

## Investigating the effect of pumice as a supplementary cementitious material on the durability of calcium aluminate cement composite

A.R. Rasekhi sahneh<sup>1</sup>, H. Madani<sup>2</sup>, M.A. Dasti Rahmatabadi<sup>3\*</sup>, H. Dehghan Manshadi<sup>4</sup>

1- Ph.D Candidate of Civil Engineering, Yazd Branch, Islamic Azad University, Yazd, Iran

2-Associate Professor of Department of Civil Engineering and Surveying, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

3-Assistant Professor of Department of Civil Engineering, Yazd Branch, Islamic Azad University, Yazd, Iran

4- Assistant Professor Department of Civil Engineering, Yazd Branch, Islamic Azad University, Yazd, Iran

### ABSTRACT

Calcium aluminate cement is one of the special cements that performs much better than Portland cement in severe environmental conditions. Engineers, on the other hand, have been critical of this unique cement due to the loss of long-term strength and durability caused by the conversion phenomena. The goal of this study is to improve the durability of calcium aluminate mortar by replacing the cement with pumice powder. In this study, pumice was used as cement substitutes in proportions of 0, 5, 15, 25, 40, and 60%, and a total of 6 mortar mixes were developed and it was examined in terms of durability properties. The results showed that the plain mixture reached a compressive strength of 33 MPa at the age of 1 day, and 44MPa at the age of 28 days but at 90 days, due to the conversion phenomenon, its strength had decreased by 45%. Pumice had a considerable effect on the strength and, more significantly, the durability properties of mixtures by influencing the conversion phenomena. At the age of 90days, Compressive strength, chloride ion migration coefficient, and electrical resistance, for example, have improved 47%, 78%, and 400% in the ideal mixture (P40) compared to the plain mix. According to the review of the literature, the effect of replacing pumice with CAC cement has not been considered significantly and the effect of pumice on the durability of this type of cement has not been investigated, which can be considered an innovation of this study.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 27 December 2021

**Revise Date:** 29 June 2022

**Accept Date:** 23 July 2022

### Keywords:

Pumice

Calcium Aluminate Cement

Durability

Conversion

Supplementary Cementitious  
Material, Mortar

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.320366.2676>

\*Corresponding author: M.A. Dasti Rahmatabadi

Email address: [dashti@iauyazd.ac.ir](mailto:dashti@iauyazd.ac.ir)

## بررسی تاثیر پومیس به عنوان ماده جایگزین سیمان بر دوام سیمان آلومینات کلسیم

علیرضا راسخی صحنه<sup>۱</sup>، سیدحسام مدنی<sup>۲</sup>، محمدعلی دشتی رحمت آبادی<sup>۳\*</sup>، سید هادی دهقان<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی عمران، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران

۲- دانشیار دانشکده عمران و نقشه برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران

۴- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران

### چکیده

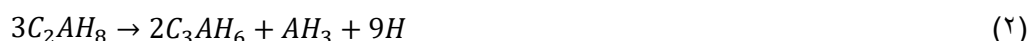
یکی از سیمان‌های ویژه که در شرایط آسیب‌رسان محیطی عملکرد بسیار بهتری نسبت به سیمان پرتلند دارد، سیمان آلومینات کلسیم است با این وجود سیمان آلومینات کلسیم به علت کاهش دراز مدت مقاومت و از دست دادن پایایی که در اثر وقوع پدیده‌ی تبدیل روی می‌دهد، چندان مورد استقبال مهندسين قرار نگرفته است. این پژوهش در نظر دارد با به‌کارگیری پودر پومیس به عنوان جایگزین بخشی از سیمان مصرفی، مشخصه‌های دوام ملات آلومینات کلسیم را بهبود بخشد. در تحقیق پیش‌رو با یک برنامه آزمایشگاهی ۵ طرح مخلوط علاوه بر مخلوط شاهد به ترتیب حاوی ۵، ۱۵، ۲۵، ۴۰ و ۶۰ درصد پومیس به عنوان جایگزین سیمان، ساخته شد و از نظر مولفه‌های دوام مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نمونه‌ی شاهد در سن ۱ روز به مقاومت ۳۳ و در سن ۲۸ روز به ۴۴ مگاپاسکال رسید ولی به علت پدیده‌ی تبدیل، در سن ۹۰ روز، مقاومت فشاری ۴۵ درصد کاهش یافت. از طرف دیگر اما در اکثر نمونه‌های حاوی پومیس نتایج متفاوتی دیده شد. پومیس با کنترل فرایند تبدیل، تاثیر قابل توجهی بر مقاومت و مهمتر از آن بهبود مولفه‌های دوام سایر نمونه‌ها داشت به طور مثال در بهترین طرح مخلوط (P40)، مقاومت فشاری ۴۷ درصد، ضریب مهاجرت یون کلراید ۷۸ درصد و مقاومت الکتریکی حدود ۴۰۰ درصد نسبت به نمونه کنترل در سن ۹۰ روز بهبود مشاهده شد. در تحقیقات قبلی تاکنون جایگزینی پومیس با سیمان آلومینات کلسیم مورد توجه قرار نگرفته است لذا بررسی اثر پومیس بر پایایی سیمان آلومینات کلسیم می‌تواند نوآوری این پژوهش به حساب آید.

کلمات کلیدی: پومیس، سیمان آلومینات کلسیم، پایایی، پدیده تبدیل، مواد جایگزین سیمان، ملات

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi:
۱۴۰۰/۱۰/۰۶	۱۴۰۱/۰۴/۰۸	۱۴۰۱/۰۵/۰۱	۱۴۰۱/۰۵/۰۱	۱۴۰۲/۰۲/۳۱	10.22065/jsce.2022.320366.2676
*نویسنده مسئول:		محمدعلی دشتی رحمت آبادی			
پست الکترونیکی:		dashti@iauyazd.ac.ir			

## ۱- مقدمه

سیمان آلومینات کلسیم (CAC)<sup>۱</sup> یک سیمان ویژه به حساب می‌آید زیرا دارای مقاومت بالایی در برابر شرایط محیطی آسیب‌رسان و سایش می‌باشد [۴-۱]. این سیمان همچنین کاربرد وسیعی به عنوان ماده نسوز در صنایع مختلف دارد [۵-۶]. اکسیدهای اصلی در سیمان آلومینات کلسیم شامل آهک (CAO) و اکسید آلومینیم ( $Al_2O_3$ ) می‌باشد بر خلاف سیمان پرتلند که اکسید اصلی آن آهک و اکسید سیلیسیم ( $SiO_2$ ) است [۳]. ترکیب این دو فاز اصلی در سیمان آلومیناتی با توجه به درصد آهک و آلومینات منجر به تشکیل فازهای مونوکلسیم آلومینات (CA)، دی کلسیم آلومینات ( $CA_2$ ) و اکسید آلومینیم می‌شود [۷]. برخلاف هیدراته شدن سیمان پرتلند، هیدراسیون سیمان آلومینات کلسیم به صورت چشمگیری به شرایط عمل‌آوری (دما و رطوبت)، نسبت آب به سیمان و مدت زمان عمل‌آوری بستگی دارد [۸]. هیدراته شدن این سیمان منجر به تشکیل فازهای پایدار ( $C_3AH_6$  و  $AH_3$ ) و فازهای ناپایدار ( $CAH_{10}$  و  $C_2AH_8$ ) می‌شود [۹]. فاز ناپایدار  $CAH_{10}$  معمولاً در ابتدای فرآیند هیدراته شدن و در دمای کمتر از ۱۵ درجه سانتی‌گراد شکل می‌گیرد که در دراز مدت به فازهای  $C_2AH_8$  و  $AH_3$  تبدیل می‌شود [۱۰]. در دمای بالاتر از ۲۷ درجه سانتی‌گراد فازهای ناپایدار  $CAH_{10}$  و  $C_2AH_8$  تبدیل به فازهای پایدار  $C_3AH_6$  و  $AH_3$  می‌شوند و در حین این فرآیند آب آزاد می‌کنند [۶]. این فرآیند به عنوان پدیده تبدیل شناخته می‌شود [۳]. تبدیل فرآیندی اجتناب‌ناپذیر در این سیمان است که مکانیزم آن در معادله ۱ و ۲ نشان داده شده است.



پدیده تبدیل تأثیرات چشمگیری بر روی تخلخل و مقاومت بتن حاوی سیمان آلومینات کلسیم دارد زیرا محصولات هیدراته شده در حین فرآیند تبدیل کاهش حجم می‌دهند و آب آزاد می‌کنند. در نتیجه‌ی این اتفاق تخلخل شکل می‌گیرد و همین تخلخل در بتن آلومیناتی عامل اصلی کاهش چشمگیر مقاومت و دوام است. مقاومت نهایی مخلوطها بر اساس فازهای پایدار  $C_3AH_6$  و  $AH_3$  بدست می‌آید، اما مقاومت اولیه، به فازهای ناپایدار  $C_2AH_8$  و  $CAH_{10}$  بستگی دارد. پرشدن فضاها به دلیل تشکیل فازهای ناپایدار باعث ایجاد مقاومت اولیه بالا در بتن‌های حاوی سیمان آلومیناتی می‌شود [۱]. ولی مقاومت اولیه کسب شده ناشی از فازهای ناپایدار موقتی است و هنگامی که این فازها، تبدیل به فازهای پایدار شوند، مقاومت کاهش می‌یابد [۱۱-۱۳].

برای آنکه بتوان این سیمان را مانند سیمان پرتلند به صورت گسترده‌تر مورد استفاده قرار داد و از مزایای منحصر به فرد آن حداکثر استفاده را برد، لازمست جهت برطرف کردن یا کاهش مشکل ذکر شده، راه حل مناسبی ارایه نمود لذا این تحقیق به دنبال یافتن روشی برای بهبود دوام سیمان آلومینات کلسیم می‌باشد. یکی از روش‌های مورد توجه برای کاهش پدیده‌ی تبدیل جایگزینی بخشی از سیمان آلومینات کلسیم با مواد حاوی سیلیس است. سیلیس موجود در این مواد در صورت انجام واکنش، مانع تشکیل فاز ناپایدار  $C_2AH_8$  می‌شود و به جای آن، فاز استرتلینگایت ( $C_2ASH_8$ ) تشکیل می‌شود که فازی پایدار به حساب می‌آید [۱۴].

تحقیقات بسیار وسیعی بر روی استفاده از مواد جایگزین سیمان در سیمان پرتلند صورت گرفته است [۱۵] به طوری‌که امروزه اهمیت اینگونه مواد در افزایش مقاومت و پایداری بتن بر کسی پوشیده نیست اما در خصوص سیمان‌های آلومینات کلسیم موضوع کاملاً متفاوت بوده و سیمان‌های آمیخته‌ی آلومیناتی به ندرت مورد مطالعه و بررسی دقیق پژوهشگران قرار گرفته‌اند بنابراین ضروریست بررسی دقیق‌تری در خصوص عملکرد این نوع ترکیبات انجام شود. تا به حال مطالعات اندکی در خصوص سیمان‌های CAC آمیخته صورت گرفته که در ذیل به برخی از مهم‌ترین آن‌ها اشاره خواهد شد:

<sup>1</sup> -Calcium Aluminate Cement

هیکل و همکارانش به بررسی جایگزینی سرباره کوره آهن‌گدازی بر خواص بتن آلومینات کلسیم در محیطی‌های تهاجمی حاوی کلرید سدیم، سولفات منیزیم و سولفات آمونیوم پرداختند. آن‌ها گزارش دادند که نمونه‌های حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی عملکرد بهتری در مقایسه با مخلوط کنترل از لحاظ مقاومت فشاری و دوام داشته‌اند [۱]. در پژوهشی هان و همکاران به بررسی اثر خاکستر پوسته برنج بر مشخصات سیمان آلومینات کلسیم پرداختند. آن‌ها در این تحقیق خاکستر پوسته برنج را در درصدهای ۲۰، ۴۰ و ۶۰ جایگزینی سیمان، مورد استفاده قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد مقاومت فشاری مخلوط‌های حاوی ۲۰ درصد خاکستر پوسته برنج بیشترین مقاومت فشاری در سنین اولیه و همچنین در سنین بالاتر در مقایسه با سایر مخلوط‌ها داشته است و در درجه بعد مخلوط‌های با ۴۰ درصد جایگزینی قرار گرفتند اما ۶۰ درصد جایگزینی خاکستر پوسته برنج باعث افت مقاومت فشاری مخلوط‌ها در سن ۲۸ روز شده است [۱۶]. سیو و همکاران نشان دادند که اضافه کردن مواد جایگزین سیمان می‌تواند باعث کاهش فازهای ناپایدار در بتن آلومینات کلسیم و در نهایت بهبود عملکرد این بتن در محیط‌های اسیدی شود. آن‌ها به بررسی مخلوط‌های حاوی ۵ و ۲۵ درصد خاکستر بادی پرداختند و گزارش دادند که استفاده از ۲۵ درصد خاکستر بادی باعث کاهش ۳۰ درصدی درجه تبدیل شده است. در این پژوهش عملکرد مطلوب خاکستر بادی در سیمان CAC مورد تایید قرار گرفت [۱۷]. چن و همکاران به بررسی اثر نانو اکسید آلومینیوم بر فرایند هیدراسیون بتن حاوی سیمان آلومینات کلسیم پرداختند و گزارش دادند که افزودن نانو ذرات آلومینیوم باعث افزایش نرخ هیدراسیون و همچنین بهبود ریزساختار این نوع بتن می‌شود [۱۸]. در تحقیقی دیگر گاسلین نشان داد که استفاده از سرباره کوره آهن‌گدازی و دوده سیلیسی به عنوان مواد جایگزین سیمانی در بتن‌های حاوی سیمان آلومینات کلسیم باعث ایجاد فضای بیشتر برای هیدراسیون مونوکلسیم آلومینات شده و در نهایت کاهش مقاومت ناشی از پدیده تبدیل را بهبود می‌بخشد [۱۹]. سان و همکاران گزارش دادند که استفاده از کلسیم سولفات باعث جلوگیری از افت مقاومت ناشی از پدیده تبدیل در بتن‌های حاوی سیمان آلومینات کلسیم شده است [۲۰]. ادیس و همکاران در پژوهشی دیگر به بررسی رفتار هیدراسیون ملات سیمان آلومینات کلسیم با مواد افزودنی معدنی در دماهای مختلف عمل‌آوری پرداختند. آن‌ها در این تحقیق از دوده سیلیسی، سرباره کوره آهن‌گدازی و خاکستر بادی به عنوان جایگزین ماسه استفاده کردند. سرباره کوره آهن‌گدازی و خاکستر بادی در درصدهای ۳۰، ۱۰ و ۶۰ و دوده سیلیسی در درصدهای ۵، ۱۰ و ۱۵ جایگزین ماسه گردید. در این پژوهش مقاومت فشاری مخلوط‌ها در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز پس از عمل‌آوری در دماهای ۲۰ و ۳۸ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد افزودن سرباره کوره آهن‌گدازی، دوده سیلیسی و همچنین خاکستر بادی باعث بهبود مقاومت فشاری مخلوط‌ها در مقایسه با مخلوط کنترل شده است [۲۱]. سعیدی کیا و مدنی در مخلوط‌های آلومیناتی اصلاح شده با پلیمر نشان دادند که مهاجرت تسریع شده‌ی یون کلراید به میزان قابل توجهی کاهش یافته است [۲۲]. در تحقیق دیگری معتمد و مدنی میزان مهاجرت یون کلر در سیمان آلومینات کلسیم الیافی را اندازه‌گیری کردند [۲۳]. بررسی پیشینه مطابق آنچه گفته شد نشان می‌دهد که تمرکز تحقیقات پیشین عمدتاً بر مشخصات مکانیکی سیمان آلومیناتی بوده است و پایایی سیمان آلومینات کلسیم آمیخته به ندرت مورد مطالعه قرار گرفته است و به طور خاص اثر پومیس بر دوام این سیمان تا کنون بررسی نشده است که می‌تواند نوآوری این پژوهش محسوب شود.

## ۲- مواد و روشها

### ۲-۱- مواد و مصالح

برای ساخت مخلوط‌ها از سیمان آلومینات کلسیم وارداتی، ساخت کارخانه‌ی Kerneos فرانسه با گرید متوسط و پومیس تفتان تولیدی کارخانه سیمان خاش استفاده شد. ترکیب اکسیدهای سیمان و پومیس مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۱ قابل مشاهده است. ماسه طبیعی مورد استفاده از معادن اطراف شهر شیراز با حداکثر اندازه اسمی ۴/۷۵ میلی‌متر، چگالی اشباع با سطح خشک ۲/۶۴ گرم بر

سانتی متر مکعب و جذب آب ۲/۳ درصد که مشخصات آن در جدول ۲ آمده است. فوق روان ساز مصرفی بر پایه پلی کربوکسیلات اثر با غلظت جامد ۳۰٪ و چگالی ۱/۱ گرم بر سانتی متر مکعب انتخاب شد.

جدول ۱: خواص فیزیکی و ترکیب شیمیایی سیمان و پومیس

مواد	$SiO_2$	$Fe_2O_3$	$Al_2O_3$	$CaO$	$MgO$	$SO_3$	$Na_2O$	$K_2O$	چگالی $\frac{g}{cm^3}$	سطح ویژه $\frac{cm^2}{g}$
CAC	4.25	10.14	43.4	40.3	0.61	0.05	0.09	0.1	3.24	3600
P	61	5	19	8	2.7	0.4	1.9	2	2.71	4500

P: پومیس

جدول ۲: مشخصات ماسه مصرفی

شماره الک	درصد عبوری
4	71.5
8	44.4
16	29.8
30	14.2
50	6.1
100	1.5
200	1.28

## ۲-۲- برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۲-۱- طرح مخلوط

در این پژوهش پومیس به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در سطح جایگزینی ۵٪، ۱۵٪، ۲۵٪، ۴۰٪ و ۶۰٪ استفاده شده است و مقاومت فشاری، مهاجرت تسریع شده کلرید، فضای منافذ قابل نفوذ، مقاومت الکتریکی و ریزساختار مخلوطها مورد بررسی قرار گرفت. برای تمرکز بهتر بر روی تاثیر پومیس بر سیمان CAC، از ملات استفاده شد. نمونهها در ابعاد مورد نیاز با ۵۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب سیمان و نسبت ثابت آب به مواد سیمانی ۰/۴ ( $\frac{w}{cm} = 0.4$ ) ساخته شدند. جهت بررسی میزان روانی مخلوطها از میز سیلان استفاده گردید. همچنین مقدار هوا برای تمامی مخلوطها ۱،۵ درصد در نظر گرفته شد. جدول ۳ جزئیات طرح اختلاط را برای تمام آزمونها نشان می دهد.

چندین مخلوط آزمایشی اولیه فاقد پومیس (شاهد) با نسبت آب مصرفی مذکور، روانی را در حدود ۱۸-۲۰ سانتی متر نشان داد بنابراین مبنای میزان استفاده از ماده‌ی روان‌ساز، کسب روانی  $1 \pm 19$  سانتی متر، برای سایر مخلوط‌های قرار داده شد.

جدول ۳: طرح مخلوط نمونه‌ها

طرح مخلوط	سیمان ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	ماسه ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	پومیس ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	آب ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	فوق روان‌ساز ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	سیلان (cm)
C	550	1523	-	220	0	19.5
P5	522.5	1517.8	27.5	220	1.2	19
P15	467.5	1510.2	82.5	220	2.1	20
P25	412.5	1502.6	137.5	220	2.7	19
P40	330	1487.2	220	220	3.6	20
P60	220	1469.3	330	220	5	18.5

C. طرح مخلوط کنترل

## ۲-۲-۲- ساخت و عمل آوری

ابتدا ماسه و پومیس در حالت خشک به مدت  $1/5$  دقیقه در مخلوط‌کن همزده شدند سپس آب و در انتها سیمان و فوق روان‌ساز به میزان لازم و به آرامی اضافه گردید. برای همگن شدن کامل مخلوط، همزن حدود ۴ دقیقه‌ی دیگر به کار ادامه داد. پس از پایان اختلاط، ملات در قالب‌های مخصوص هر آزمایش ریخته و روی میز ویبره متراکم شد.

کلیه نمونه‌ها بعد از قالب‌گیری به مدت ۲۴ ساعت با یک پوشش پلاستیکی پوشانده و سپس در دمای  $1 \pm 22$  درجه سانتی‌گراد تا زمان انجام آزمایش در حوضچه آب نگهداری شدند.

## ۲-۲-۳- آزمایش مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری در سنین مختلف طبق استاندارد ASTM C109 انجام شد [۲۴]. در هر سن، چهار نمونه مکعبی با ابعاد ۵ سانتی‌متر مورد آزمایش قرار گرفت.

## ۲-۲-۴- آزمایش مهاجرت تسریع شده‌ی کلرید

آزمایش مهاجرت تسریع شده‌ی یون کلراید در این تحقیق مطابق با استاندارد NT BUILD492 انجام شد [۲۵]. تصویر نحوه انجام آزمایش در شکل ۱ آمده است.



شکل ۱: تصویر نحوه آزمایش مهاجرت تسریع شده یون کلراید

### ۵-۲-۲- مقاومت الکتریکی

چون خوردگی میلگردهای داخل بتن یک فرایند الکتروشیمیایی است، آزمایش مقاومت الکتریکی برای پیشبینی میزان خوردگی بتن، آزمایش بسیار مهمی به شمار می‌رود. همچنین لازم به ذکر است که آزمایش مقاومت الکتریکی پارامتر مهمی برای بررسی دوام مواد پایه سیمانی می باشد که علاوه بر بحث خوردگی می توان از بررسی نتایج آن برای میزان نفوذپذیری مواد مذکور استفاده کرد. در این تحقیق آزمایش مقاومت الکتریکی با استفاده از روش چهار نقطه‌ای که به روش ونر (Wenner) معروف است بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر انجام شد. ونر بهترین روش شناخته شده و مورد استفاده برای تعیین مقاومت الکتریکی بتن می‌باشد [۲۶-۲۷].

### ۶-۲-۲- حجم حفرات قابل نفوذ

برای تعیین حجم حفرات قابل نفوذ در سن ۲۸ روز از استاندارد ASTM C642 استفاده شد [۲۸].

### ۷-۲-۲- میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

در این پژوهش از میکروسکوپ الکترونی روبشی TESCAN VEGA3 (شکل ۲) برای بررسی اثر پومیس به عنوان ماده‌ی جایگزین سیمان در ریزساختار مخلوط‌ها استفاده شد. جهت تهیه عکس‌ها از قطعاتی با ابعاد حدود ۱ سانتی‌متر که از نمونه‌های مقاومت فشاری بدست آمده بود، استفاده گردید. قبل از انجام آزمایش نمونه‌ها باید کاملاً خشک و سپس با لایه بسیار نازکی از پوشش طلا شوند.



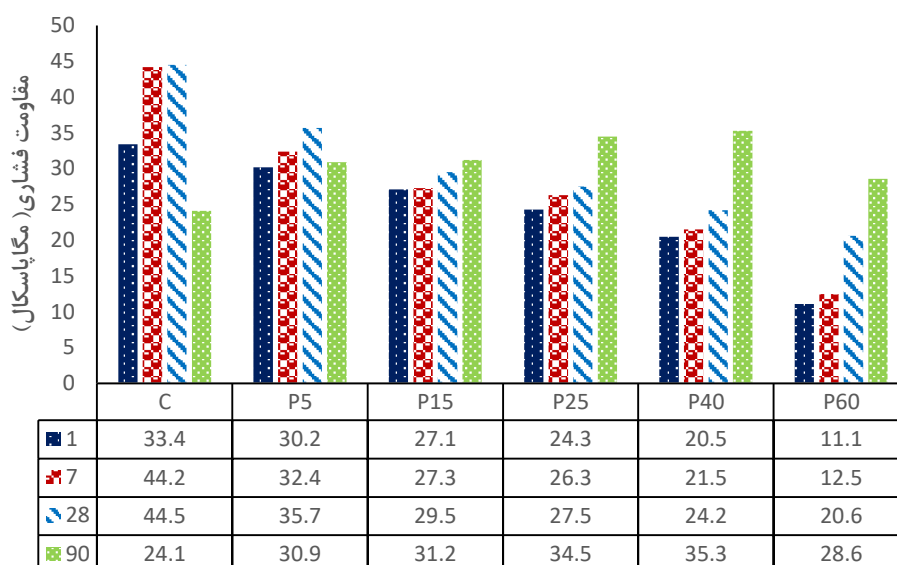
شکل ۲: دستگاه میکروسکوپ الکترونی

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- مقاومت فشاری

مطابق شکل ۳ مقاومت فشاری ۱ روزه نمونه کنترل بسیار قابل توجه و بیش از ۳۳ مگاپاسکال می باشد. مقاومت فشاری تا ۲۸ روز به ۴۴ مگاپاسکال افزایش یافت اما برعکس سیمان پرتلند، وقوع پدیده تبدیل باعث کاهش ۴۵ درصدی مقاومت فشاری ۹۰ روزه شد. سایر ستون های شکل ۳ به نتایج مخلوط هایی با درصدهای مختلف جایگزینی پومیس اختصاص یافته است. نتایج نشان می دهد که پومیس در سنین اولیه (تا ۲۸ روز) با سیمان CAC واکنش قابل ملاحظه ای نداده به همین دلیل مقاومت فشاری ۱ و ۷، ۲۸ روزه کلیه مخلوط های دارای پومیس از مخلوط کنترل کمتر است اما در سن ۹۰ روز به دلیل انجام واکنش پومیس با فازهای سیمان آلومینات کلسیم که منجر به کنترل پدیده ی تبدیل شده است، مقاومت فشاری آزمون های حاوی پومیس نسبت به نمونه ی شاهد افزایش یافت. به عنوان مثال مخلوط دارای ۴۰٪ پومیس با حدود ۴۷ درصد ارتقاء مقاومت نسبت به نمونه ی کنترل، بیشترین مقاومت فشاری را کسب نموده است و می توان این درصد جایگزینی را برای پومیس، بهترین میزان جایگزینی در نظر گرفت. درصد بهینه استفاده از پومیس برای بتن پرتلندی در حدود ۲۰ درصد گزارش شده است [۲۹].



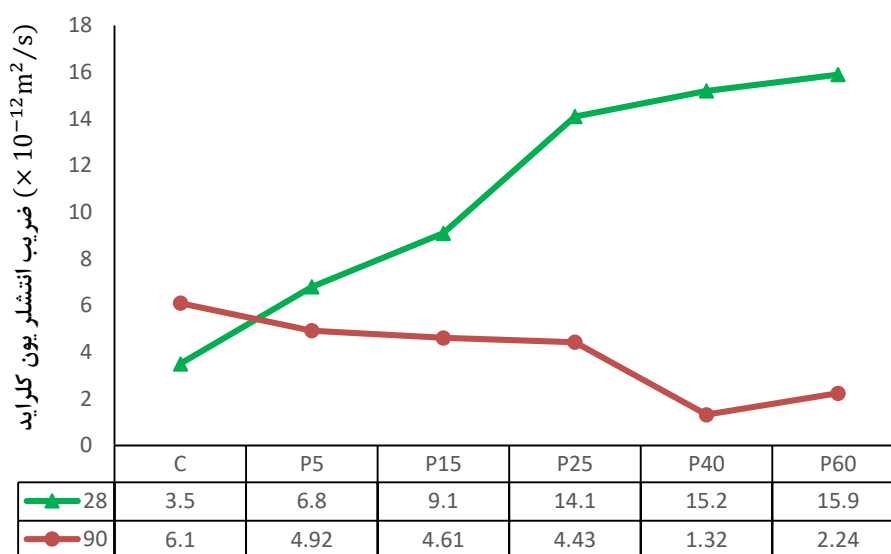


شکل ۳: مقاومت فشاری مخلوط‌ها از سن ۱۱ الی ۹۰ روز

## ۲-۳- آزمون مهاجرت تسریع شده یون کلراید (RCMT)<sup>۲</sup>

یکی از مهمترین مشکلات محیط‌های کلریدی، خوردگی کلرایدی میلگرد در بتن است بنابراین، بررسی نفوذپذیری بتن بسیار ضروری خواهد بود. یکی از روش‌های مؤثر در کاهش انتشار یون‌های خورنده در بتن، جایگزینی سیمان با مواد مکمل می‌باشد [۳۰]. همچنین در برخی تحقیقات دیگر استفاده از یک ماده معدنی حاوی سیلیس مانند خاکستر بادی یا سرباره کوره بلند به عنوان واکنش دهنده در هیدراسیون CAC توصیه شده است [۳۱]. این آزمایش در سنین ۲۸ و ۹۰ روز بر روی نمونه‌ها انجام و نتایج آن در شکل ۴ ارائه شد. در سن ۲۸ روز، مخلوط کنترل دارای کمترین میزان مهاجرت یون کلراید نسبت به نمونه‌های حاوی پومیس است اما با گذشت زمان، در سن ۹۰ روز، نمونه‌های دارای ۵٪، ۱۵٪، ۲۵٪، ۴۰٪ و ۶۰٪ به ترتیب ۱۹٪، ۲۴٪، ۲۷٪، ۷۸٪ و ۴۵٪ کاهش نفوذ پذیری را نشان می‌دهند. این بهبود به دلیل انجام واکنش پومیس با ماتریس سیمان CAC و جبران اثرات ناشی از فرایند تبدیل در این سن می‌باشد. مطابق شکل ۴ در سن ۹۰ روز بیشترین ضریب RCMT، متعلق به نمونه‌ی کنترل با مقداری برابر  $\frac{m^2}{s} \times 10^{-12} \times \frac{6}{1}$  و کمترین ضریب مربوط به مخلوط با ۴۰٪ پومیس ( $\frac{m^2}{s} \times 10^{-12} \times \frac{1}{32}$ ) بوده که اثبات می‌کند جایگزینی پومیس بهبود بسیار معنی‌داری در نفوذپذیری این نمونه داشته است.

<sup>2</sup> - Rapid Chloride Migration Test



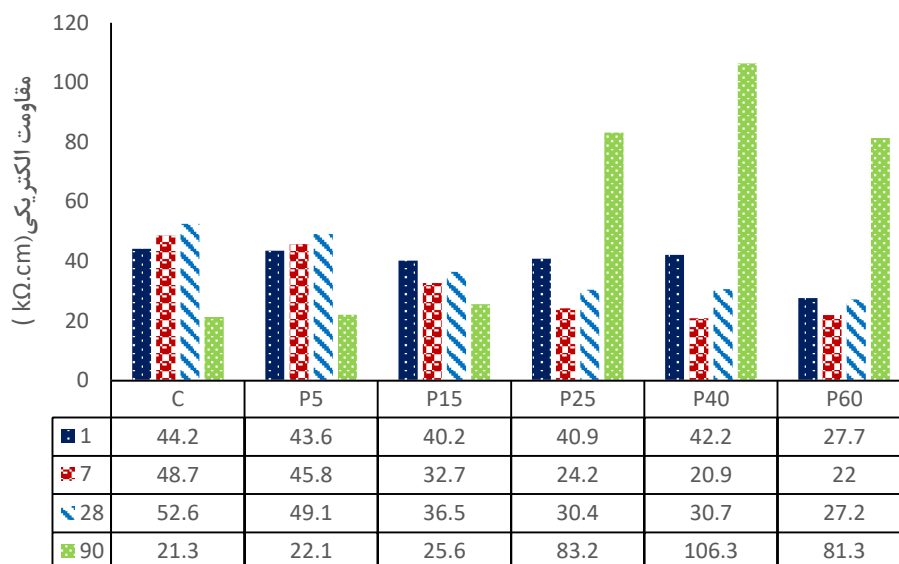
شکل ۴: نتایج آزمایش مهاجرت تسریع یافته کلرید

### ۳-۳- مقاومت الکتریکی

مقاومت الکتریکی با استفاده از روش چهارنقطه‌ای از نمونه‌ها در شرایط اشباع با سطح خشک اندازه‌گیری شد. همانطور که از شکل ۵ مشخص است در سن ۱ روزه مخلوط کنترل بیشترین مقاومت الکتریکی را در بین مخلوط‌ها دارد. با این حال، در این سن مخلوط‌های ۵٪، ۱۵٪، ۲۵٪ و ۴۰٪ دارای مقاومت الکتریکی تقریباً مشابه با مخلوط کنترل هستند. با افزایش سن نمونه تا ۲۸ روز مقاومت الکتریکی مخلوط‌های کنترل و P5 به دلیل هیدراته شدن تدریجی سیمان افزایش یافته است. اما در مخلوط‌های حاوی ۱۵٪، ۲۵٪، ۴۰٪ و ۶۰٪ پومیس مقاومت الکتریکی کاهش دارد زیرا در این طرح مخلوط‌ها ۱۵ الی ۶۰ درصد از سیمان موجود کاسته شده است و عملاً سیمان کمتری برای فرایند هیدراته شدن موجود بوده است. از طرف دیگر پومیس هم در سنین پایین (تا ۲۸ روز) وارد واکنش شیمیایی با سیمان نشده تا بتواند کمبود سیمان را جبران نماید بنابراین برای این دو عامل باعث افت مقاومت الکتریکی مخلوط‌های دارای پومیس به نسبت نمونه‌ی شاهد در این سن گردید همچنین لازم به ذکر است که پومیس نسبت به خمیر سیمان دارای تخلخل بیشتری می‌باشد و می‌تواند جریان الکتریکی را راحت‌تر عبور دهد که خود یکی از دلایل کاهش مقاومت الکتریکی در این سن می‌باشد. با افزایش سن از ۲۸ تا ۹۰ روز مطابق شکل ۵ مقاومت الکتریکی مخلوط کنترل کاهش یافت که نشان دهنده وقوع روند تبدیل است. فرآیند تبدیل، منجر به افزایش تخلخل در این مخلوط شده که به نوبه خود می‌تواند مقاومت الکتریکی را کاهش دهد. در سن ۹۰ روز، مخلوط کنترل کمترین مقاومت الکتریکی (۲۱/۳kΩ.cm) را داشت و مخلوط با ۴۰٪ پومیس دارای بالاترین مقاومت الکتریکی (۱۰۶/۳kΩ.cm) در میان تمام مخلوط‌ها است. این افزایش حدود ۴۰۰ درصدی نشان می‌دهد پومیس اثر بسیار قابل توجهی بر کنترل فرآیند تبدیل دارد. در مخلوط‌های حاوی ۲۵٪ و ۶۰٪ پومیس هم، مقاومت الکتریکی به ترتیب حدود ۲۹۰٪ و ۲۸۰٪ بهبود یافته است. بنابراین در مجموع، پومیس با کنترل پدیده‌ی تبدیل باعث بهبود مقاومت الکتریکی شده است.

آلونسو و همکاران [۳۲] و کاکس [۳۳] مقاومت الکتریکی بتن معمولی را در چهار رده‌ی کمتر از ۱۰، ۱۰ الی ۵۰، ۵۰ الی ۱۰۰ و بیشتر از ۱۰۰ کیلو اهم سانتی متر گروه بندی کرده‌اند. خطر خوردگی در این رده بندی برای گروه اول زیاد، برای گروه دوم متوسط و در گروه‌های سوم و چهارم به ترتیب کم و ناچیز منظور می‌شود. مطابق شکل ۵ مشخص است که مخلوط کنترل و مخلوط‌های حاوی ۵ و ۱۵ درصد

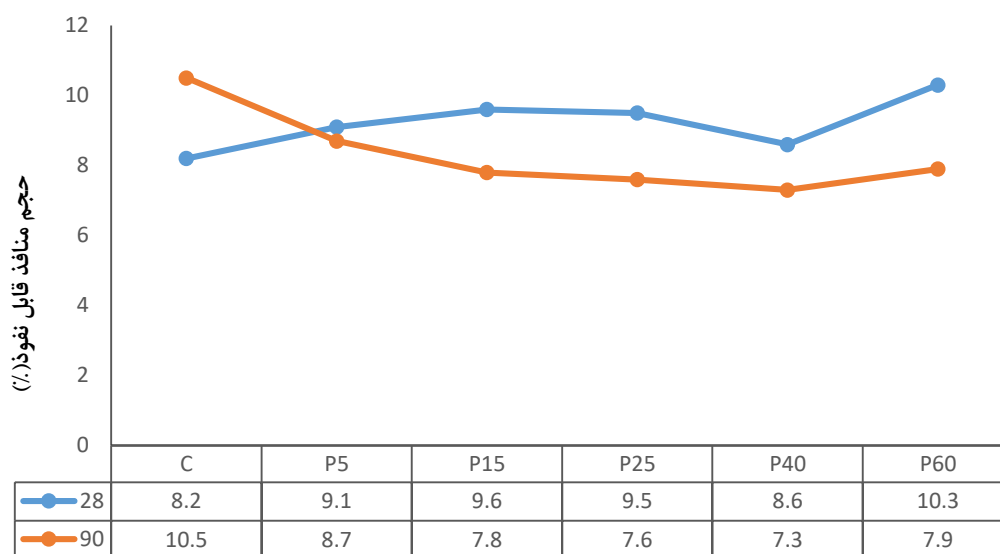
پومیس را می‌توان در معرض خطر خوردگی متوسط و مخلوط‌های حاوی ۲۵٪، ۴۰٪ و ۶۰٪ پومیس را به عنوان خطر کم خوردگی و ناچیز طبقه بندی کرد و کماکان مخلوط حاوی ۴۰٪ پومیس بیشترین مقاومت الکتریکی را دارا است. نتایج نشان داد که استفاده از پومیس می‌تواند مقاومت الکتریکی سیمان آمیخته‌ی CAC و در نتیجه شاخص ماندگاری را به میزان قابل توجهی بهبود بخشد. شایان ذکر است که نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی با نتایج آزمون مهاجرت تسریع شده یون کلر هماهنگی دارد.



شکل ۵: نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی نمونه‌ها

#### ۴-۳- حجم حفرات قابل نفوذ

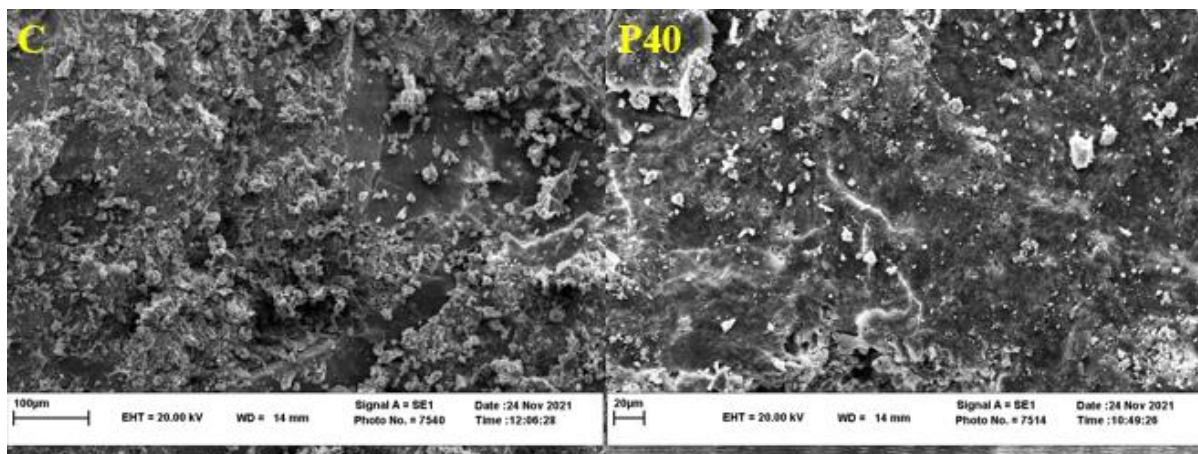
برای هر خمیر سیمان (یا بتن) عامل تخلخل تأثیر مهمی بر مقاومت دارد [۳۴]. شکل ۶ نشان دهنده‌ی نتایج آزمایش حجم منافذ نفوذپذیر است. همانطور که در سن ۲۸ روزه مشاهده می‌شود، ترکیب پومیس باعث افزایش حجم منافذ نفوذپذیر در مقایسه با مخلوط کنترل خواهد شد. به عنوان مثال در ترکیب ۵، ۱۵، ۲۵، ۴۰ و ۶۰ درصد، حجم منافذ نفوذ پذیر به ترتیب ۱۱، ۱۷، ۱۶، ۵ و ۲۵ درصد افزایش یافت. در سن ۲۸ روز، مخلوط کنترل دارای کمترین فضای منافذ نفوذپذیر در میان تمام مخلوط‌ها است که نشان دهنده‌ی ریزساختار متراکم با تخلخل کم به دلیل تشکیل فازهای  $C_2AH_8$  و  $CAH_{10}$  می‌باشد. اما با افزایش سن از ۲۸ به ۹۰ روز، به علت وقوع فرآیند تبدیل و در پی آن ازدیاد تخلخل، حجم منافذ قابل نفوذ نیز افزایش یافته است. تحقیقات دیگر نیز نشان داده است که کاهش در حجم جامد موجب افزایش تخلخل خواهد بود [۳۲]. با وجود افزایش تخلخل در مخلوط کنترل، مخلوط‌های حاوی پومیس روند کاهشی در حجم منافذ نفوذپذیر را نشان می‌دهند. نتایج تایید می‌کند جایگزینی ۵٪، ۱۵٪، ۲۵٪، ۴۰٪ و ۶۰٪ پومیس به ترتیب باعث کاهش ۱۷٪، ۲۶٪، ۲۸٪، ۳۰٪ و ۲۵٪ فضای منافذ نفوذپذیر در مقایسه با مخلوط کنترل در سن ۹۰ روز می‌شود و این نشان از تأثیر مثبت پومیس بر کاهش روند تبدیل در سیمان آلومینات کلسیم دارد.



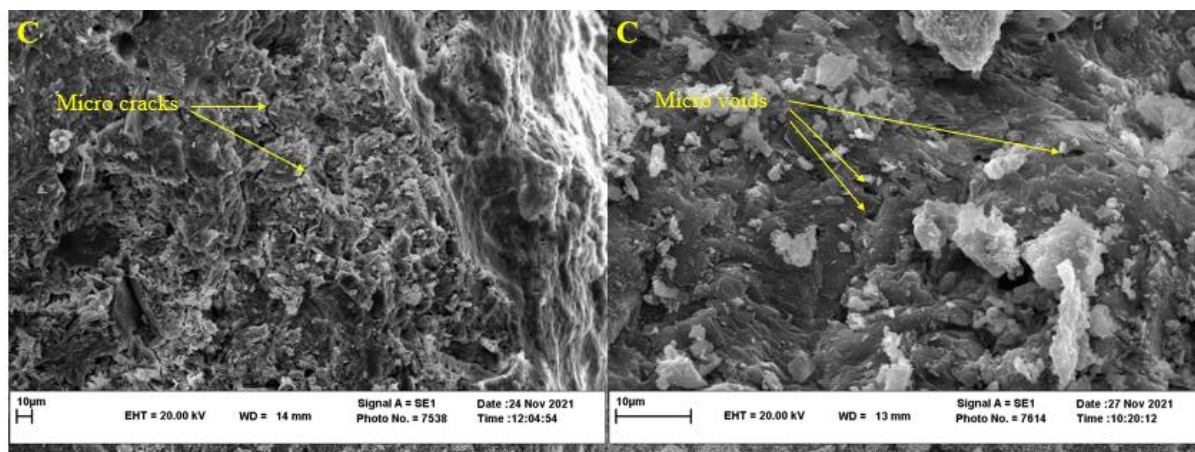
شکل ۶- نتایج آزمایش حجم حفرات قابل نفوذ (درصد)

### ۵-۳- تصاویر ریزساختاری

برای بررسی ریزساختار، دو نمونه‌ی کنترل و P40 (به عنوان بهترین طرح مخلوط) انتخاب شد. شکل ۷-a ریز ساختار مخلوط کنترل و P40 را در سن ۲۸ روز نشان می‌دهد که در آن به وضوح ماتریس سیمان متراکم است. این ساختار متراکم نشان می‌دهد که هنوز پدیده‌ی تبدیل اتفاق نیفتاده و مقاومت فشاری نسبتاً بالای نمونه (۴۴/۵ مگاپاسکال) را توجیه می‌کند. تصویر ۷-b ریزساختار مخلوط کنترل در سن ۹۰ روز را نشان می‌دهد. به دلیل وقوع فرآیند تبدیل در این سن، نمونه دارای ضعف‌های ریزساختاری شامل میکرو منافذ و میکرو ترک‌ها شده است. این یک اصل اثبات شده می‌باشد که بین تخلخل و مقاومت در مواد جامد رابطه معکوس وجود دارد و مقاومت جسم بر اساس وضعیت قسمت جامد آن ماده خواهد بود. بنابراین، حفره‌ها و ترک‌ها به مقاومت آسیب می‌رسانند [۳۳]. به علاوه پژوهشگران نشان داده‌اند که هر چه تخلخل بیشتر باشد، خصوصیات ماندگاری و دوام پایین‌تر است [۳۳]. بنابراین افزایش تخلخل ناشی از فرآیند تبدیل می‌تواند نفوذپذیری زیاد و مقاومت فشاری کم مخلوط کنترل (۲۴/۱ مگاپاسکال) را در سن ۹۰ روز توجیه کند. شکل ۸-a تصویر ریزساختار مخلوط حاوی ۴۰٪ پومیس را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است مخلوط P40 در مقایسه با مخلوط کنترل دارای ریز ساختار همگن و متراکم‌تری است و مقاومت فشاری و دوام بالای این مخلوط با نتایج ریزساختاری هماهنگی دارد. ساختار بلوری  $C_3AH_6$  مکعبی و معمولاً دارای یک مورفولوژی از کریستال‌های چند وجهی سه بعدی است در حالی که  $AH_3$  اغلب بلوری ضعیف بوده و به صورت دسته جمعی رسوب می‌کند. این دو فاز مسئول خواص طولانی مدت سیمان CAC هستند که به صورت مشخص در شکل ۸-b نشان داده شده است. افزودن مواد مکمل سیمان با محتوای سیلیس بالا می‌تواند با فازهای قابل تبدیل شدن واکنش داده و فاز استراتلینگایت (فازی پایدار) را ایجاد کند که در شکل ۸-b نشان داده شده است. این واکنش قادر است روند تبدیل را مهار یا کاهش دهد. قابل ذکر است که بررسی‌های ریزساختاری هر دو نمونه با نتایج دوام به دست آمده در مباحث قبلی کاملاً مطابقت دارد.

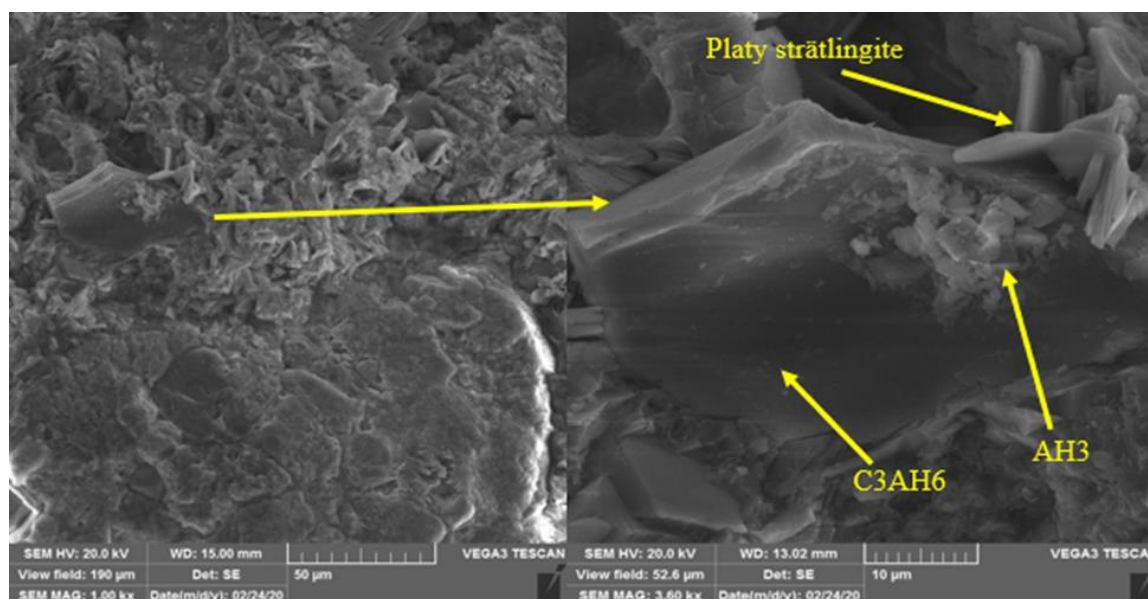


(a)



(b)

شکل (a-b)-۷- عکس‌های ریزساختاری از نمونه‌ی کنترل و P40



(a)

(b)

شکل (a-b) ۸- عکس ریزساختاری از نمونه P40 در سن ۹۰ روز

#### ۴- نتیجه گیری

این پژوهش بر روی سیمان آلومینات کلسیم آمیخته صورت گرفت. غیر از طرح کنترل، ۵ طرح مخلوط دیگر با درصدهای مختلف جایگزینی از سیمان با پومیس ساخته و بررسی شد. نتایج ذیل مهمترین دستاوردهای این پژوهش به حساب می آید:

- مقاومت فشاری مخلوط کنترل در سن ۱ روز به ۳۳ مگاپاسکال و در ۲۸ روز به ۴۴ مگاپاسکال رسید اما این مقاومت به دلیل وقوع پدیده تبدیل در سن ۹۰ روز بیش از ۴۵ درصد کاهش یافت.

- مقاومت فشاری کلیه مخلوطهای حاوی پومیس در سن ۱-۷-۲۸ روز کمتر از نمونهی کنترل بود اما با انجام واکنش پومیس با سیمان CAC در سن ۹۰ روز، مقاومت فشاری مخلوطهای P60 و P40، P25، P15، P5 به ترتیب ۲۸٪، ۲۹٪، ۴۳٪، ۴۷٪ و ۱۹٪ افزایش پیدا کرد.

- اندازه گیری ضریب مهاجرت یون کلر بر روی نمونهها نشان داد که در سن ۲۸ روز، مخلوط کنترل دارای کمترین مقدار نفوذ نسبت به نمونههای حاوی پومیس است اما با گذشت زمان و وقوع واکنش شیمیایی پومیس با سیمان آلومینات کلسیم در سن ۹۰ روز، نمونههای دارای ۵٪، ۱۵٪، ۲۵٪، ۴۰٪ و ۶۰٪ به ترتیب ۱۹٪، ۲۴٪، ۲۷٪، ۷۸٪ و ۴۵٪ کاهش نفوذپذیری را نشان دادند در صورتیکه ضریب مهاجرت نمونهی شاهد در سن ۹۰ روز به دلیل وقوع پدیده تبدیل نه تنها کاهش نیافت، بلکه ۷۴ درصد اضافه شد.

- با افزایش سن از ۲۸ به ۹۰ روز در مقاومت الکتریکی اکثر نمونههای حاوی پومیس افزایش چشمگیری به نسبت نمونه کنترل مشاهده شد به طوریکه نمونههای دارای ۲۵٪، ۴۰٪ و ۶۰٪ پومیس به ترتیب ۲۹٪، ۴۰٪ و ۲۸۰٪ افزایش مقاومت الکتریکی را در پی داشتند اما مقاومت الکتریکی نمونهی کنترل در همین سن بیش از ۱۰۰ درصد کاهش را تجربه کرد.



- حجم حفرات قابل نفوذ از سن ۲۸ به ۹۰ روز، در مخلوط کنترل افزایش یافت اما برخلاف این افزایش، حجم حفرات در تمام مخلوط‌های حاوی پومیس از ۱۷ الی ۳۰ درصد کاهش مشاهده شد.

- مطالعه ریزساختاری نمونه‌های کنترل و P40 به عنوان بهترین طرح مخلوط، تایید کرد که جایگزینی پومیس می‌تواند وقوع ریزترک‌ها و تخلخل ناشی از پدیده‌ی تبدیل را به صورت قابل توجهی کاهش داده و ساختاری متراکم‌تر با مقاومت فشاری و مشخصه‌های دوام بالاتری به دست دهد.

### مراجع :

- [1] Heikal, Mohamed, M. M. Radwan, and O. K. Al-Duaij.(2015) "*Physico-mechanical characteristics and durability of calcium aluminate blended cement subject to different aggressive media.*" Construction and building materials 78: 379-385.
- [2] Khaliq, W., & Khan, H. A.(2015). *High temperature material properties of calcium aluminate cement concrete.* Construction and Building Materials, 94, 475-487.
- [3] Scrivener, K. L., Cabiron, J. L., & Letourneux, R.(1999). *High-performance concretes from calcium aluminate cements.* Cement and concrete research, 29(8), 1215-1223.
- [4] Ann, K. Y., & Cho, C. G.(2014). *Corrosion resistance of calcium aluminate cement concrete exposed to a chloride environment.* Materials, 7(2), 887-898.
- [5] C. Parr, D. Veyrat, C. Wohrmeyer, J.P. Letourneux.(2008). *High purity calcium aluminate binders for demanding high temperature applications*, in: C. Fentiman, R. Mangabhai, K.L. Scrivener (Eds.), Centenary Conference on Calcium AluminateCements, IHS BRE Press, Avignon, France, , pp. 417-428.
- [6] Adams, M. P., & Ideker, J. H.(2017). *Influence of aggregate type on conversion and strength in calcium aluminate cement concrete.* Cement and Concrete Research, 100, 284-296..
- [7] Maaroufi, M. A., Lecomte, A., Diliberto, C., Francy, O., & Le Brun, P.(2015). *Thermo-hydrous behavior of hardened cement paste based on calcium aluminate cement.* Journal of the European Ceramic Society, 35(5), 1637-1646.
- [8] Schmitt, N., Hernandez, J. F., Lamour, V., Berthaud, Y., Meunier, P., & Poirier, J.(2000). *Coupling between kinetics of dehydration, physical and mechanical behaviour for high alumina castable.* Cement and concrete research, 30(10), 1597-1607.
- [9] Heikal, M., Radwan, M. M., & Darweesh, H. H. M.(2005). *Hydration characteristics and durability of calcium aluminate cement containing some blended systems.* Silicates Ind Ceram Sci Technol, 70, 3-4.
- [10] Zhang, Y., Chang, J., Zhao, J., & Fang, Y.(2018). *Nanostructural characterization of Al (OH) 3 formed during the hydration of calcium sulfoaluminate cement.* Journal of the American Ceramic Society, 101(9), 4262-4274.
- [11] K.L. Scrivener, A. Capmas.(1998).*Calcium aluminate cements*, in: P.C. Hewitt (Ed.), Lea's Chemistry of Cement and Concrete, Elsevier - Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, pp. 713-782.
- [12] Rashid, S., Barnes, P., Bensted, J., & Turrillas, X.(1994). *Conversion of calcium aluminate cement hydrates re-examined with synchrotron energy-dispersive diffraction.* Journal of materials science letters, 13(17), 1232-1234.
- [13] Sakai, E., Sugiyama, T., Saito, T., & Daimon, M.(2010). *Mechanical properties and micro-structures of calcium aluminate based ultra-high strength cement.* Cement and Concrete Research, 40(6), 966-970.
- [14] Khan, H. A., Castel, A., Khan, M. S., & Mahmood, A. H.(2019). *Durability of calcium aluminate and sulphate resistant Portland cement-based mortars in aggressive sewer environment and sulphuric acid.* Cement and Concrete research, 124, 105852.
- [15] Paris, J. M., Roessler, J. G., Ferraro, C. C., DeFord, H. D., & Townsend, T. G. (2016). *A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete.* Journal of Cleaner Production, 121, 1-18.
- [16] Wu, K., Han, H., Rößler, C., Xu, L., & Ludwig, H. M. (2021). Rice hush ash as supplementary cementitious material for calcium aluminate cement—Effects on strength and hydration. Construction and Building Materials, 302, 124198.
- [17] Son, H. M., Park, S. M., Jang, J. G., & Lee, H. K.(2018). *Effect of nano-silica on hydration and conversion of calcium aluminate cement.* Construction and Building Materials, 169, 819-825.
- [18] Chen, J., Liang, C., Li, B., Wang, E., Li, G., & Hou, X.(2018). *The effect of nano- $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> additive on early hydration of calcium aluminate cement.* Construction and Building Materials, 158, 755-760.
- [19] Gosselin, C.(2009). *Microstructural development of calcium aluminate cement-based systems with and without supplementary cementitious materials* (No. THESIS). EPFL.

- [20] Son, H. M., Park, S., Kim, H. Y., Seo, J. H., & Lee, H. K. (2019). *Effect of CaSO<sub>4</sub> on hydration and phase conversion of calcium aluminate cement*. Construction and Building Materials, 224, 40-47.
- [21] Idrees, M., Ekincioglu, O., & Sonyal, M. S. (2021). Hydration behavior of calcium aluminate cement mortars with mineral admixtures at different curing temperatures. Construction and Building Materials, 285, 122839.
- [22] Saeedikia, A. Madani, H. (2019), *Inuence of polymer materials on the durability of calcium aluminate cement based mixtures*, Journal of Concrete Structures and Materials, 3(2), pp. 24-40 (In persian).
- [23] Motamed, S. Madani, H. (2020) ,*combined Effect of glass and polymer fibers on shrinkage ,durability and mechanical properties of cementitious composites*, Sharif Journal of Civil Engineer , 362 (32),pp 67-76(In persian).
- [24] ASTM. (2002). ASTM C109/C109M for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or 50 mm Cube Specimens).
- [25] N. Build, 492.(2004).*Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments.*, Nordtest method, 492.
- [26] Lencioni, J. W., & De Lima, M. G. (2013). *A study of the parameters that affect the measurements of superficial electrical resistivity of concrete*. In Nondestructive Testing of Materials and Structures (pp. 271-276). Springer, Dordrecht.
- [27] R.B. Polder, C. Andrade, B. Elsener, Vennesland, J. Gulikers, R. Weidert, Rilem TC 154-EMC.(2000).*electrochemical techniques for measuring metallic corrosion – test methods for onsite measurement of resistivity of concrete*, Mater. Struct. 33 603–611. ISSN: 1359-5997-00.
- [28] ASTM C642.(1997).*Standard Test Method for Density , Absorption , and Voids in Hardened Concrete*, ASTM C642.
- [29] Mousavi, S. R., Saadatipour, A., Mokhtari, Y., & Shahnazari Aval, S.(2021). *Investigating the size effect on the compressive strength of self-consolidating concrete containing Taftan Pumice and micro-silica*. Journal of Structural and Construction Engineering, 8(5), 333-346.
- [30] Paris, J. M., Roessler, J. G., Ferraro, C. C., DeFord, H. D., & Townsend, T. G.(2016). *A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete*. Journal of Cleaner Production, 121, 1-18.
- [31] Gosselin, C.(2009). *Microstructural development of calcium aluminate cement based systems with and without supplementary cementitious materials* (No. THESIS\_LIB). EPFL.
- [32] Alonso, C., Andrade, C., & González, J. A.(1988). *Relation between resistivity and corrosion rate of reinforcements in carbonated mortar made with several cement types*. Cement and concrete research, 18(5), 687-698.
- [33] R.N. Cox, R. Cigna O (Eds.). (1997),*COST-509, Corrosion and Protection of Metals in Contact with Concrete*, Final Report,
- [34] Mehta, P. K. A. M., & Monteiro, P.(2014). *Concrete: microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill Education.