

بررسی خصوصیات عملکردی مخلوط آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه ای

حاوی فیلر خاکستر ذغال سنگ و خاکستر پوسته برنج

مقاله پژوهشی

بابک فرضی، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی، پردیس، تهران، ایران

علیرضا عاملی*، مربی، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران

رضوان باباگلی، مربی، گروه مهندسی عمران، واحد پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی، پردیس، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Amelii@gmail.com

دریافت: ۹۷/۰۸/۲۷ - پذیرش: ۹۸/۰۲/۰۴

صفحه ۱۰۷-۸۷

چکیده

هدف از این مقاله بررسی تأثیر فیلر خاکستر ذغال سنگ و خاکستر پوسته برنج بر خواص مکانیکی و عملکردی مخلوط آسفالتی گرم با استخوان بندی سنگدانه ای می باشد. در این تحقیق از خاکستر ذغال سنگ و خاکستر پوسته برنج به عنوان جایگزین فیلر بودر سنگ آهک در درصدهای (۰٪، ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪) در مخلوط های آسفالتی با استخوان بندی سنگ دانه ای استفاده شد. همچنین جهت جلوگیری از پدیده ریزش قیر در این مخلوط از الیاف سلولزی و پلیمر SBS استفاده شد. جهت بررسی خصوصیات عملکردی مخلوط آسفالتی آزمایشات مقاومت مارشال، مدول برجهندگی، مقاومت کششی غیرمستقیم، حساسیت رطوبتی، خزش دینامیکی و شیار جای چرخ انجام شد. نتایج نشان داد جایگزینی خاکستر پوسته برنج با فیلر گودر سنگ آهک سبب بهبود خصوصیات عملکردی مخلوط آسفالتی گردیده است. در حالی که استفاده از خاکستر ذغال تنها سبب بهبود حساسیت رطوبتی مخلوط گردیده است و بر روی سایر خصوصیات عملکردی مخلوط اثر منفی داشته است.

واژه های کلیدی: مخلوط آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه ای، خاکستر پوسته برنج، خاکستر ذغال، ضایعات صنعتی

۱- مقدمه

آسفالت گرم سنتی اجرا می شوند که با دانه بندی پیوسته و توپر تولید می شود. دوام ناکافی این نوع آسفالت در تحمل فشارها و کشش های رو به افزایش، متوسط عمر مفید آن را در کشور به کمتر از پنج سال رسانده است که این موضوع منجر به اختصااص اعتبارات و بودجه های هنگفت به این صنعت گردیده و هر ساله باعث هدر رفتن سرمایه های زیاد در کشور می شود. لذا با علم بر حجم بالا و روزافزون وسایل نقلیه از یک سو و عمر کوتاه و خرابی های متعدد رویه های آسفالتی از سوی دیگر، نیاز به استفاده از لایه های آسفالتی با دوام بیشتر امری ضروری به نظر می رسد. در این مسیر، استفاده از آسفالت ماستیک درشت دانه¹ SMA با

امروزه با افزایش تعداد بارهای محوری راه ها و بالا رفتن فشار ناشی از چرخ وسایل نقلیه، روسازی های آسفالتی در معرض بارگذاری بیشتر و در نتیجه تنش های کششی و فشاری زیادی قرار می گیرند که این امر منجر به خرابی زودرس رویه آسفالتی راه ها می گردد. خرابی هایی چون خستگی و شیار افتادگی که ناشی از بارهای ترافیکی زیاد بوده و موج زدگی و نا همواری هایی که در اثر ترمزهای شدید وسایل نقلیه روی می دهند، همچنان یکی از معضلات اصلی روسازی های انعطاف پذیر آسفالتی به شمار می روند و همواره نیز در حال افزایش هستند. در حال حاضر، روکش های آسفالتی جاده ها و معابر کشور با استفاده از مخلوط

(Transportation, 1998) به همین دلیل ریزش قیر - جدا شدن ملات قیری از مخلوط هنگام حمل در مخلوطهای SMA را باید بزرگترین نقطه ضعف این گونه مخلوطها دانست [Asi, 2006]. الیاف به منظور مسلح سازی این مخلوطهای آسفالتی، افزایش مقاومت کششی، عمر خستگی و نیز برای تثبیت قیر در این مخلوطها استفاده میشود. الیاف معدنی و الیاف سلولزی، متعارف ترین نوع الیاف مورد استفاده در مخلوطهای SMA است و استفاده گسترده تری دارد و برخی از این الیاف بسته به منبع و روش تولیدشان نسبتاً گران هستند. [Putman and Amirkhanian, 2004]. یک دلیل برای استفاده از پلیمر در آسفالت SMA، حداقل کردن میزان ریزش قیر در زمان اختلاط، حمل و نقل و اجرای آسفالت می باشد. هدف دیگر، افزایش سختی قیر در دمای بالا و یا بهبود برخی خواص قیر در دماهای پایین می باشد. پلیمرها معمولاً در بازه ۳ تا ۸ درصدی وزنی قیر به مخلوط اضافه می شوند. در شرایط حاد (آمدو شد زیاد) اصلاح کننده پلیمر و الیاف همزمان به کار می روند. خاکستر برنج (RHA^2) محصول جانبی حاصل از احتراق برنج است که برای تامین سوخت کارخانه های آسیاب برنج مورد استفاده قرار می گیرد. این مساله منجر به نگرانی های متعددی از جمله مشکلات زیست محیطی و اقتصادی می شود. در حالی که پوسته برنج از تولید برنج تولید می شود که در ایران بسیار شایع است. پوسته برنج قبل از اینکه فروخته شود و مصرف شود، در فرآیند کشاورزی برداشته می شود. این شرکت ۲۰٪ از ۵۰۰ میلیون تن برنج تولید شده در جهان را تشکیل می دهد. سالها از دست اندرکاران صنعت حجم عظیمی از زغال سنگ (CWA^3) را در محل های دفن زباله وسیع ذخیره می کنند که باعث گرد و غبار می شوند و منجر به آلودگی آب و خاک می شوند. سوزاندن زغال سنگ حجم زیادی CO_2 ، آلاینده ها مانند CO ، دوده، ذرات غبار رادیواکتیو و NOX را تولید می کند. بنابراین باعث نگرانی های زیست محیطی و اقتصادی می شود و توجه مردم را به خود جلب می کند. یک منطقه جنگلی در شمال ایران وجود دارد که در آن یک معدن زغال سنگ وجود دارد. برای سالها یک زباله زغال سنگ در آنجا ذخیره شد و یک منطقه وسیع با این مواد اشغال شد. مقدار زغال سنگ که در آنجا ذخیره می شود، ۵۵۷ میلیون تن

مشخصات عملکردی فوق العاده و جایگزین نمودن آن با مخلوط آسفالتی گرم سنتی در کلیه محورهای بزرگراهی و معابر پر تردد کشور ایران، راهکاری مناسب و مقرون به صرفه می باشد. اکنون در برخی از کشورهای اروپایی، ایالات متحده آمریکا و کانادا برای تأمین برخی از انتظارات خاص روسازی، نظیر مقاومت در مقابل شیارافتادگی جای چرخ، جلوگیری از گسترش ترکهای انعکاسی و تحمل بارمحوری سنگین از مخلوطهای آسفالتی با استخوانبندی سنگدانه های (SMA) استفاده شده است (نشریه ۲۰۶، ۱۳۷۹). SMA یک مخلوط با دانه بندی میانه، شامل مقدار زیادی مصالح درشتدانه برای پیشینه کردن تماس سنگدانه به سنگدانه ۱ و ایجاد یک شبکه کارا برای توزیع بار است که ذرات مصالح درشتدانه به وسیله یک ملات غنی از فیلر، الیاف و یا پلیمر با لایه نسبتاً ضخیم قیر به یکدیگر متصل شده اند. (Georgia Department of Transportation, 2002) مخلوطهای SMA به وسیله ساختار سنگدانه ای آن از دیگر مخلوطها متمایز می شود. این مخلوط درصد بالایی از مصالح درشت دانه را که با یکدیگر تماس دارند در خود جای میدهد. این استخوان بندی سنگدانه ای در برابر بارهای سنگین توسط پخش و انتقال آنها به لایه های زیرین روسازی استقامت میکند، و اگر لایه های زیرین به اندازه کافی قوی باشند، مخلوطهای SMA در برابر بارهای سنگین تر به طور مؤثرتری مقاومت خواهد کرد. استخوان بندی درشتدانه با ایجاد تماس سنگدانه به سنگدانه به مخلوط استحکام و مقاومت می بخشد و مقدار ملات قیری زیاد آن باعث افزایش دوام مخلوط می شود (Asi, 2006, Pierce, 2000, Brown and Manglokar, 1993). از دیگر ویژگیهای این مخلوطها، جلوگیری از لغزنده بودن سطح راه و عدم ایجاد ترکهای ناشی از خستگی است (Asi, 2006). مخلوطهای SMA بکار رفته در رویه، ترکهای انعکاسی کمتری را که ناشی از ترک خوردگی رویه های زیرین روسازی است به علت انعطاف پذیری ملات قیری آن از خود نشان می دهد (Troutbeck and Kennedy 2005). به علت دانه بندی میان تهی و مقدار فیلر زیاد، میزان قیر این مخلوطها در مقایسه با آسفالت های متعارف بیشتر است (State of Ohio Department of

برآورد می‌شود (Arabani, 2019) بنابراین بیش از ۲ میلیون تن پسماند این معدن در بیش از ۲ هکتار از زمین‌های مجاور بدون ملاحظات زیست محیطی ذخیره شده است. با توجه به این که زمین‌های کشاورزی شالیزاری زیادی در ایران به ویژه در شمال ایران وجود دارد، تولید برنج در این منطقه بسیار بالا است و همچنین سوزاندن پوسته برنج منجر به تولید مقدار زیادی خاکستر پوسته برنج می‌شود. اگرچه خاکستر پوسته برنج به طور گسترده در بسیاری از زمینه‌ها مانند ساخت و ساز بتن کاربرد دارد، استفاده از خاکستر پوسته برنج در مخلوط‌های آسفالت هنوز در مراحل اولیه است. همچنین مقدار زیادی خاکستر ضایعات زغال سنگ در این منطقه ذخیره می‌شود و باعث نگرانی‌های زیست محیطی بسیاری می‌شود. بسیاری از جنبه‌های استفاده از این پرکننده در مخلوط‌های آسفالت مطالعه نشده است. علی و همکاران (Ali et al, 1996) اثر خاکستر بادی بر خواص مکانیکی مخلوط‌های بتن آسفالتی را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که خاکستر بادی تاثیر زیادی بر عمق شیار و شاخص وضعیت روسازی مخلوط‌های بتن آسفالتی ندارد، اما میزان ترک خوردگی سطح روسازی را افزایش می‌دهد. چرچیل و همکاران (Churchill, Amirkhanian, 1999) اثر خاکستر بادی و خاکستر کف را به عنوان مواد جایگزین برای جایگزینی سنگ دانه‌های خوب در مخلوط آسفالت بررسی کردند و دریافتند که هر دو خاکستر بادی و خاکستر پایین اثرات مضر و زیان کمتری بر روی مخلوط‌های آسفالتی دارند، اما می‌تواند الزامات روسازی را در مقادیر مناسب برآورده کند. لاو و همکاران (et al, 2006 lav) خواص مواد پایه روسازی را که حاوی مقدار بالای خاکستر بادی کلاس F ثابت شده توسط سیمان بود، مطالعه کردند. Celik (Celikli, 2008) امکان‌پذیری خاکستر بادی را برای جایگزینی سنگ دانه‌های ریز با مقادیر کم در بتون مخلوط آسفالتی گرم مورد بررسی قرار دادند و عملکرد مارشال آسفالت را مورد بررسی قرار دادند. هوانگ و همکاران (Huang et al, 2010) از پنج پرکننده سیمانی (از جمله خاکستر بادی) برای بهبود مقاومت به آب مخلوط‌های آسفالتی گرم مخلوط استفاده کرد و دریافتند که فیلرهای سیمانی از جمله خاکستر بادی می‌توانند در کاهش حساسیت مخلوط‌های آسفالتی موثر باشند. شارما و همکاران (Sharma

et al, 2010) اثر خاکسترهای بادی مختلف بر عملکرد مخلوط‌های آسفالت را بررسی کردند و اعلام کردند که خاکسترهای بادی برای استفاده در مخلوط‌های آسفالتی مناسب هستند و می‌توانند عملکرد بهتری نسبت به پرکننده معمولی در مقدار ۷ درصد داشته باشند. اسنوبی و همکاران (Osinubi et al, 2011) عملکرد روسازی‌های آسفالتی اصلاح شده (RAP^۱) را با استفاده از خاکستر زغال شده و نسبت اجزا آن در خصوصیات تراکمی و فشردگی در ساخت جاده مورد مطالعه قرار دادند. شیواپراساد و همکاران (Shivaprasad et al, 2011) رطوبت و حساسیت شیارافتادگی مخلوط‌های آسفالتی گرم با حجم کم (HMA) و مخلوط‌های آسفالتی گرم با مخلوط گرم (WMA^۵) را مقایسه کردند که هر دو شامل دانه‌های مرطوب، خاکستر زغال و سفال‌های سقف دار هستند. سوبولوو و همکاران (sobolev et al, 2014) اثر خاکستر بادی بر روی خواص رئولوژیکی و گرانشی دینامیک را بررسی کردند و دریافتند که افزودن خاکستر بادی در مخلوط‌های آسفالت می‌تواند عملکرد مکانیکی آن را بهبود بخشد. اگر چه تحقیقات زیادی در مورد استفاده از خاکستر پوسته برنج در بسیاری از مناطق کاری انجام شد، اما تحقیقات کمی در نوشته‌ها در مورد استفاده از خاکستر پوسته برنج در بتن آسفالتی وجود دارد. سارگین و همکاران (Sargin et al, 2013) قابلیت استفاده از خاکستر پوسته برنج را به عنوان پرکننده معدنی در HMA^۶s مورد بررسی قرار داده‌اند. برای این منظور، چهار نمونه بتنی با استفاده از سنگ آهک در نسبت‌های مختلف (۴٪، ۵٪، ۶٪ و ۷٪) به عنوان پرکننده معدنی تولید شدند. مقدار بهینه قیر و مقدار پایداری مارشال با آزمایش برای نمونه‌ها تعیین شد. انتخاب مجموعه آسفالت حاوی ۵٪ پرکننده که بالاترین پایداری را به خود اختصاص داده است. خاکستر پوسته برنج به میزان ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ تغییر کرد. پس از آن آزمایش خاکستر پوسته برنج بر روی نمونه‌های تولیدی انجام شد و نتایج ارزیابی شدند. در نتیجه، به خصوص در مناطقی که در آن زباله خاکستر پوسته برنج گسترده وجود دارد، می‌توان از آن به جای پرکننده معدنی در مخلوط بتن آسفالتی به عنوان پرکننده معدنی استفاده کرد. مطالعه مقایسه‌ای بین گرد و غبار سنگ مرمر (که مواد زائد صنعتی است) و گرد و غبار

گرفت. همچنین بر اساس استاندارد AASHTO-T305 آزمایش ریزش قیر جهت سنجش پتانسیل ریزش قیر مخلوطهای مختلف و نیز در نهایت انجام آزمایشهای مارشال، مدول برجهندگی، کشش غیرمستقیم، حساسیت رطوبتی و تغییر شکل های دائمی بر روی نمونه های شاهد و نمونه های حاوی افزودنی انجام شد.

۳-۱- 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 می گذارد و باید با مقادیر آیین نامه ای ارائه شده برای مخلوطهای SMA مطابقت داشته باشد. در این تحقیق ویژگیهای ارائه شده گزارش NCHRP-No 425 برای مخلوطهای SMA، برای تعیین دانه بندی، انتخاب مصالح سنگی و طرح مخلوط مبنا 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 نمونه ها 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.

سنگ آهک به عنوان پرکننده توسط و ترزی و کاراشیان انجام شده است (Terzi, Karasahin, 2007). آنها نتیجه گرفتند که آزمون های تغییر شکل پلاستیک و مارشال قابل مقایسه با دو مخلوط بتن آسفالتی هستند. از طرف دیگر، شارما و همکاران (sharma et al, 2010) گزارش داده اند که خاکستر بادی با اکسید کلسیم بالا برای کنترل خواص مقاومتی مخلوط های بتن آسفالتی موثر است. همچنین، آنها بیان کردند که تا حدود ۷ درصد از خاکستر بادی را می توان به عنوان پر کننده معدنی در HMA ترکیب کرد. علاوه بر این، چاندرنا و همکاران (Chandra et al, 2013) کاربرد احتمالی سه پسماند صنعتی یعنی گرانیت و گرد سنگ مرمر را بررسی می کنند. صنعت سنگ و خاکستر بادی از نیروگاه های حرارتی به عنوان پرکننده در HMA و مقایسه نتایج با مخلوط های دیگر که با آهک هیدراته و گرد و غبار سیمان معمولی از quartzite در هند تهیه شده بودند، مقایسه شد. آنها به این نتیجه رسیدند که گرد و غبار سنگ مرمر موثرترین پرکننده هاست، به طوری که HMA با گرد و غبار مرمر کم ترین مقدار قیر بهینه را دارند.

۳-۲ روش تحقیق

در این پژوهش تأثیر درصد مختلف خاکستر ذغال سنگ و خاکستر پوسته برنج به عنوان فیلر بر عملکرد مخلوط آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه ای مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق جهت جلوگیری از پدیده ریزش قیر از الیاف سلولزی و پلیمر SBS⁷ استفاده گردید. در این تحقیق طرح مارشال برای تعیین میزان قیر بهینه براساس گزارش NCHRP-No 425 برای مخلوطهای SMA صورت

جدول ۱. خصوصیات مصالح سنگی مورد استفاده

| واحد | مقدار | استاندارد | آزمایش |
|----------|-------|-------------|-----------------------|
| % | ۲۵.۶ | AASHTO T۹۶ | سایش لس آنجلس |
| % | ۲.۱ | AASHTO T۸۵ | جذب آب (درشت دانه) |
| % | ۳.۹ | AASHTO T۸۴ | جذب آب (ریزدانه) |
| g/cm^3 | ۲.۶۵۹ | AASHTO T۸۵ | وزن مخصوص (درشت دانه) |
| g/cm^3 | ۲.۶۲۳ | AASHTO T۸۴ | وزن مخصوص (ریزدانه) |
| % | ۱۰۰ | ASTM D-۵۸۲۱ | درصد شکستگی در یک وجه |

| | | | |
|-----------------------|-------------|----|---|
| درصد شکستگی در دو وجه | ASTM D-۵۸۲۱ | ۹۵ | % |
|-----------------------|-------------|----|---|

جدول ۲. مشخصات دانه بندی بکاررفته در طرح مخلوط SMA

| ۹.۵ mm | | اندازه الک (میلی متر) |
|---------|----------|-----------------------|
| حد بالا | حد پایین | |
| - | - | 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 |

۲-۲-۲- الیاف سلولزی TOPCEL

در این تحقیق برای ساخت نمونه ها از الیاف سلولزی در برخی نمونه ها 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 گزارش NCHRP 425 در نظر گرفته شد. مشخصات الیاف استفاده شده به صورت خلاصه در جدول ۴ آورده شده است.

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 درشتدانه 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).

جدول ۳. مشخصات فیزیکی قیر

| نتیجه آزمایش | استاندارد | نوع آزمایش |
|--------------------------|-----------|---------------------------|
| ۴۷ درجه سانتیگراد | ASTM D36 | نقطه نرمی |
| ۶۷ دسی میلیمتر | ASTM D5 | درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه |
| ۳۰۴ درجه سانتیگراد | ASTM D92 | درجه اشتعال |
| بیش از ۱۰۰ سانتیمتر | ASTM D113 | شکل پذیری در دمای ۲۵ |
| ۱/۰۴۵ gr/cm ³ | ASTM D70 | چگالی |
| ۰/۰۵ درصد | ASTM D6 | افت حرارتی |
| ۹۹/۵ درصد | ASTM D4 | قابلیت حل |

جدول ۴. مشخصات الیاف سلولزی

| مشخصات | مقدار | واحد |
|-------------|--------------|---------------|
| میزان فیبر | 95 ± 3 | % |
| 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

کوپلیمر استایرن - بوتادین - استایرن یک کوپلیمر سه 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. (زیاری و گلی، ۱۳۸۶). از پلیمر SBS به عنوان یکی از پرکاربردترین مواد افزودنی قیر استفاده می شود. مشخصات این ماده مطابق با جدول (۵)

در این تحقیق از به مقدار ۰,۳٪ 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

است. در ضمن پلیمر مورد نظر دارای ساختار خطی می باشد.

جدول ۵. مشخصات پلیمر

| مشخصات | استاندارد آزمایش | واحد | مقدار | محدوده مجاز |
|-----------------------------------|------------------|---------|-------|-------------|
| وزن مخصوص در ۲۳ درجه سانتی گراد | ASTM D ۷۹۲ | g/l | 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 سانتی گراد | ASTM D ۱۲۳۸ | g/10min | ۰.۳ | ۱۲ |
| سختی | ASTM D ۲۲۴۰ | - | ۷۵ | <۱ |

۲-۴- خاکستر پوسته برنج

پوسته برنج از یک کارخانه تولید برنج محلی از استان مازندران بخش شمالی ایران جمع‌آوری شد. شکل ۲، پوسته برنج و خاکستر پوسته برنج مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد. خاکستر پوسته برنج مورد استفاده برای این تحقیق توسط سوزاندن برنج در ۶۵۰ درجه سانتیگراد در کوره به مدت ۲ ساعت تولید شد. خاکستر در یک آسیاب توپی برای ۱۵ دقیقه ساخته شد و سپس از میان

اندازه الک ۰,۰۷۵ میلی‌متر عبور کرد. گزارش شده است که شرایط احتراق بر روی سطح خاص خاکستر برنج تاثیر می‌گذارد. بنابراین تولید بیش‌ترین واکنش‌پذیری خاکستر به دما و محیط بستگی دارد. بیش‌ترین مقدار واکنش‌پذیری با سوزاندن پوسته برنج در دمای حدود ۵۰۰ - ۷۰۰ درجه سانتی گراد بدست می‌آید. (Arabani, 2019)



شکل ۲. پوسته برنج و خاکستر پوسته برنج

۲-۵- خاکستر ضایعاتی دغال سنگ

براساس نتایج مطالعات قبلی، CWA با منفجر کردن دسته‌ای از ضایعات زغال‌سنگ خام (CW) در ۷۵۰ درجه سانتی گراد به مدت ۵ ساعت بدست آمد (Modarres و Ayar, ۲۰۱۴). این CW از محل دفن زباله یک کارخانه

زغال‌سنگ واقع در شمال ایران به دست آمد. در این کارخانه زغال شویی، زغال‌سنگ یا با استفاده از روش شناورسازی فرآوری می‌شود. مواد زائد مورد استفاده در این تحقیق، محصول فرعی روش شناورسازی است که ضایعات درشت

دانه تر نسبت به شناورسازی تولید می‌کند.

استفاده از الیاف نیز انجام گرفته و درصد قیر بهینه در این حالت برابر ۶/۹٪ انتخاب شد. در این تحقیق از خاکستر پوسته برنج و خاکستر ذغال سنگ به عنوان جایگزین فیلر مرسوم پودر سنگ آهک استفاده شد. برای هر دو نوع فیلر از ۵ درصد مختلف (۰٪، ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪) به عنوان فیلر استفاده می‌شود. به طور مثال، نمونه ۲۵٪ یعنی به میزان ۲۵٪ از فیلر پودر سنگ با فیلر خاکستر ذغال سنگ یا خاکستر پوسته برنج جایگزین شده و ۷۵٪ آن از نوع فیلر پتر سنگ می‌باشد. 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.

۲-۶- طرح اختلاط

در این پژوهش پس از انتخاب دانه بندی مطلوب و برای تهیه درصد قیر بهینه، نمونه هایی 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٪، ۶/۵٪ و ۷/۵٪ و بدون وجود الیاف و طبق دانه بندی 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



شکل ۳. ضایعات ذغال سنگ

روش کار آزمایش

آزمایش ریزش قیر

پتانسیل ریزش قیر یا همان جدا شدن ملات قیری از مخلوط های 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 مخلوط های آسفالتی که شامل درصد بالایی از مصالح درشت دانه می‌باشند همانند مخلوط آسفالتی متخلخل و هم چنین مخلوط های آسفالتی SMA

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 (Asi, ۲۰۰۶). 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

به همراه صفحه زیر آن از اون خارج می شوند. وزن صفحه زیر سبد که شامل مواد ریخته شده نیز می باشد (D)، اندازه گیری شده و با وزن آن قبل از انجام آزمایش (B) مقایسه می شود. اختلاف بین این دو مقدار، وزن مواد خارج شده از نمونه را نشان می دهد. محاسبات لازم در این بخش به صورت زیر می باشد. نمایی از سبد مخصوص آزمایش ریزش قیر در شکل (۴) نمایش داده می شود:

انجام می پذیرد. نمونه مورد آزمایش باید در آزمایشگاه ساخته شود. نمونه در یک سبد سیمی که روی یک صفحه قرار دارد ریخته می شود. (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 توزین شده و داخل اون که از قبل دمای آن تنظیم شده است قرار داده می شود. پس از گذشت حدود یک ساعت، سبد سیمی

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



شکل ۴: سبد استفاده شده برای انجام آزمایش ریزش قیر

۳-۲- آزمایش مقاومت مارشال

به منظور انجام آزمایش مقاومت مارشال و ارائه نتایج حاصله، نمونه های ساخته شده به مدت ۳۰ الی ۴۰ دقیقه در حمام آب گرم مجهز به ترموستات با دمای ۶۰ درجه سانتی گراد قرار داده می شوند. باید دقت کرد که ترتیب قرار دادن نمونه ها در آب به نحوی باشد که بتوان همه ی نمونه ها 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. نمونه ها داخل فکین قرار داده شده و مقادیر استقامت و وارفتگی هریک اندازه گیری می شوند [۵۷]. همانطور که در فصل دوم نیز ذکر گردید، آزمایش مارشال نمی تواند 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^۸ یک نمونه استوانه ای به صورت قطری بارگذاری می شود. آزمایش کشش غیر مستقیم برای تعیین مقاومت کششی مخلوط های آسفالتی و پیش بینی ظهور ترک ها در مخلوط آسفالتی استفاده می شود. همچنین می توان از این آزمایش برای ارزیابی عمر خستگی نیز استفاده کرد. آزمایش کششی غیر مستقیم بر 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 نمونه ها با استفاده از معادله زیر تعیین شد:

$$ITS = (2P_{max}) / (\pi Dt) \quad (۲)$$

بیشتر مستعد ترک خوردگی حرارتی می باشند. ابتدا نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت در محفظه دستگاه در دمای ۲۵ سانتی-گراد 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 می گردد:

$$M_r = \frac{p(\rho + 0.2734)}{\delta t} \quad (3)$$

Mr = مدول برجهنگی (مگا پاسکال)

P = بار تکراری (نیوتن)

v = نسبت پواسون

δ = ضخامت نمونه (میلی متر)

t = تغییر شکل افقی برگشت پذیر (میلی متر)

جدول ۷ می باشد.

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

جدول ۶. تنظیمات دستگاه جهت انجام آزمایش مدول برجهنگی

| مقدار | پارامتر |
|------------|--------------------------|
| شبه سینوسی | شکل بارگذاری |
| ۱۰۰ | زمان بارگذاری (ms) |
| ۱۰۰۰ | زمان تکرار بارگذاری (ms) |
| ۲۵ | تعداد پالس پیش بارگذاری |
| ۵ | تعداد پالس آزمایش |
| ۲۵ | دمای انجام آزمایش °C |
| ۱۰۰۰ | بار اعمالی (N) |
| ۰,۳۵ | نسبت پواسون |

۳-۵-آزمایش حساسیت رطوبتی

انجام می گیرد. نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم^۹ نمونه ها

این آزمایش براساس استاندارد AASHTO-T283

استاندارد [AASHTO T - ۳۲۴] آزمون شیار جای چرخ در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد برای ارزیابی عملکرد شیارافتادگی نمونه ها انجام شد. به منظور دستیابی به کنترل دما، از محفظه دستگاه استفاده شد. سه نمونه آزمایشی برای هر نوع نمونه ساخته شد.

بر طبق این استاندارد در شرایط اشباع و غیر اشباع باید بیش از ۰/۷۰ باشد. برای اشباع شدن، نمونه ها 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^{۱۰} 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. 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.

۴- تحلیل نتایج آزمایشات

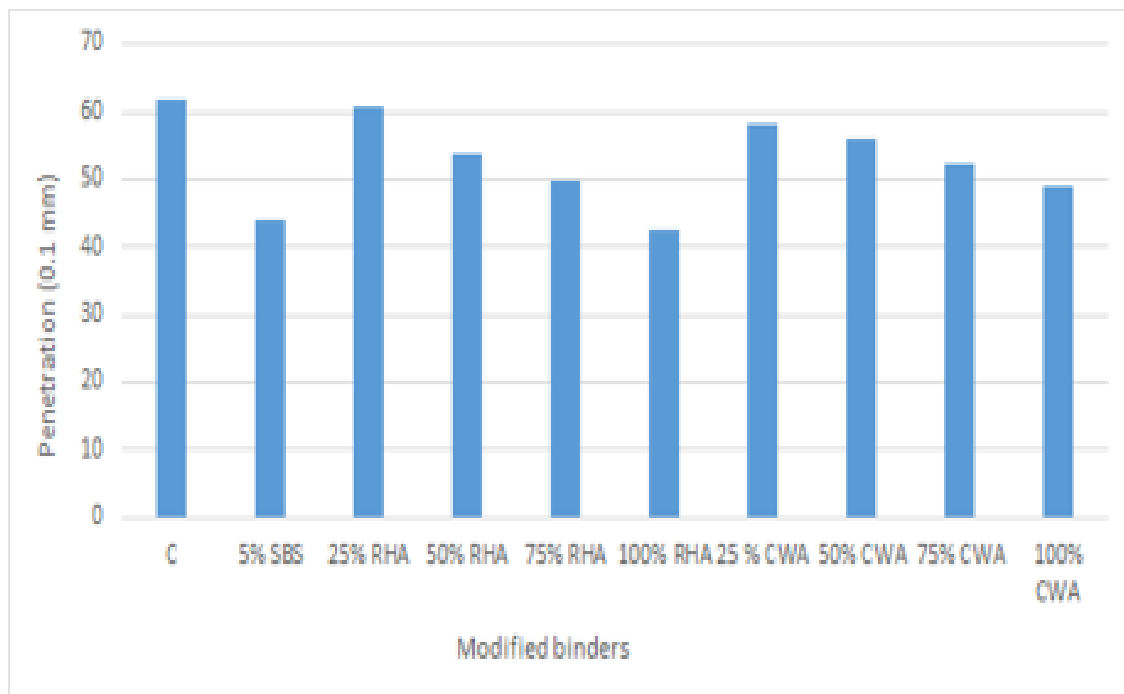
۴-۱- نتایج آزمایشات قیر

نتایج درجه نفوذ، نقطه نرمی و آزمایش شکل‌پذیری قیر خالص و اصلاح‌شده در اشکال ۵ الی ۸ نشان‌داده شده‌است. همانطور که در شکل ۵ و ۶ مشاهده شد، افزودن RHA و CWA به قیر اصلی منجر به افزایش خواص رئولوژیکی قیر شد. با توجه به نتایج، درجه نفوذ قیر اصلاح‌شده کاهش یافت، در حالی که نقطه نرمی قیر افزایش یافت. ممکن است به خاطر این واقعیت باشد که CWA چگالی پایین و حجم بیشتری نسبت به پرکننده سنگ آهک دارد و منجر به کاهش نفوذ و افزایش نقطه نرمی می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت که افزودن مواد افزودنی، باعث استحکام محکم‌تر و محکم‌تر شدن مخلوط‌های آسفالت شده و مقاومت مخلوط‌های آسفالتی نسبت به شیارافتادگی، بهبود می‌دهد. نتایج نشان داد که نقطه نرمی و ویسکوزیته روند مشابهی را دارند. در واقع این دو پارامتر وابسته به یکدیگر هستند به طوری که با نقطه نرمی بالاتر، گرانروی بیشتر است. همانطور که در شکل ۷ نشان‌داده شده‌است، نتایج شکل‌پذیری قیر اصلاح‌شده کم‌تر از قیر خالص است. نتایج شاخص نفوذ قیر اصلاح‌شده در شکل ۸ نشان داد که با اضافه کردن RHA و CWA مقادیر شاخص نفوذ افزایش یافت. همچنین با افزودن مواد افزودنی، مقدار شاخص نفوذ نیز افزایش می‌یابد. بنابراین، با افزایش درصد RHA و CWA، حساسیت دمایی قیر کاهش یافت. قیر با شاخص نفوذ بالاتر، حساسیت دمایی کمتری را به دست می‌دهد که منجر به بهبود مقاومت شیارافتادگی و کاهش در ترک‌خوردگی دمای پایین می‌شود [۳۰]. می‌توان نتیجه گرفت که اصلاح‌کننده‌های RHA و CWA به بهبود حساسیت دمایی، عملکرد شیارشدگی و ترک‌خوردگی دمای

۳-۷- شیار جای چرخ

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 جمعی بعد از سیکل‌های پیشنهادی به عنوان معیاری از پتانسیل شیارافتادگی، گزارش شده است. تست ردیابی 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

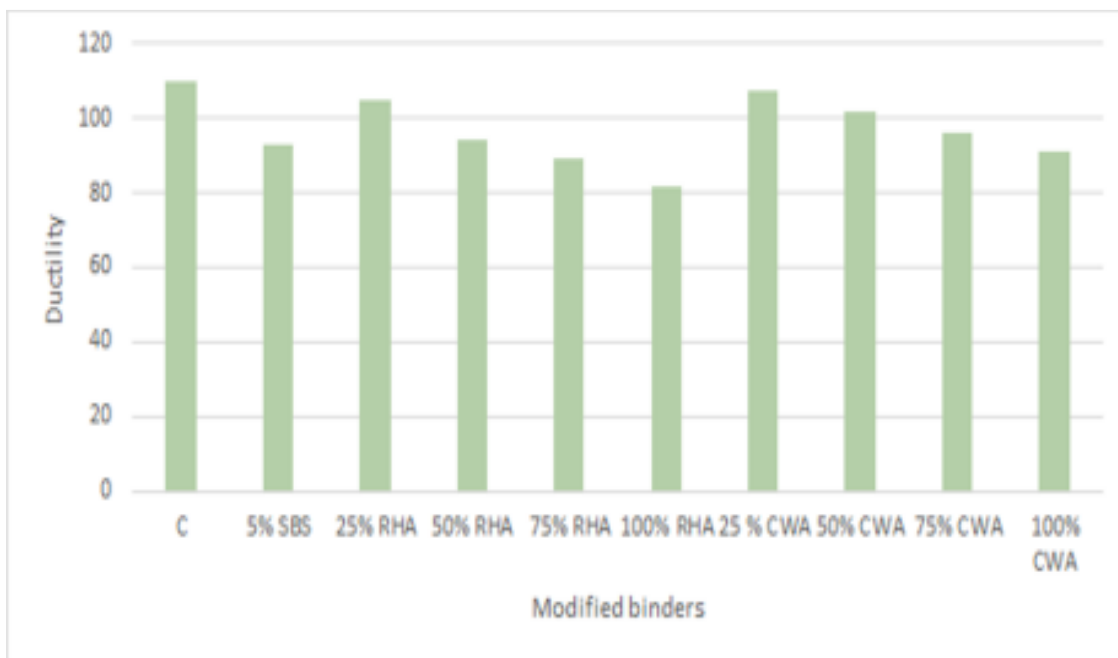
پایین قیر کمک می‌کنند.



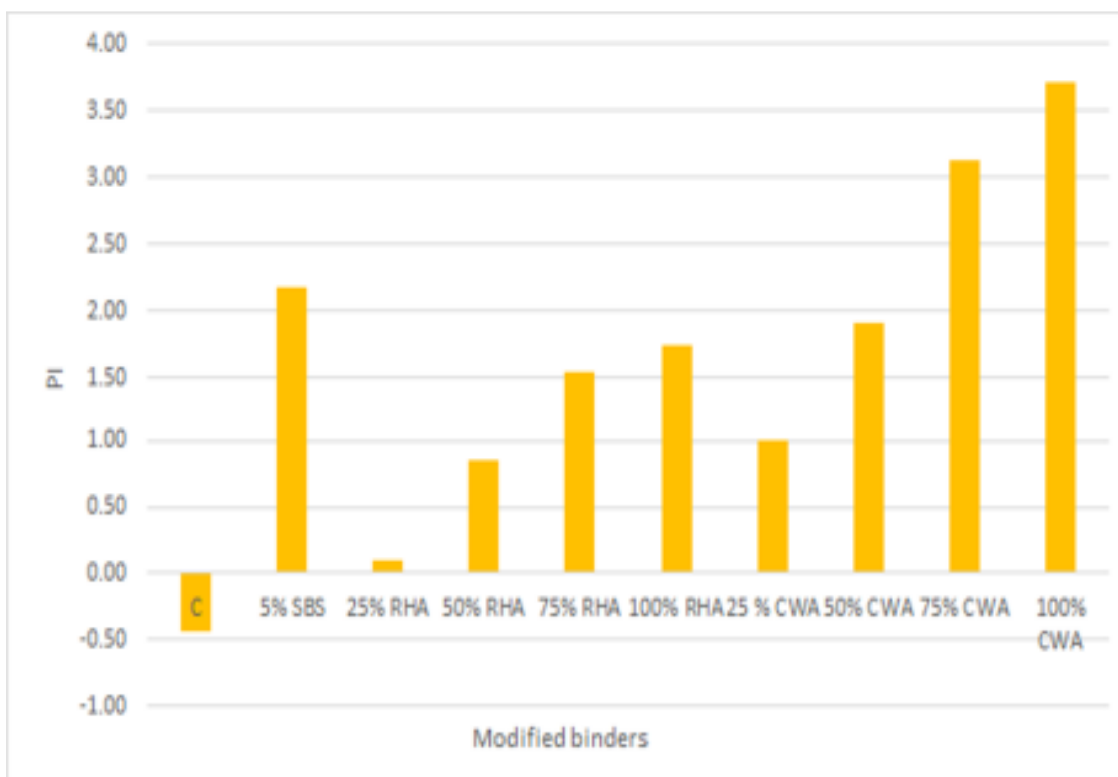
شکل ۵. نتایج آزمایش درجه نفوذ



شکل ۶. نتایج آزمایش نقطه نرمی



شکل ۷. نتایج آزمایش خاصیت انگمی



شکل ۸. نتایج آزمایش حساسیت حرارتی قیر

۴-۲- آزمایش ریزش قیر

زمینه بوده و ریزش قیر در تمامی نمونه ها در محدوده مجاز (کمتر از ۰,۳ درصد) می باشد. هم چنین نمونه های حاوی قیر پلیمری نسبت به نمونه های حاوی الیاف سلولزی دارای ریزش قیر کمتری می باشند.

آزمایش ریزش قیر طبق گزارش NCHRP-425 صورت پذیرفت. انجام این آزمایش از الزامات طرح اختلاط مخلوط های SMA می باشد. نتایج حاصل از انجام آزمایش ریزش قیر نشان دهنده صحت کلیه نمونه ها در این

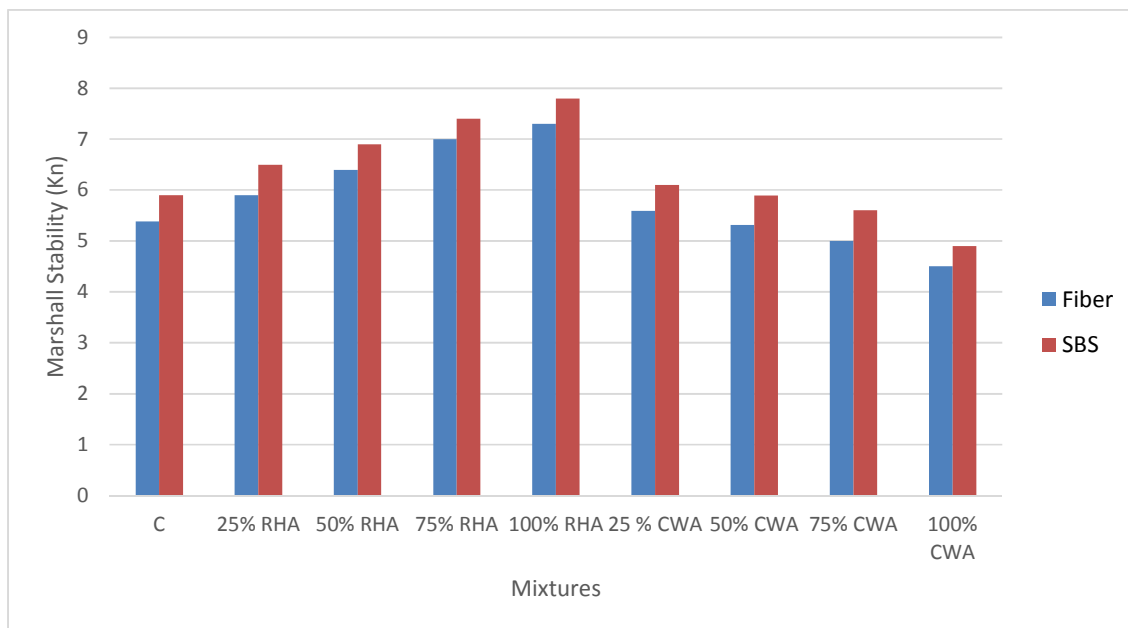


شکل ۹. نتایج آزمایش ریزش قیر

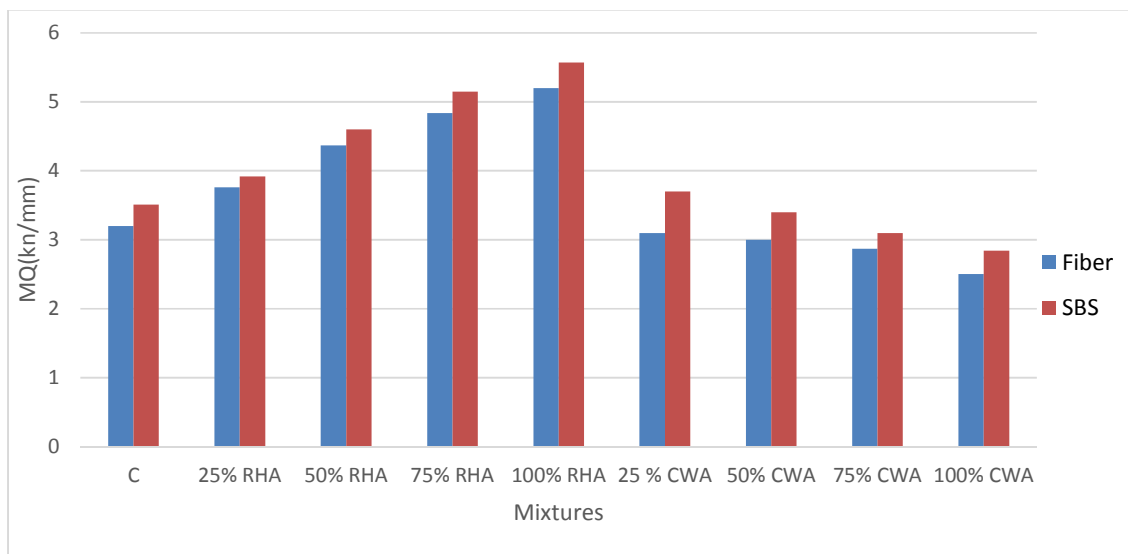
۴-۳- مقاومت مارشال

مقاومت بهتری در برابر تغییر شکل داریم دارد [۲۳]. مقادیر MQ نمونه های شاهد، ۲۵ درصد RHA، ۵۰ درصد RHA، ۷۵ درصد RHA و ۱۰۰ درصد RHA به ترتیب ۳,۲، ۳,۷۶، ۴,۳۷، ۴,۸۴ و ۵,۲ بود. نتایج نشان می دهد که اصلاح کننده ها پیوندهای میان ذرات قیر را تقویت می کنند، که در نتیجه به توانایی چسبندگی بین سنگدانه های مخلوط های آسفالتی گرم کمک می کند. یکی از دلایل افزایش چسبندگی بین سنگدانه ها در مخلوط اصلاح شده این است که RHA با ساختار متخلخل تمایل زیادی به جذب قیر دارد که می تواند باعث شود فیلم قیر اندود شده در سنگدانه ها ضخیم تر شود. در نتیجه درصد قیر آزاد به عنوان نتیجه نهایی کاهش می یابد. این امر نیروی چسبندگی بین آسفالت و سنگدانه ها را افزایش داده و قابلیت کلی مخلوط آسفالت را به بار می آورد. همچنین می توان نتیجه گرفت که مخلوط های حاوی SBS به عنوان پایدار کننده مقادیر MQ بالاتری نسبت به مخلوط های حاوی سلولز دارند.

شکل ۱۰ مقاومت مارشال مخلوط های SMA را نشان می دهد. همان طور که در شکل نشان داده شده، افزودن فیبر RHA منجر به بهبود مقاومت مارشال مخلوط ها شد. همانطور که درصد افزایش RHA افزایش می یابد، مقاومت مارشال مخلوط ها افزایش می یابد. جایگزینی ۱۰۰٪ پر کننده متداول توسط RHA باعث افزایش مقاومت مارشال تقریباً ۳۸٪ می شود. همچنین همانطور که می توان از شکل (۴-۹) مشاهده کرد، پایداری مخلوط های مختلف به اضافه کردن خاکستر ذغال سنگ کاهش می یابد. همانطور که درصد خاکستر ذغال سنگ افزایش می یابد، مقاومت مارشال کاهش می دهد، به این معنی است که خاکستر ذغال سنگ اثر معکوسی بر روی پایداری مخلوط دارد. شکل (۱۰) مقادیر MQ مخلوط های مختلف را نشان می دهد. همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، اضافه کردن خاکستر پوسته برنج باعث افزایش MQ مخلوط های آسفالتی می شود. مقدار بالاتر MQ نشان می دهد که مخلوط آسفالت محکم تر و



شکل ۱۰. نتایج آزمایش مقاومت مارشال



شکل ۱۱. نتایج آزمایش نسبت مقاومت مارشال

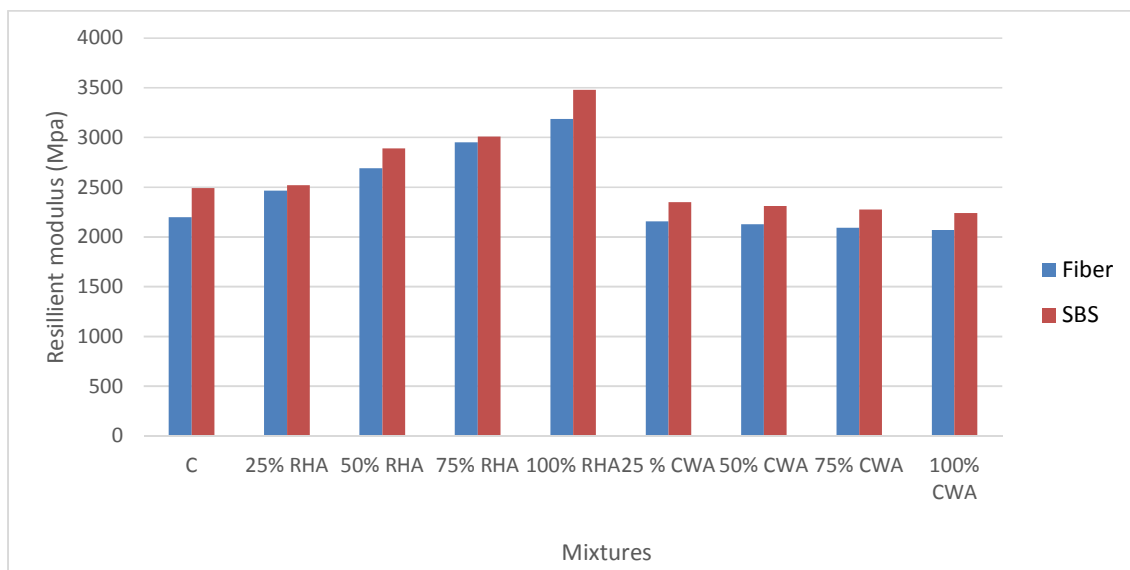
۴-۴- آزمایش مدول برجهندگی

حاوی ۱۰٪ RHA دارای بالاترین مدول برجهندگی در برابر نمونه‌های اصلاح شده توسط RHA می‌باشد. این به دلیل سخت شدن قیر با RHA است. ذرات پرکننده در قیر به حالت تعلیق درآمده است. تخلخل بالاتر ذرات پرکننده،

مدول برجهندگی مخلوط‌های حاوی RHA و CWA به عنوان پرکننده جایگزین در شکل (۴-۱۱) ارائه شده است. نتایج نشان داد که افزودن خاکستر پوسته برنج باعث افزایش انعطاف پذیری می‌شود، به طوری که مخلوط

می توان نتیجه گرفت که مخلوط‌های حاوی هم پلیمر و خاکستر می باشند، دارای مقادیر بیشتری نسبت به مخلوط‌های حاوی الیاف سلولز و RHA هستند. این روند همچنین بر روی مخلوط‌های حاوی CWA مشاهده می‌شود. این می‌تواند ناشی از این واقعیت باشد که افزودنی SBS مخلوط را سخت می‌کند و استحکام کششی مخلوط‌ها را افزایش می‌دهد.

ترکیبات قیر بیشتری را جذب خواهد کرد که منجر به افزایش ویسکوزیته آن می‌شود. به عنوان مثال، مدول برجهدگی مخلوط حاوی RHA ۱۰۰٪، ۴۵٪ بیشتر از مخلوط شاهد است، در حالی که مخلوط حاوی RHA ۲۵٪ دارای مدول برجهدگی حدود ۱۲،۰۳٪ بیشتر از مخلوط کنترل است. مدول برجهدگی مخلوط‌های آسفالت حاوی CWA روند کاهشی را نشان می‌دهد که با نتایج آزمایش مارشال انطباق دارد. افزودن ۱۰۰٪ CWA به مخلوط منجر به کاهش مدول برجهدگی مخلوط تا ۶٪ می‌شود. همچنین



شکل ۱۲. نتایج مدول برجهدگی نمونه های حاوی افزودنی های مختلف

به منظور بررسی تاثیر دو نوع پرکننده بر مقاومت کششی و مقاومت به رطوبت نمونه‌ها، تست مقاومت کششی غیر مستقیم انجام شد. مقادیر بالاتر ITS و TSR نشان می‌دهند که مخلوط مقاومت بالاتری نسبت به رطوبت دارد. میانگین استحکام کششی نمونه کنترل و نمونه‌های حاوی پرکننده و درصد متفاوت در شکل ۱۳ نشان داده شده‌است. مقادیر میانگین سه نمونه هستند. نتایج نشان داد که مقدار مقاومت کششی مخلوط‌های حاوی پرکننده RHA بیشتر از مخلوط شاهد بود. همچنین مقادیر آن با افزایش درصد RHA افزایش می‌یابد. افزودن پرکننده CWA به مخلوط منجر به کاهش مقادیر آن شد و با افزودن درصدهای بالاتر پرکننده روند کاهشی داشت. هر چه چسبندگی قیر به

افزایش مدول برجهدگی ارتباط مستقیم با ضریب لایه آسفالتی در طرح ضخامت آسفالت دارد و هرچه مدول برجهدگی بیشتر باشد این ضریب بالاتر رفته و ضخامت لایه کاهش می‌یابد. اما افزایش بیش از حد این مدول سبب سخت شدن لایه آسفالتی شده و آن را شکننده می‌سازد که احتمال ترک خوردگی در اثر حرارت و خستگی افزایش خواهد یافت. لذا توصیه می‌شود که حداکثر مدول برجهدگی برای لایه آسفالتی، 45000 psi معادل 3100 Mpa انتخاب گردد.

۴-۵-آزمایش کششی غیر مستقیم

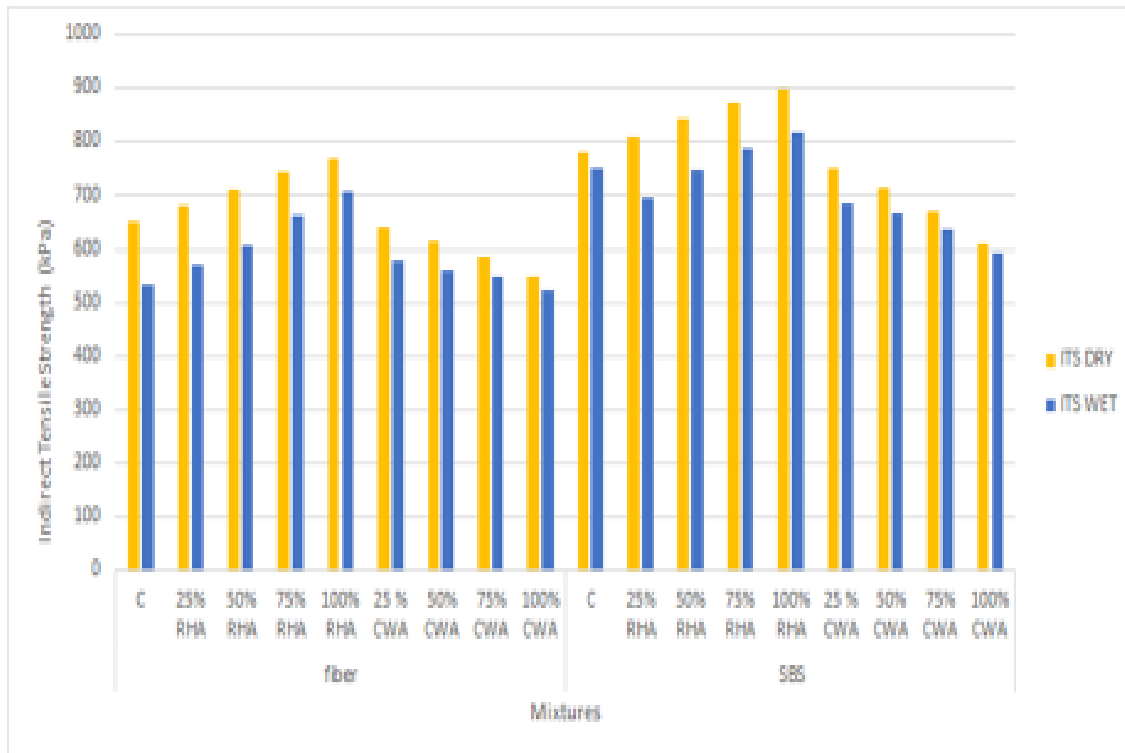
۴-۵-۱-مقاومت کششی غیر مستقیم

مارشال کوبیده شدند. درصد هوای تمامی نمونه ها در این حالت ۶.۵٪ لحاظ شد. نکته حائز اهمیت قرار گرفتن کلیه نمونه ها در کلیه حالات (درصدهای مختلف خاکستر بادی) در محدوده استاندارد TSR یعنی ۷۰٪ < TSR می باشد. مقادیر TSR مخلوطهای مختلف شکل ۱۴ به تصویر کشیده شد. همانطور که می توان از نتایج مشاهده کرد، تمام مخلوطها حداقل نیاز استاندارد که ۷۰٪ در نظر گرفته می شود، را برآورده نمودند. براساس نتایج، مخلوطهای حاوی RHA عملکرد بهتری نسبت به مخلوط اصلاح شده با خاکستر ذغال سنگ دارند. در نتیجه می توان نتیجه گرفت که اگرچه مخلوطهای اصلاح شده CWA نسبت به مخلوطهای کنترل در هر دو حالت خشک و مرطوب مقادیر کمتری دارند، اما مقادیر TSR بیشتری دارند که نشان می دهد افزودن CWA منجر به افزایش حساسیت به رطوبت مخلوطها شده است

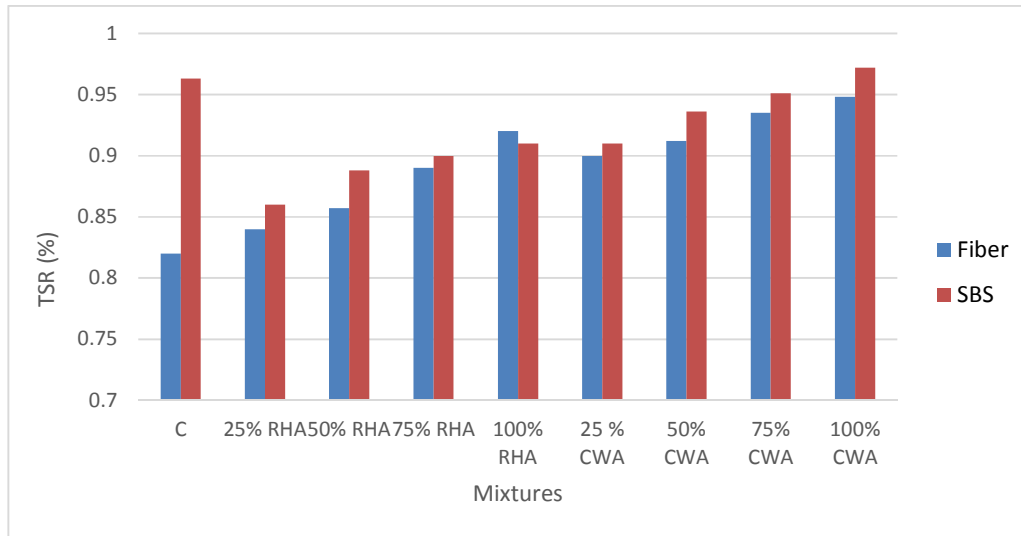
سنگدانه ها بیشتر باشد، مقادیر کشش غیرمستقیم آن بیشتر خواهد بود. بنابراین می توان نتیجه گرفت که با افزودن RHA و CWA به مخلوط چسبندگی و پیوستگی قیربه سنگ دانه ها به ترتیب افزایش و کاهش می یابد. همانطور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، مخلوطهای حاوی SBS مقادیر بیشتری نسبت به مخلوطهای حاوی فیبر سلولز دارند.

۴-۵-۲- آزمایش حساسیت رطوبتی

آزمایش حساسیت رطوبتی مطابق با استاندارد AASHTO T283 انجام گرفته و نتایج حاصل از آن در نمودار ۱۴ آمده است. هم چنین نمونه های مورد نیاز جهت این آزمایش براساس استاندارد باید درصد هوای 1 ± 6 درصد داشته باشند. فلذا در این حالت نمونه های حاوی پلیمر با ۳۴ ضربه چکش مارشال و نمونه های حاوی الیاف با ۴۲ ضربه



شکل ۱۳. نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

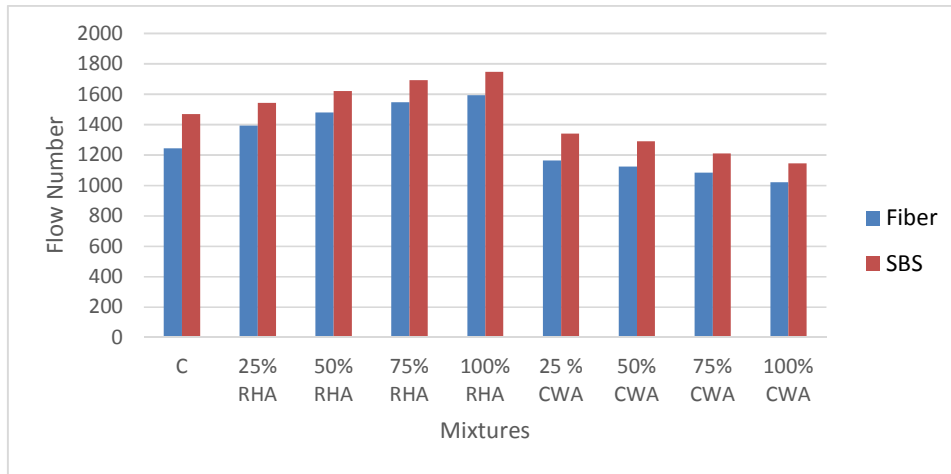


شکل ۱۴- نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه ها

۴-۶- آزمایش خزش دینامیکی

مقدار RHA، مقاومت شیارافتادگی آسفالت می‌شود. مخلوط‌های حاوی CWA دارای مقاومت شیارافتادگی کمتری نسبت به مخلوط شاهد و مخلوط با ۱۰۰ درصد CWA، کم‌ترین عملکرد شیارشدگی بین مخلوط‌های اصلاح شده را دارا می‌باشند. همانطور که می‌توان از نتایج مشاهده کرد، اضافه شدن SBS به مخلوط منجر به افزایش عملکرد مخلوط می‌شود. به طوری که تمام مخلوط‌های حاوی SBS مقاومت شیارافتادگی بهتری نسبت به مخلوط‌های حاوی فیبر سلولز دارند. مخلوطی از ۱۰۰٪ RHA و فیبر سلولز و نمونه حاوی ۱۰۰٪ RHA و SBS به ترتیب عدد روانی را به ترتیب ۳۲٪ و ۴۹٪ افزایش می‌دهند. این افزایش ناشی از این واقعیت است که RHA و SBS منجر به افزایش سختی مخلوط و ویسکوزیته قیر گردیده اند.

شیارشدگی یکی از خرابی‌های رایج در روسازی‌های آسفالتی می‌باشد و به تغییر شکل‌های دائمی گفته می‌شود که بصورت شیار فرورفته در مسیر چرخ وسایل نقلیه به موازات محور طولی راه دیده می‌شود (Sureyya, Halit, Aksoy, 2007). لذا در این تحقیق شیارشدگی نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. برای بررسی شیارشدگی نمونه‌ها از آزمایش خزش دینامیکی استفاده شد. آزمایش خزش دینامیکی یکی از معیارهای مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر تغییر شکل‌های دائم می‌باشد (National Cooperative Highway, 2002). به منظور ارزیابی مقاومت شیارافتادگی مخلوط، آزمون خزش دینامیک انجام شد. شکل (۱۴) عدد روانی مخلوط اصلاح شده را نشان می‌دهد. عدد روانی بالاتر نشان‌دهنده مقاومت بیشتر مخلوط‌ها در برابر شیارافتادگی است. براساس نتایج، افزودن RHA منجر به افزایش مقاومت شیارافتادگی مخلوط‌های آسفالت شده و همچنین با افزودن

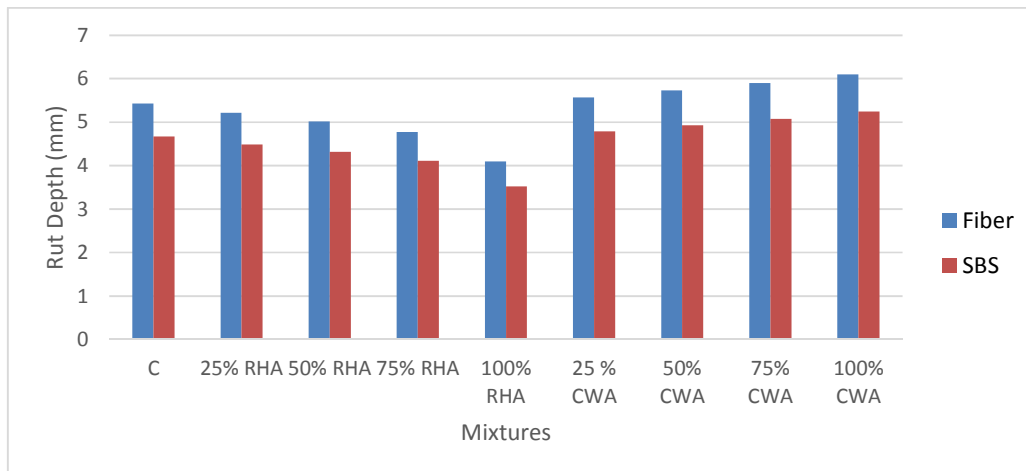


شکل ۱۵. نمودار نتایج آزمایش خزش دینامیکی نمونه‌ها در دمای ۵۰°C

۴-۷- آزمایش خزش دینامیکی

می‌شود. در نتیجه می‌توان نتیجه گرفت که افزودن CWA به مخلوط، تأثیر منفی بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی دارد. همانطور که در شکل ۱۶ مشاهده شد، مخلوط‌های حاوی SBS عملکرد بهتری نسبت به مخلوط‌های حاوی فیبر سلولز دارند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که SBS، منجر به افزایش گرانروی قیر و همچنین سختی مخلوط‌ها می‌گردد.

شکل ۱۶ عمق شیار مخلوط‌های اصلاح‌شده را نشان می‌دهد. همانطور که می‌توان از نتایج مشاهده کرد، RHA منجر به کاهش عمق شیارافتادگی مخلوط‌ها شد. با افزایش مقدار RHA، مقاومت شیارافتادگی بهتر می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که با افزودن خاکستر ذغال سنگ، مقاومت شیارافتادگی مخلوط‌های آسفالت کاهش یافته است. به طوری که با افزایش مقدار CWA، عمق شیار مخلوط‌های بیشتر



شکل ۱۶. نتایج آزمایش شیار جای چرخ

۵- نتیجه گیری

نتایج آزمون مارشال نشان داد که افزودن RHA باعث افزایش مقاومت مارشال در مخلوط شاهد و اضافه شدن CWA سبب کاهش پایداری مارشال شده است. هم چنین، با اضافه شدن RHA مقادیر MQ افزایش یافت. اما CWA تاثیر منفی بر روی مقادیر MQ دارد. براساس نتایج آزمون کشش غیرمستقیم، جایگزینی فیلر معمولی با RHA و CWA به ترتیب منجر به افزایش و کاهش مقادیر ITS شد. این می تواند به دلیل افزایش چسبندگی و پیوستگی قیر به سنگ دانه ها باشد. مخلوط های حاوی SBS مقادیر بالاتری نسبت به مخلوط های حاوی فیبر سلولز دارند. براساس نتایج تست حساسیت رطوبتی، هر چند افزودن CWA منجر به کاهش مقادیر ITS شد. افزودن پرکننده CWA باعث افزایش مقاومت به رطوبت مخلوط ها گردید. همچنین پرکننده RHA مقاومت رطوبت مخلوط ها را افزایش می دهد. با توجه به نتایج تست مدول برجهنگی، افزودن فیلر RHA به قیر اصلی، مدول برجهنگی مخلوط ها را افزایش می دهد. این می تواند به دلیل تخلخل بالاتر ذرات پرکننده معلق باشد که اجزای آسفالت بیشتری را جذب می کند و بنابراین منجر به افزایش کشش مخلوط ها شده است. براساس نتایج تست خزش دینامیکی، جایگزینی RHA با پرکننده معمولی باعث افزایش مقاومت شیارافتادگی مخلوط های آسفالت می شود. بالعکس، افزودن خاکستر ذغال سنگ باعث کاهش مقاومت شیارافتادگی و افزایش تغییر شکل دائم مخلوط ها شده است. نتایج آزمایش شیار جای چرخ نشان داد که افزودن و جایگزینی RHA باعث افزایش مقاومت شیارافتادگی مخلوط های آسفالتی و کاهش عمق مخلوط های آسفالتی می شود. این می تواند ناشی از این باشد که RHA مدول سختی را افزایش داده و حساسیت حرارتی مخلوط ها را کاهش می دهد.

۶- سپاسگزاری

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

۷- پی نوشت ها

- 1- Stone Matrix Asphalt
- 2- Rice Husk Ash
- 3- Coal Zaste Ash
- 4- Reclaimed Asphalt Pavement
- 5- Warm Mix Asphalt
- 6- Hot Mix Asphalt
- 7- Styrene-Butadiene-Styrene
- 8- Indirect tensile strength
- 9- Tensile Strength Ratio
- 10- Universal Testing Machine

۸- مراجع

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

- بهبهانی، ح، زیاری. ح. ارجمندپور، ج، (۱۳۹۲)، "مقایسه نتایج حاصل از آزمایش حساسیت رطوبتی در مخلوط های آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه ای (SMA) اصلاح شده با ترموپلاستیک الاستومرها"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.

- Ali N, Chan JS, Simms S, Bushman R, Bergan AT. (1996), "Mechanistic Evaluation of Fly Ash Asphalt Concrete Mixtures". J Mater Civil Engineering; 8(1), pp.19-25.

- Asi, I. M. (2006), "Laboratory comparison study for the use of stone matrix asphalt in hot weather climates", Journal of Construction and Building Materials, No. 20, Issue 10, pp. 982-989.

- A.H. Lav, M.A. Lav, A.B. Goktepe, (2006), "Analysis and design of a stabilized fly ash as pavement base material", Fuel 85 (16) 2359-2370, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.05.017>.

- Osinubi, J.E. Edeh, (2011), "Reconstituted coal ash stabilization of reclaimed asphalt pavement, in: In Geo-Frontiers Advances in Geotechnical Engineering, 2011, pp. 1172–1181.
- Pierce, L.M. (2000), "Stone matrix asphalt -SR-524, 64th Avenue West to I-5", State Pavement Engineer Washington State Department of Transportation, Post Construction Report, WA-RD 504.1.
- Putman, B. J. and Amirkhani, S. N. (2004), "Utilization of waste fibers in stone matrix asphalt mixtures", Journal of Resources Conservation and Recycling, No. 42, pp. 265- 274.
- Ramme, B. W., Wen, H., Naik, T. R., and Kraus, R. (2005), "The Use of Fly Ash for in Situ Recycling of AC Pavements into Base Courses". Geotechnical Applications for Transportation Infrastructure featuring the Marquette Interchange Project in Milwaukee, Wisconsin 181:10.
- State of Ohio Department of Transportation (1998), "Asphalt concrete with fibers", Supplemental Specification 826.
- Sharma, S. Chandra, R. Choudhary, Characterization of fly ash bituminous concrete mixes, J. Mater. Civ. Eng. 22 (12) (2010), pp.1209–1216.
- Sobolev, I.F. Vivian, R. Saha, N.M. Wasiuddin, N.E. Saltibus, The effect of fly ash on the rheological properties of bituminous materials, Fuel 116 (2014), pp.471–477.
- Shivaprasad, F. Xiao, S. Amirkhani, (2011), "Performance of warm-mix asphalt mixtures containing recycled coal ash and roofing shingles with moist aggregates for low-volume roads", Transp. Res. Rec. 2205 pp.48–57.
- Sargin, M. Saltan, Yilmaz, N. Morova, S. Serin, S. Terzi, (2013), "Evaluation of rice husk ash as filler in hot mix asphalt concrete, J. Constr. Build. Mater. 48, pp.390–397.
- 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, No.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.
- Çelik, (2008), "Influence of fly ash on the properties of asphalt", Pet. Sci. Technol. 26 (13), pp.1571–1582.
- Chandra, R. Choudhary, (2013), "Performance characteristics of bituminous concrete with industrial wastes as filler", J. Mater. Civil Engireeng, 11 (2013) pp.1666–1673.
- Churchill EV, Amirkhani SN. (1999), "Coal Ash Utilization in Asphalt Concrete mixtures". J Mater Civil Eng 1999;11(4), pp.295–301.
- Georgia Department of Transportation, Homepage, (2002), "SMA Research", Website: <http://www.dot.state.ga.us/dot/construction/material>.
- Huang, X. Shu, Q. Dong, J. Shen, (2010), "Laboratory evaluations of moisture susceptibility of hot-mix asphalt containing cementitious fillers, J. Mater. Civ. Eng. 22 (7) pp. 667–673.
- Karasahin, S. Terzi, (2007), "Use of marble waste dust in the mixture of asphalt concrete as mineral filler", Constr. Build. Mater. 21 (3), pp.616–620.
- National Cooperative Highway Research Program. (2002), "Simple Performance Test for Superpave Mix Design", Report 465.