Semnan University

Journal of Transportation Infrastructure Engineering

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

ISSN: 2821-0549

Research Article

Feasibility of Producing Fully Recycled Asphalt with RAP and Oil Sludge at Half-Warm and Cold Temperatures for Pavement Maintenance and Rehabilitation

Ramak Hamidiju [a], Alireza Sarkar [b*], Armin Esmail Zaghi [C]

[a] PhD Candidate in Civil Engineering (Road and Transportation), Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, I. R. Iran.
[b] Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, I. R. Iran.
[c] Department of Materials Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:
Received: 2026-08-06
Revised: 2026-08-31
Accepted: 2026-08-31

Keywords:
Oil sludge,
RAP,
Half warm-mix asphalt,
Cold-mix asphalt.

ABSTRACT

Despite the substantial benefits of pavement recycling, maximizing the use of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) and the safe management of oil sludge (as a hazardous industrial waste) remain fundamental challenges in road, petroleum, and environmental engineering. While most studies have focused on limited RAP percentages and the use of commercial rejuvenators, this research was conducted with the aim of technically and economically evaluating the feasibility of producing fully recycled asphalt mixtures (100% airport RAP) using refinery oil sludge as a rejuvenating and softening agent, under two temperature regimes: half-warm (70°C and 100°C) and cold (25°C and 50°C). The laboratory evaluation included determination of volumetric properties, Marshall stability and flow, air void content, moisture susceptibility, and Indirect Tensile Strength (ITS). The results showed that increasing the mixing and compaction temperature to the half-warm range, through thermal activation of the aged RAP binder and more effective dispersion of the oil sludge, significantly improved the mechanical performance and compactability of the mixtures. At a compaction temperature of 100°C and an optimum oil sludge content of 3%, Marshall stability reached 1027 kg and indirect tensile strength reached 728 kPa. In contrast, at 25°C, the mixture exhibited lower mechanical strength, likely requiring gradual ambient-temperature curing. Furthermore, economic analysis indicated that producing this mixture using a mobile in-

* Corresponding author.
E-mail address; sarkar@iau.ac.irsarkar

How to cite this article: Hamidiju, R., Sarkar, A., and Esmail Zaghi, A. (2026). Feasibility of producing fully recycled asphalt with RAP and oil sludge at half-warm and cold temperatures for pavement maintenance and rehabilitation. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering, 12(2), pp.143-169.*

DOI: https://doi.org/10.22075/jtie.2026.42227.1781

place recycling unit, by eliminating the cost of new material supply and reducing haul distance, reduces patching costs by approximately 60% and 78% compared to hot-mix and cold-mix asphalt, respectively. The findings of this study indicate that, from a volumetric and mechanical strength standpoint, the proposed mixture has the necessary potential for patching, maintenance, and rehabilitation operations on roads with light to moderate traffic levels (less than 3×10^6 Equivalent Single Axle Loads); however, final confirmation of performance under real-world conditions requires functional (performance-based) and field tests.

© 2026 The Author(s). Journal of Transportation Infrastructure Engineering published by Semnan University Press.
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

مجله زیرساخت های حمل و نقل

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

شاپا: 2821-0549

مقاله پژوهشی

امکان سنجی ساخت آسفالت کاملاً بازیافتی با تراشه و لجن نفتی در دمای نیمه‌گرم و سرد برای نگهداری و بهسازی معابر

رامک حمیدی‌جو[۱]، علیرضا سرکار[۲•]، آرمین اسماعیل زاغی[۳]

[۱] دانشجوی دکتری مهندسی عمران (راه و ترابری)، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

[۲] گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

[۳] گروه مهندسی مواد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۵/۰۵/۱۵

بازنگری مقاله: ۱۴۰۵/۰۶/۰۹

پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۶/۰۹

واژه‌های کلیدی:

لجن نفتی،

تراشه آسفالتی،

آسفالت نیمه‌گرم،

آسفالت سرد.

چکیده

با وجود مزایای فراوان بازیافت روسازی، استفاده حداکثری از تراشه آسفالتی (RAP) و مدیریت ایمن لجن نفتی (به عنوان یک پسماند صنعتی خطرناک) همچنان از چالش‌های اساسی مهندسی راه، نفت و محیط‌زیست است. در حالی که بیشتر مطالعات بر درصدهای محدود (RAP) و استفاده از جوان‌سازهای تجاری متمرکز هستند. این پژوهش با هدف ارزیابی فنی و اقتصادی امکان ساخت مخلوط‌های آسفالتی کاملاً بازیافتی (۱۰۰ درصد RAP فرودگاهی) با استفاده از لجن نفتی پالایشگاهی به عنوان جوان‌ساز و روان‌ساز، در دو رژیم دمایی نیمه‌گرم (۷۰ و ۱۰۰ درجه سلسیوس) و سرد (۲۵ و ۵۰ درجه سلسیوس) انجام شده است. ارزیابی آزمایشگاهی شامل تعیین مشخصات حجمی، استقامت و روانی مارشال، درصد فضای خالی، حساسیت رطوبتی و مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) انجام پذیرفت. نتایج نشان داد که افزایش دمای اختلاط و تراکم به بازه نیمه‌گرم، از طریق فعال‌سازی حرارتی قیر پیرشده (RAP) و پخش مؤثرتر لجن نفتی، عملکرد مکانیکی و

• پست الکترونیک نویسنده مسئول: sarkar@iau.ac.irsarkar_

استناد به این مقاله: حمیدی‌جو، رامک.، سرکار، علیرضا. و اسماعیل زاغی، آرمین. (۱۴۰۵). امکان‌سنجی ساخت آسفالت کاملاً بازیافتی با تراشه و لجن نفتی در دمای نیمه‌گرم و سرد برای نگهداری و بهسازی معابر. *مهندسی زیر ساخت‌های حمل و نقل*، ۱۲ (۲)، ۱۴۳-۱۶۹.

DOI: https://doi.org/10.22075/jtie.2026.42227.1781

تراکم‌پذیری را به طور چشمگیری ارتقا می‌دهد؛ به‌طوری که در دمای تراکم ۱۰۰ درجه سلسیوس و ۳ درصد لجن نفتی بهینه، استقامت مارشال به ۱۰۲۷ کیلوگرم و مقاومت کششی غیرمستقیم به ۷۲۸ کیلوپاسکال رسید. در مقابل، در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، مخلوط مقاومت مکانیکی پایین‌تری نشان داد که احتمالاً به عمل‌آوری تدریجی در دمای محیط نیاز دارد. همچنین، تحلیل اقتصادی نشان داد که تولید این مخلوط با واحد سیار بازیافت در محل، به دلیل حذف هزینه تأمین مصالح جدید و کاهش مسافت حمل، هزینه لکه‌گیری را در مقایسه با آسفالت گرم و سرد به ترتیب حدود ۶۰ و ۷۸ درصد کاهش می‌دهد. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که مخلوط پیشنهادی از منظر حجمی و مقاومت مکانیکی پتانسیل لازم برای عملیات لکه‌گیری، نگهداری و بهسازی معابر با ترافیک سبک تا متوسط کمتر از 3×10^6 محور استاندارد هم‌ارز را داراست. با این حال، تأیید نهایی عملکرد در شرایط واقعی مستلزم آزمون‌های عملکردی و میدانی است

۱. مقدمه

لجن نفتی معمولاً در فرآیندهای پالایش نفت خام و ذخیره‌سازی نفت تولید می‌شود. در تحقیقات صورت گرفته روی لجن نفتی-پترولیومی که بیشتر در مراحل استخراج و تولید نفت خام ایجاد می‌شود، با افزایش درصد لجن نفتی و لجن پترولیومی به قیر، میزان درجه نفوذ بیشتر و مقدار نقطه نرمی کاهش می‌یابد. همچنین، با افزودن لجن نفتی-پترولیومی مقاومت آن در برابر خستگی افزایش و در درصدهای بالاتر کاهش عملکرد در برابر شیارافتادگی ایجاد می‌شود (الشوربجی و همکاران، ۲۰۱۹؛ ممون و همکاران، ۲۰۲٤). تحقیقات انجام گرفته روی لجن نفتی نشان می‌دهد که می‌توان از آن به عنوان جوان‌کننده در آسفالت‌های داغ و گرم استفاده نمود و لجن نفتی را بیش از یک عامل نرم‌کننده صرف می‌دانند. این ماده به عنوان یک جوان‌کننده ساختاری عمل می‌کند و قادر است تا حدی روند پیری را از طریق بازیابی چندگانه، خواص شیمیایی، فیزیکی و رئولوژیکی معکوس کند. همچنین، از نظر فنی، لجن نفتی یک جایگزین پایدار و مؤثر برای جوان‌سازهای مرسوم است (آیتکالیوا و همکاران، ۲۰۲۵). انتظار می‌رود هنوز هم مقدار کل لجن نفتی تولید شده، در نتیجه‌ی تقاضای رو به رشد محصولات نفتی پالایش شده در سراسر جهان، در حال افزایش باشد که استفاده از آن در ساخت آسفالت بازیافتی سرد و نیمه‌گرم می‌تواند تحولی در این راستا باشد و پیش‌بینی می‌شود نتایج این تحقیق در عمر طراحی روسازی و با لحاظ نمودن هزینه‌های طراحی، ساخت و نگهداری، موجب کاهش هزینه‌ها گردد.

۲. آسفالت کاملاً بازیافتی با تراشه و لجن نفتی

۲-۱. لجن نفتی

لجن نفتی ماده‌ای غلیظ و چسبناک است که مخلوطی از هیدروکربن‌های نفتی سنگین، ذرات جامد و آب می‌باشد. یکی از مشکلات موجود در تمامی صنایع نفتی، شامل پالایشگاه، پتروشیمی، مراکز استخراج، نگهداری، پخش و حمل، تشکیل لجن‌های نفتی می‌باشد (هیث و همکاران، ۲۰۰٤). این لجن‌ها علاوه بر کاهش ظرفیت و ایجاد خوردگی در مخازن ذخیره، خطرات زیست‌محیطی ناشی از آلودگی آب و خاک را نیز به دنبال خواهند داشت (نوروزی و همکاران، ۲۰۲۲). در تولید و ساخت آسفالت داغ و گرم با تراشه آسفالتی می‌توان از لجن نفتی به عنوان جوان‌ساز و نرم‌کننده استفاده کرد. در این روش، تراشه آسفالتی و لجن نفتی مخلوط شده و با کنترل دمای فرآیند، از کاهش کیفیت قیر و آلایندگی در محیط‌زیست جلوگیری می‌شود (دالهات و همکاران، ۲۰۲۲). مزایای استفاده از تراشه آسفالتی و لجن نفتی در آسفالت، افزایش مقاومت آسفالت در برابر ترک‌های حرارتی و بارگذاری سنگین، کاهش مصرف قیر و مصالح سنگی و هزینه‌های تولید، افزایش پایداری محیطی و کاهش ضایعات صنعتی است.

۲-۲. تراشه آسفالتی و جوان‌ساز

با افزایش قیمت قیر و توجه بیشتر به محیط‌زیست، استفاده از تراشه آسفالتی ضرورت بیشتری می‌یابد. تراشه‌های آسفالتی بازیافتی شامل مصالح روسازی‌های قدیمی هستند که در تولید مخلوط‌های جدید مورد استفاده قرار می‌گیرند. میزان تولید RAP بسیار بیشتر از حجمی است که در کاربردهای روسازی استفاده می‌شود. اما مهمترین مشکلی که در استفاده از مصالح تراشه آسفالتی ایجاد می‌شود وجود قیر سخت و شکننده در این مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد. معمولاً این قیر پس از بازیافت آسفالت مجدداً ترک خورده و باعث بروز مشکلاتی می‌شود (زاومانیس و همکاران، ۲۰۱٤؛ زیاری و منیری، ۲۰۱۸) و این آسفالت‌ها نیاز به جوان‌کننده دارند. جوان‌کننده هر ماده‌ای است که بتواند به طور ایمن و اقتصادی قیر آسفالت قدیمی را در تراشه آسفالتی احیا کند. انواع مختلفی از جوان‌کننده‌ها به صورت تجاری در

دسترس هستند. جوان‌سازها می‌توانند ریشه گیاهی و یا ریشه نفتی داشته باشند. این جوان‌کننده‌های تجاری عمدتاً شامل اجزای روغنی هستند که از صنعت نفت خام، محصول یا محصول جانبی روغن کراکینگ، روغن معدنی، روغن زیستی و غیره به دست می‌آیند. یکی از این مواد، لجن نفتی است (دالهات و همکاران، ۲۰۲۲). دسته‌ای ازجوان‌کننده‌ها از مشتقات نفتی تشکیل شده‌اند که برای اصلاح کندروانی و یا درجه نفوذ قیر موجود در مصالح روسازی مصرف می‌شوند. این مواد ضمن آن که خواص قیر را دارند می‌توانند به جای قیر اضافی مورد نیاز نیز عمل کنند. عامل اصلی در انتخاب نوع جوان‌کننده‌ها خصوصیات کندروانی و یا درجه نفوذ قیر سخت شده موجود و کیفیت قیر حاصل از اختلاط قیر سخت شده با این ترکیبات است. اختلاط ناقص جوان-ساز با قیر تراشه آسفالتی در دماهای مختلف، قیری با ساختار پیچیده و خواص غیر قابل پیش‌بینی ایجاد می‌کند که بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی تأثیرگذار است. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از ۲۰ تا ۳۰ درصد تراشه آسفالتی در آسفالت گرم، باعث افزایش دوام روسازی و کاهش هزینه‌های نگهداری شده است (ژو و کارکی، ۲۰۱۹). طبق گزارش انجمن روسازی آسفالت اروپا (EAPA)، با وجود در دسترس بودن فراوان تراشه آسفالتی در سراسر جهان، تنها ٤٧ درصد از تراشه موجود در کاربردهای مختلف در روسازی راه‌های ۱۹ کشور توسعه یافته استفاده شده است.

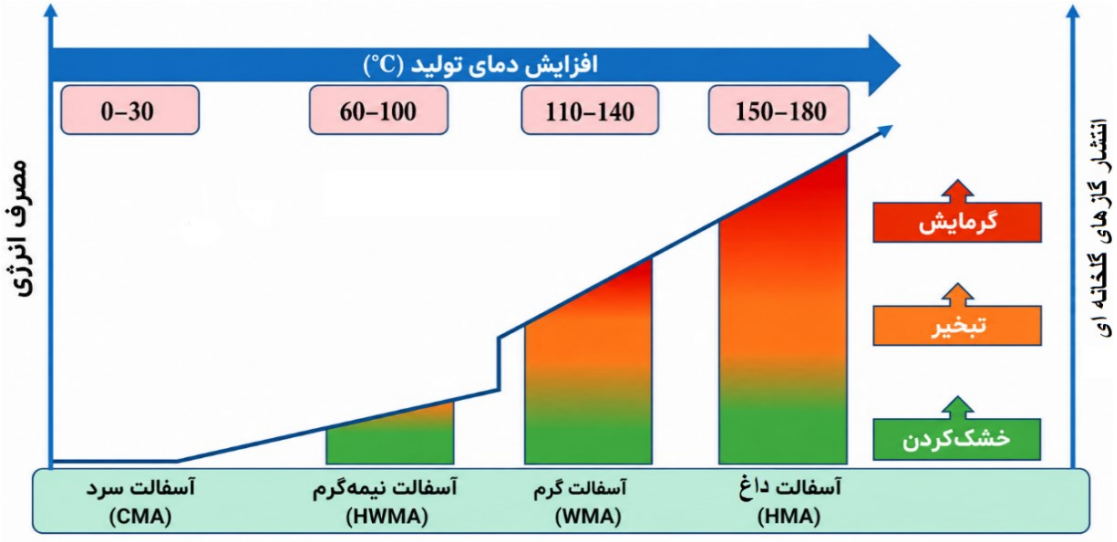
۲-۳. آسفالت بازیافتی سرد و نیمه‌گرم

آسفالت سرد از اختلاط قیر امولسیونی یا محلول با مصالح سنگی است که در دماهای پایین‌تر از مخلوط‌های آسفالت گرم معمول مخلوط و پخش می‌گردد. مخلوط-های سرد با انرژی کمتری تولید می‌شوند و آلودگی کمتری نسبت به مخلوط‌های گرم تولید می‌نمایند. ممکن است اگر سازه روسازی مناسب طراحی شود مخلوط‌های آسفالت سرد برای لایه‌های رویه، اساس، یا زیر اساس استفاده گردند. لایه‌های رویه آسفالت سرد برای ترافیک-های سبک و متوسط مناسب هستند. برای انطباق با الزامات ترافیکی، معمولاً یک لایه پوششی از نوع دیگر از قبیل یک آسفالت حفاظتی یا یک لایه نازک مخلوط آسفالت گرم را نیاز دارند. آسفالت‌های سرد زمانی که در اساس یا زیراساس استفاده شوند می‌توانند برای تمام انواع ترافیک مناسب باشند (انستیتو آسفالت، ۲۰۱٤).

دمای اجرای آسفالت نیمه‌گرم (HWMA) معمولاً بین ٦۰ تا ۱۰۰ درجه سلسیوس است، که باعث کاهش مصرف سوخت و بهبود شرایط زیست‌محیطی می‌شود. ویژگی‌های مهم آسفالت نیمه‌گرم، کاهش مصرف انرژی در تولید و اجرا، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و بهبود چسبندگی بین مصالح آسفالتی است. با افزایش نیاز به راهکارهای پایدار در روسازی‌ها، فناوری آسفالت نیمه‌گرم به‌عنوان جایگزینی برای آسفالت داغ مطرح شده است. این فناوری، همچنین کیفیت و دوام روسازی را حفظ می‌کند. یکی از راه‌های بهینه‌سازی آسفالت‌های نیمه‌گرم، استفاده از تراشه‌های آسفالتی بازیافتی و لجن نفتی به‌عنوان اصلاح‌کننده است. بر اساس بررسی‌های صورت گرفته روی نمودار ارتباط دمای تولید با میزان مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، مشخص است که محدوده دمایی انواع مخلوط‌های آسفالتی شامل سرد (CMA)، نیمه‌گرم (HWMA)، گرم (WMA) و داغ (HMA) با میزان انرژی مصرفی و آلایندگی‌های محیطی رابطه مستقیم دارد؛ به طوری که با کاهش دمای تولید، مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد (سوخیجا و سابو، ۲۰۲۱) (شکل ۱).

همچنین، گرم کردن تراشه آسفالتی باید با دقت انجام شود تا از تخریب قیر موجود در آن جلوگیری شود. موضوعاتی نظیر دما، مدت زمان گرم کردن و روش‌های گرم کردن برای تراشه‌های آسفالتی مهم است. به طور

کلی، دمای گرم کردن تراشه آسفالتی معمولاً نباید از ۱۱۰ تا ۱۳۰ درجه سلسیوس تجاوز کند. دمای بالاتر ممکن است باعث اکسیداسیون قیر و کاهش کیفیت آن شود، مدت زمان گرم کردن نیز باید کوتاه باشد و بسته به تجهیزات و شرایط متغیر است. اگرچه گرم کردن طولانی‌مدت می‌تواند به تخریب قیر منجر شود، ولی برخی مطالعات نشان داده‌اند که حرارت‌دهی تراشه آسفالتی به مدت ۲ ساعت در دمای ۱۱۰ تا ۱۵۰ درجه سلسیوس تغییرات قابل توجهی در خصوصیات قیر ایجاد نمی‌کند (برنامه ملی تحقیقات همکاری بزرگراه‌ها [NCHRP]، ۲۰۰۰) و برای گرم کردن نیز استفاده از تجهیزات مدرن مانند خشک‌کننده‌های دوار یا سیستم‌های گرمایش غیرمستقیم می‌تواند به حفظ کیفیت قیر کمک کند. لذا استفاده از روش‌های ساخت آسفالت به صورت سرد و نیمه‌گرم در تراشه‌های آسفالتی نیز می‌تواند به تولید آسفالت‌های بازیافتی با درصد بالای تراشه آسفالتی و لجن نفتی منجر شود.



شکل ۱. ارتباط بین دمای تولید انواع مخلوط‌های آسفالتی با میزان مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای (سوخیجا و سابو، ۲۰۲۱)

۲-٤. ملاحظات زیست‌محیطی

عملیات نفتی مختلف سالانه مقدار زیادی لجن نفتی تولید می‌کند. به عنوان مثال، سازمان حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده، تولید سالانه لجن هر پالایشگاه ایالات متحده را ۳۰۰۰۰ تن تخمین می‌زند؛ در حالی که میانگین لجن نفتی تولید شده از صنایع پتروشیمی در چین حدود ۳ میلیون تن در سال برآورد می‌شود (حسن و همکاران، ۲۰۲٤).

لجن نفتی در ترکیب با قیر باعث بهبود رفتار رئولوژیکی و افزایش مقاومت آسفالت در برابر شرایط آب و هوایی متغیر شده است، لیکن بوی بد آلاینده‌های هوا، شبیه دی‌اکسید گوگرد، در دمای بالای ۱۰۰ درجه سلسیوس در محیط پخش می‌شود. این بدان معناست که وقتی لجن نفتی به عنوان جوان‌کننده استفاده می‌شود ترجیحاً باید در دماهای پایین‌تر و در کوتاه‌ترین مدت زمان ذخیره‌سازی حرارتی لجن نفتی باشد که این روش بیشتر مشابه تولید آسفالت‌های سرد و نیمه‌گرم است. البته مقایسه نتایج با محدودیت‌های استاندارد EPA ایالات متحده نشان می‌دهد که انتشار آن از لجن نفتی بسیار کم است، که نشان می دهد محصول، استانداردها

ا برآورده می‌کند و از نظرکیفیت هوا در هنگام اختلاط رضایت‌بخش است (آژانس حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده، ۲۰۱۵؛ دالهات و همکاران، ۲۰۲۲). همچنین، اگر در دمای اختلاط عملی، حداقل مدت زمان ذخیره حرارتی مورد استفاده قرار گیرد، VOCs و انتشار آن در هوا از لجن نفت در محدوده قابل قبولی است. بر اساس این یافته‌ها، همچنین غلظت فلزات سنگین در شیرابه‌های بتن آسفالتی‌های حاوی تراشه آسفالتی که با لجن نفتی جوان شده بودند بسیار کمتر از آستانه‌های نظارتیUS-EPA بود و استفاده از لجن نفتی به عنوان یک جوان‌کننده در تراشه آسفالتی از نظر زیست‌محیطی ایمن است (دالهات و همکاران، ۲۰۲۲). مطالعات پیشین نشان داده‌اند که استفاده از ماتریس‌های قیری یک روش کارآمد برای تثبیت و جامدسازی (S/S) پسماندهای صنعتی نظیر لجن نفتی است (حسن و همکاران، ۲۰۰۵؛ الفطیسی و همکاران، ۲۰۰۷). آزمایش‌های نشت (مانندTCLP) در پژوهش‌های مشابه ثابت کرده‌اند که کپسوله‌سازی فیزیکی آلاینده‌ها در قیر، تحرک فلزات سنگین و هیدروکربن‌ها را به میزان قابل‌توجهی کاهش داده و آنها را در محدوده مجاز زیست‌محیطی نگه می‌دارد (آژانس حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده [EPA]، ۲۰۰۰).

در مطالعات انجام شده، با تبدیل لجن تولیدشده از صنایع مختلف نفتی به مواد ساختمانی و جاده‌ای ارزشمند، مشکل دفع لجن را حل کردند و امکان استفاده از انواع مختلف لجن را به‌عنوان افزودنی برای قیر درجه BND 70/100 بررسی نمودند. براساس تحقیقات آنان، لجن نفتی حاوی هیدروکربن‌های نفتی، آب و ذرات جامد معدنی است که بسته به منبع، ترکیب متفاوتی دارد. امکان استفاده از لجن به‌عنوان اصلاح‌کننده و جوان‌ساز در قیر BND 70/100 مورد آزمایش قرار گرفت. افزودن مقادیر مشخصی از لجن، خواص چسبندگی، انعطاف‌پذیری و مقاومت قیر را بهبود بخشید و آن را برای تولید بتن آسفالتی مناسب‌تر کرد. تبدیل لجن نفتی به افزودنی قیری نه تنها مشکل دفع زباله‌های خطرناک را حل می‌کند، بلکه ارزش اقتصادی ایجاد می‌نماید. این روش در مقایسه با سوزاندن یا تصفیه بیولوژیکی، سازگارتر با محیط‌زیست و از نظر اقتصادی مقرون به‌صرفه‌تر است. استفاده از لجن در مصالح راهسازی می‌تواند به کاهش آلودگی و صرفه‌جویی در منابع طبیعی کمک کند (آیتکالیوا و همکاران، ۲۰۲۲).

۲-۵. شکاف پژوهشی و جایگاه پژوهش حاضر

بررسی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که بازیافت تراشه آسفالتی (RAP) می‌تواند مصرف منابع طبیعی، هزینه‌های اجرایی و انتشار آلاینده‌ها را کاهش دهد. با این حال، بیشتر مطالعات پیشین بر درصدهای محدود RAP همراه با مصالح سنگی بکر و قیر خالص، جوان‌سازهای تجاری فرآوری‌شده و تولید مخلوط‌های داغ متمرکز بوده‌اند. از سوی دیگر، لجن نفتی به‌عنوان یک پسماند هیدروکربنی صنعت نفت، به دلیل هزینه‌های بالای مدیریت و مخاطرات زیست‌محیطی، چالشی مهم، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، محسوب می‌شود.

مطالعات محدودی استفاده هم‌زمان از ۱۰۰ درصد تراشه آسفالتی و لجن نفتی را در ساخت مخلوط‌های آسفالتی کاملاً بازیافتی نیمه‌گرم و سرد، در دماهای کمتر از ۱۰۰ درجه سلسیوس، بررسی کرده‌اند. رفتار قیر پیرشده RAP، نحوه اختلاط آن با ترکیبات نفتی لجن و محدودیت‌های حرارتی در فرآیند تولید و تراکم می‌تواند بر مشخصات نهایی مخلوط اثر قابل توجهی داشته باشد. از این‌رو، اطلاعات کافی در باره طرح اختلاط مناسب، درصد بهینه لجن نفتی، تراکم‌پذیری، مقاومت کششی غیرمستقیم، مقاومت در برابر آسیب رطوبتی و قابلیت اجرایی این مخلوط‌ها در دسترس نیست.

پژوهش حاضر سه تمایز اساسی نسبت به مطالعات پیشین دارد. نخست، در آن به‌جای درصدهای جزئی RAP همراه با مصالح بکر، از ۱۰۰ درصد تراشه آسفالتی

بدون افزودن هیچ مصالح سنگی نو یا قیر خالص استفاده شده است. دوم، به‌جای جوان‌سازهای تجاری گران‌قیمت یا مواد نیازمند فرآوری شیمیایی پیچیده، از لجن نفتی خام پالایشگاهی با جداسازی فیزیکی بهره گرفته شده است. سوم، دو رژیم دمایی نیمه‌گرم و سرد (۲۵ تا ۱۰۰ درجه سلسیوس) که انتشار آلاینده‌های فرار و مصرف انرژی را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد به‌صورت هم‌زمان با ماده جوان‌ساز یکسان مقایسه شده‌اند که امکان جداسازی اثر دما از اثر ماده افزودنی را فراهم می‌کند. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف بررسی امکان تولید مخلوط آسفالتی کاملاً بازیافتی نیمه‌گرم و سرد با استفاده از ۱۰۰ درصد تراشه آسفالتی و لجن نفتی پالایشگاهی انجام شده است. در این مطالعه، طرح اختلاط، تراکم‌پذیری و عملکرد مکانیکی مخلوط‌ها شامل مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) و مقاومت در برابر آسیب رطوبتی ارزیابی می‌شود. همچنین، قابلیت استفاده از این مخلوط‌ها در عملیات لکه‌گیری، تعمیر و نگهداری، همراه با ملاحظات اقتصادی بررسی خواهد شد.

۳. روش‌ها و مصالح

در این پژوهش، اثر لجن نفتی در درصدها و دماهای مختلف بر تراشه آسفالتی برای ساخت مخلوط آسفالت‌های سرد و نیمه‌گرم بررسی شد. در گام نخست، می‌بایست ترکیب لجن نفتی با تراشه آسفالتی و نحوه استفاده از آن در دماهای مختلف تعیین و سپس ملاحظات یک طراحی بهینه برای ترکیب با روسازی آسفالتی مشخص می‌شد، از ویژگی‌های مهم لجن نفتی که به عنوان یک جوان‌ساز و روان‌ساز به کار می‌رود تأثیر آن بر تراشه‌های آسفالتی در دماهای مختلف است کندروانی و یا درجه نفوذ قیر هدف به شرایط جوی اقلیمی و نوع ترافیک محور، سبک متوسط و سنگین ارتباط دارد و باید در مشخصات فنی خصوصی پروژه قید شود (سازمان ملی استاندارد ایران، ۲۰۱۶). اما باید توجه داشت که لجن نفتی یک ماده غیرهمگن است، که از سه بخش تشکیل شده است: ۱- نفت و مواد محلول در نفت که شامل هیدروکربن‌های سنگین و سبک، پارافین‌ها، آسفالتین‌ها، رزین‌ها و سایر ترکیبات آلی می‌باشند. ۲- آب و مواد محلول در آب. ۳- ذرات جامد که شامل خاک، شن و ماسه، سیلیکا و جامدات فلزی می‌باشند. این سه فاز با یکدیگر مخلوط شده و یک امولسیون تشکیل می‌دهند و نمی‌توان آن را مشابه یک جوان‌ساز تجاری همگن فرض کرد. به عبارتی، در افزودن آن به تراشه‌های آسفالتی استفاده از روابط محاسباتی معمول در تعیین پارامترهای حجمی و وزنی، می‌تواند به نتایج غیرواقعی در محاسبات حجمی مخلوط‌های آسفالتی منجر و قابلیت اطمینان آزمایش را کاهش دهد.

مطابق جدول ۱، آزمایش‌های عملکردی برای مخلوط‌های غیرمعمول برای ترافیک 3×10^6>(ESALs) الزامی نیست، مگر آژانس استفاده‌کننده مشخص نماید (انستیتو آسفالت، ۲۰۱۴). در این تحقیق، علاوه بر آزمایش‌های مواد و مصالح روی تراشه آسفالتی و لجن نفتی، آزمایش مارشال و حساسیت رطوبتی روی مخلوط آسفالتی، همچنین مدول برجهنگی و ضریب سازه‌ای لایه آسفالت سرد برای مخلوط به صورت تخمینی تعیین گردید.

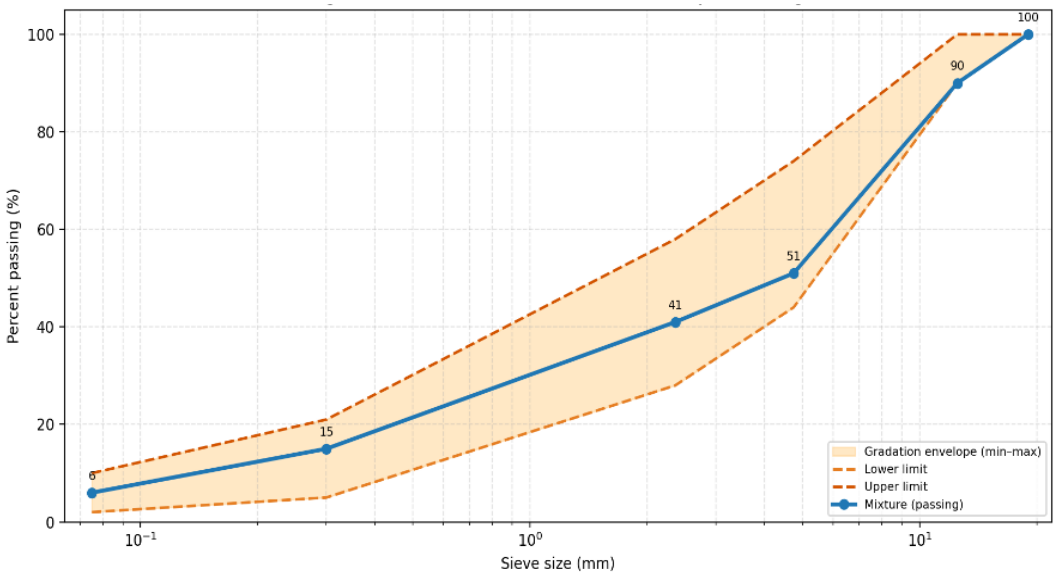
جدول ۱. الزامات پیشنهادی آزمایش عملکردی برای مخلوط‌های غیرمعمول (انستیتو آسفالت، ۲۰۱۴)

ترافیک (10^6 ESALs)	آزمایش تغییرشکل دائمی	آزمایش ترک‌خوردگی خستگی	آزمایش ترک‌خوردگی حرارتی
< 3	نیاز نیست	نیاز نیست	نیاز نیست

۳-۱. مواد و مصالح مصرفی

۳-۱-۱. تراشه آسفالتی

تراشه آسفالتی مورد استفاده در این تحقیق از آسفالت باند فرودگاه کرمانشاه تهیه شده است. این آسفالت در حدود ۳۰ سال قبل در باند اجرا گردیده و ضخامت متوسط آن در زمان ساخت حدود ۵۵ سانتی‌متر بود. به منظور به دست آوردن دانه‌بندی مورد نظر که در شکل ۲ ترسیم شده است مصالح تراشه آسفالتی به سه بخش تقسیم گردید: کمتر از ٤/۷۵ میلی‌متر، بین ٤/۷۵ و ۱۲/۵ میلی‌متر، بین ۱۲/۵ و ۱۹ میلی‌متر، به نحوی که با درصدهای تعیین شده دانه‌بندی مورد نظر در محدوده دانه‌بندی پیوسته شماره (٤) آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران قرار گرفت. مشخصات تراشه آسفالتی در جدول ۲ و شکل ۲ درج شده است.



شکل ۲. دانه‌بندی مخلوط نهایی با ۱۰۰ درصد تراشه آسفالتی

جدول ۲. مشخصات تراشه آسفالتی

دانه‌بندی	وزن مخصوص حقیقی Gsb	درصد قیر تراشه آسفالتی*	شکستگی مصالح سنگی	ارزش ماسه‌ای مخلوط
۱۲/۵ تا ۱۹ میلی‌متر	۲,۷٤۰	۲/۸	–	–
٤/۷۵ تا ۱۲/۵ میلی‌متر	۲/۷۳۱	۲/۷	–	–
کمتر از ٤/۷۵ میلی‌متر	۲/۷۵۳	۵/۷	–	–
مخلوط	۲/۷٤۳	٤/۲	٪۷٦	٪۵٤

*درصد قیرتراشه درشت‌دانه با مصالح ریزدانه چسبیده به آن محاسبه شده است.

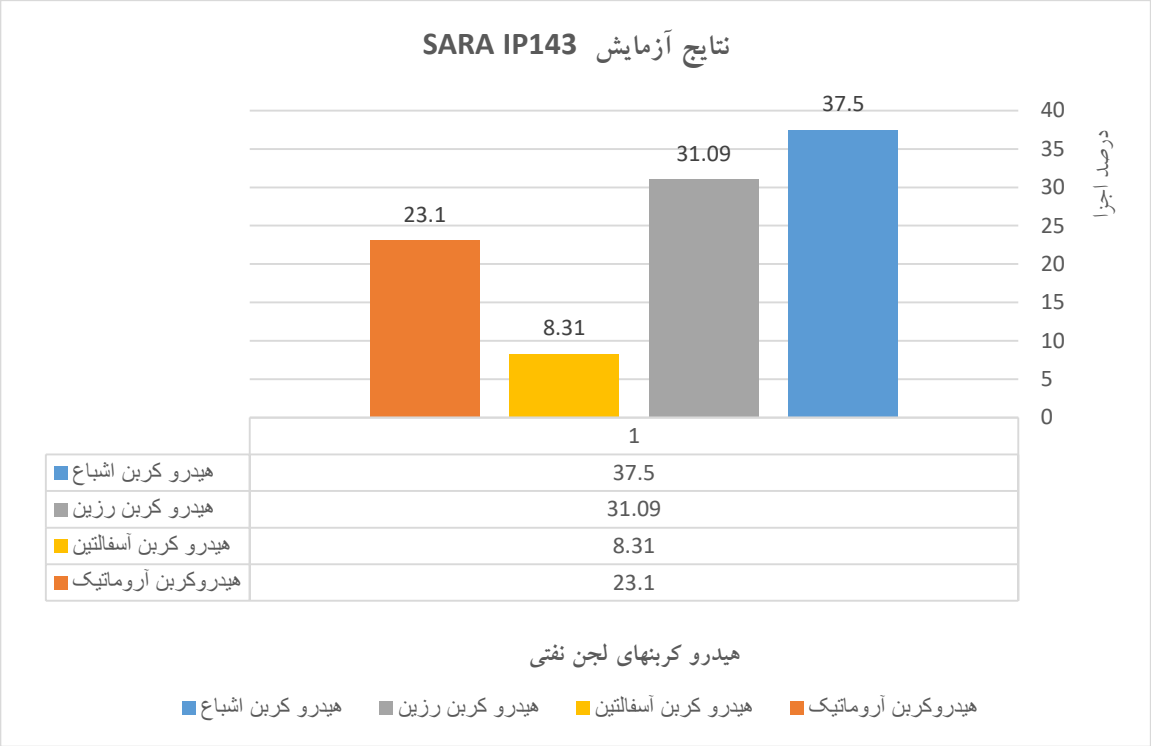
۳-۱-۲. لجن نفتی

لجن نفتی مورد استفاده از مخازن پالایشگاه کرمانشاه تهیه گردید که مشخصات آن مطابق جدول ۳ می‌باشد.

جدول ۳. مشخصات لجن نفتی (نوروزی و همکاران، ۲۰۲۲)

ردیف	پارامتر	روش آزمایش	درصد
۱	مقدار رسوب در لجن نفتی	ASTM D 4007	۸/٦۸
۲	مقدار آب در لجن نفتی	ASTM D4006	۷/۳
۳	مقدار هیدروکربن در لجن نفتی	ASTM D473	۸۳/۰۲
٤	مقدار نمک در آب	ASTM D3230	۳/۲
٥	مقدار گوگرد کل هیدروکربن	ASTM D2622	۰/۸۷

وزن مخصوص لجن نفتی در دمای ۲۵ درجه سلسیوس بر اساس استاندارد ASTM D7O به مقدار ۰/۹۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب تعیین شده است. تبخیر مواد فرار، تعادل اجزا SARA را در قیر پیر شده به‌هم می‌زند و انتظار می‌رود جوان‌سازها این عدم تعادل را جبران کنند نتایج آزمایش SARA لجن نفتی در شکل ۳ آمده است.



شکل ۳ . آزمایش SARA لجن نفتی (Norouzi و همکاران، ۲۰۲۲)

۳-۱-۳. مواد جامد لجن نفتی

جداسازی مواد جامد از لجن نفتی فرآیندی پیچیده و هزینه‌بر است، با توجه به ناهمگنی لجن نفتی تمامی آزمایش‌های این پژوهش با استفاده از این فرآیند محمولهٔ مشخص و واحد از لجن نفتی پالایشگاه کرمانشاه انجام شد به منظور جداسازی مواد جامد و آب

1- Batch

این لجن نفتی تا دمای ۹۶ درجه سلسیوس در یک ظرف استوانه‌ای (شبیه ساز یک تانک ذخیره‌سازی) حرارت داده شد که موجب تبخیر آب و ته‌نشینی مواد جامد گردید. طی این مراحل، لجن مذکور از قسمت بالای مواد جامد ته نشین شده برداشت گردید و پیش از شروع آزمایش‌ها، کل لجن نفتی مذکور با یکدیگر ترکیب و تمام لجن نفتی مورد نیاز آزمایش‌ها از آن برداشت گردید تا مشخصات فیزیکی و شیمیایی (مانند درصد آب، مواد آلی و رسوبات جامد) در تمام طول تحقیق ثابت بماند. محصولی که به دست آمد، پسماند لجن و لجن خالص شده بوده که جهت شناسایی ترکیب شیمیایی آن با استفاده از آزمایش-های XRF ترکیب شیمیایی لجن خالص و پسماند آن بر اساس استاندارد ASTM E 1621 تعیین شد. جدول ٤، نتایج آزمایش XRF (فلورسانس اشعه ایکس) روی مواد جامد لجن نفتی، محتویات و توضیحات مربوط به آن را نشان می‌دهد.

جدول ٤. نتایج آزمایش XRF (فلورسانس اشعه ایکس) روی مواد جامد لجن نفتی

محتویات	درصد وزنی	محتویات	درصد وزنی
سدیم اکسید (Na_2O)	۰/۱	تری اکسید گوگرد (SO_3)	۱۱/۷
منیزیم اکسید (MgO)	۰/۷	کلسیم اکسید (CaO)	٤/٥
آلومینیوم اکسید (Al_2O_3)	۰/۸٥	اکسید آهن (Fe_2O_3)	۷۲/۹
سیلیسیم دی اکسید (SiO_2)	۳/۱	دیگر محتویات	٥/۱٥

توضیحات:

- آنالیز به صورت نیمه کمی (Semi Quantitative) انجام شده است.
- L.O.I نمونه در دمای ۱۰۰۰ درجه سلسیوس اندازه‌گیری شده است و افت وزنی در این دمای٥/٥٪ است.
- میزان درصد عناصر سبک‌تر از ٤ به روش XRF قابل شناسایی نمی‌باشد.
- آزمون پس از سوزاندن نمونه در دمای ٥٥۰ درجه سلسیوس صورت گرفته است.

۳-۲. آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS)

در آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم، بارگذاری توسط دو تیغه با نوار فلزی مطابق استاندارد AASHTO T283 انجام می‌شود. هنگام آزمایش، نمونه در قالب بارگذاری مربوطه قرار داده می‌شود و بارگذاری با کمک دستگاه استحکام مارشال با سرعت ٥۰/۸ میلی‌متر بر دقیقه به صورت قطری اعمال می‌گردد. این آزمایش در دمای ۲٥ درجه سلسیوس تا زمان شکست انجام شد. نمونه‌ها دارای قطر ۱۰۱/٦ و ارتفاع حدود ٦۳/٥ میلی‌متر بودند. بار نهایی در موقع شکستن نمونه (دو نیمه شدن) اندازه-گیری شده و مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$ITS = 2000P / \pi Dt \qquad (۱)$$

ITS = مقاومت کششی غیرمستقیم (کیلوپاسکال)

P= بار نهایی در هنگام گسیختگی (کیلونیوتن)

D = قطر نمونه (میلی‌متر)

t = ضخامت نمونه (میلی‌متر)

۳-۳. طرح اختلاط و ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

منظور از طرح مخلوط آسفالتی مشخص نمودن معیارهایی است که بر اساس آن بتوان اولاً در کارخانه مخلوط آسفالتی تهیه نمود و ثانیاً بر اساس همان معیارها آسفالت پخش شده در سطح راه را کنترل نمود. هیچ روش طرح مخلوط مورد قبول عامی برای مخلوط‌های آسفالت سرد وجود ندارد. تقریباً همگی روش‌های اصلاح شده طرح مخلوط ویم، مارشال یا آسفالت ممتاز (سوپر پیو) هستند. طرح اختلاط آسفالت سرد کلا پیچیدگی کمتری در تولید و اجرا نسبت به مخلوط دارند (انستیتو آسفالت، ۲۰۱٤). به طور خلاصه، پس از تهیه لجن نفتی و مصالح تراشه آسفالتی مورد نظر و انجام آزمایش‌های کنترل کیفی و اطمینان ازمناسب بودن مصالح با دانه‌بندی منتخب، نسبت به تهیه طرح اختلاط مشابه با روش مارشال در نشریه انستیتو آسفالت اقدام شد، برای ساخت نمونه‌ها از ۱۰۰٪ مصالح تراشه آسفالتی، دانه‌بندی مصالح سنگی آنها در محدوده تعیین شده دانه‌بندی پیوسته شماره ٤ آیین‌نامه روسازی آسفالتی ایران قرار می‌گرفت استفاده شد. در این پژوهش، مصالح بازیافتی (RAP) به مدت ۲ ساعت در آون گرم شدند. با توجه به استفاده از مصالح ۱۰۰ درصد بازیافتی و لجن نفتی و همچنین زمان اختلاط بیشتر از حد معمول (حدود ۳ دقیقه)، دمای آماده‌سازی مصالح در آون کمی بالاتر از دمای هدف برای تراکم در نظر گرفته شد تا افت حرارتی حین فرآیند اختلاط و انتقال مخلوط به قالب به طور کامل جبران گردد. نمونه مربوط به تراکم در دمای ۲۵ درجه سلسیوس نیز مستقیماً در دمای محیط و بدون نیاز به گرمایش در آون مخلوط شد. هم‌زمان با آماده‌سازی مصالح، لجن نفتی در مقادیر۲، ٤، ٦ و ۸ درصد (نسبت به وزن کل مخلوط آسفالتی) تا دمای حدود ۹٦ درجه سلسیوس حرارت داده شد و به مخلوط افزوده گردید. پس از اتمام فرآیند اختلاط، متراکم‌سازی نمونه‌ها بر اساس استاندارد AASHTO T 245 و دستورالعمل انستیتو آسفالت (نشریه MS-14)، با اعمال ۷۵ ضربه چکش مارشال بر هر طرف نمونه و در دماهای هدف ۱۰۰، ۷۰، ۵۰ و ۲۵ درجه سلسیوس صورت گرفت. برای هر ترکیب آزمایشی (هر درصد لجن نفتی در هر دمای تراکم)، سه نمونه تکراری ساخته شد و کلیه پارامترهای مارشال (پایداری، روانی، دانسیته، درصد تراکم)، مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) و ماند مقاوم ، بر مبنای میانگین این سه نمونه گزارش گردید تا از قابلیت اطمینان و بازتولیدپذیری نتایج در کلیه آزمایش‌های انجام‌شده در این پژوهش اطمینان حاصل شود. ضریب تغییرات نتایج برای اغلب پارامترهای مارشال و مقاومت کششی غیرمستقیم در محدوده قابل قبول قرار داشت. با توجه به ناهمگنی ذاتی مصالح تراشه آسفالتی (RAP) و اثر متغیرهای دما و درصد لجن نفتی بر رفتار مخلوط، پراکندگی نتایج بین نمونه‌های تکراری در محدوده معمول گزارش‌شده در مطالعات مشابه بازیافت آسفالت ارزیابی شد. دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس به‌عنوان حد بالایی بازه دمایی آسفالت نیمه‌گرم در این پژوهش انتخاب شد. همچنین، دمای ۷۰ درجه سلسیوس که اندکی پایین‌تر از میانگین این بازه است، به‌منظور بررسی رفتار مخلوط در شرایط نیمه‌گرم با نیاز حرارتی کمتر در نظر گرفته شد. برای نمونه‌های معرف آسفالت سرد، دمای ۲۵ درجه سلسیوس نماینده شرایط متعارف دمای محیط و دمای ۵۰ درجه سلسیوس نماینده شرایط تولید و اجرای مخلوط در روزهای گرم تابستانی است که با دمای تراشه در مناطقی از کشور در روز تطابق دارد. در هر دو دمای ۲۵ و ۵۰ درجه سلسیوس، فرآیند تولید بدون استفاده از گرمایش هدفمند و کنترل‌شده به‌منظور فعال‌سازی حرارتی قیر پیرشده موجود در RAP تعریف می‌شود. از این‌رو، این نمونه‌ها در گروه آسفالت سرد طبقه‌بندی شدند.

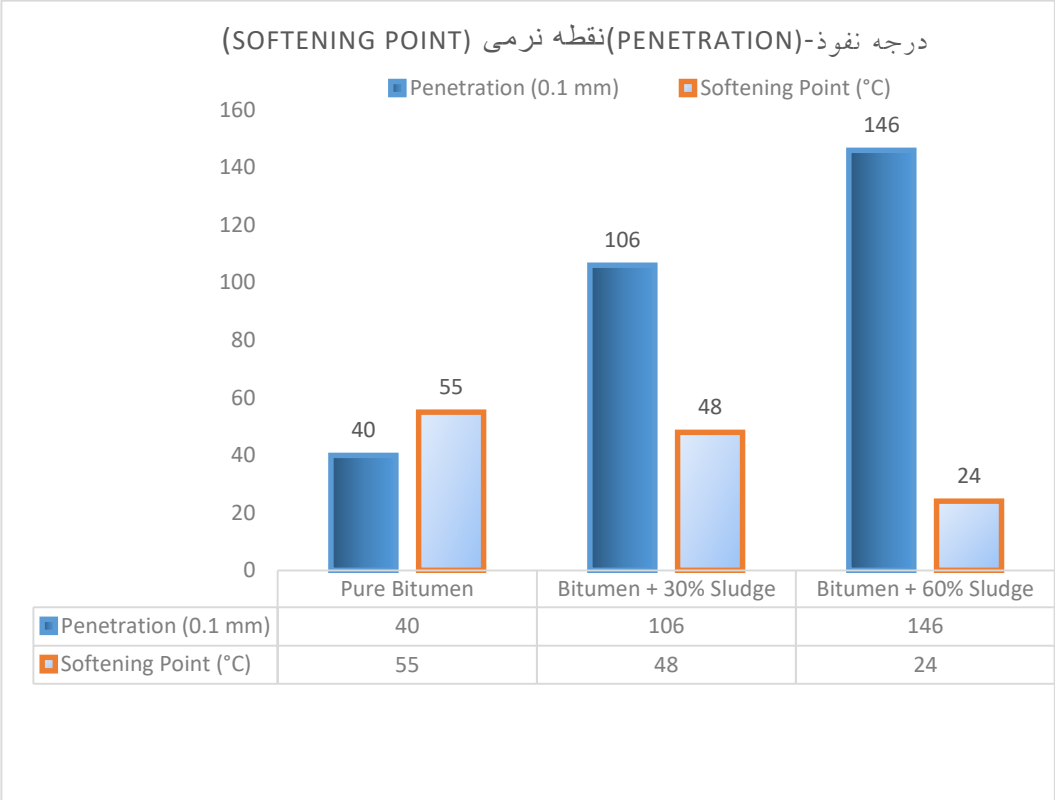
با توجه به اینکه مخلوط آسفالتی مورد نظر باید با

استفاده از تراشه آسفالتی و لجن نفتی، در دماهای کمتر از ۱۰۰ درجه سلسیوس تا دمای محیط تولید شود، تعیین درصد بهینه لجن نفتی به‌عنوان جوان‌ساز و روان‌ساز با چالش‌هایی همراه است. از آنجا که کندروانی قیر به‌شدت تابع دما است و لجن نفتی باید بتواند با قیر پیرشده موجود در تراشه آسفالتی ترکیب شود، تعیین درصد بهینه صرفاً بر اساس آزمون‌های متداول قیر، از جمله درجه نفوذ و نقطه نرمی، ممکن است با خطا همراه باشد، زیرا شرایط این آزمون‌ها لزوماً معرف شرایط واقعی اختلاط در مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم و سرد نیستند.

به‌منظور جلوگیری از ابهام، درصد لجن نفتی در این پژوهش بر اساس دو مبنای متفاوت تعریف شد. در آزمون‌های مربوط به چسباننده قیری، شامل درجه نفوذ، نقطه نرمی و شاخص نفوذ، درصد لجن نفتی نسبت به مخلوط قیر پیرشده و لجن نفتی محاسبه شد. در مقابل، در ساخت نمونه‌های آسفالتی و ارزیابی آنها با روش مارشال، درصد لجن نفتی نسبت به جرم کل مخلوط آسفالتی در نظر گرفته شد (جدول ۵). برای مثال، OSb برابر با ۱۰ درصد به این معنا است که ۱۰ درصد جرم مخلوط نهایی چسباننده قیری را لجن نفتی و ۹۰ درصد باقی‌مانده را قیر پیرشده تشکیل می‌دهد. همچنین، درصد لجن نفتی نسبت به جرم کل مخلوط آسفالتی، که با نماد OSm نشان داده می‌شود، نتایج آزمون‌های چسباننده نشان داد که مقادیر به‌دست‌آمده درصد بهینه لجن نفتی، بر پایه درجه نفوذ و نقطه نرمی شکل ٤ و شاخص درجه نفوذ کاملاً با یکدیگر منطبق نیستند. به‌طوری که برای دستیابی به نقطه نرمی ۵۲/۵ درجه سلسیوس (میانگین نقطه نرمی قیر ۷۰–٦۰)، حدود ۱۰/۷ درصد لجن نفتی نسبت به مخلوط چسباننده قیری (یعنی OSb)، مورد نیاز بود؛ در حالی که برای رسیدن به درجه نفوذ ٦۵ (میانگین درجه نفوذ قیر ۷۰–٦۰) مقدار مورد نیاز حدود ۱۱/٤ درصد OSb برآورد شد.

همچنین، بررسی مهندسی بر اساس شاخص نفوذ، PI، نشان داد که محدوده استاندارد این شاخص، یعنی بازه منفی ۱ تا مثبت ۱، تقریباً در محدوده صفر تا ۳٦ درصد لجن نفتی نسبت به مخلوط چسباننده قیری برقرار است. با این حال، محدوده ۱۰ تا ۳۰ درصد OSb از نظر پایداری حساسیت دمایی مناسب‌تر ارزیابی شد؛ زیرا در این بازه، شاخص نفوذ به صفر نزدیک بوده و چسباننده قیری رفتار متعادل‌تری از نظر حساسیت دمایی نشان می‌دهد.

در مقابل، با افزایش مقدار لجن نفتی به بیش از حدود ۳۵ تا ٤۰ درصد نسبت به مخلوط چسباننده قیری، نقطه نرمی به‌طور محسوسی کاهش یافته و کیفیت قیر افت می‌کند. در نتیجه، شاخص نفوذ به‌سرعت به سمت مقادیر منفی زیاد حرکت کرده و چسباننده قیری از محدوده استاندارد مهندسی خارج می‌شود. بنابراین، بر اساس نتایج آزمون‌های چسباننده قیری، استفاده از لجن نفتی تا سقف حدود ۳۰ درصد OSb برای دستیابی به خواص رئولوژیکی مناسب توصیه می‌شود. با وجود این، باید توجه داشت که درصدهای مذکور بر اساس فرض امتزاج کامل لجن نفتی با قیر پیرشده به‌دست آمده‌اند. در شرایط واقعی تولید آسفالت نیمه‌گرم و سرد، به‌ویژه در دماهای کمتر از ۱۰۰ درجه سلسیوس و تا دمای محیط، امتزاج کامل لجن نفتی با قیر پیرشده موجود در تراشه آسفالتی لزوماً رخ نمی‌دهد. بنابراین، نتایج آزمون‌های چسباننده قیری به‌تنهایی نمی‌توانند درصد بهینه لجن نفتی را برای مخلوط آسفالتی واقعی تعیین کنند. به همین دلیل، برای ارزیابی عملکرد واقعی مخلوط و تعیین درصد بهینه لجن نفتی در شرایط ساخت، مخلوط‌های آسفالتی با درصدهای مختلف لجن نفتی تهیه و با استفاده از روش مارشال ارزیابی شدند



شکل ٤. درجه نفوذ و نقطه نرمی قیر تراشه آسفالتی و لجن نفتی برحسب درصد لجن نفتی چسباننده قیری

جدول ٥. تعریف نمادها و مبنای درصددهی لجن نفتی

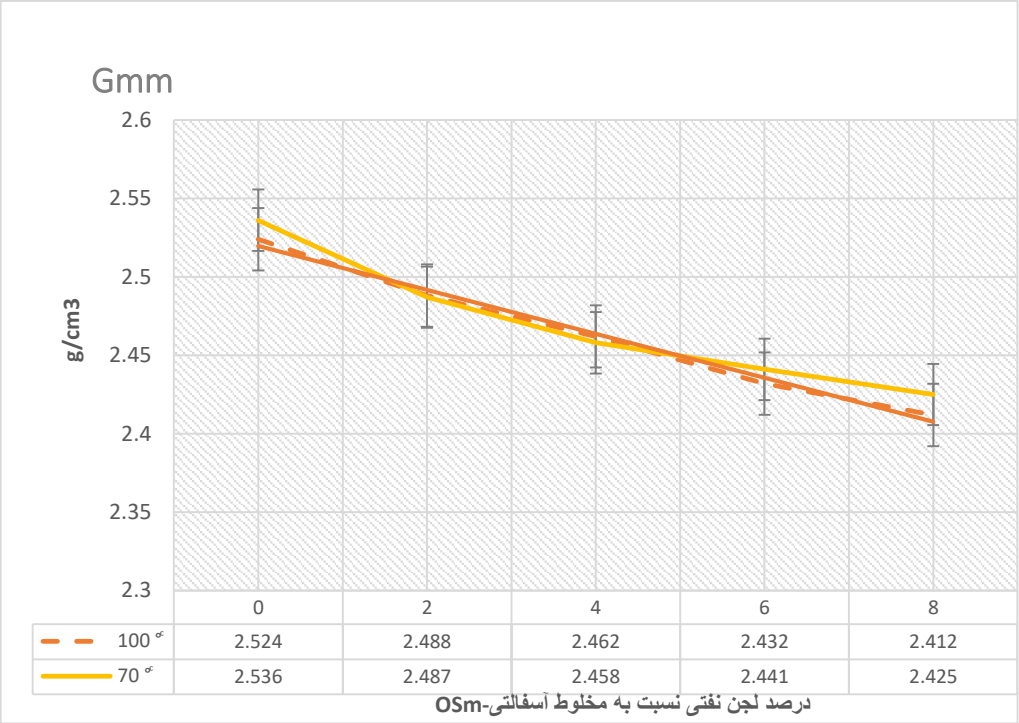
نماد	OSb	OSm
عنوان درصد	درصد لجن نفتی نسبت به مخلوط چسباننده قیری	درصد لجن نفتی نسبت به مخلوط آسفالتی
مبنای محاسبه	جرم لجن نفتی نسبت به مجموع جرم لجن نفتی و قیر پیرشده	جرم لجن نفتی نسبت به جرم کل مخلوط آسفالتی
کاربرد	آزمون‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی و محاسبه شاخص نفوذ	ساخت نمونه‌ها و ارزیابی عملکرد با روش مارشال
محاسبات	$OSb\ (\%) = [M(OS) / (M(OS) + M(AB))] \times 100$ که در آن، $M(OS)$ جرم لجن نفتی و $M(AB)$ جرم قیر پیرشده (موجود در تراشه آسفالتی یا قیر بازیافتی) است	$OSm\ (\%) = [M(OS) / M(mix)] \times 100$ که در آن، $M(mix)$ جرم کل مخلوط آسفالتی شامل مصالح سنگی، تراشه آسفالتی، قیر موجود و لجن نفتی است.

٤. نتایج آزمایش‌ها و یافته‌ها

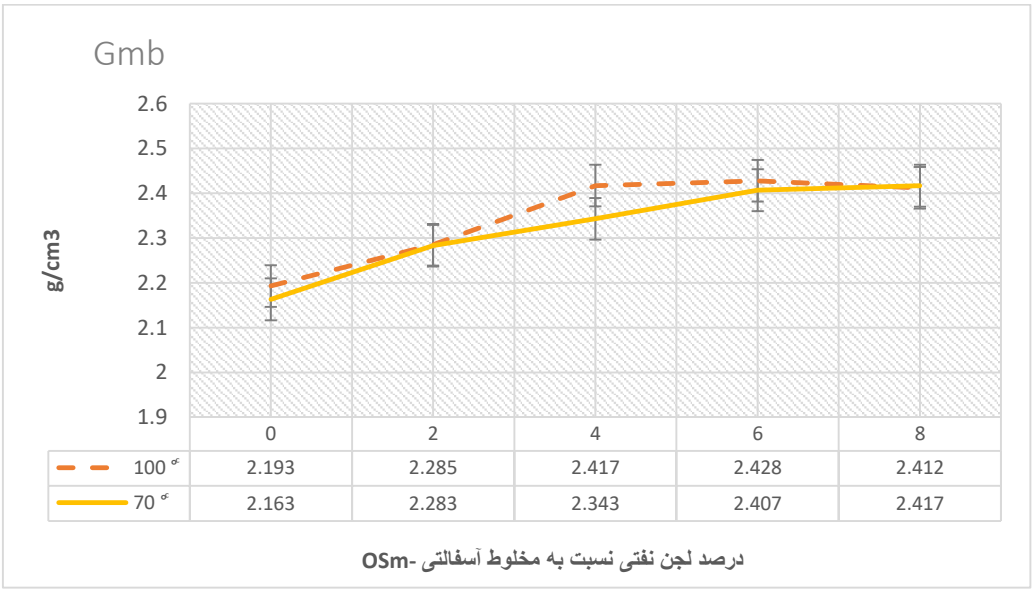
٤-١. تعیین وزن مخصوص ماکزیمم، وزن مخصوص مارشال و درصد تراکم

برای بررسی تغییرات نمونه‌های آسفالتی ساخته شده با ۱۰۰ درصد تراشه آسفالتی، از دو پارامتر تغییر درصد لجن نفتی و دمای ساخت (اختلاط و تراکم) استفاده شده است. وزن مخصوص نمونه‌های مخلوط آسفالتی متراکم

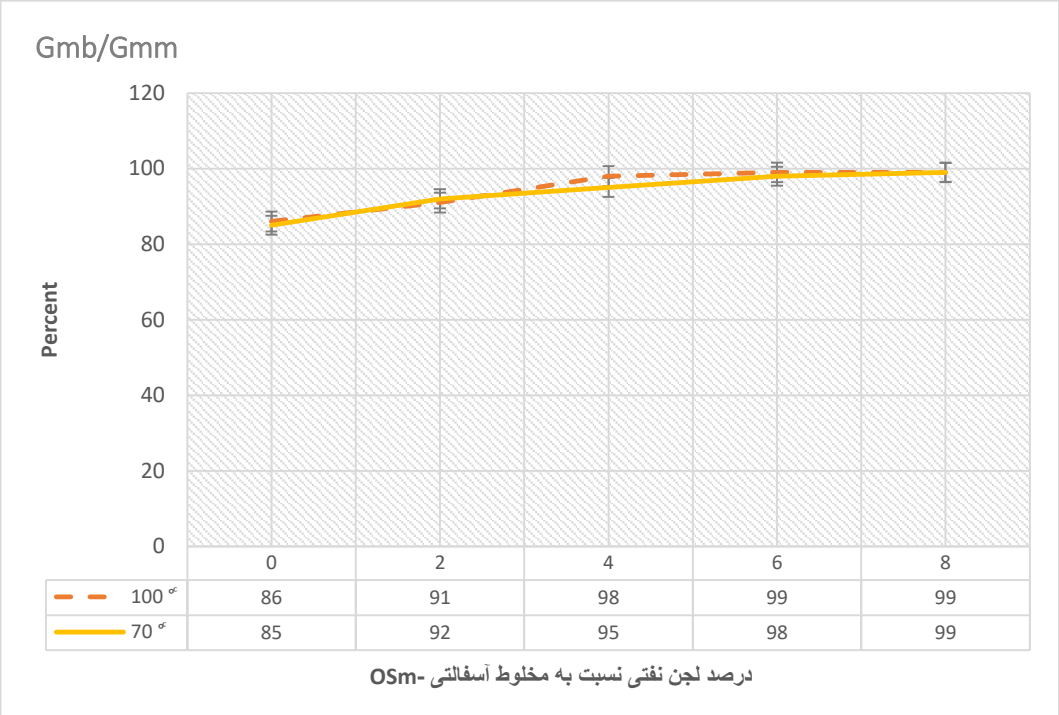
بر اساس AASHTO T166 و مقادیر وزن مخصوص ماکزیمم نمونه‌ها با آزمایش رایس (AASHTO T 209) در شکل ۵، و نمودار وزن مخصوص نمونه‌ها در شکل ٦ نشان داده شده است. در محاسبه نسبت وزن مخصوص از رابطه ($\frac{Gmb}{Gmm}$) استفاده شده و نتایج در شکل ۷ منعکس گردیده است.



شکل ۵. نمودار وزن مخصوص ماکزیمم مخلوط آسفالتی در دماهای مختلف اختلاط



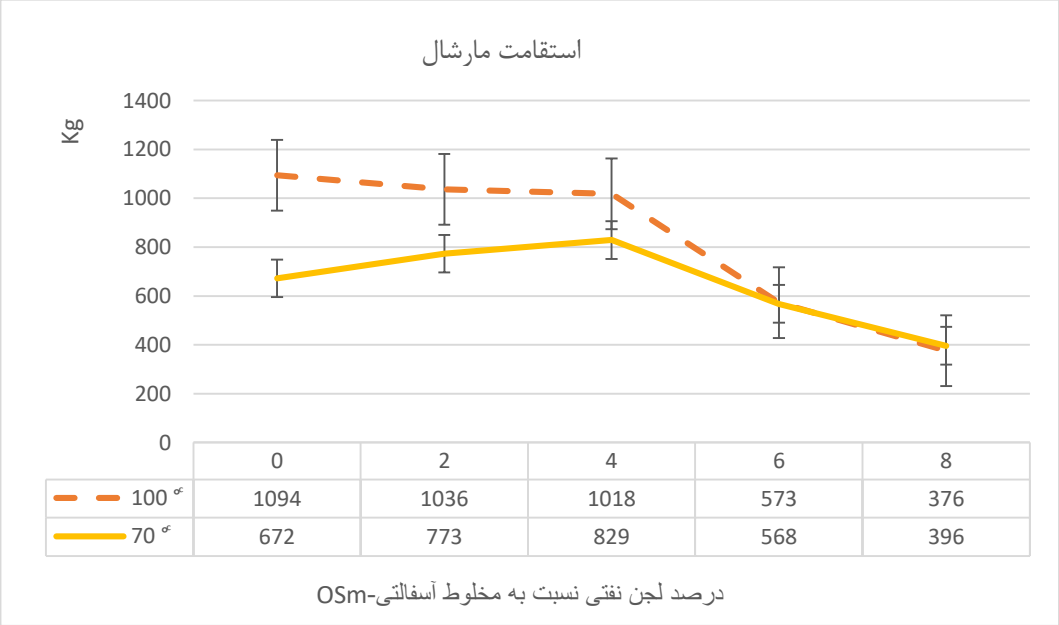
شکل ٦ نمودار وزن مخصوص مخلوط آسفالتی در دماهای مختلف اختلاط



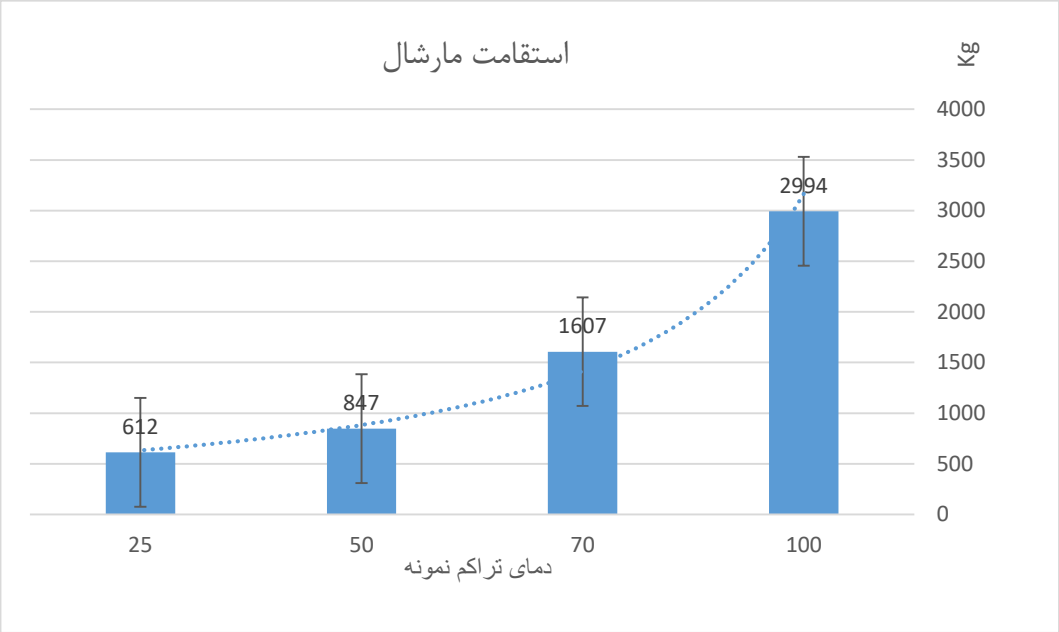
شکل ۷. نمودار نسبت وزن مخصوص مخلوط آسفالتی در دماهای مختلف اختلاط

٤-٢. آزمایش استقامت و روانی مارشال

نتایج آزمایش استقامت مارشال در دمای ٦٠ درجه سلسیوس بر اساس درصدهای مختلف لجن نفتی تعیین شده است و نتایج مطابق شکل ۸ می‌باشد، مطابق نشریه ۳٦۲، استقامت مارشال برای آسفالت سرد در دمای ۲۵ درجه سلسیوس تعیین و مقایسه می‌گردد. در شکل ۹، مقادیر استقامت مارشال در دمای ۲۵ درجه سلسیوس در درصد لجن نفتی بهینه مشخص گردیده است.

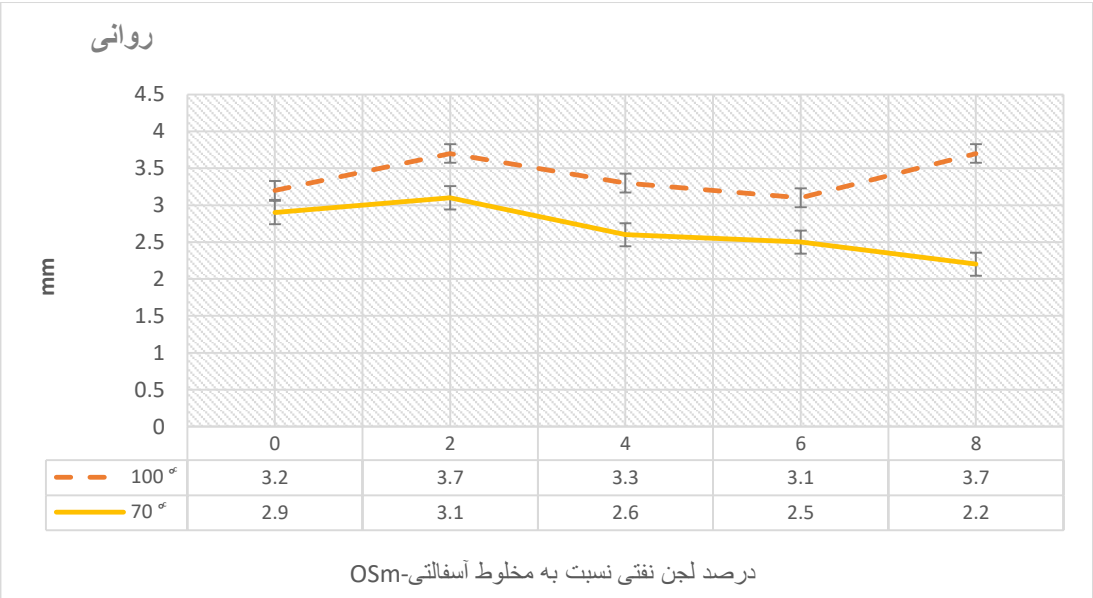


شکل ۸. نتایج آزمایش استقامت مارشال در دمای ٦٠ درجه سلسیوس



شکل ۹. نتایج آزمایش استقامت مارشال در دمای ۲۵ درجه سلسیوس در درصد بهینه لجن نفتی

در مطالعات انجام شده مشخص شده است که با افزایش مقدار تراشه آسفالتی، استقامت مارشال نیز بیشتر می‌شود، به طوری که مقدار آن با ۱۰۰ درصد تراشه آسفالتی تا دو برابر نمونه‌های آسفالتی بدون تراشه می‌باشد (حسین و یانجون، ۲۰۱۲). افزایش مقاومت مارشال در دمای آزمایش ۲۵ درجه سلسیوس می‌تواند به دلیل بیشتر شدن دمای تراکم و تبخیر مواد فرار و ترکیب شدن بیشتر جوان‌ساز با قیر پیر شده باشد. نتایج میزان روانی مخلوط آسفالتی در شکل ۱۰ نمایش داده شده است و مشخصات فنی لازم را در درصد لجن نفتی بهینه برآورد می‌نماید.



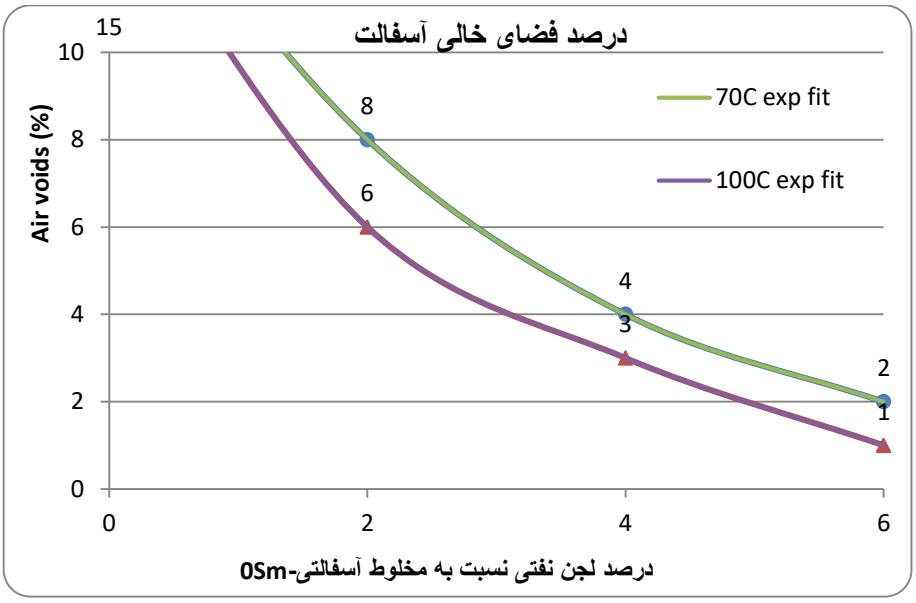
شکل ۱۰. نتایج آزمایش روانی مارشال در دمای ۶۰ درجه سلسیوس

٤-٣. آزمایش درصد فضای خالی آسفالت و تعیین درصد بهینه لجن نفتی

درصد فضای خالی آسفالت مورد استفاده در ساخت محوطه و زمین‌های ورزشی و تفریحی با نوع آسفالت مورد استفاده در روسازی راه و فرودگاه متفاوت است. به طور مثال. در طراحی روسازی راه، معیار درصد فضای خالی مخلوط ۳-۵٪ و برای مخلوط بیندر۳-٦٪ تعیین شده، در حالی که مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده جهت روسازی میادین ورزشی و محوطه‌های بازی و تفریحی به ۲-٤ درصد محدود می‌گردد (انستیتو آسفالت، ۲۰۰۷). که در طراحی آسفالت کاملاً بازیافتی برحسب نوع پروژه باید مد نظر باشد. در این تحقیق، درصد فضای خالی آسفالت جهت طراحی ٤ درصد در نظر گرفته شد.

شکل ۱۱، درصد فضای خالی آسفالت را براساس رابطه (۲) نمایش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دمای تراکم، میزان لجن نفتی به منظور دستیابی فضای خالی طرح، کاهش می‌یابد. به عبارتی، با افزایش میزان لجن نفتی به مخلوط تراشه آسفالتی میزان فضای خالی آسفالت (در دماهای ۷۰ و ۱۰۰ درجه سلسیوس) کم می‌شود. با توجه به مباحث این بخش، درصد بهینه لجن نفتی برای نمونه‌های متراکم شده در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس حدود ۳ درصد و نمونه‌های ۷۰ درجه سلسیوس و کمتر حدود ٤ درصد نسبت به وزن مخلوط آسفالتی تعیین گردید.

$$Va = 100 \times \left(1 - \left(\frac{Gmb}{Gmm}\right)\right) \qquad (۲)$$



شکل ۱۱. درصد فضای خالی آسفالت

٤-٤. آزمایش درصد فضای خالی مصالح سنگی VMA

در زمان تولید مخلوط آسفالتی، وزن مخصوص توده (Gsb) سنگدانه مخلوط به طور معمول برای تعیین فضای خالی مصالح سنگی VMA اندازه‌گیری نمی‌شود، زیرا به آزمایش‌های متعدد و زمان آزمایش طولانی نیاز دارد. در عوض، دستگاه‌های نظارتی از چندین جایگزین برای تعیین VMA مخلوط‌های آسفالتی تولید شده در کارخانه استفاده کرده‌اند (شی و همکاران، ۲۰۲۰). Gsb سنگدانه تراشه آسفالتی استخراج شده را می‌توان برای محاسبه VMA از رابطه (۳) تعیین نمود و در هنگام طراحی و تولید مخلوط استفاده کرد و یا از روابط

محاسباتی نظیر رابطه (٤) برای تعیین Gse به جای Gsb با اصلاح نهایی مقدارVMA بهره گرفت (انستیتو آسفالت، ٢٠١٤).

$$VMA = 100 - \frac{Gmb \times Ps}{Gsb} \quad (٣)$$

$$Gse(Rap) = \frac{100 - Pb(Rap)}{\frac{100}{Gmm(Rap)} - \frac{Pb(Rap)}{Gb(Rap)}} \quad (٤)$$

$Ps(Rap)=$ درصد مصالح سنگی تراشه آسفالتی

$Gmb(Rap)=$ وزن مخصوص تراشه آسفالتی

$Gb(Rap)=$ وزن مخصوص قیر تراشه آسفالتی

$Gse(Rap)=$ وزن مخصوص مؤثر تراشه آسفالتی

$Pb(Rap)=$ درصد قیر تراشه آسفالتی

$Gmm(Rap)=$ وزن مخصوص ماکزیمم تراشه آسفالتی

بر اساس محاسبات انجام شده مطابق روابط (٣) و (٤) نمودار VMA نمونه‌های ساخته شده در درصدهای بهینه لجن نفتی.برای نمونه‌های متراکم شده در دماهای ١٠٠ و ٧٠ درجه سلسیوس به ترتیب ١٧ و ٢٢ درصد تعیین شدند. این مقادیر مشخصات فنی را مطابق ضوابط تأمین می‌نماید.

٤-٥. تعیین نسبت مارشال

جدول ٦، نسبت مارشال در درصد بهینه لجن نفتی را نمایش می‌دهد.

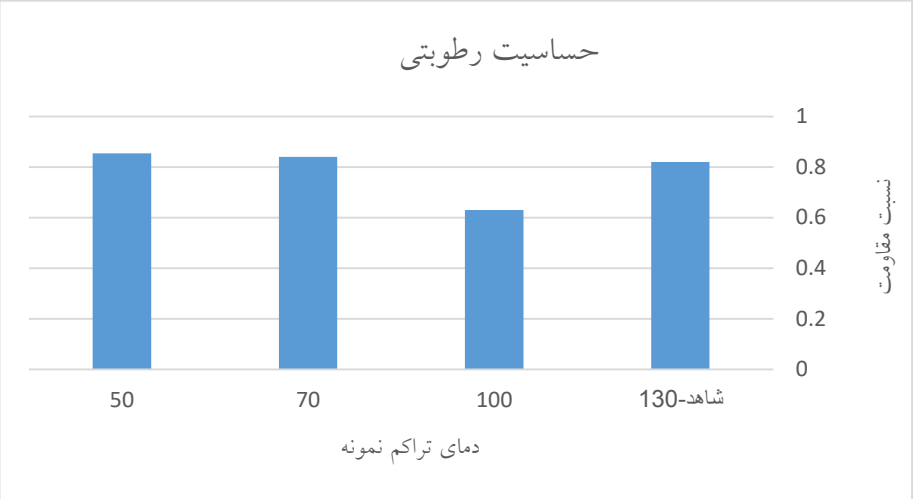
جدول ٦. نسبت مارشال در درصد بهینه لجن نفتی

محدوده مجاز برای ترافیک سنگین N/mm	نسبت مارشال N/mm	روانی mm	استقامت N	دمای تراکم نمونه آسفالتی
٤٠٠٠-٢٠٠٠	٣١٨٩	٢/٦	٨٢٩٠	٧٠ درجه سلسیوس
	٢٩٣٤	٣/٥	١٠٢٧٠	١٠٠ درجه سلسیوس

به طور کلی، طرح اختلاط بهینه باید مقداری از قیر را تعیین کند که پارامترهای مختلف (شامل استقامت، روانی، نسبت مارشال، درصد فضای خالی و...) را در محدوده‌های استاندارد و مشخصات فنی پروژه نگه دارد تا بهترین توازن بین مقاومت، انعطاف‌پذیری و دوام را در روسازی آسفالت فراهم کند. محدوده‌های استاندارد برای مهندسان بسیار حیاتی است. محدوده‌های توصیه‌شده برای نسبت مارشال (Stability/Flow) بر اساس نوع پروژه، حجم ترافیک و شرایط آب و هوایی منطقه به منظور تضمین مقاومت کافی و جلوگیری از تغییرشکل دائمی (شیارافتادگی) تعیین می‌شود. بر اساس مرجع (انجمن جهانی راه [PIARC]، ٢٠٠٦) میزان شیارشدگی آسفالت کاملاً بازیافتی با لجن نفتی کمتر از ٢ میلی‌متر تخمین زده می‌شود.

٤-٦. آزمایش حساسیت رطوبتی

مصالح سنگی تراشه آسفالتی با یک لایه قیر پیر شده اندود می‌شوند. لذا معمولاً حساسیت به رطوبت به دلیل وجود این پوشش در آنها کمتر است و در ترکیب با قیر تازه این پیوند قوی‌تر می‌شود.



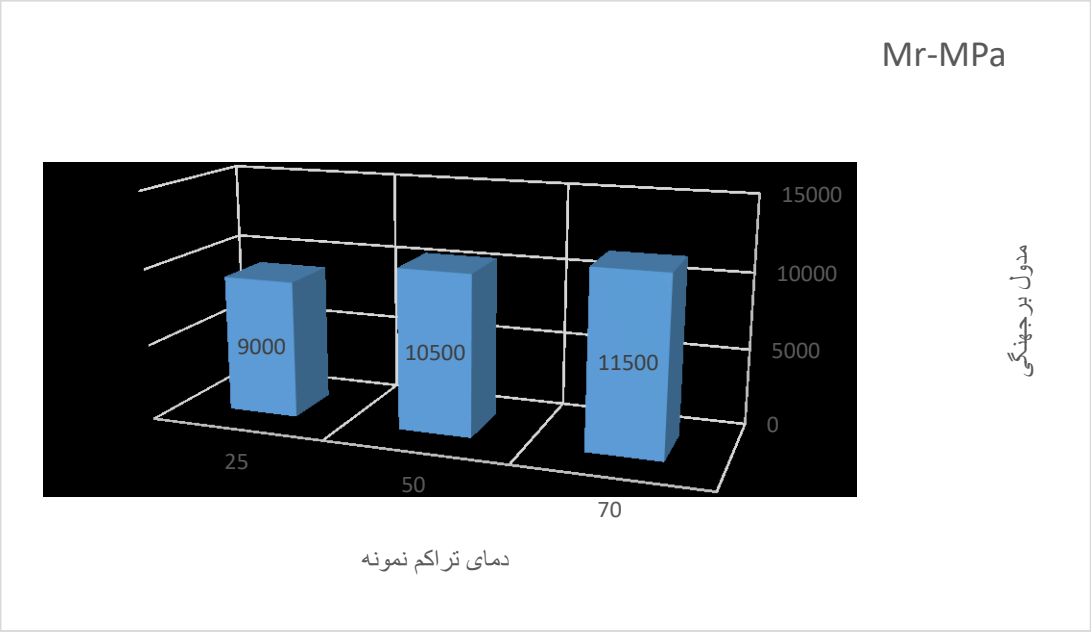
شکل ۱۲. نسبت متوسط ماند مقاومت نمونه‌ها در درصد لجن نفتی بهینه

مطابق ضوابط برای آسفالت داغ نسبت متوسط مقاومت سه نمونه آزمایشگاهی مارشال که ۲٤ ساعت در شرایط مستغرق در داخل آب ٦۰ درجه سلسیوس قرار گرفته باشند به متوسط مقاومت سه نمونه دیگر که ۳۰ تا ٤۰ دقیقه در داخل آب ٦۰ درجه سلسیوس نگهداری شوند، نباید کمتر از ۷۵ درصد باشد. برای آسفالت سرد نیز درصد ماند مقاومت مارشال بعد از ٤ روز نگهداری در آب ۲۵ درجه سلسیوس تعیین می‌شود.

حساسیت رطوبتی برای نمونه‌های ساخته شده در دمای ۱۰۰ و ۱۳۰ در دمای ٦۰ درجه سلسیوس مقایسه گردید و برای نمونه‌های ساخته شده در دمای ۷۰ و ۵۰ در دمای ۲۵ درجه سلسیوس آزمایش شد (شکل ۱۲). کاهش این نسبت در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس احتمالاً مربوط به این است که این آزمایش برای آسفالت داغ تعیین شده است و بخشی از رطوبت مخلوط تراشه و لجن نفتی در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس در آسفالت باقی مانده است.

٤-۷. تخمین مدول برجهندگی و ضریب سازه‌ای مخلوط آسفالتی با لجن نفتی

به دلیل اینکه امکان انجام آزمایش تعیین مدول برجهندگی در همه آزمایشگاه‌های کشور وجود ندارد وجود آزمایش ساده‌تری که امکان انجام آن در آزمایشگاه‌ها باشد، نظیر آزمایش مارشال، مناسب‌تر است. در این راستا، روابطی که بیانگر ارتباط بین مقادیر استحکام مارشال و مدول برجهندگی می‌باشند وجود دارند (شکل ۱۳). نمودار مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی با درصد لجن نفتی بهینه در دمای ۲۵ درجه سلسیوس بر این مبنا ترسیم شده است (سازمان برنامه و بودجه کشور، ۲۰۱٤) مطالعات نشان می‌دهد که با افزایش دما، مقدار مدول برجهندگی به شدت کاهش پیدا می‌کند. این کاهش، شکل یک منحنی را دارد که شکستگی آن در دمای ۲۵ درجه سلسیوس است. به این معنا که وقتی دما به ۲۵ درجه سلسیوس می‌رسد آهنگ کاهش مدول برجهندگی با افزایش دما کاهش پیدا می‌کند. همچنین، این مدول با افزایش درصد، قیر کاهش و با افزایش تراکم بیشتر می‌شود (هاشمی و لطیفی‌نمین، ۲۰۱۱). نتایج نمونه‌های ساخته شده با درصد بهینه لجن نفتی بیانگر این است که ضریب سازه‌ای لایه برای مخلوط آسفالتی متراکم در دماهای ۲۵ تا ۷۰ درجه سلسیوس مطابق نشریه "سازمان برنامه و بودجه کشور، ۲۰۱٤" از ۰/۲۲ تا ۰/۳۵ متغیر می‌باشد. این دو نتیجه (مدول برجهندگی و ضریب سازه‌ای لایه) تخمینی می‌باشند.



شکل ۱۳ . نمودار تخمینی مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی در درصد لجن نفتی بهینه در دمای ۲۵ درجه سلسیوس

٤-٨. آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS)

نتایج حاصل از آزمایش ITS برای مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی (شاهد-بدون لجن نفتی) و نمونه‌های حاوی لجن نفتی در سه دمای تراکم مختلف (۱۰۰ oC، ۷۰ و ۵۰) و در دمای آزمایش (۲۵ °C) در شکل ١٤ ارائه شده است.

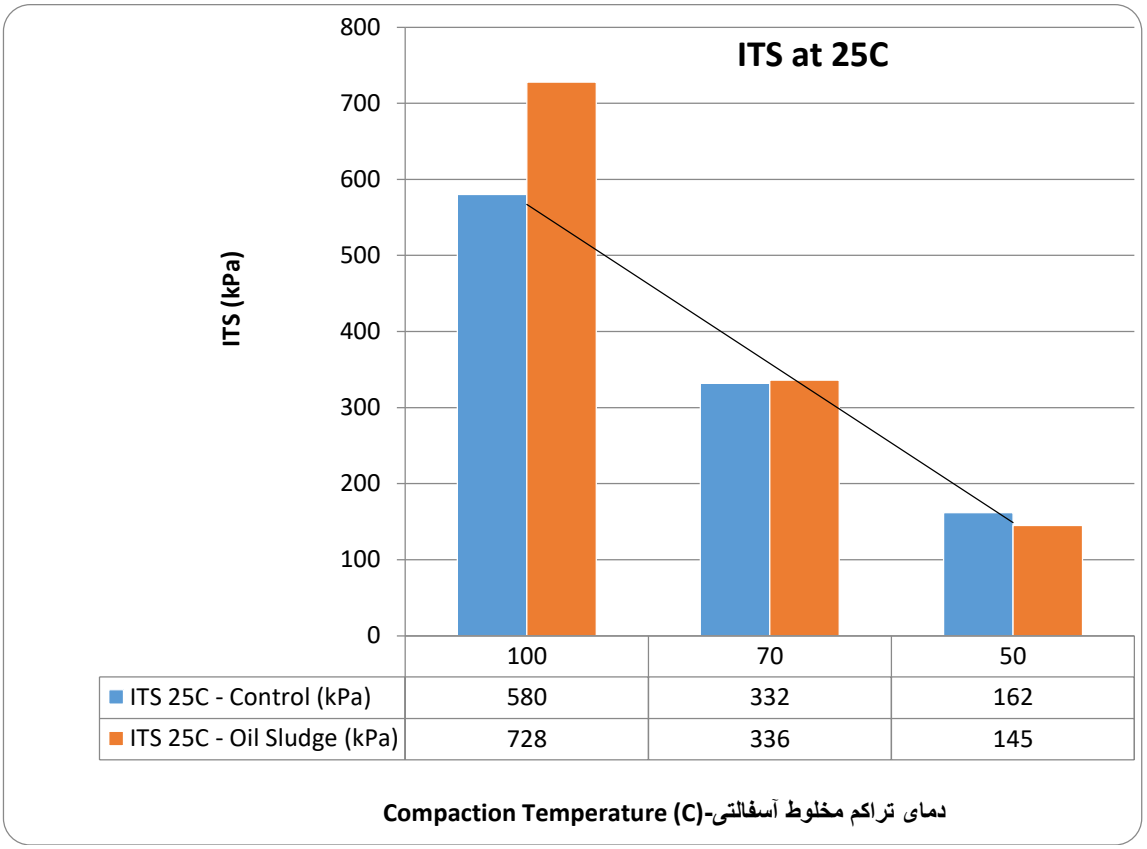
٤-٩. ارزیابی فنی و اجرایی و اقتصادی

برای تولید آسفالت با استفاده از لجن نفتی و تراشه آسفالتی، می‌توان از دستگاه ساخت آسفالت کاملاً بازیافتی سیار (شکل ۱۵) بهره گرفت که می‌تواند هزینه اجرای هر متر مربع لکه‌گیری به ضخامت ۵ سانتی‌متر را بدون احتساب ضریب پیمان نسبت به آسفالت گرم و سرد پاکتی به ترتیب ٦٠ درصد و ۷۸ درصد کاهش بدهد. برخی فرضیات در این مقایسه عبارتند از:

تأمین مصالح: در روش کاملاً بازیافتی، هزینه خرید مصالح صفر در نظر گرفته شده است، زیرا تراشه آسفالتی و لجن نفتی هر دو پسماند محسوب شده و جایگزین مصالح سنگی و قیر تجاری گران قیمت می‌شوند. در مقابل، هزینه اصلی آسفالت سرد پاکتی مربوط به تأمین خود محصول کارخانه‌ای و پاکت است.

حمل و نقل: با استفاده از دستگاه ساخت آسفالت سیار در محل ، هزینه سنگین حمل مصالح از معدن به کارخانه آسفالت و سپس انتقال آسفالت گرم به محل لکه‌گیری حذف شده است. مبلغ ۵۰۰،۰۰۰ ریال صرفاً برای انتقال لجن نفتی و تراشه در نظر گرفته شده است.

ماشین‌آلات: بیشترین سهم هزینه در روش بازیافتی مربوط به کارکرد، سوخت و استهلاک دستگاه سیار بازیافت در محل و کندن احتمالی است. جدول ۷ جهت ارزیابی فنی و اجرایی، مقایسه‌ای بین آسفالت کاملاً بازیافتی این تحقیق با نشریات ٣٦٢، ١٠١ و ٢٣٤ سازمان برنامه و بودجه تهیه شده که نتایج در جدول ۸ آمده است.



شکل ۱۴. نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) در دمای ۲۵ درجه سلسیوس

جدول ۷. خلاصه هزینه‌های لکه‌گیری با آسفالت کاملاً بازیافتی در مقایسه با آسفالت گرم و آسفالت سرد (پاکتی)

شرح آیتم	هزینه تولید، حمل و اجرای آسفالت هر متر مربع لکه‌گیری به ضخامت ۵ سانتی‌متر و بدون احتساب ضریب پیمان		
	آسفالت گرم	آسفالت سرد (پاکتی)	آسفالت بازیافتی (تراشه و لجن)
تأمین مصالح (قیر، مصالح سنگی، مواد افزودنی، پاکت) (ریال)	۵،۲۰۰،۰۰۰	۱۳،۰۰۰،۰۰۰	۰
حمل و نقل (انتقال مصالح به کارخانه و کارگاه) (ریال)	۱،۳۰۰،۰۰۰	۱،۰۰۰،۰۰۰	۵۰۰،۰۰۰
ماشین آلات (تولید، اختلاط، پخش و تراکم) (ریال)	۱،۵۰۰،۰۰۰	۵۰۰،۰۰۰	۲،۰۰۰،۰۰۰
نیروی انسانی و تیم اجرایی لکه‌گیری (ریال)	۶۸۵،۰۰۰	۱،۵۰۰،۰۰۰	۱،۰۰۰،۰۰۰
جمع کل هزینه هر متر مربع (ریال)	۸،۶۸۵،۰۰۰	۱۶،۰۰۰،۰۰۰	۳،۵۰۰،۰۰۰
کاهش هزینه آسفالت بازیافتی نسبت به آسفالت گرم / سرد	≈60 درصد	≈78 درصد	–

جدول ۸ . انطباق یافته‌ها با نشریات فنی۱۰۱، ۲۳٤ و ۳٦۲ سازمان برنامه و بودجه

ملاحظات	خلاصه بررسی نتایج آسفالت کاملاً بازیافتی با لجن و تراشه آسفالتی	آسفالت نیمه‌گرم ۷۰- °C ۱۰۰	آسفالت سرد ۲۵-°C ۵۰
مطالعات آزمایشگاهی	تطابق مشخصات فیزیکی و مقاومتی با روش مارشال برای آسفالت گرم شامل: مقاومت، روانی، درصد فضای خالی آسفالت، فضای خالی مصالح سنگی با الزامات نشریات ۲۳٤ و ۱۰۱	✓	-
	تأمین حداقل درصد ماند مقاومت مارشال بعد از ٤ روز نگهداری در آب ۲۵ درجه سلسیوس	✓	✓
	تأمین حداقل مقاومت مارشال در دمای ۲۵ درجه سلسیوس	✓	✓
اثرات زیست محیطی	کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای نسبت به آسفالت داغ و گرم	✓	✓
	تخریب کمتر محیط‌زیست با کاهش مصرف قیر و مصالح سنگی (استفاده از تراشه آسفالتی و لجن نفتی)	✓	✓
	کاهش آثار نامناسب رها سازی مواد زاید و خطرناک در محیط‌زیست با استفاده مجدد تراشه و لجن نفتی	✓	✓
ملاحظات فنی و اجرایی	امکان تولید با کارخانه آسفالت سرد	X	✓
	امکان تولید با کارخانه آسفالت گرم کشور	✓	✓
	امکان تولید با دستگاه ساخت آسفالت سیار	✓	✓
	امکان استفاده برای لکه‌گیری آسفالت	✓	✓
	امکان اجرا در موقعیت های با دمای محیطی کمتر از ۲۵ °C	✓	-
	امکان استفاده برای بهسازی معابر با ترافیک $(ESALs)<3\times10^6$	✓	-
	امکان استفاده برای پروژه‌های خاص مطابق تعریف نشریه ۳٦۲ نظیر مکان‌های ورزشی و تفریحی(زمین‌های تنیس، پارک‌ها و غیره)	✓	-
ارزیابی اقتصادی	کاهش قابل توجه هزینه‌های تولید،حمل و اجرا نسبت به آسفالت داغ، گرم و سرد پاکتی	✓	✓

- نماد(✓)به معنای تطابق در تمام یا بخشی از بازه دمایی مذکور است.
- نماد (–) به معنای اینکه پارامتر/ موضوع در نشریه مربوطه تعریف نشده، در این پژوهش اندازه‌گیری نشده، یا نیازمند آزمایش‌های تکمیلی در مراحل بعدی است.
- نماد (X) یعنی در تمام بازه دمایی امکان انجام آن وجود ندارد.



شکل ۱۵. دستگاه ساخت آسفالت کاملاً بازیافتی سیار

٤-۱۰. بحث و تحلیل

بر اساس نتایج، این تحقیق می‌تواند به عنوان راهنمای استفاده از ۱۰۰٪ تراشه آسفالتی و لجن نفتی بدون استفاده از قیر، برای آسفالت‌های نیمه‌گرم و سرد باشد، نتایج و تحلیل در ادامه آمده است:

- نتایج نشان می‌دهد که در دماهای سرد (۲۵ و ۵۰ درجه)، لجن نفتی عمدتاً نقش روان‌کننده مکانیکی را ایفا می‌کند. در حالی که در رژیم نیمه‌گرم (۷۰ و ۱۰۰ درجه)، افزایش دما موجب فعال‌سازی حرارتی قیر پیرشده RAP و نفوذ مؤثر لجن نفتی در ماتریکس چسباننده شده باشد و بهبود چشمگیر تراکم و خواص مقاومتی را رقم می‌زند
- آزمایش مقاومت مارشال در دمای ٦۰ درجه سلسیوس با درصدهای مختلف لجن نفتی برای نمونه های متراکم شده در دماهای ۱۰۰ و ۷۰ درجه سلسیوس تعیین گردید. در درصد بهینه لجن نفتی، مقاومت مارشال در دماهای ۱۰۰، ۷۰، ۵۰ و ۲۵ درجه سلسیوس نیز اندازه‌گیری شد و مشخص گردید ساخت مخلوط آسفالتی مطابق مشخصات فنی لازم امکان‌پذیر است. بر اساس مقاومت مارشال نمونه‌ها، مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی در دمای ۲۵ درجه سلسیوس بر اساس نمودار تخمین زده شد و ضریب سازه‌ای لایه مشخص گردید.
- بر اساس نتایج آزمایش استقامت مارشال در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، مخلوط آسفالتی کاملاً بازیافتی ساخته‌شده با ۱۰۰ درصد تراشه آسفالتی و درصد بهینه لجن نفتی، عملکرد مقاومتی قابل قبولی از خود نشان داد. افزایش دمای ساخت و تراکم موجب افزایش استقامت مارشال شد که این امر به بهبود اختلاط لجن نفتی با قیر پیرشده، کاهش کندروانی قیر، افزایش تراکم‌پذیری و کاهش فضای خالی مخلوط نسبت داده می‌شود. بنابراین، این مخلوط نسبت به دمای ساخت حساس بوده و استفاده از دمای نیمه‌گرم، به‌ویژه در محدوده ۷۰ تا ۱۰۰ درجه سلسیوس، می‌تواند باعث بهبود عملکرد مکانیکی آن شود.
- در تمامی نمونه‌ها، افزایش دمای تراکم از ۵۰۰ C به ۱۰۰۰ C منجر به رشد چشمگیر مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) مخلوط‌ها شده است. برای مثال در دمای آزمایش۲۵۰C، مقاومت نمونه حاوی لجن نفتی از ۱٤۵ کیلوپاسکال (در دمای تراکم ۵۰ oC به ۷۲۸ کیلوپاسکال (در دمای تراکم ۱۰۰ o C) رسیده است. این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده

اهمیت انرژی گرمایی در بهبود اختلاط لجن نفتی با قیر پیر شده مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم است. در دماهای تراکم پایین، لجن نفتی به دلیل عدم اختلاط کامل و کاهش ویسکوزیته، قادر به تشکیل فیلمِ چسباننده بلافاصله روی سنگدانه‌ها نبوده و بیشتر در ابتدا نقش یک ماده روان‌کنندهِ را بازی می‌کند و باید منتظر زمان عمل‌آوری لازم در دماهای سرویس بود.

۵. نتیجه‌گیری

با بررسی‌های انجام شده، مخلوط آسفالتی ساخته شده از ۱۰۰ درصد تراشه آسفالتی و لجن نفتی می‌تواند در عملیات تعمیر و نگهداری و بهسازی معابر مورد استفاده قرار گیرد. با افزایش دما در زمان ساخت و تراکم، کیفیت این مخلوط بهبود می‌یابد. استفاده از ماشین‌های سیار اختلاط با حرارت‌دهی تا دمای آسفالت نیمه‌گرم می‌تواند محصولی با کیفیت و اقتصادی با کارایی مورد نظر را ارائه دهد

لجن نفتی، یک محصول ضایعاتی پالایشگاه‌های نفتی، به‌عنوان اصلاح‌کننده قیر در مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شود. این ماده باعث: کاهش ویسکوزیته و بهبود روان‌پذیری قیر و چسبندگی مصالح تراشه آسفالتی نیمه‌گرم و سرد می‌شود؛ هرچند نمی‌توان لجن نفتی را مشابه یک جوان‌ساز تجاری فرض کرد، اما با توجه به هزینه‌های بالای فرآیندهای بازیافت و دفع لجن نفتی که به تجهیزات پیشرفته نیاز دارد، آسفالت با ۱۰۰ درصد تراشه آسفالتی و لجن نفتی گام مهمی در استفاده از مواد بازیافتی و افزودنی‌های جایگزین و مدیریت صحیح لجن نفتی در صنعت آسفالت می‌باشد و به کاهش هزینه‌ها در بهسازی معابر کمک می‌کند و مسیرهای جدیدی برای توسعه پایدار در صنعت راه‌سازی فراهم می‌آورد. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد این مخلوط‌آسفالتی بر اساس نتایج مقاومت مارشال و مقاومت کششی غیرمستقیم و برآورده شدن حداقل الزامات آیین نامه‌ای از منظر حجمی و مقاومت مکانیکی پتانسیل لازم برای عملیات لکه‌گیری، نگهداری و بهسازی معابر با ترافیک سبک تا متوسط کمتر از 3×10^6 محور استاندارد هم ارز را داراست؛ با این حال، تأیید نهایی عملکرد در شرایط واقعی مستلزم آزمون‌های عملکردی و ارزیابی میدانی است

۵-۱. پژوهش‌های آتی

به منظور ارزیابی دقیق‌تر عملکرد مکانیکی و دوام بلندمدت این نوع مخلوط آسفالتی، نویسندگان در حال حاضر مشغول انجام آزمایش‌های تکمیلی، از جمله آزمایش خمش نیم‌دایره‌ای (SCB) برای بررسی مقاومت در برابر ترک‌خوردگی و آزمایش‌های ارزیابی پتانسیل شیارشدگی می‌باشند که نتایج آن در مطالعات آتی ارائه خواهد شد.

٦. تقدیر و قدردانی

نویسندگان لازم می دانند بدینوسیله از ریاست وکارکنان محترم پالایشگاه نفت کرمانشاه به دلیل همکاری صمیمانه و کمک به بهبود این فناوری تشکر و قدردانی نمایند.

۷. تأییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می‌شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده‌اند.

۸. مشارکت‌های نویسندگان

همه نویسندگان در تهیه مقاله مشارکت داشته‌اند.

۹. منابع مالی

منابع مالی مورد استفاده توسط نویسندگان تأمین شده است.

۱۰. تعارض منافع

نویسندگان مقاله اعلام می‌کند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

۱۱. مراجع

Aitkaliyeva, G., Yelubay, M., Ismailova, A., et al. (2022). “Oil sludge and methods of its disposal”. Pol. J. Environ. Stud., 31(6): 5563-5569. https://doi.org/10.15244/pjoes/152349

Aitkaliyeva, G., Ashimova, S., Baidullayev, I., et al. (2025). “Oil sludge as a rejuvenator for aged bitumen: Structural and thermal effect”. Mater., 18(2): 263.

Asphalt Institute. (2007). “The asphalt handbook (MS-4)”. 7th ed., Asphalt Institute.

Asphalt Institute. (2014). “Asphalt mix design methods (MS-2)”. 7th ed., Asphalt Institute.

Dalhat, M. A., Osman, S. A., Mu’azu, N. D. & Alagha, O. (2022). “Utilization of oil sludge as rejuvenator in hot-mix-asphalt containing reclaimed asphalt concrete”. Constr. Build. Mater., 338: 127620.

El-Shorbagy, A. M., El-Badawy, S. M. & Gabr, A. R. (2019). “Investigation of waste oils as rejuvenators of aged bitumen for sustainable pavement”. Constr. Build. Mater., 220: 228-237. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.18.

Hasan, M. A., Kamal, R. S., Farag, R. K. & Abdel-Raouf, M. E. (2024). “Petroleum sludge formation and its treatment methodologies: A review”. J. Pet. Sci. Eng.

Hassan, H. F., Taha, R., Al-Rawas, A. A. & Al-Shandoudi, B. (2005). “Laboratory evaluation of hot-mix asphalt concrete containing petroleum sludge”. J. Mater. Civ. Eng., 17(4): 487-493. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2005)17:4(487)

Heath, G. M., Heath, R. A. & Dundr, Z. (2004). “Paraffinic sludge reduction in crude oil storage tanks through the use of shearing and resuspension”. Acta Montan. Slovaca, 9(3): 184-188.

Hussain, A. & Yanjun, Q. (2012). “Laboratory evaluation of asphalt mixtures containing various percentage of reclaimed asphalt pavement”. Asian J. Nat. Appl. Sci., 1(2): 156-163.

Institute of Standards and Industrial Research of Iran. (2016). “Bitumen and its derivatives”. 1st ed., Emarat Pars Publications. [In Persian]

Memon, A. M., Sutanto, M. H., Memon, Z. A., et al. (2024). “Valorization of petroleum sludge as rejuvenator for recycled asphalt binder and mixture”. Case Stud. Constr. Mater., 20: e02987. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02987

National Cooperative Highway Research Program. (2000). “Recommended use of reclaimed asphalt pavement in the Superpave mix design method”. NCHRP Web Document 30, Transportation Research Board.

Norouzi, M., Ghahri Saremi, S. & Fotourehchi, N. (2022). “The use of petroleum sludge and natural bitumen in improving bitumen quality”. Pet. Res., 32(130). [In Persian]

Plan and Budget Organization of Iran. (2011). “Iran asphalt pavement code”. Publication No. 234 (1st rev.), Plan and Budget Organization of Iran. [In Persian]

Plan and Budget Organization of Iran. (2014). “Guideline for design, construction and maintenance of cold asphalt”. Publication No. 362, Road, Housing and Urban Development Research Center. [In Persian]

Sukhija M., & Saboo N. (2021). “A comprehensive review of warm mix asphalt mixtures-laboratory to field”. Constr. Build. Mater., 274: 121781. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121781

U.S. Environmental Protection Agency. (2000). “Solidification/stabilization use at Superfund sites”. Report No. EPA-542-R-00-010.

U.S. Environmental Protection Agency. (2015). “General air quality permit for new or modified minor source hot mix asphalt plants in Indian Country”. http://www.epa.gov/air/tribal/tribalnsr.html

World Road Association (PIARC). (2006). “High rutting resistant asphalt mixtures”. Transport. Res. Instit. [In Persian]

Xie, Z., Taylor, A. J. & Kim, S. (2020). “Evaluation of different VMA estimation methods for asphalt mixtures containing RAP”. J. Mater. Civ. Eng., 32(6):04020126. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003212

Zaumanis, M., Mallick, R. B. & Frank, R. (2014). “Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures”. Constr. Build. Mater., 71: 538-550. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.07

Zhou, F. and Karki, P. (2019). “Rejuvenator laboratory characterization and field performance”. Texas A&M Transport. Inst.

Ziari, H. & Moniri, A. (2018). “Improving the functional properties and production of recycled asphalt mixtures using fiber modifiers for urban and rural roads”. Iran University of Science and Technology. [In Persian]