



Semnan University



## Research Article

## Experimental Study of the Effect of Recycled Waste Travertine Stone Powder on the Performance of Thin-layer Surface Treatment

Nejati, A.<sup>a</sup> , Mansourian, A.<sup>b\*</sup> , Ravanshadnia, M.<sup>c</sup> , Sadeh, E.<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

<sup>b</sup> Associate Professor, Department of Bitumen and Asphalt, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran.

<sup>c</sup> Associate Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

<sup>d</sup> Assistant Professor, Department of Management, Saveh Branch, Islamic Azad University, Saveh, Iran.

## PAPER INFO

**Paper history:**

Received: 2024-01-09

Revised: 2024-02-02

Accepted: 2024-03-12

**Keywords:**

Thin layer surface;  
treatment;  
Slurry seal;  
RWTSP;  
XRF.

## ABSTRACT

Today, surface treatments have become extensively popular for pavement maintenance and repair around the globe. A major environmental problem of the present age is the ever-increasing generation of construction wastes (CWs). Application of recycled CW in pavements can contribute to preservation of non-renewable materials while reducing the environmental problems. The present research seeks to investigate possible usage of recycled waste travertine stone powder (RWTSP) as an alternative to mineral filler (MF) in thin-layer surface treatment mixtures (slurry seal). For this purpose, wet cohesion test, wet abrasion test, loaded wheel – displacement test, and loaded wheel – sand cohesion test were performed on mixtures in which the MF was replaced by the RWTSP at 0, 25, 75, and 100 wt.% (by total weight of filler). Then, FESEM-EDS, XRF, and FTIR analyses were performed to check for the particle geometry and surface analysis, chemical composition, identification of organic compounds and their structures, chemical bonds, and recognition of functional groups and their molecular structure. Results showed that the mixture containing RWTSP at 100 wt.% with a residual bitumen content of 9% provided for improved wet cohesion, abrasion, and vertical and lateral displacements by about 27.3, 23, 27.9, and 19.5%, respectively. Indeed, thanks to irregular particle geometry with uneven and rough surfaces coupled with higher contents of CaO and SiO<sub>2</sub>, the RWTSP filler replacement enhances the performance of the thin-layer surface treatment.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jtie.2024.32936.1662>

\* Corresponding author.

E-mail address: [a.mansourian@bhrc.ac.ir](mailto:a.mansourian@bhrc.ac.ir)

**How to cite this article:** Nejati, A., Mansourian, A., Ravanshadnia, M., & Sadeh, E. (2023). Experimental Study of the Effect of Recycled Waste Travertine Stone Powder on the Performance of Thin-layer Surface Treatment. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 9(4), 59-81. doi: [10.22075/jtie.2024.32936.1662](https://doi.org/10.22075/jtie.2024.32936.1662)

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

# مطالعه آزمایشگاهی تأثیر به کارگیری پودر ضایعات سنگ تراورتن در عملکرد آسفالت حفاظتی لایه نازک

امین نجاتی<sup>۱</sup>، احمد منصوریان<sup>۲\*</sup>، مهدی روانشادنیا<sup>۳</sup>، احسان ساده<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup>گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران  
<sup>۲</sup>دانشیار، گروه قیر و آسفالت، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران  
<sup>۳</sup>دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران  
<sup>۴</sup>استادیار، گروه مدیریت، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ساوه، ساوه، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۱۹ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۱۳ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۲۲ واژگان کلیدی: آسفالت حفاظتی لایه نازک، اسلاری سیل، پودر ضایعات سنگ تراورتن، XRF	امروزه، آسفالت‌های حفاظتی در تعمیر و نگهداری روسازی‌ها در سراسر جهان به شکل قابل چشمگیری رواج یافته است. در عصر حاضر، یکی از مشکلات بزرگ زیست‌محیطی ایجاد شده، تولید قابل توجه ضایعات ساختمانی می‌باشد. استفاده از ضایعات ساختمانی قابل بازیافت در روسازی‌ها می‌تواند به حفظ مواد تجدیدناپذیر و در عین حال کاهش مشکلات زیست‌محیطی کمک کند. هدف از این پژوهش، بررسی جایگزینی پودر سنگ تراورتن بازیافتی ضایعاتی (RWTSF) در طرح اختلاط آسفالت حفاظتی لایه نازک (اسلاری سیل) در مقایسه با فیلر معدنی (MF) است. برای این منظور، آزمایش‌های چسبندگی مرطوب، سایش در شرایط مرطوب، بارگذاری چرخ-جابه‌جایی و بارگذاری چرخ-چسبندگی ماسه در پنج ترکیب مختلف شامل صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد بر اساس وزن کل فیلر انجام شد و سپس جهت بررسی شکل ذرات و آنالیز سطح مواد، تعیین اجزای تشکیل‌دهنده، و همچنین تعیین ساختار و شناسایی ترکیبات آلی، پیوندهای شیمیایی و شناسایی گروه‌های عاملی و ساختار مولکولی آن از آزمایش‌های FESEM-EDS، FTIR بهره گرفته شد. نتایج نشان داد که مخلوط حاوی ۱۰۰ درصد فیلر پودر سنگ تراورتن بازیافتی ضایعاتی با قیر باقیمانده ۹ درصد، چسبندگی مرطوب، سایش، جابه‌جایی عمودی و جانبی را به ترتیب در حدود ۲۷/۳، ۲۳، ۲۷/۹ و ۱۹/۵ درصد بهبود داده است. جایگزینی فیلر پودر سنگ تراورتن بازیافتی ضایعاتی، به دلیل دارا بودن شکل‌های نامنظم و سطوح ناهموار و خشن‌تر و درصد زیاد کلسیم اکسید و سیلیس، موجب بهبود عملکرد آسفالت حفاظتی لایه نازک می‌شود.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jtie.2024.32936.1662>

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: [a.mansourian@bhrc.ac.ir](mailto:a.mansourian@bhrc.ac.ir)

استناد به این مقاله: نجاتی، امین، منصوریان، احمد، روانشادنیا، مهدی، & ساده، احسان. (۱۴۰۲). مطالعه آزمایشگاهی تأثیر به کارگیری پودر ضایعات سنگ تراورتن در عملکرد آسفالت حفاظتی لایه نازک. مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، (۴)، ۸۱-۵۹. doi: 10.22075/jtie.2024.32936.1662

## ۱. مقدمه

منافع بسیاری به دنبال دارد که صرفه جویی اقتصادی یکی از آنهاست. کاهش مصرف سنگ‌های جدید که از معدن استخراج شده‌اند، کاهش مساحت زمین‌های مختص به دفع سنگ ضایعاتی و کاهش تولید دی‌اکسید کربن نیز از دیگر مزایای بازیافت نخاله‌های سنگی است (شی و همکاران، ۲۰۱۹).

یکی از انواع روسازی‌های آسفالتی، آسفالت حفاظتی لایه‌نازک است که به‌عنوان یک روش درمانی سطحی و راه‌حل مؤثر برای نگهداری پیشگیرانه روسازی‌ها در سه دهه اخیر با مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی قابل توجهی پذیرفته شده است (سانتوس و همکاران، ۲۰۱۷؛ لو، ۲۰۱۹). آسفالت حفاظتی لایه‌نازک شامل ترکیبی از سنگ‌دانه‌های باکیفیت، امولسیون قیر، پرکننده‌های معدنی، آب و افزودنی‌های پلیمری است که برای محافظت و به تأخیرانداختن آسیب روسازی، بهبود سطح جاده‌ها، افزایش مقاومت در برابر لغزش، باز کردن سریع ترافیک، صرفه‌جویی در مصرف منابع طبیعی، کاهش مصرف انرژی و دستیابی به اهداف سازگار با محیط‌زیست استفاده می‌شود (ونگ و همکاران، ۲۰۱۹).

یک جزء مهم که به طور قابل توجهی بر عملکرد و کیفیت آسفالت حفاظتی لایه‌نازک تأثیر می‌گذارد و نیاز به انتخاب دقیق دارد، فیلر است (راتاناشوتینونت و همکاران، ۲۰۱۸). مهم‌ترین عملکرد فیلر عبارت است از: تسریع در سرعت شکستن و گیرایی قیر امولسیون، مؤثر در بالابردن چسبندگی مخلوط آسفالت حفاظتی لایه‌نازک، حفظ پایداری و به‌حداقل رساندن جدایی مصالح سنگی، سفت‌شدگی قیر باقی‌مانده و همچنین اصلاح دانه‌بندی مخلوط (ونگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ لو و همکاران، ۲۰۱۹).

حسامی و همکاران (۲۰۲۰) به ارزیابی عملکرد آسفالت حفاظتی لایه‌نازک با پودر لاستیک پرداختند و نتیجه گرفتند که با افزایش سریع تعداد وسایل نقلیه،

با توجه به افزایش جمعیت طی دهه‌های گذشته، و به دنبال آن رشد شهرنشینی و فرایندهای صنعتی شدن، سرانه تولید زباله به طور تصاعدی در حال رشد است. تخمین زده می‌شود که ۹۰ درصد مواد خام مورد استفاده برای تولید محصولات بادوام، حتی قبل از خروج محصول از کارخانه، به زباله تبدیل می‌شود (سیمائو و همکاران، ۲۰۲۱).

هر متر مربع ساختمان، ۱/۵ تن آوار دارد. ارزش هر تن زباله ساختمانی ۱۵۰ دلار است که نشان می‌دهد از این طلای کثیف می‌توان درآمدزایی کرد (کاراکا و همکاران، ۲۰۱۲). نخاله‌های ساختمانی شامل دو بخش پرخطر و بی‌خطر هستند. استفاده از نخاله‌های ساختمانی بازیافتی موجب کاهش مصرف انرژی، کاهش مصرف مصالح، آب و مواد معدنی خواهد شد. در بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته، بین ۷۰ الی ۹۵ درصد ضایعات ساختمانی بازیافت می‌شوند (حسینی و ملکی طولابی، ۲۰۲۳). استفاده مجدد از ضایعات سنگ در صنایع مبدأ یا در صنایع دیگر در حال حاضر در تلاش برای کاهش کمیت و نسبت ضایعات و کاهش اثرات ضایعات بر سلامت انسان و محیط‌زیست در حال تحقیق است. با این حال، مقدار بازیافت ضایعات ساختمانی بسیار کم می‌باشد. در این راستا، باید راه‌های مؤثر یافت و به کار گرفت (ملکی طولابی و همکاران، ۲۰۱۸؛ حسینی و ملکی طولابی، ۲۰۲۴).

سنگ تراورتن، جزو سنگ‌های رسوبی محسوب می‌شود که ساختاری متخلخل دارد. خاصیت تخلخل تراورتن، در افزایش جذب آب نقش به‌سزایی دارد (دوست‌محمدی و همکاران، ۲۰۱۹). امروزه، یکی از تلاش‌های جهانی برای کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از ضایعات سنگی، استفاده از مواد بازیافتی سنگ در صنایع مختلف می‌باشد. استفاده از سنگ‌های بازیافتی از طریق تخریب و استفاده مجدد،

در تحقیقی دیگر، چنگ و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی تأثیر ضایعات سنگ‌دانه‌های شیشه‌ای بر عملکرد آسفالت حفاظتی پرداختند و اعلام نمودند که هر ساله مقادیر زیادی شیشه زباله در چین تولید می‌شود که تأثیر مخربی بر محیط‌زیست وارد می‌کند. در این تحقیق، استفاده از ضایعات شیشه به‌عنوان سنگ‌دانه در آسفالت حفاظتی آسفالت حفاظتی لایه‌نازک ارزیابی شد. همچنین، اعلام شد که استفاده بالقوه از ضایعات شیشه می‌تواند مصرف بیش از حد منابع طبیعی را کاهش دهد و انتخاب خوبی برای استفاده در مصالح روسازی آسفالت حفاظتی لایه‌نازک است.

مطالعات قبلی، تأثیر مهم استفاده از مصالح بازیافتی را بررسی کرده‌اند؛ اما هیچ تحقیقی روی اثرات پودر سنگ تراورتن بازیافتی ضایعاتی<sup>۱</sup> ساختمانی به‌عنوان فیلر بر مخلوط‌های آسفالت حفاظتی لایه‌نازک (اسلاری سیل) متمرکز نشده است. نوآوری تحقیق حاضر، جایگزینی تا ۱۰۰ درصد فیلر با پودر سنگ تراورتن بازیافتی ضایعاتی ساختمانی در آسفالت حفاظتی لایه‌نازک (اسلاری سیل) می‌باشد. این تحقیق فرض می‌کند که با استفاده از این نوآوری، کیفیت این نوع آسفالت می‌تواند افزایش یابد و میزان ضایعات ساختمانی کاهش یابد. بنابراین، مطالعه حاضر، عملکرد آسفالت حفاظتی لایه‌نازک (اسلاری سیل) حاوی پودر سنگ تراورتن بازیافتی ضایعاتی را با مجموعه‌ای از آزمایش‌های میکروسکوپی و عملکردی شامل تست چسبندگی مرطوب<sup>۲</sup>، تست سایش در شرایط مرطوب<sup>۳</sup>، تست بارگذاری چرخ-جابه‌جایی<sup>۴</sup>، تست بارگذاری چرخ

استفاده از لاستیک‌های فرسوده که هر روز در حال افزایش است، مشکلات زیست‌محیطی را افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، یکی از مسائل اساسی سازمان‌های راه‌داری، بحث مدیریت و نگهداری راه‌ها است.

سوی و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی استفاده از سرباره فولادی در آسفالت حفاظتی پرداختند و اعلام نمودند که سرباره فولاد امروزه به طور گسترده‌ای به‌عنوان سنگ‌دانه برای ساخت روسازی آسفالت استفاده می‌شود و می‌تواند آلودگی محیط‌زیست ناشی از کاهش مصرف سنگ‌دانه‌های طبیعی و بازیافت زباله‌های جامد را به حداقل برساند. با این حال، مطالعات کمی در مورد کاربرد سرباره فولاد در نگهداری پیشگیرانه وجود دارد و مکانیسم افزایش آن در مقاومت در برابر لغزش سطح هنوز ناشناخته است.

هان و همکاران (۲۰۲۰) به ارزیابی عملکرد آسفالت حفاظتی با استفاده از رزین اپوکسی پرداختند و مشخص شد که به‌منظور غلبه بر کاستی‌های دوام پوشش آسفالت در برابر لغزش و مقاومت در برابر سایش ناکافی، از رزین اپوکسی آب به‌عنوان اصلاح‌کننده برای تهیه آسفالت حفاظتی لایه‌نازک استفاده گردید که موجب شد مقاومت در برابر سایش مخلوط به طور قابل توجهی بهبود یابد.

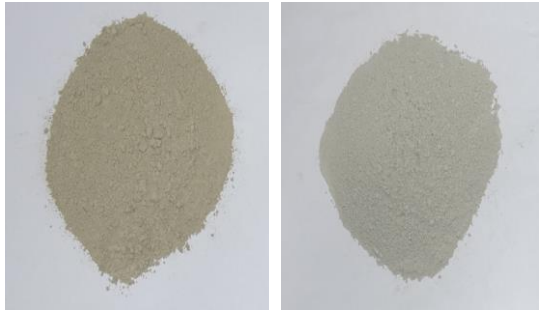
سان و همکاران (۲۰۲۰) طی پژوهشی به بررسی استفاده از پودر سنگ‌دانه در آسفالت حفاظتی پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از پودر سنگ‌دانه در آسفالت حفاظتی می‌تواند الزامات استانداردهای فنی مربوطه را برآورده کند و از طرفی، استفاده از پودر سنگ‌دانه با توجه به عدم نیاز به تولید فیلر معدنی جهت ساخت آسفالت حفاظتی، و همچنین جلوگیری از انباشت پودر سنگ‌دانه در طبیعت که موجب آلودگی آب‌های زیرزمینی و خاک می‌گردد، باعث حفظ محیط‌زیست نیز خواهد شد.

1- Recycled Waste Travertine Stone Powder (RWTSP)

2- Wet Cohesion Tester

3- Wet Track Abrasion Tester (WTAT)

4- LWT- Displacement



(الف) (ب)

شکل ۱. محصولات مورد استفاده در این تحقیق: (الف) پودر ضایعات سنگ تراورتن و (ب) فیلر معدنی

پودر ضایعات سنگ تراورتن با صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد از وزن کل فیلر، جایگزین فیلر شد (شکل ۲).



شکل ۲. درصدهای مختلف پودر ضایعات سنگ تراورتن به‌عنوان فیلر در مخلوط‌های اصلاح شده

همچنین، جزئیات نام‌گذاری مخلوط‌های ساخته شده و مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۲ نشان داده شده است.

چسبندگی ماسه<sup>۱</sup>، FESEM-EDS، XRF و FTIR test بررسی می‌کند.

## ۲. مواد و مصالح

### ۲-۱. مصالح سنگی و فیلر

در این پژوهش، مصالح سنگی از کارخانه ماسه طلای میناب واقع در استان هرمزگان مورد استفاده قرار گرفت. همچنین، از دانه‌بندی نوع II برای ساخت مخلوط‌های آسفالت حفاظتی لایه‌نازک (اسلاری سیل) استفاده گردیده که مطابق با دستورالعمل (ISSA A105) (ISSA، ۲۰۲۰) در محدوده نشان داده شده در جدول ۱ می‌باشد.

جدول ۱. دانه‌بندی مصالح سنگی اسلاری سیل

درصد عبور کرده از الک		اندازه الک
محدوده نوع II دستورالعمل	حد وسط دانه‌بندی نوع II دستورالعمل	
ISSA A105	A105	
۱۰۰-۹۰	۱۰۰	۴/۷۵ میلی‌متر (شماره ۴)
۹۰-۶۵	۷۲	۲/۳۶ میلی‌متر (شماره ۸)
۷۰-۴۵	۴۶	۱/۱۸ میلی‌متر (شماره ۱۶)
۵۰-۳۰	۳۰	۶۰۰ میکرون (شماره ۳۰)
۳۰-۱۸	۲۱	۳۰۰ میکرون (شماره ۵۰)
۲۱-۱۰	۱۶	۱۵۰ میکرون (شماره ۱۰۰)
۱۵-۵	۱۰	۷۵ میکرون (شماره ۲۰۰)

پودر ضایعات سنگ تراورتن و فیلر معدنی مورد استفاده، در شکل ۱ قابل مشاهده است.

<sup>۱</sup> - LWT- Sand adhesion

جدول ۲. ترکیبات مخلوط مورد مطالعه در این پژوهش

نوع مخلوط	مقدار پودر ضایعات سنگ تراورتن (%)	مقدار فیلر معدنی (%)
RWTSP0+MF100	۰	۱۰۰
RWTSP25+MF75	۲۵	۷۵
RWTSP50+MF50	۵۰	۵۰
RWTSP75+MF25	۷۵	۲۵
RWTSP100+MF0	۱۰۰	۰

## ۲-۲. قیر امولسیون اصلاح شده پلیمری

در این تحقیق، از قیر با رده نفوذ ۶۰-۷۰ (شرکت نفت پاسارگاد، ایران) و امولسیفایر (CECA، فرانسه) جهت تهیه قیر امولسیون اصلاح شده پلیمری، طبق استاندارد ASTM D2397 (۲۰۱۷) استفاده گردید. ویژگی‌های قیر امولسیون اصلاح شده در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. مشخصات قیر امولسیونی پلیمری

آزمایش	روش آزمایش	نتیجه آزمایش	رواداری قابل پذیرش
کندروانی سی بولت- فیورل در دمای ۲۵ °C، ثانیه نشست (پایداری) در انبارکردن قیر امولسیون، ۲۴ ساعت (%)	AASHTO T59	۲۵	۱۰۰-۲۰
تقطیر قیر امولسیون، جرم وزنی (%)	ASTM D6930	۰/۴	حداکثر ۱
الک (%)	ASTM D7497	۵۸	حداقل ۵۷
اندود (%)	ASTM D244	۰/۰۹	حداکثر ۰/۱
بار ذرات	AASHTO T59	۹۹	-
آزمایش‌های روی قیر باقی مانده از تقطیر قیر امولسیون			
نقطه نرمی قیر با آزمایش حلقه و گلوله، °C	AASHTO T59	مثبت	مثبت
درجه نفوذ در °C ۲۵، ۱۰۰ گرم، ۵ ثانیه	ASTM D36	۶۵	-
	ASTM D5	۶۱	۹۰-۴۰

## ۲-۳. آب

مطابق استاندارد (ISSA, ۲۰۲۰)، آب مصرفی برای عملیات اجرایی باید صاف و فاقد مواد روغنی، اسیدی، قلیایی، املاح و دیگر مواد مضر باشد. آب مورد استفاده در این تحقیق، آب شهری تصفیه شده و دارای pH برابر ۷/۱ بوده است.

## ۳. برنامه آزمایشگاهی و روش انجام

### آزمایش‌های آسفالتی

#### ۳-۱. برنامه آزمایشگاهی

در بخش اول آزمایش‌ها، آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM) و آزمایش

فلورسانس اشعه ایکس (XRF<sup>۲</sup>) برای مقایسه سطحی و شناسایی اکسیدهای فلزی و اجزای تشکیل دهنده مصالح انجام شد. سپس در فرایند طرح اختلاط نمونه‌های آسفالت حفاظتی، مقادیر اولیه قیر باقی مانده، فیلر معدنی و آب نسبت به وزن خشک مصالح سنگی مطابق جدول ۴ تعیین گردید. در ادامه، برای دستیابی به طرح اختلاط مناسب و ارزیابی عملکرد مخلوط‌های آسفالت حفاظتی، آزمایش چسبندگی مرطوب، آزمایش سایش در شرایط مرطوب، آزمایش چسبندگی ماسه و ارزیابی میزان جابه‌جایی با دستگاه چرخ بارگذاری شده، مطابق دستورالعمل ISSA A105 (۲۰۲۰) با رعایت مقادیر

<sup>2</sup>- X-ray Fluorescence

<sup>1</sup>- Field Emission Scanning Electron Microscopy

مجاز جدول ۵ انجام شده است. لازم به ذکر است که مقدار بهینه قیر مطابق دستورالعمل ISSA TB111 توسط نتایج آزمایش سایش در شرایط مرطوب و

جدول ۴. حدود مواد تشکیل دهنده آسفالت حفاظتی (ISSA ۱۰۵, ۲۰۲۰a)

مواد تشکیل دهنده	حدود پیشنهادی نسبت به وزن خشک مصالح سنگی
قیر باقی مانده	۷/۵ تا ۱۳/۵ درصد
فیلر معدنی	صفر تا ۳ درصد
آب	به میزان لازم برای ایجاد غلظت مناسب در مخلوط

جدول ۵. مقادیر مجاز آزمایش های آسفالت حفاظتی (ISSA ۱۰۵, ۲۰۲۰a)

شماره استاندارد	مقدار مجاز	آزمایش
TB 139	حداقل ۱۲ و ۲۰ کیلوگرم - سانتی متر	چسبندگی مرطوب در ۳۰ و ۶۰ دقیقه
TB 100	حداکثر ۸۰۷ گرم بر متر مربع	افت سایش در شرایط مرطوب ۱ ساعت
TB 109	حداکثر ۵۳۸ گرم بر متر مربع	چسبندگی ماسه توسط چرخ بارگذاری شده
	حداکثر ۱۰ درصد	تغییر مکان عمودی توسط چرخ بارگذاری شده
TB 147	حداکثر ۵ درصد	تغییر مکان افقی توسط چرخ بارگذاری شده

### ۳-۲. آزمایش ها

#### ۳-۲-۱. آزمایش چسبندگی مرطوب

تعیین شده چسبندگی جهت سنجش زمان ترافیک برای بازگشایی برای زمان های ۳۰ و ۶۰ دقیقه به ترتیب ۱۲ و ۲۰ کیلوگرم - سانتی متر مربع است. شکل ۳ (الف) و (ب)، به ترتیب نمونه های مخلوط قبل و بعد از آزمایش را نشان می دهد.

مقدار چسبندگی اولیه و زمان عمل آوری جهت بازگشایی ترافیک با استفاده از آزمایش چسبندگی مرطوب مطابق دستورالعمل (ISSA TB139 (e 2017) تعیین گردید. مطابق دستورالعمل، حداقل مقادیر



(ب)



(الف)

شکل ۳. نمونه های مخلوط آسفالت حفاظتی لایه نازک قبل (الف) و بعد (ب) از آزمایش چسبندگی



دستورالعمل (ISSA TB100 (a 2017) استفاده گردید. شکل ۴ (الف) و (ب)، به ترتیب نمونه‌های مخلوط قبل و بعد از آزمایش را نشان می‌دهد.



(ب)



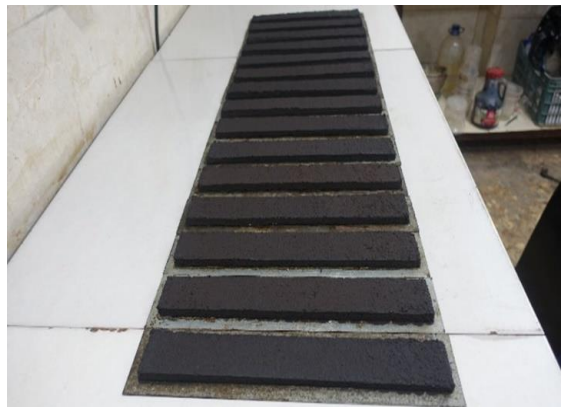
(الف)

شکل ۴. نمونه‌های مخلوط آسفالت حفاظتی لایه نازک قبل (الف) و بعد (ب) از آزمایش سایش در شرایط مرطوب

مطابق دستورالعمل (ISSA TB109 (c 2017) جهت تعیین حداکثر قیر و میزان مقاومت مخلوط در مقابل خرابی قیرزدگی تحت بار ترافیک سنگین به کار می‌رود. شکل ۵ (الف) و (ب)، به ترتیب نمونه‌های مخلوط قبل و بعد از آزمایش را نشان می‌دهد.



(ب)



(الف)

شکل ۵. نمونه‌های مخلوط آسفالت حفاظتی لایه نازک قبل (الف) و بعد (ب) از آزمایش سایش در شرایط مرطوب

(SiO<sub>2</sub>) و کلسیم اکسید (CaO) اجزای اصلی پودر ضایعات سنگ تراورتن را تشکیل می‌دهند که مقادیر آنها بیشتر از فیلر معدنی است و به ترتیب برابر ۱۴/۹۶ و ۴۸/۲۷ درصد می‌باشد.

### ۳-۲-۲. آزمایش سایش در شرایط مرطوب

از دستگاه آزمایش سایش در شرایط مرطوب، جهت تعیین حداقل مقدار قیر باقی مانده و ارزیابی مقاومت در برابر سایش برای جلوگیری از خرابی شن‌زدگی مطابق

### ۳-۲-۳. آزمایش چسبندگی ماسه و ارزیابی میزان

#### جابه‌جایی توسط دستگاه چرخ بارگذاری شده

در این پژوهش، از دستگاه بارگذاری چرخ برای آزمایش چسبندگی ماسه و ارزیابی مقدار جابه‌جایی افقی و عمودی استفاده گردید. آزمایش چسبندگی ماسه

## ۴. نتایج و بحث

### ۴-۱. مطالعات ریزساختاری

آنالیز نتایج FESEM-EDS در جدول ۶ و شکل ۶ آورده شده است. همان‌طور که نشان داده شده، سیلیس



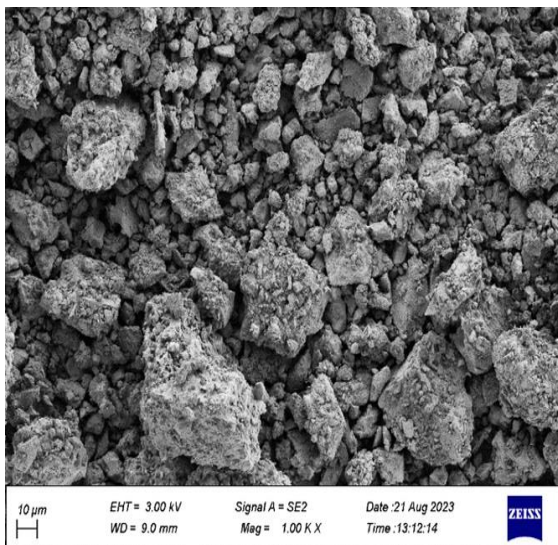
ارزیابی قرار گرفت. با توجه به تصاویر FESEM در شکل ۶، ذرات پودر ضایعات سنگ تراورتن (الف) در مقایسه با فیلر معدنی (ب) دارای شکل‌های نامنظم و سطوح ناهموار و خشن‌تر بودند که می‌تواند خاصیت جذب و چسبندگی به قیر را بهبود بخشد. مطابق تحقیقات صورت گرفته قبلی (زیاری و همکاران، ۲۰۱۹؛ زال‌نژاد و حسامی، ۲۰۲۰)، شکل نامنظم و سطح زیرتر موجب افزایش خاصیت جذب می‌گردد و چسبندگی بهتری را با قیر به همراه خواهد داشت.

در تحقیقات قبلی نیز گزارش گردیده که پودر ضایعات سنگ تراورتن سرشار از سیلیس و کلسیم‌اکسید است (هو و همکاران، ۲۰۲۱؛ ما و همکاران، ۲۰۲۰؛ اُه و همکاران، ۲۰۲۱). در واقع، سیلیس و کلسیم‌اکسید چسبندگی قیر را با سنگ‌دانه‌ها در مخلوط آسفالتی افزایش می‌دهند. در نتیجه، سختی و استحکام مکانیکی مخلوط را بهبود می‌بخشند (شی و همکاران، ۲۰۱۹؛ شر و لیائو، ۲۰۲۲).

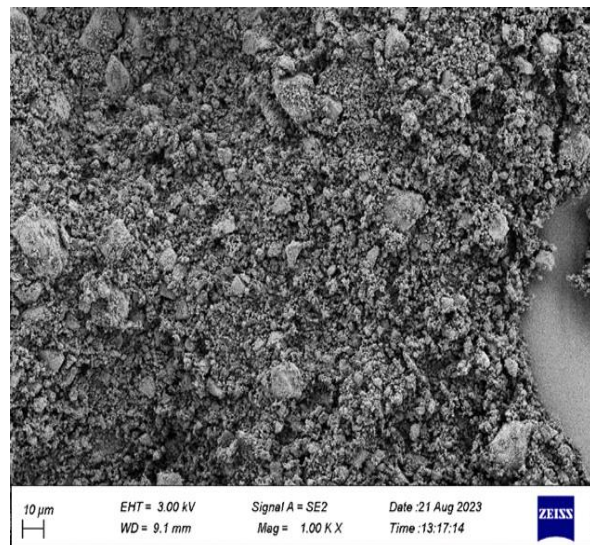
شکل ذرات و آنالیز سطح پودر ضایعات سنگ تراورتن و فیلر معدنی با استفاده از FESEM مورد

جدول ۶. ترکیب شیمیایی فیلر معدنی و پودر سنگ تراورتن بازیافتی ضایعات ساختمانی

LOI	Ba	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	نوع مواد
۳۹/۸۱	-	۲/۱۵۴	۰/۰۱۸	۰/۱۳۷	۴۵/۶۱۷	۰/۲۳	۹/۸۹۳	۱/۱۳۵	۰/۷۰۳	۰/۳۰۵	فیلر معدنی
۲۸/۴۵	۰/۰۷	۲/۲۴۴	۰/۰۲۵	۰/۱۱۸	۴۸/۲۷۳	۰/۴۰۹	۱۴/۹۶۱	۲/۰۶۴	۳/۲۹۸	۰/۰۸۹	پودر ضایعات سنگ تراورتن



(ب)



(الف)

شکل ۶. عکس‌های FESEM: (الف) فیلر معدنی و (ب) پودر ضایعات سنگ تراورتن

شدت طیف مادون‌قرمز را بر اساس طول موج جذبی رسم نماید. در طیف‌های مادون‌قرمز، هر پیک (اوج، قله) نشان‌دهنده میزان جذب در عدد موجی متناظر با آن می‌باشد و توسط یک پیوند شیمیایی مشخص ایجاد می‌شود (جربا و عثمان، ۲۰۲۱).

اسپکترومتری مادون‌قرمز تبدیل فوریه (FTIR) تکنیکی شیمیایی است که برای شناسایی گروه‌های عاملی از آن استفاده می‌شود. این تکنیک می‌تواند میزان

<sup>1</sup> -Fourier-Transform Infrared Spectroscopy

شکل ۷، نتایج آنالیز FTIR برای تعیین ساختار و شناسایی ترکیبات آلی، پیوندهای شیمیایی و شناسایی گروه‌های عاملی و ساختار مولکولی نمونه قیر اصلاح شده پلیمری، قیر اصلاح شده پلیمری حاوی فیلر معدنی، و قیر اصلاح شده پلیمری حاوی پودر ضایعات سنگ تراورتن را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، در طیف قیر اصلاح شده پلیمری، قله در ناحیه بالای  $\text{cm}^{-1}$  ۳۰۰۰ تأییدکننده حضور گروه هیدروکسیل OH در ترکیب است. طیف FTIR در قیر با افزودن فیلر معدنی نشان‌دهنده آن است که از الگوی پیک‌ها، جابه‌جایی‌ها و شدت آن‌ها، تغییرات قابل توجهی در ترکیب شیمیایی قیر اصلاح شده ایجاد شده است. قله در محدوده  $\text{cm}^{-1}$  ۲۹۱۴ و  $\text{cm}^{-1}$  ۲۸۴۸ با شدت قوی مربوط به ارتعاشات کششی گروه  $\text{CH}_{\text{sp}^3, \text{sp}^2}$  الکانی، الکنی و سیستم مزدوج آروماتیک در ساختار قیر است که در اثر اضافه شدن پودر فیلر معدنی در این ناحیه ظاهر شده است. قله در ناحیه  $\text{cm}^{-1}$  ۲۳۵۸ مربوط به ارتعاشات کششی گروه  $\text{CO}_2$  در اجزای قیر است که با شدت متوسط در این ناحیه دیده شده است. قله در ناحیه  $\text{cm}^{-1}$  ۱۷۱۷ با شدت ضعیف، مربوط به ارتعاشات کششی گروه کربونیل  $\text{C}=\text{O}$  در ساختار قیر است که با اضافه شدن پودر فیلر معدنی در فرکانس‌های بالاتری نسبت به قیر خالص دیده شده است. این تغییرات، به دلیل برهمکنش بین اتم اکسیژن گروه کربونیل در ساختار قیر خالص با اتم سیلیس در ساختار پودر فیلر معدنی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تغییرات بسیار جالبی در محدوده  $\text{cm}^{-1}$  ۱۴۰۰ در طیف دیده می‌شود. قله در ناحیه  $\text{cm}^{-1}$  ۱۲۲۴ با شدت ضعیف مربوط به ارتعاشات کششی گروه  $\text{C}-\text{C}$  در ساختار ترکیبات قیر خالص است. پیک در ناحیه  $\text{cm}^{-1}$  ۱۰۱۶ با شدت متوسط نیز مربوط به ارتعاشات کششی نامتقارن گروه  $\text{SiO}-\text{Si}$  می‌باشد. علاوه بر این، با توجه به اینکه پیک در ناحیه  $\text{cm}^{-1}$  ۱۰۲۱ قیر خالص، با شدت ضعیف مربوط به ارتعاشات کششی  $\text{C}-\text{OH}$  (اتصالات الکی)، ارتعاشات کششی  $\text{C}-\text{OC}$  (اتصالات اتری) و گروه عاملی  $\text{S}=\text{O}$  وجود دارد، و از سویی دیگر، پس از اضافه نمودن پودر سنگ تراورتن بازیافتی به قیر خالص، شاهد قله در ناحیه  $\text{cm}^{-1}$  ۱۱۰۱ با شدت متوسط مربوط به ارتعاشات کششی گروه  $\text{C}-\text{O}$  در ساختار پودر سنگ تراورتن می‌باشیم، علاوه بر این، شاهد قله مهم در ناحیه  $\text{cm}^{-1}$  ۱۰۳۲ با شدت متوسط مربوط به ارتعاشات کششی نامتقارن گروه  $\text{SiO}-\text{Si}$  هستیم، لذا قله در محدوده  $\text{cm}^{-1}$  ۱۴۲۳ و  $\text{cm}^{-1}$  ۸۶۹ با شدت بسیار قوی مربوط به ارتعاشات کششی گروه  $\text{CaO}$  در ساختار پودر فیلر معدنی است. با اضافه شدن فیلر معدنی به قیر خالص، هترو اتم‌های  $\text{Ca}$ ،  $\text{Si}$  و اکسیژن با بستر قیر خالص پیوند شیمیایی برقرار کرده و گروه عاملی جدید  $\text{C}-\text{O}-\text{C}-\text{Si}$ ،  $\text{C}-\text{Ca}$  در ناحیه  $\text{cm}^{-1}$  ۱۰۰۰ ظاهر شده که نسبت به طیف فیلر معدنی خالص در فرکانس متفاوتی دیده شده است. این موضوع نشان‌دهنده اختلاط مناسب قیر و پودر فیلر معدنی می‌باشد که در نهایت سبب افزایش ویسکوزیته قیر اصلاح شده می‌شود.

همچنین، بررسی طیف FTIR در قیر با افزودن پودر سنگ تراورتن بازیافتی ضایعاتی نشان‌دهنده تغییرات مناسبی در ترکیب شیمیایی قیر اصلاح شده ایجاد شده می‌باشد. قله در محدوده  $\text{cm}^{-1}$  ۲۲۹۱۷ و  $\text{cm}^{-1}$  ۲۸۴۹ مربوط به ارتعاشات کششی گروه  $\text{CH}_{\text{sp}^3, \text{sp}^2}$  الکانی، الکنی و سیستم مزدوج آروماتیک در ساختار قیر است که در اثر اضافه شدن پودر سنگ تراورتن در این ناحیه دیده شده است. قله در ناحیه  $\text{cm}^{-1}$  ۲۳۵۸ مربوط به ارتعاشات کششی گروه  $\text{CO}_2$  است که با شدت ضعیف دیده شده است. تغییرات در محدوده  $\text{cm}^{-1}$  ۱۴۱۱ و  $\text{cm}^{-1}$  ۸۷۱ با شدت قوی مربوط به ارتعاشات کششی گروه  $\text{CaO}$  در ساختار پودر سنگ تراورتن است. این موضوع نشان‌دهنده

مهندسی زیر ساخت‌های حمل و نقل، سال نهم، پیاپی سی و ششم، زمستان ۱۴۰۲

O معمولاً در ناحیه  $1000\text{ cm}^{-1}$  ظاهر می‌شود، قله در ناحیه  $1088\text{ cm}^{-1}$  تأییدکننده این موضوع است. این تغییرات، سبب افزایش ویسکوزیته قیر اصلاح شده می‌شود.

اختلاط مناسب قیر و پودر سنگ تراورتن می‌باشد. با اضافه شدن پودر سنگ تراورتن به قیر خالص، هترو ات‌های Si، Ca و اکسیژن با بستر قیر خالص پیوند شیمیایی برقرار کرده و گروه عاملی C-Ca، C-Si و C-



شکل ۷. نتایج آزمایش FTIR برای قیر اصلاح شده خالص و همراه با فیلر معدنی و پودر تراورتن مورد استفاده در این تحقیق

درصد قیر، چسبندگی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، از منظر مقدار پودر تراورتن، نمونه‌های RWTSP100 و RWTSP75 در ۸ و ۹ درصد قیر، بیشترین مقدار گشتاور به دست آورده است؛ بنابراین، دارای بیشترین مقدار چسبندگی نسبت به سایر مخلوط‌ها می‌باشد. به عنوان نمونه، در قیر باقی مانده ۹ درصد، مخلوط‌های RWTSP25، RWTSP50، RWTSP75 و RWTSP100 نسبت به نمونه شاهد RWTSP0 به ترتیب موجب افزایش چسبندگی در مدت زمان ۳۰ دقیقه به میزان ۸، ۱۸/۴، ۲۴ و ۲۷/۲ درصد و در مدت زمان یک ساعت به میزان ۸، ۱۲/۷، ۱۷/۴ و ۲۲/۱ درصد شده است. نکته حائز اهمیت دیگر اینکه با افزایش قیر باقی مانده، مقدار بهین

## ۴-۲. نتایج عملکرد مخلوط‌های آسفالت حفاظتی لایه نازک

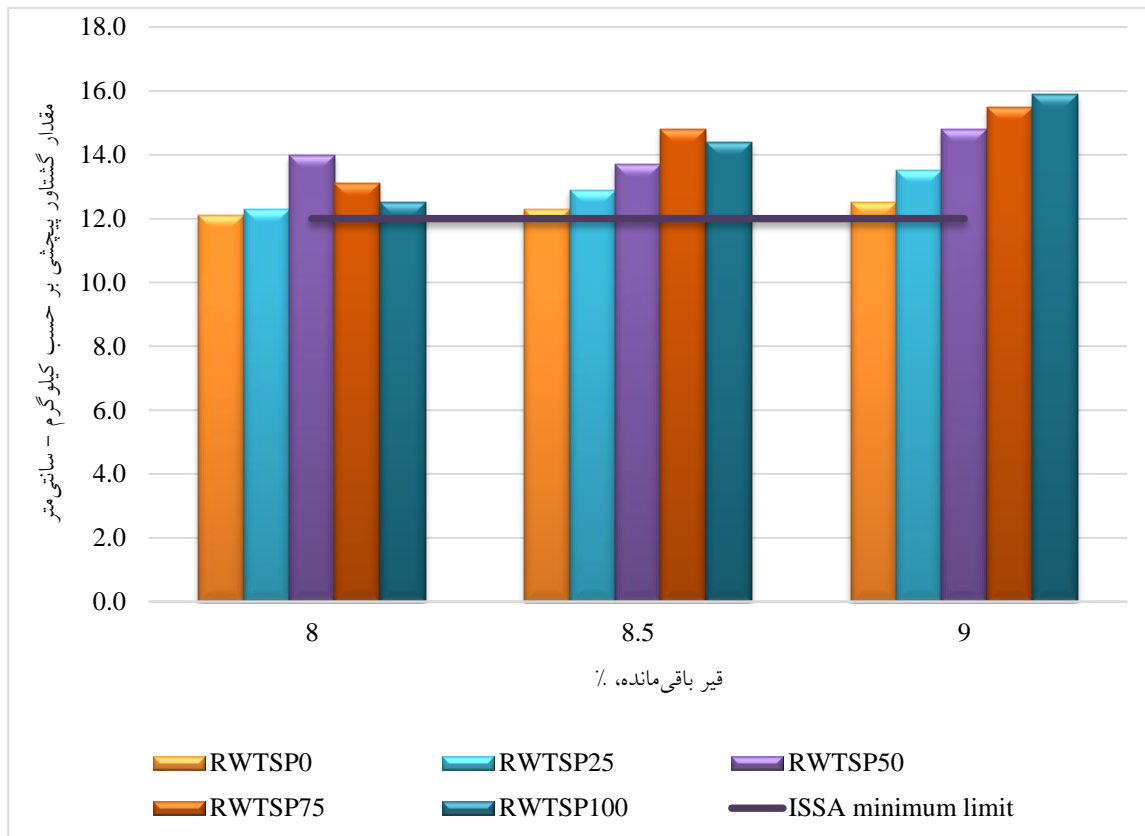
### ۴-۲-۱. آزمایش چسبندگی مرطوب

نتایج آزمون چسبندگی مرطوب برای ۳۰ و ۶۰ دقیقه به ترتیب با شکل‌های ۸ و ۹ مطابقت دارد. با توجه به نمودار و نتایج حاصله، تمامی مخلوط‌ها با توجه به دستورالعمل ISSA A105 گیرش و مقاومت لازم برای بازگشایی ترافیک به ترتیب در مدت زمان ۳۰ دقیقه و یک ساعت را کسب کرده‌اند. در مدت زمان ۳۰ و ۶۰ دقیقه، در نمونه‌های RWTSP50، RWTSP75 و RWTSP100 با افزایش مقدار قیر از ۸ به ۹ درصد، چسبندگی به بیشترین مقدار می‌رسد. لذا، با افزایش

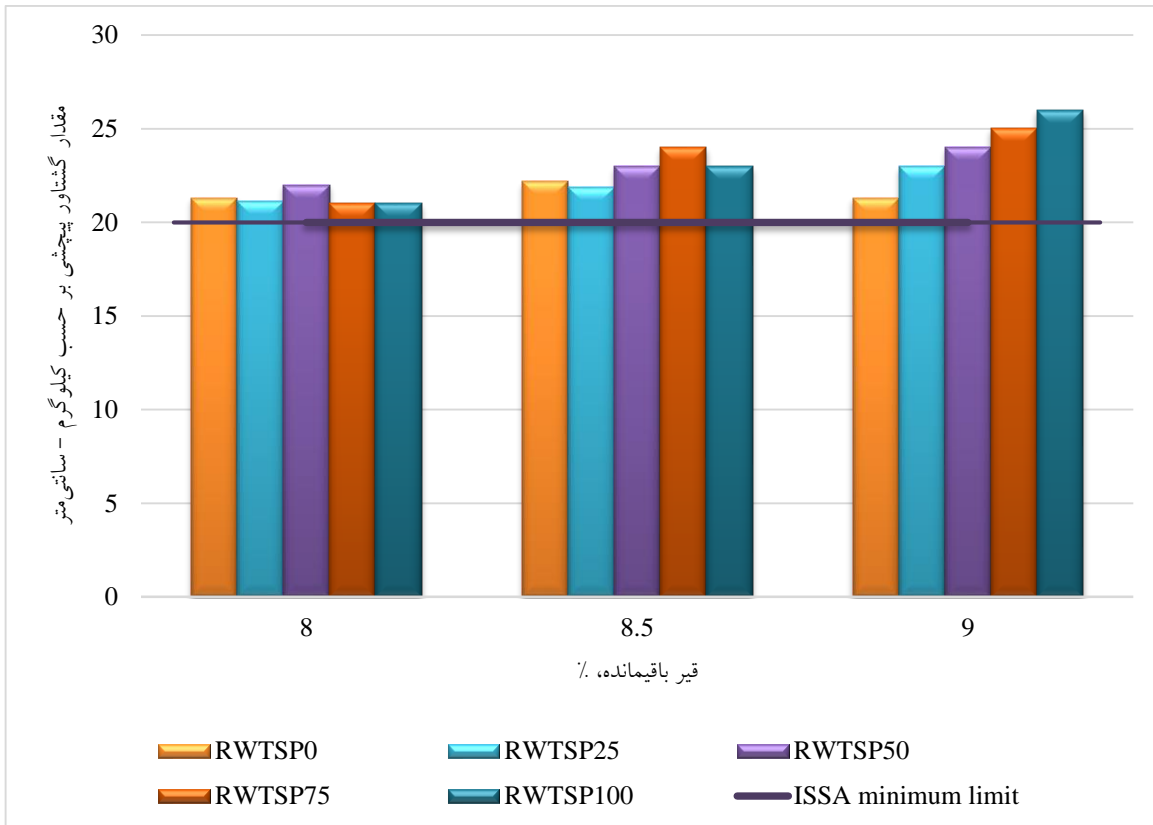
تشکیل داده است که پس از ترکیب و اختلاط با قیر امولسیون، پیوند خوبی بین آن‌ها شکل گرفته و موجب افزایش چسبندگی در مخلوط آسفالتی می‌شود که با نتایج تحقیق سایر پژوهشگران (اختر و سرماه، ۲۰۱۸؛ هو و همکاران، ۲۰۲۱؛ ملکی طولابی و همکاران، a ۲۰۲۳؛ ملکی طولابی و همکاران، b ۲۰۲۳) مطابقت دارد.

پودر تراورتن افزایش می‌یابد؛ به طوری که در قیر باقی‌مانده ۸ درصد، مخلوط‌های RWTSP25 و RWTSP50 به ترتیب بیشترین چسبندگی را دارند. ولی با افزایش مقدار قیر به ۸/۵ و ۹ درصد، مخلوط‌های RWTSP100 و RWTSP75 عملکرد بهتری نسبت به سایر مخلوط‌ها داشته‌اند.

بر اساس آنالیز شیمیایی، عمده ترکیب شیمیایی پودر سنگ تراورتن ضایعاتی را کلسیم‌اکسید و سیلیس



شکل ۸. نتایج آزمایش چسبندگی مرطوب در ۳۰ دقیقه



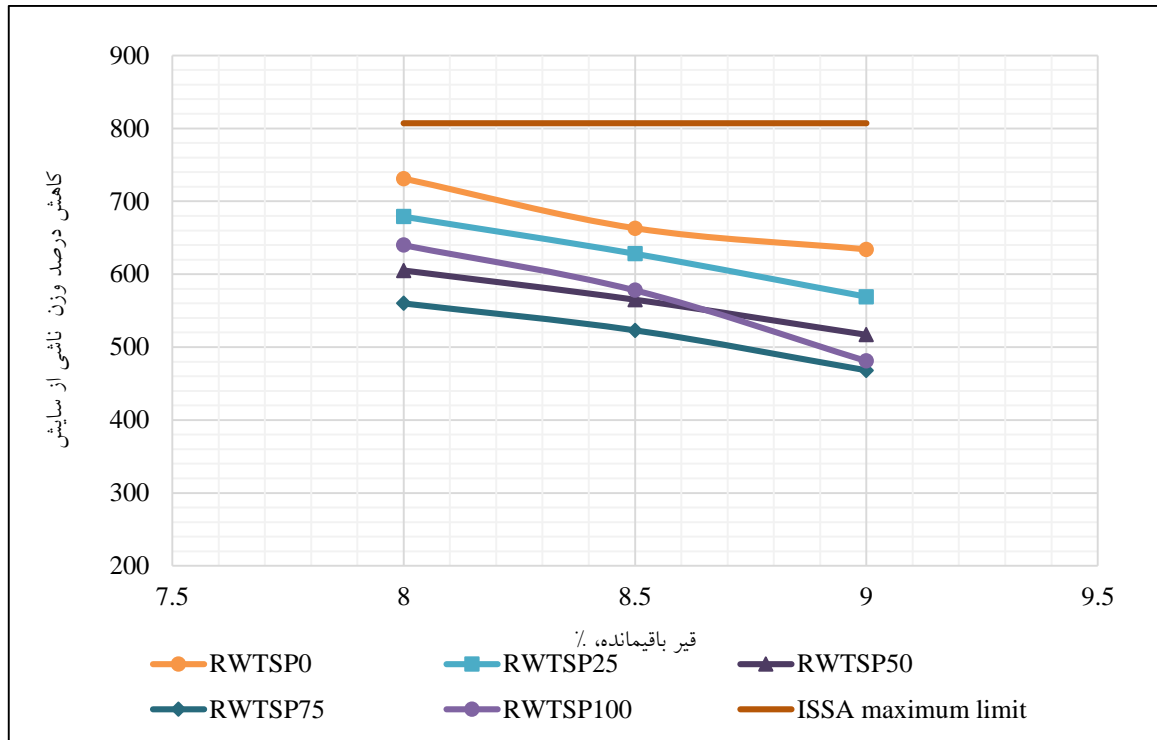
شکل ۹. نتایج آزمایش چسبندگی مرطوب در ۶۰ دقیقه

۹ درصد می‌گردد. به طور مثال، در قیر ۹ درصد، افت وزنی سایشی مخلوط‌های RWTSP50 و RWTSP25 و RWTSP75 و RWTSP100 نسبت به نمونه RWTSP0 به ترتیب ۱۰، ۱۸، ۲۶ و ۲۴ درصد بهتر بوده است. در مجموع، این نتایج حاکی از آن است که می‌توان با افزایش توأم مقدار قیر باقی‌مانده و پودر تراورتن جایگزین فیلر عملکرد سایشی نمونه‌ها را به میزان قابل توجهی بهبود داد.

بهبود چسبندگی و سطوح ناهموار و خشن‌تر باعث می‌شود تا ذرات در شرایط مرطوب در برابر سایش، از خود مقاومت خوبی نشان دهند که با نتایج پژوهشگران دیگر (کی‌منش و همکاران، ۲۰۲۱؛ ملکی طولابی و همکاران، ۲۰۲۳ a؛ ملکی طولابی و همکاران، ۲۰۲۳ b) مطابقت دارد.

## ۴-۲-۲. آزمایش سایش در شرایط مرطوب

نمودار شکل ۱۰، نتایج WTAT را نشان می‌دهد که مقاومت در برابر آسیب رطوبت و حداقل قیر باقی‌مانده مورد نیاز برای مخلوط‌های آسفالتی را بررسی می‌کند. مطابق نتایج آزمایش WTAT، در مدت زمان یک ساعت غوطه‌وری، با تغییر میزان قیر باقی‌مانده از ۸ تا ۹ درصد، روند کاهش وزن ناشی از سایش همه مخلوط‌های اصلاح شده نزولی است. این امر نشان‌دهنده بهبود عملکرد سایشی نمونه‌ها در اثر افزایش درصد قیر می‌باشد. لذا، بهترین عملکرد سایشی متعلق به ۹ درصد قیر باقی‌مانده است. از سوی دیگر، افزایش تأثیر مقدار پودر سنگ تراورتن جایگزین فیلر نیز سبب بهبود عملکرد سایشی مخلوط‌ها به ویژه در مقادیر ۸ و



شکل ۱۰. نتایج آزمایش سایش در شرایط مرطوب در یک ساعت برای هر یک از مخلوط‌های اسلاری سیل

به‌عنوان نمونه، عملکرد قیرزدگی مخلوط‌های RWTSP75، RWTSP50، RWTSP25 و RWTSP100 نسبت به نمونه شاهد RWTSP0 در قیر ۸ درصد به ترتیب به مقدار ۸، ۲۰، ۲۹ و ۳۵ درصد، و در قیر ۸/۵ درصد به ترتیب به مقدار ۴، ۱۱، ۲۲ و ۳۰ درصد بهبود داشته است. مطابق این نمودار، کمترین مقدار چسبندگی ماسه (قیرزدگی)، در قیرهای ۸، ۸/۵ و ۹ درصد به ترتیب متعلق به نمونه‌های RWTSP100 با مقدار ۲۶۵ گرم بر سانتی‌متر مربع، و مقدار ۳۲۲ گرم بر سانتی‌متر مربع و ۴۳۲ گرم بر سانتی‌متر مربع است. در مجموع، مقدار قیر زدگی تمام مخلوط‌ها در محدوده مجاز آیین‌نامه می‌باشد. همچنین، بایستی برای هر درصد قیر باقی‌مانده، مخلوط تراورتن با درصد مناسب و بهینه انتخاب گردد.

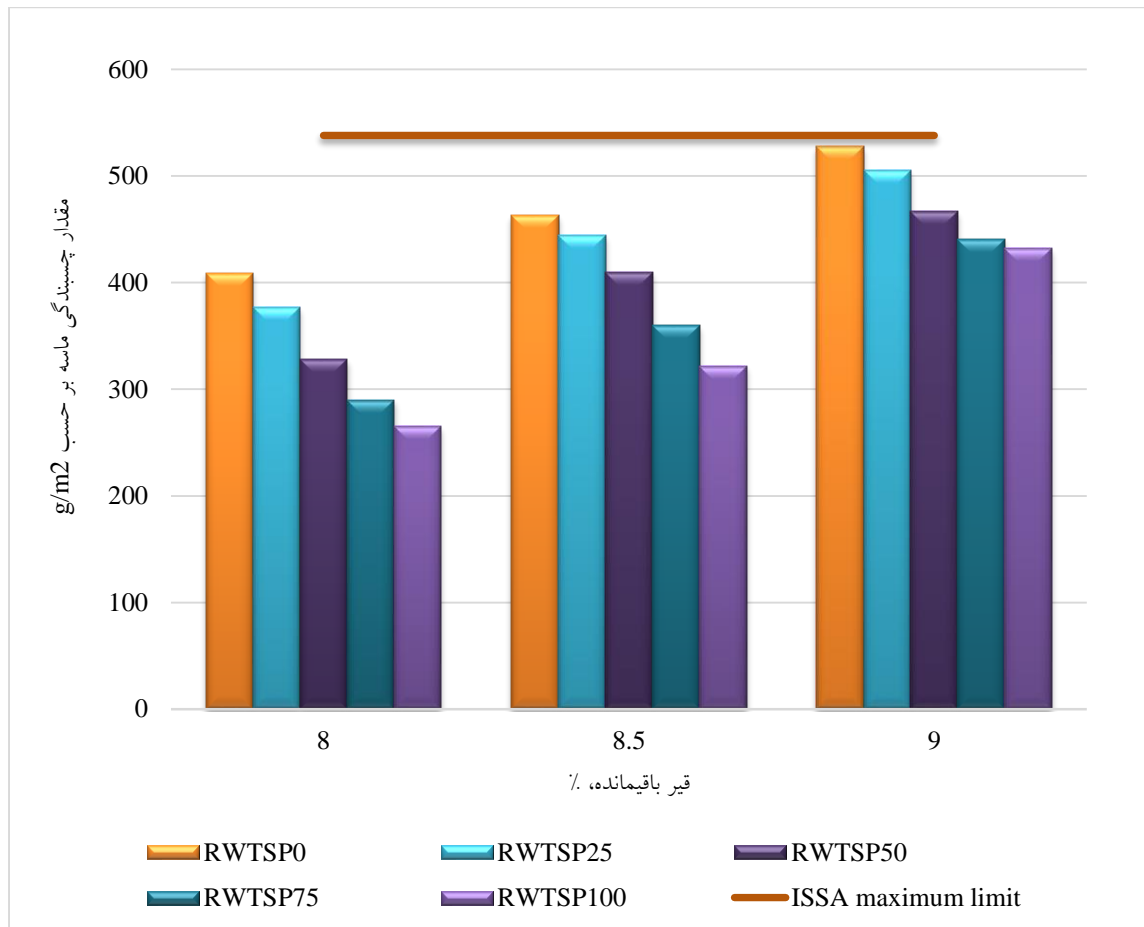
سایر پژوهشگران (زیاری و همکاران، ۲۰۲۲؛ خشنود و همکاران، ۲۰۲۲؛ ملکی طولابی و همکاران، ۲۰۲۳ a؛ ملکی طولابی و همکاران، ۲۰۲۳ b) نیز گزارش کرده‌اند که استفاده از پودرهای باز یافتی حاوی کلسیم‌اکسید

### ۳-۲-۴. آزمایش چرخ بارگذاری شده- چسبندگی

ماسه

مقاومت در برابر عریان‌شدگی در مخلوط‌های آسفالتی را می‌توان با استفاده از چسبندگی چرخ بارگذاری شده- چسبندگی ماسه ارزیابی کرد. مطابق نتایج نمودار شکل ۱۱، مقدار قیرزدگی مخلوط‌ها، با افزایش درصد تراورتن جایگزین فیلر و قیر باقی‌مانده به ترتیب نسبت مستقیم و عکس داشته است. به طور جزئی‌تر، با افزایش درصد تراورتن جایگزین فیلر (صفر تا ۱۰۰ درصد) در ۸ تا ۸/۵ درصد و ۸/۵ تا ۹ درصد قیر باقی‌مانده، مقدار قیرزدگی مخلوط‌ها به ترتیب نزولی و صعودی است. این امر حاکی از آن است که در ۸ و ۸/۵ درصد قیر باقی‌مانده، افزایش مقدار تراورتن جایگزین فیلر باعث بهبود عملکرد قیرزدگی مخلوط‌های اسلاری سیل می‌گردد. در سوی مقابل، با افزایش قیر باقی‌مانده تا ۹ درصد، افزایش تراورتن باعث افزایش درصد قیرزدگی مخلوط‌ها گردیده است.

سیلیس موجب کاهش مقدار قیرزدگی در مخلوط‌های آسفالتی شده است که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد.



شکل ۱۱. چسبندگی ماسه (پتانسیل قیرزدگی) مخلوط‌های اسلاری سیل در آزمایش چرخ بارگذاری - چسبندگی ماسه

#### ۴-۲-۴. تعیین مقدار بهینه قیر باقیمانده

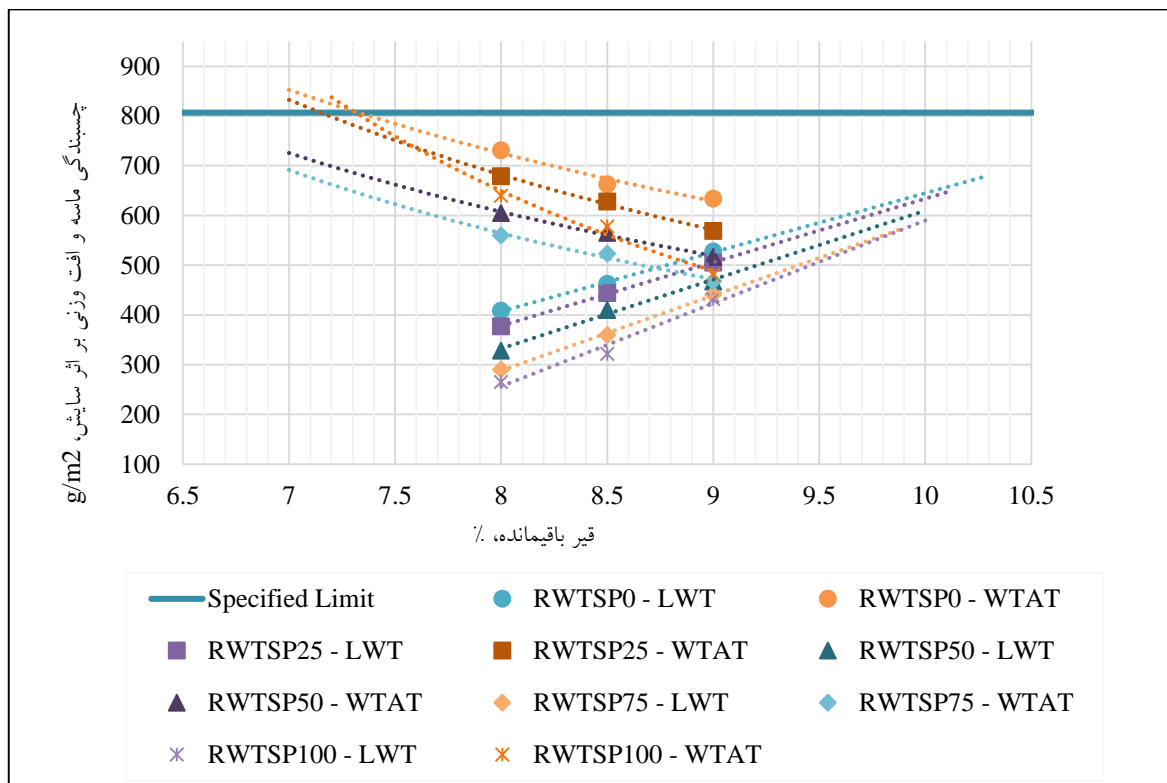
با بررسی نتایج آزمایش‌های چرخ بارگذاری شده - چسبندگی ماسه و سایش در شرایط مرطوب، محدوده مجاز قیر باقیمانده و مقدار بهینه آن مطابق ISSA TB111 به دست می‌آید. نمودار شکل ۱۲، حاصل تلفیق نمودار آزمایش چرخ بارگذاری - چسبندگی ماسه و نمودار آزمایش سایش در شرایط مرطوب می‌باشد. مقادیر عددی این محدوده مجاز و بهینه قیر باقی‌مانده، به صورت جداگانه در جدول ۷ ارائه شده است. این نتایج نشان می‌دهد که مقدار قیر بهینه مخلوط‌های RWTSP50، RWTSP25، RWTSP75 و RWTSP100 به ترتیب به مقدار ۳، ۷، ۹ و ۹ درصد

بیشتر از نمونه شاهد (RWTSP0) است. همچنین، مطابق جدول ۷، محدوده قیر مجاز مخلوط‌های اصلاح‌شده، همانند مقدار قیر بهینه، با افزایش مقدار پودر ضایعات سنگ تراورتن جایگزین فیلر، افزایش می‌یابد و بیشترین مقدار قیر بهینه متعلق به نمونه‌های RWTSP75 و RWTSP100 می‌باشد. لذا، در صورت افزایش قیر باقیمانده، بهتر است مقدار پودر ضایعاتی برای بهبود عملکرد افزایش یابد. در مجموع، قیر بهینه مخلوط‌های اصلاح شده حاوی پودر ضایعاتی تحت تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی همچون جذب آب و درصد زیاد کلسیم‌اکسید و سیلیس می‌باشد.



جدول ۷. محدوده مجاز قیر باقی مانده و درصد بهینه آن

نوع مخلوط	حداقل مقدار قیر باقی مانده حاصل از آزمایش سایش (%)	حداکثر مقدار قیر باقی مانده حاصل از چسبندگی ماسه (%)	دامنه قابل قبول قیر باقی مانده (%)	مقدار بهینه قیر باقی مانده (%)
RWTSP0	۷/۸۴	۹/۷۰	۹/۷۰-۷/۸۴	۸/۷۷
RWTSP 25	۸/۰۹	۹/۹۵	۹/۹۵-۸/۰۹	۹/۰۲
RWTSP 50	۸/۴۶	۱۰/۳۳	۱۰/۳۳-۸/۴۶	۹/۳۹
RWTSP 75	۸/۶۴	۱۰/۵۰	۱۰/۵۰-۸/۶۴	۹/۵۷
RWTSP 100	۸/۶۴	۱۰/۵۰	۱۰/۵۰-۸/۶۴	۹/۵۷



شکل ۱۲. ترکیب نتایج آزمایش سایش در شرایط مرطوب در مدت زمان یک ساعت و آزمایش چرخ بارگذاری شده-

#### چسبندگی ماسه

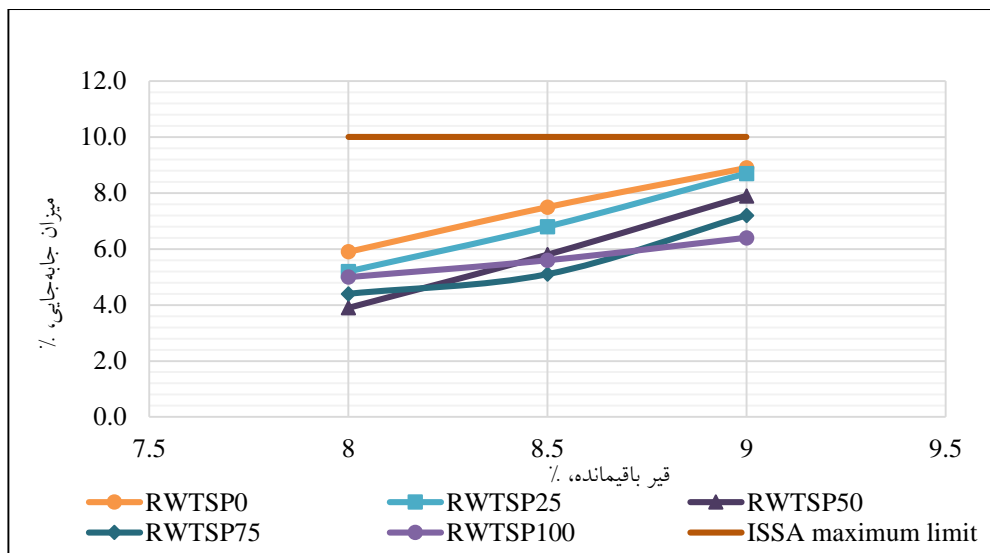
همه مخلوط‌های اصلاح شده با تراورتن در محدوده مجاز آیین نامه بوده و سبب بهبود عملکرد آسفالت، به ویژه در مقادیر قیر ۸، ۸/۵ و ۹ درصد می‌شوند. به عنوان نمونه، در قیر باقی مانده ۸ درصد، مخلوط‌های RWTSP25، RWTSP50، RWTSP75 و RWTSP100 نسبت به نمونه شاهد (RWTSP0)، موجب بهبود عملکرد جابه جایی عمودی به ترتیب به میزان ۱۲، ۳۴، ۲۵ و ۱۵ درصد و همچنین بهبود

#### ۴-۲-۵. آزمایش چرخ بارگذاری شده- جابه جایی

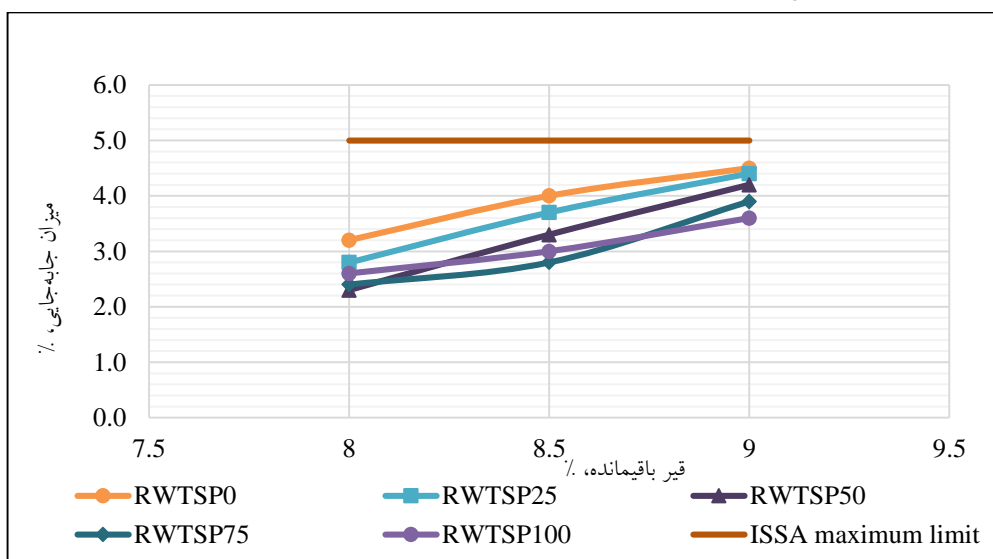
جابه جایی‌های جانبی و عمودی در مخلوط‌های تحت بار ترافیکی در نمودارهای شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده‌اند. مطابق نتایج آزمایش چرخ بارگذاری شده- جابه جایی، مقدار درصد قیر باقیمانده و مقدار افزودنی جایگزین فیلر بر مقادیر تغییر مکان ناشی از بارگذاری چرخ مؤثر است. از نظر مقدار افزودنی جایگزین فیلر،

جابه‌جایی نمونه‌ها در برابر مقدار بار چرخ و ترافیک عبوری تعیین گردد. در پژوهش‌های قبلی (نوید و همکاران، ۲۰۱۹؛ المحمداوی و مولنخائر، ۲۰۲۰؛ خشنود و همکاران، ۲۰۲۲؛ ملکی طولابی و همکاران، ۲۰۲۳ a؛ ملکی طولابی و همکاران، ۲۰۲۳ b) نیز گزارش شده که استفاده از مواد حاوی درصد زیاد کلسیم‌اکسید و سیلیس سبب کاهش جابه‌جایی در آسفالت حفاظتی لایه‌نازک شده است که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد.

عملکرد جابه‌جایی افقی به ترتیب به میزان ۱۳، ۲۸، ۲۵ و ۱۹ درصد شده‌اند. مطابق نتایج این نمودارها، نمونه‌های RWTSP0 و RWTSP25 با فاصله نزدیک از یکدیگر در قیر ۸ درصد، نمونه RWTSP50 و RWTSP75 در قیر ۸/۵ درصد و نمونه‌های RWTSP100 و RWTSP75 در قیر ۹ درصد کمترین میزان جابه‌جایی عمودی و افقی را داشته‌اند. با توجه به این موارد، بایستی مقدار قیر مناسب و فیلر تراورتن جایگزین فیلر متناسب با آن جهت بهبود عملکرد



شکل ۱۳. میزان جابه‌جایی عمودی مخلوط‌ها در درصدهای مختلف قیر



شکل ۱۴. میزان جابه‌جایی افقی مخلوط‌ها در درصدهای مختلف قیر

## ۵. تحلیل آماری

نتایج به دست آمده از خصوصیات عملکردی آسفالت حفاظتی لایه نازک شامل چسبندگی مرطوب، سایش در شرایط مرطوب، چرخ بارگذاری شده- چسبندگی ماسه و چرخ بارگذاری شده- جابه جایی با استفاده از آنالیز واریانس<sup>۱</sup> مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. نتایج تحلیل آماری، با استفاده از تجزیه و تحلیل دو عاملی در سطح اطمینان ۹۵٪ به منظور بررسی اهمیت اثرات افزودن پودر سنگ تراورتن و درصد قیر باقی مانده بر خصوصیات عملکردی مخلوط های آسفالت حفاظتی لایه نازک با استفاده از نرم افزار SPSS انجام شده است. به منظور انجام آنالیز واریانس، در ابتدا کنترل نرمال بودن داده ها به کمک آزمون کولموگروف- اسمیرنوف بررسی شده و سپس تحلیل روی داده های نرمال انجام شده است. نتایج میزان تأثیرگذاری نوع مخلوط و درصد قیر باقی مانده بر عملکرد مخلوط آسفالت حفاظتی لایه نازک در جدول ۸ قابل مشاهده است. در آنالیز واریانس، فاکتور اصلی مورد استفاده شامل دو نوع فاکتور می باشد. فاکتور اول، قیر باقی مانده ۸، ۸/۵ و ۹ درصد است، و با کلمه "Bitumen" در جدول ۸ آورده شده است. فاکتور دوم نیز شامل پنج مخلوط مورد بررسی یعنی RWTSP25+MF75، RWTSP0+MF100، RWTSP50+MF50 و RWTSP75+MF25 و RWTSP100+MF0 است که با کلمه "Blend type" در جدول ۸ نشان داده شده است که تأثیرات هر فاکتور به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، تأثیر همزمان این فاکتورها بر یکدیگر که با کلمه "Bitumen×Blend type" آورده شده است، مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس، فرض  $H_0$  به معنی عدم وجود اثر معنادار متغیر عامل (مستقل) بر متغیر پاسخ بوده و در صورت رد آن، فرض  $H_1$  به معنی وجود

اثر معنادار متغیر عامل بر متغیر پاسخ تأیید می شود. این موضوع در رابطه (۱) ارائه شده است.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k \quad (1)$$

$$H_1: \exists i, j \text{ s.t. } u_i \neq u_j \quad (i, j = 1, 2, 3, \dots)$$

مطابق نتایج حاصل از تحلیل واریانس در خصوص تأثیر درصد قیر باقی مانده و پودر تراورتن بر خصوصیات آسفالت حفاظتی لایه نازک، مقدار  $p$  مخلوط ها کمتر از ۰/۰۵ بود که نشان دهنده آن است که قیر باقی مانده و نوع مخلوط، تأثیر قابل توجهی بر تمام آزمایش های انجام شده از قبیل چسبندگی مرطوب، سایش در شرایط مرطوب، چرخ بارگذاری شده- چسبندگی ماسه و چرخ بارگذاری- جابه جایی دارند. نوع مخلوط (تأثیر پودر سنگ تراورتن) و برهمکنش قیر- نوع مخلوط در آزمایش چسبندگی ۳۰ و ۶۰ دقیقه (با نتایج نزدیک به هم) عامل تأثیرگذارتری نسبت به درصد قیر باقی مانده بوده اند. این موضوع از پارامتر Partial eta squared در تحلیل واریانس قابل مشاهده است که به ترتیب مقادیر ۹۱/۶ و ۹۲/۴ درصد را به دلیل مقدار پودر سنگ تراورتن در مخلوط کسب کردند. بنابراین، در این آزمایش ها، بهبود نوع مخلوط با استفاده از پودر سنگ تراورتن منجر به نتایج بهتری نسبت به تغییر مقدار قیر باقیمانده خواهد شد. این در حالی است که اثر درصد قیر باقی مانده و برهمکنش قیر- نوع مخلوط در آزمایش های چسبندگی ماسه و میزان جابه جایی ها عامل تأثیرگذارتری نسبت به نوع مخلوط بوده است که مقدار واریانس بیش از ۹۰ درصد را کسب نموده اند. در آزمایش سایش در شرایط مرطوب، با توجه به پارامتر Partial eta squared مشخص گردید که هر سه عامل با نتایج نزدیک به هم و با مقدار واریانس بیش از ۹۰ درصد اثر قابل توجهی بر میزان حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالت حفاظتی لایه نازک خواهند داشت.

<sup>۱</sup>- Analysis of variance (ANOVA)

جدول ۸. تجزیه و تحلیل واریانس برای نتایج نمونه‌های آسفالت حفاظتی لایه نازک

Source of variation	Type III sum of squares	df	Mean square	F	P-value	Partial squared	eta
<b>(a) Cohesion at 30 minutes</b>							
Corrected Model	60.073	14	4.463	57.888	0.000	0.965	
Intercept	8258.048	1	8258.048	107714.671	0.000	1.000	
Bitumen	24.677	2	12.339	161.931	0.000	0.857	
Blend type	12.681	4	3.168	41.323	0.000	0.916	
Bitumen*Blend type	24.743	8	2.966	39.681	0.000	0.913	
Error	2.301	30	0.078				
Total	8320.421	45					
Corrected Total	64.373	44					
<b>(b) Cohesion at 60 minutes</b>							
Corrected Model	195.409	14	13.959	59.818	0.000	0.964	
Intercept	26703.433	1	26703.433	114444.281	0.000	1.000	
Bitumen	83.377	2	41.688	178.664	0.000	0.861	
Blend type	43.247	4	10.787	46.230	0.000	0.924	
Bitumen*Blend type	68.885	8	8.611	36.903	0.000	0.907	
Error	7.001	30	0.234				
Total	26906.841	45					
Corrected Total	203.409	44					
<b>(c) WTAT</b>							
Corrected Model	568776.627	14	40627.831	920.882	0.000	0.998	
Intercept	4387159.344	1	4387159.344	99442.986	0.000	1.000	
Bitumen	456015.106	2	228007.553	5168.208	0.000	0.997	
Blend type	20646.185	4	5160.547	117.997	0.000	0.940	
Bitumen*Blend type	92113.337	8	11515.293	260.993	0.000	0.987	
Error	1324.525	30	44.118				
Total	4957259.491	45					
Corrected Total	570098.147	44					
<b>(d) LWT-Sand adhesion</b>							
Corrected Model	215304.033	14	15377.789	208.979	0.000	0.991	
Intercept	8053836.529	1	8053836.529	109808.061	0.000	1.000	
Bitumen	199396.466	2	99698.234	1359.311	0.000	0.988	
Blend type	1951.797	4	487.948	6.652	0.001	0.471	
Bitumen*Blend type	13954.771	8	1744.348	23.782	0.000	0.865	
Error	2202.341	30	73.346				
Total	8271337.901	45					
Corrected Total	217504.373	44					
<b>(e) LWT-Vertical displacement</b>							
Corrected Model	100.949	14	7.212	93.241	0.000	0.978	
Intercept	1374.482	1	1374.482	17774.475	0.000	0.891	
Bitumen	80.656	2	40.328	522.484	0.000	0.973	
Blend type	1.029	4	0.258	3.324	0.023	0.308	
Bitumen*Blend type	19.265	8	2.409	31.139	0.000	0.894	

Error	2.321	30	0.078			
Total	1477.751	45				
Corrected Total	103.269	44				
<b>(f) LWT-Lateral displacement</b>						
Corrected	34.589a	14	2.472	102.941	0.000	0.981
Model						
Intercept	468.513	1	469.512	19521.334	0.000	0.851
Bitumen	27.893	2	13.947	581.084	0.000	0.961
Blend type	0.029	4	0.007	0.293	0.033	0.238
Bitumen*Blend type	6.669	8	0.835	34.739	0.000	0.902
Error	0.721	30	0.025			
Total	503.821	45				
Corrected Total	35.319	44				

## ۶. نتیجه گیری

مقدار چسبندگی نسبت به سایر نمونه‌ها در همه درصد‌های قیر باقیمانده داشته است.

- مطابق آزمایش سایش در شرایط مرطوب، افزایش پودر ضایعات سنگ تراورتن و نیز افزایش درصد قیر سبب بهبود عملکرد سایشی مخلوط‌ها شده است. بر این اساس، نمونه‌های حاوی ۷۵ درصد پودر ضایعات سنگ تراورتن، بهترین عملکرد را در تمامی قیرهای باقی مانده داشتند.
- بر اساس نتایج آزمایش چرخ بارگذاری-جابه‌جایی، افزایش پودر ضایعات سنگ تراورتن و همچنین افزایش درصد قیر موجب بهبود عملکرد مخلوط‌ها شده است. بر این اساس، در قیر باقیمانده ۹ درصد، مخلوط RWCP100 نسبت به نمونه شاهد موجب بهبود عملکرد جابه‌جایی عمودی به میزان ۲۷/۹ درصد و بهبود عملکرد جابه‌جایی افقی به میزان ۱۹/۵ درصد شده است.
- مطابق آزمایش سایش در شرایط مرطوب و چرخ بارگذاری-چسبندگی ماسه، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش مقدار پودر ضایعات سنگ تراورتن، محدوده مجاز و مقدار درصد قیر بهینه افزایش می‌یابد. لذا، در صورت افزایش قیر باقیمانده، بهتر است مقدار پودر ضایعات سنگ تراورتن برای بهبود عملکرد افزایش یابد.

این تحقیق، مخلوط‌های آسفالت حفاظتی لایه‌نازک (اسلاری سیل) حاوی صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد پودر سنگ تراورتن بازیافتی ضایعاتی ساختمانی جایگزین فیلر را مورد بررسی قرار داد. بر این اساس، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی در ابتدا به‌وسیله آنالیز FTIR و تست‌های XRF و FESEM-EDS مورد ارزیابی قرار گرفت. در مرحله بعد، ویژگی‌های مخلوط‌های آسفالت حفاظتی لایه‌نازک حاوی پودر سنگ تراورتن بازیافتی توسط آزمایش‌های چسبندگی، جابه‌جایی و سایش در شرایط مرطوب، ارزیابی شدند. بررسی و تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌های انجام شده را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- نتایج آزمایش چسبندگی مرطوب در زمان‌های ۳۰ و ۶۰ دقیقه نشان داد که با افزایش پودر ضایعات سنگ تراورتن به دلیل درصد زیاد کلسیم‌اکسید و سیلیس موجود در پودر ضایعات سنگ تراورتن، مقدار چسبندگی مخلوط‌های آسفالتی افزایش خواهد یافت. در این راستا، نمونه‌های اصلاح‌شده، به‌خصوص نمونه‌های حاوی ۷۵ و ۱۰۰ درصد پودر ضایعات سنگ تراورتن، با افزایش چسبندگی در حدود ۲۷/۳ درصد بیشتر از مخلوط شاهد، بیشترین

- نتایج تحلیل واریانس نشان داد که هر سه عامل پودر ضایعات سنگ تراورتن، قیر و برهمکنش مواد بر عملکرد آسفالت حفاظتی لایه‌نازک تأثیر می‌گذارند.
  - این مطالعه، استفاده از پودر ضایعات سنگ تراورتن
- را به‌عنوان جایگزین فیلر معدنی در آسفالت حفاظتی لایه‌نازک با توجه به بهبود ویژگی‌های عملکردی آن و نیز مسائل زیست‌محیطی در چارچوب توسعه پایدار، توصیه می‌کند.

## ۷. مراجع

- Akhtar, A. and Sarmah, A. K. 2018. "Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective". *J. Clean. Prod.*, 186: 262-281. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.085>
- Al-Mohammedawi, A. and Mollenhauer, K. 2020. "A study on the influence of chemical nature of fillers on rheological and fatigue behaviour of Bitumen emulsion mastic". *Mater.*, 13(20): 4726. <https://doi.org/10.3390/ma13204627>
- Cheng, M., Chen, M., Wu, S., Yang, T., Zhang, J. and Zhao, Y. 2021. "Effect of waste glass aggregate on performance of asphalt micro-surfacing". *Constr. Build. Mater.*, 307: 125133. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125133>
- Cui, P., Wu, S., Xiao, Y., Yang, C. and Wang, F. 2020. "Enhancement mechanism of skid resistance in preventive maintenance of asphalt pavement by steel slag based on micro-surfacing". *Constr. Build. Mater.*, 239: 117870. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117870>
- D2397, A. 2017. "Standard specification for cationic emulsified asphalt". West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Doostmohamadi, M., Karami, H., Mousavi, S. F. and Rezayfar, O. 2019. "Improving the performance of permeable concrete pavement by replacing sedimentary travertine aggregate". *J. Struct. Constr. Eng. (JSCE)*, 6(3): 5-16. <https://doi.org/10.22065/jsce.2018.112016.1414>
- Garba, A. A. and Usman, B. 2021. "Optimization and evaluation of biodiesel quality produced from cattle fat using CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as catalyst". *Moroccan J. Chem.*, 9(1): 132-141.
- Han, S., Yao, T., Han, X., Hongwei, Z. and Yang, X. 2020. "Performance evaluation of waterborne epoxy resin modified hydrophobic emulsified asphalt micro-surfacing mixture". *Constr. Build. Mater.*, 249: 118835. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118835>
- Hesami, E., Ataollahi, A. and Sadeghi, V. 2020. "Performance evaluation of microsurfacing with rubber powder". *J. Thermoplastic Compos. Mater.*, 35(9): 1213-1230. <https://doi.org/10.1177/0892705720930760>
- Hosseini, S. A. and Maleki Toulabi, H. 2024. "Predicting the compressive strength of sulfur concrete using soft computing techniques". *Multiscale Multidisciplinary Model., Exper. Design.*, 7: 443-457. <https://doi.org/10.1007/s41939-023-00223-3>
- Hosseini, S. A. and Maleki Toulabi, H. 2023. "Presenting a novel approach for predicting the compressive strength of structural lightweight concrete based on pattern recognition and gene expression programming". *Arab. J. Sci. Eng.*, 48: 14169-14181. <https://doi.org/10.1007/s13369-023-07996-2>
- Huo, W., Zhu, Z., Chen, W., Zhang, J., Kang, S. Pu. and Wan, Y. 2021. "Effect of synthesis parameters on the development of unconfined compressive strength of recycled waste concrete powder-based geopolymers". *Constr. Build. Mater.*, 292: 123264. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123264>
- ISSA. 2017a. "Laboratory test method for wet track abrasion of slurry surfacing systems". Technical Bulletin 100: International Slurry Surfacing Association.
- ISSA. 2017b. "Outline guide design procedure for slurry seal". Technical Bulletin 111: International Slurry Surfacing Association.
- ISSA. 2017c. "Test method for measurement of excess asphalt in bituminous mixtures by use of a loaded wheel tester and sand adhesion". Technical Bulletin 109: International Slurry Surfacing Association.
- ISSA. 2017d. "Test method for measurement of stability and resistance to compaction, vertical and lateral displacement of multilayered fine aggregate cold mixes". Technical Bulletin 147: International Slurry Surfacing Association.
- ISSA. 2017e. "Test method to classify emulsified asphalt/aggregate mixture systems by modified cohesion tester measurement of set and cure characteristics". Technical Bulletin 139: International Slurry Surfacing Association.

- ISSA A105. 2020. "Recommended performance guideline for emulsified asphalt slurry seal". International Slurry Surfacing Association.
- Karaca, Z., Pekin, A. and Deliormanlı, A. H. 2012. "Classification of dimension stone wastes". *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 19(6): 2354-2362. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-0745-z>
- Keymanesh, M. R., Ziari, H., Zalnezhad, H. and Zalnezhad, M. 2021. "Mix design and performance evaluation of microsurfacing containing electric arc furnace (EAF) steel slag filler". *Constr. Build. Mater.*, 269: 121336. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121336>
- Khoshnood, A. J., Kamboozia, N., Ziari, H. and Zalnezhad, M. 2022. "Evaluation of performance characteristics of polymer-modified slurry seal (PMSS) by replacing filler with ceramic waste powder". *Road Mater. Pavement Design*, 2022: 1-18. <https://doi.org/10.1080/14680629.2022.2117639>
- Lu, W. 2019. "Big data analytics to identify illegal construction waste dumping: A Hong Kong study". *Resour., Conserv. Recy.*, 141: 264-272. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.039>
- Luo, Y., Zhang, K., Xie, X. and Yao, X. 2019. "Performance evaluation and material optimization of microsurfacing based on cracking and rutting resistance". *Constr. Build. Mater.*, 206: 193-200. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.066>
- Ma, Z., Liu, M., Duan, Z., Liang, C. and Wu, H. 2020. "Effects of active waste powder obtained from C&D waste on the microproperties and water permeability of concrete". *J. Clean. Prod.*, 257: 120518. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120518>
- Maleki Toulabi, H., Hosseini, M. and Rahim Of, K. 2018. "Technical evaluation of integrated wall and roof formwork system and its comparison with ordinary concrete building construction method". *Civ. Eng. J.*, 4(2): 422-432. <https://doi.org/10.28991/cej-0309102>
- Maleki Toulabi, H., Hosseini, S. A. and Haj Najafi, L. 2023a. "Investigating the effect of using recycled waste concrete powder (RWCP) on the performance of thin layer surface treatment: Microsurfacing". *Constr. Build. Mater.*, 400: 132734. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132734>
- Maleki Toulabi, H., Hosseini, S. A. and Haj Najafi, L. 2023b. "Investigating the effect of using recycled waste concrete powder on the performance of thin layer surface treatment (slurry seal)". *J. Transpor. Infrastruct. Eng.*, 9(1): 77-106. <https://doi.org/10.22075/jtie.2023.29724.1630>
- Naveed, H., Rehman, Z. U., Khan, A. H., Qamar, S. and Akhtar, M. N. 2019. "Effect of mineral fillers on the performance, rheological and dynamic viscosity measurements of asphalt mastic". *Constr. Build. Mater.*, 222: 390-399. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.170>
- Oh, D., Noguchi, T., Kitagaki, R. and Choi, H. 2021. "Proposal of demolished concrete recycling system based on performance evaluation of inorganic building materials manufactured from waste concrete powder". *Constr. Build. Mater.*, 135: 110147. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110147>
- Rattanashotinunt, C., Tangchirapat, W., Jaturapitakkul, C., Cheewaket, T. and Chindaprasirt, P. 2018. "Investigation on the strength, chloride migration, and water permeability of eco-friendly concretes from industrial by-product materials". *J. Clean. Prod.*, 172: 1691-1698. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.044>
- Santos, J., Flintsch, G. and Ferreira, A. 2017. "Environmental and economic assessment of pavement construction and management practices for enhancing pavement sustainability". *Resour., Conserv. Recy.*, 116: 15-31. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.08.025>
- Sherre, D. K. and Liao, M. C. 2022. "Characteristics of recycled mineral fillers and their effects on the mechanical properties of hot-mix asphalt when used as limestone filler replacements". *J. Mater. Civ. Eng.*, 34(1): 04021395. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004033](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004033)
- Shi, M., Ling, T. C., Gan, B. and Guo, M. Z. 2019. "Turning concrete waste powder into carbonated artificial aggregates". *Constr. Build. Mater.*, 199: 178-184. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.021>
- Simão, L. et al. 2021. "Assessment of the recycling potential of stone processing plant wastes based on physicochemical features and market opportunities". *J. Clean. Prod.*, 319: 128678. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128678>
- Sun, X., Liu, Z., Qin, X., Zeng, Y. and Yin, Y. 2020. "Purifying effect evaluation of pavement surfacing materials modified by novel modifying agent". *Front. Mater.*, 7: 1-13. <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00180>
- Wang, A., Shen, S., Li, X. and Song, B. 2019. "Micro-surfacing mixtures with reclaimed asphalt pavement: Mix design and performance evaluation". *Constr. Build. Mater.*, 201: 303-313. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.164>
- Zalnezhad, M. and Hesami, E. 2020. "Effect of steel slag aggregate and Bitumen emulsion types on the performance of microsurfacing mixture". *J. Traffic Transpor. Eng. (English Edition)*: 7(2): 215-226. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.12.005>



- Ziari, H., Moniri, A., Imannasab, R. and Nakhaei, M. 2019. "Performance evaluation of waterborne epoxy resin modified hydrophobic emulsified asphalt micro-surfacing mixture". *Int. J. Pavement Eng.*, 20(7): 775-781. <https://doi:10.1080/10298436.2017.1339884>
- Ziari, H., Zalnezhad, M., Ziari, M. A. and Amiri, E. N. 2022. "Substitution of the natural aggregate filler by coal waste powder (CWP) in microsurfacing surface treatment: Mix design and performance evaluation". *Constr. Build. Mater.*, 354: 129132. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129132>