
٠/٠٧٥	٨–١٠	١٠

با استفاده از دانه بندی بهینه به دست آمده در بند قبل، نمونه های مربوط به تعیین درصد قیر بهینه با استفاده از قالب و چکش مارشال ساخته شده و پس از تعیین وزن مخصوص زیر جک مارشال قرار گرفتند و بعد، آزمایش رایس بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. نتایج به صورت جداول زیر قابل مشاهده هستند. میزان ریزش قیر برای درصد قیر بهینه مقدار ٠/٣٣٦ درصد وزن نمونه به دست آمد که از مقدار استاندارد برابر و کوچک‌تر از ٠/٣ درصد (٠/٣٪>) بیشتر بوده است. در ادامه برای نمونه های اصلاح شده نیز مقدار ریزش قیر تعیین و مقایسه شده است. آزمایش ریزش قیر طبق استاندارد AASHTO-T305 بر اساس اندازه‌گیری میزان تجمعی ریزش ملات قیری در طی یک ساعت توسط سبد مخصوص به ابعاد ٦/٣٥×٦/٣٥ میلی‌متر بر حسب وزن کل مخلوط در دمای 175□C انجام می‌شود. هدف از این آزمایش شبیه سازی شرایطی است که برای مخلوط هنگام تولید، ذخیره‌سازی، حمل و پخش ممکن است رخ دهد .[Mokhtari, 2011]

نمونه های آزمایش ریزش قیر، نمونه های آسفالتی متراکم نشده ١٢٠٠ گرمی بودند که جهت ارزیابی در درصد قیر بهینه ساخته شدند .[Mohamadzade Moghadam, 2008] میزان ریزش قیر برای هر یک از نمونه‌ها در فواصل زمانی مورد نظر طبق رابطه زیر به دست آمد:

$$\text{ریزش قیر}(\%) = 100 \text{ X } \frac{D-B}{C-A} \qquad (١)$$

در رابطه بالا D، وزن سبد که شامل مواد ریزش شده است، اندازه گیری شده و با وزن آن قبل از ریزش قیر نمونه (B) مقایسه می‌شود. اختلاف بین این دو مقدار، وزن مواد خارج شده را نشان می‌دهد. A وزن سبد بدون نمونه و C وزن سبد با نمونه را نشان می‌دهد.

جدول ٧. نتایج حاصل آزمایش‌های مربوط به تعیین درصد قیر بهینه

درصد قیر	G_{mb}	V_a%	VMA%	استقامت مارشال(kn)	روانی(mm)
٦	٢/٢٨٤	٤/٦	١٨/٤٩	٤/٥٤	٤/٠١
٦/٥	٢/٢٩٢	٤/١	١٨/٣٧	٥/٦٣	٤/٢٠
٧	٢/٢٩١	٣/٦	١٨/٥٦	٤/٢٤	٤/٠٨
٧/٥	٢/٢٨٢	٣/١٥	١٨/٩٣	٤/٨٧	٤/١١
٨	٢/٢٧٦	٢/٥	١٩/٣٢	٤/٦٥	٤/٢٧

جدول ٧. نتایج حاصل آزمایش‌های مربوط به تعیین درصد قیر بهینه

درصد قیر بهینه	G_{mb}	V_a%	VMA%	ریزش قیر٪
٦/٧	٢/٢٩٠٧	٤	١٨/٥١	٠/٣٣٦

٤-٢ مدول برجهندگی

در استاندارد ASTM D4123 تعیین مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از آزمایش کشش غیرمستقیم بیان شده است. در این تحقیق جهت تعیین مدول برجهندگی از دستگاه UTM بر اساس استاندارد مذکور استفاده شده است. مقادیر مدول برجهندگی میانگین از ۳ آزمایش به عنوان مدول برجهندگی تعیین می‌شود. پس از نتایج حاصل از نمونه های خشک، نمونه های عمل آوری شده که مراحل عمل آوری آن مطابق استاندارد AASHTO T283 است مورد آزمایش قرار گرفته و نسبت نمونه های اشباع به خشک حاصل خواهد شد. نسبت مدول برجهندگی (RMR^{9}) باید بیشتر از ۷۰ درصد باشد [Kumar, Chandra and Bose, 2007]. مقدار RMR از رابطه زیر حاصل خواهد شد:

$$RMR = MR_{wet} / MR_{dry} \quad (٢)$$

در این رابطه MR_{wet}، مقاومت فشاری نمونه های تر و MR_{dry}، مقاومت فشاری نمونه های خشک و RMR نسبت این دو است.

٤-٣ مقاومت کششی غیر مستقیم

لاتمن آزمایش کشش غیرمستقیم را برای پیش‌بینی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی تحت شرایط "خدمت دهی به ترافیک واقعی" ارائه کرده است. در این آزمایش که طبق استاندارد AASHTO T283 است، یک گروه از نمونه‌ها تحت شرایط خشک مورد آزمایش قرار می‌گیرند و یک گروه دیگر قبل از انجام آزمایش عمل‌آوری می‌شوند. نمونه‌های گروه خشک تا زمان انجام آزمایش در دمای اتاق نگهداری خواهند شد. در این گروه، نمونه‌ها بایستی حداقل به مدت دو ساعت در حمام آب با دمای ۲۵ درجه سانتیگراد قرار بگیرند و سپس آزمایش مورد نظر بر روی آنها انجام شود. گروه دیگر تا مقدار معینی ،(٪۸۰-٪۵۵) اشباع شده و سپس نمونه‌ها به مدت ١٦ ساعت در دمای منفی ۱۸ درجه سانتیگراد قرار خواهند گرفت. بلافاصله بعد از این زمان، نمونه‌ها در حمام آب ٦٠ درجه سانتیگراد به مدت ٢٤ ساعت قرار گرفته و پس از این مدت، نمونه‌ها در آب ۲۵ درجه به مدت حدود ۲ ساعت قرار داده می شوند و سپس برای آزمایش زیر فک دستگاه قرار می‌گیرند [AASHTO T283]. نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (TSR) از نسبت نمونه های اشباع به خشک حاصل می‌گردد.

$$TSR = (ITS_{wet}/ITS_{dry}) \times 100 \quad (٣)$$

که در آن:

ITS_{wet}[٨] میانگین مقاومت کششی نمونه‌ها در حالت عمل‌آوری شده و ITS_{dry} میانگین مقاومت کششی نمونه‌ها در حالت خشک است.

٤-٤ مقاومت مارشال

آزمایش مارشال در مهندسی راه، هم برای طرح مخلوط و هم برای ارزیابی آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. با وجود این که روش مارشال اساساً یک روش تجربی است، ولی برای مقایسه مخلوط‌ها در شرایط خاص قابل استفاده است [Othman, 2010].

یکی از آزمایش‌های مورد استفاده برای تعیین حساسیت رطوبتی، آزمایش مارشال است. به این صورت که نمونه‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول که شامل نمونه های مستغرق و تر هستند، برای مدت ٢٤ ساعت در آب با دمای ٦٠ درجه سانتیگراد و دسته دوم که شامل نمونه های خشک هستند به مدت ۳۰ تا ٤٠ دقیقه در آب با دمای ٦٠ درجه سانتیگراد قرار گرفته و هر دو دسته بلافاصله پس از اتمام زمان مقرر، زیر جک مارشال قرار می‌گیرند. نسبت مقاومت مارشال در حالت مستغرق به حالت خشک را نسبت مقاومت مارشال می‌نامند که این نسبت با توجه به آیین نامه روسازی آسفالتی راههای ایران (نشریه ٢٣٤) و استاندارد ASTM D1075 نباید کمتر از ۷۵ درصد شود که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$RMS[10] = MS_1/MS_2 \quad (٤)$$

در این رابطه:

MS_1، مقاومت فشاری نمونه های تر و MS_2، مقاومت فشاری نمونه های خشک و RMS نسبت این دو است.

٤-٥ آزمایش آب جوشان ASTM 3625

در این آزمایش درجات مختلف عریان‌شدگی به صورت بصری، پس از جوشاندن مخلوط آسفالتی متراکم نشده به مدت ۱۰ دقیقه تعیین می‌شود. در حدود ۵۰۰ گرم آب در ظرفی ریخته شده و به آن حرارت داده می‌شود تا به نقطه جوش برسد، سپس ۲۵۰ گرم از نمونه متراکم نشده، حداکثر تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد (و بیشتر از ۸۰ درجه سانتیگراد) و برای مدت ۱۰ دقیقه درون آب جوش حرارت داده می‌شود و هر سه دقیقه یک بار محتویات درون ظرف هم زده می‌شود و در انتها قیرهای روی سطح آب با استفاده از سرنخ جدا شده تا باعث پوشش مجدد مصالح نگردد. پس از سرد شدن محتویات ظرف تا دمای اتاق، آب موجود در ظرف خالی شده و برای بررسی‌های بیشتر، مخلوط را بر روی یک سطح سفید قرار می‌دهند. معیار خرابی با مشاهدات بصری مصالح عریان شده تعیین خواهد شد.

۵. بحث درباره نتایج

۵-۱ طرح مخلوط

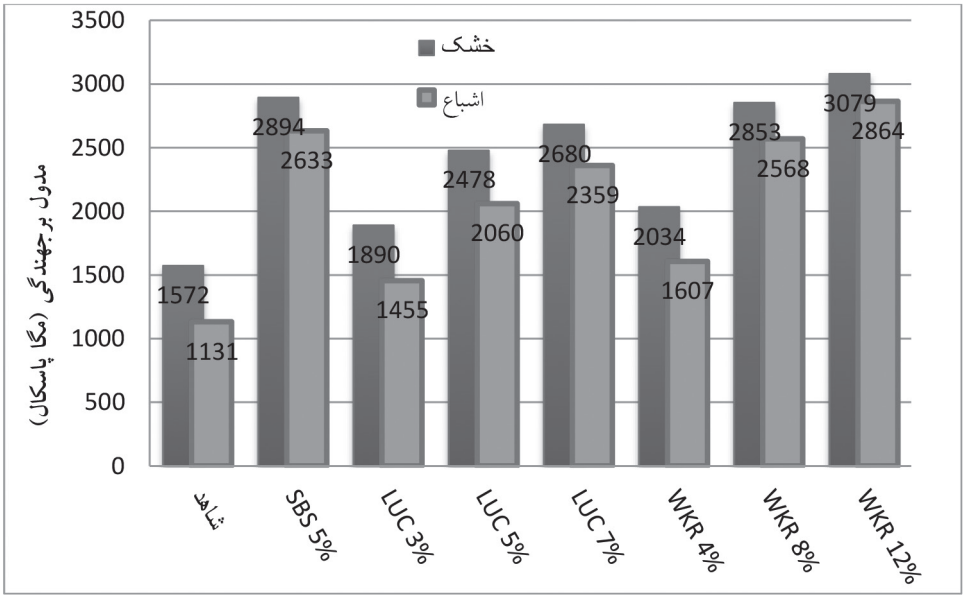
همان طور که در جدول ۸ مشاهده می‌شود، درصد قیر بهینه برای مخلوط‌های آسفالتی SMA برابر با ٦/٧ به دست آمده است.

۵-۲ مدول برجهندگی

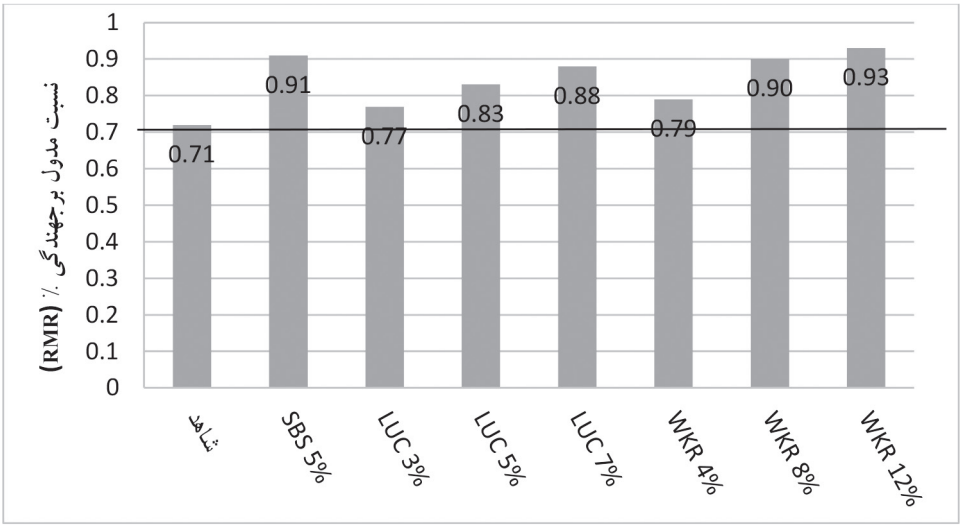
با توجه به نتایج حاصل از آزمایش مدول برجهندگی در اشکال ۱ و ۲ می‌توان این‌گونه بیان کرد که میزان مدول برجهندگی مخلوط‌های SMA اصلاح شده با WKR2 و Lucobit با افزایش درصد پلیمر، افزایش می‌یابد و این مقدار در ۱۲ درصد WKR از دیگر پلیمرها بیشتر است. میزان بهبود در نسبت مدول برجهندگی برای نمونه های اشباع و خشک نیز در نتایج قابل مشاهده است. مخلوط شامل ٪۸ WKR مقدار تقریباً مشابهی با مخلوط شامل ٪۵ SBS هم در مقدار مدول و هم در نسبت آن دارد. تغییرات در لوکوبیت از ۳ به ۵ درصد و در WKR از ٤ به ۸ درصد قابل توجه است.

۵-۳ مقاومت کششی غیرمستقیم

انجام این آزمایش بر اساس استاندارد AASHTO T283-03 و توسط دستگاه کشش غیرمستقیم صورت گرفته است. برای هر یک از مخلوط‌ها تعداد ٦ نمونه استوانه ای آماده شد. ۳ عدد از نمونه‌ها برای آزمایش تحت شرایط خشک (غیراشباع) و ۳ عدد برای آزمایش تحت شرایط اشباع استفاده شدند. نسبت مقدار مقاومت نمونه‌های اشباع به نمونه‌های خشک (اشباع نشده) مقدار



شکل ۱. مقادیر مدول برجهندگی برای نمونه های اصلاح شده و اصلاح نشده در حالت خشک و اشباع



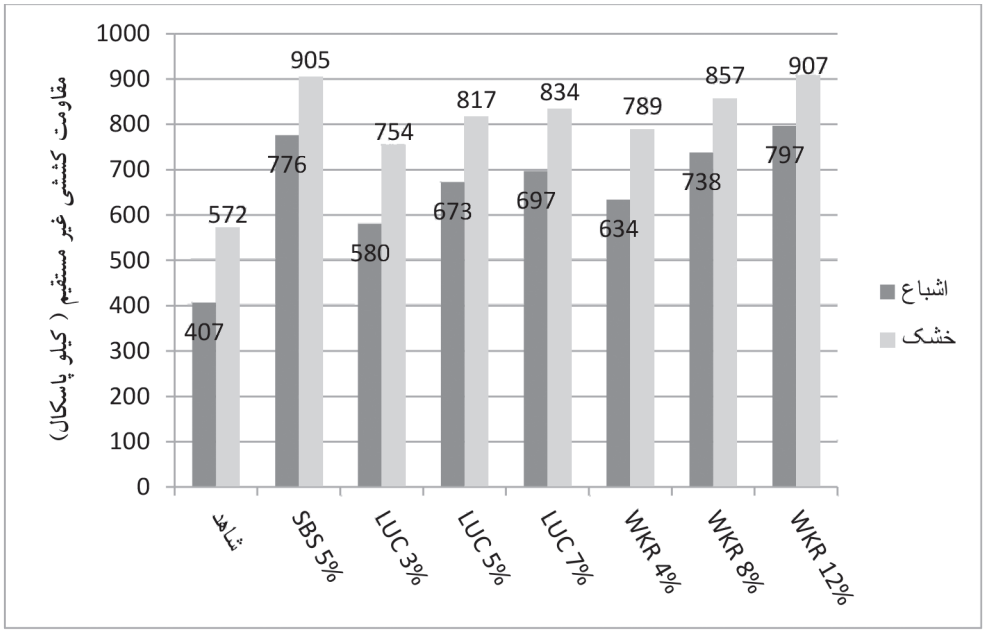
شکل ۲. مقادیر نسبت مدول برجهندگی برای نمونه های اصلاح شده و اصلاح نشده

TSR را نتیجه می‌دهد. نتایج این آزمایش در شکل ۳ و ٤ نشان داده شده است.

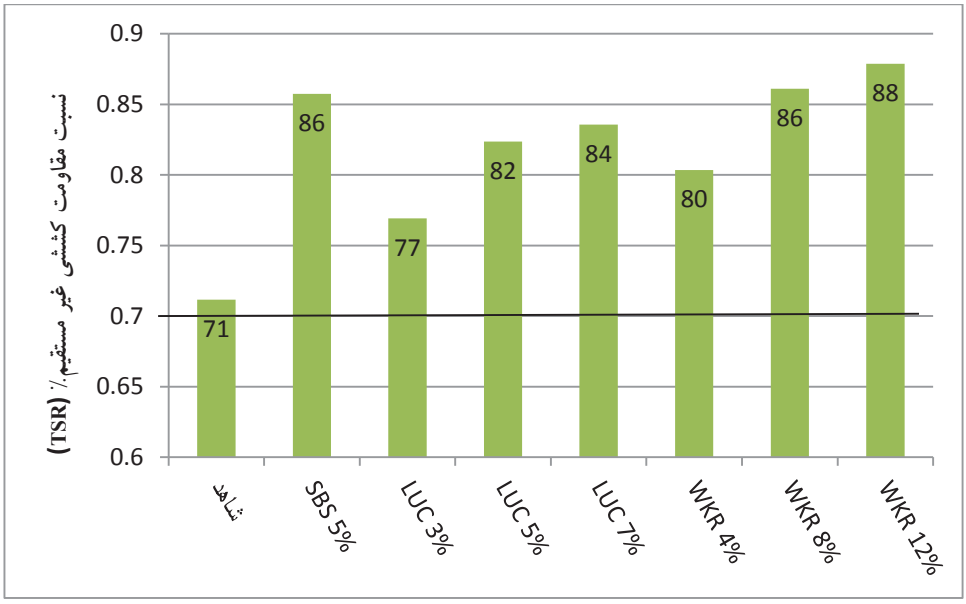
با توجه به نتایج می‌توان تأثیر مثبت پلیمر را در مقدار ITS و TSR به وضوح دید. مقدار ITS و TSR با افزایش درصد پلیمر، افزایش می‌یابد. عملکرد نمونه ٪۸ WKR در مقدار ITS و همچنین در مقدار TSR از لوکوبیت ۷ درصد بهتر بوده و برابر با ۵ SBS درصد است. تغییرات TSR در لوکوبیت از ۳ به ۵ درصد و در WKR از ۸ به ۱۲ درصد ناچیز و کم است.

٥-٤ مقاومت مارشال

انجام این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM D1075 و توسط دستگاه جک مارشال صورت گرفته است. برای هر یک از مخلوط‌ها تعداد ٦ نمونه استوانه ای آماده شد. ۳ عدد از نمونه‌ها برای آزمایش تحت شرایط خشک و ۳ عدد برای آزمایش تحت شرایط غرقاب استفاده شدند. نسبت مقدار مقاومت نمونه‌های غرقاب به نمونه‌های خشک مقدار RMS را نتیجه می‌دهد. نتایج این آزمایش در شکل ۱۳ و ١٤ نشان داده شده است.



شکل ۳. مقادیر مقاومت کششی غیر مستقیم در حالت خشک و اشباع برای نمونه های اصلاح شده و اصلاح نشده



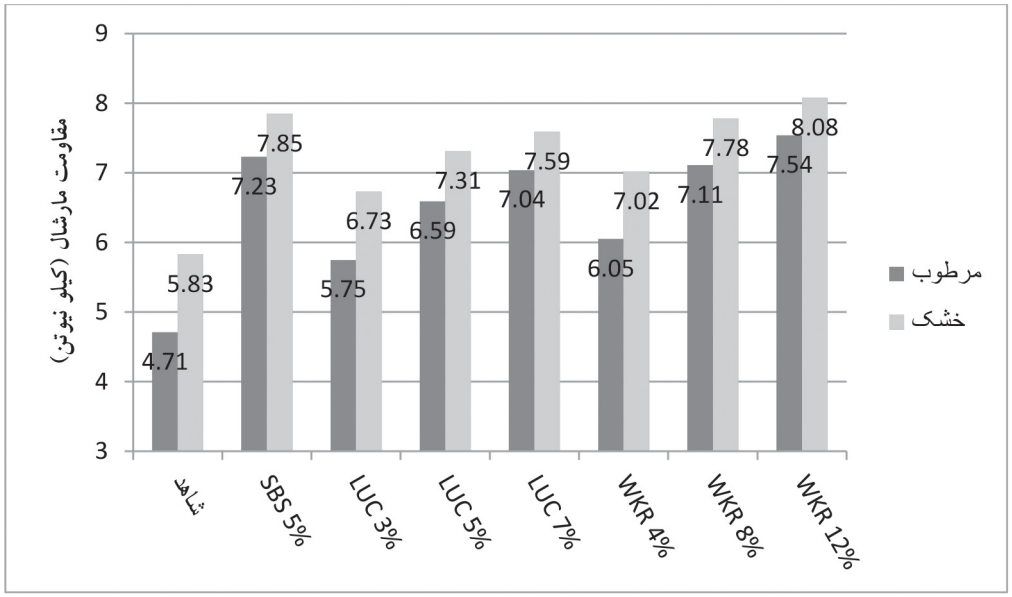
شکل ٤. مقادیر نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم برای نمونه های اصلاح شده و اصلاح نشده

با توجه به نتایج می‌توان تأثیر مثبت پلیمر را در مقدار مقاومت مارشال و نسبت آن دید. با افزایش درصد پلیمر، مقاومت و نسبت مارشال افزایش می‌یابد. عملکرد لوکوبیب و WKR به ترتیب در دو درصد ۵، ۷ و ۸، ۱۲ با SBS برابری می‌کند. تغییرات RMS در لوکوبیت از ۳ به ۵ درصد و در WKR از ۸ به ۱۲ درصد ناچیز و کم است.

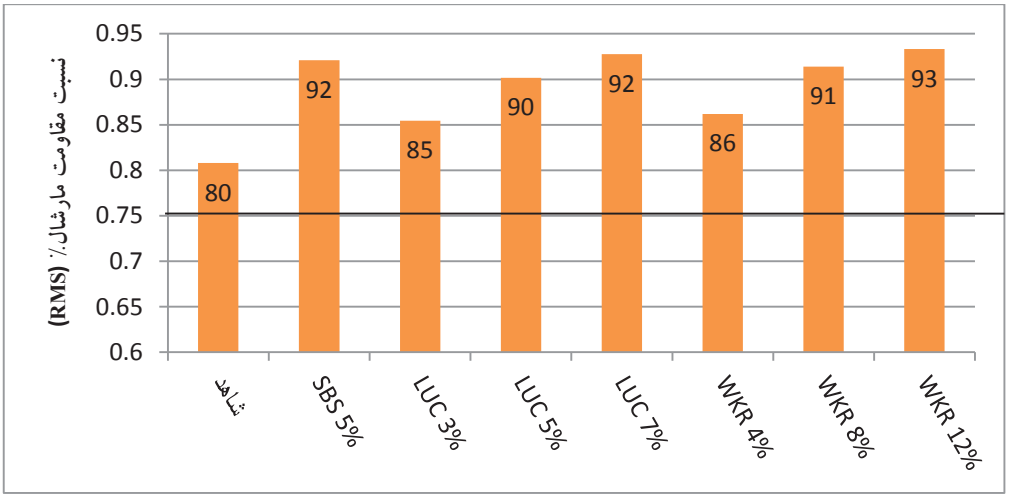
۵-۵ آب جوشان

ASTM D3625 روشی را استاندارد کرده است که می‌توان از آن، برای تعیین کاهش چسبندگی در مخلوط متراکم نشده، تحت تأثیر آب جوش استفاده کرد. نتایج به صورت جدول ۹ است.

نتایج همانند آزمایش‌های قبلی نشان دهنده بهبود حساسیت رطوبتی با افزایش درصد پلیمر است. علت این بهبود افزایش چسبندگی قیرهای پلیمری اصلاح شده است.



شکل ۵. مقادیر مقاومت مارشال در حالت خشک و مرطوب برای نمونه های اصلاح شده و اصلاح نشده



شکل ٦. مقادیر نسبت مقاومت مارشال برای نمونه های اصلاح شده و اصلاح نشد

جدول ۹. نتایج آزمایش جوشان برای نمونه های اصلاح شده و اصلاح نشده

انواع مخلوط	شاهد	SBS 5%	LUC 3%	LUC 5%	LUC 7%	WKR 4%	WKR 8%	WKR 12%
درصد جداشدگی	٥٠-٤٠	٣٠-٢٠	٤٠-٣٠	٣٠-٢٠	٣٠-٢٠	٤٠-٣٠	٣٠-٢٠	٢٠-١٠

٥-٦ ریزش قیر

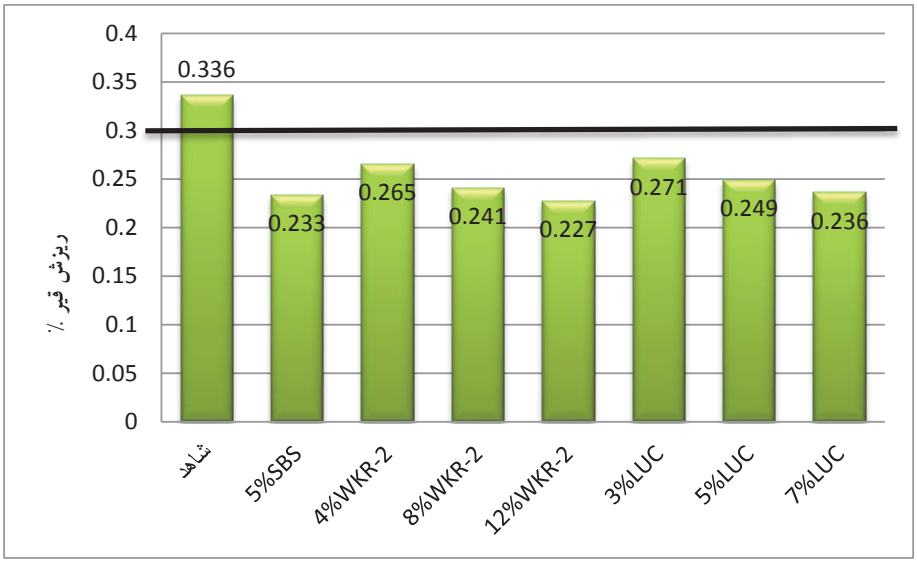
میزان ریزش قیر در نمونه های اصلاح شده در مقایسه با نمونه اصلاح نشده بیانگر تأثیر پلیمرها در میزان چسبندگی قیرها است. علاوه بر میزان چسبندگی، کندروانی قیر را نیز افزایش داده و باعث تثبیت نمونه‌ها خواهند شد. حفظ قیر در اطراف سنگدانه‌ها مهم‌ترین عامل در کاهش نفوذ رطوبت به مرز قیر و سنگدانه است. شمل (۷) به خوبی نشان می‌دهد که افزایش درصد پلیمر باعث کاهش در میزان ریزش قیر می‌شود. در تمامی درصدها به جز نمونه شاهد، ریزش قیر از حد استاندارد ۰/۳ درصد کمتر است و این برای طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه ای کافی است.

٥-٧ مقایسه روش تولید مخلوط‌های اصلاح شده با پلیمر

یکی از معایب مخلوط‌های حاوی SBS، روش تولید و اختلاط آنها است. در ساخت نمونه‌ها با پلیمر SBS، قیر خالص پس از اختلاط با پلیمر SBS به مدت ٤٥ دقیقه با مخلوط کن برش بالا در دمای ۱۸۰ درجه سانتیگراد قرار می‌گیرد تا مرحله اختلاط پایان پذیرد. سپس قیر اصلاح شده با SBS در دمای ۱۷۵ درجه سانتیگراد با مصالح سنگی مخلوط و در دمای ۱۷۵ درجه سانتیگراد متراکم می‌گردد، در حالی که فرآیند تولید مخلوط‌های حاوی لوکوبیت و WKR-2 بسیار ساده است؛ و برای تولید قیر اصلاح شده با این دو پلیمر نیازی به همزن با دور بالا نیست. بلکه با استفاده از همزن با دور پایین و به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۱٦٥ درجه سانتیگراد می‌توان قیر پلیمری کاملاً همگن تولید کرد و در دمای ۱٦٥ درجه سانتیگراد با مصالح سنگی مخلوط و در دمای ۱٦۰ درجه سانتیگراد متراکم می‌گردد.

٥-٨ مقایسه اقتصادی مخلوط‌های تولید شده با SBS، Lucobit و WKR-2

همان طور که ملاحظه می‌شود، تولید مخلوط آسفالتی اصلاح شده با پلیمر SBS و Lucobit هزینه نزدیک به هم دارند، ولی مخلوط حاوی WKR-2 کمی بیشتر است که به دلیل درصد بالای استفاده از این پلیمر در مخلوط است. در محاسبه هزینه هر تن آسفالت، از قیمت روز افزودنی استفاده شده است.



شکل ۷. مقادیر درصد ریزش قیر برای نمونه های اصلاح شده و اصلاح نشده

جدول ۱۰. هزینه تولید آسفالت با ۵ درصد SBS

درصد SBS مصرفی	قیمت هر یک کیلوگرم محصول(تومان)	درصد قیر بهینه آسفالت	میزان مصرف SBS در یک تن قیر (Kg)	هزینه SBS مصرفی در یک تن قیر تولید شده با SBS (تومان)	میزان مصرف SBS در یک تن آسفالت (Kg)	هزینه SBS مصرفی در یک تن آسفالت تولید شده با SBS (تومان)
۵	۳۸۰۰۰	٦/۷	۵۰	۱,۹۰۰,۰۰۰	۳/۳۵	۱۲۷۳۰۰

جدول ۱۱. هزینه تولید آسفالت با درصدهای مختلف Lucobit

درصد Lucobit مصرفی	قیمت هر یک کیلوگرم محصول(تومان)	درصد قیر بهینه آسفالت	میزان مصرف Lucobit در یک تن قیر (Kg)	هزینه Lucobit مصرفی در یک تن قیر تولید شده با Lucobit (تومان)	میزان مصرف Lucobit در یک تن آسفالت (Kg)	هزینه Lucobit مصرفی در یک تن آسفالت تولید شده با Lucobit (تومان)
۳			۳۰	۱,۲۰۰,۰۰۰	۲/۰۱	۸۰٤۰۰
۵	٤۰۰۰۰	٦/۷	۵۰	۲,۰۰۰,۰۰۰	۳/۳۵	۱۳٤۰۰۰
۷			۷۰	۲,۸۰۰,۰۰۰	٤/٦۹	۱۸۷٦۰۰

جدول ۱۲. هزینه تولید آسفالت با درصدهای مختلف WKR-2

درصد WKR-2 مصرفی	قیمت هر یک کیلوگرم محصول(تومان)	درصد قیر بهینه آسفالت	میزان مصرف WKR-2 در یک تن قیر (Kg)	هزینه WKR-2 مصرفی در یک تن قیر تولید شده با WKR-2 (تومان)	میزان مصرف WKR-2 در یک تن آسفالت (Kg)	هزینه WKR-2 مصرفی در یک تن آسفالت تولید شده با WKR-2 (تومان)
٤			٤۰	۱,۸٤۰,۰۰۰	۲/٦۸	۱۲۳۲۸۰
۸	٤٦۰۰۰	٦/۷	۸۰	۳,٦۸۰,۰۰۰	۵/۳٦	۲٤٦۵٦۰
۱۲			۱۲۰	۵,۵۲۰,۰۰۰	۸/۰٤	۳٦۹۸٤۰

٦. نتیجه گیری

بر اساس تحلیل اطلاعات این تحقیق نتایج زیر به دست آمده‌اند:

۱- استفاده از هر سه پلیمر فوق‌الذکر، تأثیر قابل توجهی بر خصوصیات قیر خالص داشت، به طوری که با افزودن درصدهای مختلف به قیر، خصوصیات قیر از جمله درجه نرمی و درجه نفوذ قیر بهبود یافت. این موضوع با توجه به نقش قیر در مخلوط‌های SMA بسیار حائز اهمیت است.

۲- به طور کلی نمونه های حاوی پلیمر، عملکرد بهتری در آزمایش مدول برجهندگی و نسبت مدول برجهندگی که در شرایط اشباع و غیر اشباع (خشک) صورت پذیرفت، نسبت به نمونه های معمولی، از خود نشان دادند. چسبندگی بالای قیر اصلاح شده منجر به قفل و بست مناسب در سنگدانه‌ها و افزایش مقاومت در نمونه‌ها می‌شود. با افزایش درصد پلیمر، عملکرد بهتر می‌شود. ۵ و ۷ درصد از لوکوبیت به ترتیب ۱۷ و ٢٤ درصد و همچنین ۸ و ۱۲ درصد از WKR به ترتیب ۲۷ و ۳۱ درصد، تأثیر مثبت نسبت به نمونه شاهد در آزمایش نسبت مدول برجهندگی از خود نشان دادند و همچنین نتایجی نزدیک و بالاتر نسبت به SBS با درصد تأثیر ۲۸ درصد داشته‌اند. به دلیل وابستگی ضخامت رویه های آسفالتی به مدول برجهندگی این امر از اهمیت زیادی برخوردار است.

۳- نتایج حاصل از آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم که در شرایط اشباع و غیراشباع (خشک) صورت پذیرفت، حاکی از بهبود مقاومت کششی (ITS) و نسبت مقاومت کششی (TSR) بوده است و این روند بهبود با افزایش درصد پلیمر سیر صعودی داشت. چسبندگی بین قیر اصلاح شده و سنگدانه‌ها و همچنین پیوستگی بین مولکول‌های قیر اصلاح شده به اندازه ای بود که مانع از نفوذ آب به مرز بین قیر و سنگدانه شد و این موضوع منجر به این شد که ترک در کشش نمونه‌ها، به علت ترک در سنگدانه‌ها رخ دهد، نه به علت جداشدگی در مرز بین سنگدانه‌ها و قیر. ۵ و ۷ درصد از لوکوبیت به ترتیب ۱۵ و ۱۸ درصد و همچنین ۸ و ۱۲ درصد از WKR به ترتیب ۲۱ و ٢٤ درصد، تأثیر مثبت نسبت به نمونه شاهد در آزمایش TSR از خود نشان دادند و همچنین نتایجی نزدیک و بالاتر نسبت به SBS با درصد تأثیر ۲۱ درصد داشته‌اند.

٤- نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت مارشال و نسبت نمونه‌های مستغرق به خشک این آزمایش همانند آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم با افزایش درصد پلیمر سیر صعودی داشتند. انسجام سنگدانه‌ها و تماس مناسب سنگدانه روی سنگدانه باعث مقاومت مناسب نمونه‌ها در هنگام بارگذاری شد که این امر به دلیل چسبندگی و کند روانی بالای نمونه های اصلاح شده با پلیمر بوده است. ۵ و ۷ درصد از لوکوبیت به ترتیب ۱۲/۵ و ۱۵ درصد و همچنین ۸ و ۱۲ درصد از WKR به ترتیب ١٤ و ١٦ درصد، تأثیر مثبت نسبت به نمونه شاهد در آزمایش نسبت مارشال از خود نشان دادند و همچنین نتایجی نزدیک و بالاتر نسبت به SBS با درصد تأثیر ۱۵ درصد داشته‌اند.

۵- نتایج آزمایش جوشان به صورت کیفی بوده و خطای آن زیاد است، ولی با این حال می‌توان تأثیر مثبت پلیمرها در این آزمایش را دید و مقایسه کرد. نتایج حاکی از بهبود نمونه های اصلاح شده است. همچنین کاهش میزان جداشدگی قیر از مصالح را با افزایش درصد پلیمر می‌توان را دید.

٦- آزمایش ریزش قیر برای نمونه های متراکم نشده انجام گرفت که در تمامی درصد پلیمرها نتایج متناسب با حالت استاندارد بودند. چسبندگی بالای قیر اصلاح شده و حفظ آن در دمای بالا و افزایش کندروانی در این آزمایش منجر به بهبود در ریزش قیر شدند.

۷- نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های مختلف بیانگر تأثیر مفید و مثبت پلیمرهای استفاده شده در این تحقیق است. با توجه به ملاحظات در مورد سه پلیمر استفاده شده و مقایسه آنها با یکدیگر می‌توان این‌گونه بیان کرد که استفاده از ۱۲ درصد پلیمر WKR-2 و ۷ درصد لوکوبیت با توجه به نتایج بسیار خوب و بالاتر نسبت به SBS، کارآیی مخلوط را کاهش می دهد و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نخواهد بود، ولی ۸ درصد پلیمر WKR-2 و ۵ درصد لوکوبیت با توجه به اینکه نتایج نزدیک و برابری با SBS داشته‌اند و نسبت به درصد های بالاتر هزینه کمتری دارند و با

توجه به اینکه استفاده از SBS در زمان اختلاط با قیر هزینه استفاده از همزن‌های با برش بالا را تحمیل می‌کند، می‌توانند گزینه مناسبی برای استفاده در مخلوط‌های SMA اصلاح شده به جای SBS باشند.

۸- در مورد مقایسه دو نمونه مخلوط اصلاح شده با ۸ درصد پلیمر WKR-2 و ۵ درصد پلیمر لوکوبیت با یکدیگر با توجه به نتایج تقریباً نزدیک به هم در آزمایش‌های انجام شده، پلیمری بهینه تر خواهد بود که از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه تر باشد. هزینه تولید WKR-2 تقریباً ۲ برابر SBS است، ولی Lucobit هزینه ای نزدیک به SBS دارد و با توجه به نوع همزن، Lucobit می‌تواند جایگزینه مناسبی برای SBS باشد.

۷. پی نوشت ها

1- Stone Matrix Asphalt
2-Stripping
3- Styrene Butadiene Styrene
4- Moisture Sensitivity
5- American Association of State Highway and Transportation Officials
6- Starch
7- Tensile Strength Ratio
8- Indirect Tensile Strength
9- Resilient Moduluse Ratio
10- Ratio Marshall stability
11- Hydrophilic
12- Hydrophobic

۸. مراجع

–دهقانی، مرتضی و لطیفی، منوچهر(۱۳۹۰) "بررسی آزمایشگاهی تأثیر قیر پلیمری SBS بر مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی SMA"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، ٦ و ۷ اردیبهشت ماه.

–شاکری، اقبال، مقدس نژاد، فریدون و کشاورزراد، اصغر (۱۳۹۲) "مقایسه خصوصیات مقاومتی آسفالت لاستیکی و آسفالت معمولی"،هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، زاهدان، ۱۷ و ۱۸ اردیبهشت ماه.

– محمد زاده مقدم، ابوالفضل (۱۳۸۷) "بررسی تأثیر نوع الیاف بر ریزش قیر و خواص خستگی مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه ای"، پایان نامه کارشناسی ارشد ، دانشگاه فردوسی مشهد.

– مختاری، علی(۱۳۹۰) "بررسی تأثیر افزودنی رئوفالت (WKR-2) به مخلوط آسفالتی SMA و مقایسه آن با افزودنیهای دیگر"، پایان نامه کارشناسی ارشد ، دانشگاه علم و صنعت ایران.

-AASHTO (1997) "Standard method of test for resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage", AASHTO, USA.

-Al-Hadidy, A. and Yi-qiu, T. (2008) "Comparative study of performance of natural fibres and crumb rubber modified stone matrix asphalt mixtures", Canadian Journal of Civil Engineering, 2008. 33(2), pp. 134-139

-Al-Hadidy, A., Yi-qiu, T. and Hameed, A.T. (2011)"Starch as a modifier for asphalt paving materials", Construction and Building Materials, 25 , pp. 14–20.

-Ghasemi, M. and Marandi , S. M. (2010) "Laboratory investigation of the properties of stone matrix asphalt mixtures modified with RGP–SBS", Digest Journal of nanomaterials and biostructures, Vol. 6, No 4, pp. 1823-1834.

-Huang, Yang H. (2004) "Pavement analysis and design", second edition, Prime.

-Kumar, P., Chandra, S. and Bose, S. (2007) "Laboratory investigations on SMA mixes with different additives", International Journal of Pavement Engineering, pp. 11-18.

-National Cooperative Highway Research Program (1999) "Designing stone matrix asphalt mixtures for rut-resistant pavements", NCHRP Report No.425, Transportation Research Board., Washington, D.C., National Academy Press.

-Othman, A. M. (2010) "Impact of polypropylene application method on long-term ageing of polypropylene-modified HMA," Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 22, pp. 1012.

-Xiao, F., Zhao, W., Gandhi, T. and Amirkhanian, S. N. (2010) "Influence of antistripping additives on moisture susceptibility of warm mix asphalt mixtures," Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 22, pp. 1047-1055