



Semnan University



## Research Article

## Impact of RPO and WEO Rejuvenators in Different Gradations of Reclaimed Asphalt Pavement on Deformation Strength of Stone Mastic Asphalt Mixtures

Alireza Hadi<sup>a\*</sup> , Mansour Fakhri<sup>a</sup> , Morteza Ghanbari<sup>a</sup>

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

## PAPER INFO

**Paper history:**

Received: 2024-11-19

Revised: 2024-12-30

Accepted: 2025-01-03

**Keywords:**

Waste engine oil (WEO);  
Stone mastic asphalt (SMA);  
Reclaimed asphalt pavement -  
(RAP);  
Rutting;  
Kim Test.

## ABSTRACT

The use of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in Stone Mastic Asphalt (SMA) mixtures offers environmental and economic advantages. However, incorporating RAP into SMA can introduce challenges related to rutting, particularly under heavy traffic and high temperatures. This study investigates the influence of different RAP gradations (fine and coarse) and percentages (0%, 15%, and 30%) on the performance of SMA mixtures. Additionally, the effects of waste engine oil (WEO) and rubber process oil (RPO) on the penetration, softening point, bitumen bleeding, and resistance to deformation of RAP-modified SMA mixtures were examined. Results indicated that increasing RAP content directly decreased bitumen bleeding. The resistance to deformation ( $S_D$ ) value was higher in mixtures containing fine RAP due to the uniform distribution of smaller particles and increased surface area, which enhanced bitumen-aggregate bonding and reduced vertical deformation. Conversely, coarse RAP, owing to its more robust structure, exhibited a higher capacity to withstand applied loads, resulting in increased maximum resistance. The combination of these two mechanisms provided nearly equal performance in terms of ultimate strength. Furthermore, WEO exhibited a positive effect, with an average improvement of 11.1% compared to RPO, which could be attributed to the chemical and structural properties of WEO that enhance bitumen-aggregate cohesion and bonding in the presence of RAP.

\* Corresponding author

E-mail address: [iamalirezahadi@gmail.com](mailto:iamalirezahadi@gmail.com)

**How to cite this article:** Hadi, A. , Fakhri, M. and Ghanbari, M. (2025). Impact of RPO and WEO Rejuvenators in Different Gradations of Reclaimed Asphalt Pavement on Deformation Strength of Stone Mastic Asphalt Mixtures. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 10(4), 51-73.

<https://doi.org/10.22075/jtie.2025.35987.1702>

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



Semnan University

## مجله زیر ساخت های حمل و نقل

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

شاپا: 2821-0549



مقاله پژوهشی

# تأثیر جوانسازهای RPO و WEO در دانه‌بندی‌های مختلف تراشه آسفالتی احیا شده بر مقاومت تغییر شکل مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای

علیرضا هادی<sup>۱\*</sup>، منصور فخری<sup>۱</sup>، مرتضی قنبری<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

### اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۲۹

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۱۰

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۱۴

### واژگان کلیدی:

روغن موتور ضایعاتی،  
آسفالت با استخوان‌بندی-  
سنگدانه‌ای،  
تراشه آسفالت بازیافتی،  
شیارشدگی،  
آزمون کیم.

### چکیده

در حالی که استفاده از روسازی آسفالت احیا شده (RAP) موجب مزایای زیست‌محیطی و صرفه‌جویی در هزینه‌ها می‌شود، کاربرد این ماده در آسفالت ماستیک سنگی (SMA) می‌تواند منجر به چالش‌های مربوط به شکست شیارها، به‌ویژه در ترافیک سنگین و دماهای زیاد شود. در نتیجه، این استفاده نیازمند بررسی دقیق ویژگی‌های سنگدانه، به‌خصوص بررسی تأثیرات دانه‌بندی تراشه‌های آسفالتی احیا شده و طراحی مخلوط‌های با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای جهت کاهش تأثیر خرابی شیارشدگی است. در این مطالعه، تراشه‌های آسفالت بازیافتی (RAP) به عنوان جایگزین سنگدانه در دو دانه‌بندی متفاوت ریزدانه و درشت‌دانه با درصد‌های مختلف (صفر، ۱۵ و ۳۰ درصد) در مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای استفاده شده است. همچنین، تأثیر استفاده از روغن موتور ضایعاتی (WEO) یا روغن فرآیند لاستیک (RPO) در درجه نفوذ، نقطه نرمی، میزان ریزش قیر و مقاومت در برابر تغییر شکل مخلوط‌های حاوی تراشه‌های آسفالتی بازیافتی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمون ریزش قیر نشان داد که افزایش درصد RAP در مخلوط‌ها به طور مستقیم به کاهش ریزش قیر منجر شد. در نهایت، عدد مقاومت در برابر تغییر شکل ( $S_D$ ) در مخلوط‌های حاوی RAP ریزدانه با توزیع یکنواخت ذرات کوچک‌تر و مساحت سطح بیشتر، موجب بهبود پیوند قیر و سنگدانه‌ها و کاهش تغییر شکل عمودی شد. در حالی که RAP درشت‌دانه به دلیل ساختار مستحکم‌تر، توانایی بیشتری در تحمل نیروهای وارده داشت و منجر به افزایش حداکثر مقاومت مخلوط گردید. ترکیب این دو مکانیزم بهبود عملکردی تقریباً برابر در مقاومت نهایی را ارائه کرد. همچنین، تأثیر مثبت WEO با میانگین بهبود ۱۱/۱٪ در مقایسه با RPO مشاهده شد که می‌تواند به دلیل خواص شیمیایی و ساختاری WEO باشد که انسجام و پیوندهای قیر و سنگدانه‌ها را در حضور RAP تقویت می‌کند.

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: [iamalirezahadi@gmail.com](mailto:iamalirezahadi@gmail.com)

استناد به این مقاله: هادی، علیرضا، فخری، منصور و قنبری، مرتضی. (۱۴۰۳). تأثیر جوانسازهای RPO و WEO در دانه‌بندی‌های مختلف تراشه آسفالتی

احیا شده بر مقاومت تغییر شکل مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای. مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، ۱۰(۴)، ۵۱-۷۳

<https://doi.org/10.22075/jtie.2025.35987.1702>

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

## ۱. مقدمه

خرابی‌های روسازی از مهمترین مشکلاتی است که عملکرد و ایمنی راه‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند (فرناندز و همکاران، ۲۰۱۹). این خرابی‌ها به عوامل مختلفی مانند بارهای ترافیکی، شرایط جوی، ویژگی‌های مواد سازنده روسازی و نحوه نگهداری آنها بستگی دارند (خیری و همکاران، ۲۰۲۳). شیارشدگی یکی از مهم‌ترین خرابی‌های روسازی است که به طور مستقیم بر ایمنی و کیفیت رانندگی تأثیر دارد (آیزاکس و همکاران، ۲۰۱۵؛ لینگ و باهیا، ۲۰۲۰). این خرابی به علت تکرار بارگذاری چرخ‌های وسایل نقلیه، به‌ویژه وسایل نقلیه سنگین، در طول زمان رخ می‌دهد (گو و همکاران، ۲۰۲۲؛ کیم و همکاران، ۲۰۱۳). شیارهای ایجاد شده در مسیر حرکت خودرو باعث ناهمواری سطح روسازی و جمع شدن آب شده که ایمنی و راحتی رانندگان را کاهش می‌دهد. وجود خرابی شیارشدگی نشان‌دهنده ضعف در طراحی روسازی یا مواد به‌کار رفته است (عبدالکریم و البیاتی، ۲۰۲۲). این ضعف اگر در مراحل اولیه شناسایی و ترمیم نشود، منجر به تخریب کلی روسازی و افزایش قابل توجه هزینه‌های تعمیر و نگهداری راه‌ها می‌شود.

برای جلوگیری از شیارشدگی، استفاده از مخلوط‌های آسفالتی با مقاومت بالا، بهبود روش‌های تراکم و اجرای روسازی و همچنین نگهداری صحیح و مداوم راه‌ها اهمیت بسیاری دارد (پان و همکاران، ۲۰۲۳). مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگی (SMA) به دلیل دوام زیاد و مقاومت مناسب در برابر شیارشدگی به عنوان یکی از کارآمدترین روسازی‌ها مورد توجه ویژه مهندسين ساخت و ساز قرار گرفته است (ناصر و همکاران، ۲۰۲۳؛ زانگوبینیا و همکاران، ۲۰۲۳). در این نوع مخلوط‌ها، سنگدانه‌های درشت با دانه‌بندی باز به عنوان اسکلت اصلی عمل کرده و بارهای وارده را به طور مستقیم به یکدیگر منتقل می‌کنند (شینده، ۲۰۲۳). این ساختار، باعث افزایش مقاومت مخلوط در برابر تنش‌های

ناشی از ترافیک سنگین و تغییرات دمایی شده و در نتیجه، طول عمر رویه را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد (باران و همکاران، ۲۰۲۲؛ صبحی و همکاران، ۲۰۲۲). با وجود همه مزایای ذکر شده این مخلوط‌ها در مقایسه با مخلوط‌های آسفالتی داغ، نیازمند استفاده از مصالح سنگی کاملاً شکسته، درصد قیر بیشتر و کاربرد افزودنی‌های دیگر است (کتو، ۲۰۲۱؛ موری و همکاران، ۲۰۲۳). با توجه به عوامل مذکور، استفاده از مخلوط SMA در مقایسه با مخلوط‌های بتن آسفالتی موجب افزایش تقریباً ۲۰ درصدی هزینه‌های اقتصادی خواهد بود (کتو، ۲۰۲۱).

روسازی آسفالت بازیافتی (RAP) به دلیل مقاومت زیاد در برابر تغییرشکل‌های دائمی و تحمل بارهای ترافیکی سنگین، همچنین به دلیل مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی، به طور گسترده‌ای در تولید آسفالت ماستیک سنگی (SMA) مورد استفاده قرار می‌گیرد (آدیمن و همکاران، ۲۰۲۳؛ یورگنسن و همکاران، ۲۰۲۲؛ رامیچک و همکاران، ۲۰۲۳). مطالعات نشان داده‌اند که می‌توان مقادیر زیادی از RAP را در هر دو لایه رویه و آستر آسفالت با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای استفاده کرد، بدون اینکه تأثیر قابل توجهی بر پایداری مخلوط یا اتصال آن با مواد جدید ایجاد شود (الشمایله و همکاران، ۲۰۲۲؛ گیلارد و همکاران، ۲۰۲۲؛ کریم و عابد، ۲۰۲۳). طی مطالعه تساکوماکی و پلاتی (۲۰۲۴) مشخصات استاندارد ۱۴ کشور در مورد حداکثر حد مجاز برای محتوای RAP در هر نوع لایه آسفالت ارائه شده است. این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از روسازی آسفالت احیا شده (RAP) در لایه رویه آسفالت، از جمله آسفالت ماستیک سنگی، در حال حاضر به حدود ۳۰ درصد در سطح جهانی محدود شده است.

راج و رامش (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای، با کاربرد صفر تا ۴۰ درصد تراشه آسفالتی جایگزین سنگدانه طبیعی، به این نتیجه رسیدند که به‌کارگیری تا ۳۰ درصد RAP در

روسازی‌هایی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای، منجر به افزایش مقاومت در برابر تغییرات رطوبتی، کاهش عمق شیارهای ناشی از ترافیک و افزایش مدول ارتجاعی می‌شود (راج و رامش، ۲۰۲۴) نتایج چایتانیا و همکاران (۲۰۱۵) نیز نشان می‌دهد که جایگزینی تا ۳۵ درصد مواد آسفالتی بازیافتی، منجر به افزایش قابل توجه پارامترهای مکانیکی همچون مدول الاستیسیته (سفتی) و مقاومت در برابر خستگی و به طور غیرمستقیم سبب افزایش مقاومت در برابر ایجاد شیار در سطح روسازی می‌شود (آل دوغایشی و همکاران، ۲۰۲۲). همچنین، پرادیومنا و همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند که مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۲۰٪ RAP مقاومت شیارشدگی بهتری نسبت به مخلوط‌های بکر به دلیل چسبندگی RAP سفت‌تر نشان می‌دهند، که منجر به کاهش تغییرشکل تحت بارگذاری مکرر می‌شود.

دانه‌بندی به طور قابل توجهی بر خواص مکانیکی، دوام و قابلیت کاهش نویز آسفالت ماستیک سنگی (SMA) تأثیر می‌گذارد (گاردزیچک و همکاران، ۲۰۲۰؛ عرفان و همکاران، ۲۰۱۹). دانه‌بندی بهینه سنگدانه برای دستیابی به تماس سنگ با سنگ ضروری است. این امر در ظرفیت حمل بار و مقاومت در برابر شیار شدن تأثیر به‌سزایی دارد (هیزل و همکاران، ۲۰۱۹؛ کیو و لوم، ۲۰۰۶). اندازه دانه‌های RAP می‌تواند بر همکنش بین قیر RAP و قیر بکر را تغییر دهد و بر خواص مختلف آسفالت تأثیر بگذارد. ذرات درشت‌تر می‌توانند مخلوط سفت‌تری ایجاد کنند. (خبیری و صبوحی، ۲۰۲۳؛ فخری و همکاران، ۲۰۲۴). در حالی که افزایش سفتی می‌تواند در مقاومت در برابر تغییرشکل و شیار شدن مفید باشد. همچنین، باعث می‌شود که مخلوط بیشتر تحت تنش حرارتی یا خستگی در معرض ترک خوردن قرار گیرد و موجب ضرورت استفاده از جوانساز در مخلوط‌های حاوی RAP می‌شود (حافظ و همکاران، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۵؛ لیو و همکاران، ۲۰۱۷). در حالی که دانه‌های ریزتر

می‌توانند کارایی و ترکیب قیر را بهبود بخشند، گاهی اوقات می‌توانند به مخلوط نرم‌تری منجر شوند. این ممکن است مقاومت آسفالت در برابر شیار شدن به خصوص در شرایط دمای زیاد یا در ترافیک سنگین را کاهش دهد (کوماری و همکاران، ۲۰۱۸؛ وانگ و همکاران، ۲۰۲۳). البته استفاده از دانه‌های RAP ریزتر معمولاً دمای اختلاط پایین‌تری نیاز دارد زیرا افزایش سطح ذرات ریزتر به فعال‌سازی مؤثرتر قیر پیر شده کمک می‌کند. این امر می‌تواند میزان جوانساز مورد نیاز، مصرف انرژی جهت تولید آسفالت و اثرات زیست‌محیطی را کاهش دهد (الغرایبی و الحمیدادی، ۲۰۲۱؛ سینگ و همکاران، ۲۰۱۸).

در حالی که استفاده از روسازی آسفالت احیا شده (RAP) موجب مزایای زیست‌محیطی و صرفه‌جویی در هزینه‌ها می‌شود، کاربرد این ماده در آسفالت ماستیک سنگی (SMA) می‌تواند منجر به چالش‌های مربوط به شکست شیارها، به ویژه در ترافیک سنگین و دماهای زیاد شود. در نتیجه، این استفاده نیازمند بررسی دقیق ویژگی‌های سنگدانه، به‌خصوص بررسی تأثیرات دانه‌بندی تراشه‌های آسفالتی احیا شده و طراحی مخلوط‌های با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای جهت کاهش تأثیر خرابی شیارشدگی است.

در این مطالعه تراشه‌های آسفالت بازیافتی (RAP) به عنوان جایگزین سنگدانه در دو دانه‌بندی متفاوت ریزدانه و درشت‌دانه با مقادیر مختلف (صفر، ۱۵ و ۳۰ درصد) در مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای استفاده شده است. همچنین، تأثیر استفاده از روغن موتور ضایعاتی (WEO) یا روغن فرآیند لاستیک (RPO) به عنوان جوانساز در مقاومت در برابر تغییرشکل مخلوط‌های حاوی تراشه‌های آسفالتی بازیافتی مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲. مواد و مصالح مصرفی

در این بخش، با مشخصات فیزیکی هر یک از انواع مصالح استفاده شده، از جمله سنگدانه‌ها، قیر، تراشه آسفالت بازیافتی، الیاف و جوانساز آشنا می‌شویم. همچنین، نحوه کاربرد و آماده‌سازی هر یک از این مواد به طور کامل شرح داده شده است.

### ۱-۲. مشخصات سنگدانه

سنگدانه‌های به‌کاررفته در ساخت مخلوط‌های آسفالتی این پژوهش از نوع مصالح سنگی آهکی انتخاب شده‌اند. کیفیت این مصالح سنگی مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج ویژگی‌های آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. در آسفالت‌های با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای، با توجه به درصد بالای استفاده از فیلر، نوع و خصوصیات فیلر نقش مهمی در میزان مقاومت مخلوط آسفالتی خواهد داشت.

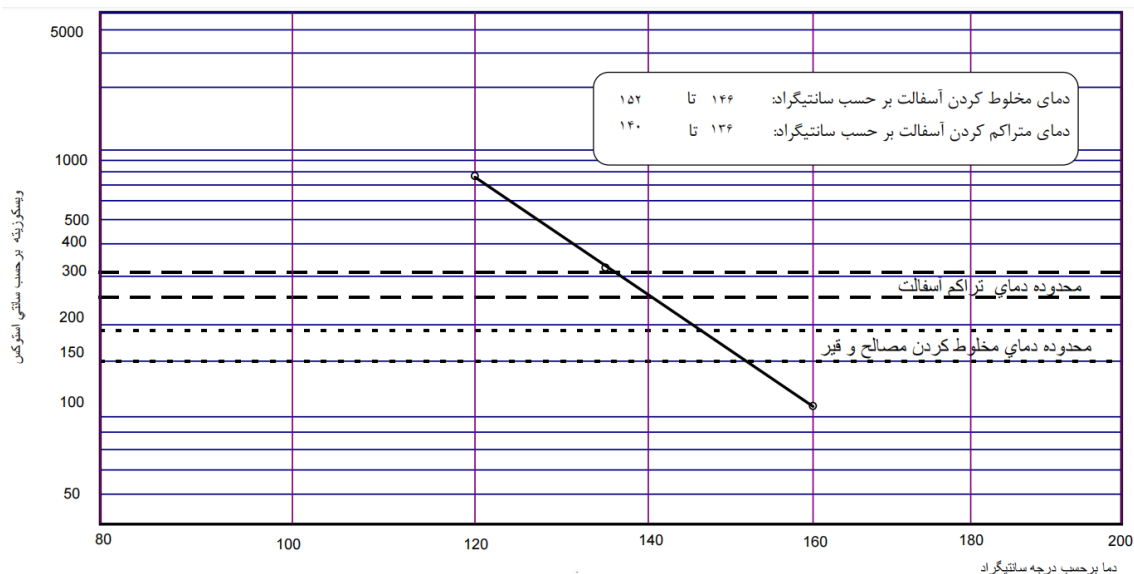
در این پژوهش، از پودر سنگ آهک به‌عنوان فیلر استفاده شد.

### ۲-۲. مشخصات قیر

قیر استفاده شده در این مطالعه از نوع قیر خالص ۷۰-۶۰ می‌باشد. به همین منظور، ویسکوزیته قیر خالص در سه دمای مختلف ۱۲۰، ۱۳۵ و ۱۶۰ درجه سلسیوس اندازه‌گیری شد. سپس با رسم نمودار تغییرات ویسکوزیته قیر نسبت به دما، همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده، محدوده دمای مناسب برای تراکم و اختلاط مخلوط آسفالتی تعیین گردید. نمونه‌های مخلوط آسفالتی برای انجام آزمایش‌های مرتبط با طرح اختلاط، در این دماها مخلوط و فشرده شدند. سایر آزمایش‌های مورد نیاز روی نمونه قیر انجام گرفته و نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات مصالح سنگی مصرفی

نتایج	بازه استاندارد	شماره استاندارد	آزمایش مورد نیاز دانه‌های سنگی
۶۳	$\leq 70\%$	AASHTO-T176	ارزش ماسه‌ای
۲۴٪	$\geq 30\%$	AASHTO-T96	افت وزنی در برابر سایش به روش لوس آنجلس
۱۰۰٪	۹۰-۱۰۰	ASTM-D3625	درصد شکستگی مصالح روی الک شماره ۴ در یک جهت
۹۹٪	$\leq 85\%$	ASTM-D3625	درصد شکستگی مصالح روی الک شماره ۴ در دو جهت
بیش از ۹۵	$\leq 90\%$	ASTM-D3625	درصد اندود قیر به مصالح سنگی
۲۲	$\geq 40\%$	BS-812	درصد تطویق
۲۶	$\geq 40\%$	BS-812	درصد تورق
۴۱	$\leq 36\%$	ASTM-C1252	گوشه‌داری
۰/۷	$\geq 10\%$	AASHTO-T104	درصد افت وزنی در برابر سولفات سدیم برای ریزدانه
۰	$\geq 12\%$	AASHTO-T104	درصد افت وزنی در برابر سولفات سدیم برای درشت‌دانه



شکل ۱. نمودار دما- ویسکوزیته برای قیر خالص ۶۰-۷۰

جدول ۲. نتایج آزمایش‌های رایج روی قیر مصرفی

نتایج	روش آزمایش AASHTO	آزمایش‌های قیر خالص
۱/۰۱۴	T228	وزن مخصوص (25 °C)
۶۷	T49	درجه نفوذ (25 °C)
۹۹/۸۸	T44	حلالیت در تترا کلرید کربن
بیش از ۱۰۰	T51	مقدار کشش برحسب سانتی‌متر ((25 °C))
۳۰۶	T48	درجه اشتعال (°C)
۵۰/۳	T53	حداقل نرمی (ساچمه - حلقه) (°C)

آسفالت الک شده و منحنی دانه‌بندی آنها ترسیم گردید. پس از انجام این آزمایش روی تراشه آسفالت بازیافتی، درصد قیر مخلوط ریزدانه‌تر ۵/۰۷٪ و قیر مخلوط درشت‌دانه‌تر ۴/۳۴٪ به‌دست آمد. نتایج مربوط به میزان قیر موجود در این مصالح در جدول ۳ و دانه‌بندی سنگدانه‌های این دو دسته تراشه‌های آسفالت بازیافتی در شکل ۲ ارائه شده است.

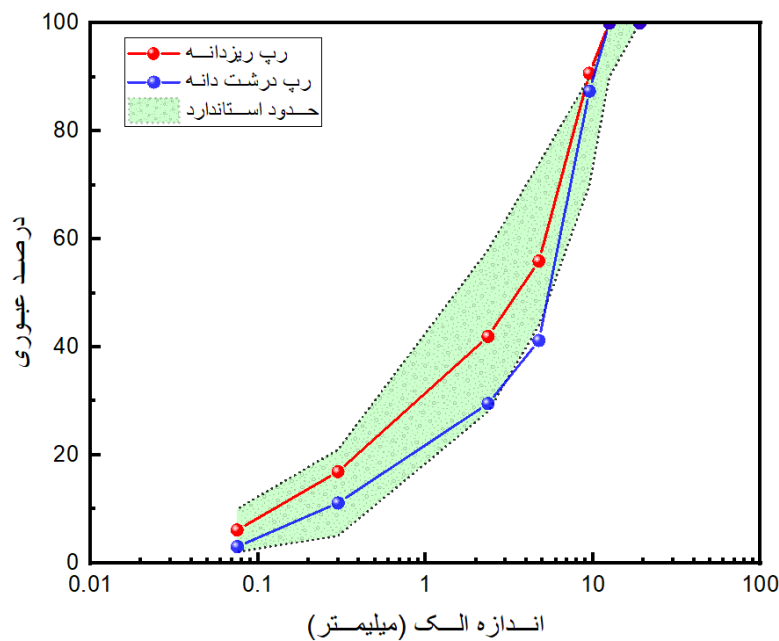
۲-۳. تراشه‌های آسفالت بازیافتی (RAP)

به منظور ارزیابی و استفاده مجدد از تراشه‌های آسفالت، ابتدا آزمایش استخراج روی آنها انجام شد. هدف از این آزمایش، تعیین دانه‌بندی سنگدانه‌ها و محاسبه درصد قیر موجود در مخلوط آسفالتی به منظور تدوین طرح اختلاط مناسب بود. پس از انجام آزمایش استخراج، تراشه‌های

تأثیر جوانسازهای RPO و WEO در دانه‌بندی‌های مختلف تراشه آسفالتی احیا شده بر مقاومت تغییرشکل مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای

جدول ۳. نتایج آزمایش اکستراکشن قیر

درصد قیر	اندازه سنگدانه
۳/۴۶	عبوری از الک 1/2 و مانده روی الک 3/8
۳/۶۰	عبوری از الک 3/8 و مانده روی الک ۴
۵/۴۸	عبوری از الک ۴ مانده روی الک ۸
۸/۰۵	عبوری از الک ۸ مانده روی الک ۱۶
۸/۷۲	عبوری از الک ۱۶ مانده روی الک ۳۰
۸/۱۰	عبوری از الک شماره ۳۰



شکل ۲. دانه‌بندی تراشه‌های آسفالت بازیافتی پس از آزمایش اکستراکشن

مشاهده است، به عنوان یکی از بهترین افزودنی‌ها برای تثبیت آسفالت‌های با ساختار سنگدانه‌ای استفاده شده است. این الیاف به صورت مواد دانه‌ای هستند که از مواد باکیفیت و بدون استفاده از ترکیبات دگرگون‌کننده تولید می‌شوند. این مواد فاقد قیر بوده و به منظور جلوگیری از جداشدگی لایه پیوند آسفالت و مواد معدنی در حین تولید آسفالت، و همچنین برای جلوگیری از ترک‌خوردگی مخلوط آسفالتی در مراحل حمل و نگهداری به کار می‌روند. مشخصات فنی این الیاف در جدول ۴ ارائه گردیده است.

با استفاده از معادله (۱) می‌توان درصد نهایی قیر را برای مخلوط حاوی تراشه آسفالت بازیافتی محاسبه کرد. (در این رابطه،  $Pb_N$  درصد قیر جدید،  $Pb_R$  درصد قیر برای مخلوط بدون تراشه آسفالت و  $Pb_F$  درصد قیر موجود در تراشه آسفالت است).

$$Pb_N = Pb_R - Pb_F \times T_R \quad (1)$$

## ۲-۴. الیاف

در این پژوهش، از الیاف سلولوزی که در شکل ۳ قابل

جدول ۴. مشخصات فنی الیاف سلولزی

درصد قیر	اندازه سنگدانه
۲/۳۱	جذب آب (%)
۲/۵۱	وزن مخصوص (گرم بر سانتی متر مکعب)
۰/۹۸۳	مقاومت برشی (مگاپاسکال)
۳/۱۸	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)



شکل ۳. الیاف سلولزی مخصوص SMA

## ۲-۵. جوانساز

در سال‌های اخیر، جوانسازها به‌عنوان افزودنی‌هایی برای بازیابی ویژگی‌های قیرهای پیرشده در مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با توجه به پیرشدگی قیر موجود در تراشه‌های آسفالتی، این پژوهش به بررسی نیاز یا عدم نیاز به استفاده از این نوع روغن جوانساز در مخلوط‌های آسفالتی پرداخته است.

در این تحقیق، از روغن فرآیند لاستیک (RPO) که در شکل ۴ نشان داده شده، به‌عنوان جوانساز استفاده شده است. این روغن که دارای ترکیباتی با محتوای بالای آروماتیک است، از فرآیند جداسازی با حلال فورفورال

به دست می‌آید و به منظور بهبود ویژگی‌های روغن پایه در دماهای زیاد و کاهش هزینه‌های تولید محصول نهایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. روغن RPO در فرمولاسیون ساخت بسیاری از محصولات پایه الاستیکی به‌کار می‌رود و در فرآیند ترکیب محصولات پلاستیکی نیز نقش مؤثری دارد، به‌ویژه در بهبود پراکندگی فیلرها و جریان ترکیبات پلاستیکی. ویژگی‌های این روغن شامل لکه‌گذاری کم، فراریت ناچیز، خواص انحلال‌پذیری مناسب و سازگاری با الاستومرها است. مشخصات این جوانساز مطابق با استانداردهای مربوطه در جدول ۵ توسط شرکت تولیدکننده ارائه شده است.

جدول ۵. مشخصات فنی الیاف سلولزی

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



تأثیر جوانسازهای RPO و WEO در دانه‌بندی‌های مختلف تراشه آسفالتی احیا شده بر مقاومت تغییرشکل مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای



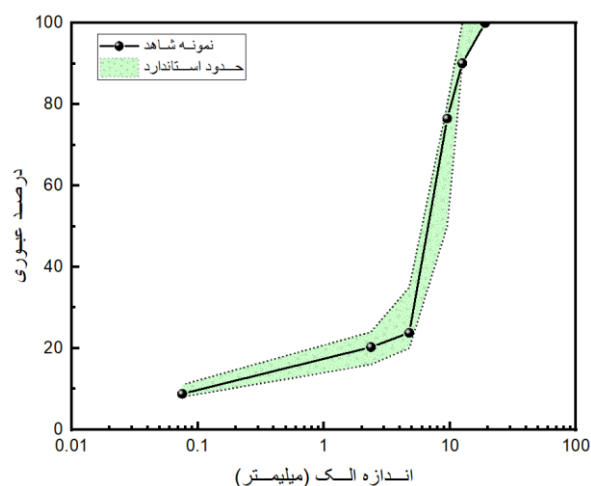
شکل ۴. روغن فرایند لاستیک (RPO)

### ۳. طرح مخلوط

در مخلوط‌های آسفالتی با ساختار استخوان‌بندی سنگدانه‌ای، ساختار اصلی توسط مصالح سنگی درشت‌دانه با ابعاد بیش از  $4/75$  میلی‌متر تشکیل می‌شود. این نوع مخلوط‌ها دارای درصد بالایی از سنگدانه‌های درشت بوده و فضای خالی ایجاد شده بین آن‌ها برای ایجاد تماس مؤثر بین سنگدانه‌ها ضروری است. در طراحی این مخلوط‌ها، لازم است که میزان سنگدانه‌های ریزدانه، به‌ویژه مصالح عبوری از الک  $4/75$  میلی‌متر، به‌دقت تنظیم شود تا تماس مستقیم بین سنگدانه‌های درشت حفظ گردد. افزایش بیش از حد مصالح ریزدانه می‌تواند منجر به کاهش تماس بین سنگدانه‌های درشت و در نتیجه کاهش پایداری مخلوط گردد.

### ۳-۱. دانه‌بندی

آزمایش دانه‌بندی مصالح سنگی براساس استاندارد<sup>۱</sup> و با روش شست‌وشو برای مصالح سنگی ریزدانه انجام پذیرفت و نتایج حاصل از دانه‌بندی مصالح سنگی به‌دست آمد. با توجه به نتایج حاصل از دانه‌بندی مصالح سنگی به‌منظور دستیابی به دانه‌بندی مخلوط مصالح سنگی و با در نظر گرفتن حدود مشخصات دانه‌بندی با حداکثر اندازه اسمی  $19/5$  میلی‌متر جدول ۳-۱۳ نشریه ۲۳۴ (آیین‌نامه روسازی آسفالتی ایران چاپ ۱۳۹۰) نسبت‌های اختلاط تعیین و منحنی مخلوط مصالح سنگی جهت ساخت نمونه‌ها تهیه گردید. منحنی مخلوط مصالح سنگی به‌کار رفته در شکل ۵ ترسیم شده است.



شکل ۵. دانه‌بندی مصالح سنگی استفاده شده

<sup>۱</sup>- AASHTO-T27

### ۲-۳. آماده‌سازی مخلوط آسفالتی

به منظور آماده‌سازی نمونه‌ها، ابتدا مصالح سنگی طبیعی به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس در کوره خشک‌کن حرارت داده شدند. با توجه به حساسیت قیر و تراشه‌های آسفالت بازیافتی به دمای زیاد و احتمال بروز پدیده پیرشدگی، این مواد تنها به مدت یک ساعت در دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس گرم شدند. سپس، جوان‌ساز به تراشه‌های آسفالت بازیافتی اضافه گردید و پس از اختلاط کامل، مصالح سنگی، قیر گرم و تراشه‌های اصلاح‌شده مطابق با طرح اختلاط تعیین شده، با یکدیگر ترکیب شدند تا مخلوط آسفالتی نهایی تولید شود.

### ۳-۳. درصد قیر بهینه

مقدار قیر بهینه مخلوط آسفالتی بر اساس مندرجات بند ۲۰-۸-۳ نشریه شماره ۱۰۱ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور و پیشنهادهای نشریه MS-۲ انستیتو آسفالت با توجه به درصد قیر نظیر فضای خالی ۴ درصد میزان قیر بهینه برابر ۶/۵ درصد نسبت به وزن مخلوط آسفالتی پیشنهاد می‌گردد.

### ۴-۳. مشخصات فیزیکی مخلوط آسفالتی

حداکثر وزن مخصوص تئوری برای مخلوط آسفالتی با ۶,۵ درصد قیر، با استفاده از روش استاندارد AASHTO-۲۰۹T، به میزان ۲,۴۰۳ تعیین شد. همچنین، میزان جذب قیر توسط مخلوط مصالح سنگی، معادل ۰,۳۰ درصد محاسبه گردید. آزمایش‌های تعیین وزن مخصوص حقیقی وزن مخصوص ظاهری و درصد جذب آب مخلوط مصالح سنگی مانده روی الک ۸ بر اساس استاندارد AASHTO-T85 و مصالح رد شده از الک شماره ۸ و مانده روی الک شماره ۲۰۰ بر اساس استاندارد AASHTO-T84 انجام پذیرفت. وزن مخصوص مصالح رد شده از الک شماره ۲۰۰ نیز بر اساس استاندارد AASHTO-T100 تعیین گردید. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها به انضمام مقدار وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی در جدول ۶ درج گردیده است.

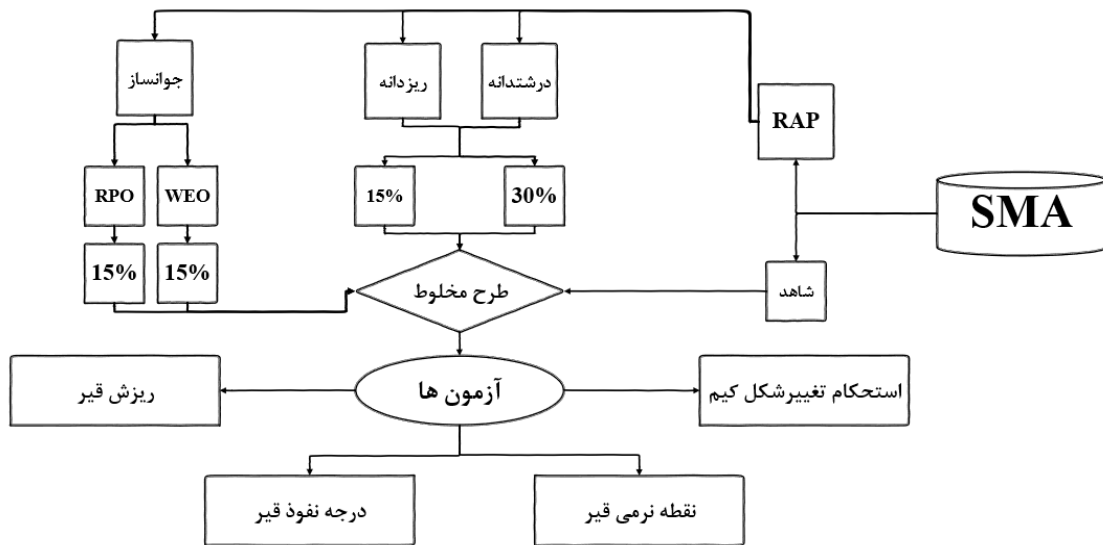
### ۵-۳. روش تهیه نمونه مارشال

روش ساخت و تهیه نمونه‌های مخلوط آسفالتی مارشال ۱۲۰۰ گرمی در آیین‌نامه ASTM-D1559 آورده شده است. فلوچارت مصالح مصرفی جهت آماده سازی نمونه‌ها در شکل ۶ قابل مشاهده است.

جدول ۶. وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی مخلوط آسفالتی

درصد جذب آب	وزن مخصوص		مشخصات دانه‌های سنگی
	حقیقی	ظاهری	
۰/۷	۲/۶۵۴	۲/۷۰۳	مصالح سنگی مانده روی الک شماره ۸
۱/۷	۲/۵۹۸	۲/۷۱۹	مصالح سنگی رد شده از الک ۸ و مانده روی الک ۲۰۰
-		۲/۷۲۱	مصالح سنگی رد شده از الک ۲۰۰
	۲۶۱۵		وزن واحد حجم متراکم میله خورده مصالح سنگی درشت‌دانه در حالت خشک ( $Kg/m^3$ )
	۲/۶۵۳		وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی (Gsb)

تأثیر جوانسازهای RPO و WEO در دانه‌بندی‌های مختلف تراشه آسفالتی احیا شده بر مقاومت تغییرشکل مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای



شکل ۶. فلوچارت مواد و مصالح مصرفی جهت طرح مخلوط و آماده‌سازی نمونه‌ها

#### ۴. روش تحقیق

در این تحقیق، چهار آزمون اصلی برای ارزیابی ویژگی‌های قیر و مخلوط‌های آسفالتی انجام شد. این آزمون‌ها شامل آزمون درجه نفوذ قیر طبق استاندارد ASTM-D5، نقطه نرمی قیر بر اساس استاندارد ASTM-D36، آزمون ریزش قیر طبق استاندارد AASHTO-T305، و آزمون مقاومت در برابر تغییرشکل کیم می‌باشد. این آزمون‌ها به منظور تحلیل و مقایسه ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی قیر اصلاح‌شده و مخلوط‌های آسفالتی به کار گرفته شدند.

#### ۴-۱. آزمون درجه نفوذ قیر

آزمون نفوذ یکی از آزمون‌های استاندارد و رایج برای تعیین سختی یا نرمی قیر است که مطابق با استاندارد ASTM-D5 انجام می‌شود. درجه نفوذ پایین نشان‌دهنده قیر سخت و درجه نفوذ بالا نشان‌دهنده قیر نرم است.

#### ۴-۲. آزمون نقطه نرمی قیر

آزمون نقطه نرمی یکی از آزمون‌های استاندارد برای تعیین مشخصه‌های قیر است که دمایی را مشخص می‌کند که

در آن قیر از حالت جامد به حالت نیمه‌جامد تغییر حالت می‌دهد. این آزمون بر اساس استاندارد ASTM-D36 انجام می‌شود و به منظور ارزیابی پایداری قیر در برابر نرم شدن تحت تأثیر افزایش دما و همچنین مقاومت آن در برابر تغییرشکل تحت بارهای وارده صورت می‌گیرد.

#### ۴-۳. آزمون ریزش قیر

آزمایش ریزش قیر، که مطابق استاندارد AASHTO T-305 انجام می‌شود، با هدف ارزیابی حساسیت مخلوط‌های آسفالتی نسبت به فیرزدگی در دماهای زیاد طراحی شده است. در این آزمون، مقدار تجمعی ریزش ملات قیری طی یک ساعت و با استفاده از سبد ویژه اندازه‌گیری می‌شود. این مقدار به صورت درصدی از وزن کل مخلوط، در دمای استاندارد ۱۷۵ درجه سلسیوس تعیین می‌گردد.

در این آزمایش، نمونه‌های آسفالتی متراکم‌نشده با وزنی در حدود ۱۲۰۰ گرم و با درصد مشخصی از قیر برای ارزیابی آماده می‌شوند. مخلوط مورد نظر درون یک سبد سیمی استاندارد قرار می‌گیرد که روی صفحه‌ای فلزی یا کاغذ نجسب گذاشته می‌شود. سپس این مجموعه به

یک فرورفتگی مقعر شکل در آن ایجاد می‌کند. به عقیده توسعه دهندگان این معیار سنجش، تغییر شکل ایجاد شده در این آزمون با سطح مقطع شیارشدگی واقعی در سطح رویه‌های آسفالتی مطابقت دارد شکل قالب و میله بارگذاری این آزمایش را نشان می‌دهد.

آزمون کیم روی یک نمونه مارشال ۱۲۰۰ گرمی مخلوط آسفالتی انجام می‌شود که به مدت ۳۰ دقیقه و در دمای ۶۰ درجه سلسیوس نگهداری شده است و سپس حداکثر نیرو و تغییر شکل متناظر با بار وارده حداکثر برای محاسبه پارامتر  $S_D$  به‌کار گرفته می‌شود. پارامتر  $S_D$  در واقع مقاومت مخلوط در برابر تغییر شکل است و با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود (که در این روابط  $S_D$  مقاومت در برابر تغییر شکل برحسب کیلوپاسکال،  $P$  حداکثر بار وارده برحسب نیوتن،  $D$  قطر سرمیله فرو رونده برحسب سانتی‌متر،  $r$  شعاع انحنا در گوشه تحتانی میله برحسب سانتی‌متر و  $y$  تغییر شکل عمودی در نمونه، متناظر با بار حداکثر برحسب سانتی‌متر می‌باشد).

$$S_D = \frac{40P}{\pi[D - 2(r - \sqrt{2ry - y^2})]^2} \quad (3)$$

رابطه (۳) را در صورتی که شعاع انحنا در محل بارگذاری ۱۰ میلی‌متر و قطر سرمیله ۴۰ میلی‌متر باشد می‌توان به صورت رابطه (۴) بازنویسی کرد:

$$S_D = \frac{0.32P}{[10 + \sqrt{20y - y^2}]^2} \quad (4)$$

در شکل ۷، نمونه‌ای از نتایج به‌دست آمده از این آزمایش به همراه چگونگی حاصل شدن پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه  $S_D$  نشان داده شده است.

مدت ۶۰ دقیقه در دمای آزمون درون گرمکن قرار داده می‌شود. طی این زمان، نمونه از کوره خارج شده و مقدار ریزش مواد مطابق با رابطه (۲) به صورت درصدی از وزن کل مخلوط محاسبه می‌شود. این آزمایش برای هر نمونه، سه بار تکرار شده و میانگین داده‌های حاصل گزارش می‌شود.

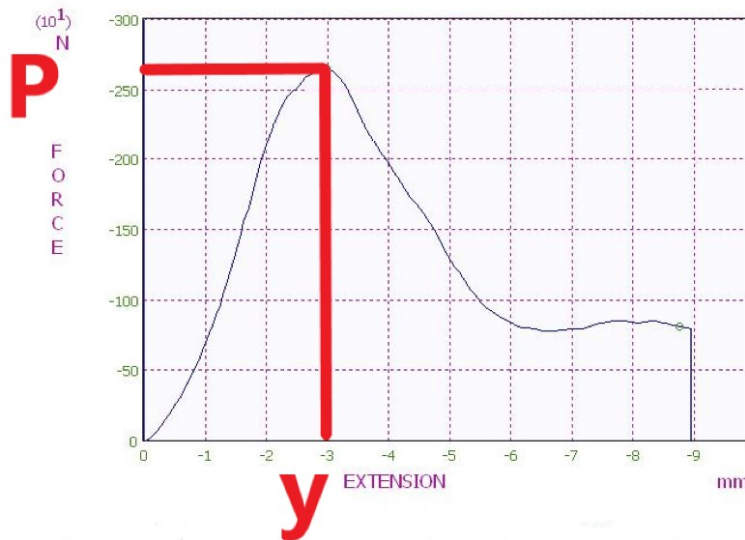
$$D = \frac{M_f - M_i}{M_t} \times 100 \quad (2)$$

که در این رابطه پارامتر  $D$  درصد ریزش قیر مخلوط،  $M_i$  وزن اولیه کاغذ،  $M_f$  وزن کاغذ در انتهای فاصله زمانی و  $M_t$  وزن کل مخلوط بر حسب گرم می‌باشد.

#### ۴-۴. آزمون مقاومت در برابر تغییر شکل کیم

یکی از مهم‌ترین انواع خرابی‌ها در روسازی‌های انعطاف-پذیر، به‌خصوص در مسیرهای پر ترافیک و گرمسیری، شیارشدگی می‌باشد. شیارشدگی به تغییر شکل پلاستیک محل عبور چرخ در روسازی آسفالتی گفته می‌شود. این خرابی در مخلوط آسفالتی علاوه بر کاهش کیفیت سطح روسازی می‌تواند سرآغاز سایر آسیب‌ها از جمله خرابی‌های رطوبتی نیز باشد، چرا که شیار ایجاد شده در سطح روسازی مقداری از آب‌های سطحی ناشی از بارندگی را در خود نگه‌داشته و این حضور بلندمدت فرصت جانشینی آب با عناصری از قیر که مسئول چسبندگی به قیر را دارند فراهم می‌آورد.

در این آزمایش، یک استوانه فولادی با گوشه‌هایی گرد شده و انتهایی تخت در دمای بحرانی مخلوط آسفالتی (۶۰ درجه سلسیوس) با سرعت ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه به داخل مخلوط آسفالتی وارد شده به طوری که



شکل ۷. پارامترهای موجود در رابطه (۴) در منحنی بار-جاب‌جایی

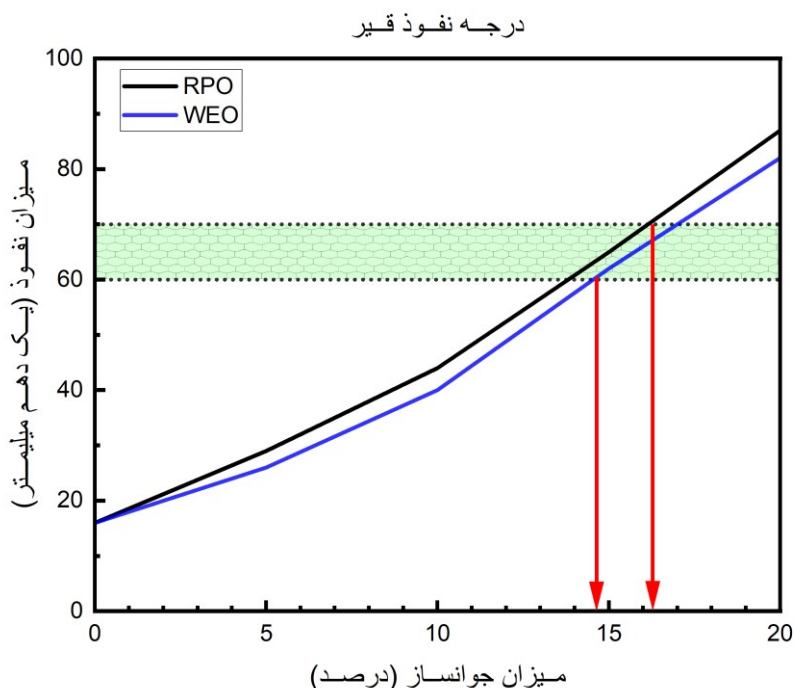
## ۵. بررسی و تحلیل نتایج

### ۵-۱. نتایج درجه نفوذ قیر

آزمون درجه نفوذ قیر برای نمونه‌های اصلاح‌شده با دو نوع جوانساز روغن سنگین (RPO) و روغن سبک (WEO) نشان داد که با افزودن ۵ تا ۲۰ درصد از این جوانسازها به قیر پیرشده، درجه نفوذ بیندر حاوی RPO به طور متوسط ۸/۱ درصد بیشتر از بیندر حاوی WEO است. این افزایش درجه نفوذ در نمونه‌های حاوی RPO را می‌توان به ماهیت سنگین‌تر و ترکیبات شیمیایی غنی‌تر این روغن نسبت داد که قابلیت بیشتری در نفوذ به ساختار مولکولی قیر دارد. این ویژگی منجر به بهبود پیوند میان مولکول‌های قیر و جوانساز شده و در نتیجه، قیر اصلاح‌شده با RPO خواص نرم‌تر و انعطاف‌پذیرتری از خود نشان می‌دهد. در مقابل، روغن WEO به‌عنوان یک جوانساز سبک‌تر، تأثیر کمتری در افزایش درجه نفوذ قیر دارد. اگرچه این جوانساز توانایی مطلوبی در کاهش

ویسکوزیته قیر و بهبود ویژگی‌های اجرایی آن دارد، اما حضور ترکیبات فرارتر در آن، به‌ویژه در مقایسه با RPO، می‌تواند منجر به کاهش پایداری بلندمدت شود. به‌طور کلی، جوانساز RPO با افزایش میانگین درجه نفوذ قیر، عملکرد بهتری در شرایطی که انعطاف‌پذیری بیشتر در مخلوط آسفالتی مورد نیاز است، از خود نشان می‌دهد. از سوی دیگر، جوانساز WEO می‌تواند به‌عنوان گزینه‌ای مناسب در مواردی که کاهش ویسکوزیته قیر بدون تغییر قابل توجه در درجه نفوذ مدنظر است، مورد استفاده قرار گیرد.

علاوه بر این، بر اساس نتایج ارائه‌شده در شکل ۸، مقدار بهینه جوانسازهای RPO و WEO، با در نظر گرفتن آزمون درجه نفوذ و دستیابی به محدوده نفوذ ۶۰ تا ۷۰، بین ۱۴/۵ تا ۱۶ درصد تعیین شده است. این محدوده به‌عنوان حدی مناسب برای حفظ عملکرد مطلوب قیر اصلاح‌شده و تأمین نیازهای مهندسی مشخص می‌شود.



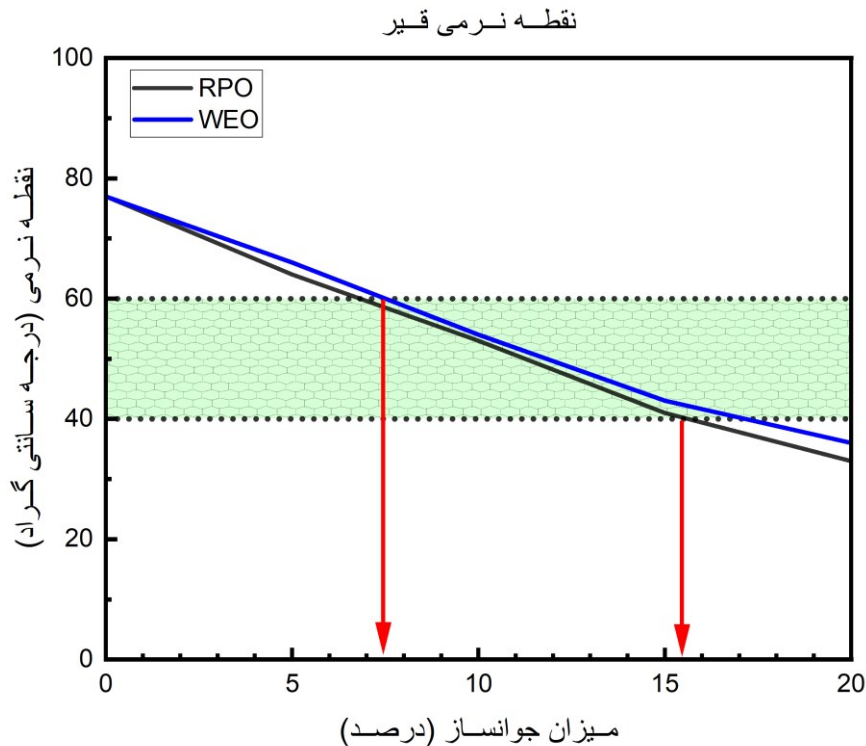
شکل ۸. منحنی درجه نفوذ قیر برای جوانسازهای WEO و RPO

#### ۲-۵. نتایج نقطه نرمی قیر

با توجه به شکل ۹، افزودن ۵ تا ۲۰ درصد جوانساز RPO به قیر پیر شده در مقایسه با WEO به طور متوسط توانسته است نقطه نرمی قیر را به میزان ۴/۷۵ درصد کاهش دهد و در عین حال عملکرد آن را بهبود بخشد. این افزایش نرمی را می‌توان به ماهیت شیمیایی RPO و حضور ترکیبات سنگین‌تر آن نسبت داد که موجب بازسازی ساختار مولکولی قیر و افزایش انعطاف‌پذیری آن می‌شود. مطالعات انجام شده توسط رن و همکاران (۲۰۲۴) نیز نشان داده است که جوانسازهای سنگین‌تر، مانند RPO، به دلیل ترکیبات شیمیایی غنی‌تر و پایداری بیشتر، معمولاً تأثیر بیشتری در بهبود نقطه نرمی قیر دارند. این یافته‌ها با نتایج این پژوهش همخوانی دارد. همچنین،

پژوهش ژو و همکاران (۲۰۲۲) اثر درصدهای مختلف جوانساز بر خواص قیر را بررسی کرده و نتیجه‌گیری کرده که برای دستیابی به نقطه نرمی مطلوب در محدوده مورد نظر، جوانسازهای سنگین‌تر مانند RPO به درصد کمتری از افزودنی نیاز دارند.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، مقدار بهینه جوانساز RPO برای دستیابی به نقطه نرمی در بازه ۴۰ تا ۶۰ درجه سلسیوس، عددی بین ۷/۵ تا ۱۵/۵ درصد تعیین شده است. بر این اساس، درصد بهینه جوانساز برای هر دو نوع روغن RPO و WEO مقدار ۱۵ درصد وزنی قیر پیر شده انتخاب شد تا تعادل مطلوبی بین بهبود عملکرد و سهولت اجرایی حاصل شود.



شکل ۹. نتایج نقطه نرمی قیر برای جوانسازهای WEO و RPO

### ۳-۵. نتایج ریزش قیر

آزمایش ریزش قیر مطابق با استاندارد AASHTOT305 به منظور ارزیابی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی حاوی RAP در کنترل ریزش قیر انجام شد. نتایج نشان داد که هر دو جوانساز، RPO و WEO، توانایی مناسبی در کاهش ریزش قیر دارند. با این حال، روغن RPO به دلیل خاصیت نرم‌کنندگی قوی‌تر و میزان نفوذ بیشتر، به طور متوسط کاهش ۲/۱ درصدی ریزش قیر را در مقایسه با روغن WEO ایجاد کرد. این اختلاف عملکرد بیانگر تأثیر کیفی ترکیبات سنگین‌تر و پایدارتر RPO در بهبود خواص ویسکوالاستیک قیر است که موجب افزایش استحکام پیوستگی و انسجام بین قیر و سنگدانه‌ها می‌شود.

افزایش میزان RAP در مخلوط‌ها تأثیر قابل توجهی بر کاهش ریزش قیر داشت. به طور خاص، نمونه‌های

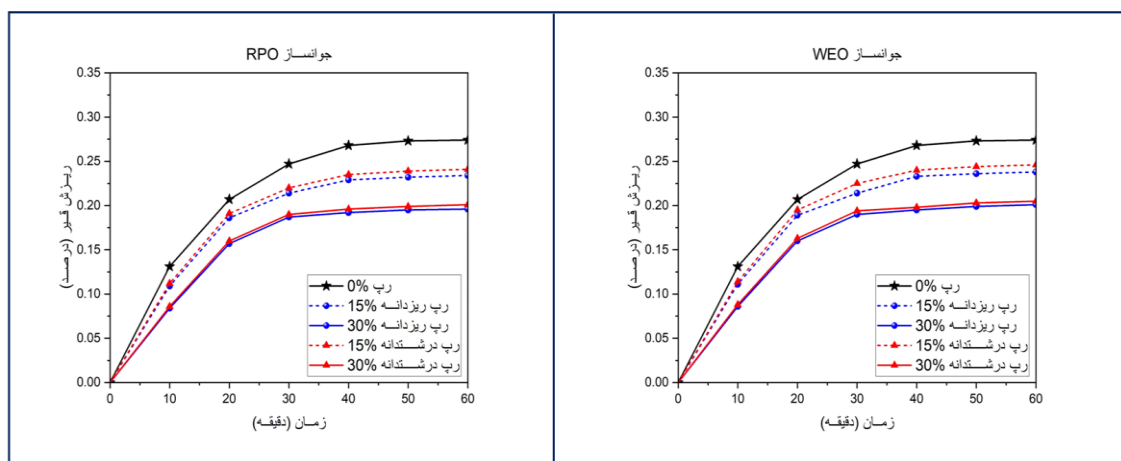
حاوی روغن RPO کاهش ۲۰/۴ درصدی و نمونه‌های حاوی WEO کاهش ۱۸/۸ درصدی را در ریزش قیر نشان دادند. این نتایج تأیید می‌کند که مخلوط‌های اصلاح‌شده با RPO مقاومت بیشتری در برابر ریزش قیر دارند. علاوه بر این، قیر پیرشده موجود در RAP به دلیل سفتی ذاتی خود می‌تواند در دماهای بالا، با کاهش جریان قیر، به کاهش ریزش کمک کند.

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۱۰، مشخص شد که استفاده از RAP ریزدانه نسبت به RAP درشت‌دانه باعث کاهش ۲/۷۵ درصدی ریزش قیر می‌شود. این کاهش را می‌توان به سطح ویژه بالاتر ذرات ریزدانه و توانایی بیشتر آن‌ها در جذب قیر نسبت داد. انسجام بهتر و توزیع یکنواخت‌تر قیر در حضور RAP ریزدانه، فضاهای خالی کمتری را در مخلوط باقی می‌گذارد و به بهبود پیوستگی قیر-سنگدانه‌ها کمک می‌کند. از سوی

(۲۰۲۴)، افزودن روغن‌های جوانساز باعث کاهش ریزش قیر شده و تأثیر قابل توجهی بر بهبود عملکرد قیر بازیافتی داشته است. همچنین، سالیانی و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که استفاده از RAP ریزدانه نسبت به RAP درشت‌دانه به‌طور قابل توجهی موجب کاهش ریزش قیر و بهبود توزیع قیر در مخلوط می‌شود. این هم‌افزایی‌ها بیانگر آن است که طراحی دقیق مخلوط با انتخاب مناسب جوانساز و نوع RAP می‌تواند به کاهش معضلات اجرایی در روسازی‌های آسفالتی کمک کند.

دیگر، در RAP درشت‌دانه، وجود فضاهای خالی بزرگ‌تر می‌تواند موجب افزایش جریان قیر و در نتیجه افزایش ریزش شود.

برای کاهش ریزش قیر در مخلوط‌های آسفالتی با حساسیت زیاد، استفاده از RAP ریزدانه به دلیل انسجام بیشتر و عملکرد بهتر در کنترل ریزش توصیه می‌شود. همچنین، جوانساز RPO به عنوان گزینه‌ای مؤثر برای بازگرداندن خواص قیر و افزایش مقاومت مخلوط پیشنهاد می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده با مطالعات پیشین همخوانی دارد. بر اساس تحقیقات ژانگ و همکاران



شکل ۱۰. منحنی انرژی شکست در موادهای اول و دوم بارگذاری

میزان جابه‌جایی عمودی متناظر آن اندازه‌گیری شده و پارامتر  $S_D$  یا همان عدد مقاومت در برابر تغییرشکل تعریف می‌شود که هرچه این پارامتر بیشتر باشد، مقاومت مخلوط در برابر خرابی شیارشدگی نیز بیشتر است. در جدول ۷ و شکل ۱۱ نتایج حداکثر نیروی وارد شده بر نمونه‌ها در این آزمون نشان داده شده است.

۵-۴. نتایج آزمون مقاومت در برابر تغییرشکل کیم  
آزمون مقاومت در برابر تغییرشکل کیم، یک آزمون سریع و به نسبت کم‌هزینه‌ای است که جهت بررسی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر شیارشدگی به کار می‌رود. در این آزمون، میزان حداکثر نیروی وارد شده بر نمونه و



جدول ۷. نتایج حداکثر نیرو در آزمایش مقاومت در برابر تغییرشکل کیم

نام نمونه	حداکثر نیرو (نیوتن)
نمونه شاهد	۲۲۹۹/۹
۱۵٪ رپ درشت‌دانه + RPO	۲۴۱۲/۸
۱۵٪ رپ درشت‌دانه + WEO	۲۴۹۵/۴
۱۵٪ رپ ریزدانه + RPO	۲۵۲۳/۱
۱۵٪ رپ ریزدانه + WEO	۲۷۲۹/۵
۳۰٪ رپ درشت‌دانه + RPO	۲۵۹۵
۳۰٪ رپ درشت‌دانه + WEO	۲۸۶۳/۱
۳۰٪ رپ ریزدانه + RPO	۲۸۳۶/۶
۳۰٪ رپ ریزدانه + WEO	۳۰۹۰/۴

حاوی RAP ریزدانه ۷/۵ درصد مقاومت بیشتری در برابر تغییرشکل نسبت به RAP درشت‌دانه نشان دادند و در حالت ۳۰ درصد جایگزینی، این اختلاف به ۱۰/۲ درصد افزایش یافت. این بهبود را می‌توان به توزیع یکنواخت‌تر دانه‌بندی، مساحت سطح بیشتر ذرات ریز، و پیوندهای قوی‌تر قیر و سنگدانه‌ها نسبت داد. تراشه آسفالتی بازبافتی ریزدانه به دلیل پر کردن بهتر فضاهای خالی در مخلوط، انسجام بهتری ایجاد می‌کند و مقاومت مخلوط را در برابر تغییرشکل افزایش می‌دهد. در مقابل، RAP درشت‌دانه به دلیل وجود فضاهای خالی بزرگ‌تر، مقاومت کمتری نشان می‌دهد.

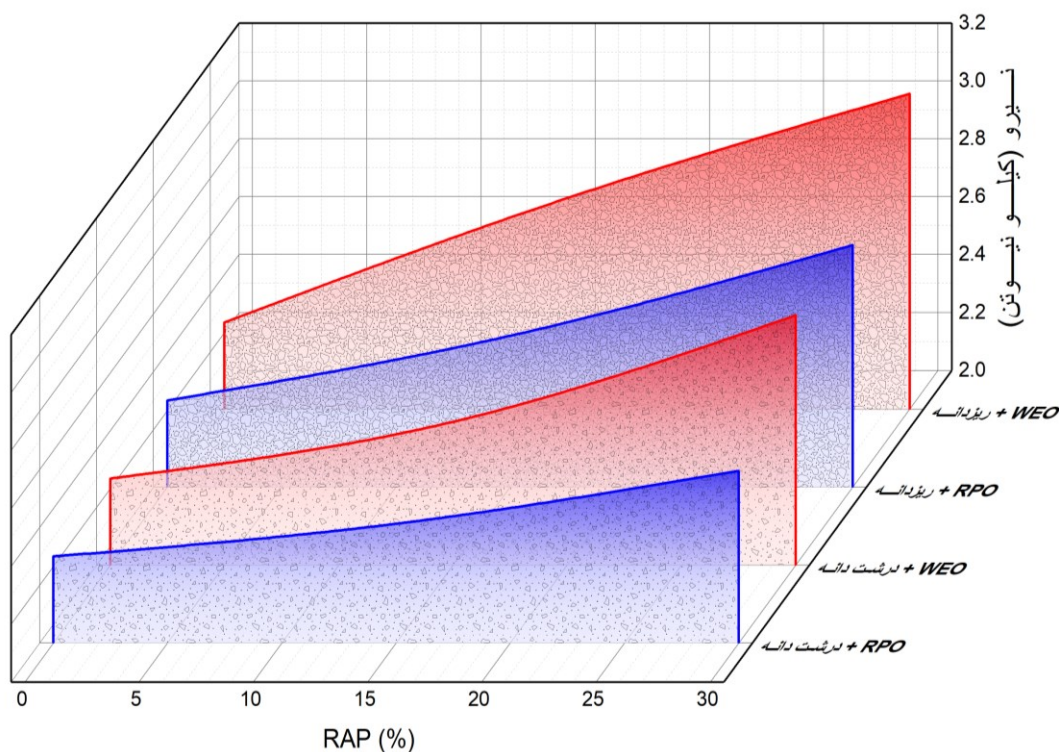
نتایج همچنین نشان داد که نمونه‌های حاوی WEO مقاومت بیشتری در برابر تغییرشکل نسبت به نمونه‌های دارای RPO دارند. به طور متوسط، مخلوط‌های حاوی WEO حدود ۸/۷ درصد مقاومت بیشتری نشان دادند. این اختلاف می‌تواند به خواص ویژه WEO مانند ویسکوزیته بیشتر و توانایی در بهبود انسجام و اتصال ذرات RAP و قیر نسبت داده شود. مطالعه آنوشا و همکاران (۲۰۲۱) نشان داد که استفاده از RAP در مخلوط‌های آسفالتی باعث بهبود مقاومت مکانیکی می‌شود، اما آنها به کاهش کارایی در دماهای پایین اشاره

بر اساس نتایج ارائه‌شده در شکل ۱۱، تمامی نمونه‌های حاوی تراشه آسفالت بازبافتی (RAP) نسبت به نمونه شاهد (بدون RAP) مقاومت مکانیکی بالاتری نشان دادند. این موضوع بیانگر تأثیر مثبت RAP در بهبود مشخصات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی است. با جایگزینی ۱۵ درصدی RAP، مقاومت در برابر تغییرشکل و نیروی وارده در مخلوط آسفالتی به میزان ۱۰/۴ درصد افزایش یافت. همچنین، با افزایش درصد جایگزینی RAP به ۳۰ درصد، این مقدار به ۲۳/۸ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش یافت. این افزایش را می‌توان به تأثیر RAP در افزایش سفتی قیر و بهبود چسبندگی بین ذرات سنگدانه و قیر نسبت داد. افزایش سفتی قیر به دلیل وجود قیر پیرشده در RAP باعث می‌شود مخلوط مقاومت بیشتری در برابر نیروهای وارده داشته باشد. این رفتار در هر دو دانه‌بندی ریز و درشت RAP مشاهده شد. این افزایش سفتی قیر باعث تقویت ساختار مخلوط و بهبود رفتار مکانیکی آن می‌شود، به‌ویژه در شرایط بارگذاری سنگین.

داده‌ها نشان می‌دهند که استفاده از RAP با دانه‌بندی ریزتر عملکرد بهتری نسبت به RAP درشت‌دانه دارد. به طور خاص، در حالت ۱۵ درصد جایگزینی، مخلوط‌های

بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در برابر تغییرشکل می‌شود. نتایج آنها نیز حاکی از ویسکوزیته بیشتر WEO و تأثیر آن بر افزایش انسجام مخلوط بود که با یافته‌های این پژوهش همخوانی دارد.

کردند. در این پژوهش، عملکرد مخلوط‌های حاوی RAP ریزدانه نیز تأیید شده و مشابه این تحقیق، افزایش مقاومت به دلیل توزیع یکنواخت‌تر و مساحت سطح بیشتر گزارش شد. همچنین، پراشانت (۲۰۲۰) دریافتند که استفاده از WEO به‌عنوان بازیافت‌کننده قیر منجر به



شکل ۱۱. حداکثر نیرو در آزمون کیم با توجه به میزان تراشه آسفالتی جایگزین و درصد جوانساز

نمونه‌های حاوی ۱۵ درصد RAP نشان داد. این افزایش تغییرشکل را می‌توان به تراکم بیش از حد مخلوط‌ها و کاهش انعطاف‌پذیری در نمونه‌های دارای مقدار بالای RAP نسبت داد. تراکم زیاد ممکن است باعث محدود شدن حرکت ذرات و افزایش تنش‌های داخلی در مخلوط شود، که در نهایت تغییرشکل عمودی بیشتری را به دنبال دارد.

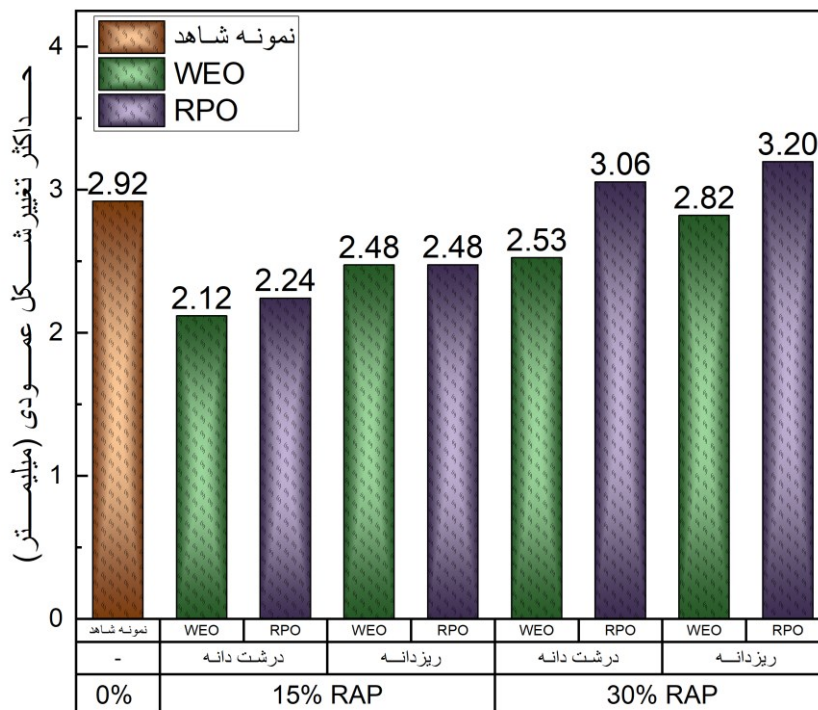
در مقایسه بین دانه‌بندی‌های مختلف، نمونه‌های حاوی RAP ریزدانه به طور متوسط ۱۰/۷۵ درصد تغییرشکل عمودی بیشتری نسبت به RAP درشت‌دانه

با توجه به شکل ۱۲، تمامی نمونه‌های حاوی ۱۵ درصد RAP نسبت به نمونه شاهد تغییرشکل عمودی کمتری نشان دادند، که نشان‌دهنده تأثیر مثبت RAP و افزودنی‌ها در بهبود پایداری مخلوط‌های آسفالتی است. با این حال، در نمونه‌های حاوی ۳۰ درصد RAP، تغییرشکل عمودی در برخی موارد، به‌ویژه در نمونه‌های حاوی RPO، بیشتر از نمونه شاهد مشاهده شد. افزایش درصد RAP به ۳۰ درصد، در حالی که مقاومت مخلوط را در برابر نیروهای وارده افزایش داده است، به طور همزمان تغییرشکل عمودی بیشتری را نسبت به

تأثیر جوانسازهای RPO و WEO در دانه‌بندی‌های مختلف تراشه آسفالتی احیا شده بر مقاومت تغییرشکل مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای

۳۰ درصد RAP، تغییرشکل عمودی کمتری نسبت به نمونه‌های حاوی RPO داشتند. به طور خاص، WEO توانست تغییرشکل عمودی را به میزان ۱۳/۸ درصد نسبت به RPO کاهش دهد. این یافته نشان می‌دهد که WEO با بهبود انعطاف‌پذیری مخلوط، توانایی بیشتری در کاهش تغییرشکل عمودی دارد.

داشتند. این اختلاف احتمالاً به دلیل تراکم بالاتر و کاهش انعطاف‌پذیری در RAP ریزدانه است. ذرات ریزتر با سطح ویژه بیشتر، پیوندهای قوی‌تری ایجاد می‌کنند. اما همین ویژگی ممکن است انعطاف‌پذیری مخلوط را محدود کرده و منجر به تغییرشکل عمودی بیشتر شود. در بررسی تأثیر نوع افزودنی، مشخص شد که نمونه‌های حاوی WEO در هر دو سطح ۱۵ درصد و



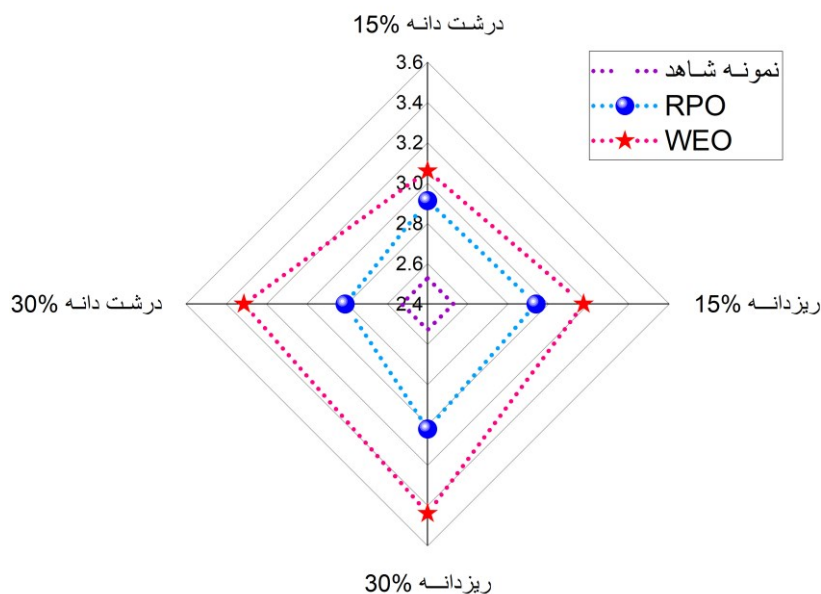
شکل ۱۲. تغییرشکل عمودی در نقطه اوج در آزمون کیم با توجه به میزان تراشه آسفالتی جایگزین و درصد جوانساز

در نمونه‌های حاوی افزودنی WEO. این امر نشان می‌دهد که درصد بیشتر RAP، با افزایش سختی مخلوط، منجر به بهبود مقاومت در برابر تغییرشکل می‌شود. با این حال، در برخی موارد خاص، مانند نمونه‌های حاوی RAP ریزدانه با RPO، این افزایش مشاهده نشده است. این رفتار ممکن است ناشی از مشکلات مربوط به تراکم مخلوط یا ترکیب نامناسب مواد باشد که موجب محدود شدن عملکرد بهینه RAP شده است. در مکانیزم اثرگذاری نوع RAP نیز مشاهده شد که

بر اساس نتایج و داده‌های ارائه شده در شکل ۱۳، تمامی نمونه‌های حاوی RAP (در هر دو سطح ۱۵٪ و ۳۰٪) مقاومت بیشتری نسبت به نمونه شاهد نشان دادند. این یافته حاکی از آن است که استفاده از RAP، در صورتی که به درستی طراحی و اجرا شود، می‌تواند به طور مؤثری بهبود عملکرد مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی را تضمین کند. افزایش RAP از ۱۵٪ به ۳۰٪ به طور کلی عدد مقاومت در برابر تغییرشکل را افزایش داده است، به‌ویژه

توجه مقاومت در برابر تغییرشکل منجر می‌شود و تأثیر هر دو نوع RAP در این زمینه تقریباً برابر است. همچنین، در مقایسه تأثیر افزودنی‌های WEO و RPO، نمونه‌های حاوی WEO در تمامی حالات، مقاومت بیشتری نسبت به نمونه‌های حاوی RPO نشان دادند. این یافته نشان‌دهنده تأثیر مثبت میانگین ۱۱/۱ درصدی WEO در بهبود انسجام و رفتار مکانیکی مخلوط آسفالتی است. این عملکرد بهتر ممکن است به دلیل خواص شیمیایی و ساختاری WEO باشد که موجب تقویت پیوندهای قیر و سنگدانه در حضور RAP می‌شود.

هر دو نوع RAP، ریزدانه و درشت‌دانه، تأثیر مثبتی بر مقاومت در برابر تغییرشکل دارند. اما از طریق مکانیزم‌های متفاوت عمل می‌کنند RAP ریزدانه با توزیع یکنواخت ذرات کوچک‌تر و مساحت سطح بیشتر، باعث ایجاد اتصال قوی‌تر میان قیر و سنگدانه‌ها شده و تغییرشکل عمودی را کاهش می‌دهد. در مقابل، RAP درشت‌دانه به دلیل ساختار مستحکم‌تر و توانایی بالاتر در تحمل نیروهای وارده، منجر به افزایش حداکثر نیروی قابل تحمل در مخلوط می‌شود. ترکیب این دو اثر، یعنی کاهش تغییرشکل توسط RAP ریزدانه و افزایش تحمل نیرو توسط RAP درشت‌دانه، در نهایت به بهبود قابل



شکل ۱۳. عدد مقاومت در برابر تغییرشکل در آزمون کیم با توجه به میزان تراشه آسفالتی جایگزین و درصد جوانساز

حفظ عملکرد مطلوب قیر اصلاح‌شده و تأمین نیازهای مهندسی مشخص می‌شود.

– در آزمون نقطه نرمی نشان داده شد که افزودن جوانساز RPO به قیر پیرشده نسبت به WEO تأثیر قابل توجهی در کاهش نقطه نرمی قیر و بهبود عملکرد آن دارد. به طور میانگین، افزودن ۵ تا ۲۰ درصد جوانساز RPO باعث کاهش ۴/۷۵ درصدی در نقطه نرمی قیر نسبت به افزودن

## ۶. نتیجه‌گیری

با توجه به آزمون‌ها و تحلیل‌های انجام گرفته از مخلوط‌های آسفالتی تهیه شده، نتایج به‌دست آمده از این پژوهش شامل موارد زیر است:  
– مقدار بهینه جوانسازهای RPO و WEO برای دستیابی به درجه نفوذ در محدوده ۶۰ تا ۷۰، بین ۱۴/۵٪ تا ۱۶٪ تعیین شد، که این محدوده به‌عنوان یک حد مناسب برای

- نتایج نشان می‌دهد که افزودن WEO می‌تواند بهبود قابل توجهی در رفتار مکانیکی مخلوط‌های حاوی RAP ایجاد کند و به عنوان یک استراتژی مناسب برای طراحی پایدار مخلوط‌های آسفالتی توصیه می‌شود. افزودنی WEO به دلیل بهبود انعطاف‌پذیری قیر، عملکرد بهتری در کاهش تغییرشکل عمودی نسبت به RPO دارد.

- برای پارامتر عدد مقاومت در برابر تغییرشکل  $S_D$  RAP ریزدانه با توزیع یکنواخت ذرات کوچکتر و مساحت سطح بیشتر، موجب بهبود پیوند قیر و سنگدانه‌ها و کاهش تغییرشکل عمودی شد. در حالی که RAP درشت‌دانه به دلیل ساختار مستحکم‌تر، توانایی بیشتری در تحمل نیروهای وارده داشت و منجر به افزایش حداکثر مقاومت مخلوط گردید. ترکیب این دو مکانیزم بهبود عملکردی تقریباً برابر در مقاومت نهایی را ارائه کرد.

- در بررسی عدد مقاومت در برابر تغییرشکل  $S_D$  نمونه‌های حاوی افزودنی WEO در تمامی حالات، مقاومت بیشتری نسبت به نمونه‌های حاوی RPO نشان دادند. تأثیر مثبت WEO با میانگین بهبود ۱۱/۱٪ در مقایسه با RPO مشاهده شد که می‌تواند به دلیل خواص شیمیایی و ساختاری WEO باشد که انسجام و پیوندهای قیر و سنگدانه‌ها را در حضور RAP تقویت می‌کند.

جوانساز RPO شد و در عین حال عملکرد قیر را بهبود بخشید.

- نتایج آزمون ریزش قیر نشان داد که افزایش درصد RAP در مخلوط‌ها به طور مستقیم به کاهش ریزش قیر منجر شد. به‌ویژه، نمونه‌های حاوی روغن RPO کاهش ۲۰/۴ درصدی و نمونه‌های حاوی WEO کاهش ۱۸/۸ درصدی در ریزش قیر نشان دادند، که نشان‌دهنده اثر مثبت RAP در کاهش جریان قیر و بهبود پایداری مخلوط‌های آسفالتی است.

- تمامی نمونه‌های حاوی RAP نسبت به نمونه‌های شاهد عملکرد مکانیکی بهتری داشتند. با جایگزینی ۱۵ درصدی RAP، مقاومت در برابر تغییرشکل به میزان ۱۰/۴ درصد افزایش یافت و این مقدار در جایگزینی ۳۰ درصدی RAP به ۲۳/۸ درصد نسبت به نمونه شاهد رسید.

- مخلوط‌های حاوی WEO به‌طور متوسط ۸/۷ درصد مقاومت بیشتری نسبت به RPO داشتند. این بهبود را می‌توان به خواص شیمیایی و ویسکوزیته بیشتر WEO نسبت داد که باعث تقویت اتصال بین RAP و قیر شده و انسجام مخلوط را افزایش داده است.

- استفاده از ۱۵ درصد RAP تأثیر مثبتی در کاهش تغییرشکل عمودی مخلوط‌ها دارد. اما افزایش RAP به ۳۰ درصد می‌تواند به دلیل کاهش انعطاف‌پذیری، تغییرشکل عمودی را افزایش دهد.

## ۷. مراجع

- Abd Al Kareem, H. M. and Albayati, A. H. K. 2022. "The possibility of minimizing rutting distress in asphalt concrete wearing course". Eng. Tech. Appl. Sci. Res., 12(1): 8063-8074.
- Adiman, E. Y., Sebayang, M., Ermiyati, E. and Morena, Y. 2023. "The durability of stone matrix asphalt (SMA) mixtures designed using reclaimed asphalt pavement (RAP) aggregates against floodwater immersion". J. Appl. Eng. Tech. Sci. (JAETS), 4(2): 921-928.
- Al Dughaihi, H., Al Lawati, J., Bilema, M., Babalghaith, A. M., Mashaan, N., Yusoff, N. I. M. and Milad, A. 2022. "Encouraging sustainable use of RAP materials for pavement construction in Oman: A review". Recy., 7(3): 35.
- Al-Ghurabi, S. B. and Al-Humeidawi, B. H. 2021. "Comparative evaluation for the effect of particles size of reclaimed asphalt pavement (RAP) on the properties of HMA". J. Phys.: Conference Series, 1895(1): 012025.

- Al-Shamayleh, R. A., Ibrahim, R., Alkhrrissat, T. and Alqatamin, A. 2022. "Mechanical properties evaluation of asphalt mixtures with variable contents of reclaimed asphalt pavement (RAP)". *Results Eng.*, 14: 100463.
- Anusha, T. M., Sharath Kumar, M. D. and Jagadeesh, H. S. 2021. "Evaluation of fatigue potential for crumb rubber modified bitumen in stone mastic asphalt mixes". *Int. J. Recent Tech. Eng.*, 10(3): 170-183. <https://doi.org/10.35940/ijrte.C6470.0910321>
- Baran, S. A., Kutsman, O. M. and Hrynychak, I. I. 2022. "Forecasting the durability of road covering made of stone-mastic asphalt concrete". *The National Transport Univ. Bull.*
- Chaitanyaa, G., Srib, M. R. and Reddyc, K. S. 2015. "Fatigue performance of bituminous mixes containing reclaimed asphalt pavement (RAP) material". *Proceedings of the 3rd Conference of Transportation Research Group of India, Kolkata, India*, pp. 17-20.
- Fakhri, M., Hadi, A. and Ghanbari, M. 2024. "Laboratory investigation of fracture and fatigue characteristics in stone mastic asphalt (SMA) mixtures containing reclaimed asphalt pavement (RAP)". *J. Transport. Infrastruct. Eng.* <https://doi.org/10.22075/JTIE.2024.35442.1691>
- Fernandes, S., Silva, H. M. R. D. and Oliveira, J. R. M. 2019. "Mechanical, surface and environmental evaluation of stone mastic asphalt mixtures with advanced asphalt binders using waste materials". *Road Mater. Pavement Design*, 20(2): 316-333.
- Gaillard, L., Chazallon, C., Hornych, P., Quezada, J. C. and Geffard, J. L. 2022. "Study of the influence of the mastic coating of untreated reclaimed asphalt pavement on the permanent and resilient behavior". *J. Test. Eval.*, 50(2).
- Gardziejczyk, W., Plewa, A. and Pakholak, R. 2020. "Effect of addition of rubber granulate and type of modified binder on the viscoelastic properties of stone mastic asphalt reducing tire/road noise (SMA LA)". *Mater.*, 13(16): 3446.
- Gettu, N. 2021. "Influence of ground tire rubber on stone mastic asphalt mixtures and preliminary sustainability studies on rubber-modified asphalt pavements". Thesis, University of Missouri-Columbia.
- Gu, Y., Ding, C., Shen, J. and Wang, W. 2022. "Low temperature crack resistance of stone mastic asphalt affected by its nominal maximum size and asphalt binders". *Appl. Sci.*, 12(15): 7444.
- Hafeez, I., Kamal, M. A., Mirza, M. W. and Aziz, A. 2012. "Investigating the effects of maximum size of aggregate on rutting potential of stone mastic asphalt". *Pak. J. Eng. Appl. Sci.*, 10: 89-96.
- Hafeez, I., Kamal, M. A. and Mirza, M. W. 2015. "An experimental study to select aggregate gradation for stone mastic asphalt". *J. Chin. Inst. Eng.*, 38(1): 1-8.
- Hyzl, P., Dasek, O., Coufalikova, I., Varaus, M. and Stehlik, D. 2019. "Usage of reclaimed asphalt material in stone mastic asphalt". *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2019(1): 3078708.
- Irfan, M., Ali, Y., Ahmed, S., Iqbal, S. and Wang, H. 2019. "Rutting and fatigue properties of cellulose fiber-added stone mastic asphalt concrete mixtures". *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2019(1): 5604197.
- Izaks, R., Haritonovs, V., Klasa, I. and Zaumanis, M. 2015. "Hot mix asphalt with high RAP content". *Proc. Eng.*, 114: 676-684.
- Jørgensen, T., Fiske, T. H. and Telle, R. 2022. "High content of reclaimed asphalt pavement (RAP) in asphalt mixtures—optimal use of rejuvenators". *Eleventh International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*, pp. 407-417.
- Kareem, Z. M. and Abed, A. H. 2023. "Effect of high RAP content on Marshal performance of hot asphalt mixture for surface and binder layers". *E3S Web of Conferences*, 427. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342703003>
- Khabiri, M. M. and Saboohi, M. 2023. "Effects of coarse aggregate RAP content on the mechanical and shear performance of HMA by the UPT method". *Slovak J Civ. Eng.*, 31(2): 70-78.
- Khabiri, M. M., Hadi, A. and Shad, M. M. M. 2023. "Crushed ceramic wastes and its effect on strength and abrasion characteristics of roller compacted concrete pavement". *Waste Forum*, 1(1): 32-44. [https://www.wasteforum.cz/cisla/WF\\_1\\_2023\\_p32.pdf](https://www.wasteforum.cz/cisla/WF_1_2023_p32.pdf)
- Kim, S., Lee, S. J., Lee, S. and Kim, K. W. 2013. "Evaluation of rut resistance of polymer-modified asphalt concretes". *Adv. Mater. Res.*, 687: 282-288. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.687.282>
- Kumari, M., Ransinchung, G. D. R. N. and Singh, S. 2018. "A laboratory investigation on dense bituminous macadam containing different fractions of coarse and fine RAP". *Constr. Build. Mater.*, 191: 655-666.
- Ling, C. and Bahia, H. 2020. "Modelling of aggregates' contact mechanics to study roles of binders and aggregates in asphalt mixtures rutting". *Road Mater. Pavement Design*, 21(3): 720-736.
- Liu, H., Hao, P. and Xu, J. 2017. "Effects of nominal maximum aggregate size on the performance of stone matrix asphalt". *Appl. Sci.*, 7(2): 126.

- Morea, F., Nosetti, R., Gonzalez, L. and Sánchez, A. 2023. "Performance analysis of non-conventional stone mastic asphalt (SMA) elaborated with crumb rubber bitumen or by mean of glass macrofibers addition". *Constr. Build. Mater.*, 400: 132654.
- Naser, S. S. M., Seyedi, M. and Al-Busaltan, S. 2023. "Enhancing stone mastic asphalt through the integration of waste paper and cement kiln dust". *J. Civ. Hyd. Eng.*, 1(1): 23-37.
- Pan, Y., Guo, H., Guan, W. and Zhao, Y. 2023. "A laboratory evaluation of factors affecting rutting resistance of asphalt mixtures using wheel tracking test". *Case Stud. Constr. Mater.*, 18: e02148.
- Pradyumna, T. A., Mittal, A. and Jain, P. K. 2013. "Characterization of reclaimed asphalt pavement (RAP) for use in bituminous road construction". *Proc.-Soc. Behav. Sci.*, 104: 1149-1157.
- Prashanth, L. D. 2020. "Laboratory investigation on the effect of rejuvenator in reclaimed asphalt pavement based stone mastic asphalt mixes". *Nat. Inst. Tech. Karnataka*.
- Qiu, Y. F. and Lum, K. M. 2006. "Design and performance of stone mastic asphalt". *J. Transport. Eng.*, 132(12): 956-963.
- Raj, N. K. K. and Ramesh, A. 2024. "Development of sustainable pavement: An experimental study of stone mastic asphalt prepared with warm mix additives and reclaimed asphalt pavement". *IOP Conference Series: Earth Environ. Sci.*, 1326(1): 012082.
- Ramiączek, P., Cielibała, M., Skrzyniarz, N., Janus, K., Maciejewski, K., Iwański, M. M. and Chomicz-Kowalska, A. 2023. "Influence of the type of recycled asphalt pavement on the properties of the SMA JENA 16 stone mastic asphalt mixture". *Roads Bridges-Drogi i Mosty*, 22(4): 569-578.
- Ren, S., Liu, X. and Erkens, S. 2024. "Role of thermodynamic relaxation on effectiveness of recycling agents on properties of aged bitumen". *Fuel*, 368: 131658.
- Saliani, S. S., Carter, A., Baaj, H. and Mikhailenko, P. 2019. "Characterization of recovered bitumen from coarse and fine reclaimed asphalt pavement particles". *Infrastruct.*, 4(2): 24.
- Shinde, S. S. 2023. "Experimental examination on use of recycled materials in stone matrix asphalt". *Int. J. Sci. Res. Eng. Manag.*, 07(09). <https://doi.org/10.55041/ijrsrem25520>
- Singh, S., Ransinchung, G. D. R. N., Monu, K. and Kumar, P. 2018. "Laboratory investigation of RAP aggregates for dry lean concrete mixes". *Constr. Build. Mater.*, 166: 808-816.
- Subhy, A., Lo Presti, D., Airey, G. and Widyatmoko, I. 2022. "Rutting analysis of different rubberised stone mastic asphalt mixtures: From binders to mixtures". *Road Mater. Pavement Design*, 23(9): 2098-2114.
- Tsakoumaki, M. and Plati, C. 2024. "A critical overview of using reclaimed asphalt pavement (RAP) in road pavement construction". *Infrastruct.*, 9(8), 128.
- Wang, P., Chen, J., Wang, J., Li, J., Ning, H., Liang, C., Ge, X. and Wang, X. 2023. "Evaluation of the refined decomposition effect of reclaimed asphalt pavement materials". *Build.*, 13(9): 2240.
- Zangoeina, P., Moazami, D., Bilondi, M. P. and Zaresefat, M. 2023. "Improvement of pavement engineering properties with calcium carbide residue (CCR) as filler in stone mastic asphalt". *Results Eng.*, 20: 101501.
- Zhang, Y., Zhou, C., Zou, P., Hu, M. and Cao, P. 2024. "A novel WCO-MDI reactive rejuvenation method for aged SBS modified asphalt toward sustainable asphalt pavements". *J. Clean. Prod.*, 434: 140199.
- Zhou, G., Tian, Y., Gong, L., Pang, Z. and Chen, T. 2022. "Performance of rejuvenated asphalt and mixtures with waste engine oil bottom and liquid styrene-butadiene rubber". *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2022(1): 4203851.