



Research Article

Evaluation and Comparison of the Mechanical Properties and Durability of Recycled Cold Asphalt Mixtures Containing Portland Cement, Granulated Blast Furnace Slag, and Glass Fibers

Ali Sarabandi ^a, Pouria Hajikarimi ^{b*}, Fereidoon Moghadas Nejad ^c

^a MSc. Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, I. R. Iran.

^b Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, I. R. Iran.

^c Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-11-12

Revised: 2025-02-07

Accepted: 2025-02-08

Keywords:

Reclaimed asphalt pavement;
Ground granulated blast-furnace slag;
Cement;
Glass fiber;
Recycled cold asphalt.

ABSTRACT

In this study, effects of adding ground granulated blast furnace slag, Type II Portland cement, and glass fibers on the performance of recycled cold asphalt mixtures were investigated. Based on the previous studies, the additive content in the mixture was set at 2% by weight for cement and ground granulated blast furnace slag, and various percentages of glass fibers were considered, specifically 0.2%, 0.3%, and 0.4% of the aggregate weight in the asphalt mixture. Results indicated that recycled cold asphalt mixtures without additives do not possess sufficient durability. The use of glass fibers leads to an increase in Marshall stability up to a maximum of 10.3% compared to the base mix design. By increasing the percentage of emulsion bitumen in the recycled cold asphalt mixture, and in the worst case, it causes a decrease in indirect tensile strength in dry condition by at least 78% and 17.7% at the age of 7 and 28 days of the samples, which indicates a decrease in the moisture resistance of the recycled cold asphalt mixture containing glass fibers. Results also indicate that cement and ground granulated blast furnace slag increase the Marshall stability by 50% and 40%, respectively, increase the indirect tensile strength in dry conditions by 36.3% and 16.4% at the age of 28 days, also significantly increase the flow number at the age of 28 days and increase the fatigue resistance at the age of 42 days compared to the base mix design. From the results obtained, it can be understood that due to the functional and economic parameters, the use of cement as an additive in recycled cold asphalt mixtures is justifiable and useful.

* Corresponding author

E-mail address: phajikarimi@aut.ac.ir

How to cite this article: Sarabandi, A. , Hajikarimi, P. and Moghadas Nejad, F. (2025). Evaluation and Comparison of the Mechanical Properties and Durability of Recycled Cold Asphalt Mixtures Containing Portland Cement, Granulated Blast Furnace Slag, and Glass Fibers. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 10(4), 1-34. <https://doi.org/10.22075/jtie.2025.35902.1700>

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



مقاله پژوهشی

بررسی و مقایسه خواص مکانیکی و دوام مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی حاوی

سیمان، سرباره گرانوله ذوب آهن و الیاف شیشه

علی سرابندی^۱، پوریا حاجی کریمی^{۲*}، فریدون مقدس‌نژاد^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

^۳ استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

چکیده

در این پژوهش، تأثیر افزودن سرباره گرانوله ذوب آهن، سیمان پرتلند تیپ ۲ و الیاف شیشه بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به مطالعات پیشین، درصد وزنی سیمان و سرباره گرانوله ذوب آهن ۲ درصد و همچنین مقادیر مختلفی از الیاف شیشه شامل ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ درصد وزن سنگدانه مخلوط آسفالتی در نظر گرفته شده است. نتایج عملکردی نشان داد که مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی بدون استفاده از افزودنی دارای دوام کافی نیستند. استفاده از الیاف شیشه موجب افزایش مقاومت مارشال به میزان حداکثر ۱۰/۳ درصد نسبت به طرح اختلاط پایه، از طریق افزایش درصد قیر امولسیون در مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی و در نامناسب‌ترین حالت موجب کاهش مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت خشک، به میزان حداقل ۷۸ و ۱۷/۷ درصد در سن ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌ها شده است که نشان‌دهنده کاهش دوام رطوبتی مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی حاوی الیاف شیشه می‌باشد. نتایج همچنین نشانگر آن است که سیمان و سرباره گرانوله ذوب آهن موجب افزایش مقاومت مارشال به ترتیب ۵۰ و ۴۰ درصد، افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت خشک به میزان ۳۶/۳ و ۱۶/۴ درصد در سن ۲۸ روزه و نیز افزایش چشمگیر عدد روانی در سن ۲۸ روز و افزایش مقاومت خستگی در سن ۴۲ روزه نسبت به طرح اختلاط پایه شده است. از نتایج حاصل می‌توان به این مهم پی برد که با توجه به پارامترهای عملکردی و اقتصادی، استفاده از سیمان به عنوان افزودنی در مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی توجیه‌پذیر و مفید می‌باشد.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۲۲

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۱۹

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۲۰

واژگان کلیدی:

تراشه آسفالتی،
سرباره گرانوله ذوب آهن،
سیمان،
الیاف شیشه،
آسفالت سرد بازیافتی.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: phajikarimi@aut.ac.ir

استناد به این مقاله: سرابندی، علی، حاجی کریمی، پوریا و مقدس‌نژاد، فریدون. (۱۴۰۳). بررسی و مقایسه خواص مکانیکی و دوام مخلوط‌های آسفالتی

سرد بازیافتی حاوی سیمان، سرباره گرانوله ذوب آهن و الیاف شیشه. مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، ۱۰(۴)، ۱-۳۴

<https://doi.org/10.22075/jtie.2025.35902.1700>

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

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی به دلیل مزایایی از جمله مصرف انرژی پایین برای تولید، انتشارات آلودگی کمتر و امکان استفاده مجدد از تراشه آسفالتی^۱ به کانون توجه تحقیقات تبدیل شده است (زو و همکاران، ۲۰۲۴). تراشه آسفالتی نوعی سنگدانه است که از شکستن و خرد کردن آسفالت روسازی موجود طی فرآیند بازیافت روسازی به دست می‌آید (لیو و همکاران، ۲۰۲۲). روش‌های متداول بازیافت آسفالت، شامل بازیافت سرد، گرم و تمام‌عمق می‌باشد. اگر خرابی‌های روسازی مربوط به لایه‌های بالایی باشد و روسازی از نظر ظرفیت باربری دارای ضعفی نباشد، بازیافت گرم می‌تواند گزینه مناسبی باشد. اما اگر روسازی دارای ضعف‌های سازه‌ای و با خرابی‌هایی از جمله شیارافتادگی، ترک پوست سوسماری و ترک‌های انعکاسی باشد، بازیافت تمام‌عمق پیشنهاد می‌شود. اگر وضعیت روسازی بین این دو حالت قرار گیرد، بازیافت سرد می‌تواند انتخاب خوبی باشد (غنی‌زاده و همکاران، ۲۰۱۸). با توجه به افزایش روزافزون هزینه‌های ساخت روسازی جدید و آلودگی‌های زیست‌محیطی، روش بازیافت سرد به دلیل دارا بودن مزایایی از جمله کاهش مصرف قیر، مصالح سنگی، هزینه‌های تولید و همچنین کاهش اثرات زیست‌محیطی نسبت به روش‌های متداول ساخت روسازی آسفالتی محبوبیت بسیاری پیدا کرده است (نفوی و همکاران، ۲۰۲۳). با توجه به عمق تراش و محل انجام عملیات بازیافت، بازیافت سرد به سه روش قابل انجام است: بازیافت سرد در کارخانه، بازیافت سرد در محل، و بازیافت تمام‌عمق (شیائو و همکاران، ۲۰۱۸). نیروی چسبندگی و مقاومت چقرمگی^۲ کم و در نتیجه عملکرد نامطلوب در برابر ترک‌خوردگی، زمان

عمل‌آوری طولانی، نیاز به اجرای لایه‌ی روکش، ترک‌خوردگی زودرس ناشی از پیرشدگی قیر تراشه آسفالتی و فقدان استانداردهای فنی در زمینه طراحی این نوع از مخلوط‌های آسفالتی از جمله مهم‌ترین معایب آسفالت سرد بازیافتی می‌باشد (لیو و همکاران، ۲۰۲۲؛ زیاری و همکاران، ۲۰۲۴؛ یائو و خو، ۲۰۲۳؛ حسینی و حمیدی جو، ۲۰۲۳). راه حل بسیاری از پژوهشگران برای بهبود نقاط ضعف یادشده در مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی، استفاده از افزودنی‌هایی از جمله خاکستر بادی، آهک هیدراته، الیاف، سیمان و پلی‌وینیل‌استات^۳ بوده است. افزودنی‌ها به دو روش به مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی اضافه می‌شوند. در روش اول، مواد افزودنی در حین ساخت مخلوط آسفالتی افزوده می‌شوند، که به این روش، روش خشک^۴ گفته می‌شود. در روش دوم، که به روش تر^۵ موسوم است، مواد افزودنی به قیر امولسیون اضافه می‌شوند و قیر امولسیون اصلاح‌شده^۶ به دست آمده در جهت ساخت مخلوط آسفالتی بازیافتی استفاده می‌شود (جین و سینگ، ۲۰۲۱).

از اوایل دهه ۱۹۷۰، محققان بسیاری از سیمان در آسفالت سرد بازیافتی استفاده کرده‌اند. ایشان دریافتند که سیمان می‌تواند باعث بهبود مقاومت اولیه و خواص عملکردی این نوع از مخلوط‌های آسفالتی از جمله کاهش حساسیت رطوبتی، افزایش مقاومت در برابر خرابی‌های شیارافتادگی و بهبود عملکرد دمای کم شود (دو، ۲۰۱۵؛ عزیزی و عموزاده عمرانی، ۲۰۲۲؛ جیانگ و همکاران، ۲۰۲۳). عملکرد سیمان در بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی از طریق افزایش اتصال بین قیر و سنگدانه، موجب بهبود خواص عملکردی آسفالت می‌شود. بسیاری از محققین، میزان استفاده از سیمان در این نوع مخلوط‌های آسفالتی را به ۲ درصد محدود نموده‌اند (جین و سینگ، ۲۰۲۱). دلیل محدود شدن

4- Dry method
5- Wet method
6- Emulsion modified

1- Reclaimed Asphalt Pavement
2- Toughness
3- Polyvinyl Acetate

شود (دولوزیکی و یاسکولا، ۲۰۱۹). جدول ۱، خلاصه نتایج برخی از پژوهش‌ها در زمینه استفاده از سیمان در مخلوط‌های سرد بازیافتی را ارائه داده است. مطابق جدول ۱، استفاده از حداکثر ۲ درصد سیمان در مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی بیشتر مورد توجه پژوهشگران بوده است.

استفاده از سیمان در مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی این است که سیمان می‌تواند باعث رفتار ترد و شکننده مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی شود. نتایج تحقیقی در کشور لهستان نشان داد که استفاده از درصد‌های زیاد سیمان می‌تواند موجب بروز خرابی‌هایی از جمله ترک-خوردگی انعکاسی^۱ در مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی

جدول ۱. خلاصه نتایج استفاده از سیمان در مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی در تحقیقات پیشین

پژوهش	درصد تراشه آسفالتی	معیار تعیین درصد قیر امولسیون بهینه	درصد استفاده از سیمان	نتایج (مقادیر، به ترتیب افزایش درصد سیمان گزارش شده است.)
(یائو و همکاران، ۲۰۲۳)	۶۵	درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی و آزمایش کشش غیرمستقیم	۱، ۲، ۳	- افزایش نسبت مقاومت کششی دو نیم‌شدگی ^۲ به میزان ۱۰، ۱۵ و ۱۳ درصد - افزایش مدول برجهنگی: ۳۳/۴، ۴۲/۵ و ۵۱ درصد
(جیانگ و همکاران، ۲۰۲۳)	۷۰	-	۱، ۱/۵، ۲	- افزایش مقاومت مارشال به ترتیب ۳/۱، ۸/۸، ۱۰/۴ و ۱۱/۴ درصد - افزایش مقاومت نفوذ تک‌محوره ^۳ به ترتیب ۲۸، ۴۰، ۴۵ و ۴۸/۶ درصد - افزایش پایداری دینامیکی ^۴ به ترتیب ۳۳/۳، ۵۸/۳، ۶۷/۷ و ۷۰ درصد
(مینا و همکاران، ۲۰۲۳)	۱۰۰	بر مبنای نشریه MS-14	۱، ۲، ۳	- کاهش مقاومت مارشال به میزان ۵/۳ و افزایش مقاومت مارشال به میزان ۲۶/۹ و ۲۳/۷ - افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم ^۵ در حالت خشک به ترتیب به میزان ۱۷/۲، ۲۵ و ۲۷/۳ درصد

4- Dynamic stability

5- Indirect tensile strength

1- Transverse crack

2- Splitting tensile strength

3- Uniaxial penetration strength

- افزایش مقاومت مارشال به میزان ۱۲ و ۲۵ درصد				
- افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم به ترتیب به میزان ۱۰/۹ و ۲۱ درصد در ۷ روز و ۱۵ و ۲۸/۸ درصد در ۴۲ روز				
- افزایش مدول برجهندگی به میزان ۱۲/۹ و ۲۶/۶ در مدت ۷ روز و ۲۹/۶ و ۳۷/۲ در مدت ۴۲ روز				
- افزایش عمر خستگی به میزان ۳۱ و ۴۲ درصد				
- افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت خشک به میزان ۳۶ درصد				
- کاهش ۴۰ درصدی انرژی شکست در آزمون IDEAL-CT				
- کاهش انرژی شکست ^۱ به ترتیب به میزان ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۶/۲، ۱۶/۶، ۳۷/۷، ۴۵/۸ و ۴۷/۵ درصد				
- افزایش ۲/۶ برابری مقاومت مارشال - افزایش نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم ^۲ (TSR) به میزان ۸ درصد				
بیشینه مقاومت مارشال و بیشینه وزن مخصوص توده آسفالت				
(عموزاده عمرانی، ۲۰۲۳)	۱۰۰	و بیشینه وزن مخصوص توده آسفالت	۱ و ۲	بیشینه مقاومت مارشال
(صبوری و صادقی، ۲۰۲۲)	۱۰۰	-	۲	-
(ژانگ و همکاران، ۲۰۲۰)	-	-	۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵	میزان ۶/۲، ۱۶/۶، ۳۷/۷، ۴۵/۸ و ۴۷/۵ درصد
(جلیلی و همکاران، ۲۰۱۹)	۵۰	بیشینه مقاومت مارشال	۲	-

مقاومت در برابر خرابی‌های دمای کم و زیاد و نیز چسبندگی بیشتر بین سنگدانه و قیر^۶ می‌شود (کنگ و همکاران، ۲۰۲۲؛ دو، ۲۰۲۲). برخی دیگر از مطالعات در زمینه استفاده از الیاف در آسفالت سرد بازیافتی نشان می‌دهد که افزودن الیاف به مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی به سبب مقاومت کششی بالا و قابلیت جذب^۷ زیادی که به طور ذاتی دارند، می‌تواند نقش مهمی در افزایش مقاومت در برابر ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی ایفا کنند (لیو و همکاران، ۲۰۲۳). عملکرد و

الیاف یکی دیگر از افزودنی‌هایی می‌باشند که به دلیل نقش مسلح‌کننده‌ای^۳ که دارند، باعث کاهش رشد ریزترک‌ها و همچنین مانع از انتشار ترک‌های ماکرو می‌شوند، و از این طریق موجب افزایش عملکرد مخلوط‌های آسفالتی می‌شوند (شینگ و همکاران، ۲۰۲۴؛ کنگ و همکاران، ۲۰۲۲). مطالعات گذشته نشان داده است که افزودن الیاف به مخلوط آسفالتی داغ، مخلوط آسفالتی درشت‌دانه^۴ و مخلوط آسفالتی با دانه‌بندی باز^۵ باعث بهبود پایداری در برابر خرابی‌های رطوبتی،

- 1- Fracture energy
- 2- Tensile strength ratio
- 3- Reinforcement
- 4- Stone matrix asphalt
- 5- Porous asphalt mixture
- 6- Adsorption
- 7- Adsorption capability

یافته و سپس کاهش می‌یابد. بنابراین، انتخاب درصد مناسب الیاف به منظور دستیابی به عملکرد بهتر در مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی بسیار مهم است (وانگ و همکاران، ۲۰۲۳).

در جدول ۲، مروری بر استفاده از الیاف در مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی انجام شده است. مطابق این جدول، بیشترین درصد استفاده از الیاف در بازه بین ۰/۱ تا ۰/۴ درصد وزنی سنگدانه مخلوط آسفالتی و طول الیاف ۶ و ۱۲ میلی‌متر می‌باشد.

خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی حاوی الیاف، به چهار پارامتر، نوع الیاف، درصد استفاده‌شده، قطر و طول الیاف استفاده‌شده در آن‌ها وابسته است (صبوری و صادقی، ۲۰۲۲). نتایج مطالعه‌ای که جهت بررسی تأثیر درصدهای مختلف الیاف بر عملکرد مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی انجام شد، نشان داد که شاخص‌های عملکردی مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی، از جمله پایداری دینامیکی، کرنش خمشی-کششی و میزان مقاومت مخلوط در برابر چرخه‌های یخبندان و ذوب، با افزایش درصد الیاف ابتدا افزایش

جدول ۲. نتایج مطالعات در خصوص استفاده از الیاف در مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی

پژوهش	نوع الیاف	طول الیاف (میلی‌متر)	مقدار الیاف (درصد وزنی)	نتایج (بهترین درصد، طول و نوع الیاف)
(وانگ و همکاران، ۲۰۲۳)	الیاف بازالت ^۱ + ۱/۵ درصد سیمان	۶	۰/۲، ۰/۳، ۰/۴	نتایج الیاف در ۰/۲ درصد:
				- ۱۰/۶ درصد بهبود مقاومت کششی غیرمستقیم ^۲ در دمای ۱۵ درجه سلسیوس
				- ۸/۰ درصد بهبود مقاومت کششی غیرمستقیم در شرایط ذوب و یخبندان ^۳
(جیانگ و همکاران، ۲۰۲۳)	الیاف پلی‌استر ^۴	۶	۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸	نتایج الیاف در ۰/۴ درصد:
				- بهبود ۸/۰ درصدی مقاومت مارشال
				- افزایش ۱۱ درصدی مقاومت نفوذ تک محوره
(صبوری و صادقی، ۲۰۲۲)	الیاف پلی‌پروپیلن ^۵	۱۲ و ۱۸	۰/۱، ۰/۲، ۰/۳	- ۶/۴ درصد بهبود مقاومت کششی غیرمستقیم
				- ۳۵/۱ درصد بهبود پایداری دینامیکی
				نتایج الیاف با طول ۱۸ میلی‌متر و ۰/۳ درصد:
				- ۲۰ درصد کاهش نسبت مقاومت کششی ^۶

4- Polyester fibers

5- Polypropylene fibers

6- Indirect tensile strength ratio

1- Basalt fibers

2- Splitting strength test

3- Freeze-thaw splitting strength ratio

- افزایش ۷۶/۳ درصدی شاخص CT _{index} ^۱			
- بهبود ۴۹ درصدی انرژی شکست			
آزمایش IDEAL-CT			
- ۷۳/۳ درصد بهبود شاخص انعطاف پذیری ^۲			
- الیاف پلی استر		نتیجه هر نوع الیاف در ۰/۴ درصد وزنی:	
۶ :		الیاف پلی استر:	
- الیاف معدنی :		- افزایش مقاومت مارشال: ۷/۲ درصد	
۱ الی ۳/۵		- افزایش مقاومت برشی: ۱۰/۹ درصد	
- الیاف پلی استر		الیاف معدنی:	
- الیاف لیگنین :		- افزایش مقاومت مارشال: ۴/۲ درصد	
۰/۸ ، ۰/۶ ، ۰/۴ ، ۰/۲		- افزایش مقاومت برشی: ۴/۴ درصد	
کوچکتر از ۶		الیاف لیگنین:	
- الیاف بازالت :		- افزایش مقاومت مارشال: ۴/۹ درصد	
۶ الی ۱۲		- افزایش مقاومت برشی: ۸/۴ درصد	
		الیاف بازالت:	
		- افزایش مقاومت مارشال: ۲ درصد	
		- افزایش مقاومت برشی: ۳ درصد	
-الیاف پلی استر:		در مقدار ۰/۳ درصد پلی اکریلونیتریل:	
۱۰		- افزایش ۸/۶ درصدی نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم	
-الیاف		- افزایش ۲۷/۶ درصدی مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت خشک	
پلی اکریلونیتریل:		۰/۵ ، ۰/۴ ، ۰/۳ ، ۰/۲	
۱۰		- بهبود ۸/۳ درصد مقاومت کششی غیرمستقیم در شرایط ذوب و یخبندان	
- الیاف بازالت:		- افزایش ۵۳/۸ درصدی مقاومت در برابر خرابی شیارافتادگی	
۱۰			
- الیاف لیگنین:		- ۸ درصد بهبود آزمایش تست کنتابرو ۵	
۶			
- پلی استر و بازالت		در مقدار ۰/۳ درصد بازالت:	
۱۰-۱۲		۰/۵ ، ۰/۴ ، ۰/۳ ، ۰/۲	
+ ۱/۵ درصد سیمان			
(کنگ و همکاران، ۲۰۲۲)			

- 1- Cracking Tolerance Index
- 2- Flexibility index
- 3- Mineral fibers
- 4- Polyacrylonitrile fiber
- 5- Contabro Test

- بهبود ۵۲/۲ درصدی مقاومت اولیه مارشال
- بهبود ۴۴ درصدی مقاومت ۷ روزه مارشال
- بهبود ۱۰ درصدی حساسیت رطوبتی در مقدار ۰/۳ درصد پلی استر:
- بهبود ۴۲/۵ درصدی مقاومت اولیه مارشال
- بهبود ۳۴/۰ درصدی مقاومت ۷ روزه مارشال
- بهبود ۱۲/۸ درصدی حساسیت رطوبتی

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در زمینه استفاده از الیاف شیشه در انواع مخلوط‌های آسفالتی، استفاده از الیاف شیشه در مخلوط‌های آسفالتی گرم بازیافتی موجب بهبود برخی از خواص عملکردی از جمله مدول دینامیکی^۱، مقاومت در برابر خرابی شیارافتادگی، مقاومت در برابر ترک‌خوردگی در دماهای کم مخلوط آسفالتی و همچنین کاهش حساسیت رطوبتی، مورد تأیید قرار گرفته است (التواتی و همکاران، ۲۰۲۲؛ زیاری و همکاران، ۲۰۲۰؛ پارک و همکاران، ۲۰۲۰). اما با این حال، تا کنون بررسی اثر افزودن این نوع از الیاف بر خواص عملکردی مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

یکی دیگر از موادی که قابلیت استفاده در مخلوط‌های آسفالتی را دارد، سرپاره فولاد^۲ و سرپاره گرانوله ذوب آهن^۳ می‌باشد. این دو نوع سرپاره، از محصولات جانبی کارخانجات تولید فولاد و آهن به شمار می‌آیند (هوانگ و همکاران، ۲۰۱۶؛ عموزاده عمران، ۲۰۲۳).

«سرپاره فولاد طی تبدیل فلز داغ به فولاد خام در کوره اکسیژن پایه^۴ (BOF) یا در هنگام ذوب در کوره قوس الکتریکی^۵ (EAF) تولید می‌شود. این سرپاره به صورت مذاب تولید شده و یک محلول پیچیده حاوی سیلیکات‌ها و اکسیدها می‌باشد که با خنک شدن به حالت جامد در می‌آید.» (کریادو و همکاران، ۲۰۱۷). در حال حاضر، در ایران، مقادیر زیادی از سرپاره فولاد تولید شده در کارخانجات ذوب آهن اصفهان و فولاد اهواز به جای استفاده مفید، به محل‌های دفن زباله منتقل می‌شود و مشکلات زیست‌محیطی جدی ایجاد می‌کند. در حالی که این سرپاره‌ها می‌توانند کاربردهای گسترده‌ای در صنعت ساخت‌وساز، به ویژه در ساخت راه‌ها داشته باشند. سرپاره فولاد، به دلیل وجود مقادیر قابل توجهی کلسیم اکسید (CaO)، وقتی با آب ترکیب می‌شود خاصیت چسبندگی پیدا کرده و شبیه سیمان عمل می‌کند. این ویژگی باعث می‌شود که سرپاره فولاد به عنوان یک افزودنی ارزشمند قابلیت استفاده در ساخت بتن، آسفالت

-
- 1- Dynamic modulus
 - 2- Steel slag
 - 3- Ground granulated blast furnace slag
 - 4- Basic oxygen furnace
 - 5- Electric arc furnace

و لایه‌های زیرین راه‌ها را داشته باشد. همچنین، حضور آب موجود در امولسیون در تولید مخلوط‌های آسفالتی سرد در واکنش با بخش آهکی سرباره، موجب بهبود خواص عملکردی این مخلوط‌ها می‌شود. اما با این وجود، کاربرد سرباره فولاد در مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی، به عنوان جایگزین مصالح درشت‌دانه و ریزدانه محدود بوده است (عموزاده عمرانی، ۲۰۲۳).

سرباره گرانوله ذوب‌آهن (GGBFS) از کوره‌های بلند^۱ مورد استفاده در تولید آهن حاصل می‌شود. زمانی که سنگ‌آهن، گک و سنگ آهک در کوره بلند ذوب می‌شوند، سرباره روی آهن مذاب تولید و شناور می‌شود. پس از جدا کردن سرباره مذاب برای تولید سرباره گرانوله ذوب‌آهن فرایندهای خنک‌سازی، دانه‌بندی و آسیاب کردن لازم است. سرباره گرانوله ذوب‌آهن معمولاً حاوی کلسیم اکسید (CaO)، سیلیس، آلومینیوم و منیزیم در نسبت‌های مختلف است (گریس و همکاران، ۲۰۱۶). استفاده از سرباره گرانوله ذوب‌آهن به عنوان یک فیلر نوآورانه در مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی، یک رویکرد جدید و کمتر بررسی شده است.

در پژوهش وانگ و همکاران (۲۰۲۲)، سرباره فولاد و سنگ بازالت به عنوان بخشی از درشت‌دانه و سنگ آهک به منظور تأمین فیلر مخلوط آسفالتی گرم بازیافتی مورد استفاده قرار گرفت. در این تحقیق، از SBS^۲ و جوان‌ساز به منظور بهبود خواص عملکردی قیر پیر شده در اطراف سنگدانه تراشه آسفالتی نیز استفاده شد. نتایج نشان داد که ترکیب سرباره فولاد با ۵۰ درصد تراشه آسفالتی، بهترین دوام را در بین طرح‌اختلاط‌های حاوی درصد‌های مختلف تراشه آسفالتی در برابر خرابی‌های رطوبتی و دمای زیاد، داراست. در پژوهش دیگری که توسط ناصر و همکاران (۲۰۲۳) صورت گرفت، تراشه آسفالتی با درصد‌های ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ جایگزین

سنگدانه آهکی موجود در مخلوط آسفالتی داغ شد. پس از به‌دست آوردن درصد قیر بهینه، با استفاده از دو نوع فیلر سرباره آهن و سیلیکا فوم^۳، با درصد‌های مشابه ذکر شده برای تراشه آسفالتی، اما نسبت به وزن فیلر موجود در مخلوط آسفالتی، افزوده شد. نتایج مطالعه ایشان نشان داد که در صورت استفاده از ۷۵ درصد تراشه آسفالتی و ۵۰ درصد سرباره فولاد، مخلوط آسفالتی بیشترین استقامت را خواهد داشت. در تحقیق عامری و همکاران (۲۰۱۹)، دو نوع سنگدانه سرباره فولاد و سنگدانه آهکی به عنوان جایگزین بخشی از تراشه آسفالتی در مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی مورد استفاده قرار گرفت. سرباره فولاد در درصد‌های مختلف ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ با ترکیبی از سنگ آهک در مقادیر ۱۰ و ۲۰ درصد، به طوری که جمع این دو از ۲۵ درصد وزن سنگدانه مخلوط آسفالتی فراتر نرود، مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزودن سنگدانه بکر به مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی، موجب افزایش درصد قیر امولسیون و آب بهینه، مقاومت در برابر شیار شدگی، مقاومت در برابر خرابی‌های رطوبتی و کاهش درصد هوای موجود در مخلوط آسفالتی می‌شود. در تحقیق دیگری، عموزاده عمرانی (۲۰۲۳) از سرباره فولاد به عنوان فیلر در مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی استفاده کرد. نتایج حاکی از آن بود که مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی حاوی ۶ درصد سرباره فولاد، موجب بهبود خواص عملکردی از جمله خستگی و مقاومت در برابر خرابی‌های رطوبتی در این نوع آسفالت‌ها نسبت به طرح‌اختلاط بدون افزودنی، در مدت زمان عمل‌آوری ۴۲ روز شده است.

با توجه به مرور ادبیات صورت گرفته، استفاده از مواد افزودنی مختلف با هدف بهبود خواص عملکردی مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. با این حال، کاربرد سرباره

رایج در صنعت راه‌سازی، از سیمان تیپ ۲ نیز به عنوان افزودنی استفاده شده است.

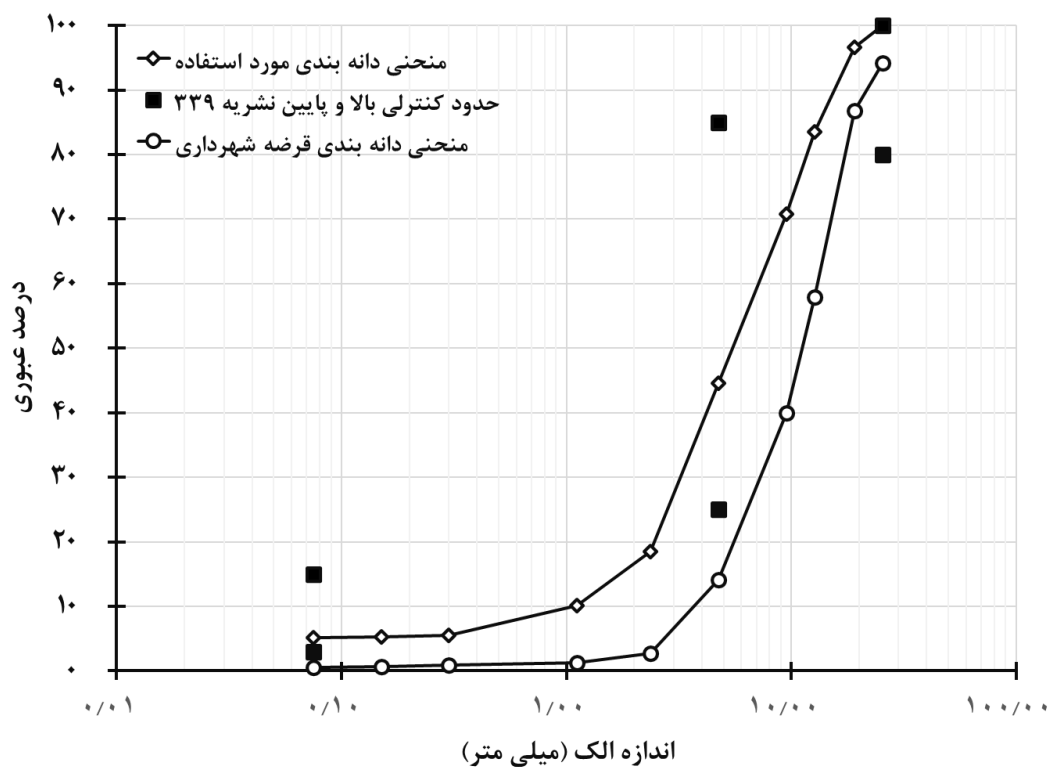
۲. مواد و روش‌ها

۱-۲. مشخصات مصالح مصرفی

۱-۱-۲. مصالح سنگی بکر و تراشه آسفالتی

تراشه آسفالتی مورد استفاده در این پژوهش از دپوی موجود در کارخانه آسفالت شهرداری تهران تهیه شده است. در شکل ۱، منحنی دانه‌بندی تراشه آسفالتی تهیه شده نشان داده است.

گرانوله ذوب‌آهن به عنوان فیلر و الیاف شیشه در این زمینه کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. این پژوهش، با هدف بررسی تأثیر افزودن سرباره گرانوله ذوب‌آهن به صورت فیلر و الیاف شیشه در مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی انجام شده است. انتظار می‌رود که الیاف شیشه از طریق نقش مسلح‌کنندگی در مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی و فیلر سرباره گرانوله ذوب‌آهن به دلیل خاصیت شبه‌سیمانی موجب بهبود خواص عملکردی مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی شود. از طرفی، به منظور مقایسه عملکرد مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی حاوی فیلر سرباره گرانوله ذوب‌آهن و الیاف شیشه با سایر افزودنی‌های



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی تراشه آسفالتی تهیه شده و مورد استفاده در این تحقیق

که به دلیل عدم وجود ریزدانه کافی در مصالح تراشه آسفالتی، جهت تأمین حد مجاز الک شماره ۲۰۰، که مطابق دانه‌بندی شماره ۴ نشریه ۳۳۹ در بازه بین ۳ الی ۱۵ درصد می‌باشد، از ۵ درصد فیلر از جنس مصالح بکر

با توجه به دشواری تأمین مصالح عبوری از الک شماره ۴ (۰/۷۵ میلی‌متر) و مانده روی الک شماره ۵۰ (۰/۳ میلی‌متر)، دانه‌بندی شماره ۴ نشریه شماره ۳۳۹ به عنوان دانه‌بندی پایه انتخاب گردید. لازم به توضیح است

استفاده گردید. پس از دانه‌بندی تراشه آسفالتی بر اساس استاندارد AASHTO T27، درصد قیر پیر شده در این مصالح با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ بر اساس استاندارد AASHTO T164 برابر ۵/۲۶ درصد تعیین شد. در این پژوهش، با توجه به توصیه نشریه ۳۳۹، قیر امولسیون

(CSS-1) انتخاب گردید و مشخصات آن در جدول ۳ ارائه شده است. لازم به ذکر است که مشخصات ذکر شده در جدول ۳ توسط کارخانه تولید قیر امولسیون ارائه شده است.

جدول ۳. مشخصات قیر امولسیون مصرفی

شرح آزمون	روش آزمون	حد استاندارد	نتیجه آزمون
گرانروی، سیبولت فیورل در ۲۵ درجه سلسیوس	ASTM-D7496	۲۰-۱۰۰	۲۵
پایداری انبارش، ۲۴ ساعت (%)	ASTM-D6930	≥ 1	۰/۵
تعیین بار ذرات	ASTM-D7402	مثبت	مثبت
باقیمانده تقطیر (%)	INSO 13580	≤ 57	۶۱/۰۱
درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، ۱۰۰ گرم، ۵ ثانیه (دسی میلی‌متر)	INSO 2950	۱۰۰-۲۵۰	۱۰۵
کشش‌پذیری در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، ۵ سانتی‌متر بر دقیقه (سانتی‌متر)	INSO 3866	≤ 40	۱۰۰

۲-۱-۲. الیاف شیشه

الیاف مورد استفاده در این پژوهش، از جنس الیاف شیشه بوده و مشخصات اعلام شده توسط کارخانه تولیدکننده این الیاف در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به محدوده درصدهای معمول الیاف در مطالعات پیشین

مطابق جدول ۲ (بین ۰/۱ تا ۰/۴ درصد وزن کل مصالح سنگی) در این پژوهش نیز جهت تعیین درصد بهینه الیاف شیشه در مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی از مقادیر وزنی ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ درصد نسبت به وزن کل مصالح سنگی (مجموع وزن مصالح سنگی بکر و تراشه آسفالتی) استفاده شده است.

جدول ۴. مشخصات الیاف شیشه مصرفی

مشخصه مورد نظر	مقدار
نوع الیاف	میکرو
رنگ	سفید
مقاومت کششی (مگاپاسکال)	1400 ± 100
مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)	52 ± 3
جذب آب	ندارد
وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۲/۶
طول (میلی‌متر)	۱۸
قطر (میلی‌متر)	۰/۰۲

۳-۱-۲. سیمان پرتلند و سرباره گرانوله ذوب آهن

مشخصات فیزیکی و شیمیایی اعلام شده توسط کارخانه تولیدی سرباره گرانوله ذوب آهن و سیمان پرتلند تیپ ۲ مورد استفاده در این پژوهش در جداول ۵، ۶ و ۷ ارائه شده است. بر اساس نتایج تحقیقات پیشین (جدول ۱)،

در این پژوهش نیز سیمان و سرباره گرانوله ذوب آهن، هرکدام به میزان ۲ درصد وزنی مصالح سنگی (مجموع وزن مصالح سنگی بکر و تراشه آسفالتی)، در ساخت مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۵. مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ ۲

حد استاندارد INSO 389	مشخصات شیمیایی	
	درصد	ماده شیمیایی
	۲۰/۲۶	SiO ₂
۶ ≥	۵/۲۵	Al ₂ O ₃
۶ ≥	۴/۱۲	Fe ₂ O ₃
	۶۳/۹۱	CaO
۶ ≥	۲/۲۳	MgO
۳ ≥	۲/۱۹	SO ₃
	۰/۴۳	Na ₂ O
	۰/۷۲	K ₂ O
۳ ≥	۰/۶۱	LOI
	۰/۲۸	سایر
	۹۵/۰۹	LSF
	۲/۱۶	SiM
	۱/۲۷	AlM
	۵۸/۷۹	C ₃ S
	۱۳/۷۳	C ₂ S
۸ ≥	۶/۹۴	C ₃ A
	۱۲/۵۴	C ₄ AF
۱/۵ ≥	۰/۲۱	In.Re

بررسی و مقایسه خواص عملکردی مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی سرد حاوی سیمان، سرباره گرانوله ذوب‌آهن و الیاف شیشه

جدول ۶. مشخصات فیزیکی سیمان پرتلند تیپ ۲

حد استاندارد INSO 389	درصد	مشخصات فیزیکی سیمان
	۰/۰۳	مانده روی الک شماره ۷۰ (درصد)
	۱/۶۰	مانده روی الک شماره ۱۷۰ (درصد)
$۳۶۰ \geq$ و ≥ ۲۶۰	۳۱۰	درجه نرمی سیمان با روش بلین ^۱ (متر مربع بر کیلوگرم)
$۰/۸ \geq$	۰/۱	آزمایش انبساط استاندارد سیمان به روش اتوکلاو ^۲ (درصد)
≥ ۴۵	۱۳۵	زمان گیرش اولیه (دقیقه)
$۳۷۵ \geq$	۲۴۰	زمان گیرش نهایی (دقیقه)
	۱/۳۴	کلسیم اکسید (درصد)
≥ ۱۸	۲۰/۵	مقاومت ۳ روزه (مگاپاسکال)
$۵۲/۵ \geq$ و $\geq ۳۲/۵$	۳۱/۲	مقاومت ۷ روزه (مگاپاسکال)
	۴۰/۸	مقاومت ۲۸ روزه (مگاپاسکال)

جدول ۷. مشخصات شیمیایی سرباره گرانوله ذوب‌آهن

درصد	ماده شیمیایی
۳۷/۰۴	SiO ₂
۳۸/۲۰	CaO
۱۳/۱۶	Al ₂ O ₃
۶/۵۹	MgO
۱/۵۲	TiO ₂
۰/۶۱	MnO
۰/۷۲	Fe ₂ O ₃
۰/۶۲	Na ₂ O
۰/۷۶	K ₂ O
۰/۲۷	SO ₃
۰/۰۰	LOI
۰/۵۱	سایر

۲-۲. طرح‌های اختلاط و نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها

در این پژوهش، شش طرح اختلاط مورد بررسی قرار گرفته است. جدول ۸ مشخصات این طرح‌های اختلاط را نشان داده است. در این پژوهش، به منظور به دست‌آوردن درصد قیر امولسیون بهینه، بر اساس نشریه

1- Blaine
2- Autoclave

سلسیوس درون قالب در گرمخانه قرار داده شدند. سپس، نمونه‌ها از گرمخانه خارج شده و به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط آزمایشگاه درون قالب نگهداری شدند.

برای ساخت نمونه‌های آزمایش خزش دینامیک^۱ و آزمایش خستگی به روش کشش غیرمستقیم^۲ از دستگاه پرس باکس^۳ استفاده شد (نمونه پرس باکس ساخته شده دارای ابعاد $15 \times 15 \times 45$ سانتی متر می باشد). در مرحله بعد، از نمونه‌های پرس باکس مغزه‌گیری به قطر ۱۰ سانتی متر صورت گرفت. سپس، نمونه‌های مغزه‌گیری شده مطابق استاندارد مربوط به هر آزمایش به ارتفاع مورد نیاز برش داده شد (شکل ۲).

۳۳۹، طرح اختلاط مارشال مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور به دست آوردن درصد قیر امولسیون بهینه، نمونه‌های مارشال با قطر ۴ اینچ (۱۰ سانتی متر) مربوط به هر طرح اختلاط، در دمای محیط و با رطوبت ثابت ۳ درصد، در ۵ درصد متفاوت قیر امولسیون (از ۳/۵ درصد الی ۵/۵ درصد)، و در هر درصد قیر امولسیون، نمونه‌ها با سه تکرار ساخته شدند. در مجموع، ۱۵ نمونه در هر طرح اختلاط جهت تعیین درصد قیر امولسیون بهینه ساخته شد. تعداد ضربات چکش مارشال مطابق توصیه نشریه ۳۳۹، ۵۰ ضربه به هر طرف نمونه در نظر گرفته شد. پس از متراکم نمودن نمونه‌ها، بلافاصله جهت عمل‌آوری به مدت ۶ ساعت در دمای ۶۰ درجه



شکل ۲. نمونه پرس باکس و نمونه‌های مغزه‌گیری شده

جدول ۸. مشخصات طرح‌های اختلاط

نام طرح اختلاط	نوع طرح اختلاط
P	طرح اختلاط پایه بدون هیچ افزودنی
G.2	طرح اختلاط حاوی الیاف شیشه به میزان ۰/۲ درصد وزنی مصالح سنگی
G.3	طرح اختلاط حاوی الیاف شیشه به میزان ۰/۳ درصد وزنی مصالح سنگی
G.4	طرح اختلاط حاوی الیاف شیشه به میزان ۰/۴ درصد وزنی مصالح سنگی
C	طرح اختلاط حاوی سیمان تیپ ۲ به میزان ۲ درصد وزنی مصالح سنگی
S	طرح اختلاط حاوی سرباره گرانوله ذوب آهن به میزان ۲ درصد وزنی مصالح سنگی

3- Press box

1- Dynamic creep

2- Indirect Tension (IDT) Fatigue Test

پارافین مشاهده شد که تکه‌هایی از نمونه که چسبندگی ضعیف‌تری دارند، به دلیل دمای زیاد پارافین، از نمونه جدا می‌شوند و همچنین به دلیل نفوذ پارافین به داخل نمونه و کاهش اصطکاک داخلی سنگدانه‌ها از مقاومت مارشال آنها کاسته می‌شود. به این دو دلیل، جهت کاهش خطا در انجام آزمایش‌ها از پارافیلیم جهت به‌دست آوردن وزن مخصوص توده آسفالت استفاده شد.



جهت به‌دست‌آوردن پارامترهای حجمی، از جمله وزن مخصوص توده آسفالت (G_{mb}) و حداکثر وزن مخصوص تئوریک آسفالت (G_{mm})، به‌ترتیب از استانداردهای AASHTO T166 و AASHTO T209 استفاده شد. از آنجا که درصد جذب آب نمونه‌ها بیشتر از ۲ درصد بود، مطابق استاندارد ASTM D1188 از پارافیلیم و مطابق استاندارد AASHTO T275 از پارافین استفاده شد (شکل ۳). پس از غوطه‌ور کردن نمونه در



شکل ۳. نمونه‌های آسفالتی سرد بازیافتی، پوشیده شده توسط پارافیلیم (تصویر سمت راست) و پارافین (تصویر سمت چپ)

بازیافتی، مانع سیمانی شدن سنگدانه‌ها می‌شود. با توجه به دو مطالعه ذکر شده، در طرح‌های اختلاط حاوی الیاف، سیمان و سرباره گرانوله ذوب‌آهن، پس از افزودن آب به مصالح سنگی، الیاف و سیمان با توجه به مقدار مورد نظر به مخلوط مصالح سنگی افزوده و سپس قیر امولسیون اضافه شده است.

مطابق توصیه^۱ FHWA (کندال و مالیک، ۱۹۹۸) نیاز است که به مدت یک هفته بعد از پخش لایه آسفالتی سرد بازیافتی، روی آن عملیات روکش آسفالتی گرم انجام نشود. این توصیه برای دستیابی به درصد رطوبت بین ۱ تا ۱/۵ درصد برای این لایه است تا از خرابی‌های زودهنگام در لایه روکش فوقانی جلوگیری شود (کیم و همکاران، ۲۰۱۱). به همین دلیل در این پژوهش کلیه

مطابق نشریه ۳۳۹، درصد هوای مجاز مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی می‌بایست بین ۹ تا ۱۴ درصد باشد. به همین جهت، ۱۱/۵ درصد فضای خالی که در وسط بازه مذکور می‌باشد انتخاب مناسبی جهت تعیین درصد قیر امولسیون بهینه است.

در مطالعه‌ای که توسط وانگ و همکاران (۲۰۲۳) در مورد ترتیب افزودن الیاف به مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی انجام شد، نتایج نشان داد که بهترین زمان برای افزودن الیاف به مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی بعد از اضافه کردن آب به مخلوط مصالح سنگی و قبل از افزودن قیر امولسیون می‌باشد. در مطالعه دیگری که عیسی و همکاران (۲۰۰۱) در مورد مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی حاوی سیمان انجام دادند، دریافتند که افزودن سیمان بعد از مرحله افزودن قیر به مخلوط آسفالتی سرد

آزمایش‌های عملکردی در سن ۷ روزه نمونه‌ها انجام شده است.

۲-۳. آزمایش‌ها

۲-۳-۱. آزمایش استقامت مارشال

در این مطالعه، آزمایش استقامت مارشال جهت مقایسه پارامترهای مارشال، برای هر طرح اختلاط انجام شد. نمونه‌های مارشال ساخته شده بعد از عمل‌آوری ۷ روزه در محیط آزمایشگاه، مطابق روش AASHTO T245، در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، بنابر توصیه نشریه ۳۳۹، مورد آزمایش قرار گرفتند.

۲-۳-۲. آزمایش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های

آسفالتی سرد بازیافتی

پس از به دست آوردن درصد قیر امولسیون بهینه، به منظور بررسی دوام و حساسیت رطوبتی نمونه‌ها از شاخص نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (TSR)، به وسیله آزمایش کشش غیرمستقیم (ITS) مطابق استاندارد ASHTO PP86 نمونه‌های مارشال هر طرح اختلاط در درصد قیر امولسیون بهینه ساخته شد. بنابر استاندارد ASTM D4867 نمونه‌های آزمایش حساسیت رطوبتی می‌بایست در درصد فضای خالی انجام شود که انتظار می‌رود مخلوط آسفالتی بعد از پخش و تراکم خواهد داشت. این درصد فضای خالی از درصد فضای خالی هدف طرح اختلاط بیشتر و برای مخلوط‌های آسفالتی داغ برابر 0.5 ± 7 می‌باشد. طبق گزارش FHWA (کراس و جاکاتیمات، ۲۰۰۷) درصد فضالی خالی مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی در محل، پس از پخش و تراکم در حدود 1 ± 12 درصد می‌باشد. بنابراین، درصد فضای خالی در نظر گرفته شده در طرح برابر $11/5$ درصد به عنوان درصد فضای خالی بعد از اجرای این نوع از آسفالت فرض شد. در ادامه، ۸ نمونه مارشال برای هر طرح اختلاط ساخته شد که ۳ نمونه مارشال در حالت

خشک و ۳ نمونه مارشال پس از عمل‌آوری رطوبتی تحت آزمایش کشش غیرمستقیم قرار گرفتند. مطابق AASHTO PP86، نمونه‌ها در حالت خشک قبل از آزمایش ITS به مدت ۲ ساعت در دمای ۲۵ درجه سلسیوس درون کیسه مخصوص نگهداری شدند. برای نمونه‌های تحت شرایط رطوبتی، جهت دستیابی به درصد اشباع بین ۵۵ تا ۷۵ درصد از پمپ خلأ و دسیکاتور استفاده شد. سپس نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت درون ظرف حاوی آب با دمای ۲۵ درجه سلسیوس، به طوری که حداقل به اندازه ۲۵ میلی‌متر ارتفاع آب روی نمونه قرار داشته باشد، نگهداری شدند. در نهایت، آزمایش ITS روی هر دو گروه نمونه‌های خشک و تحت شرایط رطوبتی انجام شد و شاخص TSR از تقسیم میانگین مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم حالت تحت شرایط رطوبتی به حالت خشک به دست آمد.

۲-۳-۳. مقایسه استاندارد AASHTO PP86 و

AASHTO T283

درصد اشباع در AASHTO T283 نسخه سال ۱۹۹۹ برای مخلوط آسفالتی داغ بین ۵۵ تا ۸۰ درصد بیان شده است. اما در نسخه‌های بعدی به ۷۰ تا ۸۰ درصد تغییر یافته است (لیانگ، ۲۰۰۸). در AASHTO PP86، که برای مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی می‌باشد، بازه‌ای بین ۵۵ تا ۷۵ درصد را بیان می‌کند. دلیل این تفاوت این است که هدف از اشباع ۷۰ تا ۸۰ درصد در کنار هوای ۷ درصد، قرار گرفتن جذب آب نمونه در بازه بین $4/6$ تا ۶ درصد است (آذری، ۲۰۱۰). در حالی که در مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی، به دلیل وجود درصد هوای زیاد، در درصد اشباع کمتری نسبت به بازه مذکور، به این درصد جذب آب می‌رسند. تفاوت دیگری که بین آیین‌نامه‌های مذکور وجود دارد، شرایط عمل‌آوری برای نمونه‌های رطوبتی می‌باشد. در AASHTO T283 که برای مخلوط‌های آسفالتی داغ مناسب می‌باشد یک چرخه

یخبندان و ذوب پیشنهاد شده است. بدین صورت که نمونه پس از اشباع در بازه ۷۰ تا ۸۰ درصد، به مدت حداقل ۱۶ ساعت در دمای ۱۸- درجه سلسیوس درون کیسه‌های مخصوص قرار می‌گیرد. سپس، بلافاصله نمونه‌ها از کیسه خارج شده و در حمام آب در دمای ۶۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت نگهداری می‌شوند و پس از طی این مراحل نمونه‌ها تحت آزمایش کشش غیرمستقیم (ITS) قرار می‌گیرند. اما AASHTO PP86 شرایط متفاوتی را بیان می‌کند. این استاندارد بیان می‌کند که برای نمونه‌های تحت شرایط رطوبتی، مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی مناسب است که به مدت ۲۴ ساعت در ظرف حاوی آب با دمای ۲۵ درجه سلسیوس نگهداری و سپس مورد آزمایش کشش غیرمستقیم (ITS) قرار بگیرند.

۲-۴. آزمایش خزش دینامیک

استانداردی که برای انجام آزمایش خزش دینامیک مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی در نظر گرفته شد، AASHTO T378 می‌باشد. این آزمایش با استفاده از دستگاه UTM^۱ صورت گرفته است. از آنجا که نمونه‌ها در این استاندارد دارای قطر و ارتفاع به ترتیب ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر می‌باشند، نمونه‌های مغزه‌گیری شده از دستگاه

پرس‌باکس در ابعاد ذکر شده برش داده شدند. مطابق استاندارد AASHTO T378 نمونه‌های مخلوط آسفالتی داغ لازم است دارای هوای 0.5 ± 7 درصد باشند که معادل درصد هوای مخلوط آسفالتی داغ بعد از پخش و تراکم می‌باشد. از این‌رو، نمونه‌های مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی نیز با درصد هوای ۱۱/۵ ساخته شدند. با توجه به نتایج به‌دست آمده از آزمایش حساسیت رطوبتی، مدت زمان عمل‌آوری برای این آزمایش ۲۸ روز در نظر گرفته شد. تنش مورد استفاده در آزمایش AASHTO T378، ۶۰۰ کیلوپاسکال می‌باشد. تنش ۶۰۰ کیلوپاسکال، تنش تقریبی زیر تک چرخ از چهار چرخ محور منفرد استاندارد با وزن ۸/۲ تُنی می‌باشد که بر لایه آسفالتی رویه وارد می‌شود. از آنجا که مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی معمولاً به عنوان لایه اساس روسازی‌های جدید استفاده می‌شوند و سپس یک لایه روکش آسفالتی روی آن قرار می‌گیرد، به طور مشخص تنش روی لایه اساس حاوی مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی کمتر از ۶۰۰ کیلوپاسکال می‌باشد.

در جدول ۹، مقدار تنشی که در آزمایش خزش دینامیک روی مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی در مطالعات پیشین مورد استفاده قرار گرفته، ارائه شده است. در هیچکدام از این مطالعات، دلیل انتخاب این سطح از تنش بیان نشده است.

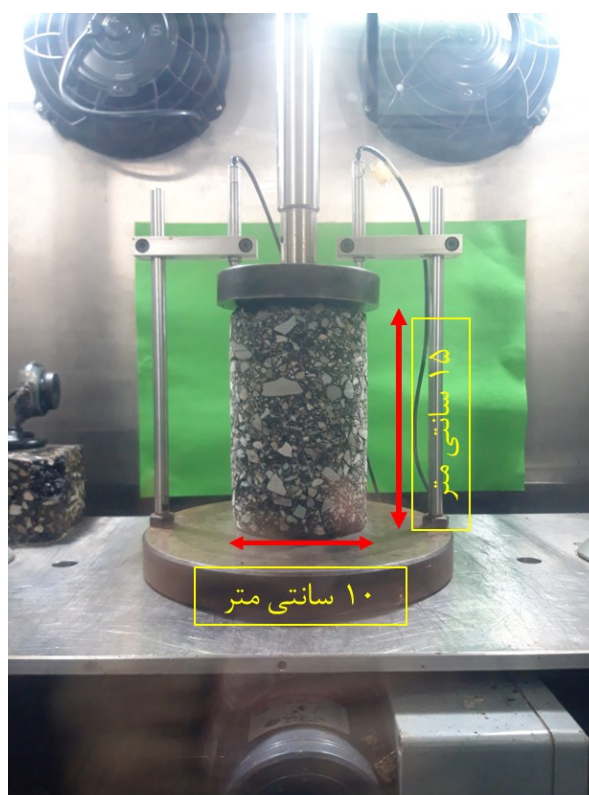
جدول ۹. تنش‌های مورد استفاده در آزمایش خزش دینامیک برای مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی

پژوهش	مقدار تنش (کیلوپاسکال)	مدت زمان بارگذاری	دمای آزمایش (سلسیوس)	اندازه نمونه (قطر، ارتفاع) بر حسب سانتی‌متر
(لین و همکاران، ۲۰۱۷)	۲۰۰	۳۶۰۰ ثانیه	۶۰	۱۰، ۱۰

نمونه ژیراتوری با درصد هوای ۵ درصد	۴۰، ۳۰، ۲۰	۱۰۰۰۰ سیکل بارگذاری (۰/۱) ثانیه بارگذاری و ۰/۹ ثانیه استراحت	۶۹	(آریمیلی و همکاران، ۲۰۱۶)
۱۰، ۱۰	۴۰	۱۰۰۰۰ سیکل بارگذاری (۰/۱) ثانیه بارگذاری و ۰/۹ ثانیه استراحت	۱۳۸	(کیم و همکاران، ۲۰۰۹)

ضخامت لایه اساس بازیافتی، به ترتیب به میزان ۱۰ و ۱۷ سانتی متر در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که مقادیر مدول الاستیسیته لایه روکش آسفالتی داغ و لایه اساس بازیافتی طبق نشریه ۲۳۴ محاسبه شده است. در نهایت، نمونه‌ها تحت تنش محاسبه شده توسط نرم افزار KENLAYER و با در نظر گرفتن مدت بارگذاری و استراحت به ترتیب ۰/۱ و ۰/۹ ثانیه در دمای ۴۰ درجه سلسیوس تحت آزمایش قرار گرفتند (شکل ۴).

جهت به دست آوردن تخمینی از تنش نرمال حاصل از ترافیک عبوری روی اساس بازیافتی (اساس حاوی مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی) از نرم افزار KENLAYER با فرض رفتار خطی لایه‌ها استفاده شد. مقادیر در نظر گرفته شده برای ارتفاع لایه اساس بازیافتی و لایه روکش آسفالتی روی آن، مطابق مطالعه‌ای که توسط مدرس و همکاران (۲۰۱۴) در زمینه استفاده از اساس بازیافتی در محور سمنان- دامغان انجام داده‌اند بوده است. در این مطالعه، ضخامت لایه آسفالتی و



شکل ۴. آزمایش خزش دینامیک روی نمونه‌های مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی

۵.۲. آزمایش خستگی به روش کشش غیرمستقیم

در این پژوهش، آزمایش خستگی به روش کشش غیرمستقیم (به روش تنش کنترل) مطابق استاندارد EN12697-24 در دمای ۲۵ درجه سلسیوس صورت گرفت (شکل ۵). نمونه‌های استوانه‌ای که برای این آزمایش در نظر گرفته شده‌اند، از نمونه‌های مغزه‌گیری شده توسط دستگاه پرس باکس با قطر ۱۰ و ارتفاع ۶/۳۵ سانتی‌متر، برش داده شده و دارای مدت زمان عمل‌آوری ۴۲ روز می‌باشند. جهت انجام مقایسه و انتخاب بهترین افزودنی در هنگام خستگی مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی، تنش اعمالی ۱۰۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شد و بارگذاری تا زمان ترک خوردن نمونه ادامه پیدا کرد. برای محاسبه عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی نیاز

است که کرنش و تنش کششی ایجاد شده در وسط نمونه به‌ترتیب مطابق روابط (۱) و (۲) و برای محاسبه حداکثر سختی نمونه مطابق رابطه (۳) محاسبه گردد.

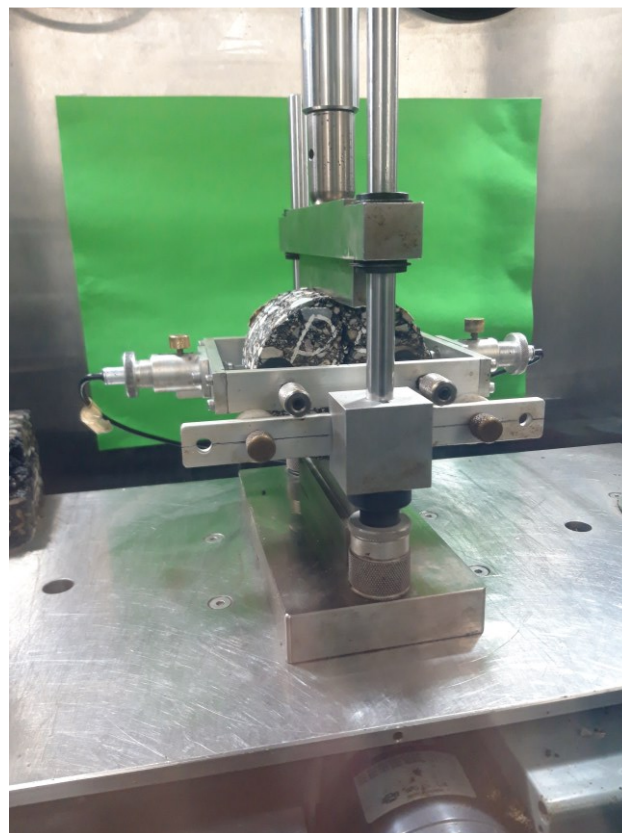
$$\varepsilon_0 = \left(\frac{2\Delta H}{D} \right) \times \left(\frac{1+3\mu}{4+\pi\mu-\pi} \right) \quad (1)$$

که ε_0 کرنش کششی در مرکز نمونه، D قطر نمونه (بر حسب میلی‌متر)، μ ضریب پواسون و ΔH تغییرشکل افقی نمونه (بر حسب میلی‌متر) است.

از آنجا که در این پژوهش ضریب پواسون ۰/۳۵ فرض شده، بنابراین حداکثر کرنش کششی در مرکز نمونه از رابطه (۲) محاسبه شده است.

$$\varepsilon_0 = \left(\frac{2.1\Delta H}{D} \right) \quad (2)$$

$$S_{\max} = \frac{\sigma_s}{\varepsilon_s} \times (1 + 3\mu) \quad (3)$$



شکل ۵. نمونه خستگی به روش کشش غیرمستقیم روی نمونه‌های مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی

۶-۲. حدود پیشنهادی آیین‌نامه‌های مخلوط‌های

آسفالتی سرد بازیافتی

از آنجا که محققان و مؤسسات تحقیقاتی در دنیا هنوز به مشخصات فنی و عملکردی واحدی برای مخلوط

آسفالتی سرد بازیافتی دست نیافته‌اند، از این رو معیارها و آزمایش‌های متفاوتی جهت سنجش و ارزیابی عملکردی این نوع از مخلوط‌های بازیافتی ارائه شده - است. در جدول ۱۰ تعدادی از این معیارها ارائه شده است (نیک فرجام، ۲۰۲۰).

جدول ۱۰. حدود پیشنهادی شاخص‌های عملکردی مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی در منابع مختلف

حدود پیشنهادی				واحد	عنوان آزمایش عملکردی
گزارش کانزاس	گزارش نیویورک	گزارش مینه‌سوتا	AASHTO MP31		
۵۵۶۰	۵۵۶۰	۵۵۶۰	۵۵۶۰	نیوتن	حداقل مقاومت مارشال AASHTO T245 (ASTM D6927)
۷۰	۷۰	۷۰	۷۰	بدون بُعد (%)	حداقل مقدار شاخص‌های حساسیت رطوبتی AASHTO T283 (ASTM D4867) AASHTO T245 (ASTM D6927)
۳۱۰	-	-	-	کیلوپاسکال	حداقل مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت خشک AASHTO T283 (ASTM D4867)

۴. نتایج و بحث

در این بخش، ابتدا نتایج آزمون استقامت مارشال و سپس نتایج آزمون حساسیت رطوبتی برای کلیه طرح‌های اختلاط و میزان تأثیر هر نوع افزودنی بر عملکرد و دوام مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی ارائه گردیده است. در انتها نیز نتایج آزمایش خزش دینامیک و آزمون خستگی به روش کشش غیرمستقیم برای طرح‌های اختلاطی که حداقل‌های آیین‌نامه‌ای لازم مطابق جدول ۱۰ را برآورده نموده‌اند گزارش شده است.

۴-۱. نتایج آزمون مارشال

درصد قیر امولسیون بهینه هر طرح اختلاط (بر اساس معیار درصد هوای معادل ۱۱/۵ درصد) در جدول ۱۱ نشان داده شده است. مطابق جدول ۱۱، در اثر افزودن الیاف شیشه، سیمان و سرباره گرانوله ذوب‌آهن به مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی، به دلیل افزایش سطح جانبی اجزای تشکیل‌دهنده مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی درصد بهینه قیر امولسیون افزایش می‌یابد که این موضوع در مطالعات پیشین نیز اشاره شده است (دو، ۲۰۲۲؛ جیانگ و همکاران، ۲۰۲۳). این افزایش در طرح‌های اختلاط حاوی الیاف شیشه بیشتر است که دلیل آن

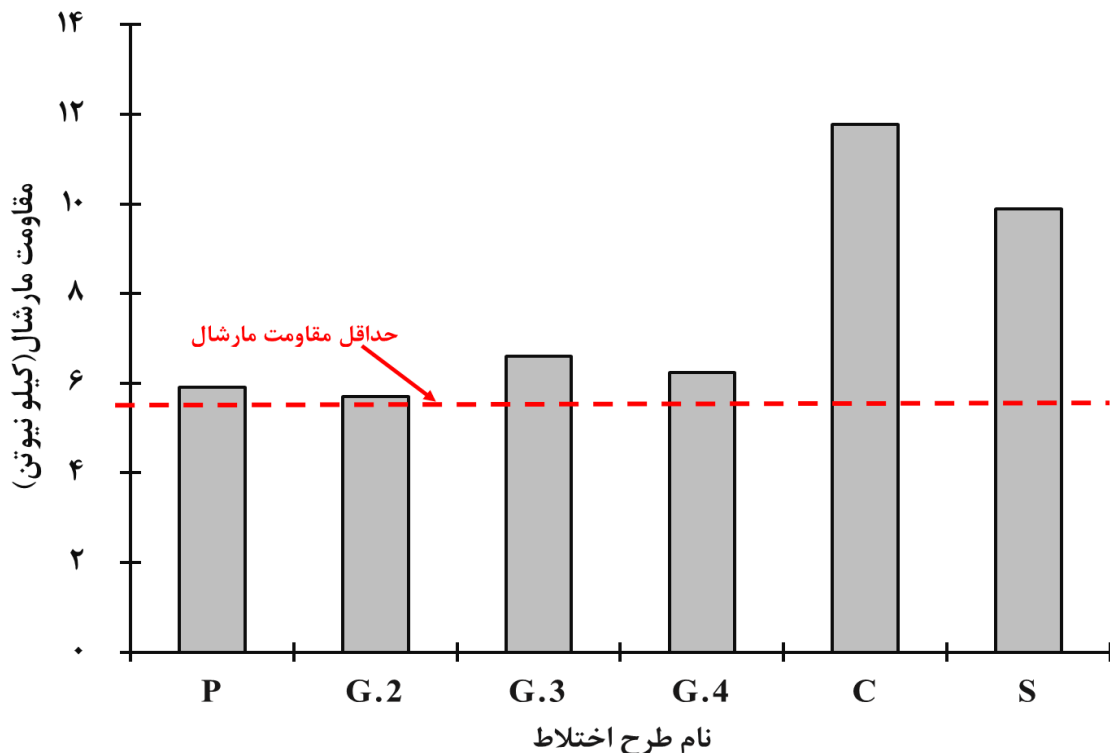
افزایش درصد فضای خالی سنگدانه^۱ (VMA) و در نتیجه افزایش درصد فضای خالی پر شده با قیر^۲ (VFA) نسبت به سایر طرح‌های اختلاط جهت دستیابی به درصد هوای ۱۱/۵ بوده است.

جدول ۱۱. درصد قیر امولسیون بهینه در طرح‌اختلاط‌های مختلف

نام طرح اختلاط	درصد قیر بهینه متناظر با درصد هوای ۱۱/۵
P	۳/۸
G.2	۵/۳
G.3	۵/۵
G.4	۵/۶
C	۴/۵
S	۴/۰

و میانی مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی کاسته شود. از دیگر نتایج این است که افزودن الیاف شیشه به میزان ۰/۳ درصد به طرح اختلاط، بیشترین بهبود را در مقاومت مارشال به همراه داشته است. به طوری که مقاومت مارشال نمونه حاوی الیاف به ۶/۵۹ کیلونیوتن رسید که نسبت به طرح اختلاط پایه، افزایشی معادل ۱۰/۳ درصد را نشان می‌دهد. با این حال، با توجه به تأثیر چشمگیر سیمان و سرباره گرانوله ذوب‌آهن بر افزایش مقاومت مارشال نمونه مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی به ترتیب ۵۰ و ۴۰ درصد نسبت به طرح اختلاط پایه، به نظر می‌رسد این افزودنی تأثیر بیشتری در افزایش استحکام نمونه‌ها داشته باشد. از سوی دیگر، با توجه به انتظار بهبود مقاومت کششی در اثر افزودن الیاف شیشه، آزمایش‌های کششی غیرمستقیم نیز روی نمونه‌ها انجام شد.

شکل ۶، مقاومت مارشال مربوط به طرح‌های اختلاط مختلف را نشان داده است. مطابق معیارهای معرفی شده در جدول ۱۰، تمامی طرح‌های اختلاط در درصد قیر امولسیون بهینه، حداقل مقاومت مارشال لازم را برآورده نموده‌اند. مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی حاوی سیمان، بیشترین مقاومت مارشال را دارا می‌باشد. نکته قابل تأمل این است که سرباره گرانوله ذوب‌آهن توانسته است در مدت ۷ روز، حداقل مقاومت مارشال برابر ۹/۹ کیلونیوتن (۴۰ درصد بیشتر از طرح اختلاط پایه) را نشان دهد. از طرفی، با توجه به مقاومت کمتر طرح اختلاط حاوی سرباره گرانوله ذوب‌آهن نسبت به طرح اختلاط حاوی سیمان، می‌توان انتظار داشت که در مدت زمان مشابه عمل‌آوری، مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی حاوی سرباره گرانوله ذوب‌آهن رفتار ترد و سخت کمتری از خود نشان دهد و در نتیجه انتظار داشت که از خرابی‌های دمای کم



شکل ۶. مقاومت مارشال مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی در هر طرح اختلاط

۴-۲. نتایج آزمون مقاومت کششی غیرمستقیم

(ITS)

همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، مقاومت ITS و TSR نمونه‌ها در سن ۷ روزه، به جز طرح اختلاط حاوی سیمان، از حد استانداردهای معرفی شده در جدول ۱۰ بسیار پایین‌تر می‌باشد. بنابراین، مقاومت ITS نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. شکل ۸، مقادیر ITS و TSR نمونه‌های هر طرح اختلاط را در سن ۲۸ روزه نشان می‌دهد. مطابق شکل‌های ذکر شده در حالت کلی، طرح اختلاط پایه در سن ۷ و ۲۸ روزه حداقل معیار استانداردهای اشاره شده در جدول ۱۰ را برآورده نمی‌کند. لذا استفاده از افزودنی‌های مورد استفاده در این پژوهش در جهت دستیابی به مخلوطی با کیفیت امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. طرح‌های اختلاط حاوی الیاف شیشه بر خلاف انتظار و مطالعات پیشین، در نامناسب‌ترین حالت موجب کاهش مقاومت کششی غیرمستقیم

نسبت به طرح اختلاط پایه به میزان ۷۸ و ۱۷/۷ درصد به‌ترتیب در سنین ۷ و ۲۸ روزه شده‌اند. با این حال، از منظر پارامتر TSR، از حداقل معیار آیین‌نامه ذکر شده در جدول ۱۰ فقط در سن ۲۸ روزه عبور کرده‌اند. در مطالعه صبوری و صادقی (۲۰۲۳)، نیز کاهش ۵۴ درصدی دوام رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی حاوی الیاف پلی‌پروپیلن گزارش شده است. بنابراین می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که الیاف شیشه، نه تنها موجب افزایش مصرف قیر امولسیون در مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی می‌شوند، بلکه موجب کاهش دوام رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی نیز می‌شوند.

پس از آزمایش ITS نمونه‌های حاوی الیاف، سطح مقطع ترک‌خورده نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۹، سطح مقطع ترک‌خورده نمونه در آزمایش ITS

نشان داده شده است. مطابق این شکل، الیافی که در این سطح موجود بودند، در دو حالت موازی با مقطع ترک و دیگری عمود بر مقطع ترک و همچنین بیشتر الیاف در حالت درهم‌تنیده، مشاهده شدند. از الیافی که به طور سالم و به حالت عمود بر مقطع ترک‌خورده قرار داشتند، می‌توان دریافت که الیاف شیشه به دلایل زیر موجب کاهش مقاومت حساسیت رطوبتی و عدم نقش مسلح‌کنندگی الیاف شیشه در مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی شده است:

۱- خاصیت شکنندگی (عدم تأمین طول لازم در هنگام ترک‌خوردن موجب کاهش درگیری بین اجزای مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی شده است) (شکل ۹، تصاویر ۱ و ۲)

۲- مورفولوژی سطحی (الیاف شیشه از درون قیر امولسیون نیز به واسطه ماهیت سطحی که دارند سُر خورده‌اند) (شکل ۹، تصاویر ۱ و ۲)

۳- وجود سنگدانه آهکی و در نتیجه عدم چسبندگی بین این نوع از سنگدانه‌ها و قیر امولسیون کاتیونیک حاوی الیاف شیشه

۴- درهم‌پیچیده شدن الیاف شیشه در زمان اختلاط (شکل ۹، تصویر ۳)

با توجه به دلایل ذکر شده و نتایج آزمون حساسیت رطوبتی می‌توان نتیجه گرفت که الیاف شیشه افزودنی مناسبی برای استفاده در مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی نمی‌باشند.

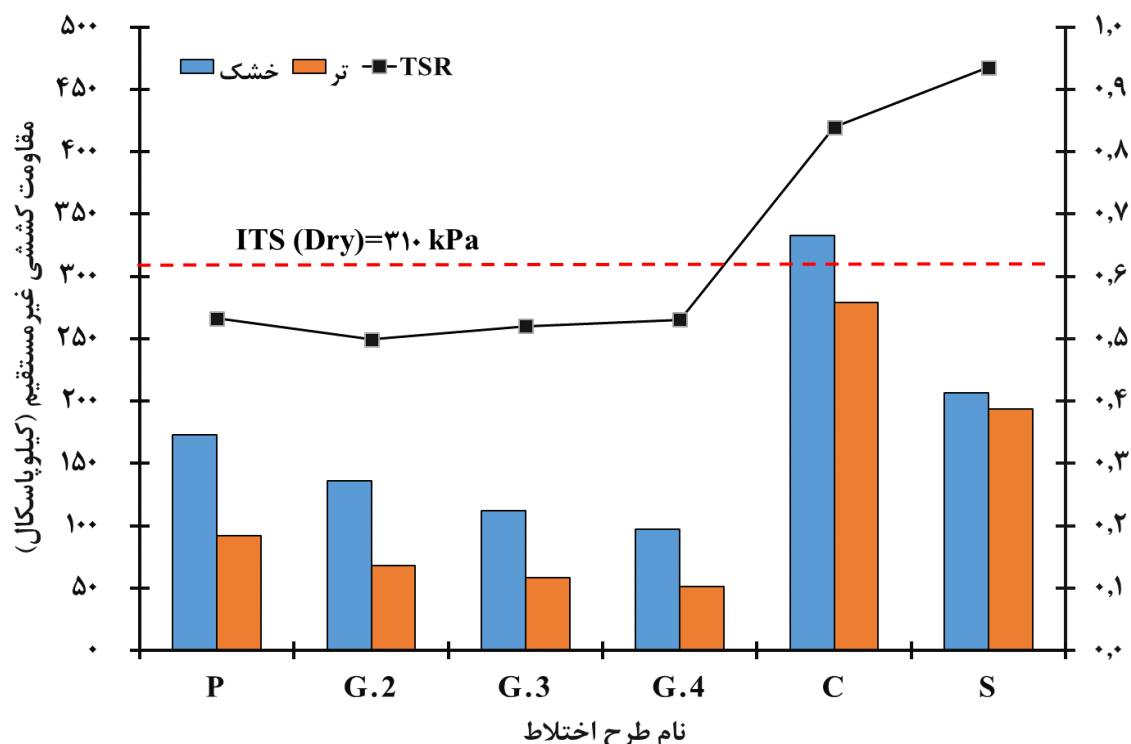
دلیل اینکه در مطالعات پیشین (جدول ۲) الیاف موجب بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی شده‌اند این است که در بیشتر این مطالعات از الیافی استفاده شده است که طول لازم برای مقاومت در حین ترک‌خوردگی را دارند. این در حالی است که الیاف شیشه به واسطه خاصیت شکنندگی اینگونه نبودند. از طرفی، در بعضی از این مطالعات (دو، ۲۰۲۲؛ کُنگ و همکاران، ۲۰۲۲) برای تعیین درصد قیر امولسیون بهینه، به جای

برآورده نمودن پارامترهای حجمی از جمله درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی، آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم را به عنوان معیار تعیین درصد قیر امولسیون بهینه در نظر گرفته‌اند. در نظر گرفتن آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم به عنوان معیار تعیین درصد قیر امولسیون بهینه موجب افزایش درصد قیر امولسیون در مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی و در نتیجه کاهش حساسیت رطوبتی آن می‌شود. در طرح‌اختلاط حاوی سیمان توانسته است در مدت زمان ۷ و ۲۸ روز حداقل مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت خشک مطابق معیارهای ذکر شده در جدول ۱۰ را برآورده نماید. در طرح اختلاط حاوی سیمان، مقدار افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت خشک نمونه به ترتیب سن ۷ و ۲۸ روزه به میزان ۴۸ و ۳۶/۳ درصد نسبت به طرح‌اختلاط پایه و همچنین ۳۷/۸، ۲۳/۷ نسبت به طرح اختلاط سرباره گرانوله ذوب‌آهن بوده است. اما در مورد طرح اختلاط حاوی سرباره گرانوله ذوب‌آهن در مدت زمان ۷ روز، اینگونه نیست. این طرح اختلاط از منظر پارامتر TSR، حداقل آیین‌نامه مطابق جدول ۱۰، یعنی مقدار ۰/۷ را در مدت زمان عمل‌آوری ۷ روز برآورده می‌نماید، اما از منظر حداقل مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت خشک، مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی نمی‌تواند انتظارات آیین‌نامه‌های مذکور در جدول ۱۰ در سن ۷ روز را برآورده نماید. از طرفی، نتایج نشان‌دهنده آن است که، میزان افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی حاوی سرباره گرانوله ذوب‌آهن در حالت خشک، در هر دو سن ۷ و ۲۸ روزه، به میزان ۱۶/۴ درصد نسبت به طرح‌اختلاط پایه می‌باشد.

افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم در طرح‌اختلاط حاوی سیمان، به دلیل واکنش هیدراتاسیون سیمان با آب موجود در قیر امولسیون می‌باشد که این واکنش در طول زمان منجر به چسبندگی بیشتر بین قیر خالص (قیر خالص

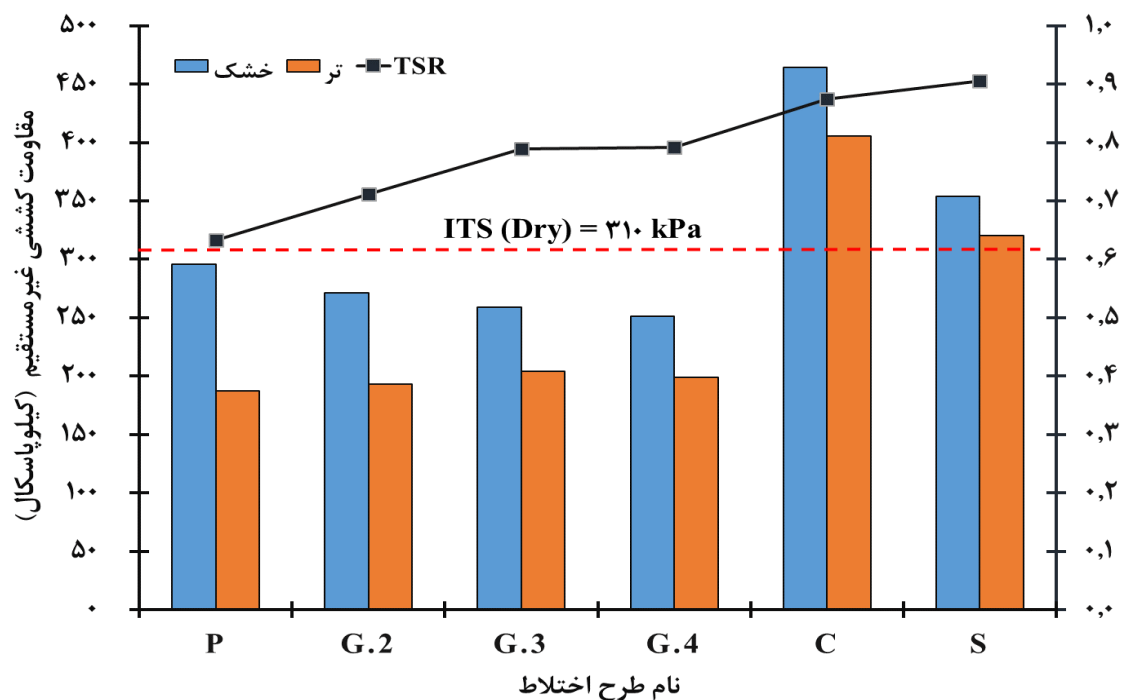
حال، مطابق جداول ۵ و ۷، به دلیل اینکه درصد کلسیم اکسید سرباره گرانوله ذوب آهن نسبت به سیمان کمتر است، بنابراین میزان افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم سرباره گرانوله ذوب آهن نسبت به سیمان در طول زمان کمتر است.

باقیمانده پس از شکست قیر امولسیون^۱ و قیر پیر شده سنگدانه تراشه آسفالتی می شود (ایار، ۲۰۱۸؛ زینگ^۲ و همکاران، ۲۰۲۴). سرباره گرانوله ذوب آهن نیز به دلیل وجود مقادیر قابل توجهی کلسیم اکسید (CaO) وقتی با آب ترکیب می شود خاصیت چسبندگی پیدا کرده و شبیه سیمان عمل می کند (عموزاده عمرانی، ۲۰۲۳). با این



شکل ۷. نتایج ITS و TSR طرح های اختلاط مختلف در مدت زمان عمل آوری ۷ روز

بررسی و مقایسه خواص عملکردی مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی سرد حاوی سیمان، سرباره گرانوله ذوب‌آهن و الیاف شیشه



شکل ۸. نتایج ITS و TSR طرح‌های اختلاط مختلف در مدت زمان عمل‌آوری ۲۸ روز



شکل ۹. الیاف در سطح مقطع ترک‌خورده نمونه در آزمایش ITS (تصاویر ۱ و ۲: سُر خوردن الیاف از درون قیر امولسیون، تصویر ۳: الیاف پوشیده شده توسط قیر امولسیون در کنار سنگدانه آهکی)

۳-۴. نتایج آزمون خزش دینامیک

مطابق نتایج به‌دست آمده از نرم‌افزار KENLAYER، در صورتی که ضخامت لایه روکش آسفالتی ۱۰ سانتی‌متر

باشد و مقاومت مارشال لایه‌های روکش آسفالتی و اساس بازیافتی به‌ترتیب ۸/۶۵ و ۵/۵۶ کیلونیوتن (مقاومت مارشال طرح اختلاط پایه) و نسبت باربری کالیفرنیا^۱

1- California Bearing Ratio

نتایج آزمایش خزش دینامیک (عدد روانی) طرح‌های اختلاط پایه، سیمان و سرباره گرانوله ذوب‌آهن در جدول ۱۲ و شکل ۱۰ (نمودار درصد کرنش ماندگار در برابر تعداد سیکل بارگذاری) نشان داده شده است. مطابق نتایج به‌دست آمده از آزمایش خزش دینامیک، طرح اختلاط سیمان بهترین عملکرد و طرح اختلاط پایه بدترین عملکرد را در برابر خرابی شیارافتادگی دارد که نشان‌دهنده سودمندی استفاده از سیمان و یا سرباره گرانوله ذوب‌آهن در مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی، به‌ویژه در شرایط آب و هوایی گرم، می‌باشد. با توجه به نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی و خزش دینامیک طرح اختلاط حاوی سیمان و سرباره گرانوله ذوب‌آهن می‌توان دریافت که دو عامل واکنش هیدراتاسیون سیمان با آب موجود در قیرامولسیون و مدت زمان عمل‌آوری در بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی حاوی این دو افزودنی نقش به‌سزایی دارند. طبق گزارش اعلام شده توسط اداره حمل‌ونقل کالیفرنیا^۵، برای مخلوط‌های آسفالتی لایه میانی، یکی از معیارهای پذیرش طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی با عمر طولانی^۶، آزمایش خزش دینامیک (مطابق استاندارد AASHTO T378 و با شرط رسیدن به ۳ درصد کرنش محوری، در حالی که تعداد سیکل بارگذاری از ۳۰۰۷ سیکل عبور کرده باشد) می‌باشد (انجمن ملی روسازی آسفالت^۶، ۲۰۲۵). مطابق شکل ۱۰، طرح اختلاط حاوی سیمان این معیار را برآورده نموده است.

(CBR) برای بستر روسازی مقدار ۹/۵ باشد، تنش نرمال روی لایه اساس بازیافتی در حدود ۲۵۰ کیلوپاسکال به‌دست می‌آید. از این رو، تمام نمونه‌ها در تنش مذکور تحت بارگذاری قرار گرفتند.

مطابق نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی، طرح‌های اختلاط حاوی الیاف شیشه به دلیل افزایش حساسیت رطوبتی و در نتیجه برآورده نکردن حداقل معیارهای لازم جهت پذیرش طرح اختلاط مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی (مطابق جدول ۱۰)، تحت آزمایش خزش دینامیک قرار نرفتند.

در این پژوهش، عدد روانی^۱ با استفاده از رابطه‌ای که توسط دانشگاه ایالتی آریزونا پیشنهاد شده است محاسبه شد. در این روش، مدل فرانکین^۲ به نمودار (کرنش ماندگار^۳ - تعداد سیکل بارگذاری) برازش می‌گردد. این مدل در رابطه (۳) بیان شده است.

$$\varepsilon_p = An^B + C(e^{Dn} - 1) \quad (3)$$

که در آن: ε_p کرنش محوری ماندگار، n تعداد سیکل بارگذاری و A, B, C ضرایب مدل برازش شده است.

پس از به‌دست آوردن ضرایب مربوطه، از رابطه (۱) دوبار مشتق گرفته می‌شود. مشتق اول و دوم این رابطه به‌ترتیب در روابط (۴) و (۵) ارائه شده است. مقدار عدد روانی برابر است با تعداد سیکلی که در آن مشتق دوم رابطه (۳) برابر صفر شود.

$$\frac{d\varepsilon_p}{dn} = ABn^{B-1} + Ce^{Dn} \quad (4)$$

$$\frac{d^2\varepsilon_p}{dn^2} = AB(B-1)n^{B-2} + CD^2e^{Dn} \quad (5)$$

5- Long-life pavements

6- National Asphalt Pavement Association

1- Flow number

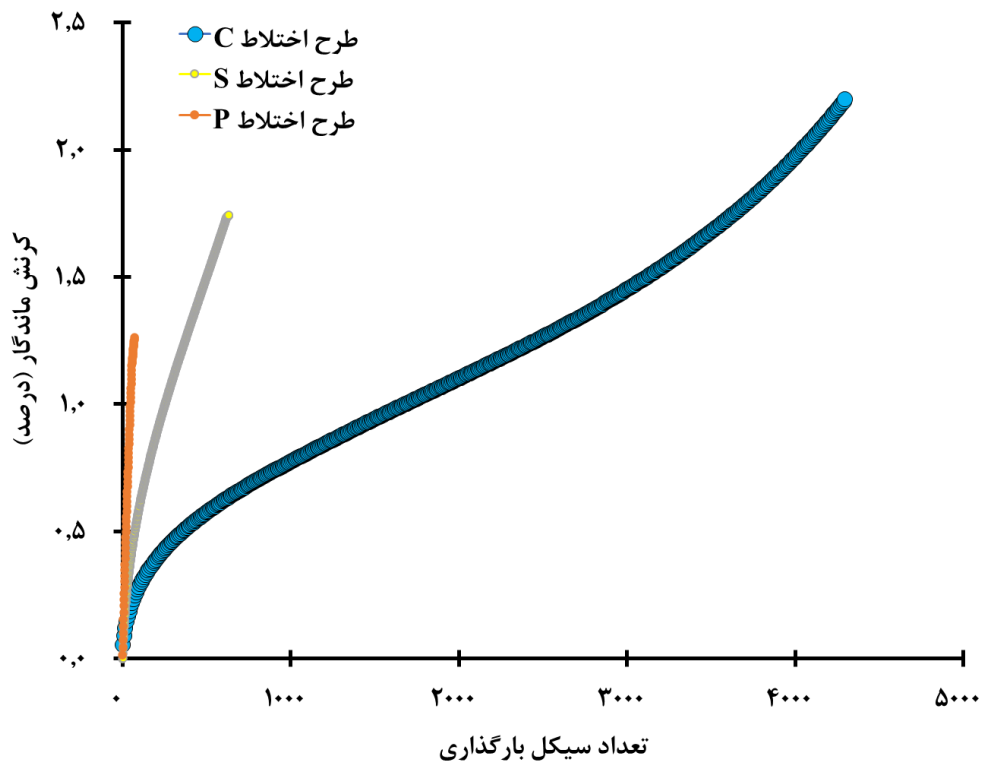
2- Francken model

3- Permanent strain

4- California Department of Transportation

جدول ۱۲. نتایج آزمایش خزش دینامیک

نام طرح اختلاط	عدد روانی (Flow number)
P	صفر
C	۱۷۹۶
S	۳۹۱

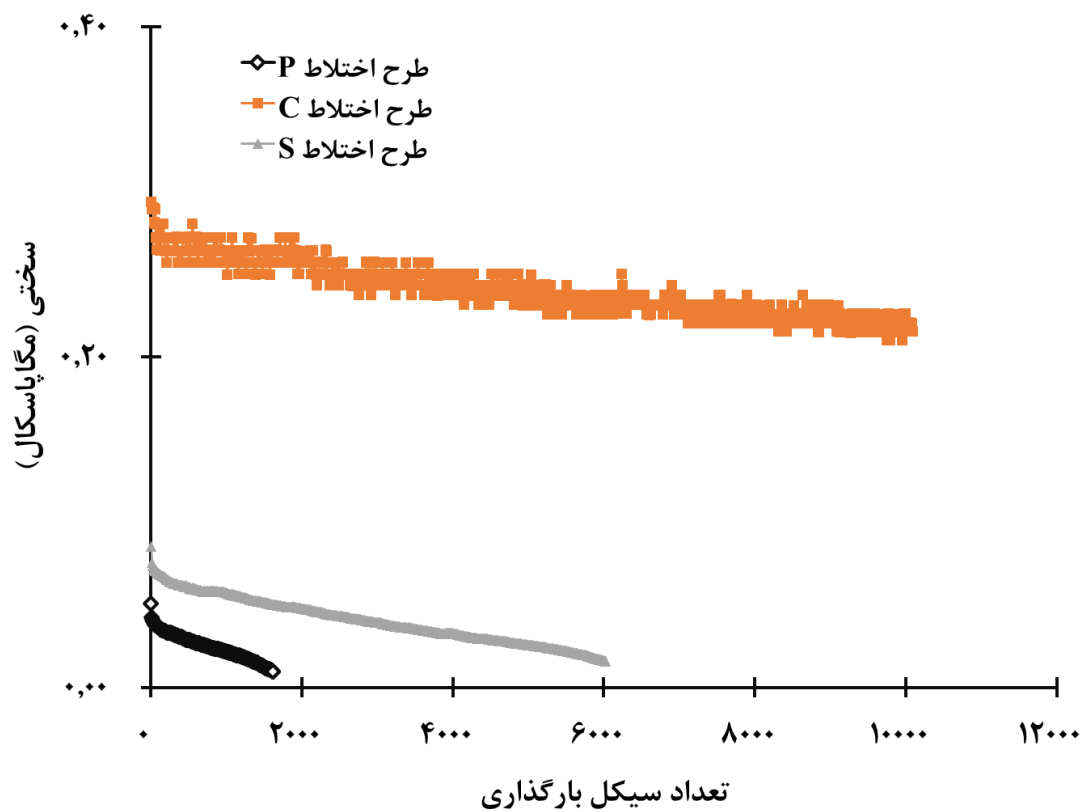


شکل ۱۰. نمودار درصد کرش ماندگار و نرخ کرش ماندگار در مقابل تعداد سیکل بارگذاری

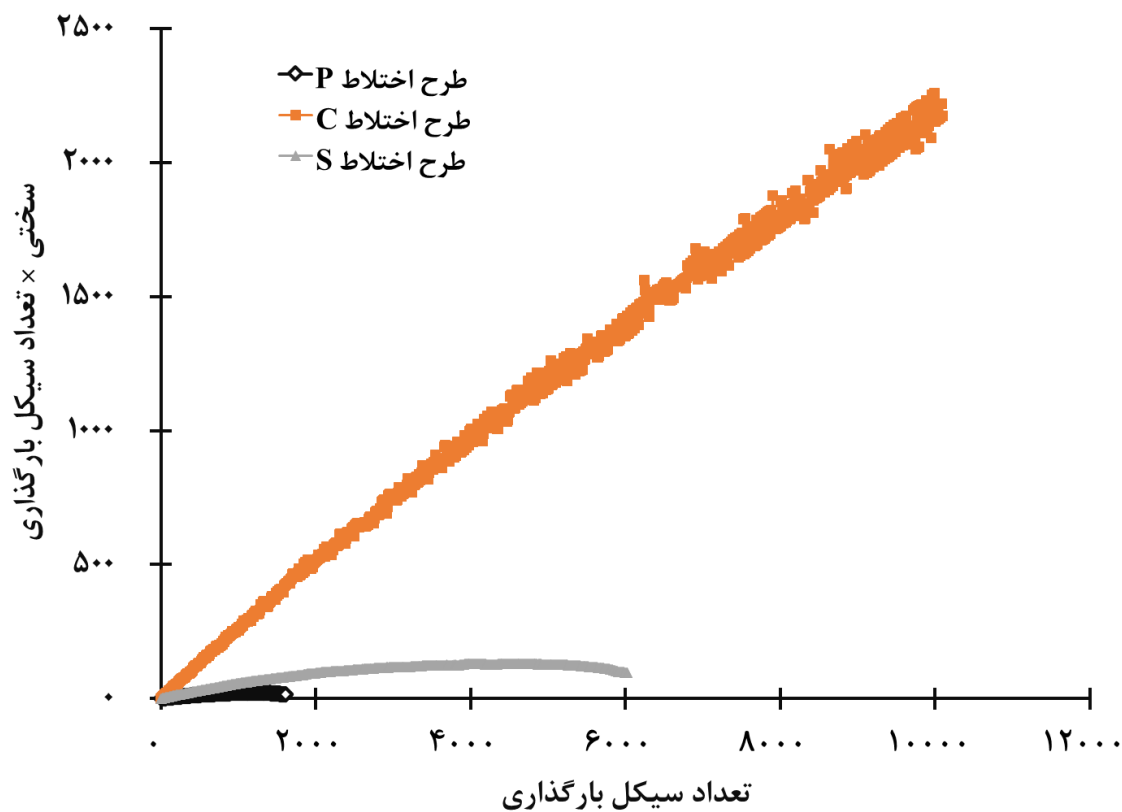
۴-۴. نتایج آزمون خستگی به روش کشش غیرمستقیم

جهت تحلیل نتایج آزمون خستگی به روش کشش غیرمستقیم، از دو معیار تعداد سیکل بارگذاری لازم برای رسیدن به نصف سختی اولیه (معیار اول) و تعداد سیکل بارگذاری برای رسیدن به حداکثر سختی (S_{max}) (معیار دوم) استفاده شده است. تحلیل حاصل از نتایج آزمایش خستگی برای معیارهای اول و دوم به ترتیب در شکل‌های

۱۱ و ۱۲ ارائه شده است. مطابق شکل‌های یاد شده، مقاومت خستگی طرح اختلاط سیمان بسیار بیشتر از دو طرح اختلاط دیگر در مدت زمان عمل‌آوری ۴۲ روز می‌باشد که دلیل آن واکنش هیدراتاسیون سیمان با آب موجود در قیر امولسیون و مدت زمان عمل‌آوری می‌باشد. دلیل عمر خستگی کمتر در طرح اختلاط پایه، درصد فضای خالی زیاد و مقدار کم درصد قیر امولسیون جهت اتصال مناسب تراشه‌های آسفالتی به یکدیگر می‌باشد (عموزاده عمرانی، ۱۴۰۲).



شکل ۱۱. نمودار سختی در برابر تعداد سیکل بارگذاری (معیار اول)



شکل ۱۲. نمودار سختی در تعداد سیکل بارگذاری در برابر تعداد سیکل بارگذاری (معیار دوم)

جدول ۱۳. نتایج آزمایش خستگی به روش کشش غیر مستقیم

نام طرح اختلاط	نوع معیار	تعداد سیکل بارگذاری
P	معیار اول	۷۵۱
	معیار دوم	۱۱۶۱
C	معیار اول	۲۲۱۳۷
	معیار دوم	۳۳۹۰۰
S	معیار اول	۲۵۹۱
	معیار دوم	۳۹۸۱

۴-۵. ارزیابی مالی

فرض ثابت ماندن قیمت این افزودنی‌ها نسبت به یکدیگر، هزینه استفاده از افزودنی برای سرباره مقدار پایه A در نظر گرفته شده و هزینه سیمان و الیاف شیشه به نسبت آن محاسبه شده است. با توجه به جدول ۱۴، سرباره کمترین هزینه و الیاف شیشه بیشترین هزینه را برای تولید مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی دارد.

در ادامه، برای یک جمع‌بندی دقیق‌تر و انتخاب بهترین افزودنی، برای مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی، هزینه‌های هر سه نوع افزودنی در جدول ۱۴ مقایسه شده است. با توجه به نوسان قیمت افزودنی‌های مختلف و با

جدول ۱۴. هزینه استفاده از انواع افزودنی‌های مورد استفاده در این تحقیق

نام افزودنی	قیمت به ازای هر کیلوگرم (A)	یک تن آسفالت با فرض وجود ۹۵۰ کیلوگرم مصالح سنگی (کیلوگرم)	مقدار افزودنی مورد استفاده در هزینه نهایی (A)
الیاف شیشه (۰/۳ درصد)	$125 \times A$	۲/۸۵	$356/25 \times A$
سیمان (۲ درصد)	$1/78 \times A$	۱۹	$33/82 \times A$
سرباره (۲ درصد)	A	۱۹	$19 \times A$

۵. نتیجه‌گیری

غیرمستقیم در سنین ۷ و ۲۸ روز، آزمون خزش دینامیک در سن ۲۸ روز و آزمون خستگی به روش کشش غیرمستقیم در سن ۴۲ روز انجام شد. مهم‌ترین نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر است:

- مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی، در حالت بدون افزودنی، دوام لازم را ندارند و بهتر است از افزودنی که

در این پژوهش، با هدف بررسی خواص عملکردی مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی، شش طرح اختلاط مختلف، حاوی افزودنی‌هایی نظیر الیاف شیشه، سرباره گرانوله ذوب‌آهن و سیمان مورد مطالعه قرار گرفت. ارزیابی‌های آزمایشگاهی شامل آزمون‌های مقاومت مارشال در دوره عمل‌آوری ۷ روزه و آزمون کشش

خاصیت سیمانی شدن به مخلوط آسفالتی می دهد استفاده شود.

- دلیل کم بودن دوام مخلوط های آسفالتی سرد بازیافتی، اتصال ضعیف بین قیر امولسیون و تراشه آسفالتی می باشد. این اتصال ضعیف سه دلیل می تواند داشته باشد: (۱) وجود قیر پیر شده در اطراف سنگدانه بازیافتی، (۲) وجود درصد کم قیر امولسیون جدید در مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی و (۳) وجود سنگدانه آهکی در کنار حضور قیر امولسیون کاتیونیک در مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی.

- با توجه به ضعف در دوام مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی، لازم است که آزمایش ITS به عنوان مبنا برای تعیین درصد قیر امولسیون بهینه در نظر گرفته شود.

- الیاف شیشه مورد استفاده در این پژوهش در بدترین حالت (۰/۴ درصد وزنی مصالح سنگی) موجب کاهش مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه های خشک نسبت به طرح اختلاط پایه به میزان ۷۸ و ۱۷/۷ درصد به ترتیب در سنین ۷ و ۲۸ روزه مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی شده است.

- الیاف شیشه به سه دلیل درهم تنیدگی، خاصیت شکنندگی و مورفولوژی سطحی، افزودنی مناسبی برای مخلوط های آسفالتی سرد بازیافتی نمی باشند.

- با توجه به نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی و خزش دینامیک و خستگی به روش کشش غیرمستقیم طرح های اختلاط حاوی سیمان و سرباره گرانوله ذوب آهن، می توان دریافت که دو عامل واکنش هیدراتاسیون سیمان با آب موجود در قیر امولسیون و مدت زمان عمل آوری در بهبود

عملکرد مخلوط های آسفالتی سرد بازیافتی نقش به سزایی دارند.

- با توجه به نتایج چهار آزمون عملکردی صورت گرفته در این پژوهش، سیمان می تواند گزینه مناسبی جهت استفاده در مخلوط های آسفالتی سرد بازیافتی باشد.

- اصلاح نشریه ۳۳۹ سازمان برنامه و بودجه، در موضوع ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط های آسفالتی سرد بازیافتی

- از آنجا که سیاست اداره کل راهداری و حمل و نقل جاده ای کشور در سالیان اخیر استفاده بیشتر از تراشه های آسفالتی می باشد، مخلوط های آسفالتی سرد بازیافتی حاوی سیمان و سرباره گرانوله ذوب آهن برای جاده های با ترافیک کم و صرفاً برای مناطقی از ایران که چرخه یخبندان و ذوب وجود ندارد و یا به ندرت اتفاق می افتد گزینه مناسبی است.

۶. پیشنهاد مطالعات آتی

- به دست آوردن درصد بهینه سیمان و سرباره گرانوله ذوب آهن در مخلوط های آسفالتی سرد بازیافتی و همچنین بررسی اثر حضور همزمان این دو نوع افزودنی در مخلوط های آسفالتی سرد بازیافتی

- بررسی و مقایسه خصوصیات شکست در دمای میانی و کم برای مخلوط های آسفالتی سرد بازیافتی حاوی سیمان و سرباره گرانوله ذوب آهن

۷. مراجع

- Ameri, M., Mohammadi, M. H., Motevalizadeh, S. M. and Mousavi, A. 2019. "Experimental study to investigate the performance of cold in-place recycling asphalt mixes". *Proceed. Instit. Civ. Eng.-Transport*, 172(6): 360-370.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). 2001. "Resistance of compacted bituminous mixture to moisture induced damage". T283-89, standard specifications for transportation materials and methods and sampling and testing. Part II: Tests, Washington D.C., T283-1–T283-8.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). 2012a. "T166-12 bulk specific gravity of compacted hot mix asphalt (HMA) using saturated surface dry specimens". 32nd Ed., AASHTO, Washington, D.C.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). 2012b. "Bulk specific gravity (G_{mb}) of compacted hot mix asphalt (HMA) using paraffin-coated specimens". T275-07.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). 2013a. "Quantitative extraction of asphalt binder from hot mix asphalt (HMA)". T164-13.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). 2013b. "Resistance to plastic flow of asphalt mixtures using Marshall apparatus". T245-13.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). 2014. "Sieve analysis of fine and coarse aggregates". T27-14.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). 2017a. "Standard practice for emulsified asphalt content of cold recycled mixture designs". PP86-17.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). 2017b. "Determining the dynamic modulus and flow number for asphalt mixtures using the asphalt mixture performance tester (AMPT)". AASHTO T-378, Washington, DC.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). 2018. "Standard specification for materials for cold recycled mixtures with emulsified asphalt". MP31-22.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). 2020. "Theoretical maximum specific gravity (G_{mm}) and density of asphalt mixtures". T209-20.
- Amouzadeh Omrani, M. 2023. "Laboratory comparison of mechanical properties of emulsified cold recycled asphalt containing cement kiln dust and steel slag with recycled asphalt containing cement". *J. Transport. Infrastruct. Eng.*, 9(3): 57-79. doi: 10.22075/jtie.2023.30574.1641. [In Persian]
- Arimilli, S., Jain, P. K. and Nagabhushana, M. N. 2016. "Optimization of recycled asphalt pavement in cold emulsified mixtures by mechanistic characterization". *J. Mater. Civ. Eng.*, 28(2): 04015132.
- ARRA. 2023. "Recommended mix design guidelines for cold recycling using emulsified asphalt recycling agent". CR201.
- Asphalt Institute. 1998. "A basic asphalt emulsion manual". Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- ASTM D4867/D4867M-09. 2014. "Standard test method for effect of moisture on asphalt concrete paving mixtures". West Conshohocken, PA: ASTM International, approved July 1. https://doi.org/10.1520/D4867_D4867M-09R14
- ASTM D1188-07. 2015. "Standard test method for bulk specific gravity and density of compacted bituminous mixtures using coated samples". ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Azari, H. 2010. "Precision estimates of AASHTO T283: Resistance of compacted hot mix asphalt (HMA) to moisture-induced damage". National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board of the National Academies.
- Azizi, H. and Amouzadeh Omrani, M. 2022. "Investigating the effect of different additives on the mechanical properties of cold asphalt produced with emulsion bitumen". *Civ. Proj. J.*, 4(5): 31-46. <https://doi.org/10.22034/cpj.2022.364307.1161>. [In Persian]
- Criado, M., Ke, X., Provis, J. L. and Bernal, S. A. 2017. "Alternative inorganic binders based on alkali-activated metallurgical slags". In *Sustainable and Nonconventional Construction Materials using Inorganic Bonded Fiber Composites* (pp. 185-220). Woodhead Publishing.
- Cross, S. A. and Jakatimath, Y. 2007. "Evaluation of cold in-place recycling for rehabilitation of transverse cracking on US 412". No. FHWA/OK 07 (04)), Oklahoma State University.
- Dolżycki, B. and Jaskuła, P. 2019. "Review and evaluation of cold recycling with bitumen emulsion and cement for rehabilitation of old pavements". *J. Traffic Transport. Eng. (English Edition)*, 6(4): 311-323.
- Du, S. 2015. "Performance characteristic of cold recycled mixture with asphalt emulsion and chemical additives". *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2015(1): 271596.

- Du, S. 2022. "Effect of different fibres on the performance properties of cold recycled mixture with asphalt emulsion". *Int. J. Pavement Eng.*, 23(10): 3444-3453.
- Eltwati, A. S., Enieb, M., Al-Saffar, Z. H. and Mohamed, A. 2022. "Effect of glass fibers and waste engine oil on the properties of RAP asphalt concretes". *Int. J. Pavement Eng.*, 23(14): 5227-5238.
- EN 12697-24. 2012. "Bituminous mixtures-test methods for hot mix asphalt – part 24: resistance to fatigue". European Committee for Standardization.
- Ghanizadeh, A. R., Rahrovan, M. and Bafghi, K. B. 2018. "The effect of cement and reclaimed asphalt pavement on the mechanical properties of stabilized base via full-depth reclamation". *Const. Build. Mater.*, 161: 165-174.
- Grace, M. A., Clifford, E. and Healy, M. G. 2016. "The potential for the use of waste products from a variety of sectors in water treatment processes". *J. Clean. Prod.*, 137: 788-802.
- Hoseini, S. M. and Hamidijo, R. 2023. "Fundamentals of using reclaimed asphalt pavement (RAP) and limitations of its recycling in batch-type asphalt plants". The 15th Bitumen, Asphalt and Machinery Conference and Exhibition. [In Persian]
- Huang, X., Wang, Z., Liu, Y., Hu, W. and Ni, W. 2016. "On the use of blast furnace slag and steel slag in the preparation of green artificial reef concrete". *Constr. Build. Mater.*, 112: 241-246.
- Issa, R., Zaman, M. M., Miller, G. A. and Senkowski, L. J. 2001. "Characteristics of cold processed asphalt millings and cement-emulsion mix". *Transport. Res. Record*, 1767(1): 1-6.
- Jain, S. and Singh, B. 2021. "Cold mix asphalt: An overview". *J. Clean. Prod.*, 280: 124378.
- Jalili, A., Siahpour, A. R., Ghasemzadeh, M. K. and Kashaninovin, M. 2019. "Evaluation of the effect of cement and asphalt crumb content on the characteristics of cold asphalt mixtures prepared from asphalt crumb". The 11th Bitumen, Asphalt and Machinery National Conference and Exhibition. <https://civilica.com/doc/966074>. [In Persian]
- Jiang, Y., Yi, Y., Tian, T., Fan, J., Bai, C., Tan, Y., ... and Deng, C. 2023. "Laboratory and field research on using cement and polyester fiber to enhance the performance of emulsified asphalt cold recycled mixture". *Arab. J. Sci. Eng.*, 48(4): 4937-4951.
- Kandhal, P. S. and Mallick, R. B. 1998. "Pavement recycling guidelines for state and local governments: Participant's reference book". No. FHWA-SA-98-042.
- Kim, Y., Lee, H. D. and Heitzman, M. 2009. "Dynamic modulus and repeated load tests of cold in-place recycling mixtures using foamed asphalt". *J. Mater. Civ. Eng.*, 21(6): 279-285.
- Kong, L., Lu, Z., He, Z., Shen, Z., Xu, H., Yang, K. and Yu, L. 2022. "Characterization of crack resistance mechanism of fiber modified emulsified asphalt cold recycling mixture based on acoustic emission parameters". *Constr. Build. Mater.*, 327: 126939.
- Liang, R. 2008. "Refine AASHTO T283 resistance of compacted bituminous mixture to moisture induced damage for superpave". No. FHWA/OH-2008/1, United States Federal Highway Administration.
- Lin, J., Hong, J. and Xiao, Y. 2017. "Dynamic characteristics of 100% cold recycled asphalt mixture using asphalt emulsion and cement". *J. Clean. Prod.*, 156: 337-344.
- Liu, Z., Sun, L., Zhai, J. and Huang, W. 2022. "A review of design methods for cold in-place recycling asphalt mixtures: Design processes, key parameters, and evaluation". *J. Clean. Prod.*, 370: 133530.
- Liu, H., Kuang, A., Wang, Z., Chu, C., Yu, H. and Lv, S. 2023. "Investigation on fracture and fatigue performance of cold recycling emulsified asphalt mixture based on acoustic emission parameters". *J. Clean. Prod.*, 428: 139285.
- Meena, P., Naga, G. R. and Kumar, P. 2023. "Effect of mechanical properties on performance of cold mix asphalt with recycled aggregates incorporating filler additives". *Sustainability*, 16(1): 344.
- Ministry of Road and Transportation of Iran. 2006. "Cold mix recycling, general technical specifications". Deputy of Education, Research and Technology, No. 339.
- Ministry of Road and Transportation of Iran. 2011. "Iran highway asphalt paving code". Deputy of Education, Research and Technology, No. 234.
- Modarres, A., Rahimzadeh, M. and Zarrabi, M. 2014. "Field investigation of pavement rehabilitation utilizing cold in-place recycling". *Resour., Conserv. Recy.*, 83: 112-120.
- Naqvi, H., Khavandi, A. R., AmirZehni, M., Shamsi, M., Abdal, M., & Nasrollahtabar, A. 2023. "Design and implementation of cold recycled asphalt layer in the pavement of runway 29 left of Mehrabad International Airport". The 15th Bitumen, Asphalt & Machinery Conference & Exhibition. [In Persian]
- Naser, M., Abdel-Jaber, M. T., Al-Shamayleh, R., Ibrahim, R., Louzi, N. and AlKhrrissat, T. 2023. "Improving the mechanical properties of recycled asphalt pavement mixtures using steel slag and silica fume as a filler". *Build.*, 13(1): 132.

- National Asphalt Pavement Association. (n.d.). "Implementation efforts". Retrieved January 19, 2025, from <https://www.asphaltpavement.org/expertise/engineering/resources/bmd-resource-guide/implementation-efforts>.
- Nikfarjam, H. 2020. "Performance evaluation of cold recycled mixtures". M.Sc. Thesis, Civil Engineering Department, Sharif University of Technology, Iran, Sharif Digital Repository, 53093 (09). [Online]. Available: <http://repository.sharif.edu/resource/479269/>. [In Persian]
- Park, K. S., Shoukat, T., Yoo, P. J. and Lee, S. H. 2020. "Strengthening of hybrid glass fiber reinforced recycled hot-mix asphalt mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 258: 118947.
- Sabouri, M. and Sadeghi, M. 2023. "Investigation on properties of cold recycled asphalt mixtures reinforced with polypropylene fibers". *Amirkabir J. Civ. Eng.*, 55(3): 583-602. [In Persian]
- Tian, T., Jiang, Y., Yi, Y., Fan, J., Yang, D. and Deng, C. 2022. "Fiber-emulsified asphalt cold-recycled mixture produced using vertical vibration compaction: Performance study". *J. Mater. Civ. Eng.*, 34(7): 04022114.
- Wang, Z., Wu, S., Yang, C., Xie, J., Xiao, Y., Zhao, Z., ... and Zhang, L. 2022. "Quantitative assessment of road performance of recycled asphalt mixtures incorporated with steel slag". *Mater.*, 15(14): 5005.
- Wang, M., Huo, T., Xing, C. and Wang, Y. 2023. "Influence of fiber mixing process on the cracking resistance of cold recycled asphalt mixture". *Appl. Sci.*, 13(2): 999.
- Xiao, F., Yao, S., Wang, J., Li, X. and Amirkhanian, S. 2018. "A literature review on cold recycling technology of asphalt pavement". *Constr. Build. Mater.*, 180: 579-604.
- Xing, C., Tang, S., Chang, Z., Han, Z., Li, H. and Zhu, B. 2024. "A comprehensive review on the plant-mixed cold recycling technology of emulsified asphalt: Raw materials and factors affecting performances". *Constr. Build. Mater.*, 439: 137344.
- Yao, X. and Xu, T. 2023. "Fatigue fracture and self-healing behaviors of cold recycled emulsified asphalt mixture containing microcapsules based on semicircular bending test". *J. Clean. Prod.*, 410: 137171.
- Yao, Y., Xu, G., Wu, M. and Zhao, M. 2023. "Exploring the influence of cement and cement hydration products on strength and interfacial adhesion in emulsified cold recycled mixture: A molecular dynamics and experimental investigation". *Constr. Build. Mater.*, 409: 134050.
- 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.
- Zhu, C., Zhang, H., Li, Q., Wang, Z. and Jin, D. 2025. "Influence of different aged RAPs on the long-term performance of emulsified asphalt cold recycled mixture". *Constr. Build. Mater.*, 458: 139680.
- Ziari, H., Aliha, M. R. M., Moniri, A. and Saghafi, Y. 2020. "Crack resistance of hot mix asphalt containing different percentages of reclaimed asphalt pavement and glass fiber". *Constr. Build. Mater.*, 230: 117015.
- Ziari, H., Tavakoli, H. and Zalnezhad, M. 2024. "Structural attributes in cold recycled asphalt mixes: Microstructure insights". *Road*, 32(120): 219-236. doi: 10.22034/road.2023.410558.2186. [In

