

Investigating the Effect of Clay Calcination Temperature on Compressive Strength and Durability of LC3 Concretes

R. Madandoust¹, M.M. Ranjbar², S. Nasiri^{3*}

1- Professor, Department of Civil Engineering, University of Guilan

2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Guilan

3- Ph.D. Candidate, Civil Engineering, Guilan, sina.nasir68@gmail.com

Received: 14 August 2023, Revised: 04 December 2023, Accepted: 17 January 2024

Abstract

The preparation process of calcined clay has a significant impact on its performance in cementitious mixtures. Compressive strength and rapid chloride ion migration tests (RCMT) were conducted on the control mixture and Limestone Calcined Clay Cement (LC3) concretes containing calcined clay prepared at calcination temperatures of 700, 800, and 900 °C through controlled calcination, as well as calcined clay prepared through instantaneous calcination at 800 °C Celsius using the RCMT method. Additionally, the obtained diffusion coefficients were used to estimate the time of corrosion initiation. X-ray diffraction (XRD) tests indicate the amorphous nature of the calcined clay prepared through the examined methods. XRD, specific surface area, and pozzolanic activity index confirm the superior quality of calcined clay annealed at 800 °C using controlled calcination. In comparison to the control mixture, the use of calcined clay leads to an increase in the water demand of the concrete. However, it significantly improves the durability of LC3 concrete without compromising its compressive strength. The results of compressive strength and chloride ion penetration indicate that the optimum calcination temperature for the examined soil is 800 °C. The use of the rapid annealing method for clay calcination results in a decline in the performance of LC3 concrete.

Keywords: clay calcination temperature, instantaneous calcination, controlled calcination, LC3 concrete, durability.

*Corresponding Author: S. Nasiri

nasiri, S., Madandoust, R., Ranjbar, M. M. Investigating the Effect of Clay Calcination Temperature on Compressive Strength and Durability of LC3 Concretes. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 2024; (): 1-23. <http://doi.org/10.30478/jcsm.2024.409706.1341>

2538-5828/ ©2024 The Authors. Published by Iranian Concrete Society

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

بررسی تاثیر دمای کلسینه‌شدن رس بر روی مقاومت فشاری و دوام بتن‌های LC3

رحمت مدوندوست^۱، ملک محمد رنجبر^۲، سینا نصیری^{۳*}

۱- استاد دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه گیلان

۲- دانشیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه گیلان

۳- دانشجوی دکتری سازه دانشگاه گیلان

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: sina.nasir68@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۱۰، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۱۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۷

۱. چکیده

فرآیند آماده‌سازی رس کلسینه‌شده تاثیر بسیار زیادی بر روی عملکرد آن در مخلوط سیمانی دارد. آزمایش‌های مقاومت فشاری و ضریب انتشار یون کلرید طبق استاندارد NT Build 492 بر روی مخلوط کنترل و بتن‌های (Limestone Calcined Clay Cement) LC3 با رس‌های کلسینه‌شده در دماهای ۷۰۰، ۸۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد با روش کنترل شده و رس کلسینه‌شده با روش احتراق آبی در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شده است. همچنین با استفاده ضرایب انتشار به‌دست‌آمده زمان شروع خوردگی تخمین زده شده است. نتایج آزمایش‌های XRD نشان‌دهنده آمورف بودن رس کلسینه‌شده آماده شده با روش‌های مورد بررسی بوده است. آزمایش‌های XRD سطح ویژه و شاخص فعالیت پوزولانی نشان‌گر کیفیت مناسب تر رس کلسینه‌شده در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد با روش احتراق کنترل شده است. در مقایسه با مخلوط کنترل استفاده از رس کلسینه‌شده موجب افزایش نیاز آبی بتن شده است. اما موجب بهبود قابل‌ملاحظه دوام بتن LC3 بدون کاهش قابل‌ملاحظه مقاومت فشاری شده است. نتایج مقاومت فشاری و نفوذ یون کلرید نشان‌گر آن است که دمای بهینه کلسینه‌شدن برای خاک مورد بررسی ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. استفاده از روش افزایش دمای آبی برای کلسینه نمودن رس باعث افت عملکرد بتن LC3 شده است.

کلمات کلیدی: دمای کلسینه‌شدن رس احتراق آبی احتراق کنترل شده بتن LC3 دوام.

۲. مقدمه

با توجه به نیاز گسترده به بتن و معضلات زیست محیطی کاهش مصرف سیمان مورد توجه قرار گرفته است. یکی از روش‌های حل این مشکل جایگزینی بخشی از سیمان با مواد مکمل سیمانی است. استفاده از مواد مکمل سیمانی هم دارای منافع زیست محیطی مانند کاهش انتشار گاز CO₂ و هم منافع فنی مانند افزایش دوام بتن است [۱ و ۲ و ۳]. مواد مکمل سیمانی دارای انواع مختلفی بوده که بعضاً به صورت طبیعی موجود می‌باشند و در مواردی مواد مصنوعی (مواد جانبی صنعتی) و یا مواد طبیعی فرآوری شده هستند. استفاده از مواد مکمل سیمانی مانند دوده سیلیسی سرباره و خاکستر بادی در بتن (که ضایعات صنعتی می‌باشند) متداول می‌باشد [۴]. اما از مشکلات مربوط به استفاده از آن‌ها محدودیت دسترسی به این مواد در نقاط مختلف می‌باشد. لذا در سال‌های اخیر سایر مواد مکمل سیمانی خصوصاً موادی که قابلیت دسترسی به آن‌ها در نقاط مختلف فراهم بوده و مقدار آن‌ها محدود نباشد مانند رس کلسینه‌شده مورد توجه قرار گرفته است [۵ و ۶ و ۷].

خاک‌رس در سراسر پوسته زمین در دسترس می‌باشد و همچنین فرآوری مورد نیاز برای تبدیل آن به یک ماده مکمل سیمانی شامل حرارت دادن و آسیاب نمودن در مقایسه با تولید کلینکر سیمان به انرژی بسیار کمتری نیاز دارد. نتایج تحقیقات نشان‌گر آن است که خاک‌رس کلسینه‌شده دارای فعالیت پوزولانی مناسب می‌باشد [۸ و ۹ و ۱۰ و ۱۱]. معمولاً خاک‌رس کلسینه‌شده به همراه پودر سنگ جایگزین بخشی از سیمان در بتن می‌شود. لازم به ذکر است به صورت صنعتی نیز سیمان آمیخته LC^۳ شامل سیمان پرتلند خاک‌رس کلسینه‌شده و پودر سنگ آهک عرضه می‌شود.

تحقیق‌های مختلفی جهت بررسی تاثیر کاربرد خاک‌رس کلسینه‌شده بر روی خواص مکانیکی و دوام مخلوط‌های سیمانی انجام شده است. نتایج نشان‌گر آن است که عملکرد خاک‌رس کلسینه‌شده در مخلوط‌های سیمانی به عوامل مختلفی مانند نوع خاک دمای کلسینه‌شدن مدت زمان کلسینه‌شدن و ریزی رس کلسینه‌شده بستگی دارد. اما به صورت کلی نتایج نشان‌گر عملکرد مطلوب خاک‌رس کلسینه‌شده به عنوان یک ماده مکمل سیمانی در مخلوط‌های سیمانی بوده است [۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵].

در تحقیق Marangu [۱۶] مقاومت فشاری بتن LC³ با بتن سیمان پرتلند معمولی و بتن سیمان آمیخته پوزولانی در سه نسبت آب به مواد سیمانی مقایسه شده است. مقاومت فشاری بتن سیمان پرتلند معمولی در سنین بین ۲ تا ۲۸ روز بیشتر از بتن LC³ و بتن سیمان آمیخته پوزولانی بوده است. اما در سنین ۹۰ و ۱۸۰ روز مقاومت فشاری بتن LC³ بیشتر از بتن سیمان پرتلند معمولی و بتن سیمان آمیخته بوده است.

در تحقیق Maraghechi و همکاران [۱] تاثیر رس کلسینه‌شده حاوی درصد‌های مختلف کائولینیت همراه با پودر سنگ به صورت LC³ و همچنین به صورت یک ماده مکمل سیمانی مجزا بر روی مقاومت فشاری ملات بررسی شده است. مقاومت فشاری ملات‌های LC³ با خاک‌رس با درصد کائولینیت بالای ۴۰ درصد با مقدار جایگزینی ۵۰ درصد سیمان با خاک‌رس کلسینه‌شده از سن ۷ روز به بعد مشابه ملات با سیمان پرتلند نوع ۱ و یا بیشتر از آن بوده است.

برخلاف نتایج فوق‌الذکر در تحقیق Lin و همکاران [۱۷] جایگزینی ۳۰ درصد سیمان با رس کلسینه‌شده و پودر سنگ باعث کمتر شدن مقاومت فشاری ملات LC³ در سن ۱۸۰ روز در مقایسه با ملات کنترل است. همچنین در تحقیق Nguyen و همکاران [۱۰] تاثیر جایگزینی ۱۵ و ۲۰ درصد سیمان با رس کلسینه‌شده به همراه پودر سنگ بر روی مقاومت فشاری بررسی شده است. نتایج این تحقیق نشان‌گر آن است که در مقدار جایگزینی ۱۵ درصد از سن ۱۴ روز به بعد مقاومت فشاری بتن LC³ بیشتر از بتن شاهد بوده است. اما در مقدار جایگزینی ۲۰ درصد بتن LC³ دارای مقاومت فشاری کمتری تا سن ۲۸ روز نسبت به بتن کنترل بوده است.

نتایج تحقیق Bahman-Zadeh و همکاران [۱۸] نشان‌گر آن است که کاربرد رس کلسینه‌شده به صورت LC³ و یا به عنوان یک



ماده مکمل سیمانی تا سن ۹۰ روز باعث کاهش مقاومت در مقایسه با مخلوط کنترل شده است. همچنین نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که کاربرد خاک رس کلسینه‌شده به صورت LC3 عملکرد بهتری در مقایسه با استفاده از آن به عنوان یک ماده مکمل سیمانی تنها داشته است.

نتایج تحقیق‌های مختلف نشان‌گر افزایش مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلر با استفاده از خاک رس کلسینه‌شده به صورت LC3 در مخلوط‌های سیمانی در مقایسه با مخلوط کنترل سیمان پرتلند بوده است [۱۸ و ۱]. در تحقیق Nguyen و همکاران [۱۰] تاثیر جایگزینی ۱۵ و ۲۰ درصد سیمان با رس کلسینه‌شده به همراه پودر سنگ بر روی نفوذ تسریع‌شده یون کلرید طبق روش RCMT بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که جایگزینی ۱۵ و ۲۰ درصد سیمان با رس کلسینه‌شده به همراه پودر سنگ به ترتیب باعث کاهش ۴۰ و ۵۵ درصدی ضریب انتشار یون کلرید شده است. همچنین در تحقیق Maraghechi و همکاران [۱] تاثیر رس کلسینه‌شده حاوی درصد‌های مختلف کائولینیت همراه با پودر سنگ به صورت LC3 و همچنین به صورت یک ماده مکمل سیمانی مجزا بر روی مقاومت پروفیل نفوذ یون کلرید ملات بررسی شده است. نتایج این تحقیق نشان‌گر کاهش قابل‌ملاحظه غلظت یون کلرید در عمق‌های مختلف ملات‌های LC3 بوده است.

نتایج فوق‌الذکر نشان می‌دهد که در خصوص تاثیر خاک رس کلسینه‌شده بر روی مقاومت فشاری و همچنین روند کسب مقاومت اختلاف قابل‌ملاحظه‌ای وجود دارد. در برخی از تحقیقات عملکرد خاک رس کلسینه‌شده شبیه مواد مکمل سیمان با واکنش پوزولانی سریع مانند دوده سیلیسی و در برخی از تحقیقات دیگر عملکرد آن مشابه مواد مکمل سیمانی با واکنش پوزولانی کند مانند خاکستر بادی و پوزولان‌های طبیعی بوده است [۱۹ و ۲۰ و ۱۶ و ۲۱]. بررسی‌ها نشان‌گر آن است که علاوه بر نوع خاک روش فرآوری و آماده‌سازی رس کلسینه‌شده نیز می‌تواند تاثیر قابل‌توجهی بر روی عملکرد رس کلسینه‌شده در مخلوط‌های سیمانی داشته باشد [۱۱ و ۲۲]. یکی از عوامل مهم در فرآوری خاک رس دمای کلسینه‌شدن می‌باشد.

در تحقیق Balykov و همکاران [۱۵] تاثیر دمای کلسینه‌شدن بین ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد بر عملکرد خاک رس کلسینه‌شده بررسی شده است. دمای کلسینه‌شدن رس به صورت کنترل شده و با نرخ افزایش دمای ۱۰ درجه بر سانتی‌گراد بوده است. مقاومت فشاری ملات حاوی رس کلسینه‌شده در دمای ۷۰۰ درجه بهتر از رس‌های کلسینه‌شده در دماهای دیگر بود. لازم به ذکر است که برای خاک رس با کائولینیت بیشتر مقاومت فشاری ملات بیشتر از ملات سیمان پرتلند بود. اما مقاومت فشاری سایر مخلوط‌ها کمتر از مخلوط سیمان پرتلند بود. نتایج نشان‌گر این تحقیق نشان‌گر آن است که بهترین عملکرد مربوط به رس کلسینه‌شده در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت بوده است.

در تحقیق Ferreiro و همکاران [۱۳] تاثیر دمای کلسینه‌شدن در دماهای ۷۰۰ و ۸۵۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد بر عملکرد رس کلسینه‌شده در مخلوط سیمانی بررسی شده است. لازم به ذکر است که در این تحقیق از کوره با روش احتراق آبی جهت کلسینه نمودن رس استفاده شده است. دمای بهینه کلسینه‌شدن در این تحقیق دمای ۸۵۰ درجه گزارش شده است. با افزایش دمای کلسینه‌شدن عملکرد رس کلسینه‌شده در مخلوط کاهش پیدا کرده است. همچنین بررسی نتایج مقاومت فشاری نشان‌گر آن است که تا سن ۹۰ روز مقاومت فشاری مخلوط‌های حاوی خاک رس کلسینه و پودر سنگ از مخلوط سیمان پرتلند کمتر است. اما در سن ۹۰ روز اختلاف مقاومت مخلوط‌های LC3 با مخلوط کنترل ناچیز می‌باشد.

نحوه تغییرات دما تا رسیدن به دمای کلسینه‌شدن را می‌توان به دو گروه تقسیم نمود. در برخی از تحقیق‌ها خاک رس درون کوره با دمای احتراق مورد نظر به صورت آبی [۲۳ و ۱۰ و ۱۴] و در برخی از تحقیق‌ها خاک رس درون کوره با نرخ تغییرات دمایی کنترل شده تا دمای مورد نظر قرار گرفته است [۱۷ و ۱۵]. تاثیر روش احتراق بر روی عملکرد رس کلسینه‌شده به نظر می‌رسد بررسی نشده باشد.

لازم به ذکر است که با خاکستر پوسته برنج نیز با سوزاندن پوسته برنج درون کوره به دست می آید. در تحقیق Vayghan و همکاران [۲۴] نشان داده شده است که نحوه تغییرات دما تا رسیدن به دمای مورد نظر بر روی عملکرد خاکستر پوسته برنج بسیار تاثیرگذار بوده است. با توجه به نتایج تحقیق های فوق الذکر به نظر می رسد یکی از عوامل تاثیرگذار بر روی عملکرد خاک رس کلسینه شده در مخلوط های سیمانی نحوه تغییرات دما در فرآیند کلسینه شدن باشد. با توجه به اینکه در تحقیق های قبلی تاثیر خصوصیات رس کلسینه شده با روش احتراق آبی و عملکرد آن در مخلوط بتن با رس کلسینه شده با روش احتراق کنترل شده مقایسه نشده است. لذا انجام این تحقیق می تواند در انتخاب روش مناسب برای ایجاد تغییر دمای کوره در فرآیند کلسینه کردن رس موثر باشد. لازم به ذکر است یکی از اهداف در بتن های LC3 داشتن روند کسب خواص مقاومتی مشابه با بتن سیمان پرتلند معمولی در کنار داشتن دوام بهتر می باشد که در این تحقیق تاثیر تغییرات شرایط کلسینه شدن بر روی این نوع بتن LC3 بررسی شده است.

با توجه به فراوانی خاک رس کائولینیتی در کشور و نیاز صنعت به کاهش مصرف سیمان پرتلند و همچنین تحقیقات محدود صورت گرفته در داخل کشور انجام تحقیقات بیشتر که بتواند زمینه کاربرد بیشتر رس کلسینه شده در صنعت ساخت و ساز را فراهم کند ضروری به نظر می رسد. لذا در این تحقیق دمای بهینه کلسینه شدن خاک رس و همچنین تاثیر روش احتراق بر روی عملکرد آن بررسی شده است.

۳. برنامه ی آزمایشگاهی

۳-۱. مصالح

در این تحقیق از سیمان پرتلند نوع دو که ویژگی های آن طبق استاندارد ۳۸۹ ایران [۲۵] بوده استفاده شده است. مشخصات شیمیایی سیمان پودر سنگ و خاک رس در جدول ۱ ارائه شده است. لازم به ذکر است که جرم حجمی و سطح ویژه سیمان به ترتیب برابر با ۳/۱۴ گرم بر سانتی متر مکعب و ۳۰۶۰ سانتی متر مربع بر گرم بوده است. سنگدانه های مورد استفاده از معادن جنوب غربی تهران شامل شن با اندازه حداکثر اسمی ۱۹ میلی متر و ماسه مطابق با استاندارد ملی ایران به شماره ۳۰۲ [۲۶] تهیه شده است. در شکل های ۱ و ۲ نتایج آزمایش دانه بندی شن و ماسه انطباق آن با استاندارد ملی ایران شماره ۳۰۲ [۲۶] ارائه شده است. درصد ذرات عبوری از الک شماره ۲۰۰ برای ماسه و شن به ترتیب برابر ۱/۸۸ و ۰/۲۱ درصد است. درصد جذب آب اشباع با سطح خشک و جرم حجمی اشباع با سطح خشک شن به ترتیب ۱/۸ درصد و ۲۵۹۰ کیلوگرم بر متر مکعب بوده است. مقادیر متناظر برای ماسه ۳/۷ درصد و ۲۵۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب بوده است. از فوق روان ساز بر پایه پلی کربوکسیلیک اتر شرکت شیمی ساختمان با درصد مواد جامد ۴۰ درصد و آب شرب تهران در ساخت مخلوط ها استفاده شده است.

خاک رس مورد استفاده از شرکت صنایع خاک چینی ایران از معادن آذربایجان شرقی با مقدار کائولینیت ۷۲٪ تهیه شده است. خاک تهیه شده در دماهای ۷۰۰، ۸۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی گراد درون کوره به مدت یک ساعت با نرخ افزایش دمای ۱۰ درجه سانتی گراد بر دقیقه کلسینه شده است. سپس رس کلسینه شده درون آسیاب به مدت ۶۰ دقیقه توسط آسیاب گلوله ای آسیاب شده است. همچنین جهت بررسی تاثیر نحوه رسیدن به دمای مورد نظر برای کلسینه شدن بر روی خصوصیات رس کلسینه شده خاک رس درون کوره با دمای ۸۰۰ درجه سانتی گراد بلافاصله به مدت یک ساعت قرار داده شده است.

جدول ۱. آنالیز شیمیایی سیمان پودر سنگ و خاک رس

ترکیب (%)	سیمان	پودر سنگ	خاک رس
SiO ₂	۲۱/۸۰	۳/۲۸	۶۰/۶۱
Al ₂ O ₃	۴/۱۰	۰/۷۵	۲۹/۷۲
Fe ₂ O ₃	۳/۵۸	۰/۲۲	۱/۳۸
CaO	۶۲/۷۰	۴۹/۳	۱/۰۸
MgO	۱/۹۰	۲/۸۲	۰/۴۱
SO ₃	۱/۵۱	۰/۰۹	-
Na ₂ O	۱/۲۰	-	۰/۰۹
K ₂ O	۱/۴۶	۰/۰۳	۰/۳۴
L.O.I.	۱/۶۱	۴۱/۶	۹/۳۱

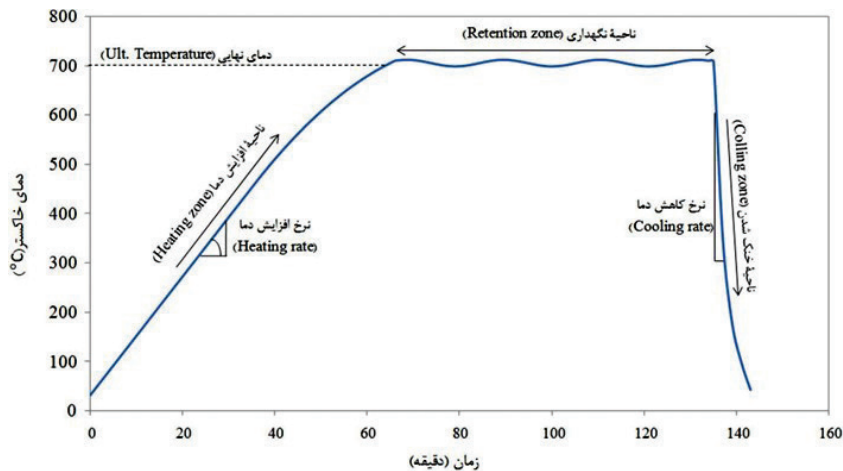
۲-۳. طرح مخلوط و آماده سازی نمونه ها

مخلوط های بتنی با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۰ و مقدار مواد سیمانی ۴۰۰ kg/m³ ساخته شده اند. در مخلوط های بتنی حاوی رس کلسینه شده و پودر سنگ به ترتیب ۲۵ درصد وزنی و ۵ درصد وزنی سیمان با این مواد جایگزین شده است. مشخصات مخلوط های مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است.

به منظور ثابت نگاه داشتن نسبت آب به مواد سیمانی در مقدار ۰/۴۰ از مقادیر مختلف فوق روان ساز جهت دستیابی به کارایی مورد نظر ۱۰۰-۱۵۰ mm براساس آزمایش اسلامپ استفاده گردید. نمونه ها پس از ۲۴ ساعت از قالب ها خارج و تحت عمل آوری مرطوب در دمای ۲۰ ± ۲°C تا زمان آزمایش قرار گرفتند. کد گذاری مخلوط ها براساس دمای کلسینه شدن و روش تغییرات دما تا دمای کلسینه شدن بوده است. به طور مثال مخلوط با کد SL/۸۰۰ عدد اول دمای مد نظر برای کلسینه شدن و نماد بعدی مربوط به روش تغییرات دمای کوره تا دمای مورد نظر است. SL نشان گر روش احتراق کنترل شده (یعنی تغییر دما از دمای محیط تا دمای نهایی کوره با نرخ مشخص) است. رس کلسینه شده درون کوره با روش احتراق آبی (یعنی قرار گیری آبی رس درون کوره با دمای نهایی) با نماد Su نشان داده شده است. در شکل ۱ نمودار تغییرات دما در فرآیند کلسینه شدن رس نشان داده شده است.

جدول ۲. مقادیر اجزاء مخلوط های ساخته شده

کد طرح	W/B	سیمان (kg/m ³)	پودر سنگ (kg/m ³)	رس کلسینه شده (kg/m ³)	شن (SSD) (kg/m ³)	ماسه (SSD) (kg/m ³)	درصد فوق روان ساز (%)	دمای بتن تازه (C°)
کنترل	۰/۴۰	۴۰۰	۰	۰	۸۸۶	۸۸۶	۰/۴۷	۲۰/۱
700/SL	۰/۴۰	۲۸۰	۲۰	۱۰۰	۸۷۶	۸۷۶	۰/۷۶	۲۰/۶
800/SL	۰/۴۰	۲۸۰	۲۰	۱۰۰	۸۷۶	۸۷۶	۰/۷۹	۲۱/۰
900/SL	۰/۴۰	۲۸۰	۲۰	۱۰۰	۸۷۶	۸۷۶	۰/۸۲	۲۱/۲
800/Su	۰/۴۰	۲۸۰	۲۰	۱۰۰	۸۷۶	۸۷۶	۰/۷۲	۲۰/۸



شکل ۱. تغییرات دما در روش احتراق کنترل شده

۳-۳. آزمایش‌های انجام شده

به منظور تعیین تاثیر روش آماده‌سازی بر روی خواص فیزیکی رس کلسینه‌شده آزمایش‌های جرم حجمی باقی‌مانده روی الک ۴۵ میکرومتر سطح ویژه به روش جذب نیتروژن (BET) انجام شده است. با توجه به قرارگیری رس کلسینه‌شده در گروه پوزولان‌های طبیعی فعالیت پوزولانی آن طبق استاندارد ASTM C311 [۲۷] با جایگزینی ۲۰ درصد تعیین شده است. همچنین آزمایش‌های آنالیز شیمیایی و XRD بر روی رس‌های کلسینه‌شده انجام شده است. پراش اشعه ایکس در واقع روشی برای مطالعه ساختار مواد بلوری می‌باشد. این روش بر پایه خاصیت موجی اشعه ایکس استوار است.

بر روی بتن‌های ساخته شده نیز آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری و آزمایش مهاجرت تسریع‌شده یون کلرید (RCMT) به ترتیب طبق استانداردهای BS EN 12390 Part 3 [۲۹] و NT Build492 [۳۰] انجام شده است. آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روز بر روی آزمون‌های مکعبی ۱۰*۱۰ سانتی‌متر انجام شده است.

در آزمایش RCMT در سنین ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روز بر روی آزمون‌های به قطر ۱۰ سانتی‌متر و ضخامت ۵ سانتی‌متر انجام شده است. در این آزمایش بتن در طی مدت زمان مشخصی تحت اختلاف پتانسیل ثابت در معرض نفوذ یون کلرید قرار می‌گیرد. در پایان آزمایش نمونه‌ها شکافته شده و بر روی سطوح شکافته شده محلول نیترات نقره پاشیده شده و عمق نفوذ یون کلرید تعیین می‌شود. با استفاده از رابطه ۱ و اطلاعات به دست آمده از آزمایش ضریب انتشار یون کلرید محاسبه می‌گردد [۳۰].

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273+T)L}{(U-2)t} \left(x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273+T)L x_d}{U-2}} \right) \quad (1)$$

در این رابطه D_{nssm} ضریب انتشار شرایط ناپایدار یون کلرید بر حسب $(\times 10^{-11} \text{ s/m}^2)$ اختلاف پتانسیل اعمال شده بر حسب ولت (V) T متوسط دمای محلول آب نمک در شروع و پایان مدت آزمایش بر حسب درجه سانتی‌گراد ($^{\circ}C$) L ضخامت نمونه بر حسب میلی‌متر (mm) x_d متوسط عمق نفوذ اندازه‌گیری شده بر حسب میلی‌متر (mm) و t مدت زمان آزمایش بر حسب ساعت (h) می‌باشد.

برای درک بهتر تاثیر دمای کلسینه‌شدن بر روی دوام بتن می‌توان با استفاده از نتایج آزمایش RCMT طبق روش ارائه‌شده در

تحقیق باقری و همکاران [۳۱ و ۳۲] زمان شروع خوردگی آرماتور درون بتن را تخمین زد. ابتدا با استفاده از ضرایب انتشار به دست آمده از آزمایش RCMT تغییرات ضریب انتشار مخلوط‌های مورد بررسی تعیین شده است. سپس با فرض ثابت بودن غلظت کلر سطحی و برابر با ۰/۸ درصد وزنی بتن [۳۳] و غلظت یون کلرید بحرانی برابر با ۰/۱۸ درصد وزنی بتن [۳۴] با استفاده از برنامه نوشته شده بر اساس روش تفاضل محدود کرنک نیلسون و نفوذ یک بعدی یون کلرید در بتن زمان شروع خوردگی مخلوط‌های مختلف را ارزیابی نمود.

۴. نتایج و تفسیر آن‌ها

۴-۱. تاثیر دمای کلسینه شدن بر روی خصوصیات رس کلسینه شده

در جدول ۳ نتایج آزمایش‌های تعیین جرم حجمی مانده روی الک ۴۵ میکرومتر سطح ویژه به روش جذب نیتروژن (BET) و فعالیت پوزولانی رس‌های کلسینه شده ارائه شده است. همچنین در جدول ۳ نتایج آزمایش‌های تعیین خصوصیات فیزیکی پودر سنگا آهک شامل جرم حجمی و مانده روی الک ۴۵ میکرومتر ارائه شده است. حداکثر مقدار مانده روی الک ۴۵ میکرومتر و شاخص فعالیت پوزولانی پوزولان‌های طبیعی طبق الزامات استاندارد ASTM C618 [۳۵] به ترتیب باید کمتر از ۳۴ درصد و بیش از ۷۵ درصد در سنین ۷ و ۲۸ روزه باشد. با توجه به اعداد جدول ۳ رس کلسینه شده الزامات این استاندارد را برآورده می‌کند. بررسی جرم حجمی و مانده روی الک ۴۵ میکرون نشان‌گر آن است که افزایش دمای کلسینه شدن و استفاده از روش افزایش آبی دما تاثیر محسوسی بر روی آن‌ها نداشته است. روند نتایج مشاهده شده مشابه با روند مشاهده شده در تحقیق Ferreiro و همکاران [۱۴] است. افزایش دمای کلسینه شدن تا حدودی می‌تواند بدلیل گلوله شدن ذرات موجب بزرگتر شدن اندازه ذرات رس کلسینه گردد. در محدوده مورد بررسی این تاثیر بر روی اندازه‌های بزرگتر از ۴۵ میکرون ناچیز بوده است. اما تاثیر افزایش دمای کلسینه شدن بر روی ساختار درونی و تخلخل ذرات زیاد بوده و باعث کاهش تخلخل درونی ذرات در دماهای بالا (بیش از ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد) می‌شود. لذا هرچند تغییر محسوسی در نتایج باقی مانده روی الک ۴۵ میکرون مشاهده نشده است اما بر روی نتایج BET که تخلخل درونی ذرات نیز در نظر گرفته می‌شود تاثیرگذار بوده است [۱۴ و ۳۶]. افزایش دمای کلسینه شدن از ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد به ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد ابتدا باعث افزایش سطح ویژه رس کلسینه شده است. اما با افزایش بیشتر دما به ۹۰۰ درجه سطح ویژه کاهش یافته است. با افزایش دما از ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد به ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد سطح ویژه با روش جذب نیتروژن حدود ۶۷ درصد افزایش یافته و با افزایش به ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد سطح ویژه نسبت به دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد حدود ۱۳ درصد کاهش داشته است. لازم به ذکر است که تغییرات ایجاد شده در خاک رس در طی افزایش دما بدین صورت می‌باشد که با افزایش دما ابتدا بخش‌های فرار خاک رس مانند آب از بین می‌رود. سپس در دمای بالای حدود ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد کائولن تبدیل به متاکائولن می‌شود. با افزایش بیشتر دما (در دمای حدود ۹۰۰ درجه و بیشتر) بخش بیشتری از سیلیس آمورف به کوارتز کریستالی تبدیل می‌شود [۳۷]. ایجاد فازهای کریستالی بیشتر می‌تواند دلیل کاهش سطح ویژه در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد باشد. روند تغییرات سطح ویژه مشابه به تغییرات سطح ویژه گزارش شده توسط Ferreiro و همکاران [۱۴] می‌باشد.

سطح ویژه رس کلسینه شده با روش افزایش دمای کنترل نشده و آبی در مقایسه با روش کنترل شده در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به روش جذب نیتروژن حدود ۴۶ درصد کاهش یافته است. لذا دلیل تغییرات زیاد سطح ویژه رس کلسینه در مراجع مختلف علاوه بر دمای کلسینه شدن روش تغییرات دما تا دمای کلسینه شدن می‌باشد.

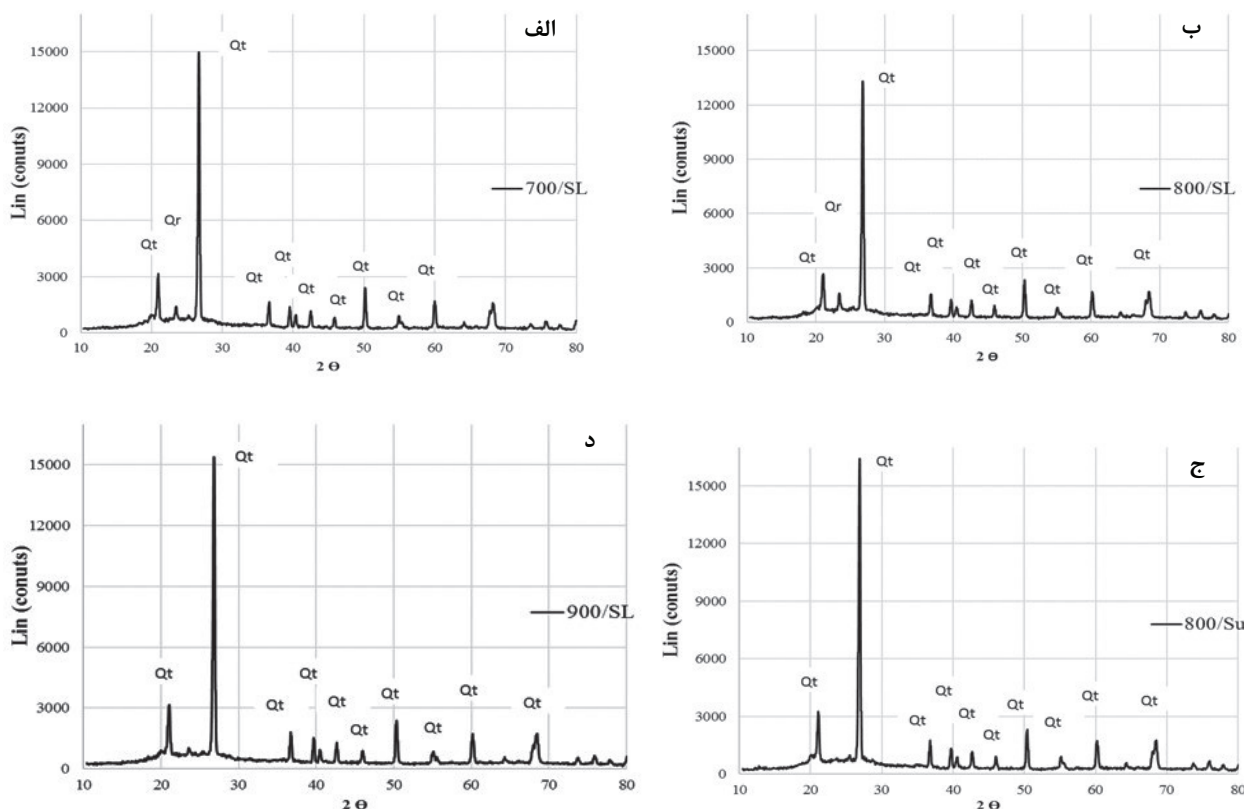
در تحقیق Fernandez و همکاران [۳۸] سطح ویژه رس کلسینه شده از خاک مونتموریلونیت با دما تغییرات زیادی داشته و برای خاک‌های کائولینیتی و ایلیتی سطح ویژه در دمای ۶۰۰ درجه تا ۸۰۰ درجه تغییرات زیادی نداشته است. اما در تحقیق Ferreiro و

همکاران [۱۴] سطح ویژه خاک کائولینیتی کلسینه شده در دماهای ۷۰۰ و ۸۵۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد تغییرات قابل توجهی داشته است. یافته‌های تحقیق حاضر در خصوص سطح ویژه با نتایج تحقیق Ferreiro و همکاران [۱۴] همخوانی بیشتری دارد. افزایش دمای کلسینه شدن خاک رس از ۷۰۰ درجه به ۸۰۰ درجه سانتی گراد موجب افزایش فعالیت پوزولانی آن شده است. روند تغییرات شاخص فعالیت پوزولانی مشابه روند تغییرات سطح ویژه رس کلسینه شده است. با افزایش دما از ۷۰۰ به ۸۰۰ درجه سانتی گراد شاخص فعالیت پوزولانی طبق روش ASTM C311 [۲۷] حدود ۸ درصد افزایش می‌یابد. با افزایش دما از ۸۰۰ به ۹۰۰ درجه سانتی گراد شاخص فعالیت پوزولانی طبق روش ASTM C311 [۲۷] حدود ۱۲ درصد کاهش می‌یابد. همچنین شاخص فعالیت پوزولانی رس کلسینه شده با روش کنترل شده نسبت رس کلسینه شده با روش آبی طبق روش ASTM C311 [۲۷] حدود ۱۷ درصد بیشتر است. در تحقیق بهمن زاده و همکاران [۱۸] شاخص فعالیت پوزولانی رس‌های کلسینه شده در دمای ۸۰۰ درجه سانتی گراد طبق استاندارد ASTM C311 [۲۷] بررسی شده است که به صورت کلی با نتایج فعالیت پوزولانی تحقیق حاضر همخوانی مناسبی دارد. در تحقیق Fernandez و همکاران [۲۸] تاثیر دمای کلسینه شدن خاک‌های کائولینیتی ایلیتی و مونتوریلونیتی بر روی فعالیت پوزولانی با روش تغییرات دمای نسبتا آبی (۳۰۰ درجه سانتی گراد بر دقیقه) در دماهای ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتی گراد بررسی شده است. نتایج نشان گر آن است که شاخص فعالیت پوزولانی رس کلسینه شده فقط برای خاک‌های از نوع مونتوریلونیت به دمای کلسینه شدن حساسیت زیادی دارد.

جدول ۳. خصوصیات فیزیکی رس کلسینه شده

ماده	جرم حجمی (g/cm ³)	مانده روی الک ۴۵ میکرومتر (%)	سطح ویژه به روش جذب نیتروژن (m ² /g)	
			۷ روزه	۲۸ روزه
پودر سنگ	۲/۶۱	۱۱/۱	-	-
700/SL	۲/۵۷	۱۲/۳	۲۱/۳	۶۸
800/SL	۲/۵۷	۱۲/۳	۳۵/۵	۶۹
900/SL	۲/۵۷	۱۲/۳	۳۱/۰	۶۳
800/Su	۲/۵۷	۱۵/۴	۱۹/۲	۶۲

در شکل ۲ نتایج آزمایش XRD رس‌های کلسینه شده ارائه شده است. کانی کوارتز جز اصلی کانی‌ها است. سیلیس حاصل از دگرسانی و انحلال کانی‌های سیلیکاتی سنگ‌های حد واسط و اسیدی همراه با سیلیس گرمایی کوارتز فراوانی را به وجود آورده است که این سیلیس در تشکیل کائولینیت و مونت مورینیت شرکت داشته است. با افزایش دمای کلسینه شدن از ۷۰۰ به ۸۰۰ درجه سانتی گراد ابتدا فاز آمورف افزایش می‌یابد و سپس با افزایش دما به ۹۰۰ درجه سانتی گراد کمی کاهش فاز آمورف مشاهده می‌شود. نتایج XRD کاهش فاز آمورف رس کلسینه شده در دمای ۹۰۰ در مقایسه با فاز آمورف رس کلسینه شده در دمای ۷۰۰ درجه را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که شدت پیک‌های بازگشت مشاهده شده در هر زاویه در نتایج XRD نشان گر میزان کریستال‌های موجود از کانی مورد نظر در ماده مورد بررسی می‌باشد. هرچه شدت بازگشت‌ها بیشتر باشد میزان کریستال‌های موجود بیشتر و در نتیجه فازهای آمورف ماده کاهش می‌یابد.



شکل ۲. نتایج آزمایش XRD (الف) رس کلسینه شده در دمای ۷۰۰ درجه سانتی گراد (ب) رس کلسینه شده در دمای ۸۰۰ درجه سانتی گراد (ج) رس کلسینه شده در دمای ۹۰۰ درجه سانتی گراد (د) رس کلسینه شده در دمای ۸۰۰ درجه سانتی گراد و افزایش دمای آنی

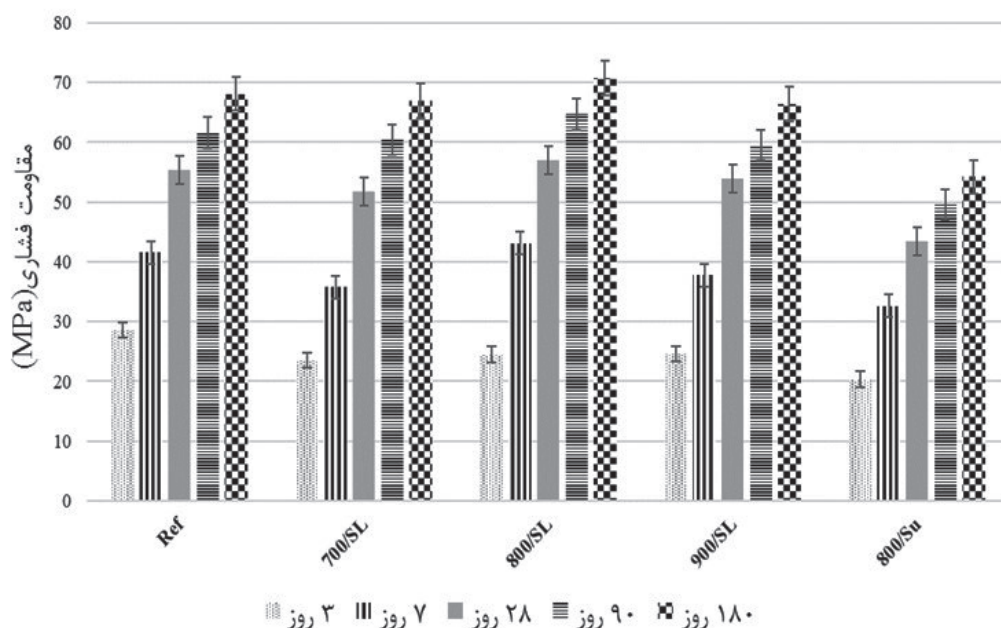
۴-۲. تاثیر دمای کلسینه شدن بر روی مقدار مصرف فوق روان ساز

مقدار فوق روان ساز لازم برای حفظ کارایی مخلوطها در حد مخلوط کنترل می تواند به عنوان شاخصی از تاثیر کاربرد رس کلسینه شده بر نیاز آبی بتن تلقی شود. در جدول ۲ مقدار فوق روان ساز مورد نیاز هر مخلوط ارائه شده است. همان طور که مشخص است کاربرد رس کلسینه شده باعث افزایش قابل توجه مصرف فوق روان ساز در مقایسه با مخلوط کنترل شده است. همچنین با افزایش دمای کلسینه شدن نیاز آبی مخلوطها افزایش می یابد. مخلوط حاوی رس کلسینه شده در دما ۹۰۰ درجه در حدود ۸ درصد نیاز آبی بیشتر از مخلوط حاوی رس کلسینه شده در دمای ۷۰۰ درجه سانتی گراد دارد. دلیل افزایش نیاز آبی با افزایش دما می تواند مربوط به افزایش سطح ویژه رس کلسینه شده با افزایش دما باشد. اما میزان افزایش نیاز آبی رابطه مستقیمی با میزان افزایش سطح ویژه رس کلسینه شده ندارد. سطح ویژه با روش BET رس کلسینه شده در دمای ۹۰۰ درجه سانتی گراد برابر با $31 \text{ m}^2/\text{g}$ بوده و سطح ویژه با روش BET رس کلسینه شده در دمای ۷۰۰ درجه سانتی گراد برابر $21/3 \text{ m}^2/\text{g}$ بوده است. نکته قابل توجه آن است که افزایش دما تاثیر زیادی در افزایش نیاز آبی مخلوط حاوی رس کلسینه نداشته است. همچنین مخلوط حاوی رس کلسینه با روش آنی در دمای ۸۰۰ درجه حدود ۹ درصد نیاز آبی کمتری در مقایسه با مخلوط حاوی رس کلسینه شده با روش کنترل شده در دمای ۸۰۰ درجه داشته است.

۴-۳. تاثیر دمای کلسینه‌شدن بر روی مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری مخلوط‌های حاوی رس‌های کلسینه‌شده و کنترل در شکل ۳ از سن ۳ روزه تا ۱۸۰ روزه ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که دمای کلسینه‌شدن رس بر روی مقاومت فشاری مخلوط‌ها و همچنین روند کسب مقاومت تاثیر گذار است. مخلوط حاوی رس کلسینه‌شده در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد دارای بهترین روند و بالاترین مقاومت فشاری می‌باشد. مقاومت فشاری این مخلوط در سن ۷ روز و سنین بالاتر بیشتر از مخلوط کنترل می‌باشد. مقاومت فشاری مخلوط‌های حاوی رس کلسینه‌شده در دماهای ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه تا سن ۱۸۰ روز از مخلوط کنترل کمتر است. در سنین بالاتر اختلاف مقاومت این مخلوط با مخلوط کنترل کمتر می‌شود. به‌عنوان مثال در سن ۷ روز مخلوط حاوی رس کلسینه‌شده در دمای ۷۰۰ درجه حدود ۱۴ درصد مقاومت فشاری کمتری در مقایسه با مخلوط کنترل دارد اما در سن ۱۸۰ روزه این اختلاف به ۲ درصد کاهش می‌یابد. وجود رس کلسینه‌شده با فازهای آلومیناتی بسیار واکنش‌پذیر ایجاد فازهای از نوع AFm را تسهیل‌تر می‌کند و بر ساختار میکروساختار محصولات هیدراتاسیون تأثیر می‌گذارد و همچنین طول زنجیره C-A-S-H را با جایگزینی آلومینیوم به جای سیلیسیم افزایش می‌دهد [۳۷]. همچنین جایگزینی بخشی از سیمان با خاک‌رس کلسینه‌شده تأثیرات قابل توجهی بر روی هیدراتاسیون سیمان دارد. تقریباً در ابتدای هیدراتاسیون با اجزا به سختی واکنش می‌کند و می‌تواند باعث کندی روند کسب مقاومت بتن گردد. از طرف دیگر وجود خاک‌رس کلسینه‌شده بدلیل سطح ویژه بالاتر می‌تواند موجب واکنش سریع تر سیمان بدلیل اثر هسته زایی گردد [۳۹]. لذا مقدار جایگزینی خاک‌رس کلسینه و همچنین کیفیت آن می‌تواند بر روی روند کسب مقاومت بتن LC^3 تاثیر زیادی داشته باشد. لازم به‌ذکر است براساس نتایج تحقیقات محققین قبلی جایگزینی ۵-۱۰ درصد سیمان با سنگ آهک موجب تسریع واکنش‌های سیمان شده و در عین حال با تشکیل فازهای کربوآلومینات منافذ بین ذرات سیمان توسط سنگ آهک پر می‌شوند [۳۹]. لازم به‌ذکر است که تغییر دمای کلسینه‌شدن خاک‌رس بدلیل تغییر بر سطح ویژه رس کلسینه باعث تغییرات روند کسب مقاومت فشاری بتن شده است. مقاومت فشاری مخلوط 800/Su از مقاومت فشاری مخلوط 800/SL و مخلوط کنترل تا سن ۱۸۰ کمتر است. مثلاً در سن ۹۰ روزه مقاومت فشاری مخلوط 800/Su در حدود ۲۳ درصد کمتر از مقاومت فشاری مخلوط 800/SL و حدود ۱۹ درصد کمتر از مخلوط کنترل است. این نتیجه نشان‌گر آن است که کلسینه‌شدن آنی رس باعث کاهش فعالیت پوزولانی رس کلسینه‌شده می‌شود. لازم به ذکر است که در نتایج شاخص فعالیت پوزولانی نیز این تاثیر دیده شده است.

دمای بهینه کلسینه‌شدن رس برای خاک مورد بررسی دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد با روش تغییرات دمای کنترل شده می‌باشد. روند تغییرات مقاومت فشاری مخلوط 800/SL در مقایسه با مخلوط کنترل به‌طور کلی همخوانی مناسبی با روند نتایج گزارش تحقیق Fernandez و همکاران [۳۸] برای رس کلسینه‌شده کائولینیتی در دمای بهینه دارد. همچنین روند کسب مقاومت مخلوط‌های حاوی رس کلسینه‌شده در سایر دماها در مقایسه با کنترل مشابه با روند نتایج مقاومت فشاری گزارش شده در تحقیق‌های Ferreiro و همکاران [۱۴] و بهمن‌زاده و همکاران [۱۸] است.

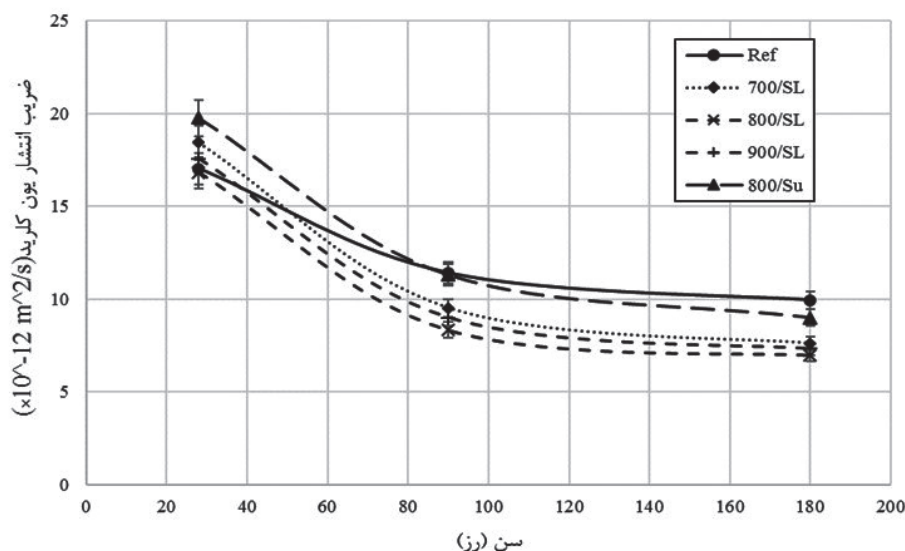


شکل ۳. مقاومت فشاری مخلوط‌های حاوی رس کلسینه‌شده در مقایسه با مخلوط کنترل

۴-۴. تاثیر دمای کلسینه‌شدن بر روی ضریب انتشار یون کلراید

نتایج آزمایش مهاجرت تسریع‌شده یون کلراید طبق روش RCMT مخلوط‌های حاوی رس‌های کلسینه‌شده و کنترل در شکل ۴ در سنین ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روزه ارائه‌شده است. در سن ۲۸ روز ضریب انتشار یون کلراید مخلوط‌های 700/Su، 800/Su و 900/Su نسبت به مخلوط کنترل به ترتیب حدود ۳۸ و ۱۵ درصد افزایش داشته است. در سن ۲۸ روزه بهترین عملکرد ضریب انتشار در مقایسه با مخلوط کنترل مربوط به مخلوط 800/Su بوده و ضریب انتشار کمی کاهش یافته است. اما در سن ۹۰ و ۱۸۰ روز همه مخلوط‌ها در مقایسه با مخلوط کنترل ضریب انتشار یون کلراید کاهش یافته که نشان‌گر افزایش دوام بتن می‌باشد. زیرا وجود رس کلسینه‌شده بدلیل واکنش پوزولانی باعث کاهش مقدار پرتلندیت در بتن شده است [۳۹]. همچنین ضریب انتشار مخلوط 800/Su در تمام سنین از مخلوط 800/Su کمتر است. مثلا در سن ۹۰ روزه ضریب انتشار مخلوط 800/Su در حدود ۲۷ درصد کمتر از مخلوط 800/Su است. این نشان‌گر تاثیر منفی روش احتراق آبی بر عملکرد پوزولانی رس کلسینه‌شده است. نتایج فعالیت پوزولانی و مقاومت فشاری نیز تایید کننده این روند می‌باشند.

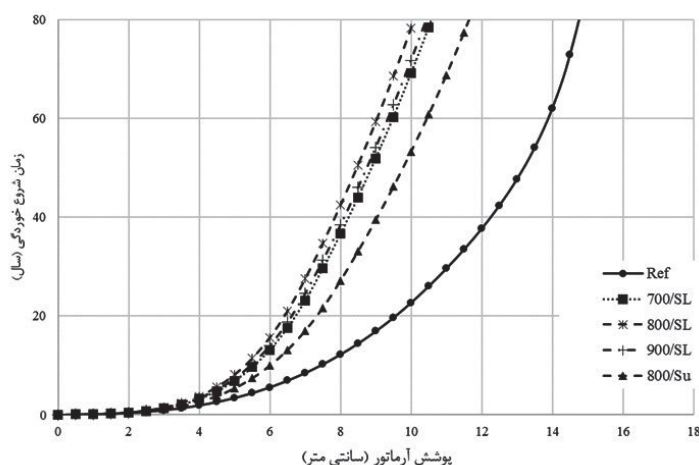
با استفاده از تخمین زمان شروع خوردگی آرماتور درون بهتر می‌توان به تاثیر دمای کلسینه‌شدن رس بر عملکرد بتن‌های LC³ دست پیدا نمود.



شکل ۴. ضریب انتشار یون کلرید مخلوط‌های حاوی رس کلسینه‌شده در مقایسه با مخلوط کنترل

۵-۴. تاثیر دمای کلسینه‌شدن بر روی زمان شروع خوردگی

در شکل ۵ زمان‌های تخمینی شروع خوردگی آرماتور برای پوشش‌های مختلف مخلوط‌های مورد ارائه شده است. در شکل ۶ زمان شروع خوردگی آرماتور در پوشش ۵ سانتی‌متر مخلوط‌های مورد بررسی نشان داده شده است. زمان تخمینی شروع خوردگی مخلوط کنترل 700/SL 800/SL 900/SL و 800/Su به ترتیب برابر با ۳/۴۲، ۶/۸۹، ۸/۱۳۴ و ۷/۳۴ سال است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد زمان شروع خوردگی در مخلوط‌های LC^3 به صورت قابل ملاحظه‌ای بیشتر از مخلوط کنترل می‌باشد. بهترین عملکرد مخلوط LC^3 مربوط به مخلوط حاوی رس کلسینه‌شده در دمای ۸۰۰ درجه با روش تغییرات کنترل شده دما است. زمان شروع خوردگی مخلوط 800/Su در مقایسه با مخلوط 800/SL حدود ۴۴ درصد کاهش داشته است. اما زمان شروع خوردگی 800/Su از مخلوط کنترل در حدود ۵۷ درصد بیشتر است.



شکل ۵. ضریب انتشار یون کلرید مخلوط‌های حاوی رس کلسینه‌شده در مقایسه با مخلوط کنترل

۶. قدردانی

نویسندگان این مقاله از مسئولین و کارشناسان آزمایشگاه بتن دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه گیلان و همچنین کارشناس آزمایشگاه بتن دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی آقای مهندس زنگانه جهت مساعدت در مراحل مختلف این پژوهش تشکر می‌نمایند.

مراجع

- [1] Maraghechi H., Avet F., Wong H., Kamyab H., and Scrivener K., 2018, "Performance of Limestone Calcined Clay Cement (LC3) with various kaolinite contents with respect to chloride transport", *Mater. Struct. Constr.*, vol. 51, no. 5, 2018, doi: 10.1617/s11527-018-1255-3.
- [2] Lothenbach B., Saout G. L., Gallucci E., and Scrivener K., 2008, "Influence of limestone on the hydration of Portland cements", *Cem. Concr. Res.* 2008, 38, 848–860. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.01.002>.
- [3] Shi Z.G., Geiker M.R., DeWeerd K., Ostnor T.A., Lothenbach B., Winnefeld F., Skibsted J., 2017, "Role of calcium on chloride binding in hydrated Portland cement-metakaolin-limestone blends", *Cem. Concr. Res.*, 95, 205–216. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.003>
- [4] Mehta.P.K and Monteiro.J.M, 2006, "Concrete, Microstructure, Properties and Materials", ' Mac Graw-Hill, 3th ed.
- [5] Scrivener K., Martirena F., Bishnoi S., and Maity S., 2018, "Calcined clay limestone cements (LC3)", *Cem. Concr. Res.*, 114, 49–56. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017>
- [6] Mishra G., Emmanuel A.C., and Bishnoi S., 2019, "Influence of temperature on hydration and microstructure properties of limestone-calcined clay blended cement", *Mater. Struct.*, 52, 91. <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1390-5>
- [7] Nicolas R. S., 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>
- [8] Antoni M., Rossen J., Martirena F., and Scrivener K., 2012, "Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone", *Cem. Concr. Res.* 2012, 42, 1579–1589. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.09.006>
- [9] 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)", *Cem. Concr. Res.* 107, 136–151. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.005>
- [10] 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, 301, doi:10.3390/jmse8050301
- [11] Tironi A., Scian A.N., and Irassar E.F., 2017, "Blended Cements with Limestone Filler and Kaolinitic Calcined Clay: Filler and Pozzolanic effects", *J. Mater. Civ. Eng.* 29 (9), 04017116. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001965](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001965)
- [12] Sommariva Z., and Alberto F., 2020, "Limestone calcined clay cements (LC3): raw material processing, sulfate balance and hydration kinetics", *Ph.D thesis, EPFL, Lausanne*, <https://doi.org/10.5075/epfl-thesis-8173>

[13] Ferreiro S., Herfort D., and Damtoft J. S., 2017, "Effect of raw clay type, fineness, water-to-cement ratio and fly ash addition on workability and strength performance of calcined clay – Limestone Portland cements", *Cement and Concrete Research*, 101, 1–12. doi:10.1016/j.cemconres.2017.08.003

[14] Ferreiro S., Canut M. M. C., Lund J., Herfort D., 2019, "Influence of fineness of raw clay and calcination temperature on the performance of calcined clay-limestone blended cements", *Applied Clay Science*, 169, 81–90. doi:10.1016/j.clay.2018.12.021

[15] Balykov A.S., Nizina A.A., Volodin V.V., and Kyashkin V.M., 2021, "Effects of calcination temperature and time on the physical-chemical efficiency of thermally activated clays in cement systems", *Materials Science Forum*. Vol. 1017, pp 61-70, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1017.61>

[16] Marangu, J.M., 2020, "Physico-chemical properties of Kenyan made calcined Clay -Limestone cement (LC3)", *Case Stud. Constr. Mater.*, 12, e00333. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00333>

[17] Lin R.Sh., Oh S., Du W., and Wang X.Y., 2022, "Strengthening the performance of limestone-calcined clay cement (LC3) using nano silica", *Construction and Building Materials*, 340, 127723, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127723>

[18] Bahman-Zadeh F., Ramezani-pour A.A., and Zolfagharnasab A., 2022, "Effect of carbonation on chloride binding capacity of limestone calcined clay cement (LC3) and binary pastes", *Journal of Building Engineering*, 52, 104447. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104447>

[19] Avet F., and Scrivener K., 2020m "Influence of pH on the chloride binding capacity of Limestone Calcined Clay Cements (LC3)", *Cem. Concr. Res.*, 131, 106031. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106031>

[20] Alghamdi H., Shoukry H., Abadel A.A., and Khawaji M., 2023, "Performance assessment of limestone calcined clay cement (LC3)-Based lightweight green mortars incorporating recycled waste aggregate", *J. M. R. & T.*, 2065-2074, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.133>

[21] Avet F., Sofia L., and Scrivener K., 2019, "Concrete Performance of Limestone Calcined Clay Cement (LC3) Compared with Conventional Cements", *Adv. Civ. Eng. Mater.* 8, 20190052. doi:10.1520/acem20190052.

[22] Gbozee M., Zheng K., He F., Zeng X., The influence of aluminum from metakaolin on chemical binding of chloride ions in hydrated cement pastes. *Appl. Clay Sci.* 2018, 158, 186–194. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.03.038>

[23] Nguyen Q.D., Khan M.S.H., and Castel A., 2018, "Engineering Properties of Limestone Calcined Clay Concrete", *J. Adv. Concr. Technol.*, 16, 343–357. <http://dx.doi.org/10.3151/jact.16.343>

[24] Vayghan A. G., Khaloo A.R., Nasiri S., and Rajabipour F., 2012, "Studies on the effect of retention time of rice husk combustion on the ash's chemo-physical properties and performance in cement mixtures." *J. Mater. Civ. Eng.* 24 (6): 691–697. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000426](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000426).

[۲۵] موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران "ویژگی‌های سیمان پرتلند" شماره. ۳۸۹.

[۲۶] سازمان ملی استاندارد ایران "سنگدانه‌های بتن-ویژگی‌ها" شماره. ۳۰۲.

[27] ASTM C311, 2017, "Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural

Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete”, ASTM International, Philadelphia, PA.

[28] ASTM C1240, 2017, “Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures”, ASTM International, Philadelphia, PA.

[29] BS EN 12390-part 3, 2009, “Testing hardened concrete Part 3: Compressive strength of test Specimens”, BSI-British Standard Institute.

[30] NT Build 492, 1999, “Chloride migration coefficient from Non-steady state migration experiments, NORDTEST, Finland.

[31] Bagheri A., Ajam A., Zanganeh H., Investigation of chloride ingress into concrete under very early age exposure conditions, *Constr. Build. Mater.* 225 (2019) 801–811, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.225>.

[32] Bagheri A., Ajam A., Zanganeh H., Effect of very early age exposure on chloride ingress and service life performance of binary and ternary concretes, *Constr. Build. Mater.* 289 (2021) 123137. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123137>

[33] - Life- 365: Model Code for Service Life Design. Produced by the Life-365™ Consortium III, Version 2.2.1, January 15, 2014

[34] U. Angst, B. Elsener, C.K. Larsen, and Ø. Vennesland, 2009, “Critical chloride content in reinforced concrete”, *Cem. Concr. Res.* 39 (12) 1122-1138.

[35] ASTM C618, 2017, “Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete”, ASTM International, West Conshohocken, PA.

[36] Wang, S.; Gaine, L.; Mackinnon, I.D.R.; Allen, C.; Gu, Y.; Xi, Y. Thermal behaviors of clay minerals as key components and additives for fired brick properties: A review. *J. Build. Eng.* 2022, 66, 105802.

[37] Alujas, A., Fernández, R., Quintana, R., Scrivener, K. L., & Martirena, F. (2015). Pozzolanic reactivity of low grade kaolinitic clays: Influence of calcination temperature and impact of calcination products on OPC hydration. *Applied Clay Science*, 108, 94–101. doi:10.1016/j.clay.2015.01.028

[38] R. Fernandez, F. Martirena, and K.L. Scrivener, 2011, “The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite. *Cement and Concrete Research*, 41(1), 113–122. doi:10.1016/j.cemconres.2010.09.013

[39] Zhao, Yuhan, and Yingda Zhang. “A Review on Hydration Process and Setting Time of Limestone Calcined Clay Cement (LC3).” *Solids* 4, no. 1 (2023): 24-38.