

Performance of low-cement self-compacting concrete using stone sludge as sand replacement

Ali Mohammadsalehi^{1*} , Davood Mostofinejad²

1. PhD, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology (IUT), Isfahan, Iran.
2. Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology (IUT), Isfahan, Iran.

Abstract

The production of sustainable and high-performance concrete has become a global necessity due to the increasing demand for construction materials and the significant environmental burden associated with cement manufacturing and natural aggregate extraction. In this research, self-compacting concrete (SCC) was developed by partially substituting natural sand with stone-cutting sludge derived from marble, granite, and travertine at three replacement levels: 10%, 15%, and 20%. A low-cement ternary binder system was adopted, consisting of 85% ground granulated blast furnace slag (GGBFS), 10% ordinary Portland cement (OPC), and 5% hydrated lime, to drastically reduce cement consumption and CO₂ emissions while maintaining adequate mechanical strength. The experimental program included both fresh and hardened concrete tests. Fresh properties such as slump flow diameter, T₅₀₀ time, V-funnel flow, and segregation resistance were assessed to evaluate workability, viscosity, and stability in line with EFNARC guidelines. Hardened properties included compressive and flexural strength at 7 and 28 days. In addition to mechanical and rheological testing, durability aspects such as resistance to segregation and cohesion were qualitatively assessed. Life cycle assessment (LCA) was also conducted to quantify the environmental benefits of the proposed mixtures compared with conventional SCC made with OPC. By linking laboratory-scale performance with broader sustainability indicators, the study provides an integrated evaluation of technical feasibility and environmental compatibility. Results showed that 10% replacement of sand with any type of stone sludge, especially marble, enhanced flowability and viscosity while significantly improving resistance to segregation without increasing the dosage of superplasticizer. At 15% and 20% replacement levels, marble and travertine sludge maintained acceptable rheological and mechanical behavior, whereas granite sludge exhibited a negative influence, reducing workability and mechanical strength at higher dosages. The optimum replacement level was found at 10%, which yielded up to 5.9% improvement in compressive strength over the control. Flexural strength was unaffected at 10% and even increased with marble sludge, but noticeable reductions occurred at 15% and 20%, with marble again showing the least adverse effect compared to granite and travertine. From an environmental perspective, the use of the ternary binder drastically reduced the global warming potential (GWP), energy demand, and acidification potential relative to OPC-based SCC. The LCA results indicated that GWP decreased by as much as 71.9% compared to conventional mixtures. Moreover, replacing sand with stone sludge contributes directly to the circular economy by diverting industrial waste from landfills and natural water bodies, thereby reducing pollution and ecological degradation. Beyond numerical reductions in environmental indicators, the valorization of stone sludge alleviates waste disposal challenges, minimizes dust and runoff contamination, and preserves limited natural sand resources. These broader sustainability impacts demonstrate that the benefits of stone sludge utilization extend beyond concrete performance and can influence waste management strategies at the industrial scale. Overall, the study demonstrates that the synergy between partial sand substitution with marble, granite, and travertine sludge and the adoption of a low-cement ternary binder offers a promising pathway toward eco-efficient SCC. This approach not only enhances certain rheological and mechanical properties but also provides substantial environmental and economic benefits, making it a viable strategy for future sustainable construction practices.

Review History

Received: Sep 3, 2025
Revised: Dec 8, 2025
Accepted: Jan 27, 2026

Keywords

Self-compacting concrete (SCC)
Stone sludge; Low-cement binder
Ground granulated blast furnace slag (GGBFS)
Life cycle assessment (LCA)

* Corresponding Author Email: a.mohammadsalehi@alumni.iut.ac.ir - ORCID: 0009-0000-3996-7436



عملکرد بتن خودمتراکم کم سیمان با استفاده از لجن سنگ به عنوان جایگزین ماسه

علی محمد صالحی^{*1}، داود مستوفی نژاد^۲

۱. دکترا، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

۲. استاد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

این پژوهش، روشی پایدار برای تولید بتن خودمتراکم (SCC) ارائه می‌دهد که در آن بخشی از ماسه با لجن سنگ حاصل از برش سنگ‌های مرمر، گرانیت و تراورتن در سطوح ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ جایگزین شده است. همچنین از یک چسباننده سه جزئی کم سیمان شامل ۸۵٪ سرباره کوره بلند آسیاب شده (GGBFS)، ۱۰٪ سیمان پرتلند معمولی (OPC)، و ۵٪ آهک هیدراته استفاده شده تا به طور قابل توجهی از میزان انتشار CO₂ کاسته شود. نتایج نشان داد که جایگزینی ۱۰ درصدی ماسه با هر نوع لجن سنگ، به ویژه مرمر، باعث بهبود کارپذیری، ویسکوزیته و مقاومت در برابر جداسدگی دانه‌ها می‌شود، بدون آنکه نیاز به افزایش میزان فوق‌روان کننده باشد. افزون بر این، جایگزینی ۱۵٪ و ۲۰٪ ماسه با لجن سنگ مرمر و تراورتن، خواص رئولوژیکی و مکانیکی مناسبی نشان داد. در مقابل، لجن سنگ گرانیت تنها در سطح ۱۰٪ عملکرد مناسبی در حالت تازه داشت، اما در سطوح جایگزینی بالاتر، کارپذیری و مقاومت بتن کاهش یافت. مقاومت فشاری در مقدار بهینه جایگزینی تا ۵/۹٪ افزایش یافت. همچنین ارزیابی چرخه عمر (LCA) نشان داد که پتانسیل گرمایش جهانی (GWP) تا ۷۱/۹٪ کمتر از بتن‌های خودمتراکم معمولی با سیمان پرتلند است. این مطالعه نشان می‌دهد که ترکیب جایگزینی ماسه با لجن سنگ و استفاده از چسباننده با سیمان کم، امکان تولید بتن سازگار با محیط زیست را فراهم کرده و در عین حال از ضایعات صنعتی بهره‌برداری می‌کند.

کلمات کلیدی

بتن خودمتراکم

لجن سنگ

چسباننده کم سیمان

سرباره کوره بلند آسیاب شده

ارزیابی چرخه عمر

۱- مقدمه

در پاسخ به این چالش‌ها، رویکردهای نوین در ساخت و ساز پایدار بر استفاده از پسماندهای صنعتی و مواد ثانویه در بتن تأکید دارند. در میان گزینه‌های مختلف، لجن سنگ‌بری - که پودری ریز و بی‌اثر بوده و در فرآیند برش و صیقل سنگ‌ها تولید می‌شود - به دلیل فراوانی و دانه بندی مناسب، مورد توجه قرار گرفته است [4-6]. با این حال، این پسماندها اغلب در محل‌های دفن زباله یا منابع آبی رها می‌شوند و خطراتی مانند قلیایی شدن خاک، ته نشینی رسوبات و آلودگی بصری ایجاد می‌کنند [7, 8]. بتن خودمتراکم (SCC) که به دلیل کارپذیری بالا و توانایی

صنعت بتن، به عنوان بخش مهمی از ساخت و سازهای مدرن، هم‌زمان یکی از بزرگ‌ترین عوامل تخریب محیط‌زیست به شمار می‌رود. تولید سیمان پرتلند، به عنوان یکی از اجزای اصلی بتن، منشا حدود ۵-۸٪ از کل انتشار جهانی CO₂ است [1]. افزون بر آن، استخراج بی‌رویه سنگدانه‌های طبیعی (به ویژه ماسه رودخانه‌ای) پیامدهای شدید زیست محیطی از جمله تخریب زیستگاه‌ها، کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و فرسایش کناره رودخانه‌ها را به دنبال داشته است [2, 3].

* رایانامه نویسنده مسئول: a.mohammadsalehi@alumni.iut.ac.ir - ORCID: 0009-0000-3996-7436

کپی‌رایت © ۲۰۲۶، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.



جاری شدن بدون نیاز به ویبره شناخته می‌شود، کاربرد گسترده‌ای در سازه‌های با عملکرد بالا و قطعات پیش‌ساخته دارد [9,10]. با این حال، SCC معمولاً به حجم بالایی از مواد چسباننده و ریزدانه‌ها نیاز دارد تا کارپذیری و یکنواختی آن حفظ شود، که این امر مصرف سیمان و هزینه را افزایش می‌دهد [11,12].

استفاده از مواد پوزولانی مکمل مانند خاکستر بادی، دوده سیلیسی، متاکائولن و سرباره کوره بلند آسیاب‌شده (GGBFS) در کاهش مصرف سیمان و افزایش دوام بتن به‌خوبی مطالعه شده است [13-16]. همچنین، برخی مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از پودرهای بی‌اثر مانند پودر سنگ آهک، مرمر یا سایر پودرهای سنگی به عنوان پرکننده، می‌تواند رفتار رئولوژیک بتن را بهبود بخشد [17-20].

با این وجود، استفاده از لجن سنگ‌بری به‌عنوان جایگزین قسمتی از ماسه (نه سیمان)، به‌ویژه در بتن‌های خودمتراکم کم سیمان، کمتر بررسی شده است. اگرچه مطالعات زیادی به بررسی جایگزینی لجن سنگ به‌جای سیمان پرداخته‌اند، اما نقش آن به‌عنوان جایگزین ریزدانه در مقالات موجود به‌خوبی مورد توجه قرار نگرفته است [20, 21].

برای مثال، حمید و سکار [22] نشان دادند که استفاده از لجن مرمر تا ۱۵٪ به‌جای سیمان، مقاومت فشاری را افزایش و پدیده آب‌انداختگی را کاهش می‌دهد. صادق و همکاران [5] دریافتند که ترکیب ۵۰:۵۰ پودر مرمر و گرانیت به جای سیمان، مقاومت را افزایش داده و نسبت‌های بهینه جایگزینی سیمان در حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد است. همچنین، مطالعاتی از ساردینیا [23] و بلاییدی [24] نشان دادند که لجن سنگ می‌تواند چگالی تراکم و رفتار جمع‌شدگی را بهبود بخشد. اویسال و ییلماز [25] نیز نشان دادند که پودر سنگ آهک با پر کردن فضاهای خالی و تقویت چسبندگی بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها، خواص بتن خودمتراکم در حالت تازه و سخت‌شده را ارتقا می‌دهد.

چودهاری و همکاران [26] نیز نشان دادند که ترکیب گرد مرمر با خاکستر بادی و دوده سیلیسی، مقاومت فشاری و تراوایی بتن را بهبود می‌بخشد. کریمی‌پور و همکاران [27] نیز با استفاده از گل قرمز و لجن گرانیت در بتن خودمتراکم، به مقاومت‌هایی برابر با نمونه‌های دارای سیمان کامل دست یافتند.

از سوی دیگر، تحقیقات مربوط به بهینه‌سازی چسباننده‌ها

نشان داده‌اند که سرباره می‌تواند تا ۷۰-۸۵٪ جایگزین سیمان شده و در صورت فعال‌سازی با آهک یا مقادیر کم سیمان، عملکرد مناسبی داشته باشد [28, 29]. یازچی [30] و یانگ [31] نشان دادند که چسباننده‌های ترکیبی حاوی سرباره و خاکستر بادی، دوام و مقاومت حرارتی بتن خودمتراکم را افزایش می‌دهند. همچنین، محمدصالحی و همکاران [32] تولید بتن با عملکرد بالا (HPC) با ترکیب ۸۵٪ سرباره، ۱۰٪ سیمان، و ۵٪ آهک هیدراته را بررسی کرده و بدون نیاز به کلرید کلسیم به مقاومت قابل قبولی دست یافتند.

با وجود پژوهش‌های فراوان در زمینه بتن خودمتراکم و به‌کارگیری پسماندها، شکاف‌های آشکاری در مطالعات وجود دارد:

- از لجن سنگ به‌عنوان جایگزین ماسه (نه سیمان) استفاده کنند،
- از سیستم‌های چسباننده با سیمان کم (مقدار بالای سرباره، آهک، و حداقل سیمان پرتلند معمولی) بهره ببرند،
- به بررسی بهبود خواص رئولوژیکی ناشی از افزودن انواع مختلف لجن سنگ در بتن خودمتراکم بپردازند.

این پژوهش به صورت منحصربه‌فرد، استفاده از لجن سنگ‌بری سنگ‌های مرمر، گرانیت و تراورتن را به عنوان جایگزین قسمتی از ماسه (در سطوح ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪) در تولید بتن خودمتراکم بررسی می‌کند. برخلاف مطالعاتی که عمدتاً به جایگزینی سیمان پرداخته‌اند، در اینجا جایگزینی ماسه مستقیماً بر دینامیک جریان بتن تأثیر می‌گذارد. افزون بر آن، چسباننده مورد استفاده شامل ۸۵٪ سرباره، ۱۰٪ سیمان پرتلند و ۵٪ آهک هیدراته است که به‌شدت ردپای کربنی مخلوط را کاهش می‌دهد.

اگرچه این نوع چسباننده به تنهایی خواص مناسبی را در حالت تازه بتن فراهم می‌کند، افزودن لجن سنگ خواص رئولوژیک، مقاومت در برابر جداشدگی و کارپذیری کلی بتن خودمتراکم را بهبود می‌دهد. در نهایت، یک ارزیابی زیست‌محیطی مقایسه‌ای میان این طرح‌ها و بتن خودمتراکم ساخته شده از سیمان پرتلند با مقاومت مشابه انجام شده است. آنچه این پژوهش را متمایز می‌سازد، استفاده هم‌زمان از پسماند سنگی به‌عنوان جایگزین ماسه و سامانه چسباننده با حداقل سیمان است – رویکردی نوآورانه که پیش‌تر در تحقیقات مطرح نشده است.

در این پژوهش، از سرباره کوره‌بلند آسیاب‌شده (GGBFS)

قابل توجه مصرف سیمان و آثار زیست‌محیطی ناشی از تولید بتن صورت گرفته است. درشت‌دانه مورد استفاده، سنگ آهک شکسته با ابعاد اسمی حداکثر ۱۲/۵ میلی‌متر، وزن مخصوص ۲/۶۷ و جذب آب کمتر از ۲٪ بود. همچنین ماسه به کار رفته دارای مدول نرمی حدود ۳/۰ و وزن مخصوص ۲/۶۳ بود (مطابق جدول ۲).

لجن سنگ‌بری به عنوان جایگزین بخشی از ماسه در بتن خودمتراکم به کار رفت. سه نوع پودر لجن سنگ مورد استفاده شامل لجن سنگ مرمر، گرانیت و تراورتن بودند که از کارخانه‌های سنگ‌بری محلی جمع‌آوری شدند (شکل ۱).

این لجن‌ها در مقادیر ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ وزنی جایگزین ماسه شدند. علت استفاده از این درصدها این است که از طرفی میزان جایگزینی ماسه قابل توجه باشد و از طرف دیگر درصد جایگزینی بهینه و درصد جایگزینی که باعث افت نتایج می‌شود را با کمترین تعداد آزمایش بتوان یافت. منحنی دانه‌بندی سیمان، سرباره و لجن سنگ‌ها در شکل (۲) نمایش داده شده است.

برای تضمین کارپذیری مناسب مخلوط‌های SCC، از فوق روان‌کننده پایه پلی‌کربوکسیلات (Auramix 4450)، تولید شرکت فسراک استفاده شد. مقدار این افزودنی برای هر طرح اختلاط بر اساس محدوده کارپذیری مطلوب تنظیم شد.

عمل اختلاط در پن میکسر با ظرفیت ۱۰۰ لیتر انجام شد. در ابتدا، کلیه مواد خشک شامل چسباننده، ماسه، شن و لجن سنگ به مدت حدود ۲ دقیقه مخلوط شدند. سپس نیمی از آب به‌همراه کل فوق‌روان‌کننده به مخلوط اضافه شد و هم‌زدن به مدت ۲ دقیقه دیگر ادامه یافت. در ادامه، نیمه باقیمانده آب به‌تدریج افزوده شده و فرایند اختلاط به مدت حدود ۴ دقیقه ادامه یافت تا یک مخلوط یکنواخت و همگن حاصل شود. بتن تازه بلافاصله پس از اختلاط، برای آزمون‌های کارایی مورد آزمایش قرار گرفت و سپس در قالب‌ها ریخته شد.



شکل ۱. لجن سنگ‌های تراورتن، مرمر و گرانیت

Fig. 1. Stone sludge of marble, travertine and granite

به‌جای سایر مواد پوزولانی استفاده شد، زیرا این ماده در کشور به‌وفور در دسترس است، فعالیت پوزولانی و هیدرولیکی بالایی دارد و با کاهش نیاز به کلینکر، منجر به کاهش قابل توجه انتشار CO_2 می‌شود.

در میان استراتژی‌های اصلی کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن در صنعت سیمان، شامل ذخیره‌سازی کربن، استفاده از سوخت و مواد جایگزین، بهره‌وری انرژی، و جایگزینی کلینکر، به‌کارگیری سرباره در چسباننده‌های سیمانی در دسته جایگزینی کلینکر قرار می‌گیرد. این رویکرد با کاهش سهم کلینکر در ترکیب سیمان، انتشار مستقیم CO_2 ناشی از فرآیند کلسیناسیون را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. گرچه این روش به‌طور غیرمستقیم موجب صرفه‌جویی در انرژی نیز می‌شود، اما در چارچوب استراتژی‌های یادشده، به عنوان راهکاری از نوع جایگزینی کلینکر شناخته می‌شود. در این پژوهش نیز استفاده از چسباننده سه‌جزئی شامل سرباره، آهک و سیمان پرتلند، به‌منظور کاهش ردپای کربن و حرکت به‌سوی بتن پایدار به کار گرفته شده است.

اگرچه صنعت فولاد از منابع اصلی انتشار CO_2 است، اما سرباره کوره‌بلند محصول جانبی اجتناب‌ناپذیر آن بوده و استفاده از آن در سیمان و بتن با جایگزینی کلینکر پرکربن، موجب کاهش انتشار خالص CO_2 می‌شود. مطالعاتی مانند مطالعات سینگ [13] نیز این رویکرد را از نظر زیست‌محیطی تأیید کرده‌اند.

۲- روش تحقیق

در این پژوهش، مخلوط‌های بتن خودمتراکم (SCC) با استفاده از یک سامانه چسباننده سه‌جزئی متشکل از سیمان پرتلند معمولی (OPC)، سرباره کوره بلند آسیاب‌شده (GGBFS)، و آهک هیدراته طراحی شدند. سیمان مورد استفاده از نوع ۳۲۵-۱ و محصول شرکت سیمان اصفهان بود. سرباره نیز از شرکت سیمان کویر کاشان تهیه شد. آهک هیدراته با خلوص ۹۸٪ به‌عنوان فعال‌کننده برای افزایش واکنش‌پذیری پوزولانی سرباره به کار رفت. آهک هیدراته با ایجاد محیط قلیایی، واکنش‌های هیدراسیون سرباره را تسریع کرده و باعث تشکیل ژل‌های C-S-H می‌شود که عامل اصلی ایجاد مقاومت در این سیستم‌های کم‌سیمان است.

ویژگی‌های شیمیایی سیمان و سرباره در جدول (۱) ارائه شده‌اند. انتخاب این سامانه چسباننده سه‌جزئی با هدف کاهش

جدول ۱. ترکیبات شیمیایی سرباره و سیمان

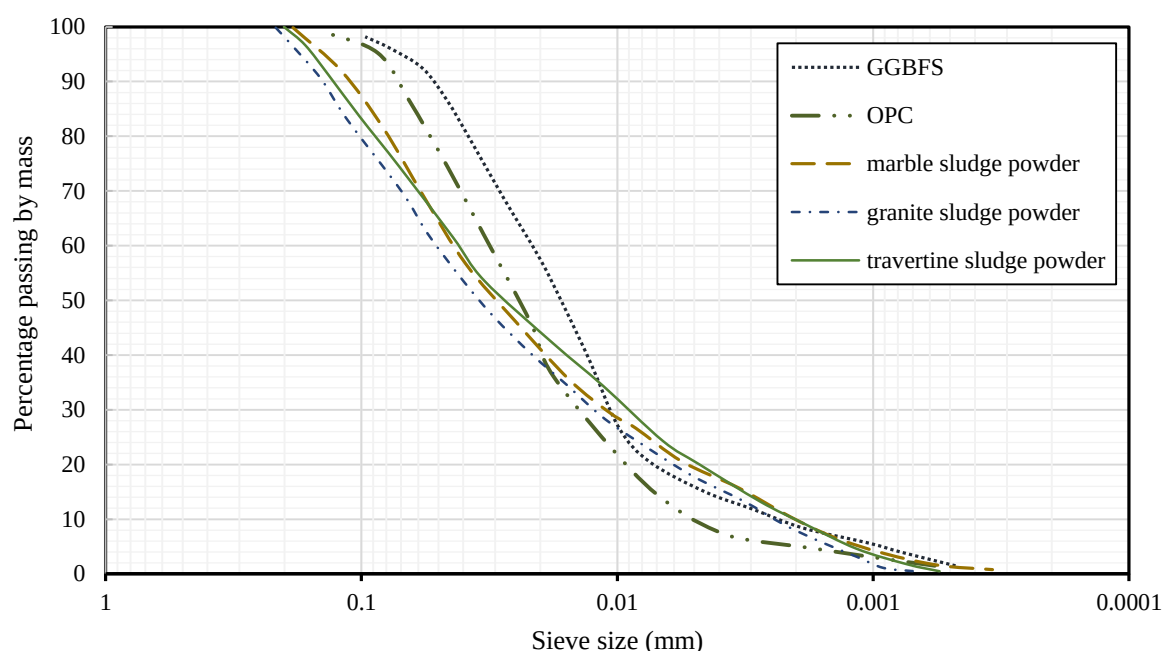
Table 1. Chemical specifications of materials

composition (% by mass)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	LOI
GGBFS	37.6	35.8	13.3	1	9	2.4	0.4	0.5	37.6
OPC	61	21.9	5.5	3.4	2.3	2.3	0.3	0.6	-

جدول ۲. توزیع اندازه دانه‌های ماسه و درشت‌دانه

Table 2. Particle size distribution of sand and coarse aggregate.

Sieve size (mm)	12.5	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15
Percentage passing by mass (%) (sand)	-	-	100	88.65	57.15	33.88	15.38	4.50
Percentage passing by mass (%) (coarse aggregate)	95.80	42.28	0.65	0	-	-	-	-



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی سیمان، سرباره و لجن سنگ‌ها

Fig. 2. Particle size distribution of hydrated lime, GGBFS, and stone sludge powders

در تمامی طرح‌های اختلاط، نسبت آب به سیمان یکسان و برابر با ۰/۳۷ در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه مقدار فوق‌روان‌کننده در نمونه مرجع (CTRL) و نمونه‌های M10، G10 و T10 یکسان است، اثر افزودن لجن سنگ بر کارپذیری بتن خودمترکم مورد بررسی قرار می‌گیرد. با افزایش درصد لجن سنگ، برای حفظ نسبت آب به مواد چسباننده، مقدار بیشتری فوق‌روان‌کننده لازم بوده و مقدار افزایش آن در درصدهای برابر انواع لجن سنگ، ثابت است. به عنوان نمونه میزان فوق‌روان‌کننده در طرح‌های G30، M30 و T30 با هم برابر بوده و به دلیل درصد بیشتر لجن سنگ، دوز بیشتری از فوق‌روان‌کننده در آن‌ها نسبت به طرح‌های دیگر استفاده شده است. به این ترتیب، اثر انواع مختلف لجن سنگ بر خواص بتن تازه و سخت‌شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

نمونه‌های استوانه‌ای (با ابعاد ۱۰۰ × ۲۰۰ میلی‌متر طبق استاندارد ASTM C39 [33]) برای تمام آزمون‌های مکانیکی استفاده شدند. پس از بتن ریزی، نمونه‌ها به مدت ۳۶ ساعت در قالب باقی ماندند و سپس در حوضچه آب آهک اشباع به مدت ۲۸ روز عمل‌آوری شدند. جدول (۳) طرح‌های اختلاط را نشان می‌دهد. برای مشخص کردن طرح‌های مختلف بتن، از علائم اختصاری استفاده شد. اصطلاح CTRL به طرح اختلاط شاهد (کنترل) اطلاق می‌شود که هیچ لجن سنگی در آن به کار نرفته است. مخلوط‌هایی که شامل لجن مرمر به عنوان جایگزین ماسه به میزان ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ وزنی هستند، به ترتیب به صورت M10، M15 و M20 نام‌گذاری شدند. به طور مشابه، مخلوط‌های حاوی لجن گرانیت با G10، G15 و G20 مشخص می‌شوند و نمونه‌هایی که شامل لجن تراورتن هستند به ترتیب T10، T15 و T20 نام دارند.

جدول ۳. نسبت مصالح در طرح‌های اختلاط

Table 3. Mixture proportions

Mixture	Materials (kg/m ³)							
	Slag	Cement	Hydrated lime	Water	Sand	Stone sludge	Coarse aggregate	Superplasticizer
CTRL	382.5	45	22.5	166.5	1150	0	600	4.05
M10	382.5	45	22.5	166.5	1035	115	600	4.05
M15	382.5	45	22.5	166.5	977.5	172.5	600	4.61
M20	382.5	45	22.5	166.5	920	230	600	4.74
G10	382.5	45	22.5	166.5	1035	115	600	4.05
G15	382.5	45	22.5	166.5	977.5	172.5	600	4.61
G20	382.5	45	22.5	166.5	920	230	600	4.74
T10	382.5	45	22.5	166.5	1035	115	600	4.05
T15	382.5	45	22.5	166.5	977.5	172.5	600	4.61
T20	382.5	45	22.5	166.5	920	230	600	4.74

[35] به منظور ارزیابی ویسکوزیته و کارپذیری بتن اجرا شد. برای تعیین یکنواختی مخلوط و مقاومت آن در برابر آب‌انداختگی و جداسازی درشت‌دانه، آزمون V-Funnel پس از ۵ دقیقه انجام گرفت.

۲-۱- آزمایش بتن تازه

۲-۱-۱- آزمون جریان اسلامپ

این آزمون کارپذیری بتن خودمتراکم (SCC) را با اندازه‌گیری قطر بتن پخش شده پس از برداشتن مخروط اسلامپ استاندارد، ارزیابی می‌کند. این فرآیند بدون هیچ‌گونه تراکم مکانیکی انجام می‌شود و قطر متوسط ثبت می‌شود (شکل ۳). نتیجه آزمون مستقیماً نشان‌دهنده قابلیت پرمکنندگی بتن است. محدوده‌های عملکرد قابل قبول این آزمون در جدول (۴) خلاصه شده‌اند.

۲-۱-۲- آزمایش T₅₀₀

زمان T₅₀₀ که به‌عنوان بخشی از آزمون جریان اسلامپ ثبت می‌شود، نشان‌دهنده مدت زمانی است که بتن برای رسیدن به قطر ۵۰۰ میلی‌متر نیاز دارد. این مقدار بیانگر ویسکوزیته نسبی و سرعت جریان مخلوط است. مقادیر هدف برای این پارامتر در جدول ۴ ارائه شده‌اند.

۲-۱-۳- آزمون V-Funnel

در این آزمون، بتن تحت تأثیر نیروی گرانش از درون یک قیف V شکل عبور داده می‌شود و زمان لازم برای تخلیه کامل آن اندازه‌گیری می‌گردد (شکل ۴). این فرآیند اطلاعاتی درباره ویسکوزیته و کارپذیری بتن فراهم می‌کند. محدوده‌های توصیه‌شده برای این آزمون در جدول (۴) آمده‌اند.



شکل ۳. آزمایش جریان اسلامپ
Fig. 3. Slump flow test

در طرح‌های اختلاطی که از لجن سنگ به‌جای ماسه استفاده شده است، مقدار آب موجود در مخلوط کاهش می‌یابد، زیرا سهم ماسه که مرطوب است در مخلوط کمتر است. این کاهش میزان آب بر اساس رطوبت ماسه محاسبه شده و دوباره به طرح اختلاط اضافه شد.

عملکرد طرح‌های اختلاط از طریق مجموعه‌ای از آزمون‌های استاندارد آزمایشگاهی، هم در حالت تازه و هم در حالت سخت‌شده ارزیابی شد. ویژگی‌های بتن تازه بلافاصله پس از اختلاط بررسی شدند. آزمایش جریان اسلامپ طبق استاندارد ASTM C1611 [34] برای ارزیابی قابلیت پرمکنندگی بتن خودمتراکم انجام شد. همچنین زمان T₅₀₀ (زمان لازم برای رسیدن بتن جریان یافته در آزمایش اسلامپ به قطر ۵۰۰ میلی‌متر) به‌عنوان شاخص سرعت جریان اندازه‌گیری شد. آزمون V-Funnel بر اساس دستورالعمل EFNARC

زیست محیطی یک محصول را از مرحله استخراج مواد خام، تولید و حمل و نقل تا پایان عمر آن مورد بررسی قرار می دهد. در این مطالعه، LCA با استفاده از داده های پس زمینه ای که عمدتاً از پایگاه داده Ecoinvent v3.8 استخراج شده بود، انجام گرفت.



شکل ۴. آزمایش قیف V شکل

Fig. 4. V-Funnel test



شکل ۵. نمونه های آزمایش مقاومت فشاری

Fig. 5. Compressive strength test specimens



شکل ۶. آزمایش خمش چهار نقطه ای

Fig. 6. 4-point Flexural test

جدول ۴. محدوده های پیشنهادی برای خواص بتن خودمترکم تازه بر اساس (EFNARC 2002)

Table 4. Recommended Ranges for Fresh SCC Properties (According to EFNARC 2002)

Test Method	Evaluated Property	Recommended Range
Slump Flow	Filling ability	650–800 mm
T ₅₀₀ Time	Viscosity/flow rate	2–5 seconds
V-Funnel	Flowability/viscosity	6–12 seconds
V-Funnel after 5 min (ΔT)	Segregation resistance	≤ 3 seconds

۲-۱-۴-آزمون V-Funnel پس از ۵ دقیقه (مقاومت در برابر

جداشدگی)

این آزمون مقاومت بتن خودمترکم در برابر جداشدگی را می سنجد. پس از اجرای اولیه آزمون V-Funnel، بتن دوباره داخل قیف ریخته شده و به مدت پنج دقیقه در حالت سکون باقی می ماند و سپس دریچه قیف باز می شود. تفاوت میان دو زمان جریان برای ارزیابی پایداری مخلوط به کار می رود. معیارهای قابل قبول این پارامتر در جدول (۴) ذکر شده اند.

۲-۲-آزمایش های بتن سخت شده

پس از ۲۸ روز عمل آوری در آب آهک اشباع، نمونه های بتن سخت شده تحت آزمایش های مکانیکی قرار گرفتند. مقاومت فشاری طبق استاندارد ASTM C39 با استفاده از نمونه های استوانه ای به ابعاد 100×200 میلیمتر اندازه گیری شد (شکل ۵). آزمایش خمش چهار نقطه ای طبق استاندارد BS EN 1170-5 [36] و تحت پروتکل کنترل-جابه جایی انجام شد و نرخ جابه جایی برابر با ۱ میلی متر بر دقیقه تنظیم شد. برای آزمون خمش، نمونه هایی با ابعاد $350 \times 100 \times 40$ میلی متر استفاده شدند. فاصله بین انتهای نمونه و تکیه گاه های مجاور ۲۵ میلی متر در نظر گرفته شد (شکل ۶). تمام آزمایش ها در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی انجام شدند و هر اندازه گیری حداقل روی سه نمونه تکرار شد.

۲-۳-ارزیابی چرخه عمر (Life Cycle Assessment - LCA)

در چند دهه اخیر، اهمیت پایداری زیست محیطی در صنعت ساخت و ساز به طور چشمگیری افزایش یافته است. یکی از مؤثرترین ابزارها برای ارزیابی عملکرد زیست محیطی مصالح ساختمانی، ارزیابی چرخه عمر (LCA) است.

LCA یک روش علمی استاندارد است که تمام آثار

به ۷۱، ۷۰ و ۷۰/۵ سانتی‌متر افزایش یافته است، در حالی که زمان T_{500} از ۴/۹ ثانیه به ۲/۷، ۳/۱ و ۲/۸ ثانیه کاهش یافته است.

با جایگزینی ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ ماسه با لجن مرمر، زمان آزمون V-Funnel به ترتیب ۴/۱۹، ۴/۲۵ و ۴/۰۸ ثانیه کاهش یافت. همچنین اختلاف زمان آزمون V-Funnel پس از ۵ دقیقه از ۱/۱ ثانیه به ترتیب به ۰/۱۷، ۰/۲۸ و ۰/۲۸ ثانیه کاهش یافت که نشان‌دهنده افزایش مقاومت بتن در برابر جداسازی سنگدانه‌ها است. علاوه بر این، زمان آزمون T_{500} به ترتیب ۲/۲، ۲/۱ و ۲ ثانیه کاهش پیدا کرد.

نمونه‌ی G10 (با ۱۰٪ لجن گرانیات) در مقایسه با نمونه شاهد ویژگی‌های بهتری در حالت تازه نشان داد؛ زمان V-Funnel برابر با ۷/۵۹ ثانیه (۳/۷۹ ثانیه کاهش) و مقدار ΔV -Funnel بعد از ۵ دقیقه برابر با ۰/۳۹ ثانیه (۰/۷۱ ثانیه کاهش) بود. همچنین زمان آزمون T_{500} نیز ۱/۸ ثانیه کاهش داشت. با این حال، افزایش درصد لجن گرانیات به ۱۵٪ و ۲۰٪ منجر به افزایش زمان آزمایش T_{500} شد؛ برای مخلوط‌های G15 و G20 زمان V-Funnel به ترتیب به ۱۱/۱ و ۱۳/۱۲ ثانیه و مقادیر V_{5min} به ۱۳/۰۲ و ۱۴/۹۲ ثانیه رسید. این نتایج نشان می‌دهد که افزایش میزان لجن گرانیات می‌تواند کارپذیری مخلوط را کاهش داده و ویسکوزیته را افزایش دهد. با جایگزینی ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ ماسه با لجن تراورتن، زمان آزمون V-Funnel به ترتیب ۴/۴۵، ۴/۱۷ و ۳/۷۶ ثانیه کاهش یافت. اختلاف زمان آزمون V-Funnel پس از ۵ دقیقه نیز از ۱/۱ ثانیه به ترتیب به ۰/۱۹، ۰/۴۱ و ۰/۳۴ ثانیه کاهش پیدا کرد که نشان‌دهنده بهبود مقاومت بتن در برابر جداسازی سنگدانه‌ها است. علاوه بر این، زمان آزمون T_{500} نیز به ترتیب ۲/۱، ۱/۶ و ۱/۴ ثانیه کاهش یافت.

مرزهای سیستم در این مطالعه به صورت از گهواره تا دروازه (cradle to gate) تعریف شدند؛ به این معنا که تمامی مراحل از استخراج مواد خام تا رسیدن محصول نهایی به در کارخانه را در بر می‌گرفت، اما مرحله استفاده و پایان عمر (end-of-life) در نظر گرفته نشد.

در زمینه بتن، به ویژه انواع پیشرفته‌ای مانند بتن خودمتراکم، LCA نقش مهمی در شناسایی بهینه‌ترین طرح‌های اختلاط از منظر زیست‌محیطی ایفا می‌کند. برای ارزیابی آثار زیست‌محیطی طرح‌های اختلاط بتن در این مطالعه، یک مخلوط بتن خودمتراکم با استفاده از سیمان پرتلند معمولی به عنوان ماده چسباننده تهیه شد. با تنظیم مقدار سیمان و در عین حال ثابت نگه‌داشتن میزان سنگدانه‌های درشت و ریز نسبت به سایر طرح‌ها، مقاومت فشاری ۲۸ روزه این مخلوط به گونه‌ای طراحی شد که به مقاومت نمونه کنترل نزدیک باشد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج آزمایش‌های بتن تازه

جدول (۵) نتایج آزمایش بتن تازه را ارائه می‌دهد. طرح اختلاط شاهد، که در آن از لجن سنگ استفاده نشده، حداقل الزامات بتن خودمتراکم را برآورده می‌کند.

از آنجایی که مقدار آب و فوق‌روان‌کننده در طرح اختلاط شاهد و مخلوط‌های G10، M10 و T10 یکسان است، اثر جایگزینی ماسه با لجن سنگ بر جریان اسلامپ بتن خودمتراکم با مقایسه این چهار مخلوط قابل ارزیابی است.

نتایج نشان می‌دهد که جریان اسلامپ به ترتیب از ۶۶ سانتی‌متر

جدول ۵. نتایج آزمایش‌های بتن در حالت تازه

Table 5. Fresh concrete experiment results

Mixture	Slump flow (mm)	T_{500} (s)	V (s)	V_{5min} (s)	ΔV (s)
CTRL	660 ± 2	4.9 ± 0.10	11.38 ± 0.18	12.48 ± 0.16	1.1
M10	710 ± 1	2.7 ± 0.07	7.19 ± 0.11	7.36 ± 0.13	0.17
M15	725 ± 2	2.8 ± 0.07	7.13 ± 0.10	7.41 ± 0.15	0.28
M20	720 ± 1	2.9 ± 0.08	7.3 ± 0.14	7.58 ± 0.11	0.28
G10	700 ± 3	3.1 ± 0.06	7.59 ± 0.16	7.98 ± 0.14	0.39
G15	660 ± 2	4.7 ± 0.07	11.1 ± 0.18	13.02 ± 0.17	1.92
G20	640 ± 1	5.1 ± 0.09	13.12 ± 0.15	14.92 ± 0.17	1.8
T10	705 ± 1	2.8 ± 0.07	6.93 ± 0.10	7.12 ± 0.12	0.19
T15	690 ± 3	3.3 ± 0.05	8.21 ± 0.12	9.33 ± 0.11	1.12
T20	685 ± 2	3.5 ± 0.05	8.63 ± 0.13	9.76 ± 0.15	1.13

زبرتری نسبت به ذرات مرمر و تراورتن دارند.

۳-۲- نتایج آزمایش‌های بتن سخت شده

۳-۲-۱- آزمون مقاومت فشاری

شکل (۸) مقاومت فشاری نمونه‌ها را نشان می‌دهد. مقاومت فشاری ۷ روزه و ۲۸ روزه نمونه شاهد به ترتیب ۲۱/۹ و ۳۹/۷ مگاپاسکال بود. چگونگی شکست نمونه‌های فشاری در شکل (۷) نشان داده شده است. این نتیجه نشان می‌دهد که مقاومت فشاری ۲۸ روزه تقریباً دو برابر مقدار ۷ روزه است. این رفتار در مقایسه با بتن معمولی مبتنی بر سیمان پرتلند، که معمولاً حدود ۷۰ درصد مقاومت نهایی در ۷ روز حاصل می‌شود، بیانگر کندی نسبی در فرایند هیدراسیون اولیه است. علت این رفتار را می‌توان به نقش مواد پوزولانی / افزودنی‌ها در کندسازی واکنش‌های اولیه و رشد تدریجی محصولات هیدراسیون (C-S-H) نسبت داد که در سنین بالاتر منجر به افزایش مقاومت می‌شود [32,37].

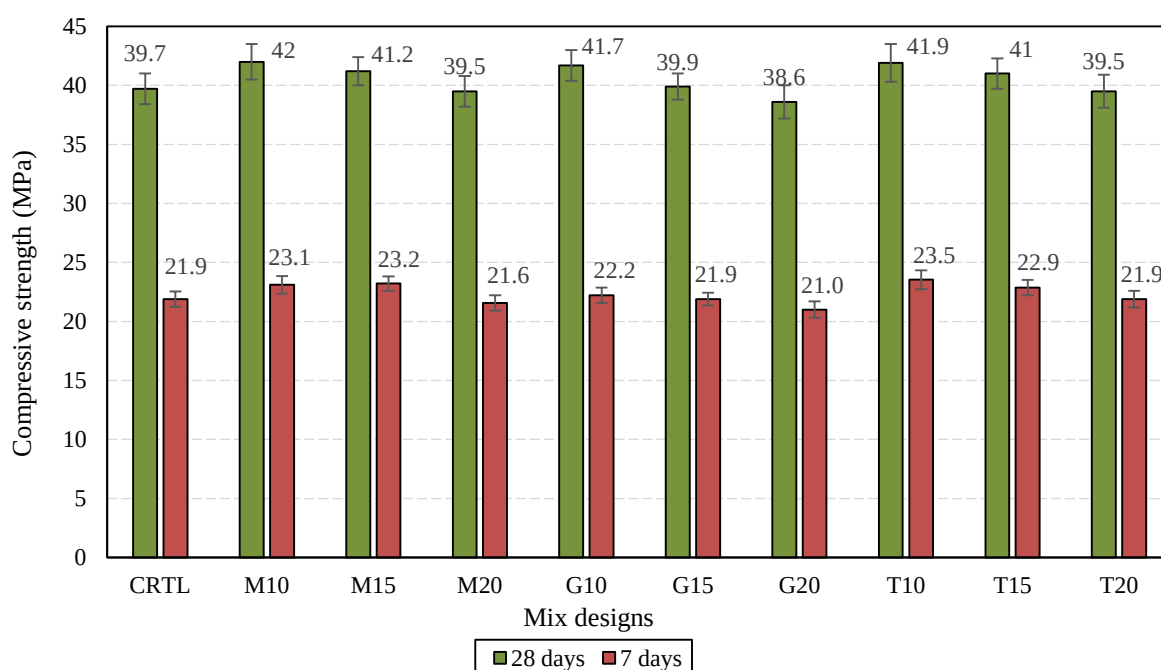
با جایگزینی ۱۰٪ ماسه با لجن مرمر، گرانیت و تراورتن، مقاومت فشاری ۷ روزه به ترتیب ۱/۵، ۱/۱۰ و ۱/۹٪ افزایش یافت و مقاومت فشاری ۲۸ روزه نیز به ترتیب ۵/۹، ۵/۱ و ۵/۵٪ بیشتر شد.



شکل ۷. شکست فشاری نمونه

Fig. 7. Compressive failure of sample

بر اساس نتایج آزمون‌های بتن تازه، جایگزینی ۱۰٪ ماسه با هر سه نوع لجن سنگ، کارایی بتن و انسجام سنگدانه‌ها را به‌طور چشمگیری بهبود داد، بدون اینکه نیازی به افزودن فوق‌روان‌کننده اضافی باشد. با این حال، در سطوح جایگزینی ۱۵٪ و ۲۰٪، مقایسه سه نوع لجن سنگ نشان داد که لجن سنگ مرمر و پس از آن تراورتن بیشترین تأثیر مثبت را بر بهبود خواص بتن خودمترکم در حالت تازه داشته‌اند، در حالی که لجن گرانیت موجب کاهش کارایی بتن شده است. این پدیده را می‌توان به مورفولوژی ذرات نسبت داد، چراکه ذرات لجن گرانیت لبه‌های تیزتر و سطوح



شکل ۸. مقاومت فشاری نمونه‌ها

Fig. 8. Compressive strength of specimens

جدول ۶. مقاومت فشاری نمونه‌ها

Table 6. Compressive strength of specimens

Mix designs	28-day Compressive Strength (MPa)					7-day Compressive Strength (MPa)				
	Samples	Mean	SD			Samples	Mean	SD		
CRTL	38.4	39.9	40.8	39.7	0.99	21	22.1	22.5	21.9	0.63
M10	40.6	41.9	43.5	42	1.19	22.5	23	23.9	23.1	0.58
M15	40.1	41.1	42.4	41.2	0.94	22.6	23.4	23.6	23.2	0.43
M20	38.4	39.3	40.8	39.5	0.99	20.9	21.6	22.3	21.6	0.57
G10	40.4	41.7	43	41.7	1.06	21.5	22.3	22.9	22.2	0.57
G15	38.9	39.8	41	39.9	0.86	21.3	22.2	22.2	21.9	0.42
G20	37.4	38.4	40	38.6	1.07	20.2	21.1	21.7	21.0	0.62
T10	40.3	42.2	43.2	41.9	1.2	23	23.2	24.3	23.5	0.57
T15	39.7	41	42.3	41	1.06	22.2	22.9	23.5	22.9	0.53
T20	38	39.6	40.9	39.5	1.19	21.1	22	22.6	21.9	0.62

با جایگزینی ۱۰٪ ماسه با لجن مرمر، گرانیته و تراورتن، مقاومت خمشی به‌ترتیب ۲/۰٪ افزایش در مخلوط مرمر و ۳/۱٪ و ۲/۹٪ کاهش در مخلوط‌های گرانیته و تراورتن نشان داد.

در سطح جایگزینی ۱۵٪، مقاومت خمشی به‌ترتیب برای مرمر، گرانیته و تراورتن ۴/۲٪، ۱۱/۸٪ و ۹/۹٪ کاهش یافت. با جایگزینی ۲۰٪، این کاهش‌ها به‌ترتیب ۹/۰٪، ۱۸/۸٪ و ۱۷/۱٪ بودند.

جایگزینی ۱۰٪ ماسه با انواع لجن سنگ تغییرات کمی در مقاومت خمشی ایجاد کرد؛ درواقع لجن مرمر موجب افزایش جزئی مقاومت در حدود ۲٪ شد. اما افزایش سطح جایگزینی به ۱۵٪ و ۲۰٪ منجر به کاهش قابل توجه مقاومت خمشی گردید. این موضوع را می‌توان به افزایش ذرات ریز و سطح ویژه بالاتر نسبت داد، که باعث بالا رفتن نیاز به مواد سیمانی برای ایجاد پیوند مناسب می‌شود. با این حال، کاهش مقاومت در مخلوط‌های حاوی لجن مرمر کمتر محسوس بود.

افزایش ذرات ریز ناشی از جایگزینی لجن سنگ تمایل به تضعیف منطقه انتقال بین خمیر سیمان و سنگدانه (ITZ) دارد. در سطوح بالای جایگزینی، وجود ذرات ریز اضافی می‌تواند به کاهش تراکم بسته‌بندی و افزایش نیاز آبی منجر شود که این موضوع باعث ایجاد تخلخل موضعی و نواحی ضعیف در مرز خمیر و سنگدانه خواهد شد. این عوامل در مجموع باعث کاهش عملکرد خمشی می‌شوند، زیرا مقاومت خمشی نسبت به کیفیت پیوند و ریزترک‌ها حساس‌تر از مقاومت فشاری است.

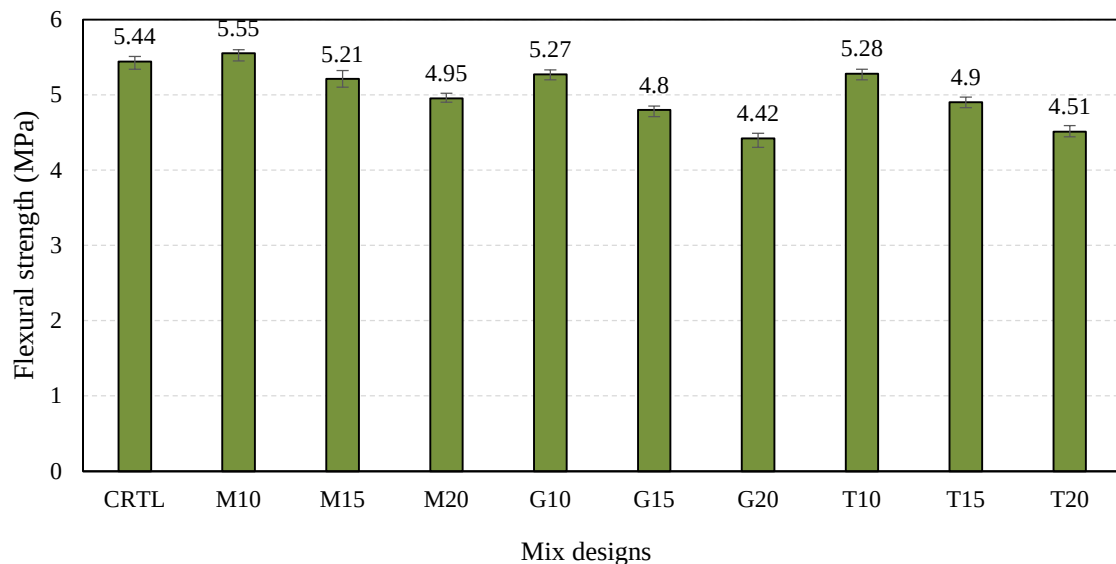
در سطح جایگزینی ۱۵٪، مقاومت فشاری ۷ روزه برای لجن مرمر ۰/۵٪ افزایش و برای لجن گرانیته و تراورتن هر کدام ۰/۵٪ کاهش داشت. مقاومت فشاری ۲۸ روزه نیز به‌ترتیب ۳/۸٪، ۰/۵٪ و ۳/۳٪ افزایش یافت.

در سطح جایگزینی ۲۰٪، مقاومت فشاری ۷ روزه برای لجن مرمر، گرانیته و تراورتن به‌ترتیب ۳/۴٪، ۶/۳٪ و ۴/۴٪ کاهش یافت و مقاومت ۲۸ روزه نیز به‌ترتیب ۰/۴٪، ۲/۸٪ و ۰/۶٪ کاهش پیدا کرد.

به طور کلی، جایگزینی ۱۰٪ و ۱۵٪ ماسه با لجن سنگ منجر به بهبود مقاومت فشاری شد. این بهبود می‌تواند ناشی از جایگیری بهتر ذرات و توزیع یکنواخت‌تر سنگدانه‌ها باشد. با این حال، بیشترین افزایش مقاومت در سطح جایگزینی ۱۰٪ مشاهده شد. با افزایش درصد جایگزینی، مقاومت فشاری کاهش یافت و در سطح ۲۰٪ کمتر از نمونه‌ی کنترل شد. این کاهش احتمالاً به دلیل افزایش میزان ذرات ریز است که باعث بالا رفتن سطح ویژه و افزایش نیاز به مواد سیمانی برای ایجاد پیوند مناسب می‌شود. با این وجود، لجن مرمر بهترین عملکرد را نشان داد؛ به‌طوری که حتی در سطح ۲۰٪، مقاومت آن نزدیک به نمونه کنترل بود، در حالی که کاهش مقاومت در مخلوط‌های حاوی گرانیته محسوس‌تر بود.

۳-۲-۲-آزمون مقاومت خمشی

شکل (۹) مقاومت خمشی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. در آزمون مقاومت خمشی، تنها مقاومت خمشی ۲۸ روزه اندازه‌گیری شد. مقاومت خمشی نمونه کنترل برابر با ۵/۴۴ مگاپاسکال بود.



شکل ۹. مقاومت خمشی نمونه‌ها

Fig. 9. Flexural strength of specimens

جدول ۷. مقاومت خمشی نمونه‌ها

Table 7. Flexural strength of specimens

Mix designs	28-day Flexural Strength (MPa)				
	Samples			Mean	SD
CTRL	5.34	5.47	5.51	5.44	0.07
M10	5.45	5.60	5.60	5.55	0.07
M15	5.10	5.21	5.32	5.21	0.09
M20	4.90	4.93	5.02	4.95	0.05
G10	5.20	5.28	5.33	5.27	0.05
G15	4.71	4.84	4.85	4.80	0.06
G20	4.30	4.47	4.49	4.42	0.09
T10	5.20	5.30	5.34	5.28	0.06
T15	4.83	4.90	4.97	4.90	0.06
T20	4.44	4.50	4.59	4.51	0.06

۳-۲-۳- تحلیل نتایج بر اساس ریز ساختار

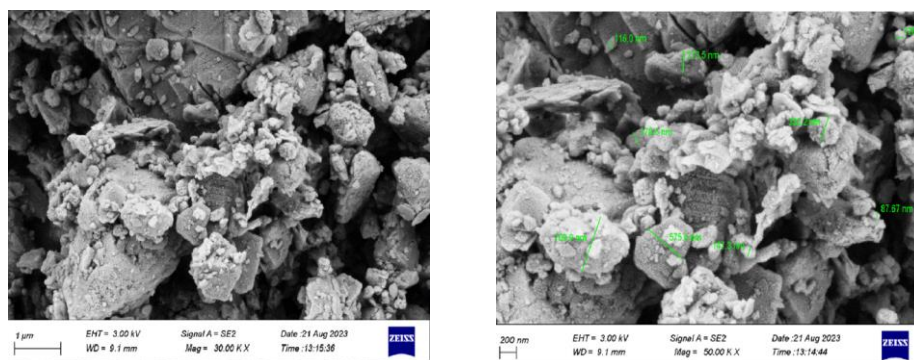
به منظور درک بهتر رفتار رئولوژیکی و مکانیکی مخلوط‌های بتنی حاوی انواع مختلف لجن سنگ، تحلیل ریزساختاری با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) که از منابع پژوهشی پیشین استخراج شده بودند [38-43] انجام شد. مورفولوژی ذرات لجن - به ویژه شکل، بافت سطحی و میزان ریزی آن‌ها - نقش بسیار مهمی در تأثیرگذاری بر کارایی و مشخصات مقاومتی بتن ایفا می‌کند.

همان‌گونه که در شکل‌های (۱۰ و ۱۱) نشان داده شده است،

ذرات لجن تراورتن و مرمر به دلیل ماهیت نرم‌تر این سنگ‌ها و حساسیت بیشتر آن‌ها به سایش در فرآیندهای برش و پولیش، عمدتاً دارای شکلی گردتر و سطحی صاف‌تر هستند. در مقابل، ذرات لجن گرانیت (شکل ۱۲) به‌طور قابل‌توجهی زاویه‌دارتر و زبرتر بوده که این امر ناشی از سختی بالاتر و رفتار شکست ترد گرانیت است.

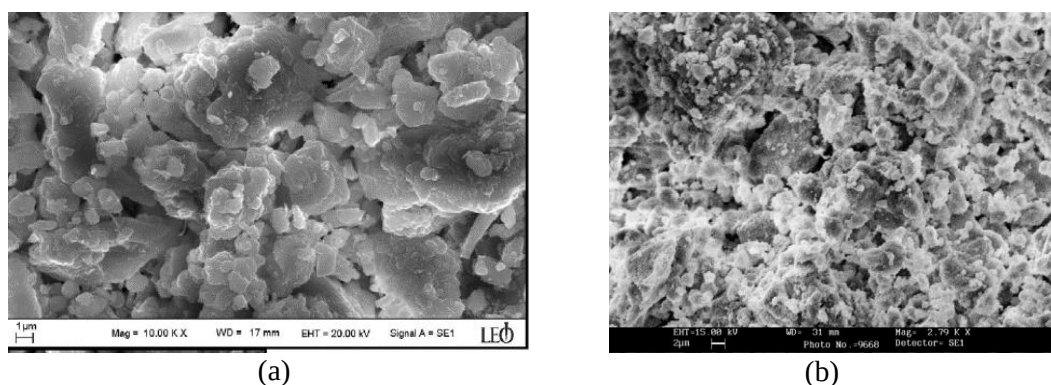
این تفاوت مورفولوژیکی، عملکرد رئولوژیکی مشاهده شده را توجیه می‌کند؛ به‌طوری‌که مخلوط‌های حاوی لجن مرمر و تراورتن، جریان اسلامپ بالاتر و مقادیر کمتر زمان T500 و آزمون قیف V را نشان دادند که بیانگر کارایی بهتر است. ذرات صاف و گرد موجب کاهش اصطکاک داخلی شده و جریان‌پذیری بتن را تحت اثر نیروی گرانش تسهیل می‌کنند. علاوه بر این، ذرات ریزتر و نامنظم‌تر لجن گرانیت می‌توانند نیاز آبی و اصطکاک داخلی را افزایش داده و در نتیجه، جریان‌پذیری را کاهش دهند.

افزون بر این، از دیدگاه ریزمکانیکی، ذرات گردتر موجود در لجن‌های مرمر و تراورتن می‌توانند منجر به بهبود جاگیری ذرات و کاهش تخلخل موضعی در ماتریس سیمانی شوند. این موضوع نه تنها به بهبود روانی مخلوط کمک می‌کند، بلکه در سطوح جایگزینی متوسط، به نتایج مطلوب‌تری در مقاومت فشاری نیز منجر می‌شود [21].



شکل ۱۰. تصویر SEM لجن سنگ تراورتن از تحقیقات نجاتی و همکاران [38]

Fig. 10. SEM image of travertine sludge: Nejati et al. [38]

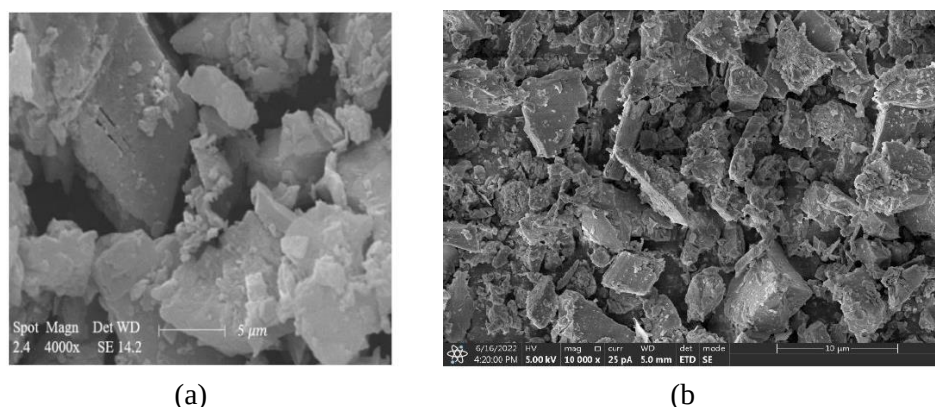


(a)

(b)

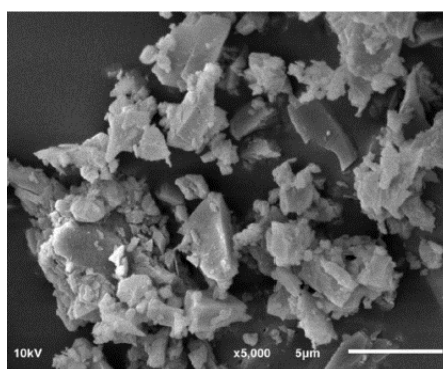
شکل ۱۱. تصویر SEM لجن سنگ مرمریت از تحقیقات: (a) دمیرال و الیاماچ [39]; (b) کرگیز و همکاران [40]

Fig. 11. SEM image of marble sludge: (a) Demirel and Alyamaç [39]; (b) Kırgız et al. [40]



(a)

(b)



(c)

شکل ۱۲. تصویر SEM لجن سنگ گرانیت از تحقیقات: (a) محمدی و همکاران [41]; (b) هوانگ و همکاران [42]; (c) احمد و همکاران [43]

Fig. 12. SEM image of granite sludge: (a) Mohammadi et al. [41]; (b) Huang et al. [42]; (c) Ahmed et al. [43]

جدول ۸. میزان مصالح در یک متر مکعب بتن خودمتراکم

Table 8: Mix Design Proportions per 1 m³ of SCC.

Mixture	Cement	Water	Coarse aggregate	Sand	Superplasticizer	f'_c (MPa)
SCC400	400	160	600	1150	4	40.9±1.6

جدول ۹. نتایج ارزیابی چرخه عمر

Table 9. LCA results.

Mixture	GWP (kg CO ₂ -eq)	AP(kg SO ₂ -eq)	EP(kg PO ₄ -eq)	PE (MJ)
SCC400	369.85	1.47	0.30	2247
CTRL	105.37	0.51	0.11	651.8
X10	104.66	0.51	0.11	650.0
X15	104.34	0.5	0.1	649.1
X20	103.99	0.5	0.1	648.2

۳-۳- نتایج LCA

(شامل انرژی‌های تجدیدپذیر و غیرتجدیدپذیر) در طول چرخه عمر یک محصول یا سیستم است و بر حسب مگاژول (MJ) اندازه‌گیری می‌شود.

مخلوط SCC400 بیشترین اثر کربنی را با مقدار ۳۶۹/۸۵ کیلوگرم کربن دی اکسید معادل بر متر مکعب نشان داد که به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از سایر طرح‌ها بود. مخلوط CTRL توانست GWP را نسبت به SCC400 حدود ۷۱/۵٪ کاهش دهد که این امر عمدتاً ناشی از جایگزینی قسمت زیادی از سیمان با سرباره و آهک هیدراته بود. افزودن لجن سنگ در طرح‌های X10، X15 و X20 اثر اندک اما پایداری در کاهش بیشتر GWP داشت؛ به طوری که X20 کمترین مقدار، یعنی ۱۰۳/۹۹ کیلوگرم کربن دی اکسید معادل بر متر مکعب را ثبت کرد که ۷۱/۹٪ کمتر از SCC400 است.

مقدار پتانسیل اسیدی شدن (AP) برای SCC400 برابر ۱/۴۷ کیلوگرم گوگرد دی اکسید معادل بود که ۱۸۸٪ بیشتر از نمونه‌ی CTRL (۰/۵۱ کیلوگرم گوگرد دی اکسید معادل) است. مخلوط‌های اصلاح‌شده با لجن سنگ (X10 تا X20)، مقادیر AP را در محدوده ۰/۵ - ۰/۵۱ حفظ کردند.

مقدار پتانسیل یوتروفیکاسیون (EP) در SCC400 برابر ۰/۳۰ کیلوگرم فسفات معادل بود، در حالی که در نمونه CTRL ۰/۱۱ و در X15 و X20 برابر با ۰/۱۰ کیلوگرم بود؛ یعنی کاهش حدود ۶۷٪. این بهبود عمدتاً به دلیل کاهش مقدار سیمان و جایگزینی ماسه با لجن سنگ است که سهم اندکی در انتشار آلاینده‌های یوتروفیک دارد.

برای ارزیابی LCA، نمونه‌ی SCC400 به گونه‌ای ساخته شد که مقاومت فشاری نزدیک به نمونه CTRL داشته باشد و کمترین ویژگی‌های رئولوژیک بتن خودمتراکم را طبق جدول (۴) داشته باشد. مقاومت فشاری ۲۸ روزه و مقادیر مواد تشکیل‌دهنده به ازای هر یک متر مکعب بتن در جدول (۸) ارائه شده‌اند.

جدول (۹) نتایج ارزیابی چرخه عمر (LCA) را در قالب شاخص‌های اصلی آثار زیست‌محیطی نشان می‌دهد. در این جدول X نشانگر علائم اختصاری لجن سنگ‌های M، G و T است. ارزیابی آثار زیست‌محیطی در LCA معمولاً شامل چهار شاخص کلیدی است:

- پتانسیل گرمایش جهانی (GWP): بیانگر سهم انتشار گازهای گلخانه‌ای در تغییرات اقلیمی است و برحسب کیلوگرم کربن دی اکسید معادل (kg CO₂-eq) گزارش می‌شود.
- پتانسیل اسیدی شدن (AP): نشان‌دهنده ظرفیت آلاینده‌های خاص برای ایجاد باران اسیدی و تخریب زیست‌محیطی است و برحسب کیلوگرم گوگرد دی اکسید معادل (kg SO₂-eq) بیان می‌شود.
- پتانسیل یوتروفیکاسیون (EP): بیانگر غنی‌سازی منابع آبی با مواد مغذی مانند نیتروژن و فسفر است که می‌تواند منجر به رشد بیش‌ازحد جلبک‌ها و کاهش اکسیژن آب شود. این شاخص برحسب کیلوگرم فسفات معادل (kg PO₄³⁻-eq) گزارش می‌شود.
- تقاضای انرژی اولیه (PE): نشان‌دهنده کل انرژی مورد نیاز

۴- خلاصه و نتایج

این مطالعه تولید بتن خودمتراکم با استفاده از یک چسباننده سه‌جزئی و جایگزینی قسمتی از ماسه با درصدهای مختلف از انواع لجن سنگ را مورد بررسی قرار داد. آثار این جایگزینی‌ها بر خواص رئولوژیکی و مکانیکی مخلوط‌ها ارزیابی شد. علاوه بر این، عملکرد زیست‌محیطی این مخلوط‌ها با بتن خودمتراکم ساخته شده با چسباننده فقط سیمانی، که برای دستیابی به مقاومت فشاری تقریباً برابر طراحی شده بود، مقایسه شد.

۱- مقایسه‌ی بین بتن خودمتراکم تولید شده با چسباننده فقط سیمانی و بتن با چسباننده سه‌جزئی (شامل ۸۵٪ سرباره، ۱۰٪ سیمان و ۵٪ آهک هیدراته) نشان می‌دهد در حالی که بتن با چسباننده سه‌جزئی برای دستیابی به مقاومت فشاری تقریباً یکسان به حدود ۱۳٪ چسباننده بیشتر نیاز دارد، محتوای کمتر سیمان آن به طور قابل توجهی تمام شاخص‌های زیست‌محیطی را بهبود می‌بخشد. بنابراین، چسباننده سه‌جزئی یک جایگزین مناسب برای سیمان معمولی ارائه می‌دهد.

۲- در حالت تازه، جایگزینی ۱۰٪ ماسه با انواع مختلف لجن سنگ، بدون افزایش میزان آب یا فوق‌روان‌کننده، باعث بهبود چشمگیر رئولوژی بتن شد. تمام نتایج آزمایش بتن تازه به طور قابل توجهی از حداقل معیارهای SCC فراتر رفت.

۳- وقتی سطح جایگزینی لجن سنگ به ۱۵٪ و ۲۰٪ افزایش یافت، لجن مرمر و سپس تراورتن بیشترین تأثیر مثبت را بر خواص بتن خودمتراکم تازه داشتند، در حالی که لجن گرانیت جریان‌پذیری را کاهش داد. لجن مرمر بهترین نتایج را نشان داد.

۴- جایگزینی ۱۰٪ و ۱۵٪ ماسه با لجن سنگ، مقاومت فشاری را بهبود داد. بیشترین افزایش مقاومت در جایگزینی ۱۰٪ مشاهده شد. در سطوح بالاتر جایگزینی، مقاومت کاهش یافت و در مخلوط‌هایی با ۲۰٪ لجن، مقاومت فشاری از مقاومت نمونه‌ی شاهد کمتر شد. با این حال، لجن مرمر هنوز بهترین عملکرد را داشت و جایگزینی ۲۰٪، مقاومت نزدیکی با نمونه‌ی شاهد ارائه داد. در مقابل، لجن گرانیت باعث کاهش بیش‌تری در مقاومت شد.

۵- جایگزینی ۱۰٪ ماسه با لجن سنگ تأثیر قابل توجهی بر مقاومت خمشی نداشت و حتی در مورد لجن مرمر باعث

مقدار تقاضای انرژی اولیه (PE) در SCC400 برابر ۲۲۴۷ مگاژول بر متر مکعب بود که به دلیل انرژی‌بر بودن تولید سیمان رخ می‌دهد. مصرف انرژی در CTRL تنها ۶۵۱/۸ مگاژول بود و کاهش بیشتری نیز در مخلوط‌های مبتنی بر لجن سنگ مشاهده شد؛ به طوری که X20 فقط ۶۴۸/۲ مگاژول نیاز داشت، یعنی حدود ۷۱/۲٪ کمتر از SCC400.

این نتایج به‌وضوح نشان می‌دهد که سیمان اصلی‌ترین عامل آثار زیست‌محیطی در بتن خودمتراکم است. کاهش مقدار سیمان از طریق جایگزینی با محصولات جانبی صنعتی (مانند سرباره، آهک و لجن سنگ) در کاهش GWP، مصرف انرژی و سایر آلاینده‌ها بسیار مؤثر است.

هرچند مخلوط‌های مبتنی بر لجن سنگ نسبت به CTRL کاهش‌های اندکی در GWP (۱/۳٪)، اسیدی شدن (۰/۲٪)، یوتروفیکاسیون (۹/۱٪) و مصرف انرژی (۰/۶٪) نشان دادند، اما اهمیت زیست‌محیطی آن‌ها در جایگزینی تا ۲۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب ماسه طبیعی با لجن سنگ صنعتی تقویت می‌شود. این جایگزینی نه تنها به حفظ منابع غیرتجدیدپذیر سنگدانه‌ها کمک می‌کند، بلکه بازیافت پسماندها را ترویج داده و به اهداف اقتصاد چرخشی فراتر از کاهش عددی آلاینده‌ها یاری می‌رساند.

همچنین استفاده از این ماده زائد نیاز به دفن پسماند در محل‌های دفن زباله (که معمولاً باعث تخریب خاک به دلیل کاهش نفوذپذیری و برهم زدن ساختار طبیعی خاک و رشد گیاه می‌شود) را کاهش می‌دهد. این کار همچنین خطر آلودگی آب ناشی از رواناب سطحی توده‌های لجن را کاهش می‌دهد، چراکه این رواناب می‌تواند ذرات ریز و باقی‌مانده‌های شیمیایی را به منابع سطحی و زیرزمینی منتقل کرده، کدورت آب را افزایش داده و کیفیت آن را کاهش دهد. علاوه بر این، افزودن لجن سنگ به بتن انتشار گرد و غبار معلق در هوا را به‌ویژه در شرایط خشک و بادی را کاهش داده و در نتیجه خطرات بالقوه برای سلامت تنفسی را کم می‌کند. جلوگیری از رهاسازی کنترل‌نشده لجن سنگ همچنین به کاهش اختلالات اکولوژیکی مانند تغییر در pH خاک و آب کمک می‌کند که می‌تواند آثار منفی بر تنوع زیستی داشته باشد.

این ملاحظات زیست‌محیطی، هرچند به‌طور کامل در ارقام LCA منعکس نشده‌اند، ولی حمایتی قوی از کاربرد پایدار لجن سنگ در تولید بتن ارائه می‌دهند.

قدردانی نویسندگان

از داوران محترم بابت بررسی مقاله و ارائه نقطه نظرات سازنده تشکر می گردد.

تعارض منافع

در این پژوهش، هیچ تعارض منافی وجود ندارد.

سهم نویسندگان

علی محمد صالحی: ایده و مفهوم، روش شناسی، نظارت و مدیریت تحقیق، نوشتن متن اولیه و ویرایش ها.
داود مستوفی نژاد: نظارت و مدیریت تحقیق و ویرایش ها.

منابع مالی

این تحقیق بدون پشتیبانی منابع مالی و در قالب پژوهش دانشگاهی انجام شده است.

بیانیه هوش مصنوعی

در انجام این تحقیق، نوشتن متن آن و ویرایش ها از هیچ ابزار هوش مصنوعی استفاده نشده است.

بهبود شد. با این حال، افزایش جایگزینی به ۱۵٪ و ۲۰٪ منجر به کاهش قابل توجهی در مقاومت خمشی شد، اگرچه کاهش برای مخلوط های حاوی لجن مرمر کمتر بود.

۶- جایگزینی ماسه با لجن سنگ مفیدتر از جایگزینی سیمان با لجن است. ماسه بخش قابل توجهی از بتن را تشکیل می دهد و سطح جایگزینی تا ۲۰٪ بدون کاهش قابل توجه مقاومت امکان پذیر است. در نتیجه، حجم بیشتری از لجن سنگ می تواند بازیافت و دوباره وارد تولید شود و بدین ترتیب تجمع زباله های محیطی کاهش می یابد.

۷- مفهوم پایداری در این روش به صورت جامع در نظر گرفته شده است. از نظر فنی، نتایج آزمایش های رئولوژیکی و مقاومتی عملکرد مناسب بتن خودمتراکم کم سیمان را تأیید می کند. از دیدگاه اقتصادی، استفاده از پسماندهای صنعتی مانند سرباره و لجن سنگ موجب کاهش هزینه مواد اولیه می شود. از نظر سرمایه گذاری و فناوری، فرایند تولید مشابه بتن های معمولی است و به تجهیزات ویژه ای نیاز ندارد. همچنین، مواد خام مورد استفاده به وفور در دسترس هستند. بنابراین، این روش از هر چهار جنبه ای اصلی توسعه پایدار قابل توجیه است.

References

- [1] Ige, O.E., Von Kallon, D.V. and Desai, D., 2024. Carbon emissions mitigation methods for cement industry using a systems dynamics model. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 26(3), pp.579-597. doi: 10.1007/s10098-023-02683-0.
- [2] Rentier, E.S. and Cammeraat, L.H., 2022. The environmental impacts of river sand mining. *Science of the Total Environment*, 838, p.155877. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155877.
- [3] Poonia, K., Kansara, P. and Choudhary, P., 2024. Environmental impacts of sand mining: A comprehensive review. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 11.
- [4] Agrawal, Y., Varma, M., Gupta, T. and Sharma, R.K., 2022. Development of eco-friendly pervious concrete utilizing granite cutting sludge waste. In: *Smart Technologies for Energy, Environment and Sustainable Development*, Vol. 1, pp.309-320. Springer. doi: 10.1007/978-981-16-6875-3_26.
- [5] Sadek, D.M., El-Attar, M.M. and Ali, H.A., 2016. Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, 121, pp.19-32. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.02.044.
- [6] Carrillo Beltrán, R., Picazo Camilo, E., Perea Toledo, G. and Corpas Iglesias, F.A., 2024. Towards a sustainable mining: Reuse of slate stone cutting sludges for new geopolymers binders. *Sustainability*, 16(8), p.3322.
- [7] Mosaferi, M., Dianat, I., Khatibi, M.S., Mansour, S.N., Fahiminia, M. and Hashemi, A.A., 2014. Review of environmental aspects and waste management of stone cutting and fabrication industries. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 16, pp.721-730.
- [8] Eid, R.A.H.S., 2011. *Approaching Industrial and Environmental Reform for Shaq Al-Thu'ban Marble and Granite Industrial Cluster*. MSc thesis. The American University in Cairo, Cairo, Egypt.
- [9] EFNARC, 2002. *Specifications and Guidelines for Self-Compacting Concrete*. European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems.
- [10] Okamura, H. and Ouchi, M., 2003. Self-compacting concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(1), pp.5-15. doi: 10.3151/jact.1.5.
- [11] Khatib, J.M., 2008. Performance of self-compacting

- concrete containing fly ash. *Construction and Building Materials*, 22(9), pp.1963-1971. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2007.07.011](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.011).
- [12] Muhammad, A. and Thienel, K.C., 2023. Properties of self-compacting concrete produced with optimized volumes of calcined clay and rice husk ash—emphasis on rheology, flowability retention and durability. *Materials*, 16(16), p.5513.
- [13] Singh, R.P., Vanapalli, K.R., Cheela, V.R.S., Peddireddy, S.R., Sharma, H.B. and Mohanty, B., 2023. Fly ash, GGBS, and silica fume based geopolymer concrete with recycled aggregates: Properties and environmental impacts. *Construction and Building Materials*, 378, p.131168.
- [14] Yazıcı, H., 2007. The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical and chloride permeability of SCC. *Cement and Concrete Research*, 37(3), pp.265-270. doi: [10.1016/j.cemconres.2006.11.003](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.11.003).
- [15] Gursel, A.P., Masanet, E., Horvath, A. and Stadel, A., 2014. Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review. *Cement and Concrete Composites*, 51, pp.38-48. doi: [10.1016/j.cemconcomp.2014.03.005](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.03.005).
- [16] Mardani-Aghabaglou, A., Sezer, G.I. and Ramyar, K., 2014. Comparison of fly ash, silica fume and metakaolin from mechanical properties and durability performance of mortar mixtures view point. *Construction and Building Materials*, 70, pp.17-25.
- [17] Khatri, R., Sirivivatnanon, V. and Gross, W., 1995. Effect of different supplementary cementitious materials on mechanical properties of high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 25(1), pp.209-220. doi: [10.1016/0008-8846\(94\)00128-L](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)00128-L).
- [18] Alyamaç, K.E. and İnce, R., 2009. A preliminary concrete mix design for SCC with marble powders. *Construction and Building Materials*, 23(3), pp.1201-1210. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2008.08.012](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.08.012).
- [19] Belaidi, A.S.E., Azzouz, L., Kadri, E.-H. and Kenai, S., 2012. Effect of natural pozzolana and marble powder on the properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 31, pp.251-257. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2011.12.109](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.109).
- [20] Benaicha, M., Belcaid, A., Alaoui, A.H., Jalbaud, O. and Burtschell, Y., 2019. Effects of limestone filler and silica fume on rheology and strength of self-compacting concrete. *Structural Concrete*, 20(5), pp.1702-1709. doi: [10.1002/suco.201900150](https://doi.org/10.1002/suco.201900150).
- [21] Karakurt, C. and Dumangöz, M., 2022. Rheological and durability properties of self-compacting concrete produced using marble dust and blast furnace slag. *Materials*, 15(5), p.1795. doi: [10.3390/ma15051795](https://doi.org/10.3390/ma15051795).
- [22] Hameed, A. and Sekar, A., 2012. Properties of self-compacting concrete using marble sludge powder as filler material. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 5(5), pp.1186-1193.
- [23] Sardinha, M., de Brito, J. and Rodrigues, R., 2016. Durability properties of structural concrete containing very fine aggregates of marble sludge. *Construction and Building Materials*, 119, pp.45-52. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2016.05.071](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.071).
- [24] Belaidi, A.S.E., Azzouz, L., Kadri, E.-H. and Kenai, S., 2012. Effect of natural pozzolana and marble powder on the properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 31, pp.251-257. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2011.12.109](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.109).
- [25] Uysal, M. and Yilmaz, K., 2011. Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Composites*, 33(7), pp.771-776. doi: [10.1016/j.cemconcomp.2011.04.005](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.04.005).
- [26] Choudhary, R., Gupta, R., Nagar, R. and Jain, A., 2021. Mechanical and abrasion resistance performance of silica fume, marble slurry powder, and fly ash amalgamated high strength self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, 269, p.121282.
- [27] Karimipour, A., Jahangir, H. and Rezazadeh Eidgahee, D., 2021. A thorough study on the effect of red mud, granite, limestone and marble slurry powder on the strengths of steel fibres-reinforced self-consolidation concrete: Experimental and numerical prediction. *Journal of Building Engineering*, 44, p.103398. doi: [10.1016/j.job.2021.103398](https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103398).
- [28] Yum, W.S., Yu, J., Jeon, D., Song, H., Sim, S., Kim, D.H. and Oh, J.E., 2022. Mechanical and durability properties of cementless concretes made using three types of CaO-activated GGBFS binders. *Materials*, 15(1), p.271. doi: [10.3390/ma15010271](https://doi.org/10.3390/ma15010271).
- [29] Jin, Z.Q., Lu, X.J. and Hu, S.G., 2010. Alkali activation of granulated blast furnace slag. *Advanced Materials Research*, 158, pp.1-11. doi: [10.4028/www.scientific.net/AMR.158.1](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.158.1).
- [30] Yazıcı, H., 2008. The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze-thaw resistance of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 22(4), pp.456-462. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2007.01.002](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.002).
- [31] Yang, Z., Liu, S., Yu, L. and Xu, L., 2021. A comprehensive study on the hardening features and performance of self-compacting concrete with high-volume fly ash and slag. *Materials*, 14(15), p.4286. doi: [10.3390/ma14154286](https://doi.org/10.3390/ma14154286).
- [32] Mohammadsalehi, A., Mostofinejad, D. and Bahmani, H., 2024. Effects of calcium chloride, ocher, and PP fibers on the mechanical properties of low cement high-performance concrete with Ca(OH)₂-activated slag binder: A novel approach. *Arabian Journal for Science and Engineering*, pp.1-19.

- [33] ASTM International, 2022. *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM C39/C39M-22. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [34] ASTM International, 2021. *Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete*. ASTM C1611/C1611M-21. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [35] EFNARC, 2005. *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use*. EFNARC.
- [36] British Standards Institution, 2013. *Test Methods for Self-Compacting Concrete — Part 5: Compressive Strength of Test Specimens*. BS EN 1170-5:2013. London: BSI.
- [37] Shariq, M., Prasad, J. and Masood, A., 2010. Effect of GGBFS on time dependent compressive strength of concrete. *Construction and Building Materials*, 24(8), pp.1469-1478.
- [38] Nejati, A., Mansourian, A., Ravanshadnia, M. and Sadeh, E., 2024. Feasibility of using recycled waste travertine stone powder (RWTSP) as a substitute for mineral filler in microsurfacing surface treatment. *Construction and Building Materials*, 418, p.135389. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2024.135389](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135389).
- [39] Demirel, B. and Alyamaç, K.E., 2018. Waste marble powder/dust. In: *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete: Characterisation, Properties and Applications*, pp.181-197. Woodhead Publishing. doi: [10.1016/B978-0-08-102156-9.00006-7](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102156-9.00006-7).
- [40] Kirgiz, M.S., Khatib, J., de Sousa Galdino, A.G., Kenai, S., Ashteyat, A., Campilho, R.D., Lezcano, R.A.G., Bamigboye, G.O., Nagaprasad, N. and Ramaswamy, K., 2025. Waste marble sludge and calcined clay brick powders in conventional cement farina production for cleaner built environment. *Scientific Reports*, 15, p.3467. doi: [10.1038/s41598-024-83163-3](https://doi.org/10.1038/s41598-024-83163-3).
- [41] Mohammadi, P., Mirghaffari, N., Razavi, Z. and Soleimani, M., 2025. Synthesis and characterization of zeolite X from granite stone sludge. *Next Materials*, 6, p.100466. doi: [10.1016/j.nxmte.2024.100466](https://doi.org/10.1016/j.nxmte.2024.100466).
- [42] Huang, J., Xu, G., Chen, S., Yu, D., Fu, T., Feng, C. and Wang, Y., 2024. Enhancing mechanical properties and microstructures of mass-manufactured sand concrete by incorporating granite powder. *Materials*, 17(10), p.2234.
- [43] Ahmed, A., Mahmoud, A.A. and Elkatatny, S., 2020. The use of the granite waste material as an alternative for silica flour in oil-well cementing. *ACS Omega*, 5(50), pp.32341-32348.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Mohammadsalehi, A. and Mostofinejad, D., 2026. Performance of low-cement self-compacting concrete using stone sludge as sand replacement. *Modares Civil Engineering journal*, 26(5), pp.63-79.

