

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

محمد رضا عالمیان^۱، مهدی دهستانی^{۱*}، سید سینا موسوی^۱

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران

چکیده

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

کلمات کلیدی: رس کلسینه؛ بازیافتی؛ ملات سبز؛ سیمان کم کربن؛ سرباره کوره آهن گدازی.

* Corresponding author, Email: dehestani@nit.ac.ir

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

از این‌رو، محققین برای بهبود این شرایط به دنبال راهکارهایی مانند جایگزینی سیمان هستند. با توجه به صنعت ساخت و ساز که بیش از نیمی از منابع طبیعی مصرف شده را به خود اختصاص می‌دهد، یکی از چالش‌های توسعه پایدار به عنوان اثرات زیست-محیطی مرتبط، کاهش میزان مواد و استفاده از مواد بازیافتی خواهد بود [۶، ۷]. تحقیق و توسعه شکل‌های مختلف سیمان کم‌کربن^۲ در سال‌های اخیر به عنوان یک راه‌حل حیاتی برای جبران ردپای کربن در نظر گرفته شده است [۸-۱۰]. سیمان کم‌کربن به عنوان نوع منحصر به فردی از سیمان، به گونه‌ای طراحی شده است که اثرات زیست‌محیطی به ویژه انتشار گازهای گلخانه‌ای کمتری داشته باشد. استفاده از مواد سیمانی مکمل مانند پوزولان‌ها، سنگ‌آهک یا آهک هیدراته می‌تواند پایداری بتن را افزایش و در عین حال شدت کربن را کاهش دهد [۱۱، ۱۲]. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از مواد جایگزین سیمان خواص مکانیکی، کارایی، و دوام بتن را بهبود می‌بخشد و همچنین فشار محیطی را کاهش می‌دهد [۱۳].

به دلیل توزیع جغرافیایی نسبتاً خوب خاک رس و اثبات خواص پوزولانی آن‌ها پس از فرآیند کلسیناسیون، در مطالعات گذشته علاقه فزاینده‌ای به خاک رس کلسینه به عنوان ماده سیمانی مکمل وجود دارد. با فعال‌سازی حرارتی کانی‌های رسی در محدوده ۵۵۰ تا ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد، می‌توان فازهای غنی از آلومینا و سیلیس را با ساختارهای تا حدی نامنظم بدست آورد که واکنش پوزولانی را نشان می‌دهند [۱۴]. صرفه جویی در انرژی و کاهش انتشار دی‌اکسید کربن به این دلیل رخ می‌دهد که دمای کلسیناسیون کمتر از دمای مورد نیاز برای فرآیند کلینکرینگ است و انتشار دی‌اکسید کربن مرتبط با کربن‌زدایی مواد خام وجود ندارد [۱۵، ۱۶]. خاک رس کلسینه و پودر سنگ‌آهک به ترتیب به سبب خاصیت پوزولانی و پرکنندگی به عنوان مواد جایگزین سیمان مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۷، ۱۸]. سیمان‌های حاوی آلومین با فازهای کربناته موجود در پودر سنگ‌آهک واکنش داده و فازهای کربوآلومینات را که سخت و کریستالی هستند تولید و به توسعه ریزساختار کمک می‌کنند [۱۹-۲۱]. در ادبیات فنی گزارش شد که استفاده هم‌زمان از خاک رس کلسینه و پودر سنگ‌آهک برای جایگزینی جزئی سیمان عملکرد بهتری نسبت به جایگزینی هر کدام از آن‌ها به تنهایی خواهد داشت [۲۲]. در مطالعه‌ای هانداپانی و همکاران گزارش شد که رشد مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی خاک رس کلسینه و پودر سنگ‌آهک (سیمان سه جزئی LC^3) در مقایسه با نمونه‌ی مرجع بهتر بوده است [۲۳]. همچنین رضانیان‌پور و همکاران نیز گزارش کردند که رشد مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی مواد جایگزین در بازه زمانی ۷ تا ۲۸ روز در مقایسه با نمونه مرجع بهتر بود. هرچند در بازه زمانی ۱ تا ۷ روز و ۲۸ تا ۹۰ روز نسبت به نمونه مرجع رشد مقاومت کمتری داشته‌اند [۲۴].

² Low-carbon cement

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

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

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

اگرچه خاصیت سیمانی سرباره کوره آهن‌گدازی بسیار ضعیف‌تر از سیمان پرتلند است، اما ممکن است یک اثر میکروکریستالی برای سیستم هیدراتاسیون سیمان داشته باشد که این ماده را برای استفاده به عنوان ماده جایگزین سیمان مناسب می‌کند [۳۷]. از آنجایی که اندازه دانه سرباره کوره آهن‌گدازی کمتر از سیمان پرتلند معمولی است، مقاومت آن در سنین پایین کم اما در مدت طولانی به دلیل اثر پرکنندگی^۳ به مقاومت خود ادامه می‌دهد [۳۸]. با توجه به اهمیت روانی ملات یا بتن در چاپ سازه‌های بتنی با استفاده از دستگاه چاپ سه بعدی، از این‌رو ژائو و همکاران در مطالعه خود ترکیب سرباره کوره آهن‌گدازی و پودر آجر رسی را برای چاپ سه بعدی بتن مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان داد که سطح متفاوت سرباره کوره آهن‌گدازی و پودر آجر رسی بر عملکرد بتن تأثیرگذار بود طوری که قابلیت چاپ ملات تحت تأثیر مورفولوژی و توزیع اندازه ذرات مواد افزودنی قرار گرفت. اگرچه مقاومت

³ filler effect

فشاری ملات چاپ سه بعدی به میزان متوسط ۳۰ درصد کاهش یافت اما به واسطه کاهش قطر منافذ ناشی از ترکیب این دو ماده، سبب کاهش اثرات یون کلرید در بتن شد [۳۹].

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

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح

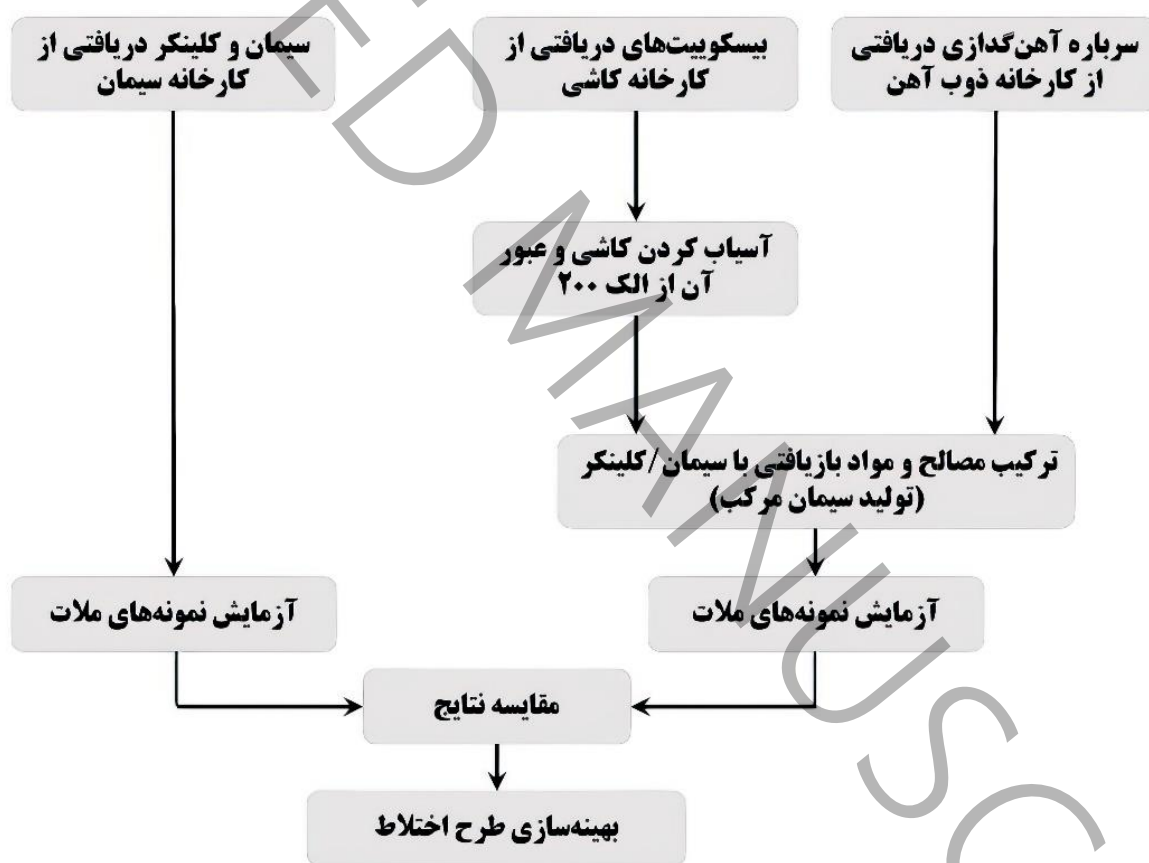
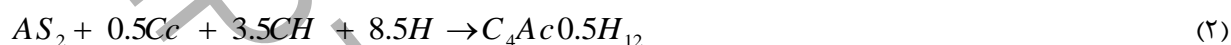
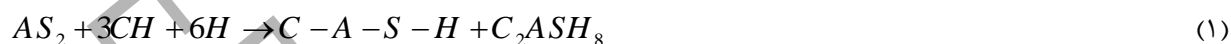
در پژوهش حاضر، از کلینکر و سیمان پرتلند تیپ II کارخانه سیمان مازندران استفاده شده است. به منظور تأمین عملکرد سیمانی کلینکر پس از خردسازی و پودرسازی، پودرهای کلینکر با مقداری گچ ترکیب شده است. نمونه‌های ملات در دو مجموعه مواد پودری شامل پایه سیمان و پایه پودر کلینکر تولید شده‌اند. در این تحقیق، خاک رس کلسینه، پودر سنگ‌آهک، و مواد معدنی بازیافتی شامل سرباره کوره آهن‌گدازی و خاک رس بازیافتی برای تولید سیمان کم‌کربن به عنوان ماده سیمانی مکمل معرفی شده‌اند. خاک رس طبیعی از کارخانه سیمان مازندران، خاک رس بازیافتی از بیسکویت‌های کارخانه کاشی یزد و سرباره کوره آهن‌گدازی نیز از کارخانه ذوب‌آهن شهر اصفهان تهیه شده‌اند. خاک‌های رس در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت زمان ۱ ساعت کلسینه شده‌اند. فرآیند کلسیناسیون در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد برای جلوگیری از کلسیناسیون ناقص و همچنین برای بدست آوردن واکنش پوزولانی بهینه رس کلسینه استفاده می‌شود [۴۰]. الگوریتم روش تحقیق در شکل ۱ نشان داده شده است.

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

در ترکیبات سیمان‌های حاوی خاک رس مانند سیمان LC^3 ، علاوه بر واکنش پوزولانی خاک رس کلسینه (AS_2) با پورتلندیت (CH) که استرانگیت^۴ و C-A-S-H (رابطه ۱) تولید می‌کند، استفاده از این ماده سیمانی مکمل غنی از آلومینا همراه با پودر

⁴ Stratlingite

سنگ آهک و سرپاره کوره آهن گدازی (Cc) منجر به تشکیل فازهای $\text{CO}_3\text{-AFm}$ به عنوان مثال؛ همی کربوآلومینات کلسیم^۵ (رابطه ۲) و مونو کربوآلومینات کلسیم^۶ (رابطه ۳) می شود. این واکنش ها ریزساختار خمیر سیمان سخت شده را تغییر می دهند که می تواند بر خواص مکانیکی، نفوذپذیری و دوام مخلوط های سیمان حاوی خاک رس کلسینه مانند سیمان LC^3 تأثیر مثبت بگذارد [۴۱]. مشخصات مصالح سنگی (ماسه) براساس استاندارد ASTM C128 [۴۲] در جدول ۳ ارائه گردید. منحنی دانه بندی ماسه مطابق با استاندارد ASTM C136 [۴۳] محاسبه شده که در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۱: الگوریتم روش تحقیق

Figure 1. Flowchart of methodology.

⁵ Hemicarboaluminate

⁶ Monocarboaluminate

جدول ۱: مشخصات فیزیکی سیمان و مواد جایگزین جزئی سیمان

Table 1. Cement partial replacements and cement physical properties.

مشخصات	سیمان	کلینکر	خاک رس کلسینه	خاک رس بازیافتی	سربراره کوره آهن-گدازی
درجه ریزی	> ۴۵ میکرومتر	> ۹۰ میکرومتر	> ۹۰ میکرومتر	> ۹۰ میکرومتر	> ۴۵ میکرومتر
		> ۴۵ میکرومتر	> ۴۵ میکرومتر	> ۴۵ میکرومتر	

جدول ۲: ترکیب شیمیایی سیمان و مواد جایگزین سیمان

Table 2. Cementing materials chemical compositions.

LOI	Ti ₂ O	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	
۲/۵	-	۲/۳	۰/۶	۰/۳	۱/۲	۳/۴	۴/۹	۶۳/۲	۲۱/۳	سیمان
۸/۵	۰/۲	-	۱/۲	۰/۴	۱/۴	۲/۳	۳/۳	۴۵/۹	۲۰/۵	کلینکر
۱/۹	۱/۰	-	۳/۱	۱/۴	۲/۳	۹/۶	۲۱/۹	۴/۷	۵۳/۹	رس بازیافتی کلسینه نشده
۳/۸	۱/۰	-	۳/۰	۱/۲	۲/۰	۱۱/۳	۲۰/۵	۴/۲	۵۲/۳	رس بازیافتی کلسینه
۴۲/۹	۰/۰۲	-	۰/۰۳	۰/۱۱	۰/۱۵	۰/۳	۰/۰۶	۵۶/۱	۰/۰۲	سنگ آهک
-	۰/۶	۴/۳	۰/۹۸	۰/۵۹	۶/۵	۰/۶	۹/۱	۳۰/۹	۳۴/۷	سربراره کوره آهن گدازی

جدول ۳: مشخصات ماسه

Table 3. Sand properties.

مشخصات	وزن مخصوص (kg/m ³)	جذب آب (%)
ماسه	۲۵۶۰	۳/۱



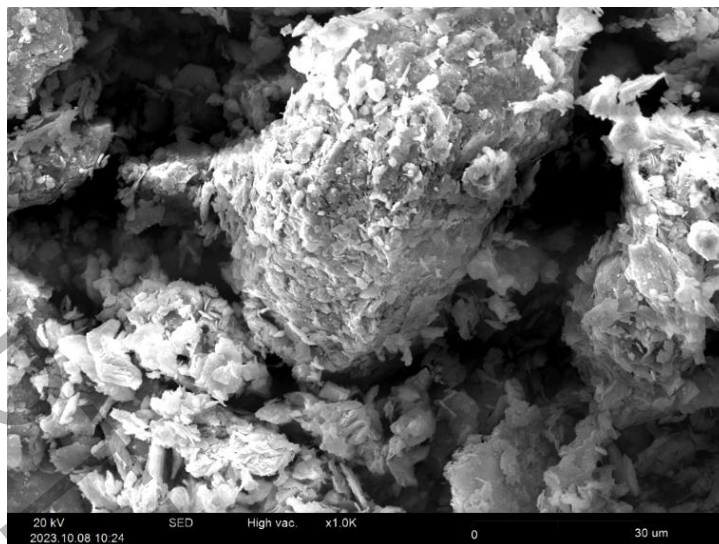
(ب)



(الف)

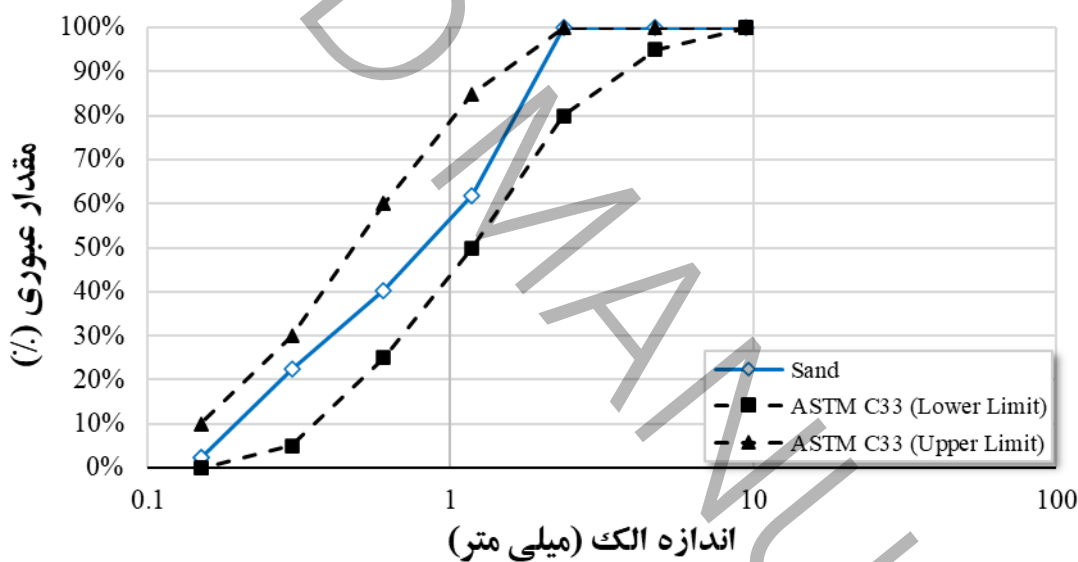
شکل ۲: خاک رس بازیافتی؛ (الف) کلسینه نشده، (ب) کلسینه شده تحت حرارت ۸۵۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱ ساعت

Figure 2. Recycled clay; (a) uncalcined, (b) calcined under 850° for 1 hour.



شکل ۳: عکس میکروسکوپ الکترونی خاک رس بازیافتی کارخانه کاشی

Figure 3. SEM image of recycled clay.



شکل ۴: منحنی دانه‌بندی ماسه

Figure 4. Particle size distribution of sand.

۲-۲- طرح اختلاط ملات

به منظور بررسی اثر جایگزینی سیمان با مواد معدنی بازیافتی، طرح اختلاط‌های حاوی سیمان کم کربن به همراه طرح اختلاط مرجع تهیه شده است. جایگزینی سیمان در مخلوط‌های دو جزئی و سه جزئی با ۲۰، ۳۰ و ۳۵ درصد مواد سیمانی مکمل انجام شده است. نامگذاری و مشخصات مواد پودری نمونه‌های ملات به صورت جدول ۴ در نظر گرفته شده است. طرح اختلاط نمونه‌های ملات حاوی مواد پودری بر پایه سیمان در جدول ۵ و طرح اختلاط نمونه‌های ملات حاوی مواد پودری بر پایه پودر کلینکر در جدول ۶ ارائه شده است. در این تحقیق برای تمامی طرح‌اختلاط‌ها نسبت آب به مواد پودری و نسبت مواد پودری به ماسه به ترتیب برابر

۰/۴۴ و ۰/۵ در نظر گرفته شده است. همچنین اسلامپ نمونه‌های ملات با استفاده از افزودنی فوق‌روان‌کننده در محدوده ۱۶۰-۲۲۰ میلی‌متر محاسبه شد.

در این مطالعه، پس از مخلوط کردن مواد پودری و دستیابی به همگنی مناسب، میزان نرمی برخی از سیمان‌های تولید شده به همراه سیمان مرجع مطابق با استاندارد ASTM C204 [۴۴] و با استفاده از دستگاه نفوذپذیری هوا^۷ اندازه‌گیری شده و نتایج حاصل از آن در شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق شکل مشاهده می‌شود که نرمی سیمان‌های کم‌کربن تولید شده (K₆₅RC₂₀GG₁₅) و (K₆₅RC₂₅GG₁₀) در مقایسه با سیمان مرجع (K₁₀₀) قابل قبول بوده است. نکته قابل ملاحظه آن است که میزان نرمی کلینکر که در آزمایشگاه تکنولوژی بتن خردایش شده است، در مقایسه با سیمان پرتلند که در کارخانه سیمان میزان نرمی آن تعیین شده متفاوت است.

جدول ۴: نامگذاری و مشخصات مواد پودری

Table 4. Nomenclature and specification of binder.

نام مختصر مواد پودری نمونه‌ها	ترکیبات مواد پودری نمونه‌ها
C ₁₀₀	سیمان
C ₇₀ GG ₂₀ L ₁₀	سیمان، پودر سنگ‌آهک، سرباره کوره آهن‌گدازی
C ₇₀ CC ₂₀ L ₁₀	سیمان، پودر سنگ‌آهک، خاک رس کلسینه (با ریزی > ۹۰ میکرومتر)
C ₇₀ FCC ₂₀ L ₁₀	سیمان، پودر سنگ‌آهک، خاک رس کلسینه (با ریزی > ۴۵ میکرومتر)
C ₇₀ RC ₂₀ L ₁₀	سیمان، پودر سنگ‌آهک، خاک رس بازیافتی (با ریزی > ۹۰ میکرومتر)
C ₇₀ FRC ₂₀ L ₁₀	سیمان، پودر سنگ‌آهک، خاک رس بازیافتی (با ریزی > ۴۵ میکرومتر)
K ₁₀₀	کلینکر (> ۹۰ میکرومتر)
FK ₁₀₀	کلینکر (> ۴۵ میکرومتر)
K ₈₀ RC ₂₀	کلینکر، خاک رس بازیافتی (با ریزی > ۹۰ میکرومتر) ۲۰٪
K ₈₀ RC ₁₅ GG ₅	کلینکر، خاک رس بازیافتی (با ریزی > ۹۰ میکرومتر) ۱۵٪، سرباره کوره آهن‌گدازی ۵٪
K ₈₀ RC ₁₀ GG ₁₀	کلینکر، خاک رس بازیافتی (با ریزی > ۹۰ میکرومتر) ۱۰٪، سرباره کوره آهن‌گدازی ۱۰٪
K ₇₀ RC ₃₀	کلینکر، خاک رس بازیافتی (با ریزی > ۹۰ میکرومتر) ۳۰٪
K ₇₀ CC ₂₀ L ₁₀	کلینکر، پودر سنگ‌آهک ۱۰٪، خاک رس کلسینه (با ریزی > ۹۰ میکرومتر) ۲۰٪
K ₅₀ CC ₃₀ L ₂₀	کلینکر، پودر سنگ‌آهک ۲۰٪، خاک رس کلسینه (با ریزی > ۹۰ میکرومتر) ۳۰٪
K ₆₅ RC ₃₀ GG ₅	کلینکر، خاک رس بازیافتی (با ریزی > ۹۰ میکرومتر) ۳۰٪، سرباره کوره آهن‌گدازی ۵٪
K ₆₅ RC ₂₅ GG ₁₀	کلینکر، خاک رس بازیافتی (با ریزی > ۹۰ میکرومتر) ۲۵٪، سرباره کوره آهن‌گدازی ۱۰٪
K ₆₅ RC ₂₀ GG ₁₅	کلینکر، خاک رس بازیافتی (با ریزی > ۹۰ میکرومتر) ۲۰٪، سرباره کوره آهن‌گدازی ۱۵٪

۲-۳- آماده‌سازی، ساخت و عمل‌آوری نمونه‌های ملات

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

⁷ Air-Permeability Apparatus

در گام بعد، پس از اضافه نمودن ماسه به خمیر سیمان، عملیات اختلاط یکبار به مدت ۳۰ ثانیه با سرعت کم و بار دیگر به مدت ۳۰ ثانیه با سرعت متوسط صورت گرفت. در گام آخر، ملات به مدت ۹۰ ثانیه در حالت ثابت باقی ماند و سپس اختلاط در مدت ۶۰ ثانیه با سرعت متوسط پایان یافت.

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

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

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

نام طرح	سیمان kg/m ³	رس کلسینه kg/m ³	رس باز یافتی kg/m ³	سرباره کوره آهن‌گذاری kg/m ³	سنگ آهک kg/m ³	ماسه kg/m ³	آب kg/m ³
C ₁₀₀	۶۴۰	۰	۰	۰	۰	۱۲۸۰	۲۸۲
C _{70GG20L10}	۴۴۸	۰	۰	۱۲۸	۶۴	۱۲۸۰	۲۸۲
C _{70CC20L10}	۴۴۸	۱۲۸	۰	۰	۶۴	۱۲۸۰	۲۸۲
C _{70FCC20L10}	۴۴۸	۱۲۸	۰	۰	۶۴	۱۲۸۰	۲۸۲
C _{70RC20L10}	۴۴۸	۰	۱۲۸	۰	۶۴	۱۲۸۰	۲۸۲
C _{70FRC20L10}	۴۴۸	۰	۱۲۸	۰	۶۴	۱۲۸۰	۲۸۲

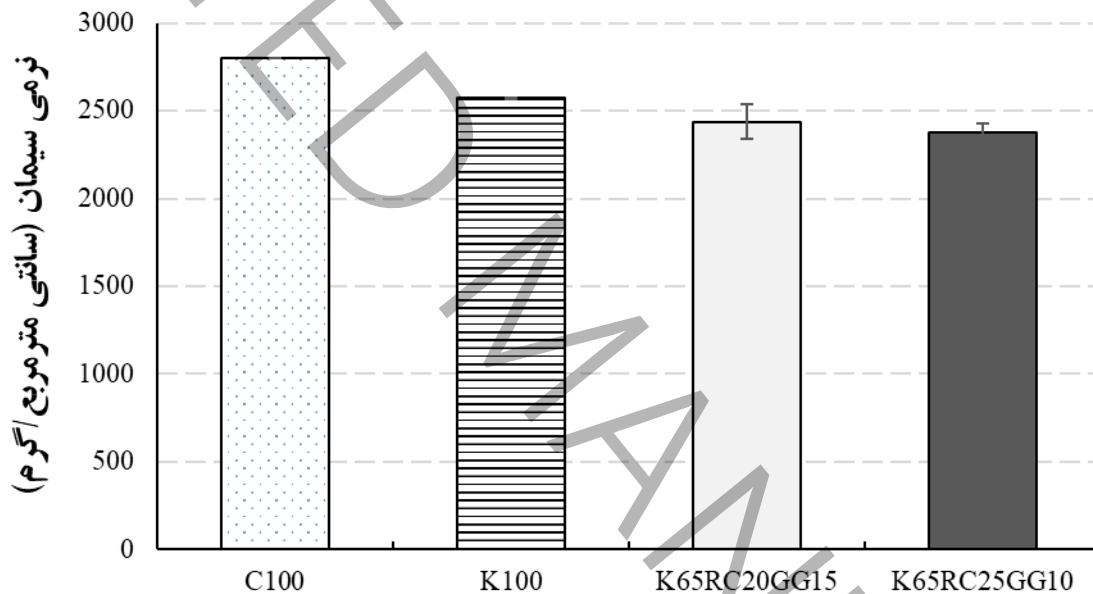
جدول ۶: طرح اختلاط نمونه‌های ملات حاوی مواد پودری بر پایه کلینکر

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

نام طرح	کلینکر kg/m ³	رس کلسینه kg/m ³	رس باز یافتی kg/m ³	سرباره کوره آهن‌گذاری kg/m ³	سنگ آهک kg/m ³	ماسه kg/m ³	آب kg/m ³
K ₁₀₀	۶۴۰	۰	۰	۰	۰	۱۲۸۰	۲۸۲
FK ₁₀₀	۶۴۰	۰	۰	۰	۰	۱۲۸۰	۲۸۲
K _{80RC20}	۵۱۲	۰	۱۲۸	۰	۰	۱۲۸۰	۲۸۲
K _{80RC15GG5}	۵۱۲	۰	۶۴	۶۴	۰	۱۲۸۰	۲۸۲
K _{80RC10GG10}	۵۱۲	۰	۹۶	۳۲	۰	۱۲۸۰	۲۸۲
K _{70RC30}	۴۴۸	۰	۱۹۲	۰	۰	۱۲۸۰	۲۸۲
K _{70CC20L10}	۳۲۰	۱۹۲	۰	۰	۱۲۸	۱۲۸۰	۲۸۲
K _{50CC30L20}	۴۴۸	۱۲۸	۰	۰	۶۴	۱۲۸۰	۲۸۲
K _{65RC30GG5}	۴۱۶	۰	۱۶۰	۶۴	۰	۱۲۸۰	۲۸۲
K _{65RC25GG10}	۴۱۶	۰	۱۲۸	۹۶	۰	۱۲۸۰	۲۸۲
K _{65RC20GG15}	۴۱۶	۰	۱۹۲	۳۲	۰	۱۲۸۰	۲۸۲

۲-۴- آزمایش‌های انجام‌شده

در این مطالعه، آزمایش‌های اسلامپ و مقاومت فشاری به ترتیب برای بررسی نمونه‌های تازه و سخت‌شده ملات مورد استفاده قرار گرفته است. آزمایش اسلامپ براساس استاندارد ASTM C230 [۴۶] بر روی تمامی نمونه‌های ملات تازه اندازه‌گیری شده است. پس از اتمام مرحله اختلاط مصالح و پیش از ریختن نمونه‌ها درون قالب، نمونه‌های ملات تازه در دو لایه درون ظرف استوانه‌ای ریخته شده و پس از تراکم هر لایه و اعمال ۲۵ ضربه در طی ۱۵ ثانیه، نمونه‌های ملات بر روی میز جریان پخش شدند. قطر ملات پخش‌شده بر روی میز جریان برابر مقدار کارایی و اسلامپ نمونه‌ها حاصل شد. آزمایش مقاومت فشاری مطابق با استاندارد ASTM C109 [۴۷] بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد $50 \times 50 \times 50$ میلی‌متر که در دو لایه ریخته شده و توسط میله کوبش با ۳۲ ضربه متراکم شده‌اند، انجام گرفته است. پس از اتمام عمل‌آوری نمونه‌های ملات، دو نمونه از هر طرح اختلاط در سنین ۳، ۱۴، و ۲۸ روز تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند و میانگین نتایج بدست آمده به عنوان نتیجه نهایی ارائه شده است.



شکل ۵: نرمی سیمان

Figure 5. Fineness of cement.

۳- نتایج آزمایش

۳-۱- اسلامپ ملات تازه

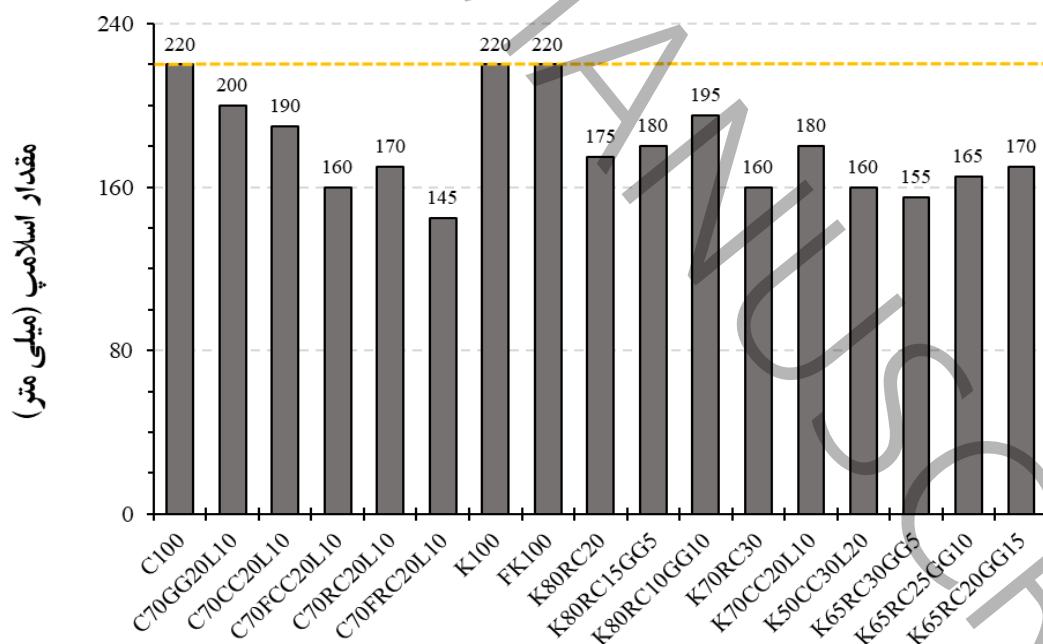
نتایج خواص رئولوژیکی نمونه‌های ملات براساس آزمایش اسلامپ در شکل ۶ نشان داده شده است. از نتایج نشان داده شده، خواص تازه ملات در محدوده قابل قبولی قرار دارد که نشان‌دهنده طرح‌های اختلاط قابل قبول و میزان مناسب استفاده از فوق‌روان-کننده است. از شکل ۷ مشخص است که گنجاندن مواد بازیافتی در مخلوط‌های ملات سیمان باعث کاهش جریان‌پذیری می‌شود. مقایسه بین ملات مرجع با ملات حاوی خاک رس کلسینه نشان می‌دهد که نتایج جریان از ۲۲۰ میلی‌متر به حدود ۱۶۰ میلی‌متر

کاهش یافته است. افزایش محتوای خاک رس کلسینه در مخلوط ملات منجر به کاهش تدریجی اسلامپ شده است که آن را می توان با مقایسه طرح های $K_{80}RC_{20}$ ، $K_{80}RC_{15}GG_5$ و $K_{80}RC_{10}GG_{10}$ مشاهده نمود.

کاهش رئولوژیکی^۸ خمیر سیمان کم کربن بیشتر به لخته شدن ذرات خاک رس کلسینه ناشی از بار سطحی منفی بیشتر در مقایسه با تجمع ساختاری ناشی از هیدراتاسیون نسبت داده شده است [۳۱، ۴۸، ۴۹]. با مقایسه مقدار اسلامپ طرح های حاوی خاک رس کلسینه مشاهده می شود که تقاضای آب نمونه ملات حاوی خاک رس باز یافتی بیشتر از نمونه ملات حاوی خاک رس طبیعی است. با بررسی طرح های حاوی خاک رس کلسینه با نرمی بیشتر (FCC و FRC) و مقایسه نتایج اسلامپ آن ها با طرح های حاوی خاک رس کلسینه با نرمی کمتر (CC و RC) مشاهده می شود که نرمی مواد به واسطه کاهش لخته شدن ذرات خاک مقدار تقاضای آب را افزایش می دهد. تصاویری از آزمایش اسلامپ در شکل ۷ نشان داده شده است.

۲-۳- مقاومت فشاری

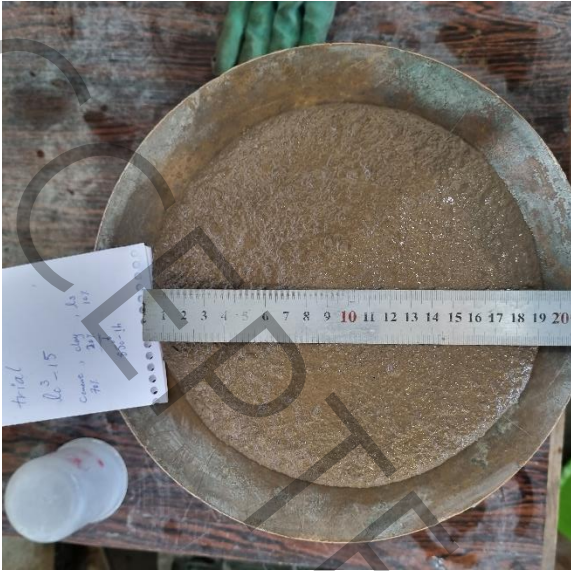
میانگین نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه های ملات حاوی مواد پودری بر پایه سیمان در سنین ۳، ۱۴، و ۲۸ روز در شکل ۸ نشان داده شده است. مطابق شکل، مقاومت فشاری ملات حاوی جایگزینی سرباره کوره آهن گدازی در سنین کوتاه مدت مشابه ملات مرجع بدست آمده است که با گذر زمان و افزایش سن این مقدار کاهش یافته تا جایی که مقاومت فشاری بلندمدت آن کمی کمتر از مقاومت فشاری طرح مرجع حاصل شده است. نتایج نشان می دهد که مقاومت ۲۸ روزه سیمان کم کربن تولیدی با وجود کاهش ۳۰ درصدی سیمان و افزودن سرباره آهن گدازی و پودر سنگ آهک در مقایسه با سیمان پرتلند قابل قبول است.



شکل ۶: نمودار اسلامپ نمونه های ملات

Figure 6. Slump results.

⁸ Thixotropy



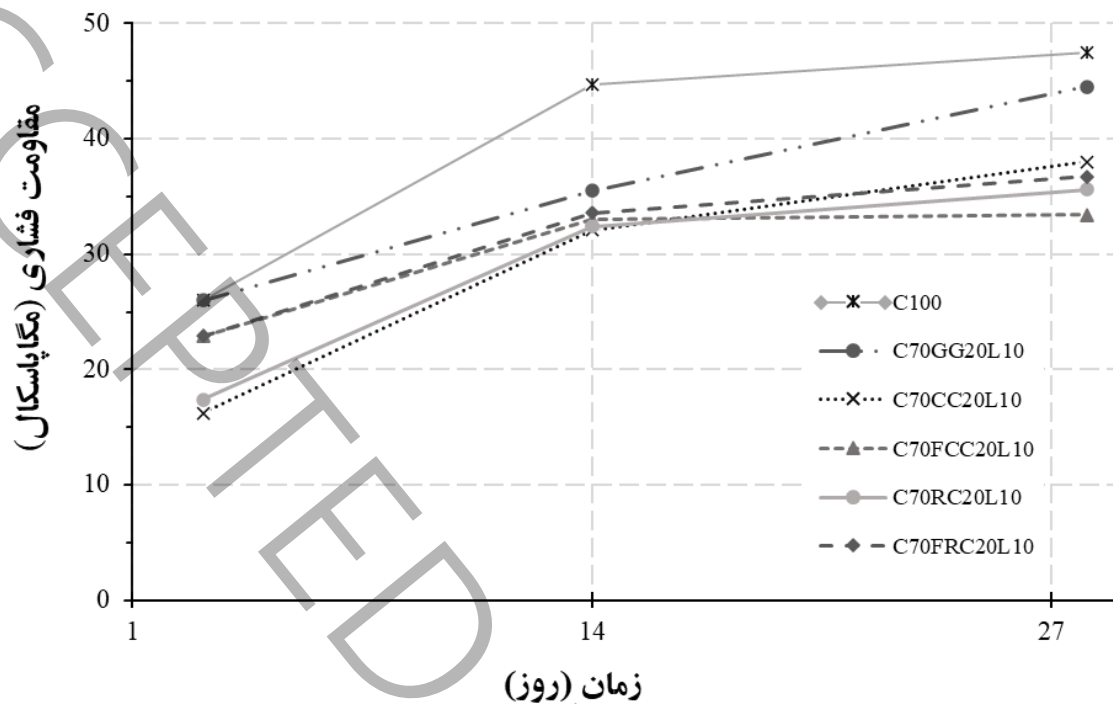
شکل ۷: آزمایش اسلامپ ملات تازه

Figure 7. Slump test.

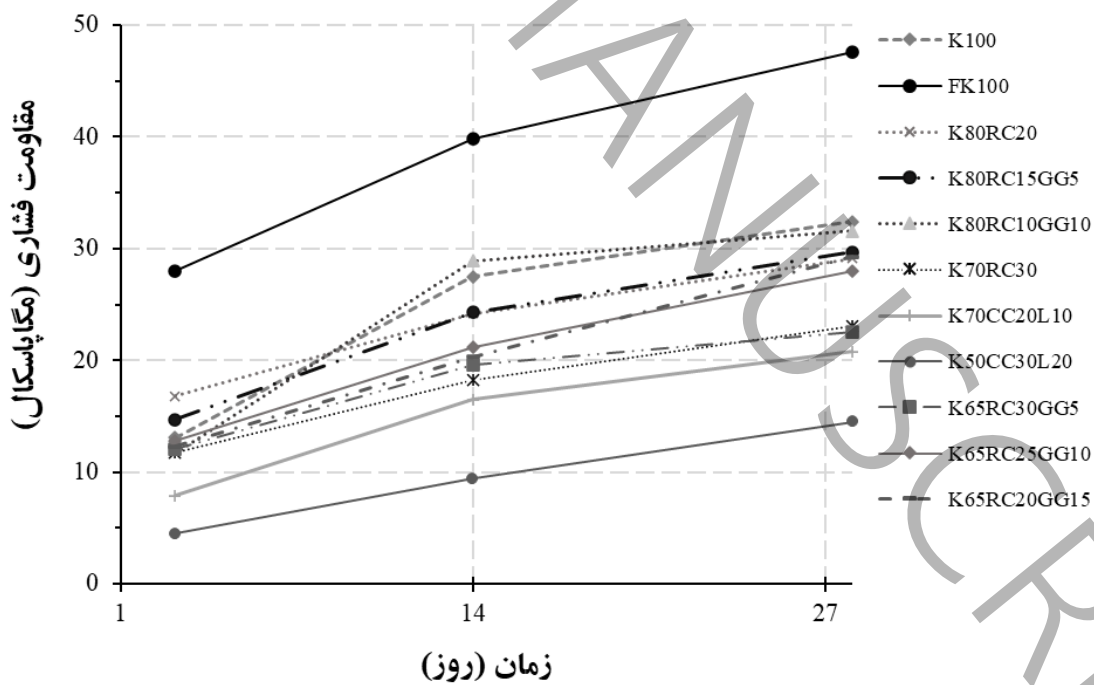
مقاومت فشاری طرح‌های حاوی جایگزینی خاک رس کلسینه (هر دو خاک بازیافتی و طبیعی) و پودر سنگ آهک با افزایش سن، افزایش پیدا کرده اما مقاومت فشاری آن‌ها در مقایسه با طرح مرجع کاهش یافته است. نتایج نشان می‌دهد که روند تغییرات مقاومت فشاری ملات حاوی خاک رس کلسینه بازیافتی در سنین مختلف مشابه ملات حاوی خاک رس طبیعی است. در این شکل مشاهده می‌شود که با وجود افزایش مقاومت فشاری ۳ روزه طرح‌های حاوی خاک رس کلسینه بازیافتی و طبیعی به واسطه افزایش نرمی (FCC و FRC)، مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن‌ها تغییر چندانی نکرده است که براساس ادبیات فنی می‌بایستی با افزایش نرمی و افزایش سن، مقاومت فشاری نیز افزایش یابد [۳۱]. کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح‌های حاوی مواد معدنی طبیعی و بازیافتی در مقایسه با طرح مرجع نشان‌دهنده نقش غالب‌تر اثر پدیده رقیق‌کنندگی^۹ نسبت به فعالیت پوزولانی و اثرات پرکنندگی واکنش‌های شیمیایی کلسیم کربنات با اجزای C_3A و C_4AF است [۵۰].

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

⁹ dilution



شکل ۸: مقاومت فشاری نمونه‌های ملات حاوی مواد پودری بر پایه سیمان
 Figure 8. Compressive strength of cement-based mortar samples.



شکل ۹: مقاومت فشاری نمونه‌های ملات حاوی مواد پودری بر پایه کلینکر
 Figure 9. Compressive strength of clinker-based mortar samples.

نتایج ۲۰ درصد جایگزینی نشان می‌دهد که با کاهش درصد خاک رس بازیافتی و افزایش درصد سرباره کوره آهن‌گدازی در مواد پودری، مقاومت فشاری ۳ روزه ملات کاهش و مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن افزایش یافته است. با بررسی نتایج ملات حاوی درصد یکسانی از خاک رس بازیافتی و سرباره کوره آهن‌گدازی ($K_{80}RC_{10}GG_{10}$) مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری به طور قابل قبولی مشابه ملات مرجع (K_{100}) بدست آمده است. این نتیجه را می‌توان به بهبود تخلخل خمیر سیمان به سبب تشکیل ژل C-S-H ثانویه بر اثر واکنش‌های پوزولانی مناسب خاک رس بازیافتی و سرباره کوره آهن‌گدازی و همچنین تأثیر مورفولوژی و توزیع اندازه ذرات مواد افزودنی اختصاص داد.

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



شکل ۱۰: شکست نمونه‌های ملات تحت آزمایش فشاری

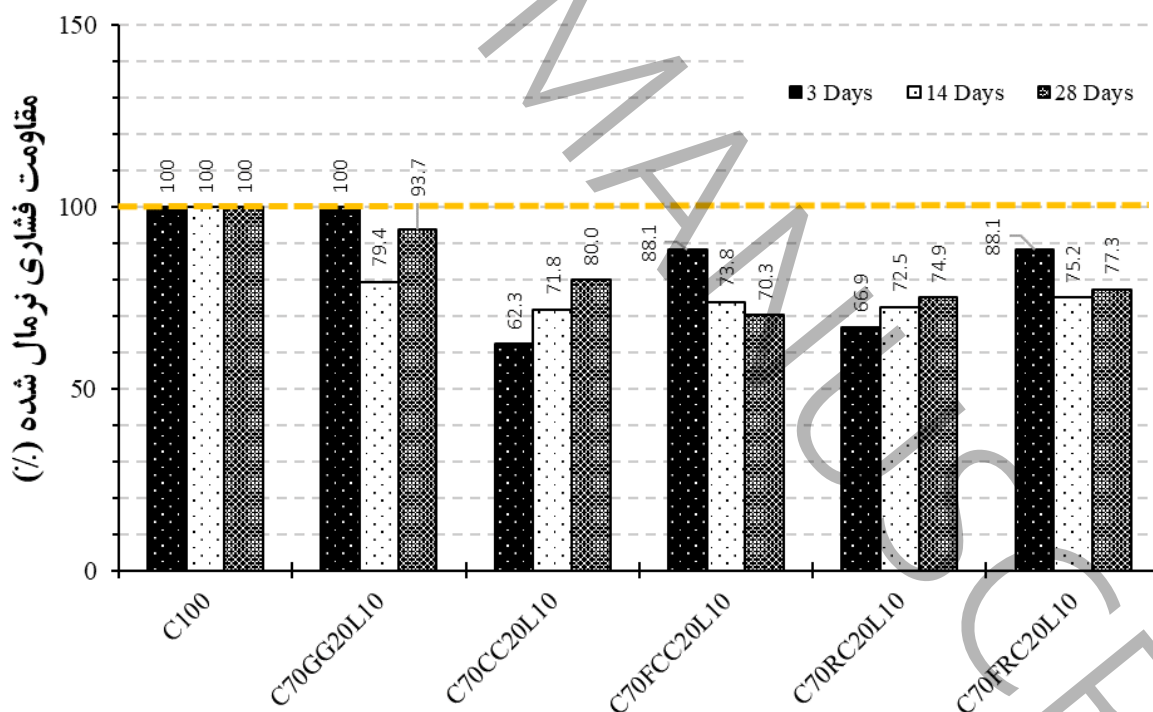
Figure 10. Failure of mortar samples under compressive test.

به منظور بررسی بیشتر تأثیر مواد معدنی و بازیافتی بر عملکرد ملات، مقاومت فشاری نرمال شده نمونه‌های ملات حاوی مواد پودری بر پایه سیمان و کلینکر در مقایسه با نمونه‌های ملات مرجع به ترتیب در شکل ۱۱ و ۱۲ ارائه شده است. مطابق شکل ۱۱، مشاهده می‌شود که با افزایش سن نمونه‌ها ملات حاوی خاک رس کلسینه و پودر سنگ‌آهک در مقایسه با طرح مرجع از حدود ۳۳ درصد به حدود ۲۰ درصد کاهش یافته است. این روند افزایشی به سبب افزایش خاصیت پوزولانی و واکنش‌پذیری خاک رس کلسینه در سنین بالاتر است. نکته قابل توجه آن است که عملکرد پوزولانی خاک رس بازیافتی به طور قابل ملاحظه‌ای مشابه خاک رس

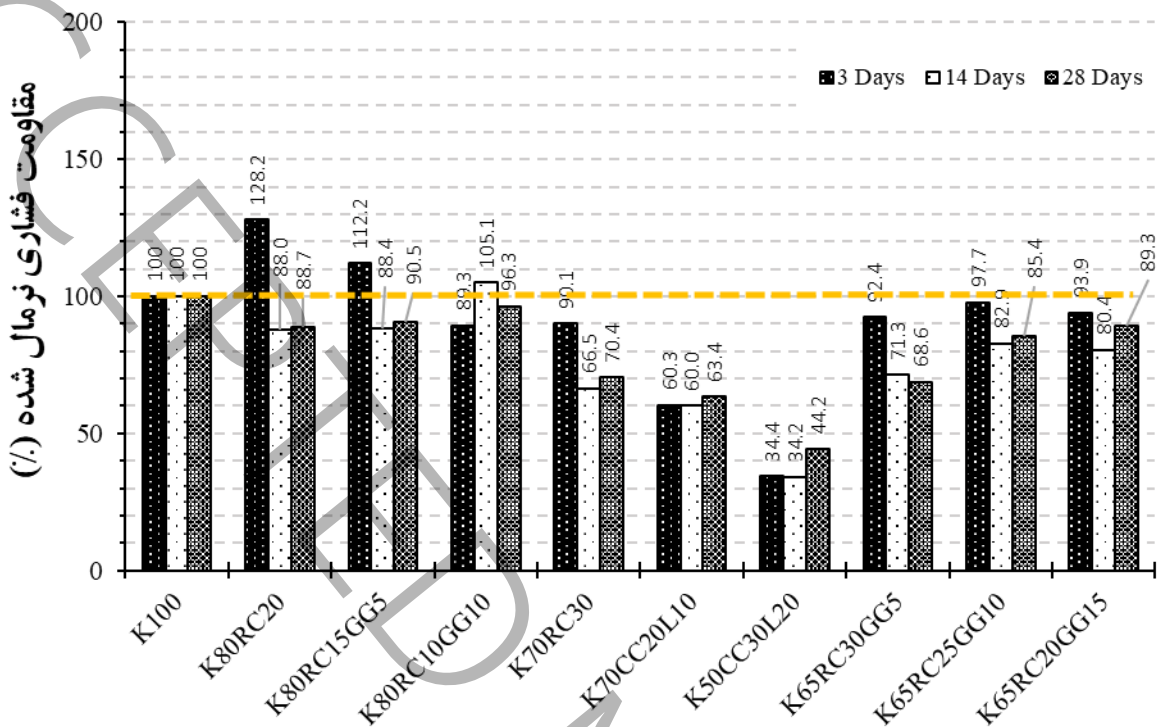
طبیعی است. در میان طرح‌های موجود، ملات حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی عملکرد قابل قبولی را در مقایسه با ملات مرجع داشته است. طوری که اختلاف مقدار مقاومت فشاری آن کمتر از ۷ درصد بدست آمد.

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

در نهایت با مقایسه نتایج حاصل از طرح ۳۵ درصد جایگزینی حاوی ۲۰ تا ۲۵ درصد خاک رس بازیافتی و ۱۰ تا ۱۵ درصد سرباره کوره آهن‌گدازی ($K_{65}RC_{25}GG_{10}$ و $K_{65}RC_{20}GG_{15}$) مشاهده شد که ترکیب مناسب مواد بازیافتی می‌تواند اختلاف مقاومت فشاری را ۱۰ تا ۱۵ نسبت به ملات مرجع کاهش دهد. این در حالی است که اختلاف مقاومت فشاری ملات حاوی تنها ۳۰ درصد خاک رس بازیافتی ($K_{70}RC_{30}$) با ملات مرجع به حدود ۳۰ درصد رسیده است. همچنین این اختلاف برای ترکیب ۳۰ درصد خاک رس بازیافتی و ۵ درصد سرباره کوره آهن‌گدازی ($K_{65}RC_{30}GG_5$) نیز به ۳۲ درصد بدست آمده است.



شکل ۱۱: مقاومت فشاری نرمال شده نمونه‌های ملات حاوی مواد پودری بر پایه سیمان
 Figure 11. Normalized compressive strength of cement-based mortar samples.



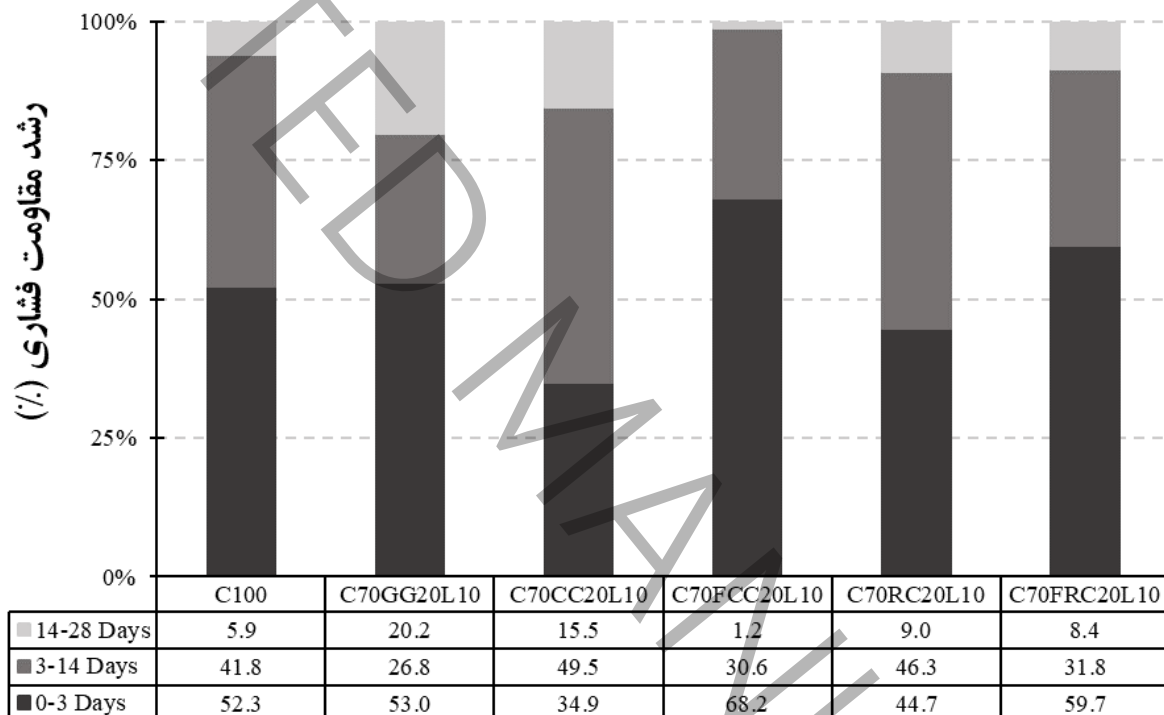
شکل ۱۲: مقاومت فشاری نرمال شده نمونه‌های ملات حاوی مواد پودری بر پایه کلینکر
 Figure 12. Normalized compressive strength of clinker-based mortar samples.

۳-۳- رشد مقاومت فشاری

رشد مقاومت فشاری نمونه‌های ملات حاوی مواد پودری بر پایه سیمان در سنین مختلف در شکل ۱۳ نشان داده شده است. مطابق شکل مشاهده می‌شود که سرعت رشد مقاومت فشاری در نمونه‌های ملات حاوی خاک رس کلسینه (C₇₀CC₂₀L₁₀) و (C₇₀RC₂₀L₁₀) در بازه زمانی ۰ تا ۳ روز در مقایسه با نمونه مرجع کمتر بدست آمده است، در حالی که سرعت رشد مقاومت فشاری نمونه حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی در این بازه زمانی برابر نمونه مرجع حاصل شده است. با این حال با افزایش فعالیت پوزولانی و واکنش‌پذیری خاک رس کلسینه (هر دو خاک طبیعی و بازیافتی) در سنین ۳ تا ۱۴ روز، رشد مقاومت فشاری نمونه‌های ملات حاوی خاک رس کلسینه حدود ۱۸/۴ درصد بیشتر از ملات مرجع بدست آمد. در سایر تحقیقات نیز به نتایج مشابهی دست پیدا کرده‌اند [۵۲، ۵۱، ۲۴].

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نرمی خاک رس کلسینه، میزان رشد مقاومت ملات (C₇₀FRC₂₀L₁₀ و C₇₀FCC₂₀L₁₀) در سنین اولیه در مقایسه با طرح مرجع بیشتر شده است. این در حالی است که مطابق شکل، سرعت رشد مقاومت این نمونه‌ها پس از گذشت زمان و افزایش سن کاهش یافته است. در واقع با افزایش نرمی خاک رس کلسینه میزان رشد مقاومت در سنین ۰ تا ۳ روز به میزان ۱۴/۱ درصد بیشتر و در سنین ۳ تا ۱۴ روز به میزان ۲۳/۹ درصد کمتر از ملات مرجع حاصل یافت. افزایش نرمی مصالح پوزولانی سبب می‌شود تا نمونه‌های ملات بیشترین مقاومت خود را در سنین اولیه کسب نمایند.

رشد مقاومت فشاری نمونه‌های ملات حاوی مواد پودری بر پایه کلینکر در سنین مختلف در شکل ۱۴ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که رشد مقاومت فشاری ملات حاوی خاک رس بازیافتی در سنین ۰ تا ۳ روز بیشتر از ملات مرجع است. با توجه به آن که هر دو ماده کلینکر و خاک رس بازیافتی در آزمایشگاه تکنولوژی بتن خرد شده‌اند، براساس نتایج می‌توان گفت که ترکیب این دو ماده به خوبی بر رشد مقاومت اولیه نمونه‌های ملات مؤثر بوده است. از این‌رو، رشد قابل ملاحظه مقاومت فشاری در سنین ۰ تا ۳ روز به حضور خاک رس بازیافتی در طرح اختلاط نمونه‌های ملات بر پایه کلینکر بستگی داشته است. مطابق شکل، افزایش درصد سرباره کوره آهن‌گدازی و کاهش درصد خاک رس بازیافتی در ملات سبب رشد مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین بالاتر (۳ تا ۲۸ روز) شده است. طوری که بکارگیری درصد یکسانی از خاک رس بازیافتی و سرباره آهن‌گدازی ($K_{80}RC_{10}GG_{10}$) در نمونه‌های ملات، بیشترین فعالیت پوزولانی در سنین ۳ تا ۱۴ روز را داشته است.

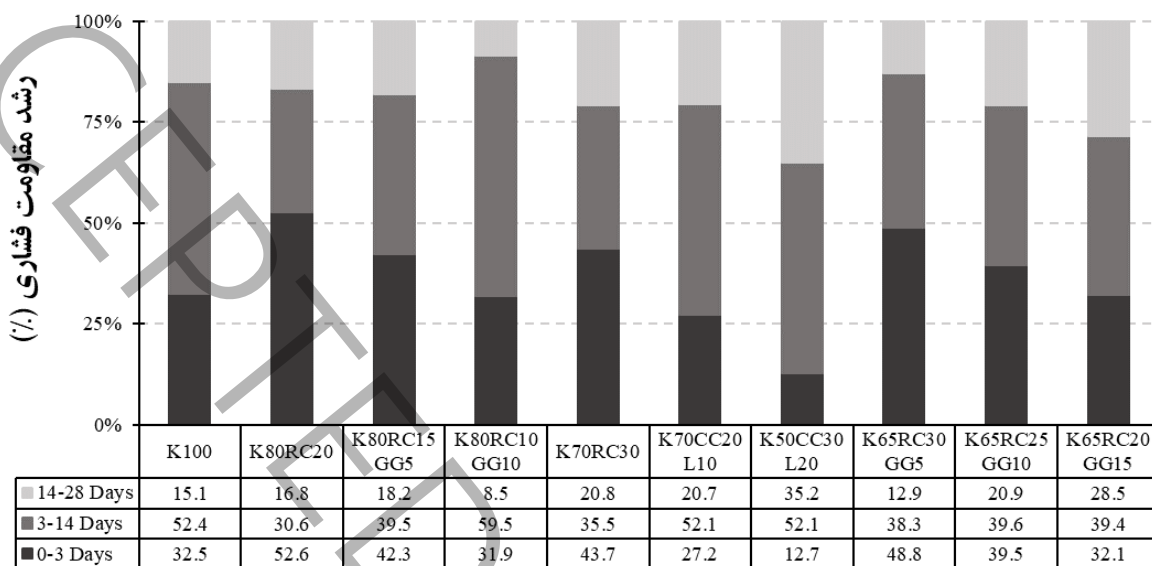


شکل ۱۳: رشد مقاومت فشاری نمونه‌های ملات حاوی مواد پودری بر پایه سیمان
 Figure 13. Compressive strength growth of cement-based mortar samples.

۳-۴- مقایسه‌ای از سیمان کم‌کربن تولید شده

نتایج حاصل از آزمایشات تحقیقات گذشته بر روی نمونه‌های حاوی سیمان کم‌کربن در جدول ۷ ارائه شده است. همانطور که در جدول نشان داده شده است با افزایش جایگزینی سیمان مقدار مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی سیمان کم‌کربن در مقایسه با نمونه‌های مرجع کاهش می‌یابد. با مقایسه مطالعات پیشین [۲۴، ۵۳، ۵۴] مشاهده می‌شود که با وجود طرح‌های مشابه، میزان کاهش مقاومت سیمان‌های کم‌کربن در مقایسه با سیمان پرتلند متفاوت است. پارامترهای مختلفی همچون خاصیت پوزولانی مواد جایگزین، نرمی و یا کیفیت مصالح می‌تواند بر عملکرد سیمان کم‌کربن مؤثر باشد. نتایج مقاومت فشاری ملات حاوی سیمان‌های

کم کربن در مقایسه با ملات مرجع به میزان ۹/۵-۱۳ درصد کمتر می‌باشد. این در حالی که در سایر تحقیقات میزان کاهش به ۴-۲۲ درصد و حتی تا ۲۵ درصد نیز گزارش شده است.



شکل ۱۴: رشد مقاومت فشاری نمونه‌های ملات حاوی مواد پودری بر پایه کلینکر
Figure 14. Compressive strength growth of clinker-based mortar samples.

جدول ۷- مقایسه نتایج مقاومت فشاری
Table 7. Comprehensive strength comparison of compressive.

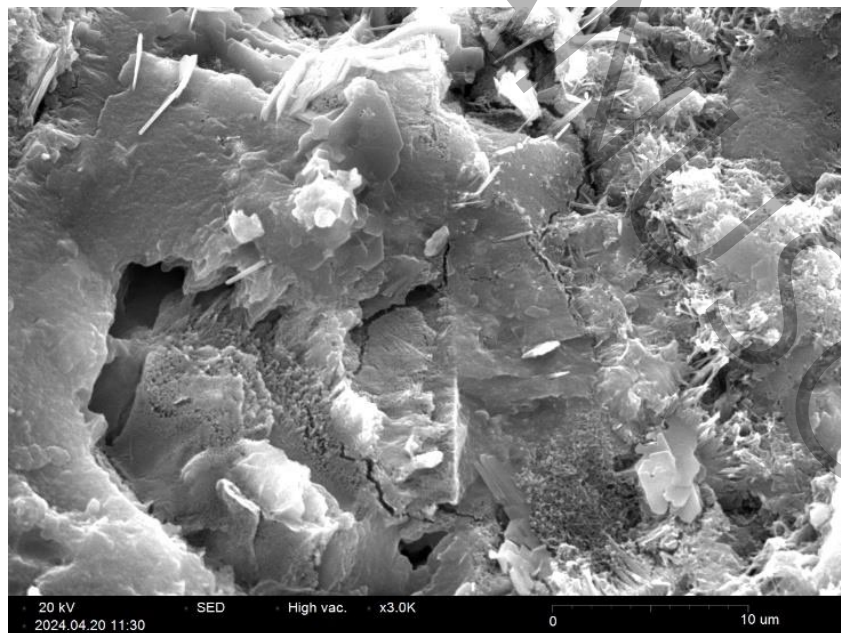
مراجع	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	مواد سیمانی
مطالعه حاضر	۳۲/۴	100OPC
	۲۹/۳	70OPC + 20RC + 15GG
	۲۸/۰	70OPC + 25RC + 10GG
رمضانیان پور و همکاران [۲۴]	۴۹/۳	100OPC
	۴۷/۳	70OPC + 30CC1
	۴۴/۹	70OPC + 20CC1 + 10LS
	۴۴/۶	70OPC + 30CC2
	۳۸/۴	70OPC + 20CC2 + 10LS
دهدپانی و ساتانام [۵۳]	۶۲/۱	100OPC
	۴۶/۶	70OPC +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

با تغییر در ساختار سیمان به واسطه جایگزینی بخشی از آن با مواد سیمانی مکمل، احتمال تغییر در روند هیدراسیون آن وجود دارد و ممکن است درون لایه‌های هیدراته شده تخلخلی به وجود آید. از این رو لازم است تا با انجام آزمایش میکروسکوپ الکترونی تغییرات به وجود آمده در نمونه‌های ساخته شده با سیمان کم کربن بررسی شود. شکل ۱۵ تصویری از عکس میکروسکوپ الکترونی

ملات حاوی سیمان کم کربن را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود لایه‌های هیدراسیون به صورت منظم تشکیل شده‌اند و از این جهت تخلخل چشمگیری در مواد هیدراته شده توسط سیمان جدید ایجاد نشده است.

کاهش اثرات زیست‌محیطی یکی از اهداف استفاده از مواد جایگزینی در تولید سیمان است. براساس مطالعات گذشته آلودگی تولید شده در فرآیند کلسیناسیون خاک رس کمتر از آلودگی ناشی از تولید سیمان حذف شده بواسطه جایگزینی خاک رس کلسینه است. صرفه جویی در انرژی و کاهش انتشار دی‌اکسید کربن به این دلیل رخ می‌دهد که دمای کلسیناسیون کمتر از دمای مورد نیاز برای فرآیند کلینکرینگ است و انتشار دی‌اکسید کربن مرتبط با کربن‌زدایی مواد خام وجود ندارد. از این‌رو، تولید سیمان حاوی رس کلسینه به مراتب آلودگی کمتری از سیمان پرتلند در حجم برابر خواهد داشت [۱۵، ۱۶]. همانطور که در بخش ۲-۱ توضیح داده شده است، خاک رس بازیافتی حاصل از خرد نمودن بیسکویت‌های کارخانه کاشی نیازی به فرآیند کلسیناسیون ندارند و از این‌رو، اثرات زیست‌محیطی سیمان کم کربن تولید شده در این مطالعه، کمتر از سیمان پرتلند و همچنین سیمان LC^3 خواهد بود.

علاوه بر اثرات زیست‌محیطی، بحث اقتصادی نیز در تولید سیمان جدید مطرح خواهد بود. در تحقیقات گذشته، تولید سیمان کم کربن مانند سیمان LC^3 در سناریوهای مختلفی صورت گرفت و نتایج نشان داد که در آن مراحل جداگانه تولید کلینکر، کلسینه کردن خاک رس، آسیاب و مخلوط کردن مصالح را می‌توان در یک مکان یا در مکان‌های مختلفی انجام داد. همچنین نشان داده شده است که سرمایه‌گذاری و یا سرمایه مورد نیاز برای راه‌اندازی یک کارخانه جدید تولید سیمان LC^3 کمتر از هزینه راه‌اندازی کارخانه تولید سیمان OPC با ظرفیت مشابه خواهد بود. به طور مشابه، هزینه افزایش ظرفیت کارخانه سیمان با تبدیل تولید به LC^3 کمتر از اضافه شدن خط تولید کلینکر جدید گزارش شده است. علاوه بر آن، مزایای اقتصادی تبدیل یک کوره کلینکر قدیمی به کلسینر رسی نیز گزارش شده است. بازده سرمایه نیز با استفاده از فناوری‌های مختلف کلسینه کردن مقایسه شده است [۱۵، ۱۶]. بدین صورت اثبات شده است که فرآیند کلسیناسیون خاک رس اقتصادی‌تر از تولید سیمان است. با توجه به عدم نیاز خاک رس بازیافتی به فرآیند کلسیناسیون، از نظر اقتصادی در مقایسه با سیمان LC^3 به صرفه‌تر خواهد بود.



شکل ۱۵: عکس میکروسکوپ الکترونی ملات حاوی سیمان جدید
Figure 15. SEM image of mortar containing new cement.

۴- نتیجه گیری

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

- افزایش محتوای خاک رس کلسینه در مخلوط ملات منجر به کاهش تدریجی اسلامپ شده است. کاهش رئولوژیکی خمیر سیمان کم‌کربن به سبب لخته‌شدن ذرات خاک رس کلسینه ناشی از بار سطحی منفی رقم خورده است.
- مقاومت فشاری طرح‌های حاوی خاک رس بازیافتی در سنین مختلف مشابه طرح‌های حاوی خاک رس طبیعی بدست آمد.
- رشد مقاومت فشاری اولیه نمونه‌های ملات حاوی خاک رس بازیافتی در جایگزینی کلینکر اولیه قابل ملاحظه بوده است. از طرفی استفاده از سرباره کوره آهن‌گدازی سبب افزایش رشد مقاومت فشاری در بازه زمانی ۱۴ تا ۲۸ روز شده است. نتایج نشان داد که استفاده همزمان و بهینه خاک رس بازیافتی و سرباره کوره آهن‌گدازی می‌تواند منجر به ایجاد سیمان کم‌کربن مؤثر شود که عملکردی مشابه با سیمان معمولی داشته باشد. این امر به سبب عملکرد پوزولانی خاک رس کلسینه و اثرات میکروکریستالی سرباره کوره آهن‌گدازی صورت گرفت.
- مقاومت فشاری طرح‌های حاوی خاک رس کلسینه (هر دو خاک بازیافتی و طبیعی) و پودر سنگ‌آهک در مقایسه با طرح مرجع کاهش یافت که این مقدار کمتر از ۲۰ درصد بدست آمد. این در حالی است که مقاومت فشاری طرح‌های حاوی مواد معدنی بازیافتی (خاک رس بازیافتی و سرباره کوره آهن‌گدازی) با ۳۵ درصد جایگزینی کمتر ۱۰ درصد کاهش یافته است.
- براساس نتایج استفاده از حداکثر ۲۵ درصد خاک رس بازیافتی در ترکیب خاک رس بازیافتی و سرباره کوره آهن‌گدازی در مواد پودری، می‌تواند عملکرد خوبی داشته باشد.

با توجه به آن‌که در تحقیقات پیشین [۲۳، ۵۰، ۵۵] دوام نمونه‌های بتنی / ملات حاوی خاک رس مانند سیمان LC³ مورد بررسی قرار گرفته و کیفیت این نوع سیمان تأیید شده است، از این‌رو در این مطالعه کیفیت سیمان حاوی خاک رس بازیافتی در مقایسه با سیمان پرتلند و همچنین سیمان حاوی خاک رس طبیعی مقایسه شده است. از آنجایی‌که تا سن ۲۸ روز، سیمان جدید حاوی مواد پوزولانی نتایج قابل مقایسه و امیدوارکننده‌ای در مقایسه با سیمان پرتلند نشان داده‌اند، از همین‌رو انتظار می‌رود که در سنین بالاتر (۹۰ روز) نیز افزایش مقاومت بیشتری از طرح‌های جایگزینی مشاهده شود. با این حال، پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آینده دوام نمونه‌های ملات حاوی سیمان مرکب کم‌کربن تحلیل و بررسی شود.

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

- [1] P.K. Mehta, P. Monteiro, Concrete: microstructure, properties, and materials, (No Title), (2006).
- [2] K.L. Scrivener, A. Nonat, Hydration of cementitious materials, present and future, Cement and concrete research, 41(7) (2011) 651-665.
- [3] B. Sabir, S. Wild, J. Bai, Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review, Cement and concrete composites, 23(6) (2001) 441-454.
- [4] Cement Industry Energy and CO₂ Performance “Getting the Numbers Right”, in: WBCSD-CSI, Washington, 2009.
- [5] C. Tomkins, G. Throwdown, Redefining what’s possible for clean energy by 2020, Gigaton Throwdown, San Francisco, (2009).
- [6] G. Schiller, K. Gruhler, R. Orllepp, Continuous material flow analysis approach for bulk nonmetallic mineral building materials applied to the German building sector, Journal of Industrial Ecology, 21(3) (2017) 673-688.
- [7] D.C. Reis, M. Quattrone, J.F. Souza, K.R. Punhagui, S.A. Pacca, V.M. John, Potential CO₂ reduction and uptake due to industrialization and efficient cement use in Brazil by 2050, Journal of Industrial Ecology, 25(2) (2021) 344-358.
- [8] L. Doussang, G. Samson, F. Deby, B. Huet, E. Guillon, M. Cyr, Durability parameters of three low-carbon concretes (low clinker, alkali-activated slag and supersulfated cement), Construction and Building Materials, 407 (2023) 133511.
- [9] J. Santorsola, L.J. Butler, Material behaviour and flexural performance of low carbon concrete beams containing very high quantities of recycled and secondary materials, Construction and Building Materials, 407 (2023) 133350.
- [10] C. Wu, C. Zhang, J. Li, X. Wang, W. Jiang, S. Yang, W. Wang, A sustainable low-carbon pervious concrete using modified coal gangue aggregates based on ITZ enhancement, Journal of Cleaner Production, 377 (2022) 134310.
- [11] R. Kajaste, M. Hurme, Cement industry greenhouse gas emissions—management options and abatement cost, Journal of cleaner production, 112 (2016) 4041-4052.
- [12] M. Schneider, M. Romer, M. Tschudin, H. Bolio, Sustainable cement production—present and future, Cement and concrete research, 41(7) (2011) 642-650.
- [13] P.K. Mehta, P.J. Monteiro, Concrete: microstructure, properties, and materials, McGraw-Hill Education, 2014.
- [14] P.S.L. Souza, D.C. Dal Molin, Viability of using calcined clays, from industrial by-products, as pozzolans of high reactivity, Cement and Concrete Research, 35(10) (2005) 1993-1998.
- [15] M. Sharma, S. Bishnoi, F. Martirena, K. Scrivener, Limestone calcined clay cement and concrete: A state-of-the-art review, Cement and Concrete Research, 149 (2021) 106564.
- [16] A. Alujas, R. Fernández, R. Quintana, K.L. Scrivener, F. Martirena, Pozzolanic reactivity of low grade kaolinitic clays: Influence of calcination temperature and impact of calcination products on OPC hydration, Applied Clay Science, 108 (2015) 94-101.
- [17] Y. Cao, Y. Wang, Z. Zhang, Y. Ma, H. Wang, Recent progress of utilization of activated kaolinitic clay in cementitious construction materials, Composites Part B: Engineering, 211 (2021) 108636.
- [18] V.M. John, B.L. Damineli, M. Quattrone, R.G. Pileggi, Fillers in cementitious materials—Experience, recent advances and future potential, Cement and Concrete Research, 114 (2018) 65-78.
- [19] M. Antoni, J. Rossen, F. Martirena, K. Scrivener, Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone, Cement and concrete research, 42(12) (2012) 1579-1589.
- [20] M. Antoni, Investigation of cement substitution by blends of calcined clays and limestone, EPFL, 2013.

- [21] A.C. Emmanuel, P. Haldar, S. Maity, S. Bishnoi, Second pilot production of limestone calcined clay cement in India: the experience, *Indian Concr. J.*, 90(5) (2016) 57-63.
- [22] K.L. Scrivener, Options for the future of cement, *Indian Concr. J.*, 88(7) (2014) 11-21.
- [23] Y. Dhandapani, T. Sakthivel, M. Santhanam, R. Gettu, R.G. Pillai, Mechanical properties and durability performance of concretes with Limestone Calcined Clay Cement (LC3), *Cement and Concrete Research*, 107 (2018) 136-151.
- [24] A. Ramezaniapor, A. Yadak Yaraghi, A. Zolfagharnasab, A.M. Ramezaniapor, INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES AND CHLORIDE IONS INGRESS IN CONCRETES CONTAINING CALCINED, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(3) (2022) 1119-1132.
- [25] R. Fernandez, F. Martirena, K.L. Scrivener, The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite, *Cement and concrete research*, 41(1) (2011) 113-122.
- [26] S. Hollanders, R. Adriaens, J. Skibsted, Ö. Cizer, J. Elsen, Pozzolanic reactivity of pure calcined clays, *Applied Clay Science*, 132 (2016) 552-560.
- [27] R. Fernandez Lopez, Calcined clayey soils as a potential replacement for cement in developing countries, EPFL, 2009.
- [28] C. He, B. Osbaeck, E. Makovicky, Pozzolanic reactions of six principal clay minerals: activation, reactivity assessments and technological effects, *Cement and concrete research*, 25(8) (1995) 1691-1702.
- [29] S. Urhan, Alkali silica and pozzolanic reactions in concrete. Part 1: Interpretation of published results and an hypothesis concerning the mechanism, *Cement and concrete research*, 17(1) (1987) 141-152.
- [30] H.H. Murray, Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite: a general overview, *Applied clay science*, 17(5-6) (2000) 207-221.
- [31] A. Pérez, A. Favier, K. Scrivener, F. Martirena, Influence grinding procedure, limestone content and PSD of components on properties of clinker-calcined clay-limestone cements produced by intergrinding, in: *Calcined Clays for Sustainable Concrete: Proceedings of the 2nd International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete*, Springer, 2018, pp. 358-365.
- [32] C. Jesus, E.A. Junior, N. Braga, J.S. Junior, M.S. Barata, Coloured concrete produced from low-carbon cements: Mechanical properties, chromatic stability and sustainability, *Journal of Building Engineering*, 67 (2023) 106018.
- [33] Y. Yang, W. Luo, Effect of Sugarcane Bagasse Ash and Ceramic Waste Dust as Partial Replacements of Portland Cement on Corrosion Behavior of HRB400 Low Carbon Steel Reinforcement in 3.5% NaCl, *International Journal of Electrochemical Science*, 15(12) (2020) 12410-12419.
- [34] H. Maraghechi, F. Avet, K. Scrivener, Chloride transport behavior of LC 3 binders, in: *Calcined Clays for Sustainable Concrete: Proceedings of the 2nd International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete*, Springer, 2018, pp. 306-309.
- [35] M. Mohit, H. Haftbaradaran, H.T. Riahi, Investigating the ternary cement containing Portland cement, ceramic waste powder, and limestone, *Construction and Building Materials*, 369 (2023) 130596.
- [36] W. Chen, J. Dang, H. Du, Using low-grade calcined clay to develop low-carbon and lightweight strain-hardening cement composites, *Journal of Building Engineering*, 58 (2022) 105023.
- [37] H. Wan, Z. Shui, Z. Lin, Analysis of geometric characteristics of GGBS particles and their influences on cement properties, *Cement and concrete research*, 34(1) (2004) 133-137.
- [38] S. Arivalagan, Sustainable studies on concrete with GGBS as a replacement material in cement, *Jordan journal of civil Engineering*, 8(3) (2014) 263-270.
- [39] Y. Zhao, Y. Gao, G. Chen, S. Li, A. Singh, X. Luo, C. Liu, J. Gao, H. Du, Development of low-carbon materials from GGBS and clay brick powder for 3D concrete printing, *Construction and Building Materials*, 383 (2023) 131232.
- [40] F. Avet, K. Scrivener, Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of Limestone Calcined Clay Cement (LC3), *Cement and Concrete Research*, 107 (2018) 124-135.
- [41] A. Zolfagharnasab, A.A. Ramezaniapor, F. Bahman-Zadeh, Investigating the potential of low-grade calcined clays to produce durable LC3 binders against chloride ions attack, *Construction and Building Materials*, 303 (2021) 124541.

- [42] Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, in: ASTM C128, ASTM International., West Conshohocken, 2015.
- [43] Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, in: ASTM C136, ASTM International., West Conshohocken, 2014.
- [44] Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus, in: ASTM C204, ASTM International., West Conshohocken, 2011.
- [45] Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency, in: ASTM C305, ASTM International., West Conshohocken, 2006.
- [46] Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement, in: ASTM C230, ASTM International., West Conshohocken, 2003.
- [47] Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), in: ASTM C109, ASTM International., West Conshohocken, 2002.
- [48] T.R. Muzenda, P. Hou, S. Kawashima, T. Sui, X. Cheng, The role of limestone and calcined clay on the rheological properties of LC3, *Cement and Concrete Composites*, 107 (2020) 103516.
- [49] P. Hou, T.R. Muzenda, Q. Li, H. Chen, S. Kawashima, T. Sui, H. Yong, N. Xie, X. Cheng, Mechanisms dominating thixotropy in limestone calcined clay cement (LC3), *Cement and Concrete Research*, 140 (2021) 106316.
- [50] F. Bahman-Zadeh, A.A. Ramezani pour, A. Zolfagharnasab, Effect of carbonation on chloride binding capacity of limestone calcined clay cement (LC3) and binary pastes, *Journal of Building Engineering*, 52 (2022) 104447.
- [51] F. Moodi, A. Ramezani pour, A.S. Safavizadeh, Evaluation of the optimal process of thermal activation of kaolins, *Scientia Iranica*, 18(4) (2011) 906-912.
- [52] A.A. Ramezani pour, H.B. Jovein, Influence of metakaolin as supplementary cementing material on strength and durability of concretes, *Construction and Building materials*, 30 (2012) 470-479.
- [53] Y. Dhandapani, M. Santhanam, Assessment of pore structure evolution in the limestone calcined clay cementitious system and its implications for performance, *Cement and Concrete Composites*, 84 (2017) 36-47.
- [54] G. Mishra, A.C. Emmanuel, S. Bishnoi, Influence of temperature on hydration and microstructure properties of limestone-calcined clay blended cement, *Materials and Structures*, 52 (2019) 1-13.
- [55] V. Shah, A. Parashar, G. Mishra, S. Medepalli, S. Krishnan, S. Bishnoi, Influence of cement replacement by limestone calcined clay pozzolan on the engineering properties of mortar and concrete, *Advances in Cement Research*, 32(3) (2020) 101-111.
- [56] L. Wang, N.U. Rehman, I. Curosu, Z. Zhu, M.A.B. Beigh, M. Liebscher, L. Chen, D.C. Tsang, S. Hempel, V. Mechtcherine, On the use of limestone calcined clay cement (LC3) in high-strength strain-hardening cement-based composites (HS-SHCC), *Cement and Concrete Research*, 144 (2021) 106421.
- [57] J. Yu, D.K. Mishra, C. Hu, C.K. Leung, S.P. Shah, Mechanical, environmental and economic performance of sustainable Grade 45 concrete with ultrahigh-volume Limestone-Calcined Clay (LCC), *Resources, Conservation and Recycling*, 175 (2021) 105846.

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

Mohammadreza Alamian¹, Mehdi Dehestani^{1*}, Seyed Sina Mousavi¹

¹Faculty of Civil Engineering, Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

ABSTRACT

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

KEYWORDS

Calcined clay; recycled; green mortar; low-carbon cement; ground granulated blast-furnace slag.