



Semnan University



Research Article

Evaluation of Performance of Warm Mix Asphalt Mixture under High and Low Temperature

Mohammad Javad Amirkhani ^a, Mansour Fakhri ^{b*}

^a Department of Civil and Environmental Engineering, , KN Toosi University of Technology, Tehran, I. R. Iran.

^b Professor, Department of Road and Transportation, Department of Civil Engineering, KN Toosi University of Technology, Tehran, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2023-11-02

Revised: 2024-01-28

Accepted: 2024-02-29

Keywords:

Warm mix asphalt mixture;

Filler;

Indirect tensile strength resistance;

Dynamic creep;

Fracture energy.

ABSTRACT

Efforts to mitigate and control global warming have led to the consideration of warm-mix asphalt technology in the asphalt industry. Warm mix asphalt, compared to hot mix asphalt, offers advantages such as reduced energy consumption and lower production of toxic gases. However, it does have certain weaknesses, including susceptibility to moisture and premature rutting. Therefore, it is crucial to develop warm mix asphalt mixtures with excellent mechanical performance. One potential solution is to carefully select the appropriate filler. The objective of this research is to examine and explore the impact of limestone powder, cement, fly ash, and micro lime as fillers on the performance of warm mix asphalt mixtures. Additionally, an organic additive called Ethylene bis estearamide was utilized to make the warm mix asphalt mixture. To evaluate the mechanical performance of the asphalt mixture, various tests were conducted, including indirect tensile strength, dynamic creep, and semi-circular bending. In the indirect tensile strength test, the force required to break the samples was measured under a constant loading rate of 50.8 mm/min. In the dynamic creep test, the sample was subjected to a haversine loading of 200 kPa at a temperature of 40 degrees Celsius. In the semi-circular bending test, the energy required to fracture the sample at -22 degrees Celsius was calculated. Based on the results, when making a warm mix asphalt mixture using Ethylene bis estearamide additive, although it increased resistance to rutting by 10%, but it reduced resistance to low-temperature cracking by decreasing fracture energy by 7%. The semi-warm asphalt mixture containing fly ash with a TSR equal to 80% exhibited good moisture resistance. Addition of cement increased resistance to rutting by 25%. The use of micro lime improved moisture sensitivity, resulting in a 140% increase in rutting resistance and a 17% increase in fracture energy.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jtie.2024.32230.1655>

* Corresponding author.

E-mail address: fakhri@kntu.ac.ir

How to cite this article: Amirkhani, M. J., & Fakhri, M. (2023). Evaluation of Performance of Warm Mix Asphalt Mixture under High and Low Temperature. Journal of Transportation Infrastructure Engineering, 9(4), 1-20. doi: [10.22075/jtie.2024.32230.1655](https://doi.org/10.22075/jtie.2024.32230.1655)



Semnan University

مجله زیر ساخت های حمل و نقل

وبسایت نشریه: <https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en>

شاپا: 2821-0549



مقاله پژوهشی

ارزیابی تأثیر فیلرهای مختلف بر عملکرد دماهای کم و زیاد مخلوط آسفالتی نیمه گرم

محمدجواد امیرخانی^۱، منصور فخری^{۲*}

^۱ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

^۲ استاد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

چکیده

تلاش‌ها برای کاهش و کنترل گرمایش جهانی سبب شده است تکنولوژی آسفالت نیمه گرم در صنعت آسفالت مورد توجه قرار گیرد. مخلوط آسفالتی نیمه گرم نسبت به مخلوط آسفالتی گرم از مزایایی مانند کاهش مصرف انرژی و کاهش تولید گازهای سمی برخوردار است. اما از ضعف‌هایی مانند شیارشدگی زودرس و خرابی رطوبتی نیز رنج می‌برد. بنابراین، ساخت مخلوط آسفالتی نیمه گرم با عملکرد مکانیکی مناسب، بسیار حائز اهمیت است. هدف از این تحقیق، مطالعه و بررسی تأثیر پودر سنگ، سیمان، خاکستریادی و میکروآهک به عنوان فیلر بر عملکرد مخلوط آسفالتی نیمه گرم در دمای زیاد و دمای کم می‌باشد. برای ساخت مخلوط آسفالتی نیمه گرم، از اتیلن بیس استنارمید به عنوان یک افزودنی آلی استفاده شد. ارزیابی عملکرد مکانیکی مخلوط آسفالتی با استفاده از آزمایش‌های مقاومت کششی غیرمستقیم، خزش دینامیک و شکست نمونه‌های خمشی نیم‌دایره‌ای انجام شد. در آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم، نیروی لازم برای شکست نمونه‌ها در اثر اعمال بارگذاری با نرخ ثابت ۵۰/۸ میلی‌متر بر دقیقه اندازه‌گیری شد. در آزمایش خزش دینامیک، نمونه در دمای ۴۰ درجه سلسیوس تحت اعمال بارگذاری نیمه‌سینوسی ۲۰۰ کیلوپاسکال قرار گرفت. در آزمایش شکست نمونه‌های خمشی نیم‌دایره‌ای، انرژی لازم برای شکست در دمای ۲۲- درجه سلسیوس محاسبه شد. براساس نتایج، ساخت مخلوط آسفالتی نیمه گرم با استفاده از افزودنی اتیلن بیس استنارمید، مقاومت در برابر شیارشدگی را تا ۱۰ درصد افزایش داد. این افزودنی با کاهش ۷ درصدی انرژی شکست، مقاومت در برابر ترک خوردگی دمای کم را کاهش داد. مخلوط آسفالتی نیمه گرم حاوی خاکستریادی با داشتن TSR برابر با ۸۰ درصد، از مقاومت مناسبی در برابر رطوبت برخوردار بود. سیمان، مقاومت در برابر شیارشدگی را تا ۲۵ درصد افزایش داد. استفاده از میکروآهک سبب بهبود حساسیت رطوبتی، افزایش ۱۴۰ درصدی مقاومت در برابر شیارشدگی و افزایش ۱۷ درصدی انرژی شکست شد.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۱۱

بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۱۸

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۱۰

واژگان کلیدی:

مخلوط آسفالتی نیمه گرم،

فیلر،

مقاومت کششی غیرمستقیم،

خزش دینامیک،

انرژی شکست

DOI: <https://doi.org/10.22075/jtie.2024.32230.1655>

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: fakhri@kntu.ac.ir

استناد به این مقاله: امیرخانی، محمدجواد، & فخری، منصور. (۱۴۰۲). ارزیابی عملکرد دمای بالا و پایین مخلوط آسفالتی نیمه گرم. مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، ۹(۴)، ۱-۲۰. doi: 10.22075/jtie.2024.32230.1655

۱. مقدمه

هستند که می‌توانند به عنوان فیلر در مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار گیرند.

استفاده از سرباره مسی به عنوان فیلر و تایرهای بازیافتی باعث بهبود خودترمیمی و شیارشدگی مخلوط آسفالتی نیمه گرم می‌شود (فخری و همکاران، ۲۰۲۰). از طرفی، استفاده از سرباره مسی با افزایش انتقال حرارت در مخلوط آسفالتی تأثیر به‌سزایی در خودترمیمی مخلوط آسفالتی دارد؛ به‌گونه‌ای که هر چه مقدار سرباره مسی بیشتر باشد، پتانسیل خودترمیمی در مخلوط آسفالتی بیشتر می‌شود (فخری و همکاران، ۲۰۲۳). آهک هیدراته، مقاومت مخلوط آسفالتی نیمه گرم را در برابر خرابی رطوبتی افزایش می‌دهد (کیم و همکاران، ۲۰۰۸). استفاده از خاکستر بادی و سیمان به عنوان فیلر در مخلوط آسفالتی گرم و نیمه گرم باعث افزایش مقاومت در برابر رطوبت و افزایش مدول برجهنگی در هر دو نوع مخلوط آسفالتی می‌شود. این افزایش، در نمونه حاوی خاکستر بادی نسبت به نمونه حاوی سیمان بیشتر است. همچنین، استفاده از خاکستر بادی، انرژی مصرفی و تولید گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهد (دولایمی و همکاران، ۲۰۲۰). استفاده از کلسیم کاربید^۲ بجای پودر سنگ به عنوان فیلر، مقاومت شیارشدگی، حساسیت رطوبتی، عمر خستگی و مدول سفتی^۳ مخلوط آسفالتی گرم را افزایش می‌دهد (جمشیدی و همکاران، ۲۰۱۸).

استفاده از آهک هیدراته و سیمان به عنوان فیلر در مخلوط آسفالتی ساخته شده با سنگ‌دانه دولریتی^۴ می‌تواند عملکرد خستگی، مقاومت شیارشدگی و حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی را بهبود ببخشد؛ به‌گونه‌ای که فیلر سیمانی سازگاری بیشتری با سنگ‌دانه‌های دولریتی دارد (اوله و همکاران، ۲۰۲۰).

محدودیت‌های زیست‌محیطی جهت کنترل گرمایش جهانی باعث شده است تا استفاده از تکنولوژی آسفالت نیمه گرم^۱ در صنعت آسفالت مورد توجه قرار گیرد (اینگراسیا و همکاران، ۲۰۲۳). این تکنولوژی، با کاهش کندروانی قیر با استفاده از افزودنی یا دمیدن آب در قیر، باعث می‌شود قیر در دمای کمتری به کندروانی لازم جهت ساخت مخلوط آسفالتی برسد. همین موضوع سبب کاهش ۲۰ تا ۴۰ درجه سلسیوس دمای اختلاط مخلوط آسفالتی می‌شود. همچنین، این تکنولوژی سبب کاهش ۲۰ درصدی مصرف انرژی، کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای و افزایش فاصله حمل و نقل مخلوط آسفالتی می‌شود (روبیو و همکاران، ۲۰۱۲؛ لی و همکاران، ۲۰۲۳؛ کاظمی و همکاران، ۲۰۲۳).

اگرچه موارد فوق برای مخلوط آسفالتی ساخته شده با این تکنولوژی مزیت محسوب می‌شود، اما عملکرد مخلوط آسفالتی ساخته شده در برابر شیارشدگی زودرس و خرابی رطوبتی مطلوب نیست (کوریکان، ۲۰۰۹؛ زومانیس، ۲۰۱۰). از این رو، محققان در تلاش‌اند تا عملکرد مخلوط آسفالتی نیمه گرم را بهبود ببخشند. استفاده از فیلر می‌تواند راه‌حل مناسبی باشد.

فیلر، ذرات معدنی کوچکتر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر می‌باشند که بین صفر الی ۱۰ درصد وزنی سنگ‌دانه مخلوط آسفالتی را تشکیل می‌دهد. وظیفه اصلی فیلر، پایداری مخلوط آسفالتی و ایجاد پیوند بین سنگ‌دانه‌ها و قیر می‌باشد. استفاده از فیلر مناسب می‌تواند عملکرد مخلوط آسفالتی را در برابر خستگی، ترک خوردگی در دمای کم، شیارشدگی و حساسیت رطوبتی بهبود ببخشد (چوداری و همکاران، ۲۰۱۸؛ پاسندین و همکاران، ۲۰۱۶). پودر سنگ آهک، گرانیات، مرمر، آهک هیدراته، خاکستر بادی، سیمان و سرباره مسی نمونه‌هایی

³- Stiffness modulus

⁴- Dolerite

¹- Warm mix asphalt

²- Calcium carbide residue

آسفالتی در دماها و خرابی‌های مختلف به صورت یکپارچه بسیار حائز اهمیت است و می‌تواند جنبه‌های مختلف تأثیر فیلر بر عملکرد مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم را بهتر مشخص کند. با توجه به اینکه مقدار فیلر ۶ درصد وزنی سنگ‌دانه است، در صورت بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم در دماهای زیاد و کم بسیار کاربردی و مناسب خواهد بود. زیرا بسیاری از مناطق ایران در طول سال هم دمای کم و هم دمای زیاد را تجربه می‌کنند.

هدف از این تحقیق، مطالعه و بررسی تأثیر اتیلن بیس استنارمید^۴ به عنوان افزودنی آلی، میکروآهک، سیمان و خاکستریادی به عنوان فیلر بر عملکرد مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم است. برای این منظور، آزمون‌های خزش دینامیک، تنش کششی غیرمستقیم و شکست بر نمونه‌های خمشی نیم‌دایره‌ای انجام شد (الگوریتم روش تحقیق در شکل ۱ نشان داده شده است). لازم به ذکر است که اتیلن بیس استنارمید افزودنی آلی جدید است و در مطالعات قبلی، تأثیر آن در کنار فیلرهای مختلف مورد ارزیابی قرار نگرفته است.

۲. مواد و مصالح مصرفی

۲-۱. مصالح سنگی

برای ساخت مخلوط آسفالتی، از سنگ‌دانه‌های آهکی استفاده شد. سنگ‌دانه‌ها از معدن اسب‌چران واقع در شهرستان رودهن در استان تهران تهیه شد. خواص فیزیکی سنگ‌دانه‌های مصرفی در جدول ۱ نشان داده شده است. دانه‌بندی با حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلی‌متر (آیین‌نامه ۲۳۴ روسازی راه‌های ایران) برای ساخت نمونه‌های مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۲، منحنی دانه‌بندی انتخابی را نشان می‌دهد.

تراشه‌های آسفالتی^۱ می‌تواند عملکرد مخلوط آسفالتی را بهبود بخشد. استفاده از تراشه آسفالتی بازیافتی در مخلوط آسفالتی گرم و نیمه‌گرم باعث افزایش مقاومت شیارشدگی می‌شود. استفاده از افزودنی‌های مختلف برای ساخت مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم، عملکرد مخلوط آسفالتی را تغییر می‌دهد. ساسوبیت^۲ و کاوواکس^۳ سبب افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی می‌شوند. در حالی که زئولیت^۴ چنین تأثیری ندارد (یوسفی و همکاران، ۲۰۲۱). استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی سبب کاهش عمر خستگی، بهبود عملکرد شیارشدگی و افزایش مدول برجهندگی می‌شود. همچنین، استفاده از الیاف پارافایبر سبب بهبود شیارشدگی، افزایش عمر خستگی و مدول برجهندگی و کاهش حساسیت رطوبتی می‌شود (زیاری و همکاران، ۲۰۲۱). استفاده از الیاف طبیعی و مصنوعی، مقاومت در برابر ترک‌خوردگی را در مخلوط آسفالتی افزایش می‌دهد. نتایج نشان داده است که اثرگذاری الیاف مصنوعی بهتر از الیاف طبیعی بوده است (علیها و همکاران، ۲۰۱۷).

با بررسی مطالعات انجام شده مرتبط با تأثیر فیلر بر عملکرد مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم، که قسمتی از آن‌ها در بالا بیان شده است، می‌توان دریافت که مطالعات مربوط به تأثیر فیلر بر مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم محدود هستند. اغلب پژوهش‌ها به بررسی خرابی‌های خاصی مثل خستگی و خرابی رطوبتی و پتانسیل خودترمیمی یا تأثیر افزودنی‌های مختلف مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم، الیاف و تراشه‌های آسفالتی پرداخته‌اند و تأثیر فیلر در دمای‌های مختلف به طور همزمان در یک تحقیق کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از طرفی، تأثیر فیلر بر مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم بر ترک‌خوردگی دمای کم با سایر خرابی‌ها کمتر مورد پژوهش قرار گرفته است. بنابراین، ارزیابی تأثیر فیلرهای مختلف بر عملکرد مخلوط

⁴- Zeolite

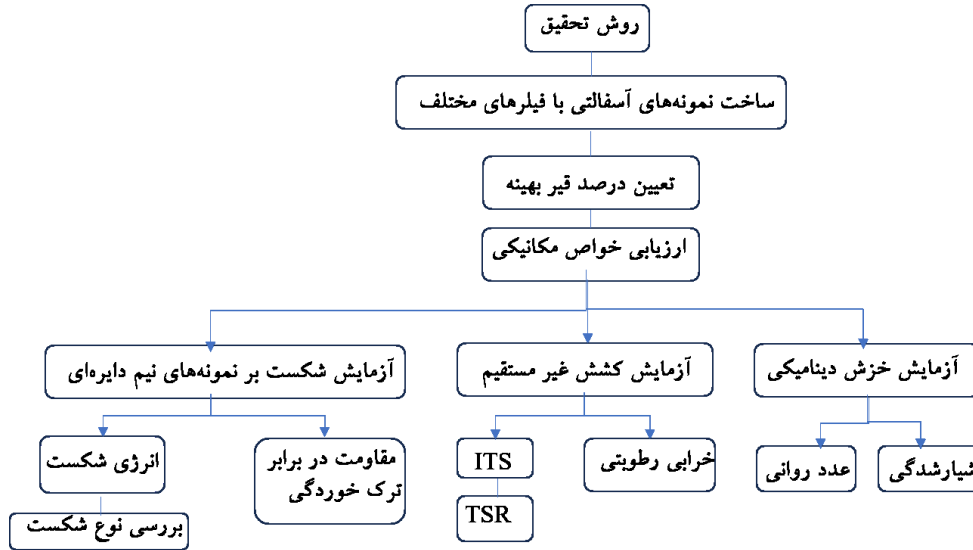
⁵- Ethylene bis estearamide

¹- Reclaimed asphalt pavement

²- Sasobit

³- Kaowax

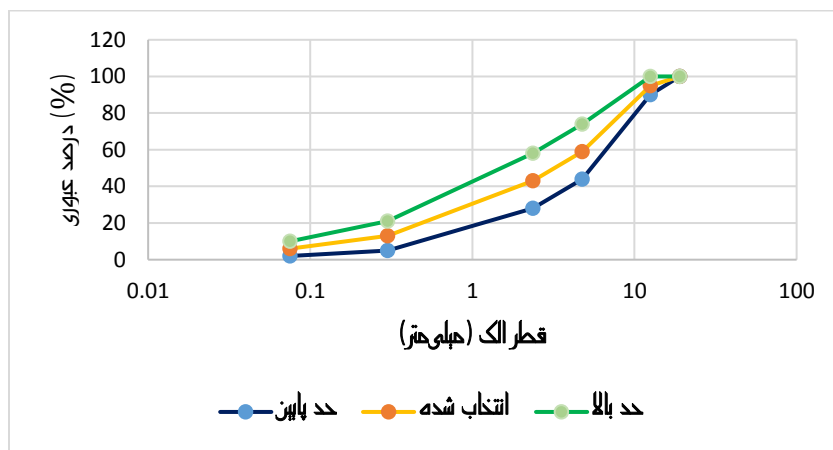
ارزیابی تأثیر فیله‌های مختلف بر عملکرد دماهای کم و زیاد مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم



شکل ۱. الگوریتم روش تحقیق

جدول ۱. خواص فیزیکی سنگ‌دانه‌های مصرفی جهت ساخت مخلوط آسفالتی

استاندارد	نتایج	آزمایش
ASTM C-131	۲۰/۳	سایش لس آنجلس (%)
ASTM D-5821	۹۳	شکستگی در دو وجه (%)
ASTM D 2419	۷۲	ارزش ماسه‌ای (%)
ASTM C-128	۲/۳۵	جذب آب مصالح ریزدانه (%)
ASTM C-128	۲/۴۲	وزن مخصوص ریزدانه (gr/cm^3)
ASTM C-127	۲/۱	جذب آب مصالح درشت‌دانه (%)
ASTM C-127	۲/۵۶	وزن مخصوص مصالح درشت‌دانه (gr/cm^3)



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی برای ساخت مخلوط آسفالت

۲-۲. فیلر

بررسی تأثیر خاکستر بادی بر مخلوط آسفالتی نیمه گرم بسیار حائز اهمیت است. از طرفی، رشته کوه‌های زاگرس منبع بسیار مناسبی برای تأمین میکروآهک است و قیمت ارزانی دارد. از این رو، پودر سنگ حاصل از سنگ‌دانه‌ها، میکروآهک، خاکستر بادی و سیمان (نوع ۲) به عنوان فیلر در این پژوهش استفاده شد (شکل ۳). وزن مخصوص پودر سنگ، میکروآهک، سیمان و خاکستر بادی به ترتیب ۲/۷۵، ۳/۱۴ و ۱/۱۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. ترکیبات شیمیایی فیلرها در جدول ۲ (حاصل از انجام آزمایش اشعه ایکس^۱) نشان داده شده است.

پژوهش‌های پیشین به صورت مجزا به عملکرد مخلوط آسفالتی در اثر استفاده از سیمان، خاکستر بادی و میکروآهک پرداخته‌اند. از این رو، استفاده از این سه ماده به عنوان فیلر به صورت همزمان بسیار حائز اهمیت است زیرا سبب مشخص شدن تأثیر آن‌ها در کنار اتیلن بیس استئارمید می‌شود. خاکستر بادی، خروجی کوره‌های زغالی است. استفاده از آن به حفظ محیط‌زیست کمک می‌کند. خاکستر بادی، نسبت به سیمان، گازهای گلخانه‌ای کمتری تولید می‌کند. بنابراین،



شکل ۳. تصویر فیلرهای استفاده شده

جدول ۲. ترکیبات شیمیایی فیلرها

I.O.I	MnO	MgO	P ₂ O ₅	SO ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	فیلر
۲۳/۹۲	۰/۰۸۹	۱/۹۱	۰/۱۵	۱/۶۱	۲۲/۴۷	۱۱/۲۱	۲/۶	۳۶/۷۵	پودر سنگ
۲/۵۷	-	۱/۱۶	-	-	۸۷/۸۴	۶/۷۴	۱	۰/۶۸	خاکستر بادی
۰/۸۹	-	۱/۷۱	-	۲/۲۶	۲۱/۶۲	۵/۱۹	۴/۱۲	۶۴/۲۱	سیمان
۴۳/۴۹۳	۰/۰۰۲	۰/۳	۰/۰۲۵	-	۰/۰۹	۰/۰۳	۰/۳۹	۵۵/۶۷	میکروآهک

^۱- X-ray test

قیر با درجه نفوذ ۷۰-۶۰ که از شرکت نفت پاسارگاد واقع در تهران تهیه شده بود برای ساخت نمونه‌ها استفاده شد. جدول ۳، مشخصات قیر مصرفی را نشان می‌دهد.

جدول ۳. مشخصات قیر

نتایج	روش انجام آزمایش	قیر
۱/۰۱۹	ASTM-D70	وزن مخصوص (gr/cm ³)
۱۱۲	ASTM-D113	کشش پذیری قیر (cm)
۶۴	ASTM-D5	درجه نفوذ (0.1 mm)
۵۲	ASTM-D36	نقطه نرمی (°C)
۳۱۹	ASTM-D92	درجه اشتعال (°C)
۳۴۱	ASTM-D2170	ویسکوزیته (cSt)

۴-۲. افزودنی

دارد (بلک و همکاران، ۲۰۲۱). از طرفی، پژوهش‌های مرتبط با تأثیر اتیلن بیس استنارمید محدودند و عملکرد آن هنوز به طور کامل بررسی نشده است. بنابراین، در این تحقیق، از اتیلن بیس استنارمید برای ساخت مخلوط آسفالتی گرم استفاده شد. مقدار بهینه این افزودنی ۲ درصد وزن قیر مصرفی می‌باشد (زیاری و همکاران، ۲۰۲۱). مشخصات این افزودنی در جدول ۴ بیان شده است. برای ساخت مخلوط آسفالتی نیمه گرم، افزودنی اتیلن بیس استنارمید در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس به قیر اضافه شد (یوسفی و همکاران، ۲۰۲۱).

اتیلن بیس استنارمید از جمله افزودنی‌های آلی است که در داخل کشور تولید می‌شود. ولی برخی دیگر از افزودنی‌های آلی مانند ساسوبیت اینگونه نیستند. همین امر، هزینه ساخت مخلوط آسفالتی را کاهش می‌دهد. از جمله مزایای افزودنی آلی نسبت به افزودنی شیمیایی امکان اضافه کردن آن به صورت مستقیم به قیر می‌باشد که سبب کاهش ویسکوزیته قیر می‌شود (هرلی و پروول، ۲۰۰۵؛ ویتکاس و همکاران، ۲۰۰۹؛ جمشیدی و همکاران، ۲۰۱۳). همچنین، افزودنی آلی نسبت به افزودنی شیمیایی سازگاری بیشتری با محیط زیست

جدول ۴. مشخصات اتیلن بیس استنارمید

نتایج	روش انجام آزمایش	افزودنی (اتیلن بیس استنارمید)
جامد سفید رنگ	-	شکل ظاهری
۱۴۰-۱۴۸	ASTM D-87	نقطه ذوب (°C)
۱۰	KCSA-125	مقدار اسید (mg KOH/g)
۱۰	KCSA-129	مقدار امین (mg KOH/g)

۳. آزمایش‌ها

۳-۱. تعیین درصد قیر بهینه و ساخت نمونه‌ها

برای ساخت نمونه‌های مخلوط آسفالتی، ابتدا سنگ‌دانه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند تا رطوبت آن‌ها گرفته شود. در مرحله بعد، اتیلن بیس استارمید به مقدار ۲ درصد وزنی قیر، در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس به قیر اضافه گردید و به مدت ۱۸ دقیقه مخلوط شد. سپس فیلرها به قیر اضافه شدند. در آخر، سنگ‌دانه‌ها اضافه و اختلاط انجام شد. لازم به ذکر است که سنگ‌دانه‌ها و فیلرها پیش از اضافه کردن به قیر تا دمای ۱۲۵ درجه از پیش حرارت داده شده‌اند. برای ساخت مخلوط آسفالتی گرم، مراحل گرم کردن قیر و اختلاط با سنگ‌دانه و فیلر در دمای

۱۵۰ درجه سلسیوس انجام شد. در پایان، تراکم مخلوط آسفالتی گرم و نیمه‌گرم به ترتیب در دمای ۱۴۰ و ۱۱۰ درجه سلسیوس انجام شد.

برای تعیین درصد قیر بهینه، نمونه‌های مخلوط آسفالتی (نمونه‌های مارشال) بر اساس آیین‌نامه ASTM-D1559 تحت بارگذاری قرار گرفتند. برای ساخت نمونه‌های مخلوط آسفالتی از قالب مارشال استوانه‌ای به قطر ۴ اینچ استفاده شد. سپس، نمونه‌های مخلوط آسفالتی با درصد‌های مختلف قیر (از ۴ تا ۶/۵ درصد با اختلاف ۰/۵ درصد) ساخته شدند. در مرحله بعد، نمونه‌ها با ۷۵ ضربه چکش مارشال در هر طرف متراکم شدند. درصد قیر بهینه برای هر یک از مخلوط‌های آسفالتی در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵. درصد قیر بهینه برای نمونه‌های مختلف

درصد قیر بهینه	فیلر	افزودنی	مخلوط آسفالتی
۴/۸۵	پودر سنگ	اتیلن بیس استارمید	WMA
۴/۸۵	پودر سنگ	-	HMA
۵	خاکستر بادی	اتیلن بیس استارمید	F-WMA
۵/۱	سیمان	اتیلن بیس استارمید	C-WMA
۴/۷	میکروآهک	اتیلن بیس استارمید	M-WMA

۳-۲. خزش دینامیک

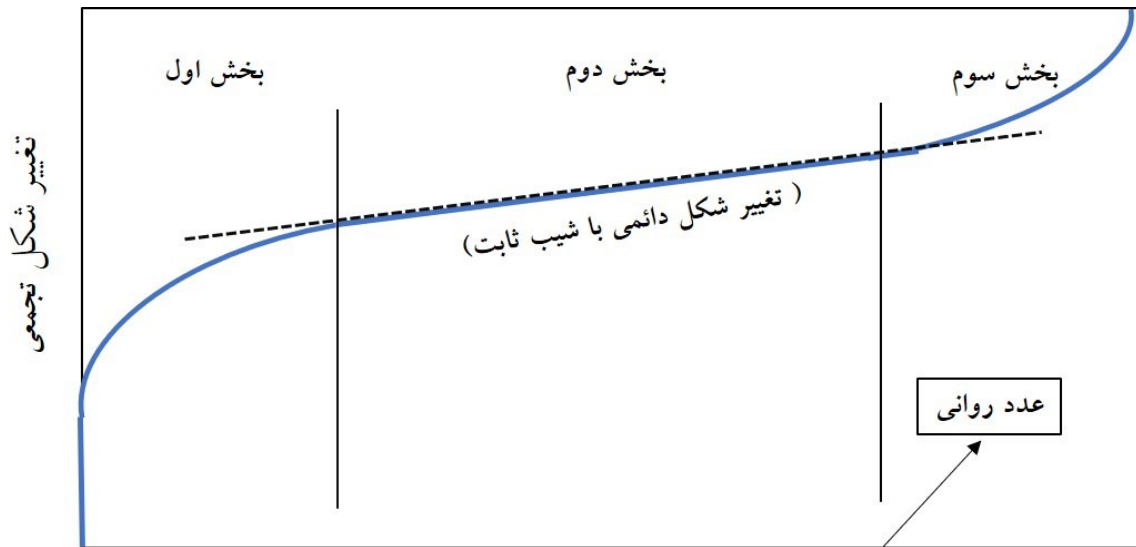
شیارشدهگی با کاهش ضخامت سبب کاهش عمر مفید روسازی می‌شود (ژو و همکاران، ۲۰۰۴). تغییرشکل دائمی را می‌توان به عنوان یک عامل مؤثر بر شیارشدهگی برشمرد. تغییرشکل دائمی در روسازی به دلیل حرکت مکرر بارهای ترافیکی افزایش می‌یابد (پرادهان، ۱۹۹۵؛ کالوش، ۲۰۰۱). با افزایش تعداد سیکل بارگذاری و تجمع تغییرشکل دائمی، خرابی شیارشدهگی در روسازی آسفالتی ایجاد می‌شود (علوی و همکاران، ۲۰۱۱). در این پژوهش، ارزیابی پتانسیل مخلوط آسفالتی در برابر شیارشدهگی توسط آزمایش خزش دینامیک انجام شد.

شکل ۴، خروجی آزمایش خزش دینامیک است که در آن تغییرات کرنش تجمعی برحسب تعداد سیکل بارگذاری ترسیم شده است. این منحنی از سه بخش تشکیل شده است. در بخش اول، تغییرشکل دائمی به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. در ناحیه دوم، تغییرشکل دائمی با شیب ثابتی افزایش می‌یابد. در ناحیه سوم، تغییرشکل دائمی مجدداً شروع به افزایش می‌کند. تعداد سیکل بارگذاری که سبب آغاز ناحیه سوم می‌شود به عنوان عدد روانی مخلوط آسفالتی در نظر گرفته می‌شود.

برای انجام آزمایش خزش دینامیک از دستگاه UTM استفاده شد (شکل ۵-الف) و بارگذاری نیمه‌سینوسی ۲۰۰

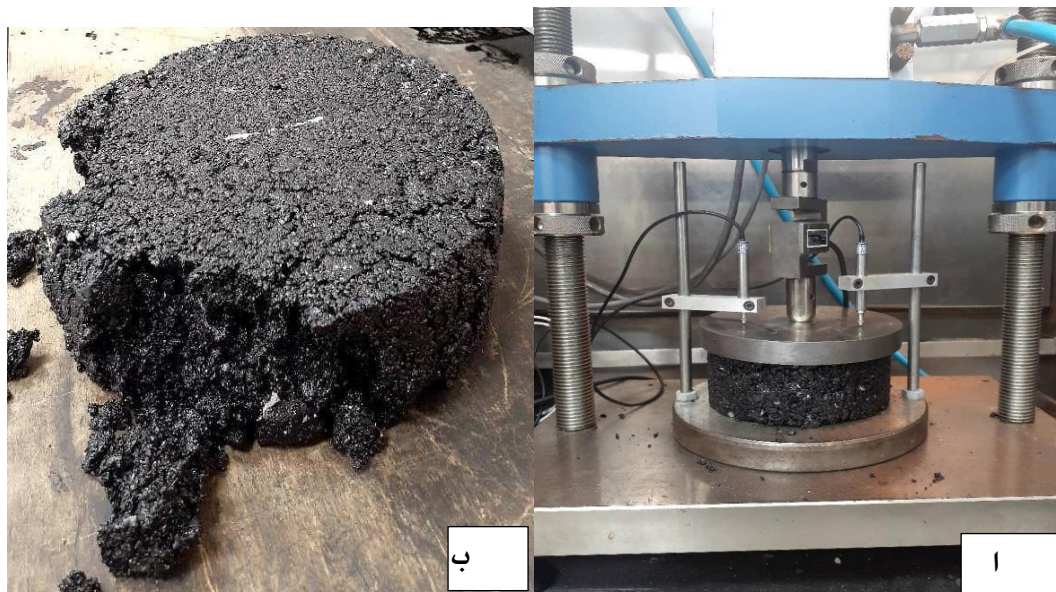
ارزیابی تأثیر فیلرهای مختلف بر عملکرد دماهای کم و زیاد مخلوط آسفالتی نیمه گرم

کیلوپاسکال در دمای ۴۰ درجه بر نمونه‌ها اعمال شد. زمان بارگذاری ۰/۱ ثانیه و کل زمان هر سیکل یک ثانیه در نظر گرفته شد. شکل ۵- ب نمونه مخلوط آسفالتی پس از انجام آزمایش را نشان می‌دهد.



تعداد سیکل بارگذاری

شکل ۴. نمودار حاصل از آزمایش خزش دینامیک



شکل ۵. الف) قرارگیری نمونه در دستگاه برای آزمایش خزش دینامیک و ب) نمونه مخلوط آسفالتی گرم بعد از انجام آزمایش

$$TSR = \frac{ITS_{wet}}{ITS_{dry}} \times 100 \quad (2)$$

۳-۴. آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

افزودنی‌های مختلف جهت ساخت مخلوط آسفالتی نیمه گرم می‌توانند بر حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی تأثیر نامطلوب بگذارند (یوسفی و همکاران، ۲۰۲۱). بنابراین، ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی بسیار ضروری است. برای این منظور، آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم طبق استاندارد AASHTO T283 انجام شد. در این آزمایش، برای هر نوع مخلوط آسفالتی ۶ نمونه با فضای خالی ۷ درصد ساخته شد. سپس، نیمی از نمونه‌ها بین ۵۵ تا ۸۵ درصد اشباع شدند. نمونه‌های اشباع شده ابتدا به مدت ۱۶ ساعت داخل فریزر با دمای ۱۸- درجه سلسیوس و سپس به مدت ۲۴ ساعت در حمام آب با دمای ۶۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند. در آخر، هم نمونه‌های خشک و هم نمونه‌های اشباع شده به مدت ۲ ساعت در حمام آب ۲۵ درجه سلسیوس قرار گرفتند. با انجام این آزمایش، مقدار نیرویی که منجر به شکست نمونه‌ها می‌شود محاسبه می‌شود. در این آزمایش، همه نمونه‌ها تحت بارگذاری با نرخ ثابت ۵۰/۸ میلی‌متر بر دقیقه قرار داده شدند. مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط آسفالتی (ITS) از معادله (۱) محاسبه می‌شود:

۳-۴. آزمایش شکست بر نمونه‌های خمشی نیم‌دایره‌ای

یکی از خرابی‌های شایع در مخلوط آسفالتی نیمه گرم، ترک خوردگی در دمای کم می‌باشد (علیها و همکاران، ۲۰۱۴؛ فخری و همکاران، ۲۰۲۰). برای ارزیابی مقاومت در برابر شکست مخلوط آسفالتی می‌توان از آزمایش شکست بر نمونه‌های خمشی نیم‌دایره‌ای استفاده کرد. از جمله نقاط قوت این آزمایش می‌توان به سادگی و تکرارپذیری نتایج اشاره کرد (پیرمحمد و مجد شکورلو، ۲۰۲۰). در این پژوهش، از استاندارد AASHTO Designation: TP105 برای انجام این آزمایش استفاده شد. ابتدا نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر ساخته شدند. سپس، هر نمونه استوانه‌ای به سه دیسک به قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰ میلی‌متر تقسیم شد. در آخر، هر دیسک به دو نیم‌دیسک تقسیم شد و در وسط هر نیم‌دیسک، ترکی به طول ۱۵ میلی‌متر و عرض ۱/۵ میلی‌متر ایجاد شد.

$$ITS = \frac{2000P}{\pi Dt} \quad (1)$$

که P حداکثر نیرو (نیوتن)، D قطر نمونه (میلی‌متر)، T ضخامت نمونه (میلی‌متر) و ITS مقاومت کششی غیرمستقیم (کیلوپاسکال) می‌باشد.

نسبت مقاومت کششی (TSR)^۱ از معادله (۲) محاسبه می‌شود. حداقل مقدار نسبت مقاومت کششی برای اینکه مخلوط آسفالتی مقاومت خوبی در برابر خرابی رطوبتی داشته باشد ۸۰ درصد می‌باشد. هرچه این نسبت به ۱۰۰ نزدیک‌تر باشد بیانگر عملکرد بهتر مخلوط آسفالتی در برابر رطوبت می‌باشد (فخری و همکاران، ۲۰۱۹).

$$G_f = \frac{W_f}{A_{lig}} \quad (3)$$

که W_f کار انجام شده (ژول)، A_{lig} مساحت سطح شکست (متر مربع) و G_f انرژی شکست (ژول بر متر مربع) است. دستگاه استفاده شده برای آزمایش شکست خمشی نیم‌دایره‌ای و نمونه مخلوط آسفالتی پس از شکست و انجام آزمایش به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده‌اند.

۱- Tensile Strength Ratio



شکل ۶. دستگاه آزمایش شکست بر نمونه‌های خمشی نیم‌دایره‌ای



شکل ۷. نمونه مخلوط آسفالتی گرم پس از آزمایش شکست

۴. نتایج آزمایش‌ها

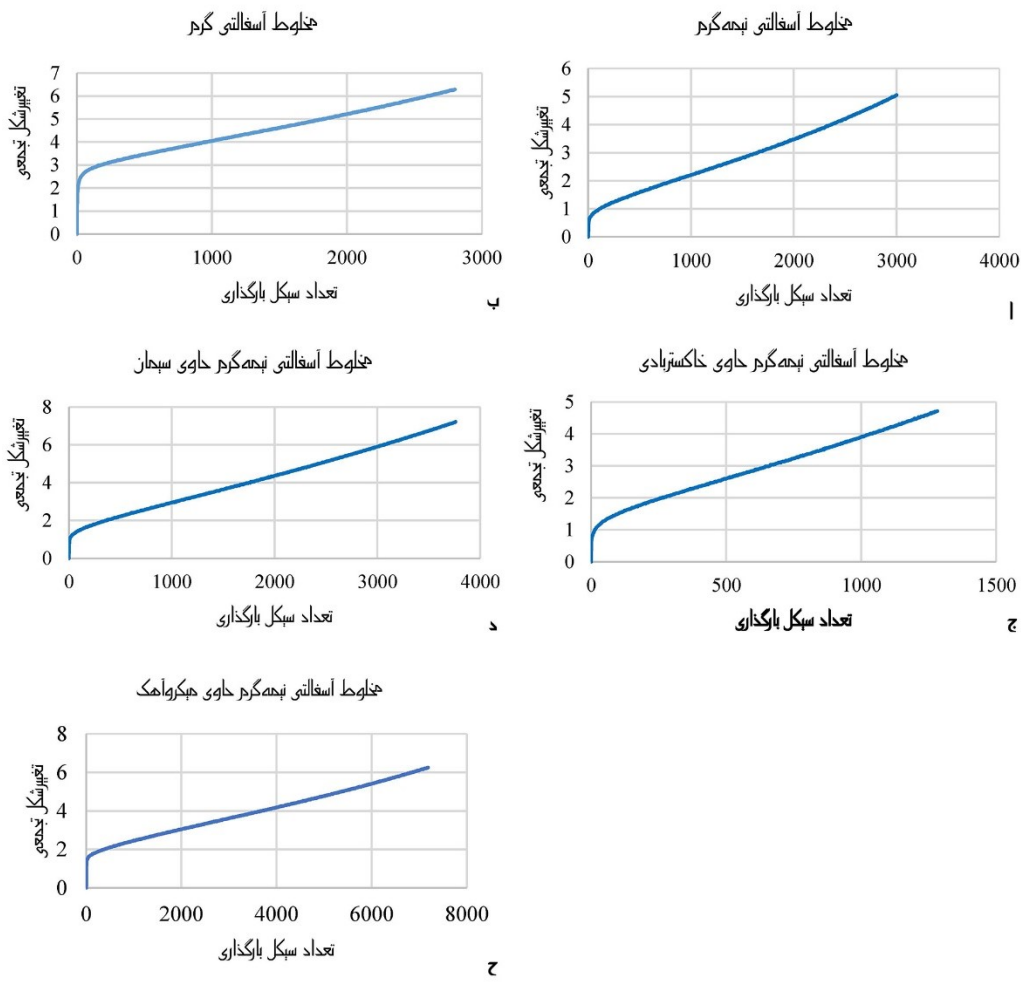
۴-۱. آزمایش خزش دینامیک

نمودار تغییرمکان در برابر تعداد سیکل بارگذاری برای نمونه‌های مختلف آسفالتی در شکل ۸ نشان داده شده است. برای مقایسه مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی، از عدد روانی به عنوان شاخص استفاده می‌شود (گندمی و

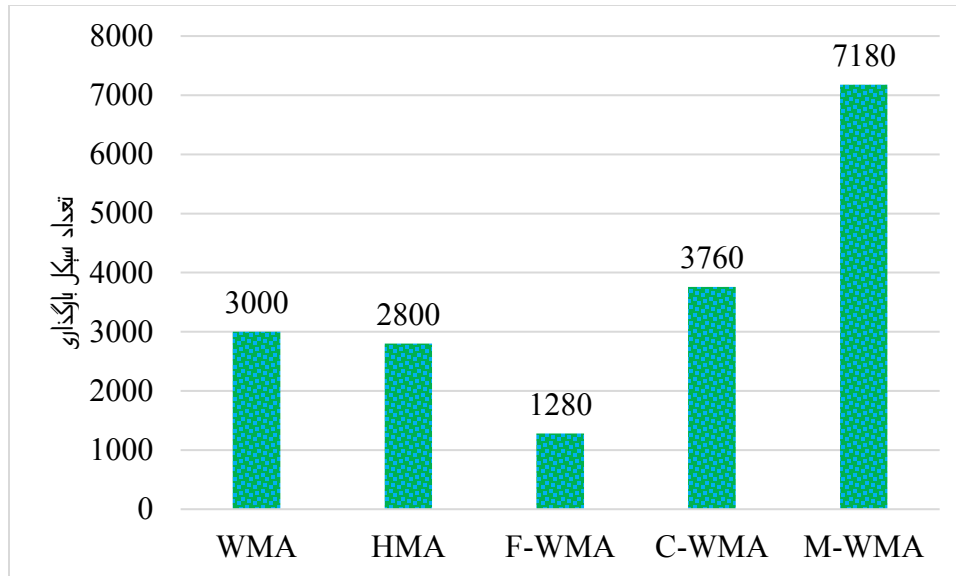
همکاران، ۲۰۱۱). عدد روانی مخلوط‌های آسفالتی مختلف در شکل ۹ نشان داده شده است. بیشترین مقدار عدد روانی مربوط به نمونه ساخته شده با میکروآهک و کمترین مقدار مربوط به نمونه حاوی خاکستر بادی است. همانطور که مشاهده می‌شود، استفاده از اتیلن بیس استنارمید برای ساخت مخلوط آسفالتی، با افزایش ۷ درصدی عدد روانی سبب افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط آسفالتی شده که

اثر استفاده از فیلر باشد. به بیان دیگر، استفاده از سیمان، میکروآهک و اتیلن بیس استنارمید باعث سفت‌تر شدن قیر در دمای زیاد می‌شوند، که مانع از جابجایی سنگ‌دانه‌ها به اطراف می‌شود. همین عامل سبب کاهش تغییرشکل تجمعی و افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی می‌شود (دولایمی و همکاران، ۲۰۲۰؛ ضیایی و بهنیا، ۲۰۲۰). خاکستربادی عدد روانی مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم را بیش از ۵۰ درصد کاهش داد.

با مطالعات قبلی مطابقت دارد (یوسفی و همکاران، ۲۰۲۱). همچنین، میکروآهک با افزایش چشمگیر ۱۴۰ درصدی و سیمان با افزایش ۲۵ درصدی عدد روانی، مقاومت در برابر شیارشدگی را در مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم بهبود بخشید. افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی با استفاده از فیلر سیمانی در تحقیقات قبلی نیز گزارش شده است (یان و همکاران، ۲۰۱۳). افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی می‌تواند به خاطر افزایش مدول سختی مخلوط آسفالتی در دمای زیاد در



شکل ۸. تغییرشکل تجمعی در برابر تعداد سیکل بارگذاری: الف) مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم، ب) مخلوط آسفالتی گرم، ج) مخلوط حاوی خاکستربادی، د) مخلوط حاوی سیمان و ح) مخلوط حاوی میکروآهک

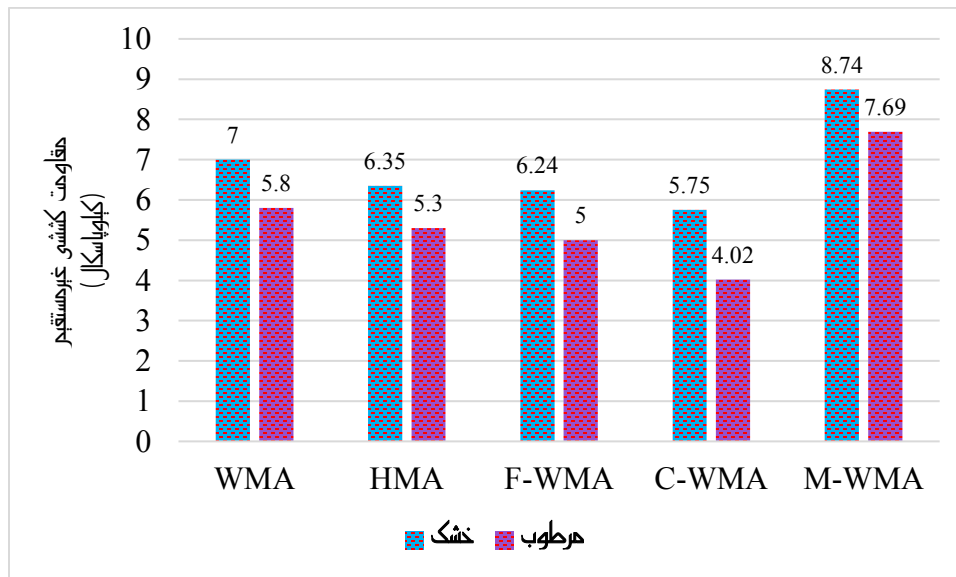


شکل ۹. مقایسه عددی روانی نمونه‌های مختلف

افزودنی در مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم ساخته شده با سنگ‌دانه سیلیسی گزارش شده است (یوسفی و همکاران، ۲۰۲۱). استفاده از سیمان و خاکستریادی، میزان مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های خشک و مرطوب را کاهش داد (اگرچه اثرگذاری سیمان در کاهش بیشتر بود). استفاده از میکروآهک به ترتیب سبب افزایش ۲۴ و ۳۷ درصدی مقاومت کششی غیرمستقیم در نمونه‌های مرطوب و خشک شد.

۴-۲. آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

ارزیابی حساسیت رطوبتی نمونه‌های مختلف مخلوط آسفالتی با آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم انجام شد. نتایج حاصل از این آزمایش در شکل ۱۰ نشان داده شده است. افزودنی اتیلن بیس استارمید موجب افزایش ۱۰ درصدی مقاومت کششی غیرمستقیم در هر دو نمونه خشک و مرطوب شد. در حالی که در مطالعات پیشین، کاهش مقاومت توسط این

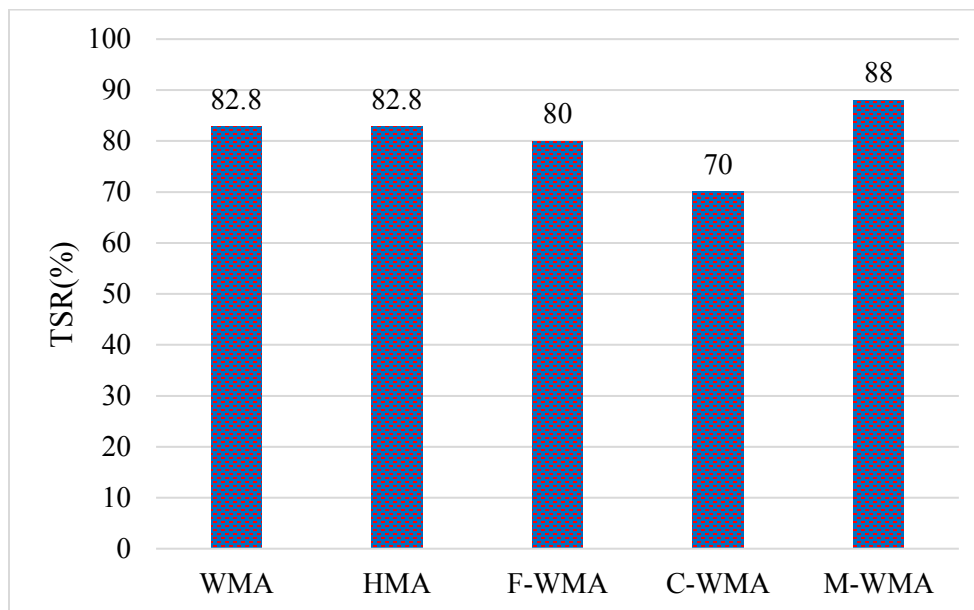


شکل ۱۰. مقاومت کششی نمونه‌های مختلف مخلوط آسفالتی

اتیلن بیس استنارمید با داشتن TSR بیش از ۸۰ درصد، از حساسیت رطوبتی قابل قبولی برخوردار بود (زیاری و همکاران، ۲۰۲۱). این موضوع نشان می‌دهد که استفاده از اتیلن بیس استنارمید در کنار سنگ‌دانه آهکی عملکرد بهتری دارد. استفاده از سیمان و خاکستربادی با کاهش TSR، مقاومت در برابر رطوبت مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم را کاهش داد. از طرفی، مخلوط دارای خاکستربادی در مقایسه با مخلوط حاوی سیمان از مقدار TSR بیشتر و مقاومت در برابر رطوبت بهتری برخوردار بود. این موضوع در تحقیقات گذشته نیز گزارش شده است (جمشیدی و همکاران، ۲۰۱۸؛ یوسفی و همکاران، ۲۰۲۱). افزایش مقاومت در برابر خرابی رطوبتی در اثر استفاده از میکروآهک بیانگر افزایش چسبندگی بین قیر و سنگ‌دانه و بهبود کشش سطحی قیر در اثر استفاده از این فیلر است. در حالی که استفاده از خاکستربادی و سیمان سبب کاهش چسبندگی بین قیر و سنگ‌دانه‌ها می‌شود (فخری و شهریاری، ۲۰۲۱).

TSR مربوط به نمونه‌های مختلف در شکل ۱۱ ارائه شده است. بیشترین و کمترین مقدار TSR به ترتیب مربوط به مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم ساخته شده با میکروآهک (حدود ۸۸ درصد) و سیمان (حدود ۷۰ درصد) می‌باشد. تمامی نمونه‌های مخلوط آسفالتی ساخته شده، به‌جز نمونه مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم حاوی سیمان، TSR بیش از ۸۰ درصد داشتند. این موضوع بیانگر این است که مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده، به‌جز نمونه حاوی سیمان، از مقاومت خوبی در برابر خرابی رطوبتی برخوردار هستند (عامری و بهنود، ۲۰۱۲).

استفاده از افزودنی اتیلن بیس استنارمید سبب کاهش جزئی TSR در مخلوط آسفالتی شد. نتایج تحقیقات قبلی بیانگر آن است که استفاده از این افزودنی در مخلوط آسفالتی ساخته شده با سنگ‌دانه سیلیسی سبب کاهش ۵۵ درصدی TSR می‌شود (یوسفی و همکاران، ۲۰۲۱). در حالی که مخلوط آسفالتی ساخته شده با سنگ‌دانه آهکی و افزودنی



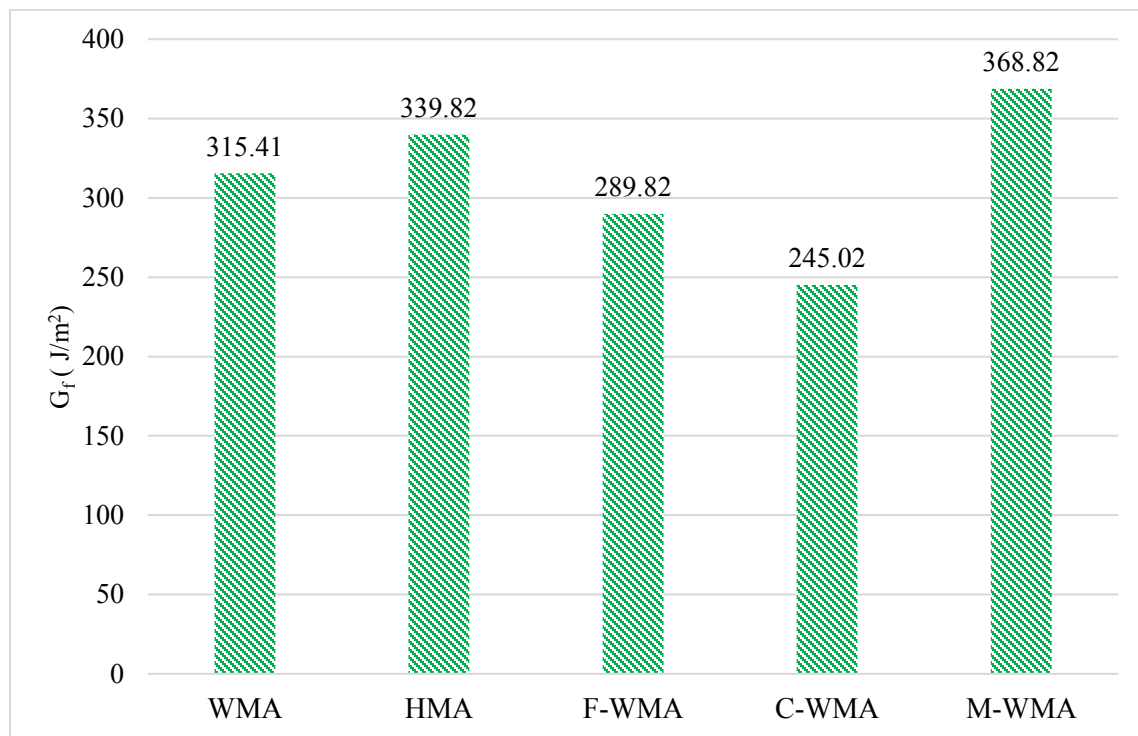
شکل ۱۱. مقایسه مقاومت نمونه‌های مختلف در برابر خرابی رطوبتی

نتایج حاصل از آزمایش شکست بر نمونه‌های خمشی نیم‌دایره‌ای برای نمونه‌های مختلف در شکل ۱۲ نشان داده

۳-۴. آزمایش شکست بر نمونه‌های خمشی نیم‌دایره‌ای

رشد ترک در دمای کم می‌باشد. استفاده از میکروآهک مقدار انرژی شکست در مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم را ۱۷ درصد افزایش داد. این افزایش انرژی شکست توسط میکروآهک بیانگر افزایش سختی قیر در دمای کم است، که مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر شروع ترک از نوک ترک را افزایش می‌دهد. همچنین، با توجه به اینکه آزمایش شکست در مد اول انجام شد، افزایش انرژی شکست بیانگر افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر شروع ترک کششی در دمای کم توسط این فیله است (علیها و همکاران، ۲۰۱۴؛ اکبری و همکاران، ۲۰۲۳).

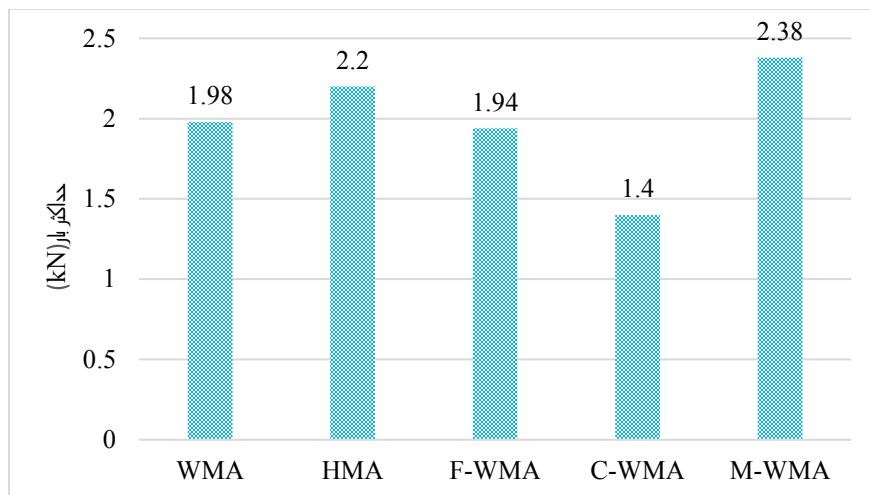
شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مخلوط آسفالتی ساخته شده با میکروآهک و سیمان به ترتیب دارای بیشترین و کمترین G_f (انرژی شکست) می‌باشند. استفاده از افزودنی اتیلن بیس استنارمید سبب شد تا مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم نسبت به مخلوط آسفالتی گرم انرژی شکست کمتری (حدود ۷ درصد) داشته باشد. همچنین، استفاده از خاکستر بادی و سیمان به عنوان فیله در مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم به ترتیب باعث کاهش ۸ و ۲۲ درصدی انرژی شکست در این مخلوط آسفالتی می‌شود. این کاهش مقدار G_f به معنای کاهش جذب انرژی و در نتیجه کاهش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر



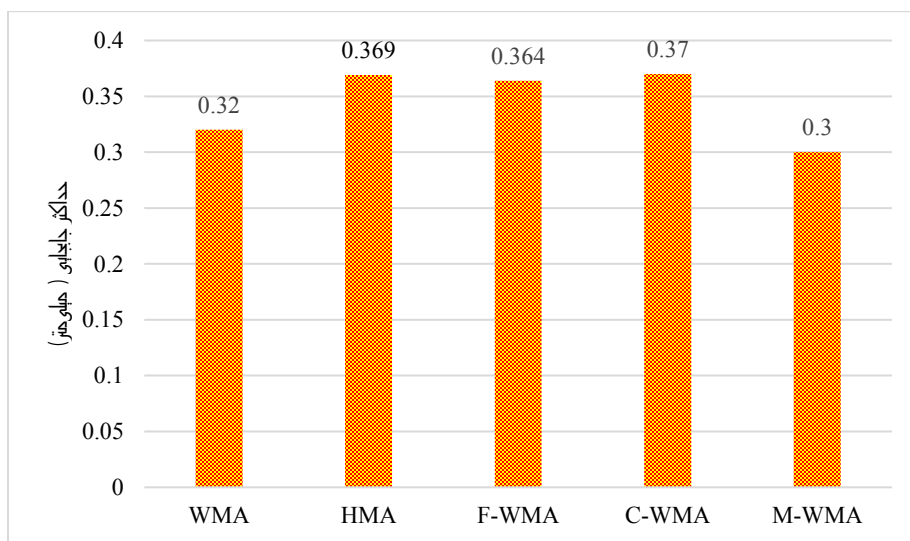
شکل ۱۲. انرژی شکست نمونه‌های مختلف

نسبت به سایر نمونه‌ها دارای شکست تردتری است. همچنین، نمونه حاوی سیمان با داشتن بیشترین تغییر مکان و کمترین بار بیانگر شکست نرم‌تر نسبت به سایر نمونه‌ها است (ایپکیول و همکاران، ۲۰۲۲).

در شکل ۱۳، حداکثر بار لازم برای شکست نمونه‌های مختلف و در شکل ۱۴ تغییر مکان متناظر با حداکثر بار مورد نیاز برای شکست نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، نمونه حاوی میکروآهک دارای بیشترین بار شکست و کمترین تغییر مکان می‌باشد که بیانگر این است که این نمونه



شکل ۱۳. حداکثر بار مورد نیاز برای شکست نمونه‌ها



شکل ۱۴. جابجایی متناظر در زمان اعمال حداکثر بار

۴-۴. تحلیل آماری

هدف از این تحقیق، ارزیابی تأثیر فیلرهای مختلف بر عملکرد مخلوط آسفالتی در دمای زیاد و دمای کم می‌باشد. به منظور مشخص شدن تأثیر افزودنی اتیل بیس استئارمید و فیلر میکروآهک، از تست ANOVA استفاده شد. سطح اطمینان برای این آنالیز ۹۵ درصد در نظر گرفته شد (فخری و شهریاری، ۲۰۲۱).

نتیجه حاصل از آنالیز واریانس‌ها بین نمونه‌های مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم حاوی اتیلن بیس استئارمید و مخلوط

آسفالتی گرم برای عدد روانی و انرژی شکست به ترتیب در جداول ۶ و ۷ نشان داده شده است. در این آنالیز، نظریه فرضیه صفر برابری مقدار عدد روانی و انرژی شکست مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم با مخلوط آسفالتی گرم است. مقدار p -value در جدول ۶ کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد که بیانگر معنادار بودن تأثیر افزودنی بر افزایش عدد روانی است. در جدول ۷، پارامتر p -value کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد که بیانگر تأثیر قابل توجه افزودنی اتیلن بیس استئارمید بر کاهش انرژی شکست مخلوط آسفالتی است.

جدول ۶. خروجی آنالیز واریانس‌ها برای عدد روانی

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	98604.9	1	98604.9	19.00854	0.002413	5.317655
Within Groups	41499.2	8	5187.4			
Total	140104.1	9				

جدول ۷. خروجی آنالیز واریانس‌ها برای انرژی شکست

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	1474.039	1	1474.039	15.45786	0.004347	5.317655
Within Groups	762.8684	8	95.35855			
Total	2236.907	9				

مخلوط آسفالتی نیمه گرم و مخلوط آسفالتی نیمه گرم حاوی میکروآهک است رد می‌شود. به بیان دیگر، استفاده از میکروآهک از لحاظ عدد روانی و انرژی شکست به طور معناداری بر بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی نیمه گرم تأثیرگذار است.

نتایج حاصل از آنالیز واریانس‌ها برای تعیین تأثیر میکروآهک بر شیارشدگی و ترک خوردگی دمای کم مخلوط آسفالتی نیمه گرم به ترتیب در جداول ۸ و ۹ نشان داده شده است. پارامتر P-value برای شیارشدگی و ترک خوردگی دمای کم کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد، که بیانگر این است که نظریه فرضیه صفر که برابری مقدار عدد روانی یا انرژی شکست

جدول ۸. خروجی آنالیز واریانس‌ها برای تعیین تأثیر میکروآهک بر شیارشدگی مخلوط آسفالتی نیمه گرم

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	43710265	1	43710265	9598.424	1.32E-13	5.3176
Within Groups	36431.2	8	4553.9			
Total	43746696	9				

جدول ۹. خروجی آنالیز واریانس‌ها برای تعیین تأثیر میکروآهک بر عملکرد دمای کم مخلوط آسفالتی نیمه گرم

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	7160.441	1	7160.441	115.5743	4.93E-06	5.3176
Within Groups	495.6425	8	61.95531			
Total	7656.083	9				

آسفالتی نیمه گرم با میکروآهک دارای افزایش معنادار عدد روانی و انرژی شکست این مخلوط آسفالتی نسبت به مخلوط آسفالتی گرم می‌باشد.

نتایج حاصل از آنالیز واریانس‌ها بین مخلوط حاوی میکروآهک و مخلوط آسفالتی گرم در جداول ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. p-value در هر دو خروجی کمتر از ۰/۰۵ است که بیانگر این موضوع می‌باشد که ساخت مخلوط

جدول ۱۰. خروجی آنالیز واریانس‌ها به منظور مقایسه عدد روانی نمونه‌های M-WMA و HMA

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	47961000	1	47961000	8539.304	2.1E-13	5.317655
Within Groups	44932	8	5616.5			
Total	48005932	9				

جدول ۱۱. خروجی آنالیز واریانس‌ها به منظور مقایسه انرژی شکست نمونه‌های M-WMA و HMA

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	2136.859	1	2136.859	16.55155	0.003592	5.317655
Within Groups	1032.826	8	129.1032			
Total	3169.685	9				

۵. نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر استفاده از افزودنی اتیلن بیس استنارمید و فیلرهای مختلف (خاکستریادی، میکروآهک و سیمان) بر عملکرد مخلوط آسفالتی می‌باشد. برای این منظور، از آزمایش‌های مارشال، مقاومت کششی غیرمستقیم، خزش دینامیک در دمای زیاد و شکست بر نمونه‌های خمشی نیم‌دایره‌ای در دمای کم استفاده شد. نتایج حاصل شده به شرح زیر می‌باشد:

- استفاده از اتیلن بیس استنارمید در ساخت مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم، با کاهش دمای اختلاط مخلوط آسفالتی، پیرشدگی قیر را کاهش داد. درصد قیر بهینه مصرفی برای ساخت مخلوط آسفالتی حاصل نسبت به مخلوط آسفالتی گرم تغییر نکرد. همچنین، این افزودنی باعث شد مقاومت شیارشدگی و مقاومت کششی غیرمستقیم در مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم افزایش یابد. مخلوط آسفالتی ساخته شده، با داشتن TSR حدود ۸۲ درصد، از حساسیت رطوبتی خوبی برخوردار بود. اتیلن بیس استنارمید با کاهش انرژی شکست، مقاومت ترک‌خوردگی مخلوط آسفالتی در دمای کم را کاهش داد.

- استفاده از میکروآهک در مقایسه با سایر فیلرها بهترین عملکرد را داشت؛ به‌گونه‌ای که مقدار قیر بهینه مصرفی مخلوط آسفالتی را کاهش داد و عملکرد مخلوط آسفالتی

را با افزایش ۱۴۰ درصدی عدد روانی در دمای زیاد، و افزایش ۱۷ درصدی انرژی شکست در دمای کم، بهبود بخشید. میکروآهک، مقاومت کششی غیرمستقیم و TSR مخلوط آسفالتی را بهبود بخشید و سبب افزایش مقاومت در برابر رطوبت در مخلوط آسفالتی شد.

- فیلر سیمان، قیر بهینه مصرفی برای ساخت مخلوط آسفالتی را افزایش داد. سیمان اگرچه مقاومت شیارشدگی را حدود ۲۵ درصد افزایش داد اما مقاومت در برابر رطوبت، مقاومت کششی غیرمستقیم و مقاومت در برابر ترک‌خوردگی دمای کم را در مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم کاهش داد؛ به‌گونه‌ای که نمونه ساخته شده با سیمان دارای ضعیف‌ترین عملکرد نسبت به سایر نمونه‌ها بود. سیمان، با کسب TSR کمتر از ۸۰ درصد، از مقاومت خوبی در برابر خرابی رطوبتی برخوردار نبود.

- استفاده از خاکستریادی به عنوان فیلر، میزان قیر بهینه مصرفی برای ساخت مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم را افزایش داد. خاکستریادی، مقاومت کششی غیرمستقیم و مقاومت در برابر رطوبت را در مخلوط آسفالتی کاهش داد. همچنین، این فیلر، با کاهش انرژی شکست، مقاومت ترک‌خوردگی در دمای کم مخلوط آسفالتی را کاهش داد. استفاده از این فیلر سبب کاهش ۵۰ درصدی عدد روانی شد؛ به‌گونه‌ای

که مخلوط آسفالتی حاصل دارای کمترین مقاومت شیارشدگی در بین نمونه‌ها بود.

• تحلیل آماری نشان داد که استفاده از میکروآهک سبب افزایش معنادار مقاومت شیارشدگی و ترک‌خوردگی دمای کم مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم می‌شود. همچنین، نتایج نشان داد که با استفاده از میکروآهک می‌توان مخلوط آسفالتی نیمه‌گرمی ساخت که عملکرد آن از مخلوط آسفالتی گرم در دمای زیاد، دمای کم و خرابی رطوبتی بهتر باشد.

۶. مراجع

- Akbari, M., Shahryari, E., Hamedipour, A. M. and Shafabakhsh, G. 2023. "Laboratory investigation on the rutting and fracture resistance of hot-mix asphalt containing nanographene Oxide". *J. Mater. Civ. Eng.*, 35(3): 04022483.
- Alavi, A. H., Ameri, M., Gandomi, A. H. and Mirzahosseini, M. R. 2011. "Formulation of flow number of asphalt mixes using a hybrid computational method". *Constr. Build. Mater.*, 25(3): 1338-1355.
- Aliha, M. M., Behbahani, H., Fazaeli, H. and Rezaifar, M. H. 2014. "Study of characteristic specification on mixed mode fracture toughness of asphalt mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 54: 623-635.
- Aliha, M. R. M., Razmi, A. and Mansourian, A. 2017. "The influence of natural and synthetic fibers on low temperature mixed mode I+ II fracture behavior of warm mix asphalt (WMA) materials". *Eng. Fract. Mech.*, 182: 322-336.
- Ameri, M. and Behnood, A. 2012. "Laboratory studies to investigate the properties of CIR mixes containing steel slag as a substitute for virgin aggregates". *Constr. Build. Mater.*, 26(1): 475-480.
- Belc, A. L., Coleri, E., Belc, F. and Costescu, C. 2021. "Influence of different warm mix additives on characteristics of warm mix asphalt". *Mater.*, 14(13): 3534.
- Choudhary, J., Kumar, B. and Gupta, A. 2018. "Application of waste materials as fillers in bituminous mixes". *Waste Manag.*, 78: 417-425.
- Corrigan, M. 2009. "Warm mix asphalt update". In *Work Mix Seminar and Demonstration*.
- Dulaimi, A., Shanbara, H. K., Jafer, H. and Sadique, M. 2020. "An evaluation of the performance of hot mix asphalt containing calcium carbide residue as a filler". *Constr. Build. Mater.*, 261: 119918.
- Fakhri, M., Javadi, S., Sedghi, R., Arzjani, D. and Zarrinpour, Y. 2019. "Effects of deicing agents on moisture susceptibility of the WMA containing recycled crumb rubber". *Constr. Build. Mater.*, 227: 116581.
- Fakhri, M., Baveli Bahmai, B., Javadi, S. and Sharafi, M. 2020. "An evaluation of the mechanical and self-healing properties of warm mix asphalt containing scrap metal additives". *J. Clean. Prod.*, 253: e119963.
- Fakhri, M. and Shahryari, E. 2021. "The effects of nano zinc oxide (ZnO) and nano reduced graphene oxide (RGO) on moisture susceptibility property of stone mastic asphalt (SMA)". *Case Stud. Constr. Mater.*, 15: e00655.
- Fakhri, M., Javadi, S., Norouzi, M. A., Bahmai, B. B. and Karimi, M. M. 2023. "The induced heating-healing of inductive warm-mix asphalt mixture containing copper-slag filler". *J. Mater. Civ. Eng.*, 35(4): 04023039.
- Gandomi, A. H., Alavi, A. H., Mirzahosseini, M. R. and Moghadas Nejad, F. 2011. "Nonlinear genetic-based models for prediction of flow number of asphalt mixtures". *J. Mater. Civ. Eng.*, 23(3): 248-263.
- Hurley, G. C. and Prowell, B. D. 2005. "Evaluation of Sasobit for use in warm mix asphalt". *NCAT Report*, 5(6): 1-27.
- Ingrassia, L. P., Spadoni, S., Ferrotti, G., Virgili, A. and Canestrari, F. 2023. "Prediction of the long-term performance of an existing warm recycled motorway pavement". *Mater.*, 16(3): 1005.
- Ipekyol, A., Tortum, A., Rasouli, R. and Yazdani, M. 2022. "Evaluating fatigue and crack resistance of asphalt mixture containing zinc tailing aggregates". *Case Stud. Constr. Mater.*, 17: e01384.
- Jamshidi, A., Hamzah, M. O. and You, Z. 2013. Performance of warm mix asphalt containing Sasobit®: State-of-the-art. *Constr. Build. Mater.*, 38: 530-553.
- Jamshidi, A., Hasan, M. R. M. and Lee, M. T. 2018. "Comparative study on engineering properties and energy efficiency of asphalt mixes incorporating fly ash and cement". *Constr. Build. Mater.*, 168: 295-304.
- Kaloush, K. E. 2001. "Simple performance test for permanent deformation of asphalt mixtures". Arizona State University.
- Kazmee, H., Garg, N., Offenbacher, D., Ricalde, L. and Villafane, W. 2023. "Comparing critical pavement responses in HMA and WMA (with RAP) test sections measured using embedded sensors under accelerated pavement tests at NAPMRC". In: *Airfield and Highway Pavements 2023*, pp. 293-304.

- Kim, Y. R., Lutfi, J. S., Bhasin, A. and Little, D. N. 2008. "Evaluation of moisture damage mechanisms and effects of hydrated lime in asphalt mixtures through measurements of mixture component properties and performance testing". *J. Mater. Civ. Eng.*, 20(10): 659-667.
- Li, B., Li, N., Yu, X., Xie, J., Zhan, H., Ding, J. and Ma, H. 2023. "Evaluation of the field-aged performance of foamed warm mix asphalt: Comparisons with hot mix asphalt". *Case Stud. Constr. Mater.*, 18: e01750.
- Pasandín, A. R., Pérez, I., Ramírez, A. and Cano, M. M. 2016. "Moisture damage resistance of hot-mix asphalt made with paper industry wastes as filler". *J. Clean. Prod.*, 112: 853-862.
- Pirmohammad, S. and Majd-Shokorlou, Y. 2020. "Finite element analysis of road structure containing top-down crack within asphalt concrete layer". *J. Central South University*, 27(1): 242-255.
- Pradhan, M. M. 1995. "Permanent deformation characteristics of asphalt-aggregate mixtures using varied materials and molding procedures with Marshall method". Montana State University.
- Rubio, M. C., Martínez, G., Baena, L. and Moreno, F. 2012. "Warm mix asphalt: An overview". *J. Clean. Prod.*, 24: 76-84.
- Ullah, R., Hafeez, I., Zaidi, S. B. A., Jamal, J. and Haider, S. 2020. "Study the effect of substitution filler on performance of asphalt mixture". *Civ. Eng. J.*, 6(9): 1704-1714.
- Vaitkus, A., Čygas, D., Laurinavičius, A. and Perveneckas, Z. 2009. "Analysis and evaluation of possibilities for the use of warm mix asphalt in Lithuania". *Baltic J. Road Bridge Eng.*, 4(2): 80-86.
- Yan, K. Z., Xu, H. B. and Zhang, H. L. 2013. "Effect of mineral filler on properties of warm asphalt mastic containing Sasobit". *Constr. Build. Mater.*, 48: 622-627.
- Yousefi, A., Behnood, A., Nowruzzi, A. and Haghshenas, H. 2021. "Performance evaluation of asphalt mixtures containing warm mix asphalt (WMA) additives and reclaimed asphalt pavement (RAP)". *Constr. Build. Mater.*, 268: 121200.
- Zaumanis, M. 2010. "Warm mix asphalt investigation". Master of science thesis, Kgs. Lyngby: Technical University of Denmark in cooperation with the Danish Road Institute, Department of Civil Engineering.
- Zhou, F., Scullion, T. and Sun, L. 2004. "Verification and modeling of three-stage permanent deformation behavior of asphalt mixes". *J. Transport. Eng.*, 130(4): 486-494.
- Ziaee, S. A. and Behnia, K. 2020. "Evaluating the effect of electric arc furnace steel slag on dynamic and static mechanical behavior of warm mix asphalt mixtures". *J. Clean. Prod.*, 274: 123092.
- Ziari, H., Orouei, M., Divandari, H. and Yousefi, A. 2021. "Mechanical characterization of warm mix asphalt mixtures made with RAP and Para-fiber additive". *Constr. Build. Mater.*, 279: 122456.