Amirkabir Journal of Civil Engineering

Amirkabir J. Civil Eng., 57(11) (2026) 1981-2010
DOI: 10.22060/ceej.2026.24576.8326

Advancements, Challenges, and Future Prospects of Structural Lightweight Concrete: Emphasizing the Role of Fly Ash in Sustainable Construction

Saeed Vahdani[1], Shahram Pour Akbar[1] *, Armin Hatami Rad[2], Jafar Najafizadeh[2]

[1] Department of of Engineering, Binaloud Institute of Higher Education, Mashhad, Iran.
[2] Department of Engineering, Islamic Azad University, Mashhad Branch, Mashhad, Iran.

ABSTRACT: Structural Lightweight Concrete (SLC) has become one of the most promising construction materials in modern civil engineering due to its potential to reduce structural dead load, enhance seismic performance, improve thermal efficiency, and contribute to sustainable development. Over recent decades, extensive research has focused on the development of various forms of lightweight concrete, including lightweight aggregate concrete, cellular and foamed concrete, fiber-reinforced lightweight concrete, nano-engineered systems, and recycled or green lightweight concretes. Despite these advances, achieving an optimal balance between reduced density, adequate mechanical performance, long-term durability, and environmental sustainability remains a major challenge. Among supplementary cementitious materials, fly ash has emerged as a key component in improving the performance of structural lightweight concrete. As a widely available industrial by-product with significant pozzolanic activity, fly ash contributes to enhanced microstructural density, improved durability, reduced cement consumption, and lower environmental impact. This review paper presents a comprehensive, critical, and forward-looking assessment of structural lightweight concrete, with particular emphasis on the role of fly ash in improving mechanical, durability, and sustainability-related properties. The study synthesizes recent experimental and analytical findings, identifies key challenges and research gaps, and outlines future directions for the development and large-scale application of fly ash–based structural lightweight concrete in sustainable construction.

Review History:

Received: Aug. 15, 2025
Revised: Dec. 20, 2025
Accepted: Jan. 02, 2026
Available Online: Feb. 19, 2026

Keywords:

Structural Lightweight Concrete
Fly Ash
Mechanical Properties
Long-term Durability
Sustainable Construction

1- Introduction

The increasing demand for sustainable, resilient, and resource-efficient infrastructure has intensified the need for advanced construction materials capable of meeting modern performance and environmental requirements [1]. Conventional normal-weight concrete, despite its widespread use, is associated with high self-weight, significant consumption of natural resources, and considerable carbon dioxide emissions arising primarily from cement production [2] [3]. In this context, structural lightweight concrete has gained growing attention as a viable alternative capable of addressing both structural and environmental challenges [4].

Structural lightweight concrete is defined as concrete with a reduced density—typically achieved through the use of lightweight aggregates, controlled porosity, or innovative material systems—while maintaining sufficient strength and durability for structural applications [5]. The reduction in dead load, often ranging from 20% to 50% compared with normal-weight concrete, allows for more efficient structural design, smaller cross-sectional dimensions, reduced reinforcement demand, and improved seismic performance [6]. Furthermore, the inherent thermal insulation properties of lightweight concrete contribute to lower operational energy consumption in buildings, supporting global efforts toward energy efficiency and greenhouse gas emission reduction [7].

Despite its advantages, the performance of structural lightweight concrete is strongly influenced by its constituent materials, production techniques, and curing regimes [8]. The wide diversity of lightweight concrete types and formulations has resulted in significant variability in mechanical properties, durability, and long-term performance [9]. Existing studies often focus on specific lightweight concrete systems, while comprehensive and integrative reviews that critically evaluate recent advancements, limitations, and future perspectives remain limited [10].

Within this framework, the incorporation of fly ash as a supplementary cementitious material has received considerable attention [11]. Fly ash not only improves workability and long-term strength development but also enhances durability and significantly reduces the environmental footprint of concrete [12]. Figure 1 illustrates the timeline of research on lightweight concrete containing fly ash from 1980 to 2025,

*Corresponding author's email: shahram.pourakbar@gmail.com

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

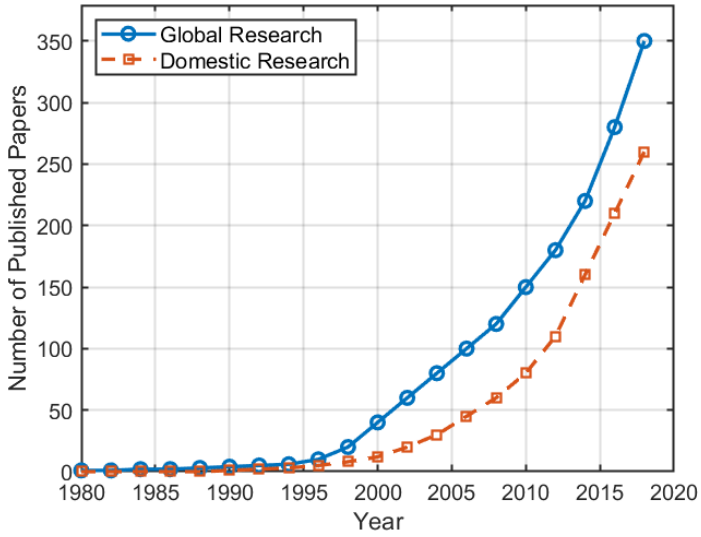


Fig. 1. Timeline of Research on Lightweight Concrete Containing Fly Ash (1980–2025).

highlighting the increasing scholarly interest and research activity over the past four decades. The present study aims to provide a comprehensive and analytical review of structural lightweight concrete, with particular emphasis on the role of fly ash in improving performance and sustainability. The paper systematically examines classification, material characteristics, production technologies, and emerging research trends, while highlighting existing challenges and future research needs.

2- Methodology

This study adopts a systematic and critical literature review methodology to analyze research related to structural lightweight concrete and the application of fly ash. Peer-reviewed journal articles, conference proceedings, technical reports, and international standards published between 1980 and 2025 were examined. Both experimental and analytical studies were included to ensure comprehensive coverage of material behavior, performance evaluation, and practical applications.

The reviewed literature was categorized based on the following criteria:

1. classification and production methods of structural lightweight concrete;
2. mechanical properties, including compressive, tensile, and flexural strength;
3. durability performance, such as permeability, freeze–thaw resistance, and chemical resistance;
4. environmental and sustainability aspects, including cement reduction and CO_2 emissions; and
5. the role and mechanisms of fly ash in improving lightweight concrete performance.

Comparative analysis was employed to identify performance trends, optimal mix design parameters, advantages, limitations, and research gaps. Particular emphasis was placed on studies investigating fly ash as a partial cement replacement or as a component of lightweight aggregate systems.

3- Results and Discussion

The reviewed studies indicate that structural lightweight concrete can be broadly classified into four main categories: lightweight aggregate concrete, cellular and foamed concrete, fiber- and nano-reinforced lightweight concrete, and recycled or green lightweight concrete. Lightweight aggregate concrete remains the most widely used form for structural applications due to its relatively high strength and predictable behavior. Cellular and foamed concretes offer extremely low densities and superior thermal insulation but are generally limited to non-structural applications because of their lower mechanical strength.

Recent research demonstrates that the incorporation of fibers and nanomaterials effectively compensates for the inherent brittleness and reduced tensile strength of lightweight concrete. Fibers enhance crack control, ductility, and energy absorption, while nanomaterials improve the microstructure and interfacial transition zone, leading to higher strength and durability.

Fly ash plays a critical role across all categories of structural lightweight concrete. Its pozzolanic reaction with calcium hydroxide results in the formation of additional calcium silicate hydrate (C–S–H), refining the pore structure and enhancing long-term strength. The spherical morphology and fine particle size of fly ash also improve workability and reduce water demand. Most studies report optimal cement replacement levels between 20% and 30%, providing a balance between early-age strength development and long-term performance enhancement.

Durability performance is significantly improved in fly ash–based lightweight concrete, with reduced permeability,

enhanced resistance to chloride and sulfate attack, and improved freeze–thaw behavior. From an environmental perspective, the partial replacement of cement with fly ash leads to substantial reductions in CO_2 emissions, promotes industrial waste recycling, and aligns with sustainable construction principles. Nevertheless, challenges remain, including variability in fly ash quality, reduced early-age strength, and the lack of comprehensive design standards specifically addressing structural lightweight concrete containing fly ash.

4- Conclusion

Structural lightweight concrete represents a key material solution for addressing the technical and environmental challenges of modern construction. Advances in material engineering, particularly through the use of fly ash, fibers, and nanomaterials, have significantly enhanced the mechanical performance, durability, and sustainability of lightweight concrete systems. Fly ash, in particular, has proven to be an effective supplementary cementitious material that improves long-term performance while reducing cement consumption and environmental impact.

Despite significant progress, further research is required to optimize mix designs, address early-age performance limitations, and develop unified standards and design guidelines. Future studies should focus on large-scale applications, long-term durability assessment, and life-cycle analysis to facilitate widespread industrial adoption. With continued research and standardization, fly ash–based structural lightweight concrete is expected to play a central role in sustainable, resilient, and energy-efficient construction.

References

[1] Agrawal, Y., Gupta, T., Sharma, R., Panwar, N. L., & Siddique, S. (2021). A comprehensive review on the performance of structural lightweight aggregate concrete for sustainable construction. Construction Materials, 1(1), 39-62.

[2] Behera, D., Liu, K. Y., Rachman, F., & Worku, A. M. (2025). Innovations and Applications in Lightweight Concrete: Review of Current Practices and Future Directions. Buildings, 15(12), 2113.

[3] Singh, N., Raza, J., Colangelo, F., & Farina, I. (2024). Advancements in Lightweight Artificial Aggregates: Typologies, Compositions, Applications, and Prospects for the Future. Sustainability, 16(21), 9329.

[4] Phiri, R., Rangappa, S. M., Siengchin, S., Oladijo, O. P., & Ozbakkaloglu, T. (2024). Advances in lightweight composite structures and manufacturing technologies: A comprehensive review. Heliyon. 10(21).

[5] Prasittisopin, L., Tuvayanond, W., Kang, T. H. K., & Kaewunruen, S. (2025). Concrete mix design of recycled concrete aggregate (rca): analysis of review papers, characteristics, research trends, and underexplored topics. Resources, 14(2), 21.

[6] Nadh, V. S., & Muthumani, K. (2017). Critical review on structural light weight concrete. International Journal of Civil Engineering and Technology, 8(2), 111-127.

[7] Siddiqui, A. R., Khan, R., & Akhtar, M. N. (2025). Sustainable concrete solutions for green infrastructure development: A review. Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies, 10(1), 108-141.

[8] Alghrairi, N. S., Aziz, F. N., AlGhazali, N. A., Rashid, S. A., Mohmed, M. Z., & Ibrahim, A. M. (2025). Physical, Mechanical, Durability and Microstructure properties of lightweight concrete containing nanomaterials: A comprehensive review. Journal of Rehabilitation in Civil Engineering, 13(2), 94-127.

[9] Lotfy, A., Hossain, K. M., & Lachemi, M. (2016). Durability properties of lightweight self-consolidating concrete developed with three types of aggregates. Construction and Building Materials, 106, 43-54.

[10] Lu, J. X. (2023). Recent advances in high strength lightweight concrete: From development strategies to practical applications. Construction and Building Materials, 400, 132905.

[11] Liao, Q., Zhao, X. D., Wu, W. W., Lu, J. X., Yu, K. Q., & Poon, C. S. (2024). A review on the mechanical performance and durability of fiber reinforced lightweight cement composites: The roles of fiber and lightweight aggregate. Journal of Building Engineering, 109121.

[12] Gautam, L., Purbe, M. K., Sharma, K. V., Kumar, C., & Kalita, P. P. (2025). Environmental impact mitigation and durability enhancement of concrete through fly ash substitution: a comprehensive review. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, 10(2), 99.

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۷، شماره ۱۱، سال ۱۴۰۴، صفحات ۱۹۸۱ تا ۲۰۱۰
DOI: 10.22060/ceej.2026.24576.8326

پیشرفت‌ها، چالش‌ها و چشم‌انداز آینده بتن سبک سازه‌ای: با تأکید بر نقش خاکستر بادی در ساخت‌وساز پایدار

سعید وحدانی[۱]، شهرام پوراکبر*[۱]، آرمین حاتمی راد[۲]، جعفر نجفی زاده[۲]

۱- دانشکده مهندسی، موسسه آموزش عالی بینالود، مشهد، ایران
۲- دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد، مشهد، ایران.

خلاصه: بتن سبک سازه‌ای (SLC) به‌عنوان یکی از مصالح نوین و کارآمد در صنعت ساخت‌وساز مدرن، به دلیل کاهش وزن مخصوص، بهبود عملکرد حرارتی و افزایش کارایی سازه‌ای، مورد توجه فزاینده‌ای قرار گرفته است. در دهه‌های اخیر، انواع متنوعی از این نوع بتن با بهره‌گیری از سنگدانه‌های سبک طبیعی و مصنوعی، بتن‌های سلولی و فومی، سیستم‌های الیاف‌دار، مواد نانو و مصالح بازیافتی توسعه یافته است. در این میان، استفاده از خاکستر بادی، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پسماندهای صنعتی، نقش مؤثری در بهبود خواص مکانیکی، دوام و کاهش اثرات زیست‌محیطی بتن سبک ایفا کرده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تلفیق فناوری‌های نوین با مصالح بازیافتی می‌تواند افق‌های تازه‌ای در بهینه‌سازی عملکرد و کاهش هزینه‌های ساخت‌وساز ایجاد کند. همچنین، ارزیابی‌های آینده‌نگر بیانگر آن است که گسترش کاربرد خاکستر بادی، همراه با تدوین استانداردهای یکپارچه، می‌تواند مسیر توسعه پایدار در پروژه‌های عمرانی را هموار سازد. این مقاله مروری، با رویکردی جامع، انتقادی و آینده‌نگر، به بررسی پیشرفت‌های اخیر، چالش‌های فنی و اجرایی، و ظرفیت‌های بالقوه انواع بتن سبک سازه‌ای می‌پردازد. همچنین نقش کلیدی خاکستر بادی در ارتقای عملکرد و کمک به توسعه پایدار در این حوزه، به‌طور ویژه تحلیل می‌شود. در پایان، شکاف‌های موجود در تحقیقات، مسیرهای پیشنهادی برای آینده و ضرورت تدوین استانداردهای جامع در این زمینه مورد تأکید قرار گرفته است.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۴
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۲۸
پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۲
ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۱۱/۳۰

کلمات کلیدی:
بتن سبک سازه‌ای
خاکستر بادی
خواص مکانیکی
دوام بلندمدت
ساخت‌وساز پایدار

۱- مقدمه

بتن سبک سازه‌ای از مهم‌ترین نوآوری‌های مهندسی عمران در چند دهه اخیر محسوب می‌شود که نقش کلیدی در تحول فناوری‌های ساخت و ساز مدرن ایفا کرده است [۱]. افزایش روزافزون جمعیت جهان، رشد شهرنشینی و نیاز به سازه‌های پایدار و اقتصادی، مهندسین و پژوهشگران را به سمت توسعه مصالحی سوق داده است که ضمن حفظ مقاومت و دوام، کاهش وزن و بهینه‌سازی عملکرد ساختاری را فراهم کنند [۲].در این میان، بتن سبک سازه‌ای با کاهش وزن مرده سازه‌ها، امکان طراحی اجزای نازک‌تر، کاهش مصرف فولاد و تسهیل در حمل و نقل و نصب را فراهم می‌آورد، که این موضوعات به نوبه خود هزینه‌ها و اثرات زیست‌محیطی ساخت‌وساز را کاهش می‌دهند [۳].

یکی از مهم‌ترین مزایای بتن سبک، تأثیر مثبت آن در بهبود کارایی انرژی ساختمان‌ها است [۴]. به دلیل وزن کمتر و خاصیت عایق‌بندی حرارتی بهتر، ساختمان‌های ساخته شده با بتن سبک، مصرف انرژی کمتری در گرمایش و سرمایش دارند [۵]. این امر در راستای اهداف توسعه پایدار و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای اهمیت بسزایی دارد [۶]. همچنین، بتن سبک به دلیل ویژگی‌های خاص خود، امکان اجرای سریع‌تر پروژه‌ها، کاهش بار مرده در زلزله و افزایش عمر مفید سازه‌ها را فراهم می‌کند [۷].

با این وجود، پیچیدگی‌ها و تنوع بسیار زیاد در ترکیبات، فرآیندهای تولید و خواص بتن سبک، نیازمند مروری جامع و عمیق است که بتواند ضمن تحلیل انتقادی پیشرفت‌های علمی و فناوری، چالش‌ها و محدودیت‌های فعلی را نیز شناسایی کند [۸]. بررسی‌های موجود عمدتاً به گونه‌ای جزئی یا محدود به یک نوع خاص از بتن سبک پرداخته‌اند و نگاه چندجانبه و آینده‌نگر نسبت به این حوزه کمتر مشاهده شده است [۹]. این مقاله با هدف پر کردن این خلأ، تلاش می‌کند تصویری گسترده و تحلیلی از بتن سبک سازه‌ای ارائه دهد که شامل طبقه‌بندی کامل انواع بتن‌های سبک، بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی، تحلیل فناوری‌های نوین تولید و عمل‌آوری و ارزیابی چالش‌های تحقیقاتی و اجرایی می‌باشد.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: shahram.pourakbar@gmail.com

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

در این راستا، تمرکز ویژه‌ای بر نقش خاکستر بادی[1] به عنوان یک ماده افزودنی پایدار و موثر در بهبود عملکرد بتن سبک گذاشته شده است. خاکستر بادی، به‌عنوان یکی از پسماندهای صنعتی فراوان که قابلیت بهره‌برداری گسترده در صنعت ساخت‌وساز دارد، علاوه بر کاهش هزینه‌های تولید، موجب بهبود دوام، مقاومت مکانیکی و ویژگی‌های زیست‌محیطی بتن می‌شود [۱۰]. اهمیت خاکستر بادی در زمینه بتن سبک، نه تنها در پژوهش‌های داخلی بلکه در مطالعات بین‌المللی نیز مورد توجه قرار گرفته است و بررسی دقیق این موضوع می‌تواند به توسعه فناوری‌های ساخت سبز و پایدار کمک شایانی نماید [۱۱].

هدف اصلی این مقاله، ارائه یک مروری جامع، انتقادی و آینده‌نگر بر بتن سبک سازه‌ای است که ضمن بررسی انواع مختلف بتن سبک و خواص آن‌ها، پیشرفت‌های نوین در حوزه فناوری‌های تولید، مواد افزودنی و عملکرد بهینه را تشریح کرده و چالش‌ها و شکاف‌های پژوهشی موجود را مورد تحلیل قرار دهد. ساختار مقاله به گونه‌ای طراحی شده است که ابتدا به مبانی و طبقه‌بندی بتن‌های سبک پرداخته، سپس نقش ویژه خاکستر بادی و کاربردهای آن به طور مفصل بررسی می‌شود. در ادامه پیشرفت‌های نوین، چالش‌های تحقیقاتی و اجرایی و نهایتاً چشم‌اندازهای آینده توسعه این حوزه مطرح می‌گردد. این رویکرد جامع، هم برای پژوهشگران و مهندسان ساخت و ساز و هم برای سیاست‌گذاران و تصمیم‌گیرندگان حوزه عمران، نقشه راهی روشن و مستدل ارائه می‌کند تا بتوانند گام‌های مؤثری در جهت ارتقاء کیفیت، دوام و پایداری سازه‌ها بردارند.

با توجه به اهمیت روزافزون مسائل زیست‌محیطی و توسعه پایدار در مهندسی عمران، انتظار می‌رود نتایج و تحلیل‌های ارائه شده در این مقاله بتواند نقش مؤثری در توسعه فناوری‌های نوین بتن سبک، به ویژه بتن سبک با افزودنی‌های پایدار همچون خاکستر بادی ایفا کند و زمینه را برای تحقیقات آتی و کاربردهای صنعتی آن فراهم آورد.

۲- مبانی و طبقه‌بندی بتن‌های سبک سازه‌ای

بتن سبک سازه‌ای[2] (SLC)به دلیل مزایای فراوانی همچون کاهش وزن مرده سازه (حدود ۲۰ تا ۵۰ درصد)، بهبود عملکرد لرزه‌ای، کاهش مصرف انرژی در فرآیند ساخت و بهره‌برداری و نقش آن در توسعه پایدار، یکی از موضوعات مهم و رو به رشد در مهندسی عمران است [۱۲]. با این حال، بهره‌گیری مؤثر از این نوع بتن مستلزم ایجاد توازن دقیق میان کاهش وزن و حفظ خواص مکانیکی و دوام بلندمدت است؛ موضوعی که در بسیاری از مطالعات به‌عنوان چالش اصلی بتن‌های سبک مطرح شده است.

تعریف دقیق این نوع بتن، نخستین گام برای درک ویژگی‌ها و دسته‌بندی‌های آن است. طبق استاندارد ASTM C330، بتن سبک سازه‌ای به بتنی اطلاق می‌شود که وزن مخصوص خشک آن کمتر از ۱۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب بوده و در عین حال مقاومت فشاری کافی برای کاربردهای سازه‌ای (معمولاً در بازه ۱۷ تا ۲۸ مگاپاسکال) را تأمین کند [۱۳]. استانداردهای دیگری مانند EN 206-1 و BS 8500 نیز معیارهای مشابهی ارائه کرده‌اند که همگی همگی بر کنترل هم‌زمان وزن مخصوص، مقاومت و دوام تاکید دارند [۱۴].

طبقه‌بندی بتن‌های سبک سازه‌ای معمولاً بر اساس نوع سنگدانه مصرفی، روش ایجاد تخلخل و نوع افزودنی‌های معدنی و شیمیایی انجام می‌شود [۱۵]. این طبقه‌بندی صرفاً جنبه توصیفی ندارد، بلکه مبنایی برای انتخاب طرح اختلاط بهینه متناسب با نیاز سازه، شرایط محیطی و محدودیت‌های اجرایی محسوب می‌شود [۱۶]. به‌طور کلی، بتن‌های سبک سازه‌ای را می‌توان در چهار گروه اصلی طبقه‌بندی کرد که در ادامه، مهم‌ترین آن‌ها با رویکردی تحلیلی بررسی می‌شود.

۲- ۱- بتن سبک با سنگدانه‌های سبک[3]

یکی از قدیمی‌ترین و رایج‌ترین روش‌ها برای تولید بتن سبک، جایگزینی سنگدانه‌های معمولی با سنگدانه‌های سبک است [۱۷]. این سنگدانه‌ها یا از منابع طبیعی مانند پوکه معدنی (پومیس)، پرلیت و ورمیکولیت استخراج می‌شوند یا به صورت مصنوعی و در فرآیندهای کنترل شده تولید می‌گردند، مانند لیکا[4]، شیل منبسط‌شده، سرباره منبسط‌شده و خاکستر بادی منبسط‌شده [۱۸]. استفاده از این سنگدانه‌ها معمولاً منجر به کاهش وزن مرده سازه تا حدود ۳۰ تا ۵۰ درصد نسبت به بتن معمولی می‌شود [۱۹]، در حالی که مقاومت فشاری بتن سبک سازه‌ای در بسیاری از مطالعات در بازه ۲۰ تا ۴۵ مگاپاسکال گزارش شده است [۲۰]. علاوه بر کاهش وزن، بهبود عملکرد حرارتی و کاهش ضریب انتقال حرارت تا حدود ۱۵ تا ۳۰ درصد از مزایای مهم این نوع بتن به‌شمار می‌رود [۲۱]. علاوه بر کاهش وزن، بهبود عملکرد حرارتی و کاهش ضریب انتقال حرارت تا حدود ۱۵ تا ۳۰ درصد از مزایای مهم این نوع بتن به‌شمار می‌رود [۲۲]. جذب آب بالای سنگدانه‌های سبک نیز یکی از چالش‌های اجرایی مهم است که در صورت

1. Fly Ash
2. Structural Lightweight Concrete (SLC)
3. Natural and Artificial Lightweight Aggregates
4. Light Expanded Clay Aggregate

عدم پیش‌اشباع یا کنترل دقیق نسبت آب به سیمان، می‌تواند باعث افت اسلامپ، ناپایداری خواص مکانیکی و کاهش دوام بتن گردد [۲۳]. همچنین در برخی پژوهش‌ها، افت عملکرد بتن سبک در برابر سیکل‌های ذوب و انجماد گزارش شده است [۲۴].

از منظر تاریخی، هرچند استفاده محدود از سنگدانه‌های سبک در برخی بناهای سنتی مشاهده شده است، اما توسعه علمی و مهندسی این نوع بتن از اواسط قرن بیستم آغاز گردید [۲۵]. در دهه‌های اخیر، پیشرفت فناوری تولید سنگدانه‌های سبک مصنوعی و انجام آزمایش‌های گسترده آزمایشگاهی و میدانی، موجب کاربرد گسترده‌تر بتن سبک در پروژه‌های بزرگ عمرانی و ساختمانی شده است [۲۶].

در تحقیقات داخلی، تمرکز اولیه عمدتاً بر استفاده از پوکه‌های معدنی طبیعی بوده است [۲۷]. نتایج این مطالعات نشان داد که اگرچه پوکه‌های معدنی موجب کاهش وزن مخصوص و بهبود خواص حرارتی بتن می‌شوند، اما بدون اصلاح دانه‌بندی یا استفاده از مواد مکمل سیمانی، دستیابی به مقاومت‌های سازه‌ای پایدار با محدودیت مواجه است [۲۸] [۲۹]. در ادامه، پژوهش‌ها به سمت استفاده ترکیبی از سنگدانه‌های سبک طبیعی و مصنوعی همراه با افزودنی‌های معدنی و شیمیایی سوق یافت [۳۰] که منجر به افزایش مقاومت فشاری، کاهش جذب آب و بهبود دوام بتن شد و کاربرد آن را در بلوک‌ها، قطعات پیش‌ساخته و دیوارهای جداکننده گسترش داد [۳۱].

از سال ۲۰۱۶ به بعد، تمرکز اصلی مطالعات داخلی بر تولید بتن سبک سازه‌ای با قابلیت تحمل بارهای ثقلی و جانبی معطوف شد [۳۲]. نتایج این تحقیقات نشان داد که بتن سبک حاوی سنگدانه‌های سبک مصنوعی و مواد مکمل سیمانی می‌تواند عملکرد لرزه‌ای قابل قبولی داشته و به‌عنوان گزینه‌ای مناسب در مناطق زلزله‌خیز مطرح شود [۳۳]. همچنین افزودن نانومواد موجب افزایش حدود ۱۰ تا ۲۵ درصدی مقاومت فشاری و کاهش نفوذپذیری گزارش شده است [۳۴].

در سطح جهانی، روند تحقیقات ابتدا بر توسعه سنگدانه‌های سبک مصنوعی متمرکز بود [۳۵]، اما در سال‌های اخیر استفاده از مواد پوزولانی نظیر خاکستر بادی به‌عنوان جایگزین جزئی سیمان، با هدف بهبود دوام و کاهش اثرات زیست‌محیطی، مورد توجه ویژه قرار گرفته است [۳۶]. تمرکز پژوهش‌های نوین بر تولید بتن‌های سبک با کارایی بالا، کاهش مصرف انرژی در فرآیند تولید و بهبود عملکرد در شرایط محیطی شدید است [۳۷] [۳۸]. امروزه، کاربرد بتن سبک در سازه‌های مرتفع، پل‌ها، کف‌های پیش‌تنیده و اعضای باربر اصلی روندی رو به رشد دارد [۳۹].

در مجموع، اگرچه بتن سبک با سنگدانه‌های سبک پتانسیل بالایی در کاهش وزن و بهبود عملکرد لرزه‌ای دارد، موفقیت آن به‌شدت وابسته به کنترل دقیق طرح اختلاط، نوع سنگدانه، میزان جذب آب و استفاده هم‌زمان از مواد مکمل سیمانی است. در غیر این صورت، مزایای کاهش وزن می‌تواند با افت مقاومت و دوام خنثی شود.

۲- ۲- بتن‌های سلولی و فومی[1]

در میان انواع بتن‌های سبک سازه‌ای، گروهی از بتن‌ها با ایجاد حباب‌های کنترل‌شده هوا یا گاز در ساختار خمیر سیمان، کاهش چشمگیر وزن نهایی بتن را امکان‌پذیر می‌سازند [۴۰]. این گروه شامل بتن هوادار اتوکلاوی شده[2] (AAC)، بتن هوادار غیراتوکلاوی[3] و بتن فومی[4] است [۴۱]. ساختار متخلخل این بتن‌ها، علاوه بر کاهش وزن مخصوص، موجب بهبود قابل توجه خواص حرارتی و صوتی می‌شود [۴۲].

یکی از مهم‌ترین مزایای بتن‌های سلولی و فومی، چگالی بسیار پایین آن‌هاست؛ به‌طوری که در برخی طرح‌های اختلاط، چگالی بتن به کمتر از ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌رسد [۴۱]. این ویژگی، در کنار ضریب هدایت حرارتی پایین و جذب صوت مناسب، این بتن‌ها را به گزینه‌ای کارآمد برای اجزای غیرباربر، پانل‌های ساختمانی و دیوارهای جداکننده تبدیل کرده است. همچنین سهولت قالب‌گیری، شکل‌پذیری بالا و کاهش وزن قطعات، موجب تسهیل اجرا و کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل و نصب می‌شود [۴۳].

با وجود این مزایا، محدودیت‌های مکانیکی جدی کاربرد بتن‌های سلولی و فومی را در سازه‌های باربر محدود می‌کند. مقاومت فشاری این بتن‌ها معمولاً به‌طور قابل توجهی کمتر از سایر انواع بتن سبک بوده و غالباً در بازه ۲ تا ۷ مگاپاسکال گزارش می‌شود [۴۴]. افزایش میزان تخلخل، هرچند به کاهش وزن کمک می‌کند، اما در صورت عدم کنترل دقیق، می‌تواند موجب افت شدید مقاومت، افزایش نفوذپذیری و کاهش دوام بتن شود. از این‌رو، فرآیند تولید این بتن‌ها نیازمند کنترل دقیق یکنواختی حباب‌ها، پایداری فوم و شرایط عمل‌آوری است؛ در غیر این صورت، عملکرد مکانیکی و دوام بتن به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد [۴۵].

از منظر تاریخی، بتن‌های سلولی و فومی از دهه ۱۹۵۰ به‌عنوان مصالح سبک و عایق حرارتی و صوتی مورد توجه قرار گرفتند. در دهه ۱۹۸۰، تمرکز تحقیقات بر بهبود مقاومت مکانیکی و دوام این بتن‌ها قرار گرفت و نتایج

1. Cellular and Foamed Concrete
2. Autoclaved Aerated Concrete (AAC)
3. Non-Autoclaved Aerated Concrete
4. Foamed Concrete

نشان داد که افزودن مواد پوزولانی نظیر خاکستر بادی و میکروسیلیس می‌تواند مقاومت و دوام را به‌طور محسوسی افزایش دهد [۴۶]. هم‌زمان، توسعه فناوری تولید فوم امکان کنترل بهتر اندازه و توزیع حباب‌ها را فراهم کرد که به بهبود خواص حرارتی و صوتی انجامید [۴۷]. در دهه ۱۹۹۰، پژوهش‌ها به استفاده از افزودنی‌های شیمیایی و فعال‌کننده‌های سطحی برای افزایش پایداری فوم و کاهش نفوذپذیری معطوف شد که منجر به تولید بتن‌های فومی با چگالی کمتر و عملکرد مکانیکی بهینه‌تر گردید [۴۸].

از اوایل دهه ۲۰۰۰، استفاده از مواد بازیافتی و ضایعات صنعتی مانند سرباره کوره‌ها و خاکستر بادی در تولید بتن‌های سلولی و فومی گسترش یافت [۴۹]. این رویکرد، علاوه بر کاهش هزینه‌های تولید، مزایای زیست‌محیطی قابل توجهی نیز به همراه داشت. پیشرفت فناوری‌های تصویربرداری و تحلیل میکروسکوپی نیز امکان بررسی دقیق ساختار داخلی این بتن‌ها را فراهم کرد و منجر به ارائه فرمولاسیون‌های بهینه‌تر شد [۴۷]. در سال‌های اخیر، بتن‌های سلولی و فومی به‌عنوان مصالح کلیدی در ساختمان‌های پایدار و هوشمند مطرح شده‌اند و عملکرد آن‌ها در برابر حرارت، صوت، رطوبت و حتی بارهای لرزه‌ای در قالب اجزای غیربابر مورد مطالعه قرار گرفته است [۴۵]. همچنین استفاده از نانوفناوری برای بهبود مقاومت مکانیکی، کاهش نفوذپذیری و افزایش دوام این بتن‌ها در حال گسترش است و نتایج اولیه حاکی از بهبود قابل توجه خواص عملکردی آن‌هاست [۵۰].

در ایران، نخستین مطالعات علمی درباره بتن‌های سلولی و فومی از اواخر دهه ۱۹۸۰ آغاز شد و در ابتدا بر شناخت خواص پایه و مواد اولیه تمرکز داشت. در دهه ۱۹۹۰، پژوهش‌ها به سمت بهینه‌سازی فرمولاسیون‌ها برای افزایش مقاومت و کاهش جذب آب سوق پیدا کرد [۵۱]. استفاده از مواد پوزولانی بومی مانند خاکستر بادی و سرباره در این دوره، نقش مهمی در بهبود دوام بتن‌های سلولی ایفا کرد [۵۲]. در دهه ۲۰۰۰، اثر شرایط محیطی نظیر دما و رطوبت بر عملکرد این بتن‌ها مورد بررسی قرار گرفت و فرآیندهای تولید بهینه‌تر شدند [۵۳]. در سال‌های اخیر، بتن‌های سلولی و فومی در برخی پروژه‌های عمرانی کشور، به‌ویژه به‌عنوان اجزای سبک در سازه‌های مقاوم در برابر زلزله، مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۵۴]. پژوهش‌های نوین نیز بر به‌کارگیری فناوری نانو برای افزایش مقاومت، دوام و خواص ضدآب این بتن‌ها متمرکز شده‌اند که نتایج اولیه آن‌ها امیدوارکننده است [۵۵]. علاوه بر این، مطالعاتی در زمینه ترکیب بتن‌های سلولی با سایر مصالح نوین و بررسی عملکرد آن‌ها در شرایط اقلیمی متنوع ایران در حال انجام است [۵۶].

به‌طور کلی، بتن‌های سلولی و فومی به دلیل وزن بسیار کم و عملکرد حرارتی مناسب، گزینه‌ای مطلوب برای اجزای غیربابر و کاربردهای خاص هستند؛ اما محدودیت‌های مقاومت مکانیکی، نفوذپذیری و حساسیت بالای فرآیند تولید، استفاده سازه‌ای گسترده از آن‌ها را با چالش مواجه می‌کند. توسعه فرمولاسیون‌های بهینه، استفاده هدفمند از مواد پوزولانی و نانو مواد و کنترل دقیق فرآیند تولید، شرط اصلی گسترش ایمن کاربرد این نوع بتن‌ها در آینده خواهد بود.

۲- ۳- بتن‌های سبک تقویت‌شده با الیاف و نانو مواد[1]

با توسعه فناوری‌های نوین در مهندسی مصالح، استفاده از الیاف و نانو مواد به‌عنوان راهکاری مؤثر برای جبران ضعف‌های ذاتی بتن‌های سبک سازه‌ای مورد توجه قرار گرفته است. این افزودنی‌ها با هدف بهبود خواص مکانیکی، افزایش دوام و ارتقای رفتار سازه‌ای بتن‌های سبک به کار می‌روند [۵۷]. بتن‌های سبک تقویت‌شده با الیاف شامل انواع الیاف فولادی، پلی‌پروپیلن، شیشه‌ای، کربنی و الیاف طبیعی هستند که نقش مؤثری در افزایش مقاومت کششی، خمشی و جذب انرژی ایفا می‌کنند.

مطالعات نشان می‌دهد که افزودن الیاف به بتن‌های سبک می‌تواند مقاومت خمشی را تا حدود ٪۳۰–٪۷۰ و ظرفیت جذب انرژی را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد، در حالی که گسترش و عرض ترک‌ها به‌طور مؤثری کنترل می‌شود [۵۸]. این ویژگی، به‌ویژه در سازه‌های تحت بارهای دینامیکی و لرزه‌ای اهمیت دارد، زیرا رفتار ترد بتن‌های سبک معمولی را به رفتاری شکل‌پذیرتر تبدیل می‌کند.

از سوی دیگر، فناوری نانو امکان اصلاح ریزساختار بتن در مقیاس میکروسکوپی را فراهم کرده است. افزودن نانو موادی نظیر نانو سیلیکا، نانو رس، نانو اکسید تیتانیوم و گرافن موجب کاهش تخلخل‌های موئینه، بهبود ناحیه انتقالی بین خمیر سیمان و سنگدانه و افزایش تراکم ماتریس سیمانی می‌شود [۵۹]. نتایج پژوهش‌ها حاکی از آن است که استفاده از نانو سیلیکا می‌تواند مقاومت فشاری بتن‌های سبک را تا ٪۲۰–٪۴۰ افزایش داده و نفوذپذیری یون‌های مخرب مانند کلر و سولفات را به‌طور محسوسی کاهش دهد [۶۰].

ترکیب هم‌زمان الیاف و نانو مواد، اثر هم‌افزایی قابل توجهی ایجاد می‌کند. در این حالت، الیاف مسئول کنترل ترک‌های ماکروسکوپی و جذب انرژی بوده و نانو مواد با اصلاح ریزساختار، از تشکیل و گسترش

1. Fiber-Reinforced and Nano-Engineered Lightweight Concrete

ترک‌های ریز جلوگیری می‌کنند. این رویکرد منجر به تولید بتن‌های سبک با عملکرد مکانیکی بالا، دوام ارتقایافته و رفتار مناسب در برابر بارهای لرزه‌ای و ضربه‌ای می‌شود [۶۱]. چنین ویژگی‌هایی استفاده از این بتن‌ها را در سازه‌های مرتفع، پل‌ها، سازه‌های دریایی و مناطق با شرایط محیطی شدید توجیه‌پذیر می‌سازد [۶۲].

با وجود این مزایا، بتن‌های سبک تقویت‌شده با الیاف و نانو مواد با چالش‌های اجرایی و اقتصادی نیز همراه هستند. هزینه بالای برخی الیاف پیشرفته و نانو مواد، یکی از محدودیت‌های اصلی توسعه کاربرد صنعتی این بتن‌هاست [۶۳]. علاوه بر آن، اختلاط یکنواخت الیاف و نانو ذرات نیازمند تجهیزات مناسب و کنترل دقیق فرآیند تولید است؛ در غیر این صورت، پدیده تجمع ذرات یا گره‌خوردگی الیاف می‌تواند منجر به کاهش عملکرد مکانیکی و ایجاد نواحی ضعیف در بتن شود [۶۴]. بنابراین، کنترل کیفیت دقیق در مراحل طراحی، اختلاط و اجرا، شرط اساسی بهره‌برداری موفق از این نوع بتن‌ها محسوب می‌شود [۶۵].

از منظر تاریخی، کاربرد الیاف در بتن از دهه ۱۹۶۰ میلادی آغاز شد و به‌تدریج با توسعه دانش مهندسی، بهینه‌سازی نوع، طول و درصد الیاف در بتن‌های سبک مورد توجه قرار گرفت [۶۶]. از اوایل قرن ۲۱، ورود فناوری نانو به صنعت بتن موجب جهش قابل توجهی در بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن‌های سبک تقویت‌شده شد [۶۷]. در سطح جهانی، پژوهش‌ها نشان داده‌اند که ترکیب نانو سیلیکا و الیاف می‌تواند رفتار دینامیکی بتن‌های سبک را به‌طور محسوسی بهبود داده و آسیب‌پذیری آن‌ها در برابر زلزله را کاهش دهد [۶۸].

در ایران، تحقیقات در زمینه بتن‌های سبک الیافی از اواخر دهه ۱۹۸۰ آغاز شد و در دهه‌های بعد، استفاده از الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن برای کنترل ترک‌خوردگی و افزایش مقاومت خمشی توسعه یافت [۶۹]. با ورود فناوری نانو، مطالعات ترکیبی الیاف و نانو سیلیکا نشان داد که این رویکرد می‌تواند مقاومت، دوام و عملکرد لرزه‌ای بتن‌های سبک را به‌طور هم‌زمان بهبود بخشد [۷۰] [۷۱]. در سال‌های اخیر، این نوع بتن‌ها به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای سازه‌های مقاوم در برابر زلزله و پروژه‌های خاص در شرایط اقلیمی متنوع کشور مطرح شده‌اند [۷۲].

به‌ویژه گرافن و نانوسیلیکا به‌عنوان مواد افزودنی پیشرفته، با ایجاد شبکه‌های ساختاری متراکم‌تر در ماتریس سیمانی، موجب بهبود پیوند خمیر–سنگدانه، کاهش تخلخل مؤثر و در نتیجه افزایش قابل توجه دوام و خواص مکانیکی بتن‌های سبک تقویت‌شده شده‌اند [۵۵]. با این حال، مطالعات نشان می‌دهد که دستیابی به این مزایا به‌شدت وابسته به دوز مصرف، یکنواختی توزیع نانوذرات و سازگاری آن‌ها با نوع الیاف مصرفی است.

در سال‌های اخیر، تمرکز تحقیقات به سمت توسعه بتن‌های بسیار سبک، فوق‌مقاوم و خودترمیم‌شونده با بهره‌گیری هم‌زمان از الیاف و نانومواد سوق یافته است؛ رویکردی که هدف آن رفع ضعف‌های ذاتی بتن سبک در برابر ترک‌خوردگی و افت دوام بلندمدت است. در این راستا، فناوری‌های نوین ساخت و تحلیل‌های میکروسکوپی پیشرفته نقش کلیدی در شناسایی مکانیزم‌های عملکرد و ارائه فرمولاسیون‌های بهینه ایفا کرده‌اند [۷۳].

در ایران، پژوهش‌ها در زمینه بتن‌های سبک تقویت‌شده با الیاف از اواخر دهه ۱۹۸۰ میلادی آغاز شد و در دهه ۱۹۹۰، استفاده از الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن به‌عنوان راهکاری مؤثر برای افزایش مقاومت خمشی و کنترل ترک‌خوردگی به‌طور گسترده مورد توجه قرار گرفت [۷۴]. در این دوره، تمرکز اصلی پژوهشگران بر بهینه‌سازی درصد، طول و نوع الیاف و بررسی اثر آن‌ها بر خواص مکانیکی و دوام بتن بود [۷۵].

با ورود فناوری نانو در دهه ۲۰۰۰، تحقیقات ترکیبی بر استفاده از نانوسیلیکا همراه با الیاف در بتن‌های سبک آغاز شد [۷۶]. نتایج این مطالعات نشان داد که این ترکیب می‌تواند به‌طور هم‌زمان مقاومت خمشی را افزایش داده، نفوذپذیری را کاهش داده و رفتار بتن را در برابر بارهای دینامیکی و شرایط محیطی سخت بهبود دهد [۷۷]. علاوه بر این، پژوهش‌هایی درباره کاربرد سایر نانومواد نظیر نانو اکسیدهای فلزی و نقش آن‌ها در ارتقای عملکرد بتن‌های سبک تقویت‌شده در حال انجام است که نتایج اولیه آن‌ها امیدوارکننده گزارش شده است [۷۸].

در سال‌های اخیر، بتن‌های سبک تقویت‌شده با الیاف و نانومواد به‌عنوان گزینه‌ای کاربردی برای پروژه‌های عمرانی، به‌ویژه در مناطق زلزله‌خیز کشور مطرح شده‌اند [۷۹]. مطالعات گسترده‌ای عملکرد این بتن‌ها را در شرایط اقلیمی متنوع ایران، رفتار سازه‌ای در برابر زلزله و دوام بلندمدت در محیط‌های خورنده و متغیر مورد ارزیابی قرار داده‌اند[۸۰]. همچنین، بهره‌گیری از آنالیزهای میکروسکوپی و روش‌های پیشرفته تصویربرداری امکان بررسی دقیق‌تر تعامل بین الیاف، نانومواد و ماتریس سیمانی را فراهم کرده و به بهینه‌سازی طرح‌های اختلاط و توسعه بتن‌هایی با عملکرد بالا منجر شده است [۸۱].

به‌طور کلی، روند تحقیق و توسعه در زمینه بتن‌های سبک تقویت‌شده با الیاف و نانومواد – چه در سطح جهانی و چه در ایران –نشان‌دهنده حرکت

به‌سوی مصالحی با وزن کمتر، مقاومت بالاتر و دوام بیشتر است. با وجود چالش‌هایی نظیر هزینه تولید و پیچیدگی اختلاط، پیشرفت فناوری نانو، تنوع الیاف و بهبود روش‌های ساخت، انتظار می‌رود این نوع بتن‌ها در آینده به‌طور گسترده‌تری در سازه‌های پیشرفته، پایدار و مقاوم در برابر شرایط سخت محیطی و بارهای دینامیکی مورد استفاده قرار گیرند [۸۲].

۲- ۴- بتن‌های سبک بازیافتی و سبز [1]

با افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی و ضرورت کاهش مصرف منابع طبیعی، بتن‌های سبک بازیافتی و سبز به عنوان جایگزینی پایدار مطرح شده‌اند [۸۳]. این نوع بتن‌ها از سنگدانه‌های بازیافتی حاصل از ضایعات ساختمانی، خاکستر بادی، سرباره کوره‌ها، ضایعات پلاستیکی، خرده لاستیک و مواد زیستی مانند الیاف گیاهی و ضایعات کشاورزی تولید می‌شوند [۸۴].

استفاده از مصالح بازیافتی در تولید بتن، به‌ویژه بتن‌های سبک و تقویت‌شده، رویکردی مؤثر برای حفظ منابع طبیعی و کاهش ضایعات ساختمانی محسوب می‌شود. این اقدام علاوه بر کاهش استخراج مواد خام، پسماندهای ساختمانی، صنعتی و کشاورزی را که معمولاً به زباله تبدیل می‌شوند، دوباره وارد چرخه تولید کرده و به مصالح با ارزش افزوده بالا تبدیل می‌کند [۸۵]. بهره‌گیری از این مواد بازیافتی همچنین موجب کاهش چشمگیر هزینه‌های تأمین مصالح اولیه و ایجاد ارزش اقتصادی قابل توجه می‌شود [۸۶]. از نظر زیست‌محیطی، جایگزینی بخشی از مصالح سنتی با ضایعات صنعتی و کشاورزی، انتشار گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه دی‌اکسیدکربن، و اثرات منفی محیط‌زیستی را کاهش می‌دهد [۸۷]. این عوامل در مجموع، گام مهمی در جهت ارتقاء توسعه پایدار در صنعت ساختمان و کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی آن به شمار می‌روند.

با وجود این مزایا، استفاده از مصالح بازیافتی با محدودیت‌ها و چالش‌هایی نیز همراه است. مهم‌ترین چالش، عدم یکنواختی خواص فیزیکی و مکانیکی مصالح بازیافتی است که بر عملکرد نهایی بتن تأثیر می‌گذارد و نیازمند کنترل کیفیت دقیق در تولید و اجراست [۸۸]. در برخی موارد، مقاومت مکانیکی بتن‌های حاوی مصالح بازیافتی نسبت به بتن‌های معمولی کاهش می‌یابد، که با انتخاب دقیق نوع، درصد و کیفیت مصالح بازیافتی می‌توان آن را به حداقل رساند [۸۹]. تغییر ویژگی‌های مصالح بازیافتی همچنین ممکن است باعث مشکلات اجرایی مانند تغییر در میزان آب مصرفی، روانی، زمان گیرش و دیگر خواص بتن شود؛ بنابراین طراحی مخلوط و اجرای سازه‌ها نیازمند دقت بالاتری است [۹۰]. باوجود این چالش‌ها، تحقیقات و فناوری‌های نوین بازیافت و کنترل کیفیت چشم‌انداز مثبتی برای استفاده گسترده و ایمن از مصالح بازیافتی فراهم کرده‌اند [۹۱].

نخستین تلاش‌ها برای استفاده از مصالح بازیافتی در بتن‌های سبک و سبز به دهه ۱۹۸۰ بازمی‌گردد [۹۲]. در این دوره، ضایعات صنعتی مانند خاکستر بادی و سرباره‌های کوره ذوب آهن به عنوان جایگزین بخشی از سیمان یا سنگدانه‌ها بررسی شدند [۹۳]. دهه ۱۹۹۰ با پیشرفت فناوری بازیافت و افزایش دغدغه‌های زیست‌محیطی، استفاده از طیف گسترده‌ای از مصالح بازیافتی مانند خرده شیشه، خرده لاستیک، ضایعات پلاستیکی، پسماندهای کشاورزی و ضایعات ساختمانی گسترش یافت [۹۴]. در این دوره، علاوه بر خواص مکانیکی، دوام و وزن بتن، اثرات زیست‌محیطی و کاهش ردپای کربن نیز بررسی شد [۹۵].

از اوایل دهه ۲۰۰۰، استفاده صنعتی‌تر از مصالح بازیافتی در بتن‌های سبک آغاز شد و پروژه‌های آزمایشی و نیمه صنعتی اجرا شدند [۹۶]. بتن‌های سبک شامل خاکستر بادی، ضایعات پلیمری، الیاف پلاستیکی، خرده آجر و شیشه بازیافتی، سرباره‌های صنعتی و خاکستر زیستی رواج بیشتری یافت. مطالعات گسترده‌ای بر مدل‌سازی رفتار مکانیکی، دوام، ارزیابی چرخه عمر و تحلیل اثرات زیست‌محیطی انجام شد و استانداردها و دستورالعمل‌های فنی تدوین گردید [۹۷]. از سال ۲۰۱۰، ترکیب نانو مواد، مصالح بازیافتی و فناوری‌های نوین در تولید بتن‌های سبک سبز رایج شد و این بتن‌ها با عملکرد مکانیکی بالا، دوام قابل قبول و سهم بالای مصالح بازیافتی در پروژه‌های عمرانی، ساختمانی، زیرساخت‌های شهری و حتی سازه‌های دریایی مقاوم در برابر زلزله به کار گرفته شدند [۹۸].

تحقیقات علمی در ایران از اوایل دهه ۲۰۰۰ آغاز شد و تمرکز اولیه بر کاربرد خاکستر بادی و سرباره‌های صنعتی بود که باعث بهبود دوام و کاهش مصرف سیمان شد [۹۹]. از میانه دهه ۲۰۰۰، ضایعات پلاستیکی، خرده لاستیک و پودر شیشه نیز در بتن‌های سبک بررسی شدند و نتایج نشان داد که این مصالح علاوه بر کاهش وزن مخصوص، مقاومت در برابر ضربه و نفوذپذیری را بهبود می‌بخشند [۱۰۰]. پس از ۲۰۱۰، تمرکز تحقیقات داخلی به استفاده گسترده‌تر از ضایعات ساختمانی، خرده بتن، خرده آجر و پسماندهای کشاورزی مانند پوسته برنج و تفاله نیشکر معطوف شد که ضمن کاهش مصرف منابع طبیعی، به بهبود برخی خواص مکانیکی، دوام و سبک‌سازی بتن کمک کردند [۱۰۱]. هم‌زمان با رشد فناوری نانو و توسعه استانداردهای مرتبط با بتن‌های سبز، تحقیقات بر تلفیق نانو مواد و مصالح

1. Recycled and Green Lightweight Concrete

جدول ۱. مقایسه انواع بتن‌های سبک سازه‌ای.

Table 1. Comparison of Different Types of Structural Lightweight Concrete.

نوع بتن سبک	ویژگی‌های فنی اصلی	مزایا	معایب	کاربردهای رایج
بتن سبک با سنگدانه‌های طبیعی سبک (مانند پوکه، پرلیت، ورمیکولیت)	چگالی ۸۰۰-۱۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب؛ مقاومت فشاری معمولاً ۷ تا ۲۵ مگاپاسکال	در دسترس بودن؛ عایق حرارتی و صوتی خوب؛ قیمت نسبتاً مناسب	مقاومت مکانیکی محدود؛ یکنواختی کمتر نسبت به مصالح صنعتی	دیوارهای غیر باربر، شیب‌بندی بام، بلوک‌های ساختمانی
بتن سبک با سنگدانه‌های مصنوعی سبک (مانند لیکا، شیل، اسلیت، سرباره)	چگالی ۱۰۰۰-۱۹۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب؛ مقاومت فشاری تا ۳۵ مگاپاسکال	خواص مهندسی یکنواخت‌تر؛ مقاومت و دوام بهتر نسبت به سنگدانه طبیعی	قیمت بالاتر نسبت به سنگدانه طبیعی؛ نیاز به کنترل دقیق فرآیند تولید	سازه‌های باربر، پانل‌های پیش‌ساخته، کف‌های سبک، سازه‌های پل
بتن سلولی (بتن گازیAAC ، بتن فومی)	چگالی ۳۰۰-۱۶۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب؛ مقاومت فشاری ۲ تا ۸ مگاپاسکال	فوق‌العاده سبک؛ عایق حرارتی و صوتی عالی؛ سهولت اجرا	مقاومت مکانیکی پایین؛ نیازمند دقت در اجرا و عمل‌آوری	دیوارهای جداکننده، بلوک‌های غیربابربر، پرکننده سقف و کف
بتن‌های سبک تقویت‌شده با الیاف و نانو مواد	چگالی متغیر؛ افزایش قابل توجه مقاومت و دوام؛ خواص مهندسی پیشرفته	بهبود مقاومت مکانیکی و دوام؛ کاهش ترک‌خوردگی؛ امکان طراحی چندمنظوره	هزینه بالای مواد افزودنی؛ نیاز به فناوری پیشرفته در تولید	سازه‌های خاص با عملکرد بالا، اجزای پیش‌ساخته، پل‌ها، مقاوم‌سازی
بتن‌های سبک بازیافتی و سبز (سنگدانه‌های بازیافتی، پسماند صنعتی، زیست‌پایه)	چگالی و مقاومت متغیر؛ بسته به نوع ماده بازیافتی یا زیستی	دوستدار محیط زیست؛ کمک به مدیریت پسماند؛ صرفه‌جویی منابع طبیعی	عملکرد فنی متغیر؛ مشکلات کنترل کیفیت؛ نیاز به استانداردسازی	پروژه‌های پایدار، ساختمان‌های سبز، پرکننده‌ها، دیوارهای غیرباربر

بازیافتی انجام شد که نتایج امیدوارکننده‌ای در بهبود مقاومت، دوام و کاهش اثرات زیست‌محیطی ارائه کرد [۱۰۲]. در سال‌های اخیر، بتن‌های سبک بازیافتی و سبز در پروژه‌های آزمایشی و نیمه صنعتی در ایران به کار گرفته شده و پیش‌بینی می‌شود با ادامه روند تحقیق و توسعه، کاربرد گسترده‌تری در صنعت ساختمان کشور پیدا کنند [۱۰۳].

۲- ۵- مقایسه خواص و کاربردهای انواع مختلف بتن سبک سازه‌ای

انواع بتن‌های سبک سازه‌ای با توجه به خصوصیات ذاتی خود، کاربردهای متنوعی در صنعت ساختمان دارند. بتن‌های سبک با سنگدانه‌های سبک طبیعی یا مصنوعی به دلیل مقاومت فشاری بالاتر، عمدتاً در سازه‌های باربر و اعضای سازه‌ای استفاده می‌شوند [۱۰۴]. بتن‌های سلولی و فومی به دلیل وزن بسیار کم و خواص عایق حرارتی، بیشتر در دیوارهای غیر باربر، بلوک‌های عایق و پوشش‌های ساختمانی کاربرد دارند [۱۰۵].

بتن‌های تقویت‌شده با الیاف و نانو مواد، به دلیل ویژگی‌های مکانیکی بهبود یافته، در پروژه‌های خاص که نیازمند مقاومت بالا و دوام طولانی‌مدت هستند، به کار می‌روند [۱۰۶]. همچنین بتن‌های سبک بازیافتی و سبز بیشتر به عنوان راهکاری پایدار و دوستدار محیط زیست، در پروژه‌های ساختمانی سبز، ساختمان‌های انرژی‌کارآمد و پروژه‌های بازسازی و نوسازی کاربرد دارند [۱۰۷].

در نهایت، انتخاب نوع بتن سبک سازه‌ای بستگی به نیازهای پروژه، شرایط اقتصادی، دسترسی به مصالح و استانداردهای مربوطه دارد. توسعه فناوری‌های نوین و بهبود خواص بتن‌های سبک، چشم‌انداز گسترده‌ای برای استفاده مؤثر و پایدار این مصالح در صنعت ساختمان فراهم کرده است [۱۰۸]. در ادامه، جدول ۱ برای مقایسه انواع بتن‌های سبک سازه‌ای، شامل ویژگی‌ها، مزایا، معایب و کاربردها ارائه می‌شود.

در جمع‌بندی کلی می‌توان اذعان داشت که بتن‌های سبک سازه‌ای، یکی

از مهم‌ترین دستاوردهای مهندسی مصالح در راستای پاسخ به چالش‌های ساخت‌وساز مدرن، به‌ویژه کاهش وزن مرده سازه، بهینه‌سازی مصرف انرژی، ارتقاء بهره‌وری منابع و توسعه پایدار به شمار می‌روند. این دسته از بتن‌ها با بهره‌گیری از مصالح نوین، فناوری‌های پیشرفته و رویکردهای زیست‌محیطی، توانسته‌اند نیازهای روزافزون صنعت ساخت‌وساز در ابعاد فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی را تا حد زیادی برآورده سازند. طیف گسترده بتن‌های سبک سازه‌ای شامل بتن‌های مبتنی بر سنگدانه‌های سبک طبیعی و مصنوعی (نظیر پوکه معدنی، لیکا، پرلیت و سرباره‌های صنعتی)، بتن‌های سلولی و فومی (مانند بتن‌های هوادار اتوکلاوی و غیراتوکلاوی)، بتن‌های سبک تقویت‌شده با الیاف و نانو مواد و در نهایت بتن‌های سبک بازیافتی و سبز است که هر یک با توجه به خواص مکانیکی، حرارتی، دوام، سهولت اجرا و سازگاری زیست‌محیطی، کاربردهای خاص خود را در پروژه‌های عمرانی، مسکونی، صنعتی و زیربنایی یافته‌اند.

بررسی تحلیلی و مقایسه‌ای انجام‌شده نشان می‌دهد که علی‌رغم پیشرفت‌های چشمگیر در توسعه انواع مختلف بتن سبک، هنوز چالش‌هایی همچون محدودیت‌های مقاومت فشاری و کششی، حساسیت به شرایط عمل‌آوری، هزینه‌های تولید بالا (به‌ویژه در بتن‌های نانو مهندسی‌شده یا فوق سبک)، پیچیدگی کنترل کیفیت و عدم تدوین استانداردهای جامع و فراگیر در سطح بین‌المللی، وجود دارد. همچنین برخی انواع بتن‌های سبک نظیر بتن‌های بازیافتی و سبز یا بتن‌های حاوی خاکستر بادی، علی‌رغم مزایای زیست‌محیطی قابل‌توجه، همچنان در مراحل تحقیقاتی و نیمه‌صنعتی قرار دارند و نیازمند توسعه تحقیقات جامع‌تر، بهبود عملکرد مکانیکی و دوام، و افزایش مقبولیت در صنعت ساخت‌وساز هستند. با این حال، چشم‌انداز آینده بتن‌های سبک سازه‌ای، با تمرکز بر بهره‌گیری از مواد نوین، فناوری‌های پایدار و به‌ویژه نقش کلیدی خاکستر بادی در بهبود خواص و کاهش اثرات زیست‌محیطی، افق روشنی را در راستای تحقق اهداف توسعه پایدار و ساخت‌وساز سبز ترسیم می‌کند.

۳- نقش خاکستر بادی در بتن سبک سازه‌ای[1]

در دهه‌های اخیر، توسعه پایدار، افزایش بهره‌وری منابع و ارتقای عملکرد سازه‌ها به موضوعات کلیدی در صنعت ساختمان تبدیل شده‌اند [۱۰۹]. یکی از راهکارهای مؤثر برای تحقق این اهداف، استفاده از مصالح مکمل سیمانی همچون خاکستر بادی در تولید انواع بتن‌های سبک سازه‌ای است [۱۱۰].

1. Role of Fly Ash in Structural Lightweight Concrete

این رویکرد علاوه بر کاهش اثرات زیست‌محیطی، می‌تواند خواص مکانیکی، دوام و کارایی بتن‌های سبک را به شکل چشمگیری بهبود بخشد [۱۱۱]. در این بخش، ضمن معرفی جامع خاکستر بادی و ویژگی‌های آن، اثرات مثبت و منفی استفاده از این ماده در انواع بتن سبک سازه‌ای بر اساس جدیدترین مطالعات داخلی و خارجی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳- ۱- معرفی خاکستر بادی، منابع و خواص فیزیکی و شیمیایی

خاکستر بادی محصول جانبی نیروگاه‌های حرارتی است که در فرآیند احتراق زغال‌سنگ تولید می‌شود. این ماده به‌صورت ذرات کروی شکل، بسیار ریز و معمولاً شیشه‌ای از دودکش‌های نیروگاه جمع‌آوری شده و به‌دلیل دارا بودن ترکیبات فعال پوزولانی، سال‌هاست در صنعت بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۱۲].

خاکستر بادی بر اساس استاندارد ASTM C618 به دو دسته اصلی تقسیم می‌شود [۱۱۳]:

- **خاکستر بادی کلاس F** : حاصل از سوخت زغال‌سنگ آنتراسیت یا بیتومینه با مقادیر بالای سیلیس، آلومینا و اکسید آهن، دارای خاصیت پوزولانی بالا و خاصیت سیمانی اندک.
- **خاکستر بادی کلاس C** : تولید شده از زغال‌سنگ‌های لیگنیتی یا ساب‌بیتومینه، با درصد بالاتر اکسید کلسیم و ترکیبی از خاصیت پوزولانی و سیمانی.

جدول ۱ خلاصه‌ای از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی رایج خاکستر بادی را ارائه می‌دهد:

وجود ذرات کروی و شیشه‌ای، اندازه ذرات بسیار ریز و ترکیبات شیمیایی مناسب، خاکستر بادی را به گزینه‌ای مطلوب برای بهبود خواص بتن سبک سازه‌ای تبدیل می‌کند [۱۹].

۳- ۲- مکانیزم‌های بهبود خواص بتن سبک با استفاده از خاکستر بادی

افزودن خاکستر بادی به بتن سبک سازه‌ای با بهره‌گیری از چندین مکانیزم فیزیکی و شیمیایی، خواص مکانیکی، دوام و زیست‌محیطی بتن را ارتقا می‌دهد [۱۱۴]. مهم‌ترین این مکانیزم‌ها عبارتند از:

- **واکنش پوزولانی:** سیلیس و آلومینای موجود در خاکستر بادی با هیدروکسید کلسیم حاصل از هیدراتاسیون سیمان واکنش داده و ژل C-S-H اضافی تولید می‌کند که منجر به افزایش مقاومت و چگالی ریزساختار بتن می‌شود [۱۱۵].
- **بهبود ریزساختار:** ذرات بسیار ریز خاکستر بادی فضاهای خالی بین

جدول ۲. خلاصه‌ای از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی رایج خاکستر بادی.

Table 2. Summary of Common Physical and Chemical Properties of Fly Ash.

ویژگی	دامنه معمول مقادیر
قطر متوسط ذرات	۱ تا ۴۵ میکرون
سطح مخصوص	۳۰۰ تا ۵۰۰ متر مربع بر کیلوگرم
چگالی	۲/۱ تا ۲/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	بیش از ۷۰٪ (کلاس F)؛ ۵۰-۷۰٪ (کلاس C)
CaO	کمتر از ۱۰٪ (کلاس F)؛ ۱۵-۳۰٪ (کلاس C)

ذرات سیمان را پر می‌کنند که منجر به کاهش تخلخل و افزایش دوام بتن می‌شود [۱۱۶].

- **کاهش مصرف آب:** شکل کروی و نرم ذرات خاکستر بادی باعث بهبود روانی و کارایی بتن سبک می‌شود و در بسیاری موارد می‌توان با کاهش نسبت آب به سیمان، مقاومت و دوام را ارتقا داد [۱۱۷].
- **کاهش حرارت هیدراتاسیون:** خاکستر بادی سرعت واکنش‌های اولیه را کنترل می‌کند و از بروز ترک‌های ناشی از گرما در بتن حجیم جلوگیری می‌نماید [۱۱۸].
- **اثر زیست‌محیطی مثبت:** جایگزینی بخشی از سیمان با خاکستر بادی، علاوه بر کاهش مصرف سیمان، به مدیریت پسماندهای صنعتی و کاهش گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند [۱۱۹].

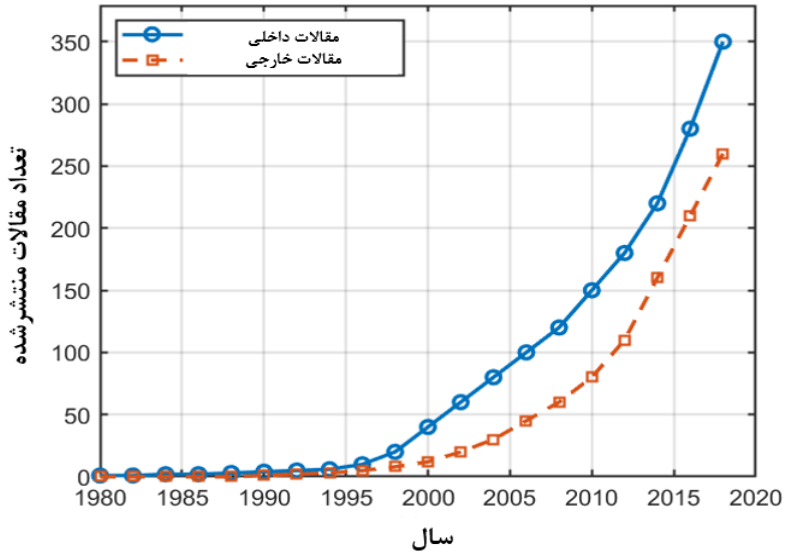
این مکانیزم‌ها در انواع مختلف بتن سبک از جمله بتن‌های سبک با سنگدانه‌های طبیعی و مصنوعی، بتن‌های سلولی و فومی و بتن‌های سبز و بازیافتی قابل مشاهده است.

۳- ۳- مروری بر تحقیقات داخلی و خارجی

طی چهار دهه اخیر، استفاده از خاکستر بادی به عنوان یکی از مهم‌ترین جایگزین‌های سیمان در بتن‌های سبک سازه‌ای، به‌طور پیوسته مورد توجه محققان در سراسر جهان قرار گرفته است [۱۲۰]. نخستین تحقیقات جهانی در این زمینه در اوایل دهه ۱۹۸۰ میلادی آغاز شد، زمانی که نگرانی‌ها نسبت به مصرف بالای سیمان، هزینه‌های تولید و اثرات زیست‌محیطی ناشی از تولید آن افزایش یافت [۱۲۱]. در این دوران، محققان به‌ویژه در آمریکای شمالی و اروپا بررسی کردند که چگونه می‌توان با استفاده از خاکستر بادی، ضمن کاهش مصرف سیمان، دوام و خواص مکانیکی بتن را بهبود بخشید [۱۱]. نتایج اولیه این مطالعات نشان داد که افزودن خاکستر بادی به بتن‌های سبک می‌تواند مقاومت در برابر نفوذ آب، دوام در برابر حملات شیمیایی و رفتار حرارتی بتن را بهبود دهد، بدون آنکه وزن مخصوص بتن به شکل محسوسی افزایش یابد [۱۲۲]. روند زمانی و تکامل این تحقیقات از دهه ۱۹۸۰ میلادی تا سال ۲۰۲۵ به‌صورت خلاصه در شکل ۱ ارائه شده است.

در دهه ۱۹۹۰ میلادی، با گسترش استفاده از بتن‌های سبک سازه‌ای در پروژه‌های عمرانی و رشد فناوری ساخت مصالح نوین، تحقیقات بیشتری بر روی ترکیب خاکستر بادی با انواع بتن‌های سبک شامل بتن لیکا، بتن‌های فومی، بتن‌های سبک الیافی و بتن‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی انجام شد [۸]. در این بازه، محققان دریافته‌اند که جایگزینی ۱۵ تا ۳۰ درصد سیمان با خاکستر بادی می‌تواند علاوه بر کاهش مصرف سیمان، به کاهش چگالی بتن، افزایش مقاومت فشاری و ارتقای دوام کمک کند [۱۲۳]. مطالعات در کشورهای آلمان، آمریکا، کانادا، چین و استرالیا نقش مؤثر خاکستر بادی در بهبود رفتار بتن‌های سبک را تأیید کرده است [۱۲۴]. همچنین مشخص شد که خاکستر بادی با داشتن ساختار پوزولانی می‌تواند در واکنش‌های هیدراتاسیون سیمان مشارکت کرده و منجر به تشکیل فازهای سیمانی ثانویه و شبکه‌های متراکم‌تر در بتن شود [۱۲۵].

در دهه ۲۰۰۰ میلادی، روند جهانی توسعه بتن‌های سبک سبز و پایدار شتاب بیشتری گرفت [۱۲۶]. تحقیقات گسترده‌ای در کشورهای پیشرفته و در حال توسعه بر روی تلفیق خاکستر بادی با الیاف‌های مختلف نظیر الیاف فولادی، پلی‌پروپیلن و بازالت انجام شد که نتایج آن‌ها نشان داد علاوه بر سبک‌سازی، می‌توان مقاومت خمشی، جذب انرژی و مقاومت در برابر



شکل ۱. روند زمانی تحقیقات بتن سبک حاوی خاکستر بادی (۱۹۸۰-۲۰۲۵).

Fig. 1. Timeline of Research on Lightweight Concrete Containing Fly Ash (1980–2025).

ترک‌خوردگی بتن را نیز ارتقاء داد [۱۲۷]. در این دوره، استفاده از خاکستر بادی در بتن‌های سبک سازه‌ای مسلح به الیاف، به‌ویژه در مناطق زلزله‌خیز و پروژه‌های عمرانی مهم مورد استقبال قرار گرفت [۱۲۸]. مطالعات متعددی نیز به بررسی دوام بتن‌های سبک حاوی خاکستر بادی در شرایط سخت محیطی ازجمله سیکل‌های ذوب و یخبندان، محیط‌های سولفاتی و کلریدی اختصاص یافت که همگی بر نقش مثبت خاکستر بادی در افزایش مقاومت این بتن‌ها تأکید داشتند [۱۲۹].

از سال ۲۰۱۰ میلادی تاکنون، با پیشرفت چشمگیر فناوری نانو و توسعه مفاهیم بتن‌های سبز، نسل جدیدی از تحقیقات شکل گرفت که بر استفاده هم‌زمان از خاکستر بادی، نانو مواد و الیاف‌ها در بتن‌های سبک تمرکز داشت [۸۳]. نتایج این مطالعات در کشورهای مختلف ازجمله چین، هند، آمریکا و کشورهای اروپایی، نشان داد که این رویکرد منجر به بهبود چشمگیر خواص مکانیکی، دوام، کاهش نفوذپذیری، افزایش عملکرد حرارتی و سبک‌سازی مؤثر بتن می‌شود [۱۳۰]. همچنین طی این سال‌ها، با توسعه مدل‌های عددی و نرم‌افزارهای شبیه‌سازی، رفتار بلندمدت بتن‌های سبک سازه‌ای حاوی خاکستر بادی به دقت تحلیل و بهینه‌سازی شده است [۱۳۱]. تحقیقات آزمایشگاهی و مدل‌سازی نشان می‌دهد که در اکثر موارد، جایگزینی ۲۰ تا ۳۰ درصد سیمان با خاکستر بادی بهترین تعادل بین کاهش مصرف منابع، بهبود دوام و حفظ مقاومت بتن را فراهم می‌کند [۱۳۲].

در ایران نیز از اوایل دهه ۲۰۰۰ میلادی، هم‌زمان با رشد جهانی این رویکرد، تحقیقات پیرامون استفاده از خاکستر بادی در بتن‌های سبک آغاز شد. در ابتدا، تمرکز مطالعات داخلی بر بررسی اثر جایگزینی خاکستر بادی در بتن‌های سبک لیکا و بتن‌های پرلیتی بود [۱۳۳]. نتایج اولیه نشان داد که افزودن ۱۵ تا ۲۰ درصد خاکستر بادی، علاوه بر کاهش مصرف سیمان، می‌تواند مقاومت فشاری و دوام بتن را بهبود بخشد [۱۳۴]. در دهه ۲۰۱۰ میلادی، دامنه تحقیقات داخلی گسترش یافت و بتن‌های فومی، بتن‌های سبک الیافی، بتن‌های سبک حاوی ضایعات بازیافتی و بتن‌های سبک حاوی نانو مواد نیز مورد بررسی قرار گرفتند [۱۳۵]. محققان داخلی دریافتند که استفاده از خاکستر بادی، به‌ویژه در ترکیب با نانو مواد نظیر نانو سیلیکا و نانو آلومینا، می‌تواند نقش مؤثری در افزایش مقاومت فشاری، کاهش چگالی، افزایش عایق حرارتی و بهبود عملکرد بتن‌های سبک ایفا کند [۱۳۶].

از سال ۲۰۱۵ میلادی تاکنون، پژوهش‌های داخلی تمرکز بیشتری بر جنبه‌های دوام بتن‌های سبک حاوی خاکستر بادی در شرایط سخت محیطی، تأثیر آن بر کاهش مصرف انرژی، بهبود عملکرد سازه‌ای و بررسی رفتار بتن‌های سبک در ابعاد نیمه صنعتی و واقعی داشته است [۱۳۷]. این مطالعات نشان داده‌اند که می‌توان تا ۳۰ درصد سیمان را با خاکستر بادی در بتن‌های سبک جایگزین کرد، بدون آنکه مقاومت مکانیکی یا دوام بتن دچار افت چشمگیر شود [۱۳۸]. همچنین در سال‌های اخیر، ترکیب خاکستر بادی با

جدول ۳. مقایسه تأثیر خاکستر بادی بر خواص بتن سبک سازه‌ای.

Table 3. Comparison of the Effect of Fly Ash on the Properties of Structural Lightweight Concrete.

خواص بتن سبک سازه‌ای	اثر استفاده از خاکستر بادی	توضیحات تکمیلی
مقاومت فشاری	بهبود ۱۰ تا ۳۰ درصد	در صورت جایگزینی بهینه (۲۰ تا ۳۰٪) سیمان با خاکستر بادی
مقاومت خمشی و کششی	افزایش جزئی تا متوسط	بیشتر در بتن‌های سبک الیافی یا تقویت‌شده قابل مشاهده است
دوام در برابر نفوذ آب	کاهش چشمگیر نفوذپذیری	ناشی از بهبود ریزساختار و کاهش تخلخل
مقاومت در برابر یون کلرید و سولفات	افزایش مقاومت شیمیایی	کاهش خطر خوردگی آرماتور و تخریب سازه در محیط‌های خورنده
رفتار در سیکل یخبندان-ذوب	بهبود دوام تا ۲۵ درصد	کاهش ترک‌های سطحی و افت مقاومت در سیکل‌های متوالی
وزن مخصوص	کاهش وزن نسبی بتن	بسته به نوع بتن و میزان خاکستر بادی بین ۵ تا ۱۵ درصد کاهش وزن
کارایی و روانی	بهبود روانی و سهولت اجرا	به دلیل شکل کروی و نرم ذرات خاکستر بادی
جنبه‌های زیست‌محیطی	کاهش مصرف سیمان و تولید CO_2	کمک به توسعه پایدار و بازیافت ضایعات صنعتی
محدودیت‌ها	کاهش مقاومت اولیه؛ نیاز به کنترل دقیق طرح اختلاط	جایگزینی بیش از حد می‌تواند خواص مکانیکی اولیه را کاهش دهد

ضایعات کشاورزی نظیر پوسته برنج و ضایعات صنعتی، به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای توسعه بتن‌های سبک سبز و اقتصادی در ایران پیشنهاد شده است [۱۳۹]. تحقیقات جدید داخلی نیز به بررسی هم‌زمان اثرات خاکستر بادی، الیاف و نانو مواد در بتن‌های سبک سازه‌ای می‌پردازد که هدف آن دستیابی به بتن‌های سبک با عملکرد مکانیکی بالا، دوام مطلوب، مصرف بهینه منابع و سازگاری زیست‌محیطی است [۱۴۰].

در مجموع، تا سال ۲۰۲۵ میلادی، حجم وسیعی از مطالعات داخلی و خارجی به‌طور مستقل و ترکیبی، اثرات مثبت و کارآمد استفاده از خاکستر بادی در بتن‌های سبک سازه‌ای را اثبات کرده‌اند و این روند، هم‌چنان مسیر توسعه و تکامل خود را در راستای بهبود کیفیت و پایداری بتن‌های سبک ادامه می‌دهد.

۳- ۴- تأثیر خاکستر بادی بر خواص مکانیکی، دوام و عملکرد زیست‌محیطی بتن سبک

مطالعات فوق نشان می‌دهد که خاکستر بادی تأثیرات مثبت متعددی بر انواع بتن سبک سازه‌ای دارد که می‌توان آن را در سه بخش اصلی خلاصه کرد [۱۴۱]:

- **خواص مکانیکی:** افزایش مقاومت فشاری، خمشی و کششی، به‌ویژه در بتن‌های سبک سازه‌ای و فومی؛ در عین حال باید به کنترل درصد جایگزینی توجه نمود تا کاهش مقاومت اولیه رخ ندهد.
- **دوام:** کاهش نفوذپذیری، افزایش مقاومت در برابر سیکل‌های ذوب و یخبندان، کاهش کربناسیون و جذب آب، و بهبود دوام طولانی‌مدت بتن.
- **عملکرد زیست‌محیطی:** کاهش مصرف سیمان، صرفه‌جویی در انرژی، استفاده مجدد از پسماندهای صنعتی، کاهش تولید دی‌اکسید کربن و کمک به تحقق اصول توسعه پایدار.

۴- پیشرفت‌های نوین در بتن سبک سازه‌ای

در دهه‌های اخیر، بتن سبک سازه‌ای با پیشرفت‌های چشمگیری در زمینه مواد اولیه، فناوری‌های تولید و بهبود عملکرد فنی همراه بوده است؛ به‌گونه‌ای که دامنه کاربرد آن از عناصر غیرسازه‌ای به سازه‌های باربر و پروژه‌های مهندسی پیشرفته گسترش یافته است. این تحولات عمدتاً در چهار محور اصلی قابل دسته‌بندی هستند: کاربرد نانومواد، استفاده از الیاف

نوین و مواد بازیافتی، توسعه بتن‌های سبک فوق‌مقاوم و چندمنظوره، و به‌کارگیری فناوری‌های نوین تولید، عمل‌آوری و کنترل کیفیت. تمرکز پژوهش‌های اخیر بر این محورها، نقش تعیین‌کننده‌ای در ارتقای هم‌زمان مقاومت، دوام و کارایی بتن‌های سبک سازه‌ای داشته است.

۴- ۱- کاربرد نانو مواد در بتن سبک سازه‌ای

کاربرد نانومواد یکی از مؤثرترین رویکردهای نوین در بهبود عملکرد بتن سبک سازه‌ای به شمار می‌رود. نانومواد‌ی نظیر نانوسیلیکا، نانورس، نانوآلومینا و به‌ویژه نانوگرافن، به دلیل ابعاد بسیار ریز و سطح ویژه بالا، تأثیر قابل‌توجهی بر ریزساختار و میکروساختار بتن دارند [۱۴۲]. مطالعات نشان می‌دهد که افزودن نانوسیلیکا موجب تسریع واکنش‌های پوزولانی، کاهش تخلخل خمیر سیمان و افزایش تراکم ماتریس می‌شود که در نهایت به افزایش مقاومت فشاری و بهبود دوام بتن سبک منجر می‌گردد [۵۵]. نانورس‌ها نیز با بهبود خواص رئولوژیکی و کاهش نفوذپذیری، عملکرد بتن سبک را در محیط‌های خورنده ارتقا می‌دهند.

از سوی دیگر، نانوگرافن و نانولوله‌های کربنی علاوه بر افزایش مقاومت مکانیکی، نقش مؤثری در کنترل رشد ریزترک‌ها و بهبود رفتار حرارتی بتن دارند [۱۴۳]. نتایج تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که استفاده از مقادیر بهینه نانومواد می‌تواند مقاومت فشاری بتن سبک را تا حدود ٪۳۰ افزایش داده و جذب آب را به‌طور معنی‌داری کاهش دهد [۱۴۴]. همچنین، این افزودنی‌ها باعث بهبود چسبندگی در ناحیه گذار بین خمیر سیمان و سنگدانه سبک[1] (ITZ) می‌شوند که یکی از نقاط ضعف اصلی بتن‌های سبک محسوب می‌شود.

۴- ۲- استفاده از الیاف نوین و مواد بازیافتی

استفاده از الیاف تقویت‌کننده یکی دیگر از محورهای مهم در ارتقای عملکرد بتن سبک است. الیاف پلی‌پروپیلن، الیاف شیشه، الیاف فولادی میکرو، و اخیراً الیاف کربنی و بازالت به بتن‌های سبک افزوده می‌شوند تا مقاومت کششی، شکل‌پذیری و مقاومت در برابر ترک‌خوردگی بهبود یابد [۱۴۵]. مطالعات متعدد داخلی و خارجی نشان داده‌اند که بتن سبک حاوی الیاف، رفتار بهتری در برابر ضربه، خستگی و آتش‌سوزی از خود نشان می‌دهد [۱۴۶]. از سوی دیگر، توجه به مواد بازیافتی از جمله الیاف پلاستیکی بازیافتی و پودر لاستیک فرسوده به عنوان جایگزین بخشی از سنگدانه‌های سبک یا الیاف، زمینه‌ای نوین در راستای توسعه پایدار ایجاد کرده است.

1. Interfacial Transition Zone

به‌کارگیری این مواد ضمن کاهش هزینه، به حفظ محیط زیست و کاهش حجم پسماندها کمک می‌کند [۱۴۷].

۴- ۳- توسعه بتن‌های سبک فوق مقاوم و چندمنظوره

یکی از چشمگیرترین روندهای اخیر، توسعه بتن‌های سبک فوق مقاوم[2] است که چگالی پایین‌تر از ۱۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب را با مقاومت فشاری بیش از ۵۰ مگاپاسکال ترکیب می‌کنند [۱۴۸]. این نوع بتن‌ها با استفاده از ترکیبات پیشرفته شامل نانو مواد، الیاف پرفشار، و افزودنی‌های کاهنده آب تولید می‌شوند و قادر به تحمل بارهای سنگین در شرایط بسیار سبک هستند [۱۴۹]. همچنین، رویکرد چندمنظوره در طراحی بتن‌های سبک شامل ترکیب قابلیت‌های مختلف از جمله خودترمیم‌شوندگی، مقاومت بالا در برابر آتش، خاصیت ضدباکتریایی و هدایت حرارتی کنترل‌شده در یک نوع بتن است. بتن‌های سبک خودتمیزشونده و بتن‌های سبک با قابلیت جذب آلودگی هوا از جمله نمونه‌های نوآورانه این حوزه به شمار می‌روند [۱۵۰].

۴- ۴- فناوری‌های نوین تولید، عمل‌آوری و کنترل کیفیت

پیشرفت در فناوری تولید بتن سبک نیز نقش بسزایی در ارتقای کیفیت این مصالح داشته است [۱۵۱]. استفاده از تکنیک‌های میکسرهای خاص برای تولید بتن‌های فومی پایدار، کاربرد عمل‌آوری با بخار و عمل‌آوری با امواج مایکروویو برای بتن‌های سلولی، و به‌کارگیری چاپ سه‌بعدی در تولید اجزای سبک بتنی از جمله فناوری‌های نوین هستند [۱۵۲]. همچنین، بهره‌گیری از سیستم‌های نظارت بر کیفیت آنلاین[3] و سنسورهای هوشمند در خطوط تولید بتن سبک، موجب بهبود یکنواختی و عملکرد بتن‌های سبک سازه‌ای شده است [۱۵۳]. کنترل دقیق نسبت آب به سیمان، اندازه و توزیع حباب‌های هوا، و میزان یکنواختی افزودنی‌ها با استفاده از این فناوری‌ها به‌طور چشمگیری دقت تولید را افزایش داده‌اند [۱۵۴].

در مجموع، پیشرفت‌های نوین در حوزه بتن سبک سازه‌ای، افق‌های جدیدی را برای کاربردهای گسترده‌تر و عملکرد بهینه‌تر این مصالح در پروژه‌های عمرانی فراهم کرده است. نانو فناوری، با تأثیرگذاری بر ریزساختار و میکروساختار بتن، موجب افزایش مقاومت، دوام و کاهش نفوذپذیری شده است [۱۵۵]. از سوی دیگر، به‌کارگیری الیاف پیشرفته و مواد بازیافتی علاوه بر بهبود خواص مکانیکی و کاهش وزن، به توسعه پایدار و حفاظت از منابع طبیعی کمک می‌کند [۱۵۶].

2. ULSCC: Ultra-Lightweight Super Concrete
3. Real-Time Quality Control

توسعه بتن‌های سبک فوق مقاوم و چندمنظوره نیز نیازهای پروژه‌های پیشرفته، از جمله سازه‌های بلندمرتبه، سازه‌های پل، المان‌های معماری پیچیده، و پروژه‌های زیست‌محیطی را پاسخ می‌دهد [۷۳]. همچنین، فناوری‌های نوین تولید و عمل‌آوری، دقت و کیفیت تولید بتن سبک را در سطح صنعتی ارتقاء داده و امکان استفاده گسترده‌تر این نوع بتن را حتی در پروژه‌های حساس و با الزامات فنی بالا فراهم کرده‌اند [۱۵۷].

علیرغم این پیشرفت‌ها، همچنان چالش‌هایی نظیر هزینه بالای برخی نانو مواد، نیاز به استانداردسازی دقیق برای بتن‌های سبک چندمنظوره، و مسائل مربوط به پذیرش صنعتی و کاربرد گسترده وجود دارد که باید در مطالعات آتی مورد توجه قرار گیرد.

۵- چالش‌های تحقیقاتی و اجرایی

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در توسعه و کاربرد بتن سبک سازه‌ای، این مصالح همچنان با چالش‌های جدی در ابعاد فنی، اقتصادی، اجرایی و استانداردسازی مواجه هستند؛ چالش‌هایی که در بسیاری موارد موجب شده‌اند علی‌رغم پتانسیل فنی و زیست‌محیطی بالا، استفاده از بتن سبک سازه‌ای در پروژه‌های واقعی با احتیاط، تردید و حتی مقاومت مهندسین و کارفرمایان همراه باشد. این مسائل، روند گسترش استفاده صنعتی از این نوع بتن را با کندی مواجه کرده و ضرورت بررسی انتقادی و نظام‌مند آن‌ها را دوچندان می‌سازد. در این بخش، مهم‌ترین چالش‌های موجود در حوزه بتن سبک سازه‌ای به‌صورت ساختارمند مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۵- ۱- محدودیت‌های فنی و مهندسی

یکی از مهم‌ترین چالش‌های موجود در توسعه و کاربرد بتن سبک سازه‌ای، محدودیت‌های فنی آن به‌ویژه در زمینه خواص مکانیکی، دوام و عملکرد بلندمدت است [۱۵۸]. علی‌رغم بهبود نسبی در خواص مقاومتی بتن سبک طی سال‌های اخیر، در بسیاری از موارد، مقاومت فشاری و کششی این نوع بتن همچنان کمتر از بتن‌های معمولی متناظر گزارش شده است؛ به‌طوری‌که مقاومت فشاری بتن سبک سازه‌ای معمولاً حدود ۱۰ تا ۳۰ درصد کمتر از بتن معمولی با طرح اختلاط مشابه است [۱۵۹]. این موضوع، دامنه کاربرد بتن سبک را در سازه‌های باربر و اجزای بحرانی محدود می‌سازد.

از سوی دیگر، بتن‌های سبک، به‌خصوص انواع دارای تخلخل بالا، معمولاً از نظر دوام در برابر سیکل‌های ذوب و انجماد، نفوذپذیری، جذب آب و حمله عوامل شیمیایی دچار ضعف هستند. گزارش‌ها نشان می‌دهد که نفوذپذیری بتن سبک در برخی طرح‌ها می‌تواند تا حدود دو برابر بتن معمولی افزایش یابد، که این مسئله خطر کاهش دوام و عمر مفید سازه را به‌دنبال دارد [۱۶۰]. در نتیجه، کاربرد بتن سبک در شرایط محیطی سخت یا مناطق با اقلیم شدید با محدودیت‌های جدی مواجه می‌شود.

در زمینه طراحی و تحلیل سازه‌ای نیز کمبود داده‌های جامع آزمایشگاهی و مدل‌های تحلیلی دقیق برای پیش‌بینی رفتار بتن سبک سازه‌ای، یکی دیگر از چالش‌های اساسی به‌شمار می‌رود. در بسیاری از موارد، ضرایب و روابط طراحی موجود بر اساس بتن‌های معمولی توسعه یافته‌اند و برای بتن سبک، به‌ویژه بتن‌های سبک نوین نظیر بتن‌های حاوی نانو مواد یا الیاف پیشرفته، دقت و کفایت لازم را ندارند [۱۶۱].

۵- ۲- چالش‌های اقتصادی و زیست‌محیطی

از منظر اقتصادی، علی‌رغم صرفه‌جویی‌هایی که بتن سبک به واسطه کاهش وزن سازه، ابعاد مقاطع و هزینه‌های حمل‌ونقل ایجاد می‌کند، در بسیاری از پروژه‌ها قیمت تمام‌شده این نوع بتن به دلیل استفاده از سنگدانه‌های سبک مصنوعی، نانو مواد، الیاف خاص و فناوری‌های پیشرفته تولید، بالاتر از بتن معمولی است[۱۶۲]. این اختلاف هزینه، پذیرش گسترده بتن سبک را در پروژه‌های متعارف با محدودیت‌های بودجه‌ای با چالش مواجه می‌کند.

از نظر زیست‌محیطی نیز، اگرچه بتن سبک می‌تواند نقش مثبتی در کاهش مصرف مواد خام، کاهش بار مرده سازه و بهینه‌سازی مصرف انرژی ایفا کند، اما در برخی موارد فرآیند تولید سنگدانه‌های سبک مصنوعی یا استخراج و فرآوری مواد اولیه نانو، با مصرف انرژی بالا و آثار زیست‌محیطی منفی همراه است [۱۶۳]. علاوه بر این، بازیافت و مدیریت پسماند بتن‌های سبک حاوی ترکیبات خاص یا افزودنی‌های پیشرفته، همچنان یک چالش فنی و زیست‌محیطی حل‌نشده محسوب می‌شود [۱۵].

۵- ۳- مشکلات اجرایی و پذیرش صنعتی

در بُعد اجرایی، یکی از مشکلات رایج بتن‌های سبک، دشواری در کنترل کیفیت تولید و اجرا است. حساسیت این نوع بتن به تغییرات نسبت آب به سیمان، نحوه عمل‌آوری، دقت در تولید سنگدانه‌های سبک و کیفیت مواد افزودنی، می‌تواند منجر به نوسانات شدید در خواص نهایی بتن شود [۱۶۴]. این موضوع، به‌ویژه در پروژه‌های بزرگ مقیاس یا صنعتی، نگرانی‌هایی برای مهندسین طراح و پیمانکاران ایجاد می‌کند [۱۶۵].

همچنین، کمبود تجربه اجرایی، آموزش ناکافی نیروی انسانی و عدم آشنایی کامل برخی مجریان با ویژگی‌ها و الزامات خاص بتن سبک، موجب

بروز خطاهای اجرایی، کاهش کیفیت نهایی و در نهایت تضعیف اعتماد به این مصالح شده است [۱۶۶]. پذیرش صنعتی بتن سبک سازه‌ای، به‌ویژه در کشورهایی که سنت استفاده از مصالح سنگین و معمولی رایج است، همچنان با مقاومت‌هایی مواجه است [۱۶۷]. این مسئله، نیازمند فرهنگ‌سازی، مستندسازی تجربیات موفق، ارائه آموزش‌های تخصصی و اثبات اقتصادی بودن این مصالح از طریق مطالعات میدانی است.

۵- ۴- موانع استانداردسازی و تدوین ضوابط طراحی

یکی از چالش‌های بنیادین در توسعه بتن سبک سازه‌ای، نبود یا ناکافی بودن استانداردهای ملی و بین‌المللی جامع و روزآمد در این حوزه است. بسیاری از استانداردهای موجود، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، عمدتاً مبتنی بر بتن‌های معمولی هستند و ویژگی‌های خاص بتن سبک، به‌ویژه انواع جدید نظیر بتن‌های سبک حاوی خاکستر بادی، نانو مواد یا الیاف پیشرفته، به‌خوبی در آن‌ها لحاظ نشده است [۱۶۸]. در زمینه تدوین ضوابط طراحی سازه با بتن سبک نیز شکاف‌های جدی وجود دارد. برخی آیین‌نامه‌ها نظیر ACI 213R، صرفاً به ارائه کلیاتی درباره بتن سبک اکتفا کرده‌اند و جزئیات کافی در خصوص طراحی سازه‌ای، دوام، کنترل کیفیت و الزامات اجرایی ارائه نمی‌کنند [۱۶۹].

این کمبود استانداردها و ضوابط شفاف، منجر به سردرگمی مهندسین طراح، مراجع نظارتی و مجریان پروژه‌ها شده و به‌عنوان یکی از موانع اصلی در مسیر توسعه ایمن و گسترده بتن سبک سازه‌ای در صنعت ساخت‌وساز مطرح است [۱۷۰].

در مجموع، اگرچه بتن سبک سازه‌ای از منظر کاهش وزن سازه، بهبود عملکرد لرزه‌ای و ارتقای پایداری زیست‌محیطی دارای مزایای قابل توجهی است، اما چالش‌های فنی، اقتصادی، اجرایی و آیین‌نامه‌ای همچنان به‌عنوان موانع اصلی در مسیر صنعتی‌سازی و اعتماد گسترده مهندسین به این نوع بتن مطرح هستند. غلبه بر این چالش‌ها مستلزم انجام تحقیقات هدفمند، توسعه داده‌های آزمایشگاهی معتبر، اصلاح و به‌روزرسانی ضوابط طراحی، و همچنین گسترش تجربیات اجرایی مستند در مقیاس صنعتی است.

۶- شکاف‌های تحقیقاتی و مسیرهای آینده

در حالی که بتن سبک سازه‌ای طی دهه‌های اخیر به یکی از مصالح کلیدی در صنعت ساخت‌وساز مدرن تبدیل شده و کاربرد آن در پروژه‌های مختلف عمرانی، مسکونی و صنعتی به طور چشمگیری افزایش یافته است، بررسی انتقادی پژوهش‌های موجود نشان می‌دهد که این حوزه همچنان با چالش‌ها و شکاف‌های علمی و فنی قابل توجهی روبه‌رو است که توجه ویژه محققان و صنعتگران را می‌طلبد.

نخستین ضعف آشکار در مطالعات انجام‌شده، پراکندگی و عدم یکپارچگی داده‌های آزمایشگاهی است. در بسیاری از تحقیقات، روش‌های ساخت و آزمون بتن سبک متفاوت بوده و استانداردهای مشخص و یکسانی برای ارزیابی عملکرد این نوع بتن به کار گرفته نشده است [۱۷۱]. این مسأله باعث شده است که مقایسه نتایج مطالعات مختلف دشوار باشد و در نتیجه، امکان تدوین دستورالعمل‌های جامع و کاربردی برای طراحی و اجرا محدود گردد [۱۷۲]. به‌علاوه، بخش عمده مطالعات، در شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی انجام شده و عملکرد بتن‌های سبک سازه‌ای در مقیاس واقعی پروژه‌های عمرانی و تحت شرایط متغیر اقلیمی، کمتر مورد ارزیابی دقیق قرار گرفته است [۱۷۳]. به‌ویژه، داده‌های قابل اتکا در خصوص رفتار این نوع بتن‌ها در مناطق با شرایط آب‌وهوایی سخت، نظیر مناطق گرم و خشک، مناطق با رطوبت بالا و یا اقلیم‌های سردسیر، بسیار محدود است [۱۷۴].

یکی دیگر از کاستی‌های مهم در ادبیات موجود، کمبود مطالعات جامع پیرامون دوام بلندمدت و رفتار بتن سبک سازه‌ای تحت بارگذاری‌های دینامیکی و چرخه‌ای است [۱۷۵]. اگرچه بررسی‌های متعددی بر خواص مکانیکی اولیه نظیر مقاومت فشاری و خمشی تمرکز داشته‌اند، اما داده‌های کافی درباره مقاومت در برابر سیکل‌های یخ‌زدگی و ذوب، خوردگی آرماتور، خزش، جمع‌شدگی، ترک‌خوردگی‌های ناشی از خشک‌شدن و مهم‌تر از همه، عملکرد لرزه‌ای این نوع بتن‌ها وجود ندارد [۱۷۶]. این کمبود اطلاعات، به‌ویژه در مناطق زلزله‌خیز یا مناطق ساحلی با ریسک بالای خوردگی، مانعی جدی بر سر راه گسترش کاربرد بتن سبک در سازه‌های حیاتی و باربر محسوب می‌شود [۱۷۷].

از سوی دیگر، اگرچه طی سال‌های اخیر استفاده از نانو مواد، الیاف پیشرفته و مصالح بازیافتی در تولید بتن سبک رشد چشمگیری داشته است، اما تحقیقات جامع و سیستماتیکی که به بررسی اثرات ترکیبی این مواد و یافتن نسبت‌های بهینه مصرف آن‌ها بپردازد، هنوز در مراحل ابتدایی قرار دارد [۱۷۸]. مطالعات اندکی به تحلیل دقیق رفتار بتن‌های سبک چندمنظوره که در آن‌ها هم‌زمان از نانو ذرات، الیاف و پسماندهای صنعتی استفاده شده است، پرداخته‌اند. این در حالی است که طراحی چنین بتن‌هایی می‌تواند راهکار مؤثری برای تولید مصالح سبک، مقاوم، بادوام و زیست‌پذیر باشد [۱۷۹].

در این میان، نقش مصالح جایگزین سیمان و سنگدانه‌های طبیعی، به‌ویژه خاکستر بادی، به عنوان یکی از مهم‌ترین فرصت‌های توسعه پایدار

جدول ۴. خلاصه شکاف‌های تحقیقاتی و پیشنهادهای آینده.

Table 4. Summary of Research Gaps and Future Recommendations.

شکاف‌های تحقیقاتی شناسایی‌شده	پیشنهادهای تحقیقاتی آینده
نبود استانداردهای یکپارچه برای تولید و آزمون بتن سبک سازه‌ای	توسعه دستورالعمل‌ها و استانداردهای جامع ملی و بین‌المللی برای طراحی، ساخت و کنترل کیفیت بتن سبک
کمبود مطالعات میدانی در مقیاس واقعی پروژه‌های عمرانی	اجرای پایلوت‌های صنعتی و پروژه‌های واقعی برای ارزیابی عملکرد بتن سبک در شرایط اقلیمی و محیطی مختلف
ضعف در بررسی دوام بلندمدت و رفتار تحت بارگذاری دینامیکی	مطالعات جامع بر روی رفتار بتن سبک در برابر سیکل‌های یخزدگی-ذوب، خزش، جمع‌شدگی، ترک‌خوردگی و زلزله
کمبود تحقیقات در خصوص ترکیب بهینه نانو مواد و الیاف نوین	انجام آزمایش‌های سیستماتیک جهت تعیین درصد بهینه نانو ذرات، الیاف و افزودنی‌های مکمل در بتن سبک چندمنظوره
نبود ارزیابی جامع اثر متغیر بودن کیفیت خاکستر بادی	مطالعه دقیق تأثیر ترکیب شیمیایی، نوع و درصد مصرف خاکستر بادی بر خواص مکانیکی و دوام بتن سبک
محدودیت تحقیقات بر روی عملکرد زیست‌محیطی و اقتصادی بتن‌های سبز	تحلیل چرخه عمر (LCA) و مطالعات جامع هزینه-فایده برای ارزیابی پایداری اقتصادی و زیست‌محیطی بتن سبک بازیافتی و حاوی خاکستر بادی
کمبود داده درباره سازگاری بتن سبک با فناوری‌های نوین ساخت‌وساز	بررسی امکان تلفیق بتن سبک با فناوری چاپ سه‌بعدی، سازه‌های مدولار و سیستم‌های هوشمند سازه‌ای

در صنعت بتن، بیش از پیش اهمیت یافته است [۱۸۰]. استفاده از خاکستر بادی نه‌تنها به کاهش مصرف منابع طبیعی و انرژی کمک می‌کند، بلکه می‌تواند با بهبود ریزساختار بتن، خواص مکانیکی و دوام آن را نیز ارتقاء دهد [۱۸۱]. با این وجود، هنوز چالش‌های مهمی در مسیر بهره‌برداری گسترده و استاندارد از این ماده وجود دارد. برای مثال، کیفیت و ترکیب شیمیایی خاکستر بادی تولیدشده در نیروگاه‌های مختلف، بسته به نوع سوخت و فرآیند احتراق، می‌تواند به‌شدت متغیر باشد [۱۸۲]. این مسأله، تأثیر مستقیمی بر خواص بتن سبک حاوی خاکستر بادی دارد و ضرورت مطالعات جامع برای تعیین محدوده‌های بهینه مصرف، استانداردسازی و کنترل کیفیت این ماده را دوچندان می‌کند [۱۸۳]. همچنین باید توجه داشت که اکثر مطالعات مربوط به خاکستر بادی، صرفاً بر بررسی درصدهای محدود و خاصی از این ماده در بتن سبک متمرکز بوده‌اند و تحلیل رفتار بتن در بازه‌های گسترده‌تری از درصد مصرف خاکستر بادی، یا در ترکیب با سایر مواد مکمل سیمانی و نانو مواد، کمتر مورد توجه قرار گرفته است [۱۸۴]. علاوه بر این، تحقیقات سیستماتیک در خصوص تحلیل چرخه عمر، ارزیابی زیست‌محیطی و اقتصادی بتن‌های سبک حاوی خاکستر بادی و مقایسه آن‌ها با بتن‌های معمولی، هنوز در مراحل ابتدایی است و توسعه این بخش می‌تواند نقش مهمی در افزایش مقبولیت و پذیرش صنعتی این نوع بتن‌ها ایفا کند [۱۸۵].

در نهایت، با توجه به رشد روزافزون فناوری‌های نوین همچون چاپ سه‌بعدی بتن، سیستم‌های سازه‌ای مدولار و سازه‌های هوشمند، تلفیق بتن سبک سازه‌ای با این فناوری‌ها می‌تواند افق‌های جدیدی در صنعت ساخت‌وساز ایجاد کند. با این حال، برای تحقق این هدف، لازم است تحقیقات جامع‌تری در خصوص سازگاری بتن سبک با این فناوری‌ها، بهینه‌سازی فرآیند تولید و عمل‌آوری و همچنین توسعه دستورالعمل‌های اجرایی مناسب انجام گیرد.

در مجموع، اگرچه تاکنون پیشرفت‌های قابل‌توجهی در زمینه تولید،

بهینه‌سازی و کاربرد بتن سبک سازه‌ای، به‌ویژه بتن‌های حاوی خاکستر بادی، حاصل شده است، اما مسیر توسعه این مصالح همچنان نیازمند تلاش‌های هدفمند علمی، صنعتی و سیاست‌گذاری‌های مؤثر است تا بتوان از ظرفیت‌های بالقوه آن در جهت توسعه پایدار، کاهش اثرات زیست‌محیطی و بهبود عملکرد فنی و اقتصادی پروژه‌های عمرانی بهره‌برداری کامل نمود.

۷- بحث و نتیجه‌گیری

بتن سبک سازه‌ای در دهه‌های اخیر به‌عنوان یکی از راهکارهای مؤثر برای کاهش وزن مرده سازه، بهبود عملکرد لرزه‌ای، افزایش بهره‌وری انرژی و دستیابی به ساخت‌وساز پایدار مورد توجه گسترده قرار گرفته است. با وجود پیشرفت‌های فناورانه در تولید سنگدانه‌های سبک، بررسی ادبیات علمی نشان می‌دهد که چالش‌های فنی، اجرایی و استانداردسازی همچنان مانع گسترش فراگیر این نوع بتن در مقیاس صنعتی است.

در این میان، استفاده از خاکستر بادی به‌عنوان ماده مکمل سیمانی، نقش کلیدی در بهبود ریزساختار، کاهش تخلخل، افزایش دوام و ارتقای عملکرد زیست‌محیطی بتن سبک ایفا می‌کند. با این حال، نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که اثرگذاری خاکستر بادی به‌شدت وابسته به کیفیت ماده، درصد جایگزینی، نوع سنگدانه سبک و شرایط اجرایی است و در برخی مطالعات، به‌ویژه در پروژه‌های داخلی، نوسانات عملکردی قابل توجهی مشاهده شده است. این موضوع بیانگر وجود شکاف دانشی و ضرورت بومی‌سازی دستورالعمل‌های فنی در سطح ملی است.

از سوی دیگر، روند تحقیقات جدید حاکی از آن است که رویکردهای ترکیبی شامل استفاده هم‌زمان از خاکستر بادی، نانو مواد، الیاف و مصالح بازیافتی، ظرفیت بالایی برای توسعه بتن‌های سبک چندمنظوره با خواص مکانیکی، دوام و پایداری زیست‌محیطی بهبودیافته دارند. با وجود این، اغلب مطالعات موجود به آزمایش‌های آزمایشگاهی محدود شده و شواهد میدانی و صنعتی هنوز کافی نیست.

- بر اساس تحلیل انتقادی ادبیات، مسیرهای پیشنهادی برای تحقیقات آینده عبارت‌اند از:
- تدوین استانداردهای جامع ملی و بین‌المللی متناسب با شرایط بومی برای تولید و کاربرد بتن سبک حاوی خاکستر بادی؛
- انجام مطالعات میدانی و صنعتی در مقیاس واقعی به‌منظور ارزیابی دوام و عملکرد لرزه‌ای بلندمدت؛
- توسعه فناوری‌های ترکیبی با تمرکز بر بهینه‌سازی هم‌زمان خواص مکانیکی و زیست‌محیطی؛
- اجرای تحلیل‌های چرخه عمر (LCA) و ارزیابی‌های هزینه–فایده برای سنجش پایداری واقعی این نوع بتن؛
- بررسی سازگاری بتن سبک حاوی خاکستر بادی با فناوری‌های نوین ساخت مانند چاپ سه‌بعدی و سازه‌های مدولار.

در مجموع، بتن سبک سازه‌ای حاوی خاکستر بادی، با وجود محدودیت‌ها، پتانسیل قابل توجهی برای ارتقای ایمنی، کارایی و پایداری صنعت ساخت‌وساز دارد. تحقق این پتانسیل مستلزم رویکردی نظام‌مند، بین‌رشته‌ای و مبتنی بر شواهد تجربی و صنعتی است که پیوند مؤثرتری میان تحقیقات دانشگاهی و کاربردهای اجرایی برقرار کند.

منابع

[1] Thienel, K. C., Haller, T., & Beuntner, N. (2020). Lightweight concrete—From basics to innovations. Materials, 13(5), 1120.

[2] Agrawal, Y., Gupta, T., Sharma, R., Panwar, N. L., & Siddique, S. (2021). A comprehensive review on the performance of structural lightweight aggregate concrete for sustainable construction. Construction Materials, 1(1), 39-62.

[3] Zareef, M. E. (2010). Conceptual and structural design of buildings made of lightweight and infra-lightweight concrete (Doctoral dissertation, Berlin, Techn. Univ., Diss., 2010).

[4] Kumar, R., Srivastava, A., & Lakhani, R. (2021). Industrial wastes-cum-strength enhancing additives incorporated lightweight aggregate concrete (LWAC) for energy efficient building: A comprehensive review. Sustainability, 14(1), 331.

[5] Tasdemir, C., Sengul, O., & Tasdemir, M. A. (2017). A comparative study on the thermal conductivities and mechanical properties of lightweight concretes. Energy and Buildings, 151, 469-475.

[6] Huang, X., Ranade, R., Zhang, Q., Ni, W., & Li, V. C. (2013). Mechanical and thermal properties of green lightweight engineered cementitious composites. Construction and Building Materials, 48, 954-960.

[7] El Zareef, M. A., Ghalla, M., Hu, J. W., & El-Demerdash,

W. E. (2024). Damage detection of lightweight concrete dual systems reinforced with GFRP bars considering various building heights and earthquake intensities. Case Studies in Construction Materials, 20, e03191.

[8] Lu, J. X. (2023). Recent advances in high strength lightweight concrete: From development strategies to practical applications. Construction and Building Materials, 400, 132905.

[9] Phiri, R., Rangappa, S. M., Siengchin, S., Oladijo, O. P., & Ozbakkaloglu, T. (2024). Advances in lightweight composite structures and manufacturing technologies: A comprehensive review. Heliyon. 10(21).

[10] Kurda, R., Silvestre, J. D., & de Brito, J. (2018). Toxicity and environmental and economic performance of fly ash and recycled concrete aggregates use in concrete: A review. Heliyon, 4(4).

[11] Nayak, D. K., Abhilash, P. P., Singh, R., Kumar, R., & Kumar, V. (2022). Fly ash for sustainable construction: A review of fly ash concrete and its beneficial use case studies. Cleaner Materials, 6, 100143.

[12] Nadh, V. S., & Muthumani, K. (2017). Critical review on structural light weight concrete. International Journal of Civil Engineering and Technology, 8(2), 111-127.

[13] Abed, H. S. (2019). Production of lightweight concrete by using construction lightweight wastes. Engineering and Technology Journal, 37(1), 12-19.

[14] Tam, C. T. (2021). The Past, Present and Future of Concrete Construction. IEM Journal, 82(2).

[15] Badogiannis, E., Stratoura, M., Aspiotis, K., & Chatzopoulos, A. (2021). Durability of structural lightweight concrete containing different types of natural or artificial lightweight aggregates. Corrosion and Materials Degradation, 2(4), 554-567.

[16] Behera, D., Liu, K. Y., Rachman, F., & Worku, A. M. (2025). Innovations and Applications in Lightweight Concrete: Review of Current Practices and Future Directions. Buildings, 15(12), 2113.

[17] Aslam, M., Shafigh, P., Nomeli, M. A., & Jumaat, M. Z. (2017). Manufacturing of high-strength lightweight aggregate concrete using blended coarse lightweight aggregates. Journal of building engineering, 13, 53-62.

[18] Singh, N., Raza, J., Colangelo, F., & Farina, I. (2024). Advancements in Lightweight Artificial Aggregates: Typologies, Compositions, Applications, and Prospects for the Future. Sustainability, 16(21), 9329.

[19] Nadesan, M. S., & Dinakar, P. (2017). Structural concrete using sintered flyash lightweight aggregate: A review. Construction and Building Materials, 154, 928-944.

[20] Shafigh, P., Mahmud, H. B., Jumaat, M. Z. B., Ahmmad, R., & Bahri, S. (2014). Structural lightweight aggregate concrete using two types of waste from the palm oil industry as aggregate. Journal of Cleaner Production, 80, 187-196.

[21] Real, S., Gomes, M. G., Rodrigues, A. M., & Bogas, J. A. (2016). Contribution of structural lightweight aggregate concrete to the reduction of thermal bridging effect in buildings. Construction and Building Materials, 121, 460-470.

[22] Lee, Y. H., Chua, N., Amran, M., Yong Lee, Y., Hong Kueh, A. B., Fediuk, R., ... & Vasilev, Y. (2021). Thermal performance of structural lightweight concrete composites for potential energy saving. Crystals, 11(5), 461.

[23] Memon, S. A., Cui, H. Z., Zhang, H., & Xing, F. (2015). Utilization of macro encapsulated phase change materials for the development of thermal energy storage and structural lightweight aggregate concrete. Applied Energy, 139, 43-55.

[24] Eckert, M., & Oliveira, M. (2017). Mitigation of the negative effects of recycled aggregate water absorption in concrete technology. Construction and Building Materials, 133, 416-424.

[25] Eschke, L. (2024). Towards an ever-lasting Architecture.

[26] Del Rey Castillo, E., Almesfer, N., Saggi, O., & Ingham, J. M. (2020). Light-weight concrete with artificial aggregate manufactured from plastic waste. Construction and Building Materials, 265, 120199.

[27] Jafari, S., & Mahini, S. S. (2017). Lightweight concrete

in Lightweight Aggregates. Taylor & Francis.

[36] Kabay, N., Tufekci, M. M., Kizilkanat, A. B., & Oktay, D. (2015). Properties of concrete with pumice powder and fly ash as cement replacement materials. Construction and Building Materials, 85, 1-8.

[37] Alqahtani, F. K., Sherif, M. A., & Ghanem, A. M. (2023). Green lightweight concrete utilizing sustainable processed recycled plastic aggregates: Technical, economic and environmental assessment. Construction and Building Materials, 393, 132027.

[38] Ustaoglu, A., Kurtoglu, K., Gencel, O., & Kocyigit, F. (2020). Impact of a low thermal conductive lightweight concrete in building: Energy and fuel performance evaluation for different climate region. Journal of Environmental Management, 268, 110732.

[39] Sah, T. P., Lacey, A. W., Hao, H., & Chen, W. (2024). Prefabricated concrete sandwich and other lightweight wall panels for sustainable building construction: State-of-the-art review. Journal of Building Engineering, 109391.

[40] Hamad, A. J. (2014). Materials, production, properties and application of aerated lightweight concrete. International journal of materials science and engineering, 2(2), 152-157.

[41] Yakymechko, Y., Jaskulski, R., Banach, M., & Perłowski, P. (2023). Review of selected aspects of shaping of physical, mechanical and thermal properties and manufacturing technology of lightweight and ultra-lightweight autoclaved aerated concrete. Archives of Civil Engineering, 385-402.

[42] Thakur, A., & Kumar, S. (2022). Mechanical properties and development of light weight concrete by using autoclaved aerated concrete (AAC) with aluminum powder. Materials Today: Proceedings, 56, 3734-3739.

[43] Pedroso, M., De Brito, J., & Silvestre, J. D. (2017). Characterization of eco-efficient acoustic insulation materials (traditional and innovative). Construction and Building Materials, 140, 221-228.

[44] Omran, M., Khalifeh, M., & Saasen, A. (2022, October). design using gene expression programing. Construction and Building Materials, 139, 93-100.

[28] Shirzadi, T., & Ahmadi Danesh Ashtiani, F. (2024). Mechanical behavior of new lightweight concrete with fiber and ingredients. Numerical Methods in Civil Engineering, 8(3), 22-28.

[29] Mijan, R. S., Momeni, M., & Hadianfard, M. A. (2024). Impact of fine lightweight aggregates and coal waste on structural lightweight concrete: Experimental study and gene expression programming. In Structures (Vol. 63, p. 106397). Elsevier.

[30] Khoshvatan, M., & Pauraminia, M. (2021). The effects of additives to lightweight aggregate on the mechanical properties of structural lightweight aggregate concrete. Civil and Environmental Engineering Reports, 31(1).

[31] Azizi, M., Teymourian, T., Teymoorian, T., Gheibi, M., Kowsari, E., Hajiaghaei–Keshteli, M., & Ramakrishna, S. (2023). A smart and sustainable adsorption-based system for decontamination of amoxicillin from water resources by the application of cellular lightweight concrete: experimental and modeling approaches. Research on Chemical Intermediates, 49(1), 341-370.

[32] Dadkhah, M., Rahgozar, R., Bandani, A., & Rahgozar, P. (2024). Mechanical Properties of Self-Compacting Lightweight Concrete Containing Pumice and Metakaolin. Journal of Rehabilitation in Civil Engineering, 12(3), 97-116.

[33] Pour, H. B. R., & Saffari, H. (2024). Relationships for Evaluating the Seismic Resilience Index of Reinforced Concrete Buildings Built Up with FRP Lying on Different Soil Types under Near-Field Earthquakes. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 48(6), 4215-4231.

[34] Shafabakhsh, G., Jafari Ani, O., & Mirabdolazimi, S. M. (2021). Rehabilitation of asphalt pavement to improvement the mechanical and environmental properties of asphalt concrete by using of nano particles. Journal of Rehabilitation in Civil Engineering, 9(2), 1-20.

[35] Małgorzata, F. (2023). Application of Waste Materials

Influence of Activators and Admixtures on Rheology of Geopolymer Slurries for Well Cementing Applications. In SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition (p. D031S012R003). SPE.

[45] Lei, M., Liu, Z., & Wang, F. (2024). Review of lightweight cellular concrete: Towards low-carbon, high-performance and sustainable development. Construction and Building Materials, 429, 136324.

[46] Lermen, R. T., Favaretto, P., Silva, R. D. A., Hidalgo, G. E. N., Tubino, R. M., & Tiecher, F. (2019). Effect of additives, cement type, and foam amount on the properties of foamed concrete developed with civil construction waste. Applied Sciences, 9(15), 2998.

[47] Chica, L., & Alzate, A. (2019). Cellular concrete review: New trends for application in construction. Construction and building materials, 200, 637-647.

[48] Tran, N. P., Nguyen, T. N., Ngo, T. D., Le, P. K., & Le, T. A. (2022). Strategic progress in foam stabilisation towards high-performance foam concrete for building sustainability: A state-of-the-art review. Journal of Cleaner Production, 375, 133939.

[49] Yang, S., Wang, X., Hu, Z., Li, J., Yao, X., Zhang, C., ... & Wang, W. (2023). Recent advances in sustainable lightweight foamed concrete incorporating recycled waste and byproducts: A review. Construction and Building Materials, 403, 133083.

[50] VS, S., & Xavier, J. R. (2024). Effects of nanomaterials on mechanical properties in cementitious construction materials for high-strength concrete applications: a review. Journal of Adhesion Science and Technology, 38(20), 3737-3768.

[51] Esmaeili, K. (2023). An Introduction to Lightweight Flexible Nonlinear Composite (LFNLC) and Elastic Composite, Reinforced Lightweight Concrete (ECRLC) as the Cementitious LFNLC: Lightweight Flexible Nonlinear Composite. International Journal of Innovation in Engineering, 3(3), 28-47.

[52] Sadigh Sarabi, M., Arash Sohrabi, S., & Dehghan, S. (2024). Improving Tensile Strength and Strength and Resilience of Reinforced Concrete through Pozzolanic Materials. European Online Journal of Natural and Social Sciences: Proceedings, 13(4 (s)), pp-14.

[53] Hosseinzadehfard, E., & Mobaraki, B. (2024). Investigating concrete durability: The impact of natural pozzolan as a partial substitute for microsilica in concrete mixtures. Construction and Building Materials, 419, 135491.

[54] Gholhaki, M., & Golpayegani, S. (2025). A Study on the Seismic Behavioral Parameters of the Composite Steel Plate Shear Wall (CSPSW) in The Building Frame System Using Incremental Dynamic Analysis (IDA). Amirkabir Journal of Civil Engineering.

[55] Mustafa Mohamed, A., Tayeh, B. A., Ahmed, T. I., Bashir, M. O., & Tobbala, D. E. (2025). Influence of nano-silica and nano-ferrite particles on mechanical and durability of sustainable concrete: A review. Nanotechnology sReviews, 14(1), 20250151.

[56] Sadati, S. E., Rahbar, N., & Kargarsharifabad, H. (2023). Energy assessment, economic analysis, and environmental study of an Iranian building: The effect of wall materials and climatic conditions. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 56, 103093.

[57] Rezaifar, O., Ghanepour, M., & Amini, M. M. (2024). A novel magnetic approach to improve compressive strength and magnetization of concrete containing nano silica and steel fibers. Journal of Building Engineering, 91, 109342.

[58] Jakhar, S. K., Kumar, R., Nagappan, B., & Singh, A. (2023). Nanotechnology and high-performance concrete: Evaluating mechanical transformations. Multidisciplinary Reviews, 6.

[59] Alghrairi, N., N. Aznieta, F., M. Ibrahim, A., Wan Hu, J., Mohammed Najm, H., & Anas, S. M. (2025). Improvement of Concrete Characterization Using Nanomaterials: State-of-the-Art. Journal of Engineering, 2025(1), 8027667.

[60] Goel, G., Sachdeva, P., Chaudhary, A. K., & Singh, Y. (2022). The use of nanomaterials in concrete: A review. Materials Today: Proceedings, 69, 365-371.

[61] Hussein, T., Kurda, R., Mosaberpanah, M., & Alyousef, R. (2022). A review of the combined effect of fibers and nano materials on the technical performance of mortar and concrete. Sustainability, 14(6), 3464.

[62] Ojaghi, K., Kalateh, F., & Lotfollahi Yaghin, M. A. (2025). Review on the Impact of Nanoparticle Additives on Fiber Adhesion in Ultra-High Performance Concrete for Corrosive Traffic Environments. International Journal of Transportation Engineering, 12(4), 1947-1972.

[63] Waheeb, R., & Lymperis, I. (2023). Keys to successful design of earthquake-resistant buildings. Available at SSRN.

[64] Simões, S. (2024). High-performance advanced composites in multifunctional material design: state of the art, challenges, and future directions. Materials, 17(23), 5997.

[65] Bautista-Gutierrez, K. P., Herrera-May, A. L., Santamaría-López, J. M., Honorato-Moreno, A., & Zamora-Castro, S. A. (2019). Recent progress in nanomaterials for modern concrete infrastructure: Advantages and challenges. Materials, 12(21), 3548.

[66] Silvestre, J., Silvestre, N., & De Brito, J. (2016). Review on concrete nanotechnology. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 20(4), 455-485.

[67] Paul, S. C., van Zijl, G. P., & Šavija, B. (2020). Effect of fibers on durability of concrete: A practical review. Materials, 13(20), 4562.

[68] Saleem, H., Zaidi, S. J., & Alnuaimi, N. A. (2021). Recent advancements in the nanomaterial application in concrete and its ecological impact. Materials, 14(21), 6387.

[69] Hassanpour, M., Shafigh, P., & Mahmud, H. B. (2012). Lightweight aggregate concrete fiber reinforcement–A review. Construction and Building Materials, 37, 452-461.

[70] Bhandari, I., Kumar, R., Sofi, A., & Nighot, N. S. (2023). A systematic study on sustainable low carbon cement–Superplasticizer interaction: Fresh, mechanical, microstructural and durability characteristics. Heliyon, 9(9).

[71] Sasi, D., Harikumar, S., Prasad, A., Beena, V., Gleeja, V. L., & Nameer, P. O. (2021). STRUCTURAL AND MICROCLIMATIC CHARACTERISTICS OF DAIRY CATTLE SHELTERS IN KERALA. Journal of Indian Veterinary Association, 19(1).

[72] Aliu, A. (2024). Experimental study of mixing parameters on graphene-oxide reinforced concrete compressive strength and its applicability to sub-Saharan Africa (Doctoral dissertation, Anglia Ruskin Research Online (ARRO)).

[73] Sabet, M. (2024). Advanced developments in carbon nanotube polymer composites for structural applications. Iranian Polymer Journal, 1-30.

[74] Khodadadi, N., Roghani, H., Harati, E., Mirdarsoltany, M., De Caso, F., & Nanni, A. (2024). Fiber-reinforced polymer (FRP) in concrete: A comprehensive survey. Construction and Building Materials, 432, 136634.

[75] Hasani, M., Nejad, F. M., Sobhani, J., & Chini, M. (2021). Mechanical and durability properties of fiber reinforced concrete overlay: Experimental results and numerical simulation. Construction and Building Materials, 268, 121083.

[76] Ghanbari, M., Kohnehpooshi, O., & Tohidi, M. (2020). Experimental study of the combined use of fiber and nano silica particles on the properties of lightweight self compacting concrete. Int. J. Eng, 33(8), 1499-1511.

[77] Fallah, S., & Nematzadeh, M. (2017). Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume. Construction and building materials, 132, 170-187.

[78] Halvaeyfar, M. R., Gorji Azandariani, M., Zeighami, E., & Mirhosseini, S. M. (2024). Retrofitting fiber-reinforced concrete beams with nano-graphene oxide and CFRP sheet: an experimental study. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 25(1), 32.

[79] Shojaei, B., Najafi, M., Yazdanbakhsh, A., Abtahi, M., & Zhang, C. (2021). A review on the applications of polyurea in the construction industry. Polymers for

advanced technologies, 32(8), 2797-2812.

[80] Mottaki, Z., Hosseini Sabzevari, S. A., & Aslani, F. (2024). Designing post-earthquake temporary shelter in hot and arid climate (Case study: Isfahan city, Iran). Architectural Engineering and Design Management, 20(6), 1777-1794.

[81] Nasabolhosseini, S. A., Honarbakhsh, A., Zhiani, R., Movahedifar, S. M., & Nobahari, M. (2025). CNT/DFNS nanoparticles as a valuable admixture for ultrahigh-performance concrete. Results in Engineering, 104084.

[82] Mirdarsoltany, M., Abed, F., Homayoonmehr, R., & Alavi Nezhad Khalil Abad, S. V. (2022). A comprehensive review of the effects of different simulated environmental conditions and hybridization processes on the mechanical behavior of different FRP bars. Sustainability, 14(14), 8834.

[83] Siddiqui, A. R., Khan, R., & Akhtar, M. N. (2025). Sustainable concrete solutions for green infrastructure development: A review. Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies, 10(1), 108-141.

[84] Khan, A. H., Akhtar, M. N., & Bani-Hani, K. A. (Eds.). (2024). Recent Developments and Innovations in the Sustainable Production of Concrete.

[85] Moodi, F., Hanafi, M. R., & Shariatinia, Z. (2025). Toward high sustainability using fully recycled geopolymer concrete: mechanical, rheological, and microstructural properties. RSC Advances, 15(28), 22953-22971.

[86] Naik, T. R., & Moriconi, G. (2005, October). Environmental-friendly durable concrete made with recycled materials for sustainable concrete construction. In International Symposium on Sustainable Development of Cement, Concrete and Concrete Structures, Toronto, Ontario, October (Vol. 5, No. 7).

[87] Napolano, L., Menna, C., Graziano, S. F., Asprone, D., D'Amore, M., de Gennaro, R., & Dondi, M. (2016). Environmental life cycle assessment of lightweight concrete to support recycled materials selection for sustainable design. Construction and Building Materials, 119, 370-384.

[88] Badraddin, A. K., Rahman, R. A., Almutairi, S., & Esa, M. (2021). Main challenges to concrete recycling in practice. Sustainability, 13(19), 11077.

[89] De Brito, J., Ferreira, J., Pacheco, J., Soares, D., & Guerreiro, M. (2016). Structural, material, mechanical and durability properties and behaviour of recycled aggregates concrete. Journal of Building Engineering, 6, 1-16.

[90] Zeyad, A. M. (2023). Sustainable concrete Production: Incorporating recycled wastewater as a green building material. Construction and Building Materials, 407, 133522.

[91] Sandanayake, M., Bouras, Y., Haigh, R., & Vrcelj, Z. (2020). Current sustainable trends of using waste materials in concrete—a decade review. Sustainability, 12(22), 9622.

[92] Mehta, P. K. (2002). Greening of the concrete industry for sustainable development. Concrete international, 24(7), 23-28.

[93] Kwek, S. Y., & Awang, H. (2021). Utilization of industrial waste materials for the production of lightweight aggregates: a review. Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 10(6), 353-381.

[94] Gu, L., & Ozbakkaloglu, T. (2016). Use of recycled plastics in concrete: A critical review. Waste Management, 51, 19-42.

[95] Pellegrino, C., Faleschini, F., & Meyer, C. (2019). Recycled materials in concrete. Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete, 19-54.

[96]Nassiri, S., Roy, S., Haider, M. M., Butt, A. A., Pandit, G. A., & Harvey, J. T. (2025). Literature Review and Industry Survey of Recycled Fibers from Novel and Existing Source Materials for Concrete Use.

[97] Gursel, A. P., Maryman, H., & Ostertag, C. (2016). A life-cycle approach to environmental, mechanical, and durability properties of "green" concrete mixes with rice husk ash. Journal of Cleaner Production, 112, 823-836.

[98] Hasan, N. M. S., Shaurdho, N. M. N., Sobuz, M. H. R., Meraz, M. M., Islam, M. S., & Miah, M. J. (2023).

Utilization of waste glass cullet as partial substitutions of coarse aggregate to produce eco-friendly concrete: role of metakaolin as cement replacement. Sustainability, 15(14), 11254.

[99] Amiri, M., Hatami, F., & Golafshani, E. M. (2021). Evaluating the synergic effect of waste rubber powder and recycled concrete aggregate on mechanical properties and durability of concrete. Case Studies in Construction Materials, 15, e00639.

[100] Rahat Dahmardeh, S., Sargazi Moghaddam, M. S., & Mirabi Moghaddam, M. H. (2021). Effects of waste glass and rubber on the SCC: rheological, mechanical, and durability properties. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 25(2), 302-321.

[101] Moghadam, A. S., Roshan, A. M. G., & Omidinasab, F. (2023). Utilization of agricultural wastes as fiber, binder and aggregates of geopolymer mortars: Application of Taguchi method for strength and durability optimization. Journal of Building Engineering, 75, 106906.

[102] Ghafari, F., Bozorgi, M. H., & Salari, M. (2022). Applications of nanotechnology in construction: A Short Review. Advances in Applied NanoBio-Technologies, 3(1), 82-86.

[103] Azandariani, M. G., Vajdian, M., Javadi, M., & Parvari, A. (2024). Durability and compressive strength of composite polyolefin fiber-reinforced recycled aggregate concrete: An experimental study. Composites Part C: Open Access, 15, 100533.

[104] Narimanifar, K., & Mousavi Ghasemi, S. A. (2024). Evaluating and Comparing the Bending Performance of RC Beams Fabricated with Lightweight Aggregate Concrete and Normal Concrete of Equivalent Strength. Buildings, 15(1), 45.

[105] Mohamed, A. M., Tayeh, B. A., Majeed, S. S., Aisheh, Y. I. A., & Salih, M. N. A. (2024). Ultra-light foamed concrete mechanical properties and thermal insulation perspective: A comprehensive review. Journal of CO2 Utilization, 83, 102827.

[106] Allujami, H. M., Abdulkareem, M., Jassam, T. M., Al-Mansob, R. A., Ng, J. L., & Ibrahim, A. (2022). Nanomaterials in recycled aggregates concrete applications: Mechanical properties and durability. A review. Cogent Engineering, 9(1), 2122885.

[107] Almusaed, A., Yitmen, I., Myhren, J. A., & Almssad, A. (2024). Assessing the impact of recycled building materials on environmental sustainability and energy efficiency: a comprehensive framework for reducing greenhouse gas emissions. Buildings, 14(6), 1566.

[108] Kromoser, B., Preinstorfer, P., & Kollegger, J. (2019). Building lightweight structures with carbon-fiber-reinforced polymer--reinforced ultra-high-performance concrete: Research approach, construction materials, and conceptual design of three building components. Structural Concrete, 20(2), 730-744.

[109] Qasem, F., Sharaan, M., Fujii, M., & Nasr, M. (2024). Recycling of Egyptian Shammi Corn Stalks for Maintaining Sustainable Cement Industry: Scoring on Sustainable Development Goals. Recycling, 9(3), 34.

[110] Akbulut, Z. F., Yavuz, D., Tawfik, T. A., Smarzewski, P., & Guler, S. (2024). Enhancing concrete performance through sustainable utilization of class-C and class-F fly ash: a comprehensive review. Sustainability, 16(12), 4905.

[111] Nilimaa, J. (2023). Smart materials and technologies for sustainable concrete construction. Developments in the Built Environment, 15, 100177.

[112] Senapati, M. R. (2011). Fly ash from thermal power plants–waste management and overview. Current science, 1791-1794.

[113] Suraneni, P., Burris, L., Shearer, C. R., & Hooton, R. D. (2021). ASTM C618 fly ash specification: Comparison with other specifications, shortcomings, and solutions. ACI Mater. J, 118(1), 157-167.

[114] Liu, X., Ni, C., Meng, K., Zhang, L., Liu, D., & Sun, L. (2020). Strengthening mechanism of lightweight cellular concrete filled with fly ash. Construction and Building Materials, 251, 118954.

[115] Hoyos-Montilla, A. A., Tobón, J. I., & Puertas, F. (2023). Role of calcium hydroxide in the alkaline activation of

& Islam, M. N. (2011). Strength development of mortar and concrete containing fly ash: A review. International Journal of the Physical Sciences, 6(17), 4137-4153.

[124] Sathsarani, H. B. S., Sampath, K. H. S. M., & Ranathunga, A. S. (2023). Utilization of fly ash-based geopolymer for well cement during CO2 sequestration: A comprehensive review and a meta-analysis. Gas Science and Engineering, 113, 204974.

[125] Zeng, Q., Li, K., Fen-chong, T., & Dangla, P. (2012). Determination of cement hydration and pozzolanic reaction extents for fly-ash cement pastes. Construction and Building Materials, 27(1), 560-569.

[126] Imbabi, M. S., Carrigan, C., & McKenna, S. (2012). Trends and developments in green cement and concrete technology. International Journal of Sustainable Built Environment, 1(2), 194-216.

[127] Tangirala, A., Rawat, S., & Lahoti, M. (2023). High volume fly ash and basalt-polypropylene fibres as performance enhancers of novel fire-resistant fibre reinforced cementitious composites. Journal of Building Engineering, 78, 107586.

[128] Shukla, S. K., & Kaul, S. (2024). 1 Advanced Building. Thermal Evaluation of Indoor Climate and Energy Storage in Buildings, 1.

[129] Zhao, N., Wang, S., Wang, C., Quan, X., Yan, Q., & Li, B. (2020). Study on the durability of engineered cementitious composites (ECCs) containing high-volume fly ash and bentonite against the combined attack of sulfate and freezing-thawing (FT). Construction and Building Materials, 233, 117313.

[130] Shao, R., Wu, C., & Li, J. (2022). A comprehensive review on dry concrete: application, raw material, preparation, mechanical, smart and durability performance. Journal of Building Engineering, 55, 104676.

[131] Saradar, A., Nemati, P., Paskiabi, A. S., Moein, M. M., Moez, H., & Vishki, E. H. (2020). Prediction of mechanical properties of lightweight basalt fiber reinforced concrete containing silica fume and fly ash: coal fly ash. Cement and Concrete Composites, 137, 104925.

[116] Wang, Q., Wang, D., & Chen, H. (2017). The role of fly ash microsphere in the microstructure and macroscopic properties of high-strength concrete. Cement and Concrete Composites, 83, 125-137.

[117] Dong, D., Huang, Y., Pei, Y., Zhang, X., Cui, N., Zhao, P., ... & Lu, L. (2023). Effect of spherical silica fume and fly ash on the rheological property, fluidity, setting time, compressive strength, water resistance and drying shrinkage of magnesium ammonium phosphate cement. Journal of Building Engineering, 63, 105484.

[118] Woo, H. M., Kim, C. Y., & Yeon, J. H. (2018). Heat of hydration and mechanical properties of mass concrete with high-volume GGBFS replacements. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 132, 599-609.

[119] Zheng, S., Lin, L., Mao, W., Wang, Y., Liu, J., & Yuan, Y. (2025). A Hybrid RBF-PSO Framework for Real-Time Temperature Field Prediction and Hydration Heat Parameter Inversion in Mass Concrete Structures. Buildings, 15(13), 2236.

[120] Mojapelo, K. S., Kupolati, W. K., Burger, E. A., Ndambuki, J. M., Snyman, J., Achi, C. G., & Quadri, A. I. (2025). Durability and Environmental Impact of Wastewater Sludge Ash as a Cement Replacement in Concrete: Challenges and Future Directions. Materials Circular Economy, 7(1), 1-19.

[121] Kravanja, G., Mumtaz, A. R., & Kravanja, S. (2024). A comprehensive review of the advances, manufacturing, properties, innovations, environmental impact and applications of Ultra-High-Performance Concrete (UHPC). Buildings, 14(2), 382.

[122] Abdulkareem, O. A., Al Bakri, A. M., Kamarudin, H., Nizar, I. K., & Saif, A. E. A. (2014). Effects of elevated temperatures on the thermal behavior and mechanical performance of fly ash geopolymer paste, mortar and lightweight concrete. Construction and building materials, 50, 377-387.

[123] Karim, M. R., Zain, M. F. M., Jamil, M., Lai, F. C.,

calcium aluminate cement concrete. In Structures (Vol. 36, pp. 140-152). Elsevier.

[140] Javan, H., Honarbakhsh, A., Movahedifar, S. M., Nobahari, M., & Zhiani, R. (2025). The use of dendritic fibrous nano-titanium to enhance the initial characteristics and durability of lightweight concrete. Scientific Reports, 15(1), 11811.

[141] Ali, M., Buller, A. S., Ali, T., Shabbir, S., Ahmed, A., & Rehman, J. U. (2025). Effect of Fly Ash and Indus River Sand on Mechanical, Durability and Environmental Performance of Autoclaved Aerated Concrete (AAC). Tehnički vjesnik, 32(3), 860-867.

[142] Bayat, M. (2025). Nanomaterials in Geotechnical Engineering: A Comprehensive Review on Soil Improvement Techniques. Civil Engineering Infrastructures Journal.

[143] Alghrairi, N. S., Aziz, F. N., AlGhazali, N. A., Rashid, S. A., Mohmed, M. Z., & Ibrahim, A. M. (2025). Physical, Mechanical, Durability and Microstructure properties of lightweight concrete containing nanomaterials: A comprehensive review. Journal of Rehabilitation in Civil Engineering, 13(2), 94-127.

[144] Dhairiyasamy, R., Gabiriel, D., Varshney, D., & Singh, S. (2025). Optimizing nanomaterial dosages in concrete for structural applications using experimental design techniques. Scientific Reports, 15(1), 22375.

[145] Mostofinejad, D., Abdoli, M., Saljoughian, A., Karimi, A., & Eftekhar, M. (2025). Innovative energy-efficient lightweight concrete with improved thermal and mechanical properties using PCM-impregnated LECA aggregates. Construction and Building Materials, 482, 141588.

[146] Choi, S. J., Mun, J. S., Yang, K. H., & Kim, S. J. (2016). Compressive fatigue performance of fiber-reinforced lightweight concrete with high-volume supplementary cementitious materials. Cement and Concrete Composites, 73, 89-97.

[147] Zamora-Castro, S. A., Salgado-Estrada, R., Sandoval-Herazo, L. C., Melendez-Armenta, R. A., Manzano-Huerta, E., Yelmi-Carrillo, E., & Herrera-May, A. L. Experimental and numerical assessment. Journal of Building Engineering, 32, 101732.

[132] Samson, G., Phelipot-Mardelé, A., & Lanos, C. (2017). A review of thermomechanical properties of lightweight concrete. Magazine of Concrete Research, 69(4), 201-216.

[133] Zeighami, E., Ghiasvand, E., & Mirhosseini, S. M. (2024). Investigating the Relationship Between Compressive Strength and Electrical Resistivity of Concretes Containing Micro Silica and Fly Ash at Early Ages. International Journal of Multiphysics, 18(4).

[134] Bazregar, N., Garkani-Nejad, Z., Maghsoudi, S., & Amiri, M. (2024). Investigating the performance of silica fume as a supplementary cementitious material in the production of pozzolanic cement with the aim of achieving the maximum compressive strength. Asian Journal of Civil Engineering, 25(4), 3747-3761.

[135] Mansoori, B., Yousefinezhad, H., Avaznejad, F., & Bazaee, A. (2024). Investigating the Freezing Strength and Durability of Lightweight Concrete With Different Weight Ratios of Nano Montmorillonite and Microsilica. Amirkabir Journal of Civil Engineering, 55(11), 2263-2284.

[136] Nia, S. B., & Shafei, B. (2024). Synergistic effects of nano and micro silica on fresh and hardened properties of self-consolidating concrete. Case Studies in Construction Materials, 21, e03443.

[137] Dabbaghi, F., Nasrollahpour, S., Dehestani, M., & Yousefpour, H. (2022). Optimization of concrete mixtures containing lightweight expanded clay aggregates based on mechanical, economical, fire-resistance, and environmental considerations. Journal of Materials in Civil Engineering, 34(2), 04021445.

[138] Hashemmoniri, S., & Fatemi, A. (2023). Optimization of lightweight foamed concrete using fly ash based on mechanical properties. Innovative Infrastructure Solutions, 8(1), 59.

[139] Abolhasani, A., Samali, B., Dehestani, M., & Libre, N. A. (2022). Effect of rice husk ash on mechanical properties, fracture energy, brittleness and aging of

[156] Maiti, S., Islam, M. R., Uddin, M. A., Afroj, S., Eichhorn, S. J., & Karim, N. (2022). Sustainable fiber-reinforced composites: a review. Advanced Sustainable Systems, 6(11), 2200258.

[157] Feizbahr, M., & Pourzanjani, P. (2024). The Impact of Advanced Concrete Technologies on Modern Construction and Aesthetics. Journal of Review in Science and Engineering, 2024, 1-9.

[158] Abdal, S., Mansour, W., Agwa, I., Nasr, M., Abadel, A., Onuralp Özkılıç, Y., & Akeed, M. H. (2023). Application of ultra-high-performance concrete in bridge engineering: Current status, limitations, challenges, and future prospects. Buildings, 13(1), 185.

[159] Masoule, M. S. T., Bahrami, N., Karimzadeh, M., Mohasanati, B., Shoaei, P., Ameri, F., & Ozbakkaloglu, T. (2022). Lightweight geopolymer concrete: A critical review on the feasibility, mixture design, durability properties, and microstructure. Ceramics International, 48(8), 10347-10371.

[160] Lotfy, A., Hossain, K. M., & Lachemi, M. (2016). Durability properties of lightweight self-consolidating concrete developed with three types of aggregates. Construction and Building Materials, 106, 43-54.

[161] Shcherban', E. M., Stel'makh, S. A., Beskopylny, A., Mailyan, L. R., Meskhi, B., & Varavka, V. (2021). Nanomodification of lightweight fiber reinforced concrete with micro silica and its influence on the constructive quality coefficient. Materials, 14(23), 7347.

[162] Umar, U. M., & Muthusamy, K. (2023). Potential of Waste Material as Coarse Aggregates for Lightweight Concrete Production: A Sustainable Approach. Construction, 3(1), 87-114.

[163] Stempkowska, A., & Gawenda, T. (2024). Artificial lightweight aggregate made from alternative and waste raw materials, hardened using the hybrid method. Scientific Reports, 14(1), 16880.

[164] Onyelowe, K. C., Kamchoom, V., Ebid, A. M., Hanandeh, S., Zurita Polo, S. M., Zabala Vizuete, R. F., ... & Avudaiappan, S. (2025). Evaluating the impact of (2021). Sustainable development of concrete through aggregates and innovative materials: A review. Applied sciences, 11(2), 629.

[148] Shafei, B., Kazemian, M., Dopko, M., & Najimi, M. (2021). State-of-the-Art Review of Capabilities and Limitations of Polymer and Glass Fibers Used for Fiber-Reinforced Concrete. Materials 2021, 14, 409.

[149] Loh, K. J., Gupta, S., & Ryu, D. (2022). Multifunctional materials and nanocomposite sensors for civil infrastructure monitoring. In Sensor Technologies for Civil Infrastructures (pp. 497-553). Woodhead Publishing.

[150] Ming, X., & Cao, M. (2020). Development of eco-efficient cementitious composites with high fire resistance and self-healing abilities-a review. Resources, Conservation and Recycling, 162, 105017.

[151] Newman, J., & Owens, P. (2003). Properties of lightweight concrete. Advanced concrete technology, 3, 1-29.

[152] Cruz, G., Dizon, J. R. C., Farzadnia, N., Zhou, H., Margarito, M., Garcia, J. A., ... & Advincula, R. C. (2023). Performance, applications, and sustainability of 3D-printed cement and other geomaterials. MRS Communications, 13(3), 385-399.

[153] Ghosh, A., Edwards, D. J., Hosseini, M. R., Al-Ameri, R., Abawajy, J., & Thwala, W. D. (2021). Real-time structural health monitoring for concrete beams: A cost-effective 'Industry 4.0'solution using piezo sensors. International Journal of Building Pathology and Adaptation, 39(2), 283-311.

[154] Rakam, A., Sahu, S. S., & Pillalamarri, B. (2024). State-of-the-art review on advancement in foam concrete production technology using mineral admixtures. Innovative Infrastructure Solutions, 9(11), 439.

[155] Ghoddousi, P., Zareechian, M., Javid, A. A. S., & Korayem, A. H. (2020). Microstructural study and surface properties of concrete pavements containing nanoparticles. Construction and Building Materials, 262, 120103.

[173] Haller, T., Beuntner, N., & Thienel, K. C. (2024). Optimized building envelope: Lightweight concrete with integrated steel framework. Materials, 17(6), 1278.

[174] Ahmed, M. M., Sadoon, A., Bassuoni, M. T., & Ghazy, A. (2024). Utilizing Agricultural Residues from Hot and Cold Climates as Sustainable SCMs for Low-Carbon Concrete. Sustainability, 16(23), 10715.

[175] Liao, Q., Zhao, X. D., Wu, W. W., Lu, J. X., Yu, K. Q., & Poon, C. S. (2024). A review on the mechanical performance and durability of fiber reinforced lightweight cement composites: The roles of fiber and lightweight aggregate. Journal of Building Engineering, 109121.

[176] Ortiz, J. D., Khedmatgozar Dolati, S. S., Malla, P., Nanni, A., & Mehrabi, A. (2023). FRP-reinforced/strengthened concrete: State-of-the-art review on durability and mechanical effects. Materials, 16(5), 1990.

[177] Ghaboussi, D. (2025). Performance Analysis of Self-Compacting Concrete in Earthquake-Resistant Buildings. Jurnal Mekintek: Jurnal Mekanikal, Energi, Industri, Dan Teknologi, 16(1), 19-28.

[178] Beytekin, H. E., Biricik Altun, Ö., Mardani, A., & Şenkal Sezer, F. (2024). Innovative lightweight concrete: effect of fiber, bacteria and nanomaterials. Iranian Polymer Journal, 33(9), 1327-1350.

[179] Salami, B. A., Bahraq, A. A., ul Haq, M. M., Ojelade, O. A., Taiwo, R., Wahab, S., ... & Ibrahim, M. (2024). Polymer-enhanced concrete: A comprehensive review of innovations and pathways for resilient and sustainable materials. Next Materials, 4, 100225.

[180] Gautam, L., Purbe, M. K., Sharma, K. V., Kumar, C., & Kalita, P. P. (2025). Environmental impact mitigation and durability enhancement of concrete through fly ash substitution: a comprehensive review. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, 10(2), 99.

[181] Benli, A., Öz, A., Kılıç, D., Tortum, A., Yıldız, İ., & Kaplan, G. (2025). Sustainable fly ash-based geopolymer composites: The influence of RAP aggregates and silica fume on strength, durability, and microstructural properties. Structural Concrete.

waste marble on the compressive strength of traditional concrete using machine learning. Scientific Reports, 15(1), 13417.

[165] Wattanapanich, C., Imjai, T., Sridhar, R., Garcia, R., & Thomas, B. S. (2024). Optimizing recycled aggregate concrete for severe conditions through machine learning techniques: a review. Engineered Science, 31.

[166] Meena, V. W. (2020). Quality Management Model for Curbing Failure of Reinforced Concrete Buildings in Dar es Salaam, Tanzania (Doctoral dissertation, JKUAT-COETEC).

[167] Haddadian, A., Alengaram, U. J., Ayough, P., Mo, K. H., & Alnahhal, A. M. (2023). Inherent characteristics of agro and industrial By-Products based lightweight concrete–A comprehensive review. Construction and Building Materials, 397, 132298.

[168] Bonde, A., Agrawal, P. S., Chaware, M., Dode, S., Gupta, S., & Ahmad, F. (2024). Evolution of green concrete in the building industry: A sustainable approach for nanomaterials: development and application. In Nanofluids Technology for Thermal Sciences and Engineering (pp. 292-328). CRC Press.

[169] Elshahawi, M., Hückler, A., & Schlaich, M. (2021). Infra lightweight concrete: A decade of investigation (a review). Structural Concrete, 22, E152-E168.

[170] DeVita, H. A. (2024). Evaluating the Performance and Feasibility of Foamed Glass Aggregate in Lightweight Concrete Mix Designs (Master's thesis, Villanova University).

[171] Murali, G., Wong, L. S., & Abid, S. R. (2024). A comprehensive review of drop weight impact testing: evaluating the Pros and Cons in fiber-reinforced concrete performance assessment. Journal of Building Engineering, 109934.

[172] Jiang, L., Wu, M., Du, F., Chen, D., Xiao, L., Chen, W., ... & Ding, Q. (2024). State-of-the-art review of microcapsule self-repairing concrete: Principles, applications, test methods, prospects. Polymers, 16(22), 3165.

[182] Zierold, K. M., & Odoh, C. (2020). A review on fly ash from coal-fired power plants: chemical composition, regulations, and health evidence. Reviews on environmental health, 35(4), 401-418.

[183] Alterary, S. S., & Marei, N. H. (2021). Fly ash properties, characterization, and applications: A review. Journal of King Saud University-Science, 33(6), 101536.

[184] Porselvan, R., Lakshmi, T. S., & Tholkapiyan, M. (2025). Optimization of Bacterial Self-healing Concrete Using Bacillus licheniformis with Micro Silica and Fly Ash Aggregates. J. Environ. Nanotechnol, 14(1), 334-346.

[185] Ilkentapar, S., Örklemez, E., Durak, U., Gülçimen, S., Bayram, S., Uzal, N., ... & Atis, C. D. (2025). Evaluation of diatomite substitute with thermal power plant waste fly ash in sustainable geopolymer through life cycle assessment. Journal of Material Cycles and Waste Management, 1-18.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Vahdani, Sh. Pour Akbar, A. Hatami Rad, J. Najafizadeh, Advancements, Challenges, and Future Prospects of Structural Lightweight Concrete: Emphasizing the Role of Fly Ash in Sustainable Construction, Amirkabir J. Civil Eng., 57(11) (2026) 1981-2010.

DOI: 10.22060/ceej.2026.24576.8326