Semnan University

Journal of Transportation Infrastructure Engineering

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

ISSN: 2821-0549

Research Article

A Review of LC3 Cement: Feasibility of Its Use in Concrete Pavements Alongside the Reduction of Greenhouse Gases Emission

Erfan Ghorbanian[1] , Saeid Hesami[2*]

[1]MSc. student of Raod and Transportation, Faculty of Civil Engineering, Noshirvani University of Technology, Babol, I. R. Iran.
[2]Associatet Professor, Department of Raod and Transportation, Faculty of Civil Engineering, Noshirvani University of Technology, Babol, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-06-19
Revised: 2024-08-27
Accepted: 2024-08-28

Keywords:

LC3 cement;
Calcined clay;
Metakaolin;
Green cement;
Concrete pavement.

ABSTRACT

Cement, as one of the most important raw materials in the production of concrete pavements, plays a critical role in the quality and longevity of pavements. The use of ordinary cement, due to its production process, leads to the emission of a significant amount of greenhouse gases and environmental pollutants. This has raised serious concerns about the negative impact of the cement industry on weather changes and climate changes. In response to these concerns and the need to produce cement with minimal environmental impact, limestone calcined clay cement (LC3) has emerged as a sustainable and environmentally friendly solution. This article demonstrates that LC3 cement can be a suitable alternative to ordinary cement in concrete pavements, showing significant potential in this context. Reviews have indicated that, in addition to its environmental benefits, LC3 cement generally improves the mechanical properties and durability of concrete. The present paper reviews the literature on this cement, its components, mechanical properties, durability, environmental advantages, and feasibility of its use in concrete pavement construction.

*** Corresponding author.**
E-mail address: s.hesami@nit.ac.ir

How to cite this article: Ghorbanian, E. (2024). A Review of LC3 Cement: Feasibility of Its Use in Concrete Pavements Alongside the Reduction of Greenhouse Gases Emission. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, *10*(2), 39-56. https://doi.org/10.22075/jtie.2024.34499.1679

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

مجله زیرساخت های حمل و نقل

وبسایت نشریه: https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en

شاپا: 2821-0549

مقاله پژوهشی

مروری بر سیمان LC3، امکان‌سنجی استفاده از آن در روسازی بتنی به همراه کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای

عرفان قربانیان[۱]، سعید حسامی[۲*]

[۱]دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

[۲]دانشیار، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۳۰

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۰۶

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۰۷

واژگان کلیدی:

سیمان LC3،

رس کلسینه شده،

متاکائولین،

سیمان سبز،

روسازی بتنی.

چکیده

سیمان، به‌عنوان یکی از مهمترین مواد اولیه در تولید بتن روسازی، نقش حیاتی در کیفیت و عمر روسازی‌ها دارد. اما استفاده از سیمان معمولی با توجه به فرآیند تولید آن، باعث انتشار مقدار زیاد گازهای گلخانه‌ای و آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌شود. این موضوع باعث نگرانی‌های جدی در باره تأثیرات منفی صنعت سیمان بر تغییرات اقلیمی شده است. با توجه به این نگرانی‌ها و نیاز به تولید سیمانی با کمترین تأثیرات زیست‌محیطی، سیمان آمیخته‌شده با رس کلسینه شده و پودر سنگ‌آهک (LC3) به‌عنوان یک راهکار پایدار و محیط‌زیستی مطرح شده است. این مقاله نشان می‌دهد که سیمان LC3 می‌تواند به‌عنوان جایگزینی مناسب برای سیمان معمولی در روسازی بتنی مورد استفاده قرار گیرد و پتانسیل قابل‌توجهی در این زمینه دارد. بررسی‌ها نشان داده که سیمان LC3 علاوه بر مسائل محیط‌زیستی، عمدتاً موجب بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن نیز می‌شود. در مقاله پیش رو، به مرور ادبیات مربوط به این سیمان، مواد تشکیل‌دهنده آن، ویژگی‌های مکانیکی، دوام، مزیت‌های زیست‌محیطی و ارزیابی امکان استفاده از آن در ساخت روسازی‌های بتنی پرداخته شده است.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: s.hesami@nit.ac.ir

استناد به این مقاله: قربانیان, عرفان & ,حسامی, سعید. (۱۴۰۳). مروری بر سیمانLC3 ، امکان‌سنجی استفاده از آن در روسازی بتنی به همراه کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای .*مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل*, ۱۰(۲), ۳۹-۵۶ . https://doi.org/10.22075/jtie.2024.34499.1679

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

۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر، نگرانی‌های محیط‌زیستی به‌طور چشمگیری در سراسر جهان افزایش یافته است. یکی از صنایع پرمصرف و تأثیرگذار بر محیط‌زیست، صنعت سیمان است که به‌واسطه انتشار گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه دی‌اکسید کربن (CO_2)، نقش مهمی در تشدید پدیده‌های زیست‌محیطی مانند گرمایش جهانی ایفا می‌کند. این موضوع سبب شده تا حرکت به سمت مصالح پایدار و جستجو برای مواد و فناوری‌های جایگزین سیمان در حوزه‌های مختلف مصرف‌کننده سیمان، از جمله روسازی‌های بتنی اهمیت پیدا کند (آندرو، ۲۰۱۸؛ چاندار و همکاران، ۲۰۲۳؛ سلطانی‌نژاد و همکاران، ۲۰۲۱). نگرانی‌های مربوط به پایداری تولید سیمان، منجر به توسعه بسیاری از فناوری‌ها شده است که به‌طور گسترده در سراسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرند. اولین مجموعه پیشرفت‌ها، بر کاهش انرژی مورد نیاز برای تولید کلینکر متمرکز بود. با استفاده از این پیشرفت‌ها، اکثر کوره‌های کلینکر مدرن امروزی، نزدیک به حداکثر بازده ممکن ازنظر ترمودینامیک هستند و شاید افزایش مجدد این بازدهی‌ها، هزینه‌بر و غیرقابل دسترسی تا به امروز بوده است. از این‌رو، جایگزین کردن بخشی از کلینکر با مواد پوزولانی، امکان کاهش انرژی و اثرات زیست‌محیطی تولید سیمان را فراهم می‌کند و قدم دیگری بر کاهش آلودگی‌ها برداشته می‌شود (یان و همکاران، ۲۰۱۵).

در سال‌های اخیر، تلاش‌ها برای کاهش مصرف سیمان در روسازی بتنی با چالش‌هایی مواجه شد. هرچند استفاده از مواد جایگزین سیمان مانند خاکستر بادی، سرباره و دوده سیلیسی به‌عنوان راه‌حلی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مطرح شده، اما محدودیت‌های فنی و عملکردی این مواد، امکان جایگزینی کامل کلینکر را غیرمحتمل کرد. به‌عنوان مثال، خاکستر بادی علی‌رغم فراوانی، به دلیل واکنش‌پذیری کم، تنها به مقدار محدودی می‌تواند جایگزین سیمان شود. در مورد سرباره نیز، با وجود اینکه جایگزینی بیشتری ممکن است، اما ممکن است منجر به تأثیرات نامطلوبی بر عملکرد و خواص مکانیکی روسازی بتنی شود. این محدودیت‌ها نشان دادند که کاهش بیشتر مصرف سیمان بدون اثرات منفی بر کیفیت آن به‌سادگی امکان‌پذیر نیست و نیاز به توسعه و راهکارهای جدیدی دارد که بتواند بدون کاهش کیفیت، اثرات زیست‌محیطی را به حداقل برساند (آجایی و همکاران، ۲۰۲۳؛ آنتونی و همکاران، ۲۰۱۲؛ کامارگو پرز و همکاران، ۲۰۲۳؛ حسامی و همکاران، ۲۰۱٤؛ روسالس و همکاران، ۲۰۲۲؛ یاسین و همکاران، ۲۰۲٤؛ زونگ و همکاران، ۲۰۲۳).

سیمان آمیخته با رس کلسینه شده و پودر سنگ‌آهک (LC3) یکی از سیمان‌هایی است که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است و در آن آلومینا از خاک رس کلسینه شده و کربنات از سنگ‌آهک، با یکدیگر واکنش نشان می‌دهند. همچنین، علاوه بر این واکنش پوزولانی، به دلیل خاصیت پرکنندگی سنگ‌آهک و پر شدن منافذ ریز، باعث بهبود عملکرد مکانیکی و دوام این ترکیب (کلینکر، خاک رس کلسینه شده و سنگ‌آهک) می‌شود (آنتونی و همکاران، ۲۰۱۲). از آنجایی که خاک رس و سنگ‌آهک به‌طور گسترده در سراسر جهان در دسترس است، تولید سیمان LC3 امکان‌پذیر است و با مشکلی همراه نمی‌باشد. خاک رس کشورهای مختلف با منشأهای گوناگون مانند: هوازدگی سنگ‌ها، خاک‌های رس دریایی و ... و همچنین سنگ‌آهک از گردوغبار مرمر و ضایعات سنگ‌ها. در تولید سیمان LC3 استفاده می‌گردد (هوانگ و همکاران، ۲۰۲۰). علاوه بر موارد ذکر شده، این نوع سیمان را می‌توان با استفاده از فناوری و تجهیزاتی که در حال حاضر در صنعت سیمان رایج است، تولید کرد و همچنین نیاز به آموزش خاصی ندارد که این امر، یک مزیت متمایز در برابر مواد جایگزینی است که

نیاز به تجهیزات و تولید خاصی دارند (بیشنوی و همکاران، ۲۰۱٤).

در این مطالعه، امکان‌سنجی و پتانسیل استفاده از سیمان LC3 به‌عنوان جایگزینی برای سیمان معمولی در روسازی‌های بتنی، به دلیل مزایای محیط‌زیستی و خواص مکانیکی آن مورد بررسی قرار خواهد گرفت. به‌کارگیری سیمان LC3 در تولید بتن روسازی، نه‌تنها می‌تواند به‌طور چشمگیری از اثرات منفی زیست‌محیطی بکاهد، بلکه هزینه‌های کلی ساخت روسازی را به دلیل مصرف کمتر انرژی نیز کاهش می‌دهد. اگرچه سیمانLC3 پتانسیل خوبی در ارتقاء پروژه‌های روسازی بتنی دارد، اما تاکنون عملکرد آن در روسازی بتنی در هیچ مطالعه‌ای بررسی نشده است. از این‌رو، در این مقاله سعی گردیده تا با معرفی این سیمان جدید و بررسی شاخص‌ها و الزامات کلیدی مرتبط با بتن روسازی مانند خواص مکانیکی، دوام و عوامل محیط‌زیستی، به امکان‌سنجی و مزایای بالقوه استفاده از سیمان LC3 به‌عنوان یک ماده جایگزین در روسازی‌های بتنی پرداخته شود و اثبات شود که سیمان LC3 می‌تواند به‌عنوان یک جایگزین قابل قبول و پایدار برای سیمان معمولی در روسازی‌های بتنی به‌کار گرفته شود یا خیر. این مقاله، به‌عنوان اولین گام در ارزیابی پتانسیل سیمانLC3 برای کاربرد در روسازی‌های بتنی، می‌تواند بینشی ارزشمند ارائه دهد و امید است که زمینه‌ساز تحقیقات آینده در این حوزه باشد.

۲. کائولین[۱]

کائولینیت با فرمول شیمیایی $AL_2Si_2O_5(OH)_4$ یک کانی رسی است و در گروه کانی‌های صنعتی قرار دارد. به خاک‌هایی که غنی از کائولینیت باشند کائولین یا خاک چینی گفته می‌شود. این خاک از خانواده مونتموریلونیت‌ها به دست می‌آید و کانی‌های آن شامل: کائولینیت، هالوزیت، ناکریت و دیکیت می‌باشند (بیشنوی و همکاران، ۲۰۱٤). برای تولید رس کلسینه، خاک رس حاوی کائولینیت را در دمای زیاد قرار می‌دهند. این فرایند، کلسیناسیون نامیده می‌شود. در این فرآیند، ساختار بلوری منظم کائولینیت دچار تخریب شده و به ساختاری بی‌نظم و آمورف به نام متاکائولین (خاک رس کلسینه شده) تبدیل می‌گردد. این تغییر ساختاری، همراه با افزایش سطح ویژه و ایجاد گروه‌های فعال شیمیایی، سبب افزایش قابل توجه واکنش‌پذیری متاکائولین می‌شود. در شکل ۱، تصویری از خاک رس کلسینه شده، یا متاکائولین، نشان داده شده است. انجام فرایند کلسیناسیون خاک رس در محدوده دمایی ۹۰۰–۶۰۰ درجه سلسیوس از اهمیت زیادی برخوردار است؛ زیرا در دماهای زیاد، ماده‌ای به نام مولیت تشکیل می‌شود که یک ماده غیرواکنش‌پذیر شیمیایی است و خواص پوزولانی خود را از دست می‌دهد. فرآیند کلسیناسیون خاک رس و تبدیل کائولین به متاکائولین در واکنش ۱ نشان داده شده است (کائو و همکاران، ۲۰۲۱؛ امین و همکاران، ۲۰۱۲؛ نگوین و همکاران، ۲۰۲۰).

$$AL_2Si_2O_5(OH)_4 \longrightarrow AL_2O_3.2SiO_2 + 2H_2O \quad (۱)$$

۳. ترکیبات سیمان LC3

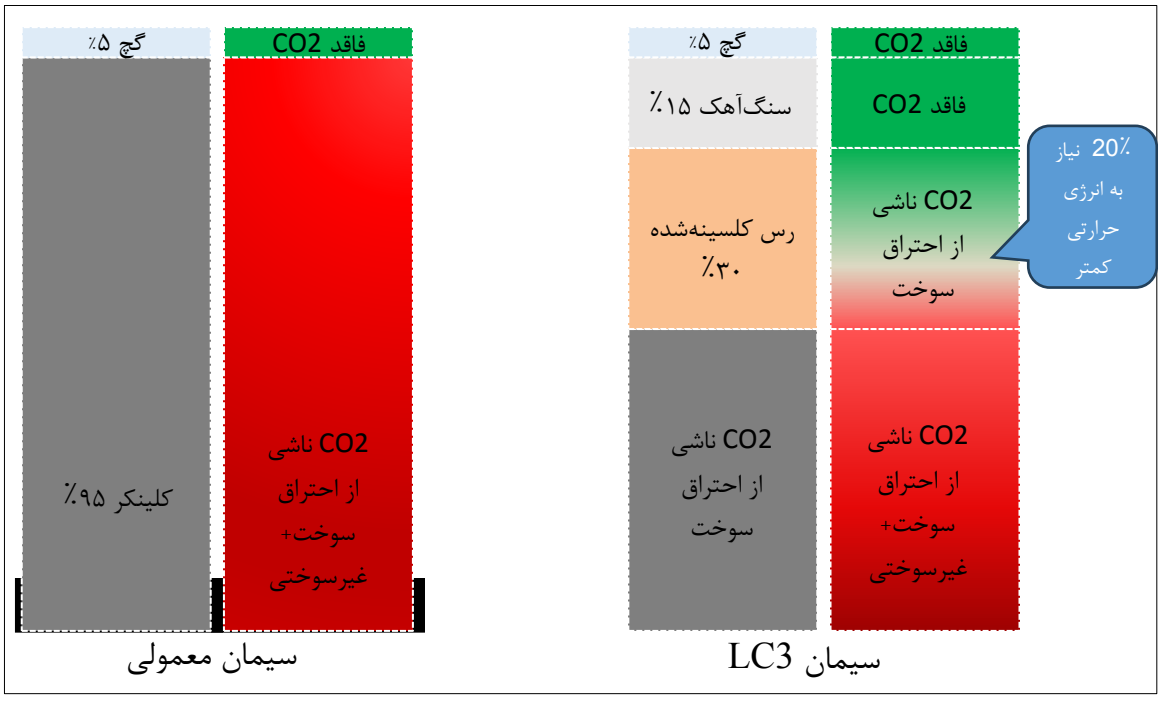
سیمان LC3، یک سیمان مرکب حاوی کلینکر، رس کلسینه شده، پودر سنگ‌آهک و پودر سنگ گچ می‌باشد که با نسبت معین با یکدیگر ترکیب شده‌اند. ایده LC3 بر اساس این مشاهدات است که رس‌های کلسینه حاوی آلومینا با فازهای کربنات از آهک واکنش داده و فازهای کربوآلومینات را که سخت و کریستالی هستند تولید می‌کنند (کائو و همکاران، ۲۰۲۱).

[۱]- Kaolin

شکل ۱. خاک رس کلسینه‌شده (زونینو، ۲۰۲۰)

در تحقیقات گذشته، استفاده از رس کلسینه شده به‌عنوان مواد پوزولانی به‌خوبی مورد تأیید قرار گرفته است و سنگ‌آهک نیز به‌طور گسترده به‌عنوان پرکننده در سیمان استفاده می‌گردید (کائو و همکاران، ۲۰۲۱؛ جان و همکاران، ۲۰۱۸). ایده ترکیب این دو برای دستیابی به سطوح جایگزینی کلینکر بالاتر برای اولین بار در سال ۲۰۱۲ گزارش شد (آنتونی و همکاران، ۲۰۱۲). علت این ایده، افزایش قابل توجه در تشکیل فازهای کربوآلومینات در ترکیب سیمان LC3 بوده است که به‌عنوان مبنایی برای عملکرد قابل مقایسه با سیمان پرتلند معمولی مورد توجه قرار گرفت (کریشنان، ۲۰۱۹). ترکیبات سیمان LC3در مقایسه با سیمان پرتلند معمولی در شکل ۲ نشان داده شده است.

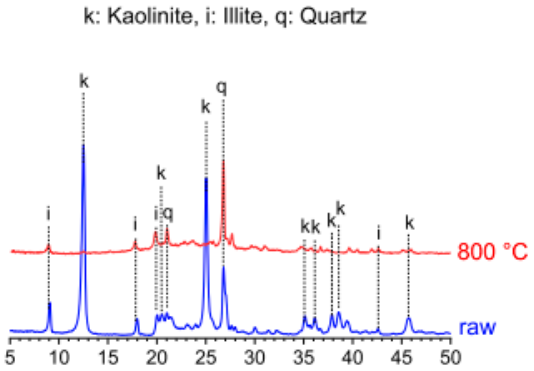
در بیشتر مطالعات تا نسبت ۵۰ درصد جایگزینی کلینکر مورد تأیید قرار گرفته است. این ترکیب با نسبت ۵۰ درصد کلینکر، ۳۰ درصد خاک رس کلسینه شده، ۱۵ درصد پودر سنگ‌آهک و ۵ درصد گچ پیشنهاد شده است (کریشنان و بیشنوی، ۲۰۲۰). این سیمان جدید LC3-50 نام‌گذاری گردید که عدد ۵۰ در آن بیانگر درصد سیمان پرتلند موجود است. این سیمان قابلیت جایگزینی زیاد سیمان با خاک رس کلسینه شده را داراست. تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از این ترکیبات می‌تواند یک جایگزین مناسب و مؤثر برای سیمان‌های معمولی باشد و می‌تواند به کاهش آلودگی‌های محیط‌زیستی ناشی از تولید سیمان پرتلند کمک نماید (آنتونی و همکاران، ۲۰۱۲).



شکل ۲. مقایسه ترکیب سیمان پرتلند معمولی و سیمان LC3 (باربوئیا و همکاران، ۲۰۲۳)

مطابق شکل ۲، مقدار قابل‌توجهی از مواد تشکیل‌دهنده سیمان LC3، گاز کربن دی‌اکسید تولید نمی‌کنند و از این‌رو دارای مزیت محیط‌زیستی می‌باشند.

در مورد دمای مورد نیاز برای کلسیناسیون کامل، اختلاف نظر وجود دارد. احتمالاً به دلیل شرایط مختلف انتقال حرارت در انواع تجهیزات، دمای مورد نیاز جهت کلسیناسیون مختلف گزارش شده است. به‌طور کلی، توافق بر این است که افزایش دما به بیش از ۹۰۰ درجه سلسیوس منجر به تبلور مجدد (کریستاله شدن) و از دست رفتن خاصیت پوزولانی خاک رس می‌شود و استفاده از آن در محیط بتن بی‌اثر خواهد بود و تنها نقش پرکننده (فیلر) را خواهد داشت. طبق مطالعات، آزمایش XRD[1] مناسب‌ترین روش جهت اطمینان از کلسینه شدن صحیح خاک رس است (آلوجاس و همکاران، ۲۰۱۵). شکل ۳، منحنی XRD خاک رس خام (رنگ آبی) و کلسینه شده در دمای ۸۰۰ درجه سلسیوس (رنگ قرمز) را نشان می‌دهد. کاهش یا ناپدید شدن پیک‌های مربوط به کائولینیت پس از حرارت ۸۰۰ درجه سلسیوس، نشان‌دهنده تجزیه این فاز و تبدیل آن به متاکائولین می‌باشد (دو و پنگ، ۲۰۲۰).



شکل ۳. نمودار XRD برای خاک رس خام و خاک رس کلسینه شده (دو و پانگ، ۲۰۲۰)

دیگر ماده موجود در سیمان LC3 پودر سنگ‌آهک است. این ماده نیز به میزان کافی و مناسب موجود و تولید می‌گردد (فرناندز و همکاران، ۲۰۱۱). به‌طور گسترده در مطالعات گزارش شده که تنها بخش کوچکی از پودر سنگ‌آهک در سیمان LC3 با فازهای آلومینا در سیمان و خاک رس کلسینه شده واکنش نشان می‌دهد تا فازهای کربوآلومینات تولید کند و بخش قابل‌توجهی از سنگ‌آهک به‌عنوان یک پرکننده و بدون واکنش عمل می‌کند (بریکی و همکاران، ۲۰۲۱؛ اسکریونر و همکاران، ۲۰۱۵). بنابراین، استفاده از کربنات‌هایی با خلوص کمتر و سایر مواد زائد قابل توجیه می‌باشد (کریشنان و همکاران, ۲۰۱۸).

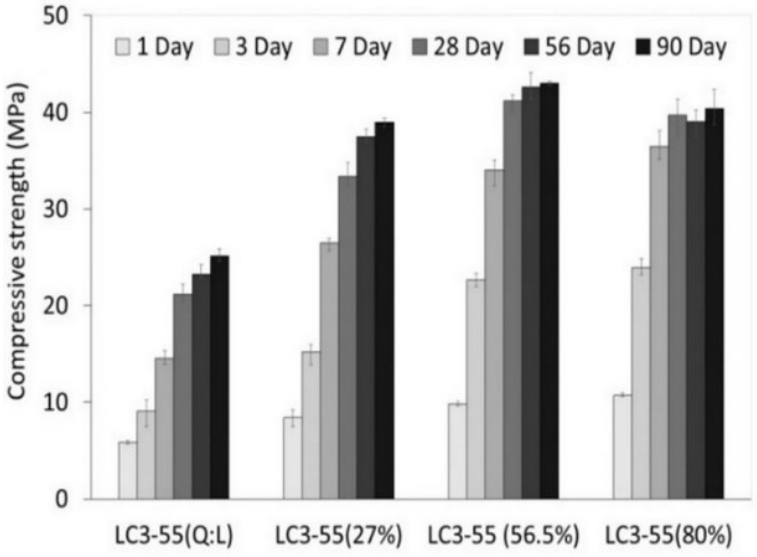
٤. خواص مکانیکی سیمان LC3

سیمان LC3 به‌عنوان یکی از نوآورانه‌ترین جایگزین‌های سیمان معمولی در سال‌های اخیر توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است (نگوین و کستل، ۲۰۲۰). در این بخش از مقاله، با تمرکز بر خواص مکانیکی سیمان LC3، قابلیت‌های این سیمان در برآوردن حداقل الزامات مکانیکی روسازی‌های بتنی (ACI325، ۲۰۱۵) مورد بررسی قرار می‌گیرد. با بررسی یافته‌های پژوهش‌های پیشین، هدف این است که نشان داده شود سیمان LC3، می‌تواند به‌عنوان یک جایگزین قابل قبول و پایدار برای سیمان معمولی در روسازی‌های بتنی به کار گرفته شود.

[1]- X-Ray Diffraction

مطالعات زیادی روی مشخصات مکانیکی بتن در ادبیات گذشته موجود است. اکثر نتایج نشان می‌دهد که مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های بتن حاوی رس کلسینه شده و سنگ‌آهک مشابه نمونه‌های شاهد، که با سیمان پرتلند معمولی ساخته شده بودند، است (آوت و اسکریونر، ۲۰۱۸؛ مارتیرنا و همکاران، ۲۰۱۸؛ مراغه‌چی و همکاران، ۲۰۱۹). برای سایر سنین نیز گزارش‌ها نشان می‌دهد که مقاومت سه روزه بتن LC3 کمی کمتر از سیمان پرتلند معمولی و بیشتر از سیمان‌های حاوی سرباره یا خاکستر بادی است (دهنداپانی و همکاران، ۲۰۱۸). سان نیکولاس و همکاران در سال ۲۰۱٤ از رس کلسینه شده برای تولید نمونه‌های بتن به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که در روزهای اولیه، مقاومت فشاری نمونه شاهد بیشتر از نمونه‌های حاوی خاک رس کلسینه شده است. اما با افزایش دوره عمل‌آوری، نمونه‌های حاوی سیمان LC3 مقاومت فشاری بیشتری را از خود نشان دادند.

کریشنان و بیشنوی (۲۰۲۰) در تحقیقی در مورد تأثیر میزان کائولینیت موجود در خاک رس بر مقاومت فشاری بتن، به این نتیجه رسیدند که تا حدود ٦۰ درصد محتوای کائولینیت در خاک رس، منجر به افزایش مقاومت فشاری خواهد شد و مقادیر بیشتر از این مزیت خاصی را نشان نمی‌دهد.

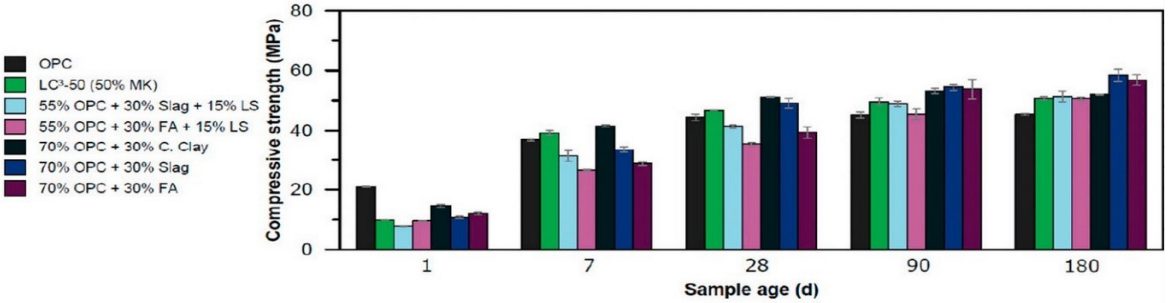


شکل ٤. تأثیر محتوای کائولینیت خاک رس کلسینه‌شده (٪۲۷، ٥٦٪٥ و ۸۰٪) بر مقاومت فشاری (کریشنان و بیشنوی، ۲۰۲۰)

زونینو و اسکیونر (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای، مقایسه جالبی بین مقاومت فشاری سیمان‌های حاوی مواد جایگزین متفاوت در سنین مختلف انجام دادند. در این مقایسه، مشخص شد که سیمان LC3 مقاومت مشابه و قابل مقایسه‌ای با سیمان معمولی و سایر مواد جایگزین سیمان در سنین مختلف دارد (شکل ٤). مطابق شکل ٥، نمونه حاوی سیمان LC3 (ستون سبز رنگ) در سن ۲۸ روز، مقاومت فشاری ٤۷ مگاپاسکال را کسب کرده که نسبت به نمونه شاهد نیز مقاومت بیشتری را از خود نشان داده است. همچنین، مطابق استاندارد روسازی‌های بتنی (ACI325، ۲۰۱٥) حداقل مقاومت فشاری لازم در این سن ۲۸ مگاپاسکال تعیین شده، که بتن حاوی سیمان LC3 این الزام را رعایت نموده است و نشان می‌دهد که از این حیث پتانسیل استفاده در روسازی‌های بتنی را دارا می‌باشد.

در پژوهش شیخ و همکاران در سال ۲۰۲۳، به ارزیابی مقاومت کششی غیرمستقیم و مقاومت خمشی بتن ساخته‌شده با سیمان LC3 پرداخته شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از سیمان LC3 نسبت به سیمان پرتلند معمولی موجب بهبود مشخصات ذکر شده می‌گردد. این تحقیق بیان می‌کند که به‌طور متوسط ٦ درصد افزایش در مقاومت کششی غیرمستقیم و همچنین ۷ درصد افزایش در مقاومت خمشی بتن مشاهده شده است.

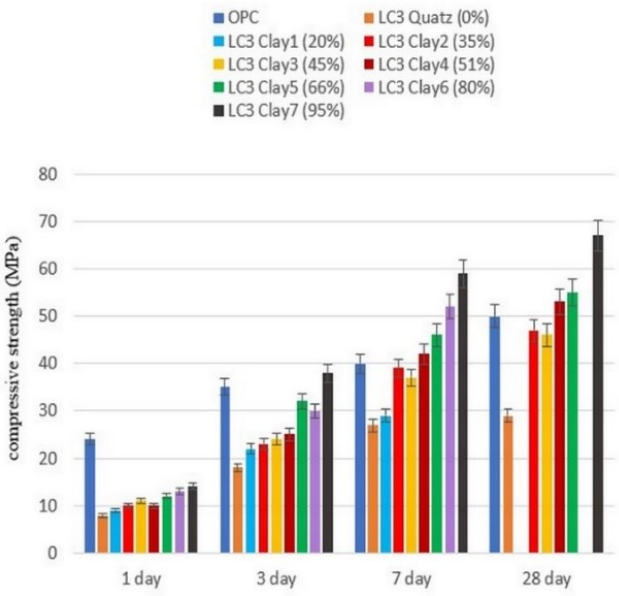
مطالعات دیگر نیز نشان داده‌اند که افزودن سیمان LC3به بتن، به دلیل اندازه ریزتر ترکیبات آن و تشکیل ژل‌های سیلیکاتی ناشی از واکنش‌های سیلیکات و آلومینات موجود در LC3، مقاومت کششی و خمشی مشابهی با بتن معمولی ایجاد می‌کند (امانوئل و بیشنوی، ۲۰۲۳؛ کریشنان و همکاران، ۲۰۲۰؛ پوروشوتام ردی و همکاران، ۲۰۲۱؛ روآن و همکاران، ۲۰۲۲). این یافته‌ها حاکی از آن است که بتن حاوی LC3، به دلیل مشابهت مقاومت کششی و خمشی با سیمان معمولی و با دستیابی به الزامات مورد نیاز کششی و خمشی برای کاربرد در روسازی بتنی، می‌تواند به‌عنوان یک جایگزین مناسب و امیدبخش برای بتن‌های معمولی در روسازی بتنی مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۵. مقایسه مقاومت فشاری سیمان LC3 با دیگر سیمان‌ها (زونینو و اسکیونر، ۲۰۲۱)

در تحقیقی که آبراهام و همکاران (۲۰۲۱) انجام دادند، مقاومت فشاری بتن برای سنین ۱، ۳، ۷ و ۲۸ روز اندازه‌گیری شد. ترکیب این نمونه‌های بتن LC3 شامل: ۵۰٪ کلینکر، ۳۰٪ رس کلسینه، ۱۵٪ پودر سنگ‌آهک و ۵٪ گچ بوده که برای هر سن، نمونه‌های بتنی شامل یک طرح شاهد و هشت طرح دیگر بر اساس درصد کائولینیت موجود در خاک رس ساخته شد. رس‌های موجود در این هشت طرح به ترتیب شامل صفر درصد، ۲۰٪، ۳۵٪، ٤٥٪، ۵۱٪، ٦٦٪، ۸۰٪ و ۹۵٪ کائولینیت بوده است. با توجه به شکل ٦، بتن‌های حاوی سیمان LC3 در سنین اولیه نسبت به طرح شاهد مقاومت فشاری کمتری نشان می‌دهند؛ اما به مرور زمان و کامل شدن واکنش‌های پوزولانی، مقاومت فشاری آن‌ها افزایش یافته و حتی از مقاومت طرح شاهد نیز فراتر رفته است.

رس‌های کلسینه شده، با مصرف کلسیم هیدروکسید (حاصل از هیدراته شدن خمیر سیمان) بهبود قابل توجهی در ریزساختار و مقاومت فشاری بتن ایجاد می‌کند. اما این بهبود وابسته به میزان فازهای آمورف و واکنش‌پذیر موجود در رس کلسینه شده می‌باشد. در رس‌های کلسینه با محتوای کم کائولینیت (حدود ٤٠ درصد)، به دلیل کمبود این فازهای آمورف، ممکن است مقاومت فشاری آن را اندکی کاهشی دهد. با توجه به اهمیت مقاومت فشاری در تحمل بارهای وارده بر روسازی، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که سیمان LC3 با کائولینیت نه‌چندان زیاد نیز مقاومت فشاری قابل قبولی برای روسازی بتنی ارائه می‌دهد که این امر نیز بیانگر پتانسیل بالای LC3 برای استفاده در روسازی‌های بتنی می‌باشد.



شکل ٦. مقاومت فشاری سنین مختلف بتن LC3 حاوی درصدهای متفاوت کائولینیت (آبراهام و همکاران، ۲۰۲۱)

ابوبکر و همکاران در سال ۲۰۲۲ به تحقیقی در مورد تأثیر افزودن متاکائولین (خاک رس کلسینه شده) و الیاف فولادی بر خواص مکانیکی بتن غلتکی روسازی پرداختند. برای این منظور، هفت طرح اختلاط طراحی و مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از ترکیب ۱۵٪ متاکائولین و ٤٥ کیلوگرم بر متر مکعب الیاف فولادی، موجب افزایش ٤٢٪ مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌گردد. همچنین، در این پژوهش، مشخص شد که ترکیب ۲۰٪ متاکائولین و ٦۰ کیلوگرم بر متر مکعب الیاف فولادی، منجر به افزایش مقاومت کششی تا ۲۹٪ می‌شود. همچنین، در این تحقیق نشان داده شد که استفاده از ۲۰٪ متاکائولین به‌تنهایی نیز موجب افزایش مقاومت کششی و فشاری در بتن غلتکی روسازی می‌شود.

نتایج بررسی‌های صورت پذیرفته در مورد خواص مکانیکی سیمان LC3 نشان می‌دهد که این سیمان جدید، پتانسیل قابل توجهی در برآورده کردن الزامات روسازی‌های بتنی دارد. نتایج مطالعات مختلف بیانگر آن است که بتن‌های حاوی LC3 قادر به دستیابی به خواص مکانیکی کلیدی مانند مقاومت فشاری، کششی و خمشی مطابق با استانداردهای روسازی بتنی هستند و در سنین مختلف با سیمان معمولی قابل مقایسه بوده و در برخی موارد حتی عملکرد بهتری را ارائه می‌کنند. همچنین، بهبود تدریجی مقاومت فشاری با گذشت زمان و تکمیل واکنش‌های پوزولانی، نشان‌دهنده پایداری بلندمدت این نوع بتن است که در کنار کاهش قابل‌توجه مصرف سیمان و مزایای زیست‌محیطی آن، می‌توان نتیجه گرفت که سیمان LC3 به‌عنوان یک جایگزین مناسب و امیدوارکننده برای سیمان معمولی در ساخت روسازی‌های بتنی مطرح و پتانسیل زیادی برای به‌کارگیری در این حوزه دارد.

۵. دوام و نفوذپذیری سیمان LC3

دوام و نفوذپذیری به‌عنوان دو ویژگی مهم در تعیین عمر مفید روسازی‌های بتنی شناخته می‌شوند. سیمان LC3 توانسته است توجه محققان را به دلیل پتانسیل زیاد آن در بهبود دوام و کاهش نفوذپذیری جلب کند. این ویژگی‌ها نقش مهمی در افزایش مقاومت روسازی‌های بتنی در برابر عوامل مخرب محیطی مانند چرخه‌های ذوب و یخبندان، نفوذ آب، حمله سولفات‌ها و کلریدها و دیگر مواد خورنده دارند.

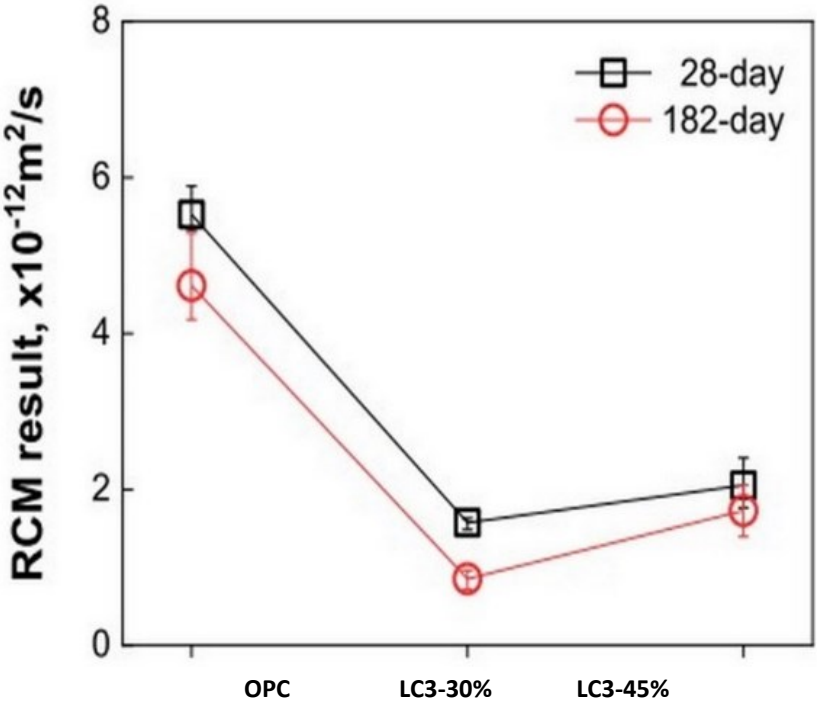
در این بخش از مقاله، با تمرکز بر دوام و نفوذپذیری سیمان LC3، تلاش می‌شود تا ارتباط این خصوصیات با بهبود طول عمر و ارتقاء کیفیت روسازی‌های بتنی بررسی شود. هدف این است که نشان داده شود سیمان LC3، به دلیل کاهش نفوذپذیری و افزایش دوام، می‌تواند به‌عنوان یک ماده جایگزین مؤثر و مفید در ساخت روسازی‌های بتنی مورد استفاده قرار گیرد.

در سال ۲۰۱۸، آکاشا و عبدالله تحقیقی پیرامون جایگزینی متاکائولین در سیمان‌های مستغرق در محلول سدیم سولفات ۵ درصد انجام دادند. در این تحقیق، نمونه‌هایی با جایگزینی صفر، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد متاکائولین ساخته شده و مقاومت سولفاتی آن‌ها از طریق اندازه‌گیری انبساط نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که سیلیکای موجود در متاکائولین با آهک آزاد شده طی فرآیند هیدراتاسیون ترکیب شده و ژل C-A-S-H[1] اضافی را تولید می‌کند. اگرچه این ژل ثانویه چگالی کمتری نسبت به ژل C-A-S-H اولیه دارد، اما نقش مهمی در کاهش نفوذپذیری و افزایش مقاومت سولفاتی دارد. طبق این تحقیق، تشکیل ژل C-A-S-H ثانویه و مصرف آب آهک در واکنش‌های پوزولانی متاکائولین، عامل اصلی افزایش مقاومت سولفاتی سیمان حاوی متاکائولین است.

یو و همکاران (۲۰۱۸) با مطالعات آزمایشگاهی، مکانیزم خرابی سیمان‌های LC3، تحت حمله سولفاتی را ارزیابی کرده‌اند. نتایج نشان داده که سیمان‌های LC3 نسبت به سیمان معمولی، نرخ انبساط، مدول دینامیک و کاهش جرم کمتری دارند. این محققان بیان کردند که ترکیب سنگ‌آهک و رس کلسینه شده موجب بهبود تخلخل و کاهش نفوذپذیری بتن می‌گردد. این بهبود در نفوذپذیری، از ورود سولفات جلوگیری کرده و مانع تشکیل ترکیبات مضر و خورنده در بتن می‌گردد. نفوذپذیری بتن مورد استفاده در روسازی، مستقیماً بر میزان ورود عوامل مخرب مانند سولفات‌ها، کلریدها، و دیگر مواد خورنده به درون روسازی تأثیر می‌گذارد. در روسازی‌های بتنی، که به‌طور مداوم در معرض شرایط محیطی سخت و مخرب قرار دارند، کنترل نفوذپذیری برای جلوگیری از ورود و تخریب‌های ناشی از این عوامل مخرب بسیار مهم است. این فرایندها می‌توانند به ترک‌خوردگی، کاهش مقاومت مکانیکی و در نهایت ایجاد انواع خرابی‌ها در روسازی بتنی منجر شوند. به همین دلیل، روسازی‌های بتنی با نفوذپذیری کم، که توانایی جلوگیری از ورود این مواد مخرب را دارند، عمر مفید طولانی‌تری دارند و نیاز به تعمیر و نگهداری کمتری دارند. سیمان LC3 به دلیل کاهش نفوذپذیری و بهبود مقاومت در برابر حملات سولفاتی، پتانسیل زیادی برای استفاده در روسازی‌های بتنی دارد. کاهش نفوذپذیری مواد خورنده و سولفاتی در بتن حاوی سیمان LC3، به افزایش عمر مفید روسازی‌های بتنی و کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات کمک می‌کند، که این امر نشان‌دهنده قابلیت این سیمان به‌عنوان یک جایگزین پایدار و مقاوم در روسازی‌های بتنی است.

دو و پنگ (۲۰۲۰) با جایگزینی ۳۰ و ٤٥ درصد سیمان معمولی با سیمان LC3 به بررسی مقاومت نمونه‌های بتنی در برابر نفوذ کلر پرداختند. نتایج نشان داد که نفوذ یون‌های کلرید به دلیل تخلخل کمتر و متراکم‌تر بودن بتن که به واکنش سنگ‌آهک و خاک رس کلسینه شده نسبت داده می‌شود، به‌شدت کاهش پیدا کرده است (شکل ۷).

[1]- Calcium-Aluminum-Silicate-Hydrate



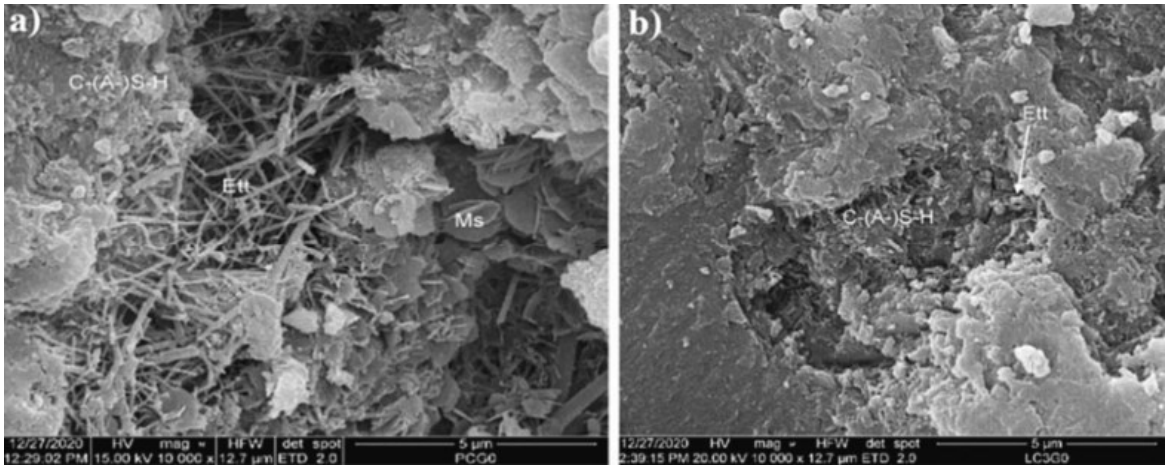
شکل ۷. مقاومت کلریدی مخلوط‌های مختلف بتن

گنگ و همکاران (۲۰۲۲) در تجزیه و تحلیل ترکیب سیمان LC3 نشان دادند که در فرآیند هیدراتاسیون، محصولات مختلفی از جمله کربوآلومینات‌ها، اتریت و ژل C-A-S-H تشکیل می‌شوند. این محصولات هیدراتاسیون اضافی نقش مهمی در تراکم ریزساختار و پر شدن فضاهای خالی بین ذرات بتن دارند. تراکم ریزساختار باعث می‌شود ساختار منافذ بتن به‌طور قابل توجهی بهبود یابد و موجب کاهش نفوذپذیری بتن می‌شود. نتایج مشابهی در تحقیقات متعدد برای بهبود ریزساختار و کاهش نفوذ یون کلر به نمونه‌های حاوی سیمان LC3 مشاهده شده است (دهنداپانی و سانتانام، ۲۰۲۰؛ مراغه‌چی و همکاران، ۲۰۱۹؛ نگوین و همکاران، ۲۰۲۰؛ سوی و همکاران، ۲۰۱۹). مانند نفوذ سولفات‌ها که در بخش قبل بحث شد، نفوذ یون‌های کلرید به روسازی‌های بتنی نیز می‌تواند باعث واکنش‌های تخریبی و در نهایت کاهش عمر مفید روسازی بتنی شود. در مناطقی که روسازی‌های بتنی در معرض نمک‌های یخ‌زدا یا در نوار ساحلی قرار دارند، جلوگیری از نفوذ کلرید اهمیت ویژه‌ای دارد زیرا کلریدها می‌توانند موجب آسیب به ساختار روسازی بتنی شوند. بنابراین، سیمان LC3 می‌تواند به‌عنوان یک جایگزین جدید و مؤثر، این نیاز اساسی را برآورده نماید. در شکل ۸، تصویر SEM از مقایسه ریزساختار بتن LC3 و بتن معمولی ارائه شده است. مطابق شکل، ساختار متراکم‌تر همراه با تخلخل کمتر در بتن حاوی LC3 مشاهده می‌گردد (ایجاز و همکاران، ۲۰۲٤).

از مزیت‌های مهم دیگر در جلوگیری از نفوذ یون‌های کلر به درون روسازی‌های بتنی، کاهش خوردگی آرماتورهای فولادی در روسازی‌های بتن مسلح مانند JRCP[۱] و CRCP[۲] می‌باشد که در پژوهش‌های مختلف کاهش خوردگی آرماتورهای فولادی در بتن حاوی سیمان LC3 تأیید شده است (اجبوه و همکاران، ۲۰۲۳؛ گو، ۲۰۲۰؛ نگوین و کاستل، ۲۰۲۰).

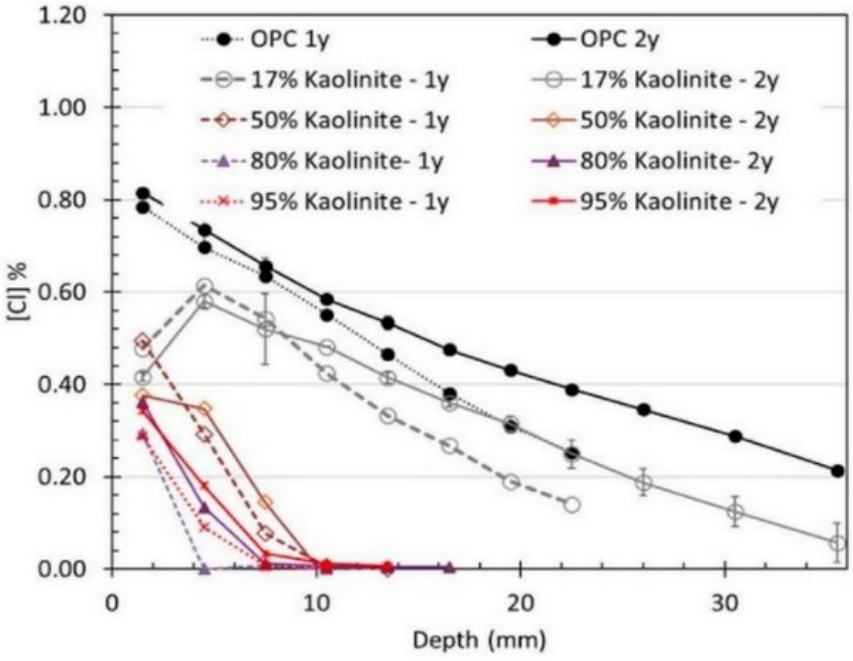
[۱]- Jointed Reinforced Concrete Pavement

[2]- Continuously Reinforced Concrete Pavement



شکل ۸. مقایسه ریزساختار: الف) سیمان معمولی و ب) سیمان LC3 به کمک تصاویر SEM (ایجاز و همکاران، ۲۰۲٤)

در تحقیقی، اسکریونر و همکاران (۲۰۱۸) به این مسئله که سیمان‌های حاوی رس کلسینه شده و آهک تا چه اندازه می‌توانند در برابر نفوذ یون‌های کلر مقاومت از خود نشان دهند و از تخریب بتن جلوگیری کنند، پرداختند. در این تحقیق، نمونه‌های حاوی رس کلسینه شده و آهک با درصدهای مختلف کائولینیت طی بازه زمانی یک الی دو سال در معرض یون‌های کلر قرار گرفته‌اند. همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است، در سیمان حاوی رس حرارت دیده و آهک که مقدار رس حرارت دیده و آهک که مقدار کائولینیت آن بیش از ۵۰ درصد یا بیشتر بوده و فقط ۵۰ درصد از سیمان تشکیل شده بود، مقاومت بسیار زیادی در برابر نفوذ یون‌های کلر مشاهده است. طبق نتایج این پژوهش، مقدار نفوذ یون‌ها در نمونه‌های حاوی سیمان LC3 طی مدت دو سال، کمتر از ۱۰ میلی‌متر بوده است؛ در حالی که این مقدار در نمونه سیمان معمولی بیش از ۳۰ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است (اسکرایونر و همکاران، ۲۰۱۸).



شکل ۹. مقدار نفوذ یون کلر در سیمان LC3 حاوی مقدار کائولینیت متفاوت (اسکریونر و همکاران، ۲۰۱۸)

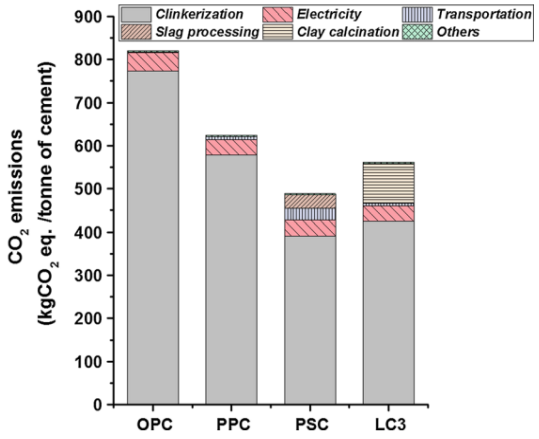
ابوبکر و همکاران (۲۰۲۲) در تحقیقی، به بررسی مقاومت بتن غلتکی روسازی حاوی متاکائولین در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان پرداختند. آن‌ها نمونه‌های حاوی ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد متاکائولین را در معرض صفر، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ چرخه ذوب و انجماد قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن متاکائولین، به دلیل فعالیت پوزولانی متاکائولین و بهبود ریزساختار بتن غلتکی، موجب کاهش افت وزنی و همچنین کاهش افت مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از قرارگیری در سیکل‌های ذوب و یخبندان می‌شود.

تحقیقات بررسی شده در این بخش نشان می‌دهد که استفاده از سیمان LC3 به‌جای سیمان معمولی، به دلیل تشکیل محصولات هیدراتاسیون اضافی و بهبود ریزساختاری بتن، منجر به کاهش نفوذپذیری و افزایش دوام بتن می‌شود. بهبود این ویژگی‌ها مستقیماً به بهبود عملکرد روسازی‌های بتنی کمک کرده و موجب افزایش عمر مفید روسازی‌های بتنی می‌گردد.

٦. ارزیابی محیط‌زیستی سیمان LC3

مسائل محیط‌زیستی همواره یکی از موضوعات مهم در روسازی‌های بتنی بوده است. با توجه به تأثیرات منفی تولید سیمان سنتی بر محیط‌زیست و مصرف آن در ساخت روسازی بتنی، تلاش‌های فراوانی برای توسعه سیمان‌های پایدارتر در حوزه‌های مختلف صورت پذیرفته است. یکی از سیمان‌های دوستدار محیط‌زیست، سیمان LC3 بوده است. در نتایج تحقیقات پژوهشگران بیان شده که تولید سیمان حاوی خاک رس حرارت‌دیده و سنگ‌آهک پودر شده، می‌تواند در حدود ۳۰ درصد از تولید گاز کربن دی‌اکسید (CO_2) در مقایسه با سیمان معمولی بکاهد. مهم‌ترین دلیل کاهش این آلودگی، مربوط به کاهش انرژی الکتریسیته مصرفی بوده است. همچنین، بیان شده است که یکی دیگر از محورهای کاهش انرژی مصرفی، مربوط به آسیاب شدن راحت‌تر خاک رس نسبت به کلینکر سیمان می‌باشد (گتو و همکاران، ۲۰۱۹؛ جوزف و همکاران، ۲۰۱٦؛ سانچز بریل و همکاران، ۲۰۱٦).

در شکل ۱۰، مقایسه میزان انتشار گاز CO_2 در چهار نوع سیمان مختلف (سیمان پرتلند معمولی(OPC)، سیمان حاوی خاکستر بادی (PPC)، سیمان حاوی سرباره کوره (PSC) و سیمان حاوی خاک رس کلسینه و سنگ‌آهک (LC3)) نشان داده شده است که کاهش تولید CO_2 توسط LC3 نسبت به سیمان معمولی قابل ملاحظه می‌باشد **(گتو و همکاران، ۲۰۱۹)**.



شکل ۱۰. مقایسه میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید در سیمان‌های مختلف (گتو و همکاران، ۲۰۱۹)

در تولید سیمان معمولی، کلینکر در دمای حدود ۱۴۰۰ درجه سلسیوس حرارت می‌بیند، در حالی که حرارت مورد نیاز برای کلسیناسیون خاک رس حدود ۸۰۰ درجه سلسیوس بوده است و همین تفاوت منجر به کاهش مصرف انرژی در فرآیند تولید سیمان LC3 و در نتیجه کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌گردد (کانسیو دیاز و همکاران، ۲۰۱۷؛ گتو و همکاران، ۲۰۱۶).

با توجه به بررسی‌های صورت پذیرفته، استفاده از سیمان LC3 به‌عنوان یک جایگزین پایدار برای سیمان معمولی در روسازی‌های بتنی، می‌تواند به کاهش چشمگیر انتشار گازهای گلخانه‌ای و تأثیرات منفی زیست‌محیطی آن کمک کند. این امر به‌ویژه در شرایطی که دغدغه‌های زیست‌محیطی و تغییرات آب‌وهوایی اهمیت فراوانی پیدا کرده‌اند، اهمیت بیشتری می‌یابد و LC3 را به‌عنوان یک گزینه پایدار و دوستدار محیط‌زیست در ساخت روسازی بتنی مطرح می‌کند.

۷. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، پتانسیل سیمان LC3 به‌عنوان یک جایگزین پایدار برای سیمان معمولی در ساخت روسازی‌های بتنی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که بتن حاوی سیمان LC3 با ارائه ویژگی‌های قابل قبول مکانیکی و دوام زیاد، قادر به برآورده‌سازی الزامات استاندارد، برای کاربرد در روسازی‌های بتنی بوده است. بهبود خواص مکانیکی مانند مقاومت فشاری، کششی و خمشی در بتن‌های حاوی سیمان LC3، همراه با کاهش نفوذپذیری و مقاومت بهتر در برابر عوامل مخرب محیطی مانند چرخه‌های ذوب و یخبندان، نفوذ آب، حمله سولفات‌ها و کلریدها، از جمله مزایای استفاده از این سیمان در روسازی‌های بتنی است که می‌تواند نقش مهمی در کاهش هزینه‌های ساخت و نگهداری روسازی‌های بتنی ایفا کند. علاوه بر این، به‌کارگیری سیمان LC3 در روسازی‌های بتنی می‌تواند به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و تأثیرات منفی زیست‌محیطی نیز کمک کند.

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که سیمان LC3 با دارا بودن ویژگی‌های مطلوب مکانیکی، دوام زیاد و مزایای زیست‌محیطی، می‌تواند به‌عنوان یک جایگزین قابل قبول و دوستدار محیط‌زیست برای سیمان معمولی در ساخت روسازی‌های بتنی مورد استفاده قرار گیرد و به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در حوزه ساخت روسازی‌های بتنی کمک نماید.

۸ مراجع

Abraham, R., Neelakantan, T. R., Chokkalingam, R. B. and John, E. 2021. "Blended cement using calcined clay and limestone for sustainable development-A review". Proceedings of SECON2020, pp. 701-710. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55115-5_64

Abu-Bakr, M., Mahmood, H. F. and Mohammed, A. A. 2022. "Investigation of metakaolin and steel fiber addition on some mechanical and durability properties of roller compacted concrete". Case Stud. Constr. Mater., 16: e01136. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01136

ACI Committee 325. 2015. "Concrete Pavement Construction Guide".

Ajayi, J. A., Gana, A. J., Adanikin, A. and Busari, A. 2023. "Mitigation of alkali- silica reactions in concrete pavements using supplementary cementitious materials". Mater. Today: Proceed., 86(C): 59-66. https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.02.257

Akasha, A. M. and Abdullah, J. M. 2018. "Sulfate resistance of cement mortar containing metakaolin". pp. 8-14. https://doi.org/10.1007/978-94-024-1207-9_2

Alujas, A., Fernández, R., Quintana, R., Scrivener, K. L. and Martirena, F. 2015. "Pozzolanic reactivity of low grade kaolinitic clays: Influence of calcination temperature and impact of calcination products on OPC hydration". Appl. Clay Sci., 108: 94-101. https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.01.028

Amin, N., Alam, S., Gul, S. and Muhammad, K. 2012. "Activation of clay in cement mortar applying mechanical, chemical and thermal techniques". Adv. Cement Res., 24(6): 319-324. https://doi.org/10.1680/adcr.11.00020

Andrew, R. M. 2018. "Global CO2 emissions from cement production". Earth Syst. Sci. Data, 10(1): 195-217. https://doi.org/10.5194/essd-10-195-2018

Antoni, M., Rossen, J., Martirena, F. and Scrivener, K. 2012. "Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone". Cement Concrete Res., 42(12): 1579-1589. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.09.006

Avet, F. and Scrivener, K. 2018. "Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of limestone calcined clay cement (LC3)". Cement Concrete Res., 107: 124-135. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.016

Barbhuiya, S., Nepal, J. and Das, B. B. 2023. "Properties, compatibility, environmental benefits and future directions of limestone calcined clay cement (LC3) concrete: A review". J. Build. Eng., 79: 107794. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107794

Bishnoi, S., Maity, S., Mallik, A., Joseph, S. and Krishnan, S. 2014. "Pilot scale manufacture of limestone calcined clay cement : The Indian experience". Ind. Concrete J., 7: 22-28.

Briki, Y., Avet, F., Zajac, M., Bowen, P., Haha, M. Ben and Scrivener, K. 2021. "Understanding of the factors slowing down metakaolin reaction in limestone calcined clay cement (LC3) at late ages". Cement Concrete Res., 146: 106477. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106477

Camargo-Pérez, N. R., Abellán-García, J. and Fuentes, L. 2023. "Use of rice husk ash as a supplementary cementitious material in concrete mix for road pavements". J. Mater. Res. Tech., 25: 6167-6182. https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2023.07.033

Cancio Díaz, Y., Sánchez Berriel, S., Heierli, U., Favier, A. R., Sánchez Machado, I. R., Scrivener, K. L., Martirena Hernández, J. F. and Habert, G. 2017. "Limestone calcined clay cement as a low-carbon solution to meet expanding cement demand in emerging economies. Dev. Eng., 2: 82-91. https://doi.org/10.1016/j.deveng.2017.06.001

Cao, Y., Wang, Y., Zhang, Z., Ma, Y. and Wang, H. 2021. "Recent progress of utilization of activated kaolinitic clay in cementitious construction materials". Compos. Part B: Eng., 211: 108636. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108636

Chandar, P., Raganathan, S. and Ramachandran, R. 2023. "CO_2 emission analysis of metakaolin and alccofine replaced cement in M40 grade concrete". Environ. Sci. Pollut. Res., 30: 104408-104414. https://doi.org/10.1007/s11356-023-29771-4

Dhandapani, Y. and Santhanam, M. 2020. "Investigation on the microstructure-related characteristics to elucidate performance of composite cement with limestone-calcined clay combination". Cement Concrete Res., 129: 105959. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105959

Dhandapani, Y., Sakthivel, T., Santhanam, M., Gettu, R. and Pillai, R. G. 2018. "Mechanical properties and durability performance of concretes with limestone calcined clay cement (LC3)". Cement Concrete Res., 107, 136-151. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.005

Du, H. and Pang, S. D. 2020. "High-performance concrete incorporating calcined kaolin clay and limestone as cement substitute". Constr. Build. Mater., 264: 120152. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120152

Ejbouh, A., Ech-chebab, A., Hassi, S., Galai, M., Benqlilou, H. and Ebn Touhami, M. 2023. "Durability assessment of LC3-based reinforced concrete under combined chloride-sulfate environment via the EIS technique". Constr. Build. Mater., 366: 130194. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130194

Emmanuel, A. C. and Bishnoi, S. 2023. "Effect of curing temperature and clinker content on hydration and strength development of calcined clay blends". Adv. Cement Res., *35*(1): 12-25. https://doi.org/10.1680/jadcr.21.00197

Fernandez, R., Martirena, F. and Scrivener, K. L. 2011. "The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite". Cement Concrete Res., 41(1): 113-122. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.09.013

Gettu, R., Prakasan, S. and Patel, A. 2016. "Expanding boundaries - process mapping and preliminary assessment of life cycle impact in Indian cement plants- R. Gettu, S. Prakasan, A. Patel, V. Rathi, K. Nagrath, S. Palaniappan, S. Maity. vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich. https://doi.org/10.3218/3774-6_70

Gettu, R., Patel, A., Rathi, V., Prakasan, S., Basavaraj, A. S., Palaniappan, S. and Maity, S. 2019. "Influence of supplementary cementitious materials on the sustainability parameters of cements and concretes in the Indian context". Mater. Struct., 52(1): 10. https://doi.org/10.1617/s11527-019-1321-5

Gong, G., Guo, M., Zhou, Y., Zheng, S., Hu, B., Zhu, Z. and Huang, Z. 2022. "Multiscale investigation on the performance of engineered cementitious composites incorporating PE fiber and limstone calcined clay cement (LC3)". Polym., 14(7): 1291. https://doi.org/10.3390/polym14071291

Guo, F. 2020. "Calcined clay and limestone as partial replacements of portland cement: Electrochemical corrosion behavior of low carbon steel rebar as concrete reinforcement in corrosive environment". Int. J. Electrochem. Sci., 15(12): 12281-12290. https://doi.org/https://doi.org/10.20964/2020.12.27

Hesami, S., Ahmadi, S., Sadeghi, V., & Hassanabadi, M. E. (2014). Evaluation of polyphenylene sulfide and steel fibers on mechanical properties of pervious concrete pavement. *International Journal of Pavement Research and Technology*, *7*, 218–222. https://doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2014.7(3).218

Huang, Z., Huang, Y., Liao, W., Han, N., Zhou, Y., Xing, F., Sui, T., Wang, B. and Ma, H. 2020. "Development of limestone calcined clay cement (LC3) concrete in South China and its bond behavior with steel bar". J. Zhejiang Univ. Sci. A: 21. https://doi.org/10.1631/jzus.A1900111

Ijaz, N., Ye, W. M., Rehman, Z., Ijaz, Z. and Junaid, M. F. 2024. "Global insights into micro-macro mechanisms and environmental implications of limestone calcined clay cement (LC3) for sustainable construction applications". Sci. Total Environ., 907: 167794. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167794

John, V. M., Damineli, B. L., Quattrone, M. and Pileggi, R. G. 2018. "Fillers in cementitious materials-Experience, recent advances and future potential". Cement Concrete Res., 114: 65-78. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.09.013

Joseph, S., Bishnoi, S. and Maity, S. 2016. "An economic analysis of the production of limestone calcined clay cement in India". The Ind. Concrete J., 90: 22-27.

Krishnan, S. 2019. "Hydration and microstructure develoment in limestone calcined clay cement". Indian Institute of Technology, Delhi, India.

Krishnan, S. and Bishnoi, S. 2020. "A numerical approach for designing composite cements with calcined clay and limestone". Cement Concrete Res., 138: 106232. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106232

Krishnan, S., Kanaujia, S. K., Mithia, S. and Bishnoi, S. 2018. "Hydration kinetics and mechanisms of carbonates from stone wastes in ternary blends with calcined clay". Constr. Build. Mater., 164: 265-274. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.240

Krishnan, S., Gopala Rao, D. and Bishnoi, S. 2020. "Why low-grade calcined clays are the ideal for the production of limestone calcined clay cement (LC3)". pp. 125-130. https://doi.org/10.1007/978-981-15-2806-4_14

Maraghechi, H., Avet, F., Wong, H., Kamyab, H. and Scrivener, K. 2019. "Correction to: Performance of limestone calcined clay cement (LC3) with various kaolinite contents with respect to chloride transport". Mater. Struct., 52(6); 124. https://doi.org/10.1617/s11527-019-1415-0

Martirena, F., Diaz, E., Rocha, D., Maraghechi, H. and Scrivener, K. L. 2018. "Performance of concrete made with a calcined clay-limestoneportland cement exposed to natural conditions". 6th International Conference on Durability of Concrete Structures, pp. 244-247.

Nguyen, Q. D. and Castel, A. 2020. "Reinforcement corrosion in limestone flash calcined clay cement-based concrete". Cement Concrete Res., 132: 106051. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106051

Nguyen, Q. D., Afroz, S. and Castel, A. 2020. "Influence of calcined clay reactivity on the mechanical properties and chloride diffusion resistance of limestone calcined clay cement (LC3) concrete". J. Mar. Sci. Eng., 8(5): 301. https://doi.org/10.3390/jmse8050301

Purushotham Reddy, K., Chandra Mohan Rao, B. D. V., Janardhan Yadav, M. and Swamy Naga Ratna Giri, P. 2021. "Comparative studies on LC3 based concrete with OPC & PPC based concretes". Mater. Today: Proc., 43: 2368-2372. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.833

Rosales, M., Rosales, J., Agrela, F., Sánchez de Rojas, M. I. and Cabrera, M. 2022. "Design of a new eco-hybrid cement for concrete pavement, made with processed mixed recycled aggregates and olive biomass bottom ash as supplementary cement materials". Constr. Build. Mater, 358: 129417. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.129417

Ruan, Y., Jamil, T., Hu, C., Gautam, B. P. and Yu, J. 2022. "Microstructure and mechanical properties of sustainable cementitious materials with ultra-high substitution level of calcined clay and limestone powder". Constr. Build. Mater., 314: 125416. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125416

San Nicolas, R., Cyr, M. and Escadeillas, G. 2014. "Performance-based approach to durability of concrete containing flash-calcined metakaolin as cement replacement". Constr. Build. Mater., 55: 313-322. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.063

Sánchez Berriel, S., Favier, A., Rosa Domínguez, E., Sánchez Machado, I. R., Heierli, U., Scrivener, K., Martirena Hernández, F. and Habert, G. 2016. "Assessing the environmental and economic potential of limestone calcined clay cement in Cuba". J. Clean. Prod., 124: 361-369. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.125

Scrivener, K. L., Alujas Diaz, A., Vizcaíno Andrés, L. M., Martirena Hernández, J. F. and Antoni, M. G. 2015. "Effect of fineness in clinker-calcined clays-limestone cements". Adv. Cement Res., 27(9): 546-556. https://doi.org/10.1680/adcr.14.00095

Scrivener, K., Martirena, F., Bishnoi, S. and Maity, S. 2018. "Calcined clay limestone cements (LC3)". Cement Concrete Res., 114: 49-56. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017

Sheikh, M. D., Jamil, T., Ayub, T., Khan, A. R., Bilal, S. M. and Hu, C. 2023. "Comparative study on LC3-50 with OPC concrete using raw materials from Pakistan". Adv. Mater. Sci. Eng., 2023: 1-10. https://doi.org/10.1155/2023/5503670

Soltaninejad, M., Soltaninejad, M., K, F. S., Moshizi, M. K., Sadeghi, V., & Jahanbakhsh, P. (2021). Environmental-friendly mortar produced with treated and untreated coal wastes as cement replacement materials. *Clean Technologies and Environmental Policy*, *23*(10), 2843–2860. https://doi.org/10.1007/s10098-021-02204

Sui, S., Georget, F., Maraghechi, H., Sun, W. and Scrivener, K. 2019. "Towards a generic approach to durability: Factors affecting chloride transport in binary and ternary cementitious materials". Cement Concrete Res., 124: 105783. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105783

Yan, D., Peng, Z., Ding, Q., Karstensen, K. H., Engelsen, C. J., Li, L., Ren, Y. and Jiang, C. 2015. "Distribution of Hg, As and Se in material and flue gas streams from preheater–precalciner cement kilns and vertical shaft cement kilns in China". J. Air Waste Manag. Assoc., 65(8): 1002-1010. https://doi.org/10.1080/10962247.2015.1051607

Yaseen, N., Alcivar-Bastidas, S., Irfan-ul-Hassan, M., Petroche, D. M., Qazi, A. U. and Ramirez, A. D. 2024. "Concrete incorporating supplementary cementitious materials: Temporal evolution of compressive strength and environmental life cycle assessment". Heliyon, 10(3): e25056. https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2024.E25056

Yu, C., Yuan, P., Yu, X. and Liu, J. 2018. "Degradation of calcined clay-limestone cementitious composites under sulfate attack". Pp. 110-116. https://doi.org/10.1007/978-94-024-1207-9_18

Zong, H., Wang, Y., Wang, G., Li, Q., Li, F., Li, Q. and Hou, P. 2023. "The role of ultra-fine supplementary cementitious materials in the durability and microstructure of airport pavement concrete". Constr. Build. Mater., 392: 131954. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.131954

Zunino, F. 2020. "Limestone calcined clay cements (LC3): raw material processing, sulfate balance and hydration kinetics". https://doi.org/10.5075/epfl-thesis-8173

Zunino, F. and Scrivener, K. 2021. "Assessing the effect of alkanolamine grinding aids in limestone calcined clay cements hydration". Constr. Build. Mater., 266: 121293. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121293