

Application of supplementary cementitious materials in improving the environmental performance of concrete towards sustainable development

Behnoosh Khataei^{1*}

1- Assistant Professor, Faculty of Earth Sciences Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.

Abstract

The present study investigated the influence of partially replacing cement in concrete with supplementary cementitious materials (SCMs) on the environmental performance and negative impacts of concrete. For this purpose, several mix designs including different levels of cement replacement with a combination of silica fume and fly ash were used while maintaining constant amounts of fine and coarse aggregates and other ingredients. To evaluate the environmental performance of the mixtures, the global warming potential (GWP), expressed as carbon emissions, and embodied energy representing total energy consumption, were quantified and analyzed. Then, simultaneous evaluation of the aforementioned indices with the mechanical indices of concrete, including compressive strength and tensile strength, was performed. The results demonstrated that increasing the replacement level of cement with SCMs significantly improved the environmental performance of concrete. Specifically, carbon emissions decreased from 353.48 to 251.17 kg CO₂/m³, while embodied energy declined from 2150 to 1486 MJ/m³. Compared with the control mixture containing 100% cement, these reductions corresponded to decreases of 28.9% in carbon emissions and 30.8% in energy consumption. Furthermore, a combined assessment of environmental and mechanical performance, based on the ratio of environmental indices to mechanical indices, identified the mixture containing 35% cement replacement (25% fly ash and 10% silica fume) as the optimal design. This mixture achieved approximately 31% and 29% reductions in embodied energy and carbon emissions, respectively, while simultaneously increasing the 28-day tensile and compressive strengths by approximately 25% and 34%, respectively.

Review History

Received: May 12, 2026

Revised: Jun 20, 2026

Accepted: Jun 6, 2026

Keywords

Environmental impacts

Life cycle assessment

Concrete sustainability

SCMs

Carbon emissions

Embodied energy

* Corresponding Author Email: b.khataei@arakut.ac.ir



Copyright © 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

کاربرد مواد سیمانی مکمل در بهبود عملکرد زیست محیطی بتن در راستای توسعه پایدار

بهنوش خطائی^{*۱}

۱- استادیار، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

تحقیق حاضر با هدف بررسی اثر جایگزینی بخشی از سیمان مصرفی در بتن با مواد سیمانی مکمل بر عملکرد و اثرات منفی زیست محیطی بتن صورت گرفت. بدین منظور، از طرح اختلاط‌های بتن شامل درصدهای مختلف جایگزینی سیمان با ترکیبی از سیلیکا فوم و خاکستر بادی، و نیز مقادیر ثابت سنگدانه‌های ریز و درشت و سایر مواد مصرفی استفاده گردید. جهت بررسی عملکرد زیست محیطی بتن، شاخص‌های پتانسیل گرمایش جهانی (میزان انتشار کربن) و انرژی تجسم‌یافته (انرژی مصرفی) محاسبه و بررسی شدند. سپس، ارزیابی همزمان شاخص‌های مذکور با شاخص‌های مکانیکی بتن (مقاومت فشاری و مقاومت کششی) انجام شد. طبق نتایج، با افزایش درصد جایگزینی سیمان با مواد سیمانی مکمل، مقدار انتشار کربن از $353/48$ به $251/17 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3$ و مقدار انرژی مصرفی از 2150 به 1486 MJ/m^3 رسیده‌است. بنابراین، نسبت به طرح اختلاط کنترل با کاربرد 100 درصد سیمان، $28/9$ درصد کاهش در انتشار کربن و $30/8$ درصد کاهش در انرژی مصرفی رخ داده‌است. به علاوه، با ارزیابی همزمان عملکرد زیست محیطی و مکانیکی طرح اختلاط‌های بتن از طریق نسبت شاخص زیست محیطی به شاخص مکانیکی، طرح اختلاط با 35 درصد جایگزینی سیمان (25 درصد خاکستر بادی و 10 درصد سیلیکا فوم) به عنوان طرح اختلاط بهینه تعیین گردید؛ که به ترتیب حدود 31 و 29 درصد کاهش در انرژی مصرفی و انتشار کربن، و نیز 25 و 34 درصد افزایش در مقاومت کششی 28 روزه و مقاومت فشاری 28 روزه بتن را نتیجه داده‌است.

کلمات کلیدی

اثرات زیست محیطی

ارزیابی چرخه عمر

پایداری بتن

مواد سیمانی مکمل

انتشار کربن

انرژی تجسم‌یافته

۱- مقدمه

رشد فزاینده جمعیت، توسعه شهرنشینی و افزایش نیاز به احداث زیرساخت‌های عمرانی، موجب افزایش چشمگیر مصرف مصالح ساختمانی در دهه‌های اخیر شده‌است. در این بین، بتن به عنوان پرمصرف‌ترین ماده ساختمانی، نقشی اساسی در توسعه زیرساخت‌ها و پروژه‌های عمرانی دارد. در سال‌های اخیر، توجه به مفاهیم توسعه پایدار و کاهش اثرات زیست محیطی فعالیت‌های عمرانی، موجب افزایش مطالعات مرتبط با تولید بتن‌های پایدار و کم‌کربن شده‌است. چراکه با وجود مزایای متعدد بتن، تولید اجزای اصلی آن به‌ویژه سیمان

پرتلند با پیامدهای زیست محیطی قابل توجهی همراه است (Bang et al., 2015; Fode et al., 2023). صنعت سیمان به دلیل مصرف گسترده سوخت‌های فسیلی و فرایند کلسیناسیون مواد آهکی، یکی از منابع اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای در جهان محسوب می‌شود (Golewski, 2022) و سهم قابل توجهی در گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی دارد. طوری که تولید هر تن سیمان پرتلند معمولی باعث انتشار حدود یک تن CO_2 در محیط زیست می‌شود (Hamada et al., 2021). علاوه بر این، تولید سیمان نیازمند مصرف مقادیر زیادی انرژی و منابع طبیعی است که نگرانی‌های جدی در ادامه روند فعلی از

* رایانامه نویسنده مسئول: b.khataei@arakut.ac.ir

منظر توسعه پایدار ایجاد می‌کند.

در مواجهه با چالش‌های زیست‌محیطی تولید بتن، راهکارهای مختلفی برای کاهش ردپای کربن در چرخه عمر بتن توسط محققین مورد مطالعه و استفاده قرار گرفته‌است (Barbhuiya et al., 2015; Hu, 2023; Marandi and Shirzad, 2025). از جمله: استفاده از مواد سیمانی مکمل^۱ (SCM)؛ استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی^۲؛ استفاده از بایندهای کم کربن جایگزین^۳؛ بهینه‌سازی طرح‌های اختلاط بتن؛ کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از حمل و نقل با بهینه‌سازی لجستیک؛ افزایش دوام و عمر مفید بتن؛ به حداقل رساندن ضایعات در طول تولید بتن؛ به کارگیری فناوری‌های جذب، استفاده و ذخیره‌سازی کربن^۴. هر یک از این رویکردها می‌تواند به طور مستقیم یا غیر مستقیم در کاهش اثرات زیست‌محیطی بتن موثر باشد.

با توجه به سهم عمده تولید سیمان در انتشار گازهای گلخانه‌ای، استفاده از مواد سیمانی مکمل (مانند خاکستر بادی، سرباره کوره بلند، سیلیکا فوم و ...) یک راهکار مهم در کاهش ردپای کربن و اثرات زیست‌محیطی بتن می‌باشد (Khanapur et al., 2025). از این رو بسیاری از محققان به مطالعه کاهش اثر سیمان پرتلند معمولی با جایگزینی مواد سیمانی مکمل مصنوعی و طبیعی که معمولاً در مخلوط بتن/ملات استفاده می‌شوند، پرداخته‌اند. مواد سیمانی مکمل که عمدتاً شامل محصولات جانبی صنعتی و معدنی نظیر خاکستر بادی، سرباره کوره آهن‌گدازی و سیلیکا فوم هستند، علاوه بر کاهش مصرف سیمان، می‌توانند باعث بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن نیز شوند. استفاده از این مواد نه تنها به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و مصرف انرژی کمک می‌کند، بلکه از منظر مدیریت پسماندهای صنعتی و حفظ منابع طبیعی نیز دارای اهمیت فراوان است. در تحقیقات مختلف از موادی چون سرباره کوره بلند (Ali et al., 2022)، سیلیکا فوم (Kurda, 2023)، پودر زائدات سنگ مرمر (Ahmadi et al., 2025)، متاکائولن (Johari et al., 2011)، خاکستر بادی (Khataei et al., 2024) و خاکستر پوسته برنج^۵ (Montazeri et al., 2025) به عنوان جایگزین بخشی از سیمان مصرفی در بتن استفاده شده است.

با وجود مطالعات متعدد در زمینه کاربرد مواد سیمانی مکمل، بسیاری از تحقیقات تنها بر جنبه‌های مکانیکی یا زیست‌محیطی بتن تمرکز داشته‌اند و ارزیابی همزمان این دو جنبه کمتر مورد توجه قرار گرفته است. درحالی که دستیابی به بتن پایدار مستلزم ایجاد تعادل میان عملکرد سازه‌ای و کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی است. از این رو، بررسی شاخص‌های زیست‌محیطی نظیر پتانسیل گرمایش جهانی^۶ (GWP) و انرژی تجسم‌یافته^۷ در کنار شاخص‌های مکانیکی بتن، می‌تواند دیدگاه جامع‌تری در انتخاب طرح اختلاط‌های بهینه ارائه دهد.

بنابراین، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر جایگزینی بخشی از سیمان مصرفی در بتن با مواد سیمانی مکمل بر عملکرد زیست‌محیطی و مکانیکی بتن انجام شده‌است. مواد سیمانی مکمل شامل خاکستر بادی و سیلیکا فوم می‌باشند. در این تحقیق، شاخص‌های پتانسیل گرمایش جهانی و انرژی تجسم‌یافته برای طرح اختلاط‌های مختلف محاسبه و تحلیل شدند. سپس، با ارزیابی همزمان شاخص‌های زیست‌محیطی و مکانیکی، مناسب‌ترین طرح اختلاط از منظر توسعه پایدار و رسیدن به بتن پایدار معرفی شد.

۲- روش کار

مواد مورد استفاده: در تحقیق مورد بررسی، از سیمان پرتلند معمولی با درجه ۵۳، وزن مخصوص ۳/۲۲۷، مساحت سطح ویژه ۲۳۵ متر مربع بر گرم، دوره گیرش اولیه ۳۳ دقیقه و دوره گیرش نهایی ۵۲۰ دقیقه استفاده شده‌است. سنگدانه‌های ریز (ماسه رودخانه‌ای موجود در محل) دارای چگالی نسبی ۲/۶۲ و چگالی حجمی ۱/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب بوده‌است. سنگ‌های زاویه‌دار پودر شده با عبور از الک ۲۰ میلی‌متری و باقی ماندن روی الک ۴/۷۵ میلی‌متری، با چگالی نسبی ۲/۶۷، چگالی حجمی ۱۴۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب در حالت غیر فشرده و ۱۵۱۸ کیلوگرم بر متر مکعب در حالت فشرده، به عنوان سنگدانه درشت به کار رفتند. خاکستر بادی تهیه شده از نیروگاه حرارتی وزن مخصوص ۲/۱۷ داشته‌است. به‌علاوه، برای مخلوط کردن و عمل‌آوری نمونه‌ها، از آب آشامیدنی استفاده شده‌است (Magudeaswaran et al., 2023).

¹ Supplementary cementitious materials

² Recycled aggregates

³ Low-clinker binders

⁴ Carbon capture, utilization, and storage

⁵ Rice husk ash

⁶ Global warming potential

⁷ Embodied energy

جدول ۱: طرح اختلاط بتن

شماره	سیمان (kg)	آب (kg)	سنگدانه درشت (kg)	سنگدانه ریز (kg)	فوق روان‌کننده (kg)	خاکستر بادی (%)	سیلیکا فوم (%)
۱	۳۵۰	۱۴۰	۱۳۱۵	۷۴۵	۳/۵	۰	۰
۲	۲۲۸	۱۴۰	۱۳۱۵	۷۴۵	۳/۵	۲۵	۱۰
۳	۲۲۸	۱۴۰	۱۳۱۵	۷۴۵	۳/۵	۲۰	۱۵
۴	۲۲۸	۱۴۰	۱۳۱۵	۷۴۵	۳/۵	۱۰	۲۵
۵	۲۲۸	۱۴۰	۱۳۱۵	۷۴۵	۳/۵	۱۵	۲۰
۶	۲۴۵	۱۴۰	۱۳۱۵	۷۴۵	۳/۵	۱۰	۲۰
۷	۲۴۵	۱۴۰	۱۳۱۵	۷۴۵	۳/۵	۲۰	۱۰
۸	۲۸۰	۱۴۰	۱۳۱۵	۷۴۵	۳/۵	۱۰	۱۰
۹	۳۱۵	۱۴۰	۱۳۱۵	۷۴۵	۳/۵	۵	۵

طرح اختلاط: طرح‌های اختلاط مورد بررسی در این تحقیق، طبق جدول ۱ شامل مقادیر سیمان، آب، سنگدانه درشت، سنگدانه ریز، فوق روان‌کننده، و نیز درصد کاربرد خاکستر بادی و سیلیکا فوم (به عنوان جایگزین درصدی از سیمان در نمونه کنترل-شماره ۱) می‌باشد (Magudeaswaran et al., 2023). لازم به ذکر است که در طرح اختلاط‌های فوق ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۳۵ درصد از سیمان با ترکیبی از مواد سیمانی مکمل (خاکستر بادی و سیلیکا فوم) جایگزین گردیده و سپس خصوصیات مکانیکی نمونه‌های بتن از جمله مقاومت فشاری و مقاومت کششی تعیین شده‌است (Magudeaswaran et al., 2023). در ادامه، جهت بررسی عملکرد زیست‌محیطی بتن، شاخص‌های انتشار کربن و انرژی تجسم‌یافته برای هر طرح اختلاط محاسبه و سپس مقایسه و تحلیل نتایج صورت گرفت.

ارزیابی چرخه عمر^۱ (LCA): اولین مرحله ارزیابی چرخه عمر تعریف هدف و دامنه آن است که سیستم تولید را از نظر واحد عملکردی^۲ و مرز سیستم توصیف می‌کند. در این مطالعه، واحد عملکردی به عنوان مبنای مقایسه و ارزیابی زیست‌محیطی، ۱ متر مکعب بتن تولیدی در نظر گرفته شد. تمامی ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم شامل مصرف مواد اولیه، مصرف انرژی و انتشار کربن، بر اساس این واحد عملکردی بررسی و گزارش شدند. همچنین، مرز سیستم به صورت گهواره تا دروازه^۳ و شامل

استخراج و فراوری مواد خام و تولید بتن تعریف گردید. این رویکرد امکان ارزیابی اثرات زیست‌محیطی مرتبط با تولید بتن را فراهم می‌کند و مبنای مناسبی برای مقایسه طرح‌های اختلاط مختلف از منظر پایداری ارائه می‌دهد.

مرحله دوم LCA (فهرست چرخه حیات^۴ به عنوان LCI) جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز (فهرست مواد ورودی و خروجی از و به سیستم) بر اساس هدف مطالعه است. سپس، بر اساس تجزیه و تحلیل موجودی، ارزیابی تأثیر چرخه حیات^۵ (LCIA) به ارزیابی و تفسیر اثرات زیست‌محیطی در چارچوب اهداف و دامنه کمک می‌کند.

جهت ارزیابی زیست‌محیطی، دو شاخص انتشار کربن با GWP و نیز انرژی مصرفی به صورت انرژی تجسم‌یافته در نظر گرفته می‌شوند. GWP برای توصیف تغییر در اثر گلخانه‌ای ناشی از انتشار و جذب گازهای گلخانه‌ای متناسب به انسان توسعه داده شده‌است. LCA معمولاً از GWP برای یک افق زمانی ۱۰۰ ساله استفاده می‌کنند. GWP امکان محاسبه یک شاخص واحد را فراهم می‌کند که بر حسب گرم CO₂ در هر واحد عملکردی از یک محصول بیان می‌شود و مقدار CO₂ را با پتانسیل یکسان برای گرمایش جهانی در طول ۱۰۰ سال اندازه‌گیری می‌کند. در تحقیق حاضر با استفاده از معادله ۱ میزان GWP برای یک متر مکعب بتن بر اساس هر یک از طرح‌های اختلاط بتن محاسبه گردید:

¹ Life cycle assessment

² Functional unit

³ Cradle to gate

⁴ Life cycle inventory

⁵ Life cycle impact assessment

جدول ۲: عوامل هم‌ارزی پتانسیل گرمایش جهانی

جریان (i)	CO ₂ معادل (GWP _i)
CO ₂	۱
CH ₄	۲۳
N ₂ O	۲۹۶

$$GWP = \sum_i m_i \times GWP_i \quad (1)$$

که در آن: m_i جرم هر یک از اجزای بتن در ۱ متر مکعب بتن (بر حسب کیلوگرم) و GWP_i مقدار شاخص پتانسیل گرمایش جهانی برای همان جزء بتن (بر حسب کیلوگرم CO₂ بر کیلوگرم ماده) می باشد. به عبارتی، GWP_i مقدار CO₂ معادل با توانایی یکسان در گرمایش زمین در یک دوره عمر ۱۰۰ ساله است که در

جدول ۲ ارائه شده است (Lippiatt, 1998).

به همین صورت، معادله ۲ برای محاسبه میزان انرژی تجسم‌یافته بر حسب مگاژول در ۱ متر مکعب بتن طبق جدول طرح اختلاط بتن به کار گرفته شد.

$$EE = \sum_i m_i \times EE_i \quad (2)$$

که در آن: m_i جرم هر یک از اجزای بتن در ۱ متر مکعب بتن (بر حسب کیلوگرم) و EE_i مقدار انرژی تجسم‌یافته برای همان جزء بتن (بر حسب مگاژول بر کیلوگرم ماده) می باشد. مقادیر انتشار کربن و انرژی تجسم‌یافته برای هر یک از اجزای بتن مورد بررسی از مطالعات مختلف استخراج و در جدول ۳ لیست گردید.

جدول ۳: میزان انتشار کربن و انرژی تجسم‌یافته برای هر جزء بتن

ماده	انتشار کربن (kg CO ₂ /kg)	مرجع	انرژی تجسم‌یافته (MJ/kg)	مرجع
سیمان	۰/۸۴۴	(Aghajanzadeh et al., 2024)	۵/۵	(Bheel et al., 2023)
آب	۰/۰۰۰۱۶	(Aghajanzadeh et al., 2024)	۰/۰۱۱۹	(Gholami et al., 2023)
سنگدانه درشت	۰/۰۳۶	(Nayana et al., 2017)	۰/۰۶۲۳	(Gholami et al., 2023)
سنگدانه ریز	۰/۰۱۱	(Nayana et al., 2017)	۰/۰۱۷۶	(Gholami et al., 2023)
فوق روان‌کننده	۰/۷۲	(Chen et al., 2023)	۳۶/۷۶	(Bheel et al., 2023)
خاکستر بادی	۰/۰۰۹	(Chen et al., 2023)	۰/۱	(Bheel et al., 2023)
سیلیکا فوم	۰/۰۰۳۹	(Gholami et al., 2023)	۰/۰۳۶	(Gholami et al., 2023)

کشتی برای ارزیابی عملکرد مکانیکی بتن استفاده گردید.

۳- نتایج

۳-۱- شاخص‌های زیست‌محیطی بتن

شکل ۱ میزان انتشار کربن برای هر طرح اختلاط را به تفکیک اجزای تشکیل دهنده ۱ متر مکعب بتن طبق آن طرح اختلاط نشان می‌دهد. در طرح اختلاط شماره ۱ (طرح اختلاط کنترل) از ۱۰۰ درصد سیمان بدون جایگزینی استفاده شده است؛ درحالی‌که در طرح اختلاط‌های ۲ تا ۵، ۳۵ درصد سیمان با ترکیبی از سیلیکا فوم و خاکستر بادی (با درصدهای مختلف کاربرد) جایگزین گردید. در طرح اختلاط‌های ۶ و ۷، ۳۰ درصد جایگزینی و در طرح اختلاط‌های ۸ و ۹ به ترتیب ۲۰ و ۱۰ درصد جایگزینی لحاظ

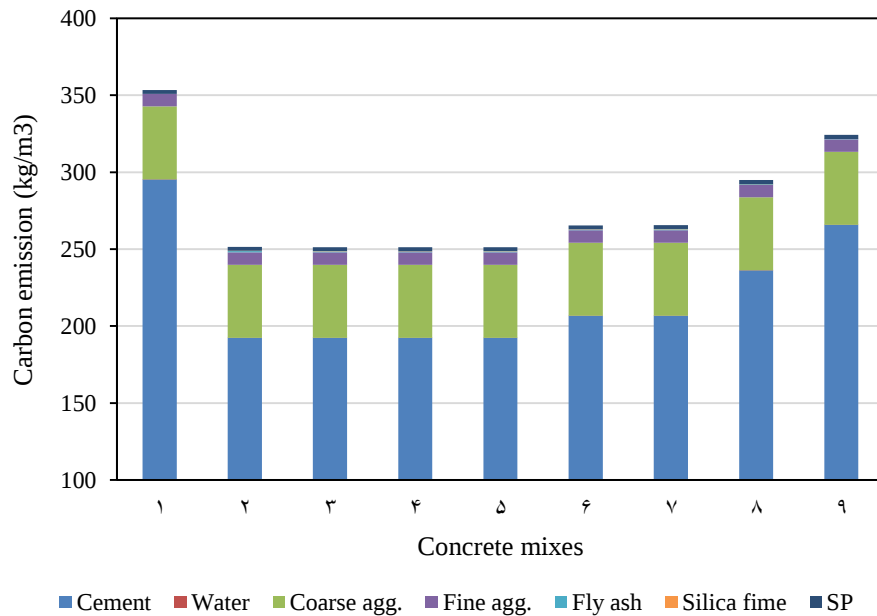
در این بخش، به کمک معادلات ۱ و ۲ و نیز اطلاعات جدول ۳، به محاسبه مقدار انتشار کربن و انرژی مصرفی برای هر جزء تشکیل دهنده بتن طبق طرح اختلاط‌های مورد بررسی پرداخته شد. همانطور که پیشتر بیان شد، واحد عملکردی برای ارزیابی چرخه عمر برابر با ۱ متر مکعب بتن در نظر گرفته شد. بدین ترتیب، مقادیر شاخص‌های فوق برای هر جزء تشکیل دهنده ۱ متر مکعب بتن و نیز در مجموع برای کل ۱ متر مکعب بتن در هر طرح اختلاط محاسبه گردید. از این شاخص‌ها برای ارزیابی عملکرد زیست‌محیطی بتن و سپس از مقاومت فشاری و مقاومت

کلینکر مصرفی و در نتیجه کاهش انتشار کربن می شود. مطالعات مختلف نیز گزارش کرده اند که کاربرد مواد سیمانی مکمل یکی از مؤثرترین راهکارهای کاهش اثرات زیست محیطی بتن و توسعه بتن های کم کربن به حساب می آید (Hu, 2023; Barbhuiya et al., 2025; Marandi and Shirzad, 2025).

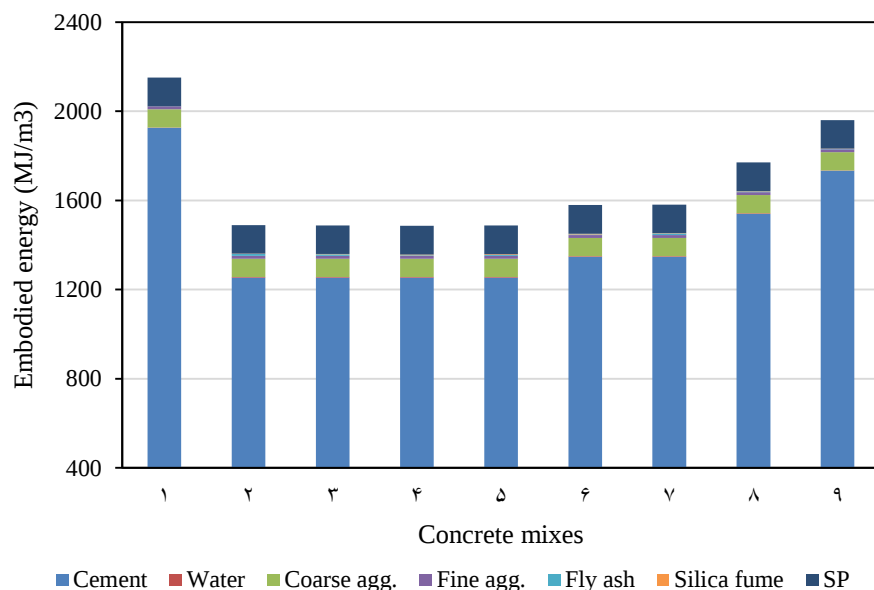
در خصوص سهم هر ماده در میزان انتشار کربن بتن نیز مطابق شکل ۱، می توان این گونه بیان کرد که ابتدا سیمان و سپس سنگدانه درشت، سنگدانه ریز و فوق روان کننده در انتشار کربن هر طرح اختلاط نقش بیشتری داشته اند. اما مقدار انتشار کربن برای سایر مواد (شامل آب، خاکستر بادی و سیلیکا فوم) بسیار کمتر بوده است. برای مثال، در طرح اختلاط شماره ۸ با ۲۰ درصد جایگزینی سیمان (با ۱۰ درصد سیلیکا فوم و ۱۰ درصد خاکستر بادی) سهم سیمان، سنگدانه درشت و سنگدانه ریز به ترتیب حدود ۸۰/۱۵، ۱۶/۰۵، ۲/۷۸ درصد و بسیار بیشتر از سهم سایر مواد مصرفی (فوق روان کننده، خاکستر بادی، سیلیکا فوم و آب) بوده است. سهم بیشتر سیمان نسبت به سایر مواد در انتشار کربن بتن، در مطالعات مشابه نیز گزارش شده است (Gursel et al., 2016; Bheel et al., 2023; Huang et al., 2024).

در شکل ۲ میزان انرژی مصرفی (به صورت انرژی تجسم یافته) برای هر طرح اختلاط به تفکیک مواد تشکیل دهنده ۱ متر مکعب بتن نشان داده شده است. طبق آن، مقدار انرژی مصرفی در طرح های اختلاط مورد بررسی در بازه 1486 MJ/m^3 تا حدود 2150 MJ/m^3 بدست آمده است؛ که در این بین، بیشترین و کمترین میزان انرژی مصرفی به ترتیب مربوط به طرح اختلاط کنترل و طرح اختلاط با بیشترین درصد جایگزینی سیمان با مواد سیمانی مکمل بوده است. در رابطه با انرژی مصرفی هم، استفاده از درصدهای مختلف مواد سیمانی مکمل در طرح اختلاط های ۲ تا ۵ (در مجموع ۳۵ درصد جایگزینی سیمان) اختلاف کمی بین مقادیر انرژی مصرفی (میزان انرژی مصرفی در بازه $1486/01 \text{ MJ/m}^3$ تا $1489/37 \text{ MJ/m}^3$) نتیجه داده است.

شده است. طبق نتایج، مقدار انتشار کربن طرح های اختلاط از $251/17$ تا $353/48 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3$ حاصل شده است؛ طوری که بیشترین انتشار کربن مربوط به طرح اختلاط کنترل و کمترین انتشار کربن مربوط به طرح اختلاط ۴ با ۳۵ درصد جایگزینی سیمان بوده است. البته کاربرد درصدهای مختلف سیلیکا فوم و خاکستر بادی در طرح اختلاط های ۲ تا ۵ (با ۳۵ درصد جایگزینی سیمان) تاثیر چندانی بر مقدار انتشار کربن نداشته و منجر به انتشار کربن از $251/17$ تا $251/43 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3$ شده است. به علاوه، این نتیجه حاصل شد که با افزایش درصد جایگزینی سیمان با مواد سیمانی مکمل، مقدار انتشار کربن کاهش یافته است. این خود نقش بیشتر سیمان در تولید کربن بتن را تایید می نماید. با ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۳۵ درصد کاربرد ترکیب سیلیکا فوم و خاکستر بادی، به ترتیب حدود $224/2$ ، $294/8$ ، $265/5$ و $251/3 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3$ انتشار کربن حاصل شد. طوری که نسبت به طرح اختلاط کنترل با انتشار کربن $251/48 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3$ ، به ترتیب حدود $8/3$ ، $16/6$ ، $24/9$ و $28/9$ درصد کاهش در انتشار کربن بتن رخ داده است. در سایر تحقیقات انجام شده در زمینه کاربرد انواع مواد سیمانی مکمل به صورت جایگزین بخشی از سیمان نیز، با افزایش کاربرد این مواد، کاهش بیشتر در میزان انتشار کربن نتیجه شده است (Abolhasani et al., 2022; Ozturk et al., 2022; Khataei et al., 2024; Raveendran and Krishnan, 2025; Ahmadi et al., 2025). علت اصلی آن، سهم بسیار زیاد سیمان پرتلند در انتشار گازهای گلخانه ای مرتبط با تولید بتن است. تولید کلینکر سیمان نیازمند مصرف بالای انرژی می باشد که علاوه بر انتشار ناشی از مصرف سوخت، مقدار زیادی دی اکسید کربن طی فرایند کلسیناسیون سنگ آهک آزاد می شود. بنابراین، سیمان پرتلند به عنوان اصلی ترین عامل ایجاد رد پای کربنی بتن محسوب می گردد (Samad and Shah, 2017). از سوی دیگر، مواد سیمانی مکمل شامل خاکستر بادی و سیلیکا فوم، محصولات جانبی سایر صنایع بوده و انتشار کربن مربوط به تولید آنها (طبق جدول ۳) بسیار کمتر از سیمان پرتلند می باشد. بنابراین، جایگزینی بخشی از سیمان با این مواد منجر به کاهش مستقیم



شکل ۱: مقدار انتشار کربن برای هر طرح اختلاط به تفکیک ماده



شکل ۲: مقدار انرژی مصرفی برای هر طرح اختلاط به تفکیک ماده

۱۵۸۰ و $1487/7 \text{ MJ/m}^3$ انرژی مصرفی را نتیجه داده است. در مقایسه با کاربرد ۱۰۰ درصد سیمان (طرح اختلاط کنترل) با افزایش کاربرد مواد سیمانی مکمل (به همان ترتیب)، حدود ۸/۸، ۱۷/۷، ۲۶/۵ و ۳۰/۸ درصد کاهش در میزان انرژی مصرفی حاصل شده است. سایر محققین نیز کاهش محسوس انرژی تجسم یافته بر اثر افزایش درصد جایگزینی سیمان را گزارش نموده اند (Samad and Shah, 2017; Li et al., 2024). در واقع، مصرف انرژی بتن

همچنین، مشاهده گردید که افزایش درصد کاربرد مواد سیمانی مکمل منجر به کاهش انرژی مصرفی ۱ متر مکعب بتن شده است؛ به طور مشابه با روند کاهشی در مقدار انتشار کربن، نقش مواد سیمانی مکمل (به عنوان جایگزین بخشی از سیمان) در کاهش اثرات زیست محیطی بتن تایید می شود. بدین صورت که استفاده از ترکیب سیلیکا فوم و خاکستر بادی به میزان ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۳۵ درصد جایگزینی سیمان، به ترتیب حدود $1960/24$ ، $1770/12$

شاخص‌های مذکور از مقادیر نرمال شده آنها نسبت به طرح اختلاط کنترل استفاده گردید؛ نتایج در شکل ۳ نشان داده شده است. طبق شکل ۳، با افزایش درصد جایگزینی سیمان با مواد سیمانی مکمل، روند کاهش در میزان انتشار کربن و انرژی مصرفی بتن حاصل شده است. مقادیر نرمال شده انرژی مصرفی و انتشار کربن با ۱۰ تا ۳۵ درصد جایگزینی سیمان به ترتیب از ۰/۹۱ و ۰/۹۲ به ۰/۶۹ و ۰/۷۱ کاهش یافته است. از سوی دیگر، افزایش کاربرد مواد سیمانی مکمل منجر به افزایش مقاومت کششی و مقاومت فشاری گشته است. به طور کلی، با ۱۰ تا ۳۵ درصد جایگزینی سیمان، مقاومت کششی نرمال شده از ۱/۰۶ به ۱/۲۵ و مقاومت فشاری نرمال شده از ۱ به ۱/۳۴ رسیده است. می توان نتیجه گرفت که در بهترین حالت (با جایگزینی ۳۵ درصدی سیمان) به ترتیب حدود ۳۱ و ۲۹ درصد کاهش در انرژی مصرفی و انتشار کربن، و نیز ۲۵ و ۳۴ درصد افزایش در مقاومت کششی ۲۸ روزه و مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن حاصل شده است.

اثر جایگزینی بخشی از سیمان با مواد سیمانی مکمل بر بهبود عملکرد زیست محیطی بتن در بخش ۳-۱ بررسی و بحث شده است. در پژوهش‌های مختلف، بهبود خواص مکانیکی بتن مانند مقاومت فشاری و کششی نیز، با کاربرد مواد سیمانی مکمل مانند خاکستر بادی، سیلیکا فوم و ... نتیجه شده است (Oner et al., 2005; Nath and Sarker, 2011; Zhao and Zhang, 2019; Qureshi et al., 2020; Lou et al., 2023; Wang et al., 2023; Ahmed, 2024; Mostofinejad et al., 2025).

درباره اثر مثبت کاربرد مواد سیمانی مکمل بر مقاومت بتن می توان به دلایل مختلف چون واکنش پوزولانی و تولید بیشتر ژل C-H-S، اثر پرکنندگی، کاهش ضخامت و بهبود ناحیه انتقال بین سطحی^۱ (ITZ) و اصلاح ساختار منافذ اشاره نمود. واکنش‌های هیدراتاسیون فازهای کلینکر در سیمان‌های پرتلند مخلوط به‌طور عمده توسط واکنش‌های پوزولانی مواد سیمانی مکمل تکمیل می شوند. اگرچه فرایندهای هیدراتاسیون کلینکر از مکانیسم‌ها و همچنین سرعت‌های متفاوتی نسبت به واکنش‌پذیری پوزولانی مواد سیمانی مکمل پیروی می کنند، اما وجود مواد سیمانی مکمل بر هیدراتاسیون در سیمان‌های مخلوط تاثیر می گذارد (Magudeaswaran et al., 2023).

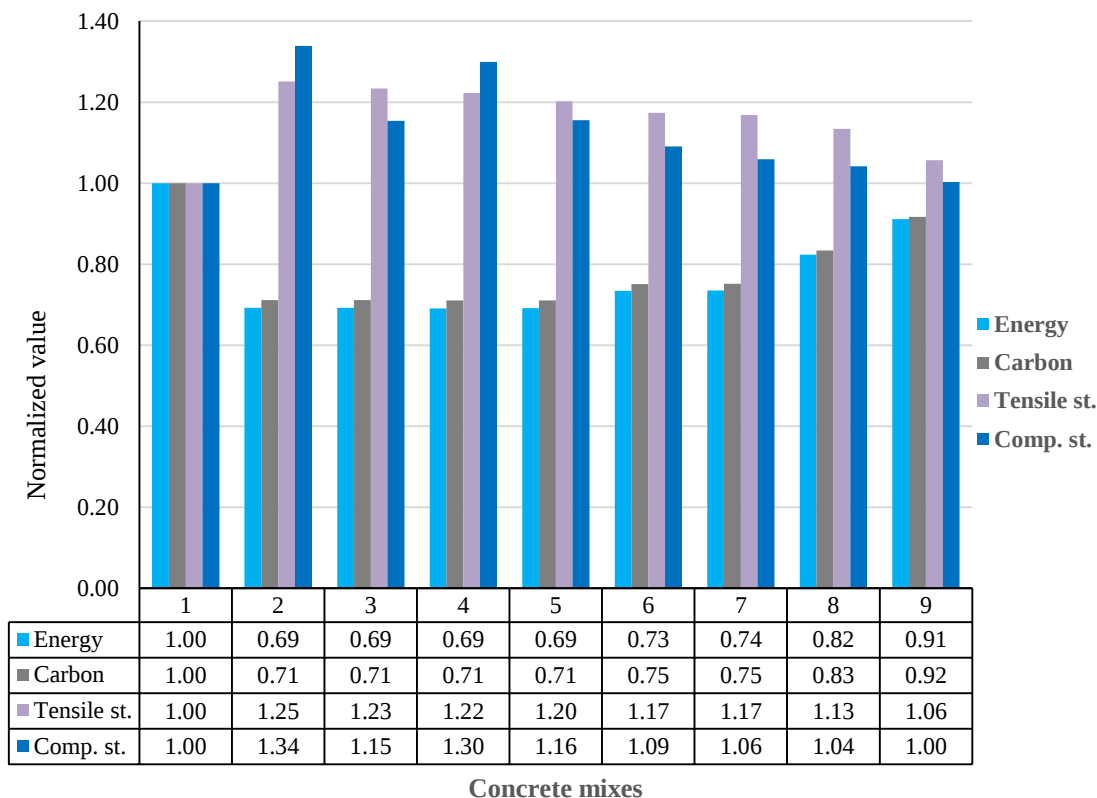
به طور عمده به انرژی بسیار بالای مورد نیاز برای تولید سیمان پرتلند مربوط می شود. چراکه تولید سیمان شامل استخراج مواد اولیه، آسیاب، همگن سازی و به ویژه پخت کلینکر در دمای بالا، یکی از انرژی برترین فرایندهای صنعتی محسوب می گردد. بنابراین، سیمان بیشترین سهم را در انرژی تجسم یافته بتن به خود اختصاص می دهد (Afkhami et al., 2015; Devi et al., 2017; Sahoo and Kumar, 2022). در مقابل، انواع مواد سیمانی مکمل مانند خاکستر بادی، سیلیکا فوم، سرباره کوره بلند و ...، پسماند یا محصولات جانبی سایر صنایع هستند و بخش عمده انرژی مصرفی فرایند تولید اصلی به محصول اولیه تخصیص داده می شود. بنابراین، انرژی مورد نیاز برای آماده سازی، فرآوری و استفاده از این مواد در بتن به مراتب کمتر از انرژی لازم برای تولید سیمان پرتلند است. در نتیجه، با کاهش مقدار سیمان و افزایش جایگزینی آن با مواد سیمانی مکمل، انرژی تجسم یافته بتن کاهش می یابد (Samad and Shah, 2017).

همانطور که در شکل ۲ مشاهده می شود، ابتدا سیمان و سپس فوق روان کننده و سنگدانه درشت سهم قابل توجهی در میزان انرژی مصرفی داشته اند؛ درحالی که میزان انرژی برای سنگدانه ریز، خاکستر بادی، سیلیکا فوم و آب بسیار کمتر بوده است. به عنوان مثال، در طرح اختلاط شماره ۸ دارای ۲۰ درصد کاربرد مواد سیمانی مکمل با نسبت مساوی، سیمان، فوق روان کننده و سنگدانه درشت، با حدود ۸۷، ۷/۲ و ۴/۶ درصد از انرژی مصرفی ۱ متر مکعب بتن، سهم بیشتری نسبت به سایر مواد مصرفی در بتن داشته اند. در سایر تحقیقات نیز گزارش شده که سهم سیمان در میزان انرژی مصرفی حین تولید بتن، بیشتر از سایر مواد مصرفی بوده است (Huang et al., 2024; Khataei et al., 2024; Ahmadi et al., 2025).

۳-۲- بررسی همزمان عملکرد زیست محیطی و مکانیکی بتن

در این بخش، عملکرد زیست محیطی و مکانیکی بتن با هم مقایسه و به طور همزمان ارزیابی گردید. بدین ترتیب که از مقادیر انتشار کربن و انرژی مصرفی محاسبه شده به عنوان شاخص های زیست محیطی و از مقاومت فشاری ۲۸ روزه و مقاومت کششی ۲۸ روزه (گزارش شده به همراه طرح اختلاط های مورد نظر) به عنوان شاخص های مکانیکی بهره گرفته شد. جهت مقایسه بهتر

¹ Interfacial transition zone



شکل ۳: شاخص‌های نرمال‌شده زیست‌محیطی و مکانیکی طرح‌های اختلاط

در یافتند که ضخامت و مقاومت ITZهای اطراف سنگدانه‌ها در بتن، با جایگزینی بخشی از سیمان با مواد سیمانی مکمل مانند سیلیکا فوم یا خاکستر بادی، تحت تاثیر قرار گرفته و به بهبود عملکرد بتن منجر می‌شود (Nežerka et al., 2019).

در ادامه، جهت مقایسه و تحلیل بهتر نتایج، از ترکیب شاخص‌های زیست‌محیطی و شاخص‌های مکانیکی استفاده شد. بدین گونه که در جدول ۴، نتایج به صورت نسبت هر یک از شاخص‌های مکانیکی به هر یک از شاخص‌های زیست‌محیطی مورد بررسی ارائه گردید.

با کاربرد این نسبت و ترکیب اهداف کاهش اثرات زیست‌محیطی و افزایش عملکرد مکانیکی بتن جهت رسیدن به بتن پایدارتر، طرح اختلاط با بیشترین مقدار این نسبت، مطلوب‌تر و بهینه خواهد بود. طبق نتایج حاصل، با لحاظ کردن هر چهار نسبت مقاومت فشاری به انتشار کربن، مقاومت کششی به انتشار کربن، مقاومت مصرفی، طرح اختلاط شماره ۲ (با کاربرد ۲۵ درصد خاکستر بادی و ۱۰ درصد سیلیکا فوم و در مجموع ۳۵ درصد جایگزینی سیمان) به ترتیب با مقادیر ۱/۸۸، ۱/۷۶، ۱/۹۳ و ۱/۸۱ مطلوب‌تر بوده و بنابراین، به لحاظ بررسی همزمان عملکرد زیست‌محیطی و مکانیکی، بهینه می‌باشد.

ناحیه انتقال بین سطحی تاثیر مخرب زیادی بر عملکرد سازه‌های بتن دارد که این تاثیر منفی را می‌توان با کاربرد افزودنی‌های معدنی در مخلوط بتن، که حفره‌های اضافی درون ITZ را پر می‌کند و با پرتلندیت واکنش می‌دهند تا محصولات فشرده‌تری تشکیل دهند، تعدیل نمود. سیلیکا فوم در کاهش ضخامت ITZ مؤثر است، درحالی‌که افزودن خاکستر بادی به طور قابل توجهی به مقاومت ITZ کمک می‌کند (Nežerka et al., 2019). نتایج برخی تحقیقات نشان می‌دهد افزودنی‌های معدنی می‌توانند علاوه بر متراکم‌سازی چنین ناحیه‌ای، کاهش قابل توجهی در ضخامت ITZ ماتریس-سنگدانه ایجاد کنند و به بهبود خواص مربوط به مقاومت مکانیکی و دوام بتن کمک کنند (Kjellsen et al., 1998). سیلیکا فوم به عنوان یک افزودنی معدنی بسیار مؤثر در کاهش ضخامت ITZ در بتن تایید شده‌است (Mehta and Monteiro, 1987).

Duan و همکاران (۲۰۱۳) نیز طی مطالعه‌ای دریافتند که کاربرد مواد سیمانی مکمل مانند سیلیکا فوم، سرباره و متاکائولن باعث اصلاح منافذ و بهبود ITZ بتن، به ویژه در مراحل بعدی عمل‌آوری، شده و با تکامل ساختار منافذ و ITZ، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. زیرا ITZ متراکم‌تر شده و ساختار منافذ در بتن بهینه می‌گردد. بنابراین، ریزساختار بهبود می‌یابد (Duan et al., 2013). به‌طور کلی، محققین

جدول ۴: ترکیب شاخص‌های زیست‌محیطی و مکانیکی بتن

شماره	نسبت مقاومت فشاری به	نسبت مقاومت کششی به	نسبت مقاومت فشاری به	نسبت مقاومت کششی به
	انتشار کربن	انتشار کربن	انرژی تجسم‌یافته	انرژی تجسم‌یافته
۱	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰
۲	۱/۸۸	۱/۷۶	۱/۹۳	۱/۸۱
۳	۱/۶۲	۱/۷۳	۱/۶۷	۱/۷۸
۴	۱/۸۳	۱/۷۲	۱/۸۸	۱/۷۷
۵	۱/۶۳	۱/۶۹	۱/۶۷	۱/۷۴
۶	۱/۴۵	۱/۵۶	۱/۴۸	۱/۶۰
۷	۱/۴۱	۱/۵۵	۱/۴۴	۱/۵۹
۸	۱/۲۵	۱/۳۶	۱/۲۷	۱/۳۸
۹	۱/۰۹	۱/۱۵	۱/۱۰	۱/۱۶

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به نقش قابل توجه صنعت بتن در مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، استفاده از مواد سیمانی مکمل به عنوان جایگزین بخشی از سیمان، راهکاری مؤثر در جهت توسعه بتن‌های پایدار به حساب می‌آید. در این تحقیق، اثر استفاده ترکیبی از خاکستر بادی و سیلیکا فوم بر عملکرد زیست‌محیطی و مکانیکی بتن بررسی شد. طبق یافته‌های این تحقیق، استفاده ترکیبی از خاکستر بادی و سیلیکا فوم به عنوان جایگزین بخشی از سیمان، نقش مؤثری در بهبود پایداری زیست‌محیطی بتن دارد. افزایش درصد جایگزینی سیمان موجب کاهش قابل توجه انتشار کربن و انرژی تجسم‌یافته گردید؛ طوری که بیشترین میزان کاهش به ترتیب برابر با ۲۸/۹ درصد در انتشار کربن و ۳۰/۸ درصد در انرژی مصرفی نسبت به طرح اختلاط کنترل حاصل شد. این موضوع بیانگر ظرفیت بالای مواد سیمانی مکمل در کاهش اثرات زیست‌محیطی بتن می‌باشد. از سوی دیگر، گزارش عملکرد

مکانیکی نشان داد که جایگزینی کنترل‌شده سیمان نه تنها سبب افت عملکرد مقاومتی بتن نگردید، بلکه در همه طرح اختلاط‌های مورد بررسی موجب افزایش مقاومت فشاری و کششی شده‌است. در بین آنها، طرح اختلاط حاوی ۲۵ درصد خاکستر بادی و ۱۰ درصد سیلیکا فوم، بهترین عملکرد همزمان زیست‌محیطی و مکانیکی را از خود نشان داد و به عنوان طرح اختلاط بهینه تعیین شد. این طرح اختلاط ضمن کاهش قابل توجه شاخص‌های زیست‌محیطی، افزایش ۲۵ درصدی مقاومت کششی ۲۸ روزه و افزایش ۳۴ درصدی مقاومت فشاری ۲۸ روزه را نیز فراهم کرده‌است. بنابراین، بهره‌گیری هدفمند از مواد سیمانی مکمل می‌تواند راهکاری کارآمد برای تولید بتن‌های پایدار و کم‌کربن باشد. به علاوه، رویکرد ارزیابی همزمان شاخص‌های زیست‌محیطی و مکانیکی نیز می‌تواند مبنایی مناسب برای طراحی بتن و توسعه ساخت‌وساز پایدار فراهم نماید.

References

- Abolhasani, A., Samali, B. and Aslani, F., 2022. Rice husk ash incorporation in calcium aluminate cement concrete: Life cycle assessment, hydration and strength development. *Sustainability*, 14(2), p.1012.
- Afkhami, B., Akbarian, B., Beheshti, N., Kakaee, A.H. and Shabani, B., 2015. Energy consumption assessment in a cement production plant. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 10, pp.84-89.
- Aghajanzadeh, I., Ramezani-pour, A.M., Amani, A. and Habibi, A., 2024. Mixture optimization of alkali activated slag concrete containing recycled concrete aggregates and silica fume using response surface method. *Construction and Building Materials*, 425, p.135928.
- Ahmadi, M., Abdollahzadeh, E., Kashfi, M., Khataei, B. and Razavi, M., 2025. Life cycle assessment and performance evaluation of self-compacting concrete incorporating waste marble powder and aggregates. *Materials*, 18(13), p.2982.
- Ahmed, A., 2024. Assessing the effects of supplementary cementitious materials on concrete properties: a review. *Discover Civil Engineering*, 1(1), p.145.
- Ali, B., Ouni, M.H.E. and Kurda, R., 2022. Life cycle assessment (LCA) of precast concrete blocks utilizing

- ground granulated blast furnace slag. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(55), pp.83580-83595.
- Bang, J.W., Ganesh Prabhu, G., Jang, Y.I. and Kim, Y.Y., 2015. Development of ecoefficient engineered cementitious composites using supplementary cementitious materials as a binder and bottom ash aggregate as fine aggregate. *International Journal of Polymer Science*, 2015(1), p.681051.
- Barbhuiya, S., et al., Low carbon concrete: Advancements, challenges and future directions in sustainable construction. *Discover Concrete and Cement*, 2025. 1(1): p. 1-24.
- Bheel, N., Mohammed, B.S., Ali, M.O.A., Shafiq, N., Tageldin, E.M. and Ahmad, M., 2023. Effect of polyvinyl alcohol fiber on the mechanical properties and embodied carbon of engineered cementitious composites. *Results in Engineering*, 20, p.101458.
- Chen, G., Zheng, D.P., Chen, Y.W., Lin, J.X., Lao, W.J., Guo, Y.C., Chen, Z.B. and Lan, X.W., 2023. Development of high performance geopolymers concrete with waste rubber and recycle steel fiber: A study on compressive behavior, carbon emissions and economical performance. *Construction and Building Materials*, 393, p.131988.
- Devi, K.S., Lakshmi, V.V. and Alakanandana, A.J.A.P.J.R., 2017. Impacts of cement industry on environment-an overview. *Asia Pac. J. Res*, 1, pp.156-161.
- Duan, P., Shui, Z., Chen, W. and Shen, C., 2013. Effects of metakaolin, silica fume and slag on pore structure, interfacial transition zone and compressive strength of concrete. *Construction and Building Materials*, 44, pp.1-6.
- Fode, T.A., Jande, Y.A.C. and Kivevele, T., 2023. Effects of different supplementary cementitious materials on durability and mechanical properties of cement composite—Comprehensive review. *Heliyon*, 9(7).
- Gholami, E., Afshin, H., Basim, M.C. and Sharghi, M., 2023, January. Ultra-high performance recycled steel fiber reinforced concrete segments under the thrust force of TBM jacks and their environmental potentialities. In *Structures* (Vol. 47, pp. 2465-2484). Elsevier.
- Golewski, G.L., 2022. Fracture performance of cementitious composites based on quaternary blended cements. *Materials*, 15(17), p.6023.
- Gursel, A.P., Maryman, H. and 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, pp.823-836.
- Hamada, H.M., Thomas, B.S., Yahaya, F.M., Muthusamy, K., Yang, J., Abdalla, J.A. and Hawileh, R.A., 2021. Sustainable use of palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material: A comprehensive review. *Journal of Building Engineering*, 40, p.102286.
- Hu, M., Strategies and techniques of life cycle-embodied carbon reduction from the building and construction sector: a review. *Journal of architectural engineering*, 2023. 29(3): p. 04023017.
- Huang, X., Jiao, Z., Xing, F., Sui, L., Hu, B. and Zhou, Y., 2024. Performance assessment of LC3 concrete structures considering life-cycle cost and environmental impacts. *Journal of Cleaner Production*, 436, p.140380.
- Johari, M. M., Brooks, J., Kabir, S., & Rivard, P. (2011). Influence of supplementary cementitious materials on engineering properties of high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2639-2648.
- Khanapur, N.V., et al., Environmental impact of fine recycled aggregate concrete: A life cycle perspective based on mix design method. *Construction and Building Materials*, 2025. 501: p. 144225.
- Khataei, B., Ahmadi, M. and Kioumars, M., 2024, June. Environmental assessment of fiber-reinforced self-compacting concrete containing class-F fly ash. In *The International Conference on Net-Zero Civil Infrastructures: Innovations in Materials, Structures, and Management Practices (NTZR)* (pp. 377-388). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Kjellsen, K.O., Wallevik, O.H. and Fjällberg, L., 1998. Microstructure and microchemistry of the paste—aggregate interfacial transition zone of high-performance concrete. *Advances in Cement Research*, 10(1), pp.33-40.
- Kurda, R., 2023. Effect of silica fume on engineering performance and life cycle impact of jute-fibre-reinforced concrete. *Sustainability*, 15(11), p.8465.
- Li, Z., Gao, Y., Zhu, Z. and Tian, W., 2024. Data-guided for discovering high-strength, cost-effective, and low-carbon rice husk ash concrete. *Journal of CO2 Utilization*, 83, p.102786.
- Lippiatt, B.C., 1998. Building for environmental and economic sustainability (BEES).
- Lou, Y., Khan, K., Amin, M.N., Ahmad, W., Deifalla, A.F. and Ahmad, A., 2023. Performance characteristics of cementitious composites modified with silica fume: A systematic review. *Case Studies in Construction Materials*, 18, p.e01753.
- Magudeaswaran, P., Kumar, V., Krishna, K.V., Nagasaibaba, A. and Ravinder, R., 2023. Investigational studies on the impact of Supplementary Cementitious Materials (SCM) for identifying the strength and durability characteristics in self curing concrete. *Materials Today: Proceedings*.
- Marandi, N. and S. Shirzad, Sustainable cement and

- concrete technologies: A review of materials and processes for carbon reduction. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2025. 10(9): p. 408.
- Mehta, P.K. and Monteiro, P.J.M., 1987. Effect of aggregate, cement, and mineral admixtures on the microstructure of the transition zone. *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, 114, p.65.
- Montazeri, P., Bamshad, O., Aghililoft, M., & Singh, P. (2025). Mechanical and durability-based life cycle assessment of rice husk ash containing concrete. *Case Studies in Construction Materials*, e05241.
- Mostofinejad, D., Nasrollahi, M., Bahmani, H., Zajshoor, Z. and Sadeghi, M., 2025. Enhancing concrete strength and durability of normal and high-strength concrete: Exploring combined effects of optimized silica fume and slag. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 49(3), pp.2309-2328.
- Nath, P. and Sarker, P., 2011. Effect of fly ash on the durability properties of high strength concrete. *Procedia Engineering*, 14, pp.1149-1156.
- Nayana, A.Y. and Kavitha, S.J.I.J.C.E.T., 2017. Evaluation of CO2 emissions for green concrete with high volume slag, recycled aggregate, recycled water to build eco environment. *Int. J. Civ. Eng. Technol*, 8(5), pp.703-708.
- Nežerka, V., Bílý, P., Hrbek, V. and Fládr, J., 2019. Impact of silica fume, fly ash, and metakaolin on the thickness and strength of the ITZ in concrete. *Cement and concrete composites*, 103, pp.252-262.
- Oner, A.D.N.A.N., Akyuz, S. and Yildiz, R., 2005. An experimental study on strength development of concrete containing fly ash and optimum usage of fly ash in concrete. *Cement and Concrete Research*, 35(6), pp.1165-1171.
- Ozturk, E., Ince, C., Derogar, S. and Ball, R., 2022. Factors affecting the CO2 emissions, cost efficiency and eco-strength efficiency of concrete containing rice husk ash: A database study. *Construction and Building Materials*, 326, p.126905.
- Qureshi, L.A., Ali, B. and Ali, A., 2020. Combined effects of supplementary cementitious materials (silica fume, GGBS, fly ash and rice husk ash) and steel fiber on the hardened properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 263, p.120636.
- Raveendran, N. and Krishnan, V., 2025. Engineering performance and environmental assessment of sustainable concrete incorporating nano silica and metakaolin as cementitious materials. *Scientific reports*, 15(1), p.1482.
- Sahoo, N. and Kumar, A., 2022. Review on energy conservation and emission reduction approaches for cement industry. *Environmental Development*, 44, p.100767.
- Samad, S. and Shah, A., 2017. Role of binary cement including Supplementary Cementitious Material (SCM), in production of environmentally sustainable concrete: A critical review. *International journal of Sustainable built environment*, 6(2), pp.663-674.
- Souto-Martinez, A., Arehart, J.H. and Srubar III, W.V., 2018. Cradle-to-gate CO2e emissions vs. in situ CO2 sequestration of structural concrete elements. *Energy and Buildings*, 167, pp.301-311.
- Wang, J., Che, Z., Zhang, K., Fan, Y., Niu, D. and Guan, X., 2023. Performance of recycled aggregate concrete with supplementary cementitious materials (fly ash, GBFS, silica fume, and metakaolin): Mechanical properties, pore structure, and water absorption. *Construction and Building Materials*, 368, p.130455.
- Zhao, S. and Zhang, Q., 2019. Effect of silica fume in concrete on mechanical properties and dynamic behaviors under impact loading. *Materials*, 12(19), p.3263.