فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۱٤، شماره ۲، زمستان ۱٤۰۱، ص. ۲٤۱۸-۲۳۹۹

مقاله علمی-پژوهشی

# اثر درصد آمیخته‌ی ماسه وسیمان در عملکرد آسفالت متخلخل نیمه صلب با دانه‌بندی مختلف

زهره غفوری فرد، کارشناسی ارشد، گروه راه و ترابری، پردیس فنی مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

محمدمهدی خبیری (مسئول مکاتبات)، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، پردیس فنی مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

**Email: mkhabiri@yazd.ac.ir**

دریافت: ۱٤۰۰/۰٤/۱۲ پذیرش: ۱٤۰۱/۰۲/۰٤

## چکیده

*آسفالت نیمه صلب، مخلوطی آسفالتی با درصد ریزدانه بسیار کم و درصد تخلخل زیاد (حدود ۲۰٪) است که با آمیخته سیمان و ماسه روان پر شده است. این نوع آسفالت یک مخلوط انعطاف‌پذیر و مقاوم و رویه‌ای مناسب ازلحاظ تأمین اصطکاک و کاهش صدا برای رویه جاده‌ها است. هدف این پژوهش ارزیابی عملکرد این مخلوط با درصدهای مختلف آمیخته ماسه سیمان است. بدین منظور، نمونه‌هایی از یک مخلوط آسفالتی متخلخل با درصدهای متفاوت آمیخته ماسه سیمان (٪۰،٪۲۵،٪۵۰ و ٪۷۵) اشباع شد و آزمایش‌های مقاومت مارشال، خزش دینامیکی، ضریب برجهنگی، خستگی و حساسیت رطوبتی بر روی آن‌ها انجام گرفت. نتایج نشان می‌دهد با افزایش درصد آمیخته ماسه سیمان در رویه نیمه صلب به‌طور متوسط به ترتیب حساسیت رطوبتی، خستگی و خزش، ٪۵، ٪۸ و٪۱۲ کاهش می‌یابد و پارامترهای مقاومت مارشال و ضریب برجهندگی به ترتیب ٪۸ و ٪۳۳ افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش درصد آمیخته ماسه سیمان در رویه نیمه صلب میزان جذب آب و روانی کاهش و مقدار وزن مخصوص واقعی نمونه افزایش می‌یابد. درواقع می‌توان گفت پارامتر درصد آمیخته ماسه سیمان در رویه‌های نیمه صلب، پارامتری بسیار مؤثر بر عملکرد این رویه است. علاوه بر این نتایج نشان می‌دهد با تبدیل رویه آسفالتی انعطاف‌پذیر به رویه نیمه صلب به کمک تزریق آمیخته ماسه سیمان در حفرات آسفالت متخلخل با دانه‌بندی و درصد قیر بهینه (دانه‌بندی C و ٤ درصد قیر) به ترتیب پارامترهای مدول برجهندگی، خستگی، خزش، حساسیت رطوبتی و مقاومت مارشال، حدوداً ٪۵، ٪۶۲، ٪۶۰، ٪۱۶۷ و ٪ ۲۱ بهبود می‌یابد.*

**واژگان کلیدی**: آمیخته ماسه-سیمان، آسفالت متخلخل، رویه نیمه صلب، عملکرد محیطی

## ۱. مقدمه

ساخت‌وساز جاده و تعمیر آن معمولاً با سه نوع روسازی انعطاف‌پذیر، صلب و نیمه صلب انجام می‌شود. انتخاب نوع روسازی یک دانش و روش کامل و دقیق ندارد، ولی برای انتخاب نوع رویه باید عوامل فنی، اقتصادی، مسائل زیست‌محیطی، مزایا و معایب رویه‌ها را در نظر گرفت(اسماعیل پور و زوربخش, ۱۳۹۸). روسازی انعطاف‌پذیر دارای مزایایی همچون قابلیت خدمت‌دهی فوری، کیفیت سواری خوب و عدم وجود درزهای اتصال است(حمدی و همکاران، ۱۳۹۰). از طرفی دیگر،رویه‌های صلب دارای ظرفیت باربری بسیار زیاد و عمر خدمت‌دهی بالاتر هستند. باوجود تمام این مزیت‌ها این دو نوع روسازی دارای نقص‌هایی نیز هستند(عاشوری و همکاران،۱۳۹٦). روسازی انعطاف‌پذیر مقاومت مناسبی در برابر اثرات شیمیایی، حرارتی، آتش‌سوزی و بارگذاری بسیار سنگین ندارد(محمدی جانکی و همکاران،۱۳۹۸) و خرابی شیار شدگی از متداول‌ترین خرابی‌ها در این نوع روسازی است. از آن سو، روسازی صلب نیز دارای مشکلات بسیاری در مراحل ساخت و تعمیر و نگهداری است و وجود درزهای اتصالی در این روسازی باعث افت کیفیت رانندگی می شود؛ ازاین‌رو موضوع رویه نیمه صلب مطرح شد(زرتشتی ایل بیگی و همکاران،۱۳۹۸). رویه نیمه صلب (SRP[1]) که از سال ۱۹۵۰ رواج پیدا کرد(Reddy et al., 2005)، لایه مرکب آسفالت و بتن است که در آن حفرات مخلوط آسفالت متخلخل با آمیخته سنگین پر می‌شود(Sunil et al., 2020). روسازی نیمه صلب برای اولین بار در فرانسه به‌عنوان روسازی باند فرودگاه و برای جلوگیری از اثرات مخرب آلاینده‌های روغنی استفاده شد. این فرآیند توسط شخصی به نام سالویکیم[2] و یک شرکت ساخت‌وساز فرانسوی[3] توسعه داده شد. روسازی نیمه صلب به‌عنوان یک جایگزین مناسب برای روسازی صلب(PCC) در نظر گرفته شد. پس‌ازآن در دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ میلادی، استفاده از آن در کشورهای مختلف ازجمله بریتانیا، آفریقای جنوبی، ژاپن، استرالیا و عربستان سعودی گسترش یافت(Anderton, 2000). به دلیل وجود سیمان در رویه نیمه صلب، این رویه حساسیت کمتری نسبت به حرارت در دماهای بالا دارد. این مخلوط که مرکب از آسفالت متخلخل و ترکیب آن با آمیخته سیمان است، حساسیت کم‌تری نسبت به تغییر شکل دائمی در دماهای بالا دارد. رویه نیمه صلب همه‌ی مزیت‌های رویه صلب و انعطاف‌پذیر را باهم ادغام می‌کند و همچنین مانند رویه صلب دارای ظرفیت باربری و دوام زیاد است(Zhang & Wu, 2020). درصد تخلخل یا به عبارتی درصد فضای خالی آسفالت متخلخل یک پارامتر اساسی در رویه‌های نیمه صلب است؛ چراکه جای خالی پر شده با آمیخته سیمان اثر به سزایی بر پایداری مخلوط آسفالت در برابر عبور ترافیک دارد(Pradeep & Mampearachchi, 2019) بدین ترتیب توصیه می شود آسفالت متخلخل موردا ستفاده در این نوع رویه دارای درصد فضای خالی ۱۵ الی ۲۵ درصد باشد(Daines, 1992) چراکه نتایج تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که درصد فضای خالی و اندازه خلل و فرج زیاد سبب نفوذ آمیخته سیمان به کل لایه‌های آسفالت متخلخل می شود. لایه‌ی مرکب نسبت به تغییر شکل دائمی مقاوم بوده و خواص مکانیکی آن در دماهای بالا، خوب است (Setiawan, 2009)(de Ven & Molenaar, 2004).

یکی از مسائل مهم در این زمینه بررسی عملکرد روسازی نیمه‌صلب است؛ بنابراین اهداف این تحقیق عبارت‌اند از:

- بررسی اثر میزان آمیخته ماسه سیمان بر عملکرد رویه نیمه صلب
- ارائه روابط بین پارامترهای عملکردی با درصد آمیخته ماسه سیمان و نوع دانه‌بندی

## ۲. پیشینه تحقیق

مطالعات گسترده‌ای برای سنجش عملکرد روسازی نیمه صلب انجام‌شده است. به‌طورکلی روسازی نیمه صلب دارای استحکام و مقاومت شیار شدگی بالاتر و انقباض خشک کمتر نسبت به

مخلوط آسفالت معمولی است. این امر را می‌توان به تغییر شکل کم سیمان سخت شده نسبت داد (Lee et al., 2014). ستیاوان، زوروب و هسن در سال ۲۰۱۳ با انجام مطالعه بر رویه نیمه صلب به این نتیجه رسیدند که مقاومت فشاری رویه نیمه صلب مستقیماً به مقاومت فشاری سیمان تزریق‌شده بستگی دارد. همچنین نتایج کار آن‌ها نشان داد که مقاومت فشاری رویه نیمه صلب بیشتر از اینکه تحت تأثیر مقاومت برشی مخلوط آسفالتی متخلخل باشد، تحت تأثیر مقاومت، ساختار و سایز سنگ‌دانه‌هاست (Setyawan et al., 2013). همچنین ستیاوان در پژوهشی تحت عنوان ارزیابی خصوصیات مقاومت فشاری رویه نیمه انعطاف‌پذیر به بررسی نقش نوع سنگ‌دانه بر مقاومت فشاری رویه نیمه صلب پرداخت و یافت که سنگ‌دانه آهکی دولومیتی عملکرد بهتری در ایجاد مقاومت دارد(Setyawan, 2013). یانگ و ونگ با بررسی امکان استفاده از روسازی نیمه صلب به‌عنوان روسازی باند فرودگاه و مقاومت آن در آزمایش چرخ بارگذاری، گزارش کردند که فضای خالی آسفالت متخلخل مهم‌ترین و تأثیرگذارترین عامل در عملکرد روسازی نیمه صلب است (Yang & Weng, 2015). بر اساس نتایج پژوهش زرتشتی ایلبیگی و همکاران درزمینه‌ی مقاومت فشاری رو سازی نیمه صلب و رابطه آن با مقاومت فشاری آمیخته سیمان، بخش عمده‌ی مقاومت فشاری روسازی نیمه صلب مربوط به بخش سیمانی آن است(زرتشتی ایلبیگی و همکاران، ۱۳۹۷). یانگ و ونگ نیز به مطالعه تأثیرپذیری دوام رویه نیمه صلب، به‌عنوان رویه باند فرودگاه در برابر سیکل‌های چرخ بارگذاری پرداختند. آن‌ها با در نظر گرفتن ٤ سطح مختلف مقدار فضای خالی آسفالت متخلخل، به بررسی میزان دوام رویه نیمه صلب در برابر آزمایش چرخ بارگذاری پرداختند و با استفاده از روش طراحی آزمایش متعامد و انجام آزمایش چرخ بارگذاری به این نتیجه رسیدند که میزان درصد فضای خالی آسفالت متخلخل مهم‌ترین و تأثیرگذارترین عامل در ساخت رویه نیمه صلب است (Yang & Weng, 2015). هو، ژو و هانگ در سال ۲۰۱٦ مطالعه‌ای بر روی خصوصیات مهندسی نیمه صلب انجام دادند. نتایج نشان داد که این نوع رویه دوام بیشتری در دمای بالا، عملکرد خستگی بهتر و حساسیت حرارتی کمتری نسبت به رویه آسفالتی معمولی دارد(Hou et al., 2016). علاوه بر این دوام روسازی نیمه صلب توسط کرمی موردمطالعه قرار گرفت و نتایج گویای آن بود که شاخص دوام اولیه و ثانویه این رویه در آزمایش‌های مارشال و شیار شدگی با افزایش همراه بوده است (Karami, 2017). نتایج پژوهش دیگری که توسط هو و همکاران انجام شد، گویای آن است که افزایش درصد درشت‌دانه در دانه‌بندی و به طبع آن کاهش درصد قیر، موجب افزایش اثربخشی تزریق آمیخته سیمان می‌شود. پس نوع دانه‌بندی آسفالت متخلخل تأثیر به سزایی درنتیجه حاصل از تزریق آمیخته سیمان دارد (Hou et al., 2017).آسوگبا و همکاران در پژوهشی تحت عنوان بررسی عددی پاسخ مکانیکی رویه آسفالت نیمه صلب تحت بار ترافیکی و اثر شیب دمای غیرخطی، توزیع پارامترهای مکانیکی رویه نیمه صلب با نیازهای عملکردی و ساختاری معمولی، به‌ویژه برای مقاومت در برابر خرابی های مختلف رویه‌های نیمه صلب را بررسی کردند. مقایسه نتایج عددی و تجربی در این پژوهش نشان داد که شیب درجه حرارت غیرخطی، باوجوداینکه اغلب در مدل‌سازی مکانیکی نادیده گرفته می‌شود، یک پارامتر اصلی برای پیش‌بینی دقیق توزیع تنش‌ها و کرنش‌ها در سیستم رویه است. علاوه‌براین ، نتایج نشان می‌دهد که کمترین سرعت ترافیک و افزایش وزن اضافی محور کامیون تأثیر نامطلوبی بر پارامترهای مکانیکی این رویه دارد. به‌طورکلی، نتیجه‌گیری‌های به‌دست‌آمده در این مطالعه مرجعی برای طراحی سازه‌های رویه نیمه سخت است(Assogba et al., 2020).

همان‌طور که اشاره شد درزمینهٔ رویه نیمه صلب پژوهش‌های گوناگونی انجام‌شده است؛ اما هیچ‌کدام آن‌ها به بررسی اثر میزان آمیخته ماسه سیمان بر عملکرد رویه نیمه صلب

نپرداختند. هدف این پژوهش بررسی اثر درصد آمیخته بر پارامترهای مقاومت مارشال، خزش دینامیکی، ضریب برجهنگی، خستگی و حساسیت رطوبتی (لاتمن اصلاح شده) است که هرکدام از آنها بیانگر رفتار خاصی از روسازی، ازجمله مقاومت، شیار شدگی، رفتار سازه‌ای، خستگی و دوام است.

## ۳. روش تحقیق

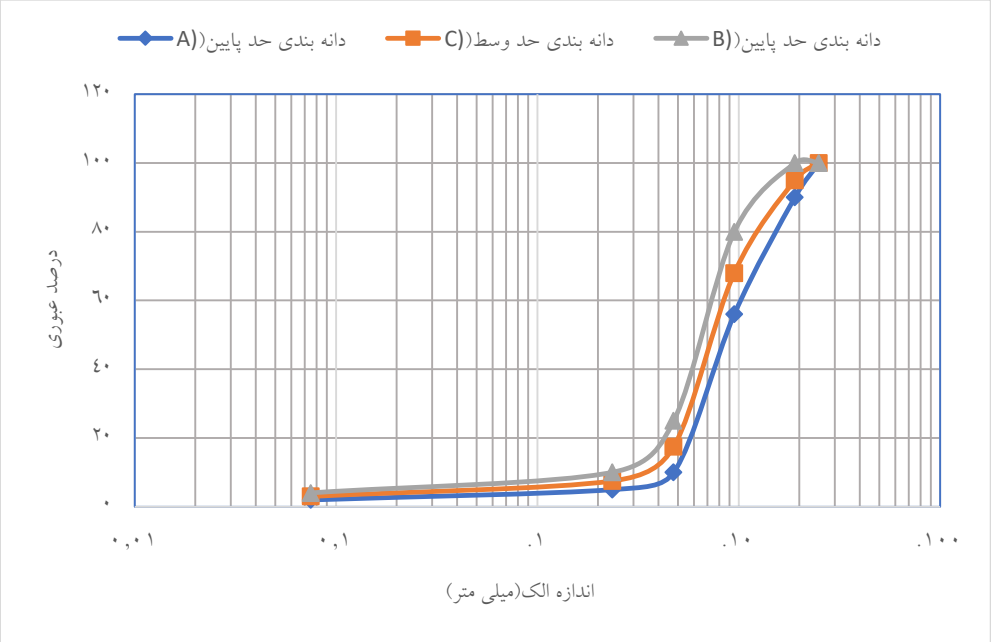
در این پژوهش نمونه‌های آسفالت متخلخل با ٤ درصد قیر مطابق آیین نامه دستورالعمل طرح، اجرا و نگهداری آسفالت متخلخل نشریه ۱-۳۸٤ ساخته شد و سپس در نمونه ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد از فضای خالی با آمیخته ماسه سیمان پرشد و سپس بر روی آنها آزمایش‌های مقاومت مارشال، خزش دینامیکی، ضریب برجهنگی، خستگی و حساسیت رطوبتی انجام شد.

### ۳-۱ ساخت نمونه آزمایشگاهی

#### ۳-۱-۱ ساخت نمونه‌های مارشال آسفالت متخلخل

در این پژوهش از نمونه‌های مارشال ٤ اینچی با دانه‌بندی آسفالت متخلخل، مطابق نمودار شکل ۱ استفاده شد که در شکل ۲ تعدادی از این نمونه‌ها به نمایش گذاشته‌شده است. در این مطالعه برای بررسی تأثیر اندازه سنگ‌دانه‌های آسفالت متخلخل از سه نوع دانه‌بندی، از سه ناحیه دانه‌بندی مجاز استاندارد بین‌المللی و ملی منطبق بر حد بالا، حد متوسط و حد پایین استفاده شد. ابعاد سنگدانه و نوع دانه‌بندی هم ازنظر مقاومت و هم ازنظر عملکرد میکرومکانیکال و درگیری آمیخته، تأثیرگذار خواهد بود.

آسفالت متخلخل درواقع همان آسفالت معمولی است که ریزدانه کمتر، دانه‌بندی یکنواخت‌تر و درنتیجه درصد فضای خالی و نفوذپذیری بالایی دارد(حسامی و همکاران، ۱۳۸۸)؛ به‌طوری‌که در مخلوط آسفالت متخلخل بیش از ۷۰ درصد از حجم مصالح سنگی، درشت‌دانه است. ایده اولیه و اصلی آسفالت متخلخل برای کاهش ارتفاع و شدت رواناب بر روی روسازی فرودگاه‌ها و درنتیجه کاهش پدیده آب پیمایی و لغزش هواپیما بوده است اما در اصل در دهه ۱۹۷۰ توسعه‌یافته و برای پارکینگ‌ها و محوطه‌سازی نیز مورداستفاده قرار گرفت. همان‌طور که اشاره شد، استخوان‌بندی اصلی مخلوط‌های آسفالت متخلخل را سنگ‌دانه‌ها تشکیل می‌دهند که به دلیل تماس مستقیم بین دانه‌های درشت، باید دارای مقاومت زیاد در برابر صیقلی شدن و سایش و دارای درصد شکستگی زیاد باشند. تعیین دانه‌بندی آسفالت متخلخل یک گام اصلی در طراحی مخلوط‌های آسفالت متخلخل است؛ چراکه این امر بر عملکرد مستقیم مخلوط تأثیر می گذارد(آیین نامه اجرا و نگهداری آسفالت متخلخلسازمان مدیریت و برنامه کشور، ۱۳۹٤). در این پژوهش از قیر PG64-22 با مشخصاتی مطابق جدول۱، که ازنظر درجه طبقه‌بندی برای محل انجام پروژه (مناطق کویری با شرایط آب‌وهوایی گرم و خشک) مناسب است، استفاده شد؛ چراکه انتخاب قیر مناسب در هر پروژه به عواملی چون نوع دانه‌بندی مصالح سنگی، شرایط جوی، ترافیک عبوری، محل اجرای طرح و ضخامت آسفالت اجرایی بستگی دارد.




**شکل ۱. دانه‌بندی آسفالت متخلخل مورداستفاده در این مطالعه**

**شکل ۲. نمونه‌ای از نمونه‌های مارشال ٤ اینچی**

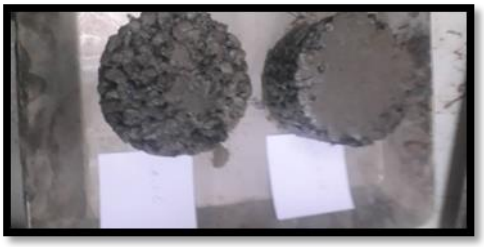
**جدول ۱. نتایج آزمایش‌های عملکردی قیر مورداستفاده در این پژوهش**

| آزمایش | واحد | استاندارد | نتایج | |
|---|---|---|---|---|
| | | | حداقل | حداکثر |
| ویسکوزیته | پاسکال ثانیه | ۰/۳۳۲ | --- | ۳ |
| نقطه اشتعال | درجه سانتی‌گراد | ۳۳٤ | ۲۳۰ | --- |
| برش دینامیکی اولیه | کیلو پاسکال | ۱ | ۱/۱٤ | --- |
| RTFO، درصد تغییر جرم | درصد | ۵/۷ | --- | ۱ |
| MSCR Test، ترافیک استاندارد (jnr3.2) | -- | ۳/۹ | --- | ٤/۵ |
| MSCR Test، ترافیک استاندارد (jnrdiff%) | درصد | ۱۹ | --- | ۷۵ |
| RTFO، برش دینامیکی | کیلو پاسکال | ۲/۳۱ | ۲/۲ | --- |
| PAV، برش دینامیکی (۲۵ درجه سانتی‌گراد) | کیلو پاسکال | ۱٦۳۲ | --- | ۵۰۰۰ |
| PAV، سختی خزشی (۱۲-درجه سانتی‌گراد) | مگا پاسکال | ۹٦/۲۳ | --- | ۳۰۰ |
| m-Value (۱۲- درجه سانتی‌گراد) | -- | ۰/۳۰۲ | ۰/۳ | --- |

**۳-۱-۲ تزریق آمیخته**

پس از ساخت نمونه‌های آسفالتی، به هر نمونه به ترتیب ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد آمیخته تزریق شد (شکل ۳). در کل تحقیق در ساخت آمیخته برای ثابت ماندن متغیر، از نسبت ۵۰ درصد ماسه و ۵۰ درصد سیمان استفاده شد. بدین منظور نمونه‌های مارشال ساخته‌شده را درون آمیخته ماسه–سیمان به مدت یک ساعت قرار داده تا این آمیخته درون خلل و فرج‌ها نفوذ کند. برای کنترل نفوذ آمیخته درون خلل و فرج، هر ۵ دقیقه یک‌بار، وزن نمونه‌ها اندازه‌گیری شدد. فضای خالی زیاد و اندازه خلل و فرج‌ها باعث می‌شود تا آمیخته ماسه–سیمان به کل ضخامت آسفالت پر خلل و فرج نفوذ نماید. ابتدا از کم‌ترین مقدار آمیخته (۲۵٪) استفاده‌شده و نمونه‌های ساخته‌شده در آن قرار داده شدند، اما ازآنجاکه ممکن است این مقدار آمیخته تمامی خلل و فرج‌های آسفالت را پر نکند، درصد بالاتر نیز ۵۰٪ و ۷۵٪ استفاده گردید. مطابق جدول ۲، مشخصات کلی ماسه مورداستفاده، بیان‌شده است و درصد رطوبت موجود در ماسه، نشان‌دهنده میزان آب موردنیاز برای ایجاد آمیخته با درصد آب مناسب است و نیز توزین وزن خشک مصالح ماسه‌ای ملاک در تعیین درصدهاست. منظور از درصد آمیخته ۲۵، ۵۰ و ۷۵، درصد فضای خالی قابل پرشده آمیخته است؛ درواقع ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد از فضای خالی آسفالت متخلخل توسط آمیخته ماسه سیمان پرشده است. به‌طوری‌که حجم فضای خالی نمونه برحسب سانتی‌متر مکعب مشخص است و نسبت موردنظر توسط استوانه مدرج روی نمونه پخش می‌شود.

دانه‌بندی ماسه روان نیز در نمودار شکل ٤ نمایش داده‌شده است که مطابق استاندارد ASTM:D421, D422 نام‌گذاری این خاک SP خواهد بود. ترکیبات شیمیایی ماسه مورداستفاده مطابق جدول ۳ است.



(الف)

(ب)

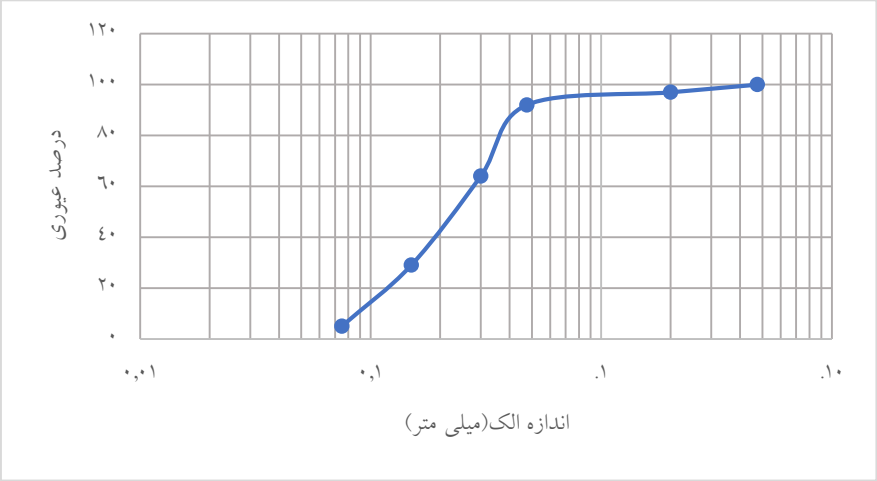
**شکل ۳. (الف) تزریق آمیخته ماسه سیمان به نمونه‌های مارشال آسفالت متخلخل (ب) نمونه‌هایی از نمونه‌های آسفالتی بعد از تزریق آمیخته ماسه سیمان**

**جدول ۲. مشخصات مصالح سنگی مورداستفاده در این پژوهش**

| ویژگی | روش استاندارد | واحد | مقدار |
|---|---|---|---|
| حد روانی | ASTMD 4318-98 | ٪ | ٤ |
| حد خمیری | ASTM- 4318-98 | ٪ | - |
| رطوبت طبیعی | ASTM:D2216 | ٪ | ۳ |
| رطوبت بهینه تراکم | ASTM:D698-00a | ٪ | ۸ |
| وزن مخصوص ماکزیمم | ASTM:D698-00a | $gr/cm^3$ | ۱/۷۵ |
| چگالی ویژه ($G_s$) | ASTM:D4546 | - | ۲/٦٤ |

**جدول ۳. مشخصات مصالح ماسه روان منطقه موردمطالعه میانگین نتایج آزمایش XRF تجزیه عناصر شیمیایی**

| نام عنصر شیمیایی | درصد | نام عنصر شیمیایی | درصد |
|---|---|---|---|
| $SiO_2$ | ٤۸ | MnO | ۰/۱ |
| $Al_2O_3$ | ۸/۳ | CaO | ۲۲/۵ |
| MgO | ٤/۵ | $Na_2O$ | ۰/۸ |
| $P_2O_3$ | ۱٤ | K2O | ۱/۹ |
| $TiO_2$ | ۸ | others | ۸/۵ |

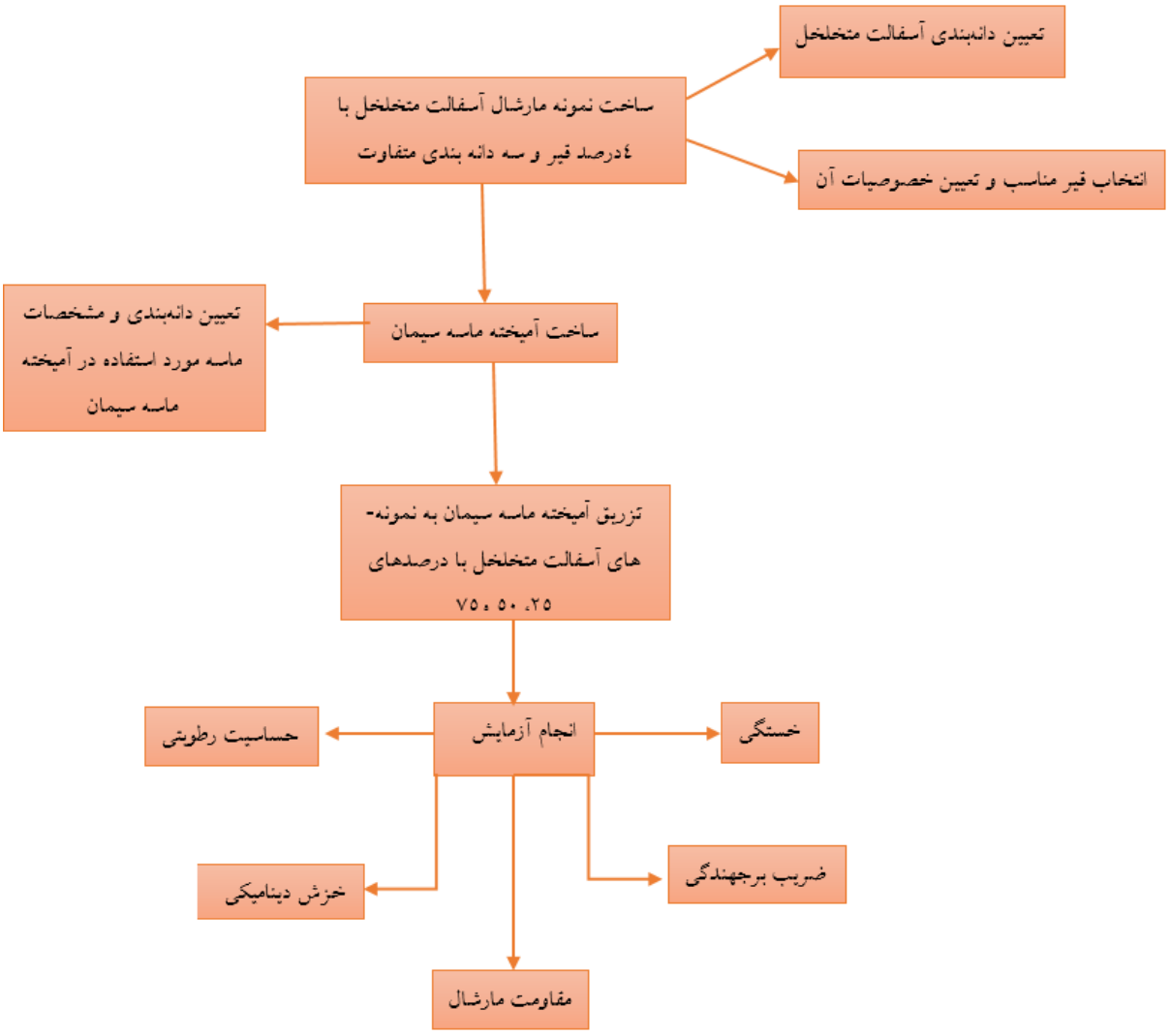



**شکل ٤. نمودار دانه‌بندی خاک ماسه‌ای به‌کاررفته در این مطالعه**

برای اجرای این روســـازی در واقعیت، آمیخته‌هایی با غلظت مناســب، پس از اجرا و تراکم دو لایه آســفالت متخلخل (بدون فشار زیاد) پخش می شود. لازم به ذکر است که دمای آسفالت متخلخل در این مرحله ۵۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد بیشتر نیست. برای جا دهی کافی آمیخته و کاهش زمان نفوذ، می‌توان از جاروب‌های مکانیکی و یا غلتک‌های سبک دستی استفاده کرد.

## ٤. آزمایش‌ها

به‌طورکلی آزمایش‌های مقاومت مارشـــال، مدول برجهندگی، خستگی، خزش و حساسیت رطوبتی بر روی نمونه‌های رویه نیمه صلب با دانه‌بندی‌های مختلف و نمونه آسفالتی با دانه‌بندی بهینه (دانه‌بندی C) بدون آمیخته نیز انجام شـــد. در فلوچارت شـــکل ۵ نمایی از روند انجام تحقیق به نمایش گذاشـــته‌شـــده است.




**شکل ۵. فلوچارت روند تحقیق**

### ٤-١ آزمایش مارشال

یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌ها در رویه‌های آسفالتی، پایداری است. پایداری، مقاومت رویه آسفالتی در برابر فشارهای افقی و تنش برشـی ناشـی از ترافیک اسـت که برای سـنجش آن از آزمایش مقاومت مارشـال اسـتفاده می‌شـود(Plati, 2019) که در این پژوهش بر اساس استاندارد ASTM D1559 بر روی تمامی

نمونه‌های رویه نیمه صلب و نمونه بهینه آسفالت متخلخل انجام شد(شکل ٦-الف).

### ٤-٢ ضریب برجهندگی

مخلوط‌های آسفالتی دارای رفتار ویسکوالاستیک هستند. این رفتار باعث تغییر شکل‌های برگشت‌پذیر و ماندگار در مخلوط‌های آسفالتی می‌شود؛ اما درصورتی‌که بار اعمالی در مقایسه با مقاومت ماده کوچک باشد و به صورت مکرر اعمال شود، تغییر شکل ایجادشده در هر سیکل بارگذاری تقریباً به‌طور کامل برگشت‌پذیر بوده و در این شرایط می‌توان ماده را الاستیک فرض کرد. مدول برجهندگی (MR) به‌صورت نسبت تنش انحرافی به کرنش برگشت‌پذیر تحت بارگذاری تکراری تعریف می‌شود؛ که یکی از پارامترهای مهم در طراحی رویه‌های آسفالتی است. اهمیت این پارامتر در حدی است که دو خرابی شایع ترک‌خوردگی خستگی و خرابی شیار شدگی که نتیجه تغییر شکل تجمعی لایه‌ها است، به‌طور مستقیم به مدول برجهندگی مرتبط است(Han & Vanapalli, 2016). در این پژوهش بر اساس استاندارد ASTM D4123نمونه‌های آسفالتی تحت دستگاه UTM-14 که در آزمایشگاه روسازی دانشگاه یزد قرارگرفته است(شکل ٦-ب). آزمایش مدول برجهندگی در این مطالعه منطبق بر استاندارد ASTM D4123-82 با بارگذاری به روش قطری مطابق شرایط زیر انجام شد:

- شکل بارگذاری: نیمه سینوسی
- دمای آزمایش: ٢٠ درجه سانتی‌گراد
- پیک بارگذاری: ٢٦٠ نیوتن
- مدت ماندگاری بارگذاری: ١٠٠ میلی‌ثانیه
- تعداد سیکل پیش بارگذاری: ٥ تکراری
- ضریب پوآسن: ٠/٣٥

درنهایت به کمک رابطه ١ مقدار آن محاسبه می‌شود؛ که در این رابطه،P حداکثر بار برحسب نیوتن،$\mu$ ضریب پواسون (٠/٥)،t طول نمونه برحسب میلی‌متر،$\delta_h$ تغییرکان افقی برحسب میلی‌متر است.

$$M_r=\frac{P(\mu+0.27)}{t\,\delta h} \qquad (١)$$

### ٤-٣ آزمایش خستگی

مقاومت در برابر خستگی یکی از مهم‌ترین خصوصیات مصالح آسفالتی است که در طراحی روسازی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. روسازی باگذشت زمان به دلیل عبور بارهای ترافیکی و قرارگرفتن در معرض شرایط محیطی مختلف، دچار خرابی می‌شود. ترک‌های ناشی از خستگی در لایه‌های آسفالتی به‌عنوان معیاری در روش های طراحی پذیرفته‌شده است ( شاهاندشتی و همکاران، ١٣٩٩). معمول‌ترین فرم آسیب اولیه روسازی‌های آسفالتی ترک خستگی است که در حال حاضر به دو روش بارگذاری با تنش ثابت و کرنش ثابت انجام می‌گیرد(Xia et al., 2021). آزمایش خستگی توسط تجهیزات بارگذاری دینامیکی آزمایشگاه روسازی مطابق با استاندارد BS-EN:12697-24 انجام گرفت که در آن بارگذاری به روش کشش غیرمستقیم به گونه‌ی تکراری وارد می‌شود. تغییر شکل افقی اندازه‌گیری شده حاصل از این تنش کششی به دست می‌آید. پارامترهای این آزمایش به شرک زیر است.

- شکل بارگذاری: نیمه سینوسی
- دمای آزمایش: ٢٠ درجه سانتی‌گراد
- بارگذاری متناوب: ٣٠٠ نیوتن
- بارگذاری ثابت: ٥٠ نیوتن
- مدت‌زمان بارگذاری: ١٠ میلی‌ثانیه
- طول سیکل: ٥٠٠ میلی‌ثانیه
- ضریب پوآسن: ٠/٢٥

لازم به ذکر است که ازآنجاکه به دلیل محدودیت دسترسی برای انجام آزمایش خستگی تیرچه خمشی، از روش آزمون ITFT بهره گرفته شد که نتایج آن به‌صورت تغییر شکل (کرنش) گزارش می‌شود.

### ٤-٤ آزمایش خزش دینامیکی

یکی از وظایف رو سازی‌ها، ایجاد سطحی صاف و ایمن برای رانندگی است. خزش در رو سازی آسفالتی که به صورت تغییر شکل ماندگار یا شیار شدگی شناخته می‌شود، یکی از خرابی‌های جاده‌ها است. علت شیار شدگی تغییر شکل‌های ماندگار همه یا بعضی از لایه‌های روسازی است که به خاطر حرکت مکرر وسایل نقلیه به وجود می‌آید؛ اما تغییر شکل ماندگار لایه رویه رو سازی دلیل اصلی شیار شدگی محسوب می‌شود (Sanij et al., 2019). خزش نشان‌دهنده تغییر شکل نسبت به زمان تحت تنش فشاری و دما ثابت است(Behbahani et al., 2015). در این تحقیق آزمایش خزش مطابق با استاندارد استرالیاAS289-12-1 با دستگاه UTMانجام شد. در این آزمایش نمونه‌ها به مدت ٤ ساعت در دمای ٥٠ درجه سانتی‌گراد نگه‌داشته شدند. تنش فشاری ٤٠٠ Kpaبازمان بارگذاری ٠/٥ ثانیه و ١/٥ ثانیه استراحت برای هر سیکل بارگذاری به نمونه‌ها اعمال گردید. تغییر شکل عمودی از طریق دو LVDTدر ناحیه مرکزی نمونه‌ها اندازه‌گیری می‌شود(شکل ٦-ج).

### ٤-٥ آزمایش حساسیت به رطوبت

مقاومت مخلوط‌های آسفالتی متراکم شده در برابر آسیب‌دیدگی رطوبتی با روش استانداردAASHTO T283 ، متداول‌ترین روش آزمایش برای تعیین حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی گرم است. در این آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های مخلوط آسفالتی متراکم شده و مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های عمل‌آوری شده اندازه‌گیری و نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های عمل‌آوری شده به عمل‌آوری نشده (TSR) به دست می‌آید. برای انجام مقاومت کششی غیرمستقیم تحت بارگذاری با نرخ ثابت ٥٠ میلی‌متر بر دقیقه قرارگرفته و مقدار نیروی لازم برای شکستن نمونه‌ها اندازه‌گیری می‌شود. بعد از بهدست آوردن مقدار نیروی لازم برای شکستن نمونه‌ها، به ترتیب مقاومت کششی غیرمستقیم و حساسیت رطوبتی نمونه یا پتانسیل رطوبتی نمونه از رابطه ٢ و ٣ به دست می‌آید.

$$S_t = \frac{٢٠٠٠\, P}{\pi . D . t} \qquad (٢)$$

$$\mathrm{TSR} = \frac{S_{t\,wet}}{S_{t\,dry}} \qquad (٣)$$

$S_t$= مقاومت کششی غیرمستقیم، کیلو پاسکال

P = حداکثر بار، نیوتن

D = قطر نمونه، میلی‌متر

t = ارتفاع نمونه، میلی‌متر

TSR= نسبت مقاومت کششی

$S_{t\,wet}$= میانگین مقاومت کششی نمونه‌های گروه اشباع

$S_{t\,dry}$= میانگین مقاومت کششی نمونه‌های گروه خشک

(الف) (ب) (ج)

**شکل ٦. (الف) آزمایش مقاومت فشاری با جک مارشال (ب) دستگاه UTM-14 استفاده‌شده در این پژوهش (ج) آزمایش خزش**

## ۵. نتایج و بحث

### ۵-۱ نتایج آزمایشات

نتایج آزمایش‌های ذکرشده در بخش ۳ در جدول ٤ به نمایش گذاشته‌شده است.

در نام نمونه‌ها، حرف اول نشان‌دهنده‌ی نوع دانه‌بندی و عدد آن نشان‌دهنده درصد آمیخته است.

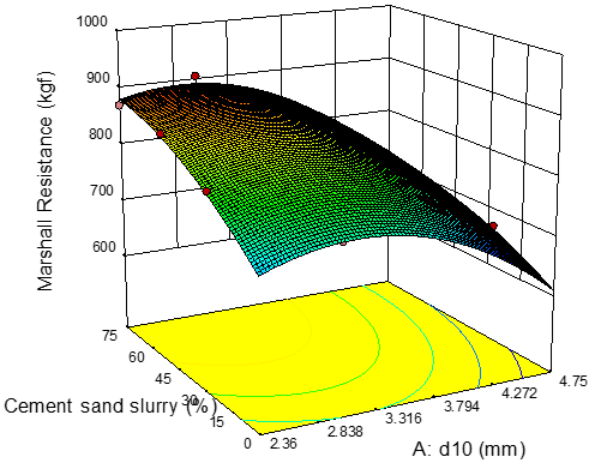
**جدول ٤. نتایج آزمایش‌ها عملکردی بر روسازی نیمه صلب**

| نوع نمونه / نام آزمایش | A-۲۵٪ | A-۵۰٪ | A-۷۵٪ | B-۲۵٪ | B-۵۰٪ | B-۷۵٪ | C-۲۵٪ | C-۵۰٪ | C-۷۵٪ | C-۰٪ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| مقاومت مارشال (kg) | ٦٧١ | ٦٩٣ | ٧٠٢ | ٨٠٤ | ٨٥٧ | ٨٦٩ | ٨١٤ | ٨٦٩ | ٩٠٦ | ٧٥٠ |
| ضریب برجهندگی ($۱۰^{۳}$ kg/cm$^2$) | ۱۹/۵ | ۲۰/۲ | ۲۲/۷ | ۱۹/۸ | ۲۳/۷ | ۲٦/۳ | ۳٤/۱ | ۳٦/۷ | ٤۰/۱ | ۱۵/۰۲ |
| تغییر شکل خستگی (mm) | ۰/۲۰۱٦ | ۰/۱۹۲۲ | ۰/۱۷۷۱ | ۰/۱۸۱٤ | ۰/۱۷۳٦ | ۰/۱۷۱٦ | ۰/۱٦۱٤ | ۰/۱٦۰۵ | ۰/۱۵۲٦ | ۰/۳۸۲ |
| کرنش خزش (mm) | ۰/۱۸۱ | ۰/۱۷٦ | ۰/۱۷۳ | ۰/۱٦۱ | ۰/۱٦۰ | ۰/۱۵۲ | ۰/۱٤۱ | ۰/۱۲۱ | ۰/۱۰۵ | ۰/۲۷٤ |
| حساسیت رطوبتی (٪) | ۸۱ | ۸۲ | ۸٤ | ۸۰ | ۸۳ | ۸۷ | ۹۱ | ۹۳ | ۹٤ | ۹۰ |
| وزن مخصوص واقعی (kg/cm$^3$) | ۲۱۱۰ | ۲۱۷۰ | ۲۲٤۰ | ۲۲۷۱ | ۲۳۰۵ | ۲۳٤۹ | ۲۲۷۳ | ۲۳۵۱ | ۲۳۸۰ | ۱۹٤۰ |
| جذب آب (٪) | ۲/۱ | ۱/٦ | ۱/٤ | ۲/۲ | ۲/۰۵ | ۱/۹ | ۱/۹ | ۱/۷ | ۱/٤ | ۰ |
| روانی (mm) | ۳/۱ | ۲/۹ | ۲/٦ | ۲/۸ | ۲/۳ | ۲/۱ | ۲/۲ | ۱/۸ | ۱/۷ | ۳/۰۵ |

### ۵-۲ بررسی اثر درصد آمیخته ماسه سیمان بر پارامترهای عملکردی

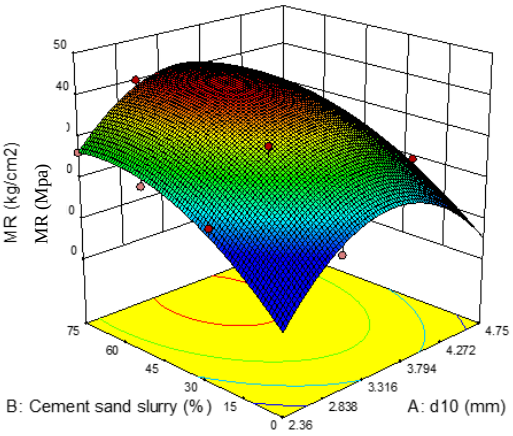
علاوه بر جدول ٤ تصاویر شکل ۷ الی ١٤ نتایج و روند تغییرات پارامترهای مذکور را نمایش می‌دهد. در این نمودارها نوع دانه-بندی با پارامتر $d_{10}$ مشخص‌شده؛ چراکه این پارامتر به‌عنوان اندازه مؤثر شناخته می‌شود و به ترتیب برای دانه‌بندی A B و C برابراست با ۲/٤/۷۵ و ۳.

با توجه به شکل ۷، با افزایش درصد آمیخته ماسه سیمان از ۲۵ تا ۷۵ درصد، به‌طور متوسط مقاومت مارشال ۸ درصد افزایش می‌یابد؛ چراکه وجود فضای خالی و حفرات هوا گرچه عامل اصلی خاصیت نفوذپذیری این نوع آسفالت هستند، اما باعث کاهش مقاومت آسفالت متخلخل نیز می‌شوند (Zhu et al., 2021). با تزریق آمیخته ماسه سیمان به آسفالت متخلخل و افزایش مقدار آن، میزان فضای خالی آسفالت متخلخل نیز کاهش می‌یابد؛ درواقع آمیخته ماسه سیمان جایگزین حفرات هوا می-شود و درنتیجه میزان مقاومت افزایش می‌یابد که با نتایج تحقیقات پیشین ازجمله پژوهش زرتشتی ایل‌بیگی و همکاران با عنوان طراحی و ارزیابی خصوصیات عملکردی روسازی نیمه صلب مطابقت دارد. آن‌ها در این پژوهش یافتند با افزایش میزان سیمان به نمونه آسفالت متخلخل، مقاومت مارشال نیز افزایش می‌یابد(زرتشتی ایل بیگی و همکاران،۱۳۹۸).




**شکل ۷. تأثیر دانه‌بندی و درصد آمیخته ماسه سیمان بر مقاومت مارشال رویه نیمه صلب**

مدول برجهندگی همان مدول ارتجاعی تحت بارگذاری چرخه‌ای پایداراست که در تئوری الاستیک به کار می‌رود (آیین نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران، ۱۳۹۰) و نشان‌دهنده رفتار سازه‌ای آسفالت است. در این خصوص نمودار شکل ۸ نیز نشان می‌دهد با افزایش درصد آمیخته ماسه سیمان، مقدار ضریب برجهندگی رویه نیمه صلب افزایش پیدا می‌کند تا جایی که این افزایش به ۳۳ درصد نیز می‌رسد. به‌طور کلی مدول برجهندگی مخلوط هایی که دارای دانه‌بندی باز و یکنواخت هستند کمتر از مخلوط‌هایی با دانه‌بندی پیوسته است و دلیل آن وجود حفرات هوایی است(Raad et al., 1992)؛ که باعث ضعف در مقاومت و رفتار سازه‌ای آسفالت می‌شود. در پژوهشی توسط یوسف دوست و همکاران در سال ۱۳۹۰ انجام شد، مشخص شد که افزایش میزان سیمان به نمونه‌ها باعث افزایش ضریب برجهندگی می‌شود(یوسف دوست و همکاران،۱۳۹۰) که با نتایج این تحقیق همخوانی دارد.



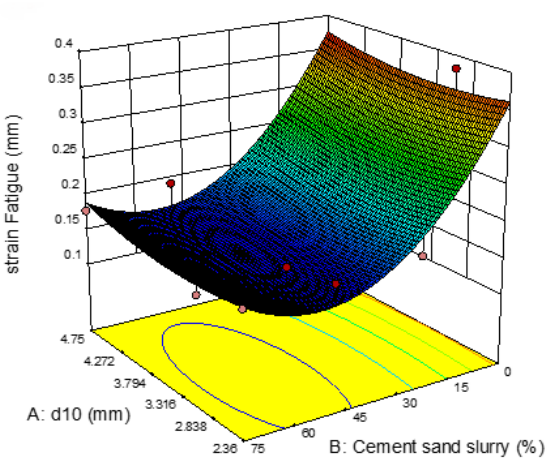

**شکل ۸. تأثیر دانه‌بندی و درصد آمیخته ماسه سیمان بر ضریب برجهندگی رویه نیمه صلب**

نمودار ۹ به‌وضوح نمایانگر آن است که با افزایش درصد آمیخته ملات ماسه سیمان میزان خستگی رویه نیمه صلب کاهش می‌یابد. به‌طور متوسط در دانه‌بندی‌های مختلف با افزایش میزان آمیخته از ۲۵ تا ۷۵ درصد حدود ۸ درصد خستگی کاهش می‌یابد. بسا و همکاران در سال ۲۰۱۸ در پژوهشی تحت عنوان پیش‌بینی ترک‌خوردگی خستگی در بخش‌های رویه آسفالت انعطاف‌پذیر و نیمه صلب یافتند که پارامتر خستگی آسفالت نیمه صلب به عوامل مختلفی مانند آب‌وهوا، سختی، مقاومت و غیره بستگی دارد و با افزایش مقاومت، این پارامتر نیز افزایش می‌یابد(Bessa et al., 2018)؛ که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد؛ چراکه با افزایش آمیخته ماسه سیمان مقاومت اولیه نمونه افزایش و درنتیجه آن خستگی کاهش می‌یابد.

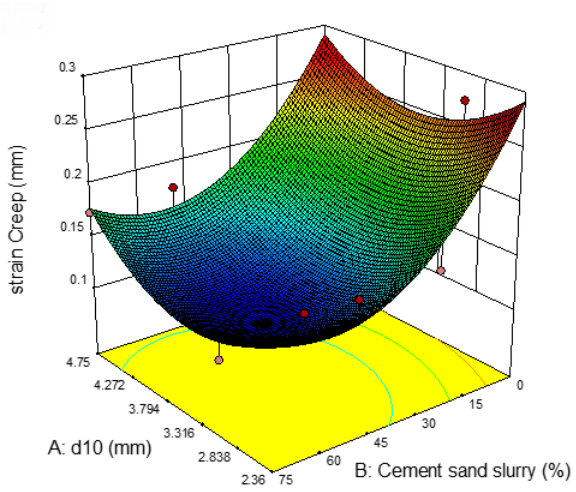
بر اساس شکل ۸ و ۹، بر اساس نتایج این آزمایش بعد از افزایش میزان آمیخته، روند کاهش مدول برجهندگی و عملکرد خستگی بین نمونه‌ها مشاهده می‌شود؛ به عبارتی روسازی نیمه صلب در حد بهینه آمیخته، عملکرد بهتری پیدا می‌کند. وجود بیش‌ازحد آمیخته و افزایش سختی نمونه‌ها، کرنش برگشت‌پذیر را کاهش می‌دهد و عملکرد تغییرات ارتجاعی می‌تواند دلیل این‌گونه تغییرات باشد. علاوه‌براین در مخلوط‌های حاوی درصد کمتر آمیخته، رفتار نرم‌تر دارند و تغییر شکل بیشتری را تحمل می‌کنند که در پی آن عملکرد ضعیف‌تری از خود نشان می‌دهد. ازاین‌رو

رسیدن به درصد بهینه آمیخته نفوذ کرده در روسازی متخلخل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

همچنین بر اساس شکل ۱۰، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد آمیخته ماسه سیمان میزان خزش رویه نیمه صلب به‌طور متوسط حدود ۱۲ درصد کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده مقاومت هرچه بهتر این رویه در برابر شیار شدگی است. بر اساس نتایج تحقیق کرمی نیز، تحت عنوان اثر استفاده از آمیخته سیمانی بر پایداری و دوام رویه نیمه انعطاف‌پذیر، افزایش آمیخته سیمانی به آسفالت متخلخل باعث بهبود پارامتر شیار شدگی می‌شود(Karami, 2017).

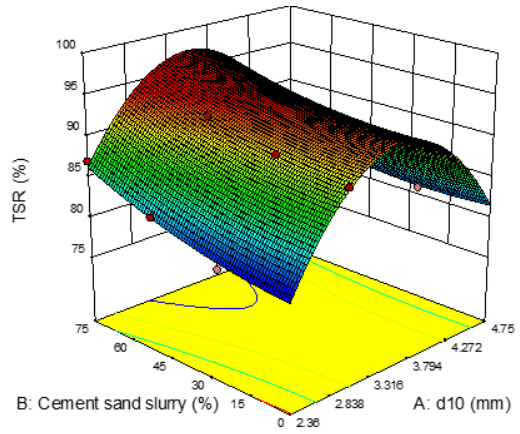



**شکل ۹. تأثیر دانه‌بندی و درصد آمیخته ماسه سیمان بر خستگی رویه نیمه صلب**




**شکل ۱۰. تأثیر دانه‌بندی و درصد آمیخته ماسه سیمان بر خزش رویه نیمه صلب**

بر اساس شکل ۱۱ در یک دانه‌بندی ثابت، با افزایش درصد آمیخته ماسه سیمان مقدار TSR افزایش می‌یابد یا به عبارتی حساسیت رطوبتی نمونه کاهش می‌یابد.

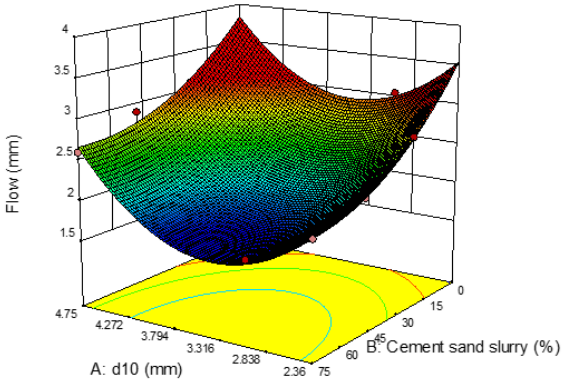



**شکل ۱۱. تأثیر دانه‌بندی و درصد آمیخته ماسه سیمان بر حساسیت رطوبتی رویه نیمه صلب**

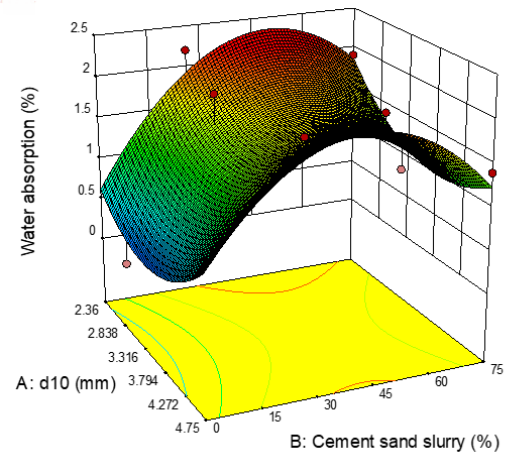
به‌طورکلی برای تمامی دانه‌بندی ها با افزایش میزان آمیخته حساسیت رطوبتی به‌طور متوسط ۵ درصد بهبود می‌یابد؛ چراکه با افزایش آمیخته ماسه سیمان حفرات هوای داخل آسفالت متخلخل که محفظه‌ای برای تجمع آب و یخ زدن آب است، کاهش می‌یابد. شای و همکاران در پژوهشی یافتند خرابی در اثر رطوبت یا به عبارتی حساسیت رطوبتی به‌طور قابل‌توجه ای به در صد فضای خالی نمونه بستگی دارد؛ بدین صورت که با افزایش درصد آمیخته ماسه سیمان و درنتیجه آن کاهش درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی میزان حساسیت رطوبتی کاهش می‌یابد که با نتایج این پژوهش هم‌خوانی دارد (Sha et al., 2019).

در اشکال ۱۲ الی ۱۴ نیز به ترتیب تأثیر دانه‌بندی و درصد آمیخته بر روانی (ASTM D1559)، جذب آب (ASTM C642) و وزن مخصوص واقعی (ASTM D 1188-96) نشان می‌دهد. در خصوص روانی، با تزریق آمیخته ماسه سیمان و افزایش آن از میزان انعطاف‌پذیری آسفالت کاسته شده و سخت‌تر می‌شود؛ ازاین‌رو است که به این رویه نیمه صلب گویند(Park et al., 2010). از طرفی زمانی که درصد آمیخته

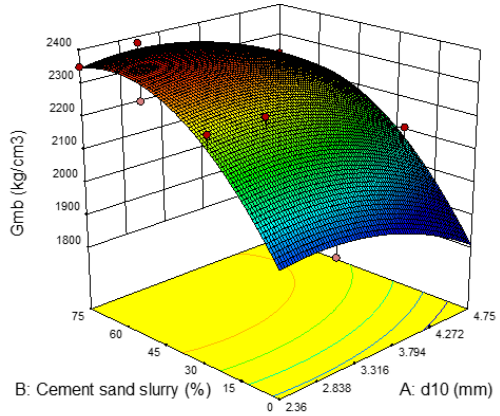
ماسه آسفالت صفر است و به عبارتی همان آسفالت متخلخل است میزان جذب آب صفر است؛ چراکه آسفالت متخلخل به‌واسطه دانه‌بندی باز دارای خاصیت نفوذپذیری است به‌طوری‌که می‌تواند به‌سرعت حجم آب ورودی را از خود عبور دهد(Yu et al., 2020)؛ اما با تزریق آمیخته ماسه سیمان به نمونه‌ها حفرات آسفالت متخلخل اغلب نیمه‌باز شده و محلی برای محبوس شدن قطرات آب به وجود می‌آورند و سپس با افزایش درصد آمیخته و پر و بسته شدن هرچه بیشتر حفرات، درصد جذب آب کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش درصد آمیخته ماسه سیمان مقدار وزن مخصوص واقعی آسفالت به علت افزایش وزن در اثر تزریق آمیخته ماسه سیمان افزایش می‌یابد.




**شکل ۱۲. تأثیر دانه‌بندی و درصد آمیخته ماسه سیمان بر روانی رویه نیمه صلب**




**شکل ۱۳. تأثیر دانه‌بندی و درصد آمیخته ماسه سیمان بر جذب آب رویه نیمه صلب**




**شکل ۱٤. تأثیر دانه‌بندی و درصد آمیخته ماسه سیمان بر چگالی واقعی رویه نیمه صلب**

## ۵-۳ بررسی روابط بین پارامترهای عملکردی با درصد آمیخته ماسه سیمان و نوع دانه‌بندی

در جدول ۵ روابط پارامترهای عملکردی رویه نیمه صلب با نوع دانه‌بندی و درصد آمیخته ماسه سیمان که به کمک نرم‌افزار Design Expert به‌دست‌آمده، آورده شده است که در این روابط $d_{10}$ همان اندازه مؤثر برحسب میلی‌متر و C درصد آمیخته ماسه سیمان است. همان‌طور که از روابط پیدا ست هر دو پارامتر نوع دانه‌بندی و درصد آمیخته سیمان در تمامی پارامترهای عملکردی مؤثرند.

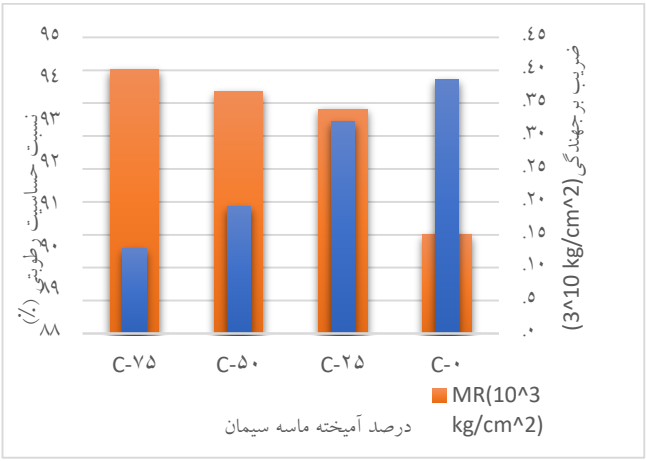
## ٤-۵ مقایسه روسازی آسفالت متخلخل و روسازی نیمه صلب

به‌طورکلی با توجه به نمودارهای شکل ۱۵ با تبدیل رویه آسفالتی انعطاف‌پذیر به رویه نیمه انعطاف‌پذیر، پارامترهای مدول برجهندگی، خستگی، خزش، حساسیت رطوبتی و مقاومت مارشال بهبود می‌یابد؛ به‌طوری‌که در دانه‌بندی C با ٤ درصد قیر (دانه‌بندی بهینه) با افزایش آمیخته از صفر درصد به ۷۵ درصد، به ترتیب پارامترهای مدول برجهندگی، خستگی، خزش، حساسیت رطوبتی و مقاومت مارشال، حدوداً ٪۱٦۷، ٪٦۰، ٪٦۲، ٪۵ و ٪۲۱ بهبود یافتند که با نتایج تحقیقات پیشین نیز مطابقت دارد. هو، ژو و هانگ در سال ۲۰۱٦ مطالعه‌ای بر روی خصوصیات مهندسی نیمه صلب انجام دادند.

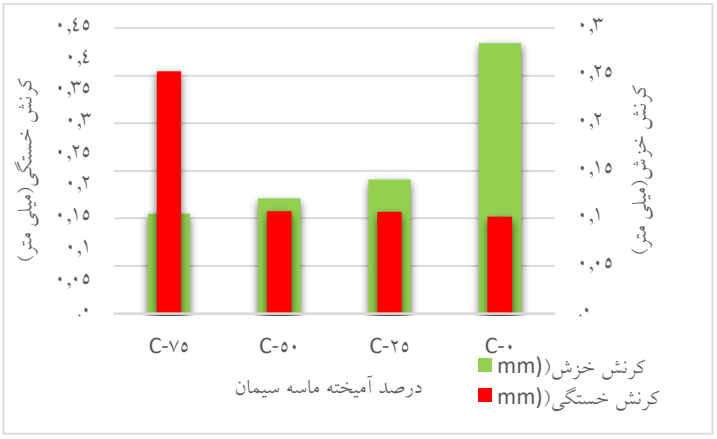
نتایج نشـــان داد که این نوع رویه دوام بیشـــتری در دمای بالا، عملکرد خ ستگی بهتر و ح سا سیت حرارتی کمتری ن سبت به رویه آســفالتی معمولی دارند(Hou et al., 2016). علاوه بر این دوام روســازی نیمه صــلب توســط کرمی موردمطالعه قرار گرفت، نتایج گویای آن بود که شـاخص دوام اولیه و ثانویه این رویه در آزمایش‌های مارشـال و شـیار شـدگی با افزایش همراه بودند(Karami, 2017).

**جدول ۵. رابطه بین پارامترهای عملکردی رویه نیمه صلب با نوع دانه‌بندی و درصد آمیخته ملات ماسه سیمان**

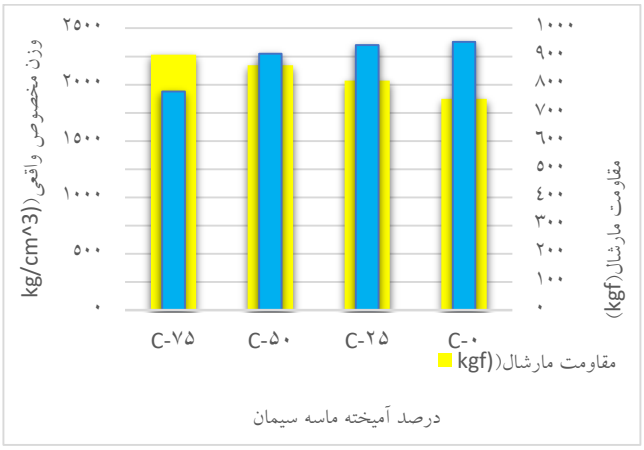
| نوع پارامتر | رابطه |
|---|---|
| مقاومت مارشال (kgf) | $\text{Resistance} = 217.69 + 340.8 * d_{10} + 4.56 * \text{C} - 0.374 * d_{10} * \text{C} - 54.4 * {d_{10}}^2 - 0.02 * C^2$ |
| ضریب برجهندگی($۱۰^۳$ kg/cm$^2$) | $\text{MR} = -135.53 + 87.41 * d_{10} + 0.82 * \text{C} - 0.039 * d_{10} * \text{C} - 12.16 * {d_{10}}^2$ |
| کرنش خستگی (mm) | $\text{Fatigue} = 0.467 - 0.069 * d_{10} - 0.008 * \text{C} + 0.0106 * {d_{10}}^2$ |
| کرنش خزش (mm) | $\text{Creep} = 0.637 - 0.219 * d_{10} - 0.0057 * \text{C} + 0.0309 * {d_{10}}^2$ |
| نسبت حساسیت رطوبتی (٪) | $\text{TER} = -19.22 + 62.24 * d_{10} + 0.0869 * \text{C} - 0.025 * d_{10} * \text{C} - 8.63 * {d_{10}}^2$ |
| وزن مخصوص واقعی (kg/cm$^3$) | $G_{mb} = 1626.33 + 251.36 * d_{10} + 12.42 * \text{C} + 0.22 * d_{10} * \text{C} - 44.85 * {d_{10}}^2 - 0.106 * C^2$ |
| جذب آب (٪) | $\text{Water absorption} = 4.305 - 2.373 * d_{10} + 0.0812 * \text{C} - 0.004 * d_{10} * \text{C} + 0.345 * {d_{10}}^2$ |
| روانی (mm) | $\text{Flow} = 9.397 - 3.769 * d_{10} - 0.04 * \text{C} + 0.0014 * d_{10} * \text{C} + 0.547 * {d_{10}}^2$ |



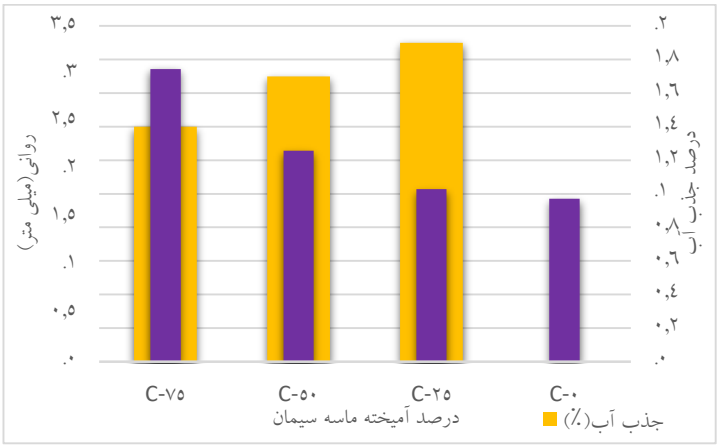

(الف)




(ب)




(ج)




(د)

**شکل ۱۵. مقایسه رویه آسفالتی و نیمه صلب با دانه‌بندی بهینه C (الف) خستگی و خزش (ب) ضریب برجهندگی و حساسیت رطوبتی (ج) مقاومت مارشال و وزن مخصوص (د) روانی و جذب آب**

## ٦. نتیجه‌گیری

این پژوهش باهدف بررسی اثر درصد آمیخته بر پارامترهای عملکردی رویه نیمه صلب ازجمله مقاومت مارشال، خزش دینامیکی، ضریب برجهنگی، خستگی و حساسیت رطوبتی انجام شد. بدین منظور در این پژوهش نمونه‌های آسفالت متخلخل با ٤ درصد قیر ساخته شد و سپس هر به نمونه به ترتیب ۲۵، ۵۰ و ۷۵ در صد آمیخته تزریق شد و بر روی آن‌ها آزمایش های مدول برجهندگی، خستگی، خزش و آزمایش مقاومت مارشال انجام شد. نتایج این پژوهش به شرح زیر است:

- با افزایش درصد آمیخته ماسه سیمان در رویه نیمه صلب، حساسیت رطوبتی بهبود می‌یابد. به‌طور متوسط با افزایش آمیخته از ۲۵ درصد تا ۷۵ درصد، حساسیت رطوبتی ۵ درصد کاهش می‌یابد.
- با افزایش درصد آمیخته ماسه سیمان از ۲۵ تا ۷۵ درصد به‌طور متوسط مقاومت مارشال ۸ درصد افزایش می‌یابد؛ درنتیجه درصد آمیخته تأثیر قابل‌توجهی بر میزان مقاومت رویه نیمه صلب دارد.
- به‌طور متوسط در دانه‌بندی‌های مختلف با افزایش میزان آمیخته از ۲۵ تا ۷۵ درصد حدود ۸ درصد خستگی کاهش می‌یابد.
- با افزایش درصد آمیخته ماسه سیمان میزان خزش رویه نیمه صلب به‌طور متوسط حدود ۱۲ درصد کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده مقاومت هرچه بهتر این رویه در برابر شیار شدگی است.
- همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد آمیخته ماسه سیمان، مقدار ضریب برجهندگی رویه نیمه صلب افزایش پیدا می‌کند تا جایی که این افزایش به ۳۳ درصد نیز می‌رسد.
- با افزایش درصد آمیخته ماسه سیمان در رویه نیمه صلب میزان جذب آب و روانی به ترتیب ٪۲٤ و٪۲۲ کاهش و مقدار وزن مخصوص واقعی٪۵ نمونه افزایش می‌یابد.
- در یک دانه‌بندی ثابت، پارامتر درصد آمیخته ماسه سیمان در رویه‌های نیمه صلب، پارامتری بسیار مؤثر بر عملکرد این رویه است.
- به‌طورکلی با تبدیل رویه آسفالتی انعطاف‌پذیر به رویه نیمه صلب به کمک تزریق آمیخته ماسه سیمان در حفرات آسفالت متخلخل با دانه‌بندی و درصد قیر بهینه دانه‌بندی C و

٤ درصد قیر به ترتیب پارامترهای مدول برجهندگی، خستگی، خزش، حساسیت رطوبتی و مقاومت مارشال، حدوداً ٪۱٦۷،٪٦۰، ٪٦۲، ٪۵ و ٪۲۱ بهبود یافتند. ازاین‌رو با تبدیل رویه انعطاف‌پذیر به رویه نیمه صلب می‌توان پارامترهای عملکردی رویه، ازجمله پارامترهای مذکور را، بهبود داد.

## ۷. پی‌نوشت‌ها

1. Semi-rigid pavement
2. Salvicim
3. Jean Lefebvre Enterprises

## ۸. مراجع


– آیین نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران .(۱۳۹۰).وزات راه و سهرسازی،نشریه شماره۲۳٤،تهران، ایران.

– آیین نامه ااجرا و نگهداری آسفالت متخلخلسازمان مدیریت و برنامه کشور .(۱۳۹٤). مستندات و مبانی فنی دستورالعمل طرح، نشریه شماره ۲–۳۸٤، تهران، ایران.

– احمدی, ا., فانی, ش. ا., و ابوطالبی, ا. (۱۳۹۹). ارزیابی هزینه خالص فعلی ساخت و تعمیر انواع روسازی بتنی وآسفالتی برای ساخت آزادراه حرم تا حرم. دوازدهمین همایش قیر و آسفالت ایران.

– اسماعیل پور, م., و زوربخش, م. (۱۳۹۸). بررسی انواع روسازی های بتنی و مقایسه آن ها با روسازی آسفالتی با استفاده از روش AHP با رویکرد اقتصاد مقاومتی (مسیر مورد مطالعه : بلوار شهید چمران شیراز). سومین کنفرانس ملی رویه های بتنی.

– حسامی, ا., خدایی, ع., و مقدس نژاد, ف. (۱۳۸۸). ارزیابی تغییر شکل دائم آسفالت متخلخل پلیمری. مهندسی عمران امیرکبیر, ٤۱(۱), ۱۰۵–۱۱۳.

– زرتشتی ایل بیگی, ع. ا., خانی سانیج, ح., و خبیری, م. (۱۳۹۸). طراحی و ارزیابی خصوصیات عملکردی روسازی نیمه صلب. یازدهمین همایش قیر و آسفالت ایران.

– زرتشتی ایلبیگی, ع. ا., خانی سانیج, ح., و خبیری, م. (۱۳۹۷). بررسی مروری عوامل موثر بر طرح اختلاط روسازی نیمه صلب. دهمین همایش قیر و آسفالت ایران.

– شاهاندشتی, ف., آتنا, منش, ک., رضا, م., نژاد, م., و ایزدی. (۱۳۹۹). پاسخ خستگی روسازی بتن آسفالتی نیمه گرم حاوی سنگدانه های سیلیسی و آهکی اصلاح شده با افزودنی نانو ماده ارگانوسیلان به روش انرژی تلف شده. مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل،(۷)۱، ۹۹–۸۱.

– عاشوری, ز., رییس الواعظین, م., و رمضانیانپور, ع. ا. (۱۳۹٦). مزایا و معایب روسازی های بتنی. دومین کنفرانس ملی رویه های بتنی.

– محمدی جانکی, ا., شفابخش, غ., و حسنی, ا. (۱۳۹۸). ارزیابی ایمنی روسازی بتنی در آتش سوزی تونل. سومین کنفرانس ملی رویه های بتنی.

– یوسف دوست, س., فرزانه, ا., اسماعیلی, م., و احمدی, ا. (۱۳۹۰). بررسی آزمایشگاهی مدول برجهندگی, مقاومت کششی غیرمستقیم و فشاری تک محوری مخلوط های آسفالت بازیافت شده با استفاده از کف قیر. نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری (دانشکده فنی)،(۷)٤۵،.۸۰۳–۸۲۵.

- Anderton, G. L. (2000). Engineering properties of resin modified pavement (RMP) for mechanistic design.

- Assogba, O. C., Tan, Y., Zhou, X., Zhang, C.,

Testing and Evaluation, 45(2), 591–600.

- Karami, M. (2017). Application of the cementitious grouts on stability and durability of semi flexible bituminous mixtures. AIP Conference Proceedings, 1903(1), 20012.

- Lee, B. J., Bang, J. W., Jang, Y. Il, Kim, S. S., & Kim, Y. Y. (2014). The effects of expansive additive on rapid hardening cement grout for semi-rigid pavement. Advanced Materials Research, 831, 376–379.

- Park, K. Y., Lee, J. J., Kwon, S. A., & Jeong, J. H. (2010). Evaluation of Functional and Structural Performance of Semi Rigid Overlay Pavements. Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 30(3D), 271–278.

- Plati, C. (2019). Sustainability factors in pavement materials, design, and preservation strategies: A literature review. Construction and Building Materials, 211, 539–555.

- Pradeep, K. I., & Mampearachchi, W. K. (2019). Determination of optimum design parameters for semi rigid pavement. 2019 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon), 7–12.

- Raad, L., Minassian, G. H., & Gartin, S. (1992). Characterization of saturated granular bases under repeated loads (Issue 1369).

- Reddy, B. R. M., Gain, A. L., Kiranmayi, M. L., Kumar, M. N., Narayan, N. T., Prasanth, T. N. D., Sumala, T., Geetla, T., Aishwarya, R. G., Krishnan, J. M., & others. (2005). Fabrication of Cement-Grouted Asphalt Concrete for Semi-Flexible Pavements. 2nd National Conference on Advances in Materials and Mechanics of Concrete Structures, at IIT Madras, Chennai, India.

- Sanij, H. K., Meybodi, P. A., Hormozaky, M. A., Hosseini, S. H., & Olazar, M. (2019). & Anato, J. N. (2020). Numerical investigation of the mechanical response of semi-rigid base asphalt pavement under traffic load and nonlinear temperature gradient effect. Construction and Building Materials, 235, 117406.

- Behbahani, H., Ziari, H., Kamboozia, N., Khaki, A. M., & Mirabdolazimi, S. M. (2015). Evaluation of performance and moisture sensitivity of glasphalt mixtures modified with nanotechnology zycosoil as an anti-stripping additive. Construction and Building Materials, 78, 60–68.

- Bessa, I. S., Vasconcelos, K. L., Branco, V. T. F., do Nascimento, L. A. H., & Bernucci, L. L. B. (2018). Prediction of Fatigue Cracking in Flexible and Semi-Rigid Asphalt Pavement Sections.

- Daines, M. E. (1992). Trials of porous asphalt and rolled asphalt on the A38 at Burton. TRL RESEARCH REPORT, 323.

- de Ven, M. F. C., & Molenaar, A. A. A. (2004). Mechanical Characterization Of Combi-Layer (With Discussion). Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 73.

- Han, Z., & Vanapalli, S. K. (2016). Relationship between resilient modulus and suction for compacted subgrade soils. Engineering Geology, 211, 85–97.

- Hou, S., Xu, T., & Huang, K. (2016). Investigation into engineering properties and strength mechanism of grouted macadam composite materials. International Journal of Pavement Engineering, 17(10), 878–886.

- Hou, S., Xu, T., & Huang, K. (2017). Aggregate gradation influence on grouting results and mix design of asphalt mixture skeleton for semi-flexible pavement. Journal of

Zhang, C., & You, L. (2021). Unified characterizing fatigue performance of rubberized asphalt mixtures subjected to different loading modes. Journal of Cleaner Production, 279, 123740.

- Yang, B., & Weng, X. (2015). The influence on the durability of semi-flexible airport pavement materials to cyclic wheel load test. Construction and Building Materials, 98, 171–175.

- Yu, T., Zhang, H., & Wang, Y. (2020). Interaction of asphalt and water between porous asphalt pavement voids with different aging stage and its significance to drainage. Construction and Building Materials, 252, 119085.

- Zhang, Y., & Wu, D. Q. (2020). General applications of the semi-rigid pavement in South East Asia. International Journal of Pavement Research and Technology, 1–7.

- Zhu, J., Ma, T., Lin, Z., & Zhu, H. (2021). Effect of aggregate structure on load-carrying capacity and deformation resistance of porous asphalt concrete based on discrete-element modelling. International Journal of Pavement Engineering, 1–11.

Evaluation of performance and moisture sensitivity of glass-containing warm mix asphalt modified with zycothermTM as an anti-stripping additive. Construction and Building Materials, 197, 185–194.

- Setiawan, A. (2009). Design and properties of hot mixture porous asphalt for semi-flexible pavement applications. Media Teknik Sipil, 5(2), 41–46.

- Setyawan, A. (2013). Asessing the compressive strength properties of semi-flexible pavements. Procedia Engineering, 54, 863–874.

- Setyawan, A., Zoorob, S. E., & Hasan, K. E. (2013). Investigating and comparing traffic induced and restrained temperature stresses in a conventional rigid pavement and semi-rigid layers. Procedia Engineering, 54, 875–884.

- Sha, D., Pan, B., Sun, Y., Che, T., & Lu, J. (2019). A new approach to evaluating the moisture damage of semi-rigid base materials based on the eroding test by the hydrodynamic pressure generator. Construction and Building Materials, 227, 116613.

- Sunil, S., Varuna, M., & Nagakumar, M. S. (2020). Performance evaluation of semi rigid pavement mix. Materials Today: Proceedings.

- Xia, C., Lv, S., Cabrera, M. B., Wang, X.,

زهره غفوری فرد، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۹۸ از دانشگاه یزد أخذ نمود. ایشان در سال ۱٤۰۰ موفق به کسب درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران- راه و ترابری از دانشگاه یزد گردید، که در این دوره نیز از حمایتهای بنیاد ملی نخبگان برخوردار گردیدند. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان، ایمنی حمل ونقل جاده‌ای، روسازی متخلخل، بهسازی و مقاوم‌سازی خاک بستر و مصالح شنی است.

محمد مهدی خبیری، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۷٦ از دانشگاه یزد أخذ نمود. ایشان موفق به کسب درجه کارشناسی ارشد و دکتری در رشته مهندسی عمران- راه و ترابری در سال‌های ۱۳۷۸ و ۱۳۸۷ از دانشگاه علم و صنعت ایران گردید.. زمینه های پژوهشـی مورد علاقه ایشـان بهسازی و مقاوم سازی خاک بستر و مصالح شنی، مصالح،تحلیل، طراحی و مدیریت نگهداری روسازی، بهره‌وری ماشین آلات ساختمانی و راهسازی، ایمنی ترافیک با رویکرد مرتبط با روسازی و روسازی متخلخل است. ایشان در حال حاضر عضو هیأت علمی دانشگاه یزد با مرتبه دانشیاری می‌باشد.