



Semnan University

Journal of Transportation Infrastructure Engineering

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

ISSN: 2821-0549



Research Article

Laboratory Evaluation and Optimization of Mechanical Performance and Durability of Concrete Pavement Containing Recycled Aggregate Using Fly Ash and Macrosynthetic Fibers

Hamed Mohammadi Sofla Pirkouhi^a, Hamed Enayati^b, Rezvan Babagoli^{c,*}

^a MSc. Graduated Student, Department of Civil Engineering, University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, I. R. Iran.

^b Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, I. R. Iran.

^c Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, I. R. Iran.

PAPER INFO

ABSTRACT

Paper history:

Received: 2026-04-13

Revised: 2026-05-05

Accepted: 2026-05-22

Keywords:

Pavement concrete,
Recycled concrete
aggregate,
Macro-synthetic fiber,
Fly ash,
Concrete durability.

The increasing use of concrete pavements has raised significant environmental, economic, and technical challenges. The high consumption of Portland cement and natural aggregates leads to the destruction of natural resources, greenhouse gas emissions and waste management problems caused by construction wastes. The use of recycled concrete aggregates (RCA) as a partial replacement for natural aggregates is considered a sustainable solution, but due to high water absorption (5%-10% higher than natural aggregate), higher porosity and weak interfacial transition zone (ITZ), it reduces the compressive strength of concrete by 10%-20% and weakens its durability against environmental factors. The present study investigated the effect of simultaneous use of recycled concrete aggregates (with 25 and 50 percent replacement levels), Class F fly ash as a cement supplement (with 25 and 50 percent levels), and polypropylene macrosynthetic fibers (with 0.4 and 0.6 percent volume percentages) on the mechanical properties and durability of pavement concrete. Ten mix designs including a control sample were designed and manufactured. Fresh concrete slump tests, compressive strength at 7 and 28 days, tensile strength, elastic modulus, and water absorption were performed on cubic and cylindrical samples. Results showed that RCA replacement alone reduced compressive strength and increased water absorption, but simultaneous addition of fly ash and macrosynthetic fibers significantly compensated for this performance loss. The optimal design combination (T8) (25% RCA + 25% fly ash + 0.4% macrosynthetic fibers) provided the best results; So that the 28-day compressive strength reached 31.48 MPa (8.5% higher than the control sample), tensile strength reached 2.81 MPa, and water absorption reached 1.41%. This combination, by creating a synergistic effect in improving the microstructure of the cement paste, strengthening the interfacial transition zone, and reducing porosity, provides a sustainable, economical, and resistant pavement concrete suitable for Iran's climatic conditions and traffic loading.

* Corresponding author.

E-mail address: Rezvan.Babagoli1987@gmail.com

How to cite this article: Mohammadi Sofla Pirkouhi, H., Enayati, H., & Babagoli, R (2026). Laboratory evaluation and optimization of mechanical performance and durability of concrete pavement containing recycled aggregate using fly ash and macrosynthetic fibers. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 12(1), pp.21-44.

DOI: [10.22075/jtie.2026.40890.1757](https://doi.org/10.22075/jtie.2026.40890.1757)

© 2025 The Author(s). Journal of Transportation Infrastructure Engineering published by Semnan University Press.

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



مقاله پژوهشی

ارزیابی آزمایشگاهی و بهینه‌سازی عملکرد مکانیکی و دوام روسازی بتنی حاوی سنگدانه بازیافتی با استفاده از خاکستر بادی و الیاف ماکروستتیک

حامد محمدی سفلی پیرکوهی^۱، حامد عنایتی^۲، رضوان باباگلی^{۳*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران.

^۲ استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران.

^۳ استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

افزایش روزافزون مصرف بتن در روسازی‌های بتنی با چالش‌های جدی زیست‌محیطی، اقتصادی و فنی همراه است. مصرف بالای سیمان پرتلند و سنگدانه‌های طبیعی موجب تخریب منابع طبیعی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و مشکلات مدیریت پسماند ناشی از نخاله‌های ساختمانی می‌گردد. استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی بتن (RCA) به عنوان جایگزین بخشی از سنگدانه‌های طبیعی، راهکاری پایدار محسوب می‌شود، اما به دلیل جذب آب بالا (۵ تا ۱۰ درصد بیشتر از سنگدانه طبیعی)، تخلخل بیشتر و ضعف ناحیه انتقال بین‌مرزی (ITZ) مقاومت فشاری بتن را ۱۰ تا ۲۰ درصد کاهش می‌دهد و دوام آن را در برابر عوامل محیطی تضعیف می‌کند. پژوهش حاضر، به بررسی اثر هم‌زمان استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی بتن (با سطوح جایگزینی ۲۵ و ۵۰ درصد)، خاکستر بادی کلاس F به عنوان مکمل سیمان (با سطوح ۲۵ و ۵۰ درصد) و الیاف ماکروستتیک (با درصدهای حجمی ۰/۴ و ۰/۶ درصد) بر خواص مکانیکی و دوام بتن روسازی پرداخته است. ده طرح اختلاط شامل نمونه شاهد طراحی و ساخته شد. آزمایش‌های اسلامپ بتن تازه، مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روز، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته و جذب آب روی نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای انجام گرفت. نتایج نشان داد که جایگزینی RCA به تنهایی باعث کاهش مقاومت فشاری و افزایش جذب آب می‌شود، اما افزودن هم‌زمان خاکستر بادی و الیاف ماکروستتیک این افت عملکرد را به طور قابل توجهی جبران می‌کند. ترکیب بهینه طرح (T8) ۲۵ درصد RCA + ۲۵ درصد خاکستر بادی + ۰/۴ درصد الیاف ماکروستتیک بهترین نتایج را ارائه داد؛ به طوری که مقاومت فشاری ۲۸ روزه به ۳۱/۴۸ مگاپاسکال (۸/۵ درصد بیشتر از نمونه شاهد) و مقاومت کششی به ۲/۸۱ مگاپاسکال رسید. نتایج نشان داد که استفاده از خاکستر بادی تأثیر دوگانه‌ای بر خواص بتن دارد. در حالی که برخی ویژگی‌ها بهبود یافتند، در بخش دوام، افزایش جذب آب در برخی طرح‌ها مشاهده شد، به طوری که مقدار جذب آب در طرح T8 (حدود ۱/۴۱٪) نسبت به نمونه شاهد (۱/۱۹٪) افزایش نشان داد. این موضوع بیانگر آن است که استفاده از مقادیر بیشتر خاکستر بادی ممکن است منجر به افزایش تخلخل و کاهش نسبی دوام، به‌ویژه در شرایط محیطی مخرب، گردد. این ترکیب با ایجاد اثر هم‌افزایی در بهبود ریزساختار خمیر سیمان، تقویت ناحیه انتقال بین‌مرزی و کاهش تخلخل، بتن روسازی پایدار، اقتصادی و مقاوم مناسبی برای شرایط اقلیمی و بارگذاری ترافیکی ایران فراهم می‌آورد.

دریافت مقاله: ۱۴۰۵/۰۱/۲۴
بازنگری مقاله: ۱۴۰۵/۰۲/۰۹
پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۲/۱۵

واژه‌های کلیدی:

بتن روسازی،
سنگدانه بازیافتی بتن،
الیاف ماکروستتیک،
خاکستر بادی،
دوام بتن.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: Rezvan.Babagoli1987@gmail.com

استناد به این مقاله: محمدی سفلی پیرکوهی، حامد، عنایتی، حامد، و باباگلی، رضوان. (۱۴۰۵). ارزیابی آزمایشگاهی و بهینه‌سازی عملکرد مکانیکی و دوام روسازی بتنی حاوی سنگدانه بازیافتی با استفاده از خاکستر بادی و الیاف ماکروستتیک مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۱۲(۱)، ۴۴-۲۱.

DOI: [10.22075/jtie.2026.40890.1757](https://doi.org/10.22075/jtie.2026.40890.1757)

۱. مقدمه

توسعه زیرساخت‌های حمل‌ونقل نقش اساسی در رشد اقتصادی و اجتماعی کشورها ایفا می‌کند و روسازی راه‌ها به‌عنوان لایه نهایی باربر، باید در برابر بارهای ترافیکی سنگین، تنش‌های حرارتی و عوامل محیطی از دوام و مقاومت کافی برخوردار باشد. در این میان، بتن روسازی به دلیل مقاومت فشاری مناسب، دوام بالا و هزینه نگهداری کمتر، یکی از گزینه‌های اصلی در پروژه‌های راهسازی محسوب می‌شود.

با این حال، تولید بتن متکی بر مصرف گسترده سیمان پرتلند و سنگدانه‌های طبیعی است که پیامدهای زیست‌محیطی قابل توجهی از جمله انتشار گاز دی‌اکسید کربن و تخریب منابع طبیعی به همراه دارد. از سوی دیگر، تخریب سازه‌های بتنی موجب تولید حجم بالایی از نخاله‌های ساختمانی می‌شود که مدیریت آن‌ها به یک چالش جدی تبدیل گردیده است. استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی حاصل از بتن تخریب‌شده می‌تواند راهکاری مؤثر در راستای توسعه پایدار باشد (سیلوا و همکاران، ۲۰۱۴؛ شیائو و همکاران، ۲۰۱۵). با وجود مزایای زیست‌محیطی، بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی معمولاً با کاهش مقاومت فشاری، افزایش جذب آب و افت مدول الاستیسیته همراه است. این موضوع عمدتاً به دلیل وجود ملات قدیمی چسبیده به سنگدانه و ضعف ناحیه انتقال جدید در ریزساختار بتن رخ می‌دهد (پون و همکاران، ۲۰۰۴؛ تام و تام، ۲۰۰۷؛ یو و همکاران، ۲۰۱۶). مطالعات نشان داده‌اند که افت مقاومت فشاری در این بتن‌ها می‌تواند بین ۱۰ تا ۲۰ درصد باشد (سیلوا و همکاران، ۲۰۱۴). برای جبران این ضعف‌ها، استفاده از الیاف ماکروستنتیک به‌عنوان عامل تقویت‌کننده پیشنهاد شده است. این الیاف با ایجاد مکانیزم پل‌زنی ترک‌ها، موجب افزایش مقاومت کششی و خمشی، بهبود شکل‌پذیری و کنترل ترک‌خوردگی می‌شوند (امین و همکاران، ۲۰۱۷؛ دوپکو و همکاران، ۲۰۱۸؛ وو و

همکاران، ۲۰۱۹). همچنین، در روسازی‌های بتنی، استفاده از الیاف می‌تواند ظرفیت باربری و عملکرد خستگی را بهبود دهد (عیسی و همکاران، ۲۰۲۱). علاوه بر این، بهره‌گیری از مواد پوزولانی نظیر خاکستر بادی کلاس F به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان، منجر به بهبود ریزساختار خمیر سیمان، کاهش نفوذپذیری و افزایش مقاومت بلندمدت بتن می‌شود (مارتانگ و آگراوال، ۲۰۱۲). هرچند استفاده از خاکستر بادی ممکن است مقاومت سنین اولیه را کاهش دهد، اما در سنین بالاتر باعث افزایش دوام و کاهش انتشار دی‌اکسید کربن ناشی از تولید سیمان می‌گردد (تات و همکاران، ۲۰۱۷). با توجه به اهمیت روسازی، بررسی هم‌زمان اثر سنگدانه‌های بازیافتی، الیاف ماکروستنتیک و خاکستر بادی می‌تواند راهکاری برای تولید بتن روسازی پایدار، اقتصادی و با عملکرد مکانیکی مطلوب ارائه دهد. پژوهش حاضر با تمرکز بر این ترکیب سه‌گانه، به دنبال تعیین طرح اختلاط بهینه برای دستیابی به مقاومت، دوام و کارایی مناسب در روسازی‌های بتنی است.

در مطالعه‌ای که توسط دانشفر و همکاران (۲۰۱۷) انجام گرفت، ارزیابی خواص مکانیکی بتن تقویت‌شده با انواع و مقادیر مختلف الیاف ماکروستنتیک بود. فرضیه آن‌ها این بود که الیاف ماکروستنتیک با انواع مختلف (مانند پیچ‌خورده، بارچپ و فیبریل) سختی، مقاومت کششی و خمشی بتن را افزایش می‌دهد؛ اما ممکن است بر مقاومت فشاری تأثیر منفی داشته باشد. روند تحقیق شامل تهیه نمونه‌های بتن با الیاف پلی‌پروپیلن در مقادیر ۰/۲ تا ۰/۶ درصد حجمی، انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی، خمشی و مدول الاستیسیته بود. نتایج نشان داد که الیاف پیچ‌خورده و بارچپ عملکرد خمشی مشابهی دارند، مقاومت کششی و خمشی را ۱۹/۶ تا ۸۱/۶۹ درصد افزایش می‌دهند، اما مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته را ۴/۵۷ تا ۳۶/۳۲ درصد و ۱۲/۴۸ تا ۳۷/۰۸ درصد کاهش می‌دهند.

اولتراسونیک، کربناته شدن، سایش، کاپیلاریت و یخزدگی بود. نتایج نشان داد که بتن تقویت شده با فولاد مقاومت فشاری را $12/4$ درصد افزایش می دهد، بتن با پلی استر $3/4$ درصد افزایش و بتن با پلی پروپیلن $4/3$ درصد کاهش می دهد، در حالی که دوام همه آنها بهبود یافته است.

تحقیق صفری و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی اثر خاکستر پوسته برنج (RHA^1) و الیاف ماکروسنتتیک بر خواص بتن خودمتراکم اختصاص داشت. فرضیه آنها این بود که خاکستر پوسته برنج و الیاف می تواند کارایی، مقاومت فشاری و خمشی بتن خودمتراکم را بهبود دهد. روند تحقیق شامل استفاده از روش سطح پاسخ برای بررسی اثرات خاکستر پوسته برنج (صفر تا ۸ درصد) و الیاف (صفر تا $0/3$ درصد) و انجام آزمایش های کارایی، مقاومت فشاری و خمشی بود. نتایج نشان داد که خاکستر پوسته برنج جریان پذیری را افزایش می دهد و الیاف انقباض را کاهش می دهد.

کازمی و همکاران (۲۰۱۸) به ارزیابی رفتار شکست و خواص مکانیکی بتن با مصالح بازیافتی تقویت شده با الیاف ماکروسنتتیک پرداختند. فرضیه آنها این بود که الیاف سختی پس از ترک و انرژی شکست بتن بازیافتی را افزایش می دهد. روند پژوهش شامل تهیه تیرهای بتنی با صفر تا ۱۰۰ درصد سنگدانه های بازیافتی و صفر تا ۱ درصد الیاف و انجام آزمایش های خمشی سه نقطه ای بود. نتایج نشان داد که انرژی شکست با ۱ درصد الیاف تا ۳۸۰ درصد افزایش یافت و سختی پس از ترک بهبود یافت، با تأکید بر تأثیر تعداد الیاف بر رفتار مکانیکی.

تحقیق امین و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی خواص بتن تقویت شده با الیاف ماکروسنتتیک اختصاص داشت. فرضیه آنها این بود که الیاف می تواند سختی، مقاومت و رفتار شکست بتن را بهبود بخشد. روند تحقیق شامل تهیه نمونه های بتن با الیاف و انجام آزمایش های فشاری،

تحقیق عیسی و همکاران (۲۰۲۱) در ارتباط با ارزیابی تأثیر الیاف ماکروسنتتیک بر عملکرد انقباض خشک شونده (کاهش حجم بتن در اثر از دست دادن تدریجی رطوبت) بتن روسازی بود. فرضیه آنها این بود که الیاف ماکروسنتتیک، انقباض خشک شونده را محدود می کند و خواص مکانیکی بتن را بهبود می بخشد. روند تحقیق شامل تهیه نمونه های بتن با الیاف ماکروسنتتیک، انجام آزمایش های مقاومت فشاری، کششی، خمشی، انقباض خشک شونده و مدول الاستیسیته بود. نتایج نشان داد که تأثیر الیاف بر مقاومت فشاری کم می باشد، اما مقاومت کششی و خمشی را به ترتیب ۲۰ و ۳۴ درصد افزایش می دهد و انقباض خشک شونده را تا ۶۰ درصد کاهش می دهد.

تحقیق دوپکو و همکاران (۲۰۱۸) با هدف ارزیابی عملکرد خمشی بتن با الیاف ماکروسنتتیک انجام شد. فرضیه آنها این بود که الیاف ماکروسنتتیک (پلی پروپیلن، پلی وینیل و شیشه مقاوم به قلیا) سختی پس از ترک و انرژی شکست بتن را افزایش می دهد. روند تحقیق شامل تهیه تیرهای بتن با الیاف در مقادیر $0/5$ تا $1/5$ درصد حجمی، انجام آزمایش های خمشی سه نقطه ای و ارزیابی خواص تازه بتن بود. نتایج نشان داد که الیاف شیشه بیشترین سختی پس از ترک را فراهم می کند، در حالی که پلی پروپیلن و پلی وینیل کارایی را بهبود می بخشد، اما الیاف شیشه سختی را تا ۲ درصد افزایش می دهد.

پژوهش بولات و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی اثر تقویت بتن با الیاف ماکروسنتتیک بر خواص فیزیکی و مکانیکی اختصاص داشت. فرضیه آنها این بود که الیاف فولاد، پلی استر و پلی پروپیلن می تواند سختی سطح، سرعت پالس اولتراسونیک، مقاومت در برابر کربناته شدن، سایش، کاپیلاریت و مقاومت به یخزدگی بتن را افزایش دهد. روند تحقیق شامل تهیه بتن با $4/25$ درصد حجمی الیاف و انجام آزمایش های فشاری، سختی سطح،

- کشتی و مدول الاستیسیته بود. نتایج نشان داد که الیاف مدول الاستیسیته بتن را ۵ تا ۱۰ درصد افزایش می‌دهد و کنترل ترک‌ها را بهبود می‌بخشد.
- پاراناو و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی مواد جایگزین برای لایه سایش روسازی بتنی پرداختند. فرضیه آن‌ها این بود که جایگزینی سیمان و مصالح طبیعی با مواد بازیافتی مانند خاکستر زغال، سیلیس فوم، نانوسیلیس، سرباره و مصالح بتن بازیافتی می‌تواند خواص مکانیکی و دوام بتن را بهبود دهد. روند تحقیق شامل مرور ادبیات در زمینه جایگزینی مواد بود. نتایج نشان داد که جایگزینی تا ۵۰ درصد مواد بازیافتی مقاومت فشاری، خمشی و مقاومت به سایش را افزایش می‌دهد و انقباض خشک‌شونده را کاهش می‌دهد.
- پژوهش الحرثای و همکاران (۲۰۲۴) به بهبود خواص مهندسی بتن با مصالح بازیافتی با استفاده از خاکستر بادی، سیلیس فوم و الیاف پلی‌پروپیلن اختصاص داشت. فرضیه آن‌ها این بود که ترکیب سنگدانه‌های بازیافتی، خاکستر بادی و الیاف پلی‌پروپیلن مقاومت و دوام بتن را افزایش می‌دهد. روند پژوهش شامل تهیه بتن با ۵۰ تا ۱۰۰ درصد سنگدانه‌های بازیافتی و ۱ تا ۳ درصد الیاف و انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی، جذب آب و مقاومت اسیدی بود. نتایج نشان داد که ترکیب با ۳ درصد الیاف، مقاومت فشاری را تا ۵ درصد افزایش می‌دهد و مقاومت در برابر اسید بهبود می‌یابد.
- گونک و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی خواص مکانیکی بتن با مصالح آجر بازیافتی تقویت‌شده با الیاف پلی‌پروپیلن پرداختند. فرضیه آن‌ها این بود که الیاف می‌تواند خواص بتن بازیافتی را بهبود دهد. روند تحقیق شامل تهیه بتن با ۳۰ تا ۱۰۰ درصد سنگدانه‌های بازیافتی آجر و ۰/۸ تا ۰/۲ درصد الیاف و انجام آزمایش‌های مکانیکی و تحلیل همبستگی خاکستری بود. نتایج نشان داد که الیاف سختی بتن را افزایش می‌دهد و تحلیل همبستگی عوامل مختلف بر خواص مکانیکی را تأیید کرد.
- عیسی و همکاران (۲۰۲۱) ظرفیت باربری اسلب‌های روسازی بتنی با الیاف ماکروسنتتیک را بررسی کردند. فرضیه آن‌ها این بود که الیاف ظرفیت باربری اسلب‌ها را افزایش می‌دهد. روند تحقیق شامل تهیه اسلب‌های بتن با الیاف و انجام آزمایش‌های باربری در موقعیت‌های مختلف بود. نتایج نشان داد که ظرفیت باربری اسلب‌ها بین ۲۳ تا ۲۴ درصد افزایش می‌یابد.
- لیو و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی بازیافت بتن تقویت‌شده با الیاف و ارزیابی خواص بتن جدید با مصالح و الیاف بازیافتی پرداختند. فرضیه آن‌ها این بود که استفاده از مصالح و الیاف بازیافتی می‌تواند خواص بتن جدید را بهبود دهد. روند تحقیق شامل بازیافت بتن، تهیه بتن جدید و انجام آزمایش‌های مکانیکی بود. نتایج نشان داد که بتن جدید با مصالح و الیاف بازیافتی کارایی و خواص مکانیکی مناسبی دارد.
- تحقیق ماکول و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی استفاده از مصالح بازیافتی در تولید بتن سبز اختصاص داشت. فرضیه آن‌ها این بود که سنگدانه‌های بازیافتی می‌تواند خواص بتن را بهبود دهد و پایداری آن را افزایش دهد. روند تحقیق شامل مرور ادبیات در زمینه سنگدانه‌های بازیافتی بود. نتایج نشان داد که سنگدانه‌های بازیافتی تا ۵۰ درصد دوام و مقاومت بتن را حفظ می‌کند.
- تحقیق مارتونگ و آگراوال (۲۰۱۲) به بررسی تأثیر خاکستر بادی بر خواص بتن اختصاص داشت. فرضیه آن‌ها این بود که خاکستر بادی دوام و مقاومت بلندمدت بتن را افزایش می‌دهد. روند پژوهش شامل تهیه بتن با ۱۰ تا ۴۰ درصد خاکستر بادی و انجام آزمایش‌های مقاومت و انقباض بود. نتایج نشان داد که خاکستر بادی مقاومت اولیه بتن را کاهش می‌دهد، اما مقاومت بلندمدت را ۱۰ تا ۳۰ درصد افزایش و انقباض را کاهش می‌دهد.
- توماس (۲۰۰۷) به بررسی تأثیر خاکستر بادی بر مقاومت فشاری بتن با مصالح بازیافتی پرداخت. فرضیه

محقق این بود که خاکستر بادی تأثیر منفی دما و یخ زدگی را کاهش می دهد (کاهش کمتر در مقاومت باقی مانده). روند تحقیق شامل تولید ۲۲۸ نمونه، قرارگیری در دمای ۴۰۰ درجه و چرخه های یخ زدگی، و آزمایش های فشاری بود. نتایج نشان داد که خاکستر بادی عملکرد در برابر دما را بهبود می بخشد، اما یخ زدگی را بدتر می کند.

اُزبک کالوغلو و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی خواص مکانیکی و دوام بتن با مصالح بازیافتی پرداختند. فرضیه محققین این بود که اندازه و محتوای مصالح خواص بتن را تحت تأثیر قرار می دهد (اندازه بزرگ تر مدول را افزایش می دهد). روند تحقیق شامل تولید ۱۴ دسته بتن، آزمایش های فشاری، خمشی و انقباض بود. نتایج نشان داد که اندازه بزرگ تر مدول را تا ۶ درصد افزایش می دهد اما مقاومت کششی را تا ۱۱ درصد کاهش می دهد.

طغرلی و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی استفاده از مصالح بتن بازیافتی و پوزولان در نفوذپذیری بتن تقویت شده با الیاف پرداختند. فرضیه نویسندگان این بود که مصالح بازیافتی نفوذپذیری را ۲۵ درصد افزایش و مقاومت را ۶۰ درصد کاهش می دهد، اما پوزولان گرد سیلیس ۱۰ درصد، مصالح طبیعی ۱-۳ درصد و الیاف مصنوعی و الیاف پلی اتیلن بازیافتی ۱-۲ درصد، مقاومت را جبران می کنند. روند تحقیق شامل تولید ۲۳۱۰ نمونه از ۱۱۰ مخلوط، آزمایش های تراکم، مقاومت و نفوذپذیری بود. نتایج نشان داد که ترکیب ۱۰۰ درصد مصالح بازیافتی با ۲ درصد الیاف مصنوعی (پلی پروپیلن یا پلی استر) و ۲ درصد مصالح طبیعی مقاومت ۲۱ مگاپاسکال فراهم می کند، بتن را برای کاربردهای ساختاری مناسب می کند.

سواتی و اسدی (۲۰۲۱) به بررسی تأثیر مواد پوزولانی با الیاف هیبرید بر عملکرد ساختاری بتن پرداختند. فرضیه محققین این بود که ترکیب پوزولان (خاکستر برنج، سیلیس فوم) با الیاف هیبرید خواص بتن را بهبود می بخشد (مقاومت تا ۵۰ درصد) و آلودگی را

کاهش می دهد. روند تحقیق شامل بررسی ادبیات بر انواع الیاف و پوزولان بود. نتایج نشان داد که پوزولان کارایی را افزایش می دهد، الیاف مقاومت را بهبود می بخشد و تأثیر دما را کم می کند.

لی و دای (۲۰۱۲) اثرات هم افزایی الیاف پلی پروپیلن و شیشه را بر خواص مکانیکی و دوام بتن سنگدانه بازیافتی بررسی کردند. فرضیه پژوهشگران این بود که الیاف هیبرید دوام بتن در برابر چرخه های یخ زدگی و بارگذاری را بهبود می بخشد (تا ۳۰ درصد). روند تحقیق شامل تولید بتن با الیاف، آزمایش های فشاری و یخ زدگی، و تحلیل میکروسکوپی بود. نتایج نشان داد که الیاف هیبرید دوام را بهبود می بخشد، پیوند را تعیین می کند.

تحقیق مرادیخو و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی بتن ژئوپلیمر تقویت شده با الیاف اختصاص داشت. فرضیه این بود که الیاف (پلی پروپیلن، پلی اولفین ۰/۱۵ تا ۰/۲۵ درصد) استحکام فشاری، کششی و خمشی بتن را بهبود می بخشد (تا ۲۰ درصد) و چگالی و جذب آب را کاهش می دهد. روند تحقیق شامل بهینه سازی مخلوط متاکاژولین، تولید بتن با الیاف، و آزمایش های مکانیکی و دما بود. نتایج نشان داد که الیاف خواص را بهبود می بخشد اما مقاومت به دما را تحت تأثیر قرار نمی دهد.

با وجود پیشرفت های قابل توجه در استفاده از مصالح بازیافتی در بتن، همچنان عدم قطعیت هایی در خصوص رفتار هم زمان سنگدانه های بازیافتی، مواد مکمل سیمانی و الیاف تقویتی، به ویژه در کاربردهای روسازی، وجود دارد. بسیاری از مطالعات پیشین به بررسی اثرات منفرد این پارامترها پرداخته اند، در حالی که برهم کنش آن ها می تواند منجر به رفتارهای غیرخطی و حتی متضاد در خواص مکانیکی و دوام گردد. از این رو، هدف اصلی پژوهش حاضر، ارزیابی آزمایشگاهی اثر هم زمان سنگدانه بازیافتی، خاکستر بادی و الیاف ماکروسنتتیک بر عملکرد بتن روسازی است. در این راستا، خواص کلیدی شامل

ارزیابی آزمایشگاهی و بهینه‌سازی عملکرد مکانیکی و دوام روسازی بتنی حاوی سنگدانه بازیافتی با استفاده از خاکستر بادی و الیاف ماکروستتیک

درصد	ترکیب
۰.۷	CaO
۱.۱۶	MgO
۴.۱۷	L.O.I

۳.۱.۲. الیاف ماکروستتیک

این الیاف برای بهبود شکل‌پذیری، کنترل ترک و افزایش سختی انتخاب شدند و مشخصات آن در جدول ۳ درج شده است.

جدول ۳. مشخصات الیاف ماکروستتیک

نوع الیاف	ماکروستتیک تک‌رشته‌ای
جنس	اولفین و کوپلیمر
رنگ	سفید
طول برش (mm)	۴۰-۵۰
مقاومت کششی (MPa)	۴۸۰
شکل‌پذیری	بالا
مقاومت شیمیایی	بالا
خوردگی	ندارد

۴.۱.۲. سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی

سنگدانه‌های طبیعی شامل ماسه و شن خرد شده با دانه‌بندی استاندارد ASTM C33 هستند، و حداکثر اندازه شن ۱۹ میلی‌متر و جذب آب ۱.۵ درصد است. سنگدانه بازیافتی از بتن تخریبی به‌دست آمد. نسبت درشت‌دانه به ریزدانه با توجه به جدول ۴، ۶۰ به ۴۰ انتخاب شد تا تراکم مناسب و کارایی مناسب تضمین شود و همچنین در محدوده استاندارد قرار بگیرد. علت انتخاب این نسبت، دستیابی به بتن متراکم بدون حفره‌های زیاد است که دوام را افزایش می‌دهد. شکل ۱، دانه‌بندی مصالح سنگی مصرفی و شکل ۲ مصالح مصرفی را نشان می‌دهد.

مقاومت‌های مکانیکی و شاخص‌های مرتبط با دوام (نظیر جذب آب) مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین، تلاش شده است با تحلیل هم‌زمان نتایج، یک ترکیب بهینه معرفی گردد که ضمن حفظ یا بهبود خواص مکانیکی، اثرات منفی بالقوه ناشی از استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی را به حداقل برساند. نتایج این تحقیق می‌تواند به توسعه رویکردهای طراحی چندپارامتری در بتن‌های پایدار مورد استفاده در روسازی‌ها کمک نماید.

۲. روش تحقیق

۱.۲. مواد و مصالح

۱.۱.۲. سیمان

سیمان پرتلند تیپ II با استاندارد ASTM C150 انتخاب شد، زیرا مقاومت متوسط در برابر سولفات دارد. مشخصات سیمان مصرفی در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات سیمان مصرفی

سیمان پرتلند تیپ II	نوع سیمان
ASTM C150	استاندارد
حدود ۴۲	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)
۱۲۰	زمان گیرش اولیه (دقیقه)
۳۰۰	زمان گیرش نهایی (دقیقه)
۳۵۰۰	سطح ویژه (cm ² /g)

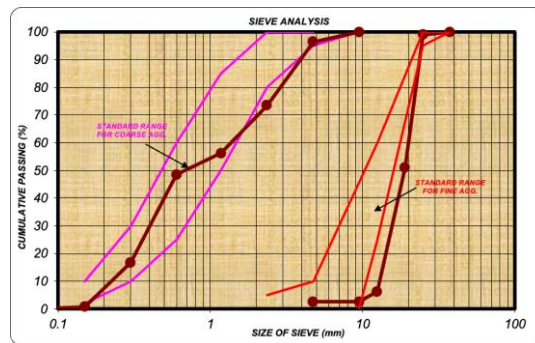
۲.۱.۲. خاکستر بادی

خاکستر بادی کلاس F با استاندارد ASTM C618 استفاده شد، که برای بتن روسازی مناسب است زیرا دوام در برابر یخ‌زدگی را افزایش می‌دهد. خصوصیات شیمیایی آن در جدول ۲ بیان شده است.

جدول ۲. مشخصات خاکستر بادی

درصد	ترکیب
۸۷.۸۶	SiO ₂
۶.۷۶	Al ₂ O ₃
۰.۹۹	Fe ₂ O ₃

سپس مواد بر اساس طرح اختلاط نوشته شده در داخل میکسر ترکیب گردید و در قالب‌های مکعبی $15 \times 15 \times 15$ و استوانه‌ای 30×15 ریخته و پس از ۲۴ ساعت از داخل قالب‌ها خارج گردید و در داخل استخر عمل‌آوری بتن قرار گرفتند. شکل ۳، نمونه‌های ساخته شده و در حال عمل‌آوری را نشان می‌دهد. نمونه‌ها متناسب با سنین مورد نیاز برای هر کدام از آزمایش‌ها نظیر مقاومت فشاری ASTM C39، مقاومت کششی ASTM C496، مدول الاستیسیته ASTM C469، جذب آب ASTM C642، خارج می‌گردد. آزمایش اسلامپ نیز براساس ASTM C143 قیل از ریختن درون قالب انجام گرفت. به منظور ارزیابی اثر هم‌زمان پارامترها، ۱۰ طرح اختلاط به همراه بتن شاهد انتخاب گردید. جدول ۴، طرح اختلاط مصالح سنگی مورد استفاده را نشان می‌دهد.



شکل ۱. نمودار دانه بندی شن و ماسه مصرفی



شکل ۲. مصالح شن و ماسه



شکل ۳. نمونه های ساخته شده و در حال عمل آوری

۵.۱.۲. آب و افزودنی‌های شیمیایی

آب آشامیدنی با $\text{pH} = 7$ و بدون آلاینده‌ها استفاده شد. هیچ فوق‌روان‌کننده‌ای استفاده نشد تا تأثیر خالص مواد بر کارایی بررسی شود، که این امر بتن را برای کاربردهای اقتصادی مناسب می‌کند. علت عدم استفاده، ارزیابی رفتار طبیعی بتن بدون افزودنی‌های شیمیایی است، که هزینه را کاهش و پایداری را افزایش می‌دهد.

۲.۲. طرح اختلاط

در ابتدا مواد مورد نیاز خاکستر بادی، سیمان، الیاف ماکروسنتتیک، مصالح طبیعی و بازیافتی آماده گردید. مصالح بازیافتی از الک $3/8$ عبور داده شد تا ریزدانه‌ها از درشت دانه‌ها جدا گردند. سپس به دلیل رطوبت موجود در مصالح از دستگاه آون استفاده شد. وزن مصالح خشک و مرطوب و میزان درصد رطوبت موجود در مصالح محاسبه گردید. میزان رطوبت کمتر از ۱۰٪ گزارش شد.

جدول ۴: طرح‌های اختلاط

شماره طرح	درصد سنگدانه بازیافتی (وزنی)	درصد الیاف حجمی	درصد خاکستر بادی	سیمان (kg)	خاکستر بادی (kg)	ماسه ریزدانه (kg)	سنگدانه درشت طبیعی (kg)	سنگدانه درشت بازیافتی (kg)	الیاف ماکروسنتتیک (kg)	آب (kg)
شاهد	۰	۰	۰	۲۱/۶	۰	۶۹/۴	۳۸/۵	۰	۰	۹/۵
T۱	۰	۰	۲۵	۲۱/۶	۵/۴	۶۵/۹	۳۶/۶	۰	۰	۱۱
T۲	۰	۰	۵۰	۲۱/۶	۱۰/۸	۶۲/۵	۳۴/۷	۰	۰	۱۲
T۳	۰	۰/۴	۲۵	۲۱/۶	۵/۴	۶۵/۷	۳۶/۵	۰	۰/۲۱	۱۱
T۴	۰	۰/۴	۵۰	۲۱/۶	۱۰/۸	۶۲/۳	۳۴/۶	۰	۰/۲۱	۱۲
T۵	۰	۰/۶	۲۵	۲۱/۶	۵/۴	۶۵/۷	۳۶/۵	۰	۰/۳۲	۱۱
T۶	۲۵	۰/۶	۵۰	۲۱/۶	۱۰/۸	۶۲/۳	۲۵/۹	۸/۷	۰/۳۲	۱۳
T۷	۵۰	۰/۶	۵۰	۲۱/۶	۱۰/۸	۶۲/۳	۱۷/۳	۱۷/۳	۰/۳۲	۱۳/۲
T۸	۲۵	۰/۴	۲۵	۲۱/۶	۵/۴	۶۵/۷	۲۷/۴	۹/۱	۰/۲۱	۱۲
T۹	۲۵	۰/۴	۵۰	۲۱/۶	۱۰/۸	۶۲/۳	۲۵/۹	۸/۷	۰/۲۱	۱۳
T۱۰	۵۰	۰/۶	۲۵	۲۱/۶	۵/۴	۶۵/۷	۱۸/۳	۱۸/۳	۰/۳۲	۱۲/۸

۲.۳. آزمایش مقاومت فشاری

پس از ساخت نمونه‌ها و قرار دادن آن‌ها در استخر عمل‌آوری بتن، در سن ۷ روزه دو نمونه از استخر خارج شده و در داخل دستگاه جک هیدروبیکی مورد آزمایش واقع شده تا مقاومت ۷ روزه هر طرح اختلاط ثبت گردد. سایر نمونه‌ها تا سن ۲۸ روزه در داخل استخر عمل‌آوری نگهداری شده و پس از خارج کردن آن‌ها، مقاومت فشاری سن ۲۸ روزه آن‌ها اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. شکل‌های ۵ و ۶ نمونه‌های تحت آزمایش مقاومت فشاری را نشان می‌دهند.



شکل ۵. نمونه طرح اختلاط T3 در زیر بار مقاومت فشاری

۳. برنامه آزمایشگاهی

۱.۳. آزمایش اسلامپ

بعد از ساخت بتن، و قبل از ریختن در داخل قالب‌های بتنی اقدام به انجام آزمایش اسلامپ به منظور مشخص نمودن کارایی هر طرح اختلاط گردید. برای انجام این آزمایش از یک صفحه فلزی، یک قیف ۳۰ سانتی متری، یک میله فلزی و یک خط کش به منظور اندازه‌گیری استفاده شد. بتن را در سه لایه وارد قیف فلزی می‌کنیم و در هر نوبت ۱۵ ضربه به آن می‌زنیم، در پایان پس از صاف کردن سطح بتن با برداشتن قیف، میزان کارایی بتن با خط‌کش اندازه‌گیری شد.



شکل ۴. آزمایش اسلامپ نمونه T4

میزان تغییر شکل بتن تحت اثر بار وارده به سطح آن انجام می شود.

برای انجام این آزمایش، مطابق شکل ۸، دستگاه مدول الاستسیته روی نمونه‌ی استوانه‌ای نصب و سپس نمونه درون دستگاه جک هیدرولیکی قرار داده و پس از آن دستگاه روی مقدار ثابت بار تنظیم می‌شود و با روشن کردن دستگاه مقادیر نمایش داده شده روی گیج دستگاه مدول ثبت و به‌طور هم‌زمان مقادیر بار اعمال شده توسط دستگاه نیز ثبت و در نهایت با استفاده از داده‌های به دست آمده، نمودار تنش-کرنش بتن ترسیم شده و مقدار مدول الاستسیته بتن محاسبه می‌گردد.

۳.۵. آزمایش مقاومت کششی

آزمایش مقاومت کششی برای اندازه‌گیری مقاومت بتن در برابر کشش انجام شد.

برای انجام این آزمایش نمونه‌های استوانه‌ای را به صورت افقی داخل دستگاه جک هیدرولیکی قرار دادیم، بار با نرخ ثابت اعمال شد، حداکثر بار شکست ثبت و میزان مقاومت کششی محاسبه گردید.



شکل ۸. نمونه تحت آزمایش مدول برجهنگی

۴. بحث و نتیجه‌گیری

نتایج این بخش برای هر آزمایش به صورت نمودار و یا جدول قرار می‌گیرد و در دو دسته قرار دارد: آزمایش بتن تازه و بتن سخت شده.



شکل ۶. نمونه شکسته شده بعد از انجام آزمایش

مطابق شکل‌ها، نمونه‌های بتنی درون دستگاه جک هیدرولیکی قرار گرفته و تحت اعمال بار دچار شکست شده‌اند.

۳.۳. آزمایش جذب آب

به منظور تعیین درصد جذب آب در هر طرح اختلاط، ابتدا یکی از نمونه‌های عمل‌آوری شده که کاملاً خشک می‌باشد انتخاب شده و وزن آن اندازه‌گیری گردید. سپس نمونه به مدت ۴۸ ساعت در استخر آب غوطه‌ور شد، پس از پایان این مدت، نمونه از آب خارج و وزن خیس آن ثبت شد، در نهایت، با استفاده از وزن خشک و وزن خیس نمونه، درصد جذب آب محاسبه شد.

شکل ۷ یک نمونه از وزن‌کشی نمونه بتنی می‌باشد.



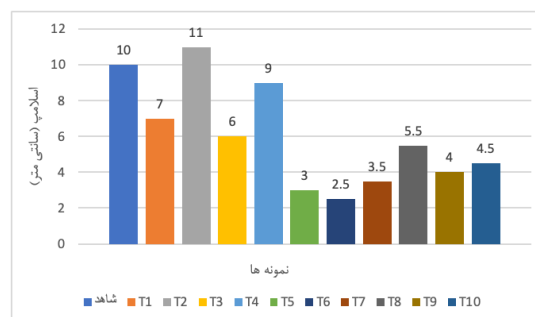
شکل ۷. نمونه تحت آزمایش جذب آب

۴.۳. آزمایش مدول الاستسیته

آزمایش اندازه‌گیری مدول الاستسیته بتن به‌منظور بررسی

۱.۴. اسلامپ

نتایج اسلامپ با توجه به شکل ۹ نشان می‌دهد که استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی موجب کاهش روانی بتن می‌شود که این موضوع به جذب آب بیشتر نمونه‌های حاوی سنگدانه بازیافتی اشاره دارد. افزودن ۲۵ درصد خاکستر بادی موجب افزایش ویسکوزیته و کاهش روانی بتن گردید. افزایش میزان خاکستر بادی تا ۵۰ درصد منجر به بهبود نسبی در کارایی مخلوط گردید، که می‌تواند به شکل کروی ذرات و کاهش اصطکاک داخلی نسبت داده شود. با این حال، تغییرات مشاهده شده در اسلامپ محدود بوده و نمی‌توان آن را به‌عنوان یک اثر روان‌کنندگی قابل توجه در نظر گرفت. در حالی که افزایش درصد الیاف ماکروستنتیک به دلیل اصطکاک موجود در سطح الیاف موجب کاهش روانی بیشتر بتن شد.



شکل ۹. نتایج آزمایش اسلامپ نمونه‌ها

نتایج اسلامپ نشان داد که افزودن سنگدانه‌های بازیافتی منجر به کاهش کارایی بتن شده است که این موضوع با نتایج اچ‌بریا و همکاران (۲۰۰۷) همخوانی دارد. آن‌ها کاهش اسلامپ را به جذب زیاد آب توسط سنگدانه‌های بازیافتی نسبت داده‌اند.

در خصوص خاکستر بادی، نتایج این پژوهش نشان داد که تأثیر آن بر کارایی محدود بوده و تغییرات مشاهده شده (در حدود ۱ سانتی‌متر) چندان قابل توجه نیست. این موضوع با برخی مطالعات مانند صدیق (۲۰۰۴) که بهبود کارایی در مقادیر بالای خاکستر بادی را گزارش

کرده، تفاوت دارد که می‌تواند ناشی از نسبت آب به مواد سیمانی پایین در این تحقیق باشد. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که در این طرح‌ها، اثر جذب آب سنگدانه‌های بازیافتی بر کارایی غالب بوده است.

۲.۴. آزمایش مقاومت فشاری

مقاومت فشاری یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها برای ارزیابی کیفیت و عملکرد بتن می‌باشد. در این بخش، نتایج این آزمون در سنین مختلف ارائه و تحلیل می‌شود.

همانطور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، مقاومت‌های ۷ روزه و ۲۸ روزه مربوط به طرح‌های T1 تا T10 به همراه نمونه شاهد مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نمونه شاهد با مقاومت ۷ روزه ۲۵/۷۹ مگاپاسکال و مقاومت ۲۸ روزه ۲۹/۵۲ مگاپاسکال بیانگر رفتار یک بتن معمولی بدون هیچ‌گونه افزودنی می‌باشد و روند رشد طبیعی مقاومت را نشان می‌دهد. بنابراین از این نمونه به عنوان معیار اصلی مقایسه میان سایر طرح‌های اختلاط استفاده می‌شود.

در طرح T1 با افزودن ۲۵٪ خاکستر بادی، مقاومت ۷ روزه برابر با ۱۰/۷۹ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد که نشان‌دهنده کاهش قابل توجه مقاومت اولیه نسبت به نمونه شاهد می‌باشد. علت این کاهش در سنین ابتدایی را می‌توان به ماهیت ریزدانه و فعال نشده خاکستر بادی نسبت داد. ذرات خاکستر بادی به دلیل سطح ویژه بالا، بخشی از آب آزاد مخلوط را جذب می‌کنند و موجب کاهش آب مؤثر برای هیدراتاسیون سیمان می‌شوند. این پدیده باعث می‌شود فرآیند تشکیل ژل سیلیکات کلسیم هیدراته در روزهای اولیه به کندی انجام گیرد. با این حال، واکنش‌های پوزولانی خاکستر بادی در سنین میانی و بلندمدت فعال شده و زمینه رشد مقاومت را فراهم می‌کند. به همین دلیل مقاومت ۲۸ روزه این طرح به ۲۹/۰۹ مگاپاسکال رسیده و نسبت به مقاومت ۷ روزه رشد چشمگیری نشان می‌دهد.

در طرح T2 مقدار پوزولان به ۵۰٪ افزایش می‌یابد.

این طرح مقاومت ۷ روزه ۱۳/۵۳ مگاپاسکال را نشان می‌دهد که نسبت به طرح T1 افزایش یافته، اما همچنان فاصله قابل توجهی با نمونه شاهد دارد. با این وجود، مقاومت ۲۸ روزه برابر با ۳۰/۳۹ مگاپاسکال به دست آمده که از نمونه شاهد نیز بیشتر می‌باشد. این موضوع بیانگر آن است که افزایش مقدار خاکستر در مخلوط، امکان تشکیل محصولات پوزولانی بیشتری را فراهم کرده که به مرور زمان باعث کاهش تخلخل و رشد قابل توجه مقاومت فشاری می‌شود.

در طرح T3 از ۲۵٪ پوزولان به همراه ۰/۴ درصد الیاف فولادی ریز الیاف ماکروستتیک استفاده شد. مقاومت ۷ روزه این طرح برابر با ۱۷/۰۶ مگاپاسکال اندازه‌گیری شده که در مقایسه با طرح‌های T1 و T2 نشان‌دهنده بهبود مقاومت اولیه می‌باشد، اما همچنان نسبت به نمونه شاهد افت دارد. حضور الیاف ماکروستتیک موجب بهبود خمیر سیمان، کنترل ریزترک‌ها و انتقال بهتر تنش در سنین اولیه می‌شود. مقاومت ۲۸ روزه این طرح نیز ۳۰/۳۷ مگاپاسکال به دست آمد که نسبت به طرح T2 افت اندکی نشان می‌دهد. این کاهش می‌تواند ناشی از کاهش درصد پوزولان نسبت به T2 و افزایش میزان تخلخل ناشی از حضور الیاف باشد. با این حال می‌توان نتیجه گرفت که الیاف ماکروستتیک در تقویت مقاومت ۲۸ روزه نقش مثبت دارد.

در طرح T4 مقدار پوزولان به ۵۰٪ افزایش یافته و درصد الیاف ماکروستتیک برابر ۰/۴ در نظر گرفته می‌شود. در این طرح، مقاومت ۷ روزه به ۲۰/۴۹ مگاپاسکال رسید که نشان‌دهنده اثر مثبت افزایش پوزولان در کنار الیاف بر مقاومت اولیه می‌باشد. اگرچه افزایش پوزولان توانست مقاومت ۷ روزه را بهبود دهد، اما مقاومت ۲۸ روزه برابر با ۲۷/۶۷ مگاپاسکال به دست آمد که نسبت به طرح T3 کاهش دارد. افزایش بیش از حد پوزولان ممکن است باعث کاهش سرعت هیدراتاسیون اولیه و افزایش تخلخل ناشی از پراکندگی

الیاف گردد که موجب افت مقاومت در سنین بالاتر می‌شود.

در طرح T5 مقدار پوزولان روی ۲۵٪ ثابت مانده اما الیاف ماکروستتیک به ۰/۶ دزد افزایش می‌یابد. مقاومت ۷ روزه برابر با ۱۷/۸۹ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد که نسبت به طرح T4 کاهش یافته، اما در مقایسه با طرح T3 مقداری بهبود نشان می‌دهد. افزایش درصد الیاف در حد ۰/۶ منجر به کاهش کارایی بتن و افزایش احتمال ایجاد حفرات در خمیر سیمان شده که همین موضوع می‌تواند دلیل افت مقاومت باشد. مقاومت ۲۸ روزه برابر با ۲۷/۲۵ مگاپاسکال حاصل شد که نسبت به طرح T3 کاهش نشان می‌دهد و بیانگر آن است که ترکیب ۲۵٪ پوزولان و ۰/۶ درصد الیاف خارج از محدوده بهینه بوده و نتوانسته ساختار بتن را تقویت کند. در طرح T6 ترکیبی از ۵۰٪ خاکستر بادی، ۰/۶٪ الیاف ماکروستتیک و ۲۵٪ سنگدانه بازیافتی به کار گرفته شد. مقاومت ۷ روزه این طرح ۱۸/۹۲ مگاپاسکال به دست آمد که نسبت به طرح‌های فاقد سنگدانه‌های بازیافتی کمتر می‌باشد. علت این کاهش را می‌توان به حضور ملات قدیمی و تخلخل بیشتر سنگدانه‌های بازیافتی نسبت داد. این سنگدانه‌ها معمولاً دارای ناحیه انتقال ضعیف‌تر و ظرفیت جذب آب بالاتر هستند و همین موضوع سبب کاهش مقاومت اولیه می‌شود. مقاومت ۲۸ روزه نیز برابر با ۲۴/۱۹ مگاپاسکال ثبت شد که کمترین مقدار میان طرح‌های بررسی شده تا این مرحله می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ترکیب درصد بالای پوزولان، الیاف و سنگدانه‌های بازیافتی تأثیر هم‌افزایی منفی بر مقاومت فشاری دارد.

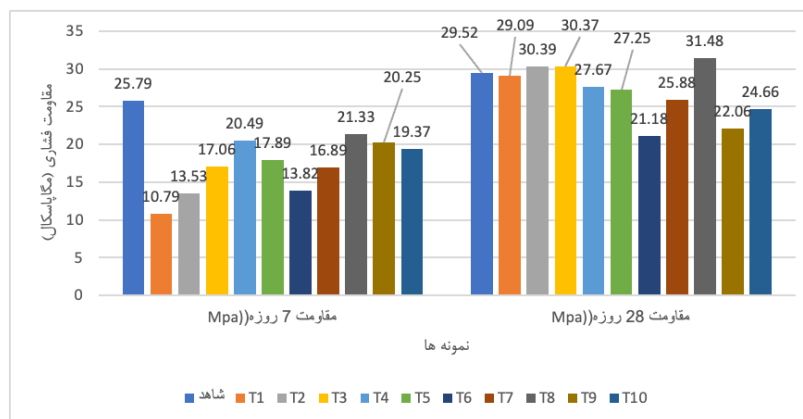
در طرح T7 مقدار سنگدانه‌های بازیافتی به ۵۰٪ افزایش داده شد، درصد پوزولان و الیاف مشابه طرح T6 باقی می‌ماند. مقاومت ۷ روزه برابر با ۱۷/۵۵ مگاپاسکال می‌باشد که همچنان کمتر از طرح‌های بدون سنگدانه‌های بازیافتی می‌باشد، اما مقاومت ۲۸ روزه برابر با ۲۷/۰۶

روزه برابر ۱۹/۵۲ مگاپاسکال گزارش شد که نسبت به طرح T8 کاهش نشان می‌دهد. افزایش درصد پوزولان موجب کاهش واکنش‌های اولیه هیدراتاسیون و تأخیر در تشکیل فازهای اولیه ژل سیلیکات کلسیم هیدراته می‌شود. مقاومت ۲۸ روزه نیز برابر ۲۵/۶۷ مگاپاسکال حاصل شد که پایین‌تر از طرح T8 می‌باشد. بنابراین، افزایش بیش از حد خاکستر بادی در حضور سنگدانه‌های بازیافتی و الیاف نتوانسته اثر مطلوبی بر مقاومت داشته باشد.

در طرح T10 مقدار سنگدانه‌های بازیافتی برابر ۰/۵۰، مقدار پوزولان ۰/۲۵ و الیاف ماکروستنتیک معادل ۰/۶ درصد در نظر گرفته شد. مقاومت ۷ روزه برابر ۲۴/۰۷ مگاپاسکال ثبت شد که به‌طور قابل‌توجهی از طرح‌های مشابه دارای سنگدانه‌های بازیافتی بالاتر می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان به نقش مهم الیاف در کنترل ترک‌های اولیه و بهبود انتقال تنش در ماتریس بتن نسبت داد. مقاومت ۲۸ روزه نیز برابر ۲۸/۵۴ مگاپاسکال به‌دست آمد که نسبت به طرح T9 عملکرد بهتری دارد، اگرچه نسبت به طرح T8 همچنان ضعیف‌تر می‌باشد. این نتیجه نشان می‌دهد که افزایش الیاف تا حد متوسط می‌تواند بخشی از ضعف ناشی از سنگدانه‌های بازیافتی را جبران کند. نتایج میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در سنین ۷ و ۲۸ روزه در جدول ۵ آورده شده است. هم‌چنین نتایج در شکل ۱۰ آورده شده است.

مگاپاسکال به‌دست آمد که نسبت به طرح T6 افزایش قابل توجهی نشان می‌دهد. می‌توان بیان کرد که حضور هم‌زمان الیاف ماکروستنتیک و خاکستر بادی قادر است بخشی از ضعف ناحیه انتقال ناشی از سنگدانه‌های بازیافتی را جبران کند. واکنش‌های پوزولانی خاکستر بادی موجب پرشدن حفرات و تقویت ناحیه انتقالی شده و الیاف نیز با ایجاد مکانیزم پل‌سازی در برابر گسترش ترک‌ها مقاومت می‌کنند.

در طرح T8 از ترکیب بهینه‌تری شامل ۲۵٪ خاکستر بادی، مقدار متوسط ۴/۰٪ الیاف ماکروستنتیک و ۲۵٪ سنگدانه‌های بازیافتی استفاده شد. مقاومت ۷ روزه برابر با ۲۱/۶۷ مگاپاسکال به‌دست آمد که نسبت به طرح‌های قبلی از جمله T6 و T7 بهبود قابل‌ملاحظه‌ای دارد. این طرح نشان‌دهنده تعادل مناسب میان میزان پوزولان، الیاف و سنگدانه‌های بازیافتی می‌باشد، به‌گونه‌ای که واکنش‌های هیدراتاسیون و پوزولانی در کنار رفتار مکانیکی مناسب الیاف، موجب تشکیل ساختار پایدار و مقاوم شده‌اند. مقاومت ۲۸ روزه نیز برابر با ۳۰/۹۴ مگاپاسکال ثبت شد که حتی از نمونه شاهد نیز بیشتر می‌باشد. این طرح را می‌توان به عنوان یکی از بهینه‌ترین ترکیب‌ها در میان تمامی طرح‌های اختلاط معرفی کرد. در طرح T9 مقدار پوزولان به ۵۰٪ افزایش یافت، در حالی که درصد الیاف ماکروستنتیک برابر ۴/۰٪ و مقدار سنگدانه‌های بازیافتی برابر ۲۵٪ باقی ماند. مقاومت ۷



شکل ۱۰. داده‌های نمودار مقایسه مقاومت فشاری (۷ روزه و ۲۸ روزه)

جدول ۵. نتایج میانگین مقاومت فشاری (MPa) در سنین مختلف

شماره طرح	مقاومت ۷ روزه (MPa)	مقاومت ۲۸ روزه (MPa)	درصد تغییر ۷ روزه نسبت به شاهد	درصد تغییر ۲۸ روزه نسبت به شاهد
شاهد	۲۵/۷۹	۲۹/۵۲	۰/۰۰	۰/۰۰
T1	۲۵/۱۰	۲۹/۰۹	-۲/۶۸	-۱/۴۶
T2	۱۳/۵۳	۳۰/۳۹	-۴۷/۵۴	+۲/۹۵
T3	۱۷/۰۶	۳۰/۳۷	-۳۳/۸۵	+۲/۸۸
T4	۲۰/۴۹	۲۷/۶۷	-۲۰/۵۵	-۶/۲۷
T5	۱۷/۸۹	۲۷/۲۵	-۳۰/۶۳	-۷/۶۹
T6	۱۳/۸۲	۲۱/۱۸	-۴۶/۴۱	-۲۸/۲۵
T7	۱۶/۸۹	۲۵/۸۸	-۳۴/۵۱	-۱۲/۳۳
T8	۲۱/۳۳	۳۱/۴۸	-۱۷/۲۹	+۶/۶۴
T9	۲۰/۲۵	۲۲/۰۶	-۲۱/۴۸	-۲۵/۲۷
T10	۱۹/۳۷	۲۴/۶۶	-۲۴/۸۹	-۱۶/۴۶

حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد برای جایگزینی ۲۵ تا ۵۰ درصدی سنگدانه بازیافتی گزارش شده است.

همچنین، کاهش مقاومت در سنین اولیه در طرح‌های حاوی خاکستر بادی مشاهده شد که مطابق یافته‌های صدیق (۲۰۰۴) است. وی کاهش حدود ۱۵ تا ۳۵ درصدی مقاومت اولیه را در اثر جایگزینی سیمان با خاکستر بادی گزارش کرده است که به کندی واکنش پوزولانی مربوط می‌شود.

در مقابل، افزودن الیاف ماکروسنتتیک موجب بهبود نسبی مقاومت فشاری گردید که این موضوع با نتایج بانتیا و گوپتا (۲۰۱۲) همسو است. در این مطالعات افزایش مقاومت در حدود ۱۰ تا ۲۵ درصد گزارش شده که ناشی از مکانیزم پل زنی ترک و توزیع مجدد تنش می‌باشد.

بنابراین، رفتار مشاهده شده در این پژوهش حاصل برهم‌کنش سه عامل اصلی (RCA^1 ، خاکستر بادی و الیاف) بوده و روند کلی آن با مطالعات پیشین سازگار است.

همانطور که از نتایج مشاهده می‌شود، مقاومت‌های ۷ روزه و ۲۸ روزه مربوط به طرح‌های T1 تا T10 به همراه نمونه شاهد مورد ارزیابی قرار گرفت. نمونه شاهد با مقاومت ۷ روزه ۲۵/۷۹ مگاپاسکال و مقاومت ۲۸ روزه ۲۹/۵۲ مگاپاسکال بیانگر رفتار یک بتن معمولی بدون هیچ‌گونه افزودنی و روند رشد طبیعی مقاومت را نشان می‌دهد. بنابراین از این نمونه به عنوان معیار اصلی مقایسه میان سایر طرح‌های اختلاط استفاده می‌شود.

نتایج مقاومت فشاری نشان داد بتن حاوی سنگدانه بازیافتی دچار افت مقاومت ۱۰ تا ۲۰ درصدی نسبت به نمونه شاهد شد. با این حال ترکیب خاکستر بادی و الیاف ماکروسنتتیک موجب افزایش مقاومت در سن ۲۸ روزه گردید.

نتایج مقاومت فشاری نشان داد که استفاده از سنگدانه بازیافتی منجر به کاهش مقاومت نسبت به نمونه شاهد گردید که این روند با نتایج عیسی و همکاران (۲۰۲۱) و کاظمی و همکاران (۲۰۱۸) همخوانی دارد؛ به‌طوری که در این مطالعات، کاهش مقاومت فشاری در محدوده

1- Recycled Concrete Aggregate

۳.۴. آزمایش مقاومت کششی

آزمایش مقاومت کششی بتن برای تعیین توانایی بتن در برابر نیروهای کششی انجام می‌شود. مطابق داده‌های شکل ۱۱، آزمایش مقاومت کششی روی نمونه‌های مختلف بتن انجام گردید. نتایج مقاومت کششی ۲۸ روزه طرح‌های T1 تا T10 با نمونه‌ی شاهد مقایسه می‌شود. نمونه‌ی شاهد دارای مقاومت کششی ۲/۷۲۱ مگاپاسکال می‌باشد و به عنوان بتن بدون هیچ افزودنی مورد استفاده برای مقایسه بین نمونه‌ها قرار می‌گیرد.

در طرح T1 با افزودن ۲۵٪ خاکستر بادی، مقاومت کششی ۲۸ روزه برابر با ۲/۷۰۱ مگاپاسکال به دست آمد که نشان‌دهنده‌ی کاهش جزئی مقاومت است. خاکستر بادی موجب کاهش میزان مورد نیاز آب بتن می‌شود؛ به‌گونه‌ای که بخشی از آب مخلوط جذب ذرات خاکستر بادی شده و آب مؤثر برای هیدراتاسیون اولیه سیمان کاهش می‌یابد. در نتیجه، خمیر سیمان در سنن اولیه به‌طور کامل هیدراته نشده و تشکیل ژل سیلیکات کلسیم هیدراته با سرعت کمتری انجام می‌شود که این امر کاهش مقاومت کششی را توجیه می‌کند.

در طرح T2 با افزایش خاکستر بادی به ۵۰٪، مقاومت کششی ۲/۷۶۱ مگاپاسکال حاصل شد. افزایش مقدار خاکستر بادی باعث افزایش سیلیس و آلومینای فعال شده و واکنش‌های پوزولانی با کلسیم اکسید آزاد شده از هیدراتاسیون سیمان شدت می‌گیرد. تشکیل مقادیر قابل‌توجهی ژل سیلیکات کلسیم هیدراته ثانویه سبب تراکم بیشتر ماتریس و تقویت ناحیه انتقالی می‌شود. بدین ترتیب، در درصد‌های بالاتر خاکستر بادی، تأثیر مثبت واکنش‌های پوزولانی بر مقاومت بر محدودیت‌های اولیه غلبه کرده و مقاومت افزایش می‌یابد.

در طرح T3 که از ۲۵٪ پوزولان به همراه ۴٪ حجمی الیاف ماکروستنتیک استفاده شده، مقاومت کششی برابر ۲/۷۶ مگاپاسکال ثبت شد. ترکیب الیاف ماکروستنتیک با خاکستر بادی موجب بهبود رفتار کششی

بتن می‌گردد، با این حال افزایش الیاف در مقایسه با طرح T2 سبب کاهش جزئی در پیوستگی خمیر سیمان و ایجاد ریزتخلخل شده که افزایش مقاومت را محدود کرده است.

در طرح T4 با استفاده از ۵۰٪ پوزولان و ۴٪ الیاف ماکروستنتیک، مقاومت کششی به ۲/۶۳۵ مگاپاسکال کاهش یافت. افزایش درصد خاکستر بادی، در کنار حضور الیاف، موجب کاهش هیدراتاسیون اولیه و افزایش تخلخل می‌شود؛ به‌طوری‌که مقدار زیاد خاکستر بادی در این طرح باعث افت بیشتر مقاومت کششی نسبت به T3 شده است.

در طرح T5 با کاهش خاکستر بادی به ۲۵٪ و افزایش الیاف ماکروستنتیک به ۶٪، مقاومت کششی برابر ۲/۶۱۵ مگاپاسکال حاصل شد. درصد بالاتر الیاف موجب افت کارپذیری و افزایش احتمال ایجاد حفرات در ماتریس سیمان می‌شود؛ بنابراین افزایش الیاف ماکروستنتیک نسبت به T4 نه تنها موجب جبران کاهش مقاومت نشده، بلکه افت بیشتری را رقم زده است.

در طرح T6 از ۵۰٪ خاکستر بادی، مقدار ۶٪ الیاف الیاف ماکروستنتیک و ۲۵٪ سنگدانه بازیافتی استفاده شده و مقاومت کششی ۲/۳۰۵ مگاپاسکال به دست آمد. وجود سنگدانه‌های بازیافتی به دلیل تخلخل بالا، جذب آب زیاد و حضور لایه ملات قدیمی روی سطح سنگدانه‌ها، کیفیت ناحیه انتقالی را تضعیف کرده و موجب کاهش محسوس مقاومت کششی گردیده است. این نتیجه با رفتار رایج بتن‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی هم‌خوانی دارد.

در طرح T7 با افزایش سنگدانه‌های بازیافتی به ۵۰٪، همراه با ۵۰٪ خاکستر بادی و ۶٪ الیاف ماکروستنتیک، مقاومت کششی ۲/۵۴۸ مگاپاسکال حاصل شد. با وجود مقدار زیاد سنگدانه‌های بازیافتی، حضور هم‌زمان الیاف و خاکستر بادی اثر منفی آن را تا حد قابل توجهی جبران کرده است. عملکرد پل‌زنی الیاف و تراکم ناشی از

مقاومت کششی برابر $2/487$ مگاپاسکال ثبت شد. افزایش هم‌زمان سنگدانه‌های بازیافتی و الیاف ماکروسنتتیک نسبت به طرح T8 منجر به کاهش مقاومت شده است؛ با این حال به دلیل افزایش الیاف، افت مقاومت نسبت به طرح T9 کمتر است.

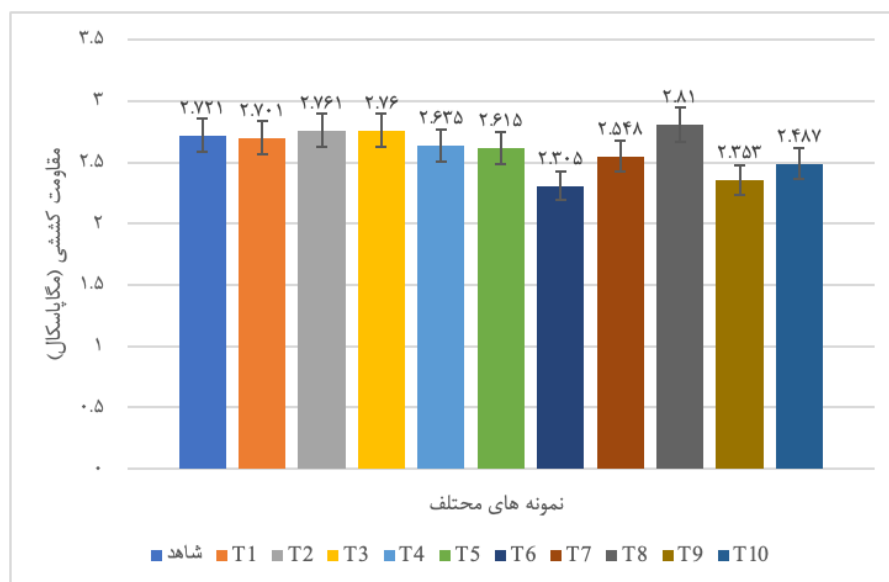
سنگدانه‌های بازیافتی منجر به کاهش مقاومت کششی بتن می‌شوند، زیرا ناحیه انتقال ضعیف تنش را متمرکز می‌کند. پس در نتیجه برای کنترل ضعف بتن در کشش نیاز به یک ترکیب در تعادل از الیاف ماکروسنتتیک و پوزولان خاکستر بادی در بتن داریم. افزایش الیاف ماکروسنتتیک در بتن مقاومت کششی را بهبود می‌بخشد زیرا این الیاف در میان سنگدانه‌های بتن موجب ایجاد پل می‌شوند (مشابه تحقیق مایر و دورهام، ۲۰۱۲). پوزولان خاکستر بادی مقاومت کششی را کمی کاهش می‌دهد. اما در ترکیب T3 منجر به بهبود مقاومت کششی شد. این پوزولان باعث افزایش دوام بتن می‌شود. نتایج این تحقیق با نتایج تحقیق صفری و همکاران (۲۰۱۸) همخوانی دارد.

واکنش‌های پوزولانی خاکستر بادی موجب شده مقاومت کششی نسبت به طرح T6 افزایش یابد.

در طرح T8 که شامل ۲۵٪ خاکستر بادی، مقدار $0/4$ الیاف ماکروسنتتیک و ۲۵٪ سنگدانه‌های بازیافتی است، مقاومت کششی $2/81$ مگاپاسکال به دست آمد که از نمونه شاهد نیز بالاتر است. این طرح تعادل مناسبی میان سه جزء اصلی برقرار کرده و نشان می‌دهد که ترکیب بهینه‌ی سنگدانه‌های بازیافتی، خاکستر بادی و الیاف ماکروسنتتیک می‌تواند نه تنها افت مقاومت ناشی از هر کدام را جبران کند، بلکه موجب بهبود عملکرد کششی نیز بشود.

در طرح T9 با افزایش خاکستر بادی به ۵۰٪ و ثابت ماندن الیاف ماکروسنتتیک و سنگدانه‌های بازیافتی، مقاومت ۲۸ روزه برابر $2/353$ مگاپاسکال حاصل شد. افزایش مقدار پوزولان نسبت به طرح T8 باعث کاهش واکنش‌های اولیه هیدراتاسیون و افزایش تخلخل شده و در نتیجه مقاومت کششی کاهش یافته است.

در طرح T10 با وجود ۲۵٪ خاکستر بادی، مقدار $0/6$ درصد الیاف ماکروسنتتیک و ۵۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی،



شکل ۱۱. نتایج مقاومت کششی نمونه‌ها

این موضوع با نتایج کو و پون (۲۰۱۲) همخوانی دارد. آن‌ها کاهش مقاومت کششی در محدوده ۱۰ تا ۲۰

نتایج مقاومت کششی نشان داد که حضور سنگدانه‌های بازیافتی تمایل به کاهش این پارامتر دارد که

درصد را گزارش کرده‌اند که ناشی از ضعف ناحیه انتقالی (ITZ^1) در بتن بازیافتی است.

در طرح‌های حاوی خاکستر بادی، کاهش مقاومت کششی در سنین اولیه مشاهده شد که مشابه رفتار گزارش شده توسط توماس و همکاران (۲۰۱۳) است. در مقابل، افزودن الیاف ماکروستنتیک نقش بسیار مؤثری در بهبود مقاومت کششی ایفا نمود، به‌طوری که این نتایج با یافته‌های بانتیا و گوپتا (۲۰۱۲) مطابقت دارد. در این مطالعات، افزایش مقاومت کششی تا حدود ۲۰ تا ۴۰ درصد گزارش شده است. این افزایش عمدتاً ناشی از مکانیزم پل‌زنی ترک و جلوگیری از گسترش ترک‌های ریز در ماتریس سیمانی می‌باشد.

۴.۴. آزمایش مدول الاستیسیته

برای تعیین الاستیسیته، آزمایش مدول الاستیسیته بتن انجام شده است.

همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، بر اساس نتایج آزمایش مدول الاستیسیته، نمونه شاهد با مقدار $28/47$ گیگاپاسکال به‌عنوان معیار مرجع برای مقایسه سایر طرح‌های اختلاط در نظر گرفته شد. این نمونه نشان‌دهنده رفتار الاستیک بتن معمولی بدون مواد افزودنی است و ساختار خمیر سیمان در آن در شرایط استاندارد شکل گرفته است.

در طرح $T1$ مقدار مدول الاستیسیته برابر با $28/34$ گیگاپاسکال به‌دست آمد که نشان‌دهنده کاهش بسیار جزئی نسبت به نمونه شاهد است. این افت محدود ناشی از خاکستر بادی می‌باشد؛ زیرا خاکستر بادی در سنین ابتدایی واکنش‌پذیری کامل ندارد و تشکیل فازهای ژل سیلیکات کلسیم هیدراته اولیه را اندکی کند می‌کند. کاهش جزئی سختی در این سن انتظار می‌رود.

در طرح $T2$ مقدار مدول الاستیسیته با افزایش درصد خاکستر بادی به $28/72$ گیگاپاسکال رسید و حتی اندکی

بالتر از نمونه شاهد قرار گرفت. این رشد را می‌توان نتیجه ادامه واکنش‌های پوزولانی و تشکیل محصولات ثانویه ژل سیلیکات کلسیم هیدراته دانست که موجب پرشدن حفرات خمیر سیمان شده و سختی بتن را در میان‌مدت و بلندمدت بهبود می‌بخشند. بنابراین افزایش خاکستر بادی تا یک حد مشخص می‌تواند تأثیر مثبت بر مدول الاستیسیته داشته باشد.

در طرح $T3$ مدول الاستیسیته برابر $28/71$ گیگاپاسکال اندازه‌گیری شد. ترکیب هم‌زمان خاکستر بادی و الیاف ماکروستنتیک باعث افزایش سختی بتن شده است. الیاف ماکروستنتیک با ایجاد نقش پل‌سازی درون ماتریس، توانایی بتن در انتقال تنش را افزایش می‌دهند. با این حال، به دلیل افزایش جزئی تخلخل ناشی از حضور الیاف، مقدار مدول نسبت به طرح $T2$ تغییر قابل‌توجهی نداشته و کمی کمتر ثبت شده است.

در طرح $T4$ مقدار مدول الاستیسیته برابر $27/92$ گیگاپاسکال گزارش شد. افزایش بیشتر خاکستر بادی نسبت به طرح $T3$ منجر به کاهش سختی بتن گردید. درصد بالای خاکستر بادی در سنین اولیه موجب تأخیر بیشتر در تشکیل فازهای مقاوم سیمان و افزایش زمان لازم برای دستیابی به ساختار متراکم می‌شود؛ به همین دلیل مدول در این طرح کاهش یافته است.

در طرح $T5$ مقدار مدول الاستیسیته برابر با $27/79$ گیگاپاسکال به‌دست آمد. افزایش درصد الیاف ماکروستنتیک در کنار کاهش مقدار خاکستر بادی نسبت به طرح $T4$ موجب افت بیشتر در سختی بتن شد. دلیل این امر آن است که الیاف در درصدهای بالا می‌توانند موجب ایجاد ریزفضاهای خالی و اختلال در یکنواختی خمیر سیمان شوند و به همین علت مدول الاستیسیته دچار کاهش تدریجی شده است.

در طرح $T6$ ، که در آن ۵۰٪ خاکستر بادی، مقدار ۰/۶ درصد الیاف ماکروستنتیک و ۲۵٪ سنگدانه‌های

ساختار متراکم، یکنواخت و بهینه در خمیر و ناحیه انتقال می‌باشد که باعث افزایش سختی بتن شده است.

در طرح T9 مقدار مدول الاستیسیته به ۲۶/۰۸ گیگاپاسکال کاهش یافت. افزایش درصد خاکستر بادی تا ۵۰٪ در این طرح موجب تأخیر بیشتر در رشد سختی شده و در سن ۲۸ روزه هنوز ساختار خمیر سیمان نتوانسته به تراکم کافی برسد. همچنین، حضور سنگدانه‌های بازیافتی نیز این موضوع را تشدید کرده است.

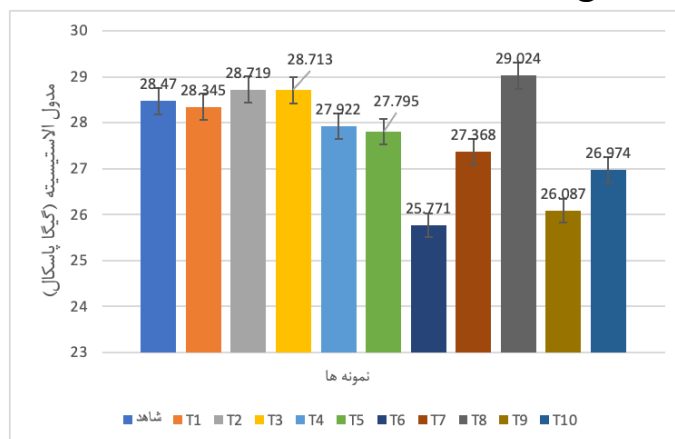
در طرح T10 مقدار مدول الاستیسیته برابر ۲۶/۹۷ گیگاپاسکال به دست آمد. افزایش هم‌زمان سنگدانه‌های بازیافتی و الیاف نسبت به طرح T8 موجب افت سختی شده است؛ با این حال، درصد بیشتر الیاف ماکروستتیک نسبت به طرح T9 موجب کنترل بهتر ترک‌ها و انتقال تنش در ماتریس شده و باعث شده مقدار مدول در طرح T10 کمی بهتر از T9 باشد.

به طور کلی، با توجه به داده‌های آزمایش مدول الاستیسیته به این نتیجه می‌رسیم که سنگدانه‌های بازیافتی به دلیل افزایش تخلخلی که با خود به همراه دارد مدول را کاهش می‌دهد. افزایش میزان الیاف ماکروستتیک مدول را بهبود می‌بخشد زیرا الیاف توزیع تنش را بهتر می‌کنند (دوپکو و همکاران ۲۰۱۸)، خاکستر بادی مدول را کمی افزایش می‌دهد زیرا واکنش پوزولانی سختی را بهبود می‌بخشد (صفری و همکاران، ۲۰۱۸).

بازیافتی به کار رفته، مقدار مدول الاستیسیته ۲۵/۷۷ گیگاپاسکال ثبت شد. این مقدار کاهش چشمگیری نسبت به نمونه شاهد نشان می‌دهد. مهم‌ترین عامل این افت حضور سنگدانه‌های بازیافتی است، زیرا سنگدانه‌های بازیافتی دارای تخلخل بیشتر، جذب آب بالا و پوشش ملات قدیمی روی سطح خود است که همگی موجب تضعیف ناحیه انتقال و در نتیجه افت سختی کلی بتن می‌شوند.

در طرح T7 مقدار مدول الاستیسیته ۲۷/۳۷ گیگاپاسکال به دست آمد. با وجود افزایش سنگدانه‌های بازیافتی تا ۵۰٪، حضور خاکستر بادی توانسته بخشی از ضعف ناشی از سنگدانه‌های بازیافتی را جبران کند و سختی بتن را نسبت به طرح T6 افزایش دهد. با این حال مقدار مدول همچنان کمتر از نمونه شاهد است و نشان می‌دهد که تأثیر منفی سنگدانه‌های بازیافتی بر ساختار بتن کاملاً رفع نشده است.

در طرح T8 مقدار مدول الاستیسیته ۲۹/۰۲ گیگاپاسکال اندازه‌گیری شد که بالاترین مقدار میان تمام طرح‌ها و حتی بیشتر از نمونه شاهد است. این نتیجه نشان می‌دهد که ترکیب ۲۵٪ خاکستر بادی، مقدار متوسط الیاف ماکروستتیک ۴/۰٪ و ۲۵٪ سنگدانه‌های بازیافتی بهترین تعادل میان واکنش‌پذیری پوزولانی، کنترل ترک‌خوردگی و کاهش ضعف ناشی از سنگدانه بازیافتی را ایجاد کرده است. عملکرد این طرح نشان‌دهنده یک



شکل ۱۲. نتایج مدول الاستیسیته

۵.۴. آزمایش جذب آب

همان‌گونه که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از آزمایش جذب آب بتن بیانگر اثر سه عامل اصلی، شامل مصالح بازیافتی، الیاف ماکروسنتتیک و خاکستر بادی بر نفوذپذیری و دوام بتن است. نمونه شاهد با میزان جذب آب ۱/۱۹ درصد، معرف بتن معمولی بدون هیچ‌گونه افزودنی بوده و به عنوان مبنای مقایسه در سایر طرح‌ها مورد استفاده قرار گرفت. مقدار جذب آب در این نمونه با محدوده استاندارد بتن‌های معمولی سازگار است.

در طرح T1 مقدار جذب آب برابر ۰/۲۴ درصد اندازه‌گیری شد. مقدار پایین جذب آب در این طرح می‌تواند ناشی از تراکم بالاتر و کاهش تخلخل مؤثر باشد. با این حال، این مقدار با احتیاط تفسیر می‌شود. تأثیر خاکستر بادی بر جذب آب وابسته به میزان جایگزینی بوده و روند یکنواختی مشاهده نشد. این کاهش را می‌توان ناشی از عملکرد مثبت خاکستر بادی در پر کردن حفرات خمیر سیمان و کاهش نفوذپذیری دانست. خاکستر بادی با انجام واکنش‌های پوزولانی و تولید ژل‌های ثانویه ژل سیلیکات کلسیم هیدراته موجب کاهش تخلخل و در نتیجه افزایش دوام بتن می‌شود. کاهش جذب آب در این طرح بیانگر تشکیل ساختار متراکم‌تر در سن ۲۸ روزه است.

در طرح T2 مقدار جذب آب ۰/۳۸ درصد ثبت شد. هرچند مقدار جذب آب همچنان کمتر از نمونه شاهد است، اما نسبت به طرح T1 اندکی افزایش یافته است. این موضوع احتمالاً ناشی از افزایش بیش از حد درصد خاکستر بادی و تغییر در ساختار ریزتخلخل خمیر سیمان می‌باشد. به عبارت دیگر، درصد زیاد خاکستر بادی در برخی موارد می‌تواند باعث تأخیر در واکنش‌های هیدراسیون اولیه شده و تراکم میکروسازه بتن را کمی کاهش دهد.

در طرح T3 مقدار جذب آب به حداقل مقدار یعنی

۰/۱۲ درصد رسید. این طرح بهترین عملکرد را در میان کلیه ترکیبات مورد بررسی نشان داد. ترکیب مناسب الیاف ماکروسنتتیک با خاکستر بادی موجب تقویت چسبندگی داخلی خمیر سیمان، کاهش ترک‌های مویین و پر شدن حفرات ریز شده است.

الیاف ماکروسنتتیک با نقش پل‌سازی و خاکستر بادی با تولید ژل سیلیکات کلسیم هیدراته ثانویه به صورت هم‌افزا عمل کرده و بیشترین کاهش نفوذپذیری را رقم زده‌اند.

جدول ۶. نتایج جذب آب نمونه‌ها

نمونه	وزن خشک (kg)	وزن تر (kg)	درصد جذب آب
T3	۸/۲۶۸	۸/۲۹۶	۰/۱۲
T1	۸/۳۹۴	۸/۴۱۴	۰/۲۴
T2	۸/۳۲۸	۸/۳۶	۰/۳۸
T6	۸/۱	۸/۱۵۶	۰/۶۹
T7	۸/۴۴۲	۸/۵۰۲	۰/۷۱
T4	۸/۰۸۴	۸/۱۵۶	۰/۸۹
شاهد	۸/۰۵۴	۸/۱۵	۱/۱۹
T8	۸/۳۹۲	۸/۵۱	۱/۴۱
T5	۸/۱۷۲	۸/۲۹۲	۱/۴۷
T9	۸/۱۳۶	۸/۲۵۶	۱/۴۸
T10	۸/۰۱۲	۸/۱۶	۱/۸۵

در طرح T4 مقدار جذب آب ۰/۸۹ درصد اندازه‌گیری شد. افزایش مقدار خاکستر بادی نسبت به طرح T3 موجب افزایش جذب آب گردید. با اینکه ترکیب الیاف و پوزولان همچنان عملکرد مطلوب‌تری نسبت به بتن شاهد نشان می‌دهد، اما درصد بالای خاکستر بادی می‌تواند به دلیل تأخیر بیشتر در تشکیل شبکه ژل‌های سیمانی، موجب افزایش نسبی تخلخل شود.

در طرح T5 جذب آب برابر ۱/۴۷ درصد ثبت شد که بیشترین مقدار میان طرح‌های فاقد سنگدانه‌های بازیافتی است. علت اصلی این افزایش، درصد بالاتر الیاف ماکروسنتتیک است که در صورت افزایش بیش از

خاکستر بادی در حضور سنگدانه‌های بازیافتی همیشه نتایج مثبت به همراه ندارد.

در طرح T10 مقدار جذب آب $1/85$ درصد اندازه‌گیری شد که بالاترین مقدار در بین تمامی طرح‌هاست. افزایش هم‌زمان الیاف و سنگدانه‌های بازیافتی موجب افزایش تخلخل داخلی بتن و در نهایت رشد جذب آب شده است. با وجود این افزایش، مقدار جذب آب همچنان در محدوده قابل قبول برای بتن‌های حاوی سنگدانه بازیافتی قرار دارد، هرچند عملکرد آن نسبت به سایر طرح‌ها ضعیف‌تر است.

به طور کلی، با نتیجه‌گیری از داده‌های بدست آمده از این آزمایش می‌توان به این نکته رسید که سنگدانه‌های بازیافتی موجب افزایش جذب آب در بتن می‌شوند زیرا ملات چسبیده تخلخل را در بتن افزایش می‌دهند و موجب این می‌شوند که دوام کاهش یابد (ماکول و همکاران، ۲۰۲۱). افزایش میزان الیاف ماکروستتیک جذب را کمی افزایش می‌دهد زیرا الیاف موجب ایجاد حفره در بتن می‌شود اما در ترکیب با پوزولان خاکستر بادی منجر به کاهش درصد جذب آب می‌شود. در مجموع، الیاف ماکروستتیک تأثیر متوسطی در این فرایند دارند (بولات و همکاران، ۲۰۱۴)، پوزولان خاکستر بادی جذب آب را کاهش داد زیرا پوزولان تخلخل را کم می‌کند و دوام را بهبود می‌بخشد (مارتونگ و آگراوال، ۲۰۱۲).

نتایج نشان داد که افزایش درصد سنگدانه بازیافتی به‌تنهایی معیار مناسبی برای پیش‌بینی رفتار جذب آب نیست و این پارامتر به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر مقدار هم‌زمان خاکستر بادی و حضور الیاف قرار دارد، به‌طوری که در برخی ترکیبات (مانند طرح T10) افزایش جذب آب تا حدود 1.85% مشاهده شد، در حالی که در طرح‌هایی با درصد بالاتر خاکستر بادی (مانند T7) بهبود تراکم‌بندی منجر به کاهش جذب آب حتی کمتر از نمونه شاهد گردید.

حد می‌تواند موجب ایجاد فضا‌های خالی ریز و اختلال در پیوستگی خمیر سیمان شود. کاهش مقدار خاکستر بادی نیز در کنار افزایش الیاف، تخلخل بتن را افزایش داده و جذب آب را بیشتر کرده است.

در طرح T6 مقدار جذب آب 0.69 درصد به دست آمد. حضور مصالح بازیافتی سنگدانه‌های بازیافتی به دلیل داشتن تخلخل بالا و وجود ملات قدیمی، معمولاً موجب افزایش نفوذپذیری می‌شود. با این حال، ترکیب سنگدانه‌های بازیافتی با خاکستر بادی و الیاف ماکروستتیک توانسته بخشی از اثر منفی سنگدانه‌های بازیافتی را جبران کند. وجود خاکستر بادی باعث کاهش تخلخل خمیر و نقش الیاف در بهبود انسجام ساختار بتن موجب شده جذب آب این طرح نسبت به انتظار کاهش قابل توجهی داشته باشد.

در طرح T7 مقدار جذب آب 0.71 درصد بود. افزایش مقدار سنگدانه‌های بازیافتی نسبت به T6 سبب افزایش جذب آب شده است، اما وجود مقدار بالای خاکستر بادی توانسته تا حدی اثر منفی سنگدانه‌های بازیافتی را تعدیل کند. این طرح نوعی تعادل نسبی میان ترکیبات دارد، هرچند عملکرد آن نسبت به طرح T6 اندکی ضعیف‌تر است.

در طرح T8 مقدار جذب آب 1.41 درصد به دست آمد. افزایش جذب آب نسبت به طرح T7 را می‌توان ناشی از کاهش مقدار خاکستر بادی و حضور سنگدانه‌های بازیافتی دانست. با این وجود، این طرح همچنان عملکرد قابل قبولی دارد و نشان می‌دهد که تنظیم نسبت الیاف، خاکستر بادی و سنگدانه‌های بازیافتی نقش اساسی در کنترل نفوذپذیری دارد.

در طرح T9 مقدار جذب آب برابر 1.48 درصد ثبت شد. افزایش خاکستر بادی نسبت به طرح T8 در حضور سنگدانه‌های بازیافتی باعث تغییر در ساختار میکروتخلخل و افزایش مسیرهای نفوذ آب شده است. این افزایش جزئی جذب آب نشان می‌دهد که مقدار زیاد

نتایج آزمون جذب آب نشان داد که تأثیر خاکستر بادی بر این پارامتر به میزان مصرف آن وابسته است و روند یکنواختی مشاهده نشد. در مقادیر کمتر، کاهش جزئی در جذب آب می‌تواند به اثر پرکنندگی و بهبود تراکم‌بندی ذرات نسبت داده شود. با این حال، در درصدهای بالاتر خاکستر بادی، افزایش نسبی جذب آب مشاهده گردید که احتمالاً ناشی از کاهش میزان سیمان فعال و کندی واکنش‌های پوزولانی در سنین اولیه و در نتیجه افزایش تخلخل می‌باشد.

این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از مقادیر بالای خاکستر بادی بدون به‌کارگیری تمهیدات مکمل (نظیر مواد افزودنی یا عمل‌آوری مناسب) ممکن است منجر به افزایش نفوذپذیری و جذب آب گردد.

نتایج جذب آب نشان داد که استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی منجر به افزایش این پارامتر گردید که با یافته‌های کو و پون (۲۰۱۲) همخوانی دارد. آن‌ها افزایش جذب آب در محدوده ۱۵ تا ۳۰ درصد را گزارش کرده‌اند که ناشی از تخلخل بالاتر سنگدانه‌های بازیافتی است.

در این پژوهش، طرح بهینه (T8) افزایش جذب آب حدود ۱۸.۵ درصد نسبت به نمونه شاهد نشان داد که در همین بازه قرار دارد.

با این حال، برخی مطالعات مانند توماس و همکاران (۲۰۱۳) کاهش جذب آب (حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد) را در حضور مقادیر بالای خاکستر بادی گزارش کرده‌اند که ناشی از اثر پرکنندگی و کاهش تخلخل می‌باشد.

تفاوت نتایج این پژوهش با مطالعات مذکور را می‌توان به برهم‌کنش هم‌زمان چند پارامتر، از جمله درصد بالای سنگدانه بازیافتی، نسبت آب به مواد سیمانی و شرایط عمل‌آوری نسبت داد.

۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

- نتایج آزمایش مقاومت فشاری و جذب آب نشان داد که افزایش درصد جایگزینی سنگدانه‌های

بازیافتی تأثیر منفی بر مقاومت و تأثیر مثبت بر جذب آب دارد. در طرح‌هایی با ۲۵٪ سنگدانه بازیافتی، افت مقاومت فشاری کمتر از ۱۰ درصد بود و در ترکیب با خاکستر بادی و الیاف ماکروسنتتیک طرح T8 این افت جبران و حتی منجر به افزایش مقاومت شد. اما در طرح‌هایی با ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی، مقاومت فشاری بیش از ۱۵ درصد کاهش یافت و جذب آب به طور محسوسی افزایش پیدا کرد (تا حدود ۱۸.۵ درصد). علت این رفتار را می‌توان در ضعف ناحیه‌ی انتقالی و وجود ملات قدیمی در سطح سنگدانه‌های بازیافتی دانست. بنابراین، جایگزینی ۲۵ درصدی سنگدانه‌های بازیافتی قابل قبول و اقتصادی می‌باشد.

- حضور الیاف ماکروسنتتیک منجر به بهبود قابل ملاحظه‌ی مقاومت کششی و افزایش مدول الاستیسیته بتن می‌شود. در نمونه‌هایی با ۰/۴٪ الیاف ماکروسنتتیک (مانند T3 و T8) مقاومت کششی تا حدود ۲۰ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش یافت و سختی بتن نیز بهبود پیدا کرد. در مقابل، در طرح‌هایی با ۰/۶ درصد الیاف ماکروسنتتیک (نظیر T5 و T10) افزایش بیش از حد الیاف موجب کاهش کارایی و افزایش جزئی جذب آب گردید. با این وجود، حتی در این شرایط نیز الیاف ماکروسنتتیک توانست عملکرد کششی بتن را بهبود بخشد. در نتیجه، مقدار ۰/۴ درصد الیاف ماکروسنتتیک به‌عنوان مقدار بهینه برای تقویت مقاومت کششی و مدول الاستیسیته، بدون افت کارایی، شناخته شد.

- افزودن خاکستر بادی اثر مثبت بر دوام و رشد مقاومت در سنین بلندمدت دارد، اما در سنین اولیه موجب افت نسبی مقاومت می‌شود. در طرح‌هایی با ۲۵ درصد خاکستر بادی (مانند T1 و T3) مقاومت فشاری ۲۸ روزه نسبت به شاهد افزایش یافت و

RCA و اثرات اصلاحی مواد مکمل سیمانی است. در حالی که استفاده از RCA به دلیل وجود ملات چسبیده و تخلخل بیشتر تمایل به افزایش جذب آب دارد. حضور مقادیر بیشتر خاکستر بادی می تواند از طریق اثر پرکنندگی^۱ و بهبود تراکم بندی، این اثر منفی را تا حدی جبران نماید. این موضوع نشان دهنده اهمیت طراحی چندپارامتری در بهینه سازی عملکرد دوام بتن های حاوی مصالح بازیافتی است.

• روسازی های بتنی در ایران اغلب با بارهای ترافیکی سنگین (به ویژه در کریدورهای حمل و نقل اصلی) و تنش های حرارتی شدید (نوسانات دمایی روزانه و فصلی بالا) همراه هستند. همچنین، در مناطق شمالی و کوهستانی کشور، چرخه های یخ زدگی-ذوب وجود دارد. ترکیب T8 با ایجاد اثر هم افزایی (تقویت ITZ توسط خاکستر بادی کلاس F، کنترل ترک توسط الیاف ماکروستتیک پلی پروپیلنی و جبران ضعف RCA عملکرد مکانیکی مناسب و دوام قابل قبولی ارائه می دهد که آن را برای کاربرد در روسازی های بتنی پایدار و اقتصادی در شرایط اقلیمی متنوع ایران مناسب می سازد.

۶. تأییدیه اخلاقی

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

۷. مشارکت های نویسندگان

کلیه نویسندگان در تهیه مقاله همکاری داشته اند.

۸. منابع مالی

این اثر تحت حمایت هیچ سازمان یا موسسه ای انجام نشده است.

اسلامپ نیز بهبود پیدا کرد، در حالی که مقاومت ۷ روزه اندکی کاهش داشت. در طرح های با ۵۰ درصد خاکستر بادی، نظیر T2 و T4، افت مقاومت اولیه بیش از ۱۵ درصد بود. اما در ادامه، با پیشرفت واکنش های پوزولانی، مقاومت بلندمدت افزایش یافت. بنابراین، مقدار ۲۵ درصد خاکستر بادی بهترین عملکرد را از نظر تعادل میان مقاومت، دوام و کارایی بتن نشان داد و فرضیه سوم پژوهش مورد تأیید قرار گرفت.

• تحلیل داده های آزمایشگاهی از طرح های T1 تا T10 نشان داد که طرح T8 دارای بهترین عملکرد مکانیکی و دوام می باشد. این طرح مقاومت فشاری $31/48$ مگاپاسکال، مقاومت کششی $2/81$ مگاپاسکال، مدول الاستیسیته $29/024$ گیگاپاسکال را ارائه داد. نتایج نشان داد که جذب آب در طرح T8 (حدود 1.41%) نسبت به نمونه شاهد (1.19%) افزایش یافته است که می تواند نشان دهنده افزایش تخلخل و کاهش نسبی دوام، به ویژه در شرایط محیطی مخرب نظیر چرخه های یخ زدگی و ذوب، باشد. مقادیر به دست آمده همگی در محدوده استانداردهای انجمن آمریکایی آزمون و مواد برای روسازی های بتنی قرار داشته و بیانگر بتن با دوام بالا، مقاومت مناسب و جذب کنترل شده است. بنابراین، ترکیب یاد شده به عنوان گزینه ی بهینه برای بتن های روسازی پایدار می شود. با وجود برخی بهبودها در خواص مکانیکی، افزایش جذب آب در درصدهای بالاتر خاکستر بادی به عنوان یک محدودیت بالقوه در کاربردهای مرتبط با دوام (نظیر روسازی های در معرض چرخه یخ زدگی و ذوب) باید مدنظر قرار گیرد.

• رفتار جذب آب در مخلوط های حاوی سنگدانه بازیافتی تابعی از برهم کنش بین تخلخل ذاتی

۹. تعارض منافع

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

۱۰. مراجع

- Alharthai, M., Ali, T., Qureshi, M. Z., & Ahmed, H. (2024). "Engineering characteristics in recycled aggregates concrete combined effect of fly ash, silica fume and PP fiber". *Alexandria Eng. J.*, 96: 139–150.
- Amin, A., Foster, S. J., & Gilbert, R. I. (2017). "Material characterisation of macro synthetic fibre reinforced concrete". *Cement Concrete Compos.*, 84: 124–133.
- Banthia, N., & Gupta, R. (2007). Test method for evaluation of plastic shrinkage cracking in fiber-reinforced cementitious materials. *Experimental Techniques*, 31, 44–48.
- Bolat, H., Şimşek, O., Çullu, M., Durmuş, G., & Can, Ö. (2014). "The effects of macro synthetic fiber reinforcement use on physical and mechanical properties of concrete". *Compos. Part B: Eng.*, 61: 64–68.
- Daneshfar, M., Hassani, A., Aliha, M. R. M., & Berto, F. (2017). "Evaluating mechanical properties of macro-synthetic fiber-reinforced concrete with various types and contents". *Strength Mater.*, 49(5): 618–626.
- Dopko, M., Najimi, M., Shafei, B., Wang, X., Taylor, P., & Phares, B. M. (2018). "Flexural performance evaluation of fiber-reinforced concrete incorporating multiple macro-synthetic fibers". *Transport. Res. Record*, 2672(27): 1–12.
- Eisa, M. S., Basiouny, M. E., & Youssef, A. M. (2021a). "Improvement of load carrying capacity of concrete pavement slabs using macro synthetic fibers". *Coatings*, 11(7): 833.
- Eisa, M. S., Basiouny, M. E., & Youssef, A. M. (2021b). "Effect of macro-synthetic fibers on the drying shrinkage performance of rigid pavement". *Innov. Infrastruct. Solutions*, 6(4) 212.
- Etcheberria, M., Vázquez, E., Marí, A., & Barra, M. (2007). "Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete". *Cement Concrete Res.*, 37(5): 735–742.
- Gong, Sh., Bai, L., Tan, Zh., et al. (2023). "Mechanical properties of polypropylene fiber recycled brick aggregate concrete and its influencing factors by gray correlation analysis". *Sustain.* 15(14): 11135.
- Kazmi, S. M. S., Munir, M. J., Wu, Y. F., & Patnaikuni, I. (2018). "Effect of macro-synthetic fibers on the fracture energy and mechanical behavior of recycled aggregate concrete". *Constr. Build. Mater.*, 189: 857–868.
- Kou, S., & Poon, C. S. (2012). "Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate". *Constr. Build. Mater.*, 35: 69–76.
- Li, Y., & Dai, D. H. (2012). "Influence of mixing method of mineral admixture on performance of recycled concrete". *Adv. Mater. Res.*, 598: 612–617.
- Liu, G., Tošić, N. & de la Fuente, A. (2023). "Recycling of macro-synthetic fiber-reinforced concrete and properties of new concretes with recycled aggregate and recovered fibers". *Appl. Sci.*, 13(4): 2029.
- Maier, P. L., & Durham, S. A. (2012). "Beneficial use of recycled materials in concrete mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 29: 428–437.
- Makul, N., Fediuk, R., et al. (2021). "Use of recycled concrete aggregates in production of green cement-based concrete composites: A review". *Crystals*, 11(3): 232.
- Marthong, C., & Agrawal, T. P. (2012). "Effect of fly ash additive on concrete properties". *Int. J. Eng. Res. Appl.*, 2(4): 1986–1991.
- Moradikhah, A. B., Esparham, A., & Jamshidi Avanaki, M. (2020). "Physical & mechanical properties of fiber reinforced metakaolin-based geopolymer concrete". *Constr. Build. Mater.*, 251: 118965.
- Nemkumar, B., & Onuaguluchi, O. (2022). "Recycling scrap tire-derived fibers in concrete". *Trans. Indian Nat. Acad. Eng.*, 7(1): 207–217.
- Ozbakkaloglu, T., Gholampour, A., & Xie, T. (2018). "Mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete: Effect of recycled aggregate properties and content". *J. Mater. Civ. Eng.*, 30(2): 04017275.
- Pedro, D., J. De Brito, J., & Evangelista, L. (2014). "Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete". *Constr. Build. Mater.*, 71: 141–151.
- Poon, C. S., Shui, Z. H., & Lam, L. (2004). "Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates". *Constr. Build. Mater.*, 18(6): 461–468.

- Pranav, Sh., Aggarwal, Sh., & Yang, E. H. (2020). "Alternative materials for wearing course of concrete pavements: A critical review". *Constr. Build. Mater.*, 236: 117609.
- Safari, J., Mirzaei, M., Rooholamini, H., & Hassani, A. (2018). "Effect of rice husk ash and macro-synthetic fibre on the properties of self-compacting concrete". *Constr. Build. Mater.*, 175: 371-380.
- Siddique, R. (2004). "Performance characteristics of high-volume Class F fly ash concrete". *Cement Concrete Res.*, 34(3): 487-493.
- Silva, R. V., de Brito, J., & Dhir, R. K. (2014). "Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production". *Constr. Build. Mater.*, 65: 201-217.
- Swathi, V., & Asadi, S. S. (2021). "An influence of pozzolanic materials with hybrid fibers on structural performance of concrete: A review". *Mater. Today: Proceed.*, 43(2): 1075-1078.
- Tam, V. W. Y., & Tam, C. M. (2007). "Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach". *J. Mater. Sci.*, 42(10): 3592-3602.
- Thomas, M. D. A. (2007). "Optimizing the use of fly ash in concrete". Vol. 5420, Skokie, IL, USA: Portland Cement Association.
- Thomas, C., Setién, J., Polanco, J., Alaejos, P., & Sánchez De Juan, M. (2013). "Durability of recycled aggregate concrete". *Constr. Build. Mater.*, 40: 1054-1065.
- Toghrol, A., Mehrabi, P., Shariati, M., et al. (2020). "Evaluating the use of recycled concrete aggregate and pozzolanic additives in fiber-reinforced pervious concrete with industrial and recycled fibers". *Constr. Build. Mater.*, 252: 118997.
- Tóth, M., Juhasz, K. P., & Pluzsik, A. (2017). "Effect of mixed fibers on the ductility of concrete". *J. Mater. Civ. Eng.*, 29(9): 04017082.
- Wu, Y., Gao, K., & Wu, B. (2019). "Influence of fly ash on the compressive strength of concrete containing recycled aggregate". *Emerg. Mater. Res.*, 8(3): 483-491.
- Xiao, J., Li, L., Shen, L., & Yuan, J. (2015). "Effects of strain rate on mechanical behavior of modeled recycled aggregate concrete under uniaxial compression". *Constr. Build. Mater.*, 93: 214-222.
- Yoo, D. Y., & Banthia, N. (2016). "Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review". *Cement Concrete Compos.*, 73: 267-280.