



## Production of green low-carbon mortar containing recycled calcined clay from the tile factory and ground granulated blast furnace slag

Mohammadreza Alamian, Mehdi Dehestani \*, Seyed Sina Mousavi

Faculty of Civil Engineering, Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

**ABSTRACT:** To mitigate environmental impacts and increase energy efficiency in the cement production process, alternative materials to clinker are now used in cement, allowing for the production of a larger amount of composite cement with identical properties from a certain amount of clinker produced by the cement factory. This is achieved through the appropriate combination of low-carbon and environmentally friendly materials. The aim is to produce cement that not only uses accessible resources but also reduces carbon emissions. In this study, recycled minerals (recycled clay (RC) and ground granulated blast-furnace slag (GG)), calcined clay (CC), and limestone (LS) powder were used as partial replacements for cement/clinker to create low-carbon cement. The properties of fresh mortar and compressive strength tests were considered. Accordingly, 16 mix designs were prepared, including 5 mortar mix designs containing CC, LS powder, and recycled materials as a cement replacement, and 9 mix designs containing CC, LS powder, and recycled materials as a clinker powder replacement, along with two reference mixes. The results showed that the compressive strength of the mixes containing RC at different ages was similar to that of mixes containing CC. Based on the results, the compressive strength of the mixes containing RC and LS with 30% replacement decreased by about 20% compared to the reference mix. Meanwhile, the reduction in compressive strength of the 35% replacement mixes containing recycled minerals was less than 10%.

### Review History:

Received: Dec. 15, 2023

Revised: May, 08, 2024

Accepted: Sep. 14, 2024

Available Online: Oct. 03, 2024

### Keywords:

Calcined Clay

Recycled

Green Mortar

Low-Carbon Cement

Ground Granulated Blast-Furnace Slag

### 1- Introduction

Cement is by far the most widely used manufactured material due to its compatibility, low cost, and the availability of raw materials [1]. The mass production of cement accounts for nearly 8% of human-made global carbon emissions [2, 3]. Nowadays, various supplementary cementitious materials (SCMs), such as natural pozzolans like clay, LS, or hydrated lime [4, 5], and artificial pozzolans like GG [6], are used to partially replace cement to reduce environmental impacts and achieve concrete sustainability. CC and LS powder have been introduced as SCMs due to their pozzolanic properties after being calcined at temperatures between 550 and 950°C and their filler effect, respectively [7, 8]. The literature reports that the compressive strength development of samples containing CC and LS powder was better compared to the reference sample [9, 10]. In some studies, low-kaolinite clays such as calcined kaolin waste and ceramic waste have been proposed as partial cement replacements for the production of low-carbon cement [11, 12].

Although numerous studies have been conducted on the production of low-carbon cement containing CC and LS powder, RC from biscuit grinding in tile factories has not yet

been used as a SCMs in cement production. Furthermore, no study has been carried out to combine RC with LS powder or other recycled materials. Therefore, this study aims to investigate the effect of recycled mineral materials (RC and GG) as partial cement replacements on compressive strength and to analyze their growth and development trends.

### 2- Methodology

In this study, CC, LS powder, and recycled mineral materials including GG and RC for the production of low-carbon cement have been introduced as complementary cement materials. The clays were calcined at 850°C for 1 hour. RC was considered as recycled calcined clay and was used without the calcination process in the mixing design. After combining the powder materials, the mortar compressive specimens were made with a ratio of water-to-binder of 0.44 and sand-to-binder of 2.0 and were kept in a water chamber for processing until the ages of 3, 14, and 28 days. After curing processing, the compressive strength test was performed on the mortar specimens and the average of the obtained results was presented as the final result.

\*Corresponding author's email: dehestani@nit.ac.ir



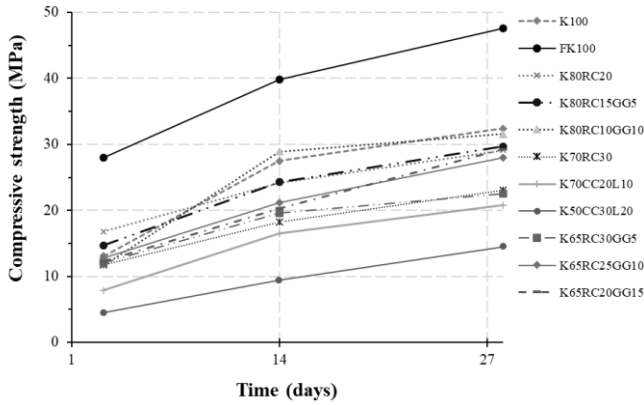


Fig. 1. Compressive strength of clinker-based mortar samples

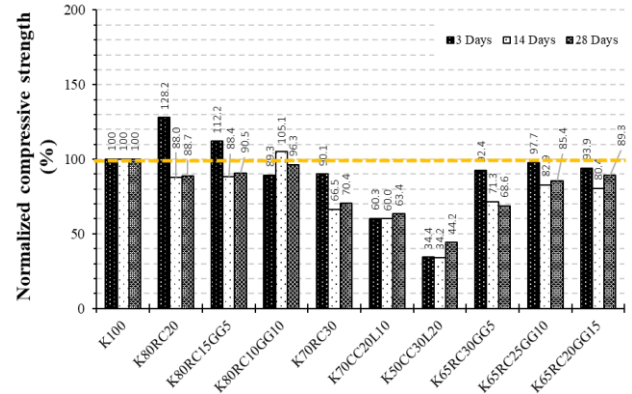


Fig. 2. Normalized compressive strength of clinker-based mortar samples

### 3- Results and Discussion

Compressive strength results are presented in Figure 1. The results of 20% substitution show that by reducing the RC content and increasing the GG content, the 3-day compressive strength has decreased and its 28-day compressive strength has increased. By examining the results of the mortar containing the same content of RC and GG ( $K_{80}RC_{10}GG_{10}$ ), it can be seen that the compressive strength is acceptably similar to the reference mortar ( $K_{100}$ ). This result can be attributed to the improvement of cement paste porosity due to the formation of secondary C-S-H gel due to suitable pozzolanic reactions of RC and GG, as well as the effect of morphology and particle size distribution of additives. Similarly, the results of 35% replacement also showed that adding GG and combining it with RC can lead to an increase in the long-term strength of the mortar.

The normalized compressive results show that the growth of compressive strength of mortar containing RC at the ages of 0-3 days is higher than the reference mortar (Figure 2). According to the figure, increasing the GG content and decreasing the RC content in the mortar has caused an increase in the compressive strength of the samples at older ages (3-28 days). So using the same content of RC and GG in the mortars had the highest pozzolanic activity at the ages of 3-14 days.

Based on Figure 3, almost all the mortars containing RC had an acceptable performance compared to the reference mortar. So the difference in the compressive strength of low-carbon mortar with the reference mortar at an early age is less than 10%. As mentioned, the same combination of RC and GG has obtained an acceptable performance in 20% replacement of clinker, which according to the figure of the difference in compressive strength at the age of 8 days has reached below 4%. Finally, by comparing the results of  $K_{65}RC_{20}GG_{15}$  and  $K_{65}RC_{25}GG_{10}$ , it was observed that the appropriate combination of recycled materials can reduce the difference in compressive strength by 10-15 compared to the reference mortar.

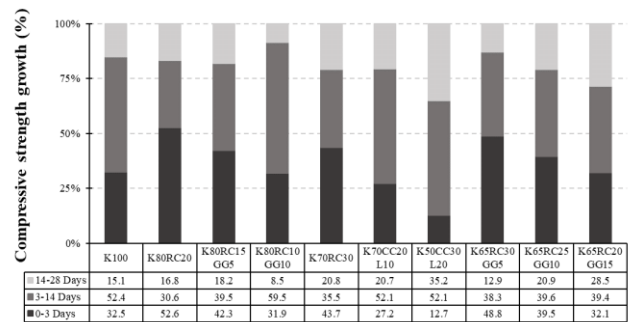


Fig. 3. Compressive strength growth of clinker-based mortar samples

### 4- Conclusions

In this study, the feasibility of producing low-carbon mortar containing recycled materials in the country has been investigated. The most important results obtained in this research are as follows:

The growth of the initial compressive strength of mortar containing RC in replacing the clinker has been significant. On the other hand, the use of GG has increased the growth of compressive strength in the period of 14 to 28 days. The results showed that the simultaneous and optimal use of RC and GG can lead to the creation of effective low-carbon cement that has the same performance as ordinary cement. This happened due to the pozzolanic performance of RC and the microcrystalline effects of GG.

The compressive strength of mortar containing calcined clay (both recycled and natural clay) and LS powder decreased compared to the reference mortar, and this value was less than 20%. Meanwhile, the compressive strength of mortar containing recycled minerals (RC and GG) has decreased by 10% with 35% replacement.

Based on the results, using a maximum of 25% of RC in the combination of RC and GG can have well performance.

## References

- [1] P.K. Mehta, P. Monteiro, *Concrete: microstructure, properties, and materials*, (No Title), (2006).
- [2] B. Sabir, S. Wild, J. Bai, Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review, *Cement and concrete composites*, 23(6) (2001) 441-454.
- [3] K.L. Scrivener, A. Nonat, Hydration of cementitious materials, present and future, *Cement and concrete research*, 41(7) (2011) 651-665.
- [4] R. Kajaste, M. Hurme, Cement industry greenhouse gas emissions—management options and abatement cost, *Journal of cleaner production*, 112 (2016) 4041-4052.
- [5] M. Schneider, M. Romer, M. Tschudin, H. Bolio, Sustainable cement production—present and future, *Cement and concrete research*, 41(7) (2011) 642-650.
- [6] Y. Zhao, Y. Gao, G. Chen, S. Li, A. Singh, X. Luo, C. Liu, J. Gao, H. Du, Development of low-carbon materials from GGBS and clay brick powder for 3D concrete printing, *Construction and Building Materials*, 383 (2023) 131232.
- [7] Y. Cao, Y. Wang, Z. Zhang, Y. Ma, H. Wang, Recent progress of utilization of activated kaolinitic clay in cementitious construction materials, *Composites Part B: Engineering*, 211 (2021) 108636.
- [8] V.M. John, B.L. Damineli, M. Quattrone, R.G. Pileggi, Fillers in cementitious materials—Experience, recent advances, and future potential, *Cement and Concrete Research*, 114 (2018) 65-78.
- [9] Y. Dhandapani, T. Sakthivel, M. Santhanam, R. Gettu, R.G. Pillai, Mechanical properties and durability performance of concretes with Limestone Calcined Clay Cement (LC3), *Cement and Concrete Research*, 107 (2018) 136-151.
- [10] A. Ramezaniapor, A. Yadak Yaraghi, A. Zolfagharnasab, A.M. Ramezaniapor, Investigation of mechanical properties and chloride ions ingress in concretes containing calcined, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(3) (2022) 1119-1132.
- [11] C. Jesus, E.A. Junior, N. Braga, J.S. Junior, M.S. Barata, Coloured concrete produced from low-carbon cements: Mechanical properties, chromatic stability and sustainability, *Journal of Building Engineering*, 67 (2023) 106018.
- [12] M. Mohit, H. Haftbaradaran, H.T. Riahi, Investigating the ternary cement containing Portland cement, ceramic waste powder, and limestone, *Construction and Building Materials*, 369 (2023) 130596.



## معرفی ملات سبز کم کربن حاوی خاک رس کلسینه بازیافتی کارخانه کاشی و سرباره کوره آهن گدازی

محمدرضا عالمیان، مهدی دهستانی\*، سید سینا موسوی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۴  
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۱۹  
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۴  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۷/۱۲

### کلمات کلیدی:

رس کلسینه  
بازیافتی  
ملات سبز  
سیمان کم کربن  
سرباره کوره آهن گدازی

**خلاصه:** به منظور کاهش اثرات زیست محیطی و همچنین افزایش بهره‌وری انرژی در فرآیند تولید سیمان، امروزه از مواد جایگزین کلینکر در سیمان استفاده می‌شود تا با مقدار معینی از کلینکر تولیدی کارخانه سیمان بتوان مقدار بیشتری سیمان مرکب با مشخصات یکسان تولید نمود. این امر با ترکیب مناسب مواد کم کربن و سازگار با محیط زیست حاصل می‌گردد. هدف، تولید سیمانی است که ضمن در دسترس بودن مصالح منجر به کاهش انتشار دی‌اکسید کربن شود. در این مطالعه، از مواد معدنی بازیافتی (خاک رس بازیافتی و سرباره کوره آهن گدازی)، رس کلسینه و همچنین پودر سنگ‌آهک به عنوان جایگزین جزئی سیمان/کلینکر برای ساخت سیمان کم کربن استفاده شده است. مشخصات ملات تازه و مقاومت فشاری از جمله آزمایش‌هایی هستند که در این مطالعه در نظر گرفته شده‌اند. از این رو، ۱۶ طرح اختلاط شامل ۵ طرح اختلاط ملات حاوی رس کلسینه، پودر سنگ‌آهک و مواد بازیافتی برای جایگزینی سیمان و ۹ طرح اختلاط حاوی رس کلسینه، پودر سنگ‌آهک و مواد بازیافتی برای جایگزینی پودر کلینکر به همراه دو طرح مرجع تهیه شدند. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری طرح‌های حاوی خاک رس بازیافتی در سنین مختلف مشابه طرح‌های حاوی خاک رس طبیعی است. براساس نتایج، مقاومت فشاری طرح‌های حاوی خاک رس بازیافتی و سنگ‌آهک با ۳۰ درصد جایگزینی در مقایسه با طرح مرجع حدود ۲۰ درصد کاهش یافته است. این در حالی است که کاهش مقاومت فشاری طرح‌های ۳۵ درصد جایگزینی حاوی مواد معدنی بازیافتی تنها کمتر از ۱۰ درصد بوده است.

### ۱- مقدمه

از این رو، محققین برای بهبود این شرایط به دنبال راهکارهایی مانند جایگزینی سیمان هستند. با توجه به صنعت ساخت و ساز که بیش از نیمی از منابع طبیعی مصرف شده را به خود اختصاص می‌دهد، یکی از چالش‌های توسعه پایدار به عنوان اثرات زیست محیطی مرتبط، کاهش میزان مواد و استفاده از مواد بازیافتی خواهد بود [۶، ۷]. تحقیق و توسعه شکل‌های مختلف سیمان کم کربن<sup>۱</sup> در سال‌های اخیر به عنوان یک راه حل حیاتی برای جبران ردپای کربن در نظر گرفته شده است [۸-۱۰]. سیمان کم کربن به عنوان نوع منحصر به فردی از سیمان، به گونه‌ای طراحی شده است که اثرات زیست محیطی به ویژه انتشار گازهای گلخانه‌ای کمتری داشته باشد. استفاده از مواد سیمانی مکمل مانند پوزولان‌ها، سنگ‌آهک یا آهک هیدراته می‌تواند پایداری بتن را افزایش و در عین حال شدت کربن را کاهش دهد [۱۱، ۱۲]. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از مواد جایگزین سیمان خواص مکانیکی، کارایی، و دوام بتن را بهبود می‌بخشد و همچنین فشار محیطی را کاهش

سیمان به دلیل سازگاری، هزینه نگهداری کم و در دسترس بودن مواد اولیه تا حد زیادی پرمصرف‌ترین مواد ساخته شده توسط انسان بوده و از نظر پایداری نیز با سایر مواد ساختمانی قابل مقایسه است [۱]. همچنین به سبب رشد جمعیت، توسعه شهری، و توسعه زیرساخت‌ها شاهد افزایش قابل توجهی در میزان تقاضا است. به همین سبب استفاده بیش از حد از منابع طبیعی را تحریک می‌کند. از طرفی، به دلیل تولید انبوه آن، تقریباً ۸ درصد از انتشار گاز دی‌اکسید کربن ساخته دست بشر در سراسر جهان را به خود اختصاص می‌دهد که فشار زیست محیطی سنگینی را ایجاد کرده است [۲، ۳]. گزارش شده است که برای تولید ۱ تن کلینکر سیمان پرتلند حدود ۰٫۸ تن گاز دی‌اکسید کربن آزاد می‌شود [۴]. در صورتی که بتوان ۵۰ درصد از وزن سیمان پرتلند را با مواد سیمانی مکمل در بتن جایگزین نمود، آنگاه هر ساله تقریباً ۱ میلیارد تن انتشار گاز دی‌اکسید کربن کاهش می‌یابد [۵].



می‌دهد [۱۳].

سه جزئی ثابت شده است که فرصت استفاده از خاک رس‌های کم عیار را که توسط صنایع مصرفی متاکائولن و صنایع سرامیک رد می‌شوند، گسترش می‌دهد [۳۱]. در کارخانه تولید کاشی و سرامیک از خاک رس برای ساخت محصولات استفاده می‌شود. هر کاشی و سرامیکی که در کارخانه تولید می‌شود دارای بدنه‌ای است که طرح و نقش روی آن انجام می‌شود. به منظور ساخت کاشی لازم است تا با استفاده از گل فشرده شده اشکال مورد نیاز بر روی بدنه کاشی صورت گیرد (این بدنه‌های سفالی بیسکویت کاشی نام دارند) تا پس از آن عملیات طراحی و نقش و لعاب کاری صورت گیرد. بخشی از این بیسکویت‌ها قبل از ورود به مرحله عملیات لعاب کاری آسیب دیده و دیگر قابل استفاده نخواهند بود. از این رو به عنوان ضایعات کارخانه کاشی به محل دیو ضایعات منتقل می‌شوند.

در ادبیات فنی گزارشاتی در خصوص استفاده از ضایعات کائولن کلسینه و ضایعات سرامیکی به عنوان جایگزین جزئی سیمان برای تولید سیمان کم کربن ارائه شده است [۳۲، ۳۳]. بررسی مراغه‌چی و همکاران نشان داد که استفاده از رس‌های کلسینه با کائولینیت کمتر از ۴۰ درصد در جایگزینی سیمان سبب می‌شود که مقاومت فشاری نمونه‌ها در مقایسه با نمونه مرجع کمتر و یا برابر آن بدست آید [۳۴]. مهیت و همکاران ملات سیمانی حاوی پودر ضایعات سرامیکی و پودر سنگ‌آهک را به عنوان جایگزین جزئی برای سیمان به ترتیب با درصدهای ۱۰-۳۰ و ۵-۱۵ درصد مورد مطالعه قرار دادند [۳۵]. نتایج نشان داد که بیشترین مقاومت فشاری برای نمونه‌های با ۱۰ درصد پودر ضایعات سرامیکی و ۱۵ درصد پودر سنگ‌آهک حاصل شد و با افزایش مقدار پودر ضایعات سرامیکی و کاهش مقدار پودر سنگ‌آهک، مقاومت فشاری نسبت به نمونه مرجع کاهش یافت. چن و همکاران در مطالعه خود امکان استفاده از خاک رس کلسینه شده با عیار پایین را که از حفاری و سازه‌های ساختمانی بدست آمد، برای ایجاد کامپوزیت‌های سیمانی سبک وزن مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه گزارش شد که با جایگزینی ۲۰ درصد سیمان با LCC، در اثر واکنش پوزولانی با محصولات هیدراتاسیون، اندازه منافذ کاهش و مقاومت فشاری نمونه‌ها در حدود ۳ درصد افزایش یافتند [۳۶].

اگرچه خاصیت سیمانی سرباره کوره آهن‌گدازی بسیار ضعیف‌تر از سیمان پرتلند است، اما ممکن است یک اثر میکروکریستالی برای سیستم هیدراتاسیون سیمان داشته باشد که این ماده را برای استفاده به عنوان ماده جایگزین سیمان مناسب می‌کند [۳۷]. از آنجایی که اندازه دانه سرباره کوره آهن‌گدازی کمتر از سیمان پرتلند معمولی است، مقاومت آن در سنین پایین

به دلیل توزیع جغرافیایی نسبتاً خوب خاک رس و اثبات خواص پوزولانی آن‌ها پس از فرآیند کلسیناسیون، در مطالعات گذشته علاقه فزاینده‌ای به خاک رس کلسینه به عنوان ماده سیمانی مکمل وجود دارد. با فعال‌سازی حرارتی کانی‌های رسی در محدوده ۵۵۰ تا ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد، می‌توان فازهای غنی از آلومینا و سیلیس را با ساختارهای تا حدی نامنظم بدست آورد که واکنش پوزولانی را نشان می‌دهند [۱۴]. صرفه جویی در انرژی و کاهش انتشار دی‌اکسید کربن به این دلیل رخ می‌دهد که دمای کلسیناسیون کمتر از دمای مورد نیاز برای فرآیند کلینکرینگ است و انتشار دی‌اکسید کربن مرتبط با کربن‌زدایی مواد خام وجود ندارد [۱۵، ۱۶].

خاک رس کلسینه و پودر سنگ‌آهک به ترتیب به سبب خاصیت پوزولانی و پراکنندگی به عنوان مواد جایگزین سیمان مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۷، ۱۸]. سیمان‌های حاوی آلومین با فازهای کربناته موجود در پودر سنگ‌آهک واکنش داده و فازهای کربوآلومینات را که سخت و کریستالی هستند تولید و به توسعه ریزساختار کمک می‌کنند [۱۹-۲۱]. در ادبیات فنی گزارش شد که استفاده همزمان از خاک رس کلسینه و پودر سنگ‌آهک برای جایگزینی جزئی سیمان عملکرد بهتری نسبت به جایگزینی هر کدام از آن‌ها به تنهایی خواهد داشت [۲۲]. در مطالعه‌ای هانداپانی و همکاران گزارش شد که رشد مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی خاک رس کلسینه و پودر سنگ‌آهک (سیمان سه جزئی LC<sup>3</sup>) در مقایسه با نمونه‌ی مرجع بهتر بوده است [۲۳]. همچنین رضانیان‌پور و همکاران نیز گزارش کردند که رشد مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی مواد جایگزین در بازه زمانی ۷ تا ۲۸ روز در مقایسه با نمونه مرجع بهتر بود. هرچند در بازه زمانی ۱ تا ۷ روز و ۲۸ تا ۹۰ روز نسبت به نمونه مرجع رشد مقاومت کمتری داشته‌اند [۲۴].

اگرچه در میان خاک‌های رس موجود، رس‌های کائولینیتی بیشترین پتانسیل پوزولانی را نشان دادند، اما ذخایر رس کائولن با عیار بالا قابل استفاده تجاری از نظر تعداد نسبتاً اندک هستند و در چندین بخش صنعتی به غیر از صنعت سیمان مانند صنایع کاغذ، ظروف سفید و نسوز کاربرد گسترده‌ای دارند [۲۵-۳۰]. این دسترسی محدود و قیمت‌های نسبتاً بالا در مقایسه با سایر موادهای جایگزین سیمان منعکس می‌شود. با این حال، رس‌ها به ندرت در طبیعت به عنوان ذخایر بسیار خالص، بلکه به عنوان رس‌های معمولی حاوی کانی‌های رسی مختلف و کانی‌های غیررسی مرتبط هستند.

رس‌های با کائولینیت کم جایگزین مناسبی برای متاکائولن در سیمان

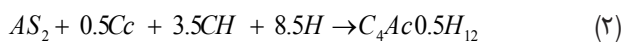
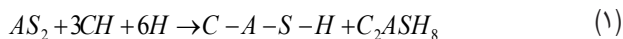


مدت زمان ۱ ساعت کلسینه شده‌اند. فرآیند کلسیناسیون در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد برای جلوگیری از کلسیناسیون ناقص و همچنین برای بدست آوردن واکنش پوزولانی بهینه رس کلسینه استفاده می‌شود [۴۰]. الگوریتم روش تحقیق در شکل ۱ نشان داده شده است.

مشخصات ریزی و ترکیبات شیمیایی سیمان، کلینکر و مواد جایگزین سیمان به ترتیب در جدول ۱ و ۲ گزارش شده است. براساس جدول ۱، از دو سایز ۴۵ و ۹۰ میکرون برای دانه‌بندی و نرمی مواد پودری استفاده شده است. مطابق جدول ۲، ترکیبات شیمیایی خاک رس بازیافتی بعد از کلسیناسیون تغییر چندانی نکرده است. از این رو، خاک رس بازیافتی به عنوان رس کلسینه بازیافتی محسوب می‌شود و بدون فرآیند کلسیناسیون در طرح اختلاطها مورد استفاده قرار می‌گیرد. تصاویری از خاک رس بازیافتی قبل و بعد از عملیات کلسیناسیون در شکل ۲ ارائه شده است. همچنین، عکس میکروسکوپ الکترونی خاک رس بازیافتی کارخانه کاشی در شکل ۳ نشان داده شده است.

در ترکیبات سیمان‌های حاوی خاک رس مانند سیمان  $LC^3$ ، علاوه بر واکنش پوزولانی خاک رس کلسینه ( $AS_2$ ) با پورتلندیت ( $CH$ ) که استرانگیت<sup>۲</sup> و  $C-A-S-H$  (رابطه ۱) تولید می‌کند، استفاده از این ماده سیمانی مکمل غنی از آلومینا همراه با پودر سنگ‌آهک و سرباره کوره آهن‌گدازی ( $Cc$ ) منجر به تشکیل فازهای  $CO_3-AFm$ ، به عنوان مثال؛ همی کربوآلومینات کلسیم<sup>۳</sup> (رابطه ۲) و مونو کربوآلومینات کلسیم<sup>۴</sup> (رابطه ۳) می‌شود. این واکنش‌ها ریزساختار خمیر سیمان سخت‌شده را تغییر می‌دهند که می‌تواند بر خواص مکانیکی، نفوذپذیری و دوام مخلوط‌های سیمان حاوی خاک رس کلسینه مانند سیمان  $LC^3$  تأثیر مثبت بگذارد [۴۱].

مشخصات مصالح سنگی (ماسه) براساس استاندارد ASTM C128 [۴۲] در جدول ۳ ارائه گردید. منحنی دانه‌بندی ماسه مطابق با استاندارد ASTM C136 [۴۳] محاسبه شده که در شکل ۴ نشان داده شده است.



کم اما در مدت طولانی به دلیل اثر پرکنندگی<sup>۱</sup> به مقاومت خود ادامه می‌دهد [۳۸]. با توجه به اهمیت روانی ملات یا بتن در چاپ سازه‌های بتنی با استفاده از دستگاه چاپ سه بعدی، از این رو ژائو و همکاران در مطالعه خود ترکیب سرباره کوره آهن‌گدازی و پودر آجر رسی را برای چاپ سه بعدی بتن مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان داد که سطح متفاوت سرباره کوره آهن‌گدازی و پودر آجر رسی بر عملکرد بتن تأثیرگذار بود طوری که قابلیت چاپ ملات تحت تأثیر مورفولوژی و توزیع اندازه ذرات مواد افزودنی قرار گرفت. اگرچه مقاومت فشاری ملات چاپ سه بعدی به میزان متوسط ۳۰ درصد کاهش یافت اما به واسطه کاهش قطر منافذ ناشی از ترکیب این دو ماده، سبب کاهش اثرات یون کلرید در بتن شد [۳۹].

براساس مطالعات گذشته مشاهده شد که از مواد مکمل سیمانی طبیعی نظیر خاک رس و مواد بازیافتی مانند سرباره کوره آهن‌گدازی برای جایگزینی بخشی از سیمان استفاده شده است. با توجه به آن که امروزه مطالعات متعددی در مورد تولید سیمان کم‌کربن حاوی خاک رس کلسینه و پودر سنگ‌آهک انجام شده است، با این حال، تاکنون از خاک رس بازیافتی حاصل از آسیاب بیسکویت‌های کارخانه کاشی به عنوان ماده مکمل سیمانی در تولید سیمان استفاده نشده است. همچنین مطالعه‌ای به منظور ترکیب خاک رس بازیافتی و پودر سنگ‌آهک و همچنین ترکیب آن با مواد بازیافتی دیگری صورت نگرفته است. از این رو هدف از این مطالعه، بررسی تأثیر مواد معدنی بازیافتی (خاک رس بازیافتی و سرباره کوره آهن‌گدازی) به عنوان جایگزین جزئی سیمان بر مقاومت فشاری و تحلیل روند رشد و توسعه آن می‌باشد.

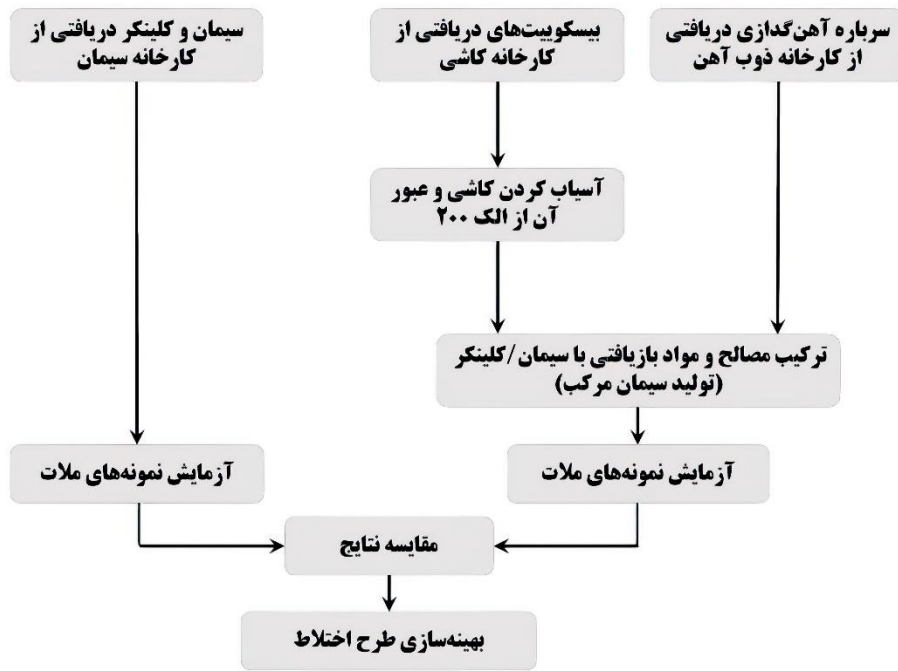
## ۲- برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مصالح

در پژوهش حاضر، از کلینکر و سیمان پرتلند تیپ II کارخانه سیمان مازندران استفاده شده است. به منظور تأمین عملکرد سیمانی کلینکر پس از خردسازی و پودرسازی، پودرهای کلینکر با مقداری گچ ترکیب شده است. نمونه‌های ملات در دو مجموعه مواد پودری شامل پایه سیمان و پایه پودر کلینکر تولید شده‌اند. در این تحقیق، خاک رس کلسینه، پودر سنگ‌آهک، و مواد معدنی بازیافتی شامل سرباره کوره آهن‌گدازی و خاک رس بازیافتی برای تولید سیمان کم‌کربن به عنوان ماده سیمانی مکمل معرفی شده‌اند. خاک رس طبیعی از کارخانه سیمان مازندران، خاک رس بازیافتی از بیسکویت‌های کارخانه کاشی یزد و سرباره کوره آهن‌گدازی نیز از کارخانه ذوب‌آهن شهر اصفهان تهیه شده‌اند. خاک‌های رس در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد و به

1 filler effect

2 Stratlingite  
3 Hemicarboaluminate  
4 Monocarboaluminate



شکل ۱. الگوریتم روش تحقیق

Fig. 1. Flowchart of methodology.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی سیمان و مواد جایگزین جزئی سیمان

Table 1. Cement partial replacements and cement physical properties.

سرباره کوره آهن‌گذاری	خاک رس بازیافتی	خاک رس کلسینه	کلینکر	سیمان	مشخصات
> ۴۵ میکرومتر	> ۹۰ میکرومتر	> ۹۰ میکرومتر	> ۹۰ میکرومتر	> ۴۵ میکرومتر	درجه ریزی
	> ۴۵ میکرومتر	> ۴۵ میکرومتر	> ۴۵ میکرومتر		

جدول ۲. ترکیب شیمیایی سیمان و مواد جایگزین سیمان

Table 2. Cementing materials chemical compositions.

LOI	Ti <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	
۲۰۵	-	۲۰۳	۰۰۶	۰۰۳	۱۰۲	۳۰۴	۴۰۹	۶۳۰۲	۲۱۰۳	سیمان
۸۰۵	۰۰۲	-	۱۰۲	۰۰۴	۱۰۴	۲۰۳	۳۰۳	۴۵۰۹	۲۰۰۵	کلینکر
۱۰۹	۱۰۰	-	۳۰۱	۱۰۴	۲۰۳	۹۰۶	۲۱۰۹	۴۰۷	۵۳۰۹	رس بازیافتی کلسینه نشده
۳۰۸	۱۰۰	-	۳۰۰	۱۰۲	۲۰۰	۱۱۰۳	۲۰۰۵	۴۰۲	۵۲۰۳	رس بازیافتی کلسینه
۴۲۰۹	۰۰۰۲	-	۰۰۰۳	۰۰۱۱	۰۰۱۵	۰۰۳	۰۰۰۶	۵۶۰۱	۰۰۰۲	سنگ‌آهک
-	۰۰۰۶	۴۰۳	۰۰۹۸	۰۰۵۹	۶۰۵	۰۰۶	۹۰۱	۳۰۰۹	۳۴۰۷	سرباره کوره آهن‌گذاری

جدول ۳. مشخصات ماسه

Table 3. Sand properties.

مشخصات	وزن مخصوص ( $\text{kg/m}^3$ )	جذب آب (%)
ماسه	۲۵۶۰	۳۰۱



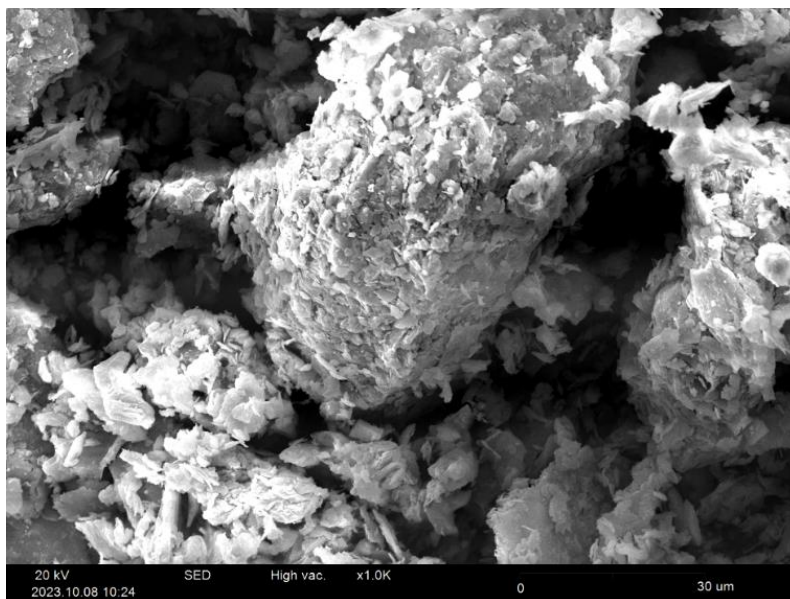
(ب)



(الف)

شکل ۲. خاک رس بازیافتی؛ (الف) کلسینه نشده، (ب) کلسینه شده تحت حرارت  $850^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت

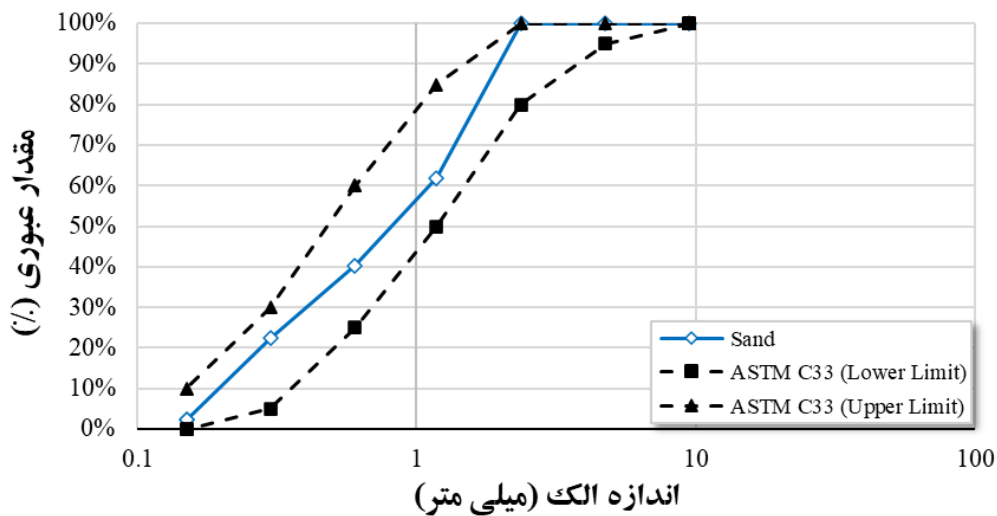
Fig. 2. Recycled clay; (a) uncalcined, (b) calcined under  $850^{\circ}\text{C}$  for 1 hour.



شکل ۳. عکس میکروسکوپ الکترونی خاک رس بازیافتی کارخانه کاشی

Fig. 3. SEM image of recycled clay.





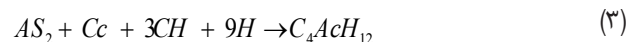
شکل ۴. منحنی دانه‌بندی ماسه

Fig. 4. Particle size distribution of sand.

هوا<sup>۱</sup> اندازه‌گیری شده و نتایج حاصل از آن در شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق شکل مشاهده می‌شود که نرمی سیمان‌های کم‌کربن تولید شده ( $K_{65}RC_{20}GG_{15}$  و  $K_{65}RC_{25}GG_{10}$ ) در مقایسه با سیمان مرجع ( $K_{100}$ ) قابل قبول بوده است. نکته قابل ملاحظه آن است که میزان نرمی کلینکر که در آزمایشگاه تکنولوژی بتن خردایش شده است، در مقایسه با سیمان پرتلند که در کارخانه سیمان میزان نرمی آن تعیین شده متفاوت است.

### ۲-۳- آماده‌سازی، ساخت و عمل‌آوری نمونه‌های ملات

ساخت نمونه‌های ملات توسط همزن ۴ لیتری موجود در آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل صورت گرفت. روش اختلاط از استاندارد ASTM C305 [۴۵] اقتباس شده است که می‌توان بدین صورت خلاصه نمود: ابتدا فقط مواد پودری (سیمان/ کلینکر، خاک رس کلسینه + پودر سنگ‌آهک/ مواد معدنی بازیافتی) برای رسیدن به همگنی مناسب به مدت ۳۰ ثانیه با سرعت کم مخلوط و سپس تمام آب به آن اضافه شد. پس از آن، اختلاط خمیر سیمان به مدت ۳۰ ثانیه با سرعت کم ادامه یافت. در گام بعد، پس از اضافه نمودن ماسه به خمیر سیمان، عملیات اختلاط یکبار به مدت ۳۰ ثانیه با سرعت کم و بار دیگر به مدت ۳۰ ثانیه با سرعت متوسط صورت گرفت. در گام آخر، ملات به مدت ۹۰ ثانیه در حالت



### ۲-۲- طرح اختلاط ملات

به منظور بررسی اثر جایگزینی سیمان با مواد معدنی بازیافتی، طرح اختلاط‌های حاوی سیمان کم‌کربن به همراه طرح اختلاط مرجع تهیه شده است. جایگزینی سیمان در مخلوط‌های دو جزئی و سه جزئی با ۲۰، ۳۰ و ۳۵ درصد مواد سیمانی مکمل انجام شده است. نامگذاری و مشخصات مواد پودری نمونه‌های ملات به صورت جدول ۴ در نظر گرفته شده است. طرح اختلاط نمونه‌های ملات حاوی مواد پودری بر پایه سیمان در جدول ۵ و طرح اختلاط نمونه‌های ملات حاوی مواد پودری بر پایه کلینکر در جدول ۶ ارائه شده است. در این تحقیق برای تمامی طرح اختلاط‌ها نسبت آب به مواد پودری و نسبت مواد پودری به ماسه به ترتیب برابر ۰٫۴۴ و ۰٫۵ در نظر گرفته شده است. همچنین اسلالمپ نمونه‌های ملات با استفاده از افزودنی فوق‌روان‌کننده در محدوده ۱۶۰-۲۲۰ میلی‌متر محاسبه شد.

در این مطالعه، پس از مخلوط کردن مواد پودری و دستیابی به همگنی مناسب، میزان نرمی برخی از سیمان‌های تولید شده به همراه سیمان مرجع مطابق با استاندارد ASTM C204 [۴۴] و با استفاده از دستگاه نفوذپذیری

جدول ۴. نامگذاری و مشخصات مواد پودری

Table 4. Nomenclature and specification of binder.

نام مختصر مواد پودری نمونه‌ها	ترکیبات مواد پودری نمونه‌ها
C <sub>100</sub>	سیمان
C <sub>70GG20L10</sub>	سیمان، پودر سنگ‌آهک، سرباره کوره آهن‌گدازی
C <sub>70CC20L10</sub>	سیمان، پودر سنگ‌آهک، خاک رس کلسینه (با ریزی > ۹۰ میکرومتر)
C <sub>70FCC20L10</sub>	سیمان، پودر سنگ‌آهک، خاک رس کلسینه (با ریزی > ۴۵ میکرومتر)
C <sub>70RC20L10</sub>	سیمان، پودر سنگ‌آهک، خاک رس بازیافتی (با ریزی > ۹۰ میکرومتر)
C <sub>70FRC20L10</sub>	سیمان، پودر سنگ‌آهک، خاک رس بازیافتی (با ریزی > ۴۵ میکرومتر)
K <sub>100</sub>	کلینکر (> ۹۰ میکرومتر)
FK <sub>100</sub>	کلینکر (> ۴۵ میکرومتر)
K <sub>80RC20</sub>	کلینکر، خاک رس بازیافتی (با ریزی > ۹۰ میکرومتر) ۲۰٪
K <sub>80RC15GG5</sub>	کلینکر، خاک رس بازیافتی (با ریزی > ۹۰ میکرومتر) ۱۵٪، سرباره کوره آهن‌گدازی ۵٪
K <sub>80RC10GG10</sub>	کلینکر، خاک رس بازیافتی (با ریزی > ۹۰ میکرومتر) ۱۰٪، سرباره کوره آهن‌گدازی ۱۰٪
K <sub>70RC30</sub>	کلینکر، خاک رس بازیافتی (با ریزی > ۹۰ میکرومتر) ۳۰٪
K <sub>70CC20L10</sub>	کلینکر، پودر سنگ‌آهک ۱۰٪، خاک رس کلسینه (با ریزی > ۹۰ میکرومتر) ۲۰٪
K <sub>50CC30L20</sub>	کلینکر، پودر سنگ‌آهک ۲۰٪، خاک رس کلسینه (با ریزی > ۹۰ میکرومتر) ۳۰٪
K <sub>65RC30GG5</sub>	کلینکر، خاک رس بازیافتی (با ریزی > ۹۰ میکرومتر) ۳۰٪، سرباره کوره آهن‌گدازی ۵٪
K <sub>65RC25GG10</sub>	کلینکر، خاک رس بازیافتی (با ریزی > ۹۰ میکرومتر) ۲۵٪، سرباره کوره آهن‌گدازی ۱۰٪
K <sub>65RC20GG15</sub>	کلینکر، خاک رس بازیافتی (با ریزی > ۹۰ میکرومتر) ۲۰٪، سرباره کوره آهن‌گدازی ۱۵٪

جدول ۵. طرح اختلاط نمونه‌های ملات حاوی مواد پودری بر پایه سیمان

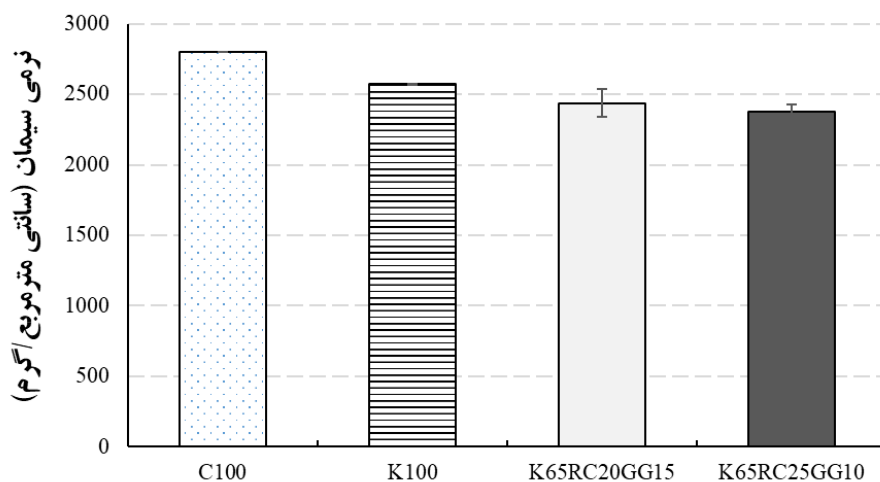
Table 5. Mix design of cement-based mortar samples.

نام طرح	سیمان kg/m <sup>3</sup>	رس کلسینه kg/m <sup>3</sup>	رس بازیافتی kg/m <sup>3</sup>	سرباره کوره آهن‌گدازی kg/m <sup>3</sup>	سنگ آهک kg/m <sup>3</sup>	ماسه kg/m <sup>3</sup>	آب kg/m <sup>3</sup>
C <sub>100</sub>	۶۴۰	۰	۰	۰	۰	۱۲۸۰	۲۸۲
C <sub>70GG20L10</sub>	۴۴۸	۰	۰	۱۲۸	۶۴	۱۲۸۰	۲۸۲
C <sub>70CC20L10</sub>	۴۴۸	۱۲۸	۰	۰	۶۴	۱۲۸۰	۲۸۲
C <sub>70FCC20L10</sub>	۴۴۸	۱۲۸	۰	۰	۶۴	۱۲۸۰	۲۸۲
C <sub>70RC20L10</sub>	۴۴۸	۰	۱۲۸	۰	۶۴	۱۲۸۰	۲۸۲
C <sub>70FRC20L10</sub>	۴۴۸	۰	۱۲۸	۰	۶۴	۱۲۸۰	۲۸۲

جدول ۶. طرح اختلاط نمونه‌های ملات حاوی مواد پودری بر پایه کلینکر

Table 6. Mix design of clinker-based mortar samples.

آب kg/m <sup>3</sup>	ماسه kg/m <sup>3</sup>	سنگ آهک kg/m <sup>3</sup>	سرباره کوره آهن‌گذاری kg/m <sup>3</sup>	رس بازیافتی kg/m <sup>3</sup>	رس کلسینه kg/m <sup>3</sup>	کلینکر kg/m <sup>3</sup>	نام طرح
۲۸۲	۱۲۸۰	۰	۰	۰	۰	۶۴۰	K <sub>100</sub>
۲۸۲	۱۲۸۰	۰	۰	۰	۰	۶۴۰	FK <sub>100</sub>
۲۸۲	۱۲۸۰	۰	۰	۱۲۸	۰	۵۱۲	K <sub>80</sub> RC <sub>20</sub>
۲۸۲	۱۲۸۰	۰	۶۴	۶۴	۰	۵۱۲	K <sub>80</sub> RC <sub>15</sub> GG <sub>5</sub>
۲۸۲	۱۲۸۰	۰	۳۲	۹۶	۰	۵۱۲	K <sub>80</sub> RC <sub>10</sub> GG <sub>10</sub>
۲۸۲	۱۲۸۰	۰	۰	۱۹۲	۰	۴۴۸	K <sub>70</sub> RC <sub>30</sub>
۲۸۲	۱۲۸۰	۱۲۸	۰	۰	۱۹۲	۳۲۰	K <sub>70</sub> CC <sub>20</sub> L <sub>10</sub>
۲۸۲	۱۲۸۰	۶۴	۰	۰	۱۲۸	۴۴۸	K <sub>50</sub> CC <sub>30</sub> L <sub>20</sub>
۲۸۲	۱۲۸۰	۰	۶۴	۱۶۰	۰	۴۱۶	K <sub>65</sub> RC <sub>30</sub> GG <sub>5</sub>
۲۸۲	۱۲۸۰	۰	۹۶	۱۲۸	۰	۴۱۶	K <sub>65</sub> RC <sub>25</sub> GG <sub>10</sub>
۲۸۲	۱۲۸۰	۰	۳۲	۱۹۲	۰	۴۱۶	K <sub>65</sub> RC <sub>20</sub> GG <sub>15</sub>



شکل ۵. نرمی سیمان

Fig. 5. Fineness of cement.

ضربه در طی ۱۵ ثانیه، نمونه‌های ملات بر روی میز جریان پخش شدند. قطر ملات پخش شده بر روی میز جریان برابر مقدار کارایی و اسلامپ نمونه‌ها حاصل شد. آزمایش مقاومت فشاری مطابق با استاندارد ASTM C109 [۴۷] بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد  $50 \times 50 \times 50$  میلی‌متر که در دو لایه ریخته شده و توسط میله کوبش با ۳۲ ضربه متراکم شده‌اند، انجام گرفته است. پس از اتمام عمل‌آوری نمونه‌های ملات، دو نمونه از هر طرح اختلاط در سنین ۳، ۱۴، و ۲۸ روز تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند و میانگین نتایج بدست آمده به عنوان نتیجه نهایی ارائه شده است.

### ۳- نتایج آزمایش

#### ۳-۱- اسلامپ ملات تازه

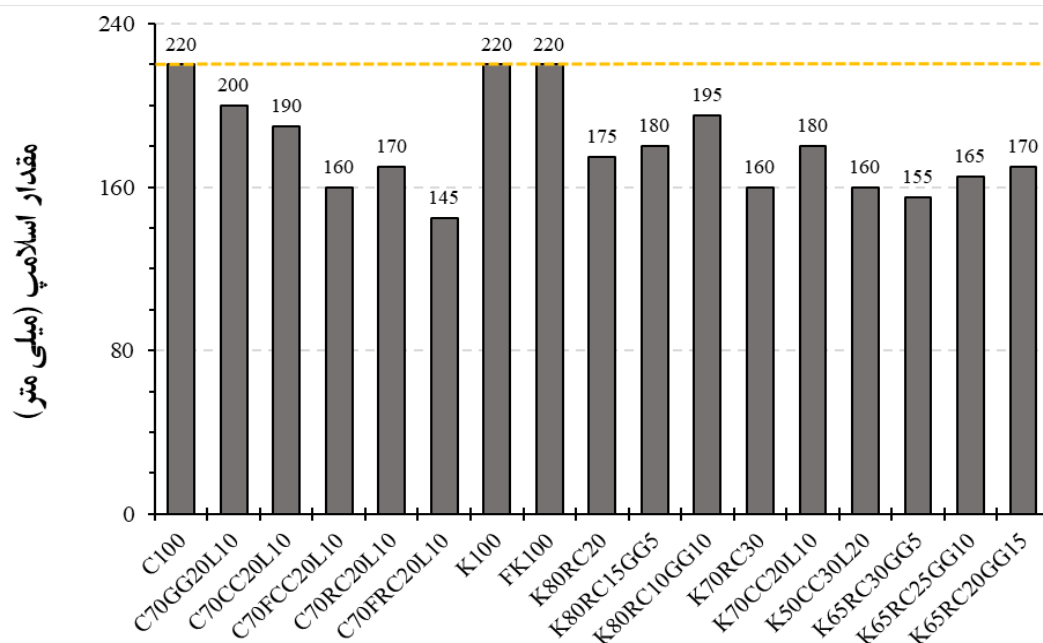
نتایج خواص رئولوژیکی نمونه‌های ملات براساس آزمایش اسلامپ در شکل ۶ نشان داده شده است. از نتایج نشان داده شده، خواص تازه ملات در محدوده قابل قبولی قرار دارد که نشان‌دهنده طرح‌های اختلاط قابل قبول و میزان مناسب استفاده از فوق‌روان‌کننده است. از شکل ۷ مشخص است که گنجاندن مواد بازیافتی در مخلوط‌های ملات سیمان باعث کاهش جریان‌پذیری می‌شود. مقایسه بین ملات مرجع با ملات حاوی خاک رس

ثابت باقی ماند و سپس اختلاط در مدت ۶۰ ثانیه با سرعت متوسط پایان یافت.

بعد از اتمام اختلاط مواد و همگنی مناسب مخلوط، میزان کارایی ملات تازه براساس استاندارد ASTM C230 [۴۶] اندازه‌گیری شدند. سپس ملات تازه در دو لایه درون قالب‌های مکعبی با ابعاد ۵۰ میلی‌متر ریخته شدند و عملیات تراکم با اعمال ۳۲ ضربه به وسیله میله کوبش مطابق ASTM C109 [۴۷] صورت گرفت. نمونه‌های ملات پس از گذشت ۲۴ ساعت از قالب‌ها خارج و برای عمل‌آوری و انجام واکنش‌های هیدراتاسیون تا سنین مورد نظر (۳، ۱۴، و ۲۸ روز) در محفظه آب و آهک نگهداری شدند.

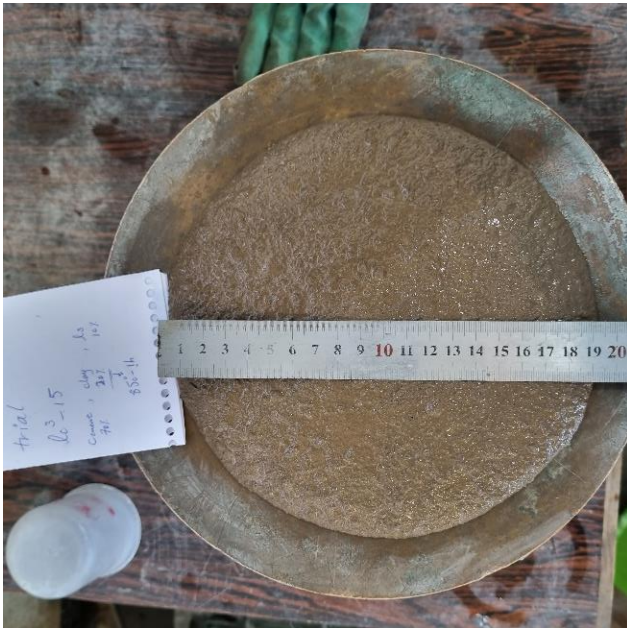
#### ۳-۲- آزمایش‌های انجام‌شده

در این مطالعه، آزمایش‌های اسلامپ و مقاومت فشاری به ترتیب برای بررسی نمونه‌های تازه و سخت‌شده ملات مورد استفاده قرار گرفته است. آزمایش اسلامپ براساس استاندارد ASTM C230 [۴۶] بر روی تمامی نمونه‌های ملات تازه اندازه‌گیری شده است. پس از اتمام مرحله اختلاط مصالح و پیش از ریختن نمونه‌ها درون قالب، نمونه‌های ملات تازه در دو لایه درون ظرف استوانه‌ای ریخته شده و پس از تراکم هر لایه و اعمال ۲۵



شکل ۶. نمودار اسلامپ نمونه‌های ملات

Fig. 6. Slump results.



شکل ۷. آزمایش اسلامپ ملات تازه

Fig. 7. Slump test.

### ۳-۲- مقاومت فشاری

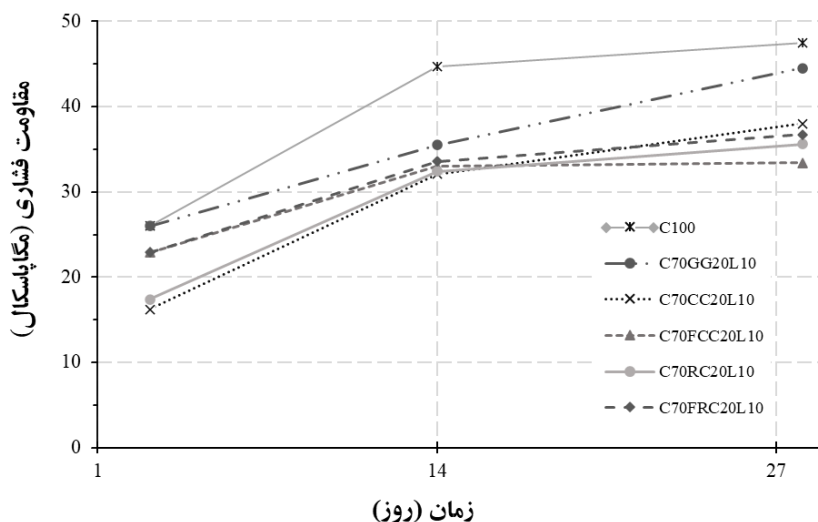
میانگین نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های ملات حاوی مواد پودری بر پایه سیمان در سنین ۳، ۱۴، و ۲۸ روز در شکل ۸ نشان داده شده است. مطابق شکل، مقاومت فشاری ملات حاوی جایگزینی سرباره کوره آهن‌گدازی در سنین کوتاه‌مدت مشابه ملات مرجع بدست آمده است که با گذر زمان و افزایش سن این مقدار کاهش یافته تا جایی که مقاومت فشاری بلندمدت آن کمی کمتر از مقاومت فشاری طرح مرجع حاصل شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقاومت ۲۸ روزه سیمان کم‌کربن تولیدی با وجود کاهش ۳۰ درصدی سیمان و افزودن سرباره آهن‌گدازی و پودر سنگ‌آهک در مقایسه با سیمان پرتلند قابل قبول است.

مقاومت فشاری طرح‌های حاوی جایگزینی خاک رس کلسینه (هر دو خاک بازبافتی و طبیعی) و پودر سنگ‌آهک با افزایش سن، افزایش پیدا کرده اما مقاومت فشاری آن‌ها در مقایسه با طرح مرجع کاهش یافته است. نتایج نشان می‌دهد که روند تغییرات مقاومت فشاری ملات حاوی خاک رس کلسینه بازبافتی در سنین مختلف مشابه ملات حاوی خاک رس طبیعی است. در این شکل مشاهده می‌شود که با وجود افزایش مقاومت فشاری ۳

کلسینه نشان می‌دهد که نتایج جریان از ۲۲۰ میلی‌متر به حدود ۱۶۰ میلی‌متر کاهش یافته است. افزایش محتوای خاک رس کلسینه در مخلوط ملات منجر به کاهش تدریجی اسلامپ شده است که آن را می‌توان با مقایسه طرح‌های  $K_{80}RC_{20}GG_5$ ،  $K_{80}RC_{15}GG_5$  و  $K_{80}RC_{10}GG_{10}$  مشاهده نمود. کاهش رئولوژیکی<sup>۱</sup> خمیر سیمان کم‌کربن بیشتر به لخته‌شدن ذرات خاک رس کلسینه ناشی از بار سطحی منفی بیشتر در مقایسه با تجمع ساختاری ناشی از هیدراتاسیون نسبت داده شده است [۳۱، ۴۸، ۴۹]. با مقایسه مقدار اسلامپ طرح‌های حاوی خاک رس کلسینه مشاهده می‌شود که تقاضای آب نمونه ملات حاوی خاک رس بازبافتی بیشتر از نمونه ملات حاوی خاک رس طبیعی است. با بررسی طرح‌های حاوی خاک رس کلسینه با نرمی بیشتر (FCC و FRC) و مقایسه نتایج اسلامپ آن‌ها با طرح‌های حاوی خاک رس کلسینه با نرمی کمتر (CC و RC) مشاهده می‌شود که نرمی مواد به واسطه کاهش لخته‌شدن ذرات خاک مقدار تقاضای آب را افزایش می‌دهد. تصاویری از آزمایش اسلامپ در شکل ۷ نشان داده شده است.

1 Thixotropy





شکل ۸. مقاومت فشاری نمونه‌های ملات حاوی مواد پودری بر پایه سیمان

Fig. 8. Compressive strength of cement-based mortar samples.

بازیافتی و افزایش درصد سرباره کوره آهن‌گدازی در مواد پودری، مقاومت فشاری ۳ روزه ملات کاهش و مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن افزایش یافته است. با بررسی نتایج ملات حاوی درصد یکسانی از خاک رس بازیافتی و سرباره کوره آهن‌گدازی ( $K_{80}RC_{10}GG_{10}$ ) مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری به طور قابل قبولی مشابه ملات مرجع ( $K_{100}$ ) بدست آمده است. این نتیجه را می‌توان به بهبود تخلخل خمیر سیمان به سبب تشکیل ژل C-S-H ثانویه بر اثر واکنش‌های پوزولانی مناسب خاک رس بازیافتی و سرباره کوره آهن‌گدازی و همچنین تأثیر مورفولوژی و توزیع اندازه ذرات مواد افزودنی اختصاص داد.

به طور مشابه نتایج حاصل از ۳۵ درصد جایگزینی نیز نشان داد که افزودن سرباره کوره آهن‌گدازی و ترکیب آن با خاک رس بازیافتی می‌تواند منجر به افزایش مقاومت بلندمدت ملات گردد. مطابق شکل، کاهش مقاومت فشاری ملات حاوی تنها ۳۰ درصد جایگذاری خاک رس بازیافتی در کلینکر ( $K_{70}RC_{30}$ ) قابل ملاحظه است. علاوه بر آن، ترکیب ۳۰ درصد خاک رس بازیافتی و ۵ درصد سرباره کوره آهن‌گدازی ( $K_{65}RC_{30}GG_5$ ) نیز تأثیر چندانی بر افزایش مقاومت ملات نداشته است. از این رو، استفاده از خاک رس بازیافتی می‌تواند به ۲۵ درصد محدود گردد. تصاویری از شکست نمونه‌های ملات تحت آزمایش فشاری در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

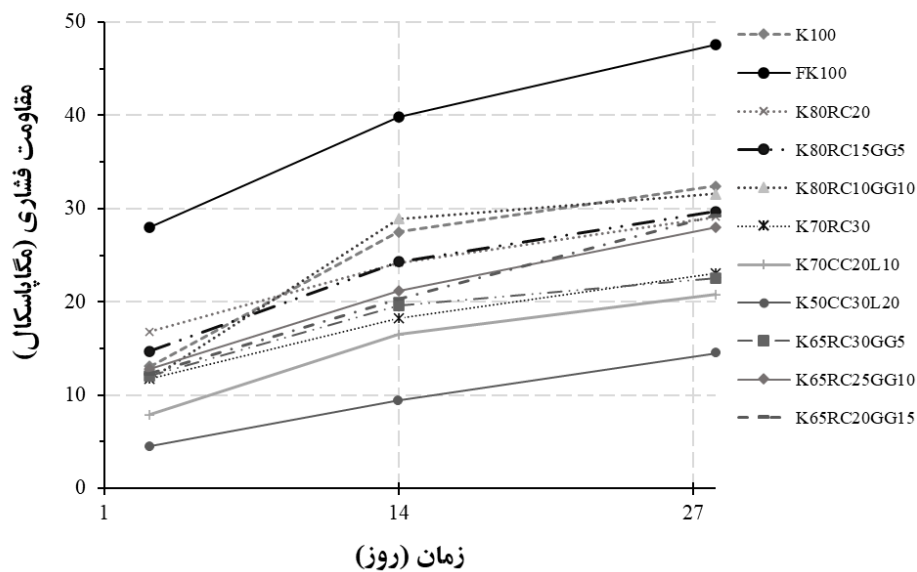
به منظور بررسی بیشتر تأثیر مواد معدنی و بازیافتی بر عملکرد ملات، مقاومت فشاری نرمال شده نمونه‌های ملات حاوی مواد پودری بر پایه

روزه طرح‌های حاوی خاک رس کلسینه بازیافتی و طبیعی به واسطه افزایش نرمی (FCC و FRC)، مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن‌ها تغییر چندانی نکرده است که براساس ادبیات فنی می‌بایستی با افزایش نرمی و افزایش سن، مقاومت فشاری نیز افزایش یابد [۳۱]. کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح‌های حاوی مواد معدنی طبیعی و بازیافتی در مقایسه با طرح مرجع نشان‌دهنده نقش غالب‌تر اثر پدیده رقیق‌کنندگی نسبت به فعالیت پوزولانی و اثرات پرکنندگی واکنش‌های شیمیایی کلسیم کربنات با اجزای  $C_3A$  و  $C_4AF$  است [۵۰].

نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های ملات حاوی مواد پودری بر پایه کلینکر در سنین ۳، ۱۴، و ۲۸ روز در شکل ۹ ارائه شده است. همانطور که در تحقیقات نشان داده شده تأثیر نرمی کلینکر بر نتایج آزمایش تأثیرگذار است که این موضوع را می‌توان با مقایسه نتایج نمونه‌های  $K_{100}$  و  $FK_{100}$  مشاهده نمود. از آنجایی که مقاومت فشاری ۲۸ روزه ملات حاوی خاک رس کلسینه (در طرح مواد پودری بر پایه سیمان) کمتر از ملات مرجع بدست آمد، از این رو از سرباره کوره آهن‌گدازی به جای پودر سنگ‌آهک در ترکیب با خاک رس بازیافتی استفاده شده است. بدین منظور جایگزینی ۲۰، ۳۰ و ۳۵ درصد مواد معدنی به جای کلینکر مورد بررسی قرار گرفته است.

نتایج ۲۰ درصد جایگزینی نشان می‌دهد که با کاهش درصد خاک رس

1 dilution



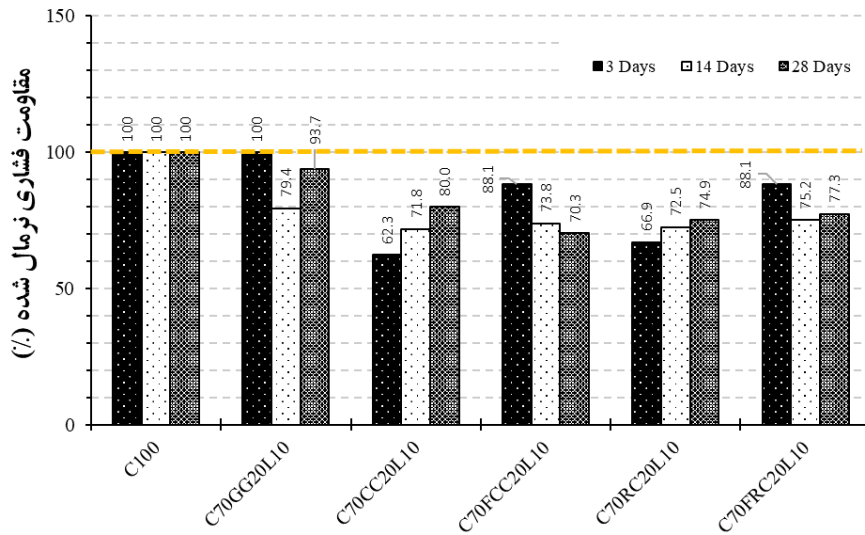
شکل ۹. مقاومت فشاری نمونه‌های ملات حاوی مواد پودری بر پایه کلینکر

Fig. 9. Compressive strength of clinker-based mortar samples.



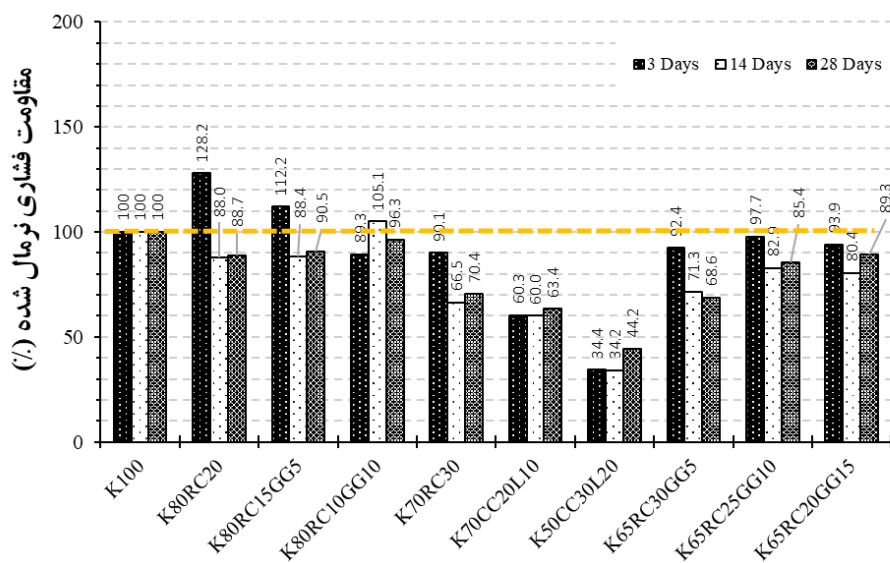
شکل ۱۰. شکست نمونه‌های ملات تحت آزمایش فشاری

Fig. 10. Failure of mortar samples under compressive test.



شکل ۱۱. مقاومت فشاری نرمال شده نمونه‌های ملات حاوی مواد پودری بر پایه سیمان

Fig. 11. Normalized compressive strength of cement-based mortar samples.

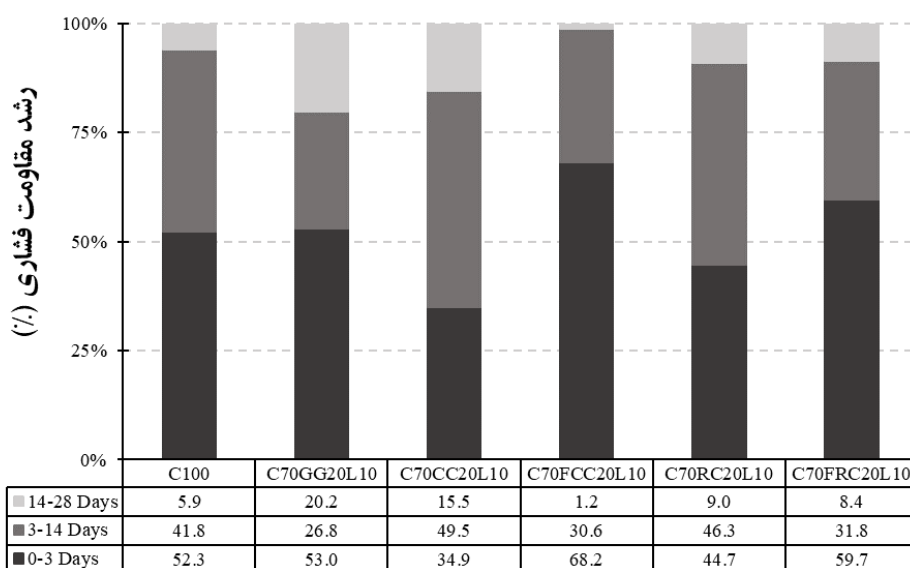


شکل ۱۲. مقاومت فشاری نرمال شده نمونه‌های ملات حاوی مواد پودری بر پایه کلینکر

Fig. 12. Normalized compressive strength of clinker-based mortar samples.

کلسینه در سنین بالاتر است. نکته قابل توجه آن است که عملکرد پوزولانی خاک رس بازیافتی به طور قابل ملاحظه‌ای مشابه خاک رس طبیعی است. در میان طرح‌های موجود، ملات حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی عملکرد قابل قبولی را در مقایسه با ملات مرجع داشته است. طوری که اختلاف مقدار مقاومت فشاری آن کمتر از ۷ درصد بدست آمد.

سیمان و کلینکر در مقایسه با نمونه‌های ملات مرجع به ترتیب در شکل ۱۱ و ۱۲ ارائه شده است. مطابق شکل ۱۱، مشاهده می‌شود که با افزایش سن نمونه‌ها ملات حاوی خاک رس کلسینه و پودر سنگ‌آهک در مقایسه با طرح مرجع از حدود ۳۳ درصد به حدود ۲۰ درصد کاهش یافته است. این روند افزایشی به سبب افزایش خاصیت پوزولانی و واکنش‌پذیری خاک رس



شکل ۱۳. رشد مقاومت فشاری نمونه‌های ملات حاوی مواد پودری بر پایه سیمان

Fig. 13. Compressive strength growth of cement-based mortar samples.

درصد رسیده است. همچنین این اختلاف برای ترکیب ۳۰ درصد خاک رس بازیافتی و ۵ درصد سرباره کوره آهن‌گدازی ( $K_{65}RC_{30}GG_5$ ) نیز به ۳۲ درصد بدست آمده است.

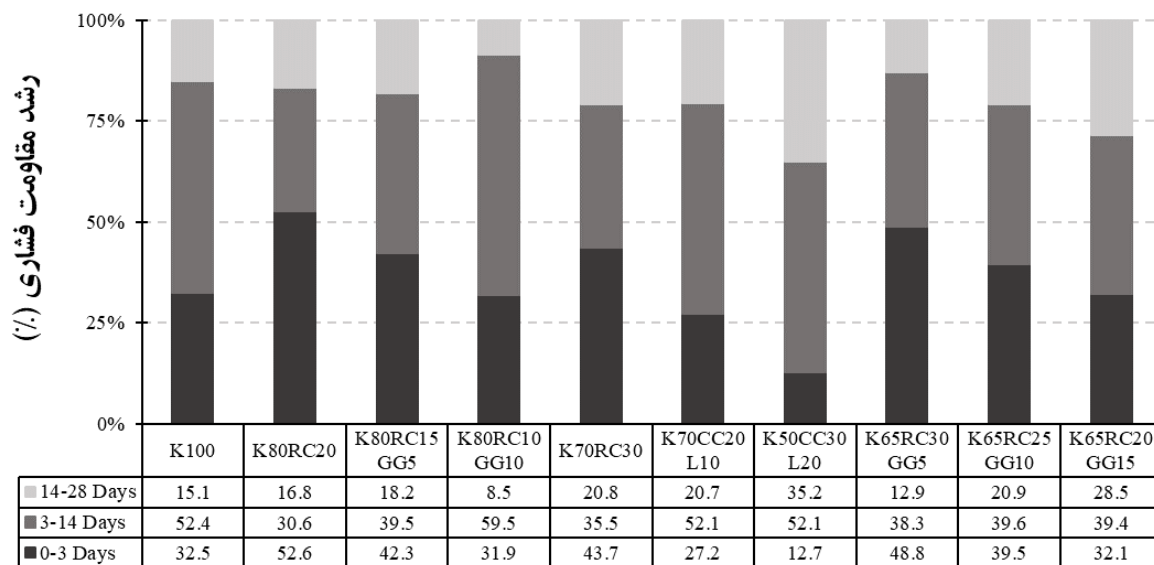
### ۳-۳- رشد مقاومت فشاری

رشد مقاومت فشاری نمونه‌های ملات حاوی مواد پودری بر پایه سیمان در سنین مختلف در شکل ۱۳ نشان داده شده است. مطابق شکل مشاهده می‌شود که سرعت رشد مقاومت فشاری در نمونه‌های ملات حاوی خاک رس کلسینه ( $C_{70}RC_{20}L_{10}$  و  $C_{70}CC_{20}L_{10}$ ) در بازه زمانی ۰ تا ۳ روز در مقایسه با نمونه مرجع کمتر بدست آمده است، در حالی که سرعت رشد مقاومت فشاری نمونه حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی در این بازه زمانی برابر نمونه مرجع حاصل شده است. با این حال با افزایش فعالیت پوزولانی و واکنش‌پذیری خاک رس کلسینه (هر دو خاک طبیعی و بازیافتی) در سنین ۳ تا ۱۴ روز، رشد مقاومت فشاری نمونه‌های ملات حاوی خاک رس کلسینه حدود ۱۸،۴ درصد بیشتر از ملات مرجع بدست آمد. در سایر تحقیقات نیز به نتایج مشابهی دست پیدا کرده‌اند [۲۴، ۵۱، ۵۲].

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نرمی خاک رس کلسینه، میزان رشد مقاومت ملات ( $C_{70}FRC_{20}L_{10}$  و  $C_{70}FCC_{20}L_{10}$ ) در سنین اولیه در

براساس شکل ۱۲، تقریباً تمامی ملات‌های حاوی خاک رس بازیافتی عملکرد قابل قبولی در مقایسه با ملات مرجع داشته‌اند. طوری که مقدار اختلاف مقاومت فشاری ملات کم‌کربن با ملات مرجع در سن اولیه کمتر از ۱۰ درصد گزارش شده است. با مقایسه مقاومت فشاری نرمال شده تمامی طرح‌های ۲۰ درصد جایگزینی، مشاهده می‌شود که ضمن کسب مقاومت اولیه قابل ملاحظه نسبت به ملات مرجع، با گذشت زمان و افزایش سن اختلاف مقاومت این طرح‌ها با ملات مرجع به حدود ۴ تا ۱۲ درصد کاهش یافته است. همانطور که گفته شد ترکیب یکسانی از خاک رس بازیافتی و سرباره کوره آهن‌گدازی ( $K_{80}RC_{10}GG_{10}$ ) عملکرد قابل قبولی در ۲۰ درصد جایگزینی کلینکر کسب کرده‌اند که مطابق شکل ۱۲، اختلاف مقاومت فشاری آن در سن ۲۸ روزه به زیر ۴ درصد رسیده است. از طرفی مقاومت ۱۴ روزه آن به میزان ۵ درصد بیشتر از طرح مرجع شده است.

در نهایت با مقایسه نتایج حاصل از طرح ۳۵ درصد جایگزینی حاوی ۲۰ تا ۲۵ درصد خاک رس بازیافتی و ۱۰ تا ۱۵ درصد سرباره کوره آهن‌گدازی ( $K_{65}RC_{25}GG_{10}$  و  $K_{65}RC_{20}GG_{15}$ ) مشاهده شد که ترکیب مناسب مواد بازیافتی می‌تواند اختلاف مقاومت فشاری را ۱۰ تا ۱۵ نسبت به ملات مرجع کاهش دهد. این در حالی است که اختلاف مقاومت فشاری ملات حاوی تنها ۳۰ درصد خاک رس بازیافتی ( $K_{70}RC_{30}$ ) با ملات مرجع به حدود ۳۰



شکل ۱۴. رشد مقاومت فشاری نمونه‌های ملات حاوی مواد پودری بر پایه کلینکر

Fig. 14. Compressive strength growth of clinker-based mortar samples.

نمونه‌ها در سنین بالاتر (۳ تا ۲۸ روز) شده است. طوری که بکارگیری درصد یکسانی از خاک رس بازیافتی و سرباره آهن‌گذاری ( $K_{80}RC_{10}GG_{10}$ ) در نمونه‌های ملات، بیشترین فعالیت پوزولانی در سنین ۳ تا ۱۴ روز را داشته است.

### ۳-۴- مقایسه‌ای از سیمان کم‌کربن تولید شده

نتایج حاصل از آزمایشات تحقیقات گذشته بر روی نمونه‌های حاوی سیمان کم‌کربن در جدول ۷ ارائه شده است. همانطور که در جدول نشان داده شده است با افزایش جایگزینی سیمان مقدار مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی سیمان کم‌کربن در مقایسه با نمونه‌های مرجع کاهش می‌یابد. با مقایسه مطالعات پیشین [۲۴، ۵۳، ۵۴] مشاهده می‌شود که با وجود طرح‌های مشابه، میزان کاهش مقاومت سیمان‌های کم‌کربن در مقایسه با سیمان پرتلند متفاوت است. پارامترهای مختلفی همچون خاصیت پوزولانی مواد جایگزین، نرمی و یا کیفیت مصالح می‌تواند بر عملکرد سیمان کم‌کربن مؤثر باشد. نتایج مقاومت فشاری ملات حاوی سیمان‌های کم‌کربن در مقایسه با ملات مرجع به میزان ۹،۵-۱۳ درصد کمتر می‌باشد. این در حالی که در سایر تحقیقات میزان کاهش به ۴-۲۲ درصد و حتی تا ۲۵ درصد نیز گزارش شده است.

مقایسه با طرح مرجع بیشتر شده است. این در حالی است که مطابق شکل، سرعت رشد مقاومت این نمونه‌ها پس از گذشت زمان و افزایش سن کاهش یافته است. در واقع با افزایش نرمی خاک رس کلسینه میزان رشد مقاومت در سنین ۰ تا ۳ روز به میزان ۱۴،۱ درصد بیشتر و در سنین ۳ تا ۱۴ روز به میزان ۲۳،۹ درصد کمتر از ملات مرجع حاصل یافت. افزایش نرمی مصالح پوزولانی سبب می‌شود تا نمونه‌های ملات بیشترین مقاومت خود را در سنین اولیه کسب نمایند.

رشد مقاومت فشاری نمونه‌های ملات حاوی مواد پودری بر پایه کلینکر در سنین مختلف در شکل ۱۴ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که رشد مقاومت فشاری ملات حاوی خاک رس بازیافتی در سنین ۰ تا ۳ روز بیشتر از ملات مرجع است. با توجه به آن که هر دو ماده کلینکر و خاک رس بازیافتی در آزمایشگاه تکنولوژی بتن خرد شده‌اند، براساس نتایج می‌توان گفت که ترکیب این دو ماده به خوبی بر رشد مقاومت اولیه نمونه‌های ملات مؤثر بوده است. از این‌رو، رشد قابل ملاحظه مقاومت فشاری در سنین ۰ تا ۳ روز به حضور خاک رس بازیافتی در طرح اختلاط نمونه‌های ملات بر پایه کلینکر بستگی داشته است. مطابق شکل، افزایش درصد سرباره کوره آهن‌گذاری و کاهش درصد خاک رس بازیافتی در ملات سبب رشد مقاومت فشاری



جدول ۷. مقایسه نتایج مقاومت فشاری

Table 7. Comprehensive strength comparison of compressive.

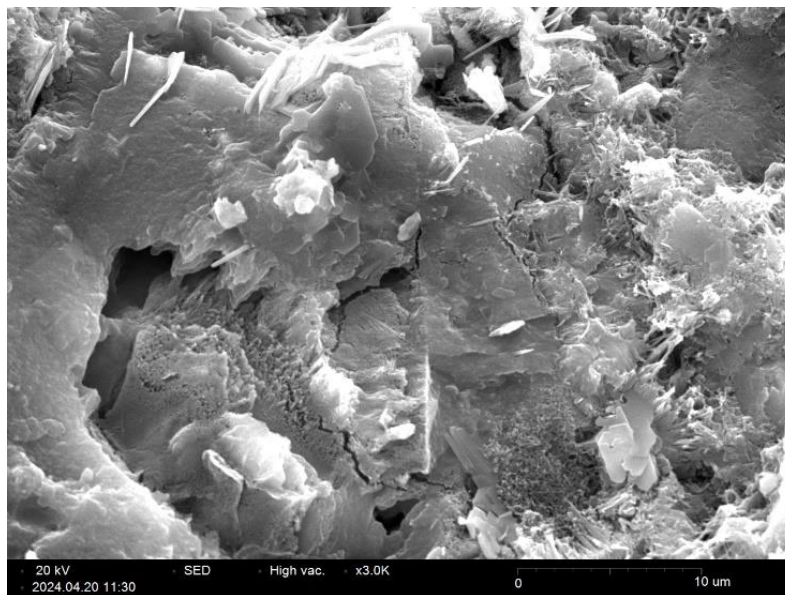
مواد سیمانی	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	مراجع
100OPC	۳۲,۴	مطالعه حاضر
70OPC + 20RC + 15GG	۲۹,۳	
70OPC + 25RC + 10GG	۲۸,۰	
100OPC	۴۹,۳	رمضانیان پور و همکاران [۲۴]
70OPC + 30CC1	۴۷,۳	
70OPC + 20CC1 + 10LS	۴۴,۹	
70OPC + 30CC2	۴۴,۶	
70OPC + 20CC2 + 10LS	۳۸,۴	
100OPC	۶۲,۱	دهدپانی و سانتانام [۵۳]
70OPC + 30FA	۴۶,۶	
55OPC + 30CC + 15LS	۴۳,۰	
100OPC	۳۸,۸	میشرا و همکاران [۵۴]
55OPC + 30CC + 15LS	۳۶,۲	

داشت [۱۵، ۱۶]. همانطور که در بخش ۲-۱ توضیح داده شده است، خاک رس بازیافتی حاصل از خرد نمودن بیسکویت‌های کارخانه کاشی نیازی به فرآیند کلسیناسیون ندارند و از این رو، اثرات زیست‌محیطی سیمان کم‌کربن تولید شده در این مطالعه، کمتر از سیمان پرتلند و همچنین سیمان  $LC^3$  خواهد بود.

علاوه بر اثرات زیست‌محیطی، بحث اقتصادی نیز در تولید سیمان جدید مطرح خواهد بود. در تحقیقات گذشته، تولید سیمان کم‌کربن مانند سیمان  $LC^3$  در سناریوهای مختلفی صورت گرفت و نتایج نشان داد که در آن مراحل جداگانه تولید کلینکر، کلسینه کردن خاک رس، آسیاب و مخلوط کردن مصالح را می‌توان در یک مکان یا در مکان‌های مختلفی انجام داد. همچنین نشان داده شده است که سرمایه‌گذاری و یا سرمایه مورد نیاز برای راه‌اندازی یک کارخانه جدید تولید سیمان  $LC^3$  کمتر از هزینه راه‌اندازی کارخانه تولید سیمان OPC با ظرفیت مشابه خواهد بود. به طور مشابه، هزینه افزایش ظرفیت کارخانه سیمان با تبدیل تولید به  $LC^3$  کمتر از اضافه شدن خط تولید کلینکر جدید گزارش شده است. علاوه بر آن، مزایای اقتصادی تبدیل یک کوره کلینکر قدیمی به کلسینر رسی نیز گزارش شده است. بازده سرمایه نیز با استفاده از فناوری‌های مختلف کلسینه

با تغییر در ساختار سیمان به واسطه جایگزینی بخشی از آن با مواد سیمانی مکمل، احتمال تغییر در روند هیدراسیون آن وجود دارد و ممکن است درون لایه‌های هیدراته شده تخلخلی به وجود آید. از این رو لازم است تا با انجام آزمایش میکروسکوپ الکترونی تغییرات به وجود آمده در نمونه‌های ساخته شده با سیمان کم‌کربن بررسی شود. شکل ۱۵ تصویری از عکس میکروسکوپ الکترونی ملات حاوی سیمان کم‌کربن را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود لایه‌های هیدراسیون به صورت منظم تشکیل شده‌اند و از این جهت تخلخل چشمگیری در مواد هیدراته شده توسط سیمان جدید ایجاد نشده است.

کاهش اثرات زیست‌محیطی یکی از اهداف استفاده از مواد جایگزینی در تولید سیمان است. براساس مطالعات گذشته آلودگی تولید شده در فرآیند کلسیناسیون خاک رس کمتر از آلودگی ناشی از تولید سیمان حذف شده بواسطه جایگزینی خاک رس کلسینه است. صرفه جویی در انرژی و کاهش انتشار دی‌اکسید کربن به این دلیل رخ می‌دهد که دمای کلسیناسیون کمتر از دمای مورد نیاز برای فرآیند کلینکرینگ است و انتشار دی‌اکسید کربن مرتبط با کربن‌زدایی مواد خام وجود ندارد. از این رو، تولید سیمان حاوی رس کلسینه به مراتب آلودگی کمتری از سیمان پرتلند در حجم برابر خواهد



شکل ۱۵. عکس میکروسکوپ الکترونی ملات حاوی سیمان جدید

Fig. 15. SEM image of mortar containing new cement.

بازیافتی در جایگزینی کلینکر اولیه قابل ملاحظه بوده است. از طرفی استفاده از سرباره کوره آهن‌گدازی سبب افزایش رشد مقاومت فشاری در بازه زمانی ۱۴ تا ۲۸ روز شده است. نتایج نشان داد که استفاده همزمان و بهینه خاک رس بازیافتی و سرباره کوره آهن‌گدازی می‌تواند منجر به ایجاد سیمان کم‌کربن مؤثر شود که عملکردی مشابه با سیمان معمولی داشته باشد. این امر به سبب عملکرد پوزولانی خاک رس کلسینه و اثرات میکروکریستالی سرباره کوره آهن‌گدازی صورت گرفت.

- مقاومت فشاری طرح‌های حاوی خاک رس کلسینه (هر دو خاک بازیافتی و طبیعی) و پودر سنگ‌آهک در مقایسه با طرح مرجع کاهش یافت که این مقدار کمتر از ۲۰ درصد بدست آمد. این در حالی است که مقاومت فشاری طرح‌های حاوی مواد معدنی بازیافتی (خاک رس بازیافتی و سرباره کوره آهن‌گدازی) با ۳۵ درصد جایگزینی کمتر ۱۰ درصد کاهش یافته است.
- براساس نتایج استفاده از حداکثر ۲۵ درصد خاک رس بازیافتی در ترکیب خاک رس بازیافتی و سرباره کوره آهن‌گدازی در مواد پودری، می‌تواند عملکرد خوبی داشته باشد.

با توجه به آن‌که در تحقیقات پیشین [۲۳، ۵۰، ۵۵] دوام نمونه‌های بتنی/ ملات حاوی خاک رس مانند سیمان  $LC^3$  مورد بررسی قرار گرفته و کیفیت این نوع سیمان تأیید شده است، از این‌رو در این مطالعه کیفیت سیمان حاوی

کردن مقایسه شده است [۱۵، ۱۶]. بدین صورت اثبات شده است که فرآیند کلسیناسیون خاک رس اقتصادی‌تر از تولید سیمان است. با توجه به عدم نیاز خاک رس بازیافتی به فرآیند کلسیناسیون، از نظر اقتصادی در مقایسه با سیمان  $LC^3$  به صرفه‌تر خواهد بود.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بررسی و امکان‌سنجی تولید ملات کم‌کربن حاوی مواد بازیافتی موجود در کشور پرداخته شده است. با انجام آزمایش‌های تجربی، نتایج حاصل از مقاومت فشاری و درصد رشد نمونه‌های ملات حاوی مواد معدنی بازیافتی، رس کلسینه و پودر سنگ‌آهک با ملات مرجع مقایسه شده است. مهمترین نتایج بدست آمده در این پژوهش به شرح زیر است:

- افزایش محتوای خاک رس کلسینه در مخلوط ملات منجر به کاهش تدریجی اسلامپ شده است. کاهش رئولوژیکی خمیر سیمان کم‌کربن به سبب لخته‌شدن ذرات خاک رس کلسینه ناشی از بار سطحی منفی رقم خورده است.
- مقاومت فشاری طرح‌های حاوی خاک رس بازیافتی در سنین مختلف مشابه طرح‌های حاوی خاک رس طبیعی بدست آمد.
- رشد مقاومت فشاری اولیه نمونه‌های ملات حاوی خاک رس

flow analysis approach for bulk nonmetallic mineral building materials applied to the German building sector, *Journal of Industrial Ecology*, 21(3) (2017) 673-688.

- [7] D.C. Reis, M. Quattrone, J.F. Souza, K.R. Punhagui, S.A. Pacca, V.M. John, Potential CO<sub>2</sub> reduction and uptake due to industrialization and efficient cement use in Brazil by 2050, *Journal of Industrial Ecology*, 25(2) (2021) 344-358.
- [8] L. Doussang, G. Samson, F. Deby, B. Huet, E. Guillon, M. Cyr, Durability parameters of three low-carbon concretes (low clinker, alkali-activated slag and supersulfated cement), *Construction and Building Materials*, 407 (2023) 133511.
- [9] J. Santorsola, L.J. Butler, Material behaviour and flexural performance of low carbon concrete beams containing very high quantities of recycled and secondary materials, *Construction and Building Materials*, 407 (2023) 133350.
- [10] C. Wu, C. Zhang, J. Li, X. Wang, W. Jiang, S. Yang, W. Wang, A sustainable low-carbon pervious concrete using modified coal gangue aggregates based on ITZ enhancement, *Journal of Cleaner Production*, 377 (2022) 134310.
- [11] R. Kajaste, M. Hurme, Cement industry greenhouse gas emissions—management options and abatement cost, *Journal of cleaner production*, 112 (2016) 4041-4052.
- [12] M. Schneider, M. Romer, M. Tschudin, H. Bolio, Sustainable cement production—present and future, *Cement and concrete research*, 41(7) (2011) 642-650.
- [13] P.K. Mehta, P.J. Monteiro, *Concrete: microstructure, properties, and materials*, McGraw-Hill Education, 2014.
- [14] P.S.L. Souza, D.C. Dal Molin, Viability of using calcined clays, from industrial by-products, as pozzolans of high reactivity, *Cement and Concrete Research*, 35(10) (2005) 1993-1998.
- [15] M. Sharma, S. Bishnoi, F. Martirena, K. Scrivener, Limestone calcined clay cement and concrete: A state-of-the-art review, *Cement and Concrete Research*, 149 (2021) 106564.
- [16] A. Alujas, R. Fernández, R. Quintana, K.L. Scrivener, F. Martirena, Pozzolanic reactivity of low grade kaolinitic

خاک رس بازیافتی در مقایسه با سیمان پرتلند و همچنین سیمان حاوی خاک رس طبیعی مقایسه شده است. از آنجایی که تا سن ۲۸ روز، سیمان جدید حاوی مواد پوزولانی نتایج قابل مقایسه و امیدوارکننده‌ای در مقایسه با سیمان پرتلند نشان داده‌اند، از همین رو انتظار می‌رود که در سنین بالاتر (۹۰ روز) نیز افزایش مقاومت بیشتری از طرح های جایگزینی مشاهده شود. با این حال، پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آینده دوام نمونه‌های ملات حاوی سیمان مرکب کم کربن تحلیل و بررسی شود.

از طرفی براساس مطالعات گذشته [۱۶، ۵۵]، فعالیت پوزولانی خاک‌های رس کلسینه مورد تأیید قرار گرفته است. ضمن آن که در سایر مقالات [۲۳، ۴۰، ۵۶، ۵۷] با استناد به فعالیت پوزولانی مصالح جایگزینی، در مطالعات خود فعالیت پوزولانی مصالح مکمل سیمانی را مورد بحث قرار نداده‌اند. از این‌رو، مطالعه حاضر تنها به مطالعه مقاومت فشاری ملات حاوی سیمان کم کربن پرداخته است. در تحقیق حاضر، با مقایسه نتایج ترکیب شیمیایی خاک رس بازیافتی (مطابق جدول ۲) با خاک رس کلسینه استفاده شده در مقالات [۲۳، ۴۰، ۵۶، ۵۷]، سطح کیفیت خاک رس بازیافتی برای استفاده در ملات مناسب در نظر گرفته شد. نتایج این مطالعه نیز نشان داد که مقاومت فشاری و میزان رشد ملات‌های حاوی خاک طبیعی و بازیافتی به طور قابل توجهی مشابه بوده است. با این حال، پیشنهاد می‌شود فعالیت پوزولانی مواد جایگزین در مطالعات آینده مورد بررسی قرار گیرد.

## منابع

- [1] P.K. Mehta, P. Monteiro, *Concrete: microstructure, properties, and materials*, (No Title), (2006).
- [2] K.L. Scrivener, A. Nonat, Hydration of cementitious materials, present and future, *Cement and concrete research*, 41(7) (2011) 651-665.
- [3] B. Sabir, S. Wild, J. Bai, Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review, *Cement and concrete composites*, 23(6) (2001) 441-454.
- [4] Cement Industry Energy and CO<sub>2</sub> Performance “Getting the Numbers Right”, in: WBCSD-CSI, Washington, 2009.
- [5] C. Tomkins, G. Throwdown, Redefining what’s possible for clean energy by 2020, *Gigaton Throwdown*, San Francisco, (2009).
- [6] G. Schiller, K. Gruhler, R. Ortlepp, *Continuous material*

- Applied Clay Science, 132 (2016) 552-560.
- [27] R. Fernandez Lopez, Calcined clayey soils as a potential replacement for cement in developing countries, EPFL, 2009.
- [28] C. He, B. Osbaeck, E. Makovicky, Pozzolanic reactions of six principal clay minerals: activation, reactivity assessments and technological effects, Cement and concrete research, 25(8) (1995) 1691-1702.
- [29] S. Urhan, Alkali silica and pozzolanic reactions in concrete. Part 1: Interpretation of published results and an hypothesis concerning the mechanism, Cement and concrete research, 17(1) (1987) 141-152.
- [30] H.H. Murray, Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite: a general overview, Applied clay science, 17(5-6) (2000) 207-221.
- [31] A. Pérez, A. Favier, K. Scrivener, F. Martirena, Influence grinding procedure, limestone content and PSD of components on properties of clinker-calcined clay-limestone cements produced by intergrinding, in: Calcined Clays for Sustainable Concrete: Proceedings of the 2nd International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete, Springer, 2018, pp. 358-365.
- [32] C. Jesus, E.A. Junior, N. Braga, J.S. Junior, M.S. Barata, Coloured concrete produced from low-carbon cements: Mechanical properties, chromatic stability and sustainability, Journal of Building Engineering, 67 (2023) 106018.
- [33] Y. Yang, W. Luo, Effect of Sugarcane Bagasse Ash and Ceramic Waste Dust as Partial Replacements of Portland Cement on Corrosion Behavior of HRB400 Low Carbon Steel Reinforcement in 3.5% NaCl, International Journal of Electrochemical Science, 15(12) (2020) 12410-12419.
- [34] H. Maraghechi, F. Avet, K. Scrivener, Chloride transport behavior of LC 3 binders, in: Calcined Clays for Sustainable Concrete: Proceedings of the 2nd International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete, Springer, 2018, pp. 306-309.
- [35] M. Mohit, H. Haftbaradaran, H.T. Riahi, Investigating the ternary cement containing Portland cement, ceramic clays: Influence of calcination temperature and impact of calcination products on OPC hydration, Applied Clay Science, 108 (2015) 94-101.
- [17] Y. Cao, Y. Wang, Z. Zhang, Y. Ma, H. Wang, Recent progress of utilization of activated kaolinitic clay in cementitious construction materials, Composites Part B: Engineering, 211 (2021) 108636.
- [18] V.M. John, B.L. Damineli, M. Quattrone, R.G. Pileggi, Fillers in cementitious materials—Experience, recent advances and future potential, Cement and Concrete Research, 114 (2018) 65-78.
- [19] M. Antoni, J. Rossen, F. Martirena, K. Scrivener, Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone, Cement and concrete research, 42(12) (2012) 1579-1589.
- [20] M. Antoni, Investigation of cement substitution by blends of calcined clays and limestone, EPFL, 2013.
- [21] A.C. Emmanuel, P. Haldar, S. Maity, S. Bishnoi, Second pilot production of limestone calcined clay cement in India: the experience, Indian Concr. J, 90(5) (2016) 57-63.
- [22] K.L. Scrivener, Options for the future of cement, Indian Concr. J, 88(7) (2014) 11-21.
- [23] Y. Dhandapani, T. Sakthivel, M. Santhanam, R. Gettu, R.G. Pillai, Mechanical properties and durability performance of concretes with Limestone Calcined Clay Cement (LC3), Cement and Concrete Research, 107 (2018) 136-151.
- [24] A. Ramezaniapor, A. Yadak Yaraghi, A. Zolfagharnasab, A.M. Ramezaniapor, INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES AND CHLORIDE IONS INGRESS IN CONCRETES CONTAINING CALCINED, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 54(3) (2022) 1119-1132.
- [25] R. Fernandez, F. Martirena, K.L. Scrivener, The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite, Cement and concrete research, 41(1) (2011) 113-122.
- [26] S. Hollanders, R. Adriaens, J. Skibsted, Ö. Cizer, J. Elsen, Pozzolanic reactivity of pure calcined clays,

- [46] Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement, in: ASTM C230, ASTM International., West Conshohocken, 2003.
- [47] Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), in: ASTM C109, ASTM International., West Conshohocken, 2002.
- [48] T.R. Muzenda, P. Hou, S. Kawashima, T. Sui, X. Cheng, The role of limestone and calcined clay on the rheological properties of LC3, *Cement and Concrete Composites*, 107 (2020) 103516.
- [49] P. Hou, T.R. Muzenda, Q. Li, H. Chen, S. Kawashima, T. Sui, H. Yong, N. Xie, X. Cheng, Mechanisms dominating thixotropy in limestone calcined clay cement (LC3), *Cement and Concrete Research*, 140 (2021) 106316.
- [50] F. Bahman-Zadeh, A.A. Ramezani-pour, A. Zolfagharnasab, Effect of carbonation on chloride binding capacity of limestone calcined clay cement (LC3) and binary pastes, *Journal of Building Engineering*, 52 (2022) 104447.
- [51] F. Moodi, A. Ramezani-pour, A.S. Safavizadeh, Evaluation of the optimal process of thermal activation of kaolins, *Scientia Iranica*, 18(4) (2011) 906-912.
- [52] A.A. Ramezani-pour, H.B. Jovein, Influence of metakaolin as supplementary cementing material on strength and durability of concretes, *Construction and Building materials*, 30 (2012) 470-479.
- [53] Y. Dhandapani, M. Santhanam, Assessment of pore structure evolution in the limestone calcined clay cementitious system and its implications for performance, *Cement and Concrete Composites*, 84 (2017) 36-47.
- [54] G. Mishra, A.C. Emmanuel, S. Bishnoi, Influence of temperature on hydration and microstructure properties of limestone-calcined clay blended cement, *Materials and Structures*, 52 (2019) 1-13.
- [55] V. Shah, A. Parashar, G. Mishra, S. Medepalli, S. Krishnan, S. Bishnoi, Influence of cement replacement by limestone calcined clay pozzolan on the engineering properties of mortar and concrete, *Advances in Cement Research*, 32(3) (2020) 101-111.
- waste powder, and limestone, *Construction and Building Materials*, 369 (2023) 130596.
- [36] W. Chen, J. Dang, H. Du, Using low-grade calcined clay to develop low-carbon and lightweight strain-hardening cement composites, *Journal of Building Engineering*, 58 (2022) 105023.
- [37] H. Wan, Z. Shui, Z. Lin, Analysis of geometric characteristics of GGBS particles and their influences on cement properties, *Cement and concrete research*, 34(1) (2004) 133-137.
- [38] S. Arivalagan, Sustainable studies on concrete with GGBS as a replacement material in cement, *Jordan journal of civil Engineering*, 8(3) (2014) 263-270.
- [39] Y. Zhao, Y. Gao, G. Chen, S. Li, A. Singh, X. Luo, C. Liu, J. Gao, H. Du, Development of low-carbon materials from GGBS and clay brick powder for 3D concrete printing, *Construction and Building Materials*, 383 (2023) 131232.
- [40] F. Avet, K. Scrivener, Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of Limestone Calcined Clay Cement (LC3), *Cement and Concrete Research*, 107 (2018) 124-135.
- [41] A. Zolfagharnasab, A.A. Ramezani-pour, F. Bahman-Zadeh, Investigating the potential of low-grade calcined clays to produce durable LC3 binders against chloride ions attack, *Construction and Building Materials*, 303 (2021) 124541.
- [42] Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, in: ASTM C128, ASTM International., West Conshohocken, 2015.
- [43] Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, in: ASTM C136, ASTM International., West Conshohocken, 2014.
- [44] Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus, in: ASTM C204, ASTM International., West Conshohocken, 2011.
- [45] Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency, in: ASTM C305, ASTM International., West Conshohocken, 2006.



[57] J. Yu, D.K. Mishra, C. Hu, C.K. Leung, S.P. Shah, Mechanical, environmental and economic performance of sustainable Grade 45 concrete with ultrahigh-volume Limestone-Calcined Clay (LCC), *Resources, Conservation and Recycling*, 175 (2021) 105846.

[56] L. Wang, N.U. Rehman, I. Curosu, Z. Zhu, M.A.B. Beigh, M. Liebscher, L. Chen, D.C. Tsang, S. Hempel, V. Mechtcherine, On the use of limestone calcined clay cement (LC3) in high-strength strain-hardening cement-based composites (HS-SHCC), *Cement and Concrete Research*, 144 (2021) 106421.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*M. R. Alamian, M. Dehestani, S. S. Mousavi, Production of green low-carbon mortar containing recycled calcined clay from the tile factory and ground granulated blast furnace slag, Amirkabir J. Civil Eng., 56(11) (2025) 1407-1430.*

DOI: [10.22060/ceej.2024.22864.8059](https://doi.org/10.22060/ceej.2024.22864.8059)

