

## بررسی آزمایشگاهی رفتار مکانیکی - شیمیایی ترکیب سیمان پرتلند و کلسیم سولفوآلومینا تحت سیکل‌های حرارتی

امیرحسین محرر<sup>\*</sup>، فتاح پیرویان<sup>۲</sup> و محمد جهانی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> هیئت علمی گروه عمران و معماری، دانشگاه ملی مهارت تهران، ایران - مشاور واحد بتن و کامپوزیت کارخانه فناوری پیش‌ساخته شیراز اسکان، شیراز  
<sup>۲</sup> دانشجوی دکترای عمران، دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب، تهران - رئیس هیئت مدیره کارخانه فناوری بتن پیش‌ساخته شیراز اسکان و شرکت مهندسی‌سازان، شیراز  
<sup>۳</sup> کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس - کارشناس ارشد بتن و کامپوزیت کارخانه فناوری پیش‌ساخته شیراز اسکان، شیراز

### چکیده

توسعه بتن‌های زودگیر و اقتصادی، به‌ویژه در فناوری تولید قطعات پیش‌ساخته، در سال‌های اخیر توجه بسیاری از پژوهشگران حوزه‌ی ساخت‌وساز را به خود جلب کرده است. در این مطالعه، از دو نوع سیمان کلسیم سولفوآلومینات IRC40 و IRC50 برای ساخت ملات‌های سیمانی استفاده شد و خواص مکانیکی، ترکیب شیمیایی و ریزساختار این مواد در ترکیب با سیمان پرتلند، پیش و پس از اعمال ۲۴ سیکل شوک حرارتی، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد تشکیل فازهای پایدار و مقاومی چون اترینگایت و آلومینات در سنین اولیه، نقش کلیدی در افزایش مقاومت فشاری این سیمان‌ها نسبت به سیمان پرتلند دارد. مقاومت فشاری یک‌روزه‌ی سیمان‌های IRC40 و IRC50 به ترتیب ۲۹٪ و ۱۸٪ بیش‌تر از سیمان پرتلند به‌دست آمد. همچنین، با افزودن ۱۰٪ وزنی از این سیمان‌ها به سیمان پرتلند، مقاومت فشاری آن به‌ترتیب به ۱۴/۳٪ و ۹٪ افزایش یافت. از نظر پایداری حرارتی، IRC50 و IRC40 به‌دلیل محتوای پایین‌تر CaO عملکرد بهتری از خود نشان دادند؛ به‌طوری‌که پس از اعمال شوک حرارتی، مقاومت فشاری آن‌ها به‌ترتیب ۴۵٪ و ۲۶٪ بیش‌تر از نمونه‌ی پرتلند ثبت شد. در ترکیب‌های دوگانه، افزودن IRC50 موجب بهبود ۹/۳٪ و افزودن IRC40 باعث افت ۷/۴٪ در مقاومت فشاری در مقایسه با حالت مرجع گردید. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و آنالیزهای شیمیایی نیز حاکی از آن بود که فازهای Aft در مراحل ابتدایی گیرش و حتی پس از اعمال تنش حرارتی، از پایدارترین و متراکم‌ترین فازها باقی مانده‌اند و با حفظ ساختار متراکم خمیر سیمانی، به کاهش ترک‌های حرارتی، کاهش جذب آب، بهبود وزن مخصوص و افزایش مقاومت فشاری نسبت به خمیر سیمان پرتلند منجر شده‌اند.

**کلیدواژه‌ها:** سیمان کلسیم سولفوآلومینا، خواص مکانیکی، تنش حرارتی، آنالیز شیمیایی، ملات زودگیر

### ۱- مقدمه

است (Gosh و همکاران، ۲۰۱۲). از طرفی، در حوزه‌ی ساخت‌وساز مدرن، سرعت اجرا، کاهش هزینه‌ها و بهبود دوام سازه‌ها از جمله اولویت‌های اساسی به شمار می‌روند (Jahani و همکاران، ۲۰۲۳).

استفاده از سیمان کلسیم سولفوآلومینا<sup>۱</sup> (CSA) در بتن، به‌ویژه در تولید قطعات پیش‌ساخته، به دلیل سرعت بالای گیرش و کسب مقاومت اولیه، کاهش زمان عمل‌آوری و افزایش دوام سازه‌ها اهمیت زیادی دارد. این نوع سیمان امکان باز کردن

بتن به عنوان یکی از پرکاربردترین مصالح در صنعت ساخت‌وساز، به دلیل ویژگی‌های خاص خود، در طیف وسیعی از پروژه‌های ساخت و ساز عمرانی (Moharrer و همکاران، ۲۰۲۳)، (Moharrer و همکاران، ۲۰۲۱) از جمله سازه‌های پیش‌ساخته به کار می‌رود. در این زمینه، یکی از چالش‌های اصلی در استفاده از بتن‌های پیش‌ساخته، تسریع در فرآیند هیدراتاسیون سیمان و افزایش مقاومت فشاری اولیه بتن است. نیاز به این ویژگی به‌ویژه در پروژه‌هایی که به قالب‌برداری سریع و یا استفاده از بتن در فواصل زمانی کوتاه‌تری نیاز دارند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار

<sup>1</sup> Calcium Sulfo-Alumina

\* امیرحسین محرر؛ شماره تماس: ۰۹۱۲۸۹۸۷۸۶۳

آدرس ایمیل: amoharrer@nus.ac.ir (ا. م. محرر)، Fattahp@gmail.com (ف. پیرویان)، Jahani.m.edu@gmail.com (م. جهانی).

سرعت هیدراسیون و واکنش پذیری بالای CSA شرایطی را به وجود می آورد که در مدت کمتر از ۴۸ ساعت، رطوبت باقی مانده در آن به کمتر از ۳٪ می رسد، درحالی که در بتن های معمولی هفته ها طول می کشد تا رطوبتشان به این حد برسد (Ghosh و همکاران، ۲۰۲۳). این موضوع، وقتی اهمیت دارد که بخواهیم روی کف بتنی را بدون فوت وقت با نوعی پوشش مثل رزین اپوکسی، رنگ، پارکت، چسب یا کاشی بپوشانیم. از طرفی، حضور آلومینا در تسریع گیرش اولیه ی سیمان، یک ترکیب بسیار ضروری به شمار می رود که می تواند گیرش اولیه و سخت شدگی بتن را تا حد بسیار زیادی تحت تأثیر قرار دهد. اما از طرفی، فازهای  $AFt^3$  در بلندمدت فازهای پایدار و متراکمی به شمار نمی روند و بافت متراکم و وزن مخصوص بافت های ژلی را تحت تأثیر قرار می دهند و در کل برای ماندگاری در بلندمدت توصیه نمی گردد. با توجه به موارد گفته شده، خواص مکانیکی بتن ساخته شده از این نوع سیمان در بلندمدت نیاز به تثبیت و اطمینان سازی دارد (Ma و همکاران، ۲۰۲۳). با این حال مهم ترین مسئله در استفاده از این نوع سیمان، قیمت بالای آن است که در برخی موارد تا ۱۰ برابر سیمان پرتلند تیپ ۲ ارزش گذاری شده است که کاربری این نوع سیمان را برای پیمانکاران و متخصصین مجری محدود کرده است.

این مطالعه بر خواص ترکیبی سیمان پرتلند و سیمان سولفوآلومینات کلسیم (CSA) با دو گرید IRC40 و IRC50 تمرکز دارد تا با افزودن مقادیر اندک CSA، ضمن بهینه سازی اقتصادی، امکان سنجی کاربرد این ترکیب در شرایط سیکل های حرارتی متناوب و تأثیر آن بر دوام در دماهای بالا بررسی شود. نوآوری اصلی پژوهش در تحلیل جامع رفتار مکانیکی، تحولات فازی با استفاده از XRD و ریزساختار با استفاده از SEM ملات های ترکیبی تحت تنش های حرارتی واقعی و همچنین ارزیابی هزینه-فایده اقتصادی آن نهفته است.

این تحقیق از چند جهت با مطالعات پیشین متمایز است: اولاً، برخلاف پژوهش های گذشته که عمدتاً خواص سیمان های CSA را به صورت منفرد یا تحت شرایط ثابت بررسی کرده اند، در این مطالعه ترکیب های بهینه شده سیمان پرتلند و دو نوع سیمان CSA در معرض سیکل های حرارتی متناوب قرار گرفته اند تا پایداری واقعی در شرایط دمایی متغیر سنجیده، و ترکیبات شیمیایی و ریزساختار مکانیکی این ترکیبات ارزیابی شود. ثانیاً، در حالی که اغلب مطالعات صرفاً پارامترهای مقاومت مکانیکی یا راندمان زودرس گیرش را گزارش کرده اند، این پژوهش به صورت هم زمان رفتار مکانیکی و روند تحولات شیمیایی و ریزساختاری را تحلیل می کند. ثالثاً، برخلاف پژوهش های قبلی که کمتر به

سریع قالب ها<sup>۲</sup> را فراهم کرده و چرخه تولید را بهینه می کند، که در نهایت منجر به کاهش هزینه های نیروی کار و تجهیزات می شود (Afroughsabet و همکاران، ۲۰۲۱). در همین راستا، فناوری بتن پیش ساخته به دلیل این ویژگی ها می تواند یک انتخاب هوشمندانه برای پروژه های با مقیاس بزرگ و حجیم باشد که در چارچوب اهداف اقتصادی، فنی و زمانی، عملکرد بهینه و ماندگاری بالایی ارائه دهد. به علاوه، این عوامل در پروژه های صنعتی و زیرساختی موجب کاهش اثرات زیست محیطی ناشی از حمل و نقل مصالح، کاهش استفاده از انرژی و افزایش بازدهی کلی پروژه ها می شود. یکی از چالش های اساسی در این زمینه، مدت زمان طولانی لازم برای کسب مقاومت و گیرش در بتن های معمولی مبتنی بر سیمان پرتلند است که می تواند باعث افزایش زمان توقف و هزینه های جانبی در پروژه های زیرساختی شود که این موضوع می بایست با برنامه های مبتنی بر روش های علمی و آزمایشگاهی توسعه داده شود (Jahani و همکاران، ۲۰۲۳) و (Pooni و همکاران، ۲۰۲۱) و (Guo و همکاران، ۲۰۲۲). استفاده از CSA به عنوان ماده ای برای تولید بتن می تواند مصرف انرژی را تا ۲۵٪ و انتشار دی اکسید کربن را نیز تا ۴۰٪ کاهش دهد (جهانی و همکاران، ۲۰۲۳). به طور کلی، زمان گیرش ملات های حاوی سیمان های CSA (بدون افزودنی ها) سریع تر از بتن های مبتنی بر سیمان پرتلند معمولی است. خواص این بتن ۲۴ ساعت پس از اجرا، معادل خواصی است که در بتن معمولی بعد از ۲۸ روز به دست می آید (گوآ و همکاران، ۲۰۲۲). بتن ساخته شده از این نوع سیمان در درجات حرارت بالا نیز مقاومت مکانیکی خود را حفظ می نماید و برخلاف سیمان معمولی، مقاومت خوبی در برابر شوک حرارتی و متلاشی شدن از خود نشان می دهد. به این دلیل، در صنعت نسوز برای تولید جرم های سبک (عایق) و سنگین نسوز کاربرد دارد (Zhang و همکاران، ۲۰۲۱)، (Scrivener و همکاران، ۲۰۱۱) و (Wang و همکاران، ۲۰۲۴). CSA ضمن داشتن میزان بسیار بیشتر آلومینا ( $Al_2O_3$ )، باعث تشکیل یک بستر حاوی فازهای  $AFt$  در فرآیند جذب رطوبت و هیدراته شدن کلسیم اکسید و دکامپوزیت شدن هیدروکسید کلسیم می گردد (Jahani و همکاران، ۲۰۲۳). این ترکیب می تواند در دکامپوزیشن فازهای اولیه و تبدیل به زیر فازهای ثانویه، در صورت حضور نسبی سولفات ها به ترکیبات شیمیایی با تخلخل های متفاوت با ترکیبات پایه گچ، مانند اترینگایت تبدیل گردد. البته لازم به ذکر است که اترینگایت با انبساط محدود باعث جبران انقباض ملات و کنترل تغییرات سازه آن می شود (Juenger و همکاران، ۲۰۱۱).

<sup>3</sup> Alumina Ferric Tri-sulfate

<sup>2</sup> Demolding



شکل ۱. نمونه گیری در قالب‌های مکعبی ۵ سانتی‌متری

جدول شماره ۱. جزئیات مصالح ملات‌های ساخته شده در این تحقیق

| ردیف | سیمان پرتلند تیپ ۲ (%) | IRC40 (%) | IRC50 (%) | ماسه اتاوا           | W/C   |
|------|------------------------|-----------|-----------|----------------------|-------|
| ۱    | ۱۰۰                    |           |           | ۲/۷۵ برابر وزن سیمان | ۰/۴۸۵ |
| ۲    |                        | ۱۰۰       |           | ۲/۷۵ برابر وزن سیمان | ۰/۴۸۵ |
| ۳    |                        |           | ۱۰۰       | ۲/۷۵ برابر وزن سیمان | ۰/۴۸۵ |
| ۴    | ۹۰                     | ۱۰        |           | ۲/۷۵ برابر وزن سیمان | ۰/۴۸۵ |
| ۵    | ۹۰                     |           | ۱۰        | ۲/۷۵ برابر وزن سیمان | ۰/۴۸۵ |

به دلیل قیمت بالای این سیمان‌های ۱۰٪ وزن کل مصالح سیمانی بود که به نحوی ارزیابی بهینه سازی اقتصادی طرح نیز انجام گرفت. نمونه‌ها پس از گذشت ۲۴ ساعت از قالب خارج و بلافاصله در حوضچه قرار داده شدند.

ترکیبات شیمیایی سیمان‌های مصرفی نیز در جدول ۲ آورده شده است.

ماسه اتاوا یک ماسه استاندارد متشکل از کوارتز با دانه‌بندی یکنواخت (۰/۳ تا ۰/۶ میلی‌متر) است که مطابق استاندارد ASTM C788 به عنوان مصالح سنگی مرجع در آزمایش‌های سیمان و ملات استفاده می‌شود. این ماسه به دلیل نبود ناخالصی‌های آلی و رسی، پایه قابل اطمینانی برای ساخت ملات‌های سیمانی در پژوهش‌هاست. در این تحقیق، ملات‌های سیمان با نسبت ۱-۲/۷۵ به ماسه اتاوا و نسبت آب به سیمان ۰/۴۸۵ مطابق ASTM C305 تهیه شد.

فرآیندهای اختلاط، تراکم و عمل‌آوری نمونه‌ها نیز براساس موارد و نکات ارائه شده در استاندارد ASTM C109 انجام گرفت. به طور کلی استفاده از این ماسه تضمین می‌کند که نتایج به دست آمده عاری از تأثیرات متغیرهای ناخواسته (مانند ناهمگنی ذرات، حضور فوق روانکننده و سایر افزودنی‌ها) بوده و حتی قابلیت تکرارپذیری آزمایش‌ها را نیز افزایش می‌دهد.

جنبه اقتصادی ترکیب‌های سیمانی پرداخته‌اند، در این مطالعه علاوه بر دوام، هزینه و صرفه‌جویی ناشی از جایگزینی جزئی OPC با CSA نیز مدنظر بوده است. نهایتاً، تفاوت کلیدی دیگر، مقایسه هم‌زمان دو نوع متفاوت CSA و تعیین ترکیب ایده‌آل برای هر کدام است که کاربردپذیری و انعطاف‌پذیری بیشتری در پروژه‌های مختلف صنعتی و ساختمانی فراهم می‌آورد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مواد مصرفی و طرح‌ها

در این تحقیق تمامی نمونه‌ها در قالب مکعبی ۵ سانتی‌متری، با استفاده از سیمان پرتلند تیپ ۲ کارخانه سیمان فارس نو، و دو نوع سیمان CSA با اسامی IRC40 و IRC50 ساخته شدند که جزئیات مصالح مورد استفاده در هر طرح در جدول ۱ ارائه شده است. تمامی نمونه‌ها بلافاصله پس از ساخت به مدت ۶ ساعت در یک محیط ایزوله تحت بخار آب تا رسیدن به دمای ۶۰ درجه نگهداری شدند. به منظور جلوگیری از ایجاد شوک و اعمال تنش حرارتی به بتن، تغییرات دما برای رسیدن به ماکزیمم ۶۵ درجه سانتیگراد، در گام‌های ۲۰ درجه در هر ساعت مطابق با ASTM C511 و ASTM C192 بوده است. پس از گذشت ۶ ساعت عمل‌آوری در محیط بخار، نمونه‌ها در حوضچه آب قرار داده شدند تا در ادامه به سن مورد نظر رسیده و آزمایش‌های مد نظر بر روی آن‌ها انجام گردند. مقادیر جایگزینی

جدول ۲. ترکیبات شیمیایی سیمانهای مصرفی

|        | CaO (%) | SiO <sub>2</sub> (%) | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | Ti <sub>2</sub> O (%) | MgO (%) |
|--------|---------|----------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|---------|
| OPC II | 64.38   | 21.46                | 5.14                               | 3.96                               |                       | 1.38    |
| IRC 40 | < 41    | < 6                  | > 35                               | < 19                               | < 5                   | < 1.5   |
| IRC 50 | 36-39   | < 8                  | 49-53                              | < 2                                | < 2                   |         |



شکل ۲. تست مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده و قرارگیری آنها در آون و قرارگیری در سیکل تنش حرارتی

دما تا ۱۱۰° سانتی‌گراد افزایش یافته و فیکس شده و سپس به دمای محیط بازگردانده شدند. در پایان، مقاومت فشاری نمونه‌ها با دستگاه هیدرولیک اندازه‌گیری و با داده‌های نمونه‌های شاهد مقایسه می‌شود تا تأثیر تنش‌های حرارتی بر مقاومت فشاری ملات (مانند ایجاد ترک‌های ریز و تغییرات فازهای معدنی) تحلیل گردد.

#### ۲-۲-۲- تعیین درصد جذب آب کل

این آزمون مطابق استاندارد ASTM C642 برای سنجش میزان جذب آب کل نمونه انجام شد. ابتدا نمونه مکعبی ۵ سانتی‌متری پس از خشک‌شدن در آون (دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت) تا رسیدن به جرم ثابت، وزن می‌شود. سپس نمونه به مدت ۲۴ ساعت در آب مقطر غوطه‌ور شده تا کاملاً اشباع گردد و جرم آن در این حالت ثبت می‌شود. درصد جذب آب کل با تقسیم تفاوت جرم نمونه در حالت اشباع و جرم خشک بر جرم خشک، ضرب در ۱۰۰ محاسبه می‌گردد. پس از اعمال ۲۴ سیکل حرارتی (تا ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد)، این آزمون مجدداً انجام شد تا تأثیر تنش‌های حرارتی بر تخلخل و نفوذپذیری بتن بررسی گردد. افزایش درصد جذب آب پس از حرارت‌دهی می‌تواند نشان‌دهنده ایجاد ترک‌های ریز، کاهش تراکم یا تخریب ساختار ژل C-S-H باشد. این داده‌ها برای تحلیل دوام بتن در محیط‌های با نوسان دمایی شدید (مانند سازه‌های صنعتی یا مناطق کویری) حیاتی است. جذب آب بیش از ۷٪

در این پژوهش، آب شرب شهر شیراز به عنوان آب اختلاط بتن مورد استفاده قرار گرفت که مطابق با استاندارد ASTM C1602 است. بر اساس آنالیزهای شیمیایی انجام شده توسط سازمان آب و فاضلاب استان فارس، پارامترهای کیفیت آب شیراز شامل pH بین ۷ تا ۸/۵، میزان کلرید کمتر از ۵۰۰ ppm و سولفات کمتر از ۱۰۰۰ ppm است که همگی در محدوده مجاز استانداردهای بین‌المللی قرار دارند. لازم به ذکر است، عدم وجود آلاینده‌های آلی، فلزات سنگین (مانند سرب و کادمیوم) و مواد روغنی در آب شرب، آن را برای استفاده در بتن مناسب می‌سازد. این موضوع تضمین‌کننده عدم تأثیر منفی بر گیرش سیمان، مقاومت نهایی و دوام بتن است. استاندارد به علاوه، این استاندارد تأکید میکند که آب آشامیدنی شهری در صورت نداشتن ناخالصی‌های مضر، به طور پیش‌فرض برای بتن قابل استفاده است.

#### ۲-۲- روش تحقیق و آزمایش‌ها

##### ۲-۲-۱- مقاومت فشاری

آزمون مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی ۵ سانتی‌متری در سنین ۱، ۳، ۷ و ۲۸ روزه پس از عمل‌آوری در شرایط کنترل شده (دمای ۲۳±۲ و رطوبت نسبی حداقل ۹۵٪) انجام گردید. پس از تکمیل مراحل عمل‌آوری، نمونه‌ها تحت ۲۴ سیکل حرارتی در آون قرار گرفتند که در هر سیکل،

## ۲-۵- بررسی ریزساختار با اسکنر الکترونی روبشی (SEM<sup>۵</sup>)

این آزمایش به منظور بررسی ریزساختار نمونه‌های ملات پس از قرارگیری در معرض سیکل‌های تنش حرارتی انجام شد. هدف از این بررسی، مشاهده میزان تخلخل، ترک‌های ناشی از تنش حرارتی و نحوه تغییر بافت ماتریس خمیر سیمان در اثر اعمال تنش حرارتی بوده است.

## ۳- نتایج

### ۳-۱- مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها در شکل شماره ۳ ارائه شده است.

نتایج مقاومت فشاری حاکی از گیرش سریعتر سیمان‌های CSA نسبت به سیمان پرتلند بوده است. این موضوع به دلیل گیرش سریع‌تر ترکیبات موجود در این دو نوع سیمان بوده که ذاتاً زودتر به گیرش اولیه می‌رسند. سیمان پرآلومین به دلیل دارا بودن درصد بالایی از ترکیبات آلومینات کلسیم (نظیر CA و CA<sub>2</sub>)، که به سرعت با آب وارد واکنش می‌شوند، گیرش اولیه سریعی از خود نشان می‌دهد (Jahani و همکاران، ۲۰۲۳) و (Najeeb و همکاران، ۲۰۲۳). مکانیسم این فرایند مبتنی بر واکنش هیدراتاسیون آلومینات کلسیم است که منجر به تشکیل فازهای هیدراته مانند CAH<sub>10</sub> (ده هیدرات) و C<sub>2</sub>AH<sub>8</sub> (هشت هیدرات) می‌شود. این ترکیبات هیدراته به شکل بلورهای سوزنی ظاهر می‌گردند که با ایجاد شبکه‌ای فشرده و پیوسته، ساختاری محکم و پایدار را در زمان کوتاهی شکل می‌دهند. علت اصلی سرعت بالای گیرش در مقایسه با سیمان پرتلند، به تفاوت ذاتی فازهای واکنش‌پذیر بازمی‌گردد؛ در حالی که سیمان پرتلند متکی بر فازهای سیلیکاتی با واکنش‌پذیری کندتر است، فازهای آلومیناتی در سیمان پر آلومین با جذب سریع آب، بلافاصله وارد فرایند هیدراتاسیون شده و تشکیل پیوندهای شیمیایی تسریع‌شده را ممکن می‌سازند. این ویژگی، سیمان پر آلومین را به گزینه‌ای ایده‌آل برای کاربردهای نیازمند مقاومت فوری تبدیل می‌کند (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۳) و (لی و همکاران، ۲۰۲۰).

مطالعه بر روی مقاومت فشاری ملات‌های ساخته‌شده با سیمان‌های پرتلند معمولی (OPC)، سیمان‌های کلسیم سولفوآلومینات زودگیر (IRC40 و IRC50) و ترکیبات آن‌ها نشان می‌دهد که IRC50 در تمامی سنین عملکرد برتری دارد.

پس از حرارت‌دهی، هشداردهنده کاهش عملکرد بتن محسوب می‌شود.

## ۲-۳- تعیین وزن مخصوص

برای محاسبه وزن مخصوص بتن در نمونه‌های مکعبی ۵ سانتی‌متری، ابتدا نمونه پس از عمل‌آوری در شرایط استاندارد (دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۹۵٪)، به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد خشک گردید تا جرم آن ثابت بماند. سپس جرم خشک نمونه در هوا با ترازوی دقیق و کالیبره اندازه‌گیری شد. در مرحله بعد، نمونه به مدت ۲۴ ساعت در آب مقطر غوطه‌ور می‌شود تا کاملاً اشباع شود و جرم آن در این حالت ثبت می‌گردد. در نهایت، نمونه اشباع‌شده درون آب قرار گرفته و جرم آن در حالت غوطه‌وری اندازه‌گیری می‌شود. وزن مخصوص حقیقی نیز با تقسیم جرم خشک نمونه بر تفاوت جرم خشک و جرم غوطه‌وری محاسبه می‌شود. این مقادیر نشان‌دهنده تراکم بتن، میزان تخلخل و کیفیت و همگنی بافت آن هستند. در این تحقیق این آزمون با هدف ارزیابی تأثیر تنش‌های حرارتی بر چگالی و ساختار نمونه‌ها انجام گردید. به این ترتیب که پس از اعمال ۲۴ سیکل حرارتی (افزایش دمای نمونه تا ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد و سپس کاهش دما و خنک‌سازی تا رسیدن به دمای محیط)، نمونه مکعبی ۵ سانتی‌متری مجدداً خشک‌شده و مراحل توزین در هوا، حالت اشباع و غوطه‌وری در آب تکرار می‌گردد. کاهش وزن مخصوص حقیقی پس از حرارت‌دهی می‌تواند نشان‌دهنده ایجاد ترک‌های ریز، افزایش تخلخل یا تخریب فازهای کلسیم سیلیکات هیدراته (C-S-H) باشد. این تغییرات تأثیر مستقیمی بر نفوذپذیری، مقاومت فشاری و دوام بتن در محیط‌های خورنده (مانند مناطق صنعتی یا دریایی) دارد. نتایج این آزمون برای بهینه‌سازی ترکیبات بتن مقاوم به حرارت و کاهش آسیب‌پذیری سازه‌ها در برابر نوسانات دمایی شدید ضروری است.

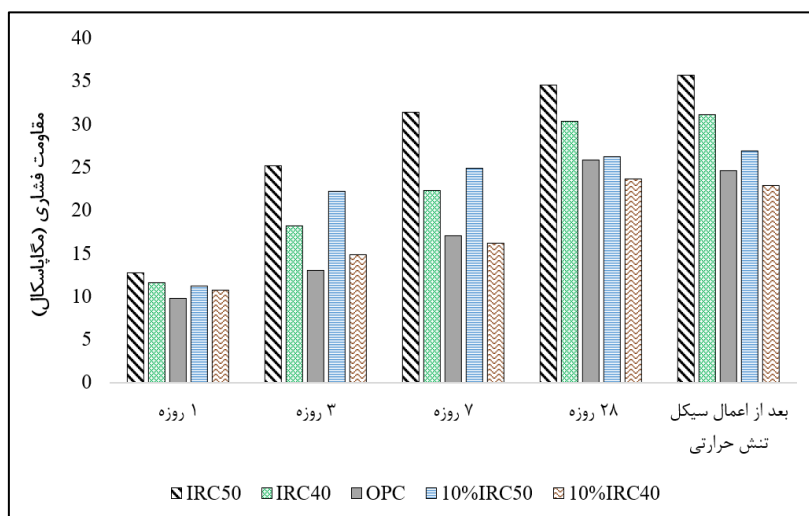
## ۲-۴- آنالیز شیمیایی (XRD<sup>۴</sup>)

این آنالیز بر روی نمونه‌های ۲۸ روزه پس از اعمال تنش حرارتی انجام گردید تا ترکیبات شیمیایی تشکیل شده طی یک فاز هیدراتاسیون کامل مشخص گردد تا شواهد و توجیه دقیقتری برای نتایج مقاومت فشاری و سایر آزمایش‌های مکانیکی باشد. این تست در شرایط استاندارد آزمایشگاهی با زاویه تابش Cu Ka = 1.540 (آنگستروم) انجام شد. این آزمایش علاوه بر شناسایی میزان کوارتز و کلسیم هیدروکسید، به طور خاص برای شناسایی پیک اترینگایت انجام شد تا با توجه به آن میزان حضور آن دلیل تغییرات خواص مکانیکی زودهنگام مشخص گردد.

<sup>5</sup> Scanning Electron Microscope

<sup>4</sup> X-ray Diffraction





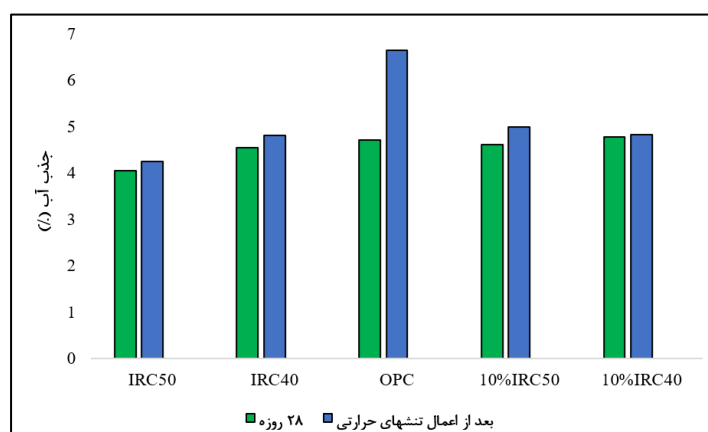
شکل ۳. نتایج آزمون مقاومت فشاری بر روی نمونه‌ها

IRC50 به‌عنوان گزینه بهینه برای پروژه‌های نیازمند مقاومت فشاری سریع و پایدار در شرایط محیطی چالش‌برانگیز مانند محیط‌های در معرض تنش‌های حرارتی شناخته می‌شود، در حالی که استفاده از ترکیبات ۱۰٪ IRC50 می‌تواند به‌عنوان راهکاری اقتصادی برای ارتقای عملکرد ملات‌های مبتنی بر OPC مورد توجه قرار گیرد (Shi و همکاران، ۲۰۱۱)، (Wang و همکاران، ۲۰۱۷)، (Sun و همکاران، ۲۰۲۵). نتایج بررسی میزان جذب آب نشان می‌دهد که نمونه حاوی IRC50 کمترین مقدار جذب آب را در سن ۲۸ روزه (۴٪) داشته که ۱۴٪ کمتر از OPC و ۱۰٪ کمتر از IRC40 است، در حالی که OPC با مقدار ۴/۷۱٪ بالاترین مقدار را نشان می‌دهد. پس از اعمال سیکل‌های تنش حرارتی، تمامی نمونه‌ها افزایش جذب آب داشتند، اما میزان این افزایش در نمونه‌ها متفاوت بود؛ OPC بیشترین افزایش (حدود ۴۱٪) را داشته و مقدار جذب آب آن به ۶/۶۴٪ رسیده است.

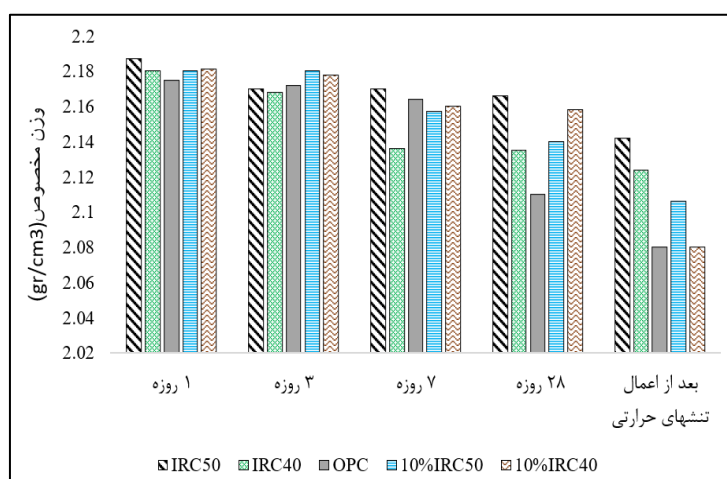
### ۳-۲- جذب آب کل

نتایج جذب آب نمونه‌ها در سن ۲۸ روزگی و پس از اعمال تنش حرارتی در شکل ۴ آورده شده است. نتایج بررسی میزان جذب آب نشان می‌دهد که نمونه حاوی IRC50 کمترین مقدار جذب آب را در سن ۲۸ روزه (۴٪) داشته که ۱۴٪ کمتر از OPC و ۱۰٪ کمتر از IRC40 است، در حالی که

در سن ۱ روزه، مقاومت فشاری IRC50 به ۱۷ مگاپاسکال رسید که ۹/۵٪ و ۲۹٪ به‌ترتیب بالاتر از IRC40 و OPC است، که ناشی از مکانیسم هیدراتاسیون سریع‌تر و تشکیل فازهای اولیه‌ی پایدارتر مانند اترینگایت در این سیمان می‌باشد. این روند در سنین میان‌مدت نیز ادامه یافت، به‌طوری که در ۳ روزگی، مقاومت IRC50 نسبت به OPC حدود دو برابر (۹۴٪ افزایش) و در ۷ روزگی ۸۴٪ بیشتر بود. با رسیدن به سن ۲۸ روزه، اگرچه اختلاف مقاومت بین IRC50 و IRC40 به ۱۴٪ کاهش یافت، اما IRC50 همچنان با ۳۴/۵ مگاپاسکال، برتری ۳۴٪ خود نسبت به OPC را حفظ کرد. تحت تأثیر سیکل‌های تنش حرارتی، پایداری IRC50 با ۴۵٪ مقاومت بیشتر نسبت به OPC و ۱۵٪ نسبت به IRC40 تأیید شد، در حالی که OPC با مقاومت فشاری ۲۴/۶ مگاپاسکالی، آسیب‌پذیری بالایی نسبت به تنش حرارتی نشان داد. نمونه‌های ترکیبی حاوی ۱۰٪ IRC50 نیز عملکردی بینابینی داشتند و پس از تنش حرارتی، ۸/۵٪ مقاومت بیشتری نسبت به نمونه‌های حاوی ۱۰٪ IRC40 ارائه دادند. این نتایج حاکی از آن است که IRC50 با ترکیب بهینه آلومینات و سولفور، نه تنها هیدراتاسیون سریع‌تر و ساختار ریزدانه متراکم‌تری ایجاد می‌کند، بلکه با تشکیل فازهای کریستالی پایدارتر، مقاومت در برابر تنش‌های حرارتی را بهبود می‌بخشد. در مقابل، OPC به دلیل وابستگی به فازهای سیلیکاتی با نفوذپذیری بالاتر، مستعد تشکیل میکروترک‌های ناشی از انبساط حرارتی است. بنابراین،



شکل ۴. نتایج آزمون جذب آب کل نمونه‌ها



شکل ۵. نتایج بررسی وزن مخصوص نمونه‌ها در سنین مختلف

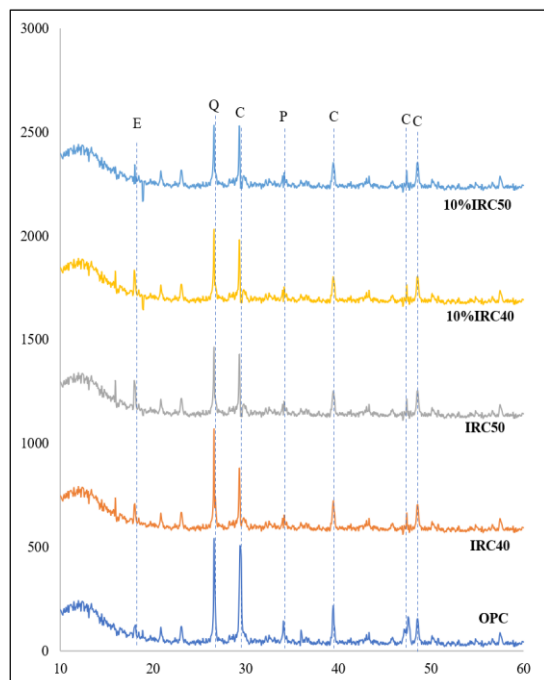
تأثیر مثبت این سیمان‌ها در کاهش جذب آب است. در مجموع، IRC50 بهترین عملکرد را در کاهش جذب آب و پایداری در برابر سیکل‌های حرارتی داشته، در حالی که OPC بیشترین تخلخل و کاهش دوام را نشان داده است.

### ۳-۳- وزن مخصوص

نتایج آزمایش وزن مخصوص در شکل ۵ ارائه شده است. در تمامی سنین آزمایش، کمی بالاتر از سایر نمونه‌ها بوده و مقدار آن تا سن ۲۸ روزگی تغییرات اندکی داشته است. این مسئله می‌تواند به میزان بالاتر ترکیبات آلومیناتی و تأثیر آن‌ها بر فرآیند هیدراسیون مرتبط باشد. کاهش نسبی وزن مخصوص در نمونه‌های حاوی IRC40 نسبت به IRC50 نشان‌دهنده تفاوت در ترکیب شیمیایی و فازهای تشکیل‌دهنده در سیمان‌های CSA

OPC با مقدار ۴/۷۱٪ بالاترین مقدار را نشان می‌دهد. پس از اعمال سیکل‌های تنش حرارتی، تمامی نمونه‌ها افزایش جذب آب داشتند، اما میزان این افزایش در نمونه‌ها متفاوت بود؛ OPC بیشترین افزایش (۴۱٪) را داشته و مقدار جذب آب آن به ۶/۶۴ رسیده است. این موضوع نشان‌دهنده ضعف ساختاری آن در برابر سیکل‌های حرارتی است. در مقابل، IRC50 همچنان کمترین جذب آب (۴٪) را نشان داده و تنها ۴/۷٪ افزایش داشته که بیانگر ساختار متراکم‌تر و پایداری بالای آن در برابر آسیب‌های ناشی از سیکل‌های حرارتی است. IRC40 نیز با جذب آب ۴/۸٪ پس از سیکل‌های حرارتی، ۵/۷٪ افزایش را نشان می‌دهد. نمونه‌های حاوی ۱۰٪ جایگزینی سیمان‌های CSA عملکردی بین دو حالت داشتند، به‌طوری که افزودن ۱۰٪ IRC50 بهبود نتایج این آزمایش به مقدار ۵٪، و افزودن ۱۰٪ IRC40 بهبود نتایج به مقدار ۴/۸۲٪ را ثبت کرده‌اند، که بیانگر

است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشان‌دهنده تأثیر نوع سیمان و درصد جایگزینی آن بر ریزساختار ملات‌ها پس از قرارگیری در سیکل‌های تنش حرارتی هستند.



شکل ۶. آزمایش XRD [Position [° 2 Theta]، که در این شکل Q بیانگر کوارتز یا  $\text{SiO}_2$ ، C بیانگر کلسیت یا  $\text{CaCO}_3$ ، E بیانگر اترینگایت و P نیز نشان‌دهنده پرتلندیت می‌باشد.

در نمونه حاوی ۱۰۰٪ IRC50، سطحی متراکم با ساختاری همگن‌تر و تخلخل اندک مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده اتصال بین‌ذره‌ای بهتر و کاهش ترک‌های حرارتی است. به نظر می‌رسد حضور بیشتر  $\text{Al}_2\text{O}_3$  در IRC50 سبب تشکیل بیشتر فازهای پایدار اترینگایت و یا گچ در سن اولیه و فازهای پایدارتر در برابر دمای بالا شده که منجر به کاهش آسیب‌پذیری ساختار در برابر تنش حرارتی گردیده‌است. در نمونه IRC40 نیز تخلخل نسبتاً پایینی دیده شد اما نسبت به IRC50 ساختار کمی بازتر و با تعداد بیشتری ریزحفره قابل مشاهده است، که می‌تواند ناشی از نسبت پایین‌تر آلومینا و تفاوت در ترکیب فازی باشد، اگرچه همچنان عملکرد مناسبی در کاهش ترک‌های حرارتی از خود نشان داده است. در مقابل، نمونه OPC (۱۰۰٪ سیمان پرتلند) دارای بیشترین ترک‌ها، ساختار ناپیوسته و حفرات عمیق و متصل به هم است، که بیانگر شکنندگی و ضعف در برابر سیکل‌های حرارتی است؛ ریزساختار آن متخلخل‌تر و حاوی سوزن‌های بلوری احتمالی از نوع هیدروکسید کلسیم است که در اثر دما آسیب‌پذیرتر شده‌اند.

کاهش مقدار  $\text{Al}_2\text{O}_3$  است. افزودن ۱۰٪ از این نوع سیمان‌ها به OPC تغییرات قابل‌توجهی در وزن مخصوص ایجاد نکرده، اما وزن مخصوص نمونه‌های حاوی ۱۰٪ IRC40 اندکی بیشتر از IRC50 ثبت شده که می‌تواند به نحوه تشکیل محصولات هیدراسیون و تغییرات در میزان تراکم ساختار خمیر سخت‌شده مرتبط باشد (Huang و همکاران، ۲۰۲۱)، (Wang و همکاران، ۲۰۲۱). بعد از اعمال سیکل‌های تنش حرارتی، تمامی نمونه‌ها کاهش وزن مخصوص را تجربه کرده‌اند، اما این کاهش در OPC و نمونه‌ی حاوی ۱۰٪ IRC40 محسوس‌تر بوده است که نشان می‌دهد ترکیبات سولفوآلومیناتی در IRC50 مقاومت بهتری در برابر سیکل‌های حرارتی داشته‌اند.

این رفتار می‌تواند به حضور فازهای پایدارتر در دماهای بالا و کاهش تخلخل ناشی از تغییرات حجمی محصولات هیدراسیون مرتبط باشد. این یافته‌ها با خواص سیمان‌های CSA نیز همخوانی دارد، زیرا سیمان‌های با درصد بالای  $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$  معمولاً ساختار متراکم‌تری ایجاد کرده و نسبت به شوک‌های حرارتی پایداری بیشتری دارند، اما به دلیل واکنش‌های خاص فازهای سولفات‌دار، ممکن است در مواجهه با رطوبت و سیکل‌های حرارتی تغییرات حجمی ناگهانی ایجاد کنند که نیازمند بررسی‌های تکمیلی است (Tang و همکاران، ۲۰۱۵).

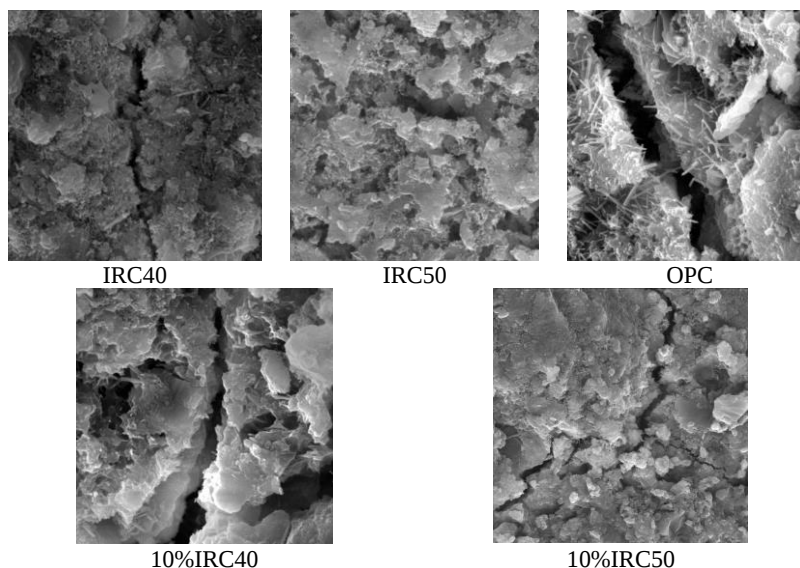
### ۴-۳- آنالیز شیمیایی با XRD

نتایج آزمایش XRD (شکل ۶) نشان می‌دهد که حضور فازهای آلومینا در ترکیبات شیمیایی دو نوع سیمان CSA باعث تشکیل بیشتر اترینگایت شده است که مقاومت فشاری بیشتر در سنین اولیه را توجیه می‌کند. این ترکیب به دلیل حضور بالای  $\text{Al}_2\text{O}_3$  زودتر از فازهای ژلی (که دارای  $\text{CaO}$  و  $\text{SiO}_2$  بیشتری هستند) به گیرش اولیه می‌رسد که اصلی‌ترین دلیل گیرش بتن در ۱ تا ۳ روزگی می‌باشد. از طرفی با توجه به مقادیر کمتر  $\text{SiO}_2$  در ترکیبات شیمیایی دو نوع سیمان CSA، کوارتز کمتری نسبت به سیمان پرتلند تشکیل شده است. به علاوه، حضور کمتر  $\text{CaO}$  نیز منجر به تشکیل کمتر کلسیت در هر دو نوع سیمان CSA شده است. لازم به ذکر است که تشکیل پرتلندیت نیز تابعی مستقیم از حضور  $\text{CaO}$  است که به دلیل کاهش این ترکیب در هر دو نوع سیمان IRC40 و IRC50 کاهش یافته است. حضور ترکیباتی که در سنین اولیه به صورت پایدارتر تشکیل می‌شوند باعث حفظ بهتر پارامترهای دوام در طی سیکل‌های حرارتی شده است (Jahani و همکاران، ۲۰۲۳).

### ۵-۳- بررسی ریزساختار با اسکنر الکترونی روبشی

نتایج آنالیز میکروسکوپی ملات‌های ساخته شده پس از قرارگیری در سیکل تنش حرارتی در شکل ۷ نشان داده شده





شکل ۷- نتایج آزمایش الکترونی روبشی نمونه ملات‌های ساخته شده پس از قرارگیری در سیکل تنش حرارتی

(Tsampali و همکاران، ۲۰۱۹)، (Szeląg و همکاران، ۲۰۲۴)، (Bertola و همکاران، ۲۰۲۰)، (Ansari و همکاران، ۲۰۲۲). همچنین، به دلیل عدم تشکیل مقادیر قابل توجه هیدروکسید کلسیم  $(Ca(OH)_2)$ ، تخلخل کاهش یافته و دوام بتن افزایش می‌یابد. این سیمان در برابر حملات شیمیایی، به‌ویژه محیط‌های سولفات و اسیدی، مقاوم‌تر از سیمان پرتلند است، زیرا خطر تشکیل اترینگایت ثانویه (Aft) و در نتیجه ترک‌خوردگی و انبساط کاهش می‌یابد. علاوه بر این، در دماهای بالا، ترکیبات اولیه هیدراسیون به فازهای کریستالی پایدارتر تبدیل شده و باعث بهبود مقاومت حرارتی بتن می‌شوند، درحالی‌که عدم تولید زیاد  $Ca(OH)_2$  که در دماهای بالا تجزیه شده و موجب کاهش استحکام می‌شود، پایداری بتن را تضمین می‌کند (Ansari و همکاران، ۲۰۲۲)، (Pimraksa و همکاران، ۲۰۱۸)، (Jahani و همکاران، ۲۰۲۲). همچنین، حضور ترکیبات آلومیناتی موجب کاهش تغییرات حجمی و کنترل ترک‌خوردگی ناشی از شوک‌های دمایی می‌شود. در مجموع، سیمان‌های CSA به دلیل رشد سریع مقاومت فشاری، دوام بالا در محیط‌های خورنده، کاهش تغییرات حجمی و بهبود پایداری در دماهای بالا، گزینه‌ای مناسب برای بتن‌های زودگیر، محیط‌های شیمیایی تهاجمی و سازه‌های در معرض حرارت بالا محسوب می‌شوند (Pimraksa و همکاران، ۲۰۱۸).

در طرح‌های ترکیبی (۱۰٪ IRC40 و ۱۰٪ IRC50)، گرچه نسبت به OPC بهبودهایی از نظر کاهش ترک و تخلخل مشاهده می‌شود، اما همچنان ساختارشان به‌طور کامل متراکم نیست و حضور حفرات و ترک‌های بین‌دانه‌ای به چشم می‌خورد. در این میان، نمونه حاوی ۱۰٪ IRC50 نسبت به ۱۰٪ IRC40 ساختار همگن‌تر و ترک‌های باریک‌تری دارد، که نشان‌دهنده تأثیر مثبت حتی درصد کم IRC50 در بهبود پایداری حرارتی است. در مجموع، از منظر ریزساختاری و مقاومت در برابر سیکل‌های تنش حرارتی، ترتیب بهبود به‌صورت  $IRC50 > IRC40 > 10\%IRC50 > OPC$  قابل مشاهده است.

#### ۴- بحث و آنالیز کلی نتایج آزمایش‌ها:

سیمان‌های کلسیم سولفوآلومینات (CSA) به دلیل ترکیبات شیمیایی خاص خود، ویژگی‌هایی مانند گیرش سریع، مقاومت اولیه بالا، دوام شیمیایی و مقاومت حرارتی را ارائه می‌دهند. ترکیبات آلومیناتی مانند آلومینات کلسیم ( $CA$ ،  $CA_2$ ) با واکنش‌پذیری بالا، منجر به تشکیل سریع محصولات هیدراته‌ای مانند  $CAH_{10}$  و  $C_2AH_8$  شده که فضای خمیر سیمان را به‌سرعت متراکم کرده و در نهایت موجب رشد مقاومت اولیه بتن شده‌اند. در مقایسه با سیمان پرتلند، مقاومت فشاری نمونه حاوی سیمان CSA در ۲۴ ساعت اول بسیار سریع‌تر افزایش یافته و با تبدیل فازهای ناپایدار اولیه به کریستال‌های پایدارتر مانند  $C_3AH_6$ ، مقاومت بلندمدت نیز بهبود می‌یابد (Lv و همکاران، ۲۰۲۳).

\* امیرحسین محرر؛ شماره تماس: ۰۹۱۲۸۹۸۷۸۶۳

## ۵- نتیجه‌گیری و پیشنهاد

تحقیق حاضر به بررسی خواص مکانیکی و شیمیایی ملات‌های زودگیر بهینه‌شده با سیمان‌های IRC40 و IRC50 پرتلند طی اعمال سیکل‌های منظم تنش حرارتی پرداخت که نتایج زیر قابل استخراج هستند:

### منابع

- Afroughsabet, V., Biolzi, L., Monteiro, P. J., & Gastaldi, M. M. (2021). Investigation of the mechanical and durability properties of sustainable high performance concrete based on calcium sulfoaluminate cement. *Journal of Building Engineering*, 43, 102656.
- Ansari, W. S., Chang, J., ur Rehman, Z., Nawaz, U., & Junaid, M. F. (2022). A novel approach to improve carbonation resistance of Calcium Sulfoaluminate cement by assimilating fine cement-sand mix. *Construction and Building Materials*, 317, 125598.
- ASTM International. (2019). Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory (ASTM C192/C192M-19). DOI: 10.1520/C0192\_C0192M-19.
- ASTM International. (2020). Standard practice for mechanical mixing of hydraulic cement pastes and mortars of plastic consistency (ASTM C305-20).
- ASTM International. (2021). \*Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens)\* (ASTM C109/C109M-21).
- ASTM International. (2021). Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes (ASTM C511-21).
- ASTM International. (2021). Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete (ASTM C642-21).
- ASTM International. (2022). Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete (ASTM C1602/C1602M-22).
- Bertola, F., Gastaldi, D., Irico, S., Paul, G., & Canonico, F. (2020). Behavior of blends of CSA and Portland cements in high chloride environment. *Construction and Building Materials*, 262, 120852.
- jahani, A., raeesi estabragh, A., jahani, M. and Vakili, G. (2024). Assessment of the effect of Ground Granulated Blast-furnace Slag (GGBS) and activated GGBS on stabilization of a clay soil contaminated with glycerol. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54(11), 1647-1665. doi: 10.22059/ijswr.2023.365905.669583
- Ghosh, D., Ma, Z. J., & Hun, D. (2023). Effect of GGBFS slag on CSA-based ternary binder hydration, and concrete performance. *Construction and Building Materials*, 386, 131554.

۱. افزایش محتوای  $Al_2O_3$  منجر به تقویت خواص مکانیکی اولیه ملات از طریق تسریع فرآیند هیدراتاسیون و تشکیل فازهای سوزنی‌شکل  $CAH_{10}$  و  $C_2AH_8$  و پس از هیدراسیون ثانویه باعث تشکیل و تورم اترینگایت شد که با ایجاد ساختاری متراکم و درهم‌تنیده، مقاومت فشاری در سنجش‌های زود هنگام (۲۴ و ۷۲ ساعت) را بیش از ۲۰٪ نسبت به سیمان پرتلند افزایش داد.
۲. در این تحقیق مشخص شد که در دماهای بالا، سازوکار تبدیل فازهای هیدراته اولیه به فاز پایدارتر  $C_3AH_6$  موجب حفظ ساختار شبکه‌ای ملات شد؛ به‌گونه‌ای که نمونه‌های حاوی سیمان IRC50 تحت سیکل حرارتی تا ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد، افت مقاومت فشاری کمتر از ۵٪ را تجربه کردند. این پایداری حرارتی با جلوگیری از تشکیل و تجزیه  $Ca(OH)_2$  همراه بود که در سیستم‌های پرتلند عامل تخریب ساختاری محسوب می‌شود.
۳. بررسی نتایج جذب آب و تخلخل نشان داد که حضور  $Al_2O_3$  در ملات حاوی ۱۰٪ سیمان IRC50 موجب کاهش تخلخل کل و مقاومت سیمان پرتلند در برابر سیکل‌های حرارتی می‌گردد که به ترتیب تا حدود ۱۵٪ و ۳٪ مشاهده شد. این پارامترها دوام حرارتی ملات را نیز به‌گونه‌ای بهبود بخشید که نمونه‌ها طی سیکل‌های حرارتی متوالی بدون افت چگالی ظاهری قابل‌ملاحظه (تا ۵٪) پایداری خود را حفظ کردند.
۴. بهینه‌سازی ساختار هیدراته در حضور مقادیر بالاتر آلومینا موجب افزایش پایداری بلندمدت ملات ساخته شده با سیمان پرتلند گردید؛ به‌طوری‌که نمونه‌ها طی ۲۸ روز سنجش دوام، رفتار قابل‌توجهی در مهار گسترش ترک‌های موییینه از خود نشان دادند که این پدیده به رشد مجدد فازهای هیدراته و پرشدن منافذ ریز ربط دارد. از منظر کاربردهای صنعتی نیز، فرمولاسیون‌های پرآلومین با محتوای ۱۵ تا ۲۰ درصد  $Al_2O_3$  عملکرد مناسبی در برابر حرارت نشان داده و به‌عنوان گزینه‌ای مطلوب برای پوشش‌های مقاوم به حرارت و اجزای سازه‌ای تحت تنش حرارتی پیشنهاد می‌شوند.

در آخر، برای تکمیل پژوهش و پیشنهاداتی برای محققان آینده، بررسی تأثیر  $Al_2O_3$  بر پارامترهای بلندمدتی مانند انقباض و

- Microstructural Properties of the Magnetized Cement Mortar Incorporating Quartz Grains and Natural Zeolite. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 47(3), 1399-1410.
- Moharrer, A., Gholhaki, M., Rezaeifar, O., & Kheyroddin, A. (2021). Investigation of the Effect of Magnetic Field on the Compressive Strength of Cement Mortar Containing Quartz Aggregate and Zeolite Powder. *Karafan Scientific Quarterly*, 18(Special Issue 1), 151-166. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.132815>.
- Moharrer, A. (2024). Investigating the Effect of Silica Fume Waste Powder of Sand Blasting as Cement Replacement in the Rheological and Mechanical Properties of Concrete. *Karafan Journal*, 21(3), 325-346. doi: 10.48301/kssa.2023.409074.2640
- Najeeb, Z., & Mosaberpanah, M. A. (2023). Mechanical and durability properties of modified high-performance mortar by using cenospheres and nano-silica. *Construction and Building Materials*, 362, 129782.
- Pimraksa, K., & Chindaprasirt, P. (2018). Sulfoaluminate cement-based concrete. In *Eco-efficient repair and rehabilitation of concrete infrastructures* (pp. 355-385). Woodhead Publishing.
- Pooni, J., Robert, D., Giustozzi, F., Setunge, S., Xie, Y. M., & Xia, J. J. T. G. (2021). Performance evaluation of calcium sulfoaluminate as an alternative stabilizer for treatment of weaker subgrades. *Transportation Geotechnics*, 27, 100462.
- Scrivener, K. L., & Nonat, A. (2011). Hydration of cementitious materials, present and future. *Cement and Concrete Research*, 41(7), 651-665.
- Shi, C., Jiménez, A. F., & Palomo, A. (2011). New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 41(7), 750-763.
- Sun, D., Wang, X., Wang, H., Mi, R., Liu, J., Li, J., ... & Wang, W. (2025). Influence of antifreeze, accelerator, and pre-curing on properties and hydration of iron-rich calcium sulfoaluminate cement under cold temperatures. *Construction and Building Materials*, 471, 140728.
- Szeląg, M., Rajczakowska, M., Rumiński, P., Franus, W., & Cwirzen, A. (2024). Macro- and microstructural evolution of cement paste modified with MWCNTs under thermal shock conditions. *Journal of Building Engineering*, 93, 109919.
- Tang, S. W., Zhu, H. G., Li, Z. J., Chen, E., & Shao, H. Y. (2015). Hydration stage identification and phase transformation of calcium sulfoaluminate cement at early age. *Construction and Building Materials*, 75, 11-18.
- Tsampali, E., Tsardaka, E. C., Pavlidou, E., Paraskevopoulos, K. M., & Stefanidou, M. (2019). Comparative study of the properties of cement pastes modified with nano-silica and nano-alumina. *Solid State Phenomena*, 286, 133-144.
- Ghosh, S. K., & Cleland, N. M. (2012). Performance of precast concrete building structures. *Earthquake Spectra*, 28(1\_suppl1), 349-384.
- Guo, C., & Wang, R. (2022). Influence of calcium sulfoaluminate cement on early-age properties and microstructure of Portland cement with hydroxypropyl methyl cellulose and superplasticizer. *Journal of Building Engineering*, 45, 103470.
- Huang, G., Pudasainee, D., Gupta, R., & Liu, W. V. (2021). Thermal properties of calcium sulfoaluminate cement-based mortars incorporated with expanded perlite cured at cold temperatures. *Construction and Building Materials*, 274, 122082.
- Jahani, M., Moradi, S., & Shahnoori, S. (2023). 4-year monitoring of degradation mechanisms of seawater sea-sand concrete exposed to tidal conditions: development of chemical composition and micro-performance. *Construction and Building Materials*, 409, 133475.
- Jahani, M., Shahnoori, S., Moradi, S., & Ershadi, C. (2022). Cleaner production towards a green concrete: Multi-scale experimental study on long-term performance of a sustainable modified-SWSSC. *American Journal of Construction and Building Materials*, 6(1), 43-59.
- Jahani, M., Shahnoori, S., Moradi, S., Yazdani, M., & Ershadi, C. (2023). Effect of tidal conditions, supplementary cementitious materials and marine's materials on some of concrete durability parameters. *Ferdowsi Civil Engineering*, 36(3), 63-82. doi: 10.22067/jfcei.2023.83067.1239 (in Persian).
- Juenger, M. C. G., Winnefeld, F., Provis, J. L., & Ideker, J. H. (2011). Advances in alternative cementitious binders. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1232-1243.
- Li, P., Gao, X., Wang, K., Tam, V. W., & Li, W. (2020). Hydration mechanism and early frost resistance of calcium sulfoaluminate cement concrete. *Construction and Building Materials*, 239, 117862.
- Lv, L., Luo, S., Šavija, B., Zhang, H., Li, L., Ueda, T., & Xing, F. (2023). Effect of particle size distribution on the pre-hydration, hydration kinetics, and mechanical properties of calcium sulfoaluminate cement. *Construction and Building Materials*, 398, 132497.
- Ma, J., Wang, H., Yu, Z., Shi, H., Wu, Q., & Shen, X. (2023). A systematic review on durability of calcium sulphoaluminate cement-based materials in chloride environment. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 12\*(6), 687-698.
- Moharrer, A.M., Ghaedian, D., Eftekhari, M. H., Investigating the Effects of Substituting Non-fired Black Soil Waste for Cement on the Mechanical and Flubility Properties of Concrete, (2023), *Iraninan Concrete Society* 8(1), 176-193. doi: 10.30478/jcsm.2023.419013.1345.
- Moharrer, A., Gholhaki, M., Rezaifar, O., & Kheyroddin, A. (2023). Study on Mechanical and

- Wang, J., Zhang, R., Luo, Q., Lu, L., Zhang, F., Fu, Q., ... & Xing, F. (2024). Influence of hybrid steel-polyacrylonitrile fibers on the mechanical toughness and freeze-thaw resistance of sulfoaluminate cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 148, 105489.
- Wang, P., Li, N., & Xu, L. (2017). Hydration evolution and compressive strength of calcium sulphoaluminate cement constantly cured over the temperature range of 0 to 80°C. *Cement and Concrete Research*, 100, 203-213.
- Wang, S., Lang, L., Liu, Z., & Pu, S. (2024). Hardening properties, water resistance and associated micro-mechanism of nano-modified calcium sulphoaluminate cement. *Case Studies in Construction Materials*, 21, e03969.
- Zhang, J., Ye, C., Tan, H., & Liu, X. (2020). Potential application of Portland cement-sulfoaluminate cement system in precast concrete cured under ambient temperature. *Construction and Building Materials*, 251, 118869.
- Zhang, Y., Zhao, Q., Gao, Z., & Chang, J. (2021). Nanostructural evolution of  $\text{Al}(\text{OH})_3$  gel formed by the cubic and orthorhombic ye'elimite clinkers of calcium sulfoaluminate cements in an ultra-wide hydration temperature range. *Cement and Concrete Research*, 150, 106607.