

بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با کربن نانو فیبر

محمد میرزایی فتح کوهی

گروه مهندسی عمران، واحد بین المللی کیش، دانشگاه آزاد اسلامی، جزیره کیش، ایران.
a.mirzaei313@yahoo.com

فرزاد حاتمی برق

عضو هیات علمی/دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
hatami@aut.ac.ir

وحید نجفی مقدم گیلانی

دکتری، گروه راه و ترابری، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران.
vahid_najafi@alumni.iust.ac.ir

چکیده

در این مطالعه، تاثیر استفاده از کربن نانو فیبر به عنوان اصلاح‌کننده قیر بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی با در نظر گرفتن تاثیر آن بر چسبندگی بین قیر-سنگدانه مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور بررسی عملکرد رطوبتی از آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) بر روی مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با دو نوع سنگدانه سنگ‌آهک و گرانیت استفاده شده است. برای ارزیابی شرایط محیطی، نمونه‌های های آسفالتی تحت شرایط ۱، ۳ و ۵ سیکل یخ-ذوب قرار گرفتند. نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی نشان داد که افزودن کربن نانو فیبر (CNF)، مقادیر ITS و نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (TSR) را در هر دو نوع سنگدانه مورد مطالعه افزایش می‌دهد و در نتیجه سبب کاهش رخداد عریان‌شدگی در نمونه‌های اصلاح‌شده می‌شود. علاوه بر این، استفاده از ۲/۰ درصد کربن نانو فیبر بهترین تاثیر را در افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر خرابی رطوبتی ایجاد کرده است.

واژه های کلیدی: آزمایش کشش غیرمستقیم، قیر اصلاح شده، خرابی رطوبتی، کربن نانو فیبر

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۳۱

تاریخ آخرین اصلاحات: ۱۴۰۱/۰۳/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۹

۱-مقدمه

رطوبتی که از ساختار روسازی به نحو مناسبی زهکش نشده باشد، می‌توان باعث ایجاد خرابی در لایه‌های آسفالتی و از دست دادن پیوستگی در غشای قیر یا از دست دادن چسبندگی در سطح تماس قیر-سنگدانه شود [۱]. جهت بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در برابر خرابی رطوبتی باید به نحوی متغیرهای موثر در خرابی را در راستای افزایش مقاومت تغییر داد. از این‌رو، استفاده از افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی چه به صورت اصلاح کننده قیر [۲ و ۳] و چه به صورت اصلاح سنگدانه [۴] را می‌توان منطقی‌ترین روش به منظور بهبود مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر رطوبت دانست.

مطالعه حاضر به منظور پیش‌بینی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در برابر عریان‌شدگی شکل گرفته است. از این‌رو جهت بررسی اثر کربن نانو فیبر (CNF) بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در برابر خرابی ناشی از رطوبت از آزمایش مقاومت کشش غیرمستقیم استفاده شده است. این آزمایش‌ها با دو سنگدانه گرانیته و آهکی و قیر ۸۵-۱۰۰ اصلاح شده با کربن نانو فیبر به منظور محاسبه پارامترهای مورد ارتباط با خرابی رطوبتی و تاثیر استفاده از مواد افزودنی بر اجزای قیر و سنگدانه استفاده شده است.

۲-مواد و مصالح

۲-۱- مصالح

در این پژوهش از دو نوع سنگدانه آهکی و گرانیته با ویژگی‌های مختلف در برابر حساسیت رطوبتی استفاده شده است. خصوصیات فیزیکی سنگدانه‌های مورد مطالعه در جدول (۱) آورده شده است. دانه‌بندی سنگدانه‌های مورد استفاده (دانه‌بندی میانی استاندارد ASTM برای دانه‌بندی متراکم سنگدانه‌ها برای مخلوط‌های آسفالت داغ) [۵] در جدول شماره (۲) آورده شده است. همچنین قیر مصرفی از نوع خالص با درجه نفوذ ۸۵/۱۰۰ می‌باشد [۶] که از پالایشگاه نفت جی تهیه شد. مشخصات قیر مصرفی در جدول (۳) ارائه شده است. مقدار قیر متناظر با بیشترین وزن مخصوص و مقدار قیر متناظر با درصد فضای خالی ۴/۰ درصد تعیین شد. درصد قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی پس از محاسبات، برابر ۴/۸ درصد برای ساخت مخلوط‌های آسفالتی HMA تعیین شد.

۲-۲- اصلاح قیر با درصد‌های مختلف کربن نانو فیبر

از کربن نانو فیبر با درصد‌های ۱/۰ و ۲/۰ به عنوان اصلاح‌کننده قیر استفاده شد. جرم مخصوص آن ۴/۴۱ گرم بر سانتی متر مکعب و درجه اسیدیته آن ۱۰/۸۹ است. به منظور اختلاط کربن نانو فیبر و قیر، در اولین مرحله: قیر را تا دمای ۱۵۰ درجه گرم نموده و سپس مواد افزودنی به آرامی در کاسه مخلوط‌کن با ۲۰۰۰۰ دور، ریخته شده است [۷]. به منظور رسیدن به یک ترکیب مناسب از قیر اصلاح شده، عمل هم زدن به مدت ۵ دقیقه باید ادامه داشته باشد.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی سنگدانه مورد استفاده

آزمایش	استاندارد	سنگ آهک	سنگ گرانیت	حدود آیین نامه
وزن ویژه (درشت دانه)				
حجمی	ASTM C127	۲/۶۰	۲/۶۵	-----
موثر		۲/۶۱	۲/۶۶	-----
ظاهری		۲/۶۳	۲/۶۵	-----
وزن ویژه (ریز دانه)				
حجمی	ASTM C128	۲/۵۶	۲/۶۵	-----
موثر		۲/۵۷	۲/۶۶	-----
ظاهری		۲/۶۰	۲/۶۵	-----
وزن ویژه (فیلر)	ASTM D854	۲/۵۶	۲/۵۴	-----
حداکثر سایش لس آنجلس	ASTM C131	۲۸	۱۹	حداکثر ۳۰
حداکثر جذب آب	ASTM C127	۰/۸	۱/۳	۲/۸
ذرات سوزنی و پولکی	ASTM D4791	۳	۱۰	حداکثر ۱۵
درصد شکستگی	ASTM D5821	۸۸	۹۶	براساس ترافیک
دوام در برابر سولفات سدیم	ASTM C88	۲	۹	حداکثر ۸
بندیم				

جدول ۲- دانه بندی سنگدانه مورد مطالعه

سایر الک (میلی‌متر)					
حدود	۱۹	۱۲/۵	۴/۷۵	۲/۳۶	۰/۳
حد بالا - پایین	۱۰۰	۹۰-۱۰۰	۴۴-۷۴	۲۸-۵۸	۵-۲۱
درصد صحیح	۱۰۰	۹۵	۵۹	۴۳	۱۳

جدول ۳- مشخصات قیر مصرفی

ویژگی	چگالی در ۲۵°C	درجه نفوذ ۰/۱ میلی‌متر	نقطه نرمی سانتی‌گراد	شکل پذیری cm	درجه اشتعال O _c	افت وزنی %	درجه خلوص %
استاندارد	ASTM D70-76	ASTM D5-73	ASTM D36-76	ASTM D113-79	ASTM D92-78	ASTM D1754-78	ASTM D2042-76
مقدار مجاز ۱۰۰-۸۵	-	۱۰۰-۸۵	۵۲-۴۵	حداقل ۱۰۰	حداقل ۲۳۲	-	-
۹۹/۵	۱/۰۲	۹۰	۴۹	۱۱۱	۲۴۶	۰/۷۵	۹۹/۵

۳- روش آزمایش

۳-۱- آزمایش حساسیت رطوبتی

در این مطالعه به منظور ارزیابی تاثیر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در برابر حساسیت رطوبتی از استاندارد AASHTO T283 استفاده شد. علاوه بر این، به منظور شبیه‌سازی شرایط سیکلی محیطی یخ-ذوب در عملکرد مخلوط‌های آسفالتی مختلف، از آزمایش نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (در ۳، ۵ و ۱۰ سیکل یخ-ذوب) استفاده شده است. برای اجرای آزمایش به روش لاتمن اصلاح شده برای هر نوع مخلوط آسفالتی، باید سه نمونه در شرایط خشک و سه نمونه در شرایط مرطوب ساخته شود. از همین‌رو برای شبیه‌سازی شرایط مرطوب، نمونه‌ها ابتدا به وسیله شرایط خلأ نسبی (فشار مطلق ۶۷-۱۳ کیلوپاسکال) به مدت پنج دقیقه اشباع می‌شوند. سپس به مدت ۱۰-۵ دقیقه در حالت مستغرق و بدون شرایط خلأ نگهداری می‌شوند. سپس بیرون آورده و جرم آن‌ها اندازه‌گیری شده و درصد اشباع نمونه‌ها به دست می‌آید. زمان‌های شرایط خلأ بایستی به نحوی باشد که درصد اشباع نمونه‌ها بین ۷۰ تا ۸۰ درصد باشد [۸].

نمونه‌های اشباع‌شده در داخل محفظه‌های پلاستیکی قرار داده شده و در آن ۱۰ میلی‌لیتر آب ریخته می‌شود. نمونه‌ها در داخل فریزر در دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۶ ساعت نگهداری می‌شوند. سپس، آن‌ها را در حمام آب گرم با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد برده و محفظه‌ها را برداشته و اجازه می‌دهند ۲۴ ساعت در این دما بماند. در نهایت، نمونه‌ها به دمای اتاق (۲۵ درجه سانتی‌گراد) آورده می‌شوند. بارگذاری آزمایش مقاومت کشش غیرمستقیم با نرخ بارگذاری ۵/۰۸ سانتی‌متر (۲ اینچ) بر دقیقه انجام می‌شود تا لحظه‌ای که نمونه گسیخته شود. مقدار بار در لحظه گسیختگی ثبت می‌شود. با استفاده از رابطه (۱) مقدار مقاومت کشش غیرمستقیم هر شش نمونه بدست می‌آید [۹]:

$$ITS = \frac{2F}{t\pi d} \quad (1)$$

که در آن، ITS مقدار مقاومت کشش غیرمستقیم F، (kPa) مقدار نیروی لحظه گسیختگی t، (kN)، ضخامت نمونه آسفالتی (m)، و قطر نمونه آسفالتی (m) است. حساسیت رطوبتی یا پتانسیل عریان‌شدگی نمونه‌های مخلوط آسفالتی با نسبت میانگین مقاومت کشش غیرمستقیم نمونه‌های مرطوب به خشک (برحسب درصد) از رابطه (۲) به دست می‌آید [۹]:

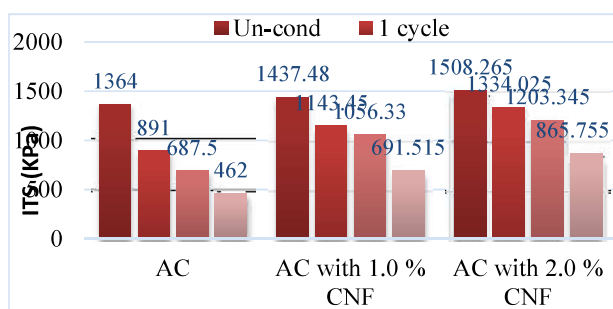
$$TSR = \left(\frac{ITS_{wet}}{ITS_{dry}} \right) * 100 \quad (2)$$

که در آن TSR نسبت مقاومت کشش غیرمستقیم ITS_{wet} ، (%) میانگین مقدار مقاومت کشش غیرمستقیم نمونه‌های مرطوب (kPa) و ITS_{dry} میانگین مقدار مقاومت کشش غیرمستقیم نمونه‌های خشک (kPa) است.

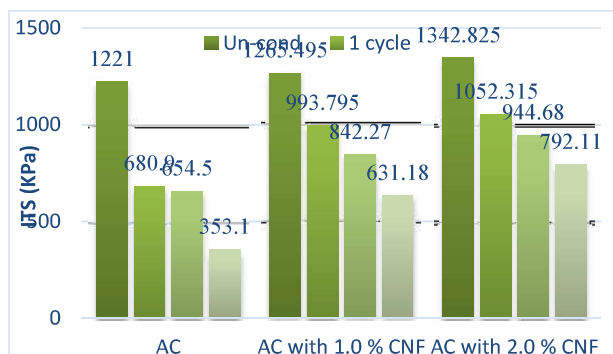
۴- نتایج و بحث

۴-۱- نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها (ITS)

نتایج مربوط به مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها در سیکل‌های مختلف شرایط محیطی در شکل‌های ۱ و ۲ ارائه شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود، مقدار کشش غیرمستقیم نمونه‌های ساخته شده با افزایش تعداد سیکل‌های یخ-ذوب کاهش می‌یابد که دلیل این موضوع را می‌توان به از دست دادن چسبندگی مخلوط یا پیوستگی قیر ناشی از حضور بیشتر نمونه‌ها در معرض رطوبت نسبت داد [۱۰]. همچنین اضافه کردن کربن نانو فیبر به عنوان ماده ضد عریان‌شدگی چسبندگی و پیوستگی را در مخلوط افزایش داده و سبب می‌شود که مخلوط پس از سیکل‌های یخ-ذوب مقاومت بالاتری در برابر رطوبت نسبت به نمونه‌های بدون مواد افزودنی داشته باشد.



شکل ۱- نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) در نمونه‌های ساخته‌شده با سنگدانه‌های سنگ آهک



شکل ۲- نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) در نمونه‌های ساخته‌شده با سنگدانه‌های گرانیت

۴-۲- نتایج نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها (TSR)

نتایج مربوط به نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم در سیکل‌های مختلف یخ-ذوب در نمونه‌های ساخته‌شده با سنگدانه‌های آهکی و گرانیتی به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. استفاده از کربن نانو فیبر باعث شده است تا مقاومت مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده در هر دو نوع سنگدانه استفاده شده، نسبت به نمونه‌های کنترل بهبود یابد. همچنین بعد از ۳ سیکل یخ - ذوب روند خرابی

جدول ۴- برآورد قیمت یک تن آسفالت اصلاح نشده و اصلاح شده

قیمت کل یک تن آسفالت اصلاح شده (ریال)	قیمت کل کربن نانوفیبر مصرفی (ریال)	قیمت پایه هر گرم کربن نانوفیبر ** (ریال)	میزان کربن نانوفیبر مورد نیاز برای یک تن آسفالت (گرم)	قیمت یک تن آسفالت اصلاح نشده (ریال)**
۸۹,۷۰۰,۰۰۰	۸۰,۰۰۰,۰۰۰	۱۰۰,۰۰۰	۸۰۰	۹,۷۰۰,۰۰۰

* قیمت هر تن آسفالت به همراه هزینه‌های حمل و نقل در سال

۱۴۰۱ از اتحادیه آسفالت استعمال گرفته شده است.

** ارزان‌ترین قیمت برای هر گرم کربن نانوفیبر از شرکت‌های

تولیدکننده و واردکننده نانومواد می‌باشد.

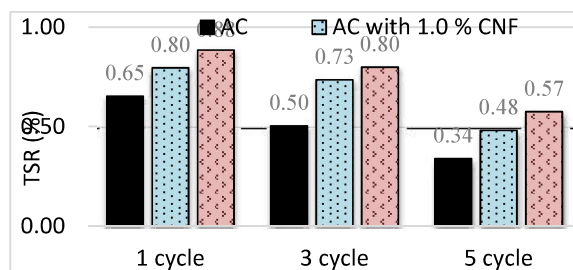
۵. نتیجه‌گیری

نتایج بدست آمده باتوجه به آزمایش‌های انجام شده بر روی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با کربن نانو فیبر نشان داد که استفاده از کربن نانو فیبر مقادیر ITS و نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (TSR) را در نمونه‌هایی با هر دو نوع سنگدانه گرانیته و آهکی افزایش می‌دهد و استفاده از ۲/۰ درصد کربن نانو فیبر بهترین تاثیر را در افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر خرابی رطوبتی ایجاد کرده است. علاوه بر این استفاده از کربن نانو فیبر سبب افزایش پایداری سیستم قیر و سنگدانه و در نتیجه کاهش شدت رخداد عریان شدگی در نمونه‌های اصلاح‌شده شده است.

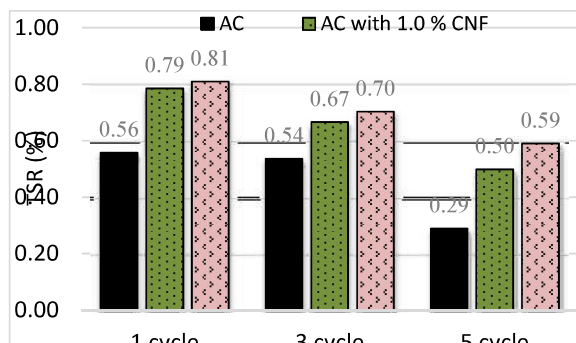
منابع و مراجع

1. Bargegol, I., Sakanlou, F., Sohrabi, M., & Hamed, G. H. (2021). Investigating the Effect of Metal Nanomaterials on the Moisture Sensitivity Process of Asphalt Mixes. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 65(1), 15-25.
2. Azaryun, Y., Shirmohammadi, H., Hamed, G. H., & Saedi, D. (2020). Investigating the Effect of Characteristics of Aggregates and SFE components of Asphalt Binder-Aggregate on the Moisture Sensitivity of Asphalt Mixtures Modified with Anti-Stripping Agents. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(8), 2109-2128.
3. شفاپخش، غلامعلی، علی اکبری بیدختی، دیواندری، حسن. (۲۰۱۹). بررسی پایداری قیرهای پلیمری حاوی نانو ذرات و تخمین استحکام مارشال مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی. *فصلنامه علمی پژوهشی اساس*، ۲۱(۵۵)، ۱۷-۵.
4. Hamed, G. H. (2018). Investigating the use of nano coating over the aggregate surface on moisture damage of asphalt mixtures. *International Journal of Civil Engineering*, 16(6), 659-669.

نمونه‌ها تسریع می‌یابد و سنگدانه‌ها از قیر جدا شده و دیگر دارای چسبندگی مناسبی برای تحمل بار نیستند، به طوری که کاهش در نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم در سیکل ۳ تا ۵ نسبت به سیکل ۱ تا ۳ بیشتر است [۱۰]. نمونه‌های ساخته‌شده با سنگدانه‌های سنگ‌آهک نسبت به نمونه‌های گرانیته مقاومت بیشتری را در برابر خرابی رطوبتی از خود نشان می‌دهند و استفاده از ۲/۰ درصد کربن نانو فیبر بهترین تاثیر را در افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر خرابی رطوبتی ایجاد کرده است.



شکل ۳- نتایج آزمایش نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (TSR) در نمونه‌های ساخته‌شده با سنگدانه‌های سنگ‌آهک



شکل ۴- نتایج آزمایش نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (TSR) در نمونه‌های ساخته‌شده با سنگدانه‌های گرانیته

با توجه به نتایج بدست آمده به منظور بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در مقابل حساسیت رطوبتی مشخص شد که مقدار ۲ درصد افزودنی کربن نانوفیبر منتج به نتایج مناسبی خواهد شد. از همین‌رو مطابق با جدول (۴) به منظور اجرای یک تن آسفالت اصلاح شده به ۸۰۰ گرم از این نانو ماده نیاز می‌باشد که با برآورد قیمت از شرکت‌های مختلف فروش نانومواد مشخص شد که اختلاف قیمت آسفالت اصلاح شده و معمولی در حدود ۸۰ میلیون ریال برای یک تن آسفالت می‌باشد که در عین حال می‌توان عمر مفید آسفالت را ۸۷ و ۱۲۴ درصد به ترتیب در مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با سنگدانه‌های آهکی و گرانیته و در شرایط سخت سیکل یخ-ذوب توسعه داد.

5. Salehfard, R., Abdi, A., & Amini, B. (2017). Effect of SBR/NC on the rheological properties of bitumen and fatigue resistance of hot mix asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(5), 04016282.

6. Rahmani, H., Shirmohammadi, H., & Hamed, G. H. (2018). Effect of asphalt binder aging on thermodynamic parameters and its relationship with moisture sensitivity of asphalt mixes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(11), 04018278.

7. Amini, B., Rajablookat, M. J., Abdi, A., & Salehfard, R. (2017). Investigating the influence of using nano-composites on storage stability of modified bitumen and moisture damage of HMA. *Petroleum Science and Technology*, 35(8), 800-805.

۸. عطازاده و گلچین. (۲۰۱۸). ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی نانولوله کربنی. *نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز*, ۴۸(۹۱), ۴۷-۵۷.

9. Behbahani, H., Hamed, G. H., & Gilani, V. M. (2020). Evaluating the surface free energy and moisture susceptibility of modified asphalt mixtures with nano hydrated lime under saturated conditions with deicer materials and distilled water. *Journal of Indian Chemical Society*, 97, 791-798.

10. Behbahani, H., Hamed, G. H., & Moghaddam Gilani, V. N. (2020). Effects of asphalt binder modifying with nano hydrated lime on moisture susceptibility of asphalt mixtures with thermodynamically concepts. *Petroleum Science and Technology*, 38(4), 297-302.