



Research Article

Laboratory Investigation of Fracture and Fatigue Characteristics in Stone Mastic Asphalt (SMA) Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)

Mansour Fakhri ^{a*}, Alireza Hadi ^a, Morteza Ghanbari ^a

^a Department of Raod and Transportation, Faculty of Civil Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-09-26

Revised: 2024-11-06

Accepted: 2024-11-11

Keywords:

Flexible pavement;
Stone mastic asphalt (SMA);
Reclaimed asphalt pavement (RAP);
Fracture test;
Fracture energy.

ABSTRACT

Pavement quality significantly impacts road safety, serviceability, and maintenance costs. Recently, the use of reclaimed asphalt mixtures has gained attention due to their environmental and economic benefits. However, reheating these materials for reuse can lead to asphalt aging and embrittlement. Consequently, these mixtures are susceptible to low-temperature cracking. Therefore, despite environmental and economic advantages, the unstable performance and potential for increased stiffness and cracking in stone mastic asphalt (SMA) pavements must be carefully managed to ensure durability and service life. This study investigates the fracture properties of SMA mixtures at low temperature (-12 °C) and fatigue behavior at intermediate temperature (25 °C). Different percentages (0%, 15%, and 30%) of reclaimed asphalt pavement (RAP) were used as a substitute for aggregate in SMA mixtures to examine the effects of this substitution on mixture properties. Results indicated that the fracture energy of asphalt mixtures using rejuvenating oil was higher than those without rejuvenating oil. This increase in fracture energy was significantly observed at low temperatures. The flexibility index (FI) analysis showed that adding asphalt shingles without rejuvenating oil reduced flexibility by about 30% compared to the control sample. However, using rejuvenating oil increased the flexibility index by almost twofold compared to the control sample; with an 85% increase in the first mode of loading and a 113% increase in the second mode.

* Corresponding author

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

How to cite this article: Fakhri, M., Hadi, A., & Ghanbari, M. (2024). Laboratory investigation of fracture and fatigue characteristics in stone mastic asphalt (SMA) mixtures containing reclaimed asphalt pavement (RAP). *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 10(3), 1-22.
<https://doi.org/10.22075/jtie.2024.35442.1691>

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



مقاله پژوهشی

بررسی آزمایشگاهی مشخصات شکست و خستگی در مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای حاوی تراشه آسفالت بازیافتی

منصور فخری^{۱*}، علیرضا هادی^۱، مرتضی قنبری^۱

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

اطلاعات مقاله

چکیده

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۰۵

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۱۶

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۲۱

واژگان کلیدی:

روسازی انعطاف‌پذیر،
آسفالت با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای،
تراشه آسفالت بازیافتی،
آزمون شکست،
انرژی شکست.

کیفیت روسازی تأثیر مهمی بر ایمنی، سرویس‌دهی و هزینه‌های نگهداری راه‌ها دارد. اخیراً، استفاده از مخلوط‌های آسفالتی تراشیده‌شده به دلیل مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی مورد توجه قرار گرفته است. اما گرم کردن این مصالح برای استفاده مجدد می‌تواند باعث پیری و شکنندگی آسفالت شود. در نهایت، این مخلوط‌ها در دمای کم مستعد ترک‌خوردگی می‌شوند. بنابراین، با وجود مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی، برای اطمینان از دوام و طول عمر روسازی‌های با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای (SMA)، باید عملکرد ناپایدار و پتانسیل افزایش سختی و ترک‌خوردگی آن‌ها به دقت مدیریت شود. در این پژوهش، به بررسی خصوصیات شکست مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای در دمای کم (۱۲- درجه سلسیوس) و خستگی مخلوط در دمای متوسط (۲۵ درجه سلسیوس) پرداخته شد. بدین منظور، از مقادیر مختلف (صفر، ۱۵ و ۳۰ درصد) تراشه‌های آسفالت بازیافتی به عنوان جایگزین سنگدانه در مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای استفاده شده و تأثیرات این جایگزینی در مشخصات مخلوط‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت، انرژی شکست مخلوط‌های آسفالتی که از روغن جوانساز استفاده شده، بیشتر از مخلوط‌هایی است که بدون روغن جوانساز هستند. این افزایش انرژی شکست در دمای کم به‌طور قابل توجهی مشهود است. بررسی شاخص انعطاف‌پذیری (FI) نشان می‌دهد که با افزودن تراشه آسفالتی، بدون استفاده از روغن جوانساز، انعطاف‌پذیری حدود ۳۰ درصد کمتر از نمونه شاهد می‌شود. اما با استفاده از روغن جوانساز، شاخص انعطاف‌پذیری تقریباً دو برابر بیشتر از نمونه شاهد می‌شود؛ به‌طوری که در بارگذاری مود اول ۸۵ درصد و در مود دوم ۱۱۳ درصد افزایش یافته است.

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

استناد به این مقاله: فخری، منصور، هادی، علیرضا & قنبری، مرتضی. (۱۴۰۳). بررسی آزمایشگاهی مشخصات شکست و خستگی در مخلوط آسفالتی با

استخوان‌بندی سنگدانه‌ای حاوی تراشه آسفالت بازیافتی. مهندسی زیر ساخت‌های حمل و نقل، ۱۰ (۳)، ۱-۲۲

<https://doi.org/10.22075/jtie.2024.35442.1691>

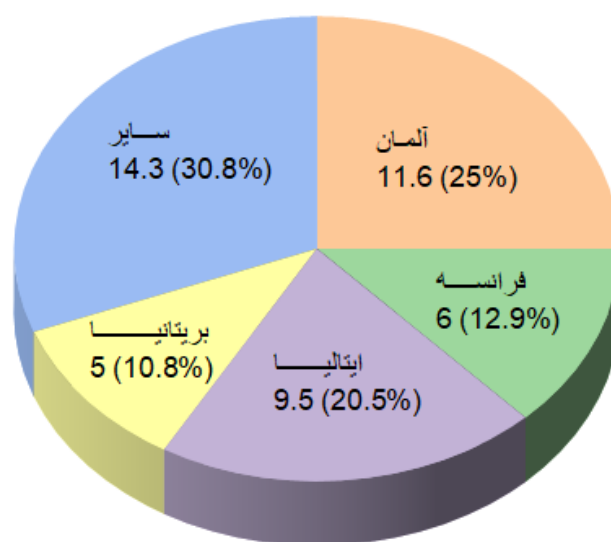
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱. مقدمه

کیفیت روسازی نقش بسیار مهمی در سطح ایمنی، سرویس‌دهی و هزینه‌های جاری نگهداری راه‌ها دارد. مخلوط‌های آسفالتی متداول‌ترین نوع رویه در راه‌ها می‌باشند (وست و کوپلند، ۲۰۱۵). اخیراً استفاده از مخلوط‌های آسفالتی قدیمی تراشیده شده از سطح راه‌ها به دلیل فواید زیست‌محیطی و اقتصادی مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از آسفالت قدیمی تراشیده شده به دلیل تأمین بخش قابل توجهی از مصالح سنگی و قیر روسازی‌های جدید، به عنوان منبعی ارزشمند تلقی می‌گردند (هیراما، ۲۰۱۴؛ ژونگ و همکاران، ۲۰۲۱). کاربرد تراشه آسفالت بازیافتی در مخلوط‌های آسفالتی می‌تواند با به حداقل رساندن نیاز به مواد جدید و کاهش هزینه‌های دفع، منجر به صرفه‌جویی قابل توجهی در هزینه شود (سیویلویسیوس و مارتیسیوس، ۲۰۲۳). همچنین، از نظر زیست‌محیطی، بازیافت آسفالت مصرف مواد طبیعی را کاهش می‌دهد و در نتیجه میزان استخراج و فرآوری مواد خام کم می‌شود (نصیر و همکاران، ۲۰۲۴). با این حال، اطمینان از خصوصیات و عملکرد

مخلوط‌های حاوی تراشه‌های آسفالتی احیاء شده حیاتی می‌باشد (الداگاشی و همکاران، ۲۰۲۲). از جمله این خصوصیات می‌توان به مشخصات فیزیکی و دانه‌بندی سنگدانه‌ها، درصد قیر و شدت پیرشدگی قیر اشاره کرد (ویلیس و همکاران، ۲۰۱۳). در برخی موارد، به‌ویژه در درصد‌های زیاد میزان RAP، استفاده از مواد جوانساز برای احیای خصوصیات قیر ضرورت دارد (سونگ و همکاران، ۲۰۱۸؛ زومانیس و همکاران، ۲۰۲۰). بدین ترتیب، استفاده از آسفالت بازیافتی گامی مؤثر در توسعه پایدار در صنعت حمل و نقل می‌باشد (کوریشتی و همکاران، ۲۰۲۳). تجربیات بسیاری نشان داده‌اند که آسفالت‌های بازیافتی دوام و عملکرد مشابهی با آسفالت‌های معمولی (بکر) دارند (سیویلویسیوس و مارتیسیوس، ۲۰۲۳).

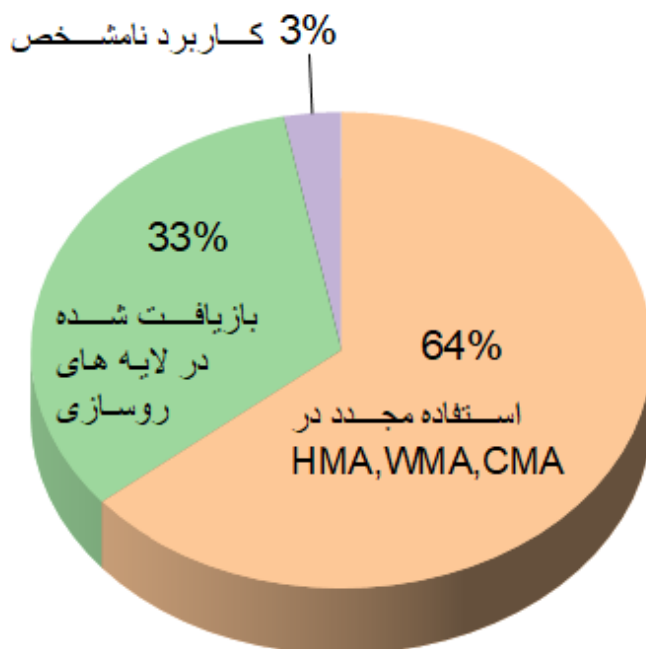
در شکل ۱، نمای کلی از مقدار آسفالت بازیافت شده در ۱۷ کشور اروپایی تا سال ۲۰۲۰ ارائه شده است. داده‌ها، به تولید انواع آسفالت، کاربردها و نرخ بازیافت اشاره دارد. کل میزان تراشه آسفالت موجود برای صنعت آسفالت در این کشورها ۴/۶ میلیون تن بوده است (پوتی، ۲۰۲۰).



شکل ۱. مقدار کل آسفالت بازیافتی موجود در ۱۷ کشور اروپایی در سال ۲۰۲۰ (پوتی، ۲۰۲۰)

مجدداً استفاده شد، ۳۳ درصد بازیافت شده و تنها ۳ درصد جهت کاربردهای ناشناخته استفاده شد، یا در محل دفن زباله قرار گرفت (پوتی، ۲۰۲۰).

شکل ۲، درصد آسفالت بازیافتی موجود را نشان می‌دهد که برای ساخت مخلوط‌های جدید بازیافت شده است. در این کشورها، در مجموع، ۲۷/۴ میلیون تن آسفالت بازیافتی موجود بود که از این مقدار، ۶۴ درصد



شکل ۲. کاربرد آسفالت بازیافتی در ۱۴ کشور اروپایی ارائه دهنده داده‌ها در سال ۲۰۲۰ (پوتی، ۲۰۲۰)

اندودکننده مصالح سنگی، بادوام بوده و به سفت‌شدگی در اثر گذشت زمان مقاوم می‌باشند. در نتیجه، این مخلوط‌ها نسبت به ترک‌خوردگی زود هنگام، جدا شدن دانه‌ها و آسیب‌دیدگی و خرابی ناشی از رطوبت مقاوم هستند (زالی و همکاران، ۲۰۲۲). علاوه بر پایداری خوب و دوام، خدمت‌دهی طولانی‌مدت و عمر زیاد مخلوط را تضمین می‌نمایند (کاردوسو و همکاران، ۲۰۲۳).

همچنین، آسفالت با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای اگرچه به دلیل دوام، مقاومت زیاد در برابر خستگی و پوسیدگی معروف است، اما مسائلی مانند قیرزدگی، ریزش قیر و پیری زودرس در مخلوط رخ می‌دهد زیرا محتوای قیر بالایی دارد و به دلیل ساختارش دانه‌بندی آن دارای فضای خالی است. برای مواجهه با این مشکلات مؤثر در مخلوط، مواردی مانند مواد افزودنی، جوان‌کننده و الیاف

مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای به عنوان لایه رویه بادوام و مقاوم در مقابل شیارشدگی مطرح می‌باشند (امامی و همکاران، ۲۰۲۳). فضای خالی این گونه مخلوط‌ها با ملاتی از قیر، ماسه شکسته، فیلر و الیاف پُر می‌گردد (فخری و همکاران، ۲۰۲۲). به طور کلی، استفاده از الیاف به منظور جلوگیری از جاری شدن قیر و متعاقب آن افزایش ضخامت پوشش قیری می‌باشد که در نتیجه آن سرعت اکسید شدن مخلوط کاهش می‌یابد (کریمی و همکاران، ۲۰۲۰). علاوه بر این، در مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای، الیاف به عنوان ریزتسلیح‌کننده ملات نیز عمل می‌کنند و باعث پایداری مخلوط و افزایش مقاومت در مقابل شیارافتادگی می‌گردند (راج و رامش، ۲۰۲۴). این آسفالت‌ها به علت درصد فضای خالی کم و ضخامت زیاد قشر قیر

به مخلوط افزوده شده است (ایمانی‌نسب و همکاران، ۲۰۲۲؛ پرادهان و همکاران، ۲۰۲۳).

به طور کلی، استفاده از RAP در مخلوط‌های آسفالتی جدید، نیاز به کاربرد قیر جدید را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهد (انوشا و همکاران، ۲۰۲۱). کامبوزیا و همکاران (۲۰۲۱) پارامترهای مختلف مخلوط شاهد با پارامترهای ۴/۸ درصد نانوسیلیس در مخلوط آسفالتی را با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای اصلاح شده حاوی ۲۰ درصد تراشه آسفالتی بازیافتی مقایسه کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که تراشه آسفالت بازیافتی و نانوسیلیس، مدول ارتجاعی مخلوط را افزایش می‌دهند. بر اساس روش آشتو در طراحی روسازی، افزایش مدول ارتجاعی منجر به کاهش ضخامت رویه می‌گردد (اندرسون، ۲۰۱۷).

در برخی از ایالت‌های آمریکا، اجازه استفاده از درصد‌های زیاد تراشه آسفالت بازیافتی هنگامی داده می‌شود که این مصالح در منطقه برداشت‌شده استفاده شوند، زیرا در این صورت مصالح یک‌دست‌تر هستند و از تغییراتی که ممکن است از ترکیب چند دسته RAP مختلف که از مناطق مختلف به وجود آید، جلوگیری می‌شود. این تغییرات می‌تواند حاصل دانه‌بندی‌ها، قیرها و همچنین مصالح سنگی مختلف باشد (کوپلند، ۲۰۱۱). از سوی دیگر، نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که افزایش میزان تراشه‌های آسفالتی می‌تواند به کاهش نفوذ و افزایش سفتی منجر شود. این امر نشان‌دهنده سخت شدن ترکیب به دلیل وجود قیر پیرشده است و ممکن است به شکست زودرس در مخلوط‌های SMA منجر شود (نوفرینی، ۲۰۱۷؛ سلیمانی گل‌سفیدی و صحاف، ۲۰۲۲). همچنین، این مخلوط ممکن است به ترک‌خوردگی در دماهای کم، به‌ویژه در شرایط بارگذاری متغیر حساس‌تر باشد (فخری و همکاران، ۲۰۲۳). از سوی دیگر، ویژگی‌های RAP ممکن است بسته به منبع آن به طور قابل توجهی متفاوت باشد. تغییرات در کیفیت

RAP می‌تواند باعث افزایش حساسیت به رطوبت در برخی از مخلوط‌ها شود (رامچیچ و همکاران، ۲۰۲۳). در نتیجه، با توجه به گرم شدن مصالح جهت مخلوط مصالح آسفالتی، تراشه‌های آسفالتی مجدداً دچار پیری شده و سبب ترد و شکننده شدن مخلوط آسفالتی می‌شوند. در نهایت، این مخلوط دچار ضعف در ترک‌خوردگی، به‌خصوص در دمای کم، می‌شود. به همین دلیل، با وجود مزایای ذکر شده برای آسفالت‌های بازیافتی، عملکرد ناپایدار و پتانسیل افزایش سختی و ترک‌خوردگی آن‌ها باید به دقت مدیریت شود تا از دوام و طول عمر روسازی‌های با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای اطمینان حاصل گردد.

در پژوهش حاضر، به بررسی خصوصیات شکست مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای در دمای کم (۱۲- درجه سلسیوس) و خستگی مخلوط در دمای متوسط (۲۵ درجه سلسیوس) پرداخته شده است. بدین منظور، از مقادیر مختلف (صفر، ۱۵ و ۳۰ درصد) تراشه‌های آسفالت بازیافتی به عنوان جایگزین سنگدانه در مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای استفاده شده و تأثیرات این جایگزینی در مشخصات مخلوط‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. مواد و مصالح مصرفی

در این قسمت، مواد و مصالح به‌کار برده شده در ساخت نمونه‌ها شامل مصالح سنگی، قیر، مصالح تراشه آسفالت بازیافتی، فیلر، الیاف و جوانساز ذکر شده و همچنین مشخصات فیزیکی و مکانیکی هر یک از آن‌ها ارائه شده است.

۲-۱. مشخصات سنگدانه‌های مصرفی

سنگدانه‌های به‌کار برده شده برای ساخت نمونه‌های آسفالتی این پروژه از جنس مصالح سنگی آهکی از معدن شن و ماسه شرکت ساخت راه سپاهان واقع در شمال

استان اصفهان می‌باشد. مرغوبیت مصالح سنگی مورد آزمایش قرار گرفته شده و نتایج خصوصیات این مصالح سنگی در جدول ۱ آورده شده است.

۲-۲. مشخصات قیر مصرفی

قیر به‌کار رفته در این مطالعه از نوع قیر خالص ۶۰-۷۰ بوده که از شرکت نفت پاسارگاد پالایشگاه تهران تهیه شده است. آزمایش‌های رایج قیر روی نمونه قیر انجام شده که نتایج آنها در جدول ۲ درج گردیده است.

۲-۳. فیلر

فیلر به عنوان پرکننده‌ی فضای خالی در مخلوط‌های

آسفالتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. هرچه مخلوط آسفالتی دارای فضای خالی و تخلخل کمتری باشد، استحکام آن بیشتر می‌شود و مخلوط آسفالتی ساخته شده با آن دارای حالتی ترد و شکننده نیست و به‌راحتی در برابر بار تسلیم نمی‌شود (بلای و همکاران، ۲۰۲۱). در آسفالت‌های با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای، با توجه به درصد زیاد استفاده از فیلر، نوع و خصوصیات فیلر نقش مهمی در میزان مقاومت مخلوط آسفالتی خواهد داشت (نشریه ۲۰۶ وزارت راه و شهرسازی ایران، ۲۰۰۰؛ زانگوینیا و همکاران، ۲۰۲۳). در این پژوهش، از پودر سنگ آهک به‌عنوان فیلر استفاده شد.

جدول ۱. مشخصات مصالح سنگی مصرفی

آزمایش مورد نیاز دانه‌های سنگی	شماره استاندارد	نوع مخلوط	نتایج (%)
ارزش ماسه‌ای	AASHTO-T176	ریزدانه	۶۳
افت وزنی در برابر سایش به روش لُس آنجلس	AASHTO-T96	درشت‌دانه	۲۴
درصد شکستگی مصالح روی الک شماره ۴ در یک جهت	ASTM-D3625	درشت‌دانه	۱۰۰
درصد شکستگی مصالح روی الک شماره ۴ در دو جهت	ASTM-D3625	درشت‌دانه	۹۹
درصد اندود قیر به مصالح سنگی	ASTM-D3625	درشت‌دانه	>۹۵
درصد تطویق	BS-812	درشت‌دانه	۲۲
درصد تورق	BS-812	درشت‌دانه	۲۶
گوشه‌داری	ASTM-C1252	ریزدانه	۴۱
درصد افت وزنی در برابر سولفات سدیم	AASHTO-T104	ریزدانه	۰/۷
درصد افت وزنی در برابر سولفات سدیم	AASHTO-T104	درشت‌دانه	۰
درصد افت وزنی در برابر ضربه	-	درشت‌دانه	۰
درصد افت وزنی در برابر فشار	-	درشت‌دانه	۰
درصد جذب آب مصالح مانده روی الک شماره ۸	AASHTO-T85	درشت‌دانه	۰/۷
درصد جذب آب مصالح عبوری از الک شماره ۸ و مانده روی الک شماره ۲۰۰	AASHTO-T84	ریزدانه	۱/۷

جدول ۲. نتایج آزمایش‌های رایج روی قیر مصرفی

نتایج	مشخصات استاندارد	روش آزمایش		آزمایش‌های قیر خالص
		AASHTO	ASTM	
۱/۰۱۴		T228	D70	وزن مخصوص (25 °C)
۶۷	۶۰-۷۰	T49	D5	درجه نفوذ (25 °C)
۹۹/۸۸	بیش از ۹۹	T44	D2042	حلالیت در تتراکلرید کربن
بیش از ۱۰۰	بیش از ۱۰۰	T51	D113	مقدار کشش برحسب سانتی‌متر (25 °C)
۳۰۶	بیش از ۲۳۲	T48	D92	درجه اشتعال (°C)
۵۰/۳		T53	D36	حداقل نرمی (ساچمه - حلقه) (°C)
۷۶۵		T201	D2170	کند روانی کینماتیک در دمای ۱۲۰ °C (سانتی استوکس)
۳۲۳		T201	D2170	کند روانی کینماتیک در دمای ۱۳۵ °C (سانتی استوکس)
۱۰۸		T201	D2170	کند روانی کینماتیک در دمای ۱۶۰ °C (سانتی استوکس)

۲-۴. تراشه‌های آسفالت بازیافتی

در این پژوهش، تراشه آسفالت بازیافتی با کمک شرکت مهندسی کندوان پارس از دپوی واقع در معدن اسب‌چران شهر دماوند تهیه شد. تراشه‌های آسفالت پس از انتقال به آزمایشگاه قیر و آسفالت دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی ایران، نمونه‌برداری شده و مشخصات آنها به شرح زیر ارائه می‌شود.

این تراشه‌های آسفالتی برای استفاده ابتدا تحت

آزمایش اکسترکشن^۱ قرار گرفتند. هدف از انجام این کار محاسبه قیر موجود در مخلوط مصالح تراشه آسفالت برای آماده‌سازی طرح مخلوط بود. پس از انجام آزمایش تجزیه تراشه آسفالت الک شده و سنگدانه‌های باقی‌مانده تحت آزمایش دانه‌بندی قرار گرفتند که نتایج به‌دست آمده از این آزمون در جدول ۳ قابل مشاهده است. همچنین، درصد قیر بازیابی شده با دانه‌بندی مذکور طی آزمون اکسترکشن ۴/۳۴ درصد به‌دست آمد.

جدول ۳. تعیین ضریب شکل برای نمونه‌های نیم‌دایره خمشی

شماره الک	درصد عبوری
الک ۱/۲	۱۰۰
الک ۳/۸	۸۷/۴
الک شماره ۴	۴۱/۲
الک شماره ۸	۲۹/۵
الک شماره ۱۶	۲۱
الک شماره ۳۰	۱۶/۵
الک شماره ۵۰	۱۱/۱
الک شماره ۱۰۰	۳/۴
الک شماره ۲۰۰	۳

1- Extraction

۲-۵. الیاف

در این پژوهش، از دو نوع الیاف محصول شرکت دانش بنیان نانو نخ سیرجان استفاده شده است. این الیاف سلولزی یکی از بهترین افزودنی‌ها به عنوان تثبیت‌کننده آسفالت‌های با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای هستند. این الیاف مواد دانه‌ای شکل شده‌ای است که از مواد بسیار مرغوب، بدون استفاده از مواد دگرگون‌کننده، تشکیل می‌شود و هم‌زمان قیر نیز ندارد و جهت جلوگیری از جداشدگی لایه پیوند آسفالت و مواد معدنی در جریان تولید آسفالت و همچنین برای جلوگیری از شکست مخلوط آسفالتی طی فرآیند حمل و نگهداری استفاده می‌شود.

۲-۶. جوانساز

جوانسازها در سال‌های اخیر به‌عنوان افزودنی‌هایی برای بازیابی خواص قیرهای دچار پیرشدگی در مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده‌اند (لین و همکاران، ۲۰۱۱؛ مانجیافیکو و همکاران، ۲۰۱۶). با توجه به وجود

پیرشدگی در قیر موجود در تراشه‌های آسفالتی، در این پژوهش، به بررسی نیاز یا عدم نیاز کاربرد این نوع روغن جوانساز در مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده نیز پرداخته شده است.

در این تحقیق، از روغن فورفورال اکسترکت^۱ به عنوان جوانساز استفاده شده است. این روغن، ترکیباتی است حاوی آروماتیک زیاد، حاصل از فرآیند جداسازی با حلال فورفورال که به منظور بهبود خواص روغن پایه در دماهای زیاد و کاهش هزینه‌ها در تولید محصول نهایی به‌کار می‌رود. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی این جوانساز در جدول ۴ ارائه شده است.

برای تعیین درصد بهینه روغن جوانساز، ابتدا قیر موجود در تراشه‌های آسفالتی بازیابی شد. سپس با استفاده از آزمایش‌های استاندارد، از جمله درجه نفوذ و نقطه نرمی، خواص قیر بازیابی شده مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج این آزمون‌ها، میزان بهینه روغن جوانساز ۱۸ درصد محاسبه شد، به گونه‌ای که بتواند خواص قیر را به حالت اولیه و قابل قبول برگرداند.

جدول ۴. مشخصات فنی روغن RPO تهیه شده توسط شرکت نفت ایرانول

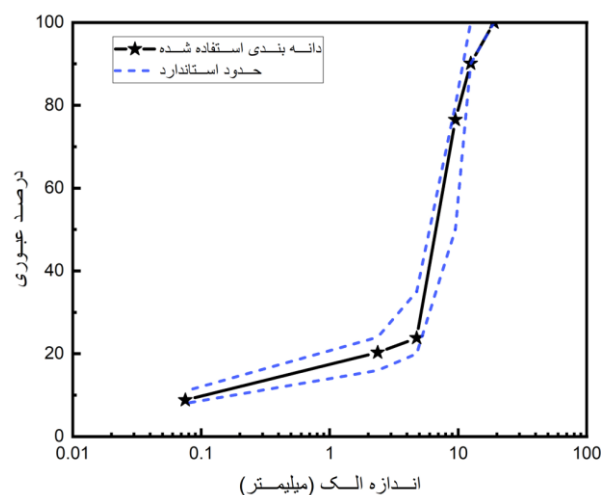
نتایج	روشن آزمایش ASTM	مشخصات فیزیکی و شیمیایی
کمتر از ۲۵۰	D-92	نقطه اشتعال (°C)
بیش از ۳۵	D-97	نقطه ریزش (°C)
۹۹۵	D-1298	وزن مخصوص (°C) (۱۵/۶)
بین ۴۰ تا ۶۰	IP-2	نقطه آنیلین (°C)
۴	D-2622	میزان گوگرد (wt %)
۰/۵	D-482	میزان خاکستر (wt %)
۴۰	D-3238	کربن C_A
۲۵	D-3238	کربن C_N

1- RPO

۷-۲. طرح اختلاط

مخلوط‌های آسفالتی گرم و بتن آسفالتی، آسفالت گرم مخلوطی از مصالح سنگی و قیر خالص است که با توجه به نوع دانه‌بندی و قیر مصرفی در دماهای بین ۸۰ تا ۱۷۰ درجه سلسیوس در کارخانه آسفالت تولید و در حالت گرم روی سطوح آماده شده راه پخش و کوبیده می‌شود. مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای (SMA) نیز از انواع مخلوط‌های آسفالتی گرم می‌باشند.

در این گونه مخلوط‌ها، مصالح سنگی درشت‌دانه مستقیماً با یکدیگر در تماس بوده و ایجاد قفل و بست می‌نمایند. به عبارت دیگر، تماس مستقیم سنگدانه به سنگدانه عامل اصلی پایداری و مقاومت است. منحنی مخلوط مصالح سنگی به کار رفته در طرح با توجه به محدوده دانه‌بندی با حداکثر اندازه اسمی ۱۹/۵ میلی‌متر جدول ۳-۱۳- نشریه ۲۳۴ در شکل ۳ ترسیم شده است.



شکل ۳. دانه‌بندی مصالح سنگی استفاده شده

۸-۲. مشخصات مخلوط آسفالتی

برای ساخت نمونه، ابتدا مصالح سنگی طبیعی به مدت ۱۲ ساعت در داخل گرمخانه با دمای ۱۶۰ درجه سلسیوس قرار گرفته و قیر نیز جداگانه تا دمای ۱۴۰ درجه سلسیوس در گرمخانه گرم شد. تراشه‌های آسفالت بازیافتی به دلیل اینکه در دمای زیاد ممکن است به قیر آنها آسیب برسد به مدت یک ساعت در دمای ۱۴۰ درجه قرار گرفتند. سپس جوانساز به تراشه‌های آسفالت اضافه شد و پس از آن با مصالح سنگی و قیر جدید طبق طرح اختلاط مخلوط شدند.

مقدار قیر بهینه مخلوط آسفالتی مطابق با دستورالعمل

نشریه ۲۰۶ وزارت راه و شهرسازی ایران با توجه به دانه‌بندی مصالح و آزمون مارشال برابر ۶/۵ درصد نسبت به وزن مخلوط آسفالتی به دست آمد، که فضای خالی نظیر این میزان قیر نیز ۴ درصد می‌باشد. همچنین، حداکثر وزن مخصوص تئوری مخلوط آسفالتی بر اساس روش استاندارد^۱ برابر ۲/۴۰۳ تعیین گردید. مقدار جذب قیر مخلوط مصالح سنگی برابر ۰/۳۰ درصد محاسبه شد.

۹-۲. تهیه نمونه نیم‌دایره خمشی^۲

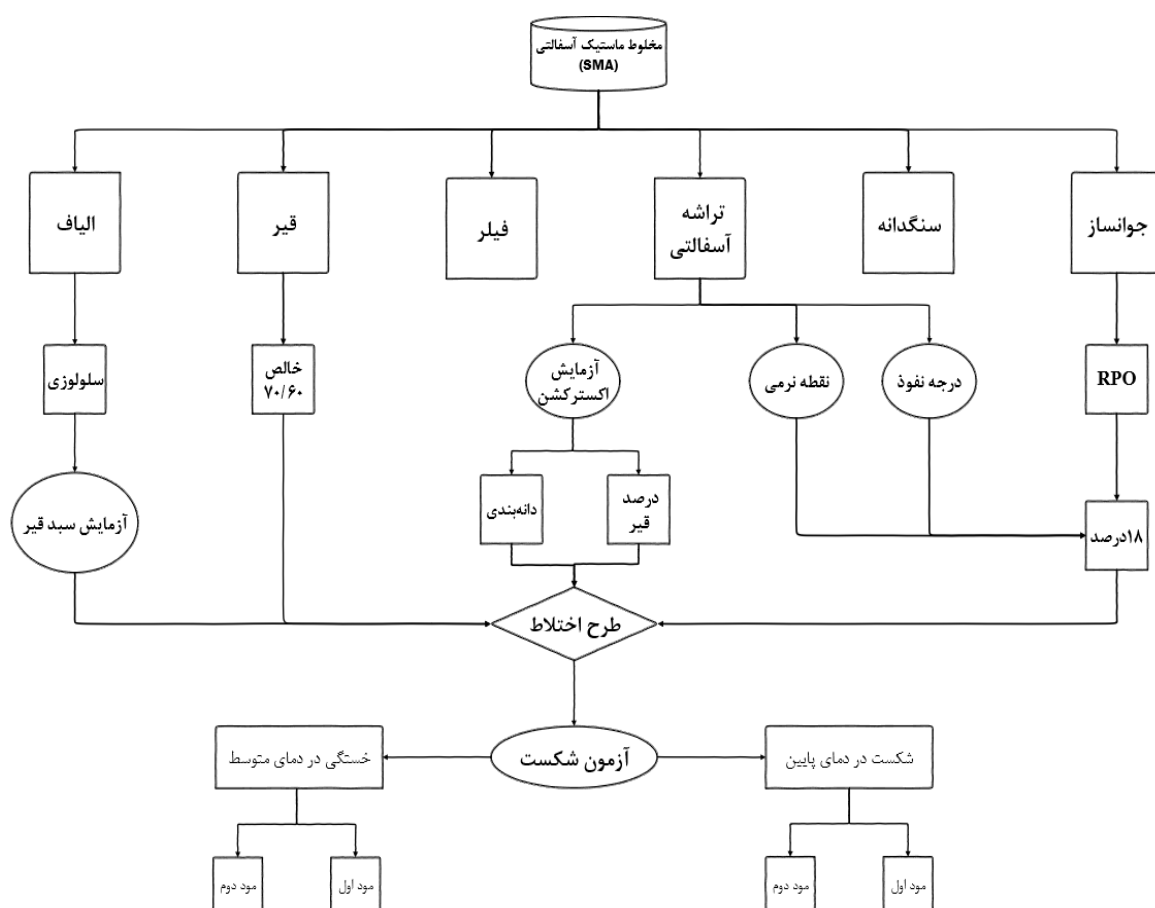
در این پژوهش، ابتدا نمونه‌های آسفالتی استوانه‌ای به قطر ۱۵۰ میلی‌متر با وزن مصالح سنگی حدود ۵ کیلوگرم

برش با دیسک گردان استوانه به ابعاد مورد نیاز برش داد و به حلقه‌هایی با ضخامت ۵۰ و ۲۵ میلی‌متر تبدیل کرد. در انتها، با ایجاد شکاف به ضخامت یک میلی‌متر و عمق ۱۵ میلی‌متر نمونه مورد نظر تهیه گردید.

شکل ۴، فلوچارت مواد و مصالح مصرفی برای طرح مخلوط و آماده‌سازی نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

تولید و با استفاده از دستگاه متراکم‌کننده لرزشی متراکم شدند و با تعداد ۱۱۰ دوره‌ای چرخش، زاویه داخلی قالب نمونه ۱/۱۶ درجه و فشار ۶۰۰ کیلوپاسکال، متراکم گردیدند.

برای تهیه نمونه‌های نیم‌دایره‌ای آزمون خمش سه-نقطه‌ای، ابتدا باید نمونه‌های استوانه‌ای را به کمک دستگاه



شکل ۴. فلوچارت مواد و مصالح مصرفی جهت طرح مخلوط و آماده‌سازی نمونه‌ها

۳-۱. پتانسیل شکست با آزمون شاخص انعطاف-

پذیری ایلینوئیز^۱

آزمون پتانسیل شکست، ویژگی‌های مقاومت در برابر ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی در دماهای متوسط در مود اول بارگذاری (حالت باز شدن کششی در حین

۳. روش تحقیق

در این پژوهش، برای آزمایش‌های شکست مخلوط‌های آسفالتی در دو دمای ۲۵ و منفی ۱۲ درجه سانتی‌گراد در مودهای شکست اول و دوم به شرح زیر انجام شد.

متفاوت باشد (در این رابطه، G_f انرژی شکست برحسب ژول بر متر مربع، W_f کار نیروی شکست برحسب ژول، $Area_{lig}$ ناحیه اتصال برحسب میلی‌متر مربع، r شعاع نمونه، t ضخامت نمونه و a عمق شکاف ایجاد شده برحسب میلی‌متر هستند):

$$G_f = \frac{W_f}{Area_{lig}} \times 10^6 \quad (1)$$

$$Area_{lig} = (r - a) \times t \quad (2)$$

شاخص انعطاف‌پذیری (FI) را می‌توان از پارامترهای به-دست آمده با استفاده از منحنی بار- تغییرشکل مطابق رابطه (۳) محاسبه کرد (آشتو، T393-21). ضریب A برای تبدیل واحد و مقیاس‌بندی استفاده می‌شود و مقدار آن برابر با ۰/۰۱ است (در این رابطه، $|m|$ حداکثر شیب نمودار نیرو- جابه‌جایی پس از نقطه نیروی حداکثر است):

$$FI = \frac{G_f}{|m|} \times A \quad (3)$$

۲-۳. تئوری و شرایط آزمون شکست در دمای کم

انرژی شکست نمونه‌های آسفالتی را می‌توان بر اساس مساحت زیر نمودار نیرو- جابه‌جایی تا نقطه حداکثر نیرو به دست آورد. در دماهای کم، نیرو به صورت خطی افزایش می‌یابد تا به نقطه اوج نمودار برسد (شکل ۵). سپس شکستگی شکننده شروع می‌شود و نیرو به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد تا صفر شود (سونگ و همکاران، ۲۰۲۱). در دمای کم، برای تجزیه و تحلیل اطلاعات از روش مکانیک شکست الاستیک خطی^۴ استفاده می‌شود. مقاومت شکست در مقاطع ترک‌خورده اغلب با مقادیر فاکتورهای شدت تنش بحرانی معرفی می‌شود که ضرایب شدت تنش بحرانی مود I و مود II، به ترتیب K_{If} و K_{IIIf} به صورت زیر محاسبه می‌شوند

انتشار ترک) را پوشش می‌دهد. در این بخش، نمونه‌ها به شکل خمشی نیم‌دایره‌ای آزمایش می‌شوند که روش تجزیه و تحلیل داده‌های مرتبط با این آزمون، انرژی شکست، منحنی نیرو- جابه‌جایی و شیب پس از اوج آن را تعیین می‌کند. این پارامتر برای ایجاد یک شاخص انعطاف‌پذیری^۱ برای پیش‌بینی مقاومت در برابر شکست مخلوط‌های آسفالتی در دمای متوسط استفاده می‌شود. از این شاخص انعطاف‌پذیری می‌توان به عنوان بخشی از فرآیند تأیید مخلوط آسفالتی بهره برد.

این آزمون برای نمونه‌های آزمایشی با حداکثر اندازه اسمی سنگدانه^۲ ۱۹/۵ میلی‌متر یا کمتر انجام می‌شود. نمونه‌های آزمایشگاهی متراکم شده و هسته‌های روسازی برداشته شده را می‌توان طبق این روش آزمایش کرد. تهویه نمونه‌های آزمایشی باید در حمام آب یا محفظه محیطی در دمای ۲۵ درجه سلسیوس به مدت دو ساعت آماده شوند. آزمایش با سرعت ۵۰ میلی‌متر در دقیقه انجام می‌شود. زمانی که نیروی بارگذاری به کمتر از ۰/۱ کیلونیوتن می‌رسد، آزمایش متوقف می‌شود (آشتو، T393-21).

کار نیروی شکست (W) به عنوان مساحت زیر منحنی بار- جابه‌جایی محاسبه می‌شود و اگر آزمایش قبل از رسیدن به ۰/۱ کیلونیوتن متوقف شود، باقیمانده منحنی بار- جابه‌جایی باید با تکنیک‌های برون‌یابی تولید شود. انرژی شکست طبق رویکرد ریل^۳ با استفاده از رابطه (۱) تعیین می‌شود که با تقسیم کار نیروی شکست بر ناحیه اتصال محاسبه می‌شود (آشتو، T393-21). در این بخش، باید در نظر گرفته شود که انرژی شکست یک مؤلفه وابسته به اندازه است. بنابراین، مقاومت در برابر ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی ممکن است زمانی که نسبت طول بریدگی به شعاع تغییر می‌کند، انرژی شکست

بارگذاری می‌شوند.

جدول ۵. تعیین ضریب شکل برای نمونه‌های نیم‌دایره خمشی (عامری و همکاران، ۲۰۱۲؛ آیت‌اللهی و همکاران، ۲۰۱۱)

مود بارگذاری	S_I	S_{II}	Y_I	Y_{II}
کششی (I)	50	50	3.734	0
برشی (II)	50	9	0	1.772

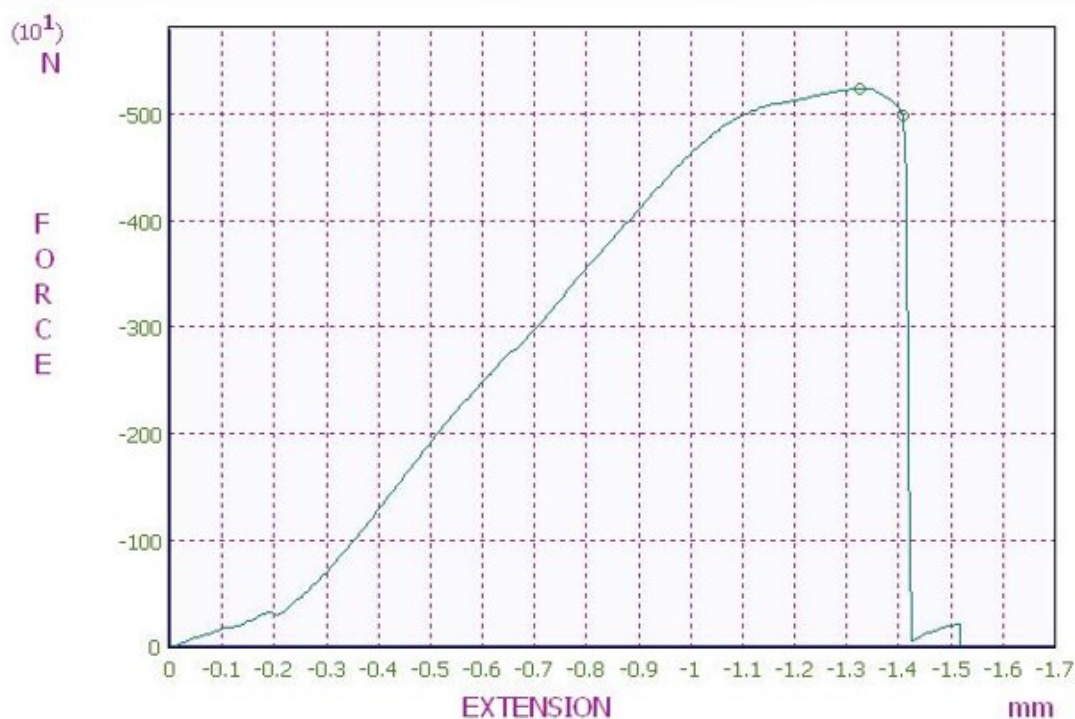
انجام آزمون شکست این گونه است که نمونه‌های مخلوط آسفالتی پس از تنظیم دمای فریزر برای ۱۲ ساعت در دمای منفی ۱۲ درجه سلسیوس نگهداری شدند تا تمام بخش‌های نمونه‌ها به دمای مورد نظر رسیده باشد و سپس با سرعت ۳ میلی‌متر بر ثانیه بارگذاری انجام شد.

(در این روابط، K_{If} و K_{IIf} شدت تنش بحرانی فاکتورهای مود شکست اول و دوم به ترتیب، Y_I و Y_{II} فاکتورهای شکل، R و t به ترتیب نشان‌دهنده شعاع و ضخامت، a عمق بریدگی و P_{cr} حداکثر بار ثبت شده در تجزیه و تحلیل شکست به دست آمده از هر مجموعه دما و مود است):

$$K_{If} = Y_I \frac{P_{cr}}{2Rt} \sqrt{\pi a} \quad (4)$$

$$K_{IIf} = Y_{II} \frac{P_{cr}}{2Rt} \sqrt{\pi a} \quad (5)$$

Y_I و Y_{II} در این مطالعه با استفاده از نمودارهای مدل‌های المان محدود ارائه شده توسط آیت‌اللهی و همکاران (۲۰۱۱) تعیین شد. در حین انجام آزمون، فاصله تکیه-گاه‌ها برای هر نمونه با توجه به مقدار S_1 و S_2 ، از قبل تنظیم گشته و پس از آن نمونه‌ها با نرخ بارگذاری ثابت به صورت خمشی سه نقطه‌ای تا لحظه شکست و رشد ترک



شکل ۵. نمونه‌ای از منحنی بار-جاب‌جایی در دمای کم

مودهای مختلف بارگذاری

۳-۳. تئوری و شرایط آزمون شکست تحت

مودهای مختلف بارگذاری شکست (مود خالص I ، II ، و

و شیب نمودار بار-جاب‌جایی پس از اوج آن (m) را تعیین می‌کند. این پارامترها برای تعیین شاخص انعطاف-پذیری (FI) برای پیش‌بینی مقاومت در برابر شکست مخلوط‌های آسفالتی در دماهای متوسط استفاده می‌شوند. از شاخص انعطاف‌پذیری می‌توان به عنوان بخشی از فرآیند تأیید مخلوط آسفالت بهره برد، به طوری که هرچه عدد این شاخص بزرگتر باشد، کارایی مخلوط آسفالتی تهیه شده در برابر ترک‌خوردگی بیشتر است.

۴-۱-۱. نتایج میزان نیرو در نقطه اوج

همان‌طور که در شکل‌های ۶ و ۷ قابل مشاهده است، افزایش میزان جایگزینی تراشه آسفالت بازیافتی بدون افزودن روغن جوانساز موجب افزایش حداکثر مقاومت در برابر ترک‌خوردگی نمونه‌های آسفالتی شد. این امر را بدین گونه می‌توان توجیه کرد که با افزایش درصد جایگزینی تراشه‌های آسفالت بازیافتی، سفتی مخلوط‌ها افزایش پیدا کرده و بنابراین افزایش حداکثر نیروی مقاومت و افزایش حداکثر شیب پس از نقطه اوج را در پی خواهد داشت.

مود ترکیبی I/II را می‌توان با تنظیم موقعیت تکیه‌گاه در دسترس قرار داد. پارامتر M^e می‌تواند برای توصیف نسبت بین موده‌های خالص I و II استفاده شود و M^e را می‌توان از معادله زیر به دست آورد:

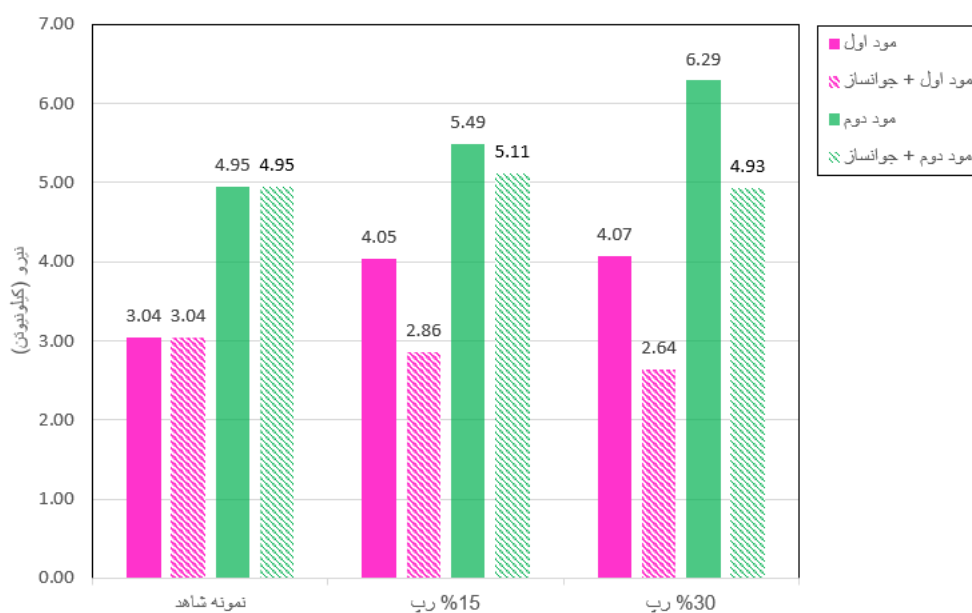
$$M^e = \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{K_I}{K_{II}} \right) \quad (6)$$

۴. بررسی و تحلیل نتایج

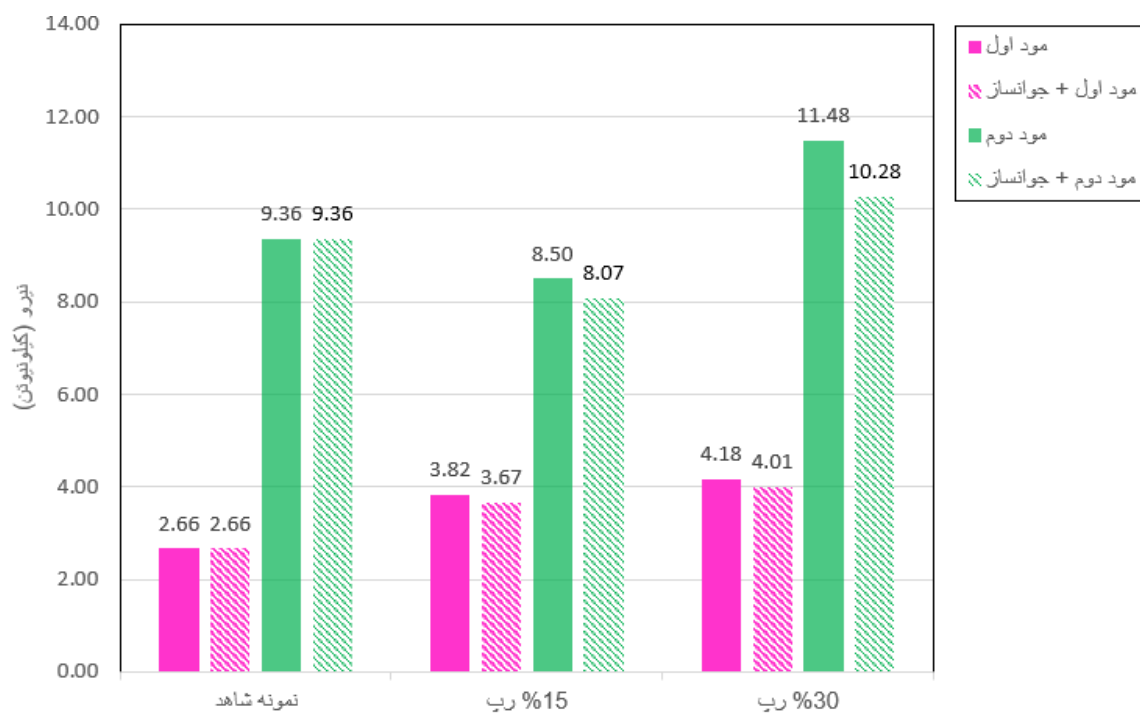
در این بخش، با استفاده از مفاهیم آسفالت با دانه‌بندی سنگدانه‌ای به بررسی و مقایسه نتایج حاصل از آزمایش‌ها پرداخته و سپس تأثیر افزایش درصد تراشه آسفالتی و استفاده یا عدم استفاده از مواد جوانساز در مقاومت ترک-خوردگی نمونه‌های آسفالتی موجود تحلیل شده است.

۴-۱. پارامترهای آزمون شکست

آزمون مقاومت شکست خمشی سه‌نقطه‌ای، یک آزمون سریع و به نسبت کم‌هزینه به وسیله نمونه‌های خمشی نیم‌دایره‌ای است که با تجزیه و تحلیل داده‌های مرتبط با این آزمون، حداکثر نیرو (P)، انرژی شکست (G_f)، ضریب شدت تنش (Kc)، منحنی بار-جاب‌جایی (LLD)



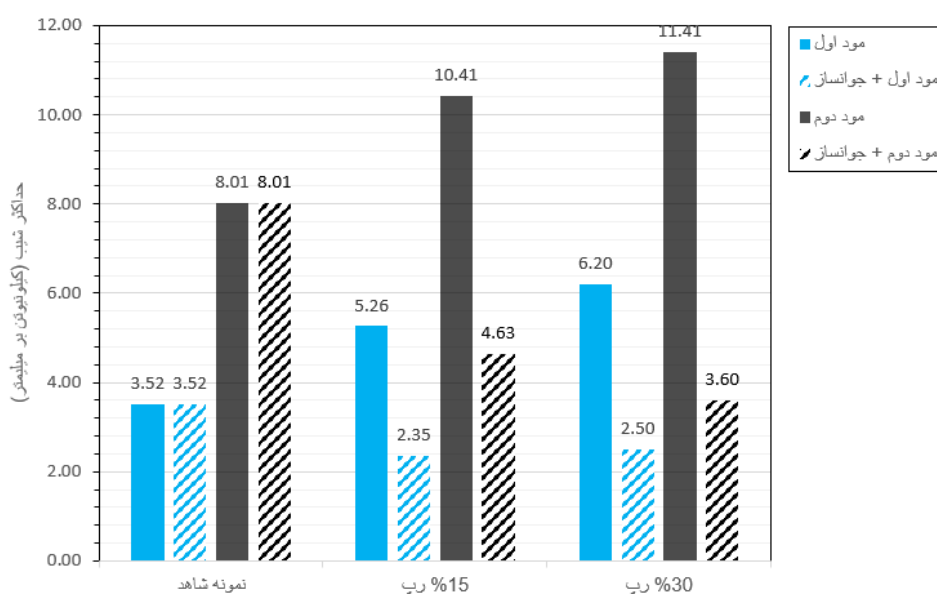
شکل ۶. حداکثر نیروی وارده تحت آزمون شکست در دمای متوسط



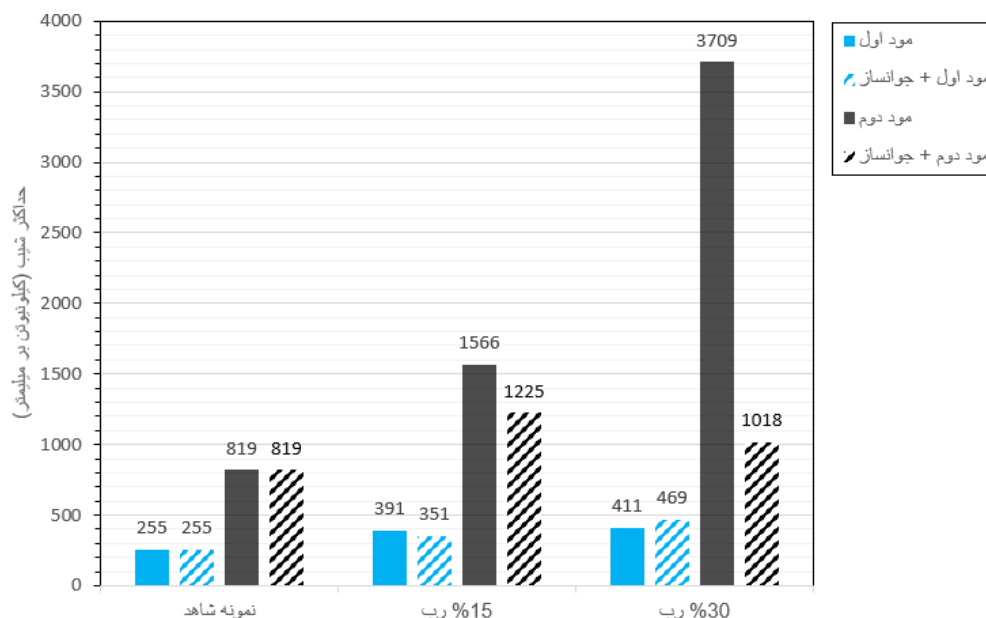
شکل ۷. حداکثر نیروی وارده تحت آزمون شکست در دمای کم

روغن جوائن ساز بیش از نمونه شاهد و در صورت استفاده از روغن جوائن ساز کمتر از نمونه شاهد است. این امر به دلیل تغییر رفتار الاستوپلاستیک قیر مخلوط های آسفالتی پس از افزودن روغن جوائن ساز می باشد.

۴-۱-۲. شیب پس از اوج نمودار بار- جابه جایی همانطور که در شکل های ۸ و ۹ مشاهده می گردد، در دمای متوسط، پس از افزودن تراشه آسفالتی، میزان حداکثر شیب نمودار پس از نقطه اوج، بدون استفاده از



شکل ۸. حداکثر شیب پس از اوج منحنی بار- جابه جایی در دمای متوسط



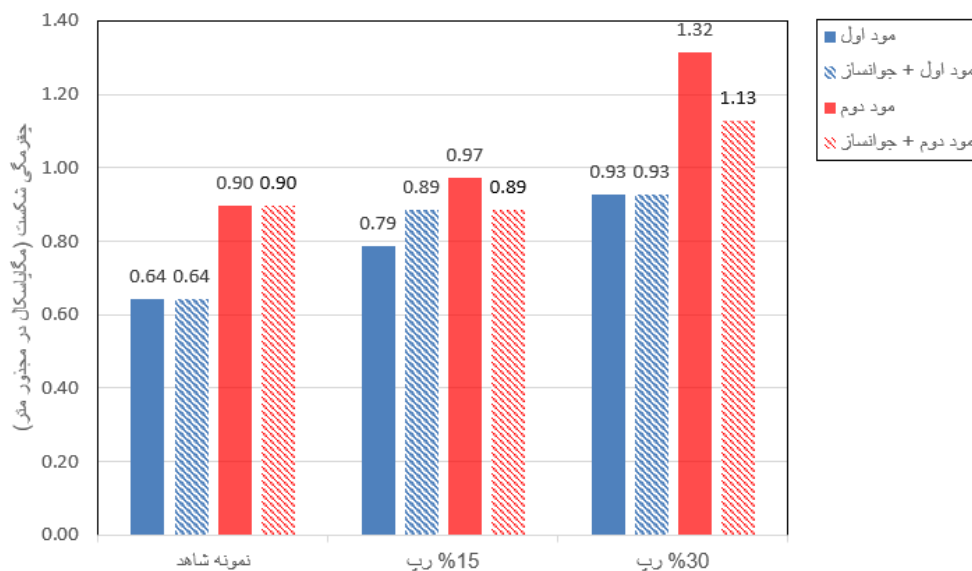
شکل ۹. حداکثر شیب پس از اوج منحنی بار-جاب‌جایی در دمای کم

۴-۱-۴. ضریب شدت تنش

شکل ۱۰، فاکتورهای شدت تنش بحرانی به‌دست آمده در زمان اوج بار برای هر دو حالت بارگذاری مود I و مود II در دمای سرد را نشان داده و مقایسه می‌کند. چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی در مود بارگذاری برشی اغلب نمونه‌ها بیشتر از بارگذاری خمشی است. به طور کلی، در صورت افزایش درصد جایگزینی تراشه آسفالتی، بدون استفاده از روغن جوائساز، مقدار ضریب شدت تنش بحرانی بیشتری نسبت به نمونه‌های حاوی روغن جوائساز در هر دو مود بارگذاری را در پی خواهد داشت که این افزایش انرژی در بارگذاری تحت مود برشی کاملاً مشهود است. به طور کلی، در صورت بالاتر بردن درصد جایگزینی تراشه آسفالتی با و بدون استفاده از جوائساز، میزان ضریب شدت تنش بحرانی نسبت به نمونه شاهد افزایش خواهد داشت. این روند تغییرات با نتایج سلیمانی گل‌سفیدی و صحاف نیز مطابقت داشت.

۴-۱-۳. انرژی شکست

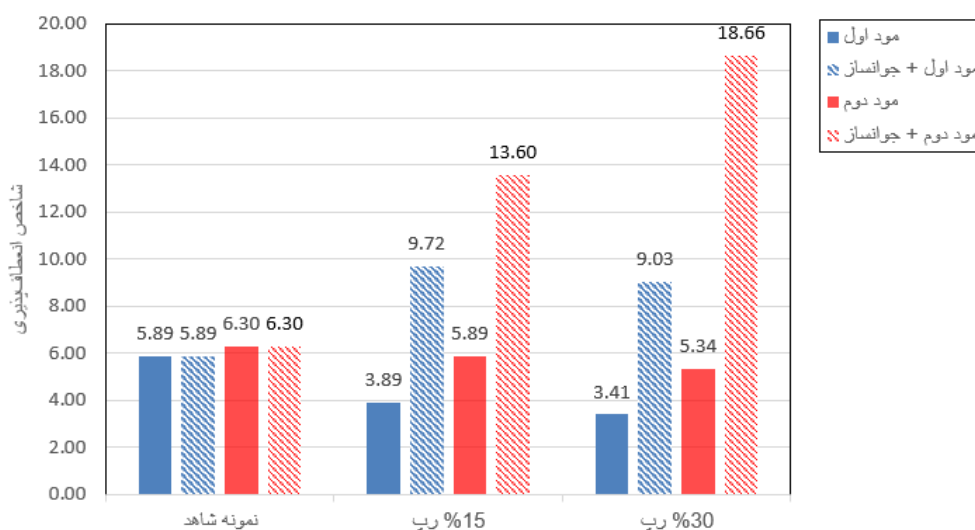
انرژی شکست یکی از پارامترهایی است که برای محاسبه شاخص انعطاف‌پذیری استفاده می‌شود، که بیشتر برای پیش‌بینی پتانسیل شکست مخلوط آسفالتی به‌کار می‌رود. انرژی شکست در مخلوط‌ها پس از افزودن تراشه آسفالتی بدون استفاده از روغن جوائساز کمتر از نمونه‌های حاوی روغن جوائساز است. در دمای کم و در بارگذاری کششی، انرژی شکست همه مخلوط‌ها و در بارگذاری برشی فقط مخلوط‌های با جایگزینی ۱۵ درصد نسبت به نمونه شاهد، مقدار بهتری از خود نشان داده‌اند. با افزایش مقدار تراشه آسفالتی در هر دو دانه‌بندی، در صورت استفاده از جوائساز، انرژی شکست افزایش و در صورت عدم استفاده کاهش می‌یابد. میزان انرژی شکست در دماها و مودهای بارگذاری مختلف در بخش‌های ۴-۲ و ۴-۳ به طور کامل مورد بررسی قرار گرفته و مقایسه گردیده‌اند.



شکل ۱۰. چقرمگی شکست در دمای سرد

۴-۱-۵. شاخص انعطاف پذیری

به کمک پارامترهای شکست و نمودار بار-جابجایی، پارامتر حداکثر شیب نمودار پس از نقطه اوج به دست آمده و فاکتور FI مخلوط آسفالتی محاسبه می‌شود. شاخص انعطاف پذیری نشانه‌ای است برای شناسایی شکنندگی مخلوط‌هایی که ممکن است مستعد ترک خوردگی زودرس باشند. مطابق شکل ۱۱، شاخص انعطاف پذیری مخلوط‌های آسفالتی در مود بارگذاری برشی و خمشی تفاوت چندانی با یکدیگر نداشته و اغلب دارای مقادیر نزدیک به هم و برابری هستند. به طور کلی، در بارگذاری مود کششی، در صورت بیشتر بودن درصد جایگزینی تراشه آسفالتی با و بدون استفاده از جوائنساز، شاخص انعطاف پذیری نسبت به نمونه شاهد افزایش و در بارگذاری مود برشی شاخص انعطاف پذیری نسبت به نمونه شاهد کاهش میزان این پارامتر را در پی خواهد داشت.



شکل ۱۱. شاخص انعطاف پذیری آزمون شکست در دمای متوسط

۴-۲. مقایسه نتایج نیرو و انرژی شکست در

مودهای مختلف بارگذاری

نتایج به‌دست آمده از آزمون خمش سه‌نقطه‌ای در دماهای ۲۵ و منفی ۱۲ درجه سلسیوس در شکل ۱۰ ارائه شده و نتایج بارگذاری در مودهای اول و دوم با یکدیگر مقایسه گشته است.

مطابق شکل ۱۲، در دمای متوسط، حداکثر نیروی وارده به نمونه‌ها در مود دوم بارگذاری بیشتر بوده و در این مود بارگذاری تأثیر نوع دانه‌بندی تراشه‌های آسفالت بازیافتی جایگزین بیشتر شده و این اختلاف نیرو به سادگی قابل مشاهده است. در صورت افزایش درصد جایگزینی تراشه آسفالتی، بدون استفاده از روغن جوانساز، حداکثر مقاومت در برابر ترک‌خوردگی بیشتری نسبت به نمونه شاهد در هر دو مود بارگذاری را در پی خواهد داشت که نتایج مطالعات ورونا و همکاران (۲۰۲۲) نیز این ادعا را تأیید می‌کند. مقدار افزایش حداکثر نیرو حین افزایش میزان جایگزینی تراشه آسفالت بازیافتی با استفاده از جوانساز به مقدار کمی دچار تغییرات شده، ولی به طور کلی تأثیر به‌سزایی در نتایج ندارد.

در دمای سرد، حداکثر نیروی وارده به نمونه‌ها در مود دوم بارگذاری بیشتر بوده و در این مود بارگذاری تأثیر نوع دانه‌بندی تراشه‌های آسفالت بازیافتی جایگزین بیشتر شده و این اختلاف نیرو به سادگی قابل مشاهده است. به طور کلی، در صورت افزایش درصد جایگزینی تراشه آسفالتی، بدون استفاده از روغن جوانساز، حداکثر مقاومت در برابر ترک‌خوردگی بیشتری نسبت به نمونه‌های حاوی روغن جوانساز در هر دو مود بارگذاری را در پی خواهد داشت که این افزایش مقاومت در بارگذاری تحت مود برشی کاملاً مشهود است.

پارامتر انرژی شکست نمونه‌ها در دمای متوسط در مود دوم بارگذاری تقریباً سه برابر بارگذاری در مود اول است. مقدار انرژی شکست حین جایگزینی تراشه

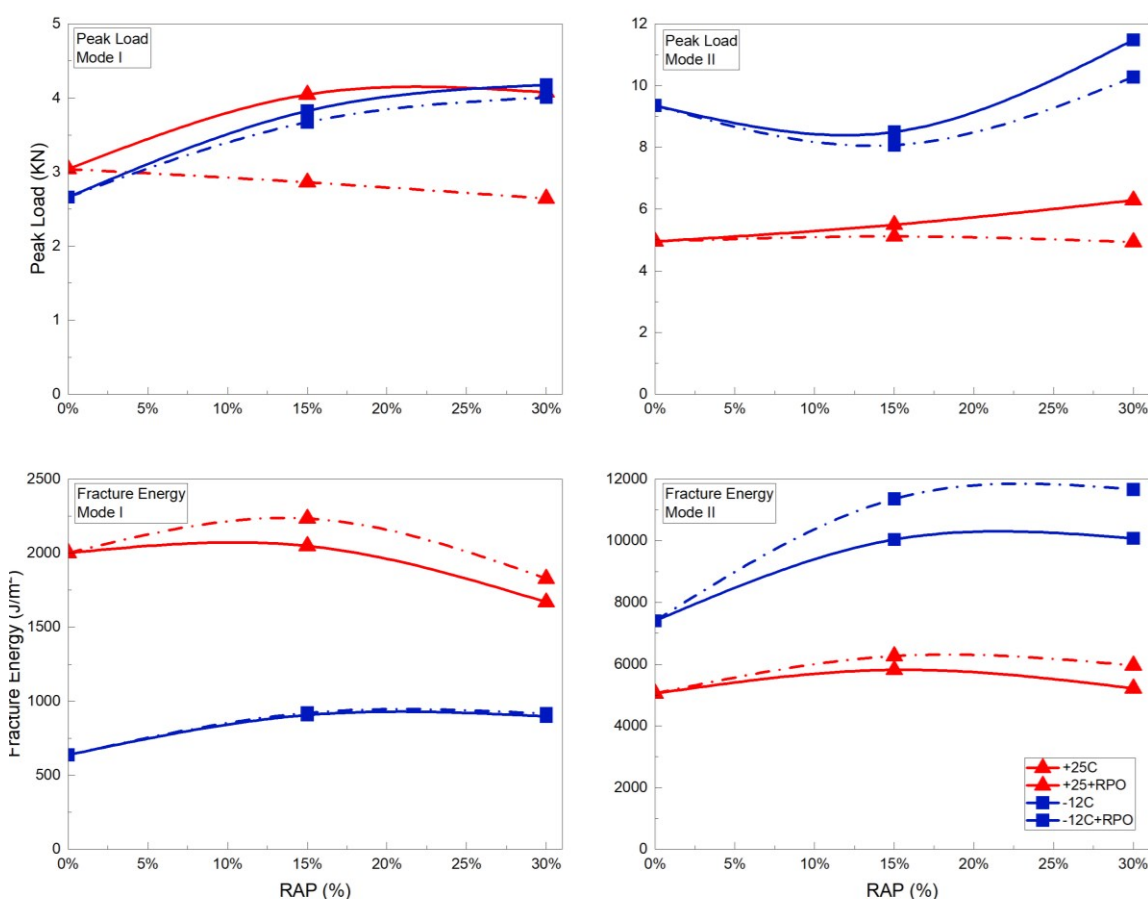
آسفالت بازیافتی از صفر تا ۱۵ درصد با استفاده از جوانساز به مقدار کم و در حالت بدون استفاده از جوانساز کمی بیشتر است که ممکن است به دلیل افزایش سهم رفتار الاستیک مخلوط باشد. به‌طور کلی، در بارگذاری مود برشی، در صورت افزودن تراشه آسفالتی، هم با و هم بدون استفاده از جوانساز، انرژی شکست بیشتری نسبت به نمونه شاهد را در پی خواهد داشت (سلیمانی گل‌سفیدی و صحاف، ۲۰۲۲). همچنین، در این مود بارگذاری، کاربرد یا عدم کاربرد روغن جوانساز تأثیر بیشتری بر میزان انرژی شکست مخلوط‌ها نسبت به مود کششی دارد.

در مود اول بارگذاری، افزودن روغن فرآیند لاستیک (RPO) به مخلوط‌های آسفالتی در دمای ۲۵ درجه سلسیوس منجر به افزایش انرژی شکست از ۱۹۰۵/۶۷ به ۲۰۲۰/۶۷ ژول بر متر مربع شده است که نشان‌دهنده رشد ۶ درصدی در مقاومت مخلوط است. این میزان افزایش، با نتایج سایر مطالعات نیز همخوانی دارد؛ برای مثال، تحقیقاتی که توسط ژانگ و همکاران (۲۰۲۰) انجام شده نشان می‌دهد که استفاده از روغن جوانساز می‌تواند به‌طور متوسط موجب افزایش ۵ تا ۱۰ درصدی انرژی شکست مخلوط‌های آسفالتی شود.

انرژی خستگی به میزان تحمل مخلوط آسفالتی در برابر سیکل‌های مکرر بارگذاری مرتبط است. با افزایش انرژی شکست، مخلوط مقاومت بیشتری در برابر ترک‌خوردگی اولیه پیدا می‌کند، که به نوبه خود احتمال تجمع آسیب ناشی از بارهای مکرر را کاهش می‌دهد. بنابراین، افزودن RPO می‌تواند انرژی خستگی مخلوط‌های آسفالتی را نیز افزایش دهد و به دوام بیشتر آنها کمک کند. بهادری و همکاران (۲۰۱۵) طی مطالعه‌ای نشان داده‌اند که افزایش ۱۰ تا ۲۰ درصدی در انرژی شکست می‌تواند به افزایش مشابهی در انرژی خستگی منجر شود؛ اما برای هر نوع مخلوط و شرایط بارگذاری، رابطه دقیق ممکن است متفاوت باشد.

است که ممکن است به دلیل افزایش سهم رفتار الاستیک مخلوط باشد. به طور کلی، در بارگذاری مود برشی در صورت افزودن تراشه آسفالتی، هم با و هم بدون استفاده از جوانساز، انرژی شکست بیشتری نسبت به نمونه شاهد را در پی خواهد داشت. همچنین، در این مود بارگذاری، کاربرد یا عدم کاربرد روغن جوانساز تأثیر بیشتری بر میزان انرژی شکست مخلوطها نسبت به مود کششی دارد.

پارامتر انرژی شکست نمونهها در دمای سرد در مود دوم بارگذاری بسیار بیشتر از مود اول بارگذاری بوده و در این مود بارگذاری با افزایش درصد جایگزینی تراشه آسفالتی، انرژی شکست روند صعودی داشت که این اختلاف نسبت به نتایج علیها و همکاران (۲۰۱۷) بیشتر بود. مقدار انرژی شکست پس از جایگزینی تراشه آسفالت باز یافتی در مخلوطهای آسفالتی حاوی جوانساز به نسبت حالت بدون استفاده از جوانساز کمی بیشتر



شکل ۱۲. منحنیهای حداکثر نیرو و انرژی شکست در دما و مودههای متفاوت بارگذاری

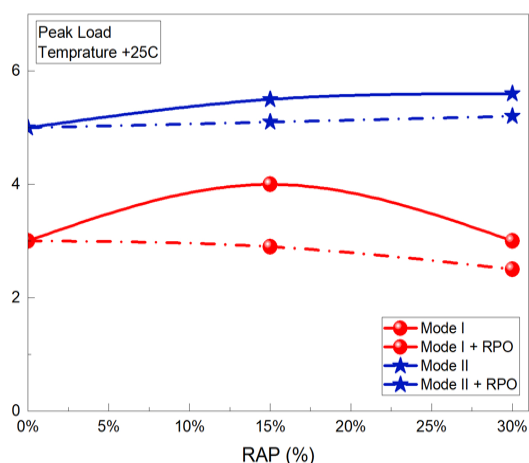
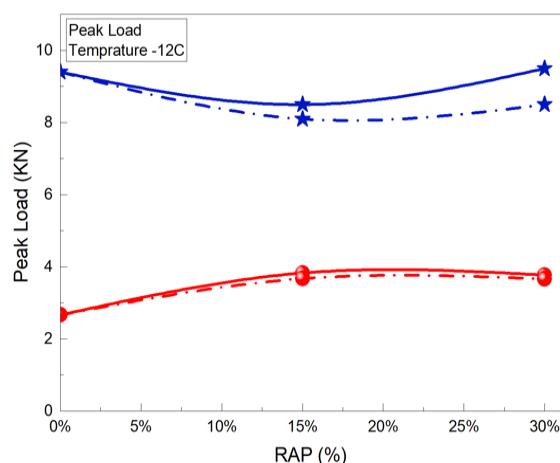
جایگزینی تراشه آسفالتی، بدون استفاده از روغن جوانساز، حداکثر مقاومت در برابر ترک خوردگی بیشتری نسبت به نمونه شاهد در هر دو دمای کم و متوسط را در پی خواهد داشت. مقدار افزایش حداکثر نیرو و افزایش میزان جایگزینی تراشه آسفالت باز یافتی با استفاده

۳-۴. مقایسه نتایج نیرو و انرژی شکست در دماهای مختلف

مطابق شکل ۱۳، حداکثر نیروی وارده به نمونهها در دمای کم بیشتر بوده و در این دما، در صورت افزایش درصد

شاهد در هر دو دمای کم و متوسط را در پی خواهد داشت. مقدار افزایش حداکثر نیرو حین افزایش میزان جایگزینی تراشه آسفالت بازیافتی با استفاده از جوانساز نیز در همه نمونه‌ها دچار کاهش شده و نشان می‌دهد که تغییرات دما تأثیری در عملکرد روغن جوانساز نداشته و نتایج در هر دو دما مشابه است.

از جوانساز به مقدار کمی دچار تغییرات شده، ولی به طور کلی تأثیر به‌سزایی در نتایج ندارد. حداکثر نیروی وارده به نمونه‌ها تحت بارگذاری برشی نیز در دمای کم بیشتر بود. در اکثر مخلوط‌های آسفالتی، در صورت افزایش درصد جایگزینی تراشه آسفالتی، بدون استفاده از روغن جوانساز، حداکثر مقاومت در برابر ترک‌خوردگی بیشتری نسبت به نمونه

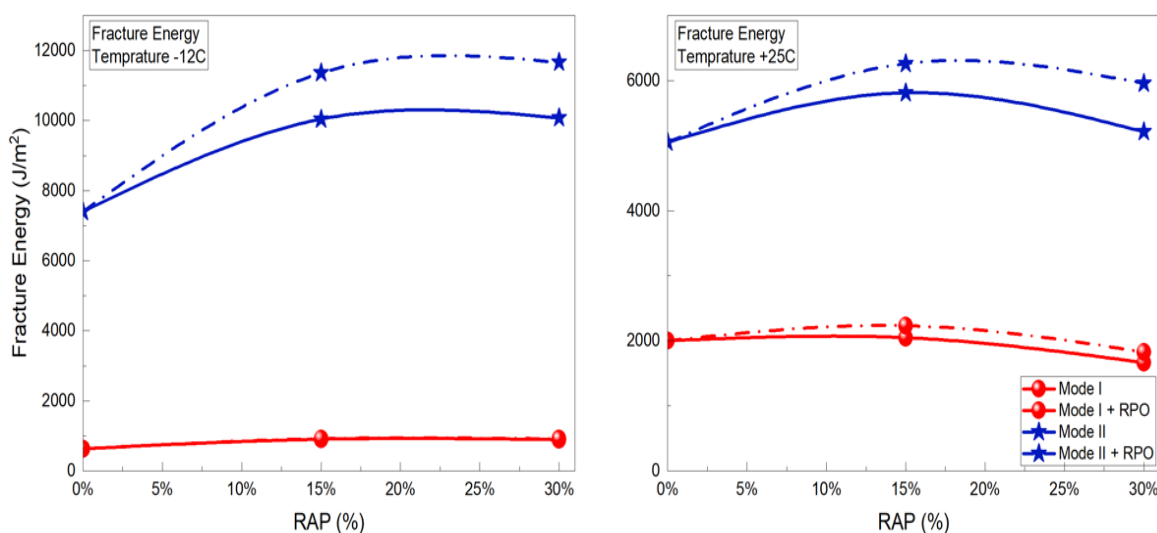


شکل ۱۳. مقایسه حداکثر نیرو در دما و مودهای متفاوت بارگذاری

شدید انرژی روبرو شده‌اند (روج و همکاران، ۲۰۲۱). مشابه با نتایج به‌دست آمده در مطالعه گو و همکاران (۲۰۲۱)، پارامتر انرژی شکست نمونه‌ها تحت بارگذاری برشی در دمای کم، کمی بیشتر از انرژی شکست در دمای متوسط است.

مقدار انرژی شکست حین جایگزینی تراشه آسفالت بازیافتی از صفر تا ۱۵ درصد به مقدار کمی افزایش داشته، ولی پس از افزایش میزان جایگزینی از ۱۵ درصد به ۳۰ درصد مخلوط‌ها با افت انرژی روبرو شده‌اند.

مطابق شکل ۱۴، پارامتر انرژی شکست نمونه‌ها در دمای متوسط دو تا سه برابر بارگذاری در دمای کم بوده و کاربرد جوانساز تأثیر به‌سزایی در انرژی شکست مخلوط‌ها نداشته و نمونه‌ها تقریباً دارای انرژی شکست برابر هستند (گو و همکاران، ۲۰۲۱). مقدار انرژی شکست حین جایگزینی تراشه آسفالت بازیافتی از صفر تا ۱۵ درصد به مقدار کمی افزایش داشته ولی پس از افزایش میزان جایگزینی از ۱۵ به ۳۰ درصد در دمای منفی ۱۲ درجه سلسیوس روند رشد انرژی متوقف شده و در دمای ۲۵ درجه سلسیوس نیز مخلوط‌ها با افت



شکل ۱۴. مقایسه انرژی شکست در دما و موده‌های متفاوت بارگذاری

خواهیم بود که نتایج به‌دست آمده با استفاده از شاخصه انرژی شکست را تأیید می‌کند.

– میزان شاخص انعطاف‌پذیری مخلوط‌ها با میزان انرژی شکست رابطه مستقیم و با میزان حداکثر شیب نمودار پس از نقطه اوج رابطه معکوس دارد. این شاخصه، در صورت افزودن تراشه آسفالتی بدون استفاده از روغن جوانساز حدود ۳۰ درصد کمتر از انعطاف‌پذیری نمونه شاهد است، که به تفکیک در صورت جایگزینی ۱۵ درصد تراشه آسفالتی این میزان کاهش ۲۲ درصدی و در صورت جایگزینی ۳۰ درصد تراشه آسفالتی این میزان با کاهش ۴۱ درصدی مواجه شده است.

– پس از به‌کار بردن روغن جوانساز، میزان شاخص انعطاف‌پذیری تقریباً دو برابر بیش از انعطاف‌پذیری نمونه شاهد نشان داده است، که به تفکیک در صورت بارگذاری مود اول این میزان افزایش ۸۵ درصد و در صورت بارگذاری در مود دوم ۱۱۳ درصد محاسبه شده است.

۵. نتیجه‌گیری

با توجه به آزمون‌ها و تحلیل‌های انجام گرفته از مخلوط‌های آسفالتی تهیه شده، نتایج به‌دست آمده از این پژوهش شامل موارد زیر است:

– انرژی شکست مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از روغن جوانساز بیشتر از مخلوط‌هایی است که در آن‌ها از روغن جوانساز استفاده نشده است. این میزان افزایش انرژی در دمای سرد قابل توجه بوده است. در نتیجه، در مخلوط‌های حاوی تراشه آسفالتی بازیافتی، استفاده از مواد جوانساز، به‌خصوص در مناطق سردسیر، حیاتی بوده، زیرا هرچه دما کاهش یابد جوانساز به‌کار رفته در مخلوط‌ها تأثیر بیشتری در مقدار انرژی شکست مخلوط‌های آسفالت با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای دارد.

– در محاسبه پارامتر چقرمگی شکست در مخلوط‌ها پس از افزودن تراشه آسفالتی، در همه مخلوط‌ها نسبت به نمونه شاهد دارای افزایش میزان چقرمگی شکست

۶. مراجع

- AASHTO T 393-21. 2021. Adopted- Determining the fracture potential of asphalt mixtures using the Illinois Flexibility Index Test (I-FIT).
- Al Dughaisi, H., Al Lawati, J., Bilema, M., Babalghaith, A. M., Mashaan, N. S., Yusoff, N. I. M. and Milad, A. 2022. "Encouraging sustainable use of RAP materials for pavement construction in Oman: A Review". *Recy.*, 7(3): 35.
- 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., Mansourian, A., Pirmohammad, S., Aliha, M. R. M. and Ayatollahi, M. R. 2012. "Mixed mode fracture resistance of asphalt concrete mixtures". *Eng. Fract. Mech.*, 93: 153-167. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2012.06.015>
- Anderson, T. L. 2017. "Fracture mechanics: Fundamentals and applications". CRC Press.
- Anusha, T. M., Akhilesh, B. R. and Jagadeesh, H. S. 2021. "Performance studies on stone mastic asphalt mixes with reclaimed asphalt pavement". *Int. J. Recent Technol. Eng. (IJRTE)*, 10(4): 129-138. <https://doi.org/10.35940/ijrte.d6503.1110421>
- Ayatollahi, M. R., Aliha, M. R. M. and Saghafi, H. 2011. "An improved semi-circular bend specimen for investigating mixed mode brittle fracture". *Eng. Fract. Mech.*, 78(1): 110-123. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2010.10.001>
- Bahadori, A. M., Mansourkhaki, A. and Ameri, M. 2015. "A phenomenological fatigue performance model of asphalt mixtures based on fracture energy density". *J. Test. Eval.*, 43(1): 133-139.
- Belay, S., Quezon, E. T. and Geremew, A. 2021. "Effect of selected conventional and non-conventional mineral fillers with "Enset" fibers on compaction characteristics of stone mastic asphalt pavement (SMAP)". *Jordan J. Civ. Eng.*, 15(1): 30-40.
- Cardoso, J., Ferreira, A., Almeida, A. and Santos, J. 2023. "Incorporation of plastic waste into road pavements: A systematic literature review on the fatigue and rutting performances". *Constr. Build. Mater.*, 407: 133441.
- Copeland, A. 2011. "Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: State of the practice". US Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- Emami, A., Abdi Kordani, A. and Zarei, M. 2023. "Investigation of the rutting performance of modified stone matrix asphalt (SMA) using the dynamic creep and Hamburg Wheel-Tracking Device tests". *Adv. Mater. Process. Technol.*, 10(2): 373-392.
- Fakhri, M., Shahryari, E. and Ahmadi, T. 2022. "Investigate the use of recycled polyvinyl chloride (PVC) particles in improving the mechanical properties of stone mastic asphalt (SMA)". *Constr. Build. Mater.*, 326: 126780. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126780>
- Fakhri, M., Ahmadi, T., Shahryari, E. and Jafari, M. 2023. "Evaluation of fracture behavior of stone mastic asphalt (SMA) containing recycled materials under different loading modes at low temperatures". *Constr. Build. Mater.*, 386: 131566.
- Guo, Q., Chen, Z., Liu, P., Li, Y., Hu, J., Gao, Y. and Li, X. 2021. "Influence of basalt fiber on mode I and II fracture properties of asphalt mixture at medium and low temperatures". *Theor. Appl. Fract. Mech.*, 112: 102884.
- Hirama, A. 2014. "The actual situation of recycled asphalt mixture in Japan". Seminar on Pavement Technology Exchange Between U.S.A. and Japan, 4 December 2014, Tokyo.
- Imaninasab, R., Loria-Salazar, L. and Carter, A. 2022. "Integrated performance evaluation of asphalt mixtures with very high reclaimed asphalt pavement (RAP) content". *Constr. Build. Mater.*, 347: 128607.
- Kamboozia, N., Saed, S. A. and Mousavi Rad, S. 2021. "Rheological behavior of asphalt binders and fatigue resistance of SMA mixtures modified with nano-silica containing RAP materials under the effect of mixture conditioning". *Constr. Build. Mater.*, 303: 124433. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124433>
- Karimi, M. M., Darabi, M. K., Jahanbakhsh, H., Jahangiri, B. and Rushing, J. F. 2020. "Effect of steel wool fibers on mechanical and induction heating response of conductive asphalt concrete". *Int. J. Pavement Eng.*, 21(14): 1755-1768.
- Korishetti, V., Chikkabagewadi, S. and Kulkarni, S. 2023. "Recycling of polymer modified bituminous mixes with reclaimed asphalt pavement-An experimental study". *Mater. Proc.* <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.397>
- Laboratory and designing evaluation of Stone Mastic Asphalt No. 206. 2000.
- Lin, P. S., Wu, T. L., Chang, C. W. and Chou, B. Y. 2011. "Effects of recycling agents on aged asphalt binders and reclaimed asphalt concrete". *Mater. Struct.*, 44: 911-921. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9675-8>

- Mangiafico, S., Di Benedetto, H., Sauzéat, C., Olard, F., Pouget, S. and Planque, L. 2016. "Relations between linear viscoelastic behaviour of bituminous mixtures containing reclaimed asphalt pavement and colloidal structure of corresponding binder blends". *Proc. Eng.*, 143: 138-145. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.018>
- Nasir, H., Kaur, M. and Faheem, S. 2024. "A statistical review on the usage of reclaimed asphalt pavement waste as a recyclable material". *IOP Conference Series: Earth Environ. Sci.*, 1327(1): 12021.
- Noferini, L. 2017. "Investigation on performances of asphalt mixtures made with reclaimed asphalt pavement: Effects of interaction between virgin and RAP bitumen". *Int. J. Pavement Res. Technol.*, 10(4). <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.03.011>
- Potti, J. J. 2020. "Asphalt in figures 2020". EAPA.
- Pradhan, S. K., Das, U. and Patra, A. R. 2023. "Utilization of reclaimed asphalt pavement (RAP) materials in HMA mixtures for flexible pavement construction". *Mater. Proc.* <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.464>
- Raj, N. K. K. and Ramesh, A. 2024. "Development of sustainable pavement: An experimental study of stone mastic asphalt prepared with warm mix additives and reclaimed asphalt pavement". *IOP Conference Series: Earth Environ. Sci.*, 1326(1): 012082.
- Ramiączek, P., Cielibała, M., Skrzyniarz, N., Janus, K., Maciejewski, K., Iwański, M. M. and Chomicz-Kowalska, A. 2023. "Influence of the type of recycled asphalt pavement on the properties of the SMA JENA 16 stone mastic asphalt mixture". *Roads Bridges-Drogi i Mosty*, 22(4): 569-578.
- Roja, K. L., Masad, E. and Mogawer, W. 2021. "Performance and blending evaluation of asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement". *Road Mater. Pavement Design*, 22(11): 2441-2457.
- Sivilevičius, H. and Martišius, M. 2023. "The significance of the factors increasing the asphalt pavement recycling rate in the country, determined using multiple-criteria decision-making methods". *Appl. Sci.*, 13(22): 12226.
- Soleimani Golsefidi, S. and Sahaf, S. A. 2022. "Effect of reclaimed asphalt pavement (RAP) on fracture properties of stone matrix asphalt (SMA) at low temperature". *Constr. Build. Mater.*, 352: 128899. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128899>
- Song, W., Huang, B. and Shu, X. 2018. "Influence of warm-mix asphalt technology and rejuvenator on performance of asphalt mixtures containing 50% reclaimed asphalt pavement". *J. Clean. Prod.*, 192: 191-198. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.269>
- Song, W., Xu, Z., Xu, F., Wu, H. and Yin, J. 2021. "Fracture investigation of asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement using an equivalent energy approach". *Eng. Fract. Mech.*, 253: 107892. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2021.107892>
- Varuna, M., Bhavani Prasad, G., Anjaneyappa, V. and Amarnath, M. S. 2022. "Influence of RAP and waste plastic on cracking resistance of warm SMA mixes". *Civ. Eng. Archit.*, 10(1).
- West, R. C. and Copeland, A. 2015. "High RAP Asphalt Pavements: Japan practice: Lesson learned".
- Willis, J. R., Marasteanu, M. O. and West, R. C. 2013. "Improved mix design, evaluation, and materials management practices for hot mix asphalt with high reclaimed asphalt pavement content". NCHRP.
- Zali, N. S. S. M., Masri, K. A., Jaya, R. P., Abdullah, M. M. A. B., Hasan, M., Hasan, M. R. M., Jez, B., Nabiałek, M., Sroka, M. and Pietrusiewicz, P. 2022. "Properties of stone mastic asphalt incorporating nano titanium as binder's modifier". *Arch. Civ. Eng.*, 68(1): 653-666. <https://doi.org/10.24425/ace.2022.140192>
- Zangoeeinia, P., Moazami, D., Bilondi, M. P. and Zaresefat, M. 2023. "Improvement of pavement engineering properties with calcium carbide residue (CCR) as filler in stone mastic asphalt. *Results Eng.*, 20: 101501.
- Zaumanis, M., Cavalli, M. C. and Poulikakos, L. D. 2020. "Effect of rejuvenator addition location in plant on mechanical and chemical properties of RAP binder". *Int. J. Pavement Eng.*, 21(4): 507-515. <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1492133>
- Zhang, J., Zheng, M., Pei, J., Zhang, J. and Li, R. 2020. "Research on low temperature performance of emulsified asphalt cold recycled mixture and improvement measures based on fracture energy". *Mater.*, 13(14): 3176.
- Zhong, H., Huang, W., Yan, C., Zhang, Y., Lv, Q., Sun, L. and Liu, L. 2021. "Investigating binder aging during hot in-place recycling (HIR) of asphalt pavement". *Constr. Build. Mater.*, 276: 122188. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122188>