

بررسی خصوصیات عملکردی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با نانولوله کربن

مقاله پژوهشی

سید روح اله معافی مدنی*، گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی رحمان، رامسر، مازندران، ایران
امین چوبدار، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران
امین فرج الهی، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: R.MoafiMadani@gmail.com

دریافت: ۹۹/۰۱/۱۹ - پذیرش: ۹۹/۰۵/۲۵

صفحه ۱۷۹-۱۶۹

چکیده

خواص ریولوژیکی قیربه طور مستقیم بر خواص مکانیکی آسفالت مخلوط گرم در دماهای مختلف تاثیر می‌گذارد. تحقیقات گذشته نشان داده که استفاده از نانو مواد سبب بهبود خصوصیات عملکردی مخلوط می‌گردد. در این مطالعه برخی از تست‌ها برای مقایسه خواص عملکردی مخلوط‌های آسفالت اصلاح شده با نانولوله های کربنی و بدون افزودنی انجام شده است. خواص مکانیکی مخلوط آسفالتی شامل مدول برجهندگی، رفتار خزش و عملکرد خستگی ارزیابی شدند. نتایج این مطالعه بهبود قابل توجهی را در خواص مکانیکی مخلوط آسفالتی حاوی نانولوله کربن ها، در برابر پدیده خستگی و تغییر شکل دائمی در مقایسه با مخلوط آسفالتی معمولی نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: نانو ساختار، مدول تغییر شکل دائمی، طول عمر خستگی تغییر شکل دائمی

۱- مقدمه

متداولترین خرابی های رخ داده در روسازی های آسفالتی شامل شیارافتادگی، ترک حرارتی و ترک خستگی است. به دلیل هزینه بالای بازسازی و تعمیر روسازی ها، جلوگیری از آسیب یا به تعویق انداختن آن اقتصادی تر است. یک راه برای تقویت روسازی ها، اصلاح خواص قیر است. محققان از مواد افزودنی مختلف برای اصلاح خواص بست کننده آسفالت، از جمله انواع مختلف مواد نانو استفاده کرده اند (Shafabakhsh et al, 2014). یکی از مطلوب ترین ویژگی های مواد نانو برای استفاده در روسازی ها، توانایی آنها برای ایجاد یک تقویت مکانیکی برای مواد روسازی است (Faramarzi et al, 2014). در حالی که تحقیقات گسترده ای در سال های اخیر بر روی اصلاح نگهدارنده های آسفالت توسط نانو ذرات مختلف مانند نانو خاک رس (and Ghaffarpour Jahromi khodai, 2009)، نانو اکسید روی (Sadeghnejad et al, 2013)، نانو سیلیکون دی اکسید (Chao and Huaxin, 2009)، نانو تیتانیوم اکسید

(Chao and Huaxin, 2009)، نانو الیاف کربن¹ (Khattak et al, 2012) و غیره انجام شده است، مطالعات بسیار کمی در زمینه قیرها و مخلوط های اصلاح شده با CNT² انجام شده است. از آنجا که CNT ها ویژگی های مکانیکی متمایز (Treacy et al, 1996, and De, 2004) را همراه با نسبت های ابعاد بسیار بالا (نسبت طول به قطر) در محدوده ۳۰ تا بیش از هزاران (Bai et al, 2003) نشان می دهند، انتظار می رود که آنها کامپوزیت های قیری قوی تر و بهبود یافته تری نسبت به مواد تقویت کننده سنتی (مانند الیاف شیشه یا الیاف کربن) ایجاد کنند. بالا بودن مقاومت ویژه، مقاومت شیمیایی، رسانایی الکتریکی و رسانایی حرارتی نانولوله های کربنی (CNTها)، آنها را برای استفاده به عنوان یک اصلاح کننده برای توسعه کامپوزیت های قیر عالی جذاب ساخته است (Chong et al, 2002; Makar et al, 2003). در این مطالعه، CNT برای اصلاح نمونه های مخلوط آسفالتی گرم استفاده می شود. به منظور بررسی اثرات

کوتاه‌تر نسبت به قیر اصلاح‌شده با کربن نشان داد. این بهبود ویژگی‌های قیرهای آسفالت منجر به کاهش شیارافتادگی آسفالت در دماهای بالا و ترک حرارتی در دماهای پایین شد. در مطالعه دیگری که توسط خطاک و همکاران (Khattak et al, 2012) انجام شد مشخص شد که استفاده از CNF به عنوان یک افزودنی ویژگی‌های عملکردی نمونه‌های HMA را به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد. در مطالعه دیگری که توسط خطاک و همکاران (Khattak et al, 2012) انجام شد مشخص شد که استفاده از CNF به عنوان یک افزودنی ویژگی‌های عملکردی نمونه‌های HMA را به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد. در نتیجه اضافه کردن CNF ها به عنوان اصلاح‌کننده قیر، مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی و عمر خستگی به طور قابل توجهی بهبود یافت. همچنین سختی و مدول برجهنگی HMA اصلاح‌شده CNF در مقایسه با مخلوط‌های اصلاح‌نشده افزایش یافت.

۳-روش تحقیق

۳-۱- مواد و مصالح

مواد مورد استفاده در این تحقیق شامل یک قیر با درجه نفوذ ۶۰ / ۷۰ از پالایشگاه نفت معدنی تهران با ویژگی‌های فیزیکی ذکر شده در جدول ۱ می باشد. نانولوله کربن های چند دیواره موجود در بازار توسط روش CVD^۵ (رسوب بخار شیمیایی) تهیه شده توسط شرکت نوترینو بدون خلص سازی بیشتر مورد استفاده قرار گرفتند. خواص نانولوله های کربنی CNT در جدول ۲ نشان داده شده است. در این مطالعه درجه بندی سنگدانه ها براساس نوع ۴ پیوسته استاندارد انجام شد که در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی قیر ۶۰/۷۰

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

چنین اصلاحی بر روی نمونه‌های HMA^۳، تست مدول برجهنگی، تست محوری بار تکراری (RLA^۴) و تست خستگی کششی غیرمستقیم بر روی مخلوط‌های تمیز، فرآوری شده و اصلاح‌شده با نانولوله کربن انجام شد.

۲-پیشینه تحقیق

امیرخانیان و همکاران به این نتیجه دست یافتند که اصلاح قیر با درصد بالای نانولوله الیاف کربن سبب بهبود مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی در دماهای بالا می‌گردد. (Amirkhanian et al, 2011). در مطالعه دیگری که توسط خطاک و همکاران (Khattak et al, 2012) انجام شد، نتیجه گرفته شد که قیر اصلاح‌شده با نانولوله الیاف کربن، خستگی و مقاومت شیارافتادگی را با مقدار مشخصی بهبود می‌بخشد که به روش اختلاط کاربردی برای پراکنده کردن الیاف نانولوله کربن در قیر بستگی دارد. چالش‌های اصلی در ساخت مواد نانولوله اصلاح‌شده پراکنده نانوذرات و سازگاری شیمیایی نانوذرات با ساختار مواد است، که توسط حسین و همکاران ذکر شده است (Hussain et al, 2006). آنها پیشنهاد کرده‌اند که به منظور بهبود مساله کشش سطحی نانوفیبرهای کربنی ((CNF/ ساختار مواد، لازم است که یک پراکنده‌کننده کامل ایجاد شود تا پتانسیل کامل مواد نانولوله داشته باشیم. شیراکاوا و همکاران (Shirakawa et al, 2012) از امولسیون آسفالت به عنوان حلال برای پراکنده کردن نانولوله های کربنی و پودر کربن استفاده کردند. آنها نشان دادند که نانولوله های کربنی در امولسیون‌های آنیونی و غیر یونی بهتر از امولسیون‌های کاتیونی پراکنده می‌شوند. همچنین قیر اصلاح‌شده CNT درجه نفوذ بالاتر و جذب موج کوتاه‌تر نسبت به چسب قیر اصلاح‌شده با کربن نشان داد. همچنین چسب قیر اصلاح‌شده CNT درجه نفوذ بالاتر و جذب موج

جدول ۲. مشخصات نانو لوله کربن

خصوصیات	واحد	نتیجه
خلوص	%	بزرگتر از ۹۵
قطر خارجی	Nm	۲۰-۱۰
قطر داخلی	Nm	۱۰-۵
متوسط طول	میکرو متر	۱۰-۳۰
سطح مخصوص	m ² /gr	بزرگتر از ۲۰۰
رنگ	-	مشکی
چگالی	گرم بر سانتی متر مکعب	۰/۲۲
چگالی صحیح	گرم بر سانتی متر مکعب	۲/۱
هدایت الکتریکی	s/cm	۱۰۰

جدول ۳. دانه بندی مصالح مورد استفاده

اندازه الک (میلی متر)	حد بالا و پایین	درصد عبوری
۱۹	۱۰۰	۱۰
۱۱,۵	۱۰۰-۹۰	۹۵
۴,۷۵	۷۷-۴۴	۵۹
۲,۳۶	۵۸-۲۸	۴۳
۰,۳	۱۱-۵	۱۳
۰,۰۷۵	۱۰-۲	۶

۳-۲- آماده سازی نمونه

روشی که برای ترکیب CNT ها در قیر استفاده شد، شامل دو مرحله است. مرحله اول، اضافه کردن CNT ها به قیر اصلی و ترکیب دستی آن است. سپس مخلوط قیر اصلاح شده با نانو لوله کربن - با مخلوط کن با برش بالا استفاده شد. برای رسیدن به یکنواختی مورد نیاز از دستگاه مخلوط کن برشی با سرعت ۱۵۵۰ دور بر دقیقه به مدت ۴۰ دقیقه استفاده شد. در زمان مخلوط کردن، دما باید در دمای ۱۶۰ درجه سانتی گراد تنظیم شود و با اعمال یک حمام روغن که توسط یک دستگاه صفحه داغ گرم شده است، ثابت نگه داشته شود. ارزیابی اثر پیری کوتاه مدت ضروری است؛ بنابراین، یک نمونه AC اصلاح نیافته در معرض همان شرایط اختلاط یک قیر اصلاح شده با نانو لوله کربن قرار می گیرد که نمونه عمل آوری شده نامیده می شود. چند دقیقه

افزایش در فرآیند مخلوط کردن می تواند خواص رپولوژیکی اولیه قیر را تغییر دهد. تغییرات در ویژگی های مکانیکی نمونه های فرآوری شده به دلیل پیر شدن کوتاه مدت قیر در طول فرآیند اختلاط است. به هر حال، چنین تغییراتی نباید به عنوان بهبود خواص مخلوط در نظر گرفته شود (Khattak et al, 2013). بنابراین، نمونه های عمل آوری شده به عنوان نمونه های کنترل ساخته شدند تا هر گونه افزایش در نتیجه تغییرات CNT را مورد بحث قرار دهند.

۳-۳- روش کار آزمایش

۳-۳-۱- آزمایش مدول برجهنگی

آزمایش مدول برجهنگی در دماهای پایین به نحوی مرتبط با ترک خوردگی حرارتی می باشد. تحقیقات متعددی

سینوسی، مدت اعمال بار ۰/۱ ثانیه، زمان استراحت ۰/۹ ثانیه و ضریب پواسون ۰/۳۵ فرض گردید. در این آزمایش به ازای هر مخلوط، ۳ نمونه آسفالتی تهیه و روی هر نمونه ۵ پالس تکرار شد و میانگین نتایج به وسیله دستگاه نمایش داده شد. مدول برجهنگی بر اساس معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$M_r = \frac{P(\mu + 0.2734)}{\sigma \times t}$$

منجر به کاهش قابل‌توجهی در عمر مفید روسازی‌های انعطاف‌پذیر شود (Arabani et al, 2012). در این مطالعه، تست خستگی کشش غیرمستقیم برای بررسی مقاومت خستگی HMA اصلاح‌شده با CNT به کار گرفته شد. رفتارهای خستگی نمونه‌های مختلف توسط روش کشش غیرمستقیم با استفاده از دستگاه تست توقف ناتینگهام مطابق با استاندارد ASTM D 4123 ارزیابی شد. نمونه‌ها با CNT های ۰/۲٪، ۰/۴٪، ۰/۸٪، ۱٪ و همچنین با اتصال‌های تمیز ساخته شدند. تست بر روی نمونه‌های با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۴۰ میلی‌متر انجام شد. نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM D 1559 آماده و متراکم شدند (ASTM D 1559). بارگذاری در حالت چرخه‌ای با فرکانس ۱ هرتز تا شکست نمونه‌ها اعمال شد. نقطه شکست نیز زمانی مشخص شد که تغییر شکل عمودی نهایی به ۱۲٫۷ میلی‌متر یا پارگی نمونه رسید. تست‌های خستگی در حالت تنش کنترل‌شده انجام شد. در حالت تنش کنترل‌شده، تنش ثابت نگه‌داشته می‌شود تا کرنش درون نمونه افزایش یابد.

در این تحقیق، تست‌های خستگی در دماهای ۵، ۲۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد با تنش‌های ثابت ۱۵۰ و ۳۵۰ کیلو پاسکال انجام شد. رابطه بین عمر خستگی و کرنش کششی برای هر درصد از مصرف CNT به دست آمد. تعداد سیکل‌های شکست برای نمونه تحت بارگذاری HMA با کرنش ایجاد شده به طور مستقیم در تعامل است. تعداد سیکل‌های شکست برای نمونه تحت بارگذاری HMA با کرنش ایجاد شده به طور مستقیم در تعامل است. یک رابطه خطی زمانی بدست آمد که کشش در برابر عمر خستگی در مقیاس لگاریتمی کشیده شد (MoghadasNejad et al, 2012)

نشان داده است که مخلوط‌های سخت‌تر در دماهای پایین‌تر بیشتر مستعد ترک‌خوردگی حرارتی می‌باشند. برای تعیین مدول برجهنگی از استاندارد AS 2891-13-1-1995 استفاده شد. ابتدا نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در محفظه دستگاه در دمای ۲۵°C قرار داده شد. شکل بارگذاری نیمه (۱)

M_r = مدول برجهنگی بر حسب مگا پاسکال

P = بار تکراری بر حسب نیوتون

μ = نسبت پواسون

t = ضخامت نمونه بر حسب میلی‌متر

σ = کل تغییر شکل بازگشت‌پذیر افقی بر حسب میلی‌متر

۳-۲-۳- تست بار محوری تکرار شده

آزمون‌های رایج برای ارزیابی تغییر شکل دائمی نمونه‌های HMA عبارتند از: تست مارشال، تست بار محوری تکرار شده (RLA)، تست خزش استاتیک، تست ردیابی چرخ و تست خزش دینامیک (Arabani et al, 2012). در این مطالعه، تست RLA برای بررسی مقاومت HMA اصلاح‌شده در برابر تغییر شکل دائمی تحت‌تاثیر بارهای مکرر، با استفاده از دستگاه تست ناتینگهام انجام شد. برای هر شرایط سه نمونه مطابق با استاندارد ASTM D 1559 ساخته و متراکم شدند (ASTM D 1559). برای این مطالعه، نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۰۱ میلی‌متر و ارتفاع ۷۰ میلی‌متر ساخته شدند. درصدهای برگزیده برای اصلاح قیر به ترتیب ۰/۲، ۰/۴، ۰/۸ و ۱ درصد وزنی قیر بودند. مقدار خزش برای نمونه‌های مختلف با اعمال بار فشاری دینامیک (بار محوری مکرر) با مقادیر ثابت ۱۵۰، ۲۵۰ یا ۳۵۰ کیلو پاسکال برای دماهای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. در یک الگوی سینوسی در امتداد محور قطری نمونه‌های استوانه‌ای. تغییر شکل عمودی اندازه‌گیری شده توسط دو سنسور ثبت شد. تغییر شکل عمودی اندازه‌گیری شده توسط دو سنسور ثبت شد. فضاهای خلوت دما و تنش به دلیل تطابق با شرایط واقعی در آسفالت انتخاب شدند.

۳-۳-۳- تست خستگی کششی غیرمستقیم

شکست خستگی یکی از سه شکست اصلی روسازی‌های انعطاف‌پذیر است. ترک‌های خستگی به خاطر بارهای دوره‌ای ترافیک در روسازی گسترش می‌یابند و می‌تواند

CNT، در شکل نشان داده شده است. همانطور که مشاهده شد، مدول برجهندگی نمونه‌ها با افزایش دما کاهش یافت.

$$N_f = a \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)^b$$

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، مدول برجهندگی نمونه‌های مورد مطالعه با کاهش دما از ۴۰ درجه سانتیگراد به ۵ درجه سانتیگراد به دو برابر افزایش یافت. هر دمای ثابتی بالاترین مقدار مدول برجهندگی زمانی به دست آمد که نانو لوله کربن به میزان ۱٪ اضافه شد، در حالی که نرخ بهبود مدول برجهندگی در درصدهای پایین‌تر CNT بیشتر است، که در شکل ۱ دیده می‌شود.

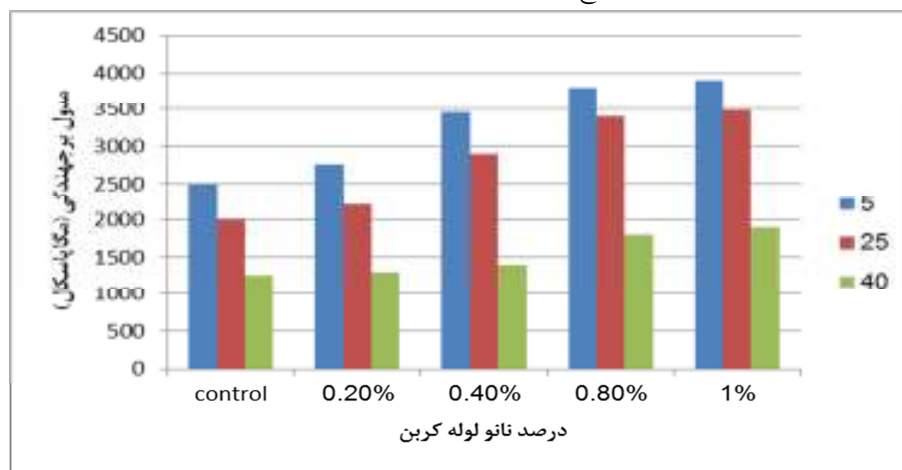
یک تحلیل رگرسیون برای دستیابی به معادلات خستگی به کار گرفته شد که به مدل‌های پیش‌بینی خستگی ووهرل معروف هستند:

که در آن N تعداد بارگذاری برای شکست نمونه است، و توان b معمولاً حدود ۴ است.

۴- نتایج و بحث‌ها

۴-۱- آزمایش مدول برجهندگی

به طور کلی، مخلوط با مدول برجهندگی بالا مقاومت بالایی در برابر تغییر شکل‌های دائمی دارد. نتایج تست مدول برجهندگی در ۵، ۲۵ و ۴۰ درجه سانتی گراد برای مخلوط‌های HMA تمیز، فرآوری شده و اصلاح شده با



شکل ۱. نتایج آزمایش مدول برجهندگی

۱ مشخص است، بیش‌ترین بهبود قابل توجه در مقدار و نرخ رشد مدول برجهندگی با افزودن CNT ها در پایین‌ترین دما رخ می‌دهد.

۴-۲- نتایج تست RLA

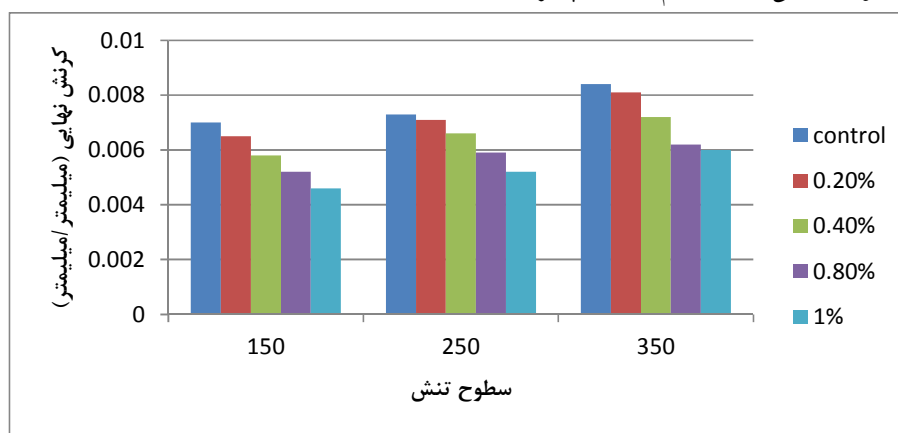
از آنجا که شیارافتادگی یک شکست معمول در دماهای بالا است، برای داشتن درک بهتر در مورد رفتار شیار شدگی HMA، تست خزش دینامیکی در دماهای ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی گراد اعمال شد که به عنوان دماهای بالا، تحت سطوح تنش ۱۵۰، ۲۵۰ و ۳۵۰ کیلو پاسکال در نظر گرفته می‌شوند. نتایج در شکل های ۲ و ۳ نشان داده شده‌اند. همانطور که در شکل

این امر می‌تواند به دلیل کاهش پوشش قیر در اطراف ذرات سنگ دانه‌ها در مقادیر بالای CNT که ناشی از افزایش ویسکوزیته در درصدهای بالاتر CNT باشد. با توجه به مطالعات گذشته، با افزایش درصد نانو لوله کربن، ویسکوزیته افزایش می‌یابد و در نتیجه میزان پوشش سنگدانه‌ها توسط قیر کاهش می‌یابد. تعامل بین قیر و مواد افزودنی در HMA اصلاح شده می‌تواند اثرات قابل توجهی بر خواص قیر و مخلوط آسفالت داشته باشد. در قیرهای اصلاح شده با CNT، چنین تعاملی بین CNT ها و قیر، با افزایش دما، تخریب می‌شود و باعث می‌شود که ساختار قیرهای اصلاح شده با CNTs، تنش را تحمل نکند. همانطور که در شکل

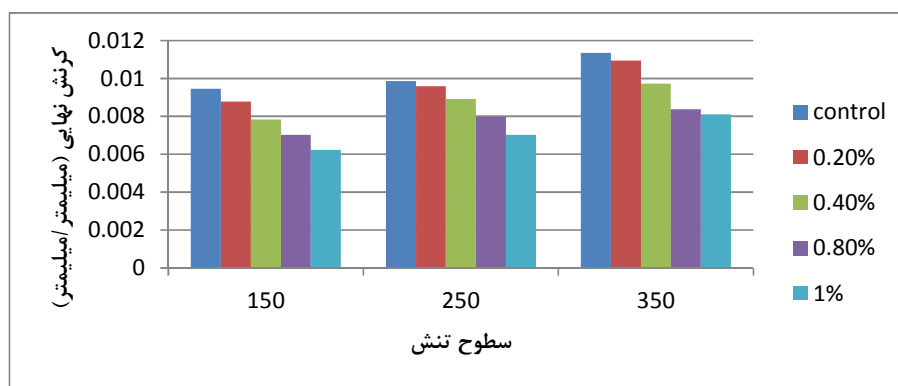
ترک های ریز ایجاد می کنند. هنگامی که تنش های برشی عمود بر محور بارگذاری و ناشی از بارگذاری محوری از استحکام کششی HMA تجاوز می کنند، CNT ها از ایجاد یا به تاخیر انداختن انتشار ترک های ریز جلوگیری می کنند و منجر به یک مخلوط آسفالت مقاوم تر در برابر پدیده شیار شدگی می شوند (Khattak et al, 2013). با افزایش دما، روند مشابهی در سطح تنش ۲۵۰ و ۳۵۰ کیلو پاسکال مشاهده شد. همچنین، همانطور که قابل پیش بینی بود، مقادیر کرنش با افزایش تنش (از ۱۵۰ کیلو پاسکال به ۳۵۰ کیلو پاسکال) در دماهای مختلف افزایش یافت (شکل ۲ و ۳).

نتایج تست RLA ثابت کرد که کرنش نهایی با افزایش محتوای CNT کاهش می یابد. با این حال، به دلایل اقتصادی، باید حد حداکثر ۱ CNT % در این تحقیق وجود داشته باشد.

این شکل ها دیده می شود، مقاومت شیار شدگی مخلوط های اصلاح شده با CNT ها در مقایسه با مخلوط های معمولی و فرآوری شده به طور قابل توجهی بهبود یافت. برای همه موارد، کرنش دایمی کل در مقدار CNT بالاتر در تعداد مشخصی از بارگذاری (۱۰۰۰ سیکل) کاهش یافت، در حالی که اضافه کردن ۱ CNT % منجر به کم ترین مقدار کرنش دایمی می شود. با توجه به نتایج تست مدول برجهندگی، نتیجه گرفته شد که اضافه کردن درصد CNT منجر به افزایش مدول برجهندگی نمونه ها می گردد. مخلوط های با مقادیر بالاتر مدول برجهندگی مقاومت بهتری در برابر تغییر شکل های دایمی دارند، بنابراین، می توان درک کرد که کرنش کل نمونه های اصلاح شده تحت تاثیر مدول بزرگ تر HMA اصلاح شده در مقایسه با HMA معمولی کاهش می یابد. نانو لوله های کربن با مقاومت کششی بالا نقش مسلح کننده مخلوط آسفالتی را در هنگام ایجاد و پیشرفت



شکل ۲. نتایج کرنش نهایی نمونه ها در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد

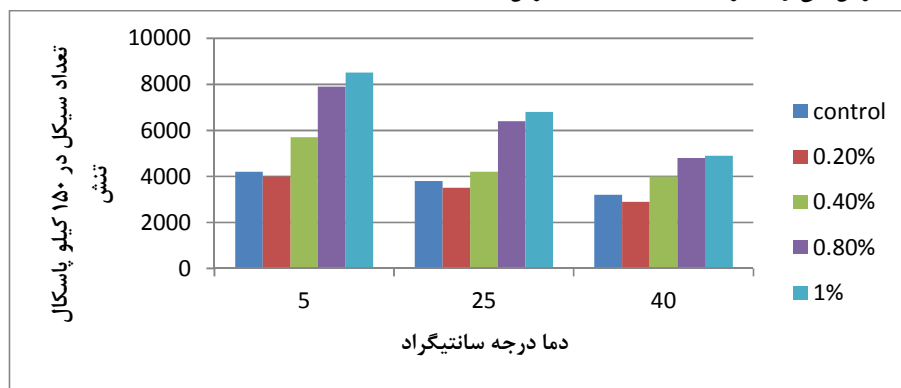


شکل ۳. نتایج کرنش نهایی نمونه ها در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد

۳.۴. نتایج تست ITF

ترک‌های با اندازه میکرو در نمونه‌های HMA را کند کند. مدل پیش‌بینی خستگی واولر از طریق میانگین عمر خستگی هر نمونه (شاهد، ۰٪ و ۰.۲٪ و ۰.۴٪ و ۰.۸٪ و ۱٪) در جدول ۴ نشان داده شد. مشخص است که اضافه کردن محتوای CNT عمر خستگی مخلوط‌های HMA اصلاح‌شده را افزایش می‌دهد. CNT ها ترک‌خوردگی را به تاخیر می‌اندازند و از ترک‌های ریز تولید شده به راحتی توسط تنش‌های کششی، جلوگیری می‌کنند. این مکانیزم به دلیل جذب انرژی بالاتر نانولوله های کربنی در مقایسه با فاز بست کننده رخ می‌دهد که منجر به عملکرد بهتر در برابر بارگیری‌های دوره‌ای می‌شود. استحکام کششی بالای نانولوله های کربنی، تولید ترک و انتشار آن را در سراسر قطر نمونه تغییر یافته HMA - به تاخیر می‌اندازد. ضرایب همبستگی مدل خستگی تمامی نمونه‌ها در جدول ۴ نشان‌داده شده‌است. به طور کلی، نتایج نشان داد استفاده از CNT سبب بهبود رفتار خستگی نمونه‌های مورد مطالعه می‌گردد.

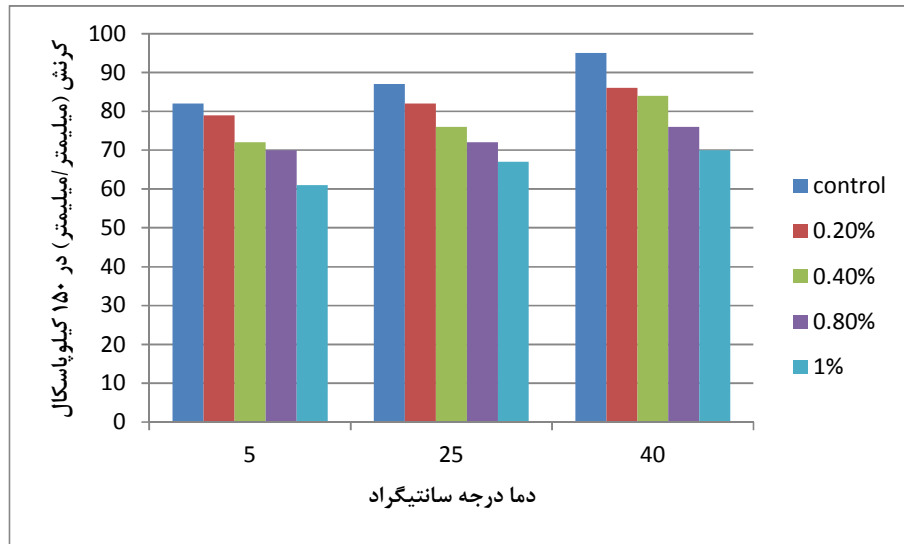
نتایج تست خستگی انجام‌شده در دماهای ۵، ۲۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد تحت تنش‌های ۱۵۰ و ۳۵۰ کیلو پاسکال، در شکل‌های ۴ الی ۷ نشان‌داده شده‌است کرنش نهایی نمونه‌های HMA در دما و سطوح تنش ذکر شده در اشکال ۶ و ۷ برای درصد‌های مختلف نانولوله کربن نشان داده شده است. همانطور که این شکل نشان می‌دهد، محتوای CNT بالاتر منجر به کاهش کم‌تر در نمونه‌های اصلاح‌شده می‌شود. علاوه بر این، مقادیر عمر خستگی تحت‌تاثیر محتوای CNT HMA's قرار گرفتند. نمونه‌های بتون آسفالت حاوی CNT ها، عمر خستگی قابل‌توجهی را در مقایسه با HMA's معمولی نشان دادند. به عنوان مثال، عمر خستگی نمونه‌های حاوی ۰.۵٪ و ۱٪ CNT در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد و ۱۰۰ کیلو پاسکال به ترتیب ۱۸۰٪ و ۲۰۰٪ در مقایسه با بتون آسفالت معمولی در همان شرایط افزایش می‌یابد. استفاده از CNT به عنوان افزودنی اصلاح‌کننده می‌تواند منجر به مقاومت کششی بالاتر در HMS های اصلاح‌شده CNT شود، بنابراین می‌تواند ترک ایجاد شده و گسترش



شکل ۴. تعداد سیکل برای شکست نسبت به دما برای درصد‌های مختلف افزودنی در ۱۵۰ پاسکال



شکل ۵. تعداد سیکل برای شکست نسبت به دما برای درصد‌های مختلف افزودنی در ۳۵۰ پاسکال



شکل ۶. کرنش نهایی کششی نسبت به دما



شکل ۷. کرنش نهایی کششی نسبت به دما

جدول ۴. نتایج ضرایب مدل خستگی

Samples	Coefficient of the fatigue models		R2
control	6 E +12	-3.38	0.9
0.20%	2 E+ 14	-3.84	0.82
0.40%	3 E+ 12	-3.1	0.83
0.80%	1 E+ 13	-3.3	0.85
1%	1 E+ 13	-3.37	0.9

asphalt binder modified with carbon nanoparticles. *Int J Pavement Res Technology*, 4(5), pp.281–6.

- Amirkhanian AN, Xiao F, Amirkhanian SN., (2011), "Evaluation of high temperature rheological characteristics of asphalt binders with carbon nano particles", *J Test Eval*, 39(4), pp.1–9.

-Arabani M, MoghadasNejad F, Azarhoosh AR., (2012), "Laboratory evaluation of recycled waste concrete into asphalt mixtures", *Int J Pavement Eng*. <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2012.747685>.

-ASTM D 1559, (2002), "Standard Test Method for Marshal Test, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials", West Conshohocken.

-AASHTO, (1993), "guide for design of pavement structures".

-Bai JB., Allaoui A., (2003), "Effect of the length and the aggregate size of MWNTs on the improvement efficiency of the mechanical and electrical properties of nanocomposites-experimental investigation", *Compos A* 2003;34(8), pp.689–94.

-Chong KP, Garboczi EJ., (2002), "Smart and designer structural material systems, *ProgStructMater Eng*. 4, pp.417–30.

-Chao YE, Huaxin C. (2009), "Study on road performance of nano SiO₂ and nano TiO₂ modified asphalt", *New Building Materials*.

-De Heer WA., (2004), "Nanotubes and the pursuit of applications. *MRS Bull*, 29, pp.281–5.

-Famarzi M, Arabani M, Haghi AK, Mottaghtalab V. (2014), "Carbon nanotubes modified asphalt binder: preparation and characterization", *Int J Pavement Res Technol* 2014;8(1), pp.29–37.

-GhaffarpourJahromi S, Khodaii A., (2009), "Effects of Nano clay on rheological properties of bitumen binder. *Constr Build Mater*, 23, pp.2894–904.

-Hussain F, Okamoto M, Gorga R. (2006), "Review article: polymer–matrix

۵- نتیجه گیری

همانطور که قبلاً اشاره شد، هدف از این مطالعه بررسی خواص مکانیکی مخلوط آسفالتی گرم اصلاح شده با CNT از طریق مطالعات آزمایشگاهی استفاده از نتایج به شکلی بود که بتواند برای پیش‌بینی رفتار روسازی‌های اصلاح‌شده با CNT به کار رود. مقایسه نتایج بین نمونه‌های HMA معمولی و اصلاح‌شده نشان داد که عملکرد HMA اصلاح‌شده با CNT در برابر ترک‌خوردگی خستگی و شیار شدگی به طور قابل توجهی بهبود یافت.

- پراکندگی مناسب CNT با مقاومت کششی بالا، در لحظه تولید و انتشار میکروترک‌ها، نقش یک مسلح کننده را در مخلوط‌های آسفالت بازی می‌کنند. همچنین در درصد‌های بالاتر CNT، حساسیت کاهش یافته قیر، عملکرد مکانیکی دمای بالا HMA اصلاح‌شده با CNT را بهبود می‌بخشد. با این دو مکانیسم، CNTها تغییر شکل‌های دایمی را کاهش داده و عمر خستگی HMA اصلاح‌شده را بهبود می‌بخشند.

- مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی معمولی با اضافه کردن CNTها بهبود یافت. این بهبود در درصد‌های بالاتر CNT و دماهای پایین‌تر قابل توجه بود.

- مقاومت مخلوط‌های اصلاح‌شده CNT در برابر تغییر شکل دایمی با افزایش مقدار CNT بهبود یافت. همانطور که در نتایج تست مدول برجهندگی نشان داده شده‌است، این امر سبب می‌شود که مخلوط‌های اصلاح‌شده در برابر تغییر شکل‌های دایمی مقاوم‌تر باشند.

- با اصلاح قیر توسط CNT، رفتار خستگی مخلوط‌های اصلاح‌شده با نانو لوله کربن، با کاهش کرنش و افزایش عمر خستگی، بهبود می‌یابد.

۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Carbon Nano Fiber
- 2- Carbon Nano Tube
- 3- Hot Mix Asphalt
- 4- Repeated Load Axial
- 5- Chemical Vapor Deposition

۷- مراجع

-Amirkhanian AN, Xiao F, Amirkhanian SN., (2011), "Characterization of unaged

evaluation of fatigue life of asphalt mixture modified with nano zinc oxide”, 7th Congress on Civil Engineering, Zahedan.

-Santagata E, Baglieri O, Tsantilis L, Dalmazzo D., (2012), “Rheological characterization of bituminous binders modified with carbon nanotubes. Proc Soc Behav Sci., 53, pp.546–55.

-Shafabakhsh Gh, Mirabdolazimi SM, Sadeghnejad M., (2014), “Evaluation the effect of nano-TiO₂ on the rutting and fatigue behavior of asphalt mixtures. Constr Build Mater, 54, pp.566–71.

-Shirakawa T, Tada A, Okazaki N., (2012), “Development of functional carbon nanotubes–asphalt composites. Int. J. Geomate, 2, pp.161–5.

-Treacy MMJ, Ebbesen TW, Gibson JM., (1996), “Exceptionally high Young’s modulus observed for individual carbon nanotubes”, Lett Nat.381, pp.678–80.

nanocomposites”, J Compos Mater 40(17), pp.1511–75.

-Khattak MJ, Khattab A, Rizvi HR, Zhang P. (2012), “The impact of carbon nanofibermodification on asphalt binder rheology. Constr Build Mater 30, pp.257–64.

-Khattak MJ, Khattab A, Rizvi H., (2013), “Characterization of carbon nano-fiber modified hot mix asphalt mixtures. Constr Build Mater 40, pp.738–45.

-Makar JM, Beaudoin JJ., (2003), “Carbon nanotubes and their applications in the construction industry. In: Proceedings of the first international symposium on nanotechnology in construction. Scotland, pp. 331–41.

-MoghadasNejad F, Aflaki E, Mohammadi MA., (2010), “Fatigue behavior of SMA and HMA mixtures, Constr Build Mater 24(6), pp.1158–65.

-Sadeghnejad M, Arabani M, Shakeri V, Mirabdolazimi SM., (2013), “Experimental

Evaluation of Performance Properties of Asphalt Mixtures Modified By Carbon Nano Tube

Syedrohalah Moafimadani, Department of Civil Engineering, Rahman Institute of Higher Education, Ramsar, Mazandaran, Iran.

Amin Choubdar, MS.c., Grad., Department of Civil Engineering, Malard Branch, Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.

Amin Farajollahi, Department of Civil Engineering, Malard Branch, Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.

E-mail: R.MoafiMadani@gmail.com

Received: March 2020-Accepted: September 2020

ABSTRACT

The rheological properties directly affect the mechanical properties of hot mixtures at different temperatures. Recent research has shown that the use of nano-materials results in improving functional properties. In this study, some tests have been done to compare the performance properties of the modified asphalt mixtures with carbon nanotubes and no additives. Mechanical properties of asphalt were evaluated including resilient modulus, creep behavior and fatigue performance. The results of this study show a significant improvement in the mechanical properties of asphalt mixture containing the carbon nanotube, against the phenomenon of fatigue and constant deformation compared to the conventional asphalt mixture.

Keywords: Nanostructure, Permanent Deformation Modulus, Fatigue Longevity, Constant Form of Strain