

پتانسیل ساخت سیمان LC^3 با انواع مختلف کائولن

فاطمه ارباب

دانشجوی دکتری عمران- سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران.

امیر طریقت *

دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران.

محسنعلی شایانفر

دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.

چکیده

سیمان و بتن برای زیرساخت دنیای مدرن ضروری هستند. گستردگی، در دسترس بودن و هزینه کم تهیه سیمان باعث می‌شود در همه نقاط روی زمین استفاده شود و حدود ۵ تا ۸ درصد انتشار گاز دی‌اکسید کربن را به خود اختصاص بدهد. استفاده از مواد سیمانی مکمل (SCMs) برای جایگزینی بخشی از کلینکر در سیمان، موفق‌ترین راهکار برای کاهش انتشار دی‌اکسید کربن در صنعت سیمان جهان است. سیمان رس کلسینه شده- سنگ آهک (LC^3) امکان جایگزینی سیمان با خاک رس کلسینه شده و سنگ آهک را فراهم می‌کند. این تحقیق به بررسی ویژگی‌های و ویژگی‌های سیمان LC^3 با در نظرگیری بلورینگی، فازهای همراه، سطح ویژه قبل و بعد از تکلیس و ریزی کائولن و با جای‌گذاری‌های ۵۰، ۵۵ و ۶۰٪ مواد سیمانی مکمل با تعداد ۱۱ نوع خاک کائولن مختلف در مقایسه با سیمان پرتلند می‌پردازد. نتایج نشان داد بتن LC^3 با محتوی کائولن ۳۰٪ و ۱۶٪ با جای‌گذاری ۵۰٪ در سن ۲۸ روز به مقاومت فشاری در حدود ۱/۱۹ برابر و مقاومت الکتریکی به ترتیب ۴/۶ و ۹/۶ برابر نسبت به سیمان پرتلند می‌رسد و همچنین در جای‌گذاری تا ۶۰٪، در سن 28 روز به مقاومت فشاری قابل قبول و مقاومت الکتریکی در حدود ۱۸ برابر سیمان پرتلند و سیمان پرتلند پوزولانی می‌رسد.

واژه‌های کلیدی: رس کلسینه شده، سنگ آهک، سیمان LC^3 ، بتن.

۱- مقدمه

به‌عنوان پوزولان استفاده می‌شود، معمولاً دارای مقدار کلینکر حدود ۶۵٪ تا ۷۰٪ هست که به‌اندازه کافی برای کاهش انتشار کربن جهانی مرتبط با تولید سیمان کافی نیستند. هم متاکائولن و هم سنگ‌آهک تأثیر فیزیکی بر هیدراسیون سیمان دارند. آن‌ها جایگاه‌های هسته‌زایی را که به تشکیل هیدرات کمک می‌کند را فراهم می‌کنند [7]. اگرچه سنگ‌آهک به‌طور فراوان در دسترس است، اضافه کردن بیشتر از ۱۰٪ آهک به‌تنهایی به سیمان منجر به افزایش تخلخل و ویژگی‌های نامرغوب می‌شود [8]. جایگزینی کلینکر با استفاده از رس‌های کلسینه شده ترکیب شده با سنگ‌آهک می‌تواند برای رسیدن به مخلوط سیمان با عملکرد خوب و میزان پایین کلینکر استفاده شود. چنین مخلوط‌هایی می‌تواند سهم قابل‌توجهی در کاهش انتشار گاز دی‌اکسید کربن در تولید سیمان داشته باشد [9]. سیمان LC^3 ^۲ امکان جایگزینی سیمان با خاک رس کلسینه شده و سنگ‌آهک را تا مقدار کلینکر حدود ۵۰٪ با خواص مکانیکی مشابه با سیمان پرتلند و بهبود در برخی جنبه‌های دوام را می‌دهد [10]. تاکنون تحقیقات زیادی در مورد درصد بهینه رس کلسینه شده، خردایش، هیدراسیون، مقاومت فشاری، دوام در برابر حمله کلراید، سولفات و کربناسیون [9, 11-18] این نوع سیمان سازگار با محیط‌زیست انجام شده است. آنتونی و همکاران [19] در سال ۲۰۱۳ نشان دادند که بهترین مقاومت فشاری با استفاده از نسبت رس کلسینه شده به سنگ‌آهک ۲ به ۱ به دست می‌آید. مطالعات در دانشگاه EPFL سوئیس در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ [20, 21] نشان داد که محتوی کائولن در حدود ۴۰٪ در مخلوط LC³-50 (۵۰٪ کلینکر، ۳۰٪ رس کلسینه شده، ۱۵٪ سنگ‌آهک، ۵٪ گچ) کافی است تا خواص مکانیکی مشابه باسیمان پرتلند معمولی از حدود ۷ روز به بعد را بدهد. آزمایش مقاومت فشاری بر روی ملات استاندارد LC³-50 توسط اسکریوینر و همکاران در سال ۲۰۱۸ [17] روی بیش از ۵۰ نوع خاک رس با دامنه ۰ تا ۹۵ درصد محتوی کائولن در سنین ۱، ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز انجام شد. نتایج حاکی از وابستگی مقاومت فشاری به مقدار کائولن کلسینه شده بود. در روز اول، چون واکنش پوزولانی متاکائولن تازه شروع شده بود، مقاومت فشاری تنها اندکی تحت تأثیر نوع خاک رس قرار گرفته بود. نتایج حاصل از

بتن بیشترین ماده تولیدشده در جهان است. در حدود ۴۲۰۰ میلیون تن سیمان در سال تولید می‌شود و تولید آن در حال افزایش است [1, 2]. قسمت عمده CO₂ مربوط به بتن ناشی از فرایند ساخت سیمان می‌باشد. این امر نشان می‌دهد که صنعت سیمان مسئول حدود ۵ تا ۸٪ از انتشار گاز دی‌اکسید کربن در جهان است. ۵۰-۴۰ درصد از انتشار گاز CO₂ ناشی از گرمایش کوره سیمان تا حدود ۱۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و ۶۰-۵۰ درصد دیگر نیز ناشی از کربن‌زدایی (کلسیناسیون) کربنات کلسیم و تبدیل به اکسید کلسیم می‌باشد. مواد خام مورد استفاده برای تولید کلینکر سیمان حدود ۷۵ تا ۷۹ درصد کربنات کلسیم است که حاصل افزودن سنگ‌آهک و یا مارن ها می‌باشد [3]. برای کاهش هزینه‌ها و اثرات زیست‌محیطی بتن استفاده از مواد سیمانی مکمل^۱ (SCMs) روش رایجی است که در سال‌های اخیر برای کاهش میزان کلینکر سیمان مورد استفاده قرار گرفته است. امروزه بیشتر از ۸۰٪ از SCMs که برای کاهش فاکتور کلینکر سیمان استفاده می‌شود شامل سنگ‌آهک، خاکستر بادی و یا سرباره هستند [4]. مقدار سرباره کوره آهن‌گدازی موجود در سراسر جهان حدود ۵٪ تا ۱۰٪ از مقدار سیمان تولیدشده است. این نسبت غیرمعمول است که افزایش یابد چون تقاضا برای فولاد با سرعت کمتری نسبت به تقاضا برای سیمان افزایش می‌یابد. مقدار خاکستر بادی در دسترس تا حدی بیشتر است (حدود ۳۰٪ در مقایسه باسیمان) اما کیفیت بسیار متغیر است و کمتر از یک‌سوم آنها برای ترکیب در سیمان مناسب هستند [5].

یکی از موادی که دارای یک پتانسیل واقعی برای کاهش کلینکر و به همین ترتیب انتشار (CO₂) سیمان است، رس می‌باشد که در هنگام کلسینه شدن در دمای بین ۶۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد واکنش‌پذیر می‌شود. رس‌های کلسینه شده تنها موادی هستند که به‌طور بالقوه در دسترس هستند تا روند کاهش میزان کلینکر در مخلوط سیمان را ادامه دهند. استفاده از رس‌های کلسینه شده، به‌ویژه از نوع کائولن، به‌عنوان پوزولان به مدت طولانی شناخته شده است. اولین گزارش متاکائولن برای استفاده به‌عنوان مواد سیمانی مکمل در ساخت در دهه ۱۹۶۰ در برزیل در سد Jupia، به‌جای ۳۰٪ حجمی سیمان، مطرح شد [6]. مخلوط‌هایی که در آن رس کلسینه شده

² Limestone Calcined Clay Cement¹ Supplementary cementitious materials (SCMs)

است از: سیمان پرتلند تیپ ۲، سیمان پرتلند پوزولانی ویژه، کائولن، سنگ آهک، سنگ گچ. مصالح سیمان پرتلند تیپ ۲ (PC)، سیمان پرتلند پوزولانی ویژه (PPC)، پودر سنگ آهک و گچ از معادن کارخانه سیمان سیستان (شرکت صنایع سیمان زابل) تهیه شدند. تعداد ۱۱ نوع خاک با خلوص متفاوت کائولن از معادن مختلف تهیه شدند و در دستگاه لس آنجلس به خوبی آسیاب شدند سپس در دمای ۸۰۰ درجه سانتی گراد در کوره الکتریکی به مدت ۳ ساعت کلسینه و به سرعت خنک شد [23]. مواد سیمانی مکمل به اندازه عبور ۱۰۰ درصد از الک (۴۵ μm) ۳۲۵ آسیاب شدند. مشخصات شیمیایی سیمان و مواد سیمانی مکمل با دستگاه طیفسنجی فلورسانس اشعه ایکس (XRF) ساخت شرکت Philips تعیین و در جدول ۱ نشان داده شده است. مصالح سنگی در این پژوهش، شن نخودی شکسته با حداکثر اندازه 12/5 میلی متر و ماسه با مدول نرمی 3/2 از معادن شهریار استفاده شده است. وزن مخصوص سنگ دانه درشت و ریز به ترتیب 2560 kg/m³ و 2550 kg/m³ می باشد. همچنین جذب آب سنگ دانه درشت 2/18٪ و سنگ دانه ریز 3/1٪ می باشد. آب مصرفی در ساخت و عمل آوری نمونه ها، آب شرب تهران بوده است. برای تأمین اسلالمپ ۱۰۰-۸۰ از فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات اتر شرکت آبادگران با وزن مخصوص 1/12 g/cm³ استفاده شده است.

۲-۲- طرح مخلوط نمونه ها

در این تحقیق ۴ طرح مخلوط با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۵ ساخته شد. در کلیه طرح ها عیار سیمان مصرفی ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شد. جدول ۲ طرح مخلوط و جدول ۳ جزئیات مواد سیمانی مکمل در طرح مخلوطها را نشان می دهد. طرح مخلوط ۱، با دو نوع سیمان، سیمان پرتلند تیپ ۲ (PC) و سیمان پرتلند پوزولانی ویژه (PPC) کارخانه سیمان سیستان ساخته شد. در این تحقیق برای ساخت سیمان LC³ به جای کلینکر از سیمان پرتلند استفاده شده است و از طرفی سیمان پرتلند ساخته شده توسط کارخانه حاوی ۹۵٪ کلینکر و ۵٪ گچ بود. لذا لازم است با توجه به درصد گچ به کاررفته در ساخت سیمان پرتلند، درصد گچ موجود در هر طرح LC³ محاسبه شود، درصد گچ محاسبه شده در هر طرح مخلوط در جدول ۳ نشان داده شده است.

این تحقیق نشان داد که کانی های رسی با مقدار کائولن کلسینه شده در حدود ۴۰ تا ۷۵ درصد بین ۷ تا ۲۸ روز مقاومت فشاری بالایی به دست می آورند. در جزئیات خاک های مورد تحقیق اشاره ای به میزان بلورینگی، سطح ویژه و تأثیر فازهای همراه در کائولن های مورد استفاده نشده بود. اوت و همکاران در سال ۲۰۱۸ [12] با مطالعه روی تصاویر MIP ترکیبات LC³-50 به این نتیجه رسیدند که نمونه های LC³ پیوستگی منافذ بهتری نسبت به نمونه های سیمان پرتلند داشتند. در واقع، در ۲۸ روز، همه خمیرهای سیمان ساخته شده با خاک رس کلسینه شده، حتی آنهایی که حاوی مقدار کمی کائولن هستند ساختار تخلخل ریزتری نسبت به خمیرهای ساخته شده با سیمان پرتلند داشتند [12]. کیجانون و همکاران در سال ۲۰۲۳ [22] نشان دادند که بتن های LC³ مقاومت فشاری بالاتر، مقدار و اندازه منافذ کمتر و مقاومت الکتریکی بیشتری نسبت به سیمان پرتلند دارند.

در مطالعات بالا به جز محتوی کائولن کلسینه شده اشاره ای به سایر موارد مانند بلورینگی و ساختار منظم یا نامنظم کائولن، فازهای همراه، سطح ویژه و ریزی کائولن نشده بود، در صورتی که فعالیت پوزولانی کائولن به عوامل فوق مربوط است و نقش مؤثری در ساخت سیمان LC³ دارد. همچنین بتن های LC³ ساخته شده در تحقیقات انجام شده در جای گذاری ۵۰٪ ساخته شده بودند و جای گذاری های بالاتر به طور کامل مورد بررسی قرار نگرفته است. در تحقیق حاضر ۱۱ نوع خاک کائولن از معادن مختلف جمع آوری گردید، محتوی کائولن خاک ها و جزئیاتی که سبب واکنش پوزولانی بهتر می شوند مانند بلورینگی و نامنظمی کائولن، سطح ویژه قبل و بعد از تکلیس، توزیع ذرات و فازهای همراه مورد بررسی قرار داده شد. در ادامه سیمان LC³ با استفاده از ۱۱ نوع خاک کائولن در جای گذاری های ۵۰٪، ۵۵٪ و ۶۰٪ مواد سیمانی مکمل ساخته شد؛ در واقع مقدار کلینکر در جای گذاری های فوق به ترتیب ۵۰٪، ۴۵٪ و ۴۰٪ بود. در نهایت مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی حجمی سیمان LC³ با سیمان پرتلند و سیمان پرتلند پوزولانی مورد مقایسه قرار گرفت.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مشخصات مصالح

سیمان و مواد سیمانی مکمل مورد استفاده در این تحقیق عبارت

جدول ۱- ترکیب شیمیایی سیمان و مواد سیمانی مکمل

اکسیدهای شیمیایی												
LOI	SO ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	MnO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	
۱/۵۱	۲/۸۹	-	-	-	۱/۷۵	۰/۸۱	۰/۶۱	۶۱/۹۹	۳/۸۳	۵/۰۹	۲۱/۵۹	PC
۱/۹۱	۳/۲۴	-	-	-	۱/۸۴	۰/۸۱	۰/۶۲	۵۴/۴۰	۴/۵۳	۵/۵۹	۲۷/۰۶	PPC
۸/۱۲	-	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۱۶	۰/۹۶	۰/۵۹	۰/۶۱	۲/۶۴	۳/۱۸	۲۱/۰۶	۵۹/۹۷	K1
۶/۱۲	-	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۱۹	۰/۰۶	۰/۲۰	۰/۱۵	۱/۰۶	۲/۵۹	۱۹/۲۷	۶۹/۹۰	K2
۱۶/۸۱	۰/۹۳	-	۰/۵۱	-	۴/۹۰	۱/۹۶	۲/۱۷	۸/۴۵	۵/۳۵	۱۴/۲۸	۴۴/۴۴	K3
۷/۷۳	-	۰/۰۹	۰/۲۰	۰/۰۱	-	۰/۳۵	۰/۰۹	۰/۳۰	۱/۷۱	۲۱/۱۵	۶۸/۳۰	K4
۷/۵۹	-	۰/۰۶	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۱۶	۰/۰۷	۰/۲۲	۱/۵۹	۰/۵۴	۲۰/۹۰	۶۸/۶۵	K5
5/52	-	۰/۰۶	۰/۰۲	۰/۰۶	۰/۱۵	۰/۱۲	0/21	۱/۳۲	0/58	۲۴/۳۹	۶۶/۹۹	K6
۱۰/۰۰	-	۰/۳۲	۰/۰۲	۱/۲۸	۰/۳۱	۰/۲۱	۰/۱۴	۰/۶۳	2/75	۲۸/۹۱	55/25	K7
۸/۸۹	-	۰/۱۹	۱/۰۱	۰/۰۴	۰/۶۴	۱/۹۸	۰/۴۰	۰/۴۲	۴/۷۵	۲۴/۹۵	۵۶/۱۰	K8
۵/۵۸	-	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۲۹	۰/۱۲	۰/۴۰	۱/۱۹	۱/۱۴	۲۶/۸۶	۶۳/۴۱	K9
۶/۱۲	-	۰/۰۶	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۲۲	۰/۰۶	۰/۳۷	۱/۴۰	۱/۰۹	۲۹/۵۵	۵۹/۹۰	K10
9/85	-	۰/۰۹	1/44	0/02	-	0/21	0/15	0/27	1/65	۴۴/۷۵	98۴۰/	K11
۳۷/۱۲	۰/۰۲	-	-	-	۱/۱۲	۰/۷۵	۰/۵۲	۴۷/۷۹	۰/۸۵	۲/۱۱	۸/۹۲	آهک
19/07	۴۲/۳۹	-	-	-	۲/۳۰	-	-	۲۹/۱۸	۱/۵۲	۲/۰۴	۳/۴۸	گچ

جای گذاری با مواد سیمانی مکمل بودند. برای ساخت طرح مخلوط ۱ که شامل سیمان پرتلند (PC) و سیمان پرتلند پوزولانی ویژه (PPC) بود به ترتیب ۰/۱۵ و ۰/۲ درصد وزن مواد سیمانی فوق روان کننده به مخلوط اضافه شد و برای طرح مخلوط ۲، ۳ و ۴ که در کل شامل ۳۳ طرح مخلوط بتن LC³ بود، بین ۰/۸ تا ۱/۲ درصد وزن مواد سیمانی فوق روان کننده به مخلوط اضافه شد.

۲-۳- روش ساخت و عمل آوری نمونه های بتنی

هر طرح مخلوط با استفاده از مخلوط کن در آزمایشگاه سازه دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی ساخته شد. ابتدا شن و ماسه به همراه یک سوم آب به مدت ۲ دقیقه مخلوط شدند سپس سیمان و گچ در سطلی جداگانه به خوبی باهم ترکیب شده و به همراه مقداری از آب و فوق روان کننده به مخلوط اضافه و به مدت ۱ تا ۲ دقیقه مخلوط شدند. سپس پودر کائولن کلسینه شده و پودر سنگ آهک در سطلی جداگانه به خوبی باهم مخلوط شده و به همراه مابقی آب و فوق روان کننده به مخلوط اضافه شد و تا حصول اطمینان از یکنواختی مخلوط، اختلاط ادامه یافت. در ادامه بتن در قالب های مورد نظر ریخته و

جدول ۲- طرح مخلوط

طرح مخلوط (kg/m ³)			
سیمان	آب	شن	ماسه
۳۵۰	۱۷۵	۶۹۶	۱۰۴۴

جدول ۳- جزئیات مواد سیمانی مکمل در طرح مخلوط

مواد سیمانی مکمل (%)				
نام طرح	سیمان	گچ	متاکائولن	سنگ آهک
۱ PC, PPC	۱۰۰	-	-	-
۲ LC ³ -50	۵۲/۵	۲/۵	۳۰	۱۵
۳ LC ³ -45	۴۷/۲۵	۲/۷۵	۳۳	۱۷
۴ LC ³ -40	۴۲	۳	۳۷	۱۸

نسبت رس کلسینه به سنگ آهک ۲ به ۱ در نظر گرفته شده بود. در ساخت هر کدام از طرح مخلوط های ۲، ۳ و ۴ از ۱۱ رس کلسینه شده با درصد خلوص متفاوت کائولن استفاده گردید. طرح مخلوط ۲ (LC³-50)، طرح مخلوط ۳ (LC³-45) و طرح مخلوط ۴ (LC³-40) به ترتیب دارای ۵۰، ۵۵ و ۶۰ درصد

کائولن wt% از کاهش جرم در طول دی هیدروکسیلاسیون کائولن گرفتند. در نهایت نمونه‌ها از قالب جدا و تا سن آزمایش در محلول آب آهک اشباع برای عمل آوری نگهداری شدند.

کائولن wt% مطابق معادله ۱ به دست می‌آید که در آن $M_{kaolinite}$ و M_{water} به ترتیب به جرم مولکولی کائولن (g/mol) و آب (۲۵۶/۱۶) و آب (۱۸/۰۲ g/mol) اشاره دارند [24].

$$wt\%_{kaolinite} = wt\%_{kaol-OH} \times \frac{M_{kaolinite}}{2M_{water}} \quad (1)$$

تخمین کمی محتوی کائولن خاک رس از طریق پراش اشعه ایکس (XRD) همراه با روش ریتولد^۲ نیز رایج است. آزمایش پراش اشعه ایکس از هر نمونه گرفته شد و با استفاده از نرم‌افزار XPERT به صورت کمی محتوی کائولن و سایر فازهای موجود در هر خاک رس محاسبه گردید. فازهای همراه و محتوی کائولن خاک‌های رس از طریق TGA و XRD در جدول ۴ نشان داده شده است. سایر پارامترها شامل محتوی قلیایی و محتوی آمورف خاک‌ها نیز در جدول ۴ قرار داده شده است.

جدول ۴- محتوی کائولن و فازهای همراه

خاک	فازهای همراه	محتوی کائولن (%)	محتوی کائولن (%)	محتوی کائولن (%)	محتوی قلیایی (Na ⁺ و OH ⁻) _{eq}	محتوی آمورف (%)
		کائولن در نظر گرفته شده	کائولن XRD	کائولن TGA		
K1	کائولن (۱۲٪)، کلسیت (۴٪)، کوارتز (۸۴٪)	۱۳/۰۹	۱۲	۱۳/۰۹	۰/۹۹	۶۲/۲۲
K2	کائولن (۱۵٪)، کوارتز (۸۵٪)	۱۵/۵۵	۱۵	۱۵/۵۵	۰/۲۸	۵۶/۷۶
K3	کائولن (۱۶٪)، کلسیت (۲۳٪)، کوارتز (۲۸٪)، هالوزیت (۱۰٪)، انستاتیت (۲۳٪)	۱۶	۱۶	۲۵/۵۱	۳/۴۵	۷۱/۷۴
K4	کائولن (۱۶٪)، آلونیت (۶٪)، کوارتز (۷۸٪)	۱۶	۱۶	۲۲/۱۴	۰/۳۱	۵۶/۳۷
K5	کائولن (۲۱٪)، کلسیت (۳٪)، کوارتز (۷۶٪)	۲۲/۲۲	۲۱	۲۲/۲۲	۰/۲۷	۵۴/۵۸
K6	کائولن (۲۹٪)، کلسیت (۲٪)، کوارتز (۶۹٪)	۲۹/۷۵	۲۹	۲۹/۷۵	۰/۲۹	۵۵/۳۲
K7	کائولن (۳۰٪)، آلونیت (۲٪)، کوارتز (۵۹٪)، آراگونیت (۱۰٪)	۳۰/۱۰	30	۳۲/۱۰	۰/۲۸	۵۵/۸۶
K8	کائولن (۳۴٪)، کیانیت (۵٪)، کوارتز (۶۱٪)	۳۴/۵۰	۳۴	۳۴/۵۰	۱/۷۰	۶۰/۲۶
K9	کائولن (۳۸٪)، کلسیت (۲٪)، کوارتز (۶۰٪)	۳۶/۱۱	۳۸	۳۶/۱۱	۰/۴۸	۵۰/۶۸
K10	کائولن (۴۳٪)، کلسیت (۲٪)، کوارتز (۵۵٪)	۴۲/۶۱	۴۳	۴۲/۶۱	۰/۴۰	۵۱/۸۴
K11	کائولن (۵۴٪)، روتیل (۲٪)، تریدمیت (۳۲٪)	۵۳/۴۸	54	۵۳/۴۸	۰/۲۹	۵۹/۸۲

مهم‌ترین روش‌های تحقیق کانی رسی است و می‌توان از آن برای بررسی انواع و اشکال عیوب ساختاری کائولن استفاده کرد. در

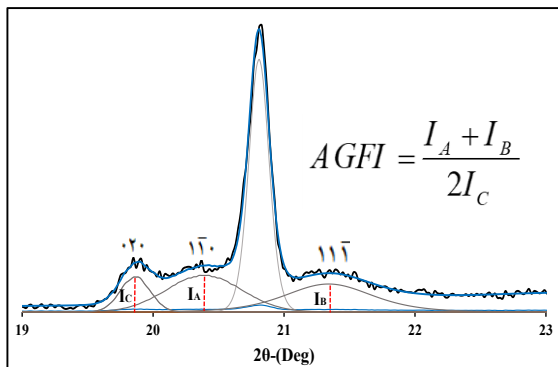
۲-۴-۲- تعیین شاخص بلورینگی کائولن

تجزیه و تحلیل پراش اشعه ایکس (XRD) یکی از گسترده‌ترین و

² Rietveld

¹ Thermogravimetric analysis (TGA)

مقاله حاضر، از داده‌های XRD برای محاسبه شاخص آپاریسو-گالان-فرل^۱ (AGFI) کائولن برای قضاوت در مورد بلورینگی نسبی آن استفاده شد. AGFI مستعد تداخل کوارتز، فلدسپات، ایلیت، اسمکتیت، کلریت، هالوزیت و هیدروکسیدهای آهن و سیلیکاژل نیست. مزیت اصلی آن توانایی استفاده از آن در مخلوط‌های پیچیده برای ارزیابی «بلورینگی» کائولن بدون نیاز به خالص‌سازی نمونه است. تنها پیش‌نیاز استفاده از شاخص AGFI، این است که محتوای کائولن باید بیش از ۱۰ درصد وزنی باشد. فرمول زیر نحوه محاسبه شاخص AGFI را نشان می‌دهد [25].



تصویر ۱- نمونه ای از تجزیه پروفایل پراش

در صورتی که:

$$AGFI < 0/9 \text{ کائولن نامنظم (نقص بالا)،}$$

$$0/9 < AGFI < 1/25 \text{ کائولن نیمه منظم}$$

$$\text{و } 1/25 < AGFI < 1/60 \text{ کائولن منظم (کم نقص)}$$

تعریف می‌شود [25]. نتایج بلورینگی خاک‌های کائولن در جدول ۵ نشان داده شده است.

$$AGFI = \frac{I_A + I_B}{2I_C} \quad (2)$$

که در آن I_A ، I_B و I_C به ترتیب برابر است با ارتفاع پیک در $11\bar{1}0$ ، $11\bar{1}$ و 020 بازتاب تعیین شاخص بلورینگی AGFI ابتدا نیازمند تجزیه ریاضی مشخصات پراش در ناحیه $02l$ و $11l$ به پیک‌های فردی است. شکل قله توسط تابع متقارن Pearson VII تعیین می‌شود. تمامی محاسبات لازم در این کار با استفاده از نرم‌افزار فیتیک (Fytik) انجام شده است. تصویر ۱ نمونه‌ای از

جدول ۵- نتایج بلورینگی خاک‌های کائولن

K11	K10	K9	K8	K7	K6	K5	K4	K3	K2	K1	شاخص AGFI
0/65	1/03	1/05	0/52	0/82	0/87	0/97	0/76	0/41	0/66	0/44	وضعیت بلورینگی
نامنظم	نیمه منظم	نیمه منظم	نامنظم	نامنظم	نامنظم	نیمه منظم	نامنظم	نامنظم	نامنظم	نامنظم	
نیمه منظم K3<K1<K8<K11<K2<K4<K7<K6<K5<K10<K9 نامنظم											
۱۱۹۱	۵۵۲	۵۳۴	۱۱۸۵	۱۱۵۹	۱۲۳۱	۵۶۴	۱۷۳۲	۱۱۳۹	۸۷۱	۸۴۵	بلین (خام) m ² /kg
۱۹۱۹	۲۹۶	۲۷۰	۲۷۰	۳۸۲	۷۸۴	۴۴۴	۱۱۸۰	۸۶۸	۱۰۷۵	۳۹۸	بلین (کلسینه) m ² /kg
۱/۲۷	۴/۳۲	۴/۳۸	۴/۳۳	۳/۸۲	۳/۴۲	۳/۷۶	۲/۰۳	۳/۳۰	۲/۱۰	۳/۸۲	D _{۵۰} (μm)

استدلال می‌کند که نتایج نسبت به اندازه‌گیری BET سازگارتر است، علاوه بر این، روش BET زمان‌برتر هم است. در مقاله حاضر سطح ویژه بلین کائولن‌های خام و کلسینه شده بر اساس ASTM C204 [26] اندازه‌گیری شد. منحنی توزیع اندازه

۳-۴-۲- تعیین سطح ویژه و منحنی توزیع ذرات

سه روش اصلی برای اندازه‌گیری سطح ویژه سیمان، نفوذپذیری هوای بلین^۲، پراش لیزری^۳ و جذب گاز نیتروژن^۴ می‌باشد. صنعت سیمان تا حد زیادی به اندازه‌گیری‌های بلین متکی است و اغلب

³ Laser diffraction (LD)

⁴ Brunauer-Emmett-Teller (BET)

¹ Aparicio-Galan-Ferrellindex

² Blaine test

گردید. با استفاده از رابطه زیر مقاومت ویژه الکتریکی بتن محاسبه گردید [28].

$$\rho = \frac{R \times A}{L} \quad (3)$$

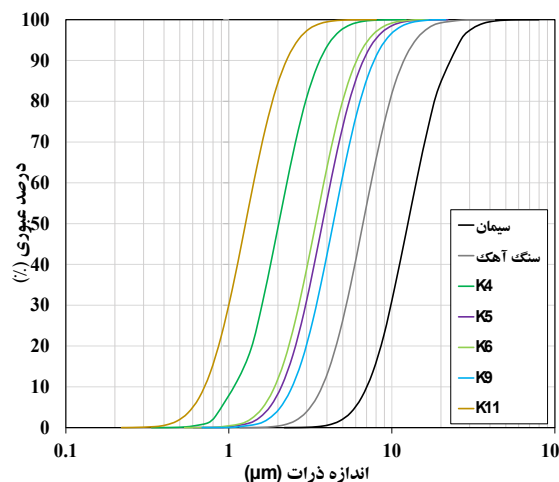
که در این رابطه ρ مقاومت ویژه الکتریکی (K Ω .cm)، R ، مقاومت الکتریکی (K Ω)، L طول نمونه (cm) و A سطح مقطع نمونه (cm²) می باشد.

۳- نتایج آزمایشگاهی و تفسیر نتایج

۳-۱- مقایسه محتوی کائولن به دو روش XRD و TGA

ترکیب رس های کائولن کلسینه شده و سنگ آهک سبب کاهش محتوی کلینکر تا ۵۰ درصد در سیمان های رس کلسینه شده با سنگ آهک (LC³) می شود [17]. عملکرد این مخلوطها به شدت به محتوی کائولن خاک رس وابسته است [16,29]. از نظر توسعه استحکام، محتوی کائولن حدود ۴۰ درصد برای رسیدن به مقاومتی مشابه سیمان پرتلند کافی است [12]. لذا کنترل و محاسبه محتوی کائولن خاک رس بسیار مهم است. محتوی کائولن به دو روش XRD و TGA در جدول ۴ نشان داده شده است. با این حال، برخی از انحرافات با مقایسه محتوی کائولن از XRD-Rietveld و TGA مشاهده می شود [16]. Rietveld به اپراتورهای ماهر برای تعیین فاز و کمیت خاک نیاز دارد و اغلب به دلیل جهت گیری ترجیحی، نقص های ساختاری و گاهی اوقات بلورینگی ضعیف با مشکلاتی مواجه است [30-33]. با استفاده از روش TGA، نمی توان تأثیر فازهای دیگر دی هیدروکسیل شدن در محدوده دمایی مشابه را کنار گذاشت. به طور مثال خاک K4 علاوه بر کائولن شامل آلونیت و خاک K3 حاوی هالوزیت نیز می باشد. دمای دی هیدروکسیلاسیون هالوزیت بین ۵۳۰ تا ۵۹۰ درجه سانتی گراد و دمای دی هیدروکسیلاسیون آلونیت بین ۵۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی گراد می باشد [34] که مشابه محدوده دمایی دی هیدروکسیلاسیون کائولن می باشد. به همین دلیل تفاوت محتوی کائولن بین XRD و TGA برای این دو خاک مقدار بیشتری را نشان داد. در واقع بخشی از محتوی محاسبه شده در TGA برای دو خاک K4 و K3 به ترتیب مربوط به آلونیت و هالوزیت می باشد. در سایر خاکها نتایج حاصل از

ذرات سیمان پرتلند، تعدادی از رس های کلسینه شده و سنگ آهک در تصویر ۲ نشان داده شده است. نتایج در جدول ۵ قرار داده شده است.



تصویر ۲- منحنی توزیع اندازه ذرات

۲-۴-۴- آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز بر روی نمونه های مکعبی به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی متر بر اساس BS EN 12390-3 [27] انجام شد.

۲-۴-۵- آزمایش مقاومت الکتریکی حجمی

مقاومت الکتریکی بتن به ریزساختار، تخلخل، اندازه حفرات، رطوبت و سن بتن بستگی دارد. اندازه گیری مقاومت ویژه الکتریکی با استفاده از روش حجمی روی نمونه های بتنی ۲۸ و ۹۰ روزه انجام شد. برای جلوگیری از اثرات رطوبت، مقاومت الکتریکی نمونه ها در شرایط اشباع از آب با سطح خشک اندازه گیری گردید. جهت انجام این آزمایش از LCR¹ متر (LCR meter) که یک وسیله تعیین مقاومت الکتریکی است استفاده شد. برای اتصال دو الکتروود دستگاه به نمونه، از صفحات مسی استفاده گردید و برای اتصال کامل صفحه مسی به نمونه از یک لایه خمیر سیمان نازک استفاده شد. همچنین جهت حصول اطمینان از اتصال کامل صفحه ای مسی به نمونه یک وزنه روی آن قرار داده شد. سپس هر یک از سیم های دستگاه به صفحه مسی متصل شد و مقاومت الکتریکی نمایش داده شده روی دستگاه ثبت

¹ Inductance (L), Capacitance (C), and Resistance (R)

TGA با نتایج به دست آمده توسط تحلیل XRD-Rietveld به هم نزدیک هستند.

۳-۲- مقایسه بلورینگی خاک‌های کائولن

جدا از خلوص کائولن اصلی که تقریباً به صورت خطی با فعالیت پوزولانی مرتبط است، بلورینگی کائولن نیز بر فرایند دی هیدروکسیلاسیون و واکنش پوزولانی آن تأثیر می‌گذارد به طوری که کائولن با بلورینگی بالا (منظم) واکنش پوزولانی کمتری نسبت به کائولن با ساختار نامنظم دارد [35]. ساختار بلوری کائولن بسیار پیچیده است، به دلیل تعداد زیاد گسل‌های انباشته‌ای که ممکن است در طول شکل‌گیری و رشد آن ظاهر شوند [36]. با استفاده از شاخص AGFI میزان بلورینگی کائولن محاسبه شد. با توجه به جدول ۵ مشخص شد کلیه خاک‌ها با شاخص کمتر از ۰/۹ نامنظم و سه خاک K5، K9 و K10 با شاخص بین ۰/۹ و ۱/۲۵ نیمه منظم هستند. خاک K3 بیشترین نامنظمی و خاک K9 بیشترین نیمه منظمی را در بین خاک‌ها دارا بود. ترتیب بلورینگی خاک‌های کائولن به ترتیب از نامنظم تا نیمه منظم در جدول ۵ نشان داده شده است.

۳-۳- مقایسه سطح ویژه کائولن و توزیع اندازه ذرات

توزیع اندازه ذرات، سطح ویژه و شکل از ویژگی‌های اساسی مواد سیمانی مکمل (SCMs) هستند. سطح ویژه سیمان به طور گسترده به تأثیرگذاری بر واکنش پذیری آن و همچنین خواص فیزیکی و مکانیکی بتن تازه و سخت شده، مانند رئولوژی [37]، سینتیک هیدراسیون [38,39] و توسعه مقاومت [40] شناخته شده است. به طور کلی سطح ویژه کائولن با افزایش دما تا زمانی که فاز آمورف به دست می‌آید افزایش می‌یابد این را می‌توان به دلیل حذف ناخالصی‌های قابل احتراق در منافذ کائولن نسبت داد که سبب افزایش متناظری در سطح ویژه، حجم و اندازه منافذ می‌شود. با افزایش بیشتر دما کاهش نسبتاً شدیدی در سطح ویژه و حجم منافذ با افزایش متناظر در اندازه منافذ به وجود می‌آید که می‌توان آن را به این واقعیت نسبت داد که با افزایش دما، اندازه منافذ با ریزش بعدی دیواره‌های منافذ افزایش می‌یابد [41]. علاوه بر این، وجود ناخالصی کلسیت نیز سطح ویژه خاک رس کلسینه شده را در مقایسه با خاک رس بدون کلسیت به دلیل تشکیل فاز شیشه‌ای

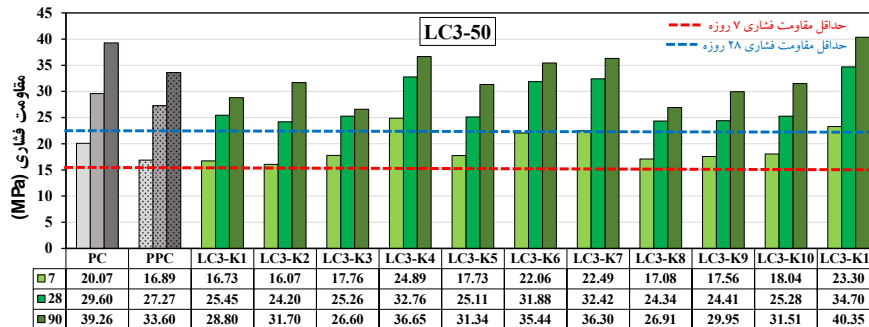
کاهش می‌دهد [42,43]، این اثر با افزایش دمای کلسینه، زمان ماندن در کوره و محتوای اولیه کلسیت تقویت می‌شود. کاهش سطح ویژه خاک‌های کلسینه نسبت به خاک خام در این تحقیق به دلیل وجود محتوی کلسیت در این خاک‌ها و دمای کلسیناسیون بود. تنها دو خاک K2 و K11 بعد از تکلیس سطح ویژه بیشتری نسبت به قبل از تکلیس داشتند که می‌تواند به علت دمای تکلیس مناسب و نبود کلسیت در محتوی خاک باشد. خاک‌های دارای کلسیت به دلیل کاهش سطح ویژه کاهش واکنش پذیری را نیز منجر می‌شوند. تحقیقات حاکی از افزایش مقاومت فشاری با افزایش سطح ویژه رس کلسینه می‌باشد [44,45]. همچنین سطح ویژه بالای خاک رس کلسینه شده بر کارایی اثر منفی می‌گذارد [46] و تقاضای فوق روان کننده را افزایش می‌دهد [47].

منحنی توزیع اندازه ذرات نیز در تصویر ۲ مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده ریزتر بودن رس کلسینه و آهک نسبت به سیمان می‌باشد. حصول اطمینان از یک خردایش مناسب و ریزی بالای کلینکر، خاک رس کلسینه شده و سنگ آهک برای دستیابی به واکنش پذیری و عملکرد مکانیکی خوب، ضروری است [48]. ریزی محصول تأثیر زیادی بر میزان دی هیدروکسیلاسیون کائولن و سرعت واکنش پوزولانی بین Ca(OH)_2 و متاکائولن دارد. در LC^3 رس کلسینه شده و سنگ آهک که ذرات نرم‌تری هستند، قابلیت خرد شدن بیشتری در مقایسه با کلینکر که ذرات سخت‌تری هستند را دارند. از این رو، با توأم آسیاب نمودن LC^3 ، کلینکر همچنان درشت باقی می‌ماند، در حالی که خاک رس کلسینه شده و سنگ آهک بسیار نرم و ریز می‌شوند. با این حال، بیشترین واکنش پذیری وقتی حاصل می‌شود که کلینکر به طور جداگانه از سنگ آهک و رس کلسینه آسیاب شود [16]. ریزتر بودن خاک رس نسبت به کلینکر ممکن است باعث افزایش تقاضای آب و یا نیاز به سطوح بالاتر فوق روان کننده شود، بنابراین فرایند تهیه و ترکیب LC^3 مهم است. به طور ایده‌آل، ابتدا باید کلینکر آسیاب شود سپس با خاک رس کلسینه شده و سنگ آهک ترکیب شود. اثربخشی پوزولان در ملات‌ها به توزیع اندازه ذرات، آمورف، سطح ویژه و مقدار جایگزینی بستگی دارد [49]. با توجه به جدول ۴ محتوی آمورف نیز در خاک‌های K1، K3 و K8 نسبت به سایر خاک‌ها بیشتر بود. هر چه محتوی آمورف خاک رس بیشتر باشد رس نامنظم‌تر و واکنش پوزولانی بیشتری دارد.

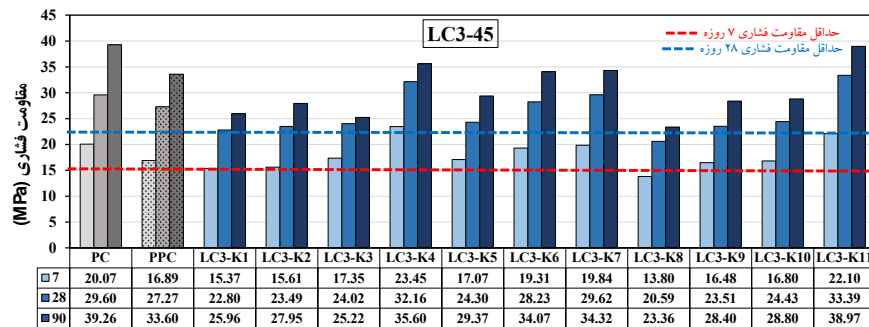
۴-۳- مقایسه مقاومت فشاری

مقاومت فشاری و در تعدادی دیگر باعث افزایش مقاومت فشاری شد. فعالیت پوزولانی متاکائولن عمدتاً به شرایط تکلیس [50,51]، نرمی و ریزی محصول [52]، میزان خلوص کائولن، میزان بلورینگی کائولن اصلی [53]، فازهای همراه و مقدار محتوی قلیایی کائولن مربوط می‌شود.

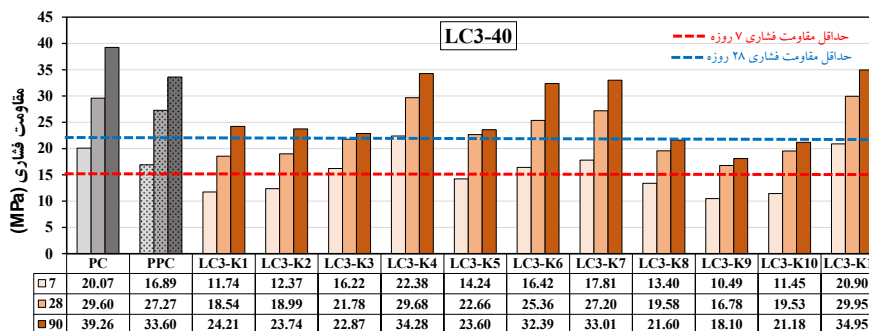
نتایج مقاومت فشاری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه نمونه‌های بتنی LC³ با جای‌گذاری ۵۰، ۵۵ و ۶۰ درصد در تصاویر ۳-۵ نشان داده شده است. افزایش جایگزینی کلینکر به میزان ۵۰، ۵۵ و ۶۰٪ بستگی به محتوی کائولن مورد استفاده در تعدادی از نمونه‌ها باعث کاهش



تصویر ۳- نتایج مقاومت فشاری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه سیمان LC³-50 با جای‌گذاری ۵۰٪ مواد سیمانی مکمل



تصویر ۴- نتایج مقاومت فشاری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه سیمان LC³-45 با جای‌گذاری ۵۵٪ مواد سیمانی مکمل



تصویر ۵- نتایج مقاومت فشاری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه سیمان LC³-40 با جای‌گذاری ۶۰٪ مواد سیمانی مکمل

هیدراسیون LC³، واکنش‌های اضافی در مقایسه با سیمان پرتلند رخ می‌دهند. متاکائولن در رس کلسینه شده که اساساً یک آلومینو سیلیکات (Al₂Si₂O₇) آمورف است به عنوان مواد پوزولانی واکنش می‌دهد تا کلسیم هیدروکسید (Ca(OH)₂) را مصرف و کلسیم آلومینات سیلیکات هیدرات (C-A-S-H) را تشکیل می‌دهد [54]. در واقع محتوی پرتلندیت در حین هیدراسیون به

با توجه به تصویر ۳ که مربوط به مقاومت فشاری نمونه‌های با جای‌گذاری ۵۰ درصد مواد سیمانی مکمل است، کائولن K11 با جای‌گذاری ۵۰ درصد و محتوی کائولن ۵۳/۴۸٪ با ویژگی‌های ساختاری شامل نامنظمی، ریزی بالا با اندازه ذرات متوسط حدود ۱/۲۷μm و سطح ویژه بالا نسبت به نمونه سیمان پرتلند مقاومت فشاری بالاتری را در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه داشت. در حین

آلومینات در سیمان‌های LC³، به فیلر مواد افزودنی معدنی و نه به ترکیب شیمیایی آنها مرتبط است. تسریع واکنش سیلیکات منجر به رسوب سریع تر C-S-H می‌شود که می‌تواند یون‌های سولفات را در محلول جذب کند. هر چه مقدار C-S-H بیشتر باشد، یون‌های سولفات بیشتری را می‌توان جذب کرد و در نتیجه زودتر به نقطه تخلیه گچ رسید [62]. جذب یون‌های سولفات بیشتر در سطح C-S-H، واکنش هیدراسیون C₃S را تسهیل می‌کند [63]. متعاقباً، دفع سولفات از C-S-H باعث افزایش رسوب اترینگایت به دلیل انحلال C₃A می‌شود که منجر به پیک آلومینات بالاتر می‌شود [64].

کائولن K10، K9 و K5 به ترتیب دارای محتوی کائولن ۴۲/۶۱٪، ۳۶/۱۱٪ و ۲۲/۲۲٪ بودند با توجه به اینکه محتوی قابل قبولی داشتند ولی مقاومت کمتری نسبت به نمونه ۲۸ روزه سیمان پرتلند کسب کرده بودند. این می‌تواند به دلیل ساختار نیمه منظم و سطح ویژه پایین آنها باشد که سبب پایین آوردن واکنش پوزولانی شده بود.

کائولن K1 دارای محتوی خیلی پایین کائولن ۱۳/۰۹٪ بود و به دلیل محتوی پایین کائولن هیچ کدام از مقاومت‌های ۲۸ و ۹۰ روزه آن مشابه سیمان پرتلند نشده بود.

خاک K3 محتوی کائولن ۱۶٪ و همچنین محتوی قلیایی بالایی برابر ۳/۴۵٪ داشت. مقاومت ۹۰ روزه نسبت به ۲۸ روزه در خاک K3 به دلیل محتوی قلیایی بالا (۳/۴۵٪) افزایش چندانی نداشت. اکسیدهای قلیایی هیدراسیون در سنین اولیه سیمان را تسریع می‌کنند [65] ولی در درازمدت سرعت هیدراسیون و مقاومت را کاهش می‌دهند [66]. همچنین خاک K3 محتوی بالای Fe₂O₃ به میزان ۵/۳۵٪ را نیز دارا بود. مطابق با تحقیقات Ghorbel [67] آهن تا محتوای بهینه ۲/۷ درصد فعالیت پوزولانی کائولن را افزایش و منجر به افزایش مقاومت فشاری می‌شود و مقادیر بیشتر از آن فعالیت پوزولانی را کاهش می‌دهد. علاوه بر این خاک K3 الزامات شیمیایی ASTM C618 [68] جهت استفاده به عنوان پوزولان رس کلسینه شده، شامل مقدار حداقل ۷۰٪ مجموع SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃، محتوی قلیایی حداکثر ۱/۵٪ و مقدار LOI حداکثر ۱۰٪ را برآورده نمی‌کرد.

خاک K8 با توجه به اینکه محتوی کائولن ۳۴/۵۰٪ را نیز داشت

دلیل واکنش‌های پوزولانی کاهش می‌یابد [55]. سنگ آهک نیز با C3A کلینکر واکنش می‌دهد تا هیدرات کربوآلومینات را تشکیل دهد [56] که ادامه‌دهنده کاهش تخلخل هستند. همه این محصولات فضا را پر می‌کنند و به توسعه خصوصیات مقاومت و دوام کمک می‌کنند.

کائولن K4 با محتوی کائولن ۱۶٪ مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روزه بیشتری نسبت به سیمان پرتلند داشت. خاک K4 دارای ساختار نامنظم، سطح ویژه بالا و با اندازه متوسط ریزی حدود ۲μm بود. این خاک علاوه بر کائولن دارای محتوی ۶ درصد آلونیت نیز بود. علاوه بر ریزساختار خوب خاک، وجود آلونیت در خاک K4 سبب افزایش مقاومت شده بود. سیمان‌های حاوی آلونیت به سرعت سخت می‌شوند و خواص مقاومتی بالایی دارند، زیرا آلونیت به عنوان یک تسریع‌کننده در تولید سیمان استفاده می‌شود [57]. لازم به ذکر است که آلونیت تنها پس از کلسینه شدن در آب، اسیدها یا بازها قابل حل می‌شود [58] و می‌توان با افزودن آلونیت به سیمان به مقاومت اولیه بالایی در بتن رسید. با ادامه یافتن هیدراسیون، انحلال آلونیت غلظت معینی از SO₄⁻² را نگه می‌دارد که با ژل Al(OH)₃ واکنش می‌دهد و اترینگایت را تشکیل می‌دهد تا ساختار سیمان را متراکم می‌کند [59]. علاوه بر این، تغلیظ ژل Al(OH)₃، ژل C-S-H و اترینگایت بین یکدیگر، تراکم ساختار سیمان را افزایش داده و مقاومت در برابر انقباض خشک بتن و خوردگی شیمیایی را بهبود می‌بخشد [60]. کائولن K6 و K7 هر دو محتوی کائولن حدود ۳۰٪ را داشتند. نتایج مقاومت فشاری برای خاک K7 نسبت به خاک K6 بهتر بود که می‌تواند به دلیل نامنظمی، سطح ویژه و ریزی بالاتر و همچنین وجود محتوی ۲٪ آلونیت در آن نسبت به خاک K6 باشد. کائولن K6 با محتوی کائولن ۲۹/۷۵٪ فقط حاوی فازهای همراه کائولن، کلسیت و کوارتز بود و مقاومت فشاری بالاتری نسبت به سیمان پرتلند داشت که می‌تواند به دلیل نامنظمی، سطح ویژه و ریزی بالای خاک باشد که سبب افزایش فعالیت پوزولانی شده بود. به خوبی شناخته شده است که هر چه اندازه ذرات ریزتر باشد، واکنش پذیری و در نتیجه مقاومت بیشتر خواهد بود [61].

رس‌های با سطح ویژه بالاتر مستقل از محتوی متاکائولن خود، در مقایسه با خاک‌های با سطح ویژه کمتر، به قله سیلیکات و قله آلومینات بالاتری منجر شوند در واقع مکانیسم تسریع واکنش

مقاومت بیشتری نسبت به خاک‌های نامنظم با محتوی مشابه کائولن داشتند که به دلیل ساختار نیمه منظم این خاک‌ها که کاهش واکنش پوزولانی را در پی داشت بود. علاوه بر اینکه خاک‌ها باید مطابق ASTM C618 [68] الزامات شیمیایی را برآورده کنند بایستی الزامات فیزیکی که شامل شاخص فعالیت مقاومتی که معادل حداقل مقاومت فشاری ۷۵٪ نمونه کنترل در سنین ۷ و ۲۸ روزه است را نیز برآورده کنند. در تصاویر ۶-۴ حداقل مقاومت فشاری در سنین ۷ روزه و ۲۸ روزه به صورت خط‌چین مشخص شده است. با توجه به رعایت الزامات به لحاظ خصوصیات شیمیایی و فیزیکی با جای‌گذاری ۵۰٪ و ۵۵٪ مواد سیمانی مکمل کلیه خاک‌ها به جز K3 و K8 و با جای‌گذاری ۶۰٪ فقط خاک‌های K4, K6, K7 و K11 مورد استفاده هستند.

۳-۵- مقایسه مقاومت الکتریکی حجمی

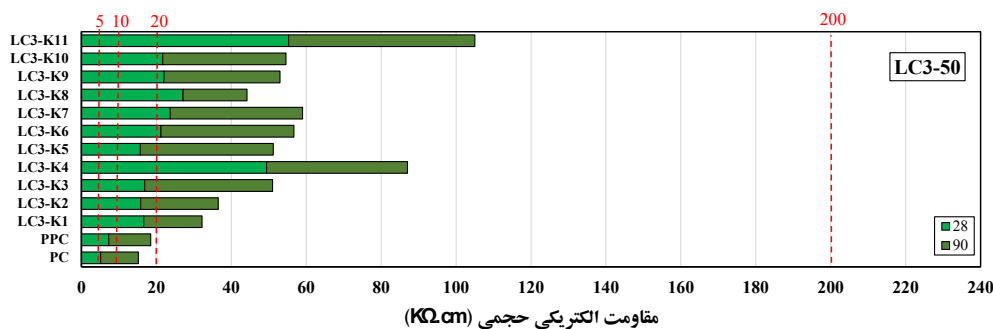
مقاومت ویژه الکتریکی حجمی نمونه‌های با جای‌گذاری ۵۰، ۵۵ و ۶۰ درصد در تصاویر ۸-۶ نشان داده شده است. هنگامی که فاز سنگ‌دانه در تمام مخلوط‌های آزمایش شده ثابت نگه داشته شود، مقاومت الکتریکی به ریزساختار خمیر سیمان بستگی دارد که با حجم، اندازه و منافذ به هم پیوسته و رطوبت مشخص می‌شود [71]. به‌طور کلی به دلیل افزایش محتوی کائولن، افزایش هیدراسیون و کاهش تخلخل مقاومت الکتریکی با افزایش سن نمونه و افزایش میزان جای‌گذاری افزایش یافت.

ولی هیچ کدام از مقاومت‌های ۹۰ و ۲۸ روزه این خاک به مقاومت سیمان پرتلند نرسید. این خاک سطح ویژه پایینی داشت و محتوی قلیایی بالای ۱/۷٪ را دارا بود و الزامات شیمیایی ASTM C618 [68] را برآورده نمی‌کرد. محتوی بالای Fe₂O₃ به میزان ۴/۷۵٪، سطح ویژه پایین و محتوی قلیایی بالا سبب واکنش‌پذیری پایین خاک K8 شده بود.

تصاویر ۴ و ۵ به ترتیب مربوط به مقاومت فشاری نمونه‌های با جای‌گذاری ۵۵ و ۶۰ درصد مواد سیمانی مکمل می‌باشد. همان‌طور که مشخص است جای‌گذاری بیشتر از ۵۰ درصد مقدار کلینکر منجر به کاهش مقاومت بیشتر نمونه‌ها شده است. در یک سیستم سیمان آمیخته، درجه هیدراسیون کلینکر نقش مهمی در واکنش پوزولانی دارد. به‌عنوان مثال، اگر جایگزینی کلینکر با متاکائولن بیش از حد زیاد باشد، پرتلندیت کافی برای واکنش پوزولانی متاکائولن وجود نخواهد داشت [69,70].

دو خاک K4 و K11 که به ترتیب شامل محتوی کائولن ۵۳/۴۸٪ و ۱۶٪ بود، در جای‌گذاری ۵۵ و ۶۰ درصد نیز به مقاومت فشاری مشابه با سیمان پرتلند رسیده بودند. خاک K11 به دلیل محتوی بالا و خاک K4 اگرچه محتوی کائولن کمی داشت ولی به دلیل اینکه دارای آلونیت با واکنش‌پذیری بالا بود تا جای‌گذاری ۶۰ درصد نیز قابل استفاده بودند. لازم به ذکر است هر دو خاک ویژگی‌های ساختاری خوبی نیز داشتند.

خاک‌های نیمه منظم K9 و K10 با جای‌گذاری ۶۰ درصد کاهش

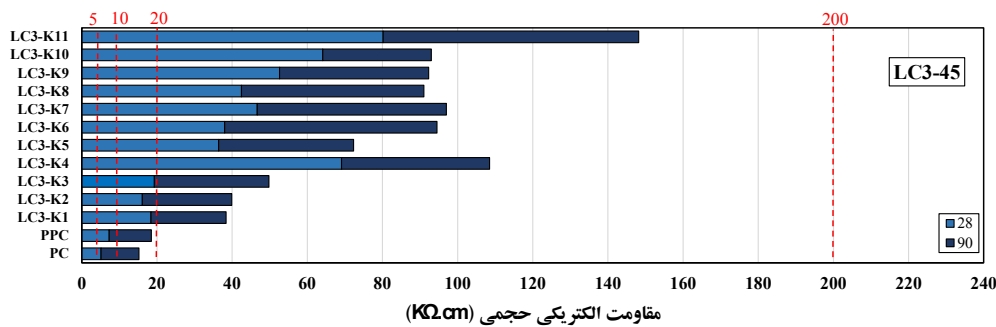


تصویر ۶- مقاومت ویژه الکتریکی حجمی ۲۸ و ۹۰ روزه سیمان LC³-50 با جای‌گذاری ۵۰٪ مواد سیمانی مکمل

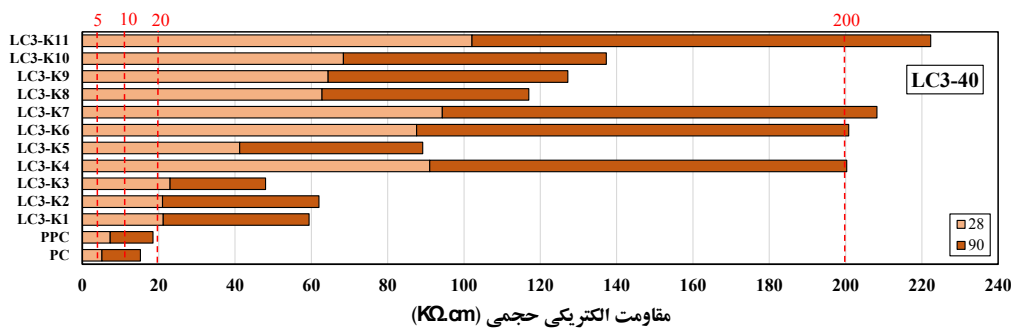
جدول ۶ و تصاویر ۸-۶ به صورت خط‌چین نشان داده شده است. میزان نفوذپذیری کلراید سیمان پرتلند و پوزولانی ویژه در سنین ۲۸ روزه در محدوده متوسط و در سنین ۹۰ روزه در محدوده کم قرار گرفتند. میزان نفوذپذیری کلراید برای سیمان LC³ با خاک‌های مختلف در سن ۹۰ روزه در جای‌گذاری‌های ۵۰ و ۵۵٪ در محدوده

مقاومت الکتریکی در سن ۹۰ روز در جای‌گذاری ۵۰٪ با توجه به مقدار محتوی خاک کائولن بین ۲ تا ۷ برابر سیمان پرتلند، در جای‌گذاری ۵۵٪ بین ۲/۵ تا ۱۰ برابر سیمان پرتلند و در جای‌گذاری ۶۰٪ بین ۴ تا ۱۵ برابر سیمان پرتلند افزایش یافت. طبقه‌بندی نفوذپذیری کلراید بر اساس مقاومت الکتریکی حجمی [72] در

خیلی کم قرار گرفت و در جای گذاری ۶۰٪ برای ۴ خاک K4، K6، K7 و K11 در محدوده ناچیز و برای سایر خاک‌ها در محدوده خیلی کم قرار گرفت. بتن ساخته شده با چسباننده LC³ مقاومت بالاتری در برابر مشکلات دوام ناشی انتشار یون کلراید و خوردگی در یک محیط مملو از کلراید دارد و این ویژگی همچنین در سنین پایین به طور قابل توجهی بهتر از سایر سیمان پرتلند و پرتلند پوزولانی است.



تصویر ۷- مقاومت ویژه الکتریکی حجمی ۲۸ و ۹۰ روزه سیمان LC³-45 با جای گذاری ۵۵٪ مواد سیمانی مکمل



تصویر ۸- مقاومت ویژه الکتریکی حجمی ۲۸ و ۹۰ روزه سیمان LC³-40 با جای گذاری ۶۰٪ مواد سیمانی مکمل

که تأثیر قابل توجهی بر مقاومت الکتریکی بتن ندارد. این بیشتر به این واقعیت مربوط می‌شود که ترکیب شیمیایی محلول منفذی تأثیر زیادی بر مقاومت فشاری ندارد درحالی که به طور قابل توجهی بر مقاومت الکتریکی بتن تأثیر می‌گذارد. مقاومت الکتریکی ۹۰ روزه در نمونه K3 که محتوی قلیایی بسیار بالایی (۳/۴۵٪) داشت با جای گذاری‌های بالاتر کاهش داشت زیرا محتوی قلیایی بالا منجر به افزایش تخلخل و در نتیجه کاهش مقاومت الکتریکی می‌شود.

جدول ۶- طبقه‌بندی نفوذپذیری کلراید

مقاومت ویژه الکتریکی (KΩ.cm)	نفوذپذیری کلراید
<۵	زیاد
5-10	متوسط
10-20	کم
20-200	خیلی کم
>200	ناچیز

هنگامی که از خاک‌های کائولن مختلف در مخلوط بتن استفاده شد، مشاهده گردید که هیچ رابطه معقولی بین مقاومت الکتریکی بتن و مقاومت فشاری وجود ندارد. خاک‌های K9 و K10 در جای گذاری ۶۰٪ با توجه به اینکه مقاومت فشاری خوبی نداشتند ولی مقاومت الکتریکی خوبی از خود نشان دادند. این نشان می‌دهد که هیچ ارتباط عملی بین مقاومت الکتریکی و مقاومت فشاری برای مواد مختلف سیمانی وجود ندارد. در مقاومت فشاری، یکی از عوامل کلیدی، مقاومت ناحیه انتقال میان سطحی^۱ (ITZ) است

۴- نتایج

ویژگی‌های سیمان LC³ با خاک‌های کائولن مختلف در مقایسه با سیمان پرتلند به شرح زیر است:
- با توجه به وجود فازهای همراه در خاک رس و نقش مؤثر آنها در فعالیت پوزولانی کائولن کنترل محتوی کائولن موجود در این خاک‌ها باید به هر دو روش TGA و XRD انجام شود.
- محتوی آمورف رابطه مستقیمی با میزان نامنظمی خاک دارد، هر

¹ Interfacial Transition Zone

۶- مراجع

- [1] Müller N, Harnisch J. A blueprint for a climate friendly cement industry. Gland: WWF lafarge conservation partnership 2008.
- [2] Cembureau, "World Statistical Review 2004 - 2014," <https://cembureau.eu>, 2017.
- [3] Locher FW. Cement: principles of production and use: Verlag Bau+ Technik; 2013.
- [4] WBCSD, Cement Sustainability Initiative, Getting the numbers right, <http://www.wbcscement.org/index.php/key-issues/climate-protection/gnr-database>."
- [5] Snellings R. Assessing, understanding and unlocking supplementary cementitious materials. RILEM Technical Letters 2016;1:50-5.
- [6] Saad MNA, Andrade WP de, Paulon VA. Properties of mass concrete containing an active pozzolan made from clay. Concrete International 1982;4(7):59-65.
- [7] Lothenbach B, Scrivener K, Hooton RD. Supplementary cementitious materials. Cement and concrete research 2011;41(12):1244-56.
- [8] Matschei T, Lothenbach B, Glasser FP. The role of calcium carbonate in cement hydration. Cement and concrete research 2007;37(4):551-8.
- [9] Scrivener KL. Options for the future of cement. Indian Concr. J 2014;88(7):11-21.
- [10] Mañosa J, Calderón A, Salgado-Pizarro R, Maldonado-Alameda A, Chimenos JM. Research evolution of limestone calcined clay cement (LC3), a promising low-carbon binder—A comprehensive overview. Heliyon 2024.
- [11] Avet F, Li X, Scrivener K. Determination of the amount of reacted metakaolin in calcined clay blends. Cement and concrete research 2018;106:40-8.
- [12] Avet F, Scrivener K. Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of Limestone Calcined Clay Cement (LC3). Cement and concrete research 2018;107:124-35.
- [13] Avet F, SCRIVENER, Karen. Hydration study of limestone calcined clay cement (LC 3) using various grades of calcined kaolinitic clays. In: Calcined Clays for Sustainable Concrete: Proceedings of the 2nd International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete. Springer Netherlands, 2018. p. 35-40.. In:
- [14] Avet F, Scrivener KL, Reaction degree of metakaolin in limestone calcined clay cement (LC 3). In: Calcined Clays for Sustainable Concrete: Proceedings of the 2nd International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete. Springer Netherlands, 2018. p. 41-45.
- [15] Bishnoi S, Maity S, Mallik A, Joseph S,

چه محتوی آمورف بیشتر باشد خاک نامنظم تر است.

- اندازه دانه بندی رابطه معکوسی با سطح ویژه داشت به طوری که هر چه اندازه دانه بندی ریزتر بود سطح ویژه نیز بیشتر بود.

- تحقیقات موجود در زمینه LC³ حاکی از آن است حاکی با محتوی کائولن ۴۰٪، مقاومت فشاری مشابه با سیمان پرتلند در سنین ۷ و ۲۸ روزه را به دست می دهد اما مطابق با داده های این تحقیق با محتوی ۴۰٪ کائولن الزاماً نمی توان به مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه در حدود سیمان پرتلند رسید، به عنوان مثال در صورتی که ریزساختار خاک خوب نباشد، خاک منظم باشد، سطح ویژه پایین و اندازه ذرات درشتی داشته باشد، حتی با محتوی کائولن ۴۰٪ نیز نمی توان سیمان LC³ مشابه با مقاومت سیمان پرتلند ساخت.

- تکنولوژی LC³ در صورتی که خاک ویژگی های ریزساختاری خوبی نظیر نامنظمی بالا، فازهای همراه با واکنش پذیری خوب، سطح ویژه و ریزی بالایی داشته باشد، نیاز به رس با درجه خلوص بالایی ندارد. در این صورت حاکی که حدود ۳۰٪ کائولن نیز داشته باشد با جای گذاری ۵۰ درصد مواد سیمانی مکمل مقاومتی مشابه با سیمان پرتلند را در سنین ۷ و ۲۸ روزه به دست می دهد و حتی در جای گذاری ۶۰٪ نیز مناسب برای ساخت سیمان LC³ است.

- وجود آلونیت در خاک رس نقش مؤثری در واکنش پوزولانی کائولن دارد به طوری که امکان استفاده از رس درجه پایین با محتوی ۱۶٪ کائولن را برای ساخت سیمان LC³ حتی تا جای گذاری ۶۰٪ مواد سیمانی مکمل را نیز مقدور می سازد.

- مقاومت الکتریکی سیمان LC³ نسبت به سیمان پرتلند به دلیل تخلخل کمتر به طور قابل توجهی بیشتر بود و با افزایش جای گذاری از ۵۰٪ تا ۶۰٪ مقاومت الکتریکی بیشتر شده بود، به طوری که در نمونه K11 با جای گذاری ۶۰٪ و محتوی کائولن ۵۳/۴۸٪ مقاومت الکتریکی در سن ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب حدود ۲۰ و ۱۵ برابر مقاومت الکتریکی سیمان پرتلند شده بود، لازم به ذکر است در این شرایط امکان نفوذپذیری یون کلراید بسیار ناچیز است.

۵- قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از مدیرعامل محترم کارخانه سیمان سیستان و همچنین مسئول محترم آزمایشگاه کارخانه که ما را در انجام و ارتقای کیفی این پژوهش یاری دادند، اعلام کنند.

- Electrical resistivity of concrete. *Concrete International* 2015;37(5):41–6.
- [29] Maraghechi H, Avet F, Wong H, Kamyab H, Scrivener K. Performance of Limestone Calcined Clay Cement (LC 3) with various kaolinite contents with respect to chloride transport. *Materials and structures* 2018;51:1–17.
- [30] Aparicio P, Galán E. Mineralogical interference on kaolinite crystallinity index measurements. *Clays and Clay Minerals* 1999;47:12–27.
- [31] Brigatti MF, Galan E, Theng BK. Structures and mineralogy of clay minerals. *Developments in clay science* 2006;1:19–86.
- [32] Hart RD, Gilkes RJ, Siradz S, Singh B. The nature of soil kaolins from Indonesia and Western Australia. *Clays and Clay Minerals* 2002;50(2):198–207.
- [33] Lorentz B, Shanahan N, Stetsko YP, Zayed A. Characterization of Florida kaolin clays using multiple-technique approach. *Applied Clay Science* 2018;161:326–33.
- [34] Földvári M. *Handbook of thermogravimetric system of minerals and its use in geological practice: Geological Institute of Hungary Budapest*; 2011.
- [35] Kakali G, Perraki TH, Tsivilis S, Badogiannis E. Thermal treatment of kaolin: the effect of mineralogy on the pozzolanic activity. *Applied Clay Science* 2001;20(1-2):73–80.
- [36] Hu Y, Liu X. Chemical composition and surface property of kaolins. *Minerals Engineering* 2003;16(11):1279–84.
- [37] Yamada K. Basics of analytical methods used for the investigation of interaction mechanism between cements and superplasticizers. *Cement and concrete research* 2011;41(7):793–8.
- [38] Bishnoi, Shashank. Vector modelling of hydrating cement microstructure and kinetics. No. 4093. EPFL, 2008..
- [39] Fernández, Maria Mercedes Costoya. Effect of particle size on the hydration kinetics and microstructural development of tricalcium silicate. Diss. Verlag nicht ermittelbar, 2008..
- [40] Lea's *Chemistry of Cement and Concrete*, Fourth Edition Butterworth-Heinemann, Oxford, 2003.
- [41] Edomwonyi-Otu L, Aderemi BO, Ahmed AS, Coville NJ, Maaza M. Influence of thermal treatment on kankara kaolinite. *Opticon* 2013;15(15).
- [42] Duminuco P, Messiga B, Riccardi MP. Firing process of natural clays. Some microtextures and related phase compositions. *Thermochimica Acta* 1998;321(1-2):185–90.
- Krishnan S. Pilot scale manufacture of limestone calcined clay cement: the Indian experience. *Indian Concr. J* 2014;88(6):22–8.
- [16] Scrivener K, Avet F, Maraghechi H, Zunino F, Ston J, Hanpongpun W et al. Impacting factors and properties of limestone calcined clay cements (LC3). *Green materials* 2018;7(1):3–14.
- [17] Scrivener K, Martirena F, Bishnoi S, Maity S. Calcined clay limestone cements (LC3). *Cement and concrete research* 2018;114:49–56.
- [18] Yu C, Yuan P, Yu X, Liu, Jiaping, Degradation of calcined clay-limestone cementitious composites under sulfate attack. In: *Calcined Clays for Sustainable Concrete: Proceedings of the 2nd International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete*. Springer Netherlands, 2018. p. 110-116. In:
- [19] Antoni, Mathieu. Investigation of cement substitution by blends of calcined clays and limestone. No. 6001. EPFL, 2013..
- [20] Avet F, Snellings R, Diaz AA, Haha MB, Scrivener K. Development of a new rapid, relevant and reliable (R3) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays. *Cement and concrete research* 2016;85:1–11.
- [21] Alujas A, Fernández R, Quintana R, Scrivener KL, Martirena F. Pozzolanic reactivity of low grade kaolinitic clays: Influence of calcination temperature and impact of calcination products on OPC hydration. *Applied Clay Science* 2015;108:94–101.
- [22] Kijjanon A, Sumranwanich T, Saengsoy W, Tangtermsirikul S. Chloride penetration resistance, electrical resistivity, and compressive strength of concrete with calcined kaolinite clay, fly ash, and limestone powder. *Journal of Materials in Civil Engineering* 2023;35(3):4022462.
- [23] Shafiq N, Nuruddin MF, Khan SU, Ayub T. Calcined kaolin as cement replacing material and its use in high strength concrete. *Construction and Building Materials* 2015;81:313–23.
- [24] Avet F, Scrivener K. Simple and Reliable Quantification of Kaolinite in Clay Using an Oven and a Balance. In: Bishnoi S, editor. *Calcined Clays for Sustainable Concrete*. Singapore: Springer Singapore; 2020, p. 147–56.
- [25] Aparicio P, Galán E, Ferrell RE. A new kaolinite order index based on XRD profile fitting. *Clay Minerals* 2006;41(4):811–7.
- [26] ASTM C-204. Fineness of Hydraulic Cement by Air Permeability Apparatus, 1995 Annual Book of ASTM Standards.
- [27] BS EN 12390-3. Testing hardened concrete Compressive strength of test specimens; 2019.
- [28] Layssi H, Ghods P, Alizadeh AR, Salehi M.

- metakaolin. *Applied Clay Science* 2009;44(3-4):194–200.
- [54] Ambroise J, Murat M, Pera J. Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals. IV. Experimental conditions for strength improvement on metakaolinite minicylinders. *Cement and concrete research* 1985; 15(1):83–8.
- [55] Hay R, Li L, Celik K. Shrinkage, hydration, and strength development of limestone calcined clay cement (LC3) with different sulfation levels. *Cement and concrete composites* 2022;127:104403.
- [56] Bonavetti VL, Rahhal VF, Irassar EF. Studies on the carboaluminate formation in limestone filler-blended cements. *Cement and concrete research* 2001;31(6):853–9.
- [57] Özacar M. Phosphate adsorption characteristics of alunite to be used as a cement additive. *Cement and concrete research* 2003;33(10):1583–7.
- [58] Özdemir M, Çetişli H. Extraction kinetics of alunite in sulfuric acid and hydrochloric acid. *Hydrometallurgy* 2005;76(3-4):217–24.
- [59] Fu X, Yang C, Liu Z, Tao W, Hou W, Wu X. Studies on effects of activators on properties and mechanism of hydration of sulphoaluminate cement. *Cement and concrete research* 2003;33(3):317–24.
- [60] Katsioti M, Giannikos D, Tsakiridis PE, Tsibouki Z. Properties and hydration of blended cements with mineral alunite. *Construction and Building Materials* 2009;23(2):1011–21.
- [61] Abdulqader M, Khalid HR, Ibrahim M, Adekunle SK, Al-Osta MA, Ahmad S et al. Physicochemical properties of limestone calcined clay cement (LC3) concrete made using Saudi clays. *Journal of Materials Research and Technology* 2023.
- [62] Zunino F, Scrivener, Karen L., The Origin of the Increased Sulfate Demand of Blended Cements Incorporating Aluminum-Rich Supplementary Cementitious Materials. In: *Calcined Clays for Sustainable Concrete: Proceedings of the 3rd International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete*. Springer Singapore, 2020. p. 309-314. In:
- [63] Neto, José da Silva Andrade, Angeles G, Kirchheim AP. Effects of sulfates on the hydration of Portland cement—A review. *Construction and Building Materials* 2021;279:122428.
- [64] Zunino F, Scrivener K. The influence of the filler effect on the sulfate requirement of blended cements. *Cement and concrete research* 2019;126:105918.
- [65] Mota B, Matschei T, Scrivener K. The influence of sodium salts and gypsum on alite [43] Zunino Sommariva, Franco Alberto. Limestone calcined clay cements (LC3): raw material processing, sulfate balance and hydration kinetics. No. 8173. EPFL, 2020..
- [44] Singh NB, Wali SK, Saxena SK, Kumar, Mukesh, Properties of Calcined Clay-Based Geopolymer Mortars in Presence of Alccofine Powder and Recron Fiber. In: *Calcined Clays for Sustainable Concrete: Proceedings of the 3rd International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete*. Springer Singapore, 2020. p. 759-766.
- [45] Wali SK, Saxena SK, Kumar, Mukesh, Development of Green Additive for Cement and Concrete Industries. In: *Calcined Clays for Sustainable Concrete: Proceedings of the 3rd International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete*. Springer Singapore, 2020. p. 807-814.
- [46] He C, Makovicky E, Osbaeck B. Thermal stability and pozzolanic activity of calcined kaolin. *Applied Clay Science* 1994;9(3):165–87.
- [47] Wagh CD, Manu SN, Dinakar, P., Rheological Properties of Self-Compacting Lightweight Concrete with Metakaolin. *Calcined Clays for Sustainable Concrete: Proceedings of the 3rd International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete*. Springer Singapore, 2020. p. 237-244.
- [48] Jankovic A, Valery W, Davis E. Cement grinding optimisation. *Minerals Engineering* 2004;17(11-12):1075–81.
- [49] Mishra DK, Yu J, Leung, Christopher K., Comparison of Strength Activity of Limestone-Calcined Clay and Class F Fly Ash. In: *Calcined Clays for Sustainable Concrete: Proceedings of the 3rd International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete*. Springer Singapore, 2020. p. 481-490.
- [50] Cao Z, Cao Y, Dong H, Zhang J, Sun C. Effect of calcination condition on the microstructure and pozzolanic activity of calcined coal gangue. *International Journal of Mineral Processing* 2016;146:23–8.
- [51] Badogiannis E, Kakali G, Tsvivilis S. Metakaolin as supplementary cementitious material: optimization of kaolin to metakaolin conversion. *Journal of thermal analysis and calorimetry* 2005;81(2):457–62.
- [52] Samet B, Mnif T, Chaabouni M. Use of a kaolinitic clay as a pozzolanic material for cements: Formulation of blended cement. *Cement and concrete composites* 2007;29(10):741–9.
- [53] Bich C, Ambroise J, Péra J. Influence of degree of dehydroxylation on the pozzolanic activity of

- hydration. *Cement and concrete research* 2015;75:53–65.
- [66] Smaoui N, Bérubé MA, Fournier B, Bissonnette B, Durand B. Effects of alkali addition on the mechanical properties and durability of concrete. *Cement and concrete research* 2005;35(2):203–12.
- [67] Ghorbel H, Samet B. Effect of iron on pozzolanic activity of kaolin. *Construction and Building Materials* 2013;44:185–91.
- [68] ASTM C 618-05, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete, 2005.
- [69] Cardinaud G, Rozière E, Martinage O, Loukili A, Barnes-Davin L, Paris M et al. Calcined clay–Limestone cements: Hydration processes with high and low-grade kaolinite clays. *Construction and Building Materials* 2021;277:122271.
- [70] Krishnan S, Gopala Rao D, Bishnoi, Shashank, Why Low-Grade Calcined Clays Are the Ideal for the Production of Limestone Calcined Clay Cement (LC 3). In: *Calcined Clays for Sustainable Concrete: Proceedings of the 3rd International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete*. Springer Singapore, 2020. p. 125-130.
- [71] Su J-K, Yang C-C, Wu W-B, Huang R. Effect of moisture content on concrete resistivity measurement. *Journal of the Chinese Institute of Engineers* 2002;25(1):117–22.
- [72] Thomas RJ, Ariyachandra E, Lezama D, Peethamparan S. Comparison of chloride permeability methods for Alkali-Activated concrete. *Construction and Building Materials* 2018; 165:104–11.

The potential of making LC³ cement with different types of kaolin

Fatemeh Arbab

Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran.

Amir Tarighat *

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran.

Mohsenali Shayanfar

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran.

Abstract

Cement and concrete are essential for the infrastructure of the modern world. The broad availability and low cost of cement production are the primary reasons for its widespread use in construction, contributing to approximately 5-8% of CO₂ emissions. Using supplementary cementitious materials (SCMs) to replace part of the clinker in cement is the most successful solution to reduce carbon dioxide emissions in the worldwide cement industry. Limestone calcined clay cement (LC³) permits the substitution of cement with calcined clay and limestone. This research investigates the properties and characteristics of LC³ cement by considering the crystallinity, associated phases, and specific surface area before and after kaolin calcination, and with 50, 55, and 60% substitution of supplementary cementitious materials compared with 11 different types of kaolin clays compared to Portland cement. The results showed that LC³ concrete with kaolin content of 30% and 16% with 50% substitution at the age of 28 days reaches a compressive strength of about 1.19 times and an electrical resistance of 4.7 and 9.7 times, respectively, compared to Portland cement and also in substitution up to 60%, at the age of 28 days, it reaches acceptable compressive strength and electrical resistance about 1.8 times that of Portland cement and Portland Pozzolana cement.

Keywords: Calcined clay, Limestone, Cement, LC³, Concrete.

* Corresponding Author: tarighat@sru.ac.ir

