

بررسی آزمایشگاهی تأثیر نانورس و پلیمر بر خصوصیات رئولوژیکی قیر و شیارشدگی مخلوط آسفالتی با استخوانبندی سنگدانه‌ای

مقاله پژوهشی

احسان حسن زاده خباز*، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد، مشهد، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Hasanzadeh.Khabaz@gmail.com

دریافت: ۹۸/۱۱/۰۳ - پذیرش: ۹۸/۰۴/۱۰

صفحه ۱۶۸-۱۵۱

چکیده

تغییر شکل دائم یا شیار افتادگی در مسیر عبور چرخ‌های وسایل نقلیه یکی از مهم‌ترین مدهای خرابی است که بر عمر روسازی انعطاف پذیر تأثیر می‌گذارد. این نوع خرابی بیشتر در جاده‌های که در مناطق گرمسیر واقع شده‌اند مشاهده می‌شود. ویژگی‌های مصالح تشکیل دهنده نقش زیادی در ویژگی‌های ساختمانی روسازی بازی می‌کنند. استفاده از دانه بندی متخلخل و درشت و درصد قیر بالا جهت ایجاد اتصال مناسب در ساختار مخلوط‌های آسفالتی از روشهای بهبود خواص مخلوط‌های آسفالتی شناخته شده است. یکی از انواع مخلوط‌های ساخته شده بر این اساس مخلوط‌های آسفالتی با استخوانبندی سنگدانه‌ای (SMA) می‌باشد. این مخلوط‌ها نوعی مخلوط آسفالتی گرم با اسکلت درشت دانه و میزان بالای قیر و فیلر می‌باشند که نقش کلیدی و با اهمیت نوع و خصوصیات قیر بکار رفته به عنوان چسباننده ذرات سنگی و عاملی که باید تحمل تنش برشی در محل سنگدانه‌ها را داشته باشد، بسیار مورد توجه است. از سوی دیگر، به واسطه‌ی بالا بودن میزان قیر و جهت جلوگیری از ریزش قیر، استفاده از افزودنی‌ها از جمله الیاف و یا مواد پلیمری اجتناب ناپذیر است. استفاده از افزودنی‌های پلیمری علاوه بر اینکه باعث بهبود خصوصیات قیر می‌شوند، با افزایش ویسکوزیته ی قیر، تا حدود زیادی مانع از ریزش قیر نیز می‌گردند. همچنین یکی از افزودنی‌هایی که به تازگی در اصلاح مشخصات رفتاری قیرها به کار گرفته شده است، نانورس است. هدف از انجام این پژوهش، ارزیابی اثر نانورس به عنوان افزودنی اصلی به قیر برای بهبود خواص قیر در کنار افزودنی‌های شایع SBS و الیاف سلولوزی، به منظور افزایش مقاومت باربری آسفالت و اصلاح خصوصیات فنی آن در برابر شیار افتادگی در آسفالت SMA می‌باشد. بدین منظور نمونه‌هایی از مخلوط‌های آسفالتی SMA از قیر خالص ۷۰-۶۰ حاوی افزودنی ۰/۴٪ الیاف به مخلوط آسفالتی و یا قیر اصلاح شده توسط ۵٪ SBS، همراه افزودنی نانورس مونت موریلونیت به نسبت ۱٪، ۲٪، ۳٪ و ۴٪ به هر دو قیر خالص و پلیمری، توسط دستگاه ژیراتوری ساخته شد. در این پژوهش آزمایش مارشال، آزمایش‌های خزش دینامیکی و شیار شدگی برای نمونه‌های مختلف انجام گرفته است. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها بهبود عملکرد نمونه‌های مخلوط آسفالتی حاوی نانورس تا ۳ درصد در شیارشدگی را نشان می‌دهد که در قیر پلیمری بهترین بهبود در عملکرد را دارد.

واژه‌های کلیدی: SMA، نانورس، الیاف، SBS، مارشال، خزش، شیارشدگی

۱-مقدمه

امروزه با افزایش بار محوری و افزایش ترافیک عبوری وسایل نقلیه، روسازی‌ها تحت تنش و بارگذاری بیشتری قرار می‌گیرند که ممکن است باعث خرابی‌های زودرس در آنها شود (Huang, 1993). خرابی‌های ناشی از خستگی و شیارشدگی یکی از مشکلات اساسی در روسازی‌های انعطاف پذیر به شمار می‌روند (Lewandowski, 1994; Ameri et al, 2010). از اینرو محققین، مطالعات زیادی در این زمینه انجام داده‌اند که در آنها سعی بر این بوده تا با ایجاد تغییراتی در قیر مصرفی و یا در ساختار دانه‌بندی آسفالت، مقاومت مناسبی در برابر تغییرشکل‌های دائمی به دست آید (Grim, 1959) از میان نتایجی که در ارتباط با تغییر ساختار دانه‌بندی آسفالت به دست آمده است می‌توان به آسفالت^۱ SMA اشاره داشت که دارای مقاومت بالایی در برابر شیارشدگی است (Grim, 1959; Lewandowski, 1994). مخلوط‌های آسفالتی با استخوانبندی سنگدانه‌ای از انواع مخلوط‌های آسفالتی هستند که به منظور تهیه آنها و

امروزه با افزایش بار محوری و افزایش ترافیک عبوری وسایل نقلیه، روسازی‌ها تحت تنش و بارگذاری بیشتری قرار می‌گیرند که ممکن است باعث خرابی‌های زودرس در آنها شود (Huang, 1993). خرابی‌های ناشی از خستگی و شیارشدگی یکی از مشکلات اساسی در روسازی‌های انعطاف پذیر به شمار می‌روند (Lewandowski, 1994; Ameri et al, 2010). از اینرو محققین، مطالعات زیادی در این زمینه انجام داده‌اند که در آنها سعی بر این بوده تا با

منظور میتوان از انواع پلیمر مانند Styrene Butadiene Rubber (SBR), Ethyl Vinyl Acetate (EVA), Polyvinyl chloride (PVC), Styrene Butadiene Styrene (SBS) استفاده نمود (یعقوبی، ۱۳۸۷). بر اساس

نتایج تحقیقات صورت گرفته، یک جنبه‌ی پلیمر SBS کندروانی کم مخلوط آن با قیر در دمای اختلاط است. پلیمرهای خانواده SBS² تمامی مشخصات قیر را تحت تاثیر قرار تحت تاثیر قرار میدهند (بهرام نژاد، ۱۳۷۲). یکی دیگر از افزودنی‌های شاخص برای اصلاح خواص قیرنانو ذرات می‌باشند. از جمله نانو مواد پرکاربرد در صنعت می‌توان به نانو رس‌ها اشاره کرد. نانو رس‌ها مواد منحصر به فردی هستند که به عنوان مواد افزودنی برای ساخت نانو کامپوزیت‌ها و بهبود قابل توجه خواص مواد پلیمری به کار می‌روند. ساختار نانورس‌ها شامل صفحاتی کوچک و نامنظم با ضخامتی در حدود ۱ نانومتر و قطر چند صد نانومتری است. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های نانو رس‌ها نسبت طول به ضخامت بسیار بالای تک تک صفحات) از ۱ به ۳۰۰ تا ۱ به ۱۵۰۰ است. به علت ساختار صفحه‌ای، نانو رس‌ها مواد پلیمدری معمول را تقویت می‌کنند، یعنی خواص مکانیکی آن‌ها را بهتر می‌کنند، افزایش استحکام، مدول و ثبات ابعادی از این موارد است. صفحات نانو رس به عنوان منافذ در برابر رطوبت و مواد شیمیایی به خوبی به عنوان حائل برای جلوگیری از نفوذ یا عبور گازها عمل می‌کنند (Lewandowski, 1994). تغییر شکل دائم یکی از پارامترهای مهم در طراحی روسازی‌های انعطاف پذیر می‌باشد. با افزایش بار ترافیک و فشار لاستیک، بیشتر تغییرشکلهای دائم در لایه‌های بالایی روسازی رخ می‌دهند تا در خاک بستر. به منظور تخمین عمق شیار، تعیین پارامترهای تغییر شکل دائم مصالح هر لایه از اهمیت بالایی برخوردار است. بدین منظور از روشهای متفاوتی استفاده شده است. اکثر روش‌ها از بارگذاری تکراری، مشابه حالت بارگذاری مدول برجهندگی و با این تفاوت که تعداد اعمال بار در حدود ۱۰۰۰۰۰ تکرار بوده استفاده می‌کنند (et al, 1986 King). مهمترین هدف آزمایش خزش دینامیکی، مطالعه عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر پدیده شیارشدگی است. به عبارت دیگر، یک روش تعیین خصوصیات تغییر مکان دائم مخلوط آسفالتی بکارگیری آزمایش بار دینامیکی تکرارشونده به تعداد چندین هزار تکرار و ثبت کرنش جمعی بعنوان تابعی از تعداد سیکل‌ها (بارگذاری‌ها) در زمان انجام آزمایش است. خزش و بارگذاری تکراری برای معین کردن خصوصیات پاسخ تغییر شکل دائم مخلوط‌های آسفالتی گرم، به صورت سه محوری فشاری و برشی مورد استفاده قرار

جهت افزایش همزمان درصد قیر و تماس بین سنگدانه، از نوعی دانه بندی میان تهی استفاده میشود. مصالح درشتدانه در این مخلوطها عامل اصلی پایداری و مقاومت می‌باشند. در واقع تماس مستقیم سنگدانه با سنگدانه سبب این پایداری میگردد. در واقع SMA یک مخلوط آسفالتی گرم با دانه بندی منقطع می‌باشد که مقادیر درشت دانه و قیر در آن نسبت به سایر آسفالت‌ها بیشتر می‌باشد. این نوع مخلوط، در اواسط دهه‌ی ۶۰ میلادی برای نخستین بار در کشور آلمان به صنعت راهسازی معرفی شد و بتدریج سایر کشورهای اروپایی و ایالات متحده به استفاده از این مخلوط آسفالتی روی آوردند (Ameri et al, 2010) این نوع مخلوط از سال ۱۹۹۱ در بسیاری از ایالات آمریکا مورد استفاده قرار گرفته است و همچنان محبوبیت استفاده از آن رو به گسترش است (Jahromi et al, 2010). تمایل کشورهای قاره آمریکای شمالی به تولید و اجرای SMA به دنبال سفر تحقیقاتی گروهی از متخصصین روسازی آمریکا به پنج کشور اروپایی در سال ۱۹۹۰ به وجود آمد. گزارش‌های توجیه عملکردی این گروه توجه مجامع داخلی ایالات متحده را جلب نموده و پس از انجام تحقیقات بیشتر و اجرای آن در کانادا در اواخر سال ۱۹۹۰ و آمریکا در ۱۹۹۱، استفاده از آن در سایر کشورها نیز رو به گسترش است (Ameri et al, 2010). در مخلوط‌های آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه ای، دانه بندی میان تهی، وجود فضای خالی نسبتاً زیاد بین مصالح سنگی درشتدانه و مصرف زیاد قیر عوامل مستعدی جهت جاری شدن و ریزش قیر می‌باشد. از این رو به جهت جلوگیری از این پدیده و تثبیت مخلوط، از الیاف و یا اصلاح کننده‌های پلیمری قیر استفاده می‌شود (آهنگر، ۱۳۸۵). الیاف به دو منظور اصلی در مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار می‌گیرند: اول افزایش سختی و مقاومت گسیختگی مخلوط‌های آسفالتی گرم و دوم پایدار کننده جهت جلوگیری از بیرون ریختن قیر. الیاف آلی و معدنی تا کنون به طور گسترده‌ای در مخلوط‌های با دانه بندی باز و استخوانی مورد استفاده قرار گرفته اند (jahromi et al, 2010). اثر نوع و درصد الیاف آلی و معدنی بر خواص حجمی و مقاومت مخلوط‌های آسفالتی SMA در تحقیقی در سال ۲۰۰۸ مورد ارزیابی قرار گرفت. در این تحقیق علاوه بر آزمایشهای مارشال، خزش دینامیکی به منظور بررسی پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های SMA به کار رفت. تغییر شکل دائم مخلوط‌ها به شدت تابع درصد الیاف به کار رفته در مخلوط می‌باشد (Xiao, et al, 2010). اصلاح قیر با مواد پلیمری علاوه بر کمک به تثبیت مخلوط آسفالتی، در بهبود مشخصات و ماندگاری روسازی نقشی اساسی دارند. بدین

است، انجام شد. همچنین به منظور بررسی تاثیر میزان نانو رس قیر در رفتار مخلوط، در هر گروه قیر معمولی و پلیمری درصدهای ۰ تا ۴ درصد نانورس به قیر توسط دستگاه التراسونیک اضافه شد. تهیهی نمونه‌ها به روش سوپریو توسط دستگاه تراکم ژیراتوری انجام گرفته است. در نهایت به کمک دستگاه $UTM-5^3$ و استفاده از محفظه‌ی زیست محیطی نمونه‌های ساخته شده در دمای ۲۵ و ۵۰ درجه‌ی سانتیگراد تحت آزمایش تعیین مدول دینامیکی قرار گرفتند. همچنین آزمایش شیارر شدگی بر روی نمونه‌ها توسط دستگاه ویل ترک صورت گرفت.

۲-۱- مصالح سنگی و قیر

تعیین خصوصیات مصالح سنگی جهت استفاده در تهیه مخلوطهای SMA از آن جهت مهم است که مواردی چون درصد شکستگی، سختی، جنس مصالح و تیزگوشگی بر روی خواص مخلوط اثر می‌گذارد و باید با مقادیر آیین نامه‌ای ارایه شده برای مخلوطهای SMA مطابقت داشته باشد. در این تحقیق ویژگیهای ارائه شده گزارش NCHRP-425 No برای مخلوطهای SMA، برای تعیین دانه بندی، انتخاب مصالح سنگی و طرح مخلوط مینا قرار گرفت (Brown et al, 1997). در این پژوهش از سنگ شکسته کوهی، معدن تلو تهران با حداکثر اندازه اسمی سنگدانه ۹/۵ میلیمتر جهت ساخت نمونه‌ها استفاده شد. مشخصات مصالح سنگی و دانه بندی انتخابی در جداول (۱) و (۲) ارائه شده است. در این پژوهش از نوع قیر خالص ۶۰/۷۰ بود که از شرکت نفت پاسارگاد تهیه شد و مشخصات فیزیکی آن در جدول ۳ آمده است.

گرفته‌اند. در روند طراحی روسازی تدارکاتی برای مقایسه خصوصیات تغییرشکل دائم مخلوطهای مختلف به وسیله اندازه‌گیری خزش و انتخاب مخلوطی که تخمین عمق شیار آن برای شرایط خاص بارگذاری و آب و هوا از مقدار پیش بینی شده تجاوز نکند، در نظر گرفته شد. عمق شیار در سطح روسازی که تنها ناشی از تغییرشکل دائم لایه‌های آسفالتی است، تابعی از سختی مخلوط می‌باشد. مقدار سختی ماکزیمم از بارگذاری خزشی تعیین می‌شود (Epps, 1994) آزمایش شیارشدگی توسط دستگاه ویل ترک اطلاعاتی در مورد عمق شیارشدگی در اختیار ما می‌گذارد. از این آزمایش برای اندازه‌گیری مقدار عمق شیار چرخ استفاده می‌شود.

۲-۲- روش تحقیق

در این تحقیق به بررسی تغییر خصوصیات ویسکوالاستیک مخلوطهای آسفالتی SMA تحت تاثیر استفاده از قیر پلیمری حاوی SBS و قیر حاوی الیاف آلی به همراه افزودنی نانو رس مونت موریلونیت با درصدهای مختلف، پرداخته شده است. بدین منظور پس از تهیه مصالح سنگی مورد نیاز، آزمایشات مربوطه به منظور اطمینان از کیفیت آنها انجام گرفت. پس از تایید کیفیت مصالح سنگی، از یک دانه بندی پیشنهادی با حداکثر اندازه اسمی ۹/۵ میلی‌متر و با توجه به حدود بالا و پایین توصیه شده در گزارش ۴۲۵ نشریه ی NCHRP استفاده شد که مشخصات کامل دانه بندی استفاده شده در جدول شماره ی ۱ آمده است. کار ساخت نمونه های آسفالتی SMA با استفاده از قیر معمولی همراه ۰/۴ درصد وزنی کل مخلوط الیاف آلی و قیر پلیمری ۵ درصد پلیمر SBS که قبلا توسط دستگاه صورت گرفته

جدول ۱. خصوصیات مصالح سنگی مورد استفاده

آزمایش	استاندارد	مقدار	واحد
سایش لس آنجلس	AASHTO T96	۲۵.۶	%
جذب آب (درشت دانه)	AASHTO T85	۲.۱	%
جذب آب (ریزدانه)	AASHTO T84	۳.۹	%
وزن مخصوص (درشت دانه)	AASHTO T85	۲.۶۵۹	گرم بر سانتی مترمکعب
وزن مخصوص (ریزدانه)	AASHTO T84	۲.۶۲۳	گرم بر سانتی مترمکعب
درصد شکستگی در یک وجه	ASTM D-58۲۱	۱۰۰	%
درصد شکستگی در دو وجه	ASTM D-58۲۱	۹۵	%

جدول ۲. مشخصات دانه بندی بکاررفته در طرح مخلوط SMA

اندازه الک (میلی متر)		۹/۵ میلی متر
حد پایین	حد بالا	
-	-	۳۷.۵
-	-	۲۵
-	-	۱۹
۱۰۰	۱۰۰	۱۲.۵
۱۰۰	۹۰	۹.۵
۶۰	۱۶	۴.۷۵
۲۸	۲۰	۲.۳۶
۲۱	۱۳	۱.۱۸
۱۸	۱۲	۰.۶
۱۵	۱۲	۰.۳
۱۰	۸	۰.۰۷۵

در این تحقیق به منظور حصول اطمینان از تماس سنگدانه به سنگدانه از روش تعیین فضای خالی مصالح سنگی درشت دانه و مقایسه آن با فضای خالی مصالح سنگی درشت دانه نمونه آسفالتی استفاده شد. شرط ایجاد تماس سنگدانه به سنگدانه کوچکتر بودن فضای خالی مصالح سنگی درشت دانه نمونه SMA از فضای خالی مصالح سنگی درشت دانه است. به منظور تعیین فضای خالی بین مصالح سنگی درشت دانه، از تراکم به روش خشک میل خورده بر طبق استاندارد AASHTO-T19 استفاده شد (Brown and cooly, 1999)

در این تحقیق به منظور حصول اطمینان از تماس سنگدانه به سنگدانه از روش تعیین فضای خالی مصالح سنگی درشت دانه و مقایسه آن با فضای خالی مصالح سنگی درشت دانه نمونه آسفالتی استفاده شد. شرط ایجاد تماس سنگدانه به سنگدانه کوچکتر بودن فضای خالی مصالح

جدول ۳. مشخصات فیزیکی قیر

نوع آزمایش	استاندارد	نتیجه آزمایش
نقطه نرمی	ASTM D36	۴۷ درجه سانتی گراد
درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه	ASTM D5	۶۷ دسی میلی متر
درجه اشتعال	ASTM D92	۳۰۴ درجه سانتی گراد
شکل پذیری در دمای ۲۵	ASTM D113	بیش از ۱۰۰ سانتی متر
چگالی	ASTM D70	۱/۰۴۵ گرم بر سانتی متر مکعب
افت حرارتی	ASTM D6	۰/۰۵ درصد
قابلیت حل	ASTM D4	۹۹/۵ درصد

۲-۲-الیاف سلولزی TOPCEL

گزارش NCHRP 425 در نظر گرفته شد. مشخصات الیاف استفاده شده به صورت خلاصه در جدول ۴ آورده شده است.

در این تحقیق برای ساخت نمونه‌ها از الیاف سلولزی در برخی نمونه‌ها به منظور اصلاح قیر و جلوگیری از پدیده ریزش قیر و مقاومت استفاده شد. مقدار مصرف الیاف سلولزی برابر ۰,۳٪ وزنی کل مخلوط آسفالتی بر اساس

جدول ۴. مشخصات الیاف سلولزی

مشخصات	مقدار	واحد
میزان فیبر	۹۵±۳	%
میزان سلولز	approx.۸۰	%
چگالی	۴۲۰-۴۸۰	g/l
رطوبت	< 6	%
خاکستر	approx.۱۵	%
طول فیبر	approx.۱۱۰۰	µm
PH	۶.۵-۸.۵	-



شکل ۱. الیاف سلولزی TOPCEL

بلوکه است که در آن بلوک های استایرن به وسیله یک بلوک بوتادین از یکدیگر جدا شده اند. این کوپلیمرها می توانند خطی یا شعاعی باشند و در قیر یک شبکه الاستیک سه بعدی از فاز پلی استایرن را تشکیل می دهند که به وسیله فاز پلی بوتادین به یکدیگر متصل می شوند. در پلیمر استایرن - بوتادین - استایرن که در قیرهای راهسازی به کار می رود معمولاً استایرن بین ۲۰ تا ۳۰ درصد وزن کل این پلیمر را تشکیل می دهد. درصد بیشتر استایرن می تواند باعث ناسازگاری با قیر و اشکالاتی در پخش کردن و ناپایداری انبارداری در دماهای بالا شود. از پلیمر SBS به عنوان یکی از پرکاربردترین مواد افزودنی قیر استفاده می شود. مشخصات این ماده مطابق با جدول (۵) می باشد. در ضمن پلیمر مورد نظر دارای ساختار خطی می باشد.

در این تحقیق از به مقدار ۳،۰٪ وزنی کل مخلوط آسفالتی برای مقابله با ریزش قیر استفاده شده است. این الیاف قبل از اختلاط قیر با سنگدانه، در مصالح سنگی داغ (۱۷۵ درجه سانتی گراد) ریخته شده و هم زده می شود تا به خوبی در آن پخش گردد. سپس قیر با مخلوط الیاف و سنگدانه مخلوط شده و نمونه ها به صورت مرسوم ساخته می شوند. الیاف TOPCEL مانند کرک است و پس از حرارت دیدن و اختلاط با قیر باز شده و شبکه ی فیبری تشکیل می دهد و به این طرق مانع از جدا شدن و ریزش قیر می گردد.

۲-۳- پلیمر SBS

کوپلیمر استایرن - بوتادین - استایرن یک کوپلیمر سه

جدول ۵. مشخصات پلیمر

مشخصات	استاندارد آزمایش	واحد	مقدار	محدوده مجاز
وزن مخصوص در ۲۳ درجه سانتی‌گراد	ASTM D ۷۹۲	۱ گرم	۰.۹۴	۰.۹۲-۰.۹۵
Styrene content	ASTM D ۱۴۱۶	Wt%	۳۲	۳۰.۵-۳۳.۵
Ash content	ASTM D ۱۴۱۶	Wt%	۰.۹	≤۱
Oil content	ASTM D ۱۴۱۶	Phr	۰	<۰,۲
شاخص روانی در ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد	ASTM D ۱۲۳۸	۱۰ گرم بر ثانیه	۰.۳	۱۲
سختی	ASTM D۲۲۴۰	-	۷۵	<۱

۲-۴-نانورس

افزودن نانو رس ذرات به سیس‌دتم قیر و پلیمر مطمئناً استحکام سیستم و مدول آن را افزایش می‌دهد در این پژوهش از نانورس مونت موریلونیت با نام Cloisite 15A

که از شرکت سیگما تهیه شد، استفاده شده است که مشخصات آن در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶. مشخصات نانو رس

Particle size	Color	Density	Moisture content	Specific surface area
1-2 nm	Pale yellow	0.5 – 0.7 gr/cm ³	1-2%	220-270 m ² /gr

۲-۵-طرح اختلاط

در شرایط مورد نظر، جام دستگاه دو جداره بوده و روغن با دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد در آن جریان داشت. عمل اختلاط به مدت ۴۵ دقیقه با دوران ۵۰۰۰Rpm انجام شد. سپس نانو رس مونت موریلونیت با درصدهای ۱٪، ۲٪، ۳٪ و ۴٪ وزنی قیر به صورت جداگانه به هر دو قیر پلیمری و خالص اضافه شد. برای اختلاط قیر و نانو رس از دستگاه التراسنیک استفاده شده است. اختلاط در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد و با تعداد دور ۶۰۰۰Rpm و مدت زمان ۳۰ دقیقه انجام گرفته است. برای اطمینان از توزیع یکنواخت و جلوگیری از کلوخه شدن نانو رس مورد نیاز برای هر نمونه در مراحل مختلف افزوده شده است. ابتدا برای تعیین درصد قیر بهینه نمونه‌های استاندارد مارشال ساخته می‌شود و در نهایت با نمونه‌ها که با دستگاه تراکم ژیراتوری ساخته می‌شوند و برای ارزیابی تاثیر افزودنی‌ها بر خواص مخلوط‌های آسفالتی گرم، آزمایش‌های مارشال، مدول برجهنگی، دوام و خزش دینامیکی و شیار جای چرخ بر روی انواع مخلوط‌های ساخته شده انجام شد.

در این پژوهش پس از انتخاب دانه‌بندی مطلوب و برای تهیه درصد قیر بهینه، نمونه‌هایی براساس روش طرح اختلاط ارائه شده در گزارش NCHRP-No 425 ساخته شد. در اینجا دو درصد قیر بهینه وجود دارد که به قرار زیر تشریح می‌شود. در حالت اول ابتدا ۱۲ نمونه با قیر پلیمری و در درصدهای ۷٪، ۷.۵٪ و ۷٪ بدون وجود الیاف و طبق دانه‌بندی مطلوب ساخته شد که پس از بررسی معیارهای ارائه شده در گزارش NCHRP-No 425 درصد قیر بهینه برابر ۷.۲٪ انتخاب شد. همین مراحل در حالت استفاده از الیاف نیز انجام گرفته و درصد قیر بهینه در این حالت برابر ۶.۹٪ انتخاب شد. ابتدا نیمی از قیر خالص جدا شد و پلیمر SBS به آن افزوده شد. بدین منظور از دستگاه مخلوط کن با برش بالا استفاده شده است. روش اختلاط بدین ترتیب بود که برای تهیه ی قیر با ۵ درصد SBS ابتدا قیر تا دمای ۱۷۵ درجه سانتی‌گراد در اون گرم شده و پس از ریختن آن در جام اختلاط و اضافه کردن مقدار مورد نیاز پلیمر، عمل اختلاط شروع می‌شد. به منظور حفظ دمای قیر

۳-روش کار آزمایش

۳-۱-آزمایش ریزش قیر

پدیده ریزش قیر عمده ترین عیب مخلوط‌های آسفالتی با دانه بندی میان تهی است و از آنجا که مخلوط‌های SMA از نوع مخلوطها با دانه بندی میان تهی هستند، بنابراین دارای پتانسیل ریزش قیر هستند. آزمایش ریزش قیر روشی برای ارزیابی پتانسیل ریزش قیر یا همان جدا شدن ملات قیری از مخلوط‌های SMA است. آزمایش ریزش قیر روشی برای ارزیابی پتانسیل ریزش قیر یا همان جدا شدن ملات قیری از مخلوط‌های SMA است. این روش، میزان ریزش قیر در یک نمونه آسفالتی متراکم نشده که در دمای بالاتری نسبت به آسفالتی که به مرحله اجرا می‌رسد، نگه داشته می‌شود را تعیین می‌کند. این آزمایش اصولاً برای مخلوط‌های آسفالتی که شامل درصد بالایی از مصالح درشت دانه می‌باشند همانند مخلوط آسفالتی متخلخل و هم چنین مخلوط‌های آسفالتی SMA انجام می‌پذیرد. نمونه مورد

نمونه آزمایش باید در آزمایشگاه ساخته شود. نمونه در یک سبد سیمی که روی یک صفحه قرار دارد ریخته می‌شود. (وزن سبد سیمی (A) و صفحه زیر آن (B) از قبل اندازه گیری شده است). سپس سبد حاوی نمونه به تنهایی (C) و بدون صفحه همراه آن توزیع شده و داخل اون که از قبل دمای آن تنظیم شده است قرار داده می‌شود. پس از گذشت حدود یک ساعت، سبد سیمی به همراه صفحه زیر آن از اون خارج می‌شوند. وزن صفحه زیر سبد که شامل مواد ریخته شده نیز می‌باشد (D)، اندازه‌گیری شده و با وزن آن قبل از انجام آزمایش (B) مقایسه می‌شود. اختلاف بین این دو مقدار، وزن مواد خارج شده از نمونه را نشان می‌دهد. محاسبات لازم در این بخش به صورت زیر می‌باشد:

$$\text{Draindown}(\%) = \frac{D-B}{C-A} * 100 \quad (1)$$

نمایی از سبد مخصوص آزمایش ریزش قیر در شکل (۲) نمایش داده می‌شود.



شکل ۲. سبد استفاده شده برای انجام آزمایش ریزش قیر

۳-۲-آزمایش مقاومت مارشال

به منظور انجام آزمایش مقاومت مارشال و ارایه نتایج حاصل، نمونه‌های ساخته شده به مدت ۳۰ الی ۴۰ دقیقه در حمام آب گرم مجهز به ترموستات با دمای ۶۰ درجه سانتی گراد قرار داده می‌شوند. باید دقت کرد که ترتیب قرار دادن نمونه‌ها در آب به نحوی باشد که بتوان همه‌ی نمونه‌ها را در زمانی بین ۳۰ تا ۴۰ دقیقه از آب خارج کرده و روی آنها آزمایش را انجام داد. فکین دستگاه مارشال باید قبل از شروع آزمایش داخل اون گذاشته شده و پس از گرم شدن

روغنکاری شوند. نمونه‌ها داخل فکین قرار داده شده و مقادیر استقامت و وارفتگی هریک اندازه‌گیری می‌شوند. همانطور که در فصل دوم نیز ذکر گردید، آزمایش مارشال نمی‌تواند به درستی بیانگر خصوصیات مقاومتی مخلوط آسفالتی SMA باشد، با اینحال در این قسمت اعداد مربوطه صرفاً جهت ارائه اطلاعات مربوط به این آزمایش ذکر گردید.

۳-۳-آزمایش کشش غیر مستقیم

در آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم^۵ یک نمونه استوانه‌ای به صورت قطری بارگذاری می‌شود. آزمایش کشش غیرمستقیم برای تعیین مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی و پیش‌بینی ظهور ترک‌ها در مخلوط آسفالتی استفاده می‌شود. همچنین می‌توان از این آزمایش برای

(۲)

ارزیابی عمر خستگی نیز استفاده کرد. آزمایش کششی غیرمستقیم بر اساس آیین نامه ASTM D6931-12 با نرخ ثابت ۵۰/۸ میلی‌متر بر دقیقه و دمای ۲۰ درجه سانتیگراد انجام شد. مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها با استفاده از معادله زیر تعیین شد:

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

بیشتر مستعد ترک خوردگی حرارتی می‌باشند. ابتدا نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در محفظه دستگاه در دمای ۲۵ درجه 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 برجهنگی براساس معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$M_r = \frac{p(\vartheta + 0.2734)}{\delta t}$$

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. می‌توان از این آزمایش برای ارزیابی عمر خستگی نیز استفاده کرد.

۳-۴-مدول برجهنگی

آزمایش مدول برجهنگی در دماهای پایین بنحوی مرتبط با ترک خوردگی حرارتی می‌باشد. تحقیقات متعددی نشان داده است که مخلوط‌های سخت‌تر در دماهای پایین‌تر

(۳)

$$M_r = \text{مدول برجهنگی (مگا پاسکال)}$$

$$P = \text{بار تکراری (نیوتن)}$$

$$v = \text{نسبت پواسون}$$

$$t = \text{ضخامت نمونه (میلی‌متر)}$$

$$\delta = \text{تغییر شکل افقی برگشت پذیر (میلی‌متر)}$$

این آزمایشات بر اساس استاندارد ASTM D-4123-82 با ضریب پواسون ثابت انجام گرفت. تنظیمات دستگاه مطابق جدول ۷ می‌باشد.

جدول ۷. تنظیمات دستگاه جهت انجام آزمایش مدول برجهنگی

پارامتر	مقدار
شکل بارگذاری	شبه سینوسی
زمان بارگذاری (متر بر ثانیه)	۱۰۰
زمان تکرار بارگذاری (متر بر ثانیه)	۱۰۰۰
تعداد پالس پیش بارگذاری	۲۵
تعداد پالس آزمایش	۵
دمای انجام آزمایش (سانتی‌گراد)	۲۵
بار اعمالی (نیوتن)	۱۰۰۰
نسبت پواسون	۰,۳۵

۳-۵- آزمایش حساسیت رطوبتی

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. این آزمایش بر اساس استاندارد NCHRP 9-19 (Unconfined) انجام شد. 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.

این آزمایش بر اساس استاندارد AASHTO-T283 انجام می‌گیرد. نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم^۶ نمونه‌ها بر طبق این استاندارد در شرایط اشباع و غیر اشباع باید بیش از ۰/۷۰ باشد. برای اشباع شدن، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آب ۶۰ درجه قرار گرفتند.

۳-۶- 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

۳-۷- شیار جای چرخ

با استفاده از دستگاه ردیابی چرخ برای ارزیابی عملکرد روسازی در دمای بالا انجام شد. نمونه‌ها با درصد‌های قیر تعیین شده از طرح مخلوط و درصد‌های مختلف فیلر توسط ماشین تراکم مالشی متراکم و مخلوط شدند. مطابق با استاندارد [AASHTO T - ۳۲۴] آزمون شیار جای چرخ در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد برای ارزیابی عملکرد شیارافتادگی نمونه‌ها انجام شد. به منظور دستیابی به کنترل دما، از محفظه دستگاه استفاده شد. سه نمونه آزمایشی برای هر نوع نمونه ساخته شد.

در تست شیار جای چرخ اخیر، دستگاه‌های جدید (دستگاه ردیابی چرخ هامبورگ، تست‌های شیار افتادگی فرانسوی، آزمایش شیار ناتینگهام، آزمایشات چرخ بارگذاری جرجیا و آنالیز کننده روسازی) توسعه داده شده و برای ارزیابی پتانسیل شیارافتادگی روسازی آسفالتی که در آن‌ها شیار جای چرخ بیشتر ترجیح داده می‌شود، استفاده از یک چرخ بار چرخ سیکلیک در سطح نمونه‌ها است. شیار تجمعی بعد از سیکل‌های پیشنهادی به عنوان معیاری از پتانسیل شیارافتادگی، گزارش شده است. تست ردیابی چرخ

۴- تحلیل نتایج آزمایشات

۴-۱- نتایج آزمایشات قیر

۴-۱-۱- نتایج تستهای فیزیکی قیر

پلیمر دارای کمترین مقدار درجه نفوذ می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد افزودن نانورس و پلیمر سبب افزایش نقطه نرمی قیرها گردیده است. نتایج آزمایش حساسیت حرارتی قیرها دارای کمترین حساسیت به حرارت می‌باشد.

نتایج تست قیر در جدول ۸ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد افزودن پلیمر سبب کاهش درجه نفوذ قیر می‌شود. همچنین افزودن نانورس سبب کاهش درجه نفوذ قیرخالص گردیده است. به طوری که قیر حاوی ۳٪ نانورس و ۵٪

جدول ۸. نتایج آزمایشات قیر

Property	Base binder	5% SBS (S0)	1% MM T (N1)	2% MMT (N2)	3% MM T (N3)	4% MM T (N4)	5% SBS + 1% MM T (S1)	5% SBS + 2% MM T (S2)	5% SBS + 3% MM T (S3)	5% SBS + 4% MM T (S4)
Penetration (100 g, 5 s, 25 °C), 0.1 mm	64	45	59	54	48	50	43	41	38	40
Ductility (25 °C, 5 cm/min), cm	110	120	107	105	103	105	116	113	111	112
Softening point (°C)	53	68	56	60	64	62	70	72	75	74
Penetration index	-0.3	0.4	0.5	0.9	1.2	1.1	0.6	1.1	1.5	1.4

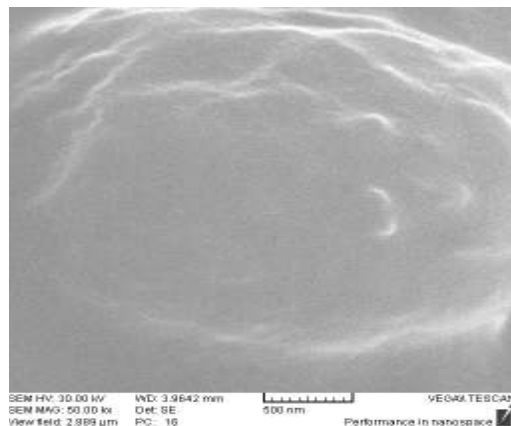
۴-۲-۲- نتایج آزمایش رئولوژی قیر

افزایش می‌یابد. به طوریکه مقدار آن برای قیر حاوی ۵٪ نانورس و ۴٪ نانورس از ۱/۱۲ به ۵/۱ می‌رسد. در حالت پیرشده کوتاه مدت، با اصلاح نمودن قیر با نانورس مقادیر پارامتر $G^*/\sin \delta$ افزایش می‌یابد. به طوریکه قیر حاوی ۵٪ پلیمر و ۴٪ نانورس دارای بیشترین مقدار می‌باشد. شارپ حداکثر پارامتر $G.Sind$ را به ۵۰۰۰ کیلوپاسکال محدود نموده است. با توجه به جدول ۹، اضافه نمودن نانورس و پلیمر سبب کاهش مقادیر $G^*.Sind$ می‌گردد.

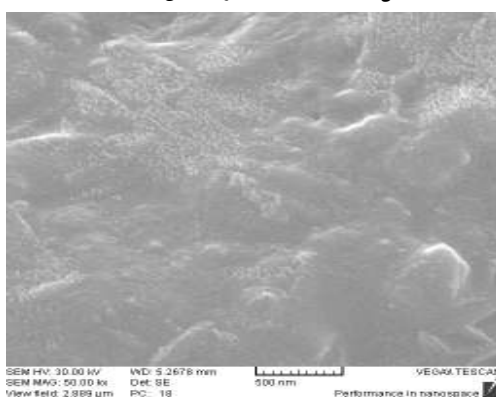
نتایج آزمایش رئولوژی قیر در جدول ۹ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش نانورس ویسکوزیته قیر افزایش می‌یابد. به طوریکه با افزایش مقادیر بیشتر نانورس، مقدار ویسکوزیته روند افزایشی دارد. میزان افزایش ویسکوزیته نمونه‌های حاوی پلیمر و نانورس بیشتر از نمونه‌های حاوی نانورس به تنهایی می‌باشد. شارپ حداقل مقدار ۱ کیلوپاسکال را قیرهای پیرنشده و مقدار ۲،۲ را برای قیرهای پیرشده در نظر گرفته است. با توجه به نتایج، در حالت پیر نشده، پارامتر $G^*/\sin \delta$ با افزودن مقادیر نانورس

جدول ۹. نتایج آزمایش رئولوژی قیر

پیرشده بلندمدت (PAV)			پیرشده کوتاه مدت (RTFO)	قیر پیر نشده		نوع قیر
m-values at -12°C	Stiffness (MPa) at -12°C	$G^* \cdot \sin \delta$ at 25°C	$G^*/\sin \delta$ at 64°C (kPa)	$G^*/\sin \delta$ at 64 °c (kPa)	ویسکوزیته در دمای ۱۳۵ درجه سانتیگراد	
0.309	185	3810	2.2	1.12	2.55	N0
0.310	184	3734	2.88	1.4	2.61	N1
0.313	182	3672	3.74	1.8	2.67	N2
0.319	176	3559	4.21	2.1	2.72	N3
0.32	171	3478	4.9	2.6	2.75	N4
0.322	166	3376	5.76	3.1	2.81	S0
0.325	154	3264	6.2	3.4	2.86	S1
0.331	145	3195	6.56	3.7	2.89	S2
0.337	141	3125	7.24	4.5	2.91	S3
0.341	137	3042	7.69	5.1	2.96	S4



شکل ۳-الف. SEM قیر خالص



شکل ۳-ب. SEM قیر با نانو رس و SBS

نتایج آزمایش⁷ SEM

مقایسه عکس‌های SEM نشان داده شده در شکل ۳ که در مقیاس ۵۰۰ نانومتر است، وجود ذرات سفیدرنگ نانورس را

نشان می‌دهد، همچنین لکه‌های سفید نشان از حضور SBS در قیر را دارد.

نتایج آزمایش^۸ MSCR

نتایج آزمایش MSCR برای قیرهای مختلف در جدول ۱۰ نشان داده شده است. درصد بازگشت کرنش برای قیرهای مختلف در دو سطح کرنش ۱۰۰ و ۳۲۰۰ پاسکال نشان داده شده است. در کل، اضافه نمودن پلیمر، سبب افزایش درصد بازگشت کرنش در قیر خالص می‌گردد. درصد بالاتر بازگشت کرنش نشان دهنده این موضوع می‌باشد که قیر توانایی بازگشت نسبت بیشتری از کرنش خود بعد از بارگذاری را دارد. هرچه درصد بازگشت کرنش بیشتر باشد، قیر توانایی بالاتری جهت مقابله با شیارشدگی را دارد. همانطور که از نتایج پیداست، قیر خالص در مقایسه با قیر پلیمر و نانورس دارای مقدار بازگشت کرنش کمتری در دو

سطح تنش می‌باشد که نشان دهنده مقاومت کمتر در برابر شیارشدگی می‌باشد. قیرهای اصلاح شده با نانورس، دارای درصد بازگشت کرنش کمتری نسبت به قیرهای اصلاح شده با نانورس و پلیمر در دو سطح تنش می‌باشد. این موضوع ناشی از سختی کمتر و رفتار الاستیک کمتر این نوع نمونه می‌باشد. همانطور که نتایج نشان می‌دهد قیر اصلاح شده با ۰.۴ نانورس و ۰.۵٪ پلیمر دارای بیشترین مقدار درصد بازگشت در هر دو سطح تنش را دارد که نشان دهنده این موضوع می‌باشد که قیرهای اصلاح شده با نانورس دارای مقاوم بیشتری در برابر شیارشدگی دارند.

جدول ۱۰. نتایج آزمایش MSCR

Binder	R100	R3200	Jnr100	Jnr3200	Jnr diff
	%	%	kPa-1	kPa-1	%
N0	19.57	9.87	1.86	1.96	5.38
N1	20.67	9.96	1.79	1.83	2.23
N2	23.85	12.82	1.52	1.71	12.50
N3	32.29	16.82	1.19	1.41	18.49
N4	34.66	35.25	0.31	0.51	15.52
S0	35.67	36.46	1.34	1.35	5.61
S1	41.7	38.76	1.16	1.14	5.69
S2	48.9	43.9	1.03	0.89	5.05
S3	53.5	49.1	0.86	0.45	20.13
S4	58.2	55.2	0.26	0.25	5

شیارشدهگی بعد از اعمال بارگذاری می‌باشد. از لحاظ مخلوط آسفالتی، قیرهای دارای مقادیر کمتر (Jnr) و یا مقادیر بیشتر درصد بازگشت کرنش، نشان دهنده نقش کمتر قیر در کرنش غیرقابل بازگشت می‌باشد. از نقطه نظر رئولوژی قیر، مقادیر کمتر (Jnr) ممکن است از مقادیر کمتر کرنش غیرقابل بازگشت در انتهای بارگذاری در یک سطح تنش به دست می‌آید. اگر آنجایی که سطوح تنش در آزمایش MSCR یکسان باشد، می‌توان نتیجه گرفت که کرنش دائمی برای قیرهای اصلاح شده نسبت به قیرهای خالص کمتر می‌باشد. حساسیت قیرها نسبت به تنش‌های اعمالی با استفاده از پارامتر Jnr-diff. به دست می‌آید که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$J_{nr-diff} = \frac{J_{nr@3200Pa} - J_{nr@100Pa}}{J_{nr@3200Pa}} \times 100$$

قیرهایی که نسبت به تغییرات تنش حساس می‌باشند و پتانسیل شیارشدهگی بالایی دارند را اگرچه الزامات درجه عملکردی را ارضاء نمایند، محدود نماید. با توجه به جدول ۱۰ می‌توان دریافت که مقدار پارامتر (Jnr-diff) برای قیر حاوی ۳٪ نانورس و ۵٪ پلیمر بیشترین مقدار می‌باشد. بنابراین این نوع قیر اصلاح شده می‌تواند در زمره قیرهای با حساسیت بالا نسبت به تنش قرار گیرد.

جدول ۱۰ مقادیر مدول غیر قابل بازگشت (Jnr) را در سطوح تنش ۱۰۰ و ۳۲۰۰ پاسکال نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که پارامتر (Jnr) با افزودن نانورس کاهش می‌یابد. بطوریکه قیر حاوی ۴٪ نانورس دارای کمترین مقدار (Jnr) در بین قیرهای اصلاح شده با نانورس به تنهایی می‌باشد. مقادیر کمتر (Jnr) نشان دهنده مقاومت بیشتر مخلوط ساخته شده با آن قیر یا حساسیت کمتر مخلوط نسبت به شیارشدهگی می‌باشد. نتایج مقادیر بهتری را برای افزودنی نانورس و پلیمر نسبت به پلیمر نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، قیر اصلاح شده با نانورس بیشترین مقدار پارامتر (Jnr) را در بین قیرهای اصلاح شده دارا می‌باشد. با توجه به مواردی که در قبل ذکر شد، مقادیر کمتر مدول غیرقابل بازگشت نشان دهنده مقاومت بیشتر قیر در برابر

جدول ۱۰ نتایج درصد اختلاف بین مدول غیرقابل بازگشت را در آزمایش بارگذاری و باربرداری نشان می‌دهد. درصد اختلاف نشان دهنده حساسیت قیر به افزایش در سطح تنش می‌باشد. بنابراین، مقادیر کمتر نشان دهنده حساسیت کمتر مواد به تنش می‌باشد. آیین نامه آشتو مقدار درصد تغییر در مدول غیرقابل بازگشت (Jnr-diff) را به ۷۵٪ محدود کرده است. این معیار می‌تواند استفاده از

۴-۲- آزمایش ریزش قیر

ریزش قیر نشان دهنده صحت کلیه نمونه‌ها در این زمینه بوده و ریزش قیر در تمامی نمونه‌ها در محدوده مجاز (کمتر از ۰٫۳ درصد) می‌باشد. نمونه‌های حاوی قیر پلیمری نسبت

آزمایش ریزش قیر طبق گزارش NCHRP-425 صورت پذیرفت. انجام این آزمایش از الزامات طرح اختلاط مخلوط‌های SMA می‌باشد. نتایج حاصل از انجام آزمایش

به نمونه‌های حاوی الیاف سلولزی دارای ریزش قیر کمتری می‌باشند.

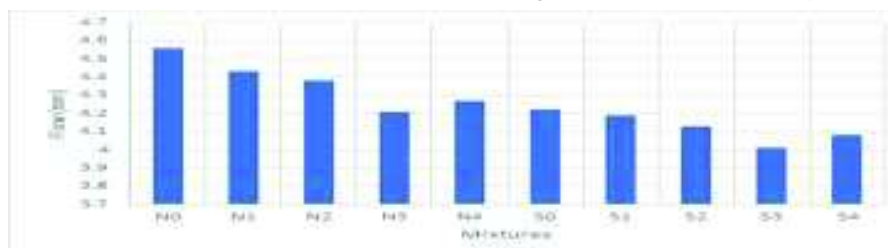
جدول ۱۱. نتایج آزمایش ریزش قیر

Mixtures	N0	N1	N2	N3	N4	S0	S1	S2	S3	S4
Specification	< 0.3 %									
Drain down (%)	0.3	0.05	0.045	0.04	0.036	0.243	0.231	0.225	0.2	0.16

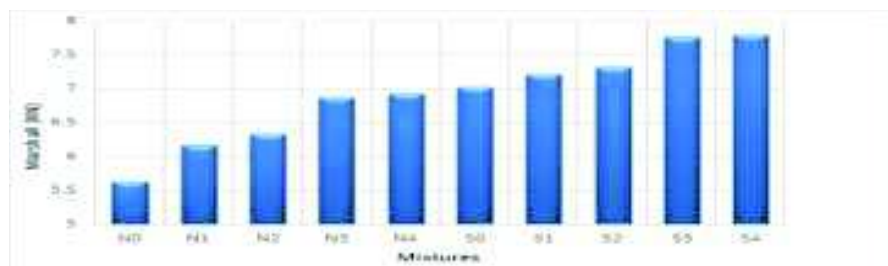
۴-۳- مقاومت مارشال

مخلوط‌های آسفالتی با درصد نانو رس بیشتر می‌شود. در مجموع می‌توان بیان کرد که نمونه‌های حاوی نانو رس انعطاف پذیری بیشتری نسبت به نمونه شاهد دارند. با افزایش درصد نانو رس استحکام مارشال نمونه‌های آسفالتی SMA افزایش پیدا کرده که علت آن احتمالاً افزایش ضخامت قیر در اطراف سنگدانه‌ها می‌باشد.

نتایج حاصل از آزمایش مارشال برای تعیین اثر نوع قیر مورد ارزیابی قرار گرفت و پارامترهای مختلفی از جمله روانی و استقامت مارشال مخلوط آسفالتی بررسی شد. با افزودن نانو رس به قیر روانی ابتدا افزایش و سپس با افزایش درصد نانو رس روانی کاهش پیدا می‌کند. هنگامی که مقدار نانو رس در قیر افزایش پیدا می‌کند، ویسکوزیته و چسبندگی قیر اصلاح شده افزایش پیدا کرده که منجر به کاهش روانی در



شکل ۴. نتایج آزمایش مقاومت مارشال

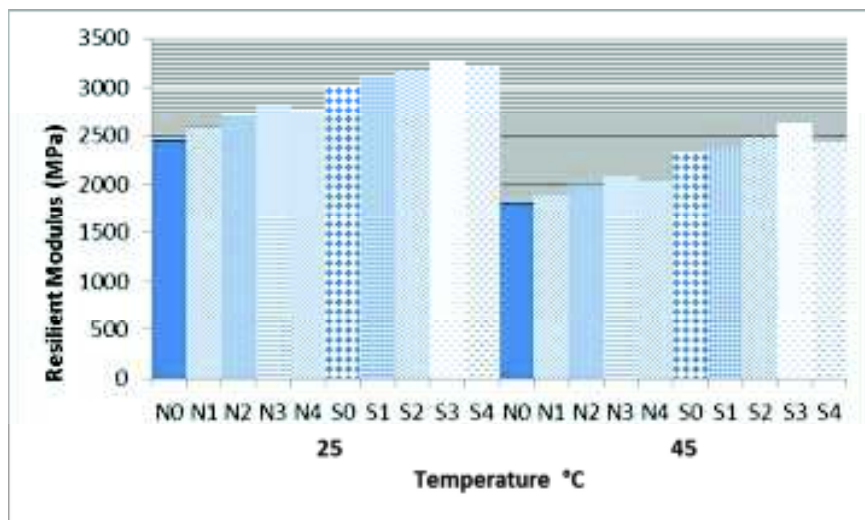


شکل ۵. نتایج آزمایش روانی مارشال

۴-۴- آزمایش مدول برجهندگی

نشان می‌دهد که با افزایش درصد مواد افزودنی، واکنش‌های بین قیر و ماده افزودنی تغییر می‌کند. با افزایش درصد افزودنی فاز پلیمری بیشتر حاکم شده و در درصد بهینه، فاز قیری و پلیمری به یکدیگر قفل و بست می‌شوند و خصوصیات مخلوط را بهبود می‌بخشند.

شکل ۶ نتایج آزمایش مدول برجهندگی نمونه‌ها در دمای ۲۵ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد را در مقادیر مختلف نانو رس نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بطور کلی با افزایش درصد مدول برجهندگی افزایش می‌یابد. واکنش‌های بین قیر و مواد افزودنی در مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده می‌تواند تأثیر زیادی در رفتار مخلوط داشته باشد. بررسی‌ها



شکل ۶. نتایج مدول برجهنگی نمونه های حاوی افزودنی های مختلف

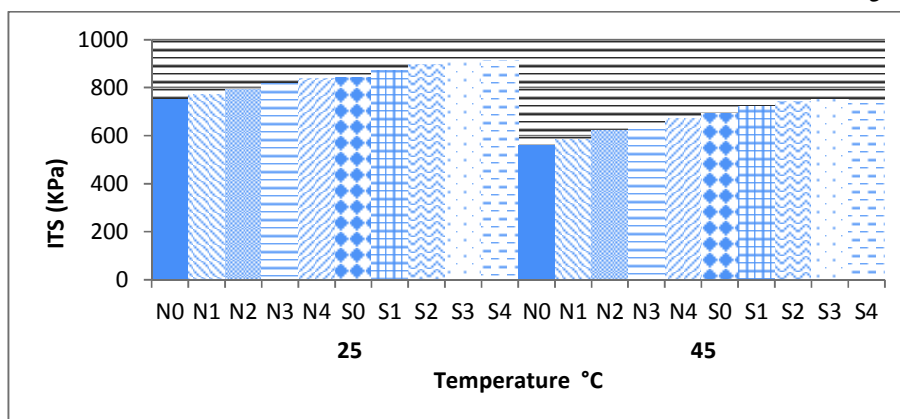
است که در نمونه های SBS دار مقاومت بیشتری را شاهد هستیم و در هر دو سری با افزایش درصد نانو مقاومت کششی غیر مستقیم افزایش یافته اما بهترین نتیجه در نمونه هایی رخ داده که ۵٪ SBS داشته و ۴٪ نانو رس که مقاومت ۷۵۱ کیلو پاسکال را در پی داشته است. این افزایش مقاومت به دلیل داشتن صفحات بزرگ نانو رس می باشد که این افزایش را می توان در اندود شدن مصالح سنگی با قیر دارای نانوکامپوزیت دانست؛ چرا که چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی را افزایش می دهد و مخلوط را مقاوم می کند. با افزایش درصد ماده افزودنی، چسبندگی بین مصالح و قیر افزایش یافته و سبب افزایش نسبت مقاومت کشش غیر مستقیم می شود و کاهش مقاومت پس از آن در درصد ۵ به احتمالاً دلیل قرار گرفتن فاصله ی زیاد بین ذرات قیر می باشد.

افزایش مدول برجهنگی ارتباط مستقیم با ضریب لایه آسفالتی در طرح ضخامت آسفالت دارد و هرچه مدول برجهنگی بیشتر باشد این ضریب بالاتر رفته و ضخامت لایه کاهش می یابد. اما افزایش بیش از حد این مدول سبب سخت شدن لایه آسفالتی شده و آن را شکننده می سازد که احتمال ترک خوردگی در اثر حرارت و خستگی افزایش خواهد یافت. لذا توصیه می شود که حداکثر مدول برجهنگی برای لایه آسفالتی، ۴۵۰۰۰ psi معادل ۳۱۰۰ مگاپاسکال انتخاب گردد.

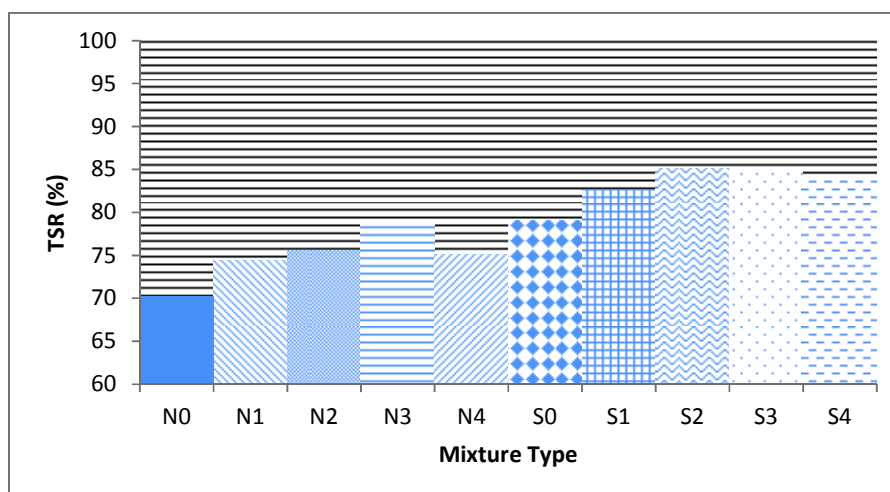
۴-۵- آزمایش کششی غیر مستقیم

۴-۵-۱- مقاومت کششی غیر مستقیم

نتایج آزمایش کشش غیر مستقیم برای درصد های مختلف نانو در شکل ۷ نشان داده شده است. مشاهده شده



شکل ۷. نتایج آزمایش کشش غیر مستقیم



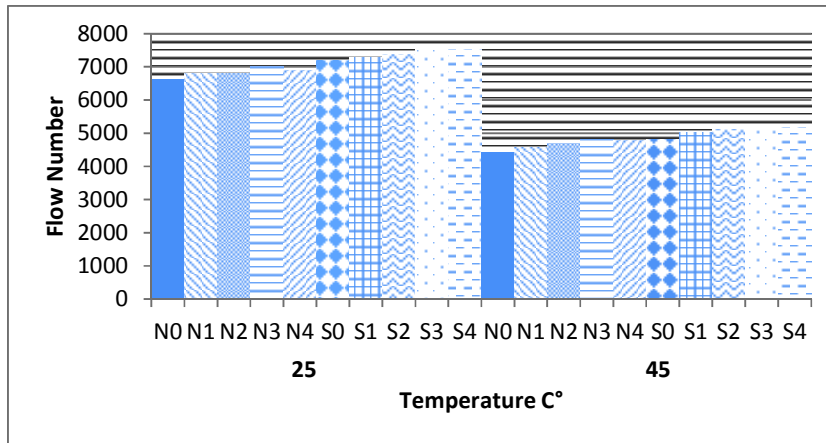
شکل ۸. نسبت مقاومت کششی نمونه‌ها (TSR)

۴-۵-۲- آزمایش حساسیت رطوبتی

آزمایش حساسیت رطوبتی مطابق با استاندارد AASHTO T283 انجام گرفته و نتایج حاصل از آن در نمودار ۸ آمده است. هم چنین نمونه‌های مورد نیاز جهت این آزمایش براساس استاندارد باید درصد هوای 1 ± 6 درصد داشته باشند. لذا در این حالت نمونه‌های حاوی پلیمر با ۳۴ ضربه چکش مارشال و نمونه‌های حاوی الیاف با ۴۲ ضربه مارشال کوبیده شدند. درصد هوای تمامی نمونه‌ها در این حالت ۶،۵٪ لحاظ شد. نکته حائز اهمیت قرار گرفتن کلیه نمونه‌ها در کلیه حالات (درصدهای مختلف خاکستر بادی) در محدوده استاندارد TSR یعنی $70 \leq \text{TSR}$ می باشد. نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی نمونه‌های مختلف نشان می دهد با افزایش درصد نانورس مقاومت کششی نمونه‌ها در حالت خشک و مرطوب، روندی افزایشی را طی می کند. همان طور که از شکل ۸ مشاهده می شود، نسبت مقاومت کششی نمونه‌ها (TSR)، برای نمونه‌هایی که هم SBS داشته و هم نانورس در حد مقادیر مجاز آیین نامه (۸۰ درصد) می باشد ولی برای دیگر نمونه‌ها کمتر از حد مجاز آیین نامه می باشد. این حضور ذرات نانورس و SBS ممکن است ضخامت قیر در اطراف سنگ دانه‌ها را افزایش داده و آب بین مصالح سنگی و قیر نفوذ نکرده و نسبت مقاومت کششی نمونه‌ها افزایش یافته است. بهترین نتیجه برای نمونه SBS دار و ۳٪ نانورس حاصل شده است.

۴-۶- آزمایش خزش دینامیکی

شیارشدهی یکی از خرابی‌های رایج در روسازی‌های آسفالتی می باشد و به تغییر شکل‌های دائمی گفته می شود که بصورت شیار فرورفته در مسیر چرخ وسایل نقلیه به موازات محور طولی راه دیده می شود (Sureyya, Halit, Aksoy, 2007). لذا در این تحقیق شیارشدهی نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. برای بررسی شیارشدهی نمونه‌ها از آزمایش خزش دینامیکی استفاده شد. آزمایش خزش دینامیکی یکی از معیارهای مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر تغییر شکل‌های دائمی می باشد (National Cooperative Highway, 2002). نتایج آزمایش‌های خزش دینامیکی نمونه‌های شاهد و نمونه‌های حاوی افزودنی در شکل ۹ آورده شده است. با توجه به نتایج، عدد روانی (FN) نمونه‌ها با افزایش درصد نانورس به طور قابل توجهی افزایش می یابد بطوری که در ۴٪ نانورس و ۵٪ SBS شاهد بیشترین مقاومت هستیم. با افزایش درصد نانورس عدد روانی (FN) افزایش می یابد اما یکی از دلایل کاهش عدد روانی در بالاترین درصد نانورس این است که زیاد بودن ذرات نانو بین عناصر قیر فاصله ایجاد کرده و بنابراین باعث کاهش مقاومت می شود.

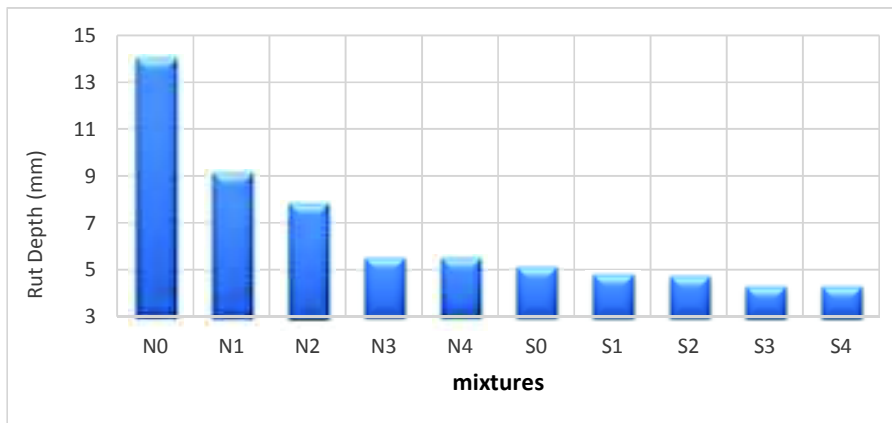


شکل ۹. نتایج آزمایش خزش دینامیکی

۴-۷- آزمایش شیار جای چرخ

به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد بطوری که در ۴٪ نانورس و ۵٪ SBS شاهد بیشترین مقاومت هستیم. با افزایش درصد نانورس عمق شیار کاهش می‌یابد.

نتایج آزمایش‌های شیار جای چرخ نمونه‌های شاهد و نمونه‌های حاوی افزودنی در شکل ۱۰ آورده شده است. با توجه به نتایج، عمق شیار نمونه‌ها با افزایش درصد نانورس



شکل ۱۰. نتایج آزمایش شیار جای چرخ

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج تست مدول برجهندگی، افزودن پلیمر و نانورس به قیر اصلی، مدول برجهندگی مخلوط‌ها را افزایش می‌دهد. عدد روانی (FN) نمونه‌ها با افزایش درصد نانورس به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد بطوری که در ۴٪ نانورس و ۵٪ SBS شاهد بیشترین مقاومت هستیم. با افزایش درصد نانورس عدد روانی (FN) افزایش می‌یابد اما یکی از دلایل کاهش عدد روانی در بالاترین درصد نانورس این است که زیاد بودن ذرات نانو بین عناصر قیر فاصله ایجاد کرده و بنابراین باعث کاهش مقاومت می‌شود.

نتایج آزمون مارشال نشان داد که افزودن پلیمر و نانورس باعث افزایش مقاومت مارشال در مخلوط شاهد شده است. براساس نتایج آزمون کشش غیرمستقیم، جایگزینی فیبر معمولی با پلیمر و نانورس منجر به افزایش مقادیر ITS شد. این می‌تواند به دلیل افزایش چسبندگی و پیوستگی قیر به سنگ دانه‌ها باشد. مخلوط‌های حاوی SBS مقادیر بالاتری نسبت به مخلوط‌های حاوی فیبر سلولز دارند. براساس نتایج تست حساسیت رطوبتی، افزودن نانورس و پلیمر مقاومت رطوبت مخلوط‌ها را افزایش می‌دهد.

pavement construction", construction and building materials.

- Brown, E. R. and Manglorkar, H., (1993), "Evaluation of laboratory properties of SMA mixtures", National Center for Asphalt Technology Auburn University, Research Report, Sponsored by NAPA and the NAPA Education Foundation.

- Brown, E. et al., (1997), "Development of a Mixture Design Procedure for Stone Matrix Asphalt (SMA)", Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 66, pp.1-30.

-Brown, E. R., & Cooley, L. A., (1999), "Designing of SMA for rut resistant pavements, NCHRP Report 425", National Cooperative Highway Research program.

-Epps, J. A., (1994), "Uses of recycled rubber tires in highways (Vol. 198)", Transportation Research Board.

-Grim, R. E., (1959), "Physico-chemical properties of soils: clay mineral", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 85(2), pp.1-18.

-Huang, Y. H., "Pavement Analysis and Design", Prentice HALL, University of Kentucky, USA, 1993.

-Jahromi, S. G., Andalbizade, B., & Vossough, S., (2010), "Engineering properties of nanoclay modified asphalt concrete mixtures", Arabian Journal for Science & Engineering (Springer Science & Business Media BV), pp.35.

-King, G. N., & King, H. W., (1986), "polymer modified asphalts: an overview", Solutions for Pavement Rehabilitation Problems.

-Lewandowski, L. H., (1994), "Polymer modification of paving asphalt binders. Rubber Chemistry and Technology", 67(3), pp.447-480.

-National Cooperative Highway Research Program, (2002), "Simple Performance Test for Superpave Mix Design", Report 465.

Xiao, F., Zhao, W., Gandhi, T., & Amir Khanian, S. N., (2010), "Influence of antistripping additives on moisture susceptibility of warm mix asphalt mixtures", Journal of Materials in Civil Engineering, 22(10), pp.1047-1055.

عمق شیار نمونه ها با افزایش درصد نانورس به طور قابل توجهی کاهش می یابد بطوری که در ۴٪ نانورس و ۵٪ SBS شاهد بیشترین مقاومت هستیم. با افزایش درصد نانورس عمق شیار کاهش می یابد. بهترین عملکرد در مخلوطهای آسفالتی با اسخوابندی سنگدانه ای SMA مربوط به نمونه های حاوی قیر ۵٪ پلیمر SBS و ۳٪ نانو رس می باشد که بیشترین مقاومت را در برابر تغییر شکل ماندگار از خود نشان می دهند.

۶- سپاسگزاری

از پرسنل محترم مرکز تحقیقات قیرو مخلوطهای آسفالتی به دلیل همکاری صمیمانه تشکر و قدردانی می شود.

۷- پی نوشت ها

- 1- Stone Matrix Asphalt
- 2- Styrene-Butadiene-Styrene
- 3- Universal Testing Machine
- 4- Round Per Minute
- 5- Indirect tensile strength
- 6- Tensile Strength Ratio
- 7- Scanning Electrical Microscopy
- 8- Multi Stress Creep Recovery

۸- مراجع

- ایران، وزارت راه و شهرسازی، معاونت امور فنی، دفتر امور فنی و تدوین معیارها، مرکز تحقیقات و آموزش، (۱۳۷۹). "طراحی و ارزیابی آزمایشگاهی مخلوطهای آسفالتی با اسخوابندی سنگدانه های"، نشریه شماره ۲۰۶، چاپ اول، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، مرکز مدارک علمی و انتشارات.

- نصراله تبار آهنگر، ع.، (۱۳۸۵)، "ارزیابی پتانسیل شیارشدگی مخلوطهای آسفالتی با استفاده از تست مقاومت کششی غیر مستقیم"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.

- بهرام نژاد، ب.، (۱۳۷۲)، "امکان اختلاط قیرهای پایه ایران با پلیمرهای خانواده SBS و بررسی خواص فیزیکی- مکانیکی و رئولوژیکی آنها جهت مصارف راهسازی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

- احسان یعقوبی، الف، (۱۳۷۸)، "بررسی تاثیر دانه بندی مصالح سنگی بر مقاومت مخلوط بتن آسفالتی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.

Ameri, M. A. Mansourian, S.S. Ashani and G. Yadollahi, (2010), "technical study on the iranian gilsonite as an additive for modification of asphalt binders used in

Laboratory Evaluation of the Effect of Nano Clay and Polymer on Rheological Behaviour of Binder and Rutting Performance of Stone Matrix Asphalt Mixtures

Ehsan Hassanzadeh Khabbaz, Department of Mechanical Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran.

E-mail: Hasanzadeh.Khabbaz@gmail.com

Received: February 2020 -Accepted: July 2020

ABSTRACT

Permanent deformation or rutting is one of the most important distress modes that affect the life of flexible pavements. This type of distress is often observed on the roads that are situated in tropical regions. The properties of the constituent materials play a significant role in the construction properties of the pavement. The use of porous gradation and high binder grade for proper binding in the structure of mixes is known as the methods for improving the properties of mixtures. One of the mixtures made on this basis is Stone Matrix Asphalt mixtures (SMA). These mixes are a type of hot mixed with the coarse skeleton and the high binder and filler, which plays a key role, with the importance of the type and the tar properties used, as the binder of rock particles and the factor that has to endure the stress of the shear stress between aggregates. On the other hand, due to the high percent of binder and the prevention of binder, the use of additives such as fibers or polymer materials is inevitable. The use of polymeric additives in addition to improving the binder properties, with the increase binder viscosity, also decreases binder drain down. Also, one of the recently applied additives to enhance the binder properties is Nano - clay. The aim of this study is to evaluate the effects of Nano clay as the main additive to binder to improve the binder properties alongside the SBS and fibers, in order to increase the loading resistance of asphalt and to correct its technical properties against the rutting. So, control asphalt mixtures containing of 60-70 binders with 0/4% fiber blended into mixture or modified bitumen mixed by 5 %, along with a montmorillonite additive of 1 %, 2 %, 3 % and 4 % for both pure and polymer bitumen. In this study, the Marshall test, dynamic creep tests and delamination were performed on different samples. The results of these experiments show improved performance of samples containing Nano - nanoparticles with an addition of Nano clay to 3%, which is best achieved performance in polymer modified mixtures.

Keywords: Stone Matrix Asphalt Mixtures, SBS, Nano Clay, Marshall, Creep, Rutting