

## بررسی آزمایشگاهی عملکرد مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای (SMA) برای استفاده در روسازی سطوح پروازی

### مقاله پژوهشی

علی پایدار، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران  
علیرضا عاملی\*، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران  
مجید ستاری، دانش آموخته کارشناس ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران  
بهروز بهنود، دانش آموخته کارشناس ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Amelii@gmail.com

دریافت: ۹۹/۰۶/۱۸ - پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۰۵

صفحه ۲۰۰-۱۸۱

### چکیده

هدف از طراحی روسازی راه‌ها و فرودگاه‌ها فراهم آوردن یک ترکیب سازه‌ای بر روی مسیر حرکت جهت انتقال ترافیک عبوری به صورت ایمن، یکنواخت و کارآمد می‌باشد و با افزایش روز افزون بار ترافیکی و میل به حمل بار بیشتر و در نتیجه ازدیاد بار وارده بر محورها و رویه آسفالتی، ضرورت طرح و اجرای لایه‌های آسفالتی مقاوم‌تر در برابر خرابی‌های مختلف از جمله حساسیت رطوبتی و پدیده شیارشدگی (به عنوان پدیده‌ای رایج در خرابی لایه آسفالتی) قابل تأمل است. در این تحقیق تاثیر افزودنی‌هایی از SBS (۳٪ و ۵٪) و Lucobite (۳٪ و ۵٪) بر عملکرد مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای (SMA) مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. آزمایشات مقاومت مارشال، مقاومت کششی غیرمستقیم، مدول برجهندگی، آزمایش حساسیت رطوبتی (با انجام آزمایش کشش غیرمستقیم و مدول برجهندگی در دو حالت خشک و مرطوب و آزمایش جوشان تگراس) خزش دینامیکی و شیار جای چرخ هامبورگ به منظور تحقیق در رفتار مخلوط‌های SMA انجام شد. نتایج نشان داد با افزایش افزودنی‌های پلیمری، درجه نفوذ کاهش و نقطه نرمی افزایش یافت. بررسی نتایج آزمایشات و پردازش تصویر عکس‌های آزمایش آب جوشان نشان داد افزودنی‌های پلیمری سبب بهبود مقاومت مخلوط در برابر رطوبت گردیده است. نتایج آزمایش خزش دینامیکی نشان می‌دهد که با افزایش افزودنی‌های پلیمری مقاومت شیارشدگی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. به طوریکه نمونه‌های حاوی افزودنی ۵٪ SBS دارای بالاترین مقاومت در برابر شیارشدگی می‌باشد. همچنین نتایج آزمایش شیار جای چرخ نیز نشان می‌دهد که با افزایش افزودنی‌های پلیمری مقاومت شیارشدگی نمونه‌ها افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای (SMA)، شیارشدگی، خزش دینامیکی، حساسیت رطوبتی، مدول برجهندگی

### ۱-مقدمه

سطوح پروازی فرودگاه‌ها، فراهم آوردن یک ترکیب سازه‌ای بر روی مسیر حرکت جهت انتقال ترافیک عبوری به صورت ایمن، یکنواخت و کارآمد می‌باشد و خرابی‌های روسازی راه‌ها و فرودگاه‌ها مستلزم اجرای عملیات تعمیر و بهسازی در فواصل زمانی نسبتاً کوتاه پس از بهره برداری است که هزینه‌های زیادی را در بر خواهد داشت. در سال‌های اخیر، در برخی کشورهای اروپایی، ایالت متحده آمریکا و کانادا جهت تأمین برخی انتظارات خاص روسازی و تحمل بار

در کشور پهناور ایران تسهیل در امور حمل و نقل با توجه به اقلیم و شرایط خاص منطقه‌ای و برنامه‌ریزی مناسب برای آن و ساخت و توسعه اصولی و مناسب زیرساخت‌های حمل و نقل با رعایت ضوابط و معیارهای فنی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. حمل و نقل هوایی با توجه به سرعت بالای آن در جابجایی کالا و مسافر و تاثیر آن بر توسعه اقتصادی در برنامه ریزی حمل و نقل کشور توجه ویژه‌ای به آن گردیده است. هدف از طراحی بخش روسازی باندها و دیگر

می‌باشد. فرودگاه بزرگ بیژینگ برای اولین بار ۱۰ سال پیش با آسفالت SMA روکش شد. از آن زمان به بعد ۱۰ فرودگاه دیگر با مجموع ۱۱ فرودگاه از ۲۲ فرودگاه با SMA ساخته شدند. برخی مزایا فرودگاه ساخته شده در چین با استفالت SMA شامل: مقاومت در برابر آسیب ناشی از نشت سوخت و روغن، بهبود مقاومت لغزشی، پایداری و دوام عالی، حفاظت پایین، ترک خوردگی انعکاسی تبدیل شده، و هزینه کمتر در چرخه عمر می‌باشد. (Prowell, 2009)

SMA نخستین بار در باند فرودگاه شرق در فرودگاه بین المللی مرکز بیچینگ مورد استفاده قرار گرفت. باند فرودگاه در اصل با روسازی‌های بتونی و با ۴۰ سانتی متر ضخامت در انتها و ۳۵ سانتی متر ضخامت در نقطه مرکزی باند فرودگاه در سال ۱۹۵۴ ساخته شد. برای حل مسائل مربوط به واکنش پذیری سیلیکا - قلیا (ASR) لازم است که این فرودگاه در ۱۹۹۶ مرمت شود. یک بافت ۵۰ سانتی متری (۲۰ اینچ) عرض در تمام اتصالات و ترک‌ها برای پوشاندن با ترکیب آسفالت داغ مورد استفاده قرار گرفت. ۸ سانتی متر لایه اساس با آسفالت داغ معمولی (HMA) با قیر پایه AC-25 و ۷ سانتی متر لایه میانی با قیر AC-20 و ۶ سانتی متر لایه سطحی با مخلوط SMA-16 مورد استفاده قرار گرفت. هر چند این روسازی ۱۱ سال سن داشت اما هنوز عملکرد خوبی دارد. تنها خط شیارهایی با عمق یک سانتی متری در پایان باند فرودگاه وجود دارد که هواپیماها در آن برای انتظار تیک آف می‌نشینند. باند فرودگاه ۵ سال پیش با پوشش محکم (SEAL MASTER) مورد بازسازی قرار گرفت. فشار بالای اسپری آب هر دو ماه یکبار برای حذف لاستیک از ابتدا و انتهای باند پرواز و از گل‌یکول در طول زمستان و برای از بین بردن برف و باران استفاده گردید. در سال ۱۹۸۰ باند غربی فرودگاه (L 36R/18) با HMA ساخته شد. مرکز باند فرودگاه دارای ضخامت ۲۱ سانتی متر و جوانب باند به فاصله ۵ متر از مرکز دارای ۱۸ سانتی متر ضخامت و شانه‌های باند نیز دارای ضخامت ۱۳ سانتی متری بوده است. این باند در سال ۲۰۰۰ با SMA روکش شده است. قیر دریاچه ترینیداد اصلاح شده با SBS برای ۲۰۰ متر انتهایی باند فرودگاه مورد استفاده قرار گرفت. (Prowell, 2009)

طرح ساخت SMA برای روکش کردن مسیر در ادامه بیان می‌شود که عبارت است از:

الف- قیر پایه با درجه نفوذ ۱۰۰ تا ۱۲۰ برای تولید قیر PG70-22 با ۳ درصد LDPE و ۳ درصد SPS اصلاح گردید.

ب- مصالح سنگی: مصالح درشت از سنگ بازالت و مصالح ریز از سنگ آهک و ماسه طبیعی بود.

محوری سنگین، از مخلوط‌های آسفالتی، با استخوان‌بندی سنگدانه ای (SMA) استفاده نموده‌اند. آسفالت SMA که از مقاومترین انواع مخلوط‌های آسفالتی شناخته شده تا به امروز است، پروسه انتقال و تنزیل بار را از طریق تماس مستقیم سنگ روی سنگ ۱ صورت می‌دهد. به منظور فراهم نمودن تماس سنگ روی سنگ در این نوع از مخلوط‌های آسفالتی، می‌بایست دانه بندی از نوع میان تهی به منظور طرح اختلاط و ساخت این نوع مخلوط‌ها بکار گرفته شود که در نتیجه این عمل مقدار فضای خالی این نوع مخلوط 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 قیر، فیلر و افزودنی (ماستیک قیر) پر کرده تا به مقدار مجاز درصد هوا برسیم. دلایل استفاده از افزودنی در این مخلوط‌ها در درجه اول جلوگیری از پدیده ریزش قیر و در درجه دوم افزایش خصوصیات فنی و مقاومتی آسفالت SMA می‌باشد. از انواع افزودنی‌ها می‌توان به پلیمرها (SBS، پلی‌اتیلن، پلی‌پروپیلن، SBR و...) و همچنین به الیاف (آلی، معدنی، فلزی، پلیمری و...) اشاره کرد. از مهمترین عوامل در تامین تماس لازم بین مصالح سنگی مخلوط‌های آسفالتی SMA می‌توان به دانه‌بندی مصالح سنگی، درصد قیر، نوع پلیمر و الیاف استفاده شده و جنس و شکل مصالح سنگی نام برد. تغییر در هریک از موارد فوق تاثیرات قابل توجهی بر خواص حجمی و مقاومتی این مخلوط‌های آسفالتی خواهد گذاشت. 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 ماستیک قیری در درجه دوم قرار دارد. البته این مسأله بدین معنی نمی‌باشد که ماستیک قیری در مخلوط‌های SMA از اهمیت کمی برخوردار می‌باشد، بلکه اساساً در اولویت دوم قرار دارد. در دهه‌های اخیر به منظور غلبه بر مشکلات قیرهای خالص معمولی که به تنهایی از خواص شیمیایی، فیزیکی، رئولوژیکی و چسبندگی محدودی برخوردارند از مواد اصلاح کننده استفاده می‌شود. قیرهای ایران نیز از این شکل مستثنی نبوده و در مناطقی که دامنه تغییرات حرارتی شدید، بار ترافیکی سنگین یا بارندگی و یخبندان فراوان باشد به تنهایی قادر به رفع مشکلات مربوط به شرایط مذکور نبوده و لازم است که حتماً در خواص آن تغییراتی داده شود. از سوی دیگر، وجود ضعف در قیرهای تولیدی باعث ایجاد خرابی در روکش‌های آسفالتی در طول زمان بهره‌برداری از راه‌های آسفالتی می‌شود [Shafabakhsh, Haddad and Akbari, 2009] چین پیشگام استفاده از SMA در فرودگاه‌ها

پ-پرکننده های معدنی: از گردو غبار سنگ آهک به عنوان فیلر استفاده شد.

ت- افزودنی تثبیت کننده: از سلولز Viatop 66 گلوله شکل برای پایداری و جلوگیری از ریزش قیر استفاده شده. باند فرود اصلی در فرودگاه ملی بروکسل (7L-25R)، ۳۲۰۰ متر طول و ۴۵ متر عرض دارد. روسازی بتنی اصلی باند فرودگاه در سال ۱۹۸۰ با ۱۸۰ تا ۳۲۰ میلی متر از HMA روکش شده است. لایه ضد لغزش در سال ۱۹۸۸ اضافه شد. با پیدایش ترک خوردگی های گسترده، باند پرواز در سال ۱۹۹۶ روکش گردید. ۶۰ میلی متر از کل روسازی تراشیده شد و بعلاوه ۷۰ میلی متر در ۳/۲ از طول باند پرواز در مرکز برای اصلاح شیب عرضی برداشته شد. لایه ضد ترک (SAMI) به ضخامت ۱۳۰ میلی متر و ۷۰ میلی متر لایه آسفالتی (HMA) و ۶۰ میلی متر نیز لایه SMA بر روی سطح قرار گرفت. (Prowell, 2009)

مخلوط آسفالتی با دانه بندی SMA به دو دلیل بر روس سطح قرار گرفت:

- فضای خالی کم برای مقاومت

- پتانسیل خوب مقاومت لغزشی

گمان می رود استفاده از SMA توانایی عرضه بافت درشت کافی برای برآورده کردن نیازهای سازمان مهندسی هواپیمایی بین المللی را بدون استفاده از لایه های ضد لغزش گران قیمت دارد. مخلوط با ۳٪ الیاف سلولزی آمیخته گردید. مخلوط آسفالتی با ۶/۸۵ درصد قیر اصلاح شده (پلیمرالاستومر) تولید شده بود. آزمایشات اصطکاک بر روی SMA و لایه ی ضد لغزش به وسیله ی (BRRC) مرکز پژوهش راه بلژیک اجرا شد تا نیاز برای تعمیر و نگهداری زمستانی را ارزیابی کند. آزمایش آونگ انگلیسی استفاده شد تا در آزمایشگاه مقادیر اصطکاک بازبینی شود. در ضوابط عملکرد روسازی SMA که در باند پرواز L-25R۰۷ گمارده شد، اجرای خوبی داشت. وضعیت باند پروازی هنوز هم خوب است و نیازی به تعمیر هم نداشته است. سازمان هوانوردی نوژ (Arinour) 46 فرودگاه را در نوژ با حدود ۷/۶ میلیون مترمربع روسازی کرده است که ۹۷ درصد آن روسازی آسفالتی میباشد. سازمان هوانوردی نوژ از سال ۱۹۹۲ از آسفالت SMA در ۱۵ فرودگاه که شامل ۱۶ باند پرواز می باشد استفاده کرده است. در ساخت روسازی های آسفالتی SMA در سه سال اول از دانه بندی ۱۶-۰ و پس از آن از دانه بندی ۱۱-۰ استفاده شد. آخرین باند پرواز با روسازی آسفالتی SMA در سال ۲۰۰۲ با دانه بندی ریزتر ۸-۰ ساخته شده است. این سازمان حداقل مقدار قیر مورد نیاز در ساخت مخلوط های آسفالتی SMA 4/6 درصد تعیین

کرده است. نیروی هوایی آمریکا در سال ۱۹۹۹ در Avino در ایتالیا یک پایگاه ایجاد نمود که روکش باند پرواز آن ۵۰ میلیمتر مخلوط آسفالتی SMA بود. مخلوط آسفالتی SMA بر اساس دستورالعمل UFGS-32 12 طراحی گردید. روسازی فرودگاه در سال ۲۰۰۶ مورد بررسی قرار گرفت. در این هفت سال هیچگونه نگهداری بجز پاکسازی خرده تایرها در انتهای باند انجام نگرفت است و با اینکه سطح شیار نبود ولی عدد اصطکاک مقدار مطلوبی گزارش شده است. با توجه به اینکه هر سال ۲ بار انتهای باند به وسله فشار آب از خرده لاستیک ها پاک می شود ولی تمایل به جدا شدن سطح دانه ها گزارش نشده است و بحث FOD در این فرودگاه مشکلی ایجاد نکرده است که دلیل آن را می توان ضخامت مطلوب قیر اصلاح شده با SBS بر روی سنگدانه ها دانست. حداقل دو مورد باند پرواز در کشور مزیک با مخلوط آسفالتی SMA ساخته شده است. مخلوط آسفالتی SMA به عنوان روکش در باند پرواز در سال ۲۰۰۴ در فرودگاه Mexicali و در سال ۲۰۰۵ در باند پرواز فرودگاه Guadalajara مورد استفاده قرار گرفته است. در هر دو پروژه از قیرهای اصلاح شده با پلیمر استفاده و از الیاف کربن نیز به مقدار ۰/۷ کیلوگرم در یکمتر مکعب قیر استفاده شده است. (Prowell, 2009)

## ۲- پیشینه تحقیق

امروزه در دنیا مخلوط های آسفالتی SMA در سطح وسیعی در صنعت راهسازی و فرودگاه استفاده می شوند.

از مهم ترین مزایای این مخلوط ها:

- پایداری زیاد در برابر تغییر شکل و شیارافتادگی در دمای بالا، به دلیل کیفیت بالای مصالح سنگی و قفل و بست سنگدانه به سنگدانه یکی از مهمترین انواع خرابی های روسازی های انعطاف پذیر، تغییر شکلهای دائم (ماندگار) می باشد که به اسم شیارشدگی شناخته می شوند. شیارشدگی با یک فرورفتگی که در مسیر عبور چرخ وسایل نقلیه شکل می گیرد پدیدار می شود و علت آن می تواند یکی از عوامل کاهش پایدار در حجم مخلوط (تحکیم مخلوط به علت چگالی ترافیک عبوری)، تغییر مکان دائمی مصالح در حجم ثابت (تغییر شکلهای پلاستیک بعلت تنش های برشی قائم بوجود آمده در مخلوط آسفالتی)، و یا ترکیبی از هر دو علت گفته شده باشد. میزان و بزرگی شیارشدگی به فاکتورهای درونی و بیرونی مختلفی بستگی دارد. عوامل خارجی شامل بار وسایل نقلیه سنگین، حجم ترافیک وسایل نقلیه سنگین، فشار تایر، دما و نحوه ساخت و عوامل داخل شامل

مقاومتی آسفالت SMA می‌باشد. از انواع افزودنی‌ها می‌توان به پلیمرها (SBS، پلی اتیلن، پلی پروپیلن، SBR و...) و همچنین به الیاف (آلی، معدنی، فلزی، پلیمری و...) اشاره کرد. لذا در این تحقیق تاثیر دو نوع افزودنی پلیمری SBS و Lucobite بر عملکرد قیر و مخلوط آسفالتی سطوح پروازی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

## ۲- روش تحقیق

روش انجام تحقیق شامل انتخاب مصالح، ساخت نمونه‌های قیر با درصدهای مختلف افزودنی SBS و Lucobite (۳ درصد و ۵ درصد نسبت به وزن قیر) و انجام آزمایشهای قیر، ساخت نمونه‌های مخلوط آسفالت با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای با درصدهای مختلف افزودنی و در نهایت انجام آزمایش‌های مارشال، آزمایش حساسیت رطوبتی (با انجام آزمایش کشش غیرمستقیم و مدول برجهنگی در دو حالت خشک و مرطوب و آزمایش جوشان تگزاس) و تغییر شکل‌های دائمی (خزش دینامیکی و شیار جای چرخ هامبورگ) بر روی نمونه‌های شاهد و نمونه‌های حاوی افزودنی می‌باشد. در این پژوهش از سنگ شکسته کوهی، معدن اسب چران رودهن و همچنین ۱۰ درصد فیلر پودرسنگ استفاده شد. خصوصیات فیزیکی مصالح سنگی مورد استفاده در جداول ۲ آمده است. بهترین مرجع برای انتخاب دانه‌بندی این نوع مخلوط‌ها می‌تواند دانه‌بندی پیشنهادی توسط NCHRP باشد. (جدول ۳). در این پژوهش حد وسط دانه بندی با بزرگترین اندازه ۱۲/۵ میلیمتر با توجه به شکل ۱ جهت ساخت نمونه‌های SMA انتخاب شد [Nashrie 110, 2012]

خصوصیات قیر، مصالح سنگی، خصوصیات مخلوط و ضخامت لایه‌های روسازی می‌باشد. این نوع خرابی قابلیت بهره‌برداری را کاهش داده و خطر تاثیرات رطوبت و یخ زدگی را به علت تجمع آب در شیار جای چرخ افزایش می‌دهد. اصلاح روسازی‌های با مشکل شیار شدگی معمولاً شامل اجرای روکش جدید آسفالتی، بازیافت و یا تعویض کل لایه‌های روسازی می‌شود. با توجه به موارد ذکر شده و تمایل دست‌اندرکاران صنعت آسفالت به سمت تولید روسازی‌های با دوام‌تر، اهمیت مخلوط‌های آسفالتی SMA در راهسازی روز دنیا نمایان می‌شود.

عریان‌شدگی نیز از اولین مشکلاتی می‌باشد که از ابتدای تشکیل صنعت ساخت رویه‌های آسفالتی شناخته شده است. تحقیقات زیادی برای مشخص کردن مکانیزم‌های وقوع این پدیده و انجام آزمایش‌هایی برای پیش‌بینی وقوع آن در روسازی آسفالتی انجام شده است. به‌طور کلی شکل عمده وقوع این پدیده در مخلوط‌های آسفالتی به‌صورت از بین رفتن چسبندگی بین قیر و سنگدانه‌ها (ضعف چسبندگی) و یا نرم شدن قیر و کاهش پیوستگی در ساختار قیر (ضعف پیوستگی) می‌باشد. حساسیت رطوبتی در ایجاد سایر خرابی‌های رویه‌های آسفالتی نقش دارد. همچنین با توجه به ساختار مخلوط با استخوان بندی سنگدانه‌ای که دارای دانه بندی از نوع میان تهی که در نتیجه آن مقدار فضای خالی این نوع مخلوط بسیار زیاد می‌باشد، مقاومت آن کاهش خواهد یافت. در نتیجه به منظور جلوگیری از این مشکل می‌بایست فضای خالی اضافی را با قیر، فیلر و افزودنی (ماستیک قیر) پر کرده تا به مقدار مجاز درصد هوا برسیم. دلایل استفاده از افزودنی در این مخلوط‌ها در درجه اول جلوگیری از پدیده ریزش قیر و در درجه دوم افزایش خصوصیات فنی و

جدول ۱. مشخصات مصالح سنگی

شرح	چگالی واقعی	درصد جذب آب
مصالح مانده روی الک نمره ۸	۲,۶۷۱	۱,۲
مصالح مانده روی الک نمره ۸ و مانده روی الک ۲۰۰	۲,۶۶۹	۱,۹

جدول ۲. نتایج آزمایش مصالح سنگی درشت دانه

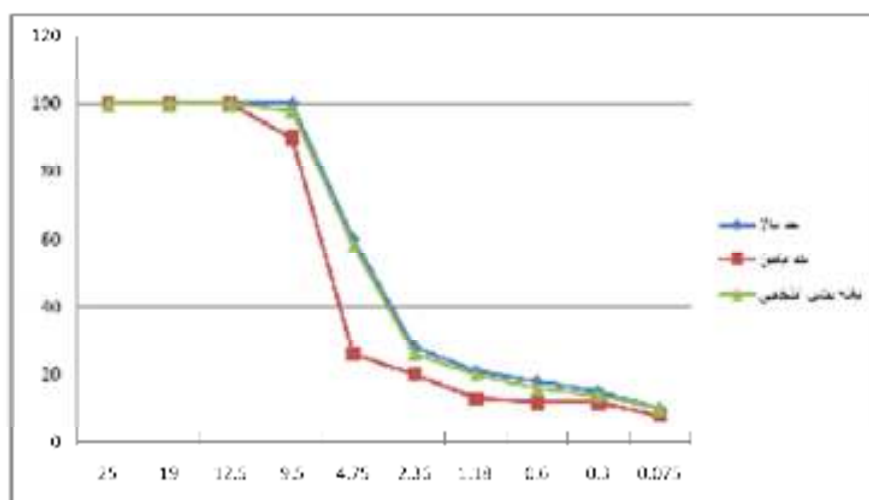
روش آزمایش	سایش لس آنجلس	افت وزنی سولفات سدیم	درصد شکستگی
	T 96	T 104	D 5821
مقدار	٪۱۵	٪۴,۸	٪۹۸-۱۰۰

فصلنامه علمی پژوهشنامه حمل و نقل، سال هجدهم، دوره دوم، شماره ۶۷، تابستان ۱۴۰۰

قیر بکارگرفته شده در این پژوهش از نوع قیر خالص ۷۰/۶۰ فیزیکی آن در جدول ۴ آمده است. بود که از شرکت نفت پاسارگاد تهیه شد و مشخصات

جدول ۳. دانه بندی پیشنهادی مخلوط SMA توسط NCHRP

۴/۷۵	۹/۵	۱۲/۵	۱۹	۲۵	حداکثر اندازه اسمی سنگدانه (میلیمتر)
درصد رد شده از الک					اندازه الک (میلیمتر)
-	-	-	-	۱۰۰	۳۷/۵
-	-	-	۱۰۰	۹۰-۱۰۰	۲۵
-	-	۱۰۰	۹۰-۱۰۰	۳۰-۸۶	۱۹
-	۱۰۰	۹۰-۱۰۰	۵۰-۷۴	۲۶-۶۳	۱۲/۵
۱۰۰	۹۰-۱۰۰	۲۶-۷۸	۲۵-۶۰	۲۴-۵۲	۹/۵
۹۰-۱۰۰	۲۶-۶۰	۲۰-۲۸	۲۰-۲۸	۲۰-۲۸	۴/۷۵
۲۸-۶۵	۲۰-۲۸	۱۶-۲۴	۱۶-۲۴	۱۶-۲۴	۲/۳۶
۲۲-۳۶	۱۳-۲۱	۱۳-۲۱	۱۳-۲۱	۱۳-۲۱	۱/۱۸
۱۸-۲۸	۱۲-۱۸	۱۲-۱۸	۱۲-۱۸	۱۲-۱۸	۰/۶
۱۵-۲۲	۱۲-۱۵	۱۲-۱۵	۱۲-۱۵	۱۲-۱۵	۰/۳
۱۲-۱۵	۸-۱۰	۸-۱۰	۸-۱۰	۸-۱۰	۰/۰۷۵



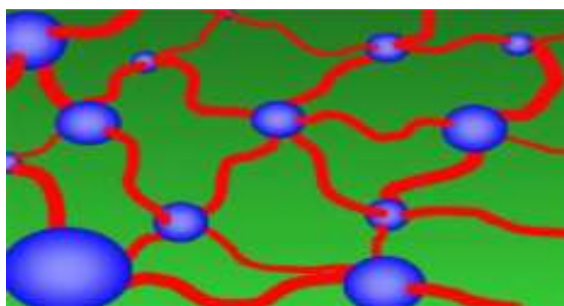
شکل ۱. منحنی دانه بندی مصالح سنگی با بزرگترین اندازه ۱۲.۵ میلیمتر

جدول ۴. مشخصات قیر مصرفی

نتایج	روش آزمایش		آزمایشات قیر خالص
	AASHTO	ASTM	
۱,۰۳	<b>T 228</b>	<b>D 70</b>	وزن مخصوص در ۲۵ درجه سانتیگراد
۶۵	<b>T 49</b>	<b>D 5</b>	درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتیگراد
۴۸	<b>T 53</b>	<b>D 36</b>	نقطه نرمی بر حسب سانتیگراد
۲۹۹	<b>T 48</b>	<b>D 92</b>	درجه اشتعال بر حسب سانتیگراد

تشکیل می‌دهد. درصد بیشتر استایرن می‌تواند باعث ناسازگاری با قیر و اشکالاتی در پخش کردن و ناپایداری انبارداری در دماهای بالا شود. (Bitumen of eMixture, SBS with Polymers SBS with ۱۹۸۷). از پلیمر SBS به عنوان یکی از پرکاربردترین مواد افزودنی‌های قیر نیز استفاده شد. نام تجاری افزودنی مورد استفاده INTERPRENE L-SBS/G و مشخصات آن مطابق با جدول ۵ می‌باشد. در ضمن این پلیمر دارای ساختار خطی می‌باشد.

کوپلیمر استایرن - بوتادین - استایرن یک کوپلیمر سه بلوکه است که در آن بلوک‌های استایرن به وسیله یک بلوک بوتادین از یکدیگر جدا شده‌اند. نمونه ای از ساختار SBS را می‌توان در شکل ۲ مشاهده کرد. این کوپلیمرها می‌توانند خطی یا شعاعی باشند و در قیر یک شبکه الاستیک سه بعدی از فاز پلی استایرن را تشکیل می‌دهند که به وسیله فاز پلی بوتادین به یکدیگر متصل می‌شوند. در پلیمر استایرن-بوتادین-استایرن که در قیرهای راهسازی بکار می‌رود، معمولاً استایرن بین ۲۰ تا ۳۰ درصد وزن کل این پلیمر را



شکل ۲. ساختار سه بعدی شبکه SBS

جدول ۵. مشخصات SBS استفاده شده در تحقیق

محدوده مجاز	مقدار	واحد	استاندارد آزمایش	
0.92 – 0.95	0.94	g/l	ASTM D792	وزن مخصوص در ۲۳ درجه سانتیگراد
30.5 – 33.5	32	%Wt	ASTM D1416	Styrene content
≤1	0.9	%Wt	ASTM D1416	Ash content
<0.2	0	Phr	ASTM D1416	Oil content
12	0.3	g/10min	ASTM D1238	شاخص روانی در ۲۰۰ درجه سانتیگراد
<100	75	-	ASTM D2240	سختی

- مقاومت در برابر فشار مکانیکی، در تغییر شکل و سایش کشور آلمان می‌باشد. Lucobit گرانی و نقطه نرمی قیر را افزایش و درجه نفوذ را کاهش می‌دهد. دمای اختلاط از ۱۶۵ تا ۱۹۵ محدود می‌باشد. در دمای پایین انعطاف پذیری قیر را حفظ می‌کند از خصوصیات دیگر آن می‌توان این موارد را نام برد.
- مقاومت در برابر فشار مکانیکی، در تغییر شکل و سایش کشور آلمان می‌باشد. Lucobit گرانی و نقطه نرمی قیر را افزایش و درجه نفوذ را کاهش می‌دهد. دمای اختلاط از ۱۶۵ تا ۱۹۵ محدود می‌باشد. در دمای پایین انعطاف پذیری قیر را حفظ می‌کند از خصوصیات دیگر آن می‌توان این موارد را نام برد.
- رفتار پیری قیر را کاهش می‌دهد
- سازگار با محیط زیست
- عدم نیاز به همزن‌های برش بالا در اختلاط با قیر

جدول ۶. مشخصات Lucobit استفاده شده در این تحقیق

مقدار	واحد	
0.97	گرم بر سانتی متر مکعب	وزن مخصوص در ۲۳ درجه سانتی‌گراد
۵۰۰	گرم	چگالی ظاهری
17	مگاپاسکال	مدول الاستیسیته
80-100	سانتی‌گراد	محدوده نرمی
<-30	سانتی‌گراد	محدوده شکنندگی



شکل ۳. شکل ظاهری Lucobit

جدول ۶ و شکل ۳ به ترتیب مشخصات فیزیکی و شکل ظاهری افزودنی Lucobit را نشان می‌دهد.

### ۳- روش کار آزمایش

#### ۳-۱- مقاومت کششی غیر مستقیم

اساس آیین نامه ASTM D6931-12 با نرخ ثابت ۵۰/۸ میلیمتر بر دقیقه و دمای ۲۰ درجه سانتیگراد انجام شد. مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌ها با استفاده از معادله زیر تعیین شد:

$$ITS = (2P_{max}) / (\pi Dt) \quad (1)$$

در آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم یک نمونه استوانه‌ای به صورت قطری بارگذاری می‌شود. آزمایش کشش غیر مستقیم برای تعیین مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی و پیش بینی ظهور ترک‌ها در مخلوط آسفالتی استفاده می‌شود. همچنین می‌توان از این آزمایش برای ارزیابی عمر خستگی نیز استفاده کرد. آزمایش کششی غیر مستقیم بر

نحوی تنظیم گشت که مقدار فضای خالی موجود در نمونه‌ها، طبق توصیه دستورالعمل سوپرپیو، در بازه ۷-۱ درصد قرار بگیرد.

### ۳-۳-۱- آزمایش لاتمن اصلاح شده

یکی از معروف‌ترین و متداول‌ترین روش‌ها برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی آزمایش لاتمن اصلاح شده (کشش غیر مستقیم) است. این آزمایش جهت تعیین حساسیت رطوبتی مخلوط‌های متراکم بعد از قرار دادن نمونه‌ها در معرض شرایط اشباع انجام می‌گیرد. نمونه‌ها بصورت استوانه‌ای با قطر ۱۰۰ میلی متر و ضخامت ۷۰/۵ میلی متر به روش سوپر پیو متراکم شدند و تعداد دوران به نحوی تنظیم گردید که درصد فضای خالی مخلوط در بازه ۷-۱ قرار گیرد. برای هر جنس مصالح تعداد ۳ نمونه بصورت عمل آوری شده و سه نمونه بصورت عمل آوری نشده مطابق استاندارد آشتو تی ۲۸۳ (AASHTO T 283) تحت آزمایش کشش غیرمستقیم (ITS) بین دونوار فلزی صلب در راستای قطری نمونه‌ها با نرخ بارگذاری ۵۰ میلی متر بر دقیقه در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد قرار گرفتند تا نمونه‌ها گسیخته شوند و مقدار نیروی لازم برای گسیختگی نمونه‌ها ثبت شد. مقدار کشش غیرمستقیم (ITS) از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$ITS = \frac{2P}{\pi \cdot d \cdot t} \quad (3)$$

$P$ : بیشترین نیروی اعمالی جهت شکست نمونه‌ها به کیلونیوتن  
 $t$ : ضخامت نمونه‌ها به میلیمتر  
 $d$ : قطر نمونه‌ها به میلیمتر  
 بوده و مقدار TSR معمولاً بصورت درصد و به صورت میانگین مقدار ITS نمونه‌های اشباع شده به اشباع نشده به شکل زیر بیان می‌شود:

$$TSR = \frac{ITS_{wet}}{ITS_{dry}} \quad (4)$$

لاتمن (۱۹۷۸) اعلام کرد که مخلوط‌های آسفالتی با مقدار TSR بیشتر از ۷۰ درصد عموماً کمتر مستعد آسیب‌های رطوبتی هستند.

که ITS: مقاومت کششی نمونه‌ها بر حسب  $P_{max}$ , Kpa بار اعمالی در زمان شکست بر حسب  $D$ , kN قطر نمونه‌ها بر حسب میلیمتر،  $t$  ارتفاع نمونه‌ها بر اساس میلیمتر می‌باشد. همچنین می‌توان از این آزمایش برای ارزیابی عمر خستگی نیز استفاده کرد.

### ۳-۲- مدول برجهندگی

آزمایش مدول برجهندگی در دماهای پایین بنحوی مرتبط با ترک خوردگی حرارتی می‌باشد. تحقیقات متعددی نشان داده است که مخلوط‌های سخت تر در دماهای پایین‌تر بیشتر مستعد ترک خوردگی حرارتی می‌باشند. برای تعیین مدول برجهندگی از استاندارد AS 2891-13-1-1995 استفاده شد. ابتدا نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در محفظه دستگاه در دمای ۲۵ سانتیگراد قرار داده شد. شکل بارگذاری نیمه سینوسی، مدت اعمال بار ۰/۱ ثانیه، زمان استراحت ۰/۹ ثانیه و ضریب پواسون ۰/۳۵ فرض گردید. در این آزمایش به ازای هر مخلوط، ۳ نمونه آسفالتی تهیه و روی هر نمونه ۵ پالس تکرار شد و میانگین نتایج به وسیله دستگاه نمایش داده شد. مدول برجهندگی براساس معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$M_r = \frac{p(g+0.2734)}{\delta t} \quad (2)$$

$M_R$  = مدول برجهندگی (مگا پاسکال)

$P$  = بار تکراری (نیوتن)

$V$  = نسبت پواسون

$t$  = ضخامت نمونه (میلی متر)

$H$  = تغییر شکل افقی برگشت پذیر (میلی متر)

$V$  = تغییر شکل قائم برگشت پذیر (میلی متر)

### ۳-۳- آزمایش حساسیت رطوبتی

در این مطالعات آزمایشگاهی جهت بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی از روش‌های لاتمن اصلاح شده و آزمایش آب جوشان استفاده شده است. جهت تراکم نمونه‌ها در مقدار قیر بهینه از متراکم کننده ی ژیراتوری متناظر با استاندارد سوپر پیو استفاده شد و تعداد دوران به



### ۳-۲- آزمایش آب جوشان

آزمایش آب جوشان معروف به آزمایش تگزاس مطابق با استاندارد ASTM D 3625 یکی از ساده‌ترین آزمایشاتی است که جهت ارزیابی ویژگی‌های مربوط به چسبندگی سنگدانه‌ها به قیر و همچنین پتانسیل عریان شدگی مصالح استفاده می‌شود. جهت انجام این تست حدود ۲۵۰ گرم از مصالح داخل آب جوش به مدت ۱۰ دقیقه جوشانده می‌شود. مخلوط هر ۳ دقیقه یکبار هنگام جوشاندن به مدت ۱۰ ثانیه هم زده می‌شود. پس از خالی کردن آب، مخلوط جهت بررسی چشمی عریان شدگی، روی یک کاغذ سفید پخش شده و درصد کاهش قیر اندود شده توسط مصالح به سبب جوشیدن در آب، بررسی می‌شود. این کاهش اندودشدگی نمایانگر بروز آسیب‌های رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی است. جهت کمی سازی و افزایش دقت در بررسی عریان شدگی مصالح، از نمونه‌های مختلف قبل و بعد از انجام آزمایش، توسط یک دوربین دیجیتال عکس گرفته شد. سپس عکس‌ها توسط نرم افزار متلب به عکس‌های دیجیتال با پیکسل‌های سیاه تا سفید بصورت فازی تبدیل شد که روشن بودن هر قسمت از عکس نشان دهنده‌ی عریان شدگی بیشتر آن قسمت می‌باشد. پیکسل‌های سیاه متناظر با عدد صفر و پیکسل‌های سفید متناظر با عدد ۲۵۵ در نرم افزار ثبت می‌شوند و سایر پیکسل‌ها با توجه به درجه‌ی روشنایی در این بازه قرار می‌گیرند. عدد ۱۲۸ به عنوان مرز بین مصالح عریان شده و عریان نشده فرض شده و آنالیز عکس نمونه‌های مختلف توسط پردازش تصویر همین نرم افزار مورد بررسی دقیق قرار گرفت. روند انجام کار پردازش تصویر تمامی نمونه‌ها در شکل (۴) نشان داده شده است.

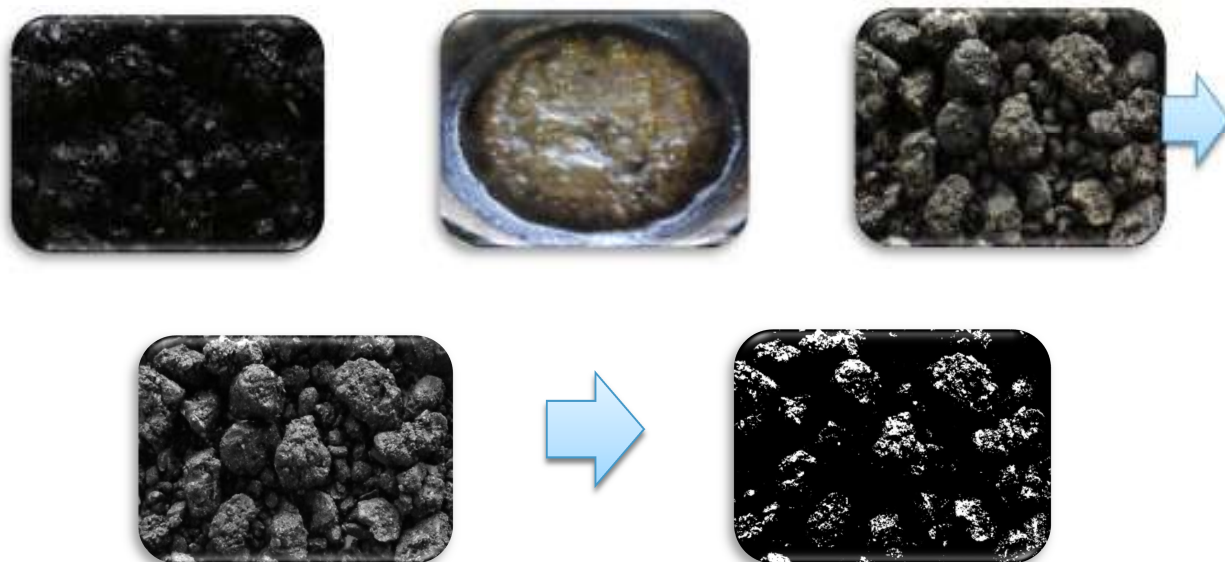
### ۳-۴- خزش دینامیکی

جهت بررسی شیارشدگی نمونه‌ها از آزمایش خزش دینامیکی استفاده شد. آزمایش خزش دینامیکی یکی از معیارهای مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر تغییر شکل‌های

دائم می‌باشد. آزمایش با استفاده از دستگاه UTM-5P در دمای ثابت ۵۰ درجه سانتیگراد و تحت تنش ثابت ۴۵۰ کیلو پاسکال که به صورت شبه سینوسی اعمال شد، انجام گرفت. در این آزمایش یک تنش ثابت در دمای ثابت با مدت بارگذاری ۰/۱ ثانیه و زمان استراحت ۰/۹ ثانیه، توسط یک صفحه صلب به صورت عمودی به نمونه وارد می‌شود. نتایج آزمایش بر حسب عدد روانی برداشت شد که معیاری برای نشان دادن مقاومت مخلوط در برابر تغییر شکل‌های دائمی می‌باشد. یعنی هر قدر عدد روانی بزرگتر باشد، مقاومت نمونه در برابر تغییر شکل‌های دائم بیشتر است.

### ۳-۵- شیار جای چرخ

این آزمایش توسط دستگاه شیار جای چرخ هامبورگ برای ارزیابی مقاومت شیارشدگی مخلوط آسفالتی در دمای بالا انجام پذیرفت. نمونه‌های مخلوط آسفالتی با درصد مشخص قیر که در طرح اختلاط بدست آمده‌اند و در ابعاد ۳۰۰×۳۰۰×۵۰ میلیمتر با استفاده از دستگاه تراکم مالشی براساس استاندارد AASHTO-T324 ساخته شده‌اند. آزمایش شیارجای چرخ هامبورگ با استفاده از چرخ‌ی با فشار ۵/۵ کیلوگرم بر سانتی مترمربع در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد در شرایط خشک مورد آزمایش قرار گرفتند. چرخ‌ها باید تعداد ۲۲ بار عبور در دقیقه از روی نمونه‌ها انجام دهند. عمق شیار نمونه‌ها بعد از ۲۰۰۰۰ عبور چرخ با فشار ۵/۵ کیلوگرم بر سانتی مترمربع قابل اندازه‌گیری می‌باشد.



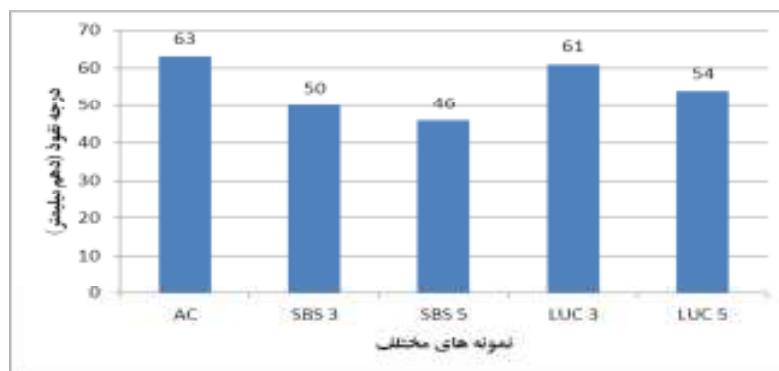
شکل ۴. روند انجام آزمایش آب جوشان و پردازش تصویر

#### ۴- تحلیل نتایج آزمایشات

##### ۴-۱- نتایج آزمایشات قیر

آزمایشگاه صورت گرفت. نتایج مقدماتی به صورت گراف در اشکال ۵ تا ۷ آمده است.

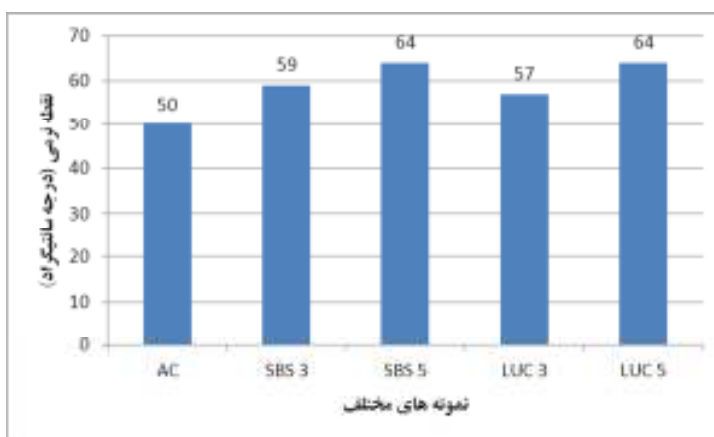
به منظور بررسی مقدماتی اثرات ماده افزودنی بر قیر، آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی و خاصیت انگمی در



شکل ۵. مقادیر درجه نفوذ قیرهای حاوی افزودنی و خالص

آزمایش تعیین نقطه نرمی نیز حاکی از آن است که نقطه نرمی قیر با افزایش درصد افزودنی از ۵۰ درجه سانتیگراد برای نمونه قیر خالص تا ۶۴ درجه برای قیر حاوی ۳٪ افزودنی افزایش می‌یابد (شکل ۶).

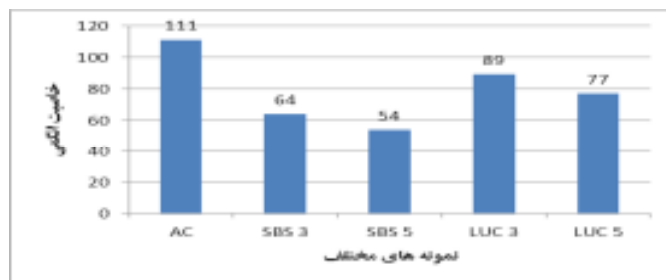
نمونه‌های قیر با درصد‌های مختلف افزودنی SBS (۳ و ۵ درصد) و Lucobite (۳ و ۵ درصد) برای انجام آزمایش‌های نقطه نرمی، درجه نفوذ و انگمی تهیه شدند. با توجه به شکل ۵ مشخص می‌شود که استفاده از SBS باعث کاهش درجه نفوذ قیر به میزان قابل توجهی می‌شود. نتایج



شکل ۶. مقادیر نقطه نرمی قیرهای حاوی افزودنی و خالص

دمای بالا (که قیر به حالت روان در می آید) باعث کاهش ویسکوزیته و افزایش کارایی قیر می گردد. در دمای محیط قیر حاوی افزودنی دارای درجه نفوذ کمتر و نقطه نرمی بیشتر از نمونه قیر خالص است. با افزایش میزان افزودنی از ۳٪ به ۵٪ از میزان شکل پذیری نمونه قیر به میزان قابل ملاحظه ای کم می شود که بر اساس خروجی انجام این آزمایش که در ارزیابی کیفیت چسبندگی قیر به مصالح استفاده می شود، می تواند منجر به کاهش چسبندگی مناسب قیر به مصالح سنگی گردد.

مقدار انگمی (شکل پذیری) برای همه انواع قیر بجز قیر خالص کمتر از ۱۰۰ سانتی متر بوده و در مورد نمونه حاوی ۳٪ افزودنی SBS، این عدد به ۵۴ کاهش یافت که حاکی از کاهش قابلیت شکل پذیری (افزایش تردی) نمونه قیر با افزایش مقدار افزودنی می باشد (شکل ۷). همچنین مقدار این پارامتر برای افزودنی Lucobite به ازای درصدهای ۳ و ۵ درصد به ترتیب به مقدار ۸۹ و ۷۷ سانتی متر کاهش یافت. جمع بندی نتایج حاصل از آزمایشهای مقدماتی مشخص می نماید که حضور افزودنی و افزایش مقدار آن تأثیرگذار بر عملکرد قیر به میزان قابل توجهی می باشد به نحوی که در



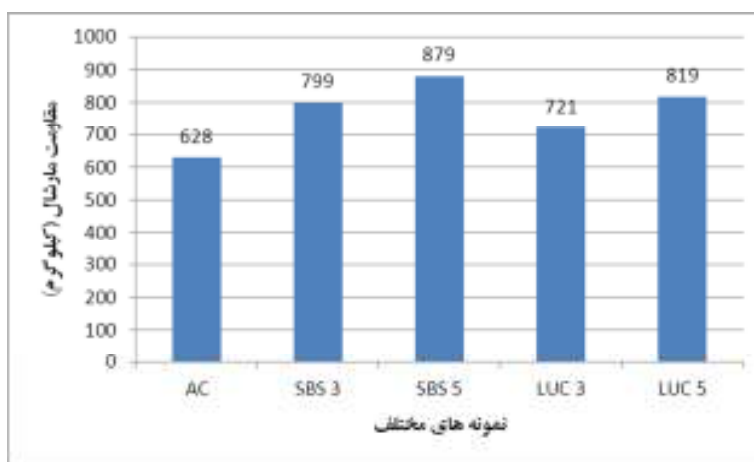
شکل ۷. مقادیر انگمی قیرهای حاوی افزودنی و خالص

#### ۴-۲- تحلیل نتایج آزمایشهای مخلوط آسفالتی

##### ۴-۲-۱- آزمایش مقاومت مارشال

نشان می دهد با افزودن پلیمر و افزایش درصد آن چسبندگی قیر و دوام مخلوط SMA افزایش پیدا می کند. بهترین عملکرد مربوط به مخلوط اصلاح شده با ۵ درصد پلیمر SBS است.

انجام این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM D6927 و توسط دستگاه جک مارشال صورت گرفته است. نتایج ارائه شده در شکل ۸ تأثیر مثبت پلیمر را در مقاومت مارشال مخلوط SMA نشان می دهد. با افزایش درصد پلیمر مقاومت مخلوط SMA نیز افزایش می یابد و نتایج

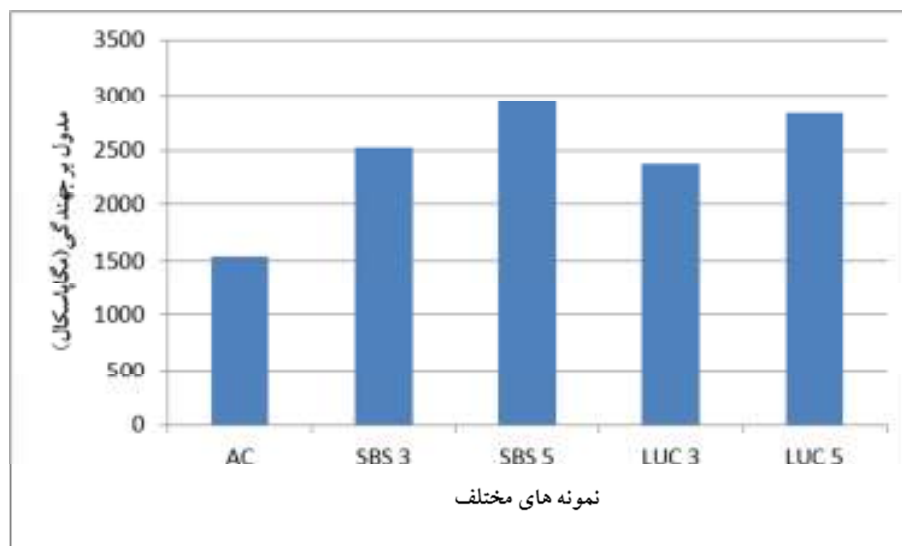


شکل ۸. نتایج آزمایش مارشال

#### ۴-۲-۲- نتایج مربوط به آزمایش مدول برجهندگی

مدول برجهندگی حاصل می‌گردد. با توجه به اینکه میزان مدول برجهندگی تاثیر مستقیمی بر تعیین ضخامت لایه آسفالتی دارد، افزایش مدول برجهندگی نمونه‌های حاوی پلیمر، نشان دهنده تاثیر مثبت اصلاح کننده پلیمر است. هرچند افزایش بیش از حد مدول برجهندگی باعث شکننده شدن روسازی خواهد شد.

نتایج به دست آمده از انجام آزمایش تعیین مدول برجهندگی توسط دستگاه UTM، در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، افزایش درصد پلیمر باعث افزایش مدول برجهندگی نمونه‌ها می‌گردد، که این امر به دلیل افزایش سفتی قیر و در نتیجه سختی آسفالت در حضور افزودنی‌ها است. همانطور که از نتایج مشخص است، با افزایش افزودنی SBS تا ۵٪ بیشترین مقدار

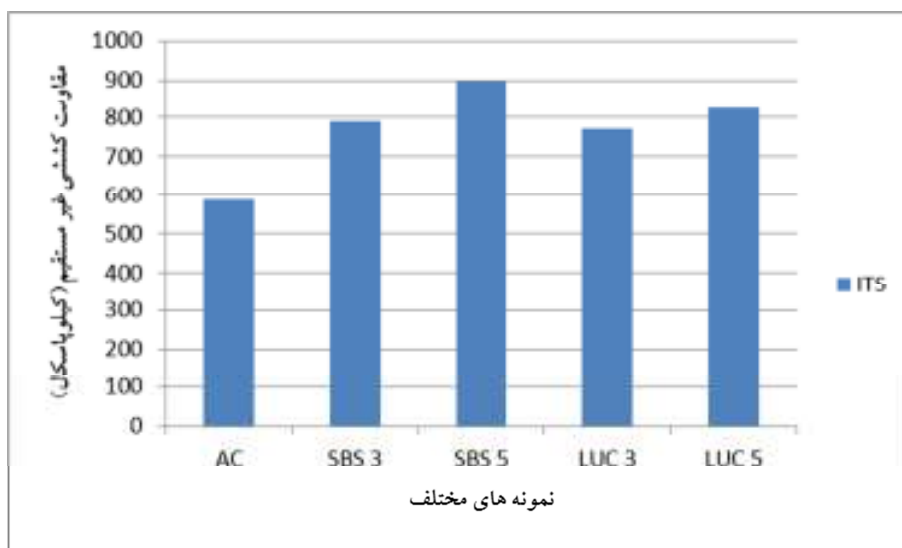


شکل ۱۰. نتایج آزمایش مدول برجهندگی

#### ۴-۲-۳- نتایج مربوط به آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

است. افزایش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر تنش‌های کششی وارد شده بر آن بر اثر بار ترافیک، در نهایت باعث افزایش عمر روسازی خواهد شد. این امر بیشتر بر این دلالت دارد که نمونه‌های حاوی افزودنی مستعد تحمل تنش کششی بیشتر قبل از ترک خوردگی هستند.

نتایج حاصل در شکل ۱۱ نشان داد، افزودن پلیمرها باعث بهبود عملکرد مخلوط‌های ساخته شده در آزمایش کشش غیرمستقیم شد. به طوریکه مخلوط حاوی ۵٪ SBS دارای بالاترین میزان مقاومت می‌باشد. افزایش درصد لوکوبیت نیز سبب افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها گردیده



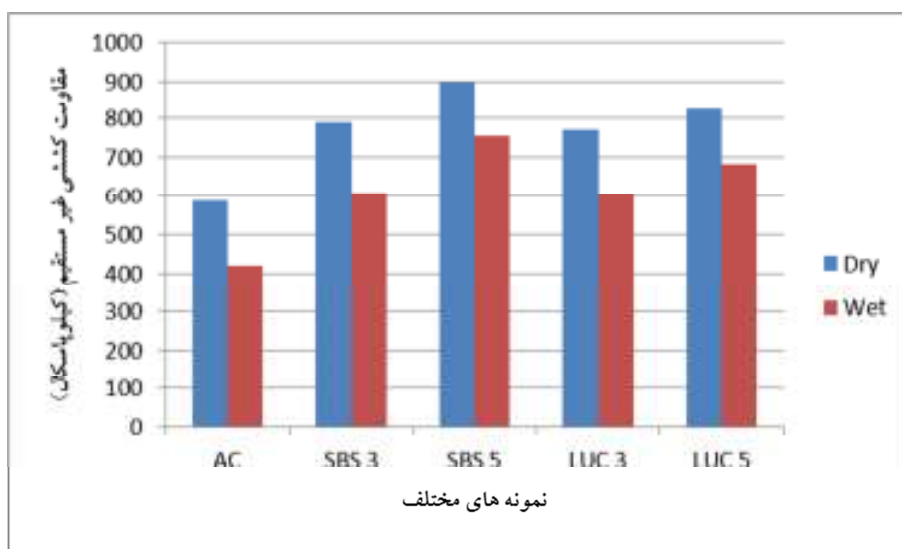
شکل ۱۱. نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

#### ۴-۲-۴- نتایج مربوط به آزمایش حساسیت رطوبتی

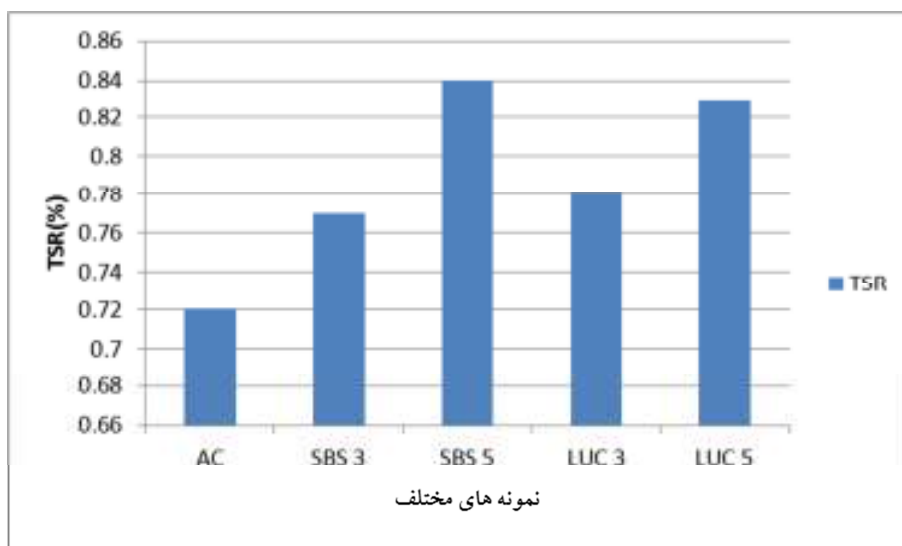
##### ۴-۲-۴-۱- نتایج مربوط به آزمایش لاتمن اصلاح شده

مقاومت در برابر رطوبت نسبت به نمونه شاهد افزایش پیدا کرده است و مطابق انتظار و آنچه از سایر آزمایش‌ها به دست آمد بیشترین مقاومت در برابر رطوبت در مخلوط‌های آسفالتی SMA حاوی ۵ درصد پلیمر SBS اتفاق می‌افتد. افزایش نسبت مقاومت کششی یا مقاومت در برابر رطوبت در مخلوط‌های آسفالتی SMA اصلاح شده با پلیمر نشانگر این مطلب می‌باشد چسبندگی و پیوستگی در مخلوط‌های آسفالتی SMA بخصوص در حضور آب افزایش پیدا می‌کند و سبب می‌شود که مخلوط در طی چرخه‌های یخبندان و ذوب یخ مقاومت باتری در برابر رطوبت نسبت به نمونه شاهد داشته باشد.

مطابق شکل ۱۲ با افزودن هر دو نوع پلیمر سختی و مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی SMA در حالت خشک و تر (عمل آوری شده) افزایش پیدا می‌کند. افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم در مخلوط‌های آسفالتی SMA حاوی پلیمر SBS بیشتر از پلیمر LUC می‌باشد و بیشترین اثربخشی در مخلوط‌های حاوی ۵ درصد پلیمر SBS اتفاق می‌افتد. نتایج مقاومت کششی و افزایش سختی و مقاومت کششی در حالت تر نشانگر عملکرد مطلوب پلیمرها بخصوص SBS در حضور آب می‌باشد. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۱۳ در حضور پلیمرها با درصد‌های مختلف نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (TSR) و



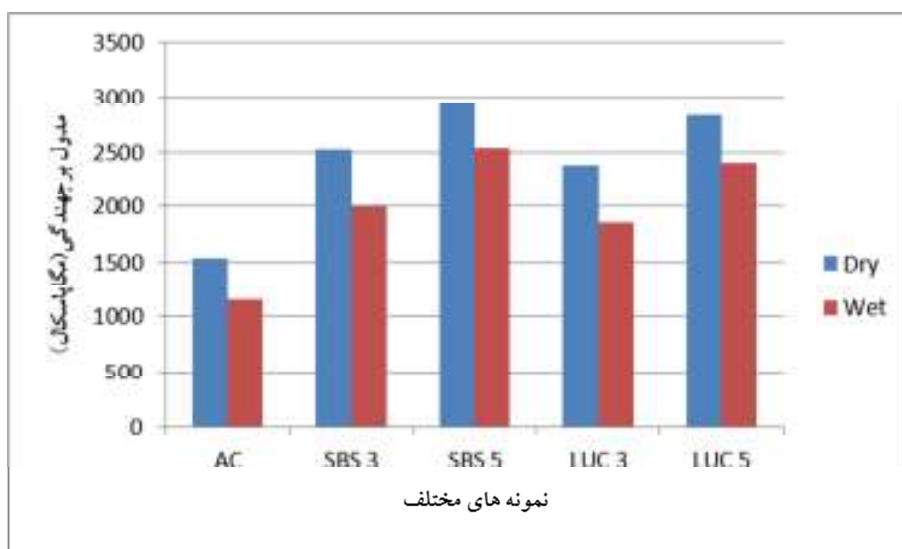
شکل ۱۲. مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها در حالت خشک و تر



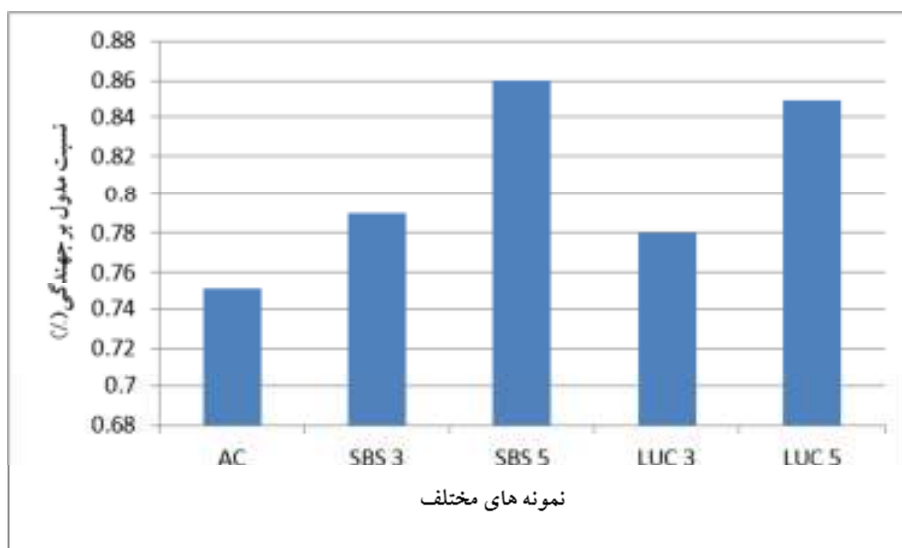
شکل ۱۳. نسبت مقاومت کششی نمونه‌ها

بخصوص SBS در حضور آب می‌باشد. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۱۵ در حضور پلیمرها با درصد‌های مختلف نسبت مدول برجهنگی (MSR) و مقاومت در برابر رطوبت نسبت به نمونه شاهد افزایش پیدا کرده است و مطابق انتظار و آنچه از سایر آزمایشها به دست آمد بیشترین مقاومت در برابر رطوبت در مخلوط‌های آسفالتی SMA حاوی ۵ درصد پلیمر SBS اتفاق می‌افتد.

۴-۲-۴-۲- نتایج مربوط به آزمایش نسبت مدول برجهنگی مطابق شکل ۱۴ با افزودن هر دو نوع پلیمر مدول برجهنگی مخلوط‌های آسفالتی SMA در حالت خشک و تر (عمل آوری شده) افزایش پیدا می‌کند. افزایش مدول برجهنگی در مخلوط‌های آسفالتی SMA حاوی پلیمر SBS بیشتر از پلیمر LUC می‌باشد و بیشترین اثربخشی در مخلوط‌های حاوی ۵ درصد پلیمر SBS اتفاق می‌افتد. نتایج آزمایش در حالت تر نشانگر عملکرد مطلوب پلیمرها



شکل ۱۴. نتایج مدول برجهندگی نمونه‌ها در حالت خشک و تر



شکل ۱۵. نسبت مدول برجهندگی نمونه‌ها

#### ۴-۲-۳- نتایج مربوط به آزمایش آب جوشان

عکس‌های دیجیتال گرفته شده از نمونه‌ها نشان می‌دهد در حالت کلی افزودنی SBS و LUC سبب کاهش قسمت‌های عمده‌ای از پیکسل‌های سفیدرنگ می‌شود. این بدین معناست که این افزودنی‌ها به عنوان یک افزودنی ضد عریان شدگی در کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی موفق عمل کرده است و تحلیل نتایج حاصل از پردازش تصویر نیز گویای همین امر است. نتایج حاصل از پردازش تصویر، در راستای سایر آزمایشات همین تحقیق و همچنین یافته‌های

محققین پیشین (Sangsefidi, Ziari, & Mansourkhaki; Hesami, Ameri, Goli, & Akbari, 2014) بوده و نتایج آنان را تأیید می‌نماید. جدول ۵ نشان می‌دهد که آزمایش آب جوشان قابلیت ارزیابی تأثیر جنس مصالح را روی بررسی عریان شدگی مخلوط‌های آسفالتی دارا می‌باشد. مکانیزم عریان شدگی بوقوع پیوسته بدلیل عدم چسبندگی مناسب بین قیر و مصالح، با روند به دست آمده از آزمایش TSR همخوانی دارد.

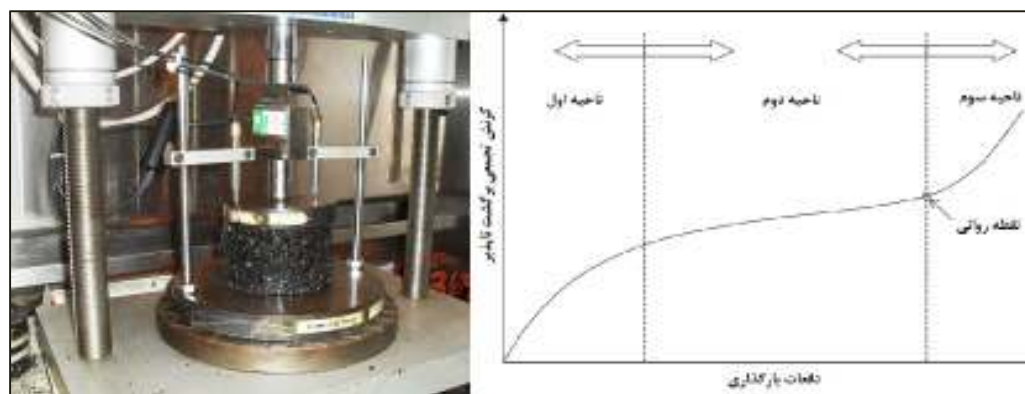
جدول ۵. نتایج حاصل از پردازش تصویر

درصد پیکسل‌ها بعد از جوشاندن		درصد پیکسل‌ها قبل از جوشاندن		مصالح
سیاه	سفید	سیاه	سفید	
90.34	9.66	98.85	1.47	نمونه های شاهد
98.04	1.96	98.96	1.06	SBS ٪۳
91.51	8.49	98.67	1.33	SBS ٪۵
97.88	2.12	98.82	1.11	LUC ٪۳
98.91	1.03	98.93	1.01	LUC ٪۵

۴-۲-۵- نتایج آزمایش خزش دینامیکی

مختلف، آزمایش خزش دینامیکی بوسیله دستگاه ۵-UTM مرکز تحقیقات قیر و مخلوط‌های آسفالتی دانشگاه علم و صنعت ایران صورت پذیرفت. آزمایش خزش دینامیکی در سطح تنش ۴۵۰ کیلوپاسکال بمنظور بررسی رفتار خزشی مخلوط‌های آسفالتی و تعیین پارامتر عدد روانی به جهت بررسی رابطه این پارامتر و پارامترهای عملکردی قیر صورت پذیرفت.

آزمایش‌های مختلفی نظیر خزش استاتیکی، خزش دینامیکی، ویل تراک و کشش غیر مستقیم معمولاً به منظور ارزیابی پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از میان این آزمایشات، خزش دینامیکی به عنوان یکی از بهترین روش‌ها شناخته شده است. همچنین یافته‌ها نشان از وجود همبستگی بسیار خوب بین عمق شیار اندازه‌گیری شده از آزمایش ویل تراک و کرنش تجمعی اخذشده از آزمایش خزش دینامیکی دارد. در نتیجه، به منظور مقایسه مقاومت شیارشدگی نمونه‌های آسفالتی

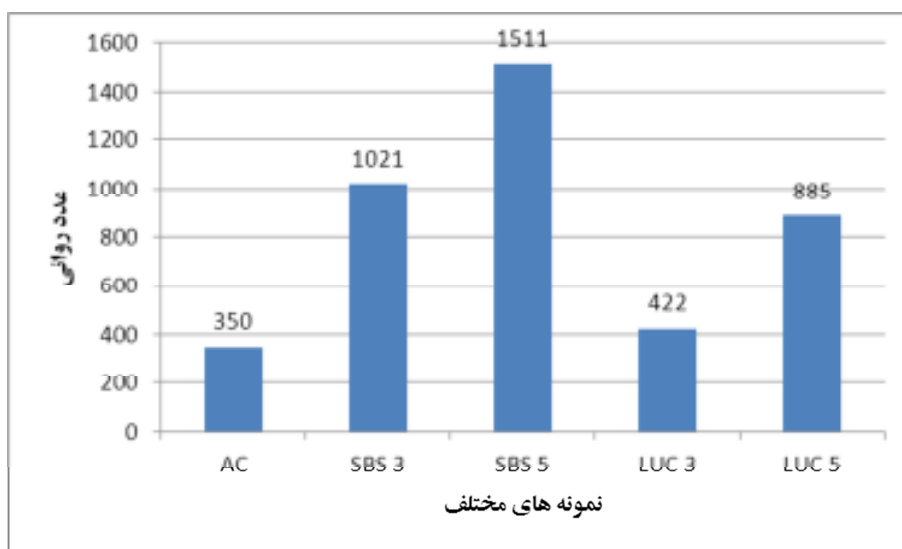


شکل ۱۶. نمونه آسفالتی تحت بارگذاری دینامیکی و نمودار سه‌ناحیه‌ای حاصل از آزمایش خزش دینامیکی

سرویس‌دهی بالا، ۵۰ درجه سانتیگراد انتخاب گردید. حسگرهای روی نمونه، تغییر مکان و کرنش برگشت‌ناپذیر در هر سیکل را تعیین نموده و گراف سه مرحله‌ای خزش دینامیکی از جمع کرنش‌های هر سیکل بارگذاری بصورت تجمعی حاصل می‌گردد.

این آزمایش بر اساس استاندارد US: NCHRP 9-19 با زمان بارگذاری ۰/۱ ثانیه، دوره استراحت ۰/۹ ثانیه و در مجموع بصورت سیکلهای بارگذاری ۱ ثانیه‌ای انجام شده است. دمای انجام آزمایش بدلیل حساسیت نمونه‌های آسفالتی در برابر بروز تغییر مکانهای برگشت‌ناپذیر در دماهای





شکل ۱۷. نمودار مقادیر اعداد روانی برای نمونه های مختلف

با افزایش درصدهای بالاتر **Lucobite**، مقاومت شیارشدگی افزایش می یابد.

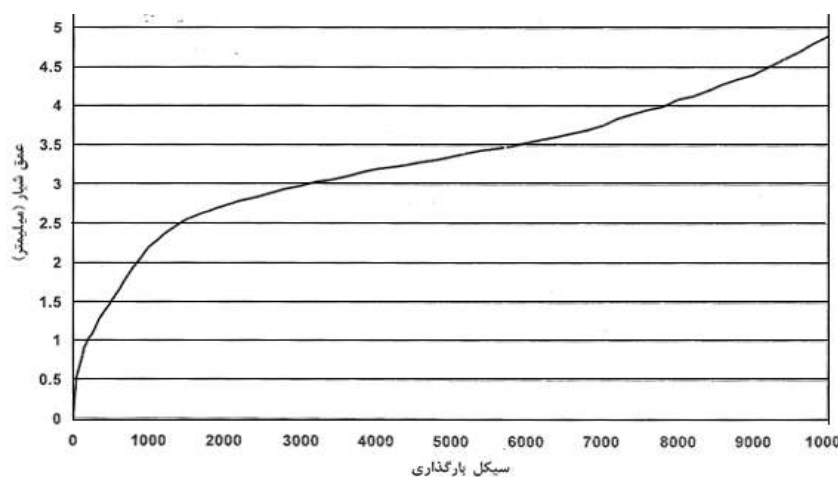
#### ۴-۲-۶- نتایج آزمایش شیار جای چرخ

انجام آزمایش شیارشدگی بمنظور ارزیابی مقاومت نمونه های آسفالتی در برابر بروز شیار و نیز دسترسی به نمودار عمق شیار در برابر تعداد دفعات عبور صورت پذیرفت. شکل های ۱۸ و ۱۹ به ترتیب دستگاه شیار جای چرخ هامبورگ و نمودار شماتیک تغییرات عمق شیار در برابر افزایش دفعات عبور چرخ دستگاه را نشان می دهند. مقادیر عمق شیار در ادامه، نتایج حاصل از انجام این آزمایش بصورت گراف ارائه می شوند.

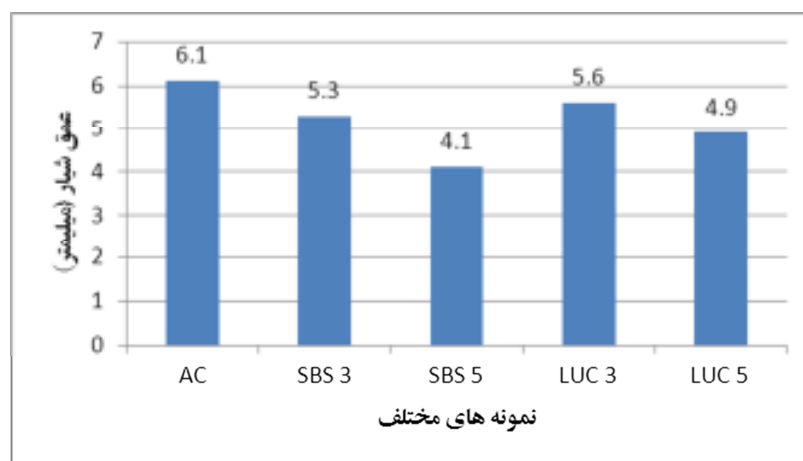
نتایج در شکل ۱۷ نشان داده شده است. قفل و بست سنگدانه ها و ثبات قیر از عوامل مهم بر پدیده شیارشدگی می باشد. اصلاح قیر با پلیمر **SBS** سبب افزایش سختی قیر می گردد. همانطور که مشاهده می شود مخلوط های شاهد مقاومت در برابر شیارشدگی کمتری نسبت به نمونه های حاوی ساسویت دارند. با توجه به نتایج آزمایشات قیر، قیرهای حاوی پلیمر **SBS** دارای درجه نفوذ کمتر و درجه نرمی بیشتر می باشد. مدول غیرقابل بازگشت کمتر و کرنش برگشت پذیر بیشتر نشان دهنده مقاومت بیشتر قیر می باشد. با توجه به شکل (۴-۱۰) درصدهای متفاوت **Lucobite** سبب افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی می گردد. بطوریکه



شکل ۱۸. نمونه ای از دال آسفالتی آزمایش شیارشدگی و دستگاه آزمایش



شکل ۱۹. نمونه‌ای از گراف خروجی دستگاه ویل تراک



شکل ۲۰. مقادیر عمق شیار گراف خروجی ویل تراک برای نمونه‌های آسفالتی

آسفالتی SMA نیز آزمایش‌های مارشال، آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم، مدول برجهنگی، آزمایش حساسیت رطوبتی، خزش دینامیکی و شیار جای چرخ انجام شد که خلاصه‌ای از نتایج آن در این بخش ارائه شده است:

- نتایج آزمایش‌های فیزیکی قیر نشان می‌دهد افزودن SBS، سبب کاهش درجه نفوذ و افزایش نقطه نرمی، کندروانی کینماتیکی و شاخص نفوذ شد.

- نتایج آزمایش‌های فیزیکی قیر نشان می‌دهد افزودن Lucobite، سبب کاهش درجه نفوذ و افزایش نقطه نرمی، کندروانی کینماتیکی و شاخص نفوذ شد.

- با توجه به نتایج آزمایش مارشال می‌توان نتیجه گرفت که افزودنی SBS و LUC باعث افزایش مقاومت مارشال نمونه‌ها می‌شوند. مخلوط حاوی ۵٪ SBS بیشترین

نمودار ۲۰ مقادیر عمق شیار نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهد. نمونه‌های حاوی ۵٪ SBS دارای بیشترین مقاومت شیارشدگی در مقایسه با سایر نمونه‌ها می‌باشد و در این میان نمونه‌های حاوی بدون افزودنی دارای مقاومت شیارشدگی کمتری می‌باشند.

### ۵- نتیجه‌گیری

این پژوهش در برگیرنده بررسی عملکرد قیر و مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای می‌باشد که با درصد‌های مختلف افزودنی پلیمری SBS و Lucobite ۳٪ و ۵٪ نسبت به وزن قیر) اصلاح شد. در این پژوهش آزمایش‌های رایج قیر بر روی قیر خالص ۶۰-۷۰ و قیر ۶۰-۷۰ اصلاح شده با افزودنی‌ها انجام شد. همچنین بر روی مخلوط‌های

- سازمان برنامه و بودجه، معاونت فنی، نشریه ۱۱۰، (۱۳۸۲)، "مشخصات فنی عمومی راه".

- شفابخش، غ.ع. و حداد، ع.ح. و اکبری، م.، (۱۳۸۷)، "کاربرد پلیمر در اصلاح خواص قیر و تهیه آسفالت پلیمری"، چهاردهمین کنفرانس دانشجویان مهندسی عمران سراسر کشور.

- یاری، ر.، (۱۳۸۸)، "تأثیر افزودنی قیر معدنی بر بتن آسفالتی گرم"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران.

- "کاربرد پلیمر در بهبود خواص قیرها و مخلوط آسفالتی"، (۱۳۸۷).

-Aflaki, S., & Tabatabaee, N., (2009), "Proposals for modification of Iranian bitumen to meet the climatic requirements of Iran", Construction and Building Materials, 23(6), pp. 2141-2150.

-Brown, E. R., & Cooley, L. A., (1999), "Designing stone matrix asphalt mixtures for rut-resistant pavements (No. 425)", Transportation Research Board.

-Brown, E. R., Haddock, J. E., Mallick, R. B., & Lynn, T. A., (1997), "Development of a mixture design procedure for stone matrix asphalt (SMA)", National Center for Asphalt Technology, Report, pp.97-03.

-Prowell, B. D., Watson, D. E., Hurley, G. C., & Brown, E. R., (2009), "Evaluation of stone matrix asphalt (SMA) for airfield pavements", NCAT Final Report .

مقاومت مارشال را در بین نمونه‌های حاوی افزودنی دارا می‌باشد. به طوری که مثلاً افزودن ۵٪ SBS به قیر خالص ۶۰-۷۰ سبب افزایش ۴۰٪ در مقاومت مارشال مخلوط SMA می‌شود.

- در بحث مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) نمونه‌های حاوی پلیمر در حالت خشک و اشباع نسبت به نمونه شاهد دارای مقاومت بالاتری می‌باشد و مقدار مقاومت کششی با افزایش درصد پلیمر در هر دو نوع پلیمر افزایش پیدا می‌کند. همچنین نسبت مقاومت کششی (TSR) یا مقاومت در برابر رطوبت در نمونه‌های حاوی پلیمر افزایش یافته است که نشان می‌دهد که حضور پلیمر در قیر و مخلوط آسفالتی میزان چسبندگی قیر و سنگدانه را افزایش می‌دهد.

- با توجه به نتایج به دست آمده، عملکرد قیر و مخلوط آسفالتی SMA اصلاح شده با پلیمر با افزایش درصد پلیمر بهبود پیدا می‌کند. همچنین عملکرد قیر و مخلوط حاوی SBS بهتر از پلیمر LUC می‌باشد و بهترین عملکرد قیر و مخلوط‌های آسفالتی SMA مربوط به نمونه‌های حاوی ۵ درصد SBS می‌باشد.

## ۶- پی‌نوشت‌ها

### 1-Stone on Stone

## ۷- مراجع

- "آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران، نشریه شماره ۲۳۴"، (۱۳۹۰)، پژوهشکده حمل و نقل، دفتر نظام فنی و اجرایی، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریس جمهور.

- زیاری، ح. و طباطبایی، س.ع. و خبیری، م.، (۱۳۸۵)، "راهنمای کاربردی آزمایش‌های قیر و آسفالت"، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران".

# Laboratory Evaluation of Performance Properties of Stone Matrix Asphalt (SMA) Mixtures for Using on Airfield Pavements

*Ali Paydar, Department of Civil Engineering, Malard Branch, Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.*

*Alireza Ameli, Department of Civil Engineering, Malard Branch, Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.*

*Majid Sattari, M.Sc., Student, Department of Civil Engineering, Malard Branch, Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.*

*Behrouz Behnoud, M.Sc., student, Department of Civil Engineering, Malard Branch, Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.*

*Email: Amelii@gmail.com*

Received: March 2021-Accepted: July 2021

## **ABSTRACT**

The aim of designing the roads and airports is to provide a structural composition on the path of motion to transport traffic in a safe, uniform and efficient way and as a result of increasing the traffic load and increasing the load on the axles and procedures, the necessity of design and implementation of stronger asphalt layers is critical to the various failures including moisture sensitivity and rutting phenomenon (as a common phenomenon in the rutting layer failure). In this study, the additives effect of SBS (% 3 and 5 %) and Lucobite (3 % and 5 %) on the performance of the asphalt mixed with the skeleton of aggregates (SMA) was investigated. Marshall " s resistance tests, indirect tensile strength, resilient modulus, moisture susceptibility test (using an indirect tensile test and resilient modulus in two dry and wet conditions and Texas boiling test) were conducted to investigate the dynamic and temporal creep of the Hamburg wheel to investigate the behavior of SMA mixtures. The results showed that with the increase of polymeric additives, decrease of penetration rate and softening point were increased. The study of the results of experiments and image processing of boiling water test photographs showed that polymer additives improved the mixed resistance to moisture. Results of dynamic creep test show that by increasing the polymer additives the resistance of specimens is increased. As such, the samples containing 5 % of the SBS had the highest resistance to rutting. Also, the results showed that by increasing the polymer additives the resistance of the samples is increased.

**Keywords:** Stone Matrix Asphalt (SMA), Rutting, Dynamic creep, Moisture Susceptibility, Resilient Modulus