



Semnan University

Journal of Transportation Infrastructure Engineering

Journal homepage: <https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en>

ISSN: 2821-0549



Research Article

Laboratory Study on the Effect of Rejuvenator (Rapiol) on the Fatigue Life of Unaged and Aged Asphalt Binder and Hot Mix Asphalt

Ehsan Mansour Kiaei^a, Mahdi Akbari^{b*} ^a MSc., Department of Road and Transportation Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, I. R. Iran.^b Assistant Professor, Department of Road and Transportation Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2025-05-05

Revised: 2025-06-27

Accepted: 2025-07-15

Keywords:

Fatigue life,

Rejuvenator,

Strain-control mode,

LAS test,

Four-point bending beam test.

ABSTRACT

Fatigue cracks are considered as one of the most significant pavement failures. The cause of fatigue cracks is the changes in environmental temperature conditions and repeated loading of vehicles. Additives can enhance the tensile strength of asphalt pavement layers and increase their life. In this article, through laboratory studies, the effect of using a rejuvenator as an additive in asphalt mixture, called "Rapiol", on improving the fatigue performance of both unaged and aged asphalt pavements was investigated. To achieve this, the study utilized the Linear Amplitude Sweep (LAS) test at strain levels of 2.5% and 5%, and the Four-Point Bending Beam (4-PBB) test in strain-control mode (at strain levels of 400, 600, and 800 microstrains). The LAS test results indicate that in unaged conditions, the Rapiol rejuvenator improved fatigue life by 7.5% and 3% at strain levels of 2.5% and 5%, respectively. However, in aged samples, fatigue life increased by 4.1% at 2.5% strain but decreased by 21.8% at 5% strain. Moreover, according to the 4-PBB test results, using Rapiol in unaged asphalt mixture samples enhanced fatigue life by 42% and 284% at 400 and 800 microstrains, respectively. Similarly, in aged asphalt mixture samples, fatigue life increased by 100% and 500% at 400 and 800 microstrains, respectively.

* Corresponding author.

E-mail address: akbari@semnan.ac.ir



مقاله پژوهشی

مطالعه آزمایشگاهی تأثیر جوان‌ساز (راپیول) روی عمر خستگی قیر و مخلوط آسفالتی گرم تحت شرایط پیرنشده و پیرشده

احسان منصور کیایی^۱، مهدی اکبری^{۲*} 

^۱ کارشناس ارشد راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

^۲ استادیار، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

چکیده	اطلاعات مقاله
ترک‌خوردگی‌های ناشی از خستگی یکی از مهم‌ترین خرابی‌های روسازی‌ها بوده که به علت تغییرات شرایط دمایی محیط و همچنین تکرار بارگذاری وسایل نقلیه اتفاق می‌افتد. کاربرد افزودنی‌ها که سبب تقویت مقاومت کششی لایه‌های روسازی آسفالتی می‌شود می‌تواند طول عمر روسازی‌ها را افزایش دهد. این مقاله، با انجام مطالعات آزمایشگاهی، تأثیر استفاده از نوعی جوان‌ساز به عنوان افزودنی مخلوط تازه، تحت عنوان راپیول (Rapiol) بر بهبود عملکرد خستگی روسازی‌های آسفالتی شاهد و اصلاح‌شده با جوان‌ساز در دو حالت پیرنشده و پیرشده را مورد بررسی قرار می‌دهد. برای این منظور، آزمایش جاروب دامنه خطی (LAS) در دو سطح کرنش ۲/۵ و ۵ درصد، و آزمایش تیر خمشی چهارنقطه‌ای (4-PBB) در حالت کرنش-کنترل (در سطوح کرنش ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میکرواسترین) انجام شده است. نتایج آزمایش LAS نشان داد که در شرایط پیرنشده، در کرنش‌های ۲/۵ و ۵ درصد، به ترتیب جوان‌ساز راپیول موجب افزایش ۷/۵ درصدی و ۳ درصدی عمر خستگی شد. اما در نمونه‌های پیرشده، نتایج متفاوت بود؛ به‌طوری که در کرنش ۲/۵ درصد، عمر خستگی ۴/۱ درصد افزایش، ولی در کرنش ۵ درصد ۲۱/۸ درصد کاهش یافت. همچنین، طبق نتایج آزمایش 4-PBB کاربرد جوان‌ساز راپیول در نمونه‌های پیرنشده، در کرنش‌های ۴۰۰ و ۸۰۰ میکرواسترین، عمر خستگی را به ترتیب ۴۲ و ۲۸۴ درصد افزایش داد. همچنین، در نمونه‌های پیرشده نیز در کرنش‌های ۴۰۰ و ۸۰۰ میکرواسترین، عمر خستگی به ترتیب ۱۰۰ و ۵۰۰ درصد افزایش یافت.	دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۱۵
	بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۰۶
	پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۲۴
	واژه‌های کلیدی:
	عمر خستگی، جوان‌ساز، حالت کرنش-کنترل، آزمایش LAS، آزمایش خمش تیر-چهارنقطه‌ای.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: akbari@semnan.ac.ir

استناد به این مقاله: منصور کیایی، احسان و اکبری، مهدی. (۱۴۰۴). مطالعه آزمایشگاهی تأثیر جوان‌ساز (راپیول) روی عمر خستگی قیر و مخلوط آسفالتی

گرم تحت شرایط پیرنشده و پیرشده. مهندسی زیر ساخت‌های حمل و نقل، ۱۱ (۲)، ۸۵-۱۰۴

<https://doi.org/10.22075/jtie.2025.37651.1722>

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

۱. مقدمه

روسازی راه در نتیجه عواملی از قبیل بارگذاری ترافیکی، دما، رطوبت و جابجایی خاک بستر در معرض تنش‌های مختلفی قرار دارد که خرابی‌های کوچکی را به روسازی وارد می‌سازند. این نوع خرابی‌ها می‌توانند منجر به خرابی‌های بزرگتری در روسازی آسفالتی شوند. ترک‌خوردگی، شیارشدگی، بروز ناهمواری و سایر انواع خرابی‌ها، نتیجه شکل‌گیری خرابی‌های کوچک هستند (اکبری و همکاران، ۲۰۲۳).

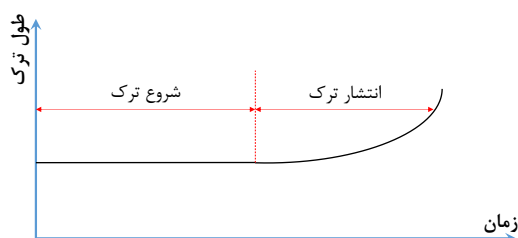
به طور کلی، خرابی‌های روسازی شامل دو گروه اصلی خرابی‌های سازه‌ای و خرابی‌های سطحی (یا عملکردی) هستند. در خرابی‌های سازه‌ای، روسازی توانایی کافی جهت تحمل بارهای وارده را نداشته و در بهترین حالت آن نیز تحمل بارهای وارده را ندارد. در خرابی سطحی، سازه دارای قدرت باربری کافی جهت تحمل بارهای وارده را دارد؛ اما به علت ناهمواری‌های موجود در آن، سطح خدمت‌دهی آن کاهش یافته و سبب افزایش نرخ تصادفات شده و حتی گاهی مسیر قابل استفاده نمی‌باشد (پل، ۱۹۶۲؛ اکبری و همکاران، ۲۰۱۵، ۲۰۲۰a، ۲۰۲۰b؛ شهریاری و همکاران، ۲۰۲۳). مشخصات قیر مورد استفاده در تهیه مخلوط آسفالتی تأثیر شگرفی بر خواص عملکردی مخلوط آسفالتی و مقاومت آن در برابر خرابی‌های مختلف از جمله خستگی می‌گذارد. بنابراین، بررسی رفتار خستگی قیر کمک شایانی به شناخت درست رفتار خستگی مخلوط آسفالتی حاصل نیز می‌کند (نوتانی و همکاران، ۲۰۱۹). آزمایش جاروب دامنه خطی (LAS) یکی از روش‌های ارزیابی خستگی قیر می‌باشد که براساس مکانیزم خرابی در محیط‌های پیوسته بوده و قادر است مقاومت خستگی قیر را براساس تابعی از نرخ کرنش روسازی پیش‌بینی نماید. خستگی روسازی، شکست روسازی در اثر دوام

بارگذاری است (روحانی و همکاران، ۲۰۲۲). میزان این بارگذاری‌ها حتی ممکن است کمتر از مقاومت نهایی استاتیکی سازه روسازی نیز باشد. ترک‌های خستگی در ابتدا به صورت ترک‌های طولی ظاهر می‌شوند و پس از آن با گذشت زمان کمی، ترک‌های عرضی نیز پدیدار می‌شوند؛ که یکی از شایع‌ترین خرابی‌ها در روسازی به حساب می‌آیند. وجود این ترک‌ها سبب نفوذ آب به درون روسازی شده، و لذا روسازی با سرعت بیشتری تخریب می‌گردد. گسترش ترک‌های خستگی در سه مرحله مطابق شکل ۱ صورت می‌پذیرد:

مرحله اول: شروع ترک‌های ریز به علت تمرکز تنش در سطح آسفالت؛

مرحله دوم: گسترش ترک‌های به وجود آمده در مرحله اول و ایجاد ترک‌های بزرگ‌تر؛

مرحله سوم: ایجاد شکست و گسیختگی سازه روسازی.



شکل ۱. فرآیند خرابی ناشی از خستگی روسازی (کستل و همکاران، ۲۰۰۰)

مواد جوان‌ساز به عنوان یکی از مهمترین مواد افزودنی برای بهبود خواص پیرشدگی قیر می‌باشد. در طی فرآیند ساخت و خدمت‌دهی مخلوط‌های آسفالتی و روسازی، به علت وجود شرایط جوی و همچنین اعمال بارگذاری ترافیکی، خصوصیات قیر موجود در آسفالت تغییر کرده و خصوصیات اولیه‌ی خود را از دست می‌دهد، به گونه‌ای که قیر موجود در مخلوط آسفالتی شکننده و سخت شده و میزان مقاومت آن در برابر ترک‌های خستگی و دمای کم کاهش می‌یابد که مواد جوان‌ساز به عنوان یک راه‌حل مناسب جهت جلوگیری

بنابراین، این مواد در بهبود عملکرد ترک خوردگی قیر کارایی مناسب را نخواهند داشت (دین و یو، ۲۰۱۴؛ ایم و همکاران، ۲۰۱۶؛ کائو و همکاران، ۲۰۲۳).

موگاور و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی تأثیر جوانسازها بر ویژگی‌های ترک خوردگی خستگی مخلوط‌های دارای RAP زیاد با استفاده از مدل‌های مکانیکی پیشرفته و روش‌های آزمایش پرداختند. طبق نتایج، عمر خستگی این مخلوط‌ها با افزودن جوانساز، افزایش یافته و این در حالی بود که پیرشدگی طولانی مدت تأثیر کمی بر ویژگی‌های خستگی این نوع مخلوط‌ها داشته است.

یاسین و همکاران (۲۰۲۲) کاربرد جوانساز در عملکرد قیر پیر شده مورد استفاده در روسازی آسفالتی را ارزیابی کردند. تمرکز آن‌ها بر تأثیر جوانسازها بر خواص فیزیکی و رئولوژیک قیرهای پیر شده بود. طبق نتایج، کاربرد جوانساز خواص فیزیکی قیر پیر شده را بهبود بخشید. همچنین، کاربرد ۷/۵ درصد جوانساز سبب افزایش چشمگیر خواص رئولوژیک قیر پیر شده گردید.

پستو و همکاران (۲۰۲۳) اثربخشی کاربرد جوانساز در بازیافت گرم چندگانه مخلوط‌های آسفالتی را مورد ارزیابی آزمایشگاهی قرار دادند. این مطالعه، اثرات جوانسازها را بر مخلوط‌های آسفالتی ارزیابی کرد و نشان داد که کاربرد جوانساز سبب کاهش سفت‌شدگی و شکنندگی در طول چرخه‌های بازیافت متعدد می‌شود که عملکرد قیر را بهبود می‌بخشد. اثربخشی جوانسازها بر اساس سابقه بازیافت و خواص خاص آسفالت بازیافتی متفاوت است و بر عمر خستگی تأثیر می‌گذارد. گلزار و همکاران (۲۰۲۴) به مدل‌سازی پدیدارشناختی پیری و جوانسازی بر ویژگی‌های خستگی قیر پرداختند. این مطالعه، به بررسی تأثیر عوامل بازیافت بر خواص خستگی قیرهای آسفالتی، با تمرکز بر پیرشدگی و جوانسازی می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد که شاخص

از این خرابی‌ها معرفی می‌گردد (کائو و همکاران، ۲۰۲۳؛ کاوالی و همکاران، ۲۰۲۴). مواد جوانساز قادرند عملکرد دمای کم و متوسط (خستگی) مخلوط‌های آسفالتی را به صورت تضمینی بهبود دهند و همچنین عملکرد دماهای زیاد را نیز در محدوده قابل قبولی حفظ نمایند (هو و همکاران، ۲۰۲۴). فرآیند جوانسازی قیر یک فرآیند صنعتی است. فرآیند جوانسازی عبارت است از تلاش برای بهبود و بازیابی خصوصیات اولیه قیر یا جلوگیری از ایجاد پیرشدگی قیر که به کمک افزودن مقدار کمی از یک روغن ویسکوز مقدور می‌باشد (میرصفایی ریزی، ۲۰۱۶).

در سال‌های اخیر، روان‌کننده‌ها و جوانسازهای گوناگونی معرفی گردیده‌اند. با این حال، تفاوت‌هایی در عملکرد این دو نوع ماده وجود دارد. نحوه اثربخشی جوانسازها با ساختار مولکولی و قطبیت آن مرتبط می‌باشد (دینگ و همکاران، ۲۰۲۱؛ اُچوآ و همکاران، ۲۰۲۴). جوانسازها روی ساختار شیمیایی قیر تأثیر می‌گذارند و مانع از تغییر ویژگی‌های قیر تحت شرایط جوی و بارگذاری می‌شوند. این در حالی است که روان‌کننده‌ها، ویسکوزیته قیر را تحت تأثیر قرار داده و ویسکوزیته را با هدف بهبود عملکرد اختلاط بین قیر کهنه و قیر جدید، کاهش می‌دهند. این مسئله به عنوان مهمترین تفاوت بین جوانساز و روان‌کننده شناخته می‌شود. به بیان دیگر، می‌توان عنوان کرد که جوانسازی به معنی بازیابی خصوصیات شیمیایی ویسکوالاستیک قیر است. در این فرآیند، به هم پیوستگی و لایه‌بندی ذرات آسفالتن موجود در قیر قطع می‌گردد که در نتیجه این فرآیند، گرانروی قیر کاهش پیدا می‌کند. این در حالی است که روان‌کننده‌ها برخلاف جوانسازها، کاهش گرانروی قیر را از طریق کاهش گرانروی ماتین (فاز پیوسته) با رقیق کردن انجام می‌دهند. به همین دلایل، روان‌کننده‌ها قادر نیستند بر خصوصیات شیمیایی و بازگشت خواص ویسکوالاستیک قیر تأثیر بگذارند.

پیشنهادی به طور مؤثر تغییرات در ویژگی‌های خستگی را ردیابی می‌کند، که نشان می‌دهد جوان‌سازها به طور مثبت بر عمر خستگی در مخلوط‌های پیرنشده و پیرشده تأثیر می‌گذارند.

ونگ و همکاران (۲۰۲۴)، خواص دینامیک و عملکرد خستگی آسفالت پیرشده و جوان‌شده با استفاده از جوان‌ساز را با استفاده از اصول برهم‌نهی پیش‌بینی نمودند. طبق نتایج، کاربرد جوان‌ساز به طور قابل توجهی عمر خستگی آسفالت پیرشده را افزایش داد، به طوری که ۶ درصد از این ماده به طور مؤثری خواص مکانیکی قیر را بازیابی نمود. در حالی که، برای مخلوط‌های پیرنشده می‌توان از درصد کمتری از جوان‌ساز بهره برد.

شیبا^۱ و همکاران (۲۰۲۴) اثر هم‌افزایی جوان‌ساز اصلاح‌شده با پلیمر و آسفالت پیرنشده بر عملکرد مخلوط‌های آسفالت اصلاح‌شده با استایرن-بوتادین-استایرن با بازیافت گرم درجا را بررسی نمودند. این مطالعه نشان می‌دهد که کاربرد ۶ درصد جوان‌ساز اصلاح‌شده پلیمری قادر است مقاومت قیر بازیافتی را در برابر خستگی افزایش دهد؛ در حالی که عمر خستگی آسفالت پیرنشده حاوی مخلوط‌های بازیافت گرم درجا را کاهش می‌دهد.

جوان‌ساز راپیول به عنوان یک ماده اصلاح‌کننده و بهبود دهنده خواص مخلوط‌های آسفالتی پیرشده می‌باشد که با انتشار گازهای کمتر سبب کاهش تأثیرات منفی بر سلامت کارگران و محیط‌زیست می‌شود. همچنین، به علت مواد سازنده آن و عدم تأثیرگذاری آن بر ساختار شیمیایی آسفالت، قادر است کارایی آسفالت را بهبود بخشد. علاوه بر این، دمای کم مورد نیاز برای کاربرد آن سبب کاهش شدت فرآیند پیری قیر شده و در نتیجه دوام و انعطاف‌پذیری مخلوط‌های آسفالتی را افزایش می‌دهد. لذا، در پژوهش حاضر از جوان‌ساز راپیول به عنوان یک

ماده جوان‌ساز استفاده شده است.

در پژوهش حاضر، برای تعیین میزان تأثیر استفاده از جوان‌ساز راپیول بر عمر خستگی قیر از آزمایش LAS در سطوح کرنش ۲/۵ و ۵ درصد و در دمای ۲۵ درجه سلسیوس استفاده شد و نمونه‌های لازم تهیه گردید. همچنین، جهت بررسی تأثیر جوان‌ساز راپیول بر عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی در حالت‌های پیرنشده و پیرشده، اقدام به ساخت دو مجموعه دال مختلف (شاهد، و اصلاح‌شده با راپیول) گردید. در مرحله بعد، هر دال به ۴ تیرچه برش داده شدند و تیرچه‌های حاصل با استفاده از دستگاه آزمایش تیر خمش چهارنقطه‌ای (4-PBB) در حالت کرنش-کنترل در سطوح کرنش ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میکرواسترین مورد ارزیابی قرار گرفتند. در این مرحله، بارهای خمشی تکراری به نمونه‌های آسفالتی اعمال گردید و میزان تغییر بار و تغییر شکل ثبت گردید.

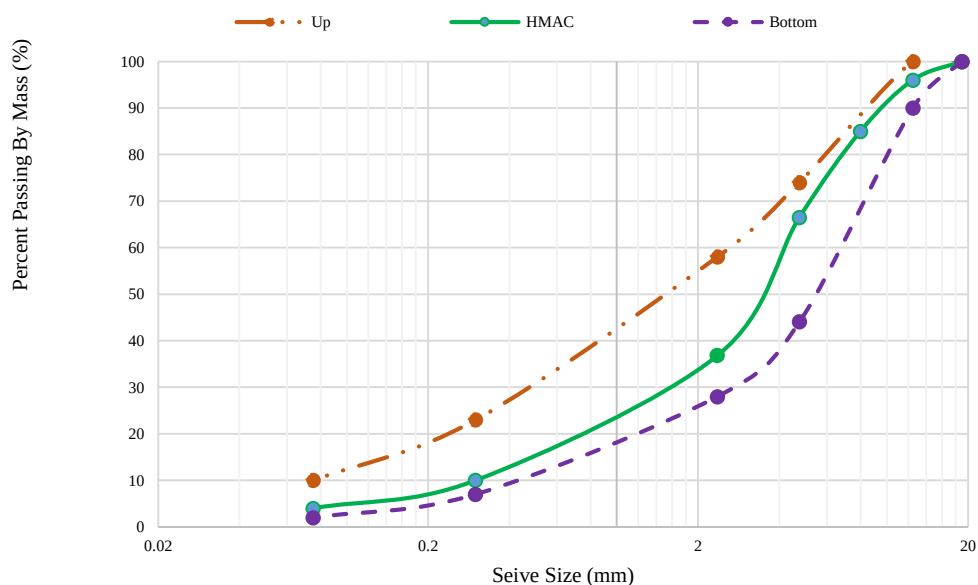
۲. ساخت نمونه

انتخاب مواد و مصالح مورد نیاز جهت ساخت نمونه‌های آسفالتی از نکات بسیار مهم محسوب می‌شود زیرا که نوع مواد و مصالح انتخابی سبب ایجاد خواص و رفتارهای مختلفی در مخلوط‌های آسفالتی می‌گردد. در این بخش، مصالح به کار برده شده در ساخت نمونه‌های آسفالتی بر اساس مشخصات فنی و متغیرهای مورد مطالعه انتخاب می‌شوند. در ادامه، به شرح جزئیاتی در باره مصالح مصرفی، روش‌های ساخت مخلوط آسفالتی و نمونه‌های مورد نیاز برای آزمایش و نحوه انجام آزمایش‌ها پرداخته شده است.

۲-۱. مشخصات مصالح مصرفی

دانه‌بندی مورد استفاده در این پژوهش مطابق دانه‌بندی شماره پنج نشریه ۱۰۱ از نوع دانه‌بندی پیوسته است که

مشخصات مصالح سنگی مصرفی در جدول ۱ و نمودار دانه‌بندی آن نیز در شکل ۲ آورده شده است. سنگدانه‌های مورد استفاده، تهیه شده از شرکت زرین سپاهان سمنان می‌باشند. برای تهیه نمونه‌های آسفالتی گرم از قیر ۶۰-۷۰ مصرفی شرکت زرین سپاهان سمنان استفاده گردید که مشخصات آن در جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. نمودار دانه‌بندی مصالح سنگی استفاده شده در این پژوهش جهت ساخت نمونه‌های آسفالتی

جدول ۱. مشخصات مصالح سنگی مصرفی

اندازه الک	درصد رد شده از الک	میانگین مشخصات براساس جدول ۲۰-۱ نشریه ۱۰۱
۱۹ mm	۱۰۰	۱۰۰
۱۲/۵ mm	۹۶	۱۰۰-۹۰
۹/۵ mm	۸۵	-
۴ شماره	۶۶/۵	۷۴-۴۴
۸ شماره	۳۶/۸	۵۸-۲۸
۵۰ شماره	۱۰	۲۳-۷
۲۰۰ شماره	۴	۱۰-۲

جدول ۲. مشخصات قیر مورد استفاده در مخلوط آسفالتی پژوهش حاضر

نوع قیر	درجه نفوذ (dmm)	نقطه نرمی (□)	وزن مخصوص (gr/cm ³)	کشش پذیری (cm)
۶۰-۷۰	۶۶	۵۰	۱/۰۱	۱۰۲



شکل ۳. ماده جوان‌ساز راپیول مورد استفاده در پژوهش حاضر

۲-۲. تهیه و ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

جهت تهیه نمونه‌های قیر اصلاح شده با جوان‌ساز، طبق استاندارد ASTM D4887، قیر پیرشده و پیرنشده ابتدا به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۱۴۰ درجه سلسیوس گرم شده و سپس توسط همزن با جوان‌ساز راپیول (به میزان ۰/۰۸ درصد وزنی قیر) به مدت ۱۰ دقیقه مخلوط می‌شود (دریایی و عامری، ۲۰۲۱). سپس، جهت تهیه مخلوط آسفالتی و نمونه‌های آسفالتی در این پژوهش پس از تهیه مصالح سنگی و قیر (قیر ۶۰-۷۰ ساده و قیر ۶۰-۷۰ اصلاح‌شده با ۰/۰۸ درصد راپیول) که در قسمت قبلی تشریح گردید، مصالح دانه‌بندی شده و قیر مورد نظر تا دمای ۱۵۶-۱۵۲ درجه سلسیوس به مدت ۱۶ ساعت گرم شد. سپس، مخلوط آسفالتی حاصل در داخل ظرف ریخته شده و توزین گردید. قیر به میزان درصد بهینه، که از روش مارشال طبق استاندارد ASTM D1559 تعیین می‌شود، به مصالح سنگی افزوده و مخلوط گردید.

جهت تهیه نمونه‌های پیرنشده، اقدام به ساخت و سپس دال‌های آسفالتی پیرنشده گردید. برای این منظور، مخلوط آسفالتی تهیه شده با قیر ۶۰-۷۰ ساده و قیر ۶۰-۷۰ اصلاح‌شده با ۰/۰۸ درصد راپیول را در درون قالب دال با ابعاد ۳۸۱×۲۶۷×۵۵ میلی‌متر ریخته و متراکم نموده و به مدت ۱۶ تا ۲۴ ساعت در دمای محیط نگهداری شدند. پس از گذشت مدت زمان ذکر شده، دال‌ها از قالب خارج شده و به اندازه تیرچه‌های مورد

ماده افزودنی مورد استفاده در این مطالعه، از نوع جوان‌ساز تحت عنوان راپیول است که بر پایه روغن بوده و به صورت یک ماده اصلاح‌کننده جهت بهبود خواص مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته است و شامل ترکیبات زیستی مانند لیگنین و روغن‌های ضایعاتی است که به عنوان آنتی‌اکسیدان عمل کرده و باعث افزایش انعطاف‌پذیری و کاهش شکنندگی قیر می‌شود (منصورخاکی و همکاران، ۲۰۱۹). میزان مصرف این ماده بین ۰/۰۸ تا ۱ درصد وزنی قیر است که در این تحقیق از ۰/۰۸ درصد وزنی قیر استفاده شده است. این ماده با انتشار گازهای کمتر سبب کاهش تأثیرات منفی بر سلامت کارگران و محیط‌زیست می‌شود. همچنین، به علت مواد سازنده آن تأثیری بر ساختار شیمیایی آسفالت ندارد، اما کارایی آن را بهبود می‌بخشد. این ماده به علت دمای کاربردی کم، سبب کاهش تأثیرات پیری قیر می‌شود. مشخصات این ماده در جدول ۴ و تصویر آن در Error! Reference source not found. قابل مشاهده است.

جدول ۳. مشخصات ماده جوان‌ساز راپیول مورد استفاده در پژوهش حاضر

ویژگی	توضیح
پایه	روغن
حالت فیزیکی در دمای اتاق	مایع
رنگ	زرد
بو	ندارد
حلالیت در آب	ندارد
ویسکوزیته در دمای ۱۳۵	۱۳
نقطه اشتعال (°C)	۲۵۵
وزن مخصوص (g/cm ³)	۱/۰۹۱

گرم‌خانه باز شد و تیرچه‌ها به مدت حداقل ۱۶ ساعت در دمای اتاق قرار داده شدند تا سرد شوند. در طول این زمان، به دلیل نرم بودن نمونه‌ها، هیچیک از نمونه‌ها جابه‌جا و یا لمس نشدند.



شکل ۴. اعمال پیرشدگی اولیه و دستگاه گرم‌کن آن



شکل ۵. اعمال پیرشدگی ثانویه در این پژوهش

جدول ۴، اطلاعات مربوط به انواع مختلف دال‌ها و تیرچه‌های تهیه شده از آن‌ها و همچنین نام اختصاری آن‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۴. مشخصات دال‌ها و تیرچه‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر

توصیف	نام اختصاری	تعداد دال	تعداد تیرچه	سطح کرنش کنترل شده
شاهد	پیرنشده	N	۱	۴۰۰-۶۰۰-۸۰۰
	پیرشده	N-AG	۱	۴۰۰-۶۰۰-۸۰۰
اصلاح شده با جوان‌ساز راپیول	پیرنشده	RO	۱	۴۰۰-۶۰۰-۸۰۰
	پیرشده	RO-AG	۱	۴۰۰-۶۰۰-۸۰۰

برای این منظور، اقدام به ساخت چهار نوع مختلف دال شد. دو نوع از دال‌ها مربوط به نمونه‌های اصلاح شده بود

نیاز آزمایش به ابعاد $380 \times 63 \times 50$ میلی‌متر برش زده شدند.

جهت تهیه نمونه‌های پیرشده شاهد و اصلاح شده با راپیول در ابتدا مخلوط آسفالتی با قیر ۷۰-۶۰ ساده (نمونه شاهد) و قیر ۷۰-۶۰ اصلاح شده با ۰/۰۸ درصد راپیول (نمونه اصلاح شده) تهیه گردید. پیرشدگی در دو مرحله اولیه و ثانویه اعمال گردید. در پیرشدگی اولیه (ASTM D2872) نمونه‌ها به صورت غیرمتراکم (با ضخامت یکنواخت ۲/۵ تا ۵ سانتی‌متر) به مدت زمان ۴ ساعت (با هدف پخش یکنواخت گرما هر یک ساعت مخلوط را هم زده و سینی چرخانده می‌شود) تا دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد گرم می‌شوند. در شکل ۴ نمونه‌ها در حال اعمال پیرشدگی اولیه و دستگاه گرم‌کن مورد استفاده نشان داده شده است. در گام بعد، جهت اعمال پیرشدگی ثانویه (ASTM D6521)، مخلوط آسفالتی با پیرشدگی اولیه حاصل در مرحله قبل به درون قالب دال ریخته و متراکم گردید. سپس، دال‌های حاصل به روشی که در ادامه تشریح می‌گردد به اندازه تیرچه‌های مورد نیاز آزمایش ($380 \times 63 \times 50$ میلی‌متر) برش زده شده و به مدت ۱۲۰ ساعت در دمای ۸۵ درجه سلسیوس قرار گرفتند. پس از گذشت این مدت زمان، پیرشدگی ثانویه به اتمام رسید. شکل ۵، نمونه‌های در حال اعمال پیرشدگی ثانویه را نشان می‌دهد. در نهایت، درب

جهت ساخت تیرچه‌های آسفالتی لازم برای انجام آزمایش خستگی، ابتدا باید دال‌های آسفالتی تهیه گردد.

ساخت تیرچه‌های آزمایش را نشان می‌دهد. سه روز پس از ساخت دال‌های آسفالتی شاهد و اصلاح‌شده، مقاطع آماده‌شده به آزمایشگاه انتقال داده شدند. سپس با استفاده از دستگاه مخصوص برش آسفالت (

شکل ۶-ج) و مطابق استاندارد (AASHTO T321)، دال‌های آسفالتی به اندازه‌های کوچکتر (به گونه‌ای که هر دال به سه تیرچه هم‌اندازه تبدیل گردید) برش داده شدند.

که با توجه به حالت‌های پیرنشده و پیرشده تهیه و برش خوردند. همچنین، دو نوع دیگر آن مربوط به نمونه شاهد (فاقد اصلاح‌کننده) جهت بررسی میزان تأثیرگذاری ماده افزودنی جوان‌ساز بود که آنها هم در دو حالت پیرنشده و پیرشده ساخته و برش خوردند. دال‌های ساخته‌شده دارای ابعاد $381 \times 267 \times 50$ میلی‌متر و تیرچه‌های حاصل از برش آن‌ها دارای ابعاد $380 \times 63 \times 50$ میلی‌متر هستند.

شکل ۶-الف و ب به ترتیب قالب مورد استفاده جهت تهیه دال‌های آسفالتی و دال‌های تهیه شده جهت



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۶. الف) قالب‌های مورد استفاده جهت ساخت دال‌های آسفالتی، ب) دال‌های ساخته شده جهت تهیه تیرچه‌ها و، ج) دستگاه مخصوص برش آسفالت

در نمونه شود ادامه می‌یابد. در نهایت، خروجی آزمایش، پیش بینی عمر خستگی قیر از روی دامنه کرنش می‌باشد. طبق این آزمایش و براساس مشخصات PG، قیر زمانی در برابر خستگی مقاوم شناخته می‌شود که پارامتر $G^* \cdot \sin \delta$ در قیر پیرشده بلندمدت کمتر از ۵۰۰۰ کیلوپاسکال در دمای میانی (۴ درجه بیشتر از میانگین دمای عملکردی بالا و پایین قیر) باشد. مشخصه موجود قیرها بر اساس کمترین مقدار برای پارامتر $G^* \cdot \sin \delta$ می‌باشد. این مشخصه بر اساس این فرض است که قیر سخت‌تر بسیار حساس‌تر به ترک‌های خستگی و دمای کم می‌باشد. این فرض بر این اساس است که تمامی قیرها مقاومت کششی یکسانی دارند.

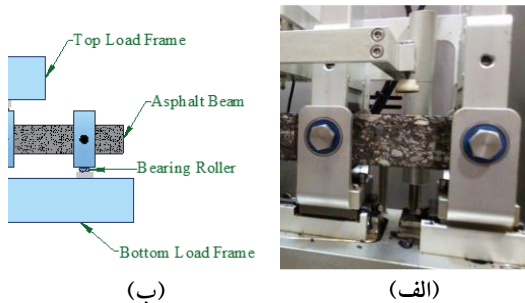
۳. آزمایش‌ها

۳-۱. آزمایش LAS

به منظور بررسی مقاومت نمونه‌های قیری شاهد و اصلاح شده با راپیول (در شرایط پیرنشده و پیرشده) در برابر خستگی از آزمایش جاروب دامنه خطی (LAS) استفاده شده است. این آزمایش توسط دستگاه رئومتر برش دینامیک و براساس استاندارد AASHTP TP-101 انجام شده است. آزمایش با اعمال نیروی سینوسی با فرکانس ۱۰ هرتز در دو سطح کرنش $2/5$ و ۵ درصد و در دمای ۲۵ درجه سلسیوس به نمونه قیر انجام شده است. بعد از اعمال تعداد مشخصی از سیکل بارگذاری، دامنه تنش اعمالی افزایش می‌یابد و فرآیند تا زمانی که دامنه تنش اعمالی به اندازه کافی بالا رود تا منجر به خرابی

۲-۳. آزمایش خستگی مخلوط آسفالتی

در این پژوهش، از دستگاه تیر خمشی چهارنقطه‌ای جهت اندازه‌گیری عمر خستگی در مخلوط آسفالتی استفاده گردیده است. شمای کلی دستگاه در

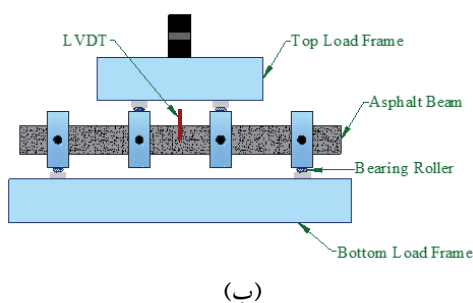


(ب)



(الف)

شکل ۷-ب نشان داده شده‌اند. خمش ساده به صورت تکراری روی تیرچه آسفالتی مورد نظر اعمال و تغییر شکل ناشی از اعمال نیرو با استفاده از کرنش‌سنج‌های موجود روی نمونه اندازه‌گیری می‌شود. از طریق گیره‌های جانبی هوایی، موقعیت جانبی نمونه ثابت شده و نمونه در وسط قرار می‌گیرد. موقعیت قائم نمونه نیز توسط موتورهای الکتریکی به صورت مداوم در طول آزمایش ثابت نگه داشته می‌شود. برای اعمال نقاط صحیح بارگذاری از گیره‌های تعیین موقعیت استفاده می‌شود.



(ب)



(الف)

شکل ۷. الف) شمای کلی از دستگاه تیر خمشی چهارنقطه‌ای، و ب) شکل شماتیک اجزا و موقعیت گره‌های دستگاه آزمایش (شفابخش و همکاران، ۲۰۲۴)

دو نوع سینوسی و نیم‌سینوسی است. میزان تنش تعیین شده در حالت تنش-کنترل تا مرحله شکست نمونه اعمال می‌گردد. اما در حالت کرنش-کنترل، سیستمی بازخوردی در دستگاه بارگذاری آزمایش خستگی تعبیه

مطابق با استاندارد AASHTO T321، آزمایش خستگی تیر خمشی در دو حالت تنش-کنترل و کرنش-کنترل صورت می‌پذیرد. در حالت تنش-کنترل موج بارگذاری از نوع سینوسی و در حالت کرنش-کنترل از

کرنش ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میکرواسترین مورد آزمایش قرار گرفتند. بارگذاری آزمایش از نوع نیمه‌سینوسی با فرکانس ۱۰ هرتز و بدون استراحت در حالت کرنش کنترل‌شده انجام گردیده است.

با توجه به بررسی نتایج تحقیقات محققین پیشین، برای مشاهده پتانسیل جوان‌سازها در رویه‌های آسفالتی، نمونه‌ها در سطوح با کرنش کم، متوسط و زیاد و دمای متوسط آزمایش شدند. نمونه‌ها در سه سطح کرنش ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میکرواسترین و در دمای ۲۲/۵ درجه سلسیوس مورد آزمایش قرار گرفتند و آزمایش‌ها تا رسیدن به مرحله شکست (کاهش ۵۰ درصد ضریب سختی) در مقابل تکرار بار ادامه پیدا کردند.

۴. بررسی و تحلیل نتایج

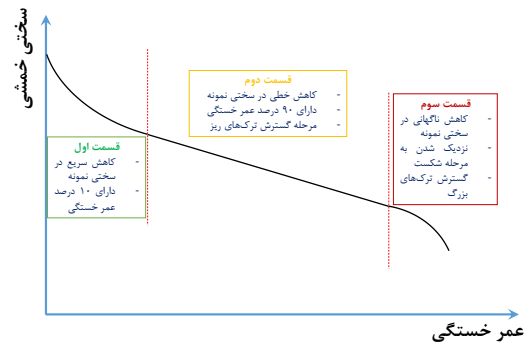
آزمایش LAS با اعمال نیروی سینوسی با فرکانس ۱۰ هرتز در دو سطح کرنش ۲/۵ و ۵ درصد و در دمای ۲۵ درجه سلسیوس به نمونه‌های قیر شاهد و اصلاح‌شده با راپیول در دو حالت پیرنشده و پیرشده انجام شد. همچنین، آزمایش خمش تیر چهارنقطه‌ای در حالت کرنش-کنترل (سه سطح کرنش ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میکرواسترین) در دمای ۲۲/۵ درجه سلسیوس روی نمونه‌های شاهد و اصلاح‌شده با راپیول در دو حالت پیرنشده و پیرشده انجام گردید که در ادامه، نتایج به‌دست آمده بررسی می‌گردد.

۴-۱. نتایج آزمایش LAS

نتایج آزمایش LAS در سطوح کرنش ۲/۵ و ۵ درصد و در دمای ۲۵ درجه سلسیوس برای نمونه‌های شاهد و اصلاح‌شده با راپیول در دو حالت پیرنشده و پیرشده در شکل ۹ نشان داده شده است.

همانطور که نتایج نشان می‌دهد، عمر خستگی نمونه‌های پیرنشده حاوی جوان‌ساز راپیول نسبت به نمونه شاهد آن در هر دو سطح کرنش ۲/۵ و ۵ درصد به

شده است، به طوری که پس از هر بارگذاری مجدد، تنش به گونه‌ای اصلاح می‌گردد که کرنش در حد معینی ثابت باقی بماند. نمودار سختی خمشی مربوط به حالت کرنش-کنترل در آزمایش‌های خستگی شامل سه قسمت به صورت شکل ۸ است.



شکل ۸. نمودار سختی خمشی حالت کرنش-کنترل در آزمایش خستگی

نمونه می‌تواند در حالت کرنش-کنترل، به علت کاهش میزان تنش، مدت زیادی را در مرحله سوم بدون کاهش چشم‌گیر در میزان سختی خمشی باقی بماند. با توجه به این موضوع، معیار شکست به طور عمومی به‌صورت کاهش سختی خمشی تا درصدی از سختی خمشی اولیه تعریف می‌شود. استاندارد AASHTO T321 این میزان را ۵۰ درصد تعیین نموده است. اما به علت اختلاف موجود در محاسبه سختی خمشی اولیه و برخی اوقات پراکندگی نتایج، بهترین معیار برای تعیین مرز شکست نمونه، توجه به نمودار سختی خمشی شکل ۸ است.

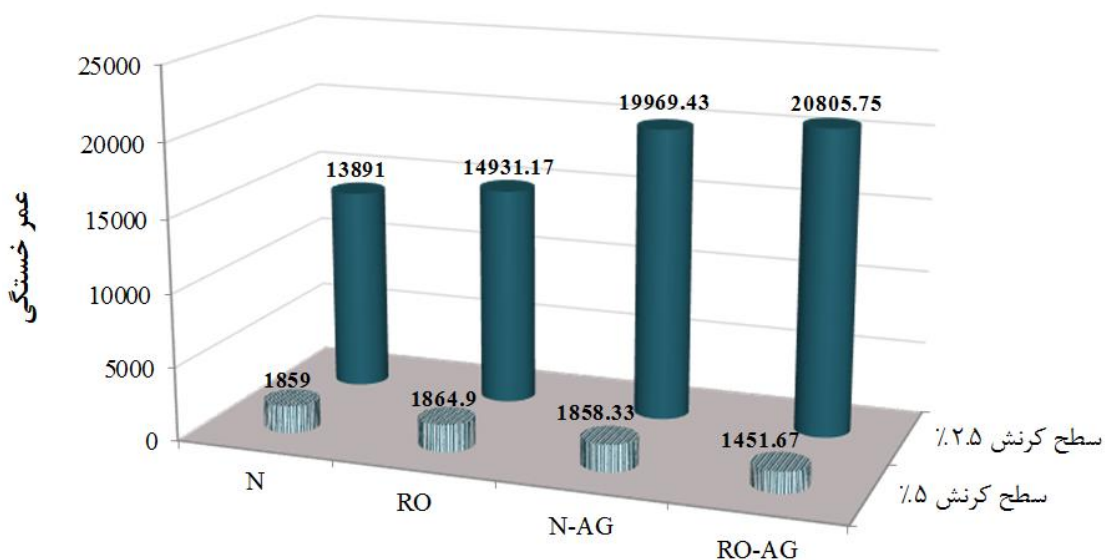
حداقل تعداد نمونه‌های لازم برای تکرار انجام آزمایش برای هر نوع نمونه سه عدد می‌باشد. تعداد نمونه‌های حاصل از عملیات برش دال‌ها برای هر نوع نمونه نیز سه عدد می‌باشد. نمونه‌های موجود شامل چهار نوع هستند (نمونه‌های شاهد و نمونه‌های اصلاح‌شده با جوان‌ساز راپیول) که دو نوع آن در حالت پیرنشده و دو نوع در حالت پیرشده می‌باشند. سه نمونه در سه سطح

نمونه شاهد پیرنشده برابر با ۱۸۵۹ و عمر خستگی نمونه شاهد پیرشده برابر با ۱۸۵۸/۳۳ بوده است.

در حالت کلی، همانطور که کاملاً واضح است، عمر خستگی قیر در سطح کرنش ۲/۵ درصد بسیار بیشتر از سطح کرنش ۵ درصد می‌باشد. بنابراین، با افزایش سطح کرنش از ۲/۵ درصد به ۵ درصد، عمر خستگی نمونه کاهش می‌یابد که این نتیجه کاملاً منطبق بر یافته‌های محققین پیشین نیز می‌باشد (دریایی و عامری، ۲۰۲۱). همانطور که مشخص است، افزایش سطح کرنش به معنای افزایش عبور و مرور بارهای ترافیکی می‌باشد و کاملاً واضح است که با افزایش تعداد و وزن بارهای ترافیکی، عمر خستگی قیر و مخلوط آسفالتی نیز کاهش می‌یابد.

ترتیب به طور تقریبی ۷/۵ و ۰/۳ درصد افزایش یافته است. این در حالی است که نمونه‌های پیرشده نتایج متفاوت‌تری را از خود نشان دادند؛ به گونه‌ای که در سطح کرنش ۲/۵ درصد، استفاده از جوان‌ساز راپیول عمر خستگی را ۴/۱ درصد افزایش داده، اما در سطح کرنش ۵ درصد، عمر خستگی را به میزان ۲۱/۸ درصد کاهش داده است. بنابراین، استفاده از جوان‌ساز راپیول در سطح کرنش ۵ درصد برای نمونه قیر پیرشده نه تنها کمکی به بهبود عمر خستگی نکرده، بلکه سبب کاهش آن نیز شده است.

نتایج آزمایش LAS همچنین نشان می‌دهد که عمر خستگی قیر شاهد در حالت پیرشده و پیرنشده تقریباً با یکدیگر برابر بوده است، به گونه‌ای که عمر خستگی



شکل ۹. عمر خستگی نمونه‌های شاهد و اصلاح‌شده با راپیول حاصل از آزمایش LAS

۲-۴. نتایج آزمایش خستگی

بارگذاری تا مرحله شکست (کاهش سختی خمشی تا حد ۵۰ درصد سختی خمشی اولیه) در سه سطح کرنش مطابق جدول ۵ بدست آمده است.

عمر خستگی نمونه‌های مورد آزمایش که شامل مخلوط‌های شاهد و اصلاح‌شده با جوان‌ساز در حالت‌های پیرنشده و پیرشده بودند بر اساس تعداد تکرار

جدول ۵. نتایج آزمایشگاهی مربوط به تعداد تکرار بار تا مرحله شکست در انواع نمونه‌ها

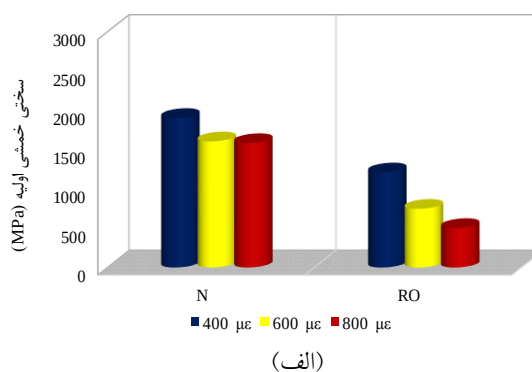
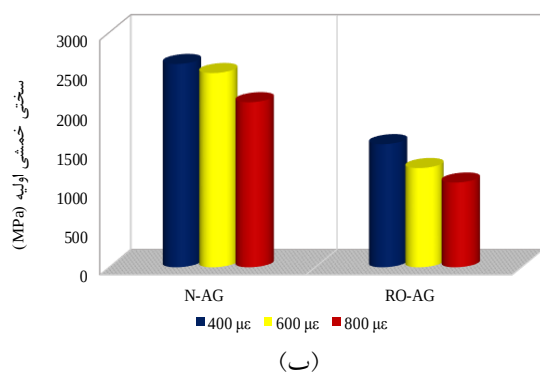
نوع نمونه	عمر خستگی در سطح کرنش (سیکل)			سختی خمشی اولیه در سطح کرنش (MPa)		
	۴۰۰	۶۰۰	۸۰۰	۴۰۰	۶۰۰	۸۰۰
N	۱۶۰۹۳	۲۰۷۲	۶۶۲	۱۹۰۴	۱۶۰۶	۱۵۸۴
N-AG	۸۹۰۰	۷۴۷	۳۰۸	۲۵۹۸	۲۴۸۲	۲۱۰۹
RO	۲۲۸۴۹	۷۰۲۱	۲۵۴۴	۱۲۱۱	۷۴۷	۵۰۳
RO-AG	۱۷۷۷۱	۲۷۴۴	۱۸۴۴	۱۵۷۳	۱۲۶۸	۱۰۸۳

نمونه‌های اصلاح‌شده با جوان‌ساز راپیول دارای کمترین سختی خمشی اولیه در هر سه سطح کرنش کنترل‌شده مورد استفاده بودند.

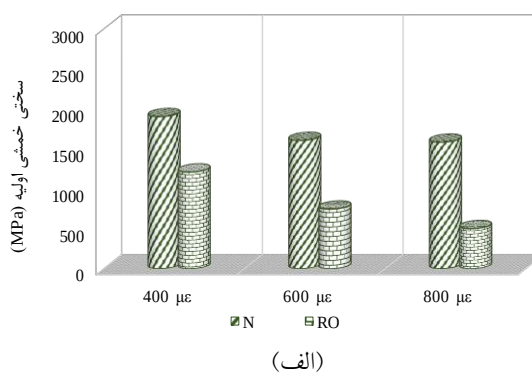
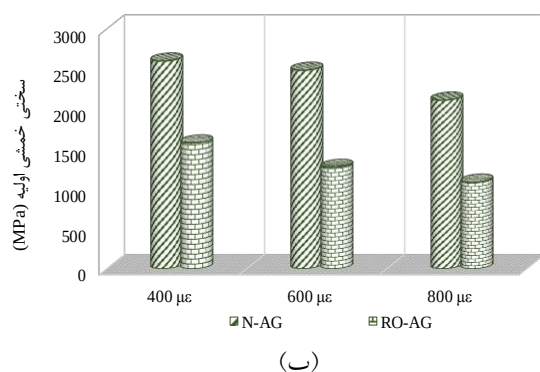
شکل‌های ۱۰ و ۱۱، سختی خمشی اولیه نمونه‌های مورد آزمایش را در حالت پیرنشده و پیرشده (شامل نمونه‌های شاهد و اصلاح‌شده با جوان‌ساز راپیول) در سه سطح کرنش کنترل‌شده ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میکرواسترین با یکدیگر مقایسه می‌کنند.

سختی خمشی تابع ورودی‌های مختلفی از جمله عرض و ارتفاع تیرچه، فاصله گیره‌های بارگذاری، فاصله تکیه‌گاه‌ها از یکدیگر و میانگین تغییر مکان وسط تیرچه می‌باشد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که ایجاد تغییر در هر یک از این عوامل باعث ایجاد تغییر در سختی خمشی نمونه خواهد شد.

براساس نتایج حاصل از آزمایش تیر خمشی چهارنقطه‌ای، در هر دو حالت پیرنشده و پیرشده،



شکل ۱۰. سختی خمشی اولیه نمونه‌های شاهد و اصلاح‌شده با راپیول در سطوح مختلف کرنش: (الف) پیرنشده و (ب) پیرشده

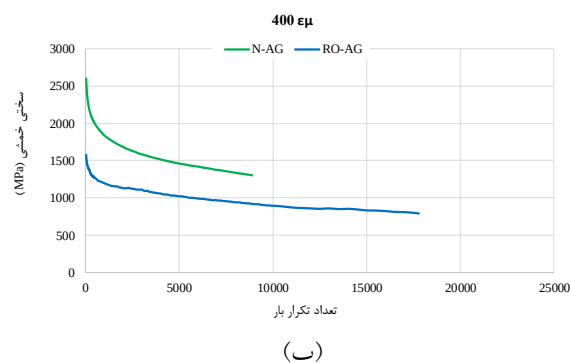


شکل ۱۱. سختی خمشی اولیه در سطوح مختلف کرنش نمونه‌های شاهد و اصلاح‌شده: (الف) پیرنشده و (ب) پیرشده

کرنش ۸۰۰ میکرواسترین) و ۱۲۱۴ مگاپاسکال (در سطح کرنش ۶۰۰ میکرواسترین) می باشد.

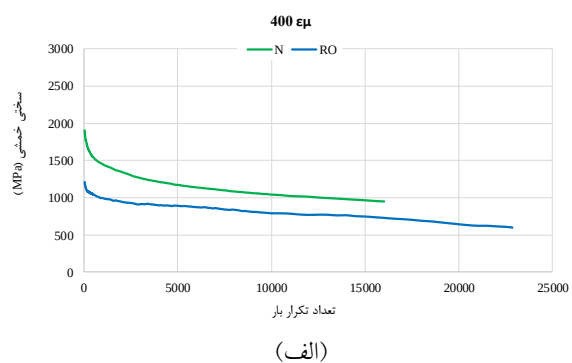
طبق این نمودارها، در هر دو حالت پیرنشده و پیرشده، بیشترین و کمترین میزان سختی خمشی اولیه به ترتیب مربوط به نمونه شاهد در سطح کرنش کنترل شده ۴۰۰ میکرواسترین و نمونه اصلاح شده با راپیول در سطح کرنش کنترل شده ۸۰۰ میکرواسترین می باشد که در حالت پیرنشده به ترتیب برابر با ۱۹۰۴ و ۵۰۳ مگاپاسکال و در حالت پیرشده به ترتیب برابر با ۲۵۹۸ و ۱۰۸۳ مگاپاسکال است.

شکل های ۱۲ تا ۱۴، روند تغییرات سختی خمشی در مقابل عمر خستگی نمونه ها را در هر دو حالت پیرنشده و پیرشده به ترتیب در سطوح کرنش کنترل شده ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میکرواسترین نشان می دهند. در این نمودارها (نمودارهای سختی خمشی-تعداد تکرار بار)، کاهش سختی خمشی مخلوط آسفالتی بیانگر افزایش انعطاف پذیری و رفتار بهتر نمونه مخلوط آسفالتی در برابر خستگی (تکرار بارگذاری ها) می باشد که بیانگر افزایش عمر خستگی مخلوط است.



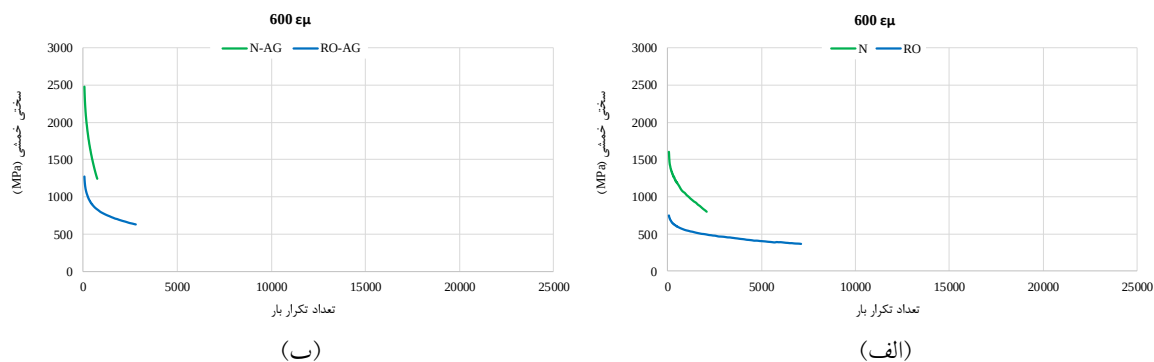
طبق شکل ۱۰، همانطور که انتظار می رفت با افزایش مقدار کرنش کنترل شده از ۴۰۰ تا ۶۰۰ و در نهایت ۸۰۰ میکرواسترین، میزان سختی خمشی اولیه در هر دو حالت پیرنشده و پیرشده و برای هر دو نوع نمونه شاهد و اصلاح شده کاهش می یابد.

از طرف دیگر، براساس نمودار شکل ۱۱ می توان عنوان کرد که نمونه های شاهد سختی خمشی اولیه بیشتری در تمام سطوح کرنش کنترل شده از خود نشان داده اند. این بدان معنی است که نمونه های شاهد انعطاف پذیری بالاتری را نسبت به نمونه های اصلاح شده با راپیول از خود نشان داده اند و می توان این نمونه ها را به عنوان نمونه هایی با بیشترین سختی خمشی اولیه معرفی کرد. نتیجه به دست آمده دیگر از این نمودار این است که نمونه اصلاح شده با راپیول دارای سختی خمشی اولیه کمتری نسبت به نمونه شاهد هستند. همچنین، می توان بیان کرد که بیشترین کاهش سختی خمشی اولیه در اثر کاربرد جوان ساز راپیول در حالت پیرنشده و پیرشده به ترتیب برابر با ۱۰۸۱ مگاپاسکال (در سطح

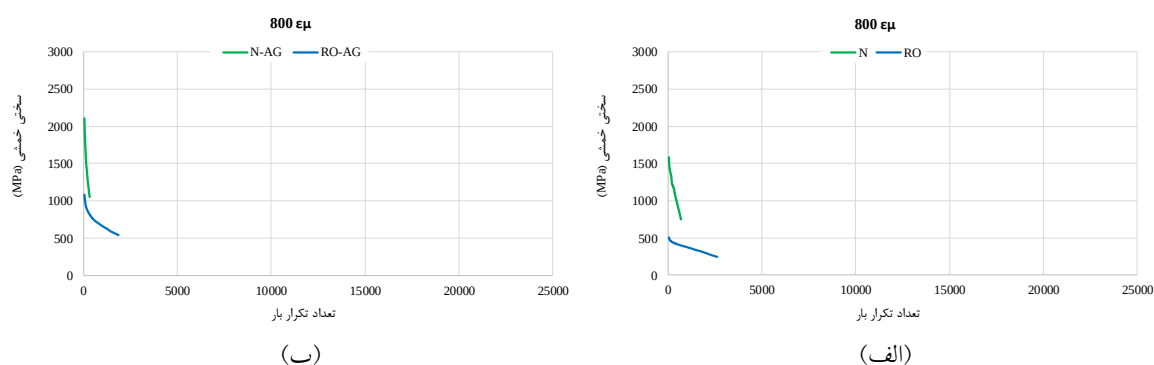


شکل ۱۲. تغییرات سختی خمشی در مقابل عمر خستگی نمونه ها در کرنش ۴۰۰ میکرواسترین: (الف) پیرنشده و (ب) پیرشده

مطالعه آزمایشگاهی تأثیر جوان‌ساز (راپیول) روی عمر خستگی قیر و مخلوط آسفالتی گرم تحت شرایط پیرنشده و پیرشده



شکل ۱۳. تغییرات سختی خمشی در مقابل عمر خستگی نمونه‌ها در کرنش ۶۰۰ میکرواسترین: (الف) پیرنشده و (ب) پیرشده

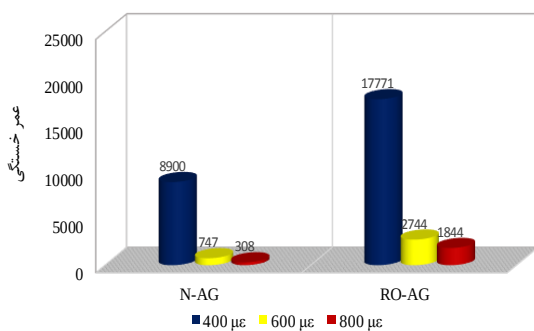


شکل ۱۴. تغییرات سختی خمشی در مقابل عمر خستگی نمونه‌ها در کرنش ۸۰۰ میکرواسترین: (الف) پیرنشده و (ب) پیرشده

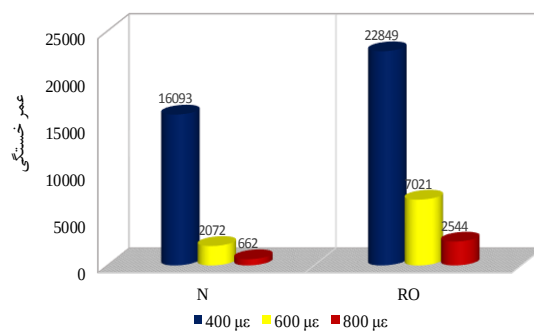
اصلاح‌شده با راپیول است. روند تغییرات سختی خمشی با افزایش تکرار بارگذاری در هر سه سطح کرنش کنترل‌شده نشان‌دهنده آن است که میزان سختی خمشی در سیکل بارگذاری متناظر از نمونه شاهد تا نمونه اصلاح‌شده با راپیول کاهش می‌یابد.

شکل‌های ۱۵ و ۱۶، عمر خستگی نمونه‌های مختلف مورد آزمایش در سطح کرنش‌های کنترل‌شده ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میکرواسترین را برای هر دو حالت پیرنشده و پیرشده نشان می‌دهند.

طبق نمودارهای شکل‌های ۱۲ تا ۱۴، با افزایش تکرار بارگذاری، میزان سختی خمشی تمام نمونه‌ها در حال کاهش است. در هر دو حالت پیرنشده و پیرشده، در کرنش ۴۰۰ میکرواسترین، این روند کاهش برای هر دو نوع نمونه شاهد و اصلاح‌شده مشابه یکدیگر است. اما در دو کرنش ۶۰۰ و ۸۰۰ میکرواسترین، نمونه‌های شاهد و اصلاح‌شده روند مشابهی ندارند؛ به گونه‌ای که در هر دو حالت پیرنشده و پیرشده، در نمونه شاهد این روند کاهشی دارای شیب بیشتر و تندتری نسبت به نمونه

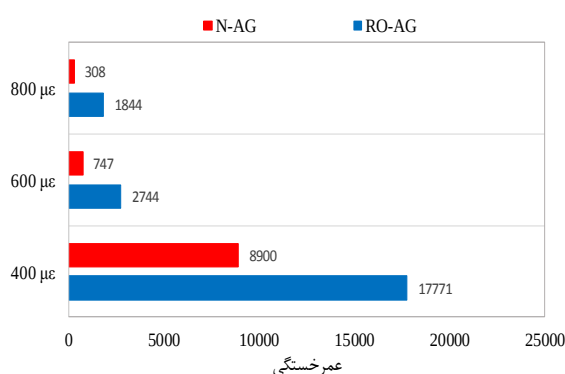


(ب)

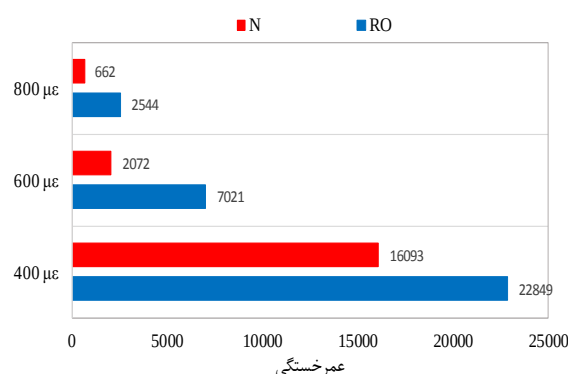


(الف)

شکل ۱۵. عمر خستگی نمونه‌های شاهد و اصلاح شده با راپیول در سطوح کرنش مختلف: الف) پیرنشده و ب) پیرشده



(ب)



(الف)

شکل ۱۶. مقایسه عمر خستگی نمونه‌ها در سطوح کرنش مختلف: الف) پیرنشده و ب) پیرشده

راپیول در هر سه سطح کرنش کنترل شده و در هر دو حالت پیرنشده و پیرشده تأثیر قابل توجهی روی عمر خستگی نسبت به نمونه‌های شاهد گذاشته است که این امر به طور کامل منطبق با یافته‌های سایر پژوهشگران می‌باشد (دریایی و عامری، ۲۰۲۱).

همچنین، بر اساس شکل ۱۶، عمر خستگی نمونه RO در سطوح کرنش ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میکرواسترین به ترتیب ۱/۴۲، ۳/۳۹ و ۳/۸۴ برابر عمر خستگی نمونه شاهد متناظر آن (N) است. به عبارت دیگر، عمر خستگی نمونه RO نسبت به نمونه N در هر سه سطح کرنش ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میکرواسترین به ترتیب ۴۲، ۳۹ و ۲۳۹ درصد افزایش یافته است. همچنین، عمر خستگی نمونه RO-AG در سطوح کرنش ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میکرواسترین به ترتیب ۱/۹۹، ۳/۶۷ و ۵/۹۸ برابر عمر

همانطور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌گردد، در هر دو حالت پیرنشده و پیرشده، افزایش میزان کرنش کنترل شده از ۴۰۰ تا ۸۰۰ میکرواسترین، عمر خستگی کاهش می‌یابد که کاملاً مورد انتظار است. به عبارت دیگر، افزایش میزان کرنش کنترل شده به معنی اعمال بارگذاری سنگین‌تر روی سازه روسازی می‌باشد. همانطور که مشخص است، هرچه میزان بارگذاری وارد شده بر سازه روسازی سنگین‌تر باشد، روسازی زودتر خسته شده و بنابراین عمر خستگی آن کاهش می‌یابد. همچنین، طبق این نمودار، در هر دو حالت پیرنشده و پیرشده، بیشترین و کمترین میزان عمر خستگی به ترتیب مربوط به نمونه‌های شاهد (RO و RO-AG) در کرنش کنترل شده ۴۰۰ میکرواسترین و نمونه‌های N و N-AG در کرنش کنترل شده ۸۰۰ میکرواسترین می‌باشد. بنابراین، کاربرد

خستگی نمونه شاهد متناظر آن (N-AG) است. به عبارت دیگر، عمر خستگی نمونه RO-AG نسبت به نمونه N-AG در هر سه سطح کرنش ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میکرواسترین به ترتیب ۱۰۰، ۲۶۷ و ۴۹۹ درصد افزایش یافته است. بنابراین، همانطور که مشخص گردید، با افزایش سطح کرنش کنترل شده، میزان تأثیرگذاری ماده اصلاح‌کننده بر عمر خستگی افزایش می‌یابد.

کاربرد جوان‌ساز راپیول سبب بازسازی فازهای سبک‌تر قیر و افزایش یکنواختی در توزیع اجزای قیر می‌شود به گونه‌ای که کاهش شکنندگی و افزایش انعطاف‌پذیری قیر را به دنبال دارد (عربانی و همکاران، ۱۳۹۱). همچنین، این جوان‌ساز سبب کاهش ویسکوزیته قیر شده است به گونه‌ای که با افزایش ایجاد چسبندگی بین فاز قیر و مصالح، سبب بهبود پوشش‌دهی سنگدانه‌ها گردیده است. این امر سبب کاهش تمرکز تنش در نواحی بحرانی و توزیع بهتر تنش در کل مخلوط آسفالتی می‌شود که در نهایت سبب بهبود مقاومت مخلوط در برابر خستگی می‌شود (عربانی و همکاران، ۱۳۹۱). علاوه بر این، از آنجایی که سختی قیر پیرشده نیز افزایش یافته است و بنابراین مقاومت ترک‌خوردگی آن نیز کاهش می‌یابد، بنابراین جوان‌ساز راپیول قادر است اجزای سبک و فعال را به قیر بازگردانده و سبب افزایش انعطاف‌پذیری آن گردد. این بازسازی ترکیب میکروسکوپی و شیمیایی قیر پیرشده را به حالت اولیه قیر پیرنشده بسیار نزدیک می‌کند (عربانی و همکاران، ۱۳۹۱).

۳-۴. مقایسه نتایج آزمایش خستگی قیر و نتایج

آزمایش خستگی مخلوط آسفالتی

بر اساس نتایج حاصل از کار تحقیقاتی مسعد و همکاران (۲۰۰۸)، کرنش در آزمایش خستگی قیر به صورت تقریبی در حدود ۵۰ برابر کرنش در آزمایش خستگی مخلوط آسفالتی می‌باشد. با توجه به این نتیجه، در تحقیق

حاضر، سطح کرنش ۴۰۰ و ۸۰۰ میکرواسترین در آزمایش خستگی مخلوط آسفالتی به ترتیب متناظر با کرنش‌های ۲/۵ و ۵ درصد در آزمایش خستگی قیر می‌باشد. تفاوت بیان شده در بخش‌های قبل در ارتباط با نتایج خستگی قیر و مخلوط آسفالتی به علت ماهیت چندفازی و پیچیده مخلوط آسفالتی و تفاوت در مکانیزم‌های آسیب در مقیاس ماده قیر و مخلوط حجمی است. در آزمایش LAS که روی قیر انجام می‌شود، رفتار خستگی عمدتاً تابع خواص رئولوژیک و شیمیایی قیر است و اثر افزودنی جوان‌ساز در بهبود انعطاف‌پذیری و کاهش سختی قیر در مقیاس مولکولی بررسی می‌شود. در حالی که در آزمایش 4-PBB، عملکرد خستگی مخلوط آسفالتی تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله نوع و دانه‌بندی مصالح سنگی، چسبندگی بین قیر و سنگدانه، ساختار حجمی مخلوط، و نحوه توزیع تنش و کرنش در نمونه است. افزودنی راپیول ممکن است در مقیاس قیر، به‌ویژه در شرایط پیرشدگی و کرنش‌های بالا، منجر به کاهش مقاومت خستگی شود که می‌تواند ناشی از کاهش بیش از حد سختی قیر و افزایش حساسیت به آسیب تجمعی باشد. اما در مقیاس مخلوط، همین افزودنی با بهبود چسبندگی قیر به سنگدانه‌ها، افزایش همگنی مخلوط و کاهش تمرکز تنش در نواحی بحرانی، منجر به بهبود قابل توجه عملکرد خستگی شده است. این پدیده در مطالعات مشابه (ملاحمدی عمران و حسامی، ۲۰۲۲) نیز گزارش شده است که همبستگی کامل و خطی بین نتایج آزمایش‌های قیر و مخلوط آسفالتی وجود ندارد و رفتار مخلوط تابعی از برهم‌کنش‌های پیچیده‌تر است.

در نتیجه، این تفاوت نه تنها غیرمنتظره نیست، بلکه نشان‌دهنده ضرورت تحلیل عملکرد افزودنی‌ها در هر دو مقیاس قیر و مخلوط برای دستیابی به ارزیابی جامع‌تر از کارایی آن‌هاست.

۵. نتیجه گیری

در این مقاله، سختی خمشی و عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی پیرنشده و پیرشده شاهد و اصلاح‌شده با جوان‌ساز راپیول بررسی شده و عمر خستگی هر کدام از حالت‌های مطرح‌شده مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور، از آزمایش تیر خمشی چهارنقطه‌ای با بارگذاری نیمه‌سینوسی و با فرکانس ۱۰ هرتز و بدون استراحت در حالت کرنش کنترل‌شده در سه سطح کرنش ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میکرواسترین و دمای ۲۲/۵ درجه سلسیوس استفاده شده است. نتایج به‌دست آمده از این آزمایش‌ها به صورت مختصر در زیر ارائه گردیده است:

- ۱- براساس نتایج آزمایش LAS، کاربرد جوان‌ساز راپیول در نمونه قیر پیرنشده در هر دو سطح کرنش ۲/۵ و ۵ درصد به ترتیب سبب افزایش عمر خستگی قیر به ترتیب در حدود ۷/۵ و ۰/۳ درصد شده است. در حالی که کاربرد جوان‌ساز راپیول در نمونه قیر پیرشده در سطح کرنش ۲/۵ درصد عمر خستگی را ۴/۱ درصد افزایش داده، اما در سطح کرنش ۵ درصد ۲۱/۸ درصد کاهش داده است.

- ۲- با افزایش میزان کرنش کنترل شده از ۴۰۰ تا ۸۰۰ میکرواسترین، سختی خمشی اولیه، سختی خمشی و عمر خستگی تمام مخلوط‌های آسفالتی پیرنشده و پیرشده کاهش می‌یابد. علاوه بر این، شیب کاهش سختی خمشی نیز افزایش داشته است که این امر استدلالی بر کم شدن عمر خستگی تمام نمونه‌ها می‌باشد. بنابراین، کمترین و بیشترین عمر خستگی و سختی خمشی به ترتیب مربوط به کرنش ۸۰۰ و ۴۰۰ میکرواسترین است.

- ۳- در هر سه سطح کرنش (۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میکرواسترین) برای هر دو حالت پیرنشده و پیرشده، استفاده از جوان‌ساز راپیول سبب افزایش عمر خستگی گردیده است که علت این امر افزایش ساختار روغنی قیر است.

- ۴- در حالت پیرنشده، کاربرد اصلاح‌کننده راپیول سبب افزایش عمر خستگی گردیده است؛ به گونه‌ای که عمر خستگی نمونه RO نسبت به نمونه N در هر سه سطح کرنش ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میکرواسترین به ترتیب ۲۳۹، ۲۸۴ و ۲۸۴ درصد افزایش یافته است.

- ۵- در حالت پیرشده، کاربرد اصلاح‌کننده راپیول سبب افزایش عمر خستگی گردیده است؛ به گونه‌ای که عمر خستگی نمونه RO-AG نسبت به نمونه N-AG در هر سه سطح کرنش ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میکرواسترین به ترتیب ۱۰۰، ۲۶۷ و ۴۹۹ درصد افزایش یافته است.

- ۶- میزان تأثیرگذاری اصلاح‌کننده راپیول بر عمر خستگی، با افزایش کرنش کنترل شده افزایش یافته است. همچنین، میزان تأثیرگذاری آن در حالت پیرشده در حدود دو برابر حالت پیرنشده است.

- ۷- یکی از مهمترین تفاوت‌های تحقیق حاضر با مطالعات پیشین در نحوه افزودن ماده اصلاح‌کننده جوان‌ساز می‌باشد. هرچند از ماده جوان‌ساز برای اصلاح آسفالت‌های قدیمی یا تولید مخلوط‌های بازیافتی استفاده می‌شود اما در این تحقیق، ماده جوان‌ساز در هنگام ساخت مخلوط آسفالتی و برای آسفالت تازه مصرف گردیده است. بررسی کلی نتایج نشان می‌دهد که افزودن این ماده در حدود ۰/۰۸ درصد وزن قیر، در تولید آسفالت تازه می‌تواند نقش به‌سزایی در افزایش عمر خستگی در تمام دوره بهره‌برداری (از زمان تولید مخلوط تا پیرشدگی نهایی) آن داشته باشد.

براساس نتایج حاصله، به طور کلی می‌توان عنوان کرد که جوان‌ساز راپیول به‌واسطه افزایش ساختار روغنی قیر، نقش مؤثری در کاهش سختی خمشی و افزایش دوام نمونه‌ها ایفا می‌کند، به‌طوری‌که در نمونه‌های پیرشده میزان بهبود عمر خستگی نسبت به نمونه‌های شاهد تا حدود ۵ برابر افزایش یافته است. همچنین، تأثیر این جوان‌ساز با افزایش سطح کرنش و در حالت پیرشده بیشتر محسوس بود. نکته قابل توجه در این تحقیق،

استفاده از راپیول نه در بازیافت بلکه در تولید آسفالت تازه با میزان حدود ۰/۰۸ درصد وزن قیر بود که نشان داد می‌تواند عملکرد خستگی مخلوط را در کل دوره بهره‌برداری به طرز معناداری افزایش دهد.

۶. مراجع

- Akbari, M., Shafabakhsh, G. and Ahadi, M. R. 2015. "Evaluating the safety effects of pavement condition index (PCI) on frequency of run-off-road accidents". *J. Transport. Infrastruct. Eng.*, 1(3): 47-61. <https://doi.org/10.22075/jtie.2015.316>
- Akbari, M., Shafabakhsh, G. and Ahadi, M. R. 2020a. "Single-vehicle run-off-road crash prediction model associated with pavement characteristics". *Int. J. Eng.*, 33(7): 1375-1386.
- Akbari, M., Shafabakhsh, G. and Ahadi, M. R. 2020b. "The impact of segmentation method on the aggregate goodness-of-fit measurements of non-linear crash prediction models". *SN Appl. Sci.*, 2: 1-13.
- 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). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004660](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004660)
- Cao, Z., Yu, J., Yi, J., Sun, G., Qiu, K., Xu, S. and Han, X. 2023. "Effect of different rejuvenation methods on the fatigue behavior of aged SBS modified asphalt". *Constr. Build. Mater.*, 407: 133494.
- Castell, M. A., Ingraffea, A. R. and Irwin, L. H. 2000. "Fatigue crack growth in pavements". *J. Transport. Eng.*, 126(4): 283-290.
- Cavalli, M. C., Wu, W. and Poulikakos, L. 2024. "Bio-based rejuvenators in asphalt pavements: A comprehensive review and analytical study". *J. Road Eng.*, 4(3): 282-291.
- Daryaei, D. and Ameri, M. 2021. "Evaluation of the correlation between performance parameters of asphalt binder and mixture in the RAP-containing asphalt mixtures". *Amirkabir J. Civ. Eng.*, 53(6): 2315-2334.
- DeDene, C. D. and You, Z. 2014. "The performance of aged asphalt materials rejuvenated with waste engine oil". *Int. J. Pavement Res. Technol.*, 7(2): 145-152.
- Ding, H., Wang, H., Qu, X., Varveri, A., Gao, J. and You, Z. 2021. "Towards an understanding of diffusion mechanism of bio-rejuvenators in aged asphalt binder through molecular dynamics simulation". *J. Clean. Prod.*, 299: 126927.
- Gulzar, S., Xue, L. (Gabriel), Preciado, J., Fried, A., Castorena, C., Underwood, B. S., Habbouche, J. and Boz, I. 2024. "Phenomenological modeling of aging and rejuvenation on asphalt binder fatigue characteristics". *Constr. Build. Mater.*, 425, 135929. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135929>
- Hu, Y., Ryan, J., Sreeram, A., Allanson, M., Pasandín, A. R., Zhou, L., Singh, B., Wang, H. and Airey, G. D. 2024. "Optimising the dosage of bio-rejuvenators in asphalt recycling: A rejuvenation index based approach". *Constr. Build. Mater.*, 433: 136761.
- Im, S., Karki, P. and Zhou, F. 2016. "Development of new mix design method for asphalt mixtures containing RAP and rejuvenators". *Constr. Build. Mater.*, 115, 727-734.
- Mansourkhaki, A., Ameri, M. and Daryaei, D. 2019. "Application of different modifiers for improvement of chemical characterization and physical-rheological parameters of reclaimed asphalt binder". *Constr. Build. Mater.*, 203: 83-94. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.086>
- Masad, E., Castelo Branco, V. T. F., Little, D. N. and Lytton, R. 2008. "A unified method for the analysis of controlled-strain and controlled-stress fatigue testing". *Int. J. Pavement Eng.*, 9(4): 233-246.
- Mirsafaei Rizi, S. M. 2016. "Rejuvenation of aged bitumen using the vacuum distillation tower bottom and investigate its characteristics". Master of Science Thesis, Isfahan University of Technology, Faculty of Civil Engineering. [In Persian]
- Mogawer, W. S., Austerman, A., Roque, R., Underwood, S., Mohammad, L. and Zou, J. 2015. "Ageing and rejuvenators: Evaluating their impact on high RAP mixtures fatigue cracking characteristics using advanced mechanistic models and testing methods". *Road Mater. Pavement Design*, 16(sup2): 1-28. <https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1076996>
- Molamohamadi Omran, A. and Hesami, S. 2022. "Correlation between asphalt chemical indices and fatigue performance and healing of reclaimed asphalt mixture containing waste oil and polymer". *J. Transport. Infrastruct. Eng.*, 8(2): 55-70.
- Notani, M. A., Moghadas Nejad, F., Khodaii, A. and Hajikarimi, P. 2019. "Evaluating fatigue resistance of toner-modified asphalt binders using the linear amplitude sweep test". *Road Mater. Pavement Design*, 20(8): 1927-1940. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1474792>

- Pasetto, M., Baliello, A., Giacomello, G. and Pasquini, E. 2023. "Laboratory evaluation of the effectiveness of rejuvenation in multiple hot recycling of asphalt mixtures". *J. Test. Eval.*, 51(4): 2075-2087. <https://doi.org/10.1520/JTE20220278>
- Pell, P. S. 1962. "Fatigue characteristics of bitumen and bituminous mixes". *International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements* University of Michigan, Ann Arbor, 203(1).
- Rohani, B., Akbari, M. and Hosseini, S. A. 2022. "Evaluation of fatigue behavior of asphalt layers containing nanosilica modified tack coat". *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2022(1): 2365457.
- Shafabakhsh, G., Sadeghnejad, M., Daraei, I., Sabbaghian, H. and Ebrahimnia, R. 2024. "The effect of Nano-CaO modified binder on the rutting and fatigue performance of asphalt mixtures". *Case Stud. Constr. Mater.*, e03757.
- Shahryari, E., Akbari, M. and Hamedipour, A. M. 2023. "Investigation of the effect of nano graphene oxide on fracture resistance of asphalt mixtures with a fracture energy approach". *Civ. Infrastruct. Res.*, 8(2): 1-17.
- Uchoa, A. F. J., Rocha, W. S., Gonzaga, M. L. C., Pedro Filho, P. M. T., Feitosa, J. P. M., Luna, F. M. T., Soares, J. B. and Soares, S. A. 2024. "Investigating the efficacy of bio-rejuvenators in restoring aged asphalt binder properties". *Constr. Build. Mater.*, 446: 137948.
- Wang, Z., Ding, H., Ma, X., Yang, W. and Ma, X. 2024. "Predicting dynamic properties and fatigue performance of aged and regenerated asphalt using time-temperature-aging and time-temperature-regenerator superposition principles". *Coatings*, 14(12): 1486. <https://doi.org/10.3390/coatings14121486>
- Xia, X., Tang, D., Wang, P. and Zhao, Y. 2024. "Synergistic effect of polymer- modified rejuvenator and fresh asphalt on road performance of hot in- place recycling styrene-butadiene-styrene- modified asphalt mixtures". *Polym. Int.*. <https://doi.org/10.1002/pi.6710>
- Yaseen, G., Jamal, A., Almoshageh, M., Alharbi, F. and Awan, H. H. 2022. "Performance evaluation of aged asphalt pavement binder through rejuvenators". *Sustain.*, 14(21): 14557. <https://doi.org/10.3390/su142114557>