

ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی نانولوله کربنی

فرزاد عطازاده وردین^۱ و بابک گلچین^{۲*}

^۱ دانش‌آموخته مقطع کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهر

^۲ استادیار گروه مهندسی عمران، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهر

(دریافت: ۹۵/۱۲/۲، پذیرش: ۹۶/۷/۱۷، نشر آنلاین: ۹۶/۷/۱۸)

چکیده

پژوهش‌های گذشته نشان داده است که نانومواد، حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی را بهبود می‌دهند. در این مقاله، اثر نانولوله کربنی بر بهبود حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به این که جنس مصالح سنگی بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی تأثیرگذار است، از دو نوع مصالح سنگی سیلیسی و آهکی در ساخت نمونه‌ها استفاده شد. نمونه‌ها با درصد‌های ۰/۱٪، ۱/۱٪، ۲/۲٪ و ۳/۳٪ نانولوله کربنی ساخته شدند. حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی گرم با استفاده از آزمایش کشش غیر مستقیم بررسی شد و نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم برای نمونه‌ها محاسبه گردید. در ادامه، اثر درصد‌های مختلف نانولوله کربنی بر روی پارامترهای آزمایش مارشال نیز ارزیابی شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم مخلوط‌های اصلاح شده با نانولوله کربنی بیشتر از نمونه‌های بدون افزودنی بوده و در نتیجه خصوصیات رطوبتی مخلوط‌ها ارتقا می‌یابد (به عنوان مثال ۱۱/۸ و ۹/۹ درصد بهبود برای مصالح آهکی و سیلیسی در حضور ۱٪ از افزودنی). ضمناً درصد بیشتر نانولوله کربنی موجود در قیر، عملکرد بهتری را نشان می‌دهد. از طرفی این تحقق نشان داد که مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با مصالح آهکی در اکثر درصد‌های نانولوله کربنی، حساسیت رطوبتی کمتری در مقایسه با مصالح سیلیسی مشابه دارند. همچنین افزودنی نانولوله کربنی، مقاومت کشش غیر مستقیم مخلوط‌های آسفالتی را در دو حالت خشک و اشباع و نیز استحکام مارشال نمونه‌ها را افزایش می‌دهد.

واژگان کلیدی: نانولوله کربنی، مخلوط آسفالتی، قیر، حساسیت رطوبتی، آزمایش مارشال.

۱- مقدمه

آمین‌ها، موادی هستند که آسیب رطوبتی را در مخلوط‌های آسفالتی کاهش می‌دهند. در این تحقیق، اثر یک نانو ماده به نام نانولوله کربنی به منظور امکان بهبود حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی قرار گرفته است.

کربن، انواع میکروسکوپی مختلفی دارد. ترکیباتی همچون گرافیت، الماس، کربن‌های بی‌شکل (آمورف)، فولرن، نانو الیاف کربنی، گرافین و نانو لوله‌های کربنی از این دسته‌اند. در میان ساختارهای کربنی، نانولوله‌های کربنی به دلیل خواص منحصر به فرد خود جزء جذاب‌ترین نانومواد محسوب می‌شوند. در یک نانو لوله کربنی، اتم‌های کربن در ساختاری استوانه‌ای آرایش یافته‌اند (یک لوله توخالی که جنس دیواره‌اش از اتم‌های کربن است). آرایش اتم‌های کربن در دیواره ساختارهای استوانه‌ای، دقیقاً مشابه آرایش کربن در صفحات گرافیت است. گرافیت، شامل شش ضلعی‌های منظم

منظور از حساسیت رطوبتی، تمایل مخلوط‌های آسفالتی به عریان شدگی است. از بین رفتن چسبندگی بین سنگدانه‌ها و قیر در یک مخلوط آسفالتی، عریان شدگی نامیده می‌شود (Xiao و همکاران، ۲۰۱۰). این پدیده عمدتاً تحت اثر آب، رطوبت و تغییر دمای روسازی به وجود آمده و با ترافیک تشدید می‌گردد. عریان شدگی می‌تواند مقدمه‌ای برای ایجاد خرابی‌هایی دیگر از قبیل ترک خوردگی، شن زدگی و شیارشدگی شود (Khodaii و همکاران، ۲۰۱۲). بنابراین می‌توان گفت آسیب رطوبتی یکی از چالش‌های مهم در صنعت تولید آسفالت است. تاکنون به منظور رفع یا کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، مطالعات مختلفی انجام شده است. این مطالعات، منجر به معرفی برخی افزودنی‌ها گردیده است. آهک هیدراته، سیمان پرتلند، مواد پلیمری و افزودنی‌های مایع از جنس

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۲۲۰۹۴۱۷۱

شده با نانولوله کربنی پرداخت. نتایج آزمایش‌های وی نشان داد که اضافه کردن نانولوله کربنی به قیر باعث بهبود مشخصات قیر می‌شود. همچنین استفاده از نانولوله‌های کربنی باعث بهبود مقاومت شیارشدگی، افزایش مدول برجهندگی، عمر خستگی، خزش استاتیکی و خزش دینامیکی نمونه‌های آسفالتی اصلاح شده می‌گردد. دیواندردی و همکاران (۱۳۹۴) در پژوهشی، به بررسی اثر پلیمر استایرن-بوتادین-استایرن (SBS) و نانولوله‌های کربنی چند دیواره بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی پرداختند. در این تحقیق، پلیمر SBS با درصد‌های وزنی مختلف (۴ تا ۶ درصد) به همراه نانو لوله‌های کربنی با درصد‌های (۱ تا ۳ درصد) با قیر پالایشگاه تهران مخلوط شد. مشاهدات نشان داد که افزایش این افزودنی‌ها، موجب بهبود خصوصیات و کارایی مخلوط‌های آسفالتی در دماهای بالا و پایین می‌شود به طوری که افزایش ۱ تا ۳ درصد وزنی نانولوله کربنی به قیر، موجب افزایش مدول برجهندگی، عمر خستگی نمونه‌ها و نیز مقاومت کششی نمونه‌ها می‌شود.

تاکنون، پژوهش‌های مختلفی در خصوص امکان بهبود حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از مواد افزودنی مختلف صورت گرفته است. Goh و همکاران (۲۰۱۱)، اثر نانو رس و لیاف میکروکربن را بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی در حضور مواد ضد یخ بررسی کردند. ایشان نشان دادند این مواد رفتار رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی را بهبود می‌دهند. Mirhosseini و همکاران (۲۰۱۶)، آسیب رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی خاکستر هسته خرما را به روش انرژی آزاد سطحی بررسی کردند. آزمایش‌ها نشان دادند که این افزودنی قابلیت لازم برای بهبود رفتار رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با مصالح آهکی را تا ۲۰ درصد دارد. Khabiri و Nabiun (۲۰۱۶)، امکان بهبود رفتار رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی را با فیلر فریت در مقایسه با فیلر آهک و سیمان آزمایش کردند. نتایج پژوهش ایشان، بهبود محسوسی را در بررسی آزمایش‌ها نشان دادند. Hamzah و همکاران (۲۰۱۷)، رفتار رطوبتی مخلوط‌های گرم آسفالتی را به روش پردازش تصویر و در حضور افزودنی گرم اوو ترم بررسی کردند. ایشان نشان دادند این افزودنی اثر منفی قابل ملاحظه‌ای در کاهش چسبندگی بین مصالح سنگی و قیر ندارد. در یک تحقیق دیگر، Yusoff و همکاران (۲۰۱۴) اثر درصد‌های مختلف نانو سیلیس را بر رفتار رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی پلیمری بررسی کردند. تحقیق ایشان نشان داد ۰.۴٪ نانو سیلیس بهترین عملکرد را برای مخلوط‌های پلیمری نشان می‌دهد.

در تحقیقات گذشته مشاهده می‌شود که مواد نانو، حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی را بهبود می‌دهند (Hamedi و همکاران، ۲۰۱۶؛ Moghadas Nejad و همکاران، ۲۰۱۲). از طرفی،

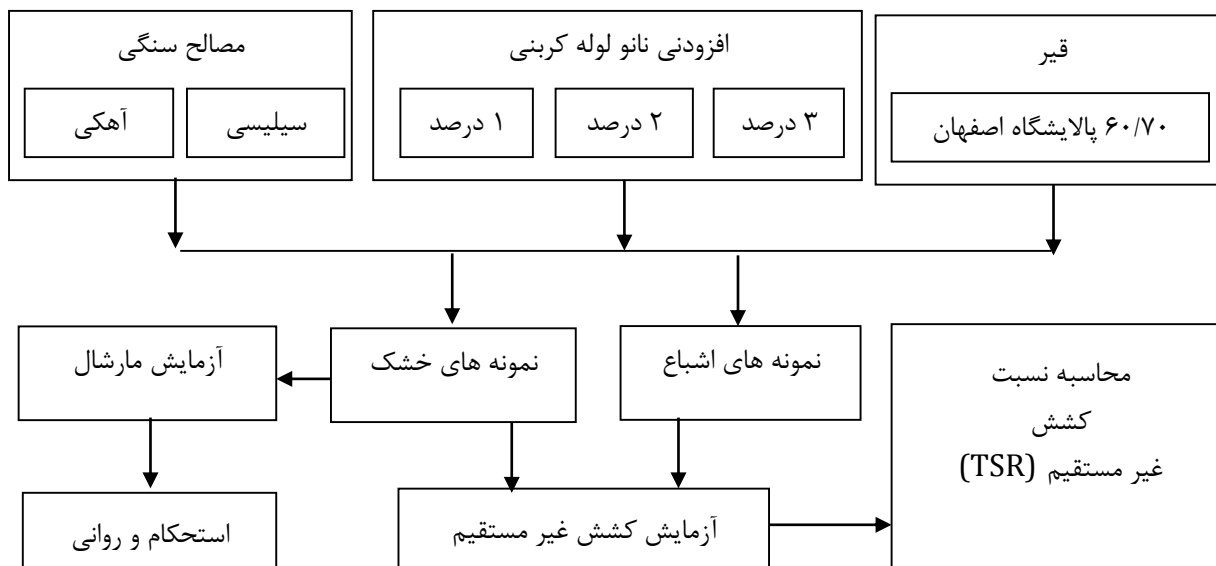
کربنی است که صفحات گرافیت را تشکیل می‌دهند. این صفحات کربنی، بر روی یکدیگر انباشته می‌شوند و هر لایه از طریق پیوندهای ضعیف و اندروالسی به لایه زیرین متصل می‌شود. هنگامی که صفحات گرافیت در هم پیچیده می‌شوند نانو لوله‌های کربنی را تشکیل می‌دهند. در واقع نانولوله کربنی، گرافیتی است که به شکل لوله درآمده باشد (Goh و همکاران، ۲۰۱۱).

استفاده از نانومواد به عنوان یک فناوری جدید در حال گسترش است. از این فناوری در تولید و اصلاح مواد مختلف استفاده می‌شود (Alsaffar, ۲۰۱۴). حیدری و همکاران (۱۳۹۱)، به بررسی اثر نانولوله‌های کربنی بر مقاومت فشاری و خمشی بتن پرداختند. بدین منظور، نانولوله کربنی چند دیواره در ترکیب‌های ۰/۰۱ و ۰/۰۲ درصد وزنی مخلوط (سیمان و ماسه) در آب به صورت یکنواخت توزیع گردید و از محلول مذکور، نمونه‌های کامپوزیت بتنی تهیه شد. تحقیق ایشان نشان داد که نانولوله کربنی می‌تواند خواص مکانیکی بتن از جمله مقاومت فشاری و خمشی را تا حدود زیادی بهبود دهد. علاوه بر آن نانولوله کربنی، باعث کاهش تعداد ترک و رشد ترک در نمونه‌های دارای نانولوله کربنی نسبت به نمونه فاقد نانولوله کربنی شد.

استفاده از ماده نانولوله کربنی به عنوان اصلاح کننده قیر و مخلوط آسفالتی از پیشرفت‌های جدیدی است که در صنعت آسفالت در حال گسترش است. در پژوهشی، زیاری و همکاران (۱۳۹۳)، به بررسی خواص ویسکوالاستیک قیر اصلاح شده با نانولوله کربنی پرداختند، ایشان نمونه‌های مختلفی را با درصد‌های مختلف نانولوله کربنی (۰، ۰/۳، ۰/۹، ۱/۲، ۱/۵) تهیه و آزمایش‌های قیر را بر روی آنها انجام دادند (زیاری و همکاران، ۱۳۹۳). نتایج آزمایش درجه نفوذ، حاکی از بهبود درجه نفوذ قیر در اثر افزایش درصد نانولوله کربنی بود. نتایج آزمایش نقطه نرمی نشان داد که اضافه کردن نانولوله کربنی به قیر باعث افزایش نقطه نرمی قیر شده است. همچنین مدول مختلط (G^*) و مدول الاستیک (G') قیر افزایش یافت. فرامرزی (۱۳۹۲) در پژوهشی به بررسی اثر این ماده بر شیارشدگی و مقاومت خستگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از آزمایش‌های ویل تراک و تیرچه خمشی پرداخت. نتایج آزمایش‌های ایشان نشان داد که نانولوله کربنی، موجب افزایش سختی مخلوط‌های آسفالتی و در نتیجه بهبود مقاومت در برابر شیار افتادگی می‌گردد. همچنین وی مشاهده کرد که اصلاح آسفالت توسط این افزودنی، موجب بهبود عملکرد مقاومت در برابر خستگی آسفالت، به خصوص در دماهای پایین می‌شود. گلی (۱۳۹۲) در تحقیقی دیگر، به بررسی آزمایشگاهی خصوصیات قیر و مخلوط‌های آسفالتی اصلاح

آزمایشگاهی با مصالح سنگی آهکی و سیلیسی با درصد‌های مختلف این ماده ساخته شده و تحت شرایط عمل‌آوری مختلف، آزمایش شدند. ضمناً به عنوان یک هدف ثانویه، اثر نانولوله کربنی بر روی پارامترهای آزمایش مارشال مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۱)، ساختار این تحقیق را نشان می‌دهد.

شکل نانولوله کربنی به صورت الیاف درحد نانو است بنابراین چنین استنباط می‌شود که این الیاف بتوانند ترک‌های ایجاد شده در حد نانو را در شرایطی که نمونه‌ها در شرایط اشباع قرار دارند پوشش دهند. بنابراین در این پژوهش، اثر نانولوله‌های کربنی بر روی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی گرم با استفاده از آزمایش کشش غیر مستقیم بررسی می‌شود. بدین منظور، نمونه‌های مختلف



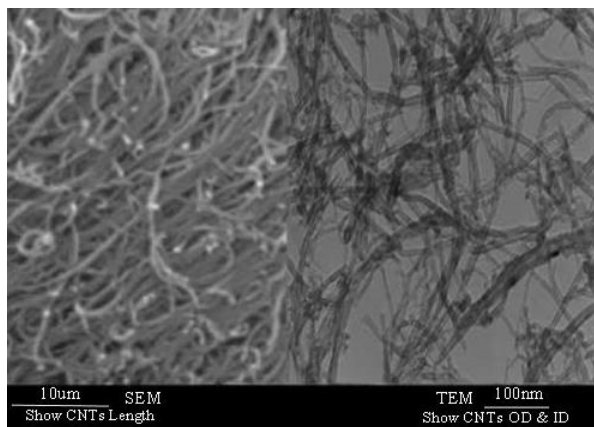
شکل ۱- ساختار تحقیق

جدول ۱- ویژگی‌های قیر به کار رفته در تحقیق

مشخصات استاندارد		نتایج	روش آزمایش		آزمایش‌ها
حداکثر	حداقل		ASHTO	ASTM	
-	-	۱/۰۱۸	T228	D70	وزن مخصوص در ۲۵ درجه سانتی‌گراد (gr/cm ³)
۷۰	۶۰	۶۴	T49	D5	درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی‌گراد بر حسب ۰/۱ mm
۵۶	۴۹	۵۰/۵	T53	D36	نقطه نرمی (ساچمه حلقه) بر حسب درجه سانتی‌گراد
-	۱۰۰	۱۰۰<	T51	D113	مقدار کشش در ۲۵ درجه سانتی‌گراد بر حسب cm
-	۹۹	۹۹/۷	T44	D2042	حلالیت در تتراکلرید کربن بر حسب درصد
-	۲۳۲	۲۹۲	T48	D92	درجه اشتعال بر حسب درجه سانتی‌گراد
-	-	-	T179	D1754	لعاب نازک قیر (۱۶۳ درجه سانتی‌گراد- پنج ساعت)
۰/۸	-	۰/۰۳	-	-	افت حرارت بر حسب درصد
-	-	۴۴	-	-	درجه نفوذ بعد از آزمایش افت حرارتی بر حسب ۰/۱ mm
-	-	۶۸/۷۵	-	-	نسبت درصد درجه نفوذ بعد از آزمایش به اولیه
-	-	۱۰۰<	-	-	مقدار کشش قیر بعد از آزمایش ۲۵°C (cm)



شکل ۲- عکس گرفته شده از نانولوله کربنی مصرف شده در این پژوهش



شکل ۳- عکس با دقت ۱۰۰ نانومتر از نانولوله کربنی

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد مصرفی

۲-۱-۱- قیر

در این تحقیق، از قیر خالص تولید پالایشگاه اصفهان با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ استفاده شد. مشخصات قیر مصرفی در جدول (۱) ارائه شده است.

۲-۱-۲- افزودنی نانولوله کربنی

در این پژوهش، از نانولوله کربنی به عنوان افزودنی قیر استفاده شد. ویژگی‌های فیزیکی مربوط به این ماده در جدول (۲) ارائه شده است. حسب گزارش شرکت تولید کننده، بیش از ۹۵٪ وزن نانولوله کربنی را کربن تشکیل می‌دهد که درصد مواد شیمیایی تشکیل دهنده نانولوله کربنی به کار رفته در این تحقیق، در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی افزودنی نانولوله‌های کربنی به کار

رفته در این تحقیق

مقدار عددی	عنوان ویژگی
۱۲۰۰	مدول یانگ (گیگا پاسگال)
۱۵۰	مقاومت کششی (گیگا پاسگال)
۲/۶	چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)
۳۰۰۰	ضریب حرارتی (W/m.k)
۱۰۷-۱۰۵	ضریب الکتریکی (S/m)

جدول ۳- عناصر شیمیایی تشکیل دهنده نانولوله کربنی به کار

رفته در این تحقیق

درصد از کل	عنصر تشکیل دهنده
۹۷/۴۶	کربن (C)
۰/۱۹	آلومینیم (Al)
۱/۰۲	کلر (Cl)
۱/۰۹	کبالت (Co)
۰/۲۴	گوگرد (S)

در تحقیقات اخیر، نانولوله کربنی از صفر تا ۳٪ برای اصلاح رفتار قیر به آن اضافه شده است (زیاری و همکاران، ۱۳۹۳؛ فرامرزی، ۱۳۹۲؛ گلی، ۱۳۹۲). از این رو در این تحقیق، این افزودنی در درصدهای ۰٪، ۱٪، ۲٪ و ۳٪ با قیر مخلوط شد. در شکل (۲)، نمونه‌ای از نانولوله کربنی مصرفی و شکل (۳) تصویری از این ماده را در اشل نانو نشان می‌دهد.

۲-۱-۳- سنگدانه‌ها

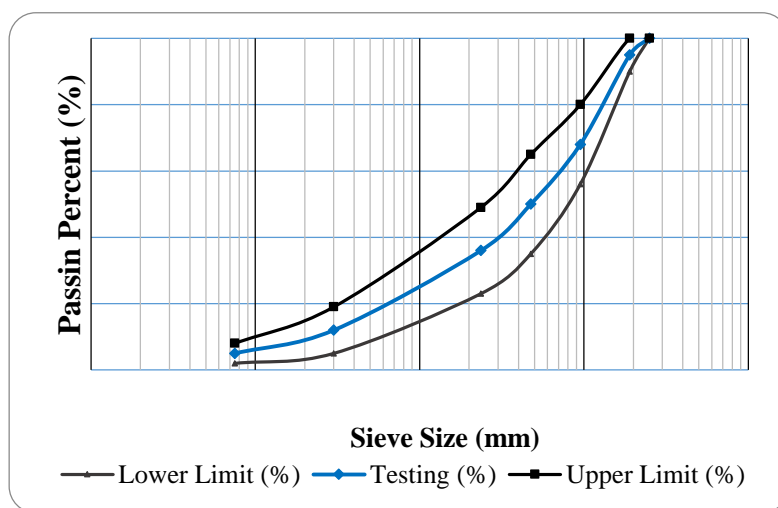
در این پژوهش، دو نوع سنگدانه با حساسیت رطوبتی متفاوت مورد استفاده قرار گرفت. مصالح سنگی سیلیسی، به جهت واکنش-هایی که در حضور آب در آن انجام می‌گیرد و دارای حساسیت رطوبتی بالایی است، مورد استفاده قرار گرفت. همچنین سنگ آهک که به عنوان یک سنگدانه مقاوم در برابر خرابی رطوبتی شناخته می‌شود نیز به کار گرفته شد. مصالح آهکی و سیلیسی به ترتیب از معدن پای قوم و روشن قدم آذرشهر تهیه گردیدند. جدول (۴) و (۵) مشخصات فنی مصالح آهکی و سیلیسی را به ترتیب نشان می‌دهد. در این پژوهش از دانه‌بندی شماره ۴ آیین‌نامه روسازی راه-های آسفالتی ایران مربوط به قشر بیندر در تهیه مخلوط‌های آسفالتی استفاده شد (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری، ۱۳۹۰). حدود این دانه‌بندی و دانه‌بندی استفاده شده در این تحقیق در شکل (۴) ارائه شده است.

جدول ۴- نتایج مرغوبیت سنگدانه‌های آهکی مورد استفاده

نتایج آزمایش			مشخصه
فیلر مصالح	مخلوط ریزدانه	مخلوط درشت‌دانه	
-	٪۷۵	-	ارزش ماسه‌ای
-	-	۵۰۰	تعداد دور
-	-	۲۵	درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لس آنجلس
-	-	۱۰۰	درصد شکستگی مانده روی الک ۴#
-	-	بیش از ۹۵	درصد اندود قیر به مصالح سنگی
-	-	۱۵	تطویل
-	-	۷	درصد تطویل و تورق
-	-	۰/۴	درصد افت وزنی در مقابل سولفات سدیم

جدول ۵- نتایج مرغوبیت سنگدانه‌های سیلیسی مورد استفاده

نتایج آزمایش			مشخصه
فیلر مصالح	مخلوط ریزدانه	مخلوط درشت‌دانه	
-	٪۷۷	-	ارزش ماسه‌ای
-	-	۵۰۰	تعداد دور
-	-	۱۹	درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لس آنجلس
-	-	۱۰۰	درصد شکستگی مانده روی الک ۴#
-	-	بیش از ۹۵	درصد اندود قیر به مصالح سنگی
-	-	۱۲	تطویل
-	-	۵	درصد تطویل و تورق
-	-	۰/۲	درصد افت وزنی در مقابل سولفات سدیم



نمودار ۴- حد بالا و پایین دانه‌بندی و دانه‌بندی مورد استفاده در تحقیق

۲-۲- نحوه ساخت نمونه‌ها

در تهیه نمونه‌ها، مراحل مختلف شامل اختلاط افزودنی با قیر، گرم کردن مصالح سنگی و قیر، مخلوط کردن و سپس متراکم کردن مخلوط‌ها صورت گرفت. بدین منظور در ابتدا ۲۱ نمونه مارشال جهت تعیین درصد قیر بهینه با مصالح آهکی و مجدداً ۲۱ نمونه جهت تعیین درصد قیر بهینه با مصالح سیلیسی ساخته شد. سپس، درصد قیر بهینه مربوط به قیر پایه برای هریک از مصالح سنگی تعیین گردید. آنگاه، نمونه‌های مخلوط آسفالتی با قیر پایه و اصلاح شده برای انجام آزمایش‌های دیگر در مقدار قیر بهینه تهیه شدند. درصد قیر بهینه برای مصالح آهکی ۴/۵ درصد و برای مصالح سیلیسی معادل با ۴/۳ درصد به دست آمد. دلیل استفاده از درصد قیر بهینه مربوط به قیر کنترل در تهیه نمونه‌های با قیر اصلاح شده این بود که تغییر در درصد قیر در نمونه‌های کنترل و اصلاح شده باعث تغییر در تحلیل نتایج نشود و صرفاً اثر ماده افزودنی بررسی شود. لازم به ذکر است برای تهیه قیر اصلاح شده، ابتدا قیر تا رسیدن به دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد گرم شده و هم‌زمان با اضافه کردن تدریجی نانولوله کربنی فرآیند هم‌زدن با سرعت کم آغاز گردید. سپس با استفاده از هم‌زن برش بالا با دور ۱۰۰۰۰ در دقیقه، عمل اختلاط به مدت ۱۵ دقیقه انجام شد.

۲-۳- فرایند آزمایشگاهی

گزارش‌ها نشان می‌دهد که آزمایشات مختلفی برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی به کار برده می‌شود، اما به نظر می‌رسد هیچ توافقی بین محققان بر روی یک روش خاص برای ارزیابی این خرابی‌ها وجود ندارد. در میان روش‌های آزمایش،

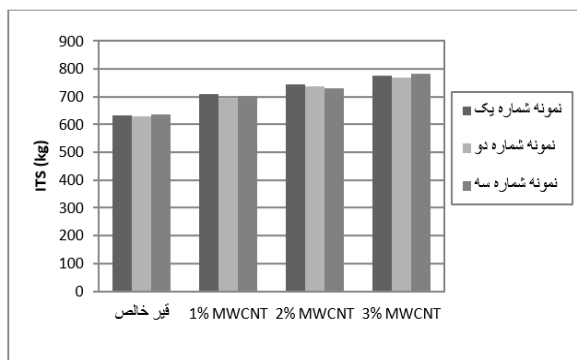
محققان اعتقاد دارند که آزمایش کشش غیر مستقیم در پیش‌بینی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی کارایی بیشتری دارد (Pickering و همکاران، ۱۹۹۲؛ Khodaii و همکاران، ۲۰۱۲). بدین منظور نمونه‌های ساخته شده با قیر خالص و نمونه‌های اصلاح شده با ۱٪، ۲٪ و ۳٪ افزودنی در دو حالت خشک و اشباع، تحت آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم یا لاتمن اصلاح شده (AASHTO T283) قرار گرفتند. برای انجام این آزمایش باید دقت شود که میزان خلل و فرج در تمامی نمونه‌های ساخته شده تقریباً برابر بوده و بین ۶ تا ۸ درصد باشد. جداول (۶) و (۷) بررسی این موضوع را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج مندرج در جدول‌ها، مشاهده می‌شود که در صد حفره‌های نمونه‌ها همگی در بازه استاندارد ۶ الی ۸ درصد بوده و مناسب جهت انجام آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم می‌باشند. در ادامه نمونه‌ها به دو گروه تقسیم می‌شوند، گروه اول نمونه‌های کنترل هستند که در حالت خشک آزمایش می‌شوند و گروه دوم نمونه‌هایی هستند که در حالت عمل‌آوری شده و اشباع آزمایش می‌شوند. پس از تعیین مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه در حالت اشباع و خشک، از تقسیم مقاومت کششی نمونه‌ها در حالت اشباع به حالت خشک نسبت TSR به دست می‌آید که بیانگر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی است. هر چه این نسبت به عدد یک نزدیک‌تر باشد مناسب‌تر است. طبق آیین‌نامه‌ها این نسبت باید حداقل ۰/۷۵ باشد. لازم به ذکر است که در این تحقیق از آزمایش‌های مارشال (ASTM D1559) نیز بر روی نمونه‌های ساخته شده با قیر خالص و نمونه‌های اصلاح شده با ۱٪، ۲٪ و ۳٪ افزودنی استفاده شد.

جدول ۶- بررسی استاندارد بودن نمونه‌ها جهت انجام آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم برای مصالح آهکی

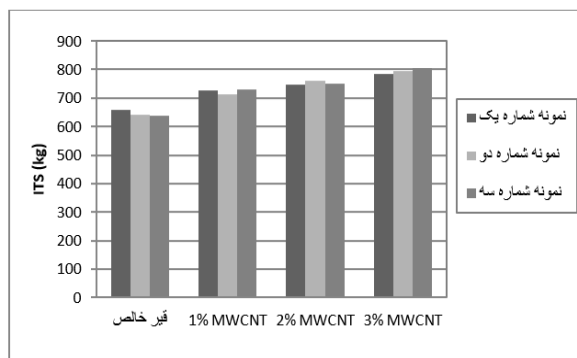
نوع قیر	وزن در هوا (kg)	وزن اشباع (kg)	وزن در آب (kg)	G_{mb} (g/cm ³)	میانگین G_{mb} (g/cm ³)	میانگین G_{mm} (g/cm ³)	Va (%)
قیر خالص	۱۲۵۳/۶	۱۲۶۸/۵	۷۳۳/۶	۲/۳۴۴	۲/۳۴۴		۷/۲
قیر خالص	۱۲۵۳/۹	۱۲۶۹/۱	۷۳۴/۲	۲/۳۴۴	۲/۳۴۴	۲/۵۵۵	۷/۱
قیر خالص	۱۲۵۳/۸	۱۲۶۸/۸	۷۳۴/۳	۲/۳۴۶	۲/۳۴۶		۶/۹
۱٪ نانولوله کربن	۱۲۵۴/۲	۱۲۶۸/۵	۷۳۴/۲	۲/۳۴۷	۲/۳۴۷		۷/۱
۱٪ نانولوله کربن	۱۲۵۳/۹	۱۲۶۹/۷	۷۳۴/۷	۲/۳۴۴	۲/۳۴۴	۲/۵۶۱	۷/۱
۱٪ نانولوله کربن	۱۲۵۴	۱۲۶۹/۹	۷۳۴/۵	۲/۳۴۲	۲/۳۴۲		۶/۹
۲٪ نانولوله کربن	۱۲۵۵/۴	۱۲۷۰/۸	۷۳۵/۹	۲/۳۴۷	۲/۳۴۷		۶/۷
۲٪ نانولوله کربن	۱۲۵۵/۱	۱۲۷۰/۳	۷۳۶/۱	۲/۳۴۹	۲/۳۴۹	۲/۵۶۴	۶/۹
۲٪ نانولوله کربن	۱۲۵۵/۷	۱۲۷۱/۱	۷۳۶/۲	۲/۳۴۷	۲/۳۴۷		۶/۸
۳٪ نانولوله کربن	۱۲۵۵/۹	۱۲۶۹/۵	۷۳۶/۸	۲/۳۵۸	۲/۳۵۸		۶/۶
۳٪ نانولوله کربن	۱۲۵۶/۳	۱۲۷۰/۱	۷۳۶/۷	۲/۳۵۵	۲/۳۵۵	۲/۵۶۹	۶/۷
۳٪ نانولوله کربن	۱۲۵۶/۱	۱۲۶۹/۸	۷۳۶/۴	۲/۳۵۵	۲/۳۵۵		۶/۷

جدول ۷- بررسی استاندارد بودن نمونه‌ها جهت انجام آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم برای مصالح سیلیسی

Va (%)	میانگین G_m (g/cm ²)	میانگین G_{mb} (g/cm ²)	وزن در آب (kg)	وزن اشباع (kg)	وزن در هوا (kg)	نوع قیر
۷/۳		۲/۳۵۱	۷۳۶/۹	۱۲۷۱/۳	۱۲۵۶/۵	قیر خالص
۷/۳	۲/۳۶۰	۲/۳۵۱	۷۳۷/۱	۱۲۷۱/۷	۱۲۵۶/۸	قیر خالص
۷/۲		۲/۳۵۱	۷۳۷/۴	۱۲۷۲/۲	۱۲۵۷/۱	قیر خالص
۷/۲		۲/۳۴۷	۷۳۴/۷	۱۲۷۰/۴	۱۲۵۷/۳	۱٪ نانولوله کربن
۷/۱	۲/۵۶۴	۲/۳۴۷	۷۳۵/۳	۱۲۷۱/۳	۱۲۵۸/۲	۱٪ نانولوله کربن
۷/۲		۲/۳۴۸	۷۳۴/۹	۱۲۷۰/۶	۱۲۵۷/۸	۱٪ نانولوله کربن
۷/۲		۲/۳۴۸	۷۳۵/۲	۱۲۷۰/۸	۱۲۵۷/۷	۲٪ نانولوله کربن
۷/۱	۲/۵۶۶	۲/۳۴۸	۷۳۵/۴	۱۲۷۰/۷	۱۲۵۷/۸	۲٪ نانولوله کربن
۷/۱		۲/۳۴۵	۷۳۵/۱	۱۲۷۱/۴	۱۲۵۷/۹	۲٪ نانولوله کربن
۶/۹		۲/۳۵۰	۷۳۷/۱	۱۲۷۲/۶	۱۲۵۸/۲	۳٪ نانولوله کربن
۶/۹	۲/۵۶۷	۲/۵۱	۷۳۷/۵	۱۲۷۲/۴	۱۲۵۸/۴	۳٪ نانولوله کربن
۶/۸		۲/۳۵۰	۷۳۶/۹	۱۲۷۲/۲	۱۲۵۸/۱	۳٪ نانولوله کربن



شکل ۵- مقاومت کشش غیر مستقیم نمونه‌های حاوی قیر خالص و اصلاح شده با نانولوله کربنی در حالت خشک با مصالح آهکی



شکل ۶- مقاومت کشش غیر مستقیم نمونه‌های حاوی قیر خالص و اصلاح شده با نانولوله کربنی در حالت خشک با مصالح سیلیسی

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مقاومت کششی غیر مستقیم

طبق استاندارد AASHTO T283 جهت انجام آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم ابتدا باید مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های ساخته شده با مصالح آهکی و مصالح سیلیسی را در حالت خشک اندازه‌گیری کرد. نتایج مربوط به این اندازه‌گیری‌ها در شکل‌های (۵) و (۶) ارائه شده است. با توجه به شکل (۵) که مربوط به مصالح آهکی است می‌توان گفت مقدار مقاومت کششی غیر مستقیم برای هر یک از نمونه‌های خشک اصلاح شده با ۱٪، ۲٪ و ۳٪ نانولوله کربنی بیشتر از نمونه‌های خشک حاوی قیر خالص می‌باشد. بیشترین مقاومت کششی خشک مربوط نمونه اصلاح شده با ۳٪ نانولوله کربنی بوده و معادل ۷۸۱ می‌باشد.

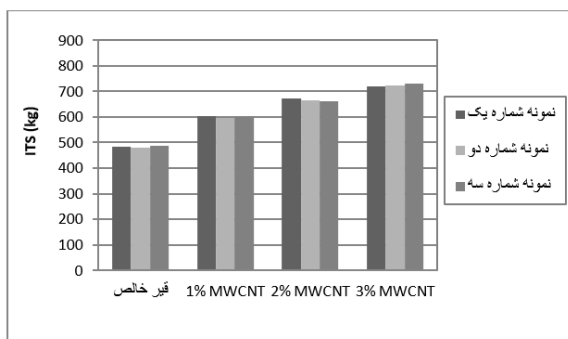
با توجه به نمودار (۶) که مربوط به مصالح سیلیسی است می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مقدار مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های خشک حاوی قیر خالص، کمتر از نمونه‌های خشک اصلاح شده با ۱٪، ۲٪ و ۳٪ نانولوله می‌باشد. بیشترین مقاومت کششی خشک نمونه‌های حاوی قیر خالص معادل ۶۵۸ به دست آمده است در حالی که بیشترین مقاومت کششی خشک نمونه‌های اصلاح شده با ۳٪ نانولوله کربنی معادل ۸۰۴ می‌باشد.

طبق استاندارد AASHTO T283 جهت انجام آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم پس از حالت خشک باید مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های ساخته شده را در حالت اشباع اندازه‌گیری کرد.

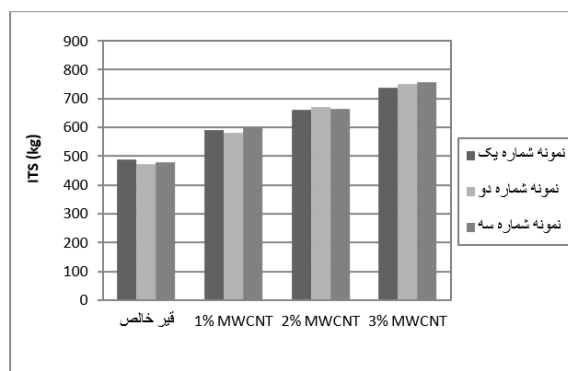
را در مقیاس نانو به وجود می‌آورد (اسماعیلی و محمدجعفری صادقی، ۱۳۹۵). این الیاف ساختار قیر و در نتیجه بخش چسباننده مخلوط آسفالتی را مسلح کرده و مقاومت مکانیکی بالایی را فراهم می‌آورند. در نتیجه مقاومت کشش غیر مستقیم مخلوط آسفالتی را تحت شرایط مختلف بهبود می‌دهند. بهبود مشخصات مکانیکی ساختار قیر توسط نانولوله کربنی در تحقیق زیاری و همکاران (۱۳۹۳) نیز گزارش شده است.

پس از محاسبه نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم در حالت خشک و حالت اشباع برای مخلوط‌های آسفالتی مذکور، نسبت TSR به دست می‌آید. این نسبت از تقسیم میانگین مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌ها در حالت اشباع به میانگین مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌ها در حالت خشک به صورت درصد محاسبه می‌شود. هرچه این نسبت به ۱۰۰ نزدیک‌تر باشد آسیب رطوبتی مخلوط آسفالتی کمتر می‌باشد. شکل (۹) درصد‌های TSR را برای مصالح آهکی و سیلیسی نمایش می‌دهد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که افزودن نانولوله کربنی باعث افزایش مقدار TSR و در نتیجه بهبود آسیب رطوبتی می‌شود. همچنین با افزایش درصد این افزودنی، مقدار TSR افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار TSR مربوط به نمونه اصلاح شده با ۳٪ نانولوله کربنی و معادل با ۹۳/۵۹ درصد می‌باشد. لازم به ذکر است، نمونه‌های اصلاح شده با ۱٪، ۲٪ و ۳٪ نانولوله کربنی، مقدار TSR را برای مصالح آهکی نسبت به نمونه‌های حاوی قیر خالص به ترتیب معادل ۱/۱۱۸٪، ۱۸/۰٪ و ۲۲/۲٪ افزایش می‌دهند. شکل (۹)، TSR را برای مصالح سیلیسی نیز نشان می‌دهد. در این مصالح، TSR نمونه حاوی قیر خالص کمتر از ۷۵٪ درصد است. این نشان می‌دهد مخلوط آسفالتی ساخته شده از مصالح سیلیسی، شدیداً در معرض آسیب رطوبتی است. از طرفی، در تمامی نمونه‌های اصلاح شده با نانولوله‌های کربنی نسبت TSR بیشتر از نمونه‌های حاوی قیر خالص است. این مطلب بیان می‌کند، نانولوله کربنی می‌تواند این نقص مصالح سیلیسی را بهبود دهد. بیشترین مقدار بهبود مربوط به نمونه اصلاح شده با ۳٪ نانولوله کربنی و معادل با ۹۴/۲۱ درصد می‌باشد. مقدار درصد افزایش یافته در نسبت TSR برای نمونه‌های اصلاح شده با ۱٪، ۲٪ و ۳٪ نانولوله‌های کربنی برای مصالح سیلیسی نسبت به نمونه‌های حاوی قیر خالص به ترتیب معادل ۹/۹٪، ۱۹/۱٪ و ۲۶/۸٪ می‌باشد. از طرفی، مقایسه TSR برای مصالح مختلف نشان می‌دهد که مصالح آهکی در مجموع عملکرد بهتری در مقایسه با مصالح سیلیسی دارند.

با بررسی شکل (۹) می‌توان به صورت کلی گفت که وجود نانولوله کربنی و نیز افزایش آن از ۱ تا ۳ درصد، مقدار TSR را برای هر دو نوع مصالح بهبود می‌دهد. دلیل این امر را می‌توان به مسلح



شکل ۷- مقاومت کشش غیر مستقیم نمونه‌های حاوی قیر خالص و اصلاح شده با نانولوله کربنی در حالت اشباع با مصالح آهکی



شکل ۸- مقاومت کشش غیر مستقیم نمونه‌های حاوی قیر خالص و اصلاح شده با نانولوله کربنی در حالت اشباع با مصالح سیلیسی

نتایج مربوط به این اندازه‌گیری در شکل‌های (۷) و (۸) ارائه شده است. با توجه به نمودار (۷) برای مصالح آهکی می‌توان مشاهده کرد که در حالت اشباع نیز، مقدار مقاومت کششی غیر مستقیم برای هر یک از نمونه‌های اصلاح شده با ۱٪، ۲٪ و ۳٪ نانولوله کربنی بیشتر از نمونه‌های حاوی قیر خالص می‌باشد. کم‌ترین مقاومت کششی اشباع مربوط به نمونه‌های با قیر خالص است، در حالی که بیش‌ترین مقاومت کششی مربوط به نمونه‌های اصلاح شده با ۳٪ نانولوله کربنی است. این رفتار برای مصالح سیلیسی نیز مشاهده می‌شود.

با بررسی شکل‌های (۵)، (۶)، (۷) و (۸) می‌توان به صورت کلی گفت که وجود نانولوله کربنی و نیز افزایش آن از ۱ تا ۳ درصد، مقاومت کشش غیر مستقیم نمونه‌های آسفالتی را در حالت تر و خشک برای هر دو نوع مصالح بهبود می‌دهد. دلیل این امر را می‌توان به ساختار نانولوله کربنی نسبت داد. ساختار نانولوله کربنی مثل ورقه‌های پیچیده شده به صورت لوله است که رفتاری شبیه به الیاف

کیلوگرم بوده است. این یعنی استحکام مارشال برای نمونه‌های حاوی ۱٪، ۲٪ و ۳٪ نانولوله‌های کربنی به ترتیب ۹۵/۶۶، ۱۲۹/۳۳ و ۱۲۹/۳۳ کیلوگرم بیش از نمونه‌های حاوی قیر خالص بوده است. روانی نمونه‌های حاوی قیر خالص برابر با ۲/۶۹ میلی‌متر بوده است در حالی که روانی نمونه‌های حاوی ۱٪، ۲٪ و ۳٪ نانولوله‌های کربنی به ترتیب معادل ۲/۶۷، ۲/۶۳ و ۲/۶۱ میلی‌متر بوده است. این یعنی روانی مارشال برای نمونه‌های حاوی ۱٪، ۲٪ و ۳٪ نانولوله‌های کربنی کمتر از نمونه‌های حاوی قیر خالص بوده است. به عنوان مثال روانی مارشال نمونه اصلاح شده با ۳٪ نانو لوله کربنی، ۰/۰۸ میلی‌متر کمتر از نمونه‌های حاوی قیر خالص بوده است.

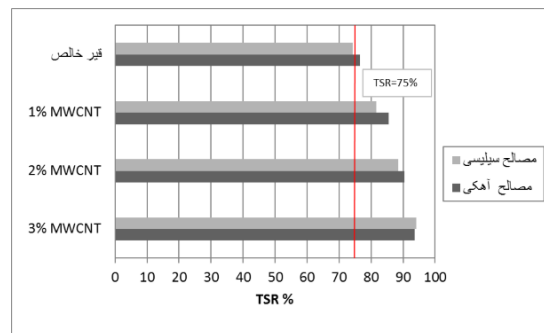
با توجه به این که نسبت استحکام مارشال به مقدار روانی مخلوط آسفالتی، می‌تواند تا حدودی بیانگر مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر پدیده شیارافتادگی باشد، این نسبت در جدول (۸) و (۹) برای مصالح آهکی و سیلیسی ارائه شد. همان طور که مشاهده می‌شود نانولوله کربنی نسبت استحکام را افزایش می‌دهد. بنابر این تلویحاً می‌توان استنباط نمود که نانولوله کربنی می‌تواند مقاومت شیار افتادگی مخلوط آسفالتی را افزایش دهد. این استنباط با نتیجه تحقیق گلی (۱۳۹۲) سازگاری دارد.

با بررسی جدول‌های (۸) و (۹) به صورت کلی می‌توان گفت که وجود نانولوله کربنی و نیز افزایش آن از ۱ تا ۳ درصد، مقدار استحکام و نسبت استحکام به روانی را برای هر دو نوع مصالح بهبود داده است. همچنین مقدار روانی کاهش یافته است. دلیل این امر را می‌توان به بهبود رفتار مقاومتی قیر در حضور نانولوله کربنی اشاره کرد. در واقع نانولوله کربنی توانسته است ساختار قیر را با الیاف در حد نانو مسلح کند و در نتیجه سفتی ماده چسباننده را بالا برده و مقدار استحکام مارشال را افزایش و نرمی را کاهش دهد.

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش مقاومت مارشال و مقاومت کششی غیر مستقیم مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با ۰٪، ۱٪، ۲٪ و ۳٪ نانولوله کربنی مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها نشان داد، حضور نانولوله کربنی در مخلوط‌های آسفالتی با مصالح سیلیسی و آهکی، استحکام مارشال را افزایش می‌دهد. همچنین، استحکام مارشال برای نمونه‌های ساخته شده با مصالح سیلیسی نظیر به نظیر در مقایسه با نمونه‌های ساخته شده با مصالح آهکی بیشتر می‌باشد. در بین تمام نمونه‌های ساخته شده با مصالح آهکی و سیلیسی، بیشترین مقدار استحکام مارشال در نمونه‌های ساخته شده با مصالح سیلیسی مشاهده شد که قیر آن با ۳ درصد نانولوله کربنی اصلاح شده بود.

کردن قیر با نانو لوله کربنی نسبت داد که از میزان تشکیل ترک‌های مویین در بافت قیر و در اندرکنش آن با مصالح سنگی تحت شرایط اشباع (مطابق با AASHTO T283) کاسته‌اند، به طوری که با پل زدن و بستن ترک‌های در خلال بارگذاری، رشد ترک‌ها در مقیاس نانو را کنترل کرده‌اند. بنابراین می‌توان گفت، ماده نانولوله کربنی شبیه الیاف معمولی ولی در مقیاس نانو عمل می‌کند.



شکل ۹- مقادیر میانگین TSR نمونه‌های حاوی قیر خالص و اصلاح شده با نانولوله کربنی برای مصالح آهکی و سیلیسی

۳-۲- استحکام و روانی مارشال

نتایج استحکام و روانی مارشال به ازای در صد‌های مختلف افزودنی در جداول (۸) و (۹) آورده شده است. با توجه به نتایج جدول (۸) برای مصالح آهکی، میانگین استحکام مارشال برای نمونه‌های حاوی قیر خالص برابر با ۱۱۸۱/۶۶ کیلوگرم بوده است در حالی که استحکام مارشال برای نمونه‌های حاوی ۱٪، ۲٪ و ۳٪ نانولوله‌های کربنی به ترتیب معادل ۱۲۳۶/۶۷، ۱۲۸۳/۳۳ و ۱۳۳۴/۳۳ کیلوگرم بوده است. این یعنی، استحکام مارشال برای نمونه‌های حاوی ۱٪، ۲٪ و ۳٪ نانولوله‌های کربنی به ترتیب ۸۲/۰۱، ۱۰۱/۶۷ و ۱۵۲/۶۷ کیلوگرم بیش از نمونه‌های حاوی قیر خالص بوده است. روانی نمونه‌های حاوی قیر خالص برابر با ۲/۷۸ میلی‌متر بوده است در حالی که روانی نمونه‌های حاوی ۱٪، ۲٪ و ۳٪ نانولوله‌های کربنی به ترتیب معادل ۲/۶۵، ۲/۶۳ و ۲/۶۱ میلی‌متر بوده است. این نشان می‌دهد، روانی مارشال برای نمونه‌های حاوی ۱٪، ۲٪ و ۳٪ نانولوله‌های کربنی به ترتیب ۰/۰۸، ۰/۱۳ و ۰/۱۵ میلی‌متر کمتر از نمونه‌های حاوی قیر خالص بوده است.

جدول (۹)، نتایج آزمایش استحکام و روانی مارشال را برای مصالح سیلیسی نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، استحکام مارشال برای نمونه‌های حاوی قیر خالص برابر با ۱۲۱۰/۶۷ کیلوگرم است، در حالی که استحکام مارشال برای نمونه‌های حاوی ۱٪، ۲٪ و ۳٪ نانولوله‌های کربنی به ترتیب معادل ۱۲۵۴/۶۷، ۱۳۰۶/۳۳ و ۱۳۴۰ کیلوگرم است.

جدول ۸- استحکام و روانی مارشال برای نمونه‌های ساخته شده با مصالح آهکی

افزودنی	استحکام (kg)	میانگین استحکام (kg)	روانی (mm)	میانگین روانی (mm)	نسبت استحکام مارشال	میانگین نسبت استحکام مارشال
قیر خالص	۱۱۸۹		۲/۷۵		۴۳۲/۳۶	
قیر خالص	۱۱۷۵	۱۱۸۱/۶۷	۲/۸۲	۲/۷۸	۴۱۶/۶۷	۴۲۵/۱۳
قیر خالص	۱۱۸۱		۲/۷۷		۴۲۶/۳۵	
۱٪ نانولوله کربن	۱۲۳۹		۲/۶۹		۴۶۰/۵۹	
۱٪ نانولوله کربن	۱۲۲۳	۱۲۳۶/۶۷	۲/۷۱	۲/۷	۴۵۱/۲۹	۴۵۸/۶۱
۱٪ نانولوله کربن	۱۲۴۸		۲/۶۹		۴۶۳/۹۴	
۲٪ نانولوله کربن	۱۲۸۴		۲/۶۵		۴۸۴/۵۳	
۲٪ نانولوله کربن	۱۲۹۰	۱۲۸۳/۳۳	۲/۶۳	۲/۶۵	۴۹۰/۴۹	۴۸۴/۹۱
۲٪ نانولوله کربن	۱۲۷۶		۲/۶۶		۴۷۹/۷۰	
۳٪ نانولوله کربن	۱۳۱۰		۲/۶۳		۴۹۸/۱۰	
۳٪ نانولوله کربن	۱۳۰۲	۱۳۰۱/۰۰	۲/۶۳	۲/۶۳	۴۹۵/۰۶	۴۹۴/۰۶
۳٪ نانولوله کربن	۱۲۹۱		۲/۶۴		۴۸۹/۰۲	

جدول ۹- استحکام و روانی مارشال برای نمونه‌های ساخته شده با مصالح سیلیسی

افزودنی	استحکام (kg)	میانگین استحکام (kg)	روانی (mm)	میانگین روانی (mm)	نسبت استحکام مارشال	میانگین نسبت استحکام مارشال
قیر خالص	۱۲۰۵		۲/۷۱		۴۴۴/۶۵	
قیر خالص	۱۲۱۲	۱۲۱۰/۶۷	۲/۶۹	۲/۶۹	۴۵۰/۵۶	۴۴۹/۵۲
قیر خالص	۱۲۱۵		۲/۶۸		۴۵۳/۳۶	
۱٪ نانولوله کربن	۱۲۶۶		۲/۶۶		۴۵۷/۹۴	
۱٪ نانولوله کربن	۱۲۵۰	۱۲۵۴/۶۷	۲/۶۸	۲/۶۷	۴۶۶/۴۲	۴۶۹/۳۴
۱٪ نانولوله کربن	۱۲۴۸		۲/۶۸		۴۶۵/۶۷	
۲٪ نانولوله کربن	۱۲۹۸		۲/۶۵		۴۸۹/۸۱	
۲٪ نانولوله کربن	۱۳۲۰	۱۳۰۶/۳۳	۲/۶۳	۲/۶۳	۵۰۱/۹۰	۴۹۶/۰۹
۲٪ نانولوله کربن	۱۳۰۱		۲/۶۲		۴۹۶/۵۶	
۳٪ نانولوله کربن	۱۳۴۰		۲/۶۱		۵۱۳/۴۱	
۳٪ نانولوله کربن	۱۳۲۸	۱۳۴۰	۲/۶۳	۲/۶۱	۵۰۴/۹۴	۵۱۳/۴۵
۳٪ نانولوله کربن	۱۳۵۲		۲/۵۹		۵۲۲/۰۱	

افزودن تا ۲٪ نانولوله کربنی بیشترین نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم (TSR) را برای نمونه‌های ساخته شده با مصالح آهکی در مقایسه نظیر به نظیر با مصالح سیلیسی به همراه دارد. افزودن ۳٪ نانولوله کربنی، TSR بیشتری را برای نمونه‌های ساخته شده با مصالح سیلیسی در مقایسه با مصالح آهکی نشان می‌دهد. به طور کلی می‌توان گفت، حضور این نانو ماده در ساختار قیر نقش مثبتی بر ارتقای استحکام و مقاومت کشش غیر مستقیم مخلوط‌های آسفالتی و بهبود حساسیت رطوبتی آنها دارد. این یافته با گزارش تحقیقات دیگر (زیاری و همکاران، ۱۳۹۳؛ فرامرزی، ۱۳۹۲؛ گلی، ۱۳۹۲؛ دیواندری و همکاران، ۱۳۹۴) در خصوص تأثیر مثبت نانولوله کربنی در بهبود رفتار قیرها و مخلوط‌های آسفالتی سازگاری دارد.

نتایج آزمایش کشش غیر مستقیم نشان داد که مقادیر کشش غیر مستقیم در حالت خشک و اشباع برای نمونه‌های ساخته شده با قیر خالص و مصالح آهکی و سیلیسی کمتر از همین مقادیر برای نمونه‌های ساخته شده با ۱، ۲ و ۳ درصد افزودنی نانولوله کربنی می‌باشد. بیشترین مقدار کشش غیر مستقیم در حالت خشک در نمونه‌های ساخته شده با مصالح سیلیسی و آهکی مربوط به نمونه‌های حاوی ۳ درصد نانو لوله کربنی می‌باشد. در بین تمامی نمونه‌های ساخته شده با مصالح آهکی و سیلیسی، بیشترین مقدار مقاومت کششی غیر مستقیم در حالت خشک مربوط به نمونه‌های ساخته شده با مصالح سیلیسی است که قیر آن‌ها با ۳٪ نانولوله کربنی اصلاح شده است. نتایج فوق‌الذکر در حالت اشباع نیز مشاهده گردیدند.

۵- مراجع

- damage properties of warm mix asphalt using response surface method", *Construction and Building Materials*, 2017, 132, 323-334.
- Khodaii A, Tehrani HK, Haghshenas H, "Hydrated lime effect on moisture susceptibility of warm mix asphalt", *Construction and Building Materials*, 2012, 36, 165-170.
- Mirhosseini SAF, Khabiri MM, Kavussi A, Jalal Kamali MH, "Applying surface free energy method for evaluation of moisture damage in asphalt mixtures containing date seed ash", *Construction and Building Materials*, 2016, 125, 408-416.
- Moghadas Nejad F, Azarhoosh AR, Hamedi GH, Azarhoosh MJ, "Influence of using nonmaterial to reduce the moisture susceptibility of hot mix asphalt", *Construction and Building Materials*, 2012, 31, 384-388.
- Nabiun N, Khabiri MM, "Mechanical and moisture susceptibility properties of HMA containing ferrite for their use in magnetic asphalt", *Construction and Building Materials*, 2016, 113, 691-697.
- Pickering K, Sebaaly PE, Stroup-Gardiner M, Epps JA, "Evaluation of new generation of antistripping additives", *Transportation Research Record*, 1992, 26-26.
- Xiao F, Zhao W, Gandhi T, Amirkhanian SN, "Influence of anti-stripping additives on moisture susceptibility of warm mix asphalt mixtures", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2010, 22(10), 1047-55.
- Yusoff NIM, Breem AAS, Alattug HNM, Hamim A, Ahmad J, "The effects of moisture susceptibility and ageing conditions on nano-silica/polymer-modified asphalt mixtures", *Construction and Building Materials*, 2014, 72, 139-147.
- اسماعیلی ج، محمدجعفری صادقی ع، "بررسی تأثیر استفاده از نانوتیوب‌های کربنی چند دیواره در افزایش مقاومت خمشی و قابلیت جذب انرژی ملات‌های سیمانی"، *نشریه مهندسی عمران امیرکبیر*، ۱۳۹۵.
- حیدری ع، افلاکی سامانی م، افلاکی سامانی ا، شریفیان‌جزی ص، "بررسی نانولوله‌های کربنی و تأثیر آنها بر مقاومت فشاری و خمشی بتن"، *دومین کنفرانس ملی یافته‌های نوین در مهندسی عمران*، نجف‌آباد، ایران، ۱۵-۱۶ آذر، ۱۳۹۱.
- دیواندری ح، طاهرخانی ح، صالح پور م، "اثر پلیمر استیرن- بوتادین- استیرن (SBS) و نانو لوله‌های کربنی چند دیواره MWNT بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی گرم"، *کنفرانس بین‌المللی دستاوردهای نوین پژوهشی در مهندسی عمران*، معماری و شهرسازی، تهران، ایران، ۱۵ شهریور، ۱۳۹۴.
- زیاری ح، فراهانی، ح، گلی ا، "بررسی خواص ویسکوالاستیک قیر اصلاح شده با نانولوله کربنی"، *فصلنامه علمی- پژوهشی مهندسی حمل و نقل*، ۱۳۹۳، جلد ۵ (۴)، ۵۱۳-۵۲۰.
- فرامرزی م، "بررسی آزمایشگاهی تأثیرات استفاده از نانولوله کربنی به عنوان یک افزودنی بر خصوصیات عملکردی مخلوط‌های آسفالتی گرم"، *پایان‌نامه کارشناسی ارشد*، دانشگاه گیلان، رشت، ایران، ۱۳۹۲.
- گلی ا، "تحلیل خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با نانولوله کربنی"، *پایان‌نامه دکتری*، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، ۱۳۹۲.
- معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری "آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه شماره ۲۳۴)"، *ویرایش دوم*، تهران، ایران، ۱۳۹۰.
- Alsaffar KA, "Review of the use of nanotechnology in construction industry", *International Journal of Engineering Research and Development*, 2014, 10, 67-70.
- Goh SW, Akin M, You Z, Shi X, "Effect of deicing solutions on the tensile strength of micro-or nano-modified asphalt mixture", *Construction and Building Materials*, 2011, 25, 195-200.
- Hamedi G, Moghadas Nejad F, and Oveisi K, "Estimating the moisture damage of asphalt mixture modified with nano zinc oxide", *Materials and Structures*, 2016, 49, 1165-1174.
- Hamedi, GH, Moghadas Nejad F, "Use of aggregate nanocoating to decrease moisture damage of hot mix asphalt", *Road materials and pavement design*, 2016, 17, 32-51.
- Hamzah MO, Teh SY, Golchin B, Voskuilen J, "Use of imaging technique and direct tensile test to evaluate moisture

EXTENDED ABSTRACT

Evaluation of Moisture Sensitivity of Asphalt Mixtures Incorporating Carbon NanoTube

Farzad Atazadeh Vardin, Babak Golchin *

Department of Civil Engineering, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran

Received: 20 February 2017; Accepted: 09 October 2017

Keywords:

Carbon Nanotube, Asphalt mixture, Asphalt binder, Moisture sensitivity, Marshal test.

1. Introduction

In the present paper, the effects of a carbon nanotube on the moisture sensitivity of asphalt mixtures were investigated. Moisture sensitivity of asphalt mixtures is related to a phenomenon named stripping. The breaking of the bond between aggregate and asphalt binder is known as stripping (Xiao et al, 2010). Stripping reduces the strength of the material over the years which will manifest itself as rutting, corrugation, shoving, raveling, cracking, etc (Kodaii et al, 2012). Previous researches have introduced some additives for improving the moisture sensitivity of asphalt mixtures. Hydrated lime, Portland cement, polymeric material, and some other liquid anti stripping additives reduce the rate of moisture damage in asphalt mixtures. Recently, the use of nano materials in modifying different materials has become widespread (Alsaffar et al, 2014). In this study, a nano material named carbon nanotube with the quantity of 1, 2 and 3% was used for modification of asphalt binder. Moisture sensitivity of modified samples was investigated using indirect tensile strength test. In addition, the strength of modified samples was evaluated through marshal test.

2. Methodology

2.1. Experimental study

A 60/70 asphalt binder based on penetration grade was selected for this study. Since, aggregate type has a significant effect on the moisture sensitivity of asphalt mixtures, two different aggregates including siliceous and lime aggregate were used for fabricating of mixtures. In addition, 0, 1, 2 and 3% of the carbon nanotube were used for modification of asphalt binder. Fig. 1 shows an image of carbon nanotube in 100nm. The fabricated samples were tested using indirect tensile strength (ITS) and marshal tests. ITS test was conducted on dry and wet samples. In the next stage, tensile strength ratio (TSR) was determined, as well.

3. Results and discussion

3.1. Effect of carbon nanotube on indirect tensile strength

In order to investigate the moisture sensitivity of asphalt mixtures containing carbon nanotube, 48 samples were tested using indirect tensile strength test. Table 1 shows the effect of this additive on the ITS of both wet and dry samples as well as TSR. From the table, ITS of dry samples fabricated using siliceous and lime aggregate increases when additive content increases. Similar performance can be seen for wet samples. In addition, TSR value improves when additive content increases. It means that this additive enhances the moisture sensitivity of mixtures. Higher TSR value is preferable than its lower value.

* Corresponding Author

E-mail addresses: farzad_atazadeh@yahoo.com (Farzad Atazadeh Vardin), b-golchin@iau-ahar.ac.ir (Babak Golchin).

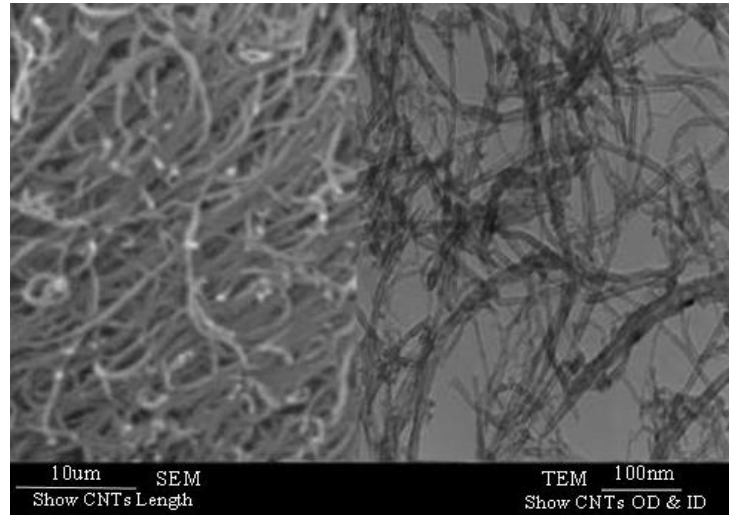


Fig. 1. SEM Image of Carbon Nanotube (100nm)

3.2. Effect of carbon nanotube on marshal samples

Marshal strength of mixtures containing carbon nanotube was investigated using marshal apparatuses. Table 1 shows the effect of this additive on marshal strength. From the table, marshal strength of samples containing additive is higher than of mixtures without additive. Marshal strength increases when additive content increases.

Table 1. Results of indirect tensile strength and marshal test

Additive content	Siliceous aggregate				Lime aggregate			
	ITS (dry)	ITS (wet)	TSR (%)	Marshal Strength	ITS (dry)	ITS (wet)	TSR (%)	Marshal Strength
0%	645.7	479.7	74.29	1210.67	631.7	483.7	76.57	1181.66
1%	713.7	590.7	81.62	1254.67	702.3	600.7	85.57	1236.67
2%	725.7	666.0	88.49	1306.33	736.7	665.7	90.36	1283.33
3%	794.3	748.3	94.21	1340.00	774.7	725.0	93.59	1334.33

4. Conclusions

This study showed that moisture sensitivity of asphalt mixtures modified by carbon nanotube depends on additive content and aggregate type. Carbon nanotube improves the moisture sensitivity of mixtures. Mixtures containing higher amount of carbon nanotube additive shows better stripping performance than that of containing lower amount of this additive. Carbon nanotube increases the indirect tensile strength of mixtures as well as marshal strength. Aggregate type shows a significant effect on the TSR values. Generally, mixtures fabricated with lime aggregate has higher TSR value when compared those mixtures fabricated siliceous aggregate.

5. References

- Alsaffar KA, "Review of the use of nanotechnology in construction industry", *International Journal of Engineering Research and Development*, 2014, 10, 67-70.
- Khodaii A, Tehrani HK, Haghshenas H, "Hydrated lime effect on moisture susceptibility of warm mix asphalt", *Construction and Building Materials*, 2012, 36, 165-170.
- Xiao F, Zhao W, Gandhi T, Amirkhanian SN, "Influence of anti-stripping additives on moisture susceptibility of warm mix asphalt mixtures", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2010, 22(10), 1047-55.