



## بررسی مشخصات مکانیکی و نفوذپذیری یون‌های کلراید در بتن‌های حاوی رس کلسینه شده

علی اکبر رمضانیاپور<sup>\*</sup>، امیرحسین یدک یراقی<sup>۱</sup>، آرش ذوالفقارنسب<sup>۱</sup>، امیرمحمد رمضانیاپور<sup>۲</sup>

۱- دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۲- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۲۴

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۴/۲۹

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۹

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۶/۱۳

### کلمات کلیدی:

رس کلسینه شده

پودر سنگ آهک

دوام بتن

مشخصات مکانیکی

یون‌های کلراید

**خلاصه:** تولید سیمان به عنوان یک فرآیند صنعتی آلاینده محیط زیست و پرمصرف در زمینه انرژی شناخته می‌شود. یکی از راه‌های کاهش تولید و مصرف سیمان استفاده از مواد جایگزین سیمان در بتن می‌باشد. امروزه از پوزولان‌ها به عنوان مواد جایگزین سیمان استفاده می‌شود. با توجه به استفاده بسیار زیاد در صنعت از سیمان پرتلند، جایگزینی بخشی از آن توسط افزودنی‌های معدنی نظیر رس‌های کلسینه شده نه تنها سبب کاهش اثرات منفی تولید سیمان شده بلکه با افزایش دوام سازه‌های بتنی همراه خواهد بود. در این پژوهش به منظور مقایسه مشخصات مکانیکی و دوام بتن‌های ساخته شده با رس کلسینه و پودر سنگ آهک با طرح شاهد، ۷ طرح مخلوط بتن شامل ۳ طرح مخلوط با جایگزینی رس‌های کلسینه با مقادیر مختلف کائولینیت به جای سیمان (به صورت دو جزئی) و ۳ طرح مخلوط با جایگزینی رس‌های کلسینه و پودر سنگ آهک به جای سیمان (به صورت ۳ جزئی) و ۱ طرح شاهد، به عنوان طرح‌های مورد استفاده انتخاب شده و جهت بررسی ویژگی‌های مکانیکی و دوامی آن‌ها آزمایشات تعیین مقاومت فشاری، مقاومت الکتریکی سطحی، جذب آب حجمی و مهاجرت تسریع شده یون‌های کلراید در سنین مختلف صورت پذیرفته است. بر اساس نتایج، استفاده از مواد جایگزین سیمان (به صورت دو جزئی و سه جزئی) موجب کاهش مقاومت فشاری شده است. اما نتایج آزمایشات دوامی شامل مقاومت الکتریکی سطحی، جذب آب حجمی و مهاجرت تسریع شده یون‌های کلراید حاکی از آن است که استفاده از رس کلسینه به صورت دو جزئی و سه جزئی باعث افزایش دوام نمونه‌های بتنی تحت شرایط حمله کلرایدی و نیز کاهش نفوذپذیری می‌شود.

### ۱- مقدمه

به عنوان مولفه اصلی انواع مختلف بتن شده است. فرآیند تولید سیمان به عنوان یکی از آلاینده‌ترین صنایع در جهان، سهم ۸-۵٪ از کل انتشار کربن دی‌اکسید در جهان را دارد [۲-۴]. طبق تحقیقات انجام شده، تولید ۱ تن سیمان پرتلند به طور متوسط ۰/۹-۰/۸ تن کربن دی‌اکسید منتشر کند. و همچنین انتشار گازهای SO<sub>p</sub> و NO<sub>x</sub> (X=۱,۲,۳) باعث اثرات گلخانه‌ای می‌شود و سبب گرم شدن کره زمین گشته است [۵-۱۰]. از طرف دیگر، در بسیاری از کشورها، تولید سیمان به دلیل فرآیند پیچیده تولید (از جمله کلینکراسیون و سنگ زنی) و تقاضای زیاد انرژی و مواد اولیه و مصرف قابل توجه سوخت (از جمله گاز، زغال سنگ و غیره) از نظر فنی و اقتصادی توجیه ندارد. به همین منظور در دهه‌های اخیر استفاده از مواد جایگزین سیمان از دو منظر کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای و همچنین بهبود مشخصات مکانیکی و دوام بتن‌ها در محیط‌های مهاجم مورد توجه واقع شده است [۱۱-۱۳].

بتن با صرف انرژی و مواد زیادی تولید می‌شود. همچنین افزایش روزافزون هزینه‌های تعمیر و جایگزینی سازه‌ها، ناشی از خرابی مصالح، بخش عمده‌ای از کل بودجه ساختمان‌سازی را به خود اختصاص می‌دهد. بهای روزافزون جایگزینی سازه‌ها و تاکید فزاینده بر اهمیت کاهش میزان هزینه‌های مصرفی در طی طول عمر سازه، به جای هزینه‌های مصرفی اولیه، مهندسان را مجبور می‌کند که مسئله‌ی دوام را جدی بگیرند. در واقع انجام تحقیقات و آزمایشات گسترده برای افزایش دوام انواع بتن‌ها، از یک سو و پژوهش در جهت یافتن مواد و روش‌های نوین برای تولید بتن‌های با دوام بالا، لازم و ضروری است [۱].

بتن پرکاربردترین مصالح ساختمانی است. افزایش جمعیت جهانی و ساخت ساختمان‌ها و سازه‌های زیربنایی منجر به تولید بیشتر سیمان پرتلند

<sup>\*</sup> نویسنده عهده‌دار مکاتبات: aaramce@aut.ac.ir



مواد جایگزین سیمان، مواد سیلیسی یا سیلیسی-آلومینی هستند که در حضور رطوبت با هیدروکسید کلسیم حاصل از هیدراتاسیون سیمان واکنش شیمیایی داده و موجب تشکیل کلسیم سیلیکات هیدراته می‌گردند. جایگزینی بخشی از سیمان با این مواد سبب بهبود مشخصات مکانیکی، کاهش نفوذپذیری و افزایش دوام می‌گردد [۱۵ و ۱۴].

رس کلسینه و پودر سنگ آهک موادی در دسترس و مناسب جهت جایگزینی با کلینکر سیمان و تولید سیمان سه جزئی (LC3) شناخته شده‌اند [۶]. رس کلسینه محصول فعال‌سازی حرارتی رس‌های خام است که به مدت کافی تحت دمای ۸۰۰-۶۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته‌اند. این فرآیند موجب هیدروکسیل زدایی (خارج شدن آب ساختاری صفحات کانی کائولینیت موجود در رس) و تبدیل کائولینیت به متاکائولین با قابلیت واکنش‌زایی پوزولانی می‌گردد [۱۵]. در برخی تحقیقات دمای بهینه برای فعال‌سازی حرارتی ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد برآورد شده است.

در تحقیقاتی که توسط رمضان‌پور و همکاران انجام گردیده، مشخص شده است که جایگزینی بخشی از سیمان با رس کلسینه سبب بهبود خواص مکانیکی، کاهش نفوذپذیری و افزایش دوام در برابر شرایط محیطی مهاجم می‌گردد. این بهبود خواص به علت خاصیت پوزولانی رس کلسینه و کاهش فضاهای خالی و حفرات موینه است [۱۷ و ۱۶].

علاوه بر واکنش پوزولانی رس کلسینه، فازهای آلومیناتی موجود در این ماده با پودر سنگ آهک واکنش داده و موجب تشکیل کلسیم مونوکربوآلومینات و کلسیم همی کربوآلومینات می‌گردد. این واکنش‌ها در کنار فعالیت پوزولانی رس کلسینه علت اصلی بهبود عملکرد سیمان‌های سه گانه LC3 در مقایسه با ترکیبات دوگانه سیمان - رس کلسینه و سیمان - پودر سنگ آهک می‌باشد [۶]. در تحقیقات انجام شده توسط شویی و همکاران، در نمونه‌های دارای متاکائولین با درصد‌های جایگزینی مختلف، ضریب انتشار کلراید نمونه‌های تهیه شده پس از ۵۶ روز عمل‌آوری به مقدار ۵۱، ۵۴ و ۵۷ درصد کاهش یافته است [۱۸]. همچنین مراغه‌چی و همکاران، نمونه‌های ملات با سیمان LC3 و جایگزینی ۳۰ درصدی رس‌های کلسینه شده‌ای با مقدار کائولینیت ۱۷، ۵۰ و ۸۰ درصد تهیه کرده‌اند که مقدار عمق نفوذ یون‌های کلراید در ملات LC3 برای نمونه‌های دارای ۵۰ درصد و ۸۰ درصد کائولینیت طی دو سال کمتر از ده میلی‌متر است. این مقادیر ۴ تا ۵ برابر کمتر از مقدار عمق نفوذ یون‌های کلراید در ملات سیمان معمولی است [۱۹]. سویی و همکاران، ملات‌هایی با جایگزینی رس کلسینه شده، خاکستر بادی و سرباره هر کدام به صورت دو جزئی و سه جزئی تهیه کرده

و با بررسی پروفیل نفوذ یون‌های کلراید در نمونه‌ها پس از ۱ سال قرارگیری در معرض محلول ۰/۵ مولار سدیم کلراید، به این نتیجه دست یافته‌اند که در نمونه‌های دو جزئی و سه جزئی تهیه شده (با سه پوزولان فوق) نمونه‌های حاوی رس کلسینه کمترین عمق نفوذ را به خود اختصاص داده‌اند. افزودن پودر سنگ آهک، باعث تغییر قابل توجه عمق نفوذ یون‌های کلراید نمی‌شود و بعضاً نتایج مشابهی مشاهده می‌گردد. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از سیمان‌های دو جزئی و سه جزئی حاوی رس کلسینه باعث کاهش قابل توجه عمق نفوذ و ضریب انتشار یون‌های کلراید و در نتیجه بهبود دوام در برابر شرایط محیطی کلرایدی می‌گردد [۲۰]. هانداپانی و همکاران [۲۱]، با بررسی مشخصات مکانیکی و پارامترهای دوامی به این نتیجه رسیده‌اند که رشد مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی LC3 در مقایسه با نمونه‌ی شاهد بهتر بوده است. همچنین علاوه بر بهبود قابل توجه مقاومت الکتریکی و نفوذ کمتر یون‌های کلراید، جذب آب موینه کمتر و کاهش حجم فضاهای خالی در مخلوط‌های حاوی مواد جایگزین نسبت به مخلوط شاهد گزارش شده است. دوام ملات‌های دو جزئی (رس کلسینه شده و سیمان پرتلند) و سه جزئی (رس کلسینه شده، پودر سنگ و سیمان) حاوی رس کلسینه شده با مقادیر مختلف کائولینیت (۹۵-۱۷٪) توسط مراغه‌چی و همکاران (۲۰۱۸) [۲۲] بررسی شده است. جایگزینی سیمان با رس‌های کلسینه شده با کائولینیت کم (کمتر از ۴۰٪) در هر دو مخلوط دو جزئی و سه جزئی، سبب کاهش یا برابر شدن مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی مواد جایگزین در مقایسه با نمونه شاهد شده است. به طور کلی، سیمان‌های دو جزئی و سه جزئی نفوذ یون‌های کلراید را حداقل به میزان ۱ تا ۲ برابر کاهش داده است. همچنین، محتوای کائولینیت رس‌های کلسینه شده تأثیر معنی داری بر تخلخل و ورود یون‌های کلراید داشته است. علاوه بر این، افزایش محتوای کائولینیت باعث بهبود ریزساختار و انسداد ساختار اتصال منافذ و همچنین کاهش عمق نفوذ کلراید می‌شود. این مطالعه توسط Scrivener (۲۰۱۴) [۶] و Marangu (۲۰۲۰) [۲۳] نیز تأیید شده است. همچنین در تحقیقی که توسط پیلائی و همکاران [۲] انجام شده است، مشخص شده که سازه‌های بتنی حاوی سیمان سه جزئی LC3 دارای عمر مفید قابل توجه بیشتری از بتن‌های حاوی خاکستر بادی و بتن شاهد بوده است. علاوه بر مقاومت بیشتر در برابر نفوذ یون‌های کلراید، میزان کربن دی اکسید تولیدی در سال به میزان ۱۶-۳۰٪ کاهش یافته است که این تحقیق سیمان سه جزئی LC3 را به ماده‌ای سازگار با محیط زیست تبدیل کرده است.

هدف از این تحقیق بررسی مشخصات مکانیکی و دوام در برابر نفوذ

جدول ۱. ترکیب شیمیایی سیمان و مواد جایگزین سیمان مورد استفاده

Table 1. Cementing materials chemical properties.

کائولینیت (%)	LOI	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	
-	۰/۹۳	۲/۳۵	-	-	۰/۶۵	۰/۲۳	۱/۴۰	۶۳/۹۸	۴/۲۵	۴/۷۳	۲۱/۴۴	سیمان (%)
۲۸/۷	۲/۵۷	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۳۳	۰/۰۵	۰/۰۹	۲/۷	۰/۲۸	۲۲/۶	۷۱/۳	رس کلسینه CC1 (%)
۲۰/۸	۱/۴۲	۰/۰۸	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۱۸	۰/۰۴	۰/۰۹	۱/۷۱	۰/۱۸	۱۹/۱	۷۷/۱۱	رس کلسینه CC2 (%)
۱۹/۴	۰/۳/۶۳۱	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۱۵	۰/۷۴	۰/۰۴	-	۰/۰۴	۰/۲۳	۱۹/۴	۷۸/۷۱	رس کلسینه CC3 (%)
-	۴۳/۴۱	۰/۱	۰/۰۸	-	۰/۰۸	-	۲/۸۳	۴۹/۱	۰/۲۴	۰/۷۳	۳/۳۱	پودر سنگ آهک LS (%)

درجه سانتی‌گراد تا ریزی مورد نظر آسیاب شده است. ترکیب شیمیایی و مشخصات فیزیکی سیمان و مواد جایگزین سیمان (رس کلسینه و پودر سنگ آهک) به ترتیب در جداول ۱ و ۲ گزارش شده است. علاوه بر این، بر اساس استاندارد ASTM C618 [۲۴] فعالیت پوزولانی رس‌های معدنی (پس از فعال‌سازی حرارتی) با ۲۰ درصد جایگزینی به جای سیمان پرتلند تعیین و نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است.

مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق، شن با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر و ماسه طبیعی بوده که مشخصات مصالح در جدول ۴ آورده شده است. شن و ماسه مصرفی در طرح مخلوط‌های تهیه شده مطابق استاندارد طرح ملی مخلوط ایران [۲۵] بوده و نسبت به کارگیری ماسه و شن به ترتیب برابر با ۶۰ و ۴۰ درصد در نظر گرفته شده‌اند. حدود A، B و C حدود تعیین شده برای حداکثر اندازه سنگدانه ۱۹ میلی‌متر است. نمودار دانه‌بندی ترکیب شن و ماسه در شکل ۱ آورده شده است.

آب مورد استفاده در بخش‌های مختلف نظیر ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها، آب شرب تهران بوده است و از فوق روان کننده با پایه پلی کربوکسیلات اتر اصلاح شده برای تأمین اسلامپ ۱۰۰-۱۵۰ میلی‌متر استفاده شده است.

یون‌های کلراید در بتن‌های ساخته شده با جایگزینی رس‌های با کائولینیت کم به جای سیمان به صورت دو جزئی و سه جزئی می‌باشد. استفاده از این رس‌ها به علت عدم مصرف در صنایع سرامیک، کاغذ و غیره از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه بوده [۶] و همچنین استفاده از این مواد جایگزین سبب کاهش هزینه‌های چرخه عمر، کاهش انتشار گاز کربن دی‌اکسید و حرکت به سوی توسعه پایدار می‌باشد.

## ۲- برنامه آزمایش‌ها

### ۲-۱- مشخصات مصالح

در این پژوهش از سیمان پرتلند تیپ ۲ کارخانه سیمان کردستان استفاده شده است. همچنین رس‌های تهیه شده CC1، CC2 و CC3 به ترتیب از معادن زنون، خراسانلو و زنون تهیه شده است. و پس از خردایش اولیه، به مدت ۱ ساعت در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد در کوره الکتریکی بستر ثابت کلسینه شده و در نهایت تا زمان رسیدن به ریزی در حدود  $\pm 5$  درصد ریزی سیمان پرتلند آسیاب شده‌اند. پودر سنگ آهک مصرفی با خلوص ۸۷/۷ درصد کلسیم کربنات بوده و پس از خشک کردن در دمای ۱۰۰

جدول ۲. مشخصات فیزیکی سیمان و مواد جایگزین سیمان مورد استفاده

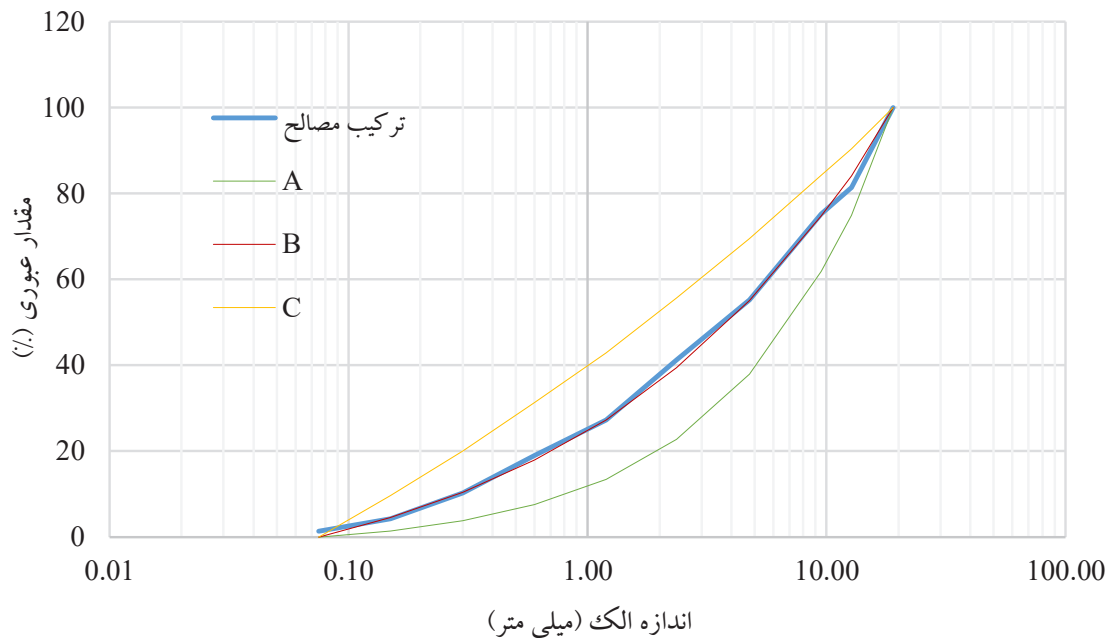
Table 2. Cementing materials physical properties

چگالی ( $\text{gr/cm}^3$ )	باقی مانده روی الک ۴۵ میکرون (%)	مصالح سیمانی مصرفی
۳/۰۲	۹/۶۲	سیمان (%)
۲/۵۵	۱۴/۵	رس کلسینه CC1 (%)
۲/۵۵	۱۴/۶	رس کلسینه CC2 (%)
۲/۵۷	۱۱/۲	رس کلسینه CC3 (%)
۲/۶۲	۱۰/۱	پودر سنگ آهک LS (%)

جدول ۳. فعالیت پوزولانی مواد جایگزین سیمان

Table 3. Pozzolanic reactivity index

فعالیت پوزولانی ۲۸ روزه	فعالیت پوزولانی ۷ روزه	ماده جایگزین سیمان
۹۰/۳	۷۴/۷	رس کلسینه CC1 (%)
۸۵/۶	۶۸/۳	رس کلسینه CC2 (%)
۸۹	۶۹/۴	رس کلسینه CC3 (%)



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی

Fig. 1. Particle size distribution of aggregates

جدول ۴. مشخصات مصالح سنگی

Table 4. Aggregates properties

شن	ماسه	مشخصات
۲۵۵۰	۲۵۴۰	وزن مخصوص ( $\text{kg/m}^3$ )
۲/۲	۳/۲	جذب آب اشباع با سطح خشک (%)

جدول ۵. طرح مخلوط نمونه‌های بتنی

Table 5. Mixture proportions

اسلامپ (mm)	درصد وزنی فوق روان کننده نسبت به سیمان	آب ( $\text{kg/m}^3$ )	ماسه ( $\text{kg/m}^3$ )	شن ( $\text{kg/m}^3$ )	پودر سنگ ( $\text{kg/m}^3$ )	رس کلسینه ( $\text{kg/m}^3$ )	سیمان ( $\text{kg/m}^3$ )	نام طرح
۱۴۰	۰/۲۱	۱۶۰	۱۰۵۰	۷۰۳	۰	۰	۴۰۰	OPC
۱۰۰	۰/۳	۱۶۰	۱۰۴۰	۶۹۵	۰	۱۲۰	۲۸۰	CC1
۱۱۰	۰/۳۷	۱۶۰	۱۰۴۰	۶۹۵	۰	۱۲۰	۲۸۰	CC2
۱۲۵	۰/۳۳	۱۶۰	۱۰۴۰	۶۹۵	۰	۱۲۰	۲۸۰	CC3
۱۰۵	۰/۳۵	۱۶۰	۱۰۴۰	۶۹۵	۴۰	۸۰	۲۸۰	LS-CC1
۱۲۰	۰/۳۸	۱۶۰	۱۰۴۰	۶۹۵	۴۰	۸۰	۲۸۰	LS-CC2
۱۳۰	۰/۳۱	۱۶۰	۱۰۴۰	۶۹۵	۴۰	۸۰	۲۸۰	LS-CC3

۲-۳- روش اختلاط، ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها

اختلاط مصالح و ساخت نمونه‌های بتنی توسط مخلوط‌کن ۶۰ لیتری مستقر در آزمایشگاه بتن و مصالح ساختمانی دانشگاه صنعتی امیرکبیر صورت پذیرفت. در گام اول اختلاط، پس از توزین مصالح، ابتدا شن و نیمی از ماسه به همراه یک سوم آب به مدت ۱ دقیقه مخلوط شده است، سپس مواد جایگزین سیمان در بخشی از آب به همراه مقداری فوق روان کننده (ساخت لجن رس کلسینه و پودر سنگ) مخلوط شده و در نهایت باقی‌مانده مصالح، به ترکیب اضافه شده و تا ۶ دقیقه دیگر اختلاط ادامه می‌یابد. در گام بعدی قالب‌هایی که از قبل آماده شده‌اند، با استفاده از بتن آماده شده پر و به مدت ۲۴ ساعت در محیط مرطوب نگه داشته و پس از آن قالب‌ها باز شده و نمونه‌ها برای عمل‌آوری تا سن آزمایش در محلول آب آهک اشباع نگهداری می‌شوند.

۲-۲- طرح مخلوط نمونه‌های بتنی

هدف از ساخت نمونه‌های بتنی، بررسی اثر پوزولان طبیعی رس کلسینه شده و پودر سنگ آهک به صورت دو جزئی (سیمان و رس کلسینه شده) و سه جزئی (سیمان، رس کلسینه شده و پودر سنگ آهک) بر مشخصات مکانیکی و دوام بتن در برابر حمله کلرایدی می‌باشد. به منظور بررسی و مقایسه دقیق‌تر اثرات مواد جایگزین سیمان، هفت طرح اختلاط تهیه شده است که در جدول ۵ قابل مشاهده است. لازم به ذکر است بتن‌ها دارای نسبت آب به مواد سیمانی برابر با ۰/۴ بوده و با استفاده از افزودنی فوق روان کننده اسلامپ بتن‌های تهیه شده در محدوده ۱۰۰-۱۵۰ میلی‌متر تنظیم شده است. همچنین جایگزینی سیمان در مخلوط‌های دو جزئی با ۳۰ درصد رس کلسینه شده و در مخلوط‌های سه جزئی با ۲۰ درصد رس کلسینه شده و ۱۰ درصد پودر سنگ انجام شده است.

## ۲-۴- آزمایش‌های انجام گرفته

آزمایش‌های مورد بررسی در این تحقیق شامل آزمایش تعیین مقاومت فشاری برای بررسی خواص مکانیکی و آزمایش‌های مقاومت الکتریکی، مهاجرت تسریع شده یون‌های کلراید (RCMT) و جذب آب حجمی برای بررسی دوام در محیط کلرایدی و نفوذپذیری می‌باشد که در ادامه توضیحات هر یک ارائه خواهد شد. لازم به ذکر است که برای انجام هر یک از آزمایش‌ها ۳ نمونه برای هر طرح مخلوط و در هر سن مورد آزمایش در نظر گرفته شده که نتایج نهایی به صورت میانگین نتیجه ۳ نمونه می‌باشد.

## ۲-۴-۴- آزمایش جذب آب حجمی بتن

در این پژوهش آزمایش جذب آب حجمی مطابق با استاندارد BS 1881-122 [29] بر روی نمونه‌های بتنی در سنین ۲۸ و ۹۰ روز صورت گرفت. بر اساس استاندارد نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر بعد از عمل‌آوری برش داده شده تا از هر یک از آن‌ها ۳ دیسک با قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵ سانتی‌متر حاصل شود. نمونه‌های برش خورده به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و پس از آن به مدت ۲۴ ساعت در داخل محفظه‌ی دربسته با دمای محیط نگهداری شدند. سپس نمونه‌ها به صورت کامل در آب مغروق شده و در زمان ۳۰ دقیقه پس از خروج از آب توزین شدند. درصد جذب آب نمونه‌ها از تقسیم وزن آب جذب شده به وزن خشک نمونه‌ها محاسبه و گزارش شده است. برای مطابقت بیشتر با استاندارد و نیز حذف خطای هم اندازه نبودن نمونه‌ها، از ضریب اصلاحی پیشنهاد شده در استاندارد استفاده شده است. مقادیر جذب آب می‌تواند بیانگر نفوذپذیری بتن و مقاومت آن در برابر حمله یون‌های مخرب باشد.

## ۳- ارائه و تفسیر نتایج آزمایشات

### ۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری

به منظور بررسی تاثیر جایگزینی بخشی از سیمان با رس کلسینه شده و پودر سنگ آهک بر روی مقاومت فشاری بتن، این آزمایش در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز بر روی نمونه‌های بتنی انجام شد. نتایج این آزمایش در شکل ۴ ارائه شده است. به طور کلی مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با افزایش سن، افزایش یافته و با افزایش سن نمونه‌ها تفاوت بین مقادیر مقاومت فشاری کسب شده در طرح‌های حاوی مواد جایگزین و نمونه شاهد، کاهش می‌یابد. همچنین در تمام موارد، طرح‌های حاوی افزودنی معدنی مقاومت فشاری کمتری نسبت به نمونه شاهد کسب کرده‌اند، که دلیل آن می‌تواند غلبه کردن اثر پدیده رقیق‌کنندگی مواد جایگزین سیمان بر اثرات پرکنندگی این مصالح و فعالیت پوزولانی باشد. در این تحقیق مقاومت نسبی بالاتر نسبت

## ۲-۴-۱- آزمایش مقاومت فشاری

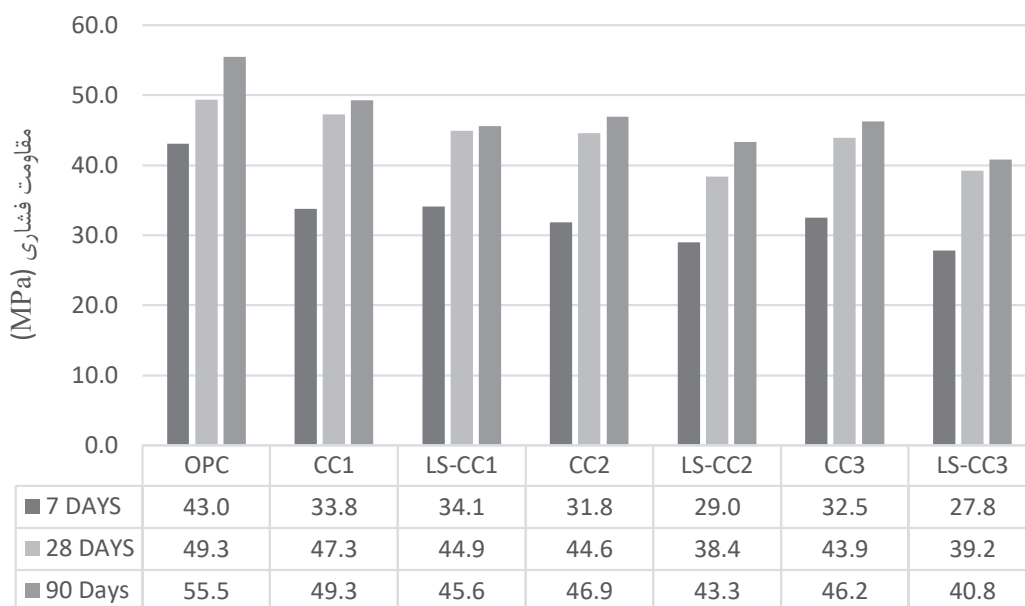
آزمایش مقاومت فشاری مطابق با استاندارد ASTM C39 [26] انجام گرفته است. نمونه‌های ساخته شده در این پژوهش به صورت مکعب‌های با ابعاد  $100 \times 100 \times 100$  میلی‌متر مکعب بوده که در ۳ لایه ریخته شده و توسط میز ویبره متراکم شده‌اند. این آزمایش برای همه طرح‌ها و در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه بر روی ۳ نمونه از هر طرح انجام گرفته است. در نهایت نیز نتیجه مقاومت فشاری برای هر طرح در هر سن به صورت میانگین نتایج به دست آمده از آزمایش ۳ نمونه گزارش شده است. تمامی نمونه‌ها تا سن آزمایش در محلول آب آهک اشباع نگهداری می‌شوند.

## ۲-۴-۲- آزمایش مقاومت الکتریکی سطحی

مقاومت الکتریکی بتن به عنوان یکی از مولفه‌های شاخص در تعیین دوام بتن شناخته می‌شود. در واقع مقدار مقاومت الکتریکی بتن به نفوذپذیری، رطوبت و ساختار شیمیایی آب حفره‌ای بتن بستگی دارد. با استفاده از روش ورنر می‌توان بدون مغزه‌گیری و در محل، میزان مقاومت الکتریکی سطحی را به دست آورد. برای استفاده از این روش، دستگاه موجود در مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن دانشگاه صنعتی امیرکبیر به کار گرفته شد. از روی اعداد به دست آمده مقاومت الکتریکی سطحی بتن محاسبه گردیده است. آزمایش مطابق دستورالعمل FM5-578 [27] بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر در شرایط اشباع با سطح خشک صورت گرفته است.

## ۲-۴-۳- آزمایش مهاجرت تسریع یافته یون‌های کلراید (RCMT)

یکی از آزمایش‌هایی که به صورت گسترده برای ارزیابی ضریب انتشار یون‌های کلراید به کار می‌رود، آزمایش مهاجرت تسریع شده یون‌های کلراید می‌باشد. این آزمایش بر اساس استاندارد NT BUILD 492 [28] انجام



شکل ۲. نمودار مقاومت فشاری

Fig.2. Compressive strength results

بتن افزایش یافته که علت اصلی آن بهبود بیشتر تخلخل خمیر سیمان ناشی از تشکیل ژل C-S-H ثانویه بر اثر واکنش‌های پوزولانی می‌باشد.

### ۳-۲- آزمایش جذب آب حجمی بتن

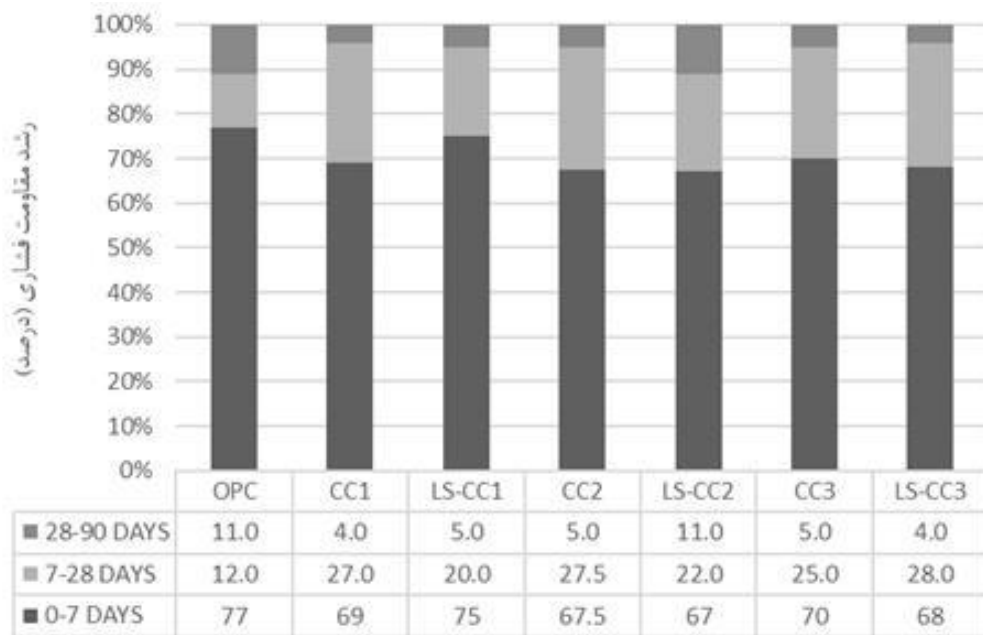
نتایج به دست آمده جذب آب حجمی نمونه‌های بتنی در سنین ۷ و ۲۸ روز در شکل ۳ ارائه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، با افزایش سن نمونه‌ها میزان نفوذپذیری بتن و در نتیجه میزان جذب آب حجمی کاهش می‌یابد که دلیل این موضوع پیشرفت فرآیند هیدراتاسیون سیمان و واکنش‌های پوزولانی می‌باشد. همچنین در اکثر موارد، استفاده از مواد جایگزین سیمان موجب کاهش جذب آب حجمی نیم ساعته نسبت به نمونه‌های شاهد گردیده است که علت این کاهش می‌تواند، فعالیت پوزولانی رس‌های کلسینه شده و اثر پرکنندگی رس کلسینه شده و پودر سنگ آهک بوده و هر چه مقدار شاخص فعالیت پوزولانی رس‌های کلسینه شده مصرفی بیشتر باشد، جذب آب حجمی بهبود بیشتری داشته است. جذب حجمی آب طرح LS-CC1 در سن ۹۰ روزه نسبتاً بیشتر از سایر طرح‌ها بوده است که احتمالاً ناشی از خطای آزمایش بوده است.

به موارد اجرایی ناشی از شرایط کنترل شده آزمایشگاهی، دانه‌بندی مناسب سنگدانه‌ها و مصالح کنترل شده می‌باشد.

با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود که سرعت کسب مقاومت فشاری در نمونه‌های حاوی مواد جایگزین در بازه ۷ تا ۲۸ روز نسبت به نمونه شاهد در همین بازه بیشتر می‌باشد که نشان از فعالیت پوزولانی رس کلسینه شده در سنین ۷ تا ۲۸ روز می‌باشد. همچنین در سنین ۲۸ تا ۹۰ روز، رشد مقاومتی نمونه‌های حاوی مواد جایگزین کمتر از نمونه شاهد است که این موضوع مؤید فعالیت پوزولانی بیشتر رس‌های کلسینه شده در بازه زمانی ۷ تا ۲۸ روز است. سایر محققین نیز در تحقیقات خود به نتایج مشابهی دست پیدا کرده‌اند [۱۷ و ۱۶]. همچنین تا سن ۹۰ روز، اختلاف مقاومت فشاری بین نمونه‌های دو جزئی (رس کلسینه شده) و سه جزئی (رس کلسینه شده و پودر سنگ آهک) برای پوزولان‌های CC1، CC2 و CC3 به ترتیب ۸، ۸ و ۱۲ درصد بوده که نشان از عملکرد بهتر نمونه‌های دو جزئی دارد.

با توجه به میزان کانولینیت موجود در خاک‌های رسی و فعالیت پوزولانی رس‌های کلسینه شده (جدول ۳) با افزایش مقدار متاکائولین، مقاومت فشاری





شکل ۳. نمودار رشد مقاومت فشاری

Fig. 3. Compressive strength growth

حفره‌ای ساختار بتن کاهش یافته و لذا از رسانایی آن کاسته می‌شود [۱۵]. این پدیده سبب افزایش قابل توجه مقاومت الکتریکی سطحی طرح‌های حاوی مواد پوزولانی نسبت به طرح شاهد شده که ارزیابی صحیح نفوذپذیری بتن را دشوار می‌کند.

علت تفاوت بین روند نتایج جذب آب حجمی بتن و مقاومت الکتریکی، دلایل متنوعی دارد. برای آزمایش جذب آب حجمی بتن، نمونه‌ها در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک می‌شوند که این موضوع احتمال به وجود آمدن ریز ترک‌های حرارتی را افزایش می‌دهد. همچنین این دما سبب تجزیه اترینگایت می‌شود که با توجه به پایداری بیشتر اترینگایت در ترکیبات حاوی رس کلسینه، این امر موجب تفاوت در ساختار بتن و در نتیجه تفاوت در نتایج می‌شود [۳۰ و ۳۱].

#### ۳-۴- آزمایش مهاجرت تسریع شده یون‌های کلراید

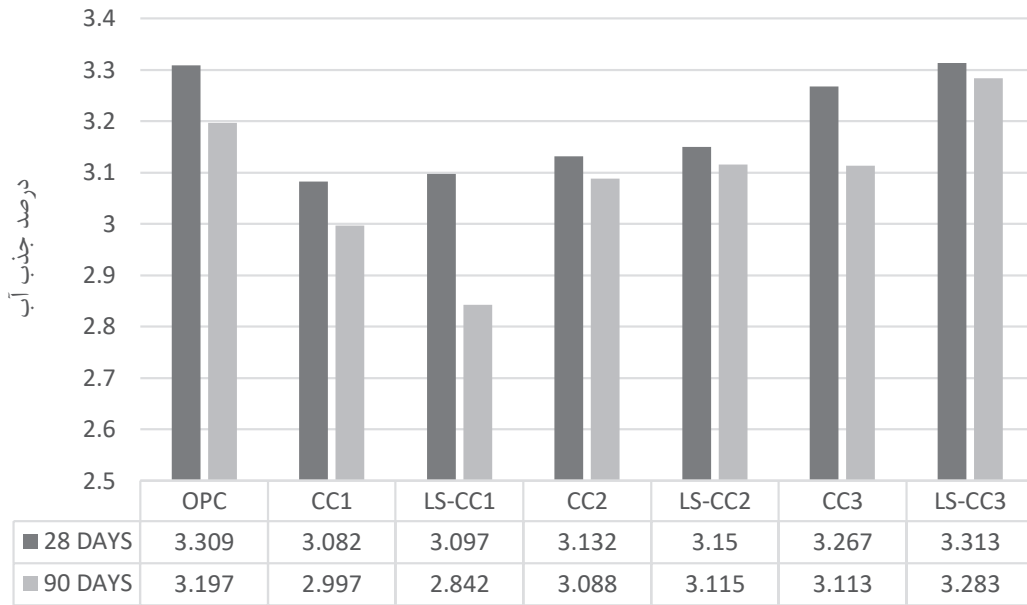
آزمایش مهاجرت تسریع شده یون‌های کلراید در سنین ۲۸ و ۹۰ روز بر روی نمونه‌های بتنی انجام شد که مقادیر ضریب انتشار یون‌های کلراید اندازه‌گیری شده، در شکل ۵ ارائه شده است.

#### ۳-۳- آزمایش مقاومت الکتریکی سطحی بتن

نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی سطحی نمونه‌های بتنی در شکل ۴ آورده شده است. با افزایش سن نمونه‌ها مقاومت الکتریکی افزایش یافته است که علت آن تکمیل هیدراسیون سیمان و واکنش‌های پوزولانی و به تبع آن کاهش نفوذپذیری بتن می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که جایگزینی رس کلسینه شده و همچنین پودر سنگ آهک به جای سیمان پرتلند، به طرز چشمگیری مقاومت الکتریکی نمونه‌ها را افزایش می‌دهد به طوری که برای بتن‌های حاوی رس کلسینه شده در مواردی حتی تا بیش از ۲/۵ برابر نسبت به نمونه شاهد، افزایش مقاومت الکتریکی مشاهده می‌شود.

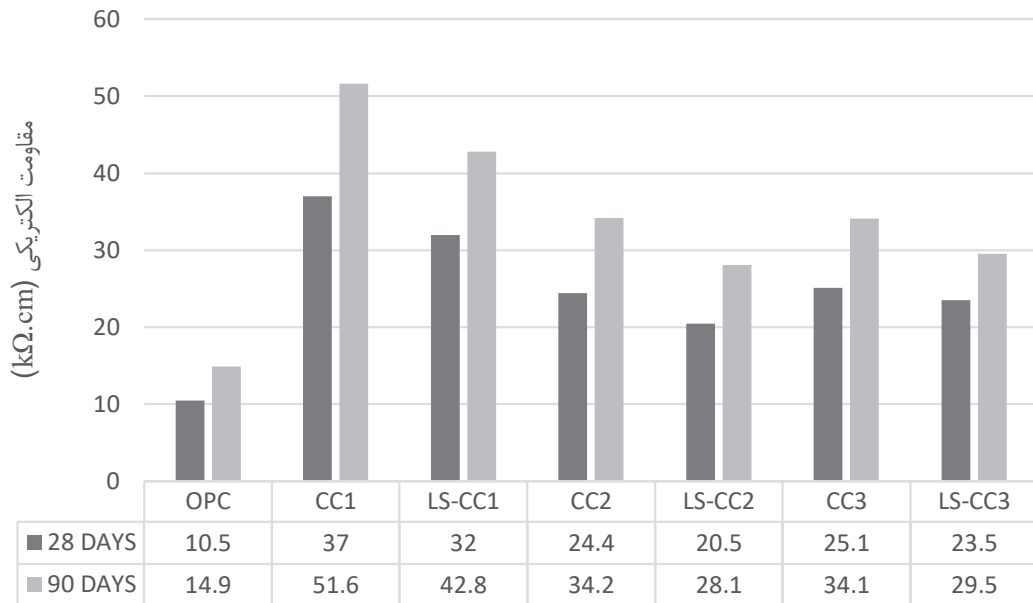
بیشتر سهم مقاومت الکتریکی تا سن ۲۸ روز کسب شده است و در بیشتر طرح‌ها از سن ۲۸ تا ۹۰ روز تقریباً ۳۰ درصد کل مقاومت الکتریکی کسب شده است. همچنین هر چه فعالیت پوزولانی رس‌های کلسینه شده بیشتر باشد مقدار مقاومت الکتریکی بیشتر می‌شود. علت اصلی این امر بهبود ساختار حفرات موئینه و نفوذپذیری بتن می‌باشد. لازم به ذکر است بر اثر واکنش‌های پوزولانی رس‌های کلسینه شده و کلسیم هیدروکسید به وجود آمده ناشی از هیدراسیون سیمان پرتلند، مقدار یون‌های محلول در آب





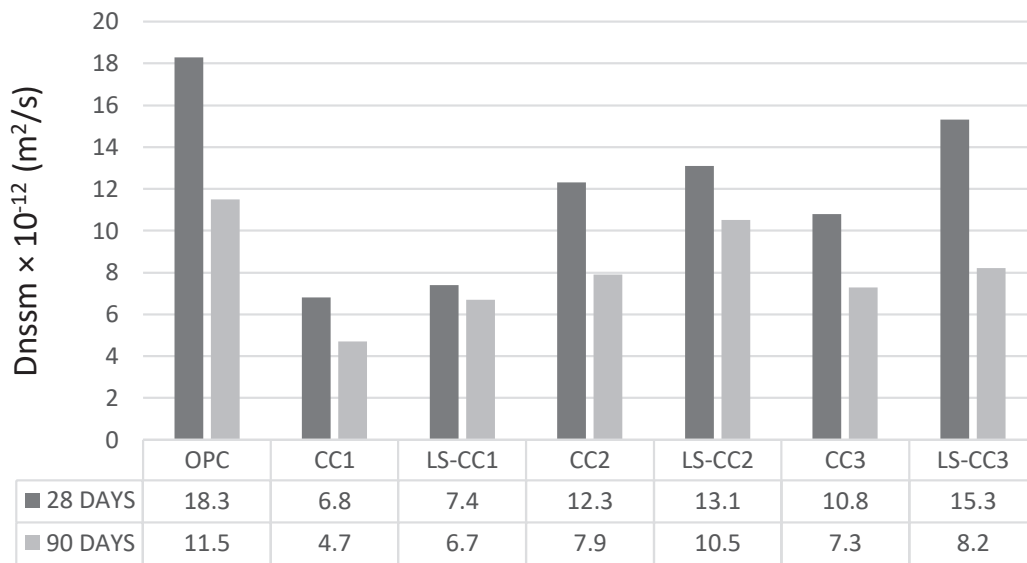
شکل ۴. نتایج جذب آب حجمی بتن

Fig.4. Water absorption results



شکل ۵. نتایج مقاومت الکتریکی سطحی.

Fig. 5. Electrical resistivity results



شکل ۶. نتایج ضریب انتشار تسریع شده یون های کلراید

Fig. 6. RCMT results

#### ۴- همبستگی بین نتایج آزمایش‌ها

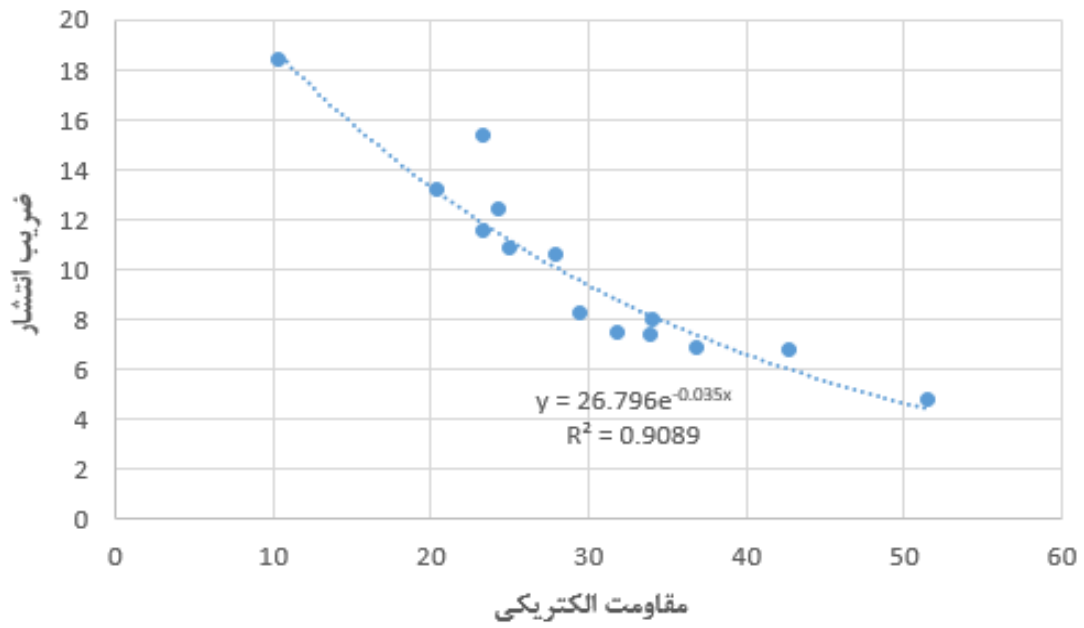
در این قسمت با مقایسه نتایج آزمایش‌های مختلف، سعی بر تعیین رابطه بین آن‌ها و میزان همبستگی نتایج این آزمایش‌ها داریم. تعیین ارتباط میان آزمایش‌های مختلف ما را قادر می‌سازد تا با داشتن بعضی خصوصیات بتن پیش‌بینی نزدیکی نسبت به دیگر خصوصیات آن داشته باشیم. به این منظور نتایج آزمایش‌های مختلف در سنین مختلف با هم مقایسه شده‌اند و ارتباط میان داده‌ها با عبور خطی که کمترین پراکندگی را نسبت به داده‌ها داشته باشد مشخص شده است. به این منظور از بین خطوط عبوری خطی که بیشترین  $R^2$  را داشته باشد انتخاب شد.  $R^2$  میزان پراکندگی داده‌ها از خط برازش داده به نتایج می‌باشد. هر چه  $R^2$  به یک نزدیک‌تر باشد پراکندگی داده‌ها از خط برازش داده کمتر خواهد بود. ارتباط بین نتایج مختلف به دست آمده در آزمایشات انجام شده به شرح شکل‌های ذیل می‌باشد.

اگر چه به نظر می‌رسد که روند نتایج آزمایش‌ها تقریباً مشابه یکدیگر هستند ولی نتایج در برخی موارد همبستگی کمی با یکدیگر دارند که این میزان کم همبستگی احتمالاً به علت تفاوت در مکانیزم انجام آزمایش‌ها می‌باشد.

با مشاهده نمودار فوق درمی‌یابیم که با بالا رفتن سن نمونه‌ها، از میزان ضریب انتشار یون‌های کلراید در تمامی طرح‌ها کاسته می‌شود که این مطلب نشان دهنده پیشرفت فرآیند هیدراسیون با زمان و کاهش نفوذپذیری در نمونه‌ها می‌باشد. همچنین استفاده از مواد جایگزین موجب کاهش میزان ضریب انتشار نمونه‌ها شده و نفوذپذیری در مقابل یون‌های کلراید کاهش یافته است. این کاهش در ضریب انتشار به علت واکنش پوزولانی و تشکیل ژل ثانویه C-S-H بوده که نقش قابل توجه این واکنش‌ها در نفوذپذیری بتن مطابق آزمایش‌های مقاومت الکتریکی سطحی و جذب آب مشخص می‌باشد (شکل‌های ۳ و ۴).

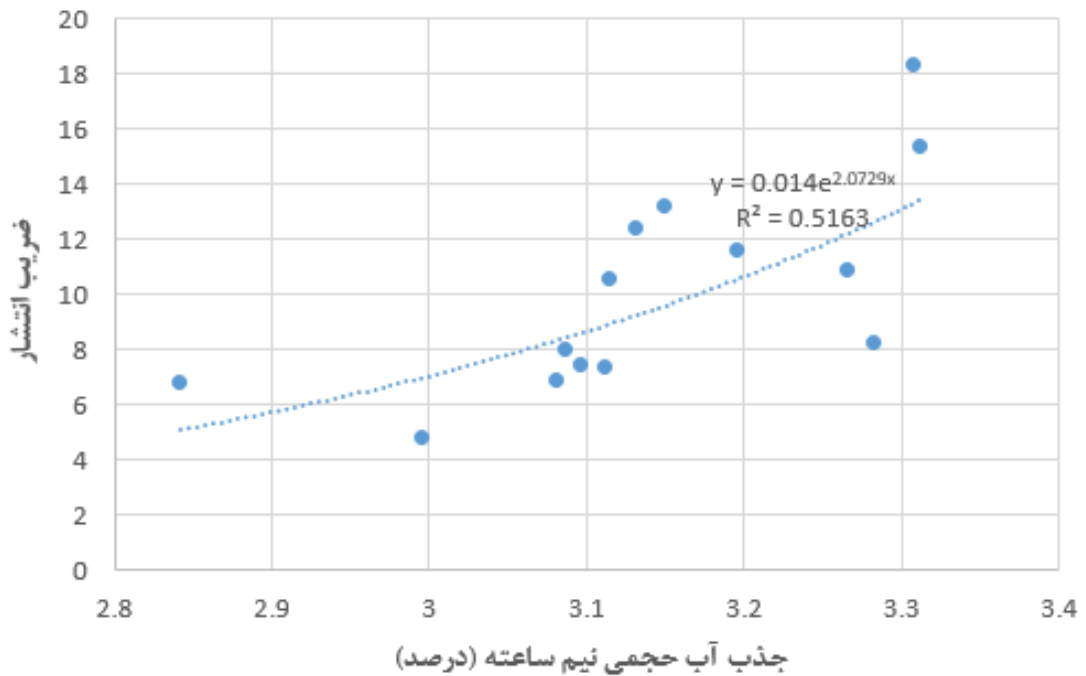
طرح CC1 و پس از آن LS-CC1 کمترین ضریب انتشار را بین نمونه‌های حاوی مواد جایگزین داشته‌اند که دلیل آن شاخص فعالیت پوزولانی بیشتر در رس کلسینه شده CC1 است.

همچنین تا سن ۹۰ روز، اختلاف ضریب انتشار بین نمونه‌های دو جزئی (رس کلسینه شده) و سه جزئی (رس کلسینه شده و پودر سنگ) برای پوزولان‌های CC1، CC2 و CC3 به ترتیب ۳۰، ۳۰ و ۱۱ درصد می‌باشد. و در تمامی طرح‌های حاوی مواد جایگزین (به جز LS-CC3) تا سن ۲۸ روز عملکرد مناسبی داشته‌اند.



شکل ۷. ارتباط میان نتایج مقاومت الکتریکی و RCMT نمونه های بتن در سنین ۲۸ و ۹۰ روز

Fig. 7. Correlation between electrical resistivity and RCMT results



شکل ۸. ارتباط میان نتایج جذب آب حجمی نیم ساعته و RCMT نمونه های بتن در سنین ۲۸ و ۹۰ روز

Fig. 8. Correlation between water absorption and RCMT results

## ۵- نتیجه گیری

## منابع

- [1] R. Polder, W. Peelen, W. Courage, Non-traditional assessment and maintenance methods for aging concrete structures—technical and non-technical issues, *Materials and Corrosion*, 63(12) (2012) 1147-1153.
- [2] R.G. Pillai, R. Gettu, M. Santhanam, S. Rengaraju, Y. Dhandapani, S. Rathnarajan, A.S. Basavaraj, Service life and life cycle assessment of reinforced concrete systems with limestone calcined clay cement (LC3), *Cement and Concrete Research*, 118 (2019) 111-119.
- [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] A. Shukla, N. Gupta, K. Kishore, Experimental investigation on the effect of steel fiber embedded in marble dust-based concrete, *Materials Today: Proceedings*, 26 (2020) 2938-2945.
- [5] V.W. Tam, A. Butera, K.N. Le, W. Li, Utilising CO2 technologies for recycled aggregate concrete: A critical review, *Construction and Building Materials*, 250 (2020) 118903.
- [6] K.L. Scrivener, Options for the future of cement, *Indian Concr. J*, 88(7) (2014) 11-21.
- [7] F. Avet, E. Boehm-Courjault, K. Scrivener, Investigation of CASH composition, morphology and density in Limestone Calcined Clay Cement (LC3), *Cement and Concrete Research*, 115 (2019) 70-79.
- [8] H. Du, S. Dai Pang, High-performance concrete incorporating calcined kaolin clay and limestone as cement substitute, *Construction and Building Materials*, 264 (2020) 120152.
- [9] A.M. Rashad, S.R. Zeedan, The effect of activator concentration on the residual strength of alkali-activated fly ash pastes subjected to thermal load, *Construction and Building Materials*, 25(7) (2011) 3098-3107.
- [10] S.-S. Park, H.-Y. Kang, Characterization of fly ash-pastes synthesized at different activator conditions, *Korean Journal of Chemical Engineering*, 25(1) (2008) 78-83.
- [11] M.J. Mwti, J.K. Thiong'o, W.J. Muthengia, Properties of activated blended cement containing high content of calcined clay, *Heliyon*, 4(8) (2018) e00742.
- [12] M.J. Mwti, J.K. Thiong'o, W.J. Muthengia, Thermal resistivity of chemically activated calcined clays-based cements, in: *Calcined clays for sustainable concrete*, Springer, 2018, pp. 327-333.

در این مقاله به بررسی و مقایسه مقاومت فشاری و دوام بتن‌های حاوی رس‌های کلسینه شده و پودر سنگ آهک (به صورت دو جزئی و سه جزئی) با بتن شاهد در شرایط محیطی کلرایدی در قالب آزمایش‌های مطرح شده پرداخته شده است. از مهم‌ترین نتایجی که در این پژوهش به دست آمده است می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- جایگزین کردن رس‌های کلسینه شده و پودر سنگ آهک، سبب کاهش مقاومت فشاری طرح‌های حاوی مواد جایگزین نسبت به طرح شاهد تا سن ۹۰ روز شده است. هر چه میزان شاخص فعالیت پوزولانی رس‌های کلسینه شده مصرفی بیشتر بوده، مقاومت فشاری بیشتری کسب شده است.
- جایگزینی رس کلسینه شده و پودر سنگ آهک سبب بهبود مقاومت الکتریکی سطحی نمونه‌های بتنی نسبت به نمونه‌های شاهد شده است. مقاومت الکتریکی نمونه‌های حاوی مواد جایگزین تا سن ۹۰ روز در بیشترین حالت ۳/۵ برابر مقاومت الکتریکی نمونه شاهد بوده، همچنین کمترین حالت این مقدار تقریباً ۲ برابر نمونه شاهد بوده است.
- جایگزینی رس کلسینه شده و پودر سنگ، باعث کاهش میزان نفوذ یون‌های کلراید در نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد شده و ضریب انتشار یون‌های کلراید را به نسبت مقدار شاخص فعالیت پوزولانی رس‌های کلسینه شده کاهش داده است.
- جایگزین کردن رس کلسینه شده و پودر سنگ، در اکثر طرح‌ها، باعث کاهش جذب آب حجمی در نیم ساعت شده است.
- در نتایج تمامی آزمایش‌ها مشخص است، که میزان بهبود در نتایج آزمایش‌ها در طرح‌های حاوی مواد جایگزین تا سن ۲۸ روز قابل توجه بوده و پس از آن از میزان فعالیت پوزولانی رس‌های کلسینه شده کاسته می‌شود.
- با مشاهده نتایج تمامی آزمایشات مشخص می‌شود که طرح‌های CC1 و LS-CC1 نسبت به سایر طرح‌ها عملکرد بهتری داشته‌اند. که این موضوع با شاخص فعالیت پوزولانی رس کلسینه مصرفی همخوانی دارد.
- مقایسه نتایج بین مخلوط‌های دو جزئی (رس کلسینه شده و سیمان) و سه جزئی (رس کلسینه شده، پودر سنگ و سیمان) تهیه شده از یک نوع رس کلسینه شده نشان از برتری مخلوط‌های دو جزئی در اکثر موارد دارد.

- [22] F. Avet, L. Sofia, K. Scrivener, Concrete performance of limestone calcined clay cement (LC3) compared with conventional cements, *Advances in Civil Engineering Materials*, 8(3) (2019) 275-286.
- [23] J.M. Marangu, Physico-chemical properties of Kenyan made calcined clay-limestone cement (LC3), *Case Studies in Construction Materials*, 12 (2020) e00333.
- [24] ASTM C618-19, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- [25] Building and housing research center, The national Method for concrete mix design, BHRC Publication, No. S-479 (2008).
- [26] ASTM C39 / C39M-21, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021.
- D. F. 5-578, "Florida method of test for concrete resistivity as an electrical indicator of its permeability", 2004.
- [28] NT Build 492, "Nord test method: Chloride Migration Coefficients from Non-Steady-State", 1999.
- [29] BS 1881-122, "Method for determination of water absorption, Testing concrete, Part: 122, BSI London", 2011.
- [30] S. Krishnan, A.C. Emmanuel, S. Bishnoi, Hydration and phase assemblage of ternary cements with calcined clay and limestone, *Construction and Building Materials*, 222 (2019) 64-72.
- [31] K. Scrivener, R. Snellings, B. Lothenbach, A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials, Crc Press, 2018.
- [13] J.M. Wachira, J.K. Thiong'o, J.M. Marangu, L.G. Murithi, Physicochemical performance of portland-rice husk ash-calcined clay-dried acetylene lime sludge cement in sulphate and chloride media, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019 (2019).
- [14] P.K. Mehta, P.J. Monteiro, Concrete: microstructure, properties, and materials, McGraw-Hill Education, 1986.
- [15] A.A. Ramezani pour, Cement replacement materials, Springer Geochemistry/Mineralogy, DOI, 10 (2014) 978-973.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Z. Shui, K. Yuan, T. Sun, Q. Li, W. Zeng, Design and Preparation of Metakaolin-Based Mineral Admixture and its Effects on the Durability of Concrete, in: *Calcined Clays for Sustainable Concrete*, Springer, 2015, pp. 229-236.
- [19] H. Maraghechi, F. Avet, K. Scrivener, Chloride transport behavior of LC 3 binders, in: *Calcined Clays for Sustainable Concrete*, Springer, 2018, pp. 306-309.
- [20] S. Sui, F. Georget, H. Maraghechi, W. Sun, K. Scrivener, Towards a generic approach to durability: Factors affecting chloride transport in binary and ternary cementitious materials, *Cement and Concrete Research*, 124 (2019) 105783.
- [21] 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.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. A. Ramezani pour , A. H. Yadak Yaraghi, A. Zolfagharnasab, A. Mohammad Ramezani pour, INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES AND CHLORIDE IONS INGRESS IN CONCRETES CONTAINING CALCINED, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(3) (2022) 1119-1132.

DOI: 10.22060/ceej.2021.19247.7117



