

بررسی روش‌های افزودن پودر کربن آمورف به قیر و ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی گرم (HMA) اصلاح شده با این پودر

حسن زیاری، استاد، مرکز تحقیقات قیر و مخلوط‌های آسفالتی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
اصغر حبیب‌نژاد کواریم، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
مجتبی حاجیلو، دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
حسن دیوانداری*، استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نوشهر
امیر رزمجو چهارمحالی، استادیار، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه اصفهان

Email: divandari@iauns.ac.ir

دریافت: ۹۵/۰۵/۲۲ - پذیرش: ۹۵/۱۲/۱۷

چکیده

روسازی‌های آسفالتی در طول زمان به دلایل مختلف دچار خرابی می‌شوند. خرابی‌های رطوبتی یکی از اصلی‌ترین عوامل خرابی روسازی‌های آسفالتی می‌باشند. روش‌های زیادی برای بالا بردن مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر رطوبت بررسی شده است، یکی از این روش‌ها، استفاده از افزودنی‌های مختلف در مخلوط آسفالتی و قیر می‌باشد. در این تحقیق، ابتدا روش مناسب اختلاط قیر با پودر کربن جهت توزیع یکنواخت پودر کربن در قیر و ساخت آسفالت توسط آزمایش زاویه تماس تعیین شده و سپس اثر پودر کربن آمورف بر کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی گرم بررسی گردید. پودر کربن، هم به صورت ماده افزودنی به قیر (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزن قیر) و هم به صورت جایگزین بخشی از فیلر مصرفی (۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد وزن فیلر) در مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار گرفت. برای بررسی اثر این پودر، از نسبت مقاومت کششی مرطوب به خشک بر اساس استاندارد AASHTO T283 و آزمایش آب جوشان ASTM D3625 استفاده شد. نتیجه هر دو آزمایش نشان‌دهنده کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی حاوی پودر کربن آمورف نسبت به نمونه شاهد بود. همچنین، استفاده از این پودر به صورت جایگزین بخشی از فیلر مصرفی، عملکرد بهتری نسبت به حالت مصرف به عنوان افزودنی به قیر، در کاهش حساسیت رطوبتی نشان داد. پودر کربن آمورف به دلیل داشتن خاصیت آبریزی می‌تواند مانع از نفوذ آب به درون مخلوط آسفالتی شده و حساسیت رطوبتی مخلوط را کاهش دهد.

واژه‌های کلیدی: پودر کربن آمورف، حساسیت رطوبتی، آزمایش زاویه تماس، مخلوط آسفالتی گرم

۱. مقدمه

می‌نامند. افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی در ابعاد مختلف و طرق گوناگون در مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. برخی از این افزودنی‌ها به‌عنوان فیلر به مصالح سنگی اضافه می‌شوند و برخی دیگر ابتدا در قیر مخلوط می‌گردند و سپس در مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲. اهمیت و ضرورت انجام تحقیق

همان‌طور که بیان شد، حساسیت رطوبتی یکی از مشکلات اساسی در بحث مخلوط آسفالتی در سرتاسر جهان است. رطوبت باعث ایجاد ضعف در آسفالت و خرابی‌هایی مانند عریان‌شدگی می‌شود. اگرچه رطوبت را نمی‌توان به‌صورت مستقیم عامل ایجاد برخی از خرابی‌ها دانست، اما وجود رطوبت باعث تشدید و سرعت بخشیدن به بسیاری از خرابی‌ها مانند شیار-شدگی و شن‌زدگی می‌شود (وسیع‌الدین و همکاران، ۲۰۰۷). به‌طور کلی، سه پارامتر تأثیرگذار بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی عبارتند از سنگدانه، قیر و افزودنی. بسیاری از متخصصین برای کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی از افزودنی‌های ضد-عریان‌شدگی استفاده می‌کنند، زیرا از نقطه‌نظر اجرایی، انتخاب سنگدانه و قیر برای یک پروژه خاص عمده‌تأثیر اساس در دسترس بودن مصالح و مسائل اقتصادی می‌باشد و گزینه تغییر مصالح عموماً هنگامی مطرح می‌شود که با سایر روش‌ها نتوان به مخلوط مورد نظر دست یافت. افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی با مکانیزم-های مختلف مانند اصلاح خواص شیمیایی فصل مشترک قیر و سنگدانه، جلوگیری از تضعیف پیوند قیر و سنگدانه توسط آب و افزایش قدرت چسبندگی قیر با سنگدانه، حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی را کاهش می‌دهند. بنابراین، شناسایی و استفاده از افزودنی‌هایی که بتوانند حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی را کاهش دهند از اهمیت خاصی برخوردار

خرابی‌های ناشی از رطوبت به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین خرابی‌های روسازی‌های آسفالتی محسوب می‌شوند (گرنفل و همکاران، ۲۰۱۴). حساسیت رطوبتی به معنی از دست رفتن مقاومت مخلوط‌های آسفالتی بر اثر وجود آب می‌باشد که می‌تواند باعث خرابی‌های مختلف مثل شیارشدگی، ترک و عریان‌شدگی شود (بوسانو و ویلیامز، ۲۰۰۹). رطوبت به سه طریق می‌تواند وارد روسازی شود: نفوذ آب‌های سطحی، از طریق خاصیت موینگی و نفوذ به صورت بخار. برای جلوگیری از بروز خرابی‌های رطوبتی باید از نفوذ رطوبت به درون مخلوط آسفالتی جلوگیری شود (تارفدر و احمد، ۲۰۱۴). خرابی‌های رطوبتی عمده‌تأثیر به علت ضعف در چسبندگی^۱ و پیوستگی^۲ می‌باشد. ضعف در چسبندگی یعنی اینکه اتصال بین قیر و سنگدانه از بین برود و ضعف در پیوستگی به معنی تغییر ماهیت قیر می‌باشد. فاکتورهایی که بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی تأثیرگذار می‌باشند را می‌توان در سه گروه دسته‌بندی کرد: گروه اول، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی قیر و مصالح می‌باشد؛ گروه دوم، ویژگی‌های مخلوط مانند درصد قیر و درصد فضای خالی (حفرات هوایی که با یکدیگر ارتباط دارند) است؛ گروه سوم، عوامل خارجی مانند میزان ترافیک عبوری، شرایط آب‌وهوایی و روش اجرای مخلوط می‌باشد (دهناد و همکاران، ۲۰۱۳). راه‌کارهای زیادی برای بالا بردن مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر رطوبت بررسی شده است. یکی از این روش‌ها، استفاده از افزودنی‌های مختلف مانند آهک هیدراته، زایکوسویل و پلیمرهایی مثل SBS و EVA در مخلوط آسفالتی و قیر می‌باشد (زیاری و همکاران، ۱۳۹۵). این افزودنی‌ها را به‌اصطلاح افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی

¹- Adhesive failure

²- Cohesive failure

است.

بھیری (۲۰۱۳) از آھک ھیدراته و سیمان به عنوان فیلر در مخلوط آسفالتی گرم استفاده کرد. نتیجه آزمایش‌های وی نشان‌دهنده کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط بود. همچنین، در این تحقیق، به این نکته اشاره شد که تأثیر آھک ھیدراته در کاهش حساسیت رطوبتی بیشتر از سیمان است. عاملیان و همکاران (۲۰۱۴) از آھک ھیدراته به میزان ۲٪ وزنی سنگدانه‌ها به صورت دوغاب در مخلوط آسفالتی گرم استفاده کردند. افزودن آھک ھیدراته منجر به کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی شد. زیاری و همکاران (۱۳۹۴) از زایکوترم در مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم استفاده کردند و دریافتند که زایکوترم حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی را خصوصاً در مخلوط‌هایی با سنگدانه‌های سیلیسی کاهش می‌دهد. مقدس‌نژاد و همکاران (۲۰۱۲) از زایکوسویل به میزان ۱ و ۱/۶ درصد وزنی سنگدانه‌ها در مخلوط آسفالتی گرم استفاده کردند. نتیجه آزمایش‌های آن‌ها نشان‌دهنده افزایش ۱۴ درصدی نسبت TSR می‌باشد. کاووسی و همکاران (۲۰۳) از زایکوسویل به میزان ۰/۱ و ۰/۲ درصد وزنی قیر در مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم استفاده کردند. افزودن این ماده به قیر و استفاده آن در مخلوط باعث کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی شد. هوانگ و همکاران (۲۰۱۰) از خاکستر بادی، آھک ھیدراته و سیمان به عنوان فیلر در مخلوط آسفالتی گرم استفاده کردند و نتیجه گرفتند که هر سه ماده باعث کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی می‌شود؛ اما تأثیر آھک ھیدراته از سیمان و خاکستر بادی بیشتر است و همچنین خاکستر بادی کمترین تأثیر را در بین این سه افزودنی دارد. گورکم و سنگز (۲۰۰۹) از SBS (۲ تا ۶ درصد وزنی قیر) و EVA (۳ تا ۷ درصد وزنی قیر) در مخلوط آسفالتی گرم استفاده کردند. نتیجه آزمایش آن‌ها نشان داد که هر دو ماده در کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی مؤثر بود؛ اما تأثیر SBS بیشتر

۳. مروری بر پژوهش‌های پیشین

در تحقیقی که توسط مدرس و رحمان زاده (۱۳۹۴) انجام شده است از سنگدانه آھکی، قیر ۸۵/۱۰۰ پودر سنگ آھک^۱، خاکستر بادی زغال‌سنگ^۲ و پودر زغال‌سنگ^۳ به عنوان فیلر برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که خاکستر بادی و پودر زغال‌سنگ به دلیل داشتن خاصیت آبگریزی باعث بهبود چسبندگی قیر با سنگدانه‌ها می‌شوند و مقاومت مخلوط‌های آسفالتی را در برابر خرابی‌های رطوبتی افزایش می‌دهند. همچنین، خاکستر بادی باعث ضعیف شدن اتصال بین مولکول‌های قیر می‌شود و در تماس با سنگدانه اتصال بهتری بین قیر و سنگدانه برقرار می‌شود.

افزودنی‌های زیادی با هدف کاهش حساسیت رطوبتی مورد استفاده قرار می‌گیرند که در این بخش به بررسی برخی از تحقیقات در این زمینه پرداخته شده است. زیاری و همکاران (۱۳۹۵) در مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم از آھک ھیدراته استفاده کردند و دریافتند که آھک ھیدراته مقاومت مخلوط در برابر خرابی‌های رطوبتی را افزایش می‌دهد. کیم و همکاران (۲۰۰۸) از آھک ھیدراته به میزان ۱٪ وزنی سنگدانه، به عنوان فیلر، در مخلوط آسفالتی گرم استفاده کردند و نتیجه گرفتند که آھک ھیدراته باعث کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی می‌شود. ابواواد و همکاران (۲۰۱۵) از آھک ھیدراته در مخلوط آسفالتی گرم استفاده کردند و نتیجه گرفتند که مصرف آھک ھیدراته باعث کاهش پتانسیل خرابی‌های رطوبتی می‌شود.

¹ - Limestone

² - Coal waste ash

³ - Coal waste powder

نوآوری این تحقیق در نظر گرفت. استفاده از آزمایش زاویه تماس برای ارزیابی آبریزی قیر اصلاح شده با پودر کربن آمورف و مخلوط‌های آسفالتی و انتخاب روش بهینه اختلاط قیر با پودر کربن نیز در نوع خود قابل توجه است.

۱-۵. مواد و مصالح

مصالح سنگی: در این پژوهش، از مصالح آهکی تهیه شده از معدن تلو استفاده شده است. همچنین، از دانه‌بندی شماره ۴ مطابق آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران استفاده شده است. درصد عبوری هر الک برای دانه‌بندی مورد استفاده در جدول ۱ و مشخصات سنگدانه‌های مصرفی در جدول ۲ ارائه شده است.

پودر کربن آمورف: کربن آمورف اشاره به شبکه بسیار نامنظم اتم‌های کربن دارد که به‌طور قابل توجهی دارای پیوندهای sp^2 و ۱۰٪ پیوندهای sp^3 هستند (رابرتسون و آرایلی، ۱۹۸۷). sp^2 و sp^3 اوربیتال‌های مولکولی هیبریدی اتم‌های کربن در آلکان (sp^3) و آلکن (sp^2) می‌باشند. مدل اوربیتال‌های هیبریدی، یک الگوی توصیفی از تشکیل پیوندهای کووالانسی بین اتم‌هاست. در این مدل، اوربیتال‌های هر اتم (که دربرگیرنده الکترون‌های پیوندی است) با یکدیگر ترکیب شده و اوربیتال‌های هیبریدی را تولید می‌کنند. اوربیتال‌های هیبریدی ایجاد شده دارای ساختار و انرژی مشابه بوده و در تشکیل پیوند با اتم‌های دیگر مشارکت می‌کنند.

کربن آمورف به طرق مختلف قابل تولید می‌باشد. در این تحقیق، کربن مورد استفاده حاصل تصفیه پساب صنعتی شرکت رز پلیمر اصفهان می‌باشد. محصول بازیافت این پسماند با روش هیدروترمال پودری است که درصد بالایی کربن دارد و با توجه به ساختار نامنظم اتم‌های کربن در این پودر، کربن حاصل ساختار آمورف دارد. این پودر به صورت پودر جامد سیاه رنگ بوده و دارای اندازه ذراتی در حدود ۱۰ تا ۷۰ میکرومتر

است.

از بین افزودنی‌هایی که با هدف کاهش حساسیت رطوبتی مورد استفاده قرار می‌گیرند زایکوترم، زایکوسویل و آهک هیدراته تأثیر قابل توجهی بر کاهش خرابی‌های رطوبتی دارند. هدف از پژوهش حاضر، بررسی تأثیر پودر کربن آمورف^۱ بر حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی گرم می‌باشد.

۴. فرضیات تحقیق

فرض اولیه تحقیق این است که استفاده از پودر کربن آمورف حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی را کاهش می‌دهد. همچنین، فرض بر این است که پودر کربن آمورف در هنگام استفاده به عنوان افزودنی در قیر، درصد قیر بهینه مخلوط آسفالتی را تغییر نمی‌دهد.

۵. روش تحقیق

در این تحقیق، ابتدا روش بهینه اختلاط قیر با پودر کربن توسط آزمایش زاویه تماس^۲ تعیین شده و سپس اثر پودر کربن آمورف بر کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی گرم مورد بررسی قرار گرفته است. این پودر به دو صورت (به عنوان فیلر و همچنین افزودنی در قیر) در آسفالت مورد استفاده قرار گرفته است. در روش اول، پودر کربن آمورف در چهار مقدار (۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد وزن فیلر) جایگزین بخشی از فیلر شد. در استفاده به عنوان افزودنی در قیر، پودر کربن در سه مقدار (۵ و ۱۰ و ۱۵ درصد وزن قیر) توسط دستگاه همزن برشی با سرعت بالا^۳ با قیر مخلوط شد و در مخلوط آسفالتی به‌کار رفت.

استفاده از پودر کربن آمورف در مخلوط آسفالتی با هدف کاهش حساسیت رطوبتی را می‌توان به عنوان

¹- Amorphous carbon powder

²- Contact angle test

³- High shear mixer

می‌باشد. برای بررسی مشخصات شیمیایی این پودر، (XRF) انجام شده و نتایج این آزمایش در جدول ۵ آزمایش آنالیز طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس^۱ آمده است.

جدول ۱. مشخصات الک و درصد عبوری هر الک برای دانه‌بندی (نشریه ۲۳۴)

مشخصات الک	اندازه الک (mm)	درصد عبوری از الک	حد وسط
۳/۴	۱۹	۱۰۰	۱۰۰
۱/۲	۱۲/۵	۹۰-۱۰۰	۹۵
۳/۸	۹/۵	-	-
۴	۴/۷۵	۴۴-۷۴	۵۹
۸	۲/۳۶	۲۸-۵۸	۴۳
۱۶	۱/۱۸	-	-
۳۰	۰/۵	-	-
۵۰	۰/۳	۵-۲۱	۱۳
۱۰۰	۰/۱۵	-	-
۲۰۰	۰/۰۷۵	۲-۱۰	۶

جدول ۲. مشخصات سنگدانه‌های مصرفی

خواص فیزیکی	مقادیر	حدود مجاز	استاندارد
وزن مخصوص مصالح درشت دانه (gr/cm^3)	۲/۶۳	-	ASTM C127
وزن مخصوص مصالح ریزدانه (gr/cm^3)	۲/۶۱	-	ASTM C128
درصد سایش به روش لس‌آنجلس (%)	۲۳/۵	حداکثر ۲۵	ASTM C131
شکستگی در یک سمت (%)	۹۷	حداقل ۵۰	ASTM D5821
شکستگی در دو سمت (%)	۹۴	حداقل ۸۰	ASTM D5821
جذب آب (%)	۰/۷	حداکثر ۲/۵	ASTM C127
ارزش ماسه‌ای (%)	۷۴	حداقل ۵۰	ASTM D2419

فیلر: فیلر مورد استفاده، مصالح آهکی عبوری از الک شماره ۲۰۰ می‌باشد. مشخصات فیلر به کار رفته در تحقیق در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳. مشخصات فیلر مصرفی

خصوصیات	مقادیر	حدود مجاز	استاندارد
دامنه خمیری (%)	غیر خمیری	حداکثر ۴	ASTM D4318
افت وزنی ناشی از سولفات سدیم (%)	۲/۲۱	حداکثر ۱۲	ASTM C88
ارزش ماسه‌ای (%)	۷۶	حداقل ۵۰	ASTM D2419

قیر: نوع قیر به کار رفته در این پژوهش، قیر خالص با درجه نفوذ ۷۰-۶۰ پالایشگاه نفت پاسارگاد می‌باشد. مشخصات قیر مصرفی در جدول ۴ آورده شده است.

^۱ - X-ray Fluorescence Spectroscopy

بررسی روش‌های افزودن پودر کربن آمورف به قیر و ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی گرم (HMA) اصلاح شده با این پودر

جدول ۴. مشخصات قیر مورد استفاده

استاندارد	حدود مجاز	مقادیر	خصوصیات
ASTM D-70	-	۱/۰۳	وزن مخصوص (gr/cm^3)
ASTM D-5	۷۰-۶۰	۶۶	درجه نفوذ (دهم میلی‌متر)
ASTM D-36	۵۶-۴۹	۵۴	نقطه نرمی (درجه سلسیوس)
ASTM D-113	بیشتر از ۱۰۰	۱۰۰ ⁺	خاصیت انگمی (سانتی‌متر)
ASTM D-92	بزرگتر از ۲۳۲	۳۰۵	نقطه اشتعال (درجه سلسیوس)

از الک ۲۰۰ (فیلر) که با استفاده از سیستم طیف‌سنجی انرژی^۲ (EDS)، که یکی از خروجی‌های دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی به‌حساب می‌آید، با ولتاژ ۱۵ کیلوولت به‌دست آمده است که این نتایج در شکل‌های ۲ و ۳ قابل مشاهده است. همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، پودر کربن تولیدی دارای یک پیک مشهود در عنصر کربن است. در حالی که شکل ۳ نشانگر وجود عناصر کلسیم، آلومینیم و اکسیژن فراوان در فیلر مصرفی می‌باشد که نشانگر آهکی بودن جنس سنگدانه مصرفی است.

جدول ۵. نتایج آزمایش XRF روی پودر کربن

عنصر	درصد
C	۷۴/۸۳
O	۱۷/۹۲
S	۷/۲۴

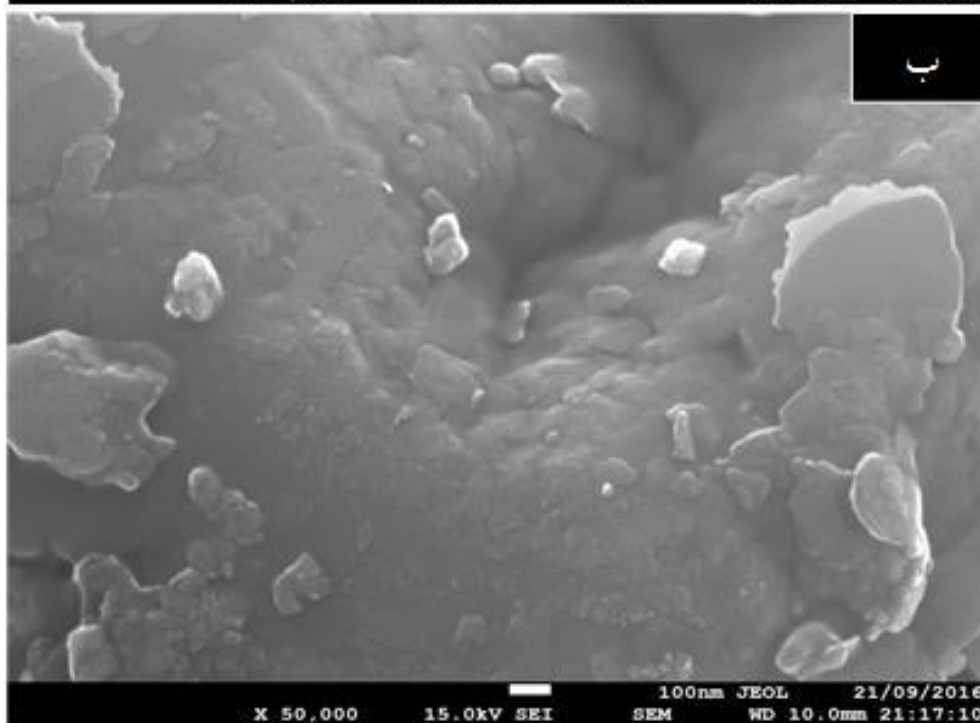
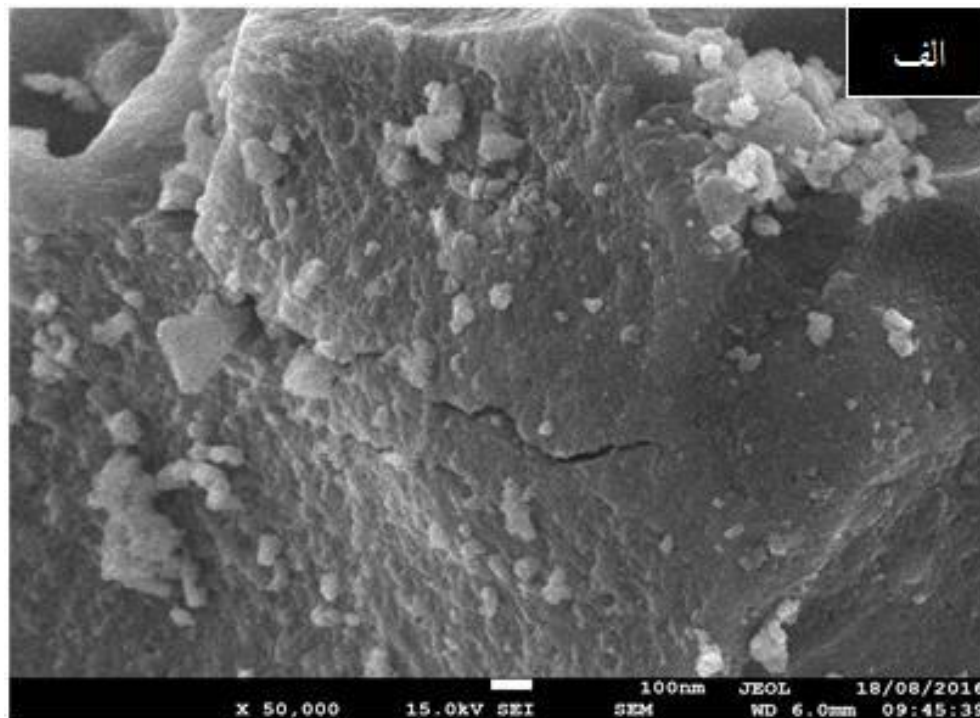
همان‌طور که در جدول ۵ ملاحظه می‌شود، پودر کربن آمورف از سه عنصر کربن، اکسیژن و گوگرد تشکیل شده است. در بین این عناصر، کربن بیشترین سهم (حدود ۷۵٪) را دارد. آزمایش XRF بیشتر با هدف شناسایی اکسیدهای تشکیل‌دهنده سنگدانه مصرفی در تحقیقات مختلف انجام می‌شود. در جدول ۶، اکسیدهای تشکیل‌دهنده سنگدانه‌های آهکی مورد استفاده قابل ملاحظه است. عکس میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ (SEM) پودر کربن و فیلر معمولی پودر سنگ در مقیاس ۱۰۰ نانومتر برای نشان دادن بافت سطحی فیلر پودر سنگ و پودر کربن آمورف در شکل ۱ نشان داده شده است. در قسمت الف شکل ۱، برجستگی‌هایی در ابعاد نانو روی سطح پودر کربن به خوبی قابل تشخیص است. این تصاویر با دستگاه مدل A JEOL 7001F FEG گرفته شده است. همچنین، ترکیب عنصری پودر کربن آمورف و پودر سنگ عبوری

² - Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy

¹ - Scanning Electron Microscope

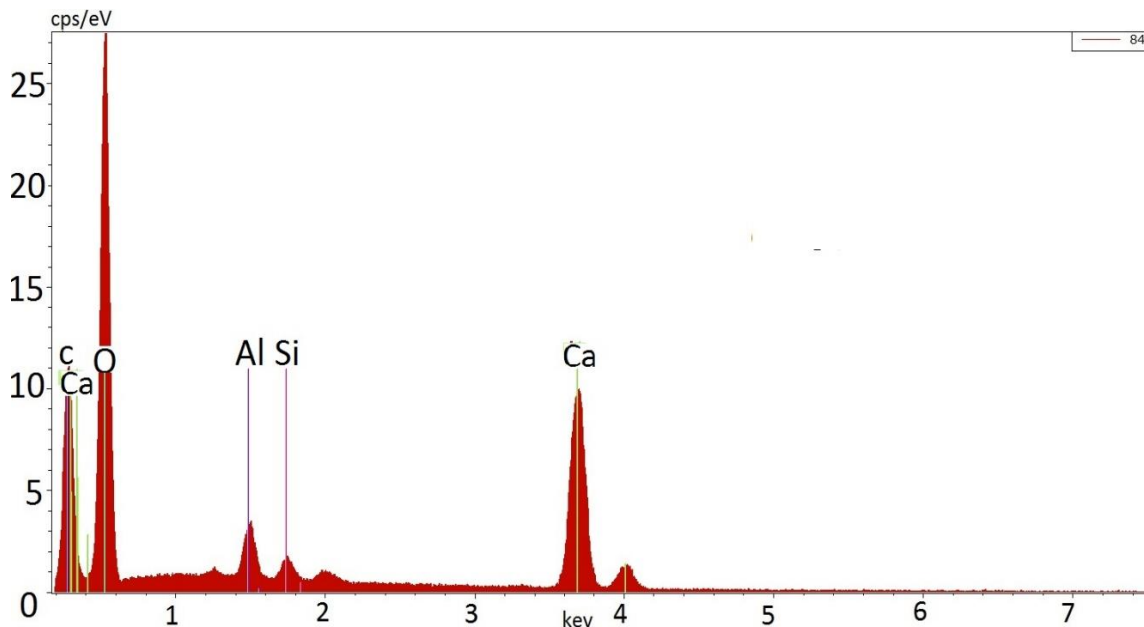
جدول ۶. نتایج آزمایش XRF روی پودر سنگ آهکی

L.O.I	MnO	K ₂ O	TiO ₂	Na ₂ O	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	اکسید
۲۹/۶	۰/۰۴۸	۰/۶۵	۰/۱۰۹	۰/۰۷	۰/۷۶	۴۳/۰۸	۲/۰۹	۰/۹۱	۱۶/۵۴	درصد

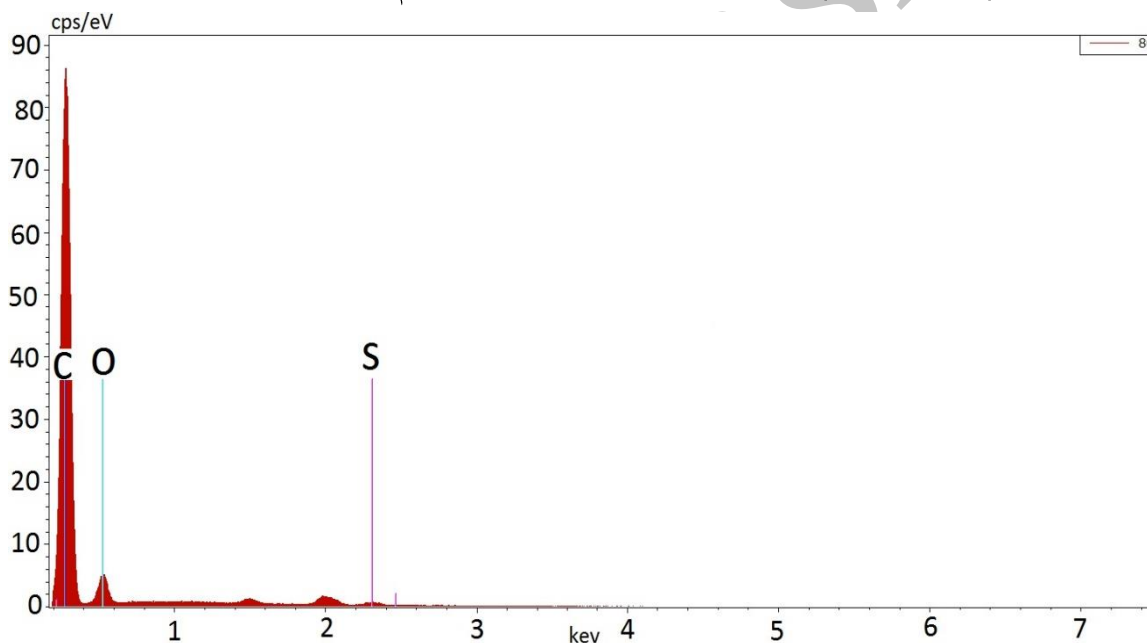


شکل ۱. تصویر SEM: الف) پودر کربن آمورف و ب) پودر سنگ عبوری الک ۲۰۰ (فیلر)

بررسی روش‌های افزودن پودر کربن آمورف به قیر و ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی گرم (HMA) اصلاح شده با این پودر



شکل ۲. عناصر تشکیل دهنده پودر سنگ معمولی با استفاده از سیستم طیف‌سنجی انرژی (EDS)



شکل ۳. عناصر تشکیل دهنده پودر کربن آمورف با استفاده از سیستم طیف‌سنجی انرژی (EDS)

۳-۵. آماده‌سازی نمونه‌ها

برای ارزیابی تأثیر پودر کربن بر مقاومت در برابر آسیب‌های رطوبتی آسفالت، این پودر به دو روش مورد استفاده قرار گرفت: استفاده از پودر کربن به عنوان فیلر: در این روش، پودر کربن با مقادیر ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد وزنی

فیلر، جایگزین بخشی از فیلر شد. این نمونه‌ها به ترتیب با عنوان B، C، D و E نام‌گذاری شدند. استفاده از پودر کربن به عنوان افزودنی در قیر: در روش دوم، پودر کربن به عنوان افزودنی در قیر مورد استفاده قرار گرفت. به‌طور کلی می‌توان برای اختلاط یک افزودنی با قیر از سه روش استفاده کرد: استفاده از

استاندارد، برای تعیین درصد قیر بهینه برای هر مخلوط تعداد ۱۸ نمونه مارشال ساخته می‌شود. در این تحقیق، برای مخلوط‌های شاهد و مخلوط‌هایی که پودر کربن به‌عنوان فیلر در آنها مورد استفاده قرار گرفته است در مجموع تعداد ۹۰ نمونه مارشال ساخته شد و درصد قیر بهینه محاسبه گردید که نتایج آنها در جدول ۷ آمده است. سپس، برای ساخت نمونه‌های آزمایش حساسیت رطوبتی از دستگاه متراکم‌کننده چرخشی (SGC)^۳ استفاده شد. در این تحقیق، برای مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با قیر اصلاح شده با پودر کربن، درصد قیر بهینه برابر درصد قیر بهینه نمونه شاهد در نظر گرفته شده است و فرض بر این است که استفاده از پودر کربن آمورف به عنوان افزودنی در قیر، درصد قیر بهینه مخلوط آسفالتی را تغییر نمی‌دهد. اما برای نمونه‌هایی که پودر کربن در آنها به عنوان فیلر مورد استفاده قرار می‌گیرد، به دلیل اینکه فیلر تأثیر زیادی در مقدار درصد قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی دارد، درصد قیر بهینه برای هر درصد جداگانه محاسبه شده است.

همزن مکانیکی، همزن برشی با سرعت بالا^۱ و روش اولتراسونیک^۲. برای ترکیب کردن قیر با پودر کربن، ابتدا هر سه روش مورد استفاده قرار گرفت تا مناسب‌ترین روش جهت توزیع یکنواخت پودر کربن در قیر انتخاب و جهت ساخت نمونه‌های آسفالتی مورد استفاده قرار گیرد. برای این منظور، ابتدا از ۵٪ وزنی قیر، پودر کربن استفاده شد. برای ارزیابی بهترین روش پخش پودر کربن در قیر از آزمایش زاویه تماس استفاده شده است که نتایج این آزمایش در بخش نتایج به‌طور کامل مورد بحث قرار گرفته است. علاوه بر آن، سه فاکتور در دسترس بودن، اجرایی بودن و هزینه نیز مورد بررسی قرار گرفت که در نهایت با توجه به قیمت زیاد روش اولتراسونیک و اجرایی نبودن این روش در حجم زیاد قیر، این روش کنار گذاشته شد و با توجه به نتایج زاویه تماس، همزن برشی با سرعت بالا به عنوان روش اختلاط بهینه پودر کربن با قیر انتخاب گردید. برای ارزیابی تأثیر استفاده از پودر کربن به عنوان افزودنی در قیر، این پودر به میزان ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی قیر انتخاب و توسط همزن برشی با سرعت بالا با قیر مخلوط شد. بدین صورت که پس از ۱۵ دقیقه اختلاط با سرعت کم، سرعت اختلاط به ۸۰۰۰ دور بر دقیقه افزایش یافت و اختلاط به مدت ۴۵ دقیقه انجام شد. دمای قیر در تمام طول اختلاط ۱۵۰ درجه سلسیوس بود. نمونه‌هایی که با قیر اصلاح شده ساخته شده‌اند در این مقاله با عنوان نمونه‌های F (۵٪ وزنی قیر پودر کربن)، G (۱۰٪ وزنی قیر پودر کربن) و H (۱۵٪ وزنی قیر پودر کربن) نام‌گذاری شدند.

۴-۵. تعیین درصد قیر بهینه

برای تعیین درصد قیر بهینه طبق طرح اختلاط مارشال، مطابق با استاندارد ASTM D1559 عمل شد. مطابق این

^۳ - Superpave gyratory compactor

^۱ - High shear mixer

^۲ - Ultrasonication

جدول ۷. درصد قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی

نمونه	درصد قیر بهینه
آسفالت شاهد	۵/۴
آسفالت اصلاح شده با کربن به‌عنوان فیلر (۲۵٪ وزنی فیلر)	۵/۲
آسفالت اصلاح شده با کربن به‌عنوان فیلر (۵۰٪ وزنی فیلر)	۵
آسفالت اصلاح شده با کربن به‌عنوان فیلر (۷۵٪ وزنی فیلر)	۴/۸
آسفالت اصلاح شده با کربن به‌عنوان فیلر (۱۰۰٪ وزنی فیلر)	۴/۶

۵-۵. آزمایش‌های انجام شده

تاکنون روش‌های زیادی برای ارزیابی حساسیت رطوبتی معرفی شده است. این آزمایش‌ها را می‌توان در دو دسته‌بندی کلی قرار داد. دسته اول، آزمایش‌هایی هستند که روی نمونه‌های غیر متراکم انجام می‌شوند. این آزمایش‌ها عموماً کیفی هستند، مثل آزمایش آب جوشان (ASTM D3625). دسته دوم، آزمایش‌هایی هستند که روی نمونه‌های متراکم انجام می‌شوند و نتایج آن‌ها عموماً کمی می‌باشد، مثل آزمایش AASHTO T283 (عاملیان و همکاران، ۲۰۱۴). در این پژوهش، این دو آزمایش بسیار مرسوم (آزمایش AASHTO T283 و ASTM D3625) در ارزیابی حساسیت رطوبتی به شرح زیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. همچنین، از آزمایش زاویه تماس برای انتخاب روش مناسب اختلاط قیر با پودر کربن و بررسی پخش یکنواخت پودر کربن در قیر و ارزیابی آب‌گریزی قیر و مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با پودر کربن آمورف استفاده شده است.

آزمایش زاویه تماس: در بیان ساده، آب‌گریزی به عدم تمایل یک ماده برای حل شدن در آب و یا پیوند با آب گفته می‌شود. دو عامل در ایجاد آب‌گریزی سطوح بسیار تأثیرگذارند: الف) انرژی سطحی کم. برای دستیابی به آب‌گریزی سطحی، لازم است یک سطح آب‌گریز یا کشش سطحی بسیار کم ایجاد شود. در این روش، با تغییر در مورفولوژی سطوحی با انرژی سطحی کم، می‌توان سطح آب‌گریز ایجاد کرد (معظم و

همکاران، ۲۰۱۶). ب) زبری سطح. ایجاد زاویه تماس بزرگ روی یک سطح فقط با اتکا به ساختار شیمیایی آب‌گریزی آن سطح، بدون هیچ بافتی در ابعاد نانو یا میکرو، تقریباً ناممکن است. بنابراین، زبری سطح عاملی مهم در پوشش‌های آب‌گریز است. زمانی که یک سطح دارای بافت زبری در مقیاس نانومتری باشد، فصل مشترک بین هوا و آب در یک قطره که روی سطح قرار گرفته است افزایش یافته و نیروی موئینگی بین قطره و سطح شدیداً کم می‌شود. بنابراین، قطره آب شکل کروی به خود می‌گیرد و امکان ایستایی ذرات آب روی سطح از بین می‌رود. به عنوان مثال، زیرساختارهایی در ابعاد نانو و میکرو روی سطح برگ نیلوفر آبی وجود دارد که باعث آب‌گریزی سطح این برگ می‌شود (بارتلوت و نینهوئیس، ۱۹۹۷).

یکی از آزمایش‌هایی که با هدف ارزیابی آب‌گریزی سطوح مختلف استفاده می‌شود آزمایش زاویه تماس می‌باشد. در این آزمون، قطره آبی روی سطح مورد نظر قرار می‌گیرد و زاویه تماس قطره آب با سطح قیر اندازه‌گیری می‌شود. این زاویه قابلیت تر شدن سطح قیر توسط آب را نشان می‌دهد. اگر زاویه تماس آب (شکل ۴) کمتر از ۹۰ درجه باشد سطح آب‌دوست و اگر بیشتر از ۹۰ درجه باشد سطح آب‌گریز نامیده می‌شود. سطوح با زاویه تماس بیشتر از ۱۵۰ درجه ابر آب‌گریز نامیده می‌شوند (لی و همکاران، ۲۰۰۳). زاویه تماس به وسیله دستگاه اندازه‌گیری زاویه تماس با قطره آب توسط سیستمی اندازه‌گیری زاویه تماس با قطره آب توسط سیستمی

سپس به مدت ۱۶ ساعت در دمای 18 ± 3 - درجه سلسیوس قرار می‌دهند. سپس نمونه‌ها را از پلاستیک خارج کرده و به مدت ۲۴ ساعت در حمام آب با دمای 1 ± 60 درجه سلسیوس قرار داده می‌شوند. در انتها، نمونه‌ها به مدت دو ساعت در حمام آب با دمای 1 ± 25 درجه سلسیوس قرار می‌گیرند. نمونه‌های خشک در داخل دو لایه پلاستیک قرار می‌گیرند تا آب به درون آن‌ها نفوذ نکند و به مدت ۲ ساعت $10 \pm$ دقیقه در حمام آب با دمای ۲۵ درجه سلسیوس قرار داده می‌شوند. این آزمایش در دمای ۲۵ درجه سلسیوس انجام می‌شود. مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها مطابق فرمول (۱) محاسبه می‌شود:

$$S_t = \frac{2000P}{\pi t D} \quad (1)$$

که در آن P بار ماکزیمم (نیوتن)، t ارتفاع نمونه (میلی‌متر)، D قطر نمونه (میلی‌متر) و S_t مقاومت کششی (کیلوپاسکال) است.

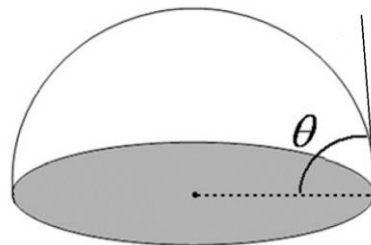
بعد از آنکه متوسط مقاومت کششی نمونه‌های آسفالتی هر گروه تعیین شد، نسبت مقاومت کششی مطابق فرمول (۲) تعیین می‌شود:

$$TSR = \frac{S_1}{S_2} \quad (2)$$

که در آن S_1 متوسط مقاومت کششی نمونه‌ها تحت شرایط مرطوب و S_2 متوسط مقاومت کششی نمونه‌ها تحت شرایط خشک (کیلوپاسکال) است.

آزمایش آب جوشان (ASTM D3625): این یک آزمایش کیفی است و برای بررسی چشمی عریان‌شدگی سنگدانه‌های مخلوط آسفالتی، مطابق استاندارد ASTM D3625 استفاده می‌شود. در این آزمایش، درجات مختلف عریان‌شدگی نمونه‌ها پس از جوشاندن مخلوط آسفالتی متراکم نشده به مدت ۱۰ دقیقه در آب جوش تعیین می‌شود. حدود ۲۵۰ گرم مصالح متراکم نشده (با دمای حداکثر تا ۱۰۰ درجه سلسیوس و حداقل ۸۰ درجه سلسیوس) در آب جوش ریخته شده و به مدت

مجهز به یک دوربین با قابلیت عکس‌برداری از قطره و دارای نرم‌افزار سنجش زاویه تماس قطره با سطح مورد نظر انجام می‌شود. در این پژوهش، این آزمایش برای بررسی آب‌گریزی قیر اصلاح شده با پودر کربن و همچنین انتخاب روش مناسب اختلاط قیر با پودر کربن جهت پخش یکنواخت پودر کربن در قیر روی نمونه‌های قیر اصلاح شده با پودر کربن و همچنین آسفالت ساخته شده با آن‌ها انجام شده است، که نتایج آن در قسمت نتایج آمده است. برای تعیین بهترین روش اختلاط، قیر و پودر کربن (۵٪ وزنی قیر) با سه روش مکانیکی و همزن برشی با سرعت بالا و اولتراسونیک مخلوط شدند و تحت آزمایش زاویه تماس قرار گرفتند. لازم به ذکر است که این آزمایش ۵ مرتبه روی هر نمونه تکرار شده و میانگین آن‌ها به عنوان زاویه تماس گزارش گردید.



شکل ۴. شماتیک زاویه تماس (یان و همکاران، ۲۰۱۱)

آزمایش کشش غیر مستقیم: این آزمایش مطابق با استاندارد AASHTO T283 انجام شد. بر اساس این استاندارد باید ۷۰ تا ۸۰ درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی با آب اشباع شود. برای این منظور، از ظرف خلأ استفاده می‌شود. ظرف با آب در دمای محیط به نحوی پر می‌شود که سطح آب حداقل ۲۵ میلی‌متر از سطح نمونه بالاتر باشد. ایجاد خلأ با فشار مطلق ۱۳ تا ۶۷ کیلوپاسکال انجام می‌شود. نمونه‌ها به دو دسته خشک و تر تقسیم می‌شوند. نمونه‌های تر را پس از اشباع کردن درون کیسه‌های پلاستیکی قرار داده و

همزن برشی با سرعت بالا و اولتراسونیک مخلوط می‌شود، به دلیل اینکه مقدار قیر و پودر کربن ثابت می‌باشد و تنها تفاوت در نوع همزن می‌باشد، بیشتر بودن زاویه تماس در نمونه قیر مخلوط شده با پودر کربن توسط دستگاه اولتراسونیک و همزن برشی با سرعت بالا نسبت به همزن مکانیکی می‌تواند نشان‌دهنده پخش شدن یکنواخت‌تر پودر کربن در قیر توسط این دو همزن باشد. جدول ۸ و شکل ۵ نتایج آزمایش زاویه تماس قیر اصلاح شده با روش‌های گوناگون را نشان می‌دهند. همان‌طور که از نتایج مشخص است، نمونه ساخته شده با روش اولتراسونیک، در مقایسه با دو روش دیگر، زاویه تماس بزرگ‌تری دارد که نشان‌دهنده آب‌گریزتر بودن مخلوط ساخته شده با این روش می‌باشد. اما به دلیل اجرایی نبودن در حجم زیاد و پرهزینه بودن آن نسبت به سایر روش‌ها، روش همزن برشی با سرعت بالا که نتایج نزدیک به روش اولتراسونیک را دارد به عنوان روش انتخابی مورد استفاده قرار گرفت. لازم به ذکر است که از آزمایش ویسکوزیته نیز برای تعیین روش اختلاط بهینه استفاده شده است که در ادامه بیان می‌گردد. نکته قابل توجه این است که نتایج هر دو روش در انتخاب نوع همزن یکسان می‌باشد.

۱۰ دقیقه حرارت داده می‌شوند. در انتها، قیرهای روی سطح آب (قیرهایی که بر اثر حرارت از سنگدانه‌ها جدا شده‌اند) جدا می‌شوند تا باعث پوشش مجدد مصالح نگردند. پس از سرد شدن ظرف به همراه محتویات درون آن در دمای اتاق، آب موجود درون ظرف خالی شده و مصالح روی یک کاغذ سفید ریخته می‌شوند تا پوشش قیر موجود روی سنگدانه‌ها به صورت چشمی مورد بررسی قرار گیرد.

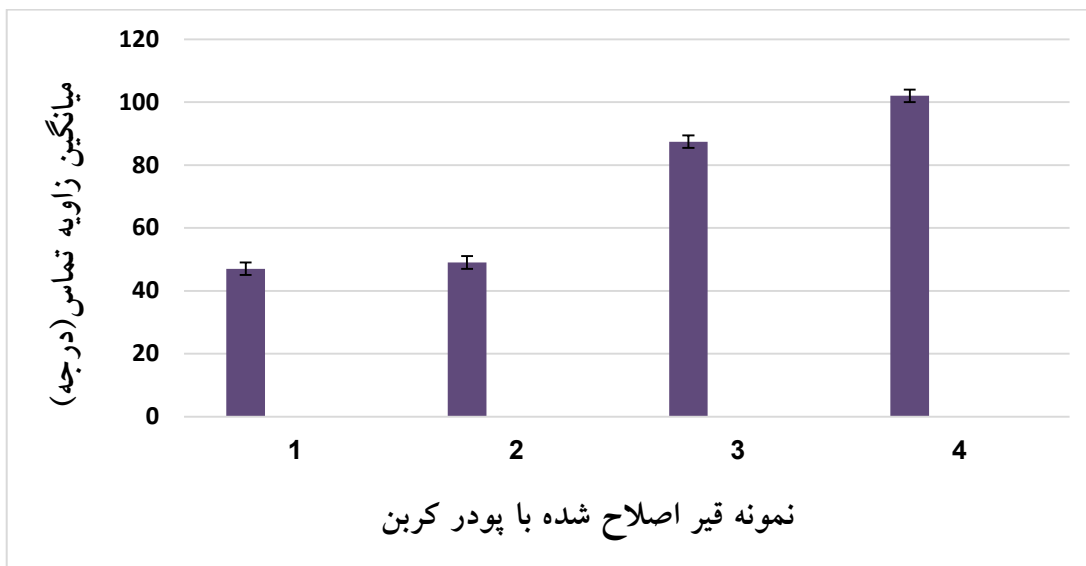
۶. نتایج

۶-۱. نتایج آزمایش زاویه تماس

همان‌طور که قبلاً گفته شد، برای انتخاب روش مناسب جهت پخش یکنواخت پودر کربن در قیر، از بین سه روش مکانیکی، همزن برشی با سرعت بالا و روش اولتراسونیک، از آزمایش زاویه تماس استفاده شده است. پودر کربن آمورف یک ماده آب‌گریز است و با اضافه کردن این پودر به قیر زاویه تماس مخلوط نسبت به قیر شاهد، به دلیل ماهیت آب‌گریزی این پودر، افزایش می‌یابد. بنابراین، می‌توان گفت هر چه زاویه تماس مخلوط قیر و پودر کربن بزرگتر باشد نشان‌دهنده این است که پودر کربن بهتر در قیر پراکنده شده است. هنگامی که پودر کربن در قیر با سه همزن مکانیکی،

جدول ۸. نتایج آزمایش زاویه تماس روی نمونه قیر شاهد و قیرهای اصلاح شده با ۵۵ پودر کربن برای پیدا کردن روش بهینه اختلاط

نوع قیر	نوع همزن	نام‌گذاری در نمودار	میانگین زاویه تماس (درجه)
قیر شاهد	-	۱	۴۷
قیر اصلاح شده با ۵٪ پودر کربن آمورف	مکانیکی	۲	۴۹
قیر اصلاح شده با ۵٪ پودر کربن آمورف	همزن برشی با سرعت بالا	۳	۸۶/۲
قیر اصلاح شده با ۵٪ پودر کربن آمورف	اولتراسونیک	۴	۱۰۲



شکل ۵. نتایج آزمایش زاویه تماس برای قیر شاهد و قیرهای اصلاح شده با پودر کربن

برای اطمینان از انتخاب روش مناسب اختلاط پودر کربن با قیر، از آزمایش ویسکوزیته مطابق استاندارد AASHTO T72 نیز استفاده شده است. نتایج این آزمایش در جدول ۹ نشان داده شده است. با توجه به اینکه مقدار قیر و پودر کربن ثابت می‌باشد و تنها تفاوت در نوع همزن است، هر چه ویسکوزیته نسبت به قیر شاهد افزایش یابد یعنی پودر کربن با قیر بهتر مخلوط شده است.

جدول ۹. نتایج آزمایش ویسکوزیته روی نمونه قیر شاهد و قیرهای اصلاح شده با ۵٪ پودر کربن

ویسکوزیته بر حسب ثانیه (ساتی استوکس)	نوع همزن	نوع قیر
۱۳۳ (۲۶۶)	-	قیر شاهد
۱۳۶ (۲۷۲)	مکانیکی	قیر اصلاح شده با ۵٪ پودر کربن آمورف
۱۴۵ (۲۹۰)	همزن برشی با سرعت بالا	قیر اصلاح شده با ۵٪ پودر کربن آمورف
۱۴۸ (۲۹۶)	اولتراسونیک	قیر اصلاح شده با ۵٪ پودر کربن آمورف

با سرعت بالا، آزمایش زاویه تماس روی قیرهای اصلاح شده با ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی قیر پودر کربن و هشت مخلوط آسفالتی مورد نظر (آسفالت شاهد و مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با پودر کربن به عنوان فیلر B تا E و مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با قیر اصلاح شده با پودر کربن (F, G و H) نیز انجام شد و نتایج در جداول ۱۰ و ۱۲ و شکل‌های ۶ و ۷ آمده است.

همان‌طور که از نتایج مشخص است، اختلاط پودر کربن با قیر با همزن برشی با سرعت بالا و اولتراسونیک بهتر از همزن مکانیکی صورت گرفته است، که با نتایج آزمایش زاویه تماس همخوانی دارد. همان‌طور که بیان شد، به دلیل آنکه استفاده از همزن اولتراسونیک از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست، همزن برشی با سرعت بالا به عنوان همزن مورد استفاده در اختلاط قیر با پودر کربن انتخاب گردیده است. پس از انتخاب همزن برشی

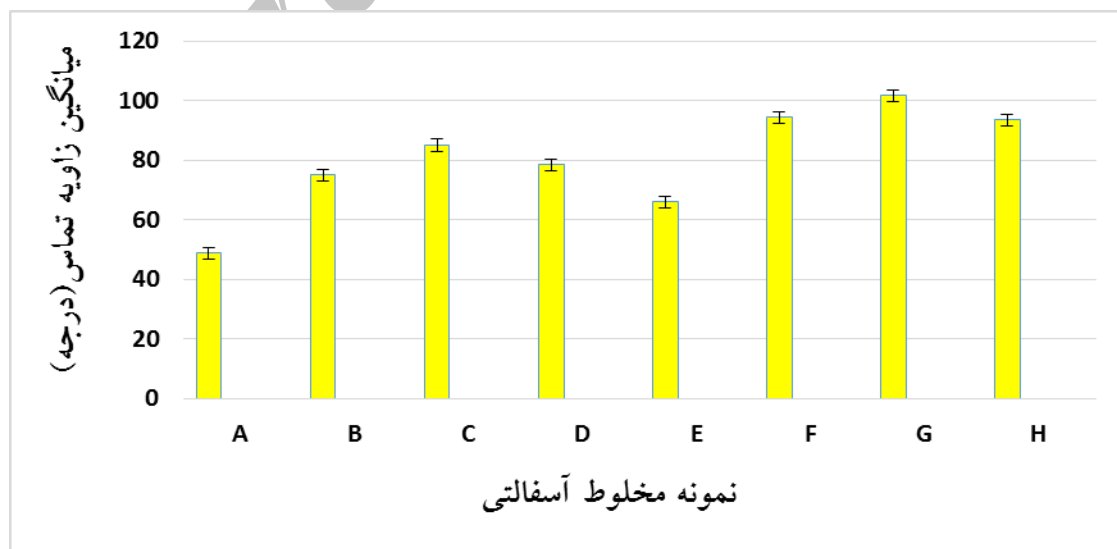
بررسی روش‌های افزودن پودر کربن آمورف به قیر و ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی گرم (HMA) اصلاح شده با این پودر

جدول ۱۰. نتایج آزمایش زاویه تماس روی نمونه قیر شاهد و قیرهای اصلاح شده

نمونه	نوع همزن	نام‌گذاری	میانگین زاویه تماس (درجه)
قیر شاهد	-	A	۴۸
قیر اصلاح شده با ۵٪ پودر کربن	همزن برشی با سرعت بالا	B	۸۶/۲
قیر اصلاح شده با ۱۰٪ پودر کربن	همزن برشی با سرعت بالا	C	۱۰۱
قیر اصلاح شده با ۱۵٪ پودر کربن	همزن برشی با سرعت بالا	D	۹۳



شکل ۶. نتایج آزمایش زاویه تماس برای قیر شاهد و قیرهای اصلاح شده با پودر کربن



شکل ۷. نتایج آزمایش زاویه تماس برای آسفالت شاهد و مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با پودر کربن

همچنین، آزمایش ویسکوزیته برای قیرهای اصلاح با پودر کربن در مقادیر ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی قیر که با روش همزن برشی با سرعت بالا مخلوط شده‌اند انجام شده است که نتایج در جدول ۱۱ قابل مشاهده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، پودر کربن آمورف ویسکوزیته قیر را افزایش می‌دهد و با افزایش درصد پودر کربن، ویسکوزیته بیشتر افزایش می‌یابد.

همان‌طور که از نتایج مشخص است، با استفاده از پودر کربن آمورف، زاویه تماس قطره آب با قیر افزایش یافته و اصطلاحاً قیر آب‌گریزتر شده است. با افزایش درصد پودر کربن، زاویه تماس بزرگ‌تر شده است. ولی در قیر اصلاح شده با ۱۵٪ پودر کربن آمورف، این مقدار کمی کاهش یافته که می‌توان این کاهش را به کلوخه شدن پودر کربن، به دلیل درصد بالای آن در قیر، نسبت داد.

جدول ۱۱. نتایج آزمایش ویسکوزیته روی نمونه قیر شاهد و قیرهای اصلاح شده

نمونه	نوع همزن	ویسکوزیته بر حسب ثانیه (ساتی استوکس)
قیر شاهد	-	۱۳۳ (۲۶۶)
قیر اصلاح شده با ۵٪ پودر کربن	همزن برشی با سرعت بالا	۱۴۵ (۲۹۰)
قیر اصلاح شده با ۱۰٪ پودر کربن	همزن برشی با سرعت بالا	۱۵۲ (۳۰۴)
قیر اصلاح شده با ۱۵٪ پودر کربن	همزن برشی با سرعت بالا	۱۶۱ (۳۲۲)

جدول ۱۲. زاویه تماس برای آسفالت شاهد و مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با پودر کربن

نمونه	نام	زاویه تماس
آسفالت شاهد	A	۴۸/۸
آسفالت اصلاح شده با کربن به عنوان فیلر (۵۰٪ وزنی فیلر)	C	۸۵
آسفالت اصلاح شده با کربن به عنوان فیلر (۷۵٪ وزنی فیلر)	D	۷۸/۴
آسفالت اصلاح شده با کربن به عنوان فیلر (۱۰۰٪ وزنی فیلر)	E	۶۶
آسفالت اصلاح شده با کربن به عنوان افزودنی در قیر (۵٪)	F	۹۴/۴
آسفالت اصلاح شده با کربن به عنوان افزودنی در قیر (۱۰٪)	G	۱۰۱/۶
آسفالت اصلاح شده با کربن به عنوان افزودنی در قیر (۱۵٪)	H	۹۳/۵

کشش غیرمستقیم و آب جوشان است که در ادامه مطرح و بررسی می‌گردد. پودر کربن آمورف به دلیل داشتن برجستگی‌هایی در ابعاد نانو و میکرو باعث افزایش آب‌گریزی مخلوط‌های اصلاح شده با این پودر می‌گردد.

مخلوط‌های ساخته شده با پودر کربن آمورف مطابق انتظار دارای زاویه تماس بزرگ‌تری نسبت به نمونه شاهد می‌باشند که نشان‌دهنده آب‌گریز شدن مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با این پودر می‌باشد که می‌تواند نفوذ آب به درون مخلوط‌های آسفالتی را کاهش دهد و حساسیت رطوبتی کاهش می‌یابد. نکته قابل توجه، همخوانی نتایج این آزمایش با آزمایش‌های

۶-۲. نتایج آزمایش کشش غیر مستقیم

میانگین مقاومت کششی غیر مستقیم^۱ نمونه‌های خشک و تر مطابق استاندارد محاسبه و در جدول ۱۳ و شکل ۸ ارائه شده است. همچنین، نسبت میانگین مقاومت غیر مستقیم کششی تر به خشک (TSR)^۲ محاسبه و در شکل ۹ قابل مشاهده است. همان‌طور که از نتایج مشخص است، پودر کربن باعث افزایش مقاومت کششی غیر مستقیم و در نتیجه کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی می‌شود. از بین نمونه‌های آسفالتی ساخته شده با فیلر کربنی، نمونه آسفالتی که ۵۰٪ فیلر با پودر کربن جایگزین شده است (C) و از بین نمونه‌های آسفالتی ساخته شده با قیر اصلاح شده با پودر کربن نمونه ساخته شده با ۱۵٪ وزنی قیر پودر کربن (G) بیشترین میانگین کششی غیر مستقیم در حالت تر را دارا هستند.

همچنین، نکته قابل توجه دیگر، افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های خشک در مخلوط‌های ساخته شده با قیر اصلاح شده با پودر کربن نسبت به نمونه شاهد می‌باشد. برای نمونه‌های F، G و H به ترتیب ۳۱، ۳۶ و ۴۲ درصد افزایش مقاومت نسبت به نمونه‌های شاهد داشته‌ایم که بسیار قابل توجه می‌باشد. شاخص TSR برای نمونه ساخته شده با ۵۰٪ پودر کربن برابر ۹۰ می‌باشد که نسبت به نمونه شاهد ۱۸٪ افزایش یافته است. نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم تر به خشک (TSR) مخلوط‌های آسفالتی F، G و H حدوداً برابر نمونه شاهد می‌باشد. اما مقاومت کششی غیر مستقیم در حالت خشک و تر در این مخلوط‌های آسفالتی (F، G و H) بسیار بیشتر از نمونه شاهد می‌باشد. از آنجایی که شاخص TSR نسبت مقاومت کششی تر به خشک می‌باشد، TSR در مخلوط‌های آسفالتی F، G و H تقریباً برابر نمونه شاهد شده است.

افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم تر و همچنین شاخص TSR در نمونه‌های اصلاح شده با پودر کربن نسبت به نمونه‌های شاهد، به دلیل داشتن خاصیت آب‌گریزی پودر کربن می‌باشد. یکی از اصلی‌ترین عوامل خرابی‌های رطوبتی، از بین رفتن اتصال بین قیر و سنگدانه به دلیل حضور آب می‌باشد. پودر کربن با داشتن خاصیت آب‌گریزی مانع از نفوذ رطوبت به محل اتصال قیر و سنگدانه می‌شود و در نتیجه چسبندگی قیر و آسفالت افزایش یافته و حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی کاهش می‌یابد. همچنین، پودر کربن در حالت استفاده به عنوان فیلر به دلیل داشتن سطحی زبر، باعث افزایش زبری سطح سنگدانه خواهد شد که در نهایت اتصال بین قیر و سنگدانه مستحکم‌تر خواهد شد.

¹ Indirect Tensile Strength

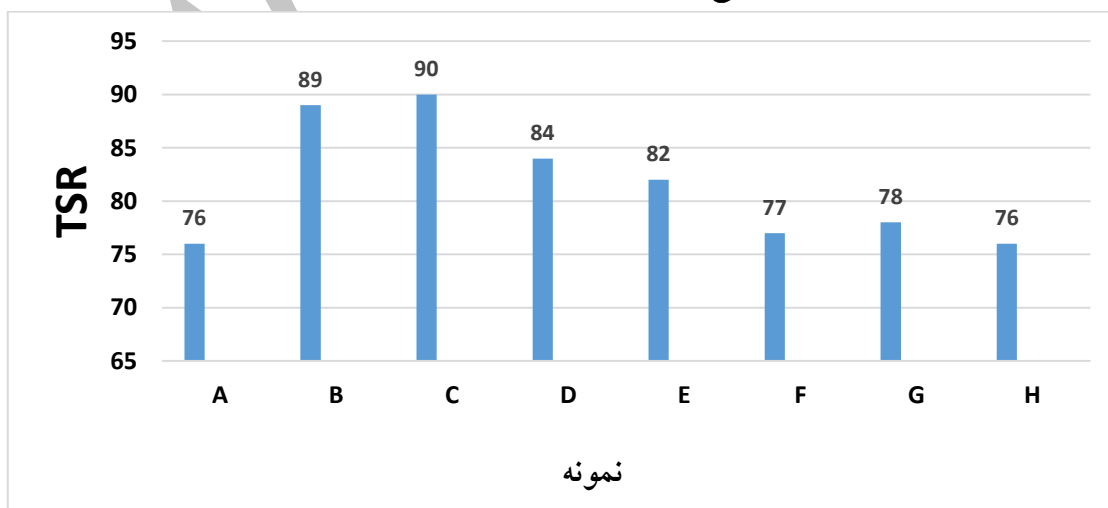
² Tensile Strength Ratio

جدول ۱۳. نتایج میانگین مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی

TSR	میانگین مقاومت		نام	نمونه
	کششی خشک (KPa)	کششی تر (KPa)		
۷۶	۴۶۴	۳۵۴	A	آسفالت شاهد
۸۹	۴۷۳	۴۲۰	B	آسفالت اصلاح شده با کربن به عنوان فیلر (۲۵٪ وزنی فیلر)
۹۰	۵۰۶	۴۵۷	C	آسفالت اصلاح شده با کربن به عنوان فیلر (۵۰٪ وزنی فیلر)
۸۴	۴۸۵	۴۰۹	D	آسفالت اصلاح شده با کربن به عنوان فیلر (۷۵٪ وزنی فیلر)
۸۲	۴۷۹	۳۹۲	E	آسفالت اصلاح شده با کربن به عنوان فیلر (۱۰۰٪ وزنی فیلر)
۷۷	۶۰۷	۴۶۸	F	آسفالت اصلاح شده با کربن به عنوان افزودنی در قیر (۵٪)
۷۸	۶۳۰	۴۸۹	G	آسفالت اصلاح شده با کربن به عنوان افزودنی در قیر (۱۰٪)
۷۶	۶۵۷	۴۹۵	H	آسفالت اصلاح شده با کربن به عنوان افزودنی در قیر (۱۵٪)



شکل ۸. نتایج میانگین مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی



شکل ۹. نسبت مقاومت کششی تر به خشک (TSR)

بررسی روش‌های افزودن پودر کربن آمورف به قیر و ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی گرم (HMA) اصلاح شده با این پودر

۳-۶. آزمایش آب جوشان (ASTM D3625)

پس از انجام این آزمایش، نمونه‌ها مورد ارزیابی چشمی قرار گرفتند. همان‌طور که انتظار می‌رفت، پودر کربن به دلیل داشتن خاصیت آب‌گریزی، مانع از نفوذ آب بین قیر و سنگدانه می‌شود. در نتیجه، اتصال بین قیر و سنگدانه قوی‌تر خواهد بود. زیرا نفوذ رطوبت در بین لایه قیر و سنگدانه اصلی‌ترین عامل کاهش چسبندگی قیر با سنگدانه و باعث بروز پدیده عریان‌شدگی می‌باشد. در شکل ۱۰، نتیجه این آزمایش برای نمونه شاهد و نمونه حاوی ۵۰٪ پودر کربن به عنوان فیلر و نمونه ساخته شده با ۱۰٪ پودر کربن به عنوان افزودنی در قیر قابل ملاحظه می‌باشد. مطابق انتظار، در نمونه‌هایی که ۵۰٪ فیلر با پودر کربن جایگزین شده

است (شکل ۱۱-ب) پدیده و نمونه ساخته شده با ۱۰٪ پودر کربن به عنوان افزودنی در قیر (شکل ۱۰-ج) عریان‌شدگی بسیار کمتر از نمونه شاهد (شکل ۱۰-الف) می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۱۰-الف) ملاحظه می‌شود، بسیاری از سنگدانه‌های نمونه‌های شاهد دچار عریان‌شدگی شده‌اند که در شکل با دایره‌های قرمز رنگ نشان داده شده‌اند. اما در نمونه‌های ساخته شده با پودر کربن (شکل ۱۰-ب) و (شکل ۱۰-ج) این عریان‌شدگی بسیار کم و در بازبینی به صورت چشمی قابل صرف‌نظر می‌باشد. پودر کربن آمورف با داشتن خاصیت آب‌گریزی مانع از ورود آب بین قیر و سنگدانه شده و در نتیجه مانع از عریان‌شدگی مخلوط آسفالتی می‌گردد.



الف



ب



ج

شکل ۱۰. نتایج آزمایش آب جوشان: الف) نمونه شاهد، ب) نمونه ساخته شده با ۵۰٪ وزنی فیلر پودر کربن و ج) نمونه

ساخته شده با ۱۰٪ پودر کربن به عنوان افزودنی در قیر

- استفاده از پودر کربن آمورف باعث افزایش مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های تر و خشک می‌شود و همچنین نسبت مقاومت تر به خشک (TSR) نیز نسبت به نمونه شاهد افزایش می‌یابد. در بین نمونه‌هایی که پودر کربن در آن‌ها به عنوان جایگزین بخشی از فیلر مورد استفاده قرار گرفته، نمونه‌های حاوی ۵۰٪ وزنی فیلر پودر کربن دارای بیشترین مقاومت تر و خشک می‌باشند. به گونه‌ای که میانگین مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های تر ۲۹ درصد و میانگین نمونه‌های خشک ۹ درصد نسبت به نمونه‌های شاهد افزایش یافته است و شاخص حساسیت رطوبتی (TSR) از ۷۶٪ به ۹۰٪ رسیده که افزایش قابل توجهی است.

- در نمونه‌هایی که با قیر اصلاح شده با پودر کربن آمورف ساخته شده‌اند، میانگین مقاومت کششی غیر مستقیم خشک به شدت افزایش یافته است. به نحوی که در نمونه‌های حاوی قیر اصلاح شده با ۱۵٪ وزنی قیر پودر کربن، میانگین مقاومت کششی غیر مستقیم حدود ۴۲٪ افزایش یافته است.

- با افزایش استفاده از پودر کربن آمورف به عنوان فیلر در مقادیر ۷۵ و ۱۰۰ درصد، میانگین مقاومت کششی

۷. بحث

در این تحقیق، به بررسی تأثیر استفاده از پودر کربن در مخلوط آسفالت گرم پرداخته شد. پودر کربن هم به صورت ماده افزودنی به قیر (در مقادیر ۵ و ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی قیر) و هم به صورت جایگزین بخشی از فیلر مصرفی در مقادیر ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد وزنی فیلر در مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار گرفت.

- نتایج آزمایش زاویه تماس نشان می‌دهد که پودر کربن آمورف باعث افزایش زاویه تماس قیر و مخلوط-های آسفالتی می‌شود که دلیل آن داشتن خاصیت آب-گریزی پودر کربن آمورف می‌باشد. به طوری که زاویه تماس آسفالت شاهد برابر ۴۸/۸ و زاویه تماس آسفالت اصلاح شده با ۵۰٪ پودر کربن به عنوان فیلر ۸۵ می-باشد که حدود ۴۳٪ افزایش یافته است.

- استفاده از پودر کربن آمورف به عنوان فیلر در مخلوط‌های آسفالتی باعث کاهش درصد قیر بهینه می‌شود و با افزایش مقدار کربن، درصد قیر بهینه بیشتر کاهش می‌یابد. این امر می‌تواند به کاهش هزینه‌های ساخت مخلوط‌های آسفالتی کمک کند.

خاصیت آب‌گریزی، از نفوذ آب به درون مخلوط‌های آسفالتی جلوگیری می‌کند و در نتیجه باعث بهبود مقاومت مصالح در برابر آسیب‌های رطوبتی می‌شود. استفاده از پودر کربن می‌تواند باعث کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی و افزایش مقاومت کششی غیر مستقیم مخلوط‌های آسفالتی شود.

۹. سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از مرکز تحقیقات قیر و آسفالت دانشگاه علم و صنعت ایران و دانشکده علوم و فناوری‌های نوین دانشگاه اصفهان بابت همکاری در ساخت و انجام آزمایش‌ها تشکر می‌نمایند. از شرکت رز پلیمر نیز جهت تهیه پودر کربن مصرفی در این تحقیق صمیمانه قدردانی می‌گردد.

غیر مستقیم نمونه‌های تر و خشک و همچنین TSR نسبت به نمونه‌های شاهد افزایش می‌یابد. اما نسبت به نمونه حاوی ۰.۵٪ وزنی فیلر، پودر کربن با مقداری کاهش روبرو می‌شویم که این عامل را می‌توان به کلوخه شدن پودر کربن نسبت داد.

- کاربرد پودر کربن آمورف به صورت جایگزین بخشی از فیلر تأثیر بیشتری نسبت به کاربرد آن به عنوان افزودنی قیر بر حساسیت رطوبتی دارد.

- نکته قابل توجه، همخوانی نتایج آزمایش زاویه تماس و آزمایش کشش غیر مستقیم می‌باشد. یعنی با افزایش زاویه تماس در مخلوط آسفالتی، TSR نیز افزایش یافته است و برعکس.

۸. نتیجه‌گیری

نتایج آزمایش‌ها نشان داد که پودر کربن به دلیل داشتن

۱۰. مراجع

- زیاری، ح.، دیواندری، ح. و یآوری، ع. م. ۱۳۹۵. "تأثیر افزودنی آهک هیدراته بر پارامترهای عملکردی مخلوط آسفالتی نیمه گرم (WMA)". مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۲(۱): ۱-۱۶.
- زیاری، ح.، میرزابابی، پ.، باباگلی، ر. و منیری، ع. ۱۳۹۴. "تأثیر نوع مصالح بر خواص عملکردی آسفالت نیمه گرم اصلاح شده با زایکوترم". مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۱(۳): ۶۳-۷۶.
- مدرس، ا. و رحمان زاده، م. ۱۳۹۴. "تأثیر فیلر زغال سنگ ضایعاتی و خاکستر آن بر مقاومت و دوام مخلوط آسفالت گرم در مقایسه با پودر سنگ آهک". مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۱(۱): ۵۵-۶۵.
- Abuawad, I. M., Al-Qadi, I. L. and Trepanier, J. S. 2015. "Mitigation of moisture damage in asphalt concrete: Testing techniques and additives/modifiers effectiveness". *Constr. Build. Mater.*, 84: 437-443.
- Amelian, S., Abtahi, S. M. and Hejazi, S. M. 2014. "Moisture susceptibility evaluation of asphalt mixes based on image analysis". *Constr. Build. Mater.*, 63: 294-302.
- Barthlott, W. and Neinhuis, C. 1997. "Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces". *Planta*, 202(1): 1-8.
- Bausano, J. and Williams, R. C. 2009. "Transitioning from AASHTO T283 to the simple performance test using moisture conditioning". *J. Mater. Civil Eng.*, 21(2): 73-82.
- Behiry, A. E. A. E. M. 2013. "Laboratory evaluation of resistance to moisture damage in asphalt mixtures". *Ain Shams Eng. J.*, 4(3): 351-363.
- Chen, J., Wu, S., Pang, L., Chen, Z., Xie, J. and Lei, M. 2014. "Influence of flue gas desulphurisation ash on moisture damage in asphalt mixtures". *Mater. Res. Innov.*, 18(S4): S4-81-S4-86.
- Dehnad, M., Khodaii, A. and Moghadas Nejad, F. 2013. "Moisture sensitivity of asphalt mixtures under different load frequencies and temperatures". *Constr. Build. Mater.*, 48: 700-707.
- Gorkem, C. and Sengoz, B. 2009. "Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime". *Constr. Build. Mater.*, 23(6): 2227-2236.

- Grenfell, J., Ahmad, N., Liu, Y., Apeagyei, A., Large, D. and Airey, G. 2014. "Assessing asphalt mixture moisture susceptibility through intrinsic adhesion, bitumen stripping and mechanical damage". *Road Mater. Pavement Design*, 15(1): 131-152.
- Huang, B., Shu, X., Dong, Q. and Shen, J. 2010. "Laboratory evaluation of moisture susceptibility of hot-mix asphalt containing cementitious fillers". *J. Mater. Civil Eng.*, 22(7): 667-673.
- Kavussi, A., Qorbani, M., Khodaii, A. and Haghshenas, H. 2013. "Quantification of parameters affecting moisture resistance of warm mix asphalt using response surface methodology". *International Journal of Pavements Conference (IJPC)*, Brazil.
- Kim, Y. R., Lutfi, J. S., Bhasin, A. and Little, D. N. 2008. "Evaluation of moisture damage mechanisms and effects of hydrated lime in asphalt mixtures through measurements of mixture component properties and performance testing". *J. Mater. Civil Eng.*, 20(10): 659-667.
- Li, M., Zhai, J., Liu, H., Song, Y., Jiang, L. and Zhu, D. 2003. "Electrochemical deposition of conductive superhydrophobic zinc oxide thin films". *The J. Phys. Chem. B*, 107(37): 9954-9957.
- Moazzam, P., Razmjou, A., Golabi, M., Shokri, D. and Landarani-Isfahani, A. 2016. "Investigating the BSA protein adsorption and bacterial adhesion of Al-alloy surfaces after creating a hierarchical (micro/nano) superhydrophobic structure". *J. Biomed. Mater. Res. A*, 104(9): 2220-2233.
- Moghadas Nejad, F., Azarhoosh, A., Hamedi, G. H. and Azarhoosh, M. 2012. "Influence of using nonmaterial to reduce the moisture susceptibility of hot mix asphalt". *Constr. Build. Mater.*, 31: 384-388.
- Robertson, J. and O'Reilly, E. P. 1987. "Electronic and atomic structure of amorphous carbon". *Phys. Rev. B*, 35(6): 2946.
- Tarefder, R. A. and Ahmad, M. 2014. "Evaluating the relationship between permeability and moisture damage of asphalt concrete pavements". *J. Mater. Civil Eng.*, 27(5).
- Wasiuddin, N. M., Fogle, C. M., Zaman, M. M. and O'Rear, E. A. 2007. "Effect of antistripping additives on surface free energy characteristics of asphalt binders for moisture-induced damage potential". *J. Test. Eval.*, 35(1): 36-44.
- Yan, Y., Gao, N. and Barthlott, W. 2011. "Mimicking natural superhydrophobic surfaces and grasping the wetting process: A review on recent progress in preparing superhydrophobic surfaces". *Adv. Colloid Interface Sci.*, 169(2): 80-105.