

بررسی آزمایشگاهی اثر افزودنی خاکستر بادی بر عملکرد مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای اصلاح شده پلیمری

حسن زیاری، استاد، مرکز تحقیقات قیر و مخلوط‌های آسفالتی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

حسن دیوانداری، استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نوشهر، نوشهر، ایران

محمد مرادی، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

رضوان باباگلی، دانش‌آموخته دکتری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: divandari@iauns.ac.ir

دریافت: 1395/10/12 – پذیرش: 1396/02/15

چکیده

هدف از این مقاله بررسی تأثیر افزودنی خاکستر بادی بر خواص مکانیکی و عملکردی مخلوط آسفالتی گرم با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای اصلاح شده پلیمری می‌باشد. افزودنی خاکستر بادی با درصدهای 2/5٪، 5٪، 7/5٪ و 10٪ نسبت به وزن مصالح سنگی به عنوان فیلر مورد استفاده قرار گرفت. در این تحقیق خصوصیات مکانیکی و عملکردی مخلوط آسفالتی اصلاح شده از طریق آزمایش‌هایی از قبیل، مقاومت مارشال، مدول برجهنگی، حساسیت رطوبتی و تغییر شکل دائمی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از خاکستر بادی به عنوان فیلر تأثیری بر کاهش ریزش قیر نداشته و ریزش قیر تنها به کمک اصلاح قیر (فیبر و یا پلیمر) کاهش می‌یابد. نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی نشان داد، بهترین نتایج مربوط به استفاده از پلیمر SBS و در حالت 7/5 FA می‌باشد. نتایج آزمایش خزش دینامیکی نیز بیانگر این مساله بود که مقادیر عدد روانی برای نمونه‌های ساخته شده با فیبر به مراتب کمتر از نمونه‌های اصلاح شده با پلیمر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: قیر اصلاح شده، پلیمر، خاکستر بادی، خواص عملکردی، حساسیت رطوبتی، مخلوط آسفالتی

1- مقدمه

استفاده از مخلوط آسفالت گرم سنتی اجرا می‌شوند که با دانه‌بندی پیوسته و توپر تولید می‌شود. دوام ناکافی این نوع آسفالت در تحمل فشارها و کشش‌های رو به افزایش، متوسط عمر مفید آن را در کشور به کمتر از پنج سال رسانده است که این موضوع منجر به اختصاص اعتبارات و بودجه‌های هنگفت به این صنعت گردیده و هر ساله باعث هدر رفتن سرمایه‌های زیادی در کشور می‌شود. لذا با علم بر حجم بالا و روزافزون وسایل نقلیه از یک سو و عمر کوتاه و خرابی‌های متعدد رویه‌های آسفالتی از سوی دیگر، نیاز به استفاده از لایه‌های آسفالتی با دوام بیشتر، امری ضروری به نظر می‌رسد. در این مسیر، استفاده از

امروزه با افزایش تعداد بارهای محوری راه‌ها و بالا رفتن فشار ناشی از چرخ وسایل نقلیه، روسازی‌های آسفالتی در معرض بارگذاری بیشتر و در نتیجه تنش‌های کششی و فشاری زیادی قرار می‌گیرند و این امر منجر به خرابی زودرس رویه آسفالتی راه‌ها می‌گردد. خرابی‌هایی چون خستگی و شیارافتادگی که ناشی از بارهای ترافیکی زیاد بوده و موج زدگی و ناهمواری‌هایی که در اثر ترمزهای شدید وسایل نقلیه روی می‌دهند، همچنان یکی از معضلات اصلی روسازی‌های انعطاف پذیر آسفالتی به شمار می‌روند و همواره نیز در حال افزایش هستند. در حال حاضر، روکش‌های آسفالتی جاده‌ها و معابر کشور با

آسفالت ماستیک درشت دانه ¹SMA با 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.

2- اهمیت موضوع

با توجه به بررسی و تحقیق در ادبیات فنی و موضوعی مشخص شد که تاکنون در کشور تحقیقی در این زمینه بر روی آسفالت SMA انجام نگرفته و با توجه به گسترش و متداول شدن استفاده از آسفالت SMA، در این پژوهش سعی شده است تا حد امکان اطلاعاتی جدیدتر در این زمینه بدست آید. با توجه به اینکه پیش از این نیز از خاکستر بادی به عنوان فیلر در آسفالت استفاده شده بود و این ماده دارای اثرات مطلوبی بوده و از آن گذشته به دلیل تولید بالای آن در بسیاری از کشورها، استفاده از آن دارای توجیه می باشد. لذا تمرکز اصلی این تحقیق بر بررسی میزان اثرگذاری خاکستر بادی به عنوان فیلر و در حضور اصلاح کننده قیری آسفالت SMA می باشد.

3- پیشینه تحقیق

اکنون در برخی از کشورهای اروپایی، ایالات متحده آمریکا و کانادا برای تأمین برخی انتظارات خاص روسازی، نظیر مقاومت در مقابل شیارافتادگی جای چرخ، جلوگیری از گسترش ترک های انعکاسی و تحمل بارمحوری سنگین از مخلوط های آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه ای (SMA) استفاده می شود (نشریه 206، 1379). SMA یک مخلوط با دانه بندی میان تهی، شامل مقدار زیادی مصالح درشت دانه برای پیشینه کردن تماس سنگدانه به سنگدانه و ایجاد یک شبکه کارا برای توزیع بار است که ذرات مصالح درشت دانه 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).

مخلوط های SMA به وسیله ساختار سنگدانه ای آن از دیگر مخلوط ها متمایز می شود.

این مخلوط درصد بالایی از مصالح درشت دانه را که با یکدیگر تماس دارند، در خود جای می دهد. این استخوان بندی سنگدانه ای در برابر بارهای سنگین توسط پخش و انتقال آنها به لایه های زیرین روسازی استقامت می کند و اگر لایه های زیرین به اندازه کافی قوی باشند، مخلوط های SMA در برابر بارهای سنگین تر به طور مؤثرتری مقاومت خواهند کرد. استخوان بندی درشت دانه 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 ویژگی های این مخلوط ها، جلوگیری از لغزنده بودن سطح راه و عدم ایجاد ترک های ناشی از خستگی است (Asi, 2006).

مخلوط های SMA بکار رفته در رویه، ترک های 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 مخلوط ها در مقایسه با آسفالت های متعارف بیشتر است (State of Ohio Department of Transportation, 1998). به همین دلیل ریزش قیر (جدا شدن ملات قیری از مخلوط هنگام حمل در مخلوط های SMA) را باید بزرگترین نقطه ضعف این گونه مخلوط ها دانست (Asi, 2006). الیاف به منظور مسلح سازی این مخلوط های آسفالتی، افزایش مقاومت کششی، عمر خستگی و نیز برای تثبیت قیر در این مخلوط ها استفاده می شود. الیاف معدنی و الیاف سلولزی، متعارف ترین نوع الیاف مورد استفاده در مخلوط های 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 می‌باشد. هدف دیگر، افزایش سختی قیر در دمای بالا و یا بهبود برخی خواص قیر در دماهای پایین می‌باشد. پلیمرها معمولاً در بازه 3 تا 8 درصدی وزن قیر به مخلوط اضافه می‌شوند. در شرایط حاد (آمدوشد زیاد) اصلاح کننده پلیمر و الیاف همزمان به کار می‌روند. طبق تحقیقات صورت گرفته بر روی آسفالت SMA در دماهای مختلف مشخص گردید که در دماهای بالا، الیاف معدنی تاثیر کمتری را نسبت به سلولز و پلیمر² SBS دارا می‌باشند در حالیکه در دماهای متعادل تر تاثیر الیاف سلولز و معدنی نزدیک به هم و بیشتر از SBS بوده است. هم چنین نتایج در دماهای پایین نشان دادند که الیاف معدنی و سلولز بیشترین تاثیر خود را در تثبیت قیر دارا بوده در صورتیکه SBS از این لحاظ کمترین تاثیر را داشته است (Brown, 1997). در تحقیقات انجام شده دیگری، تاثیر پلی اتیلن سبک خطی (LDPE) بر عمر مخلوط‌های SMA مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش درصد پلی اتیلن، درجه نفوذ و درجه نرمی به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد و در مورد خاصیت انگمی قیر در تمامی درصدهای پلی اتیلن، این مقدار بیشتر از 100 سانتی‌متر است جز در 8 درصد که میزان آن زیر 91 سانتی‌متر است. بیشترین مقدار استقامت مارشال و کمترین مقدار برای روانی در 6 درصد پلیمر بدست آمده است و با افزایش درصد پلی اتیلن مقاومت کششی غیر مستقیم نیز افزایش می‌یابد (بهبهانی و همکاران، 1392).

در سال 2009 پروژه‌ی دیگری نیز توسط Al Hadidy و همکارانش صورت پذیرفت که در آن تحقیق، تاثیر افزودنی استارچ و SBS بر رفتار مخلوط آسفالتی SMA مورد مطالعه قرار گرفت (بهبهانی و همکاران، 1392). نتایج بیانگر آن است که افزودن 5 درصد ST، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی قیر را بهبود می‌بخشد. همچنین استقامت مارشال، شاخص حساسیت رطوبتی (TSR) و مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی را به ترتیب به میزان 11٪، 38٪ و 37.7٪

ارتقاء می‌دهد.

همچنین افزودن 5 درصد SBS به قیر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی قیر خالص را بهبود داده و مقادیر استقامت مارشال، شاخص حساسیت رطوبتی (TSR) و مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی SMA را به ترتیب به میزان 8٪، 12٪ و 39.4٪ افزایش می‌دهد. خاکستر بادی (Fly Ash) که تحت عنوان Flue-Ash هم شناخته می‌شود، یکی از پسماندهای تولید شده در فرآیند احتراق بوده و شامل اجزاء ریزی می‌باشد که با گازهای حاصل از احتراق به سمت بالا متصاعد می‌شوند. خاکسترها و پسماندهایی که بدلیل بالاتر بودن وزنشان قادر به بالا رفتن نیستند را خاکستر ته‌نشین می‌گویند. در ادبیات تجاری و صنعتی، خاکستر بادی خاکستر تولید شده در خلال احتراق ذغال سنگ می‌باشد. ایده بکارگیری خاکستر بادی در مخلوط‌های آسفالتی به عنوان فیلر یک مفهوم جدید نیست. تاکنون تحقیقات زیادی در این زمینه صورت گرفته است که به چند مورد از آنها در ادامه به طور خلاصه اشاره شده است:

فهم در سال 2010، گزارشی از اثرات متقابل فیلرهای معدنی و چسباننده‌های قیری ارائه کرد که بر اساس این گزارش روند سخت شدگی چسباننده قیری تحت اثر فیلر، خطی است (Faheem, 2009).

رامی و همکاران در سال 2005، از خاکستر بادی کلاس C در مخلوط آسفالتی استفاده کردند.

فعالیت آنها بیانگر این مساله بود که می‌توان از خاکستر بادی در جهت صرفه جویی اقتصادی و کم کردن نیاز به برداشت از منابع جدید و گران استفاده کرد (Ramme et al., 2005).

علی و همکاران در سال 1996، به بررسی اثر خاکستر بادی بر مشخصات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی پرداختند. آنها به دنبال ارزیابی اثر خاکستر بادی در کاهش خرابی‌های روسازی و بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی بودند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که می‌توان از خاکستر بادی به عنوان یک فیلر معدنی در

ریزش قیر جهت سنجش پتانسیل ریزش قیر مخلوط‌های مختلف و نیز در نهایت انجام آزمایش‌های مارشال، مدول برجهنگی، کشش غیرمستقیم، حساسیت رطوبتی و تغییر شکل‌های دائمی بر روی نمونه‌های شاهد و نمونه‌های حاوی افزودنی انجام شد.

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 آیین‌نامه‌ای ارائه شده برای مخلوط‌های SMA مطابقت داشته باشد. در این تحقیق ویژگی‌های ارائه شده گزارش NCHRP-No 425 برای مخلوط‌های SMA، برای تعیین دانه‌بندی، انتخاب مصالح سنگی و طرح مخلوط، مبنای عمل قرار گرفت (Brown et al, 1997). در این پژوهش از سنگ شکسته کوهی معدن اسب چران رودهن با حداکثر اندازه اسمی سنگدانه 9/5 میلیمتر جهت ساخت نمونه‌ها استفاده شد. مشخصات مصالح سنگی و دانه‌بندی انتخابی در جداول (1) و (2) ارائه شده است. قیر مورد استفاده در این پژوهش از نوع قیر خالص 60-70 بود که از شرکت نفت پاسارگاد تهیه شد و مشخصات فیزیکی آن در جدول (3) آمده است. در این تحقیق به منظور حصول اطمینان از تماس سنگدانه به سنگدانه از روش تعیین فضای خالی مصالح سنگی درشت دانه در حالت خشک 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 در حالت خشک است. به منظور تعیین فضای خالی بین مصالح سنگی درشت دانه، از تراکم به روش خشک میل خورده بر طبق

جهت بهبود مدول برجهنگی و مقاومت در برابر عریان شدگی، استفاده کرد. افزودن خاکستر بادی اثر قابل ملاحظه‌ای در کاهش عملکرد مخلوط آسفالتی در زمینه‌ی عمق شیار شدگی و شاخص سرویس‌دهی (PSI^3) نداشت ولی باعث افزایش ترک‌های سطح روسازی شده بود (Ali et al, 1996).

چرچیل و امیرخانیان در سال 1999، از دو نوع خاکستر بادی در مخلوط‌های آسفالتی استفاده کردند و نتایج بیانگر این مساله بود که جایگزین کردن جزئی خاکستر بادی با مصالح ریزدانه اثر تخریبی کمی بر مقاومت کششی مخلوط دارد. اگرچه ترکیب خاکستر بادی و آهک حداقل‌های مورد نیاز براساس دستورالعمل دپارتمان حمل و نقل کارولینا (NCDOT) را ارضاء می‌نمود (Churchill and Amirkhanian, 1999).

4- فرضیات تحقیق

در این پژوهش، فرضیات ذیل در نظر گرفته شده است:

- 1) استاندارد ASTM در محاسبه مدول برجهنگی فرض کردن ضریب پواسون (9) را مجاز دانسته است. در این تحقیق نیز ضریب پواسون برابر 0/35 فرض شده است.
- 2) آزمایش خزش دینامیکی به منظور هرچه نزدیک‌تر بودن به شرایط محیطی در دمای $45^{\circ}C$ انجام پذیرفت.

5- روش تحقیق

در این پژوهش تأثیر درصدهای مختلف خاکستر بادی به عنوان فیلر بر عملکرد مخلوط آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه‌ای اصلاح شده با قیر پلیمری (اصلاح شده با 5٪ SBS) مورد بررسی قرار گرفت. ضمناً طرح اختلاط مارشال برای تعیین میزان قیر بهینه براساس گزارش NCHRP-No. 425⁴ برای مخلوط‌های SMA استفاده شد. همچنین بر اساس استاندارد AASHTO-T305⁵ آزمایش

استاندارد AASHTO-T19 استفاده شد (Brown and ,1999) (cooly).

جدول 1. خصوصیات مصالح سنگی مورد استفاده

واحد	مقدار	استاندارد	آزمایش
%	۲۵.۶	AASHTO T96	سایش لس آنجلس
%	۲.۱	AASHTO T85	جذب آب (درشت دانه)
%	۳.۹	AASHTO T84	جذب آب (ریزدانه)
g/cm ³	۲.۶۵۹	AASHTO T85	وزن مخصوص (درشت دانه)
g/cm ³	۲.۶۲۳	AASHTO T84	وزن مخصوص (ریزدانه)
%	۱۰۰	ASTM D-5821	درصد شکستگی در یک وجه
%	۹۵	ASTM D-5821	درصد شکستگی در دو وجه

جدول 2. مشخصات دانه‌بندی بکاررفته در طرح مخلوط SMA

9.5 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

جدول 3. مشخصات فیزیکی قیر

نتیجه آزمایش	استاندارد	نوع آزمایش
۴۷ درجه سانتیگراد	ASTM D36	نقطه نرمی
67 دسی میلی‌متر	ASTM D5	درجه نفوذ در دمای 25 درجه سانتیگراد
304 درجه سانتیگراد	ASTM D92	درجه اشتعال
بیش از 100 سانتیمتر	ASTM D113	شکل پذیری در دمای 25 درجه سانتیگراد
1/045 (gr/cm ³)	ASTM D70	چگالی
0/05 درصد	ASTM D6	افت وزنی در مقابل حرارت
99/5 درصد	ASTM D4	قابلیت انحلال

پخش کردن و ناپایداری انبارداری در دماهای بالا شود.
(زیاری و گلی، 1386).

از پلیمر SBS به عنوان یکی از پرکاربردترین مواد افزودنی قیر استفاده می‌شود. مشخصات این ماده مطابق با جدول (5) می‌باشد. در ضمن پلیمر مورد نظر دارای ساختار خطی می‌باشد.

طرح اختلاط

در این پژوهش پس از انتخاب دانه بندی 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.

جدول 4. مشخصات الیاف سلولزی

مشخصات	مقدار	واحد
میزان فیبر	95 ± 3	%
میزان سلولز	approx. 80	%
چگالی	420-480	g/l
رطوبت	< 6	%
خاکستر	approx. 15	%
طول فیبر	approx. 1100	μm
PH	6.5-8.5	-



شکل 1. نمونه‌ای از الیاف سلولزی

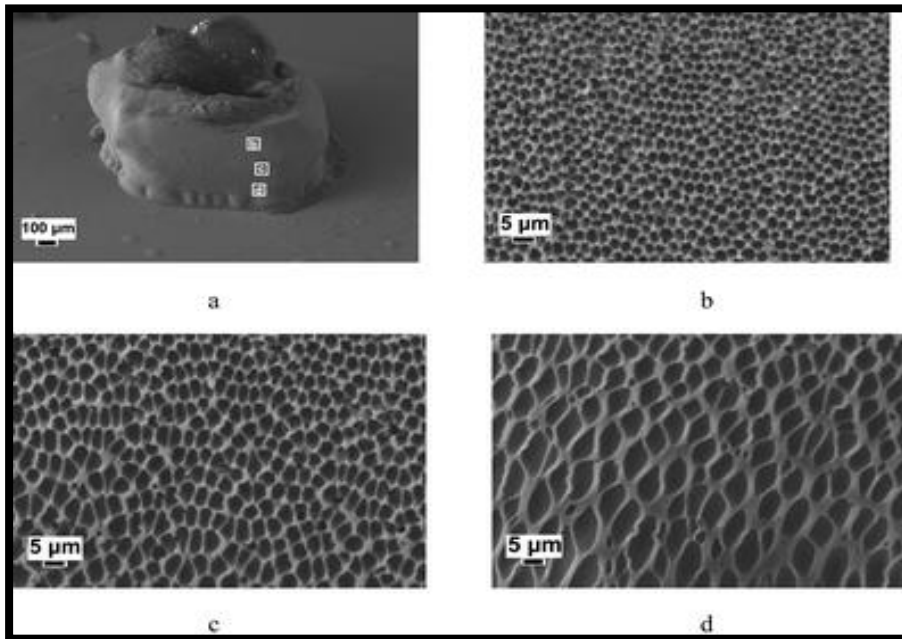
الیاف سلولزی TOPCEL

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 0/3% وزنی کل مخلوط آسفالتی بر اساس گزارش NCHRP 425 در نظر گرفته شد. مشخصات الیاف استفاده شده به صورت خلاصه در جدول (4) آورده شده است.

در این تحقیق از الیاف TOPCEL به مقدار 0/3% وزنی کل مخلوط آسفالتی برای مقابله با ریزش قیر استفاده شده است. این الیاف قبل از اختلاط قیر با سنگدانه، در مصالح سنگی داغ (175 درجه سانتی‌گراد) ریخته شده و هم زده می‌شود تا به خوبی در آن پخش گردد. سپس قیر با مخلوط الیاف و سنگدانه مخلوط شده و نمونه‌ها به صورت مرسوم ساخته می‌شوند. الیاف TOPCEL مانند کرک است و پس از حرارت دیدن و اختلاط با قیر باز شده و شبکه‌ی فیبری تشکیل می‌دهد و به این طریق مانع از جدا شدن و ریزش قیر می‌گردد.

پلیمر SBS

کوپلیمر استایرن - بوتادین - استایرن یک کوپلیمر سه بلوکه است که در آن بلوک‌های استایرن به وسیله یک بلوک بوتادین از یکدیگر جدا شده‌اند. نمونه‌ای از ساختار SBS را می‌توان در شکل (2) 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 به کار می‌رود معمولاً استایرن بین 20 تا 30 درصد وزن کل این پلیمر را تشکیل می‌دهد. درصد بیشتر استایرن می‌تواند باعث ناسازگاری با قیر و اشکالاتی در



شکل 2. ساختار سه بعدی از پلیمر SBS

جدول 5. مشخصات پلیمر

محدوده مجاز	مقدار	واحد	استاندارد آزمایش	مشخصات
۰.۹۲ - ۰.۹۵	۰.۹۴	g/l	ASTM D 792	وزن مخصوص در ۲۳ درجه سانتی گراد
۳۰.۵ - ۳۳.۵	۳۲	Wt%	ASTM D 1416	Styrene content
≤ ۱	۰.۹	Wt%	ASTM D 1416	Ash content
< ۰.۲	۰	Phr	ASTM D 1416	Oil content
< ۱۲	۰.۳	g/۱۰min	ASTM D 1238	شاخص روانی در ۲۰۰ درجه سانتی گراد
< ۱	۷۵	-	ASTM D 2240	سختی

الف) قیر بهینه‌ی بدون وجود الیاف:

این درصد قیر برای قیرهای اصلاح شده با پلیمر و قیر اصلاح نشده یکسان است. دلیل این برابری به دلیل وجود معیار درصد فضای خالی 4 درصد در مخلوط است و لذا قیر در طرح اختلاط، تنها نقش پرکننده را ایفاء می‌کند و وجود پلیمر تاثیری بر این موضوع ندارد (زیاری و ایمانی نسب 1392).

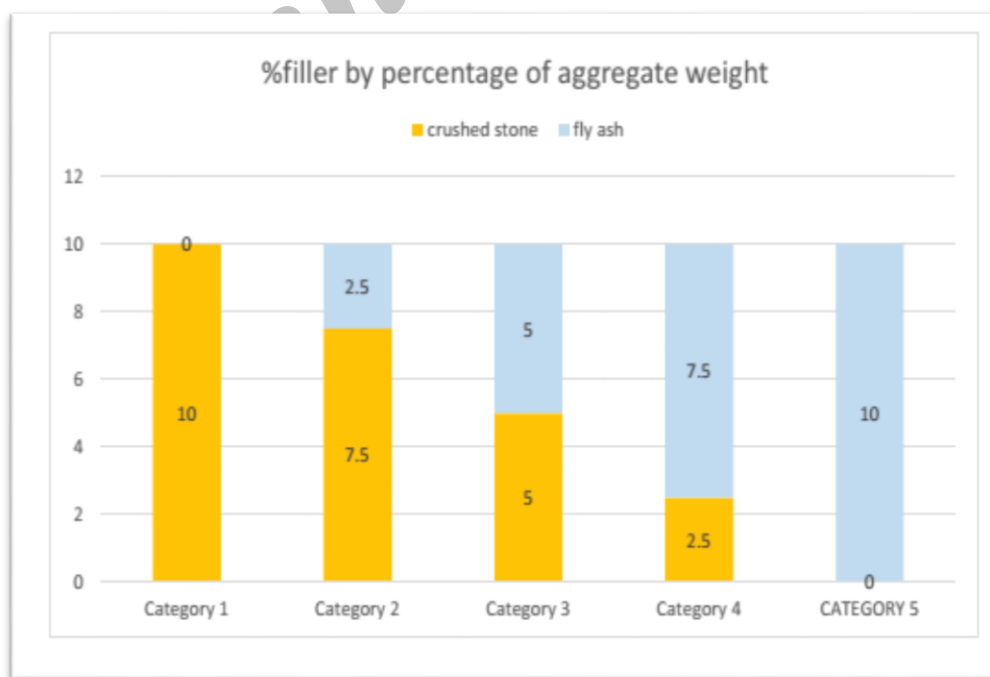
ب) قیر اصلاح شده با وجود الیاف سلولوزی: به منظور جلوگیری از ریزش ماستیک و احتمال قیرزدگی از الیاف معدنی یا سلولوزی استفاده می‌شود. کاربرد این الیاف طبیعتاً باعث پرشدن فضای خالی مخلوط SMA می‌گردد، لذا کاهش درصد قیر، طبیعی است.

در هر سه حالت اصلاح قیر (اصلاح با پلیمر، فیبر و فیبر و پلیمر به صورت همزمان) از 5 درصد مختلف خاکستر بادی به عنوان فیلر استفاده گردید. حالت اول حالتی است که درصد خاکستر بادی 0 بوده و فیلر تماماً از جنس پودر سنگ آهک می‌باشد و به این دلیل که در دانه‌بندی انتخابی 10٪ مصالح سنگی به فیلر اختصاص یافت، این حالت با 10% SD⁶ در نمودارها و جداول نمایش داده شده است که به معنای 10 درصد پودر سنگ آهک در مخلوط می‌باشد. این مقدار فیلر با افزایش 2.5 درصدی خاکستر بادی تا رسیدن این مقدار به 10 درصد خاکستر بادی که در واقع جایگزینی کامل این ماده با پودر سنگ آهک را نشان می‌دهد، ادامه دارد. این حالت نیز با کد 10% FA نمایش داده شده است. نحوه توزیع خاکستر بادی به عنوان فیلر در نمونه‌های مختلف در شکل (3) نمایش داده شده است. برای ارزیابی تاثیر افزودنی‌ها بر خواص مخلوط‌های آسفالتی گرم، آزمایش‌های مارشال، مدول برجهنگی، حساسیت رطوبتی و خزش دینامیکی بر روی انواع مخلوط‌های ساخته شده، انجام شد.

در حالت اول ابتدا 12 نمونه با قیر پلیمری و در درصدهای 6.5٪، 7٪ و 7.5٪ و بدون وجود الیاف و طبق دانه بندی مطلوب ساخته شد که پس از بررسی معیارهای جدول (6) درصد قیر بهینه برابر 7.2٪ انتخاب شد. همین مراحل در حالت استفاده از الیاف نیز انجام گرفته و درصد قیر بهینه در این حالت برابر 6.9٪ انتخاب شد. در حالت آخر نیز از الیاف و قیر پلیمری بصورت همزمان در ساخت نمونه‌ها استفاده شد که در این حالت نیز درصد قیر بهینه برابر 6.9٪ در نظر گرفته شد.

جدول 6. مشخصات مورد نیاز برای تعیین درصد قیر بهینه در مخلوط‌های SMA

پارامتر	مقدار
فضای خالی مخلوط (VTM)	3-4٪
حداقل قیر مصرفی	6٪
فضای خالی مصالح سنگی در مخلوط (VMA)	حداقل 17٪
ویسکوزیته در حین اختلاط	170 ± 20 CS
دمای قیر در حین اختلاط	177 °C



شکل 3. نحوه توزیع خاکستر بادی به عنوان فیلر در نمونه‌های مختلف

6- روش کار آزمایش

6-1- آزمایش ریزش قیر



شکل 4. سبد استفاده شده برای انجام آزمایش ریزش قیر

پدیده ریزش قیر عمده‌ترین عیب مخلوط‌های آسفالتی با دانه‌بندی میان تهی است و از آنجا که مخلوط‌های SMA از نوع مخلوط‌های با دانه‌بندی میان تهی هستند، بنابراین دارای پتانسیل ریزش قیر می‌باشند (Asi, 2006). آزمایش ریزش قیر روشی برای ارزیابی پتانسیل ریزش قیر یا همان جدا شدن ملات قیری از مخلوط‌های SMA است.

6-1-1- آزمایش کشش غیر مستقیم

در آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم⁷ 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 اساس آیین نامه ASTM D6931-12 با نرخ ثابت 50/8 میلیمتر بر دقیقه و در دمای 25 درجه سانتیگراد انجام شد. مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌ها با استفاده از معادله زیر تعیین شد:

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

که در این معادله:

ITS: مقاومت کششی نمونه‌ها بر حسب مگاپاسکال،

P_{max} : بار اعمالی در زمان شکست بر حسب نیوتن،

D: قطر نمونه‌ها بر حسب میلیمتر،

t: ارتفاع نمونه‌ها بر اساس میلیمتر می‌باشد.

6-3- مدول برجهنگی

آزمایش مدول برجهنگی در دماهای پایین بنحوی مرتبط با ترک خوردگی حرارتی می‌باشد. تحقیقات متعددی نشان داده است که مخلوط‌های سخت تر در دماهای پایین تر بیشتر مستعد ترک خوردگی حرارتی می‌باشند. ابتدا نمونه‌ها به مدت 24 ساعت در محفظه دستگاه در دمای 25°C قرار داده شد. شکل بارگذاری نیمه

این روش، میزان ریزش قیر در یک نمونه آسفالتی مترکم 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 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 توزین شده و داخل گرمخانه 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 گرمخانه 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:

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

نمایی از سبد مخصوص آزمایش ریزش قیر

در شکل (4) نمایش داده شده است.

بر طبق این استاندارد در شرایط اشباع و غیر اشباع باید بیش از 0/70 باشد. برای اشباع شدن، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آب ۶۰ درجه قرار گرفتند.

6-5- 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-5P⁹ در دمای ثابت 45 درجه سانتی‌گراد و تحت تنش ثابت 450 کیلو پاسکال که به صورت نیمه سینوسی اعمال شد، انجام گرفت. در این آزمایش یک تنش ثابت در دمای ثابت با مدت بارگذاری 0/1 ثانیه و زمان استراحت 0/9 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. هر میزان عدد روانی بزرگتر باشد، مقاومت نمونه در برابر تغییر شکل‌های دائم بیشتر است.

7- تحلیل نتایج آزمایشات

7-1- آزمایش ریزش قیر

آزمایش ریزش قیر طبق گزارش NCHRP-425 صورت پذیرفت. انجام این آزمایش از الزامات طرح اختلاط مخلوط‌های SMA می‌باشد. نتایج حاصل از انجام آزمایش ریزش قیر نشان دهنده صحت کلیه نمونه‌ها در این زمینه بوده و ریزش قیر در تمامی نمونه‌ها در محدوده مجاز (کمتر از 0.3 درصد) می‌باشد (شکل 5). همچنین نمونه‌های حاوی الیاف سلولزی نسبت به نمونه‌های حاوی قیر پلیمری دارای ریزش قیر کمتری می‌باشند.

بر اساس نتایج به دست آمده در حالت استفاده از فیبر (بصورت جداگانه و همزمان با پلیمر) میزان ریزش قیر تا

سینوسی، مدت اعمال بار 0/1 ثانیه، زمان استراحت 0/9 ثانیه و ضریب پواسون 0/35 فرض گردید. در این آزمایش به ازای هر مخلوط، 3 نمونه آسفالتی تهیه و روی هر نمونه 5 پالس تکرار شد و میانگین نتایج به وسیله دستگاه نمایش داده شد. مدول برجهندگی براساس معادله زیر محاسبه می‌گردد: (Moddares, Hamed, 2014; Ghani zade, fakhri, 2013).

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

M_r = مدول برجهندگی (مگا پاسکال)،

P = بار تکرار شونده (نیوتن)،

θ = ضریب پواسن،

t = ضخامت نمونه (میلی‌متر)،

δ = 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 7 می‌باشد.

جدول 7. تنظیمات دستگاه جهت انجام آزمایش مدول برجهندگی

پارامتر	مقدار
شکل بارگذاری	نیمه سینوسی
زمان بارگذاری (ms)	100
زمان تکرار بارگذاری (ms)	1000
تعداد پالس پیش بارگذاری	50
تعداد پالس آزمایش	5
دمای انجام آزمایش °C	25
بار اعمالی (N)	500
نسبت پواسون	0.35

6-4- آزمایش حساسیت رطوبتی

این آزمایش بر اساس استاندارد AASHTO-T283 انجام می‌گیرد. نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم⁸ نمونه‌ها

حد قابل توجهی کاهش یافته است. در صورتیکه استفاده جداگانه از پلیمر تنها مقدار ریزش قیر را پایین تر از حداکثر حد مجاز نگه داشته است و در کاهش آن تاثیر به سزایی نداشته است. هم چنین در حالت استفاده جداگانه از فیبر، استفاده از 10 درصد پودر سنگ بهترین نتیجه را داشته در صورتیکه در حالت مخلوط (استفاده همزمان از پلیمر و فیبر به منظور اصلاح قیر)، میزان 7.5 درصد خاکستر بادی، کمترین مقدار ریزش قیر را نتیجه می دهد.

2-7- مقاومت مارشال

آزمایش مارشال چندان قادر به ارزیابی فنی مخلوطهای آسفالتی SMA نیست (مختاری، 1390). اما این آزمایش نیز بر روی نمونه های ساخته شده انجام گرفته و نتایج به دست آمده در جدول (8) ذکر گردیده است.

3-7- آزمایش مدول برجهنگی

برای ارزیابی عملکرد مخلوطهای ساخته شده در این تحقیق در اثر بارگذاری ترافیکی از آزمایش مدول برجهنگی استفاده شده است. هدف از انجام این آزمایش تعیین مدول برجهنگی مخلوطهای آسفالتی SMA است. نتایج آزمایش مدول کششی غیر مستقیم بر روی نمونه های حاوی پلیمر، فیبر و نمونه هایی که همزمان حاوی فیبر و پلیمر هستند در درصدهای مختلف فیلر خاکستر بادی در شکل (6) نشان داده شده است.

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، 45000 psi معادل 3100 Mpa انتخاب گردد (زیاری و ایمانی نسب، 1392).

همان طور که از نمودار (6) قابل مشاهده می باشد، استفاده جداگانه از فیبر و پلیمر با تفاوت نسبتاً اندکی مقدار مدول مشابهی را نتیجه می دهد. در حالی که استفاده همزمان از هر دو اصلاح کننده باعث افزایش قابل توجه مدول برجهنگی یا به عبارتی افزایش سختی مخلوط آسفالتی شده است که می توان نتیجه گرفت استفاده از فیبر باعث به وجود آمدن یک شبکه توانای قیری شده و هم چنین پلیمر نیز به علت چسبندگی بالاتر، مخلوطی کارآمدتر را ساخته است. همچنین در درصدهای مختلف فیلر خاکستر بادی، برای هر حالت نتایج تابع روند یکسانی بوده اند و اختلافات، جزئی می باشد. اما با این حال می توان به صورت محتاطانه این گونه نتیجه گیری نمود که با افزایش درصد خاکستر بادی در همه ی حالات مدول برجهنگی افزایش داشته است که شکل (6) نیز بر این ادعا صحنه می گذارد.

4-7- آزمایش کششی غیر مستقیم

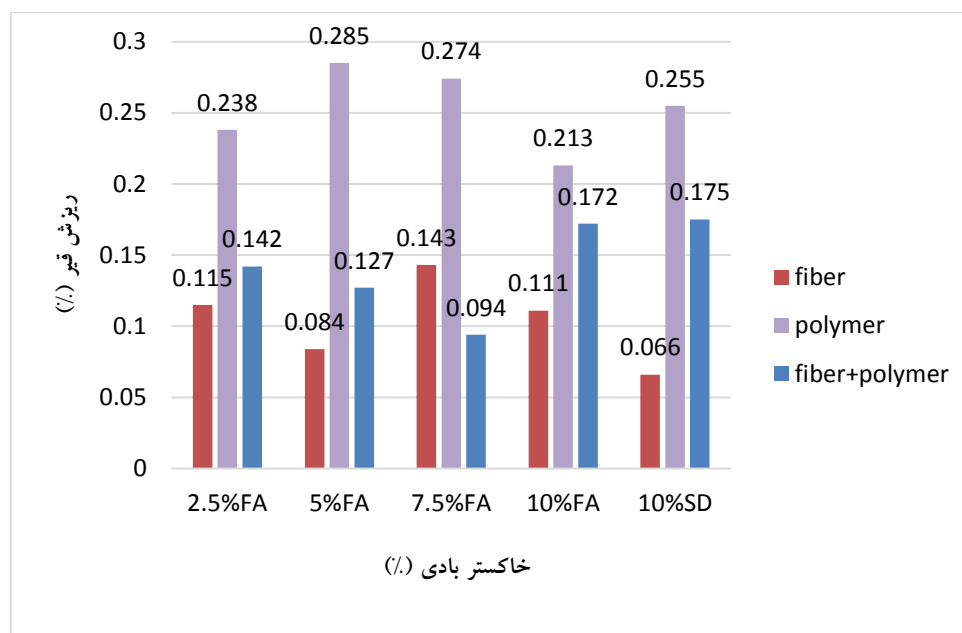
1-4-7- مقاومت کششی غیر مستقیم

با استفاده از مقادیر بدست آمده می توان به این نتیجه رسید که بیشترین میزان مقاومت کششی غیر مستقیم در حالت استفاده همزمان از فیبر و پلیمر و در حالت 2.5%FA می باشد. پس از این حالت استفاده از پلیمر اثرگذار بوده و در آخرین حالت نیز (استفاده از الیاف) در حالت 10% FA و 10 SD٪ بیشترین مقاومت کششی غیر مستقیم دیده شد (شکل 7).

2-4-7- آزمایش حساسیت رطوبتی

آزمایش حساسیت رطوبتی مطابق با استاندارد AASHTO T283 انجام گرفته و نتایج حاصل از آن در شکل های (8) و (9) آمده است. همچنین نمونه های مورد نیاز جهت این آزمایش براساس استاندارد باید درصد فضای خالی معادل 1 ± 6 درصد داشته باشند. لذا در این حالت نمونه های حاوی پلیمر با 34 ضربه چکش مارشال و نمونه های حاوی الیاف با 42 ضربه مارشال متراکم

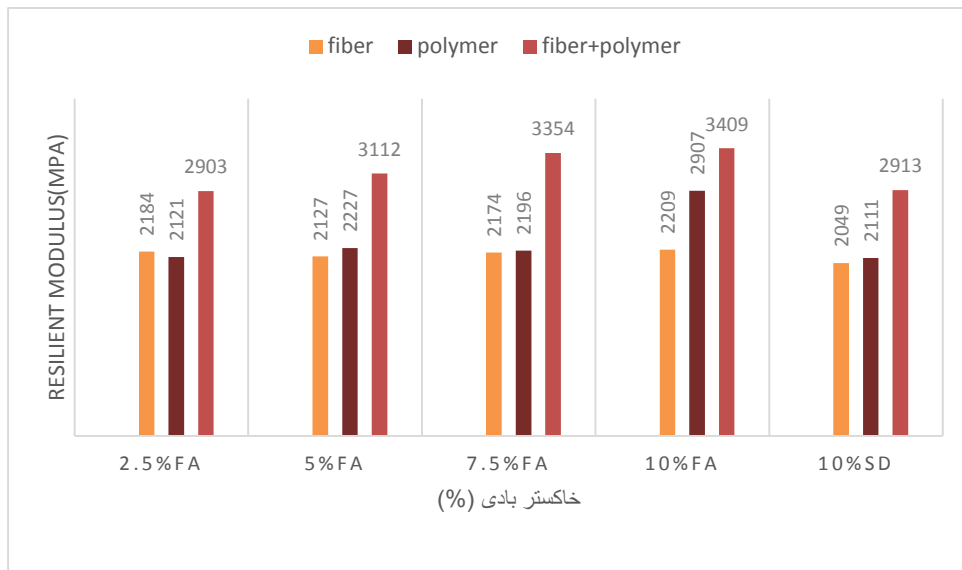
شدند. درصد فضای خالی تمامی نمونه‌ها در این حالت،
 6.5٪ لحاظ شد. نکته حائز اهمیت قرار گرفتن کلیه نمونه-
 ها در کلیه حالات (درصدهای مختلف خاکستر بادی) در
 محدوده استاندارد TSR یعنی $TSR < 70\%$ می‌باشد.



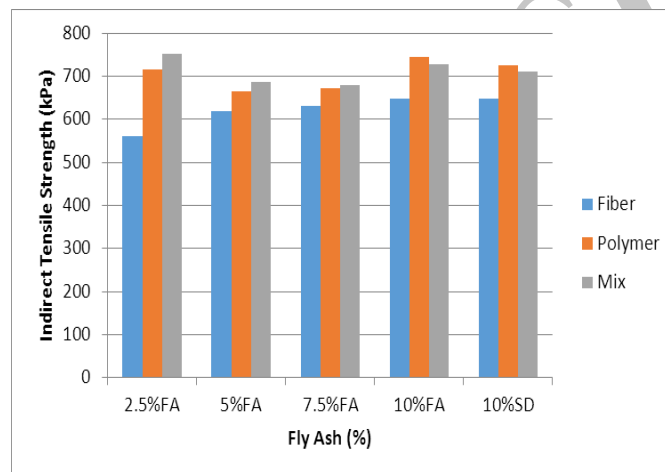
شکل 5. نتایج آزمایش ریزش فیبر

جدول 8. نتایج آزمایش مقاومت مارشال

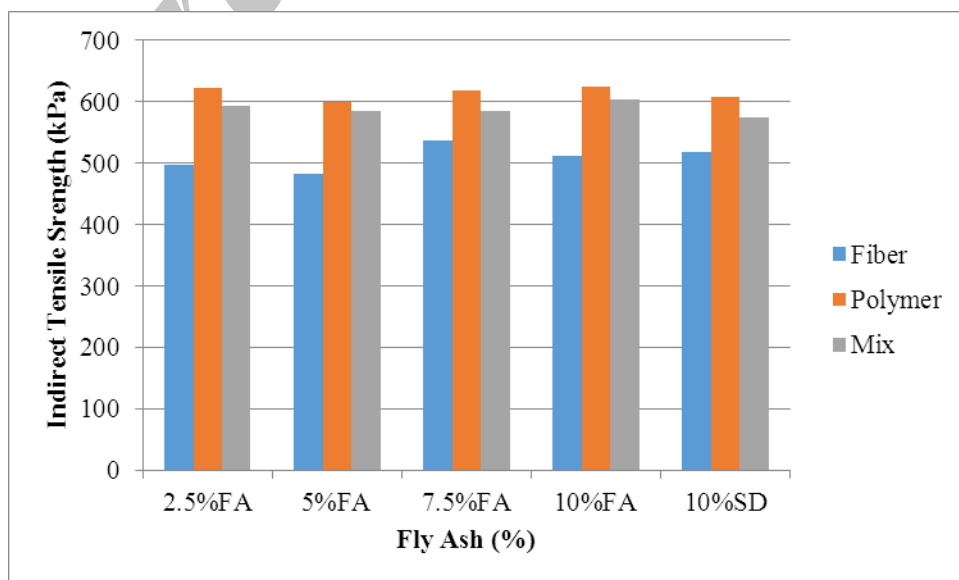
روانی (mm)	استقامت مارشال (KN)	نمونه
Fiber		
۴.۱۷	۵.۶۲	۱۰٪ SD
۴.۲۳	۵.۸۳	۲.۵٪ FA
۴.۲۱	۶.۰۴	۵٪ FA
۴.۴۲	۵.۶۸	۷.۵٪ FA
۴.۳۳	۵.۵۵	۱۰٪ FA
Polymer		
۳.۴۹	۵.۳۸	۱۰٪ SD
۳.۶۳	۶.۰۸	۲.۵٪ FA
۳.۴۵	۶.۲۳	۵٪ FA
۳.۵۷	۵.۸۹	۷.۵٪ FA
۳.۷۲	۵.۷۳	۱۰٪ FA
Mix		
۳.۵۲	۶.۲۴	۱۰٪ SD
۳.۶۱	۶.۵۲	۲.۵٪ FA
۳.۵۹	۶.۱۸	۵٪ FA
۳.۵۰	۵.۷۲	۷.۵٪ FA
۳.۳۹	۵.۴۵	۱۰٪ FA



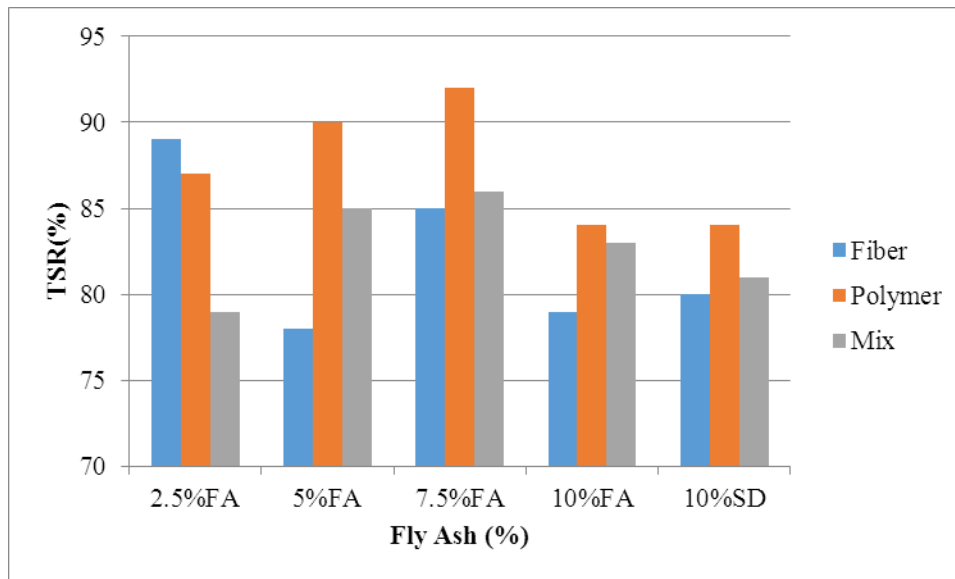
شکل 6. نتایج مدول برجهنگی نمونه‌های حاوی افزودنی‌های مختلف



شکل 7. نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم



شکل 8. نتایج آزمایش کشش غیر مستقیم در حالت اشباع



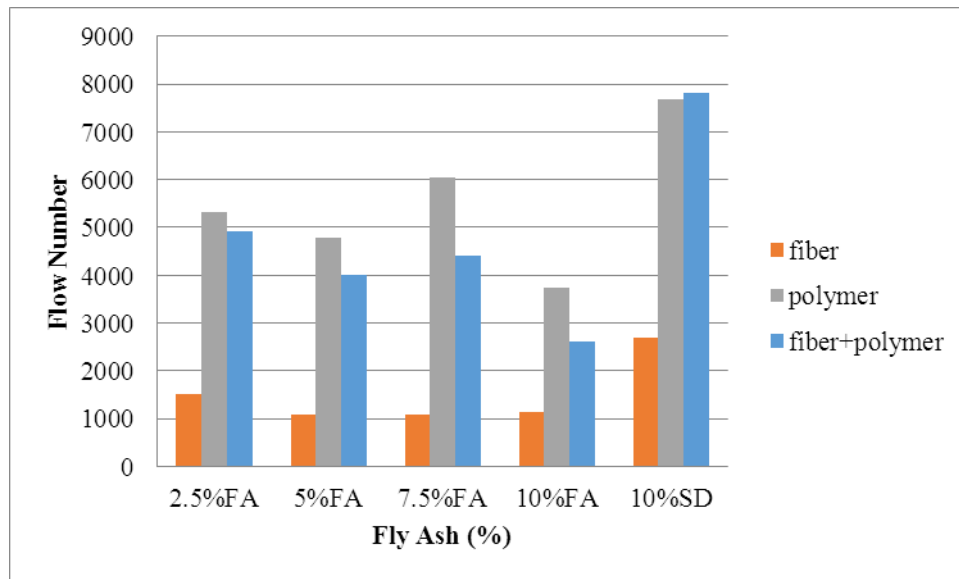
شکل 9. نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌ها

7-5- آزمایش خزش دینامیکی

شیارشدهگی یکی از خرابی‌های رایج در روسازی‌های آسفالتی می‌باشد و به تغییر شکل‌های دائمی گفته می‌شود که بصورت شیار فرو رفته در مسیر چرخ وسایل نقلیه به موازات محور طولی راه دیده می‌شود (Sureyya, Halit and Aksoy, 2007). لذا در این تحقیق شیارشدهگی نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. برای بررسی شیارشدهگی 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).

آنچه که به وضوح از اعداد و نمودار شکل (10) قابل برداشت است، تفاوت در مقاومت خزشی نمونه‌های اصلاح شده با پلیمر می‌باشد. حال آنکه این نمونه‌ها حاوی الیاف باشند یا خیر. این تفاوت قابل توجه بیانگر آن است که پلمر SBS توانسته است بطور مؤثری خصوصیات

شیارشدهگی مخلوط آسفالتی SMA را بهبود ببخشد. در تمامی حالات استفاده از فیلر پودر سنگ آهک نتایج قابل توجه‌تری را داشته است که می‌توان نتیجه گرفت خاکستر بادی اگر اثر منفی بر نمونه‌های آسفالتی نداشته باشد، اثر مثبتی نیز نخواهد داشت. هم چنین اثر خاکستر بادی در قیاس با پلیمر نمی‌تواند چندان با اهمیت باشد. چراکه در درصدهای مختلف خاکستر بادی در هر حالت تفاوت کمتر از زمانی است که نحوه اصلاح قیر تغییر می‌کند. به همین دلیل شاید بتوان نتیجه‌گیری نمود که اصلاح کننده‌های قیر، اثراتی به مراتب قابل توجه تر از فیلر بر میزان شیارشدهگی مخلوط‌های آسفالتی SMA خواهند داشت. لازم به ذکر است که نتایج به دست آمده بهترین نتایج مربوط به هر حالت بوده و در صورت نزدیک بودن اعداد به دست آمده در هر حالت (برای هر حالت 2 نمونه آزمایش شد)، مقدار میانگین آورده شده است.



شکل 10. نمودار نتایج آزمایش خزش دینامیکی نمونه‌ها در دمای 45° C

8- نتیجه گیری

کمتر از سایر نمونه‌ها بود. با وجود اینکه اعداد به دست آمده از آزمایش مارشال گویای استقامت و روانی واقعی نمونه‌های SMA نیستند، با اینحال شاید بتوان از این داده‌ها به منظور مقایسه نمونه‌های مختلف استفاده کرد.

5- در آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم، بهترین نتایج مربوط به استفاده همزمان از پلیمر SBS و الیاف در حالت 2/5% FA می باشد. پس از این حالت استفاده از پلیمر اثرگذار بوده و در آخرین حالت نیز (استفاده از الیاف) در حالت 10% FA و 10% SD بیشترین مقاومت کششی غیر مستقیم دیده شد. نکته حائز اهمیت، قرار گرفتن کلیه نمونه‌ها در کلیه حالات (درصدهای مختلف خاکستر بادی) در محدوده استاندارد TSR، یعنی $TSR < 70\%$ می باشد. در این آزمایش تغییرات در درصد فیلر خاکستر بادی نیز اثرات مشخص تری بر نتایج آزمایش داشت.

6- در آزمایش مدول برجهنگی، بالاترین مقدار مدول در تمامی حالات مربوط به 10% FA بود که این نتیجه بدین معناست که افزایش درصد خاکستر بادی تاثیر قابل توجهی بر مدول برجهنگی مخلوط‌ها داشته و

1- استفاده از خاکستر بادی به عنوان فیلر تاثیری بر کاهش ریزش قیر نداشته و ریزش قیر تنها به کمک اصلاح قیر (فیبر و یا پلیمر) کاهش می یابد.
2- در آزمایش ریزش قیر، تمامی نمونه‌ها شرایط استاندارد را ارضا کرده و در محدوده مجاز آیین نامه قرار می گیرند. استفاده از فیبر تاثیر قابل توجهی در کاهش ریزش قیر دارد. پس از این حالت استفاده همزمان از فیبر و پلیمر بیشترین اثرگذاری را داشته است. در صورتیکه استفاده از پلیمر تنها باعث می شود مقادیر مربوط به این آزمایش در محدوده مجاز قرار بگیرد و در کاهش آن تاثیر بالقوه‌ای ندارد.
3- آزمایش مارشال تنها به منظور دستیابی به داده‌های بیشتر انجام گرفته و قابل استناد نمی باشد. چراکه با توجه به آزمایش نیز مشخص شد که پراکندگی داده‌ها بسیار زیاد بوده و تغییر داده‌ها روند مشخصی ندارد. با اینحال نمونه‌های حاوی پلیمر مقادیر استقامت مارشال به نسبت بالاتری را در قیاس با نمونه‌های ساخته شده با قیر اصلاح نشده داشتند.

4- در آزمایش مارشال، مقادیر عدد روانی به طرز قابل توجهی برای نمونه‌های اصلاح شده با پلیمر SBS

آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه‌ای"، نشریه شماره 206، چاپ اول، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، مرکز مدارک علمی و انتشارات.

- بهبانی. ح.، زیاری. ح.، و ارجمندپور، ج.، (1392)، "مقایسه نتایج حاصل از آزمایش حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه‌ای (SMA) اصلاح شده با ترموپلاستیک الاستومرها"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.

- زیاری، ح. ایمانی نسب، ر.، (1392)، "مقایسه ی بهبود مقاومت خزشی مخلوط‌های آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه‌ای (SMA) با استفاده از پلیمرهای الاستومر- ترموپلاستیک"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.

- زیاری، ح. گلی، الف. (1386)، "اثر پلیمر SBS در اصلاح مخلوط آسفالتی بر اساس پهنه‌بندی آب و هوایی استان اصفهان"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.

- غنی‌زاده، ع.ر. و فخری، م. (1392)، "تأثیر پارامترهای پالس بارگذاری بر مدول برجهنگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از نظریه ویسکوالاستیک". مهندسی حمل و نقل، سال پنجم، شماره اول، پاییز، ص. 49-70.

- مختاری، ع. (1390)، "بررسی تاثیر افزودنی رئوفالت (RheoFalt WKR-2) به مخلوط‌های آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه‌ای (SMA) و مقایسه‌ی آن با افزودنی‌های دیگر"، پایان‌نامه ی کارشناسی ارشد، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، ایران.

- مدرس، الف. و حامدی، ح. ر. (1393)، "خصوصیات سختی و خستگی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با ضایعات بطری‌های پلاستیکی (PET) مهندسی حمل و نقل، سال پنجم، شماره چهارم، تابستان، ص. 533-546.

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

می توان گفت تاثیر فیلر در این تست بیش از سایر آزمایش‌ها قابل مشاهده است. همچنین مقادیر این تست در حالتی که برای اصلاح قیر از فیبر و پلیمر به صورت همزمان استفاده شد بیش از سایر حالات بود. 7- در آزمایش خزش دینامیکی، مقادیر عدد روانی برای نمونه‌های ساخته شده با فیبر به مراتب کمتر از نمونه‌های اصلاح شده با پلیمر می‌باشد. همچنین استفاده همزمان از فیبر و پلیمر نیز مقادیر عدد روانی بالایی را نتیجه می‌دهد که این خود نشانگر اثرگذاری بالای پلیمر در بالابردن مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی SMA می‌باشد. تغییرات عدد روانی در هریک از حالات نیز تابع روند خاصی نبوده اما در تمامی حالات استفاده از پودر سنگ به تنهایی بالاترین اثرگذاری را داشته است. همچنین هنگام استفاده از فیبر و در حالت FA 5٪، عدد روانی کمترین مقدار را دارد.

9- سپاسگزاری

از پرسنل محترم مرکز تحقیقات قیر و مخلوط‌های آسفالتی دانشگاه علم و صنعت ایران (ABRC) به دلیل همکاری صمیمانه، تشکر و قدردانی می‌گردد.

10- پی‌نوشت‌ها

1. Stone Matrix Asphalt
2. Styrene-Butadiene-Styrene
3. Present Serviceability Index
4. National Cooperative Highway Research Program
5. American Association of State Highway and Transportation Officials
6. Stone Dust
7. Indirect Tensile Strength
8. Tensile Strength Ratio
9. Universal Testing Machine

11- مراجع

- ایران، وزارت راه و شهرسازی، معاونت امور فنی، دفتر امور فنی و تدوین معیارها، مرکز تحقیقات و آموزش (1379) "طراحی و ارزیابی آزمایشگاهی مخلوط‌های

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 Amirkhanian, 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. Website: www.dot.state.oh.us/Divisions/ConstructionMgt/default.html.

-Sureyya Tayfur, Halit Ozen, Atakan Aksoy (2007), "Investigation of Rutting Performance of Asphalt Mixtures Containing Polymer Modifiers", Construction and Building Materials 21, pp.328-337.

-Troutbeck, R., Kennedy, C. (2005), "Review of the use of Stone Mastic Asphalt (SMA) surfacings by the Queensland Department of Main Roads", Queensland University of Technology.

-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.

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

-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, Development of a Mixture Design Procedure for Stone Matrix Asphalt (SMA). Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1997.66:pp.1-30.

-Churchill EV, Amirkhanian SN. "Coal Ash Utilization in Asphalt Concrete mixtures". J Mater Civil Eng 1999; 11(4):pp.295-301.

-Faheem AF. "Conceptual Phenomenological Model for Interaction of Asphalt Binders with Mineral Fillers". Doctoral dissertation, University of Wisconsin Madison; 2009.

-Georgia Department of Transportation, Homepage (2002), "SMA Research", Website: <http://www.dot.state.ga.us/dot/construction/material-research/b-admin/research/onlinereport/r-SMA2002.pdf>.

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