

ارزیابی آزمایشگاهی مخلوط‌های SMA حاوی الیاف نخل خرما، ته‌سیگار و درصد‌های مختلف تراشه آسفالت

سجاد تعجبیان، دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست،

دانشگاه تربیت مدرس، تهران

امیر کاووسی*، استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

Email: kavussi@yahoo.co.uk

دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۲۱ - پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۲۷

چکیده

آسفالت با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای (SMA) یک مخلوط با دانه‌بندی گسسته است که شامل درصد زیاد درشت‌دانه، قیر و فیلر می‌باشد. در مخلوط SMA، به دلیل وجود قیر زیاد و نیاز به جلوگیری از خارج شدن آن از مخلوط در زمان حمل و نقل آسفالت، به ماده جذب‌کننده قیر که نقش تثبیت‌کنندگی نیز دارد، نیاز می‌باشد. در این تحقیق، از الیاف نخل خرما، ته‌سیگار و تاپسل (الیاف سلولزی رایج) استفاده شد. به منظور کاهش هزینه‌ها و حفظ محیط‌زیست، از تراشه آسفالت در ساخت مخلوط‌های SMA استفاده شد. هدف از این تحقیق، بررسی تأثیر الیاف نخل خرما به‌عنوان الیاف دورریز بومی و الیاف ته‌سیگار به‌عنوان یک ماده‌ی آلاینده محیط‌زیست و درصد‌های مختلف وزنی تراشه آسفالت در مخلوط SMA بود. بدین منظور، به بررسی خصوصیات ریزش، حساسیت رطوبتی و شیارشدگی مخلوط‌های SMA تهیه شده با این مواد، با استفاده از آزمایش‌های سید ریزش قیر، مقاومت کششی غیرمستقیم و مسیر چرخ هامبورگ پرداخته شد. نتایج حاکی از آن است که در آزمایش ریزش قیر، مخلوط‌های آسفالتی حاوی الیاف ته‌سیگار عملکرد بهتری را در مقایسه با مخلوط‌های حاوی دو الیاف دیگر نشان دادند. نتایج آزمایش‌های کشش غیرمستقیم و شیارشدگی نشان داد که با افزایش درصد تراشه آسفالت، مقاومت کششی غیرمستقیم افزایش و عمق شیار کاهش می‌یابد. حساسیت رطوبتی نمونه‌های حاوی ۱۵٪ تراشه و الیاف نخل خرما از سایر مخلوط‌ها کمتر بود. گرچه در شیار شدگی، نمونه‌های حاوی الیاف تاپسل عملکرد بهتری داشتند، اما عملکرد نمونه‌های حاوی الیاف نخل خرما و ته‌سیگار نیز قابل قبول بود. می‌توان گفت که الیاف نخل خرما و الیاف ته‌سیگار در کنار تراشه آسفالت می‌توانند عملکرد خوبی در بهبود خصوصیات مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالت از خود به‌جای بگذارند. این الیاف می‌توانند جایگزین خوبی برای الیاف گران‌قیمت مانند تاپسل باشند و در کنار استفاده از تراشه در مخلوط می‌توانند مخلوطی مقاوم و با دوام عرضه دهند.

واژه‌های کلیدی: آسفالت با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای، تراشه آسفالت، الیاف تاپسل، الیاف نخل خرما، الیاف ته‌سیگار

۱. مقدمه

قیر الیاف، از ریزش قیر در مخلوط جلوگیری می‌کند. به دلیل عملکرد مناسب آسفالت با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای در برابر تغییر شکل‌های دائمی، استفاده از آن در مناطق با آب و هوای گرم که خطر شیارشدگی در آنها زیاد است، به شدت توصیه می‌شود (جمور و همکاران، ۲۰۱۹).

آسفالت با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای ابتدا در اروپا در اواخر دهه‌ی ۱۹۶۰ و اوایل دهه‌ی ۱۹۷۰ برای مقابله با اثر خرابی ناشی از لاستیک‌های یخ‌شکن^۳ به کار گرفته شد. نتایج آزمایش‌های مختلف انجام‌شده، مقاومت زیاد این مخلوط‌ها در برابر اثرات بارهای سنگین ترافیکی بود. SMA حاوی درصد زیاد درشت‌دانه (در حدود ۷۰ الی ۸۰ درصد مخلوط)، میزان قیر زیاد (در حدود ۶ تا ۷/۵ درصد)، فیلر (در حدود ۸ تا ۱۲ درصد) و الیاف (با حداقل میزان ۰/۳ درصد) می‌باشد (بلازجووسکی، ۲۰۱۱).

مخلوط SMA حاوی سنگدانه‌های درشت، فیلر و قیر و همچنین تثبیت‌کننده‌ها است که منجر به مصرف قابل توجهی از منابع طبیعی برای تولید این نوع از مخلوط‌های آسفالت می‌شود (بلازجووسکی، ۲۰۱۱). با توجه به سطح عملکرد مناسب و مواد اولیه مورد نیاز برای چنین مخلوطی، SMA ممکن است به‌طور قابل توجهی گران‌تر از مخلوط HMA معمولی تمام شود. اما ترکیب فناوری SMA با RAP و انواع الیاف زائد و دورریز به‌طور بالقوه هزینه‌های تولید را کاهش داده و این مصالح را از نظر محیط‌زیستی سازگار کرده و مخلوطی بادوام تولید می‌کند (لیندری و همکاران، ۲۰۱۲). بنابراین، ترکیب مواد و مصالح زائد و دورریز مختلف در مخلوط‌های SMA می‌تواند به‌منظور توسعه راه‌حل‌های پایدارتر بدون به خطر انداختن عملکرد شناخته‌شده آنها بررسی شود (فرناندز و همکاران، ۲۰۱۸). با توجه به مزایای زیست‌محیطی فراوان استفاده از مصالح آسفالت بازیافتی و الیاف زائد و دورریز،

عملکرد روسازی‌های آسفالتی در ایران، مانند بسیاری از کشورهای در حال توسعه، با انتظارات و خواسته‌های جوامع امروزی سازگار نیست و سالانه مقدار زیادی از بودجه کشور صرف بازسازی روسازی راه‌ها و ترمیم آنها می‌گردد. همواره، به‌منظور دستیابی به روسازی با عملکرد مطلوب، تحقیقات در زمینه‌ی عیب‌یابی و ارائه راه‌حل می‌تواند راهگشا بوده و سبب صرفه‌جویی در هزینه‌هایی گردد که سالانه به دلیل وجود ضعف‌های فوق که عمده دلایل وقوع آنها استفاده از شیوه‌های سنتی ساخت و تولید آسفالت است، تحمیل می‌شود.

به دلیل افزایش روزانه بارهای ترافیکی در راه‌ها و روسازی‌های آسفالتی، طراحی و اجرای لایه‌های آسفالتی تقویت‌شده لازم و ضروری است. آسفالت با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای (SMA^۱) به‌عنوان یک گزینه‌ی جایگزین، می‌تواند عملکرد خوبی در برابر خرابی‌ها داشته باشد. ایده‌ی اصلی پیرامون تولید این نوع مخلوط آسفالتی بر پایه‌ی تماس سنگ به سنگ^۲ است. در حقیقت، این نوع آسفالت با تغییر دانه‌بندی به دانه‌بندی گسسته، نسبت درشت‌دانه در مخلوط آسفالتی را افزایش می‌دهد و به دنبال آن توانایی روسازی آسفالتی در تحمل بارهای ترافیکی سنگین افزایش می‌یابد. آسفالت با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای به دلیل درصد زیاد قیر مورد استفاده در مخلوط و فضای خالی زیاد بین درشت‌دانه‌ها، به تثبیت‌کننده برای جلوگیری از ریزش و بیرون زدن قیر از مخلوط آسفالتی نیاز دارد؛ در نتیجه، از الیاف خاصی برای پایداری، تقویت و توزیع یکنواخت مخلوط آسفالتی استفاده می‌شود. در این نوع آسفالت، الیاف به‌صورت مستقیم به مخلوط اضافه می‌شوند و به دلیل شکستگی ساختار الیاف در دمای اختلاط که به وسیله‌ی نیروی برشی از جانب سنگدانه‌ها و حل شدن پوشش الیاف ایجاد می‌شود، در کنار خصوصیت جذب

^۱- Stone matrix asphalt

^۲- Stone on stone

^۳- Studded tire

کشش غیرمستقیم که به ترتیب برای بهینه‌سازی مخلوط‌های SMA و بررسی خصوصیات مهندسی مخلوط‌های تثبیت‌شده به‌کار گرفته شدند، بررسی شد (کومار و راویتجا، ۲۰۱۹). مواد افزودنی مورد استفاده در این تحقیق، الیاف طبیعی مانند الیاف نارگیل، سیسال^۳ (گیاه بومی جنوب مکزیک) و موز بود. نتایج نشان داد که اثر تقویت الیاف در ابتدا با افزایش میزان آنها در SMA افزایش می‌یابد. اما در مقادیر بیش از ۰/۳ درصد وزنی باعث دلمه‌شدگی و به یکدیگر چسبیدن آنها می‌شود. بنابراین، اثر تقویت‌کنندگی آن کاهش می‌یابد. در نتیجه، مخلوطی با سختی و مقاومت کم‌تر حاصل می‌شود. نتیجه این تحقیق آن بود که بهترین عملکرد مخلوط SMA در میزان ۰/۳ درصد وزنی الیاف نارگیل حاصل می‌شود. وجود الیاف در مخلوط‌های SMA باعث پایداری بیشتر و نسبت افزایش مقاومت کششی در میزان ۰/۳ درصد وزنی الیاف می‌شود. بهترین عملکرد در SMA با الیاف نارگیل حاصل شده و این نشان‌دهنده مقاومت بیشتر آن در برابر خرابی ناشی از رطوبت است.

مطالعه دیگری توسط رحمان و مهاجرانی (۲۰۲۰) با هدف بررسی بازایافت ته‌سیگار (CB^۴) در آسفالت ماستیک درشت‌دانه (SMA) با استفاده از ته‌سیگارهای کپسوله‌شده با قیر انجام شد. نمونه‌های SMA در آزمایشگاه با درصد‌های مختلف ته‌سیگارهای کپسوله‌شده قیری تهیه شدند. نتایج پایداری و روانی مارشال هنگامی که در مخلوط SMA به‌کار گرفته شده بود، بهبود قابل توجهی در مقاومت نشان داد. گنجاندن ۱٪ و ۲٪ ته‌سیگارهای کپسوله‌شده در SMA باعث افزایش پایداری نمونه‌ها شد. SMA تهیه شده با ۱٪ CB کپسوله‌شده در مقایسه با نمونه شاهد، عدد روانی کمتری را نتیجه داد. با این حال، هنگامی که ۲٪ CB کپسوله‌شده در SMA استفاده شد، عدد روانی افزایش

عملکرد آسفالت بازایافتی به همراه چند نوع الیاف در این تحقیق مورد ارزیابی قرار گرفت. نمونه‌های آسفالتی ساخته شده در این تحقیق حاوی سه نوع الیاف، یعنی الیاف تاپسل^۱ به عنوان الیاف سلولزی مرجع، الیاف نخل خرما^۲ به عنوان الیاف طبیعی دورریز و الیاف ته‌سیگار به عنوان الیاف زائد و دورریز و ۳٪ تراشه آسفالت (صفر، ۱۵ و ۳۰ درصد وزنی) سنگدانه بودند. سپس، به‌منظور بررسی تأثیر الیاف و تراشه آسفالت بر مخلوط SMA، الزامات حجمی، پتانسیل ریزش قیر، حساسیت رطوبتی و شیارشدگی ارزیابی شدند.

۲. مرور منابع

پژوهشگران متعددی با انجام آزمایش‌های گوناگون به بررسی تأثیر الیاف و مصالح آسفالت بازایافتی بر مخلوط SMA پرداخته‌اند. لذا، در این بخش سعی شده نتایج برخی تحقیقات در این زمینه بیان گردد.

مونینادی و هوات (۲۰۰۶) مطالعه‌ای در مورد عملکرد خستگی مخلوط آسفالت ماستیک درشت‌دانه با الیاف سلولزی نخل خرما انجام دادند. به‌طور کلی، تصور بر آن است که مخلوط‌های با دانه‌بندی گسسته در برابر خستگی مقاومت کمی دارند. در این مطالعه، الیاف سلولزی در قیر PG64-22 با نسبت الیاف ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱ درصد وزن سنگدانه‌ها از قبل با قیر مخلوط شدند. قیر اصلاح شده با الیاف، خواص بهبودیافته‌ای را نشان داد. به‌طوری که قیر PG64-22 استفاده شده به قیر PG70-22 ارتقاء پیدا کرد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که الیاف سلولزی نخل خرما عملکرد خستگی مخلوط SMA را بهبود بخشیدند که در میزان الیاف حدود ۰/۶ درصد به حداکثر خود رسید. تنش کششی و سختی نیز به همین ترتیب بهبود یافت.

در تحقیقی، تأثیر مواد افزودنی بر خصوصیات مخلوط‌های SMA با استفاده از آزمایش‌های مارشال و

^۳ - Sisal

^۴ - Cigarette butts

^۱ - Topcel

^۲ - Date palm fiber

مخلوطها را به گونه ای افزایش نمی دهد که بر عملکرد مخلوط بازیافت شده تأثیر معناداری بگذارد.

۳. مواد و مصالح

در این بخش، مصالح و مواد مورد استفاده برای ساخت مخلوط آسفالت ماستیک درشت دانه به همراه خصوصیات آنها شرح داده شده است که شامل سنگدانه، قیر، عامل ضد عریان شدگی، الیاف و تراشه آسفالت می باشد.

۱-۳. مصالح سنگی

مصالح سنگی و فیلر مورد استفاده در این تحقیق از نوع سیلیسی و شکسته بوده و از معدنی واقع در منطقه پاکدشت تهران تهیه شده است. دانه بندی به کار رفته در این تحقیق مطابق با گزارش شماره ۴۲۵ NCHRP با حداکثر اندازه اسمی ۱۲/۵ میلی متر می باشد. ویژگی های مصالح سنگی در جدول ۱ نشان داده شده است.

می یافت. با وجود کاهش در عدد روانی، همه نتایج در حد پایین استاندارد برای عدد روانی بودند. این یک چشم انداز امیدوارکننده برای استفاده از ته سیگارها در مخلوط های SMA است. نتیجه پایداری و روانی مارشال مخلوط SMA حاوی ۳٪ CB نشان دهنده کاهش قابل توجه مقاومت پایداری در مقایسه با سایر نمونه ها است. هنگامی که نمونه های حاوی ته سیگارهای کپسوله شده با قیر تهیه شدند، افزایش قابل توجهی در مدول برجهنگی حاصل شد. این افزایش برای نمونه های تهیه شده با ۱٪ و ۲٪ ته سیگار در هر سه دمای ۱۰، ۲۵ و ۴۰ درجه سلسیوس مشاهده شد. مشخص شد که ته سیگارهای کپسوله شده در قیر در آسفالت ماستیک درشت دانه، مقاومت در برابر تغییر شکل های دائمی را تا ۲٪ ته سیگارها (از نظر وزنی) بهبود می بخشد.

واتسون و همکاران (۲۰۰۸) در تحقیقی به ارزیابی اثر RAP^۱ بر عملکرد کلی مخلوط های SMA در جورجیا پرداختند. چهار نوع RAP در چهار سطح (صفر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) با چهار منبع سنگدانه ترکیب شدند. نتایج حاکی از آن بود که افزایش میزان RAP منجر به مقاومت کششی بیشتر (هم تر و هم خشک) در آزمایش حساسیت رطوبتی می شد. به علاوه، نتیجه گردید که حداکثر تا ۲۰٪ RAP می توانست بدون تأثیر قابل توجه بر عملکرد مخلوط آسفالتی استفاده شود. فقط عمر خستگی (در سطوح بالای کرنش) با افزودن ۳۰٪ RAP به طور قابل توجهی کاهش می یابد. RAP با دانه بندی ریز نیاز به قیر جدید را کاهش می دهد، که به معنای افزایش منافع اقتصادی است. با این حال، مخلوط ها سفت تر می شوند؛ زیرا نسبت قیر پیر شده به قیر جدید بیشتر شده و ممکن است در برابر ترک خوردگی خستگی حساس تر باشند. اما در مقابل، RAP دارای دانه بندی درشت، مخلوط آسفالتی با نسبت قیر پیر شده به قیر جدید کم ایجاد می کند. لذا، سختی

¹ Reclaimed Asphalt Pavement

جدول ۱. نتایج آزمایش‌های مصالح سنگی

مشخصه	روش استاندارد	نتیجه	الزام
مصالح سنگی درشت‌دانه			
افت وزنی در مقابل سایش به روش لس‌آنجلس (درصد)	ASTM C131	۱۶	حداکثر ۳۰
سنگدانه‌های پهن و دراز (۳:۱) (درصد)	ASTM D4791	۲/۱	حداکثر ۲۰
سنگدانه‌های پهن و دراز (۵:۱) (درصد)	ASTM D4791	۰/۹	حداکثر ۵
جذب آب (درصد)	ASTM C127	۱/۸	حداکثر ۲
وزن مخصوص	ASTM C127	۲/۵۳۹	-
افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (درصد)	ASTM C88	۰/۱	حداکثر ۱۵
شکستگی مصالح سنگی (یک وجه) (درصد)	ASTM D5821	۱۰۰	حداقل ۱۰۰
شکستگی مصالح سنگی (دو وجه) (درصد)	ASTM D5821	۹۷	حداقل ۹۰
مصالح سنگی ریزدانه			
افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (درصد)	ASTM C88	۰/۳	حداکثر ۱۵
گوشه‌داری (درصد)	ASTM C1252	۴۵/۵	حداقل ۴۵
جذب آب (درصد)	ASTM C128	۲/۳	-
وزن مخصوص	ASTM C128	۲/۵۱۸	-
دامنه خمیری	ASTM D4318	غیر پلاستیک	غیر پلاستیک
حد خمیری	ASTM D4318	-	-
حد روانی	ASTM D4318	غیر قابل تعیین	حداکثر ۲۵
فیلر مصالح سنگی			
وزن مخصوص	ASTM D854	۲/۶۷۳	-
دامنه خمیری	ASTM D4318	غیر پلاستیک	-
حد خمیری	ASTM D4318	-	-
حد روانی	ASTM D4318	غیر قابل تعیین	-

۳-۲. قیر

قیر مورد استفاده در مخلوط‌ها، قیر با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ بود که از شرکت نفت پاسارگاد تهران تهیه شد. ویژگی‌های قیر مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. نتایج آزمایش‌های قیر خالص

مشخصه	روش استاندارد	نتیجه	محدوده مشخصات
			حداکثر / حداقل
آزمایش‌های قیر اولیه			
درجه نفوذ (۰/۱ میلی‌متر)، در ۲۵ °C، ۱۰۰ گرم، ۵ ثانیه	ASTM D5	۶۳	۷۰ / ۶۰
نقطه نرمی (درجه سلسیوس)، در آب مقطر	ASTM D36	۵۱/۴	۵۶ / ۴۹
کشش‌پذیری (سانتی‌متر)، در ۲۵ °C، ۵ سانتی‌متر بر دقیقه	ASTM D113	۱۰۰ <	- / ۱۰۰
نقطه اشتعال، ظرف روباز کلیولند (درجه سلسیوس)	ASTM D92	۳۰۸	- / ۲۳۲
حلالیت در تری‌کلرواتیلن (درصد)	ASTM D2042	۹۹/۹۰	- / ۹۹

ارزیابی آزمایشگاهی مخلوط های SMA حاوی الیاف نخل خرما، ته سیگار و درصد های مختلف تراشه آسفالت

-	-	۱/۰۱۶	ASTM D70	چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)، در ۲۵ °C
-	-	۷۷۹	ASTM D2170	کندروانی کینماتیک (سانتی استوکس)، در ۱۲۰ °C
-	-	۳۷۲	ASTM D2170	کندروانی کینماتیک (سانتی استوکس)، در ۱۳۵ °C
-	-	۱۲۳	ASTM D2170	کندروانی کینماتیک (سانتی استوکس)، در ۱۶۰ °C
-	۰/۸	۰/۰۲	ASTM D1754	لعاب نازک قیر، تغییر جرم اولیه (درصد)
آزمایش های قیر باقی مانده پس از آزمایش لعاب نازک قیر				
-	-	۴۵	ASTM D5	درجه نفوذ (۰/۱ میلی متر)، در ۲۵ °C، ۱۰۰ گرم، ۵ ثانیه
۵۴	-	۷۱	ASTM D5	درجه نفوذ قیر باقی مانده نسبت به قیر اولیه (درصد)
۵۰	-	۵۰<	ASTM D113	کشش پذیری (سانتی متر)، در ۲۵ °C، ۵ سانتی متر بر دقیقه

مخلوط کن دور تند (۲۰۰۰ دور بر دقیقه) و به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس انجام پذیرفت. سپس، آزمایش های تعیین وزن مخصوص، ویسکوزیته و نقطه نرمی روی قیر اصلاح شده انجام پذیرفت که نتایج آن در جدول ۳ آورده شده است.

۳-۳. افزودنی ضد عریان شدگی

در این تحقیق، از افزودنی ضد عریان شدگی گریپر برای بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر رطوبت استفاده شد. مشخصات این افزودنی زرد رنگ در جدول ۲ آورده شده است. اختلاط قیر و افزودنی ضد عریان-شدگی به میزان ۰/۳ درصد وزنی قیر با استفاده از

جدول ۲. مشخصات افزودنی ضد عریان شدگی گریپر

نتیجه	مشخصه
۰>	نقطه انجماد (درجه سلسیوس)
۱/۰۲	چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)
۲۵۰۰	کندروانی (سانتی پواز)، در ۲۰ °C
۱۵۰<	نقطه اشتعال (درجه سلسیوس)

جدول ۳. نتایج آزمایش های قیر اصلاح شده با افزودنی ضد عریان شدگی گریپر (۰/۳ درصد وزنی قیر)

نتیجه	روش استاندارد	مشخصه
آزمایش های قیر اصلاحی		
۱/۰۱۵	ASTM D70	چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)، در ۲۵ °C
۷۴۳	ASTM D2170	کندروانی کینماتیک (سانتی استوکس)، در ۱۲۰ °C
۳۳۵	ASTM D2170	کندروانی کینماتیک (سانتی استوکس)، در ۱۳۵ °C
۱۲۲	ASTM D2170	کندروانی کینماتیک (سانتی استوکس)، در ۱۶۰ °C

۳-۴. الیاف

الیاف نخل خرما از نخلستان های اردکان یزد و الیاف ته-سیگار از ظروف ته سیگار واقع در محل های تجمع خاص در دانشگاه تهیه شدند. شکل های ۱ تا ۳، الیاف به کار رفته و جدول ۴ مشخصات الیاف مورد استفاده در این تحقیق را نشان می دهند.

به منظور کاهش ریزش قیر و افزایش دوام مخلوط، از سه الیاف سلولزی تاپسل، نخل خرما و ته سیگار با نسبت ۰/۴ درصد وزنی مخلوط استفاده شد. الیاف تاپسل که تولید آلمان است از شرکت دانش آوران فاتح،



شکل ۱. الیاف تاپسل



شکل ۲. الیاف نخل خرما قبل و بعد از خرد شدن



شکل ۳. ته سیگارهای کپسوله شده

جدول ۴. مشخصات الیاف مورد استفاده

الیاف			ویژگی
ته سیگار	نخل خرما	تاپسل	
۴۵	۳۹/۸	۸۰	میزان سلولز (%)
۲۷	۶	۶	میانگین طول الیاف (میلی متر)
۶/۵	۰/۱	۴/۵	میانگین ضخامت الیاف (میلی متر)
۴/۵	۵/۹۵	۶/۵-۸/۵	pH
۱/۳	۱/۰۵	۰/۴۲-۰/۴۸	چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)

شود (مهاجرانی و همکاران، ۲۰۱۷). پس از اعمال این فرایندها، ته سیگارها ابتدا با سنگدانه‌ها مخلوط شده و سپس میزان قیر مورد نیاز مخلوط که از تفاضل قیر کل نمونه و قیر جذب شده توسط ته سیگارها به دست می‌آید، به مخلوط اضافه شد. لازم به ذکر است که به دلیل وجود مواد مضر و سمی در الیاف ته سیگار، این الیاف به صورت رشته‌ای در نیامدند تا از آلوده کردن مخلوط آسفالتی جلوگیری شود؛ گرچه هنگام اختلاط مخلوط آسفالتی با استفاده از دستگاه میکسر، الیاف ته سیگار تا حد زیادی از هم باز شده و به صورت دانه‌ای در مخلوط آسفالتی عمل نمی‌کنند.

۳-۵. تراشه آسفالت

در این تحقیق، تراشه آسفالت (RAP) با نسبت‌های صفر، ۱۵ و ۳۰ درصد وزنی مصالح سنگی به مخلوط اضافه شدند. تراشه آسفالت از کارخانه آسفالت سازمان مهندسی و عمران شهر تهران تهیه شد که حاوی مصالح سنگی با جنس سیلیس بودند. استخراج قیر از تراشه‌های آسفالت مطابق با روش استاندارد ASTM D2172 انجام شد. مشخصات و درصد قیر بازیافتی در جدول ۵ آمده است.

الیاف به روش خشک به مخلوطها اضافه شدند. در این فرآیند، قبل از افزودن قیر به سنگدانه‌ها، الیاف با سنگدانه‌ها مخلوط و سپس در ادامه قیر اضافه می‌شد. الیاف تاپسل و نخل خرما به همین روش به مخلوط اضافه شدند؛ اما الیاف ته سیگار با مقداری تفاوت به مخلوط اضافه شدند. به این ترتیب که پیش از مخلوط کردن ته سیگارها با مخلوط آسفالتی، آنها را در گرم‌خانه با دمای ۱۰۵ درجه‌ی سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت قرار داده می‌شدند. این فرایند ته سیگارها را خشک می‌کند و رطوبت محبوس در آنها دفع می‌شود. بعد از فرایند خشک کردن، در مرحله‌ی دوم ته سیگارها با آغشته شدن در قیر داغ (حرارت داده شده تا دمای ۱۵۰ درجه‌ی سلسیوس) به طور کامل با قیر پوشش داده شده و به عبارتی کپسوله می‌شدند. یکی از دلایل کپسوله‌سازی ته سیگارها، جلوگیری از آلودگی آسفالت توسط مواد شیمیایی مضر و سمی موجود در ته سیگار بود. همچنین، مشخص شد که غوطه‌ور کردن ته سیگارها در قیر داغ در یک دوره‌ی چند دقیقه‌ای به قیر این اجازه را می‌دهد تا به طور کامل در ته سیگار نفوذ کرده و جذب آن شود. سپس، به ته سیگارها فرصت داده می‌شد تا خنک شوند. ته سیگارها قبل از قرار داده شدن در قیر توزین شده و بعد از آن دوباره وزن می‌شوند. این امر باعث می‌شود وزن دقیق قیر جذب شده نیز مشخص

جدول ۵. مشخصات قیر استخراج شده از تراشه آسفالت

نتیجه	روش استاندارد	مشخصات قیر
۶۳	ASTM D5	درجه نفوذ (۰/۱ میلی‌متر)، در ۲۵ °C، ۱۰۰ گرم، ۵ ثانیه
۵۱/۴	ASTM D36	نقطه نرمی (درجه سلسیوس)
۴/۳	ASTM D2172	درصد قیر

که در آن، Pb_N درصد قیر جدید، Pb_T میزان قیر بهینه، Pb_R درصد قیر موجود در تراشه آسفالت و TR درصد تراشه آسفالت است.

تراشه آسفالت مطابق با روش SHRP به مخلوط اضافه شد. در این روش، تراشه آسفالت قبل از مخلوط شدن با سنگدانه‌های معدنی و قیر جدید، به مدت دو

درصد قیر جدید مخلوط‌های آسفالتی حاوی تراشه آسفالت (RAP)، که به عنوان درصدی از وزن کل مخلوط است، با رابطه (۱) محاسبه شد (استاندارد استرالیا، ۱۹۹۵):

$$Pb_N = Pb_T - Pb_R \times TR \quad (1)$$

ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس نگهداری می‌شد (آنتونس و همکاران، ۲۰۱۹).

۴. آزمایش‌ها

در این بخش، ابتدا طرح اختلاط و روش تعیین درصد قیر بهینه شرح داده شده است. سپس به توضیح آزمایش‌های انجام‌شده که شامل آزمایش‌های ریزش قیر، حساسیت رطوبتی و شیارشدگی بود، پرداخته شده است.

۴-۱. طرح اختلاط

روش طراحی مخلوط SMA مطابق با گزارش شماره ۴۲۵ NCHRP انجام شد. هنگام طراحی مخلوط‌های SMA، پیشنهاد می‌شود که حداقل سه دانه‌بندی آزمایشی در ابتدا ارزیابی شود. برای ارزیابی خصوصیات حجمی مخلوط‌ها با محدوده‌های مختلف دانه‌بندی، تعداد ۱۲ نمونه (چهار نمونه یکسان برای هر دانه‌بندی آزمایشی) طبق روش طراحی مخلوط به روش مارشال (ASTM D1559) به عنوان متداول‌ترین روش طراحی بتن آسفالتی ساخته شدند. دماهای اختلاط و تراکم برای ساخت نمونه‌های SMA مطابق با ASTM D2493 به گونه‌ای انتخاب شدند که ویسکوزیته به ترتیب 20 ± 170 و 30 ± 280 سانتی‌پواز باشد. این معیار برای تعیین دماهای اختلاط و تراکم قیر مخلوط-های آسفالتی در نظر گرفته شد. نمونه‌های آزمایشگاهی تهیه شده در دمای تراکم با وارد کردن ۵۰ ضربه چکش

مارشال در هر طرف نمونه تهیه شدند. دانه‌بندی مطلوب و یکپارچگی اسکلت سنگدانه‌ای با تماس سنگ به سنگ زمانی قطعیت پیدا می‌کند که میزان فضای خالی موجود در مصالح سنگی درشت‌دانه‌ی مخلوط SMA (VCA_{MIX}) برابر یا کمتر از میزان فضای خالی موجود در مصالح درشت‌دانه در شرایط خشک متراکم‌شده با میله (VCA_{DRC}) باشد. از سه دانه‌بندی آزمایشی ارزیابی‌شده، دانه‌بندی حاوی کمترین درصد از درشت-دانه که حداقل الزامات VMA را برآورده کرده و دارای VCA_{MIX} کمتر از VCA_{DRC} باشد، به‌عنوان دانه‌بندی بهینه انتخاب شد.

پس از انتخاب دانه‌بندی، برای رسیدن به درصد فضای خالی مطلوب، لازم است مقدار قیر تنظیم شود. در این حالت، نمونه‌های اضافی باید با استفاده از دانه‌بندی انتخاب‌شده و میزان قیر متغیر تهیه شوند. میزان قیر بهینه به گونه‌ای انتخاب می‌شود که ۴٪ فضای خالی در مخلوط ایجاد شود. تعداد نمونه‌های مورد نیاز این قسمت از روش طراحی مخلوط، ۱۲ مورد است که سه نمونه متراکم شده و یک نمونه متراکم‌نشده در سه درصد قیر متفاوت فراهم می‌شود. دوباره خصوصیات مخلوط مشخص می‌شوند و مقدار قیر بهینه انتخاب می‌شود. مخلوط SMA انتخاب‌شده باید بسته به روش تراکم مورد استفاده، دارای خصوصیتی باشد که ضوابط نشان داده شده در جدول ۶ را برآورده کند (براون و کولی، ۱۹۹۹).

جدول ۶. الزامات مخلوط SMA برای طراحی با تراکم مارشال (براون و کولی، ۱۹۹۹)

الزامات	مشخصه
حداقل ۶	قیر (%)
۴	فضای خالی (%)
حداقل ۱۷	VMA (%)
کمتر از VCA_{DRC}	VCA (%)
حداقل ۶۲۰۰	پایداری مارشال (نیوتن)
حداقل ۷۰	TSR (%)
حداکثر ۰/۳۰	ریزش قیر (%)

۴-۲. ریزش قیر



• شکل ۴. سبد آزمایش ریزش قیر

۴-۳. حساسیت رطوبتی

به دلیل اثرات مخرب آب، ممکن است میزان خرابی- های روسازی ها وقتی آب به راحتی وارد آنها شود، به میزان قابل توجهی افزایش یابد. بین نفوذپذیری مخلوط و احتمال آسیب رطوبتی رابطه‌ی نزدیکی وجود دارد. اگر روسازی های آسفالتی غیرقابل نفوذ شوند، آسیب- های رطوبتی به ندرت اتفاق می افتند. با این حال، ممکن است منجر به تغییر شکل های دائمی بیش از حد روسازی زیر بارهای سنگین ترافیکی و پدیده قیرزدگی در دمای زیاد شوند (ترل و سواپلمی، ۱۹۹۴). در برخی از موارد، خرابی به صورت یک جدایش کامل از مخلوط های آسفالتی در طی چند سال پس از ساخت روسازی رخ می دهد (شا، ۱۹۹۹). حساسیت رطوبتی یک مخلوط را می توان با انجام آزمایش AASHTO T 283 ارزیابی کرد. همان طور که در این روش تعریف شده است، مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط ها را می توان با استفاده از بارهای فشاری در امتداد یک صفحه قطری از طریق دو نوار بارگذاری مقابل هم برای هر دو نمونه خشک و تر اندازه گیری کرد.

برای شروع این آزمایش، هر نمونه مارشال باید به جای ۵۰ ضربه به هر طرف، با تنظیم تعداد ضربات مطابق با گزارش NCHRP ۴۲۵، در 1 ± 6 درصد فضای خالی متراکم شود. حداقل تعداد نمونه ها برای هر

حساسیت به ریزش در مخلوط های SMA از مخلوط- های متداول با دانه بندی متراکم اهمیت بیشتری دارد. آزمایشی که برای این منظور توسط NCAT تهیه شده برای شبیه سازی در شرایطی است که مخلوط احتمالاً هنگام تولید، ذخیره، انتقال و اجرا قرار می گیرد. ریزش، آن بخشی از مخلوط (ریزدانه و سیمان آسفالتی) است که از مخلوط جدا شده و به سمت پایین جریان می یابد. AASHTO T305 که از روش NCAT اقتباس شده است، باید برای تعیین خصوصیات ریزش مخلوط های آسفالت متراکم نشده استفاده شود. شکل ۴، دستگاه آزمون را نشان می دهد. در این آزمایش، نمونه ای از مخلوط به جرم 1200 ± 200 گرم در یک سبد سیمی گذاشته شده و آن سبد روی صفحه یا ظرفی در یک گرم خانه به مدت یک ساعت قرار داده شده و جرم موادی که از سبد عبور می کنند و روی صفحه جمع می شوند، اندازه گیری می شود. سپس، این جرم به عنوان درصدی از جرم نمونه اولیه بیان می شود. هنگام استفاده از آزمایش به عنوان بخشی از روش طراحی مخلوط، آزمایش باید در دو دما انجام شود تا اثر احتمالی تغییر دما در کارخانه در هنگام تولید بر مخلوط مشخص شود. دمای اول، دمای پیش بینی شده تولید کارخانه ای آسفالت (یا دمای اختلاط) و دمای دوم باید ۱۵ درجه سلسیوس (۲۷ درجه فارنهایت) بیشتر از دمای اول باشد. نمونه های تکراری باید برای این آزمایش اجرا شوند. بنابراین، به حداقل چهار نمونه برای انجام آزمون نیاز است.

برای محاسبه ی ریزش قیر در یک مخلوط از رابطه (۲) استفاده می شود:

$$\text{درصد ریزش} = \frac{M_f - M_i}{M_t} \quad (2)$$

که در آن M_f جرم نهایی ظرف، M_i جرم اولیه ظرف و M_t جرم کل مخلوط است. مطابق با AASHTO T305، حداکثر میزان ریزش قیر برابر با ۰/۳ درصد است.

بارگذاری وسایل نقلیه سنگین تحت اثر حرکت تدریجی مصالح روسازی زیر بارهای ترافیکی. میزان فرورفتگی به طور قابل توجهی به کیفیت بتن آسفالتی و همچنین خصوصیات مکانیکی لایه‌های دیگر بستگی دارد (تاپکین، ۲۰۰۸). بر اساس تحقیقات قبلی، شیارشدگی مهم‌ترین نوع خرابی در روسازی آسفالتی در نظر گرفته شده است. اگرچه سنگدانه، قیر و فضای خالی سه پارامتر مهم بتن آسفالتی هستند که بر عملکرد شیارشدگی روسازی‌ها تأثیر می‌گذارند، اما شکل و بافت سنگدانه‌ها نقش مهمی در میزان به هم پیوستگی سنگدانه‌ها و در نتیجه میزان شیارشدگی روسازی‌ها دارند (شیائو و همکاران، ۲۰۱۰). بنابراین، دلیل اصلی استفاده گسترده از مخلوط‌های SMA آن است که بافت این نوع مخلوط‌ها باعث برتری آنها از لحاظ مقاومت در برابر تغییر شکل‌های دائمی نسبت به مخلوط آسفالت گرم معمولی می‌شود. با این حال، نوع تثبیت‌کننده می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای بر توانایی مقاومت شیار شدگی مخلوط‌های SMA تأثیر بگذارد (براون و همکاران، ۱۹۹۷).

از آزمون‌های مختلف تجربی برای ارزیابی پتانسیل تغییر شکل دائمی مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شود. در میان این روش‌ها، آزمایش شیارافتادگی مسیر چرخ هامبورگ برای ارزیابی عملکرد شیارشدگی مخلوط‌های آسفالت استفاده شده است. آزمایش شیارافتادگی نمونه-های آسفالتی توسط دستگاه شیارافتادگی مسیر چرخ هامبورگ مطابق با روش استاندارد AASHTO T324 روی نمونه‌های استوانه‌ای انجام پذیرفت. در این دستگاه، چرخ بارگذاری با بار ثابت روی سطح نمونه به صورت رفت و برگشتی حرکت می‌کند و نمونه در شرایط خشک یا غرقاب (تر) مورد آزمایش قرار می‌گیرد (شکل ۵).

نمونه مورد استفاده در این دستگاه به شکل دو نمونه استوانه‌ای با قطر و ارتفاع به ترتیب، ۱۵۰ و ۶۲ میلی‌متر و یا دال مکعبی به ابعاد ۳۰×۳۰×۵ سانتی‌متر

نوع مخلوط SMA، ۶ عدد است. نیمی از نمونه‌ها باید تحت شرایط استاندارد عمل‌آوری شوند. ابتدا نمونه‌ها برای رسیدن به سطح اشباع ۵۵ تا ۸۰ درصد تحت شرایط خلأ قرار می‌گیرند. سپس، هر کدام از نمونه‌های اشباع‌شده تحت خلأ را در داخل پلاستیک قرار داده و آنها را در داخل یک پلاستیک دیگر با ۱۰ میلی‌لیتر آب قرار داده می‌شوند. نمونه‌ها در دمای ۱۸- درجه سلسیوس به مدت ۱۶ ساعت در فریزر قرار داده می‌شوند. سپس، در حمام آب ۶۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت نگهداری می‌شوند. در نهایت، به مدت ۲ ساعت در آب ۲۵ درجه سلسیوس قرار می‌گیرند تا به دمای محیط برسند. نیم دیگر نمونه‌ها که عمل‌آوری نمی‌شوند را در پلاستیک قرار داده و به مدت ۲ ساعت در آب ۲۵ درجه سلسیوس نگهداری می‌شوند. هر دو گروه نمونه‌ها برای انجام آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم تحت بارگذاری با نرخ ثابت ۵۰/۸ mm/min قرار گرفته و مقدار نیروی لازم برای شکستن نمونه‌ها اندازه‌گیری می‌شود. سپس، مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) و نسبت مقاومت کششی (TSR) با استفاده از استفاده از روابط (۳) و (۴) محاسبه می‌شوند:

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

$$TSR (\%) = \frac{ITS_{wet}}{ITS_{dry}} \times 100 \quad (4)$$

که در آنها ITS مقاومت کششی غیرمستقیم (kPa)، P، حداکثر بار (N)، t ضخامت نمونه (mm)، D قطر نمونه (mm)، TSR نسبت مقاومت کششی، ITS_{wet} میانگین مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت اشباع (kPa) و ITS_{dry} میانگین مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت خشک (kPa) است.

۴-۴. شیارشدگی

به‌عنوان یک توصیف کلی، شیارشدگی عبارت است از نشست طولی سطح روسازی در امتداد مسیر چرخ‌های

۵. نتایج

در این بخش، به بررسی نتایج عددی و نموداری حاصل از انجام آزمایش های مختلف و تحلیل آنها پرداخته می-شود. لازم به ذکر است که نتایج هر آزمایش به صورت میانگین چند نمونه آزمایشی که تحت شرایط آزمایشگاهی یکسان قرار گرفته اند، آورده شده است.

۱-۵. طرح اختلاط

دماهای اختلاط و تراکم نمونه های SMA، به ترتیب ۱۵۴-۱۴۸ و ۱۴۲-۱۳۷ درجه سلسیوس تعیین گردید. دانه بندی با حداکثر اندازه اسمی ۱۲/۵ میلی متر برای تهیه کلیه نمونه های SMA انتخاب شد. در تحقیقی پیشنهاد شد که برای عملکرد بهتر از نظر مقاومت شیارشدگی و افزایش سختی مخلوط SMA در مناطق آب و هوایی گرم، از مخلوط با حداکثر اندازه اسمی ۱۲/۵ میلی متر استفاده شود (حافظ و همکاران، ۲۰۱۵).

برای بهینه سازی دانه بندی، همان طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، سه دانه بندی آزمایشی در نظر گرفته شد. به علاوه، ۶/۵ درصد قیر در ابتدا به عنوان درصد قیر آزمایشی بر اساس گزارش NCHRP ۴۲۵ به مخلوط اضافه شد (براون و کولی، ۱۹۹۹). خصوصیات حجمی مخلوط های SMA و پارامترهای مورد نیاز مانند VMA ، VCA_{DRC} ، VCA_{MIX} و فضای خالی مخلوط ها در جدول ۷ گزارش شده است. همان طور که در این جدول مشاهده می شود، نسبت VCA_{MIX} برای هر سه دانه بندی آزمایشی کوچک تر از VCA_{DRC} بود. از آنجا که دانه بندی آزمایشی شماره ۱ نسبت به دو دانه بندی دیگر ریزدانه تر است، به عنوان دانه بندی بهینه انتخاب شد. اما از آنجایی که میزان فضای خالی آن کمتر از ۴٪ بود، بنابراین باید درصد قیر آن تنظیم می-شد. بدین منظور، نمونه های دیگری در درصدهای قیر ۶ و ۷ ساخته شدند تا درصد قیر بهینه در ۴٪ فضای خالی مشخص شود. نتایج نشان داد که مقدار ۶/۳ درصد قیر برای الیاف تاپسل درصد قیر بهینه بود. برای

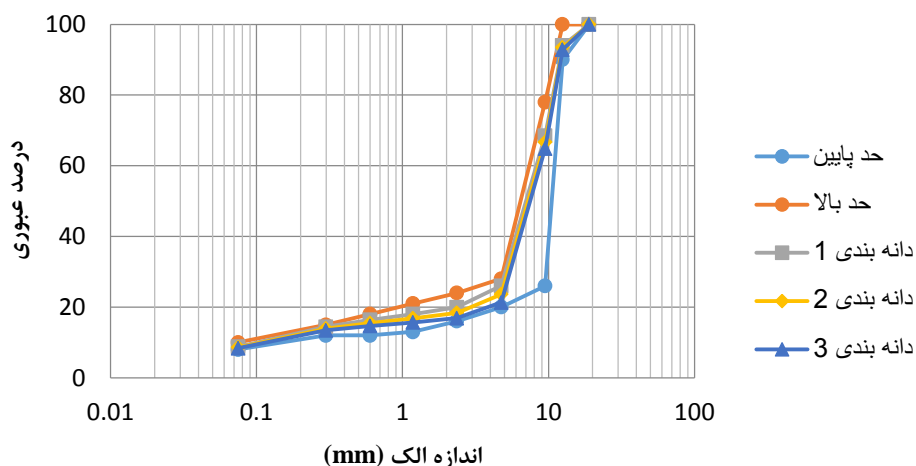
می باشد. چرخ بارگذاری دستگاه نیز به قطر ۲۰ و پهنای ۵ سانتی متر است. نمونه های استوانه ای مورد استفاده در این آزمایش به روش تراکم چرخشی با قطر و ارتفاع به ترتیب، ۱۵۰ و ۶۳ میلی متر و فضای خالی ۷ درصد مطابق با استاندارد ASTM D6925 ساخته و متراکم شدند. برای انجام آزمایش، نمونه های آسفالتی در شرایط خشک، دمای ۵۰ درجه سلسیوس، بار چرخ ۷۰۰ نیوتن و سرعت حرکت رفت و برگشتی ۵۰ عبور در دقیقه تحت ۱۰۰۰۰ رفت و برگشت (۲۰۰۰۰ عبور) چرخ بارگذاری دستگاه شیارافتادگی قرار گرفتند.



شکل ۵. بارگذاری چرخ هامبورگ روی نمونه های استوانه ای

این آزمایش به طور خودکار یا هنگامی که نمونه ۲۰،۰۰۰ عبور را تجربه می کند یا حداکثر ۲۰ میلی متر تغییر شکل عمودی در آن ایجاد می شود، خاتمه می یابد. پس از آزمایش، برای هر نمونه، یک منحنی عمق شیار در برابر تعداد عبور چرخ ترسیم و عمق شیار نهایی ارزیابی می شود.

دو الیاف دیگر از همان دانه‌بندی بهینه استفاده شد و بهینه و مقاومت مارشال در درصد قیر بهینه برای هر کدام محاسبه شد. نتایج قیر جدول ۸ آورده شده است.



شکل ۶. نمودارهای دانه‌بندی‌های مورد آزمایش

جدول ۷. نتایج آزمایشگاهی برای دانه‌بندی‌های مورد آزمایش

مشخصه	مخلوط آزمایشی ۱	مخلوط آزمایشی ۲	مخلوط آزمایشی ۳
G_{mb}	۲/۲۵۹	۲/۲۵۷	۲/۲۵۴
G_{mm}	۲/۳۳۶	۲/۳۴۱	۲/۳۴۷
فضای خالی (%)	۳/۳	۳/۶	۳/۹
VMA (%)	۱۷/۱۰	۱۷/۱۸	۱۷/۲۹
VCA_{MIX} (%)	۳۸/۴	۳۶/۵	۳۴/۷
VCA_{DRC} (%)	۴۰/۸	۴۰/۹	۴۱/۱

جدول ۸. نتایج درصد قیر بهینه برای مخلوط‌های حاوی الیاف مختلف

الیاف	درصد قیر بهینه	درصد هوا	میانگین پایداری مارشال (N)
تاپسل	۶/۳	۴±۱	۸۶۷
نخل خرما	۶/۷	۴±۱	۷۶۵
ته‌سیگار	۷/۵	۴±۱	۶۴۸

الیاف استفاده شده است، در کل، ۱۲ نمونه برای این آزمایش ساخته شد. نیمی از نمونه‌ها در دمای اختلاط یعنی ۱۵۰ درجه سلسیوس و نیمی دیگر در ۱۵ درجه سلسیوس بیشتر، یعنی در ۱۶۵ درجه سلسیوس، مورد آزمایش قرار گرفتند. میانگین نتایج در جدول ۹ آورده شده است.

۲-۵. ریزش قیر

برای انجام این آزمایش از یک سبد سیمی با توری ۰/۲۵ اینچ (۶/۳ میلی‌متر) استفاده شد. ۱۲۰۰ گرم از مخلوط آسفالتی داخل سبد ریخته و در داخل گرم‌خانه قرار داده شد. از آنجایی که برای انجام آزمایش به حداقل ۴ نمونه نیاز است و در این پژوهش ۳ نوع

جدول ۹. نتایج آزمایش ریزش قیر در مخلوط های حاوی الیاف مختلف

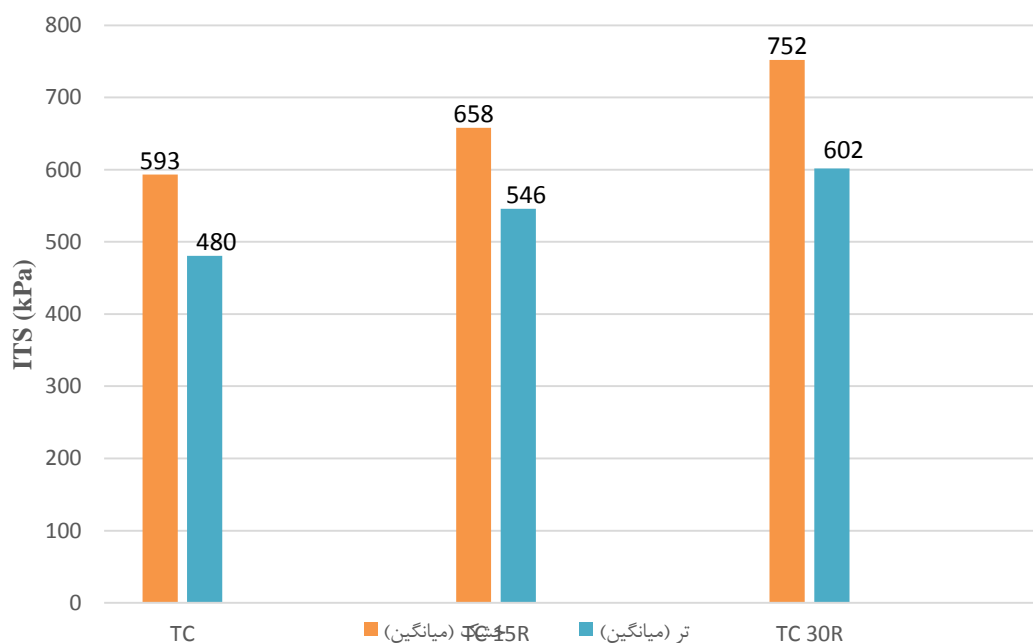
الیاف		تاپسل	دمای آزمایش (°C)
ته سیگار	نخل خرما		
۰/۰۰	۰/۰۸	۰/۱۷	۱۵۰
۰/۰۱	۰/۱۵	۰/۲۶	۱۶۵

می توانند در مخلوط های آسفالتی SMA به کار گرفته شوند.

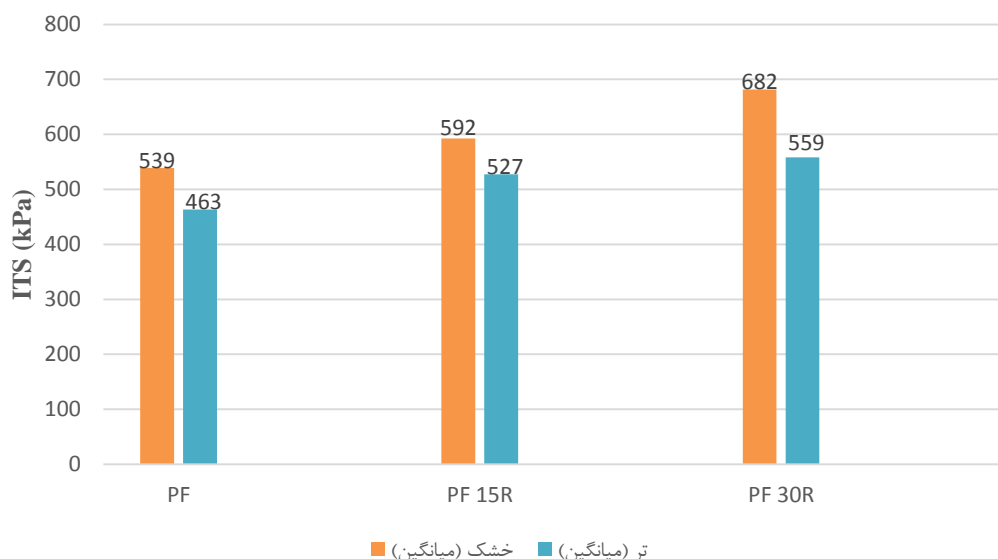
۳-۵. حساسیت رطوبتی

از آزمایش کشش غیرمستقیم به منظور ارزیابی مخلوط های آسفالتی مختلف در برابر خرابی های ناشی از رطوبت استفاده شد. شکل ۷ تا شکل ۹ مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط های مختلف را در دو حالت خشک و مرطوب نشان می دهند. TC، PF و CB به ترتیب نشان دهنده مخلوط های آسفالتی حاوی الیاف تاپسل، نخل خرما و ته سیگار می باشد. 15R و 30R به ترتیب نشان دهنده وجود ۱۵ و ۳۰ درصد تراشه آسفالت در مخلوط آسفالتی می باشد.

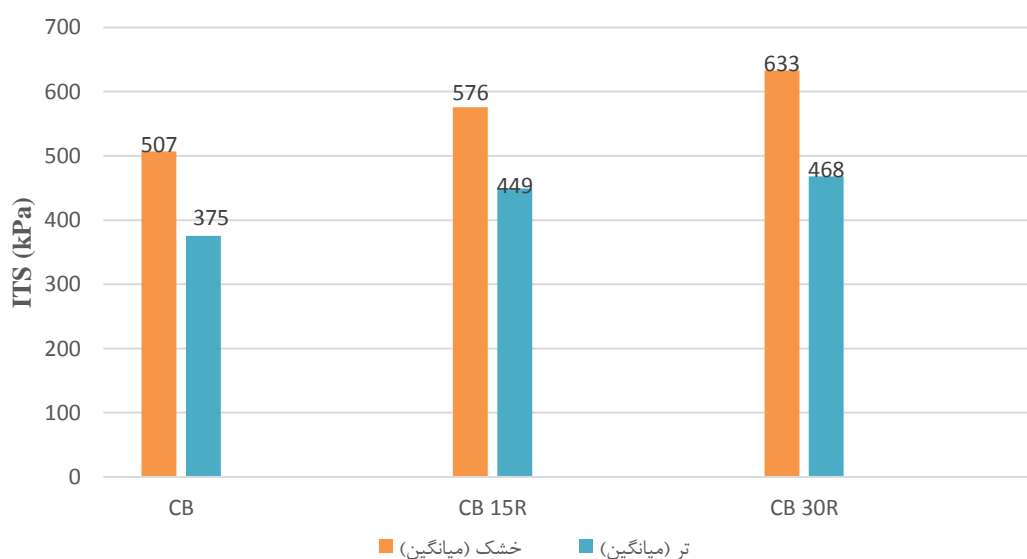
همان طور که در این جدول مشاهده می شود، نمونه های حاوی الیاف ته سیگار و نخل خرما ریزش قیر کمتری در مقایسه با الیاف تاپسل داشتند. اگرچه میزان قیر الیاف ته سیگار و نخل خرما از الیاف تاپسل بیشتر بود، اما ریزش قیر کمتری داشتند. دلیل این امر را می توان در میزان جذب قیر الیاف دانست. یعنی دو الیاف نخل خرما و ته سیگار به قدری جاذب قیر می باشند که با وجود قیر بیشتر در نمونه، ریزش قیر کمتری داشته اند. در مقایسه این دو الیاف مشاهده شد که الیاف ته سیگار بیشترین جذب قیر و الیاف نخل خرما و تاپسل در رتبه ی بعدی قرار گرفتند. با این وجود، نتایج آزمایش ریزش قیر نشان داد که نمونه های حاوی هر سه الیاف، ریزش قیر کمتر از ۰/۳ درصد را تجربه می کنند و



شکل ۷. مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط های آسفالتی حاوی الیاف تاپسل در حالت های مرطوب و خشک



شکل ۸. مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی حاوی الیاف نخل خرما در حالت مرطوب و خشک



شکل ۹. مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی حاوی الیاف ته‌سیگار در حالت مرطوب و خشک

سفت شدن قیر موجود در آن می‌شود. بنابراین، یقیناً وجود RAP در مخلوط آسفالتی منجر به افزایش سختی آن خواهد شد.

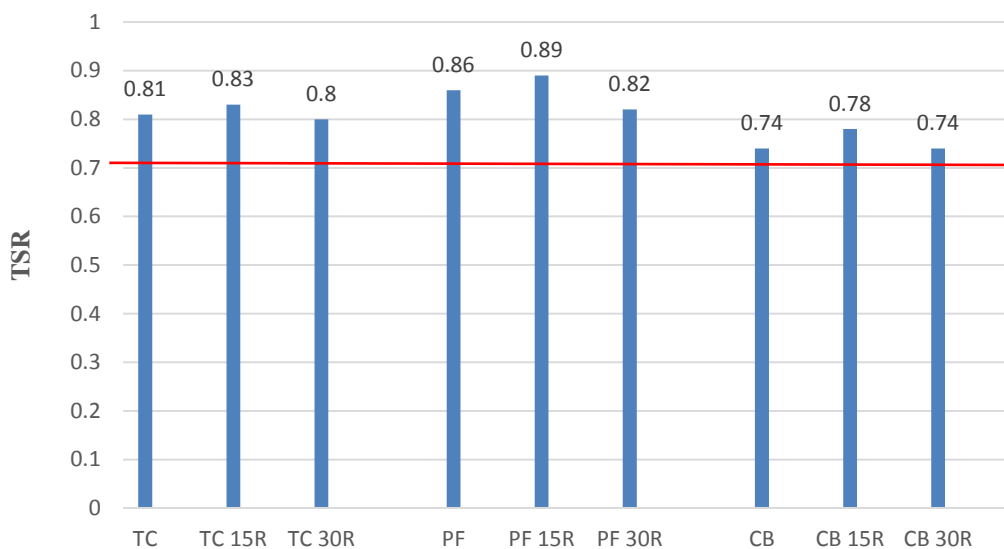
با توجه به شکل‌های فوق، می‌توان مشاهده کرد که مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی (در شرایط مرطوب و خشک) نمونه‌های حاوی الیاف تاپسل در مقایسه با الیاف‌های نخل خرما و ته‌سیگار در درصد‌های یکسان تراشه، بیشتر است. دلیل این امر را باید در میزان قیر موجود در نمونه‌ها و نوع الیاف

با توجه به شکل ۷ تا ۹ می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی (در شرایط مرطوب و خشک) با افزایش درصد RAP افزایش می‌یابد. این تعجب‌آور نیست زیرا مخلوط‌های SMA بازیافتی حاوی قیر تراشه آسفالت هستند که این قیر سخت‌تر از قیر جدید است. قیر موجود در تراشه آسفالت در طول زمان دچار فعل و انفعالاتی از جمله اکسیداسیون شده است و این فعل و انفعالات علاوه بر شرایط تهیه مخلوط در دماهای زیاد، باعث پیر شدن و

از تراشه آسفالت افزایش یافته و پس از آن کاهش می یابد. با توجه به شکل ۱۰، می توان متوجه شد که برای انواع مختلف الیاف، تا ۱۵٪ تراشه آسفالت، مقادیر TSR افزایش یافته و پس از آن کاهش می یابد. همچنین، با مشاهده ی این شکل می توان فهمید که عملکرد کلی الیاف نخل خرما به ترتیب نسبت به الیاف تاپسل و ته سیگار بهتر بوده است. مقاومت زیاد مخلوط های SMA در برابر خرابی های ناشی از رطوبت را می توان به دلیل میزان زیاد قیر آنها دانست. زیرا افزایش قیر باعث می شود تا مصالح سنگی به نحو بهتری توسط قیر پوشیده شوند و از میزان خرابی های ناشی از رطوبت، برای قیرهایی که در تماس با مصالح سنگی قرار دارند، کاسته شود.

جست. هر چه میزان قیر موجود در یک نمونه بیشتر باشد، تأثیر خاصیت ویسکوالاستیک قیر از صلبیت سنگدانه ها پیشی گرفته و نمونه نرم تر شده و مقاومت کششی غیرمستقیم آن کاهش می یابد. همچنین، در الیافی مانند ته سیگار، نرم بودن خود الیاف نیز مزید بر علت شده و باعث کاهش مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه ها می شود.

شکل ۱۰، نتایج نسبت مقاومت کششی (TSR) مخلوط ها در شرایط مرطوب به خشک را برای انواع نمونه ها نشان می دهد. با توجه به این شکل می توان نتیجه گرفت که هرچند میانگین مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه های حاوی انواع مختلف الیاف، با افزایش میزان تراشه آسفالت افزایش می یابد، اما نسبت مقاومت کششی مخلوط های SMA تا درصد مشخصی



شکل ۱۰. نسبت مقاومت کششی مخلوط های آسفالتی حاوی انواع مختلف الیاف

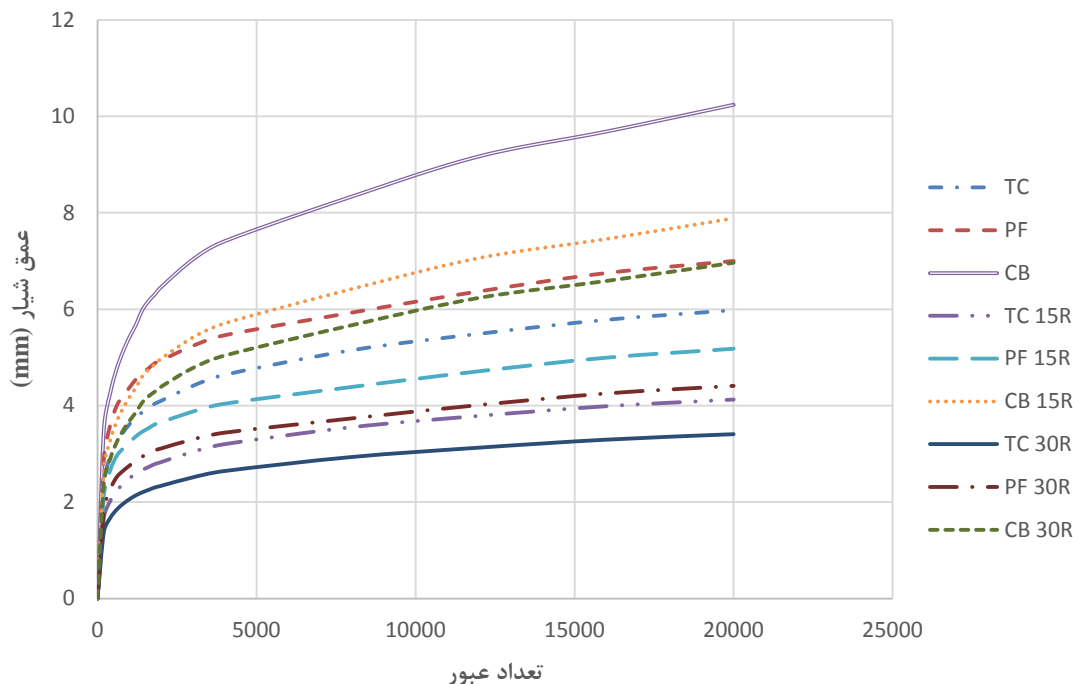
۴-۵. شیارشدگی

آزمایش مسیر چرخ هامبورگ به منظور ارزیابی مقاومت شیارشدگی نمونه های آسفالتی انجام شد. در این آزمایش، دو نمونه با روش تراکم ژیراتوری برای هر حالت ساخته شد که این دو نمونه مطابق با دستورالعمل AASHTO T324 بریده شده و در کنار یکدیگر قرار گرفتند و در نهایت آزمون انجام شد. این آزمایش به

با توجه به نتایج به دست آمده می توان نتیجه گرفت که TSR همه مخلوط ها بیش از حداقل الزامات گزارش NCHRP ۴۲۵ (۰/۷) بوده و حساسیت رطوبتی مخلوط های بازیافتی SMA حاوی الیاف زائد و دورریز نظیر ته سیگار و نخل خرما موضوع نگران کننده ای نبود.

برسد. شکل ۱۱، نتایج شیارشدگی را برای مخلوط‌های SMA حاوی الیاف متفاوت و درصد‌های مختلف تراشه آسفالت نشان می‌دهد.

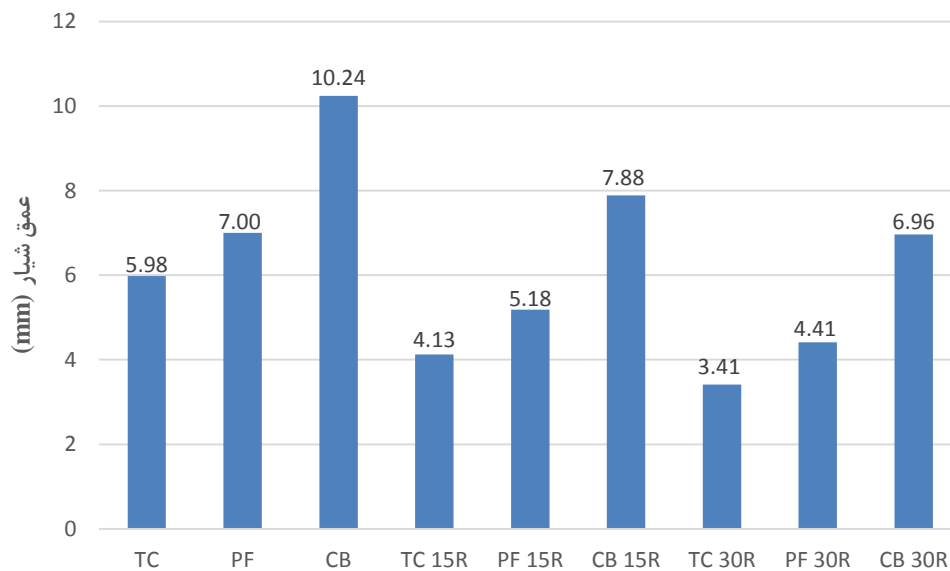
دلیل رفتار قیر که در دمای زیاد ویسکوزیته کمی داشته و حساسیت بیشتری نسبت به تغییر شکل دائمی دارد، در دمای ۵۰ درجه سلسیوس انجام شد. در دماهای زیاد ممکن است مدت‌زمان انجام آزمایش نیز به حداقل



شکل ۱۱. نتایج شیارشدگی مخلوط‌های SMA حاوی الیاف متفاوت و درصد‌های مختلف تراشه آسفالت

برخی دیگر از خصوصیات آنها نظیر انعطاف‌پذیری کاسته می‌شود. نتایج عمق شیار مخلوط‌های مورد آزمایش در شکل ۱۲ آورده شده است. عمق شیار مخلوط‌های حاوی الیاف تاپسل و ۱۵٪ تراشه به میزان ۳۱٪ و عمق شیار مخلوط‌های حاوی الیاف تاپسل و ۳۰٪ تراشه به میزان ۴۳٪ نسبت به نمونه‌ی شاهد کاهش داشته است. به همین ترتیب، عمق شیار پس از ۲۰۰۰۰ عبور چرخ در درصد‌های تراشه ۱۵ و ۳۰ مخلوط‌های حاوی الیاف نخل خرما به ترتیب ۲۶٪ و ۳۷٪ و در درصد‌های تراشه ۱۵ و ۳۰ مخلوط‌های حاوی الیاف ته-سیگار به ترتیب ۲۳٪ و ۳۲٪ نسبت به نمونه‌ی شاهد آنها کاهش نشان داده است.

سختی که یک نگرانی عمده در مخلوط‌های آسفالتی حاوی تراشه آسفالت است، در اثر اکسیداسیون قیر در زمان ساخت آسفالت در کارخانه آسفالت و در دوران بهره‌برداری از روسازی در اثر نفوذ آب و هوا به لایه‌ی آسفالتی به وجود می‌آید. این عوامل باعث تغییر خصوصیات مواد تشکیل‌دهنده قیر تراشه شده و خواص ویسکوالاستیک آن را از بین می‌برند. به همان میزان که مقدار تراشه آسفالت افزایش می‌یابد، کاهش شیارشدگی در نمونه‌های حاوی تراشه مشاهده می‌شود که نشان از سختی بیشتری در این مخلوط‌ها است. به عبارت دیگر، با افزایش درصد تراشه در مخلوط‌های آسفالتی، حساسیت شیارشدگی آنها کاهش می‌یابد، گرچه از



شکل ۱۲. نتایج عمق شیار مخلوط‌های SMA حاوی الیاف متفاوت و درصد‌های مختلف تراشه آسفالت

سیگار و نخل خرما نگران‌کننده نیست و قابلیت کاربرد در مخلوط‌های آسفالتی SMA را دارند.

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیرات الیاف تاپسل (به‌عنوان الیاف سلولزی رایج)، الیاف نخل خرما و الیاف ته‌سیگار (به‌عنوان الیاف زائد و دورریز) به همراه سه درصد متفاوت از تراشه‌های آسفالت (در نسبت‌های صفر، ۱۵ و ۳۰ درصد وزنی مصالح سنگی) بر آسفالت ماستیکی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای (SMA) مورد آزمایش قرار گرفتند. با توجه به آزمایش‌های انجام شده و نتایج به‌دست آمده، نتیجه‌گیری‌های زیر حاصل شد:

- ۱- ریزش قیر مخلوط SMA تهیه شده با الیاف ته‌سیگار در مقایسه با الیاف نخل خرما و تاپسل به ترتیب کمتر بود. این امر نشان از جذب زیاد قیر این نوع الیاف دارد که توانسته با وجود درصد قیر بیشتر، ریزش کمتری هم داشته باشد.
- ۲- استفاده از هر یک از الیاف مورد پژوهش، همراه با تراشه آسفالت در مخلوط آسفالتی، موجب افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌ها شد.

نتایج فوق حاکی از آن است که درصد کاهش عمق شیار در مخلوط‌های آسفالتی حاوی الیاف تاپسل به ترتیب نسبت به مخلوط‌های حاوی الیاف نخل خرما و ته‌سیگار بیشتر بوده است. دلیل این افزایش در کاهش عمق شیار را می‌توان در نسبت قیر پیرشده موجود در تراشه به قیر خام جدید نمونه دانست. با افزایش میزان تراشه در یک نمونه آسفالتی، نسبت قیر پیرشده به قیر جدید افزایش می‌یابد. از آنجایی که تراشه آسفالت حاوی قیر بازیافتی پیرشده و با درجه نفوذ کمتر است و ویسکوزیته مخلوط‌های آسفالتی را افزایش می‌دهد، منجر به کاهش شیارشدگی می‌شود. حال، با توجه به درصد قیر بهینه کمتر نمونه‌های حاوی الیاف تاپسل نسبت به دو الیاف دیگر، یعنی نخل خرما و ته‌سیگار، نسبت قیر بازیافتی به قیر جدید در این مخلوط‌ها افزایش یافته و سبب کاهش بیشتر عمق شیار می‌شود. با این وجود، عمق شیار نمونه‌های آسفالتی حاوی الیاف نخل خرما و ته‌سیگار در محدوده‌ی آیین‌نامه بوده و می‌تواند جایگزین الیاف گران‌قیمت شوند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که شیارشدگی مخلوط‌های بازیافتی SMA حاوی الیاف زائد و دورریز نظیر ته-

- ۳- میانگین مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های حاوی انواع مختلف الیاف، با افزایش درصد تراشه آسفالت افزایش نشان می‌داد. اما افزایش نسبت مقاومت کششی مخلوط‌های SMA تا درصد مشخصی از تراشه آسفالت بود و پس از آن شروع به کاهش می‌کرد. برای انواع مختلف الیاف، میزان ۱۵٪ تراشه آسفالت مقدار بهینه برای حصول به مقادیر قابل قبول TSR تعیین شد.
- ۴- عملکرد کلی مخلوط‌های SMA حاوی الیاف نخل خرما در کاهش حساسیت رطوبتی در مقایسه با مخلوط‌های حاوی الیاف تاپسل و ته‌سیگار بهتر بود.
- ۵- با افزایش میزان تراشه آسفالت، نسبت قیر پیرشده به قیر جدید افزایش می‌یابد و منجر به کاهش شیارشدگی می‌شود. درصد کاهش عمق شیار در الیاف تاپسل در مقایسه با الیاف نخل خرما و ته‌سیگار به ترتیب بیشتر است.

۷. مراجع

- Antunes, V., Freire, A. C. and Neves, J. 2019. "A review on the effect of RAP recycling on bituminous mixtures properties and the viability of multi-recycling". *Constr. Build. Mater.*, 211: 453-469.
- Błazejowski, K. 2011. "Stone matrix asphalt: Theory and practice". CRC Press.
- Brown, E. R. and Colley, L. A. 1999. "NCHRP Report 425: Designing stone matrix asphalt mixtures for rut-resistant pavements". Transportation Research Board, Washington DC.
- Brown, E. R., Haddock, J. E., Mallick, R. B. and Lynn, T. A. 1997. "Development of a mixture design procedure for stone matrix asphalt". NCAT Report 97-03, Auburn University.
- Fernandes, S. R. M., Silva, H. M. R. D. and Oliveira, J. R. M. 2018. "Recycled stone mastic asphalt mixtures incorporating high rates of waste materials". *Constr. Build. Mater.*, 187: 1-13.
- Hafeez, I., Kamal, M. A. and Mirza, M. W. 2015. "An experimental study to select aggregate gradation for stone mastic asphalt". *J. Chinese Inst. Eng., Trans. Chinese Inst. Eng., Series A*, 38(1): 1-8. <https://doi.org/10.1080/02533839.2014.953242>
- Jomoor, N. B., Fakhri, M. and Keymanesh, M. R. 2019. "Determining the optimum amount of recycled asphalt pavement (RAP) in warm stone matrix asphalt using dynamic creep test". *Constr. Build. Mater.*, 228: 116736.
- Kumar, N. L. N. K. and Ravitheja, A. 2019. "Characteristics of stone matrix asphalt by using natural fibers as additives". *Mater. Today: Proc.*, 19: 397-402.
- Leandri, P., Cuciniello, G. and Losa, M. 2012. "Study of sustainable high performance bituminous mixtures". *Proc.-Soc. Behav. Sci.*, 53: 495-503.
- Mohajerani, A., Tanriverdi, Y., Nguyen, B. T., Wong, K. K., Dissanayake, H. N., Johnson, L., Whitfield, D., Thomson, G., Alqattan, E. and Rezaei, A. 2017. "Physico-mechanical properties of asphalt concrete incorporated with encapsulated cigarette butts". *Constr. Build. Mater.*, 153: 69-80.
- Muniandy, R. and Huat, B. B. K. 2006. "Laboratory diametral fatigue performance of stone matrix asphalt with cellulose oil palm fiber". *Am. J. Appl. Sci.*, 3(9): 2005-2010.
- Rahman, M. T. and Mohajerani, A. 2020. "Use of bitumen encapsulated cigarette butts in stone mastic asphalt". *Constr. Build. Mater.*, 261: 120530.
- Sha, Q. L. 1999. "Asphalt pavement on semi-rigid roadbase for high-class highways". People's Communication Publication House, China.
- Standards Australia. 1995. "Methods of sampling and testing asphalt, method 12.1: Determination of the permanent compressive strain characteristics of asphalt-dynamic creep test". New South Wales, Australia.
- Tapkin, S. 2008. "The effect of polypropylene fibers on asphalt performance". *Build. Environ.*, 43(6): 1065-1071.
- Terrel, R. L. and Al-Swailmi, S. 1994. "Water sensitivity of asphalt-aggregate mixes: Test selection". Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC, USA.
- Watson, D. E., Vargas-Nordbeck, A., Moore, J., Jared, D. and Wu, P. 2008. "Evaluation of the use of reclaimed asphalt pavement in stone matrix asphalt mixtures". *Transport. Res. Record*, 2051(1): 64-70.
- Xiao, F., Amirkhanian, S. N. and Putman, B. J. 2010. "Evaluation of rutting resistance in warm-mix asphalts containing moist aggregate". *Transport. Res. Record*, 2180(1): 75-84.

