



Semnan University



Research Article

Evaluation of the Effect of Micro-silica Gel, Polymer Fibers, Fly Ash and RAP on the Performance and Durability of Concrete Pavers

Vahid Taheri^{a*}, Mikaeil Naseri Yalghouzaghaj^b, Nazanin Mohammadi^c

^a Department of Civil Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

^b Department of civil engineering, salmas branch, islamic azad university, salmas, iran

^c Graduated MSc. Department of Civil Engineering, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2023-11-28

Revised: 2024-01-08

Accepted: 2024-01-17

Keywords:

Concrete block pavement,

Micro-silica gel,

Fly ash,

P.P. fibers,

RAP.

ABSTRACT

In this article, one of the solutions to reduce greenhouse gases in concrete block pavements, i.e. the use of recycled materials and polymer fibers have been investigated. For this purpose, several concrete blocks, which are used in the upper part of the concrete block pavement system, were made by adding micro-silica gel, fly ash, macro and micro polymer fibers, as well as reclaimed asphalt pavement (RAP) and were tested in terms of compressive strength, bending resistance, durability against periods of freeze and thaw, skid resistance by the British pendulum method and wear resistance by wide wheel abrasion method. Results of the tests showed that micro-silica gel improves the compressive strength of the samples by 2 times and the bending strength by 20%. Although polymeric fibers did not affect improving the compressive strength of the samples, but they could improve the modulus of rupture by about 5% because they prevent the expansion of tensile cracks. Meanwhile, the other two materials, i.e. fly ash and RAP, were not able to significantly increase the flexural strength. Evaluation of the results of durability test showed that presence of 0.3% macro polymeric twisted fibers preserves the compressive strength of the samples before and after 50 cycles of freezing and thawing more than other additives. Overall, comparison of the ratio of compressive strength of the samples after freezing and thawing to the strength of the samples before the test showed that using high percentages of micro-silica gel, fly ash and twisted macro polymer fibers increased durability of the control samples on the average by about 30%. Results of the skidding resistance test also showed that macro twisted polymer fibers increase the skidding resistance of the control samples by about 50%. The abrasion resistance test with the wide wheel abrasion method also showed that micro-silica gel and RAP play a more effective role in keeping the surface of the sample blocks unified, i.e. nearly 10% improvement, compared to other materials.

* Corresponding author.

E-mail address: v.taheri@semnaniau.ac.ir

How to cite this article: TAHERI, V., Naseri Yalghouzaghaj, M., & Mohammadi, N. (2023). Evaluation of the effect of micro-silica gel, polymer fibers, fly ash and RAP on the performance and durability of concrete pavers. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 9(4), 83-103.

<https://doi.org/10.22075/jtie.2024.32473.1658>

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

ارزیابی تأثیر ژل میکروسیلیس، الیاف پلیمری، خاکستر بادی و تراشه آسفالت بر عملکرد و دوام بلوک کفپوش بتنی

وحید طاهری^{۱*}، میکائیل ناصری یالقوزآغاچ^۲، نازنین محمدی^۳

^۱گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

^۲گروه آموزشی عمران، واحد سلماس، دانشگاه آزاد اسلامی، سلماس، ایران

^۳دانش آموخته کارشناسی ارشد راه و ترابری، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران

چکیده

در این مقاله، یکی از راهکارهای کاهش گازهای گلخانه‌ای در روسازی‌های بتنی بلوکی، یعنی استفاده از مواد بازیافتی و الیاف پلیمری بررسی شده است. به همین منظور، تعدادی بلوک بتنی کفپوش که در رویه فوقانی سیستم روسازی بتنی بلوکی به کار می‌روند، با افزودن ژل میکروسیلیس، خاکستر بادی، الیاف پلیمری ماکرو و میکرو و همچنین تراشه آسفالت ساخته شدند و از نظر مقاومت فشاری، خمشی، دوام در برابر دوره‌های ذوب و یخبندان، مقاومت لغزشی به روش آونگ انگلیسی و مقاومت سایشی به روش چرخ غلتان مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که ژل میکروسیلیس مقاومت فشاری نمونه‌ها را حدود دو برابر و مقاومت خمشی را ۲۰٪ بهبود می‌بخشد. الیاف پلیمری هم اگر چه تأثیری بر بهبود مقاومت فشاری نداشتند اما به سبب اینکه از گسترش ترک‌های کششی جلوگیری می‌کنند، مدول گسیختگی را حدود ۵٪ بهبود می‌بخشند. در ضمن، دو ماده دیگر، یعنی خاکستر بادی و تراشه آسفالت، قادر نبودند مقاومت خمشی را به‌طور محسوسی افزایش دهند. ارزیابی نتایج آزمایش دوام نشان داد که وجود ۰/۳ درصد حجمی الیاف به هم تابیده شده پلیمری ماکرو بیش از مواد افزودنی دیگر مقاومت فشاری نمونه‌ها را قبل و بعد از ۵۰ چرخه ذوب و انجماد حفظ می‌کنند. به‌طور کلی، مقایسه نسبت مقاومت‌های فشاری نمونه‌ها بعد از ۵۰ چرخه ذوب و انجماد به مقاومت نمونه‌ها قبل از آزمایش نشان داد که به کار بردن درصد‌های زیاد ژل میکروسیلیس، خاکستر بادی و الیاف پلیمری به هم تابیده شده ماکرو، دوام نمونه‌های شاهد را به‌طور متوسط حدود ۳۰٪ بهبود می‌بخشند. نتایج آزمایش مقاومت لغزشی نیز نشان داد که الیاف پلیمری به هم تابیده ماکرو، مقاومت لغزشی نمونه‌های شاهد را حدود ۵۰٪ افزایش می‌دهند. آزمایش مقاومت سایشی با چرخ غلتان نیز نشان داد که ژل میکروسیلیس و تراشه آسفالت می‌توانند در یکپارچه نگهداشتن سطح بلوک‌های نمونه نقش مؤثرتری، یعنی نزدیک به ۱۰٪ بهبود، نسبت به بقیه مواد، ایفا نمایند.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۰۷

بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۱۸

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۲۷

واژگان کلیدی:

روسازی بتنی بلوکی،

ژل میکروسیلیس،

خاکستر بادی،

الیاف پلیمری،

تراشه آسفالت.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: v.taheri@semnaniau.ac.ir

استناد به این مقاله: طاهری، وحید، ناصری یالقوزآغاچ، میکائیل & محمدی، نازنین. (۱۴۰۲). ارزیابی تأثیر ژل میکروسیلیس، الیاف پلیمری، خاکستر بادی و تراشه آسفالت بر عملکرد و دوام بلوک کفپوش بتنی. مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، ۹(۴)، ۸۳-۱۰۳.

<https://doi.org/10.22075/jtie.2024.32473.1658>

۱. مقدمه

تحقیقات نشان داده است که به ازای تولید یک تن سیمان در دنیا، حدود نیم تن گاز دی‌اکسید کربن وارد اتمسفر می‌شود (پاتیل و کاتار، ۲۰۲۳). به همین دلیل، سعی شده است تا حد ممکن در مصرف سیمان بازنگری شود و راه‌حل‌های بلندمدتی برای جلوگیری از مصرف انرژی جستجو گردد. یکی از این راه‌حل‌ها، استفاده از مواد جایگزین سیمان مانند خاکستر بادی و میکروسیلیس یا استفاده از مواد زائد انواع کارخانه‌ها و همچنین به‌کار بردن خرده آسفالت بازیافتی در تهیه و ساخت بتن مورد استفاده در روسازی‌های صلب است.

یکی از سیستم‌های روسازی، متشکل از بلوک کفپوش بتنی است که در کنار یکدیگر با الگوهای متنوع قرار گرفته و درز بین آنها با ماسه درزبند پر می‌شود. امروزه، از این سیستم به عنوان یک روسازی مدرن و مقرون به صرفه که اجرا و ترمیم آن به سهولت انجام می‌شود و می‌تواند مسیر تلاش جهانی به منظور کاهش گازهای گلخانه‌ای را هموارتر نماید نام برده می‌شود (جمشیدی و همکاران، ۲۰۱۹؛ حیاتی و طاهری، ۱۴۰۱). این روسازی در مسیری که سرعت وسایل نقلیه زیاد نباشد، مانند مسیرهای درون شهری و مناطق مسکونی و یا در برخی از نواحی صنعتی و بندرگاه‌ها با بارگذاری سنگین که وسایل نقلیه با وزن زیاد اما با سرعت کم حرکت کنند و یا توقفگاه (اپرون) فرودگاه‌ها بیشتر استفاده شده است (دی ماسیو و همکاران، ۲۰۱۹؛ طاهری و همکاران، ۲۰۲۱). همانند دیگر طرح‌های اختلاط بتن در انواع سازه‌ها، در بلوک‌های بتنی کفپوش نیز با هدف تلاش در جهت پاک‌سازی محیط‌زیست از انواع آلاینده‌ها و ضایعات کارخانجات، مواد بازیافتی متعددی به‌کار رفته است. در همین زمینه، در سال ۲۰۲۱ برای ارزیابی مقاومت فشاری بلوک‌های کفپوش از مصالح بازیافتی سرامیکی به جای مصالح سنگدانه‌ای و افزودنی الیاف پلاستیکی استفاده شد و توصیه نهایی آن بود که ۲ درصد الیاف پلاستیکی نسبت به وزن مخلوط قابل استفاده در

روسازی بتنی بلوکی که به‌عنوان روسازی نیمه‌صلب شناخته می‌شود متشکل از بلوک‌های کفپوش بتنی به ابعاد تقریبی $20 \times 10 \times 8$ سانتی‌متر است که کنار یکدیگر قرار گرفته و زیر آن یک لایه ماسه‌ای به ضخامت تقریبی ۳ تا ۵ سانتی‌متر اجرا می‌شود. از مزایای این روسازی می‌توان به اجرای سریع و تعمیر و نگهداری آسان و کم‌هزینه آن نسبت به روسازی‌های بتنی و آسفالتی اشاره نمود. با توجه به شرایط حاکم بر جهان از نظر لزوم اقبال بیشتر به راهکارهای تعدیل تولید گازهای گلخانه‌ای و معضلات زیست‌محیطی، شماری از محققین در زمینه امکان استفاده از مصالح بازیافتی و زائد کارخانه‌ها در طرح اختلاط بتن این روسازی مطالعاتی انجام داده‌اند. در این پژوهش، استفاده از چندین ماده شامل تراشه آسفالت، ژل میکروسیلیس، خاکستر بادی و الیاف پلیمری در طرح اختلاط بتن بلوک کفپوش مورد مطالعه قرار گرفت. در خصوص بلوک‌های کفپوش بتنی به نظر می‌رسد استفاده از این مواد می‌تواند قابلیت استفاده از آنها را در محیط‌های شهری و در کاربری‌هایی که تحت شرایط جوی مختلف قرار دارند را بهبود ببخشد. با توجه به اینکه در این خصوص نیاز به انجام تحقیقات بیشتری می‌باشد، بررسی عملکرد بلوک‌های بتنی حاوی این مواد در برابر تنش‌های فشاری، خمشی و همچنین دوره‌های ذوب و انجماد و ارزیابی مقاومت لغزشی و سایشی آنها، که در استانداردهای مربوطه، مانند ASTM C936 یا استاندارد اروپایی BS EN 1338 که معادل آن در استاندارد ملی ایران به شماره INSO 20185 به عنوان معیارهای رد یا پذیرش بلوک کفپوش به عنوان رویه سیستم روسازی بتنی بلوکی بیان می‌شود، از اهداف این تحقیق آزمایشگاهی بوده است.

۲. مروری بر ادبیات موضوع پژوهش

تولید شده نه تنها برای نواحی کم ترافیک و پیاده‌راه‌ها مناسب هستند، بلکه می‌توان از آنها در نواحی با ترافیک سنگین هم استفاده نمود (حسینی و همکاران، ۲۰۲۰؛ ناندی و رانسینچانگ، ۲۰۲۱). برخی محققین بر این عقیده‌اند که برای جبران کاهش مقاومت فشاری بتن حاوی تراشه آسفالت می‌توان اولاً حداکثر ۵۰ درصد مصالح سنگی را با تراشه آسفالت جایگزین نمود و ثانیاً همزمان میکروسیلیس به میزان ۳ تا ۱۲ درصد وزن سیمان در طرح مخلوط به کار برد (رضایی و همکاران، ۲۰۲۲). نتیجه تحقیق دیگری که در کشور ایتالیا توسط ماسی و همکاران (۲۰۲۲) انجام شد حاکی از آن بود که اگر فقط از تراشه آسفالت به عنوان مصالح سنگی بتن استفاده شود (۱۰۰ درصد RAP)، دوام مخلوط حاصل تحت دوره‌های ذوب و انجماد به نحو چشمگیری افزایش می‌یابد.

ماده دیگری که بسیاری از محققین در مورد تأثیر آن بر بتن مطالعه کرده‌اند، ژل میکروسیلیس است. مصرف ژل میکروسیلیس در بتن، نفوذناپذیری آن را افزایش می‌دهد و موجب ساخت بتن پُر مقاومت و بادوام می‌شود (کیم و همکاران، ۲۰۱۸). در همین زمینه، سینگ و همکاران (۲۰۲۳) با بررسی مقاومت فشاری و خمشی بتن‌های حاوی مصالح سنگی بازیافتی و مقادیر مختلف ژل میکروسیلیس، خاکستر بادی و سرباره کوره آهن-گدازی دریافتند که استفاده از ترکیب سه جزئی ۳۵٪ خاکستر بادی با ۵۰٪ سرباره کوره آهن‌گدازی و ۱۵٪ ژل میکروسیلیس به عنوان بخشی از سیمان مصرفی، مقاومت فشاری بتن به ۵۲/۱۵ و مقاومت خمشی به ۵/۸۱ مگاپاسکال می‌رسد.

ونگ و همکاران (۲۰۲۲) در یک پژوهش، تأثیر نانوسیلیس را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که تنها ۲٪ نانوسیلیس می‌تواند مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن را حدود ۲۳٪ بهبود بخشد. بهترین مقدار نانوسیلیس و میکروسیلیس جهت بهبود مقاومت فشاری بتن توسط

روسازی بتنی بلوکی است (اویرا و همکاران، ۲۰۲۱). چایکاو و همکاران (۲۰۱۹) با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری و خمشی روی بلوک‌های کفپوشی که برای روسازی پیاده‌راه‌ها با استفاده از پودر لاستیک و الیاف فولادی قلاب‌دار به میزان ۰/۵ و ۱ درصد حجمی ساخته شده بودند، به این نتیجه رسیدند که الیاف فولادی قادرند تا مقاومت خمشی و سایشی را بهبود بخشند.

همانگونه که بیان شد، یکی از مواد زائد در فرایند تعمیر و نگهداری راه‌ها، خرده یا تراشه آسفالت است. این ماده به دلیل اینکه به معضلی از نظر حجم مضر برای محیط‌زیست تبدیل شده، برای استفاده در مخلوط‌های بتنی دوست‌دار محیط‌زیست مورد توجه قرار گرفته است (کارتیکیان و همکاران، ۲۰۲۳). در یک پژوهش آزمایشگاهی، سابو و همکاران (۲۰۲۰) استفاده از تراشه آسفالت را در ساخت بلوک‌های بتنی کفپوش متخلخل بررسی نمودند. آنها سه نسبت مختلف را در ساخت نمونه‌ها شامل (۰-۱۰۰)، (۰-۱۰۰) و (۵۰-۵۰) به کار بردند. نتیجه کلی آن بود که گرچه با اضافه شدن تراشه آسفالت، مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی کاهش می‌یابد اما اگر حداکثر ۵۰ درصد مصالح سنگی با تراشه آسفالت جایگزین شود مشخصات بتن از نظر مقاومت چندان تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد.

محققین دریافته‌اند که با جایگزین کردن مقادیر مختلفی از سنگدانه‌های بلوک‌های کفپوش بتنی، به‌طور مثال به اندازه صفر، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد با تراشه آسفالت، اگر چه مقاومت فشاری و سایشی بلوک‌های کفپوش کاهش می‌یابد اما توصیه کرده‌اند که برای رفع معضل انباشت تراشه آسفالت و به منظور کاهش سنگدانه‌های طبیعی بهتر است در نواحی کم‌ترافیک شهری و پیاده‌راه‌ها از تراشه آسفالت استفاده شود. البته، در تحقیقات دیگر، اضافه شدن تراشه آسفالت به صورت مرحله‌ای به بتن بررسی شده و این نتیجه به دست آمده که اگر تراشه آسفالت به صورت مرحله‌ای به بتن اضافه شود بلوک‌های

مطالعات گذشته به نام بتن ژئوپلیمری نیز معرفی شده است (اسپرهم و مرادی خو، ۱۴۰۰). این ماده، از استخراج گازهای خروجی کوره‌های آتش با سوخت زغال به دست می‌آید و جزو مصالح زائد در نیروگاه‌های حرارتی است. در بتن‌های معمولی، مقدار جایگزینی حتی به ۵۰ درصد هم می‌رسد. در بتن‌های با مقاومت زیاد، سطح جایگزینی به ۱۵ تا ۲۵ درصد محدود می‌شود. دلیل استفاده از این ماده، کاهش گرمایی و نفوذپذیری بتن و بهبود دوام است (نایاک و همکاران، ۲۰۲۲). در پژوهشی که در سال ۲۰۲۱ در زمینه استفاده از خاکستر بادی در مقادیر زیادتر از ۵۰۰ کیلوگرم در متر مکعب، در طرح اختلاط روسازی بتنی انجام شد، این نتیجه به دست آمد که اگر بخش ماسه سنگدانه‌ها به طور کامل با خاکستر بادی جایگزین شود، مقاومت فشاری بتن نسبت به حالت‌های دیگر که ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد ماسه با خاکستر بادی جایگزین شده باشد، بهبود پیدا می‌کند (تیتیکش و ونجاری، ۲۰۲۱).

نتیجه بررسی‌های صورت گرفته در تحقیقات گذشته را می‌توان به شرح زیر خلاصه نمود:

الف- ژل میکروسیلیس و در بعضی موارد خاکستر بادی سبب افزایش مقاومت فشاری و کاهش نفوذپذیری بتن شده و این امر می‌تواند به ارتقای دوام بتن در برابر تکرار دوره‌های ذوب و انجماد کمک نماید.

ب- تراشه آسفالت سبب می‌شود که از مصرف سیمان و مصالح سنگی کاسته شده، اما در مقادیر بیش از ۵۰ درصد به جای مصالح سنگدانه‌ای تأثیر کاهشی بر مقاومت فشاری از خود نشان می‌دهد و البته مشخص نیست که اگر بخشی از درشت‌دانه یا بخشی از ریزدانه بتن با تراشه آسفالت جایگزین شود، مقاومت آن چگونه تحت تأثیر قرار می‌گیرد. به هر حال، در این پژوهش، تأثیر جایگزین شدن بخشی از سنگدانه‌های بتن با تراشه آسفالت بررسی شده است.

ج- الیاف پلی‌پروپیلن سبب می‌شوند تا مقاومت بتن در برابر ترک خوردگی و بارهای ضربه‌ای بهبود یابد.

هاویله و همکاران (۲۰۲۳) مورد مطالعه قرار گرفت. بررسی آنها نشان داد که ۹٪ میکروسیلیس و ۱٪ نانوسیلیس تأثیر چشمگیری در بهبود مقاومت بتن دارند. امروزه، با پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه صنعت بتن، استفاده از بتن الیافی، هم برای اجرای انواع روسازی‌ها و هم برای تولید مواد پُرکننده درزها و ترک‌ها برای ترمیم انواع خرابی‌های مسیرهای بتنی، رواج و گسترش زیادی پیدا کرده است (شو و همکاران، ۲۰۲۲). بتن الیافی، اگر چه در بیشتر تحقیقات نشان داده است که تأثیر چشمگیری در بهبود مقاومت فشاری بتن ندارد، اما از قابلیت جذب انرژی بالایی برخوردار است و در تحقیقی نشان داده که مقاومت کششی بتن را می‌تواند حدود ۱۵ درصد افزایش دهد (شفابخش و اسدی، ۱۳۹۷). در تحقیقاتی دیگر، این نتایج به دست آمد که الیاف طبیعی پتانسیل آن را دارند که در ۶۰٪ پروژه‌های راه‌سازی و ۳۰٪ پروژه‌های ساختمانی مورد استفاده قرار گیرند (مورالی و رامپراساد، ۲۰۱۸؛ چن و همکاران، ۲۰۲۳). استفاده از الیاف کربنی در بتن‌های توانمند حاوی میکروسیلیس توسط راضا و همکاران (۲۰۲۲) با ساخت نمونه‌های بتنی و انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری و خمشی مورد مطالعه قرار گرفت. بررسی آنها نشان داد که بهترین مقدار الیاف ۰/۵ تا ۰/۷۵ درصد حجمی است که قادر است سبب ایجاد تأخیر در گسیختگی بتن شود. کاربرد دیگر مواد افزودنی بازیافتی و الیافی، ساخت بتن‌های مخصوص ترمیم روسازی‌های بتنی است.

فرزین و همکاران (۲۰۱۷) پس از بررسی تأثیر میکروسیلیس، ژئولیت و الیاف پلی‌پروپیلن بر ۱۱ طرح اختلاط مختلف بتن مورد استفاده در ترمیم روسازی‌های بتنی غلتکی دریافتند که ۰/۲ درصد الیاف، ۱۱٪ میکروسیلیس و ۱۵٪ ژئولیت برای بهبود مدول الاستیک و مدول خمشی مناسب هستند.

خاکستر بادی از دیگر موادی است که به صورت پودر جایگزین سیمان در مخلوط بتن می‌شود که در برخی

آسفالت و آب است که در این بخش مشخصات آنها به تفکیک ذکر شده است.

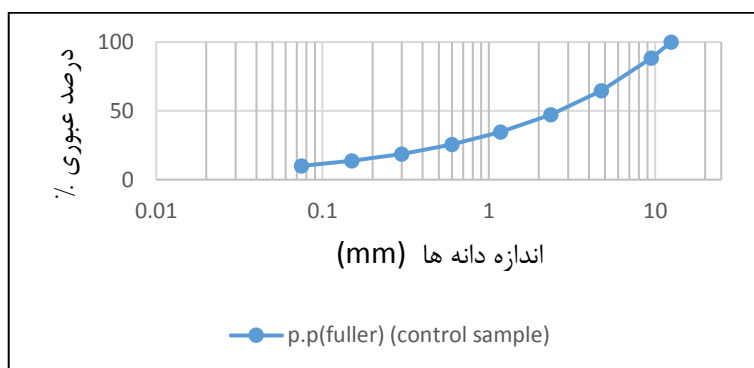
۳-۱. سنگدانه

در شکل ۱، دانه‌بندی مصالح سنگی نمونه‌های شاهد بدون افزودنی نشان داده شده است. در دانه‌بندی مورد استفاده که بر اساس رابطه فولر به دست آمده است، حداکثر اندازه اسمی برابر الک ۹/۵ میلی‌متری (سه هشتم اینچ) و حداکثر اندازه سنگدانه‌ها برابر الک ۱۲/۵ میلی‌متری (نیم اینچ) است. در جدول ۱، برخی مشخصات فیزیکی مصالح سنگی قابل مشاهده است.

در پژوهش پیش رو، سعی شده تا نتایجی که از تحقیقات گذشته در مراجع علمی ثبت شده، با ساخت بلوک‌های کفپوش حاوی مواد فوق‌الذکر، استفاده از میز ویبره و انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری، خمشی و دوام، تحلیل و ارزیابی شوند.

۳. مواد و مصالح

مواد و مصالح مورد استفاده در این پژوهش شامل مصالح سنگی، سیمان، انواع مواد افزودنی شامل ژل میکروسیلیس، خاکستر بادی، الیاف پلیمری، تراشه



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی نمونه‌های بتنی

جدول ۱. مشخصات فنی مصالح سنگی منتخب در این پژوهش

جذب آب مصالح	جذب آب مصالح مانده روی الک	وزن مخصوص واقعی مصالح ریزتر از الک	وزن مخصوص واقعی مصالح مانده روی الک	افت وزنی ریزدانه‌ها در برابر سولفات سدیم مطابق ASTM C88 (%)	افت وزنی درشت‌دانه‌ها در برابر سولفات سدیم مطابق ASTM C88 (%)	سایش لس آنجلس مطابق ASTM C535 (%)
۱/۴	۰/۹	۲/۶۱ (g/cm ³)	۲/۶۳ (g/cm ³)	۲/۶۲	۱/۴۱	۲۵

استفاده شد که حرارت‌زایی کمتری دارد و معمولاً مقاومت متوسطی در برابر سولفات‌ها از خود نشان می‌دهد. برخی از مهمترین مشخصات این سیمان در جدول ۲ ارائه شده است.

۳-۲. سیمان

برای ساخت کلیه نمونه‌ها با توجه به اینکه محل انجام این پژوهش از نظر آب‌وهوایی در منطقه نسبتاً گرم و خشک قرار داشت (سمنان)، از سیمان تیپ ۲ شاهرود

ارزیابی تأثیر ژل میکروسیلیس، الیاف پلیمری، خاکستر بادی و تراشه آسفالت بر عملکرد و دوام بلوک کفپوش بتنی

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان تیپ ۲ مورد استفاده در این پژوهش

اجزای شیمیایی			مشخصات فیزیکی				
C 3 A	اکسید سیلیس	اکسید آهن	اکسید آلومینیوم	سطح مخصوص (سانتی متر مربع بر گرم) به روش Blaine	مقاومت فشاری	زمان گیرش نهایی (دقیقه)	زمان گیرش اولیه (دقیقه)
۵/۳	۲۱/۱۱	۳/۹۱	۴/۴۸	۲۷۰۰ (مطابق INSO 389, حداقل ۲۶۰۰)	۳۷۵	۲۱۵	۱۳۵
					(مطابق INSO 389, حداقل ۳۷۵)	(مطابق INSO 389, ۳۷۵)	(مطابق INSO 389, ۴۵)
					حدداقل ۳۲۵ و حداکثر ۵۲۵		

هیدراتاسیون واکنش می دهد و سبب کاهش نفوذپذیری و افزایش مقاومت مکانیکی بتن می شود. در جدول ۳، برخی از مشخصات فیزیکی و شیمیایی این ماده ارائه شده است.

۳-۳. ژل میکروسیلیس

در طرح اختلاط یک سری از نمونه ها از درصدهای مختلف ژل میکروسیلیس بر پایه پلی کربوکسیلات بر حسب وزن سیمان استفاده شد. این ماده دارای ویژگی های پوزولانی است که با هیدروکسید کلسیم حاصل از

جدول ۳. مشخصات ژل میکروسیلیس پلی کربوکسیلات

حالت فیزیکی	رنگ	مقدار میکروسیلیس در ژل	چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)	pH	پایه شیمیایی فوق روان کننده موجود در ژل
ژل	خاکستری تیره	۴۰ درصد	۱/۳ ± ۰/۰۲	۷±۱	پلی کربوکسیلات اتر

در جدول ۴، برخی ترکیبات خاکستر بادی مورد استفاده در پژوهش بر اساس گزارش شرکت سازنده ارائه شده است.

۴-۳. خاکستر بادی^۱

^۱ - Fly ash

جدول ۴. مشخصات خاکستر بادی مورد استفاده در این تحقیق

مؤلفه	اکسید سیلیس	اکسید آهن	اکسید آلومینیوم	اکسید منیزیم	اکسید تیتانیوم
درصد	۵۹/۷	۴/۲	۳۰/۲	۰/۴	۱/۸

۳-۵. الیاف پلیمری
 در این پژوهش، دو نوع الیاف استفاده شد. یکی از آنها از نوع الیاف میکرو و ساخته شده از پلی پروپیلن خالص با نام تجاری MICROFORCE-500 متشکل از تک- رشته‌های نازک (شکل ۲-الف) بود که باعث ایجاد بتن مسلح الیافی می‌شود. برخی از مشخصات این الیاف به شرح جدول ۵ می‌باشد.

جدول ۵. مشخصات الیاف پلیمری میکرو به طول ۱۲ میلی‌متر

مواد اولیه	رنگ	وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	قطر (میکرومتر)
پلی پروپیلن خالص (۱۰۰٪)	سفید	۰/۹۱	۲۳

نوع دوم الیاف (شکل ۲-ب)، ماکروپلی تار بود که از ترکیب مواد پلیمری اصلاح شده ساخته از کوپلیمر/پلی پروپیلن ۱۰۰ درصد خالص و رشته‌های تاییده شده به دست آمده‌اند.



شکل ۲. دو نوع الیاف پلیمری مورد استفاده در پژوهش

برخی مشخصات الیاف به هم تاییده شده (شکل ۲-ب) در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶. مشخصات الیاف پلیمری ماکرو WT700

مواد اولیه	رنگ	وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	طول	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	درصد ازدیاد طول
پلی پروپیلن خالص ۱۰۰٪	سفید	۰/۹۱	۵۰-۵۵	۵۵۰-۶۵۰	کمتر از ۱۵

۳-۶. تراشه آسفالت (RAP)

نحوه استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی (RAP) حاصل تراشیدن قشر توپکا که بین ۴ الی ۵ درصد وزنی قیر داشته است، در این پژوهش بدین صورت بود که به ترتیب ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد از درشت‌دانه‌های بتن (مصالح درشت‌تر

از ۴/۷۵ میلی‌متر) با تراشه آسفالت جایگزین شدند. به عنوان مثال، در جدول ۷، مقادیر وزنی و اندازه دانه‌های تراشه آسفالت و مصالح سنگدانه‌ای بتن به ازای هر کیلوگرم ترکیب سنگدانه و تراشه آسفالت نشان داده شده است.

جدول ۷. دانه‌بندی ترکیب ۹۰٪ بخش درشت‌دانه مصالح سنگی و ۱۰٪ تراشه آسفالت

درصد	شرح / اندازه	۱۲/۵	۹/۵	۴/۷۵	۲/۳۶	۱/۱۸	کوچکتر از	جمع
وزنی	الک بر حسب	(۱/۲ اینچ)	(۳/۸ اینچ)	(شماره ۴)	(شماره ۸)	(شماره ۱۶)	۱/۱۸	
مصالح	میلی‌متر							
درشت دانه	(شماره الک)							
بتن	درصد	۱۰۰	۸۸/۴	۶۴/۷	۴۷/۲	۳۴/۶		
جایگزین	عبوری							
شده با	درصد مانده	۰	۱۱/۶	۲۳/۷	۱۷/۵	۱۲/۷	۳۴/۶	۱۰۰
آسفالت								
۱۰٪	وزن مانده	۰	۰/۱۰۳	۰/۲۱۲				
	مصالح سنگی							
	درشت‌دانه							
	در یک نمونه							
	یک							
	کیلوگرمی							
	وزن مانده	۰	۰/۰۱۲	۰/۰۲۳	۰/۱۷۴	۰/۱۲۶	۰/۳۴۸	
	تراشه							
	آسفالت (RAP)							
	برای الک‌های							
	۱۲/۵ تا							
	۴/۷۵ میلی-متر							
	و مصالح سنگی برای							
	الک‌های							
	کوچکتر از							
	۴/۷۵ میلی-متر							
	در یک نمونه							
	یک							
	کیلوگرمی							

۴. روش انجام تحقیق

اختلاط دانه‌بندی ثابت و مانند دانه‌بندی نمونه شاهد، نسبت آب به سیمان (w/c) برابر ۰/۵ و نوع سیمان مصرفی ثابت و از تیپ دو با عیار ۴۰۰ کیلوگرم در هر متر مکعب، در نظر گرفته شود. آزمایش‌های اصلی برای ارزیابی میزان تأثیر مواد در این تحقیق به همراه خلاصه‌ای از روش و استاندارد مورد استفاده نیز در جدول ۹ مشاهده می‌شود.

برای مقایسه تأثیر مواد مختلف بر خصوصیات و عملکرد بلوک‌های کفپوش مطابق جدول ۸ نسبت‌های گوناگون آنها در طرح مخلوط بتن در نظر گرفته شد. از آنجا که می‌بایست جهت سهولت مقایسه تأثیر مواد، تعداد متغیرها را محدود نمود، لذا تصمیم گرفته شد تا در همه طرح‌های

جدول ۸. انواع طرح اختلاط بلوک‌های کفپوش بتنی در این پژوهش

شماره طرح اختلاط	نوع ماده افزودنی	مقادیر ماده افزودنی (سطوح تغییر، درصد)	معیار سنجش مقدار اختلاط
۱	ژل میکروسیلیس	۱۵، ۱۰، ۵	نسبت به وزن سیمان
۲	خاکستر بادی	۲۰، ۱۵، ۱۰	نسبت به وزن سیمان
۳	الیاف میکروپلیمری	۰/۵، ۰/۳، ۰/۱	نسبت به حجم کل مخلوط
۴	الیاف ماکروپلیمری	۰/۵، ۰/۳، ۰/۱	نسبت به حجم کل مخلوط
۵	تراشه آسفالت	۲۰، ۱۵، ۱۰	نسبت به وزن مصالح سنگی درشت‌دانه (مانده روی الک ۴/۷۵ میلی‌متری)
۶	بدون هر گونه افزودنی	در تمام طرح‌های اختلاط، عیار سیمان تیپ دو، ۴۰۰ کیلوگرم در هر متر مکعب بتن و نسبت آب به سیمان برابر ۰/۵ در نظر گرفته شد.	(طرح اختلاط شاهد)

جدول ۹. روش انجام آزمایش‌های اصلی روی نمونه‌ها برای مقایسه تأثیر مواد افزودنی مختلف بر مشخصات مقاومتی و دوام

بلوک‌های بتنی کفپوش

عنوان آزمایش	شماره استاندارد	خلاصه روش انجام آزمایش
مقاومت فشاری بتن سخت شده	ASTM C39	نمونه مکعبی به ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متر تحت نیروی فشاری قائم در جک بتن‌شکن در سن ۲۸ روز شکسته می‌شود.

مقاومت خمشی	ASTM C293	نمونه‌های بلوک مکعب مستطیلی به ابعاد ۸×۱۱×۲۲ سانتی‌متر تحت نیروی فشاری که به صورت نقطه‌ای در وسط طول وارد می‌شود، قرار می‌گیرند.
دوام در برابر ذوب و یخبندان	ASTM C666	نمونه‌های بتنی در مخزن مخصوص تحت تأثیر ۵۰ سیکل (مطابق ASTM C936) ذوب و انجماد بین دمای ۱۸ درجه سلسیوس زیر صفر و ۴ درجه سلسیوس بالای صفر قرار می‌گیرند و مقاومت فشاری آنها قبل و بعد از چرخه تغییرات دمایی ثبت می‌شود.
مقاومت لغزشی	BS EN 1338 یا ASTM E303	در این روش از دستگاه آونگ انگلیسی (BP) که در آن از میزان زبری سطح نمونه و تماس یک قطعه لاستیکی هنگام سقوط و تماس با سطح نمونه، عدد لغزش از روی صفحه مدرج دستگاه قرائت می‌شود، استفاده می‌گردد.
مقاومت سایشی	BS EN 1338	سطح نمونه تحت سایش یک چرخ دوار قرار گرفته و میزان پهنای ساییده شده بر حسب میلی‌متر به‌عنوان شاخصی از مقاومت سایشی گزارش می‌شود.

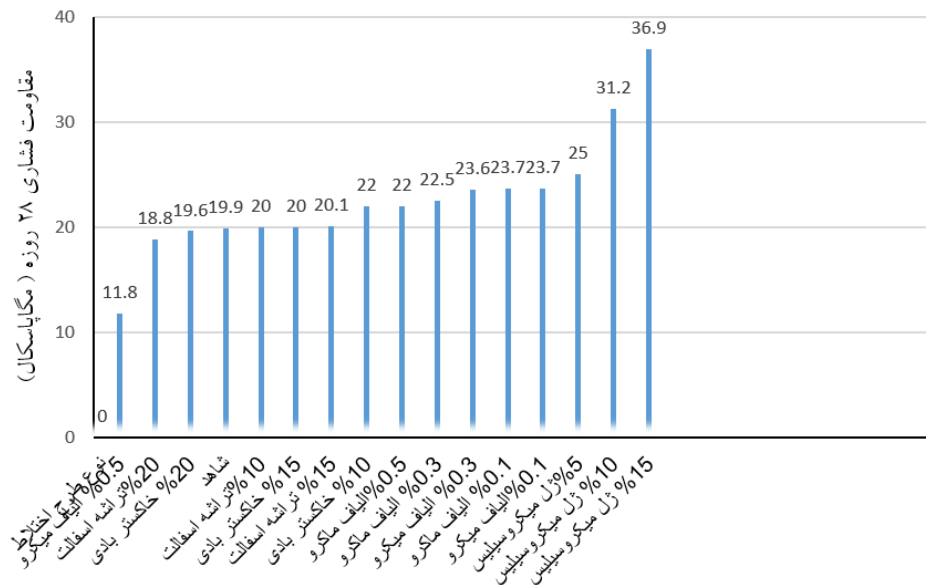
۵. بحث

پس از انجام آزمایش‌های اولیه روی مصالح و ساخت نمونه‌های مکعبی بتن و بلوک‌های کفپوش به ابعاد ۸×۱۱×۲۲ سانتی‌متر و عمل‌آوری به مدت ۲۸ روز در حوضچه آب در دمای ۲۲ درجه سلسیوس، آزمایش‌های اصلی مطابق آنچه در قسمت قبل گفته شد روی آنها صورت پذیرفت. در این بخش، ضمن ارائه نتایج، در خصوص میزان تأثیر هر یک از مواد افزودنی بر

پارامترهای مقاومتی، سعی می‌شود راجع به علل تفاوت نتایج ناشی از تنوع مواد افزودنی، مطالبی ارائه گردد.

۵-۱. آزمایش مقاومت فشاری

در شکل ۳ می‌توان مقاومت فشاری معادل استوانه‌ای استاندارد (۳۰×۱۵) نمونه‌های حاوی انواع مواد افزودنی را برحسب مگاپاسکال مشاهده نمود.



شکل ۳. مقاومت فشاری ۲۸ روزه معادل استوانه‌ای نمونه‌های بتن بر حسب مگاپاسکال

به‌طور کلی، مقاومت بلوک بتنی پیش از شکسته شدن یا ترک خوردن را مقاومت خمشی می‌نامند. می‌توان به‌طور غیرمستقیم مقاومت کششی تار تحتانی نمونه مکعب مستطیلی بتن را برای این منظور اندازه‌گیری نمود. مطابق استاندارد BS EN 1338، یکی از متغیرهای پذیرش بلوک‌های کفپوش بتنی، مقاومت خمشی است که در آن نمونه بلوک با تحت بار قائم اعمال شده در میانه طولش گسیخته می‌شود. در این تحقیق، نظیر آنچه در شکل ۴ نشان داده شده، از ابزار آزمایش استاندارد ASTM C293 برای به‌دست آوردن شاخصی از مقاومت خمشی بلوک با اندازه‌گیری مدول گسیختگی تحت تنش کششی تار تحتانی بلوک با اعمال بار در مرکز، استفاده شد. مطابق استاندارد ASTM C293 باید مدول گسیختگی بلوک-های کفپوش از رابطه (۱) به‌دست آید و مطابق BS EN 1338 باید حداقل ۳/۶ مگاپاسکال باشد.

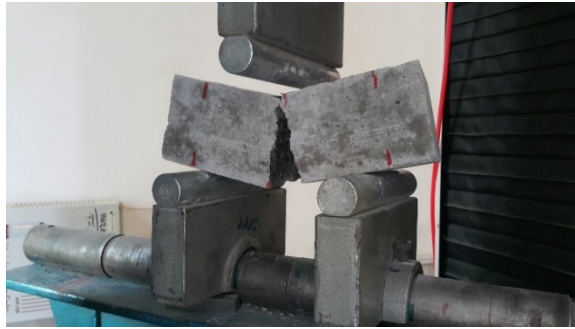
$$R = 3PL / (2bd^2) \quad (1)$$

که R ، مدول گسیختگی (مگاپاسکال)، P ، حداکثر نیروی گسیختگی (نیوتن)، L ، طول دهانه بارگذاری (میلی‌متر)، b ، عرض میانگین نمونه در زمان شکست و d ، ضخامت میانگین نمونه (هر دو به میلی‌متر) می‌باشند.

بررسی نتایج نشان می‌دهد که از بین انواع افزودنی‌ها در این پژوهش، ژل میکروسیلیس مقاومت نمونه‌های شاهد را به‌طور قابل ملاحظه‌ای، یعنی نزدیک به دو برابر، بهبود بخشیده است. به‌طور مثال، افزودن ۵ درصد ژل میکروسیلیس، ۲۵ درصد بر مقاومت فشاری نمونه شاهد می‌افزاید. بنابراین می‌توان گفت که تقریباً با نتایج تحقیقات دیگر پژوهشگران نظیر ونگ و همکاران (۲۰۲۲) همخوانی دارد. در مرتبه بعدی، به ترتیب انواع الیاف پلیمری و سپس خاکستر بادی در این بهبود نقش ایفا کرده‌اند. به‌کار بردن تراشه آسفالت هم به دلیل ماهیت انعطاف‌پذیری مصالح قیری نسبت به مصالح بتنی نقش مهمی در بهبود مقاومت فشاری ندارد و حتی در مقادیر زیاد تراشه آسفالت، در صورتی که اگر ۲۰٪ مصالح درشت‌دانه بتن با تراشه آسفالت جایگزین شود، مقاومت فشاری حدود ۵ درصد کاهش می‌یابد. این قضیه، نتایج آزمایش‌های مشابه توسط دیگر محققین در زمینه بتن‌های حاوی تراشه آسفالت را تا حدودی تأیید می‌نماید.

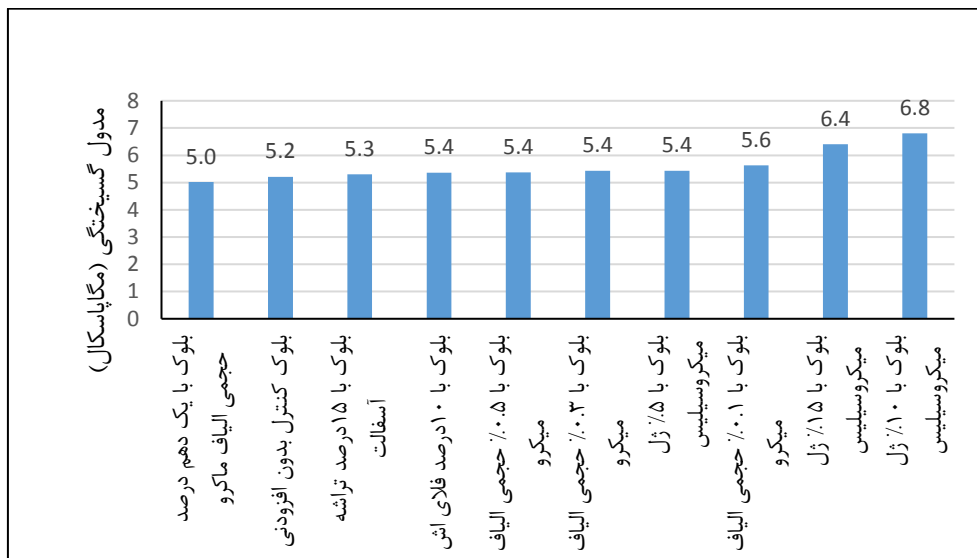
۲-۵. مقاومت خمشی

ارزیابی تأثیر ژل میکروسیلیس، الیاف پلیمری، خاکستر بادی و تراشه آسفالت بر عملکرد و دوام بلوک کفپوش بتنی



شکل ۴. نحوه اندازه‌گیری مدول گسیختگی بلوک کفپوش به روش خمش تک‌نقطه‌ای در مرکز مطابق ASTM C293

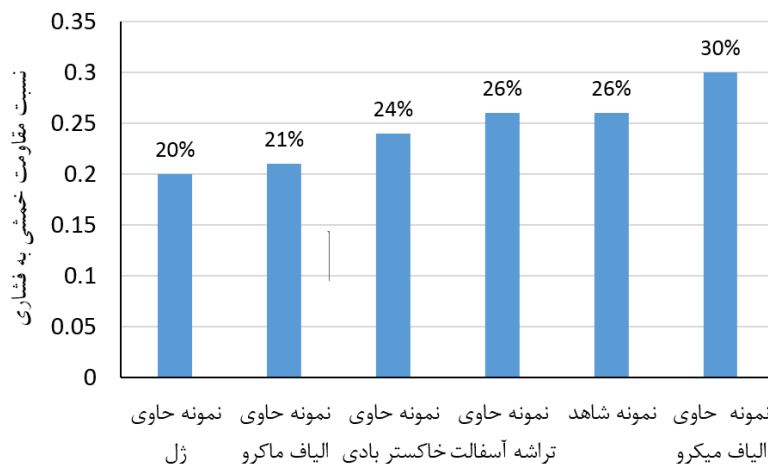
در شکل ۵، نتیجه حاصل از آزمایش مقاومت خمشی نشان داده شده است.



شکل ۵. مدول گسیختگی انواع بلوک‌های کفپوش مطابق ASTM C293

ملی ایران به شماره INSO 20185 مبنی بر اینکه حداقل مقاومت خمشی (مقاومت شکافتی) بلوک‌ها باید ۳/۶ (سه و شش دهم) مگاپاسکال باشد را برآورده کرده‌اند. اگرچه مقاومت خمشی بلوک‌های کفپوش به دلیل ابعاد کوچک آن‌ها به اندازه مقاومت خمشی بتن در روسازی دال بتنی اهمیت ندارد. اما یکی از مواردی که برای طراحی اولیه و همچنین فرایند کنترل کیفیت رویه‌های بتنی صلب می‌تواند بدون صرف هزینه انجام آزمایش مقاومت خمشی مفید باشد، تخمین مقاومت خمشی از نتایج آزمایش مقاومت فشاری است. در شکل ۶، این نسبت برای انواع طرح‌های اختلاط بر اساس نتایج آزمایش‌های صورت گرفته در این تحقیق ارائه شده است که می‌تواند بر حسب شرایط در پروژه‌های روسازی بتنی راه‌ها و فرودگاه‌ها استفاده شود.

آزمایش خمش نشان داد که بلوک الیافی شکست ترد ندارد و الیاف از این نظر بهتر از مواد دیگر عمل می‌کنند. این قضیه سبب می‌شود که بلوک بتنی در صورت شکستن باز هم می‌تواند به سرویس‌دهی خود ادامه دهد و خللی در راحتی رانندگی ایجاد نمی‌کند. اما بقیه بلوک‌ها به محض رسیدن به مقاومت نهایی دچار شکست ترد و ناگهانی شدند. اما از نظر مقدار مقاومت خمشی، بلوک‌های ژل میکروسیلیس همانطور که مقاومت فشاری بهتری داشتند از مقاومت خمشی بیشتری نسبت به بقیه برخوردار بودند. در مقام بعدی، بلوک‌های حاوی الیاف هستند و در مقام سوم بلوک‌های شاهد قرار داشتند. نتایج به‌دست آمده در این آزمایش نشان داد که همگی نمونه‌ها صرف نظر از نوع طرح اختلاط، الزامات بلوک کفپوش بتنی در استاندارد BS EN 1338 و یا بند ۵ استاندارد



شکل ۶. متوسط نسبت مقاومت خمشی به فشاری انواع طرح‌های اختلاط بلوک‌های کفپوش بر اساس نتایج به‌دست آمده در این پژوهش

نمونه‌های ساخته شده با توجه به شرایط آزمایشگاهی، تحت تأثیر ۵۰ چرخه ذوب و انجماد در بازه دمایی منهای ۱۸ درجه سلسیوس و مثبت ۴ درجه سلسیوس در دستگاهی مطابق ASTM C666 (شکل ۷) قرار گرفتند. مقاومت فشاری نمونه‌ها قبل و بعد از آزمایش اندازه‌گیری شده و نتیجه آن در شکل‌های ۸ و ۹ که نسبت مقاومت فشاری قبل و بعد از طی چرخه را نشان می‌دهند، قابل مشاهده است.

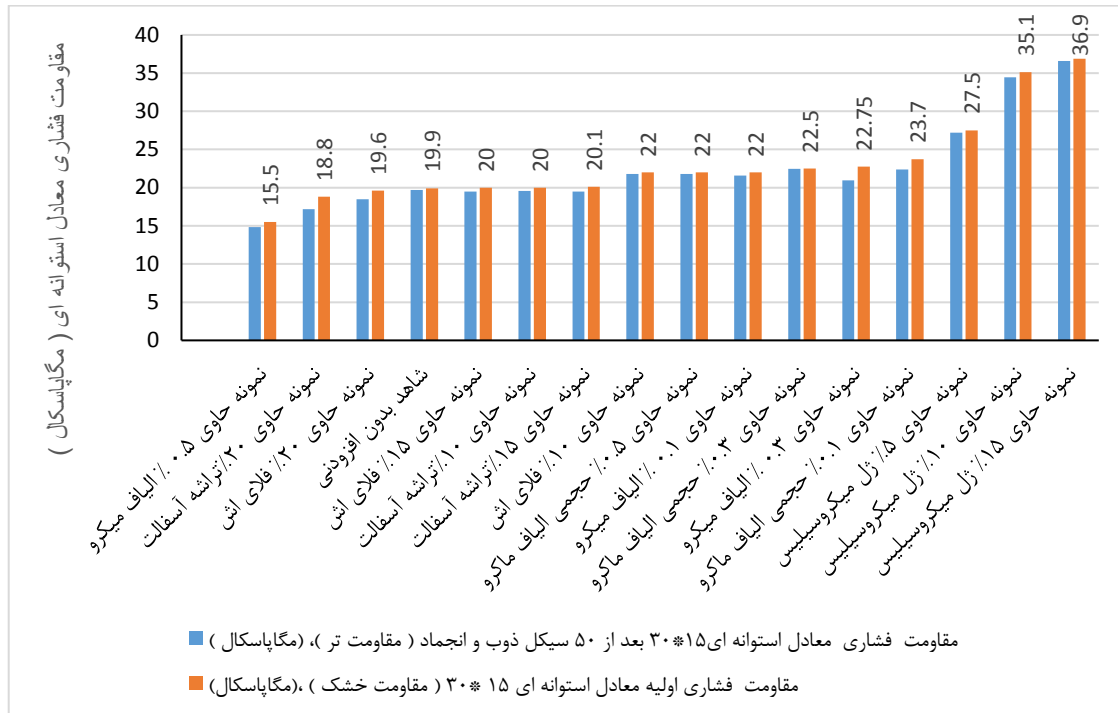
۳-۵. ارزیابی دوام در برابر ذوب و یخبندان

برای ارزیابی تأثیر انواع مواد بر دوام نمونه‌های بتنی در برابر تکرار چرخه‌های ذوب و انجماد از روش‌های متعددی می‌توان استفاده نمود. در تمام موارد، نمونه‌های بتنی به تعداد مشخص در بازه دمایی سرد و گرم قرار گرفته و مشخصات آنها پس از طی این چرخه‌ها، مانند افت وزنی، کیفیت و شدت تخریب و همچنین افت مقاومت فشاری ارزیابی می‌شود. در این تحقیق،

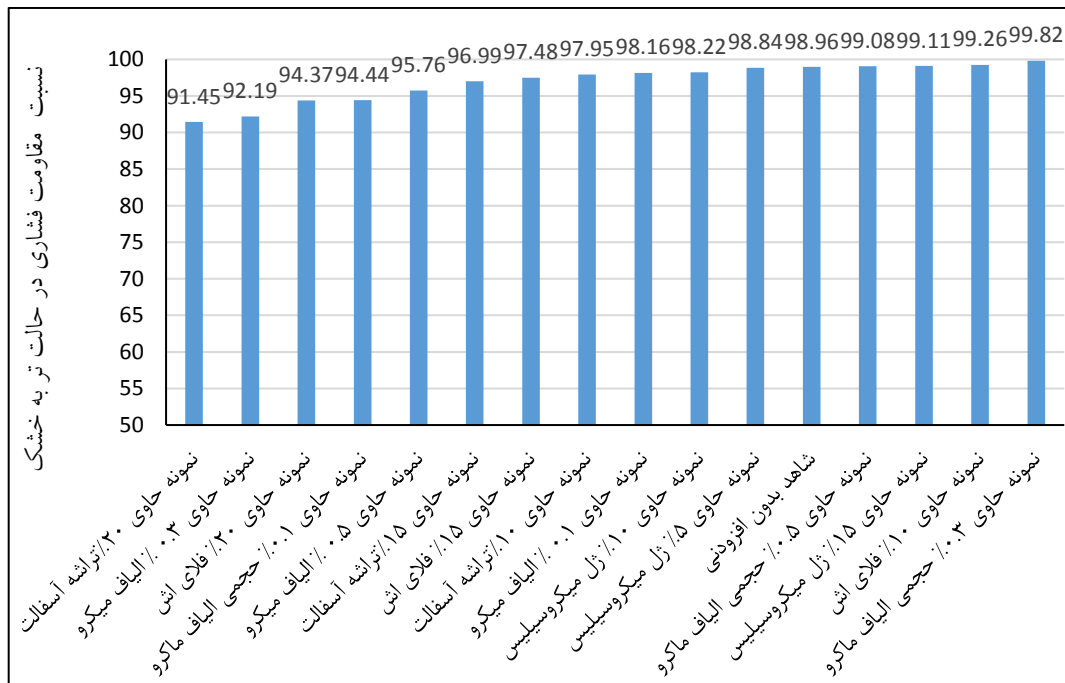


شکل ۷. مخزن دستگاه ذوب و انجماد و نحوه قرارگیری نمونه‌ها در داخل آن

ارزیابی تأثیر ژل میکروسیلیس، الیاف پلیمری، خاکستر بادی و تراشه آسفالت بر عملکرد و دوام بلوک کفپوش بتنی



شکل ۸. مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با انواع طرح‌های اختلاط پس از ۵۰ دوره ذوب و انجماد و مقاومت فشاری اولیه



شکل ۹. نسبت مقاومت فشاری نمونه‌های تر به خشک

از ذوب و انجماد به‌طور میانگین فقط ۳ درصد دچار افت شده است که به نظر می‌رسد اگر تعداد چرخه‌ها و طول مدت آزمایش دوام افزایش یابد و مثلاً به تعداد حدود ۳۰۰ سیکل برسد، این مقدار افت بیشتر خواهد شد.

ذکر چند نکته در خصوص شکل ۸ و به‌طور کلی نتایج ارزیابی دوام مخلوط‌ها در برابر ۵۰ چرخه ذوب و انجماد ضروری است. نخست آنکه مطابق شکل ۸، مقاومت فشاری نمونه‌ها با انواع طرح‌های اختلاط، پس

اینکه حاوی قیر اکسید و پیر شده هستند، نمی‌توانند مانع از نفوذ آب و یخ زدن آن در عمق بتن شده و لذا نباید از این ماده انتظار زیادی داشت. به‌طور کلی، مقایسه نسبت مقاومت‌های فشاری نمونه‌ها بعد از ۵۰ سیکل به مقاومت نمونه‌ها قبل از شروع آزمایش در شکل ۹ نشان می‌دهد که به‌کار بردن درصد‌های زیاد ژل میکروسیلیس، خاکستر بادی و الیاف پلیمری به‌هم تابیده شده ماکرو بیش از تراشه آسفالت و الیاف میکروپلیمری می‌توانند دوام بتن را تحت چرخه‌های ذوب و انجماد بهبود بخشند.

۴-۵. ارزیابی مقاومت لغزشی

اصطکاک سطح روسازی که با پارامتر مقاومت لغزشی بیان می‌شود در واقع تعیین‌کننده کیفیت تماس چرخ وسیله نقلیه با روسازی در هنگام حرکت و به ویژه در حین ترمزگیری و حرکت‌های گردشی است. بالا بودن کیفیت به این معنی است که وسیله نقلیه برای انجام حرکات خود قابل کنترل بوده و آسیبی به چرخ یا سطح روسازی وارد نمی‌شود. بنابراین، دو عامل اصلی در کیفیت عبارتند از سطح روسازی و چرخ وسیله. البته باید گفت در کنار این دو عامل اصلی، عوامل دیگری نیز مانند دمای محیط و سیستم کنترل وسیله نیز می‌توانند بررسی شوند. برای دستیابی به یک کمیت قابل اندازه‌گیری از کیفیت بافت ریز روسازی از دستگاه آونگ انگلیسی، نشان داده شده در شکل ۱۰، که عدد لغزش BPN خروجی آن است، مطابق استانداردهای ASTM E303 یا به‌طور مشابه، مطابق پیوست I در استاندارد BS EN 1338 استفاده می‌شود.

نکته دیگر آنکه به هر حال، میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف ژل میکروسیلیس (۳۳ مگاپاسکال) برای نمونه‌های تحت ذوب و انجماد قرار گرفته شده، حدود ۷۰ درصد نسبت به میانگین مقاومت فشاری دیگر انواع طرح اختلاط (۱۹ مگاپاسکال) رشد را نشان داده است که حاکی از تأثیر مثبت ژل میکروسیلیس نسبت به دیگر مواد می‌باشد. همانطور که گفته شد، در این بخش از پژوهش، نسبت مقاومت نمونه‌ها، پس از طی دوره‌های ذوب و انجماد به مقاومت اولیه آنها یعنی نسبت مقاومت تر به خشک نیز سنجیده شد که در شکل ۹ قابل مشاهده است.

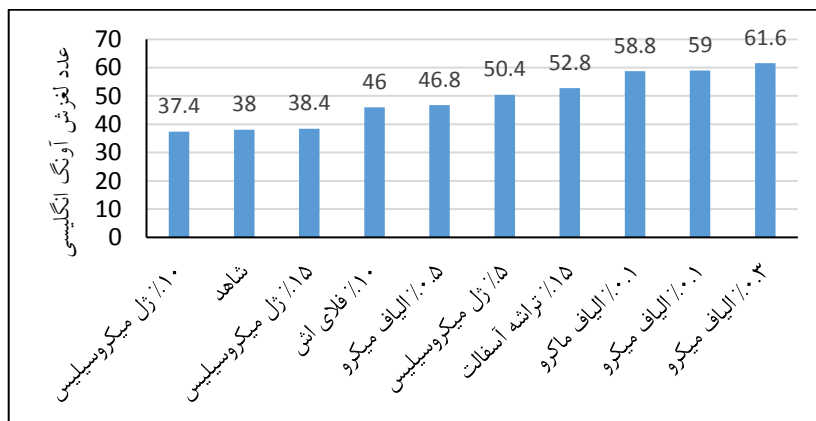
بررسی نتایج تست دوام در شکل ۹ نشان می‌دهد که به‌کار بردن ۰/۳ درصد حجمی الیاف به‌هم تابیده شده پلیمری با نام تجاری WT700، بهتر از مواد افزودنی دیگر می‌تواند مقاومت فشاری نمونه‌ها را قبل و بعد از چرخه‌های ذوب و انجماد (نسبت مقاومت نمونه‌های تر به خشک)، تقریباً ثابت و بدون تغییر نگهدارد. در مرتبه بعدی این قابلیت، ژل میکروسیلیس قرار دارد. در ضمن، با افزودن مقادیر مختلف تراشه آسفالت و الیاف میکروپلیمری، حفظ مناسب مقاومت فشاری بعد از ۵۰ چرخه ذوب و انجماد، وجود ندارد. نتایج این آزمایش نشان داد که میزان ۱۰٪ خاکستر بادی نسبت به وزن سیمان نسبت به مقادیر مختلف الیاف میکروپلیمری و تراشه آسفالت در دوام بتن تأثیر بهتری از خود نشان می‌دهد. نکته مهم دیگر در این خصوص آن است که بر خلاف نتایج یکی از تحقیقات گذشته، به‌کار بردن تراشه آسفالت حتی می‌تواند سبب کاهش دوام بتن نمونه‌های شاهد گردد. به نظر می‌رسد که دانه‌های آسفالت به دلیل



شکل ۱۰. دستگاه آزمایش آونگ انگلیسی مورد استفاده در این پژوهش

متر سقوط می‌کند و سطحی را در محدوده ۱۲۶ میلی-متری نمونه جاروب می‌نماید و سپس بعد از برخورد اوج می‌گیرد. جرم بازوی آونگ نیز حدود یک و نیم کیلوگرم است. در شکل ۱۱، نتیجه آزمایش آونگ انگلیسی روی نمونه‌های مختلف در حالت خشک نشان داده شده است.

از مزایای این آزمایش، راحتی استفاده از دستگاه و قابل حمل بودن آن است. البته این آزمایش برای سرعت-های کم و در حدود ۱۶ کیلومتر بر ساعت می‌تواند شاخصی از وضعیت بافت ریز سنگدانه‌ها به دست آورد. در این آزمایش، یک قطعه لاستیکی به صورت آونگی روی سطح نمونه تحت مسیر دایره‌ای به شعاع تقریبی نیم



شکل ۱۱. عدد لغزش (BP) نمونه‌های بتنی با آزمایش آونگ انگلیسی

متغیرهای دیگر برخوردار باشد، نسبت به دیگر طرح‌های اختلاط عملکرد بهتری دارد.

۵-۶. ارزیابی مقاومت سایشی

مقاومت سایشی عبارت است از تاب‌آوری رویه روسازی به نحوی که در اثر نیروهای ساینده، صاف‌کننده و برش-دهنده بخشی از بافت خود را از دست ندهد. عوامل مؤثر

با توجه به نتیجه به دست آمده، انواع الیاف پلیمری نسبت به مواد دیگر نظیر خاکستر بادی و ژل میکروسیلیس در بهبود مقاومت لغزشی نمونه‌ها تأثیر بیشتری داشته‌اند. لذا، بافت ریز روسازی بتنی بلوکی حاوی الیاف، در صورتی که الزامات کنترل وسیله نقلیه در انواع حرکات مانوری از اولویت بالاتری نسبت به

زیاد است. در این تحقیق، آزمایش ارزیابی مقاومت سایشی با استفاده از چرخ غلتان مطابق شکل ۱۲ و استاندارد BS EN 1338 انجام شد.

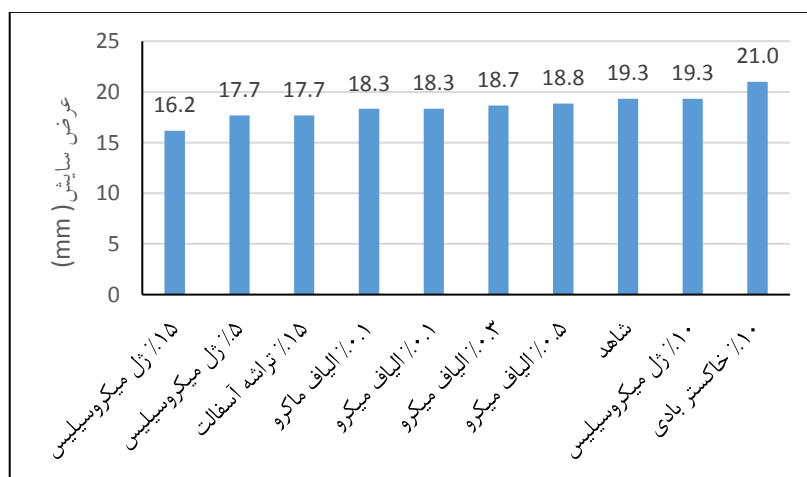
در مقاومت سایشی عبارتند از مقاومت فشاری بتن، نسبت آب به سیمان، شرایط پرداخت سطحی، نوع ماده سخت‌کننده و خصوصیات سنگدانه‌ها. زیرا احتمال اینکه سطح سنگدانه‌ها در اثر نیروهای سایشی شکسته شود



شکل ۱۲. دستگاه آزمایش مقاومت سایشی با چرخ غلتان مورد استفاده در این پژوهش

آن با فشار هوا تمیز می‌شود. سپس، توسط یک مداد و خط کش محدوده دو طرف بالا و پایین شیار ایجاد شده در اثر سایش چرخ گردنده کاملاً مشخص می‌گردد. حداکثر عرض شیار بر حسب میلی‌متر به‌عنوان نتیجه آزمایش ثبت می‌گردد. مطابق استاندارد BS EN 1338 حداکثر عرض ساییده شده بلوک باید ۲۳ میلی‌متر باشد تا بتوان از آن در سیستم روسازی بتنی بلوکی استفاده نمود. نتیجه نهایی آزمایش سایش روی انواع نمونه‌های بلوک در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

آزمایش مقاومت سایشی طبق این استاندارد از طریق ساییدن سطح رویی بلوک کفپوش بتنی توسط یک چرخ فولادی به همراه یک ماده ساینده، انجام می‌شود. قطر چرخ ۲۰ سانتی‌متر و عرض آن ۷ سانتی‌متر است. دستگاه دارای کیفی است که درون آن ماده ساینده ریخته می‌شود. ماده ساینده مورد نیاز برای این آزمایش Corundum (پودر آلومینا) با اندازه ذرات ۸۰ میکرون و دبی خروجی ۳ لیتر در دقیقه است. پس از اینکه چرخ فولادی به تعداد ۷۵ دور در دقیقه چرخید، نمونه بلوک خارج شده و سطح



شکل ۱۳. عرض سایش چرخ غلتان روی بلوک‌های کفپوش بر حسب میلی‌متر

بادی و تراشه آسفالت، قادر نبودند مقاومت خمشی نمونه‌های شاهد را بهبود بخشند.

- ارزیابی نتایج آزمایش دوام نمونه‌های بتنی نشان داد که وجود ۰/۳ درصد حجمی الیاف به هم تابیده شده پلیمری WT700، بیش از مواد افزودنی دیگر و در جایگاه بعدی ژل میکروسیلیس قادر هستند تا مقاومت فشاری نمونه‌ها را قبل و بعد از سیکل‌های ذوب و انجماد تقریباً ثابت و بدون تغییر حفظ کنند. در ضمن، استفاده از ۱۰٪ خاکستر بادی نسبت به وزن سیمان نسبت به مقادیر مختلف الیاف میکروپلیمری و تراشه آسفالت در دوام بتن تأثیر بهتری دارد. در خصوص تراشه آسفالت، نتایج این پژوهش نشان داد که این ماده در حالتی که بیش از ۱۵٪ درشت‌دانه‌ها با آن جایگزین شوند، از دوام بتن می‌کاهد. به نظر می‌رسد که دانه‌های آسفالت بازیافتی به دلیل اینکه حاوی قیر اکسید و پیر شده هستند، نمی‌توانند مانع از نفوذ آب و یخ زدن آن در عمق بتن شده و لذا نباید از این ماده انتظار زیادی داشت. به طور کلی، مقایسه نسبت مقاومت‌های فشاری نمونه‌ها بعد از ۵۰ سیکل به مقاومت نمونه‌ها قبل از شروع آزمایش نشان داد که به کار بردن درصد‌های بالای ژل میکروسیلیس، خاکستر بادی و الیاف پلیمری به هم تابیده شده ماکرو بیش از تراشه آسفالت و الیاف میکروپلیمری بر بهبود دوام بتن تأثیر افزایشی دارند.
- مطالعه نتایج آزمایش مقاومت سایشی و لغزشی نمونه‌های بلوک کفپوش نشان داد که اولاً در آزمایش مقاومت سایشی با چرخ غلتان، ژل میکروسیلیس می‌تواند در یکپارچه نگهداشتن سطح بلوک‌های نمونه بهتر از مواد دیگر عمل کند. در مرتبه بعدی، مشاهده شد که پهنای سایش در نمونه‌های الیافی و حاوی تراشه آسفالت نسبت به نمونه‌های دیگر کمتر است. با توجه به نتیجه به دست آمده از آزمایش آونگ انگلیسی، انواع الیاف پلیمری نسبت به مواد دیگر نظیر خاکستر بادی و ژل میکروسیلیس در بهبود مقاومت لغزشی نمونه‌ها تأثیر بیشتری داشتند.

بررسی مقادیر پهنای سائیده شده در انواع نمونه‌ها نشان می‌دهد که ژل میکروسیلیس به دلیل شکل فیزیکی خود، که مانند یک ماده چسبنده است، توانسته در یکپارچه نگهداشتن سطح بلوک‌ها نقش مؤثرتری ایفا نماید. به نظر می‌رسد که این خاصیت سبب شده است تا دانه‌های درشت‌تر در اثر چرخش چرخ سائیده فرصت جدا شدن از ساختار سطح را نداشته باشند. در مرتبه بعدی، مشاهده می‌شود که پهنای سایش در نمونه‌های الیافی و حاوی تراشه آسفالت نسبت به نمونه‌های شاهد و حاوی خاکستر بادی کمتر است. دانه‌های پوشیده شده با قیر توانسته‌اند با وجود ملات سیمانی مانع از سائیده شدن سطح شوند. البته با توجه به اینکه متغیرهای دیگری نیز در مقاومت نمونه‌ها در برابر سایش دخالت دارند، این نتیجه‌گیری یک فرضیه قلمداد می‌شود.

۶. نتیجه‌گیری

- از بین انواع افزودنی‌های مورد استفاده در این پژوهش، ژل میکروسیلیس بیشترین تأثیر را در بهبود مقاومت فشاری نمونه‌ها داشت. در ضمن، افزایش میزان الیاف در بتن نه تنها سبب افزایش مقاومت نگردد، بلکه تأثیر کاهنده‌ای بر مقاومت نمونه‌ها از خود نشان داد. به کار بردن تراشه آسفالت هم به دلیل ماهیت انعطاف‌پذیری مصالح قیری، نسبت به مصالح بتنی، نقشی مهمی در بهبود مقاومت فشاری ندارد.
- همانطور که انتظار می‌رفت، ژل میکروسیلیس در درصد‌های مختلف، مقاومت خمشی نمونه‌های شاهد را به طور قابل ملاحظه‌ای، یعنی نزدیک به ۲۰٪، افزایش داد. الیاف پلیمری اگر چه تأثیری بر بهبود مقاومت فشاری نمونه‌ها ندارند اما به سبب اینکه قابلیت بتن را در ممانعت از گسترش ترک‌های کششی بهبود می‌بخشند، مدول گسیختگی بهتری که در حدود ۵٪ نسبت به نمونه‌های شاهد بیشتر است، دارا هستند. در ضمن، دو ماده دیگر، یعنی خاکستر

۷. مراجع

- اسپرهیم، ع. و مرادی‌خو، ا. (۱۴۰۰). "فاکتورهای تأثیرگذار بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی". نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۵۳(۳): ۱۱۱۷-۱۱۳۶. doi: 10.22060/ceej.2019.16813.6356
- حیاتی، پ. و طاهری، و. (۱۴۰۱). "تحلیل رفتار روسازی بتنی بلوکی سطوح پروازی با استفاده از آزمایش PLT و CBR مصالح و سازه‌های بتنی". نشریه مصالح و سازه‌های بتنی، ۷(۲): ۸۱-۹۵. doi: 10.30478/jcsm.2022.350390.1284
- شفابخش، غ. و اسدی، س. (۱۳۹۷). "بررسی عملکرد فنی و اجرایی روسازی‌های بتنی الیافی در ایستگاه‌های BRT: مطالعه موردی شهر تهران". دومین کنگره بین‌المللی علوم و مهندسی.
- Awoyera, P. O., Olalusi, O. B., Ibia, S. and Prakash A, K. 2021. "Water absorption, strength and microscale properties of interlocking concrete blocks made with plastic fibre and ceramic aggregates". *Case Stud. Constr. Mater.*, 15: e00677. doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00677
- Chaikaew, C., Sukontasukkul, P., Chaisakulkiet, U., Sata, V. and Chindapasirt, P. 2019. "Properties of concrete pedestrian blocks containing crumb rubber from recycle waste tyres reinforced with steel fibres". *Case Stud. Constr. Mater.*, 11: e00304. doi: 10.1016/j.cscm.2019.e00304
- Chen, L., Chen, Z., Xie, Z., Wei, L., Hua, J., Huang, L. and Yap, P. S. 2023. "Recent developments on natural fiber concrete: A review of properties, sustainability, applications, barriers, and opportunities". *Dev. Built Environ.*, 16: 100255. doi: 10.1016/j.dibe.2023.100255
- Di Mascio, P., Moretti, L. and Capannolo, A. 2019. "Concrete block pavements in urban and local roads: Analysis of stress-strain condition and proposal for a catalogue". *J. Traffic Transpo. Eng.*, 6(6): 557-566. doi: 10.1016/j.jtte.2018.06.003
- Farzin, S., Shafabakhsh, G. A., Teymouri, E., Heydari, M. R. A. and Motamedi, M. J. E. J. 2017. "Experimental investigation of the effect of micro-silica and zeolite on repair mortar of concrete pavements". *Eng. J.*, 21(2): 213-225.
- Hawileh, R. A., Al Rashed, A., Mhanna, H. H. and Abdalla, J. A. 2023. "Properties of concrete with partial replacement of cement with different percentages of micro silica and nano silica". *Mater. Today: Proc.* doi: 10.1016/j.matpr.2023.04.077
- Hossiney, N., Sepuri, H. K., Mohan, M. K., Arjun, H. R., Govindaraju, S. and Chyne, J. 2020. "Alkali-activated concrete paver blocks made with recycled asphalt pavement (RAP) aggregates". *Case Stud. Constr. Mater.*, 12: e00322. doi: 10.1016/j.cscm.2019.e00322
- Jamshidi, A., Kurumisawa, K., White, G., Nishizawa, T., Igarashi, T., Nawa, T. and Mao, J. 2019. "State-of-the-art of interlocking concrete block pavement technology in Japan as a post-modern pavement". *Constr. Build. Mater.*, 200: 713-755. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.286
- Karthikeyan, K., Kothandaraman, S. and Sarang, G. 2023. "Perspectives on the utilization of reclaimed asphalt pavement in concrete pavement construction: A critical review". *Case Stud. Constr. Mater.*, 19: e02242. doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02242
- Kim, W., Jeon, J. C., An, B. H., Lee, J. H., Kim, H. D. and Park, C. G. 2018. "Effects of reinforcing fiber and microsilica on the mechanical and chloride ion penetration properties of latex-modified fiber-reinforced rapid-set cement concrete for pavement repair". *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2018: 6839350. doi: 10.1155/2018/6839350
- Masi, G., Michelacci, A., Manzi, S. and Bignozzi, M. C. 2022. "Assessment of reclaimed asphalt pavement (RAP) as recycled aggregate for concrete". *Constr. Build. Mater.*, 341: 127745. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127745
- Murali, G. and Ramprasad, K. 2018. "A feasibility of enhancing the impact strength of novel layered two stage fibrous concrete slabs". *Eng. Struct.*, 175: 41-49. doi: 10.1016/j.engstruct.2018.08.034
- Nandi, S. and Ransinchung, G. D. R. N. 2021. "Performance evaluation and sustainability assessment of precast concrete paver blocks containing coarse and fine RAP fractions: A comprehensive comparative study". *Constr. Build. Mater.*, 300: 124042. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124042

- Nayak, D. K., Abhilash, P. P., Singh, R., Kumar, R. and Kumar, V. 2022. "Fly ash for sustainable construction: A review of fly ash concrete and its beneficial use case studies". *Clean. Mater.*, 6: 100143. doi: 10.1016/j.clema.2022.100143
- Patil, R. R. and Katare, V. D. 2023. "Application of fiber reinforced cement composites in rigid pavements: A review". *Mater. Today: Proc.* doi: 10.1016/j.matpr.2023.04.415
- Raza, S. S., Amir, M. T., Azab, M., Ali, B., Abdallah, M., El Ouni, M. H. and Elhag, A. B. 2022. "Effect of micro-silica on the physical, tensile, and load-deflection characteristics of micro fiber-reinforced high-performance concrete (HPC)". *Case Stud. Constr. Mater.*, 17: e01380. doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01380
- Rezaei, M. R., Abdi Kordani, A. and Zarei, M. 2022. "Experimental investigation of the effect of micro silica on roller compacted concrete pavement made of recycled asphalt pavement materials". *Int. J. Pavement Eng.*, 23(5): 1353-1367. doi: 10.1080/10298436.2020.1802024
- Saboo, N., Nirmal Prasad, A., Sukhija, M., Chaudhary, M. and Chandrappa, A. K. 2020. "Effect of the use of recycled asphalt pavement (RAP) aggregates on the performance of pervious paver blocks (PPB)". *Constr. Build. Mater.*, 262: 120581. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120581
- Shu, X., Zhao, Y., Liu, Z. and Zhao, C. 2022. "A study on the mix proportion of fiber-polymer composite reinforced cement-based grouting material". *Constr. Build. Mater.*, 328: 127025. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127025
- Singh, R. P., Vanapalli, K. R., Cheela, V. R. S., Peddireddy, S. R., Sharma, H. B. and Mohanty, B. 2023. "Fly ash, GGBS, and silica fume based geopolymer concrete with recycled aggregates: Properties and environmental impacts". *Constr. Build. Mater.*, 378: 131168. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131168
- Taheri, V., Fakhri, M. and Hayati, P. 2021. "Evaluation of airfield concrete block pavements based on 3-D modelling and plate loading test". *Constr. Build. Mater.*, 280: 122441. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122441>
- Titiksh, A. and Wanjari, S. P. 2021. "Sustainable pavement quality concrete containing ultra-high volume fly ash in the presence of a novel superplasticizer". *Case Stud. Constr. Mater.*, 15: e00603. doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00603
- Wang, C., Zhang, M., Wang, Q., Dai, J., Luo, T., Pei, W., . . . and Zhang, Z. 2022. "Research on the influencing mechanism of nano-silica on concrete performances based on multi-scale experiments and micro-scale numerical simulation". *Constr. Build. Mater.*, 318: 125873. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125873