

ارزیابی عملکردی قیر و مخلوط آسفالتی اصلاح شده با نانولوله کربنی

مقاله علمی - پژوهشی

حامین چوبدار، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران
علیرضا عاملی*، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Amelii@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۰ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۵

صفحه ۵۲۰-۵۰۵

چکیده

هدف از این مقاله بررسی اثر نانولوله‌های کربنی ($CNTs^1$) به عنوان اصلاح کننده قیر بر عملکرد شیارشدگی و ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی بود. برای این منظور، درصد‌های مختلف CNT (۰.۰۵، ۰.۱، ۰.۱۵، ۰.۲ و ۰.۲۵ درصد وزنی) به قیر معمولی اضافه شد. آزمایش‌های پایداری مارشال (MS^2)، کشش غیرمستقیم (IDT^3)، مدول استاتیک (SM^4)، شیار جای چرخ (WT^5) و آزمون شکست خمشی نیمه دایره‌ای (SCB^6) برای ارزیابی عملکرد مخلوط آسفالت اصلاح شده با CNT انجام شد. نتایج نشان داد که افزودن نانولوله‌های کربنی مقاومت شیارشدگی در دمای بالا و مقاومت به ترک در دمای متوسط را به طور معنی داری افزایش داد. علاوه بر این، از آزمایش SCB مشخص شد که نرخ آزادسازی انرژی کرنش (JC) درصد ۰.۱٪ $CNTs$ بیشتر از مخلوط کنترل بود. در نهایت، بر اساس نتایج آزمایش آزمایشگاهی، می‌توان نتیجه گرفت که درصد CNT بهینه ۰.۱٪ وزن قیر می‌تواند به عنوان افزودنی برای قیر در مخلوط‌های آسفالتی استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: نانولوله‌های کربنی، مخلوط آسفالتی، مقاومت در برابر شیارشدگی، مقاومت در برابر ترک خوردگی، تست شکست خمشی نیمه دایره‌ای

۱- مقدمه

پلاستیکی کم مشخص می‌شود که منجر به کاهش استحکام ساختار روسازی AC می‌شود (Huang et al, 2019; hamedi et al, 2019). برای غلبه بر این مشکلات، قیر معمولی باید با برخی از مواد افزودنی اصلاح شود تا در برابر تنش زیاد مقاومت کند. قیر اصلاح شده با عملکرد خوب روسازی در محدوده دمایی وسیع‌تر و عمر طولانی‌تر مشخص می‌شود. همچنین دارای استحکام بهبود یافته و انعطاف پذیری در دمای پایین است (Huang et al, 2019). به همین دلیل، محققان سعی کردند

شیارشدگی و ترک خوردگی دو خرابی عمده در بتن آسفالتی (AC^7) هستند که سبب خرابی زودرس سیستم روسازی آسفالتی می‌شوند. این مشکلات مربوط به رفتار ویسکوالاستیک بتن آسفالتی است که نقش مهمی در تعیین عملکرد روسازی آسفالتی دارد. به دلیل افزایش بار ترافیکی و شرایط نامساعد آب و هوایی در سال‌های اخیر، قیر معمولی ممکن است نتواند معیارهای شیار و ترک خوردگی روسازی را حفظ کند (Zou et al, 2017). قیر به طور کلی با چسبندگی ضعیف بین سنگدانه و قیر و خواص

یافت. مطالعه دیگری سه درصد مختلف CNT را ۰,۰۱٪، ۰,۰۵٪ و ۰,۱٪ از وزن قیر ارزیابی کرد تا خواص قیر را با استفاده از آزمون درجه نفوذ، آزمون نقطه نرم شدن، تست شکل پذیری، تست مارشال بررسی کند (Akbari et al, 2012). نتایج نشان داد که با افزایش میزان نانولوله کربنی، مشخصات فنی بهبود یافته و نانولوله کربنی ۰,۱ درصد با قیر بهترین نتایج را دارد. با این حال، محدودیت مطالعه این است که فقط از آزمایش سنتی استفاده کرد و روش‌های آزمایش پیشرفته‌تر را نادیده گرفت. مطالعه دیگری (Santagata et al, 2012) نشان داد که نانولوله‌های کربنی ممکن است به طور قابل توجهی بر خواص رئولوژیکی قیرها تأثیر بگذارند که به قیر پایه با درصدهای کافی بالا (حداقل ۰,۵ درصد وزنی قیر پایه) اضافه می‌شوند. هنگامی که درصد CNT های کمتری استفاده می‌شود، تغییرات غیر قابل توجهی در پاسخ تحت بارگذاری مشاهده می‌شود، بنابراین نشان می‌دهد که هیچ تغییر واقعی رخ نمی‌دهد و هزینه‌های اضافی مربوط به تولید از نظر فنی توجیه نمی‌شود. از آنجایی که در تکنیک اختلاط CNT ها با قیر (American Standard, 2002) از حلال نفت سفید برای شکستن مدار CNT ها با استفاده از دستگاه اولتراسونیک استفاده نمی‌شود، CNT ها ممکن است با درصد بالایی به قیر پایه اضافه شوند. در سال‌های اخیر، مطالعات بیشتری در مورد CNT ها انجام شده است. با این حال، این پیشرفت‌های فعلی فقط ویژگی‌های عملکردی قیرهای اصلاح‌شده با CNT ها را ارزیابی می‌کنند. از آنجایی که نیاز به ارزیابی CNT ها در مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده وجود دارد، مطالعه ای برای ارزیابی خواص مکانیکی HMA^{۱۱} از طریق آزمون مارشال انجام شد (Zahedi et al, 2017). نتایج نشان داد که استحکام مارشال هنگام افزودن CNT ها به قیر در مخلوط‌های HMA افزایش می‌یابد (Zahedi et al, 2017). با این حال، هنوز خواص ارزیابی شده قیرهای اصلاح شده با CNT برای مخلوط آسفالتی با استفاده از آزمایش سنتی انجام شد. مخلوط‌های HMA اصلاح شده با CNT ها هنوز به‌طور کامل مورد بررسی قرار نگرفته‌اند، به‌ویژه از نظر عملکرد شیار و ترک. هدف اصلی این مطالعه بررسی عملکرد آزمایشگاهی مخلوط های HMA اصلاح شده با CNT ها است. برای دستیابی به این هدف، آزمایش‌های آزمایشگاهی مختلفی برای مخلوط‌های

خواص روسازی را با توسعه مواد جدید برای بهبود ویژگی‌های قیر مانند خرده لاستیک و کربن سیاه بهبود بخشند (Ma et al, 2018; Geckil et al, 2017). در سال‌های اخیر، بسیاری از محققان استفاده از نانولوله‌های کربنی (CNTs) را جهت بهبود عملکرد مکانیکی، دوام و پایداری قیر آغاز کرده‌اند. این مطالعات فعلی بر بهبود روش‌های ترکیب CNT ها در قیر و ویژگی‌های آن متمرکز بودند. نانولوله‌های کربنی بر اساس تعداد صفحات گرافن به طور کلی به نانولوله‌های کربنی تک جداره (SWCNT) و نانولوله‌های کربنی چند جداره (MWCNTs) تقسیم می‌شوند (Bai et al, 2003). MWCNT ها سفت تر و ارزان تر از SWCNT ها هستند. دو روش اختلاط CNT با قیر شامل فرآیندهای ساده و مرطوب برای ارزیابی خواص ویسکوالاستیک قیر اصلاح شده پیشنهاد شد. نتایج مطالعه نشان داد که فرآیند ساده نمی‌تواند در مقایسه با فرآیند مرطوب، یک اتصال دهنده CNTs همگن ایجاد کند. از سوی دیگر، مشخص شد که قیر اصلاح شده با CNT ها مقاومت شیارشدگی و ترک خوردگی حرارتی مخلوط را بهبود می‌بخشد. با این حال، نقطه ضعف اصلی این مطالعه (Faramarzi et al, 2014) این است که تنها مقدار کمی از CNT ها برای بررسی خواص قیر انجام شد. علاوه بر این، مطالعه دیگری برای بررسی تأثیر نانولوله‌های کربنی بر ویژگی‌های عملکردی و پایداری ذخیره‌سازی قیر اصلاح‌شده پلیمری انجام شد (Goli et al, 2017).

از این مطالعه مشخص شد که افزودن نانولوله‌های کربنی سبب کاهش شاخص نفوذ، حساسیت دما و حساسیت دمای ویسکوزیته مخلوط‌ها شد و در عین حال خواص فیزیکی و رئولوژیکی قیر را بهبود بخشید. همچنین، افزودن CNT ها به قیر اصلاح شده SBS^۹ منجر به بهبود پایداری شد که نشان دهنده تعامل قوی بین قیر و پلیمر SBS است. در همین حال، محقق دیگری اثر MWCNT^۹ ها را به عنوان یک افزودنی به قیر در شرایط مختلف پیری مورد مطالعه قرار داد (Amin et al, 2016). مشخص شد که دمای شکست بالا و مقاومت شیارشدگی قیر اصلاح شده با فرآیند پیرشده کوتاه مدت (RTFO^{۱۰}) با افزایش درصد MWCNT افزایش یافت در حالی که مقاومت ترک خوردگی خستگی و مقاومت به ترک خوردگی در دمای پایین با افزایش درصد MWCNT کاهش

پایه بود. ویژگی‌های CNTها در جدول ۱ ارائه شده است. CNTها در یک حلال نفت سفید به منظور شکستن مدار CNTها با استفاده از دستگاه اولتراسونیک که در آن یک گرم CNT با حدود ۳۰ گرم نفت سفید مخلوط می‌شود، حل شدند. مخلوط قیر پایه و نانولوله‌های کربنی با افزودن نانولوله‌های کربنی به داخل قیر ذوب شده در دمای 2 ± 145 درجه سانتی‌گراد و مخلوط کردن حدود ۱۰ دقیقه با سرعت ۱۶۰۰ دور در دقیقه در یک میکسر تهیه شد تا یک ترکیب خوب هموزن در آزمایشگاه به دست آید.

آسفالتی انجام شد. آزمایش‌های شکست MS، IDT، SM، WT و SCB برای ارزیابی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با CNTs انجام شد.

۲-مواد و مصالح

۲-۱-قیر اصلاح شده با نانولوله کربنی

در این پژوهش از قیر با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ به عنوان قیر پایه استفاده شد. درصد صد نانولوله‌های کربنی استفاده شده در این مطالعه ۰،۰۵، ۰،۱، ۰،۱۵، ۰،۲، درصد و ۰،۲۵ درصد وزن پایه قیر

جدول ۱. مشخصات نانولوله کربنی

نتایج	استاندارد	خصوصیات
۴۸،۲	%	درصد خلوص
۲۵،۵	um	طول
۶۷،۳	nm	قطر
<۱	ID/IG	کریستالیت
<۱	I2D/IG	کریستالیت
۲،۸۳۱		سطح مخصوص

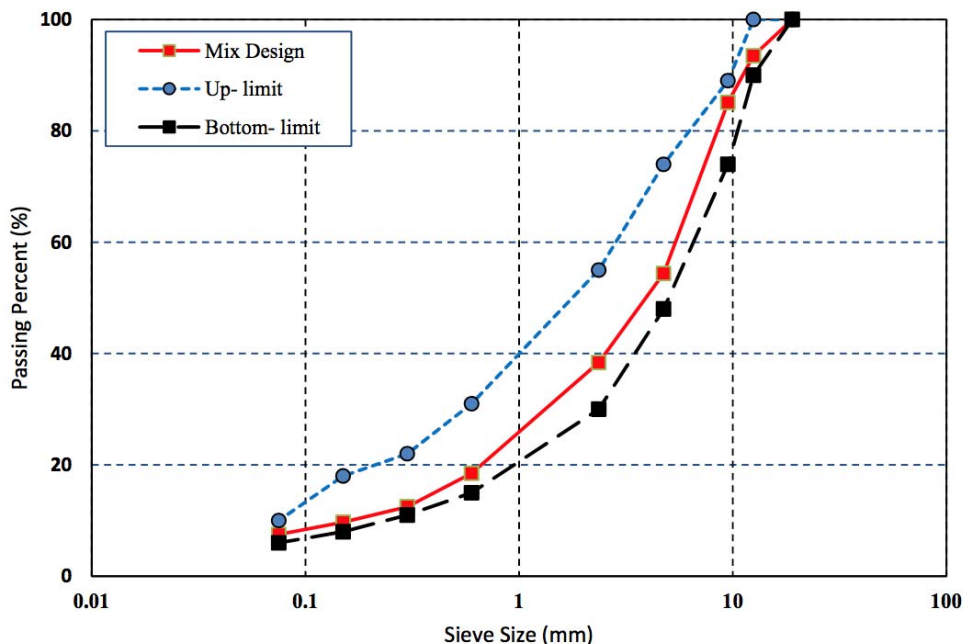
۲-۲-مصالح سنگی

در این مطالعه، از یک دانه بندی متراکم برای مخلوط‌های HMA اصلاح شده با CNTها استفاده شد، همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است. کمیت سنگدانه‌ها به دنبال ASTM C136-01-2001 ± 0.1 گرم اندازه گیری شد.

۶۰/۷۰ در دمای 2 ± 145 درجه سانتی‌گراد با هم مخلوط می‌شوند. سپس، سنگدانه‌های مخلوط شده را در یک کوره با دمای کنترل شده در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت حداقل ۱۲ ساعت قرار می‌دهند در حالی که قیر اصلاح شده با CNTها قبل از اختلاط در دمای ۱۴۵ درجه سانتی‌گراد به مدت دو ساعت در کوره دیگری گرم می‌شود. سپس سنگدانه‌ها و قیر اصلاح شده با CNTها در دمای ۱۴۵ درجه سانتی‌گراد در یک اجاق گاز کوچک مخلوط شدند. در نهایت، مخلوط‌های شل به مدت ۴ ساعت در محفظه ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند و با هفتاد و پنج ضربه فشرده شدند.

۲-۳-طرح اختلاط

مخلوط‌های کنترل در درصدهای مختلف قیر تولید شدند تا فضای خالی هوای مورد نظر ۴،۰٪ به دست آید و درصد قیر بهینه ۵،۰٪ از جرم کل مخلوط بود. برای مخلوط‌های اصلاح شده با CNTها، دمای اختلاط و تراکم در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری می‌شود. در ابتدا، نانولوله‌های کربنی و قیر



شکل ۱. دانه بندی مصالح سنگی مورد استفاده

۳- روش آزمایشگاهی

دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد تعریف می‌شود. در همین حال، مقدار جریان، تغییر شکلی است که نمونه فشرده شده در حین بارگذاری تا حداکثر مقدار متحمل می‌شود. علاوه بر این، نسبت پایداری مارشال^{۱۲} (MSR) برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی قرار گرفت و MSR با استفاده از معادله محاسبه می‌شود. (۱):

$$MSR = MS_{wet} / MS_{dry} * 100$$

تست شکستگی MS، IDT، SM، WT و SCB برای تعیین عملکرد مخلوط‌های HMA اصلاح‌شده با CNTs انجام می‌شود. در آزمایش MS، تغییر شکل پلاستیک تمام نمونه‌های فشرده در حالی که هر نمونه با سرعت ثابت ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه بر اساس ASTM D6927-06 بارگذاری می‌شود، اندازه‌گیری شد. مقدار MS به عنوان حداکثر بار حمل شده توسط نمونه‌های فشرده در

(۱)

MSR: نسبت پایداری مارشال،

MSdry: پایداری مارشال برای نمونه بدون شرط در ۲۵ درجه سانتی‌گراد (kN) و

MSwet: پایداری مارشال برای نمونه شرطی شده در ۶۰ درجه سانتی‌گراد برای ۲۴ دست ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد برای ۲ ساعت. (kN)

آزمون IDT در یک جابجایی ثابت انجام شد.

IDT تمام نمونه‌های فشرده با استفاده از معادله اندازه‌گیری شد.

نرخ ۵۰ میلی‌متر در دقیقه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد طبق

ASTM D6931-07. اوج بار فشاری برای محاسبه مقاومت

(۲)

$$\sigma_{IDT} = \frac{2000P_{max}}{\pi tD}$$

(۲)

IDT: استحکام کششی غیر مستقیم (کیلو پاسکال)،

Pmax: اوج بار (N) ،

t: ضخامت نمونه (میلی متر) و D: قطر نمونه (میلی متر)

شکل ابتدا با برش نمونه با قطر ۱۵۰ میلی متر در ضخامت ۱۲۰ میلی متر در دو نمونه آزمایشی دایره‌ای مساوی با ضخامت ۵۷ میلی متر آماده می‌شوند. این نمونه‌ها در امتداد محور مرکزی آن به دو نمونه نیم دایره مساوی بریده شدند. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، چهار نمونه نیم دایره در هر یک از اعماق شکاف زیر آزمایش شدند: ۲۵ میلی متر، ۳۲ میلی متر و ۳۸ میلی متر. بار بر روی نمونه در رژیم کنترل شده با جابجایی با نرخ ۰.۵ میلی متر در دقیقه اعمال شد تا اطمینان حاصل شود که زمان، نیرو و جابجایی با نرخ نمونه برداری ۱۰ هرتز اندازه‌گیری و ثبت می‌شوند. آزمایش ممکن است زمانی خاتمه یابد که بار اعمال شده به ۲۵٪ از بار اوج کاهش یابد. آزمایش در اعماق چند شکافی برای محاسبه نرخ آزادسازی انرژی کرنش بحرانی (Jc) تکرار می‌شود. مقدار بحرانی J-انتگرال (Jc) به عنوان یک معیار برای اندازه‌گیری مقاومت ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی در دماهای میانی استفاده می‌شود. مقدار بحرانی Jc با استفاده از معادله تعیین می‌شود.

$$J_c = -\frac{1}{b} \times \left(\frac{dU}{da} \right)$$

(۳)

Jc: نرخ آزادسازی انرژی کرنش بحرانی (kJ/m²),

b: ضخامت نمونه

a (m) عمق بریدگی

U (m): انرژی کرنش تا شکست (کیلوژول) که مساحت زیر است قسمت بارگذاری بار در مقابل. منحنی‌های انحراف، تا حداکثر بار اندازه

گیری شده برای هر شکاف عمق، و

da/dU: تغییر انرژی کرنش با عمق بریدگی (kJ/m²)



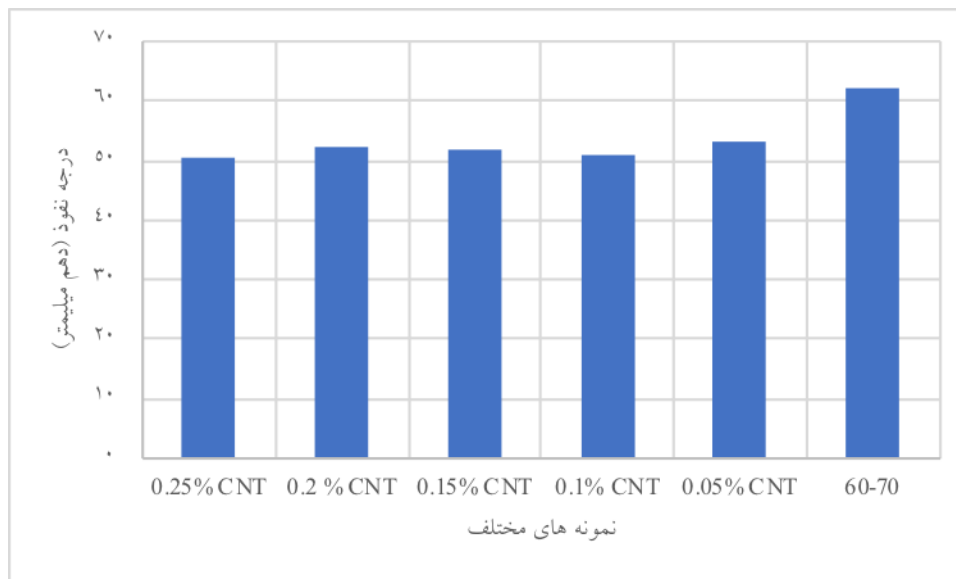
شکل ۲. نمونه‌های خمش نیم دایره‌ای

۴-بحث

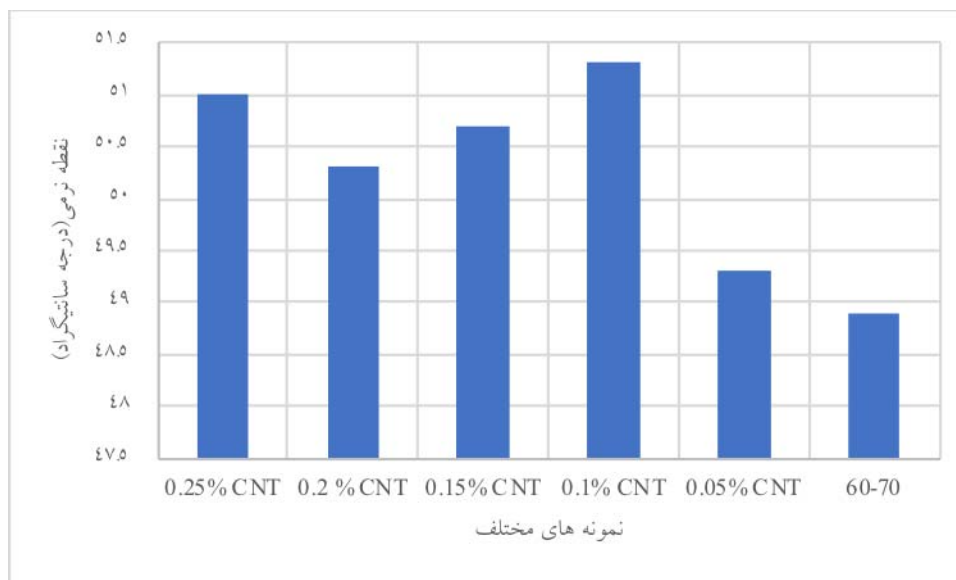
۴-۱-نتایج آزمایش قیر

اصلاح شده با CNTs در محدوده ۱,۰۳۷-۱,۰۳۵ گرم بر سانتی متر مکعب در درصد های مختلف CNT های مختلف یافت شد. علاوه بر این، افزودن CNT ها ویسکوزیته دینامیکی قیر را در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد افزایش داد (شکل ۶).

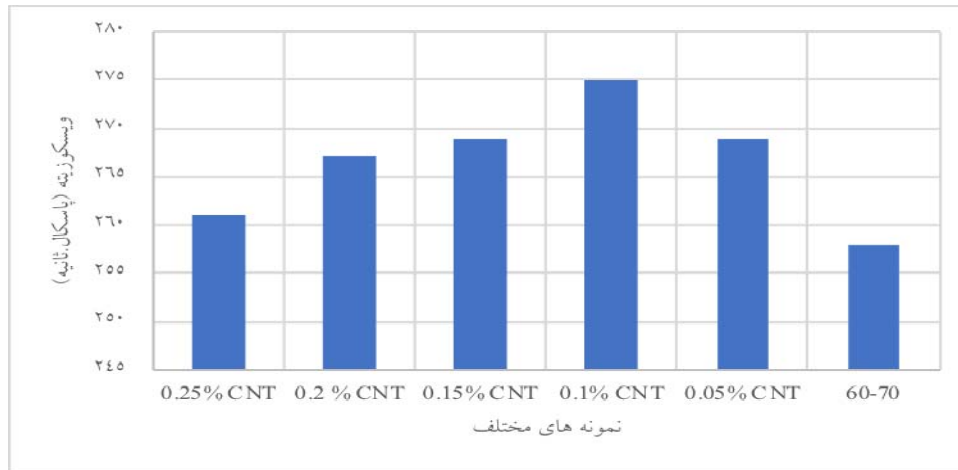
ویژگی های قیر اصلاح شده با CNT ها در اشکال ۳-۱۱ ارائه شده است. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می شود، درجه نفوذ قیر اصلاح شده با CNT برای درصد های مختلف CNT کاهش یافته است، در حالی که با توجه به شکل ۴، نقطه نرمی کمی افزایش یافته است. همچنین با توجه به شکل ۵، چگالی قیر



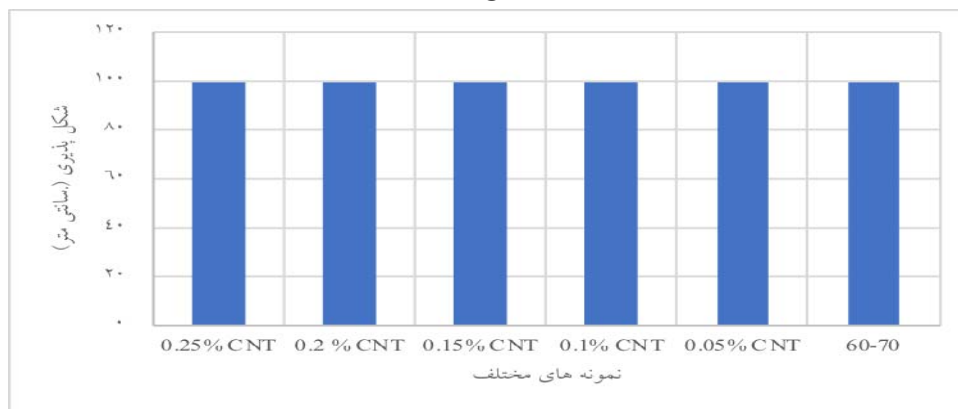
شکل ۳. درجه نفوذ



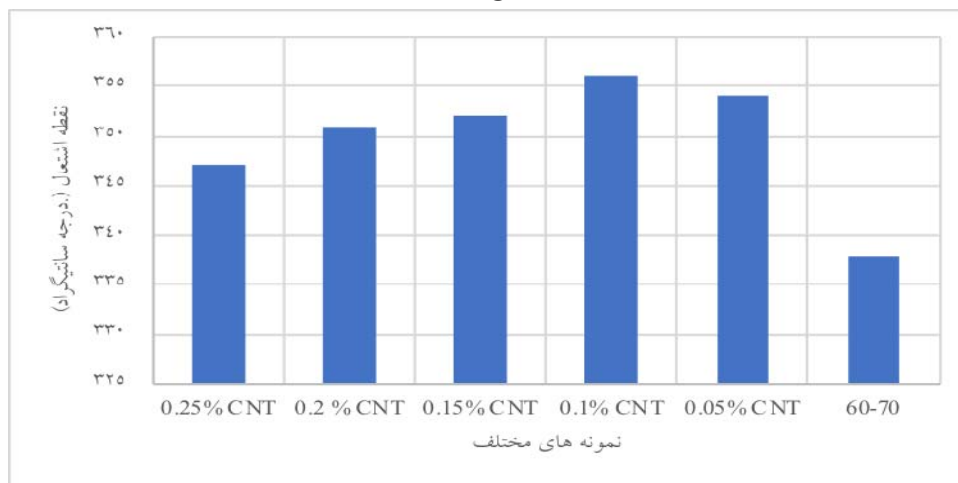
شکل ۴. نتایج نقطه نرمی



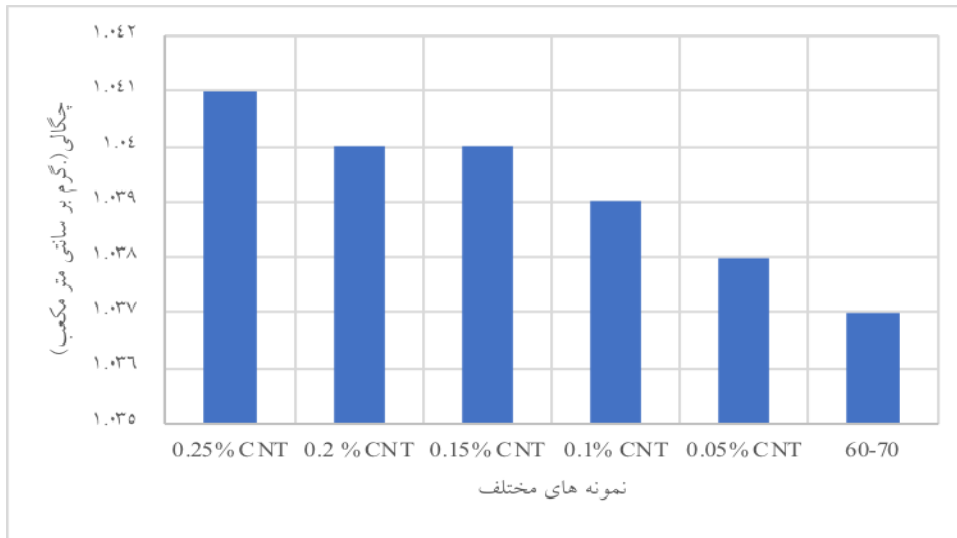
شکل ۵. نتایج ویسکوزیته



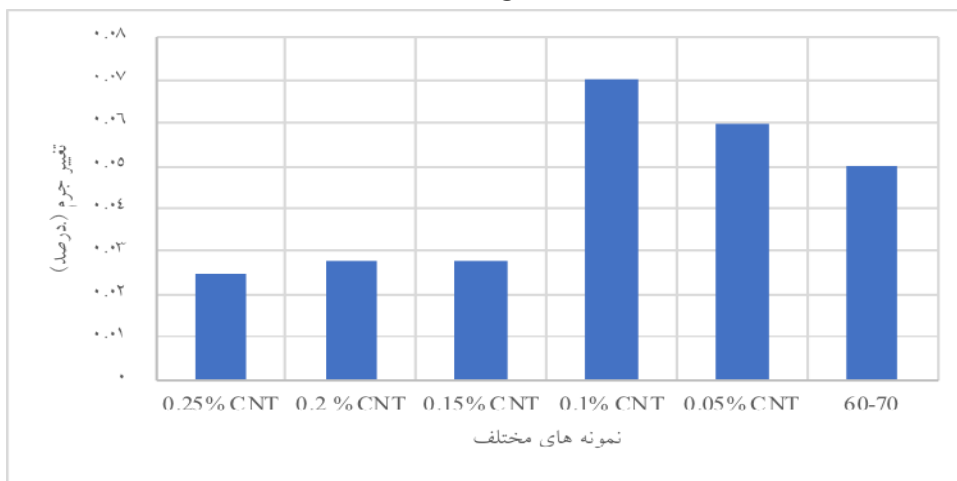
شکل ۶. نتایج شکل پذیری



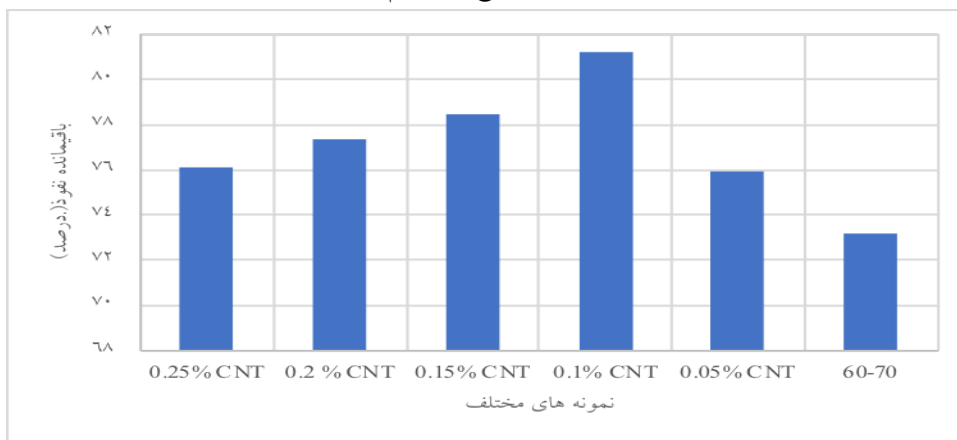
شکل ۷. نتایج نقطه اشتعال



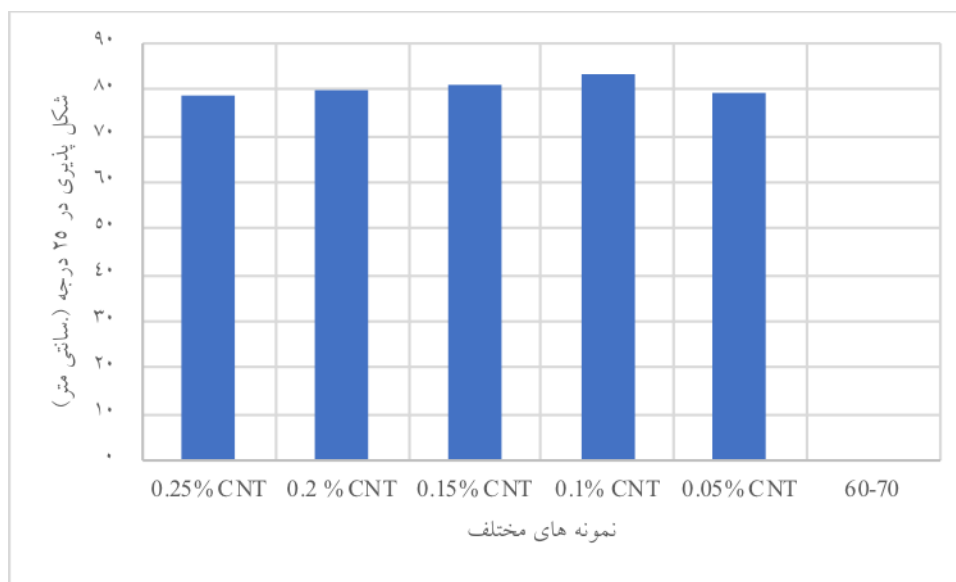
شکل ۸. نتایج چگالی نمونه ها



شکل ۹. نتایج تغییر جرم



شکل ۱۰. نتایج باقیمانده نفوذ



شکل ۱۱. نتایج شکل پذیری

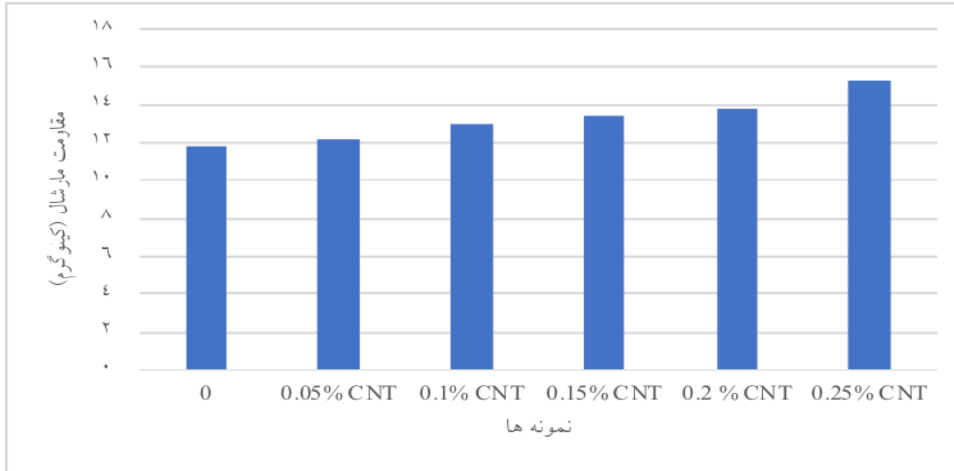
۴-۲- آزمایش استقامت مارشال

در این پژوهش، نسبت MS و MS با درصد های CNT مختلف برای تعیین قیر بهینه اصلاح شده با CNT ها در مخلوط های آسفالتی مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که در شکل ۱۲ الف نشان داده شده است، مقادیر ۰٪، ۰٫۰۵٪، ۰٫۱٪، ۰٫۱۵٪، ۰٫۲٪ و ۰٫۲۵٪ از وزن کل قیر پایه، پایداری مارشال آن به طور قابل توجهی افزایش یافته است. در همین حال، درصد 0 CNT، ۰٫۰۵٪، ۰٫۱٪ از روانی مارشال افزایش می یابد، اما روانی مارشال پس از ۰٫۱۵٪، ۰٫۲٪ و ۰٫۲۵٪ درصد CNT ها همانطور که در شکل ۱۲ ب نشان داده شده است، کاهش می یابد. از این نتایج مشخص شد که درصد ۰٫۱٪ CNTs ممکن است درصد CNT بهینه به عنوان قیر اصلاح شده در پایداری مارشال و روانی مارشال باشد. در این مطالعه، MSR برای ارزیابی حساسیت به رطوبت مخلوط های آسفالتی انجام شد. نمونه ها به دو گروه تقسیم شدند. نمونه های بدون عمل آوری در یک حمام آب به مدت ۴۰ دقیقه در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد قرار گرفتند و سپس با سرعت جابجایی ۵۰ میلی متر در دقیقه بارگذاری شدند. نمونه های تهویه شده در حمام آب به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد قبل از تهویه در حمام آب ۲۵ درجه سانتی گراد به مدت ۲ ساعت قرار داده شدند. MSR با استفاده از معادله (۱) محاسبه شد. نتایج آزمایش MSR در شکل ۱۳ خلاصه شده است. مشاهده می شود که مقدار MSR به طور قابل توجهی با افزایش محتوای CNT ها افزایش می یابد. به عنوان مثال، MSR مخلوط های آسفالتی اصلاح شده با CNT ها ۰٫۸۲، ۰٫۸۶، ۰٫۹۰، ۰٫۹۲، ۰٫۹۶ و ۰٫۹۶٪ برای درصد CNT به ترتیب ۰٫۰۵٪، ۰٫۱٪، ۰٫۱۵٪، ۰٫۲٪ و ۰٫۲۵٪ است که ۳ است. درصد، ۸، ۱۳، ۱۶ درصد و ۲۰ درصد بیشتر از مخلوط آسفالت شاهد (۸۰، ۱ درصد). می توان اشاره کرد که مقدار MSR در هنگام اشباع به دلیل پوشش نانو روی سطح سنگدانه به طور قابل توجهی افزایش می یابد. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، یک همبستگی قوی بین محتوای MSR و CNT وجود دارد. همبستگی اولیه پیشنهادی در تخمین MSR در معادله داده شده است. (۴). ضریب تعیین همبستگی توسعه یافته ۰٫۹۹ است که برای پیش بینی نسبتاً خوب است. MSR را می توان با استفاده از محتویات CNT ها با استفاده از معادله زیر تعیین کرد.

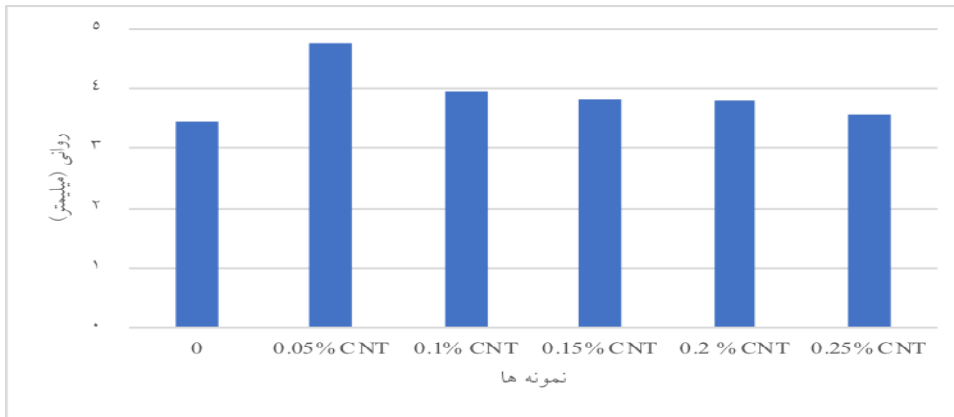
$$MSR=70.57 * CNT + 78.93$$

نسبت پایداری MSR مارشال (%). و.

درصد CNT ها از قیر اصلاح شده با CNTs (%).

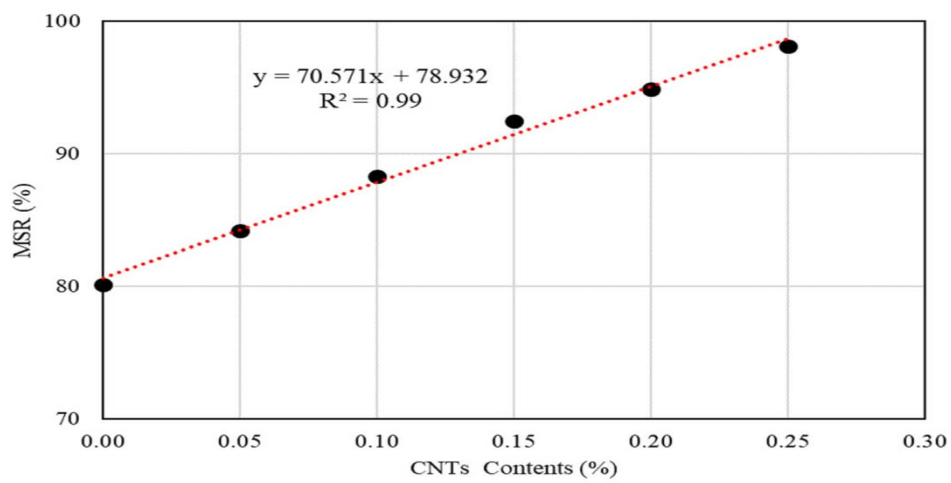


الف) نتایج مقاومت مارشال



ب) نتایج روانی نمونه‌ها

شکل ۱۲. نتایج آزمایش استقامت مارشال

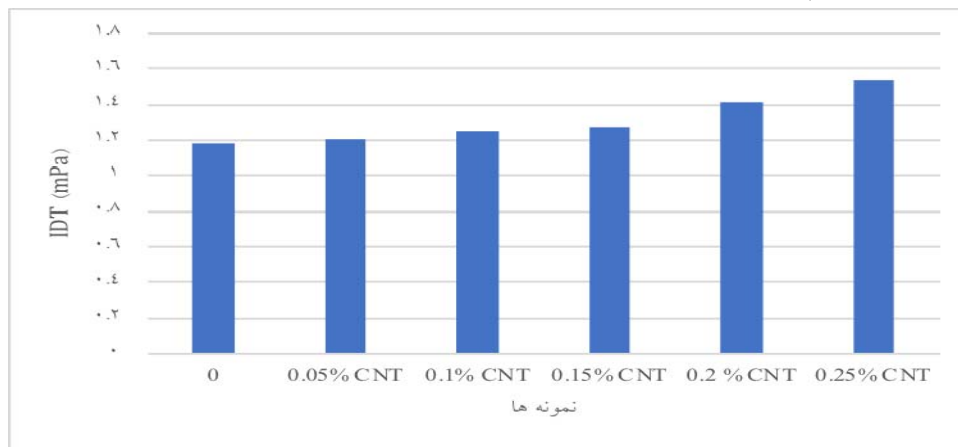


شکل ۱۳. نتایج نسبت مارشال نمونه‌ها

۴-۳- آزمایش کشش غیرمستقیم

اصلاح شده با CNT ها ۱,۱۷، ۱,۲۲، ۱,۲۵ مگاپاسکال، ۱,۲۵ مگاپاسکال، ۱,۳۸، ۱,۴۸ مگاپاسکال و ۱,۴۸ مگاپاسکال برای درصد های CNTs، به ترتیب ۰,۱٪، ۰,۱۵٪، ۰,۲٪ و ۰,۲۵٪، ۰,۱۰۵٪، که ۲٪، ۶٪، ۹٪، ۲۰٪ و ۲۸٪ بیشتر از مخلوط آسفالت شاهد (۱,۱۵ مگاپاسکال) است. می توان نتیجه گرفت که افزودن نانولوله های کربنی استحکام IDT مخلوط های آسفالتی را به ویژه در دوزهای بالاتر CNT ها در ترکیب مخلوط آسفالتی افزایش می دهد.

آزمایش IDT برای محاسبه استحکام IDT مخلوط ها در دمای متوسط ۲۵ درجه سانتی گراد انجام شد. استحکام IDT برای ارزیابی رفتار شروع ترک مخلوط های آسفالتی اصلاح شده با CNTs مورد استفاده قرار گرفت. برای داشتن مقاومت در برابر ترک خوردگی، یک ماده باید هم محکم و هم انعطاف پذیر باشد قدرت IDT با استفاده از معادله محاسبه شد (۲). نتایج آزمایش مقاومت IDT در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد در شکل ۱۴ نشان داده شده است. حداکثر استحکام کششی مخلوط های آسفالتی



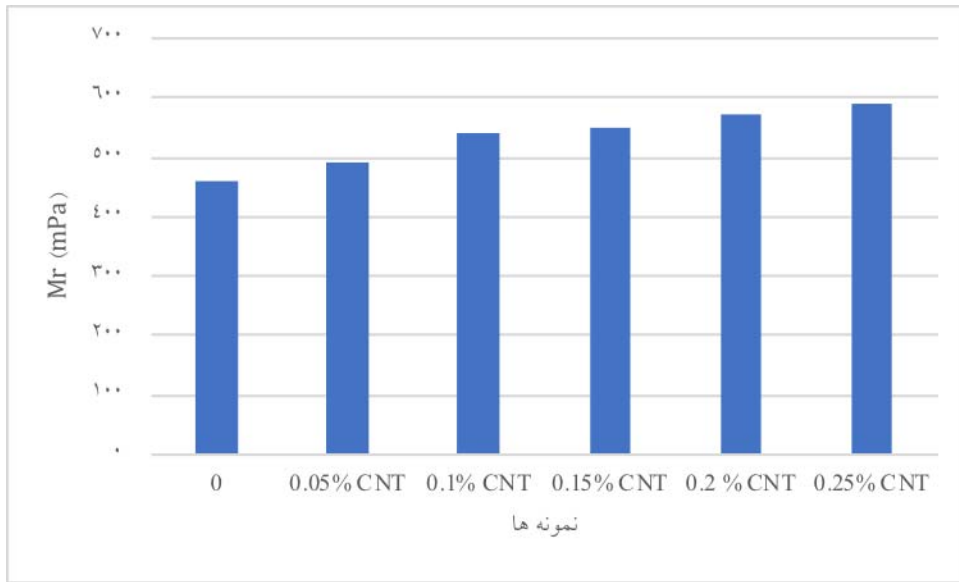
شکل ۱۴. نتایج کشش غیرمستقیم

۴-۴- نتایج مدول برجهندگی

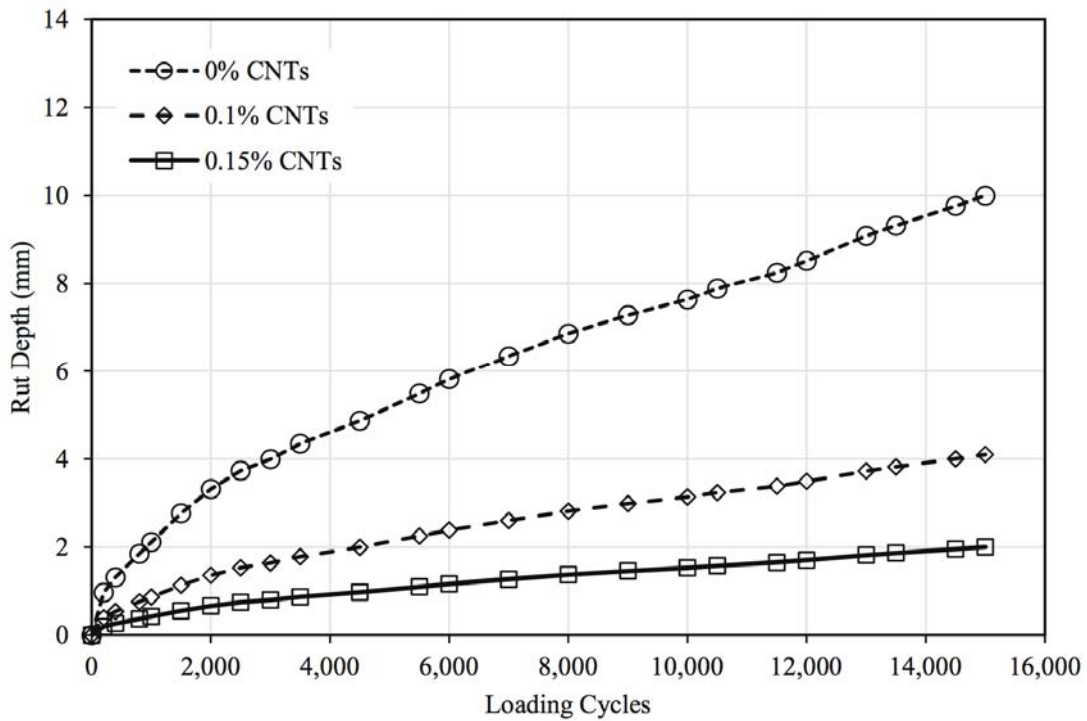
مدول به دلیل تأثیر قابل توجه آن بر تغییر شکل روسازی های آسفالتی، پارامتر کلیدی طراحی سازه است. نتایج آزمون SM در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد در شکل ۱۵ نشان داده شده است. نتایج مشابهی با آزمون MS و آزمون IDT یافت شد که در آن مقادیر مدول بازگشت بالاتر، درصد بیشتری از محتوای CNT ها بود. مدول ۰,۰۵٪، ۰,۱٪، ۰,۱۵٪، ۰,۲٪ و ۰,۲۵٪ درصد نانولوله های کربنی به ترتیب ۶٪، ۱۸٪، ۲۰٪، ۲۴٪ و ۲۸٪ بیشتر از کنترل یک بود. اشاره شد که تفاوت در مقدار مدول بین مخلوط های اصلاح شده با ۰,۱ درصد و مخلوط اصلاح شده با ۰,۱۵ درصد نانولوله های کربنی معنی دار نیست و نشان می دهد که افزودن بیشتر درصد نانولوله های کربنی از مخلوط AC اصلاح شده با ۰,۱۵ درصد نانولوله های کربنی اثر قابل توجهی در بهبود مدول مخلوط آسفالت ندارد. بنابراین، CNT های بهینه ۰,۱٪ ممکن است برای قیر در مخلوط های AC از نظر مدول استاتیک استفاده شود.

۴-۵- آزمایش شیار جای چرخ

به منظور ارزیابی مقاومت شیارشدگی قیر اصلاح شده با CNTs در مخلوط های آسفالتی، آزمایش های WT برای سه نوع مخلوط مختلف با درصد ۰٪ (مخلوط های شاهد)، ۰,۱٪ و ۰,۱۵٪ درصد CNTs انجام شد. شکل ۱۶ عمق شیار در برابر چرخه بارگذاری مخلوط کنترل و مخلوط آسفالت اصلاح شده با CNT ها را نشان می دهد. در مقایسه با مخلوط آسفالتی کنترل شده، مخلوط های آسفالتی اصلاح شده با CNT دارای عمق شیارهای ۴,۱ میلی متر و ۲,۰ میلی متر برای درصد ۰,۱٪ و ۰,۱۵٪ CNTs هستند که به ترتیب ۵۹٪ و ۸۰٪ کمتر از مخلوط کنترل در ۱۵۰۰۰ سیکل بارگذاری است. بنابراین، مخلوط آسفالتی اصلاح شده با CNT ها می تواند مقاومت شیارشدگی مخلوط های آسفالتی را به طور قابل توجهی در ساخت روسازی آسفالتی در روسازی تحت شرایط دمای بالا بهبود بخشد.



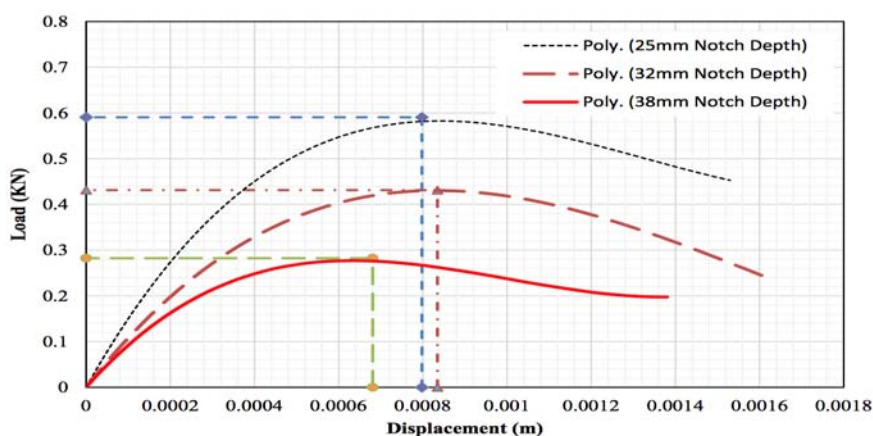
شکل ۱۵. نتایج مدول برجهندگی نمونه‌ها



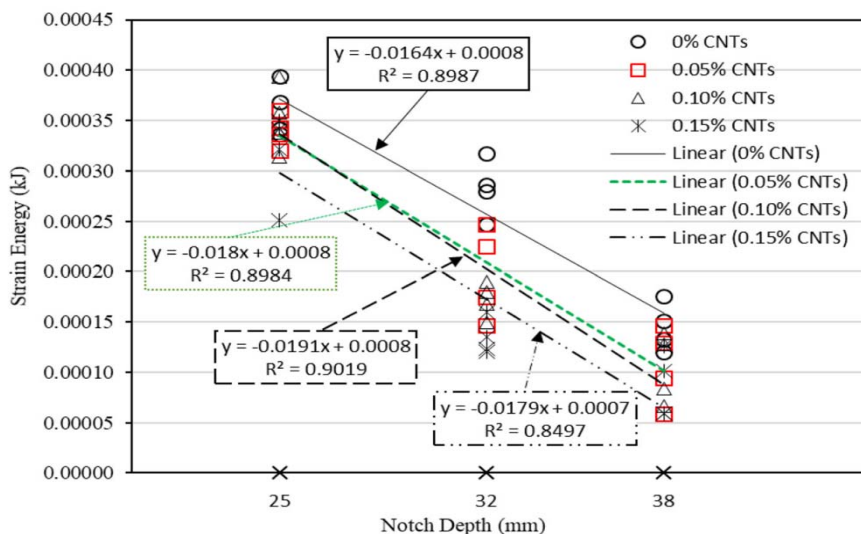
شکل ۱۶. عمق شیار نمونه‌ها

۴-۶- ترک خوردگی دمای پایین

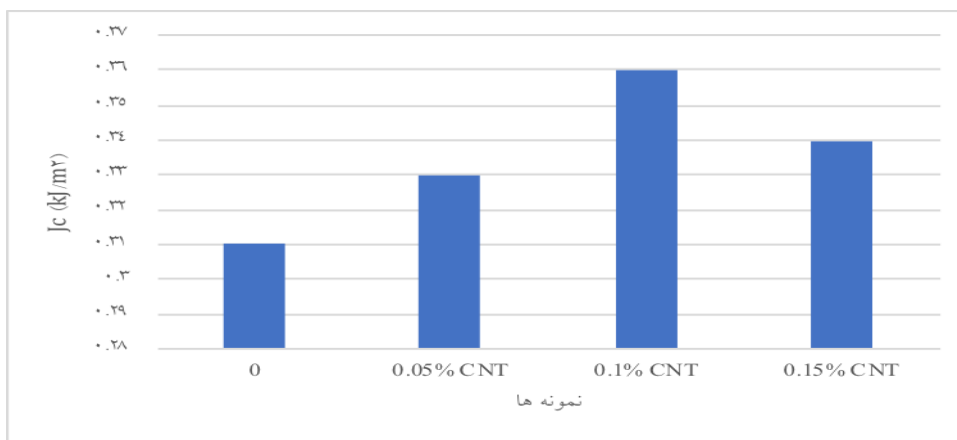
چهار نوع مخلوط شامل یک مخلوط کنترل و سه مخلوط اصلاح شده با ۰،۰۵، ۰،۱، ۰،۱۵ درصد نانولوله‌های کربنی به شکل یک نمونه SCB ترک خورده ساخته و سپس مورد آزمایش قرار گرفتند. هر نمونه تحت یک بار یکنواخت ۰،۵ میلی متر در دقیقه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت تا زمانی که شکست و رشد ترک در امتداد خط ترک اولیه رخ داد. نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در محفظه محیطی تنظیم شده در دمای آزمایش قرار گرفتند تا به تعادل دمایی مورد نیاز برسند. مساحت زیر منحنی بار-جابجایی تا بار اوج به عنوان نماینده آزادسازی انرژی کرنش همانطور که در شکل ۱۷ نشان داده شده است محاسبه شد. سپس می‌توان یک رگرسیون خطی بین مقادیر انرژی کرنش و عمق بریدگی مطابق شکل ۱۸ برآزش کرد. با توجه به معادله (۳)، مقدار بحرانی نرخ آزادسازی انرژی کرنش (Jc) را می‌توان با تقسیم شیب خط نصب شده بر ضخامت نمونه محاسبه کرد. مقدار بحرانی مقادیر نرخ آزادسازی انرژی کرنشی برای مخلوط کنترل و مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با CNTs در شکل ۱۹ ارائه شده است. محتوا به ترتیب ۱۲٪، ۱۶٪ و ۹٪ بیشتر از شاهد بود. علاوه بر این، این مطالعه نشان داد که مخلوط‌های HMA اصلاح شده با CNTها، مقاومت ترک خوردگی مخلوط آسفالتی را بهبود می‌بخشند. از این رو، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از قیر اصلاح شده با CNTها در مخلوط‌های آسفالتی از نظر انتشار ترک مفید است.



شکل ۱۷. نمودار نیرو-تغییر شکل برای نمونه کنترل



شکل ۱۸. عمق ترک نسبت به انرژی کرنش نمونه‌های کنترلی و اصلاح شده



شکل ۱۹. ارزش بحرانی مقادیر نرخ آزادسازی انرژی کرنش برای مخلوط کنترل و مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با CNT

۵- نتیجه‌گیری

نانولوله‌های کربنی را بر افزایش مقاومت به ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده نشان می‌دهد.

بر اساس آزمون مدول برجهنگی، مشخص شد که مقادیر مدول برگشتی با افزایش درصد مخلوط‌های اصلاح شده با CNTها افزایش می‌یابد.

درصد CNT بهینه ۰٫۱ درصد وزن قیر را می‌توان به عنوان افزودنی قیر در مخلوط‌های AC استفاده کرد زیرا مدول استاتیکی، مقاومت شیارشدگی (به طور قابل توجهی در شرایط دمای بالا) و مقاومت در برابر ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی را افزایش می‌دهد. (بالاترین نرخ آزادسازی انرژی کرنشی)

مطالعات بیشتر برای مطالعه مکانیسم برهمکنش بین CNTها و قیر یا مخلوط HMA توصیه می‌شود. همچنین، تأثیر مخلوط‌های اصلاح‌شده با نانولوله‌های کربنی باید در روسازی بررسی شود تا عملکرد شیار و ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی تحت شرایط واقعی مزرعه ارزیابی شود.

در این مطالعه، چندین آزمایش آزمایشگاهی برای ارزیابی اثر نانولوله‌های کربنی به عنوان افزودنی قیر بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی انجام شد. مشخص شد که عملکرد مخلوط‌های AC به طور قابل توجهی بهبود یافته است. همچنین برخی از یافته‌های مهم این پژوهش به شرح زیر خلاصه می‌شود:

مقاومت به شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی با افزودن CNTها در مخلوط‌های آسفالتی به طور قابل توجهی بهبود یافت. هنگام افزودن ۰٫۱٪ و ۰٫۱۵٪ CNTs در مخلوط آسفالت، عمق شیارها ۵۹٪ و ۸۰٪ کمتر از مخلوط HMA کنترل بود.

استفاده از قیر اصلاح شده با CNTها برای مخلوط آسفالتی، استحکام مخلوط‌های HMA را در برابر آسیب‌های رطوبتی افزایش می‌دهد.

نتایج آزمایش شکست IDT و SCB نشان داد که با افزایش درصد‌های CNTs، هم استحکام IDT و هم نرخ آزادسازی انرژی کرنشی (Jc) به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد که تأثیر مثبت

۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Carbon Nano Tube
- 2- Marshall Stability
- 3- Indirect Tensile Strength
- 4- Static Modulus
- 5- Wheel Track
- 6- Semi Circular Bending

- 7- Asphalt Cement
- 8- Styrene Butadiene Styrene
- 9- Multi-Walled Carbon Nano Tube
- 10- Rolling Thin Film Oven
- 11- Hot Mix Asphalt
- 12- Marshall Stability Ratio

۷- مراجع

asphalt binders. *J Mater Civil Eng (ASCE)*, 29:1–8. doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001910

-Hung NV, Le VP (2019). Performance evaluation of sulfur as alternative binder additive for asphalt mixtures. *Internat J Pavement Res Technol*, 12:380–387. doi.org/10.1007/s42947-019-0045-9

-Hamedi GH (2018). Effects of polymeric coating the aggregate surface on reducing moisture sensitivity of asphalt mixtures. *Internat J Civil Eng* 16, 1097–1107. doi.org/10.1007/s40999-017-0263-y

-Ma T, Wang H, Zhao Y, Huang X, Wang S (2017). Laboratory investigation of crumb rubber modified asphalt binder and mixtures with warm-mix additives. *Internat J Civil Eng* 15:185–194. doi.org/10.1007/s40999-016-0040-3

-Santagata E, Baglieri O, Tsantilis L, Dalmazzo D (2012) Rheological characterization of bituminous binders modified with carbon nanotubes. *Proc Soc Behav Sci* 53:546–555. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.905

-Zahedi M, Barati M, Zarati M (2017). Evaluation the effect of carbon nanotube on the rheological and mechanical properties of bitumen and hot mix asphalt (HMA). *Electronic J Struct Eng*, 17:76–84

-Zou G, Xu J, Wu C (2017). Evaluation of factors that affect rutting resistance of asphalt mixes by orthogonal experiment design. *Internat J Pavement Res Technol*, 10:282–288. doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.03.008

-American Standard (2002). Standard test method for compressive strength of bituminous mixtures. *Astm*. doi.org/10.1520/D1074-17

-Amin I, Badawy SM, Badawy T, Brakah T, Ibrahim M (2016). Laboratory evaluation of asphalt binder modified with carbon nanotubes for Egyptian climate. *Constr Build Mater*, 121:361–372. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.168

-Akbari M, Kiasat A, Mirzaei E, Omidi BF, Birgani O (2012). Bitumen modification using carbon nanotubes. *World Appl Sci J* 18:594–599. doi.org/10.5829/idosi.wasj.2012.18.04.1443

-Bai JB, Allaoui A (2003) Effect of the length and the aggregate size of MWNTs on the improvement. *Compos Part A*, 34:689–694. doi.org/10.1016/S1359-835X(03)00140-4

-Faramarzi M, Arabani M, Haghi AK, Mottaghitalab V (2014). Carbon Nanotubes-modified asphalt binder: preparation and characterization. *Internat J Pavement Res Technol*, 8:29–37. doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2015.8(1).29

-Geckil T, Ahmedzade P, Alatas T (2018). Effect of carbon black on the high and low temperature properties of bitumen. *Internat J Civil Eng*, 16:207–218. doi.org/10.1007/s40999-016-0120-4

-Goli A, Aff.M.ASCE; Ziari H, Amini A (2017). Influence of carbon nanotubes on performance properties and storage stability of sbs modified

Performance Evaluation of Bitumen and Asphalt Mixture Modified with Carbon Nanotube

*Hamin Chobdar, Department of Civil Engineering, Malard Branch
Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.*

*Alireza Ameli, Department of Civil Engineering, Malard Branch,
Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.*

Email: Amelii@gmail.com

Received: June 2024- Accepted: September 2024

ABSTRACT

The aim of this paper was to investigate the effect of carbon nanotubes (1CNTs) as a bitumen modifier on the rutting and cracking performance of asphalt mixtures. For this purpose, different percentages of CNT (0.05, 0.1, 0.15, 0.2 and 0.25% by weight) were added to normal bitumen. Marshall Stability tests 2 (MS), indirect tension (IDT 3), static modulus (SM 4), wheel groove 5 (WT) and semicircular bending test (SCB) 6 were performed to evaluate the performance of asphalt mixture modified with CNT. . The results showed that the addition of carbon nanotubes significantly increased the rutting resistance at high temperature and the cracking resistance at medium temperature. In addition, it was found from the SCB test that the strain energy release rate (Jc) of 0.1% CNTs was 16% higher than that of the control mixture. Finally, based on the laboratory test results, it can be concluded that the optimal CNT percentage of 0.1% of bitumen weight can be used as an additive for bitumen in asphalt mixtures.

Keywords: Carbon Nanotubes, Asphalt Mixture, Rutting Resistance, Cracking Resistance, Semi-Circular Flexural Failure Test