

Evaluation of the Effect of Deviation from Permissible Grading Curve Limits on Mechanical Properties and Moisture Susceptibility of Cold Recycled Asphalt Mixture

Abdul Hamid Bezhan¹, Pouria Hajikarimi^{2*} , Fereidoon Moghadas Nejad³, Ali Sarabandi¹

1. M.Sc., Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.
2. Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.
3. Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.

Abstract

Asphalt pavements deteriorate over time due to heavy traffic and environmental factors, necessitating frequent maintenance or rehabilitation. Cold recycled asphalt mixtures (CRAM) provide a sustainable approach for reusing reclaimed asphalt pavement (RAP), reducing construction costs, conserving natural resources, and mitigating environmental impacts. However, the mechanical performance and durability of CRAM are highly dependent on aggregate gradation. This study investigates the effect of variations in aggregate gradation, particularly deviations from permissible limits caused by plant production errors or construction-related issues, on the mechanical properties of CRAM. In this research, RAP was used as the coarse aggregate (95% by weight), while virgin aggregate served as filler (5% by weight). Five gradation curves were evaluated, including four outside the permissible range and one base mix within the permissible range, based on the gradation type specified in Code 339. These five mix designs were as follows: (1) Mix A: with the reduction of filler below the permissible range specified in Code 339. (2) Mix B: with the increase of filler beyond the permissible range specified in Code 339. (3) Mix C: with the reduction of coarse aggregates below the permissible range specified in Code 339. (4) Mix D: with the increase of coarse aggregates beyond the permissible range specified in Code 339. (5) Base Mix: with an aggregate gradation within the permissible range of Code 339. Marshall specimens were prepared under ambient conditions and cured for 7 days before testing, while indirect tensile strength (ITS) specimens were tested after 7 and 28 days of curing in both dry and moisture-conditioned states. The results indicate that increasing the coarse aggregate proportion or reducing filler content led to a decrease in Marshall stability by 18% and 7%, respectively, compared to the base mix. Conversely, increasing fine aggregate content and reducing coarse aggregates enhanced Marshall stability by 30% and 22%, respectively. In terms of tensile behavior, reducing fine aggregates decreased Dry ITS by 20%, whereas increasing fine aggregates or adjusting coarse aggregate proportions resulted in Dry ITS increases of 11%, 16%, and 1.5% relative to the base mix. Although some mixtures achieved the minimum Dry ITS requirement after 28 days, certain designs exhibited poor visual quality and insufficient cohesion, emphasizing the importance of precise gradation control during plant production. The base mix failed to meet moisture durability requirements in terms of Dry ITS and tensile strength ratio (TSR), highlighting the need for gradation optimization or the use of suitable additives. Additionally, increasing the emulsified bitumen content in mix B* to 5.5% improved Dry ITS by 21% relative to the base mix, demonstrating the synergistic effect of proper gradation and emulsified bitumen content on moisture resistance. However, the base mix failed to meet moisture durability requirements in terms of Dry ITS and TSR, emphasizing the need for gradation optimization or the use of suitable additives. Additionally, increasing the emulsified bitumen content in mix design B* to 5.5% improved Dry ITS by 21% relative to the base mix, demonstrating the synergistic effect of proper gradation and emulsified bitumen content on moisture resistance. Overall, these findings confirm that aggregate gradation has a significant influence on both the mechanical performance and moisture durability of CRAM. Maintaining optimal proportions of fine aggregate and filler is particularly crucial, as deviations from their ideal levels can substantially compromise the mixture's strength, cohesion, and durability. Therefore, careful monitoring and control of aggregate gradation and emulsified bitumen content during production are essential to ensure acceptable Marshall stability, ITS, and TSR, providing practical guidance for the sustainable rehabilitation of asphalt pavements using cold recycled mixtures.

Review History

Received: Nov 20, 2025
Revised: Mar 11, 2026
Accepted: Apr 18, 2026

Keywords

Recycled Cold Asphalt,
Reclaimed Asphalt
Pavement
Aggregates
Gradation
Filler
Marshall Stability
Durability

* Corresponding Author Email: phajikarimi@aut.ac.ir - ORCID: 0000-0001-5621-7274



ارزیابی تأثیر انحراف از حدود مجاز دانه‌بندی بر مشخصات مکانیکی و حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی

عبدالحمید بیژن^۱، پوریا حاجی کریمی^{۲*} , فریدون مقدس نژاد^۳، علی سرابندی^۱

۱. کارشناسی ارشد مهندسی راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.
۲. استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران.
۳. استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

با گذشت زمان، روسازی‌های آسفالتی تحت تأثیر ترافیک و عوامل محیطی دچار خرابی شده و نیازمند تعمیر و نگهداری می‌شوند. بازیافت سرد مخلوط آسفالتی روشی پایدار برای استفاده مجدد از تراشه‌های آسفالتی است. عملکرد این مخلوط‌ها علاوه بر نوع و درصد قیرآبه مصرفی به دانه‌بندی مصالح سنگی نیز وابسته است. با توجه به احتمال عدم رعایت دقیق دانه‌بندی هنگام اجرا، هدف این پژوهش بررسی تأثیر تغییرات دانه‌بندی، به ویژه منحنی‌های خارج از محدوده‌های مجاز ناشی از خطاهای اجرایی، بر خواص مکانیکی مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی است. یک طرح دانه‌بندی پایه مطابق تیپ ۴ نشریه ۳۳۹ و چهار طرح خارج از محدوده مجاز طراحی شد. برای ارزیابی، از آزمایش مقاومت مارشال در سن ۷ روز و آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم در سنین ۷ و ۲۸ روز استفاده شد. نتایج نشان داد که افزایش درشت‌دانه یا کاهش فیلر موجب کاهش مقاومت مارشال تا ۱۸ و ۷ درصد می‌شود، در حالی که افزایش ریزدانه و کاهش درشت‌دانه مقاومت مارشال را تا ۳۰ و ۲۲ درصد نسبت به طرح پایه افزایش می‌دهد. همچنین، کاهش ریزدانه مقاومت کششی غیرمستقیم را تا ۲۰ درصد کاهش داده و در طرح‌های افزایش ریزدانه، کاهش و افزایش درشت‌دانه موجب افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم به ترتیب ۱۱، ۱۶ و ۱/۵ درصد نسبت به طرح پایه شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که به‌طور کلی، کنترل دقیق مقدار ریزدانه و فیلر در اجرای مخلوط آسفالتی سرد ضروری است، زیرا این اجزا بیشترین تأثیر را بر مقاومت و انسجام مخلوط دارند.

کلمات کلیدی

آسفالت سرد بازیافتی
تراشه آسفالتی
مصالح سنگی
دانه‌بندی
فیلر
مقاومت مارشال
دوام رطوبتی

۱- مقدمه

مشکلات زیست‌محیطی و اقتصادی به همراه دارد. در سال‌های اخیر، استفاده مجدد از تراشه آسفالتی به عنوان روشی پایدار برای صرفه‌جویی در منابع طبیعی، کاهش هزینه‌های ساخت‌وساز و کاهش آلودگی زیست‌محیطی مورد توجه بسیاری از کشورها قرار گرفته است [1]. فناوری‌های بازیافت آسفالت معمولاً بر اساس

با گذشت زمان، روسازی‌های آسفالتی تحت تأثیر ترافیک سنگین و عوامل محیطی دچار خرابی‌های تدریجی می‌شوند و نیاز به عملیات نگهداری یا بازسازی پیدا می‌کنند. این فرآیندها حجم قابل توجهی از تراشه‌های آسفالتی^۱ تولید می‌کنند که دفع آن‌ها

¹ Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)

شبهه‌سازی شرایط بارندگی، نمونه‌ها پس از یک روز از زمان ساخت به مدت ۲۴ ساعت در آب با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند و سپس به مدت ۱، ۴ و ۷ روز بعد از باران در دمای محیط عمل‌آوری و مورد ارزیابی قرار گرفتند. در این پژوهش از آزمون‌های مقاومت کششی غیرمستقیم^{۱۱} (IDT) و آزمون خمش نیم دایره^{۱۲} (SCB) استفاده شد. نتایج نشان داد که تأثیر بارندگی بر نمونه‌های بدون سیمان بیشتر از نمونه‌های حاوی سیمان است و وجود سیمان می‌تواند شدت اثر بارندگی را کاهش دهد. همچنین به نظر می‌رسد نمونه‌های بدون سیمان برای بازگشت به شرایط پیش از بارندگی در شاخص‌های مختلف حداقل به ۱۴ روز زمان نیاز دارند، در حالی که این مدت برای نمونه‌های دارای سیمان حدود ۷ روز است.

در تحقیق دیگری صبوری و صادقی [6] از الیاف پلی‌پروپیلن^{۱۳} به همراه سیمان در مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی استفاده کردند. نتایج نشان داد استفاده از ۲/۵ درصد سیمان به همراه ۴/۵ درصد قیر امولسیون اصلاح شده با لاتکس موجب افزایش ۲۷ درصد شاخص نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم^{۱۴} (TSR) نسبت به مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی حاوی ۶/۵ درصد قیر امولسیون می‌شود.

ناصر علوی و نوذری گیلانی [7] اثر استفاده از نانورس را بر مدول برجهنگی و مقاومت شیارشدگی مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی حاوی قیر امولسیون بررسی کردند. نتایج نشان داد استفاده از نانو رس تا میزان ۲ درصد موجب افزایش عدد روانی به میزان ۴۱/۲ درصد نسبت به طرح شاهد می‌شود اما بیشتر از این مقدار نتیجه معکوس دارد و همچنین استفاده از نانو رس تا ۶ درصد موجب افزایش مدول برجهنگی به میزان ۱۸ درصد نسبت به طرح شاهد می‌شود.

نقوی و همکاران [8] پروژه بازیافت سرد آسفالت باند ۲۹ چپ فرودگاه بن المللی مهرآباد را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج پروژه نشان داد که استفاده از ۱ درصد سیمان موجب افزایش پایداری مارشال باقیمانده به میزان ۶ درصد و نسبت مقاومت کششی

دمای اختلاط به دو دسته بازیافت گرم^۱ و بازیافت سرد^۲ تقسیم می‌شوند. این دو دسته اصلی، بسته به محل اجرای عملیات و عمق عملیات بازیافت، به زیرگروه‌های مختلفی طبقه‌بندی می‌شوند. به طور خاص، بازیافت گرم شامل دو نوع بازیافت گرم در محل^۳ و بازیافت گرم در کارخانه مرکزی^۴ است، در حالی که بازیافت سرد به سه دسته بازیافت سرد در محل^۵، بازیافت سرد در کارخانه مرکزی^۶ و بازیافت تمام عمق^۷ تقسیم می‌شود. از نظر آثار زیست‌محیطی، ملاحظات اقتصادی و ایمنی اجرایی، فناوری بازیافت سرد در مقایسه با روش‌های بازیافت گرم ظرفیت بیشتر و مزایای برتری از خود نشان داده است [2]. با این حال، مخلوط‌های آسفالتی سرد همچنان با چالش‌های متعددی روبه‌رو هستند؛ از جمله مقاومت^۸ اولیه ناکافی، زمان عمل‌آوری طولانی و آسیب‌پذیری در برابر ترک‌خوردگی حرارتی [1]. پژوهشگران برای برطرف کردن این مشکل، راهکارهایی همچون به‌کارگیری قیر امولسیونی اصلاح‌شده، تنظیم^۹ میزان مصالح سنگی بکر در مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی، به‌کارگیری انواع مختلف الیاف، و همچنین استفاده هم‌زمان از قیر امولسیونی اصلاح‌شده، سیمان، آهک و مواد جوان‌ساز مورد توجه قرار داده‌اند [1, 3]. در این راستا مطالعه‌ای توسط سربندی و همکاران [4] روی مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی حاوی الیاف شیشه، سیمان و سرباره گرانوله ذوب‌آهن صورت گرفت. نتایج نشان داد که الیاف شیشه در ۰/۳ درصد وزنی موجب افزایش مقاومت مارشال به میزان ۱۰/۳ درصد و موجب کاهش مقاومت کششی غیرمستقیم^{۱۰} به میزان ۱۷/۷ درصد در مدت زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه شده است. از طرفی سرباره گرانوله ذوب‌آهن و سیمان موجب افزایش مقاومت مارشال به ترتیب ۴۰ و ۵۰ درصد و افزایش مقاومت کششی غیر مستقیم به میزان ۱۶/۴ و ۳۶/۳ شده است. صبوری و حاجی سیدنصیر [5] به بررسی رخدادهای بارندگی بر دوره عمل‌آوری مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی حاوی ۲ درصد سیمان پرداختند. در این پژوهش به منظور

¹ Hot Recycling (HR)

² Cold Recycling (CR)

³ Hot In-Place Recycling (HIR)

⁴ Hot Central-Plant Recycling (HCPR)

⁵ Cold In-Place Recycling (CIR)

⁶ Cold Central-Plant Recycling (CCPR)

⁷ Full Depth Reclamation (FDR)

⁸ Strength

⁹ Adjusting

¹⁰ Indirect Tensile Test (ITS)

¹¹ Indirect Tension

¹² Semi-Circular Bending

¹³ Polypropylene

¹⁴ Indirect Tensile Strength Ratio

عبوری از الک شماره ۴ به میزان ۳۵، ۴۰، ۴۵ و ۵۰ درصد تعیین شد و بر این اساس ۴ طرح دانه‌بندی مختلف ایجاد شد. آزمون‌های مقاومت کششی غیرمستقیم (IDT) و آزمون خمش نیم دایره (SCB) برای ارزیابی مقاومت دمای پایین مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی مورد استفاده قرار گرفت. بنابر نتایج بدست آمده محدوده پیشنهادی درصد عبور از الک‌های ۴/۷۵، ۲/۳۶ و ۰/۰۷۵ میلی‌متر به ترتیب ۴۵-۵۵٪، ۲۷-۵۲٪ و ۱/۵-۵٪ گزارش شده است و به این معنا است که هرچه مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی ریزدانه‌تر باشد مقاومت آن در برابر ترک خوردگی دمای پایین افزایش می‌یابد. لی^۶ و همکاران [16] تأثیر دانه‌بندی ریزدانه بر خواص ماکرو^۷ و میکرو^۸ مخلوط سرد بازیافتی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد مخلوطی که دارای مقدار کمتری ریزدانه بود به ترتیب کاهش ۱۶/۲ درصدی در انرژی شکست^۹ و ۱۸/۲ درصدی در کرنش شکست^{۱۰} از خود نشان داد. ژو^{۱۱} و همکاران [17] عملکرد بلندمدت و ریزساختار مخلوط آسفالتی سردبازیافتی با دانه‌بندی‌های مختلف مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که در میان سه دانه‌بندی مورد بررسی، مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی با دانه‌بندی ریزتر به سبب ساختار متراکم موجب بهبود خواص مکانیکی، افزایش پایداری رطوبتی^{۱۲} و ارتقای مقاومت در برابر ترک خوردگی در دماهای پایین تحت شرایط مختلف پیرشدگی می‌شود. در تحقیق شو^{۱۳} و همکاران [18] نیز نتایج نشان داد که با افزایش ریزدانه مقاومت مارشال و مقاومت کششی غیر مستقیم افزایش می‌یابد.

یکی از چالش‌های مهم در خصوص مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی برای استفاده حداکثری از تراشه‌های آسفالتی، قرار گرفتن دانه‌بندی مصالح سنگی در محدوده مجاز نشریات و آیین‌نامه‌ها است. تغییرات در نوع دانه‌بندی باعث انواع خرابی‌ها در روسازی می‌شود. در بسیاری از موارد، دانه‌بندی تراشه‌های آسفالتی موجود در محل پروژه به دلایلی مانند مشخصات دستگاه آسفالت‌تراش،

غیرمستقیم (TSR) به میزان ۲۰ درصد می‌شود. با وجود پیشرفت‌های حاصل‌شده در پژوهش‌های اخیر و به‌کارگیری راهکارهای متعدد در بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی، همچنان چالش‌هایی در مسیر کاربرد گسترده این فناوری از جمله عدم تطابق شرایط آزمایشگاهی و میدانی، طرح اختلاط، تراکم و دانه‌بندی باقی است [9, 10].

مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی با استفاده از تراشه آسفالتی و در صورت نیاز اضافه کردن سنگدانه بکر و در دمای محیط تولید می‌شوند. در مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی، تراشه آسفالتی به عنوان سنگدانه سیاه^۱ در طراحی دانه‌بندی در نظر گرفته می‌شود [11]. منظور از سنگدانه سیاه عدم ترکیب قیر پیر شده تراشه آسفالتی با قیر جدید است و عدم تغییر مشخصات قیر جدید توسط قیر پیر شده تراشه آسفالتی به سبب دمای پایین تولید مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی می‌باشد [12]. با توجه به وجود قیر پیر شده در اطراف سنگدانه‌های تراشه آسفالتی و دمای پایین تولید، دانه‌بندی مخلوط‌های آسفالتی حاوی این نوع سنگدانه‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. در مطالعه‌ای که توسط یان^۲ و همکاران [13] روی تأثیر دانه‌بندی مصالح سنگی بکر و تراشه آسفالتی بر مدول دینامیکی^۳ مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی انجام شد، نتایج نشانگر آن است که دانه‌بندی تأثیر قابل توجهی بر مدول دینامیکی مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی در دماهای بالا و فرکانس پایین دارد. نتایج تحقیق دیگری نشان داده است که خواص مکانیکی و حساسیت به رطوبت مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی حاوی مصالح سنگی با اندازه بزرگتر از ۲۵ میلی‌متر تفاوت قابل توجهی با مخلوط‌هایی که اندازه مصالح سنگی در آنها به ۲۵ میلی‌متر محدود است دارد [1]. در مطالعه دیگری مشاهده شد که اگر در مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی مصالح ریزدانه‌تر باشند، مقاومت فشاری غیرمحصور^۴ و مقاومت کششی غیرمستقیم به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد [14]. در مطالعه دن^۵ و همکاران [15] بهینه‌سازی دانه‌بندی مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی با تأکید بر عملکرد دمای پایین بررسی شد. در این تحقیق، درصد مصالح

⁶ Li

⁷ Macro

⁸ Micro

⁹ Fracture Energy

¹⁰ Failure Strain

¹¹ Zhu

¹² Moisture Stability

¹³ Xu

¹ Black Rock

² Yan

³ Dynamic Modulus

⁴ Unconfined Compressive Strength (UCS)

⁵ Dan

بخش ۲-۱-۱ به تشریح روش تعیین دانه‌بندی طرح اختصاص دارد. در بخش ۲-۲ فرآیند تهیه و توسعه طرح‌های اختلاط ارائه شده و در بخش ۲-۳ نیز چگونگی انجام آزمایش‌ها و روش‌های ارزیابی عملکرد تشریح می‌شود.

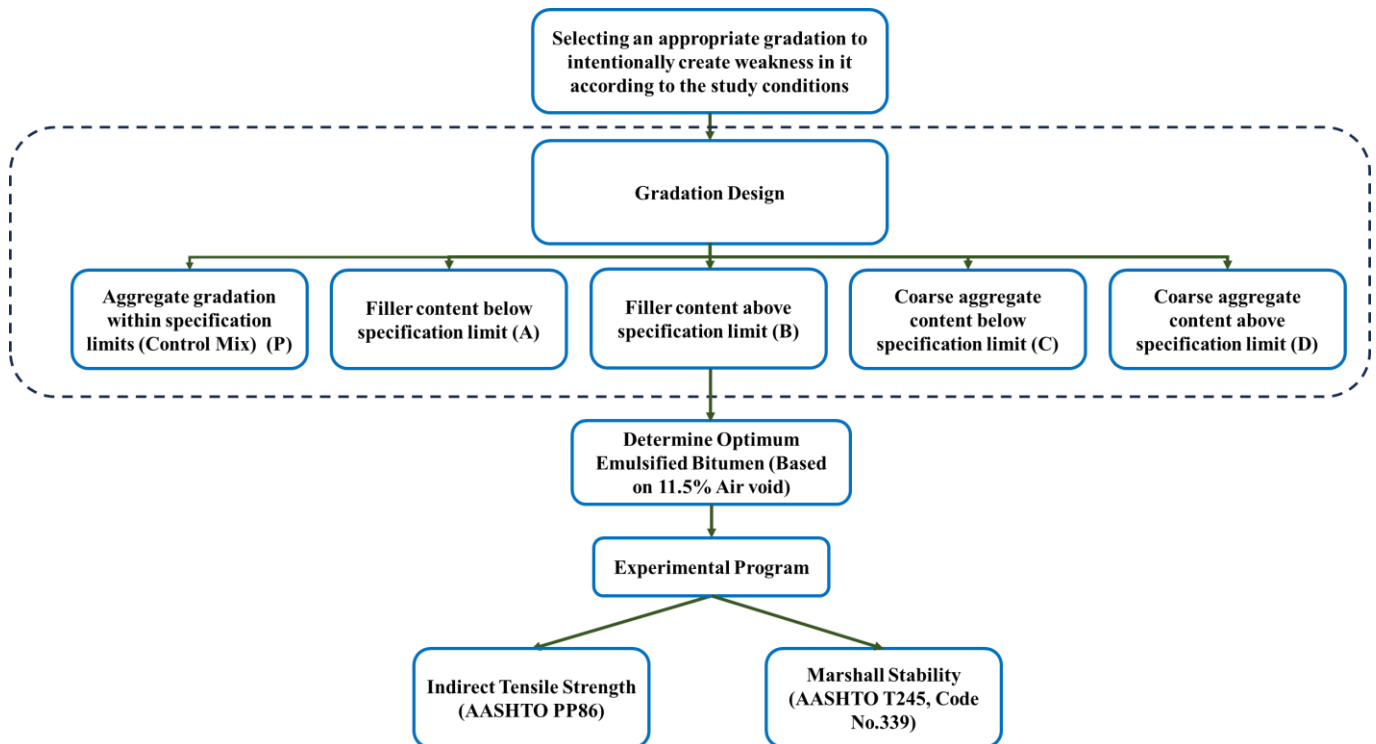
۲- روش تحقیق

۱-۲- مشخصات مصالح مصرفی

۱-۱-۲- تراشه آسفالتی

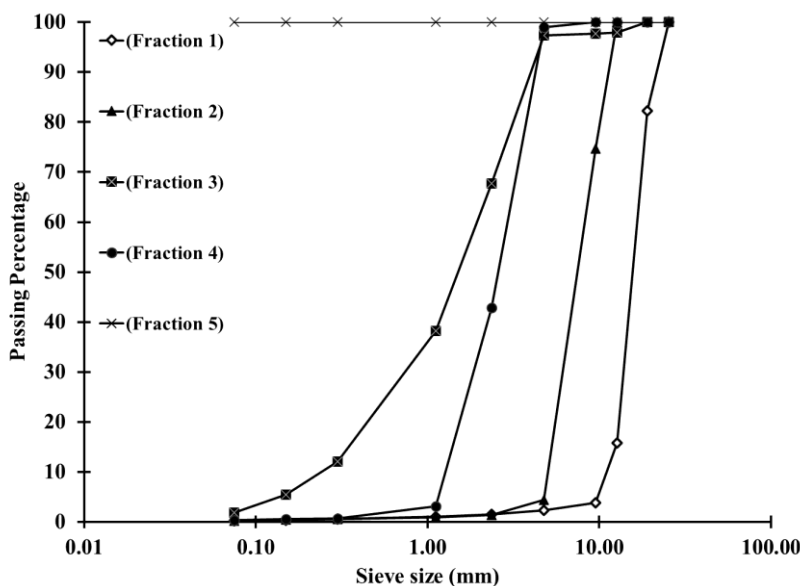
تراشه آسفالتی مورد استفاده در این پژوهش از دپوی کارخانه آسفالت شهرداری تهران واقع در منطقه ۱۸ تهیه شده است. شکل (۲) منحنی دانه‌بندی تراشه آسفالتی را تهیه شده نشان داده است. در ابتدا پنج گروه مصالح تفکیک شده شامل: ۱- مانده روی الک ۱/۲ اینچ ۲- رد شده از الک ۱/۲ اینچ و مانده روی الک شماره ۴، ۳- مانده روی الک شماره ۵۰، ۴- مانده روی الک شماره ۱۶ و ۵- رد شده از الک شماره ۲۰۰ (فیلتر) مطابق [19] AASHTO T27 دانه‌بندی و ذخیره شدند.

کیفیت لایه موجود و سایر عوامل، با محدوده مجاز نشریه مطابقت ندارد و میزان درشت‌دانه یا ریزدانه آن کمتر از مقدار مورد نیاز است. از طرفی با توجه به اینکه مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی معمولاً در پروژه‌های با درجه اهمیت کمتر و راه‌های فرعی مورد استفاده قرار می‌گیرند دسترسی به مصالح سنگی بکر و برطرف کردن مشکلات دانه‌بندی موجود امری دشوار و در برخی موارد همراه با تحمیل هزینه‌های زیاد است. پس مسئله اصلی این پژوهش بررسی تأثیر نوع دانه‌بندی و ساختار مصالح سنگی بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی سرد برای تشخیص این مطلب است که در مورد کدامیک از دانه‌بندی‌های خارج از محدوده مجاز می‌توان نگرانی کمتری داشت و در مورد کدامیک از آنها باید بیشترین میزان حساسیت را به کار برد. نتایج این مطالعه می‌تواند به ارائه راهکارهای علمی و کاربردی برای بهبود عملکرد این مخلوط‌ها و توسعه استفاده از روش‌های پایدار در صنعت بازیافت روسازی آسفالتی کمک کند. روند کلی اجرای این پژوهش در شکل (۱) نمایش داده شده است. مطابق این شکل،



شکل ۱. نمودار کلی فرآیند پژوهش

Fig. 1. Overall Research Process Flowchart



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی هر گروه تراشه آسفالتی و مصالح بکر تفکیک شده

Fig. 2. The gradation curve of each fraction of RAP and virgin aggregate

جدول ۱. مشخصات قیرآبه (CSS-1h)

Table 1. Characteristics of the emulsified bitumen (CSS-1h)

Property	Value/Description	Standard Test Method
Saybolt furol viscosity @ 25°C, sec	25.0	ASTM D7496
Storage stability test (24 hr), %	0.05	ASTM D6930
Residue by distillation, %	61.0	ASTM D6997
Penetration on residue @ 25°C, 0.1 mm	105	ASTM D5
Ductility @ 25°C, cm	100	ASTM D113
Particle charge	cationic	ASTM D244

(۲)، پنج طرح دانه‌بندی مختلف بر پایه تیپ ۴ انتخاب شد. مشخصات این طرح‌ها در جداول (۲ و ۳)، منحنی دانه‌بندی آن‌ها در شکل (۳) ارائه شده است. با توجه به بررسی نمونه‌های هر طرح اختلاط، طرح اختلاط P دارای توزیع متعادل ریزدانه و درشت‌دانه است و به عنوان معیار مرجع در نظر گرفته شده است. طرح اختلاط A به دلیل کاهش مقدار فیلر، ظاهری غنی از قیر نسبت به طرح P دارد، در حالی که طرح اختلاط B به علت استفاده از فیلر بیشتر، ظاهری نسبتاً کم‌قیرتر در مقایسه با طرح‌های P و A نشان می‌دهد. طرح اختلاط C به دلیل کاهش درشت‌دانه بیشترین پیوستگی و انسجام ظاهری را در میان تمامی طرح‌ها دارد، و طرح اختلاط D ظاهری پرقیر مشابه طرح A دارد، اما از نظر پیوستگی سطحی وضعیت مناسبی ندارد. به طور کلی تمامی طرح‌های اختلاط به جز طرح اختلاط C از انسجام سطحی مناسبی برخوردار نبودند.

۲-۱-۲- قیرآبه

قیرآبه مورد استفاده باید از منظر سازگاری با کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگدانه‌های مخلوط آسفالتی انتخاب شود. سنگدانه‌های سیلیسی با قیرآبه‌های کاتیونیک سازگارتر هستند. در این مطالعه با توجه به دسترسی آسان به قیرآبه کاتیونیک در ایران و توصیه نشریه ۳۳۹ [20]، قیرآبه کاتیونیک دیرشکن (CSS-1) انتخاب شد که مشخصات آن در جدول (۱) ارائه شده است

۲-۲- روش‌های طرح اختلاط و چگونگی آماده‌سازی نمونه‌ها

در این پژوهش ابتدا تیپ ۶ جدول (۳-۱) نشریه ۳۳۹ برای بررسی اثر دانه‌بندی بر خواص مکانیکی مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی مدنظر بود، اما به دلیل مناسب‌تر بودن دامنه‌های دانه‌بندی تیپ ۴ برای ایجاد نقاط ضعف، این تیپ به عنوان مبنا انتخاب شد. بر همین اساس، با توجه به آزادی بیشتر در شکل‌دهی منحنی‌های دانه‌بندی و نیز محدودیت ریزدانه در مصالح تراشه آسفالتی شکل

جدول ۲. مشخصات طرح اختلاطها
Table 2. Mix design specifications

NO.	Mix design type	Mix Design Code
1	The gradation curve was within the permissible range specified for Type#4 in Code 339	P
2	With the reduction of filler below the permissible range specified in Code 339	A
3	With the increase of filler beyond the permissible range specified in Code 339	B
4	With the reduction of coarse aggregates below the permissible range specified in Code 339	C
5	With the increase of coarse aggregates beyond the permissible range specified in Code 339	D

جدول ۳. مشخصات دانه‌بندی طرح اختلاطها
Table 3. Mix design aggregate gradation specifications

Mix Design Code	Proportion of each fraction (%)				
	P	A	B	C	D
Fraction 1	19	20	30	5	38
Fraction 2	38	40	39	6	44
Fraction 3	38	40	15	45	13
Fraction 4	0	0	0	35	0
Fraction 5	5	0	16	9	5

۲-۳-۳- آزمایش‌ها

۲-۳-۳-۱- آزمایش مقاومت مارشال

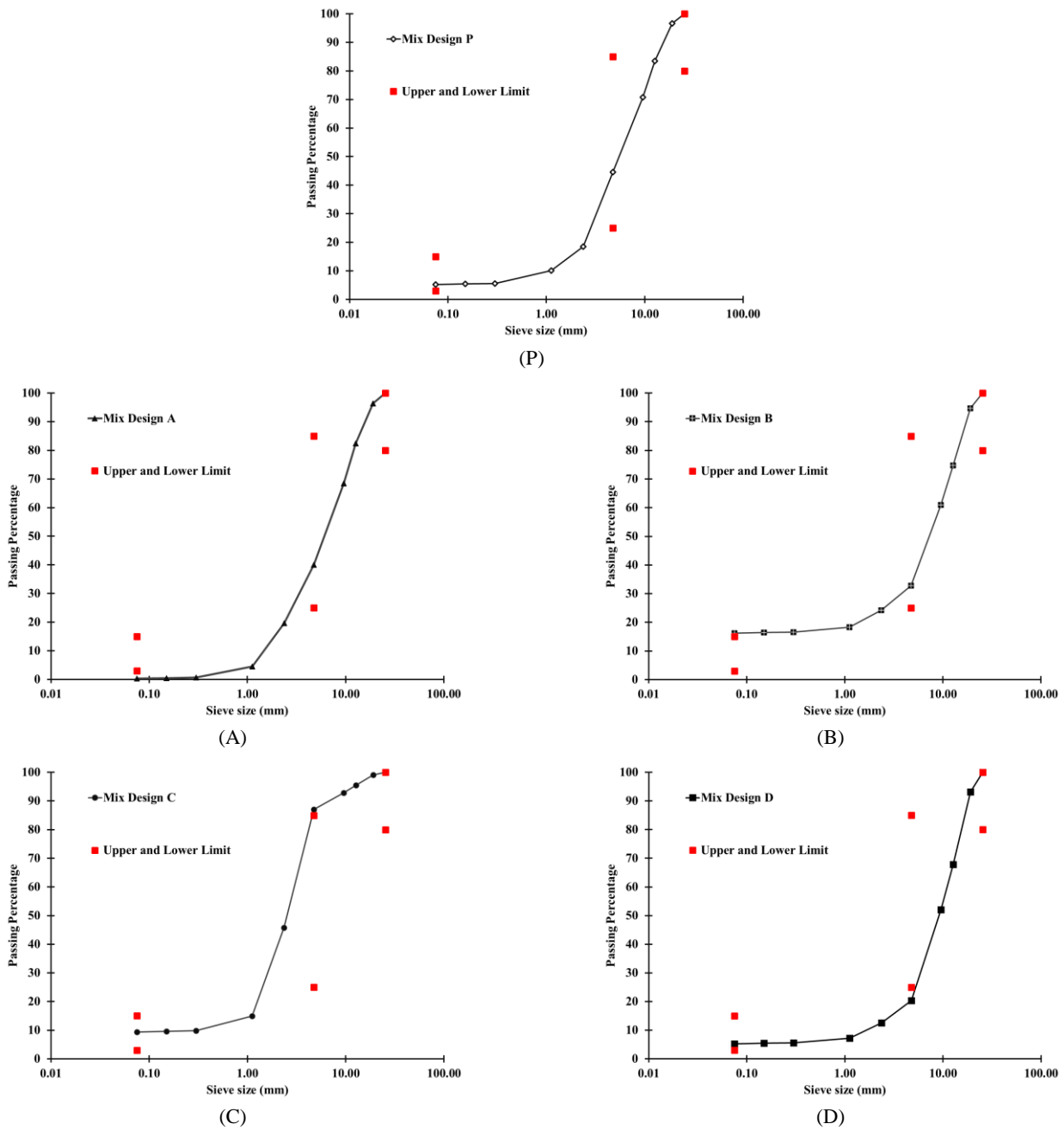
در این پژوهش، به منظور مقایسه پارامترهای مختلف مارشال، آزمایش مقاومت مارشال برای تمامی طرح‌های اختلاط مطابق با استاندارد AASHTO T245 [۲۶] انجام شد. نمونه‌های تهیه‌شده در بخش ۲-۲ پس از طی دوره عمل‌آوری هفت‌روزه در شرایط دمایی محیط آزمایشگاه مورد آزمایش قرار گرفتند. دمایی انجام آزمون مقاومت مارشال نیز بر اساس توصیه‌های مندرج در نشریه ۳۳۹ [۲۰] برابر با ۲۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد؛ به طوری که نمونه‌ها مطابق این نشریه در دمایی ۲۵ درجه سانتی‌گراد و بدون قرار دادن در حمام آب گرم مورد آزمایش قرار گرفتند.

۲-۳-۳-۲- آزمایش حساسیت رطوبتی

پس از تعیین درصد بهینه قیرآبه، به منظور ارزیابی دوام و حساسیت رطوبتی نمونه‌ها، از شاخص نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم بهره گرفته شد. برای این منظور، آزمایش کشش غیرمستقیم طبق استاندارد AASHTO PP86 [27] روی نمونه‌های مارشال هر طرح اختلاط در درصد قیرآبه بهینه انجام گرفت. طبق گزارش FHWA [28]، درصد فضای خالی در مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی در محل، پس از پخش و تراکم، حدود 1 ± 12 درصد است. از این رو، در این پژوهش، مقدار ۱۱/۵ درصد به عنوان درصد فضای خالی معادل شرایط اجرایی برای این نوع مخلوط در نظر گرفته شد.

برای تعیین درصد بهینه قیرآبه، از روش طرح اختلاط مارشال بر اساس دستورالعمل نشریه ۳۳۹ استفاده شد. به این منظور، نمونه‌های مارشال با قطر ۴ اینچ برای هر طرح اختلاط در شرایط دمایی محیط و با رطوبت ثابت ۳ درصد در پنج مقدار مختلف قیرآبه (از ۳/۵ تا ۵/۵ درصد) و با سه تکرار برای هر مقدار ساخته شدند. تعداد ضربات چکش مارشال طبق توصیه نشریه ۳۳۹ و مطالعات پیشین [4, 20-22]، ۵۰ ضربه به هر طرف نمونه در نظر گرفته شد. پس از تراکم نمونه‌ها، آن‌ها به مدت ۶ ساعت در دمایی ۶۰ درجه سانتی‌گراد درون قالب در گرمخانه عمل‌آوری و سپس نمونه‌ها از گرمخانه خارج و به مدت ۲۴ ساعت در دمایی محیط آزمایشگاه درون قالب نگهداری شدند.

از آنجا که درصد جذب آب نمونه‌ها بیشتر از ۲ درصد بود، برای به دست آوردن پارامتر حجمی از جمله وزن مخصوص توده آسفالت (G_{mb}) مطابق استاندارد ASTM D1188 [23] از پارافیلیم استفاده شد. سپس برای محاسبه حداکثر وزن مخصوص تئوریک آسفالت (G_{mm}) و درصد فضای خالی آسفالت به ترتیب از استانداردهای AASHTO T209 [24] و AASHTO T269 [25] استفاده شد. بر اساس نشریه ۳۳۹، میزان مجاز فضای خالی در مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی باید در محدوده ۹ تا ۱۴ درصد قرار گیرد. بنابراین، مقدار ۱۱/۵ درصد که در میانه این بازه قرار دارد، به عنوان مقدار مناسب برای تعیین درصد بهینه قیرآبه انتخاب شده است.



شکل ۳. منحنی دانه‌بندی هر طرح اختلاط

(تصویر P: طرح اختلاط P، تصویر A: طرح اختلاط A، تصویر B: طرح اختلاط B، تصویر C: طرح اختلاط C، تصویر D: طرح اختلاط D)

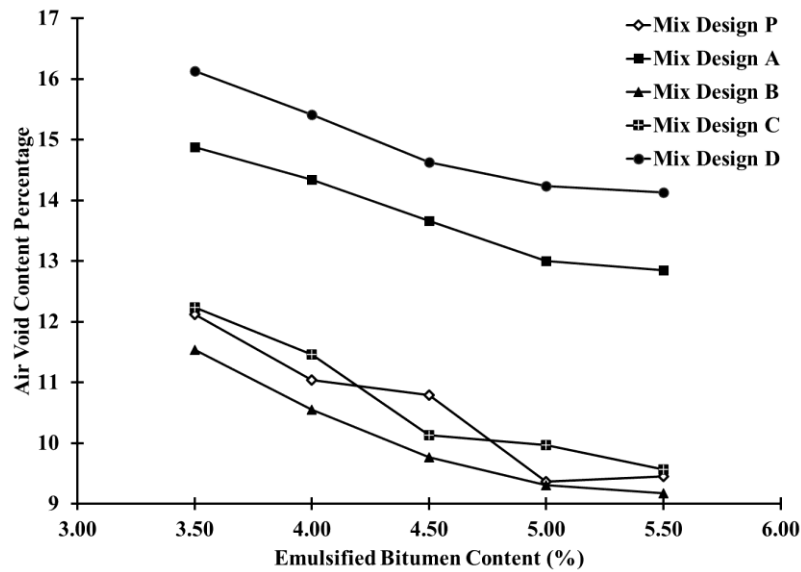
Fig 3. Gradation curve of each mix design

(Figure P: Mix design P; Figure A: Mix design A; Figure B: Mix design B; Figure C: Mix design C; Figure D: Mix design D)

اشباعی در محدوده ۵۵ تا ۷۵ درصد ایجاد شد. سپس نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در ظرف آبی با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. در پایان، آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم روی هر دو گروه نمونه‌های خشک و اشباع انجام شد و مقدار شاخص نسبت مقاومت کششی^۱ (TSR) از نسبت میانگین مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های رطوبتی به میانگین مقاومت نمونه‌های خشک محاسبه شد.

در ادامه، برای هر طرح اختلاط، تعداد ۶ نمونه مارشال ساخته شد؛ به گونه‌ای که ۳ نمونه در شرایط خشک و ۳ نمونه پس از عمل‌آوری در شرایط رطوبتی تحت آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم قرار گرفتند. طبق استاندارد AASHTO PP 86، نمونه‌های خشک پیش از انجام آزمایش، به مدت ۲ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد داخل کیسه‌های مخصوص نگهداری شدند. برای نمونه‌های عمل‌آوری شده در شرایط رطوبتی، ابتدا با استفاده از پمپ خلأ و دسیکاتور درصد

¹ Tensile Strength Ratio



شکل ۴. نتایج درصد فضای خالی هر طرح اختلاط

Fig. 4. Results of the void content for each mix design

جدول ۴. درصد بهینه قیرآبه هر طرح اختلاط

Table 4. Optimum emulsified bitumen content for each mix design

Mix Design Code	Optimum Emulsified Bitumen Content (%)
P	3.82
A	> 5.5
B	3.6
C	3.96
D	> 5.5

شده با قیر^۲ (VFA) شکل (۵) و در نتیجه موجب افزایش درصد بهینه قیرآبه شده است. از آنجا که در این دو طرح اختلاط درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی در مقدار قیرآبه ۵/۵ درصد بیش از ۱۱/۵ درصد است و در این پژوهش میزان قیرآبه به ۵/۵ درصد محدود شده است، بنابراین درصد بهینه قیرآبه برای طرح‌های اختلاط A و D برابر با ۵/۵ درصد در نظر گرفته شد.

۳-۲- نتایج آزمون مارشال و روانی

شکل (۵) مقاومت مارشال و روانی مربوط به طرح‌های اختلاط مختلف را نشان می‌دهد. مطابق استاندارد [29] AASHTO MP31 کمترین مقاومت مارشال برای پذیرش طرح اختلاط ۵/۵۶ کیلونیوتن می‌باشد که با توجه به شکل (۵) تمامی طرح اختلاط‌ها به جز طرح اختلاط A و D در درصد قیرآبه بهینه این مهم را برآورده نموده‌اند.

۳- نتایج و بحث

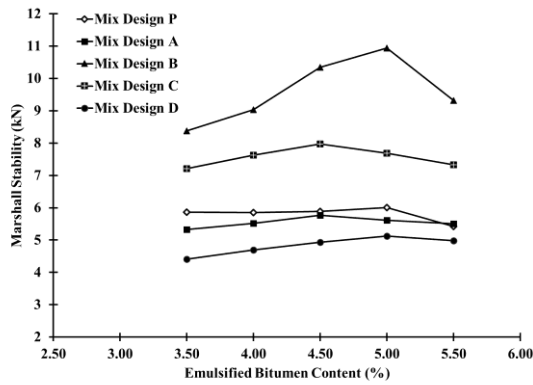
در این بخش ابتدا نتایج حاصل از آزمون استقامت مارشال و سپس نتایج آزمون حساسیت رطوبتی برای تمامی طرح‌های اختلاط ارائه شده است. همچنین میزان تأثیر هر یک از انواع دانه‌بندی بر مشخصات مکانیکی و دوام مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۱- درصد قیرآبه بهینه

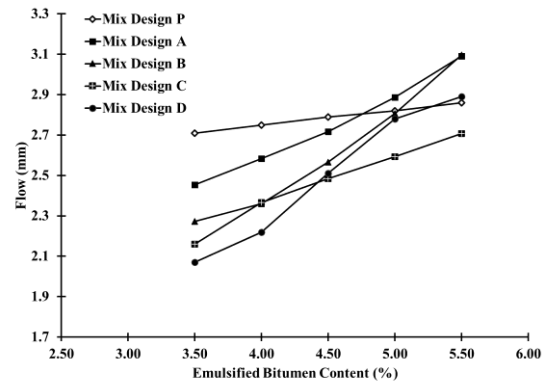
درصد فضای خالی هر طرح اختلاط در مقادیر مختلف قیرآبه در شکل (۴) ارائه شده است. همچنین، درصد بهینه قیرآبه برای هر طرح اختلاط بر اساس معیار درصد هوای معادل ۱۱/۵ درصد در جدول (۴) نشان داده شده است. در دو طرح اختلاط A و D، افزایش درصد فضای خالی مصالح سنگی^۱ (VMA) (شکل ۵) نسبت به سایر طرح‌های اختلاط موجب افزایش فضای خالی پر

² Void Filled Asphalt

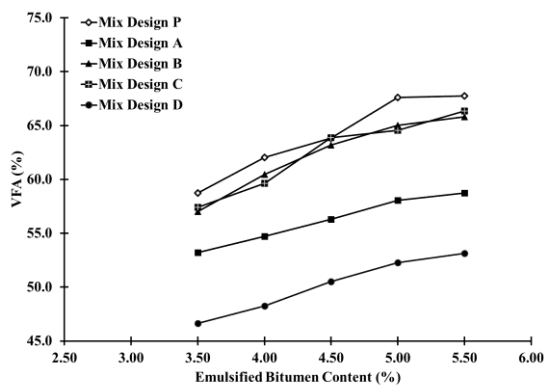
¹ Voids in the Mineral Aggregate



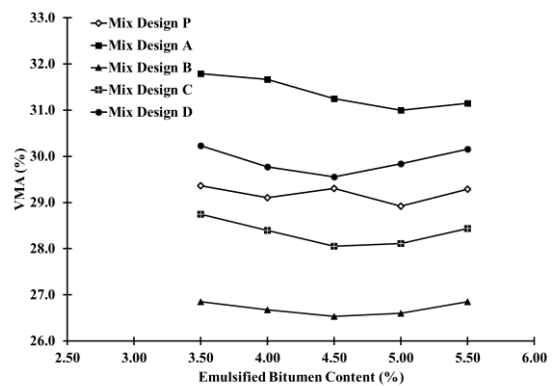
(A)



(B)



(C)



(D)

شکل ۵. نتایج مقاومت مارشال (شکل A)، روانی (شکل B)، VFA (شکل C)، VMA (شکل D) برای هر طرح اختلاط

Fig. 5. The Marshall stability results (Figure A), flow (Figure B), VFA (Figure C), and VMA (Figure D) for each mix design

مطابق شکل (۵) مقدار روانی نیز برای اختلاط A و D بیشترین و طرح‌های اختلاط P, B و C به ترتیب کمترین مقدار روانی در درصد بهینه قیرآبه نشان می‌دهد.

۳-۳- نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی

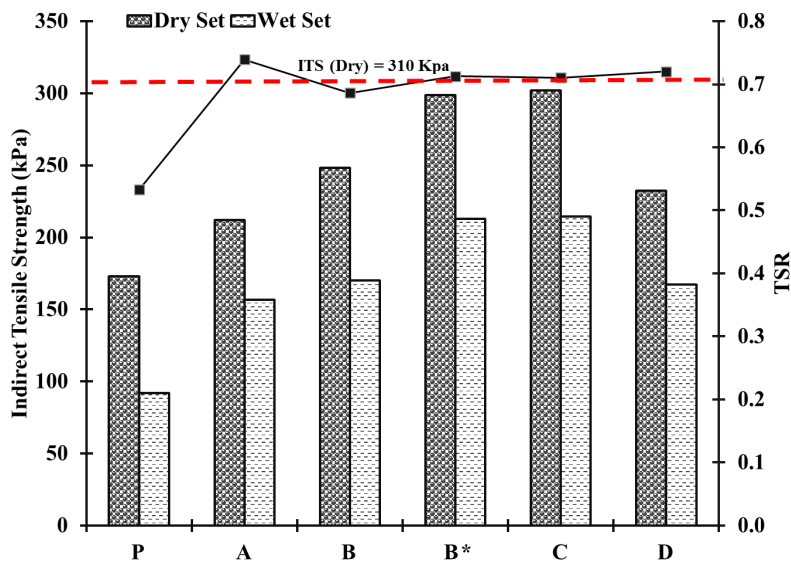
همان‌طور که در شکل (۶) نشان داده شده است، مقاومت کششی غیرمستقیم و TSR تمامی طرح‌های اختلاط در سن ۷ روزه از حد استانداردهای معرفی شده در استاندارد AASHTO MP31 یعنی مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت خشک به میزان ۳۱۰ کیلوپاسکال و حداقل TSR ۷۰ درصد، بسیار پایین‌تر می‌باشد. بنابراین مقاومت ITS نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. شکل (۷) مقادیر مقاومت کششی غیرمستقیم و TSR نمونه‌های هر طرح اختلاط را در سن ۲۸ روزه نشان می‌دهد. بر اساس نتایج به دست آمده، سه طرح اختلاط P, A و D حداقل مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت خشک را تأمین نمی‌کنند؛ با این حال، از نظر پارامتر TSR تنها طرح اختلاط پایه از بین تمامی

در طرح D به دلیل افزایش درشت‌دانه و در طرح A به دلیل کاهش فیلر، پیوستگی مخلوط کاهش یافته و فضای خالی بیشتری نسبت به سایر طرح‌ها ایجاد شده است؛ موضوعی که در نهایت سبب ثبت کمترین مقاومت مارشال در این دو طرح شده است. افزون بر این، در طرح اختلاط D کاهش مقاومت مارشال می‌تواند ناشی از شکل‌گیری یک ساختار اسکلتی نامناسب و کاهش چسبندگی مؤثر میان ذرات درشت‌دانه‌ای باشد که به‌طور کامل با قیر پوشش داده نشده‌اند؛ عاملی که در نهایت موجب افت یکپارچگی میکرومکانیکی مخلوط شده است.

میزان افزایش مقاومت مارشال در طرح‌های اختلاط B و C نسبت به طرح اختلاط پایه (P) در درصد قیرآبه بهینه به ترتیب ۳۰ و ۲۲ درصد و میزان کاهش مقاومت مارشال در طرح‌های اختلاط A و D نسبت به طرح اختلاط P به ترتیب ۷ و ۱۸ درصد می‌باشد. لازم به ذکر است که این روند با یافته‌های مطالعات گذشته [17, 18] نیز همخوانی دارد؛ به گونه‌ای با افزایش سهم ریزدانه‌ها موجب افزایش مقاومت مارشال در مخلوط‌های آسفالتی می‌شود.

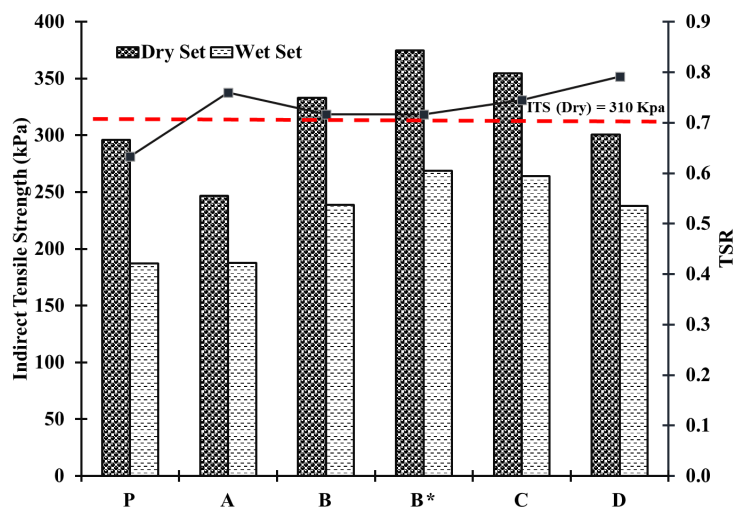
باشد، حساسیت رطوبتی مخلوط کاهش می‌یابد. میزان افزایش مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم در طرح‌های اختلاط B, C, D نسبت به طرح اختلاط پایه به ترتیب ۱۱، ۱۶ و ۱/۵ درصد و میزان کاهش ITS در طرح اختلاط A نسبت به طرح اختلاط P ۲۰ درصد می‌باشد که این پدیده می‌تواند ناشی از کاهش قابل توجه سطح ویژه مؤثر برای تشکیل فیلم قیر و در پی آن تضعیف ساختار چسبنده میان ذرات در طرح اختلاط A باشد.

طرح‌های اختلاط موفق به برآورده‌سازی این معیار نمی‌شود. مطابق نتایج ارائه شده در شکل‌های (۶ و ۷)، طرح اختلاط پایه در هیچ‌یک از دو زمان عمل‌آوری، دوام رطوبتی قابل قبولی ندارد که این امر بیانگر ضرورت اصلاح ساختار دانه‌بندی با استفاده از افزودنی‌های مناسب می‌باشد. در طرح‌های اختلاط B و C نتایج به دست آمده با یافته‌های مطالعات پیشین [18, 16, 1] مشابه بود؛ به طوری که مشاهده شد هرچه منحنی دانه‌بندی پیوسته‌تر و متمایل به ریزدانه



شکل ۶. نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم در مدت زمان عمل‌آوری ۷ روز

Fig. 6. Indirect tensile strength test results at 7 days of curing



شکل ۷. نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم در مدت زمان عمل‌آوری ۲۸ روز

Fig. 7. Indirect tensile strength test results at 28 days of curing

آسفالتی سرد بازیافتی نسبت به حدود مجاز نشریه ۳۳۹ موجب کاهش مقاومت مارشال و دوام رطوبتی می‌باشد.

- با توجه به ضعف مشاهده شده در دوام رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی، ضرورت بازنگری در نشریه ۳۳۹ برای طراحی این مخلوط‌های آسفالتی بر اساس طرح مخلوط معادل^۱، به جای طراحی مبتنی بر حجم^۲، مطرح می‌شود.

- طرح اختلاط‌ها به ترتیب کیفیت عملکرد به شرح ذیل می‌باشد:
 - ۱- طرح اختلاط B (فیلر بیش از حد مجاز): این طرح دارای مقاومت مارشال و مقاومت کششی غیرمستقیم بالا و عملکرد مکانیکی مطلوب (پس از اصلاح) است و با وجود داشتن فضای خالی مناسب، از نظر ظاهری با مشکلاتی همراه است.

- ۲- طرح اختلاط C (درشت‌دانه کمتر از حد مجاز): این طرح با عملکرد مکانیکی و ظاهر مطلوب و همچنین فضای خالی مناسب، تنها با اختلاف اندکی نسبت به طرح B همراه است.

- ۳- طرح اختلاط P (در محدوده مجاز درشت و ریزدانه): این طرح دارای مقاومت مارشال و فضای خالی مناسب است، اما حساسیت رطوبتی آن کمتر از مقادیر استاندارد می‌باشد.

- ۴- طرح اختلاط A و D (به ترتیب فیلر و درشت‌دانه بیش از حد مجاز): این دو طرح اختلاط در مقایسه با طرح اختلاط پایه، از مقاومت مکانیکی ضعیف‌تری برخوردار بوده و نتوانسته‌اند لزوم حداقلی استاندارد را برآورده نمایند.

۵-۵- پیشنهاد مطالعات آتی

- با توجه به افزایش قابل توجه مقاومت مارشال در طرح اختلاط B، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی سازوکارهای میکروسکوپی این بهبود بررسی شود؛ به‌ویژه تفکیک نقش پرکنندگی و افزایش دانسیته از آثار احتمالی تغییر در مورفولوژی و توزیع قیرآبه.

- با توجه به مقادیر پایین TSR در سن ۷ روز، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده منشأ دقیق حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها با استفاده از تجزیه و تحلیل تکمیلی مانند SEM بررسی شود تا روشن شود شکست رطوبتی ناشی از جدایش قیر-سنگدانه

افزایش ۱۶ درصدی مقاومت کششی غیرمستقیم در طرح اختلاط C با مبانی تئوریک مرتبط با ایجاد ساختاری ریزدانه‌تر و پیوسته‌تر هم‌خوانی دارد. چنین ساختاری می‌تواند با فراهم‌سازی توزیع یکنواخت‌تر تنش‌های کششی در سراسر مخلوط، از تمرکز تنش در نقاط خاص جلوگیری کرده و در نتیجه به بهبود عملکرد کششی مخلوط منجر شود. در طرح اختلاط B با وجود اینکه این طرح اختلاط در مدت زمان عمل‌آوری ۲۸ روز توانسته حداقل‌های آیین‌نامه را برآورده سازد اما از نظر ظاهری مخلوط دارای کیفیت نامناسب بوده و بر اساس قضاوت مهندسی قابل استفاده نیست. کیفیت ظاهری نامطلوب ممکن است ناشی از درصد بالای فیلر در این طرح اختلاط باشد که موجب تضعیف ساختار و کاهش انسجام مخلوط شده است. از آنجایی که درصد قیرآبه بهینه این طرح اختلاط ۳/۶ درصد تعیین شده است. به‌منظور اطمینان از عملکرد طرح اختلاط، آزمایش حساسیت رطوبتی برای طرح B* نیز در آخرین درصد قیرآبه مصرفی (۵/۵ درصد) انجام شد. نتایج نشانگر آن است که با افزایش درصد قیرآبه مصرفی در طرح اختلاط B* علاوه بر برآورده نمودن حداقل‌های استاندارد AASHTO MP31، موجب بیشترین افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم در بین طرح‌های اختلاط نسبت به طرح اختلاط پایه به میزان ۲۱ درصد شده است که نشان دهنده تأثیر مثبت افزایش درصد قیرآبه در کنار نوع دانه‌بندی بر دوام رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به منظور بررسی تأثیر نوع دانه‌بندی بر خواص مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی سرد بازیافتی، پنج طرح اختلاط مختلف مورد بررسی قرار گرفت که در هر طرح، دانه‌بندی نسبت به حدود مجاز نشریه ۳۳۹ تغییر داده شد و نقصی در آن ایجاد شد. ارزیابی‌ها و آزمایش‌های انجام شده شامل آزمون مقاومت مارشال پس از ۷ روز عمل‌آوری و آزمون کششی غیرمستقیم در سنین ۷ و ۲۸ روز بود. مهم‌ترین نتایج به دست آمده از این تحقیق به شرح زیر ارائه می‌شود:

- مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی بدون استفاده از افزودنی و اصلاح دانه‌بندی دوام رطوبتی مناسبی ندارد.
- کاهش فیلر و افزایش درشت‌دانه و درصد فضای خالی مخلوط

¹ Balance Mix Design

² Volumetric Mix Design

قدردانی می‌کنند.

تعارض منافع

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تعارض منافی در ارتباط با انجام این پژوهش وجود ندارد.

سهم نویسندگان

در این پژوهش تهیه مصالح، انجام آزمون‌های آزمایشگاهی، تحلیل نتایج و نگارش مقاله بر عهده علی سرابندی و عبدالحمید بیژن و روش‌شناسی، نظارت بر تحلیل نتایج، مرور، بازبینی و ارزیابی کیفیت مقاله توسط پوریا حاجی‌کریمی و فریدون مقدس-نژاد انجام شده است.

منابع مالی

در نگارش این مقاله از منابع مالی هیچ سازمانی استفاده نشده است.

است یا تضعیف پیوندهای داخلی.

- پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی آزمون‌های رئولوژی قیر بازیافتی انجام شود تا از عدم بروز رفتار شکننده در مخلوط در این درصدهای بالای قیرآبه اطمینان به دست آید.
- بررسی اثر همزمان تغییرات دانه‌بندی و قیرآبه حاوی افزودنی پلیمری بر رفتار ویسکوالاستیک و مقاومت به خستگی مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی.
- تدوین و بررسی شاخص‌های کمی برای ارزیابی کیفیت ظاهری و رابطه میان ویژگی‌های سطحی و خواص مکانیکی مخلوط آسفالتی سرد بازیافتی.
- مطالعه پدیده اختلاط و سازگاری شیمیایی میان قیر بکر حاصل از شکست امولسیون و قیر پیرشده موجود در تراشه آسفالتی.

قدردانی نویسندگان

نویسندگان از «سازمان مهندسی و عمران شهرداری تهران» به دلیل در اختیار قرار دادن تراشه آسفالتی جهت انجام آزمایش‌ها

Engineering, 55(3), pp.583–602.

References

- [1] Zhu, C., Zhang, H., Guo, C., Wu, C. and Wei, C., 2019. Effect of gradations on the final and long-term performance of asphalt emulsion cold recycled mixture. *Journal of Cleaner Production*, 217, pp.95–104.
- [2] 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. *Journal of Cleaner Production*, 370, p.133530.
- [3] Han, Z., Ong, G.P., Li, M., Luan, L. and Sun, L., 2025. An innovative stage mixing approach for emulsified asphalt cold recycled mixtures. *Construction and Building Materials*, 494, p.143431.
- [4] 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), pp.1–33.
- [5] Sabouri, M. and Haji Seyed-Nasir, M.H., 2024. An investigation of the effect of rainfall events on the curing period of cold in-situ recycled emulsified asphalt mixtures (CIR). In: *14th National Civil Engineering Congress*. Zanjan, Iran, 2024.
- [6] Sabouri, M. and Sadeghi, M., 2023. Investigation on properties of cold recycled asphalt mixtures reinforced with polypropylene fibers. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 55(3), pp.583–602.
- [7] Seyed Sadegh, N. and Mohammad Reza, N.G., 2024. Investigating the effect of nanoclay on the mechanical properties of asphalt cold recycling using bitumen emulsions. *Advanced Modeling in Civil Engineering*, 1(2), pp.33–46.
- [8] Nagavi, H.K., Zehni, A., Shamsi, M.A., Abdal, M., Tabar, M. and Nasrollah, A., 2023. Design and Construction of the Cold Recycled Asphalt Layer on Runway 29L Pavement at Mehrabad International Airport. In: *The 15th Bitumen, Asphalt & Machinery Conference & Exhibition*. Tehran, Iran.
- [9] Xiao, F., Yao, S., Wang, J., Li, X. and Amir Khanian, S., 2018. A literature review on cold recycling technology of asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 180, pp.579–604.
- [10] Ziari, H., Tavakoli, H. and Zalnejad, M., 2024. Structural characteristics of cold recycled asphalt mixtures: Microstructure identification. *Civilica*. Available at: <https://civilica.com/doc/2060179>.
- [11] Yan, J., Zhu, H., Zhang, Z., Gao, L. and Charmot, S., 2014. The theoretical analysis of the RAP aged asphalt influence on the performance of asphalt emulsion cold recycled mixes. *Construction and Building Materials*, 71, pp.444–450.
- [12] Al-Qadi, I.L., Elseifi, M. and Carpenter, S.H., 2007. *Reclaimed asphalt pavement—a literature review*. (No. FHWA-ICT-07-001). Illinois Center for Transportation.

- [13] Yan, J., Zhang, Z., Charmot, S., Ding, W. and Li, F., 2015. Investigation and prediction model for the dynamic modulus of asphalt emulsion cold recycled mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(1), p.04014113.
- [14] Kuchiishi, A.K., Vasconcelos, K. and Bariani Bernucci, L.L., 2021. Effect of mixture composition on the mechanical behaviour of cold recycled asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, 22(8), pp.984–994.
- [15] Lei, D., Han, Z., Liu, L., Sun, L. and Li, M., 2025. Grading Optimization of Cold Recycled Mixtures Based on Low-temperature Performance. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 40(5), pp.1187–1197.
- [16] Li, Z. et al., 2022. Effect of fine aggregate gradation on macro and micro properties of cold recycling mixture using emulsified asphalt. *Coatings*, 12(5), p.674.
- [17] Zhu, C., Zhang, H., Huang, L. and Wei, C., 2019. Long-term performance and microstructure of asphalt emulsion cold recycled mixture with different gradations. *Journal of Cleaner Production*, 215, pp.944–951.
- [18] Xu, O., Wang, Z. and Wang, R., 2017. Effects of aggregate gradations and binder contents on engineering properties of cement emulsified asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 135, pp.632–640.
- [19] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2014. *Standard Method of Test for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates (AASHTO T27)*. Washington, D.C.: AASHTO.
- [20] Ministry of Roads and Transportation of Iran (MRTI), 2006. *Cold mix recycling, general technical specifications (Code 339)*. Tehran: Deputy of Education.
- [21] Niazi, Y. and Jalili, M., 2009. Effect of Portland cement and lime additives on properties of cold in-place recycled mixtures with asphalt emulsion. *Construction and Building Materials*, 23(3), pp.1338–1343.
- [22] Behnood, A., Gharehveran, M.M., Asl, F.G. and Ameri, M., 2015. Effects of copper slag and recycled concrete aggregate on the properties of CIR mixes with bitumen emulsion, rice husk ash, Portland cement and fly ash. *Construction and Building Materials*, 96, pp.172–180.
- [23] American Society for Testing and Materials (ASTM), 2002. *Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Compacted Bituminous Mixtures Using Coated Samples (ASTM D1188)*. West Conshohocken: ASTM.
- [24] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2020. *Standard Method of Test for Theoretical Maximum Specific Gravity (Gmm) and Density of Asphalt Mixtures (AASHTO T209)*. Washington, D.C.: AASHTO.
- [25] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2018. *Standard Method of Test for Percent Air Voids in Compacted Dense and Open Asphalt Mixtures (AASHTO T269)*. Washington, D.C.: AASHTO.
- [26] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2013. *Resistance to Plastic Flow of Asphalt Mixtures Using Marshall Apparatus (AASHTO T245)*. Washington, D.C.: AASHTO.
- [27] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2018. *Standard Method of Test for Emulsified Asphalt Content of Cold Recycled Mixture Designs (AASHTO PP86)*. Washington, D.C.: AASHTO.
- [28] Cross, S.A. and Jakatimath, Y., 2007. *Evaluation of cold in-place recycling for rehabilitation of transverse cracking on US 412*. Stillwater: Oklahoma State University.
- [29] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2022. *Standard Specification for Materials Used in Cold Recycled Mixtures with Emulsified Asphalt (AASHTO MP31)*. Washington, D.C.: AASHTO.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Bezhan, A.H., Hajikarimi, P., Moghadas Nejad, F. and Sarabandi, A., 2026. Evaluation of the Effect of Deviation from Permissible Grading Curve Limits on Mechanical Properties and Moisture Susceptibility of Cold Recycled Asphalt Mixture. *Modares Civil Engineering journal*, 26(3), pp.83-96.

