

EXTENDED ABSTRACT

Experimental Investigation of the Thermo-Mechanical and Chemical Behavior of Mixed Portland Cement-Calcium Sulfoaluminate Mortar under Thermal Cycles

Amirhossein Moharrer^{a,*}, Fattah Peiravian^b, Mohammad Jahani^c

^a Assistant Professor Department of Civil Engineering Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran, Concrete & Composite Unit Consultant, Shiraz-Eskan Precast Concrete Technology Factory

^b Ph.D. in Civil Engineering, Chairman of the Board, Shiraz-Eskan Precast Concrete Technology Factory and Shiraz-Mohandesi-Sazan Company

^c M.Sc. in Civil Engineering, University of Hormozgan, Concrete & Composite Senior Specialist, Shiraz-Eskan Precast Concrete Technology Factory

Keywords: Calcium sulfoaluminate cement, Mechanical properties, Thermal stress, Chemical analysis, Rapid-setting mortar.

1. Introduction

The development of rapid-setting cementitious materials is pivotal for modern construction, particularly in precast concrete technology. Calcium sulfoaluminate (CSA) cements have gained attention due to their accelerated hydration kinetics, enabling earlier initial and final setting compared to ordinary Portland cement (OPC). This study investigates the mechanical and chemical behavior of Portland-CSA blended mortars under thermal cycling, addressing the need for durable, high-performance materials in thermally fluctuating environments. CSA cements, characterized by high alumina (Al_2O_3) and sulfoaluminate phases, promote rapid strength development via the formation of ettringite (AFt) and stable hydrates. However, their long-term stability under thermal stress remains underexplored. This research evaluates two CSA types (IRC40, IRC50) blended with OPC, focusing on compressive strength evolution, thermal resistance, and phase composition. By analyzing performance before and after 24 thermal cycles (up to 110°C), the study aims to optimize CSA-OPC synergies for precast applications, balancing economic feasibility with enhanced durability.

2. Methodology

Mortar samples (5cm³ cubes) were prepared using OPC Type II, CSA cements IRC40 and IRC50, Ottawa sand, and potable water. Mix designs included 100% OPC, 100% CSA, and 10% CSA-90% OPC blends. Specimens were steam-cured at 60°C for 6 hours, water-cured, and subjected to thermal cycling (24 cycles: heating to 110°C, cooling to ambient). Compressive strength was tested at 1, 3, 7, and 28 days. Water absorption, specific gravity, and XRD analysis were conducted post-curing and post-thermal exposure. Chemical compositions of cements were analyzed via XRF (Table 2). Testing adhered to ASTM C109, C642, and C511.

3. Results and discussion

The enhanced mechanical and thermal performance of IRC50 cement is primarily due to its unique chemical composition and hydration behavior. Containing 49-53% Al_2O_3 , IRC50 facilitates rapid ettringite (AFt) formation through reactions between calcium sulfoaluminate ($\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$), water, and gypsum. This leads to a dense, interlocked microstructure that boosts early strength-IRC50 achieves 17MPa at 1 day compared to OPC's 13.2MPa. In contrast, OPC's strength depends on slower-forming C-S-H gels.

IRC50's lower CaO content (36-39% vs. OPC's 64.38%) reduces portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) formation. Since portlandite decomposes above 400°C , causing shrinkage and microcracking, its minimization improves thermal stability. IRC50 retains 45% more strength after thermal exposure (24.6MPa vs. OPC's 16.9MPa). Water absorption after thermal cycling increased by only 4.7% in IRC50, while OPC showed a 41% rise to 6.64%, indicating more severe microcracking in OPC.

XRD analysis confirmed the persistence of ettringite and low carbonation in IRC50 post-cycling, reflecting its structural integrity. These findings align with studies highlighting CSA cement's thermal shock resistance due to phase-stable hydrates.

IRC40, while superior to OPC, exhibited intermediate performance due to lower Al_2O_3 ($\geq 35\%$) and higher residual CaO, leading to less ettringite and more porosity under heat stress. Blended systems (10% CSA in OPC) showed a practical compromise-IRC50 blends retained 14.3% of early strength gain, versus 9% in IRC40 blends. Despite CSA's high cost (up to $10\times$ OPC), even partial substitution improved hydration kinetics and thermal resilience. IRC50 blends also showed less post-thermal strength loss (9.3%) than IRC40 (7.4%), making them more suitable for thermally stressed precast applications.

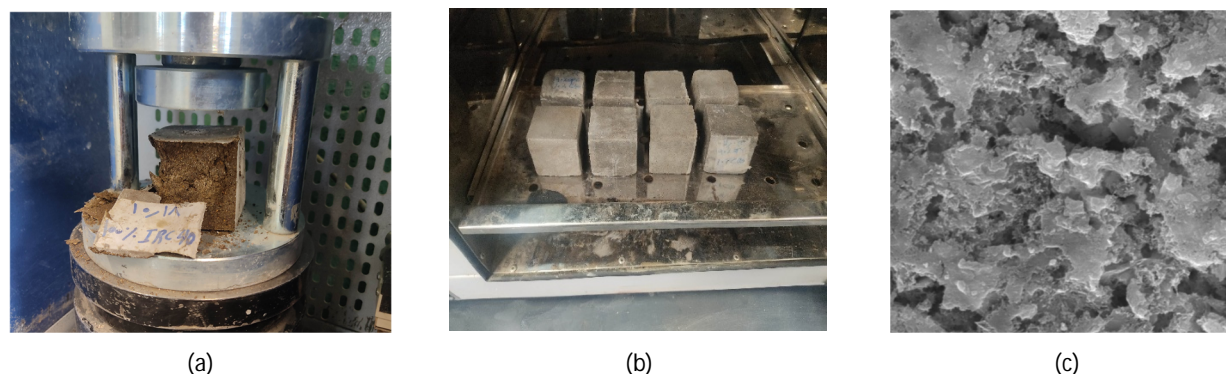


Fig. 1. a) Compressive strength testing of mortar made with calcium sulfoaluminate cement, **b)** Application of thermal cycles on samples made with a blend of calcium sulfoaluminate and Portland cements, **c)** Microstructure of the cement paste made with calcium sulfoaluminate cement after exposure to thermal stress

4. Conclusions

The findings of this study demonstrate that calcium sulfoaluminate (CSA) cements, particularly IRC50, exhibit superior early-age compressive strength and thermal stability compared to ordinary Portland cement (OPC), owing to their high alumina content ($\text{Al}_2\text{O}_3 \approx 50\%$) and rapid ettringite (AFt) formation during hydration. IRC50 achieved a 29% higher 1-day compressive strength (17MPa vs. OPC's 13.2MPa), attributed to the dense microstructure formed by interlocking ettringite crystals. The reduced CaO content in IRC50 minimized portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) formation, limiting thermal degradation and yielding 45% greater post-thermal strength retention (24.6MPa vs. OPC's 16.9MPa). Blending 10% IRC50 with OPC optimized cost-performance ratios, enhancing compressive strength by 14.3% and reducing water absorption by 4.7% after thermal cycling, making it viable for industrial applications. Chemical analyses via XRD confirmed that ettringite remained stable even after exposure to 110°C , underscoring its role in mechanical resilience. In contrast, OPC's reliance on C-S-H gels and portlandite increased vulnerability to thermal shock. However, challenges persist, including CSA's high production costs and the need for long-term studies on creep and shrinkage behavior. In summary, CSA-OPC blends offer a promising solution for precast concrete, enabling rapid formwork removal, energy efficiency, and durability in thermal environments. To advance industrial adoption, future research should focus on chemical additives (e.g., lithium carbonate) and lifecycle assessments (LCAs) to quantify environmental benefits, ensuring alignment with sustainable construction practices.

بررسی آزمایشگاهی رفتار مکانیکی - شیمیایی ترکیب سیمان پرتلند و کلسیم سولفوآلومینا تحت سیکل های حرارتی

امیرحسین محرر^{1*}، فتاح پیرویان²، محمد جهانی³

¹ استادیار عمران و معماری، دانشگاه ملی مهارت تهران/ مشاور واحد بتن و کامپوزیت کارخانه فناوری پیش ساخته شیراز اسکان، شیراز
² دانشجوی دکتری عمران، دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب/ رئیس هیئت مدیره کارخانه فناوری بتن پیش ساخته شیراز اسکان و شرکت مهندسی سازان، شیراز
³ کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس/ کارشناس ارشد بتن و کامپوزیت کارخانه فناوری پیش ساخته شیراز اسکان، شیراز

چکیده

توسعه بتن های زودگیر و اقتصادی، به ویژه در فناوری تولید قطعات پیش ساخته، در سال های اخیر توجه بسیاری از پژوهشگران حوزه ساخت و ساز را به خود جلب کرده است. در این مطالعه، از دو نوع سیمان کلسیم سولفوآلومینات IRC40 و IRC50 برای ساخت ملات های سیمانی استفاده شد و خواص مکانیکی، ترکیب شیمیایی و ریزساختار این مواد در ترکیب با سیمان پرتلند، پیش و پس از اعمال 24 سیکل شوک حرارتی، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد تشکیل فازهای پایدار و مقاومی چون اترینگایت (Ettringite) و آلومینات (Aluminate) در سنین اولیه، نقش کلیدی در افزایش مقاومت فشاری این سیمان ها نسبت به سیمان پرتلند دارد. مقاومت فشاری یک روزه سیمان های IRC40 و IRC50 به ترتیب 29% و 18% بیش تر از سیمان پرتلند به دست آمد. همچنین، با افزودن 10% وزنی از این سیمان ها به سیمان پرتلند، مقاومت فشاری آن به ترتیب به 14/3% و 9% افزایش یافت. از نظر پایداری حرارتی، IRC40 و IRC50 به دلیل محتوای پایین تر CaO عملکرد بهتری از خود نشان دادند؛ به طوری که پس از اعمال شوک حرارتی، مقاومت فشاری آن ها به ترتیب 45% و 26% بیش تر از نمونه پرتلند ثبت شد. در ترکیب های دوگانه، افزودن IRC50 موجب بهبود 9/3% و افزودن IRC40 باعث افت 7/4% 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 متراکم ترین فازها باقی مانده اند و با حفظ ساختار متراکم خمیر سیمانی، به کاهش ترک های حرارتی، کاهش جذب آب، بهبود وزن مخصوص و افزایش مقاومت فشاری نسبت به خمیر سیمان پرتلند منجر شده اند.

کلیدواژه ها: سیمان کلسیم سولفوآلومینا، خواص مکانیکی، تنش حرارتی، آنالیز شیمیایی، ملات زودگیر.

1- مقدمه

در فواصل زمانی کوتاه تری نیاز دارند، از اهمیت ویژه ای برخوردار است (Gosh و همکاران، 2012). از طرفی، در حوزه ساخت و ساز مدرن، سرعت اجرا، کاهش هزینه ها و بهبود دوام سازه ها از جمله اولویت های اساسی به شمار می روند (Jahani و همکاران، 2023). استفاده از سیمان کلسیم سولفوآلومینا (CSA)¹ در بتن، به ویژه در تولید قطعات پیش ساخته، به دلیل سرعت بالای گیرش و کسب مقاومت اولیه، کاهش زمان عمل آوری و افزایش دوام سازه ها اهمیت زیادی دارد. این نوع سیمان امکان باز کردن سریع قالب ها² را فراهم کرده و چرخه تولید را بهینه می کند، که در نهایت منجر به

بتن به عنوان یکی از پرکاربردترین مصالح در صنعت ساخت و ساز، به دلیل ویژگی های خاص خود، در طیف وسیعی از پروژه های ساخت و ساز عمرانی از جمله سازه های پیش ساخته به کار می رود (Moharrer و همکاران، 2023؛ Moharrer و همکاران، 2021). در این زمینه، یکی از چالش های اصلی در استفاده از بتن های پیش ساخته، تسریع در فرآیند هیدراتاسیون سیمان و افزایش مقاومت فشاری اولیه بتن است. نیاز به این ویژگی به ویژه در پروژه هایی که به قالب برداری سریع و یا استفاده از بتن

2. Demolding

1. Calcium Sulfo-Alumina



در آن به کمتر از 3% می‌رسد، درحالی‌که در بتن‌های معمولی هفته‌ها طول می‌کشد تا رطوبتشان به این حد برسد (Ghosh و همکاران، 2023). 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 ببوشانیم. از طرفی، حضور آلومینا در تسریع گیرش اولیه سیمان، یک ترکیب بسیار ضروری به‌شمار می‌رود که می‌تواند گیرش اولیه و سخت‌شدگی بتن را تا حد بسیار زیادی تحت تأثیر قرار دهد. اما از طرفی، فازهای Aft³ در بلندمدت فازهای پایدار و متراکمی به‌شمار نمی‌روند و بافت متراکم و وزن مخصوص بافت‌های ژلی را تحت تأثیر قرار می‌دهند و در کل برای ماندگاری در بلندمدت توصیه نمی‌گردد. با توجه به موارد گفته‌شده، خواص مکانیکی بتن ساخته‌شده از این نوع سیمان در بلندمدت نیاز به تثبیت و اطمینان‌سازی دارد (Ma و همکاران، 2023). با این حال مهم‌ترین مسئله در استفاده از این نوع سیمان، قیمت بالای آن است که در برخی موارد تا 10 برابر سیمان پرتلند تیپ دو ارزش‌گذاری 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 بهینه‌سازی اقتصادی، امکان‌سنجی کاربرد این ترکیب در شرایط سیکل‌های 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 ملات‌های ترکیبی تحت تنش‌های حرارتی واقعی و همچنین ارزیابی هزینه-فایده اقتصادی آن نهفته است.

این تحقیق از چند جهت با مطالعات پیشین متمایز است: اولاً، برخلاف پژوهش‌های گذشته که عمدتاً خواص سیمان‌های CSA را به‌صورت منفرد یا تحت شرایط ثابت بررسی کرده‌اند، در این مطالعه ترکیب‌های بهینه‌شده سیمان پرتلند و دو نوع سیمان CSA در معرض سیکل‌های حرارتی متناوب قرار گرفته‌اند تا پایداری واقعی در شرایط دمایی متغیر سنجیده و ترکیبات شیمیایی و ریزساختار مکانیکی این ترکیبات ارزیابی شود. ثانیاً، درحالی‌که اغلب مطالعات صرفاً پارامترهای مقاومت مکانیکی یا راندمان زودرس گیرش را گزارش کرده‌اند، این پژوهش به‌صورت هم‌زمان رفتار مکانیکی و روند تحولات شیمیایی و ریزساختاری را تحلیل می‌کند. ثالثاً، برخلاف پژوهش‌های قبلی که کمتر به 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

کاهش هزینه‌های نیروی کار و تجهیزات می‌شود (Afroughsabet و همکاران، 2021). در همین راستا، فناوری بتن پیش‌ساخته به‌دلیل این ویژگی‌ها می‌تواند یک انتخاب هوشمندانه برای پروژه‌های با مقیاس بزرگ و حجیم باشد که در چارچوب اهداف اقتصادی، فنی و زمانی، عملکرد بهینه و ماندگاری بالایی ارائه دهد. به‌علاوه، این عوامل در پروژه‌های صنعتی و زیرساختی موجب کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از حمل‌ونقل مصالح، کاهش استفاده از انرژی و افزایش بازدهی کلی پروژه‌ها می‌شود. یکی از چالش‌های اساسی در این زمینه، مدت‌زمان طولانی لازم برای کسب مقاومت و گیرش در بتن‌های معمولی مبتنی بر سیمان پرتلند است که می‌تواند باعث افزایش زمان توقف و هزینه‌های جانبی در پروژه‌های زیرساختی شود که این موضوع می‌بایست با برنامه‌های مبتنی بر روش‌های علمی و آزمایشگاهی توسعه داده شود (Jahani و همکاران، 2023؛ Pooni و همکاران، 2021؛ Guo و همکاران، 2022).

استفاده از CSA به‌عنوان ماده‌ای برای تولید بتن می‌تواند مصرف انرژی را تا 25% و انتشار دی‌اکسیدکربن را نیز تا 40% کاهش دهد (Jahani و همکاران، 2023). به‌طورکلی، زمان گیرش ملات‌های حاوی سیمان‌های CSA (بدون افزودنی‌ها) سریع‌تر از بتن‌های مبتنی بر سیمان پرتلند معمولی است. خواص این بتن 24 ساعت پس از اجرا، معادل خواصی است که در بتن معمولی بعد از 28 روز به دست می‌آید (Guo و همکاران، 2022). بتن ساخته‌شده از این نوع سیمان در درجات حرارت بالا نیز مقاومت مکانیکی خود را حفظ می‌نماید و برخلاف سیمان معمولی، مقاومت خوبی در برابر شوک حرارتی و متلاشی شدن از خود نشان می‌دهد. به این دلیل، در صنعت نسوز برای تولید جرم‌های سبک (عایق) و سنگین نسوز کاربرد دارد (Zhang و همکاران، 2021؛ Scrivener و همکاران، 2011؛ Wang و همکاران، 2024).

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 می‌گردد (Jahani و همکاران، 2023). این ترکیب می‌تواند در دکامپوزیشن فازهای اولیه و تبدیل به زیر فازهای ثانویه، در صورت حضور نسبی سولفات‌ها به ترکیبات شیمیایی با تخلخل‌های متفاوت با ترکیبات پایه گچ، مانند اترینگایت تبدیل گردد. البته لازم به‌ذکر است که اترینگایت با انبساط محدود باعث جبران انقباض ملات و کنترل تغییرات سایز آن می‌شود (Juenger و همکاران، 2011).

سرعت هیدراسیون و واکنش‌پذیری بالای CSA شرایطی را به وجود می‌آورد که در مدت کمتر از 48 ساعت، رطوبت باقی‌مانده

سیمان‌های 10٪ وزن کل مصالح سیمانی بود که به نحوی ارزیابی بهینه‌سازی اقتصادی طرح نیز انجام گرفت. نمونه‌ها پس از گذشت 24 ساعت از قالب خارج و بلافاصله در حوضچه قرار داده شدند. ترکیبات شیمیایی سیمان‌های مصرفی نیز در جدول (2) آورده شده است.

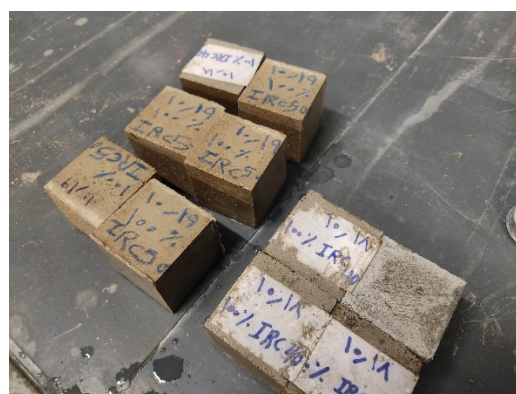
جدول 1- جزئیات مصالح ملات‌های ساخته شده در این تحقیق

W/C	ماسه اتاوا	IRC50 (%)	IRC40 (%)	سیمان پرتلند تیپ 2 (%)	ردیف
0/485	2/75 برابر وزن سیمان			100	1
0/485	2/75 برابر وزن سیمان		100		2
0/485	2/75 برابر وزن سیمان	100			3
0/485	2/75 برابر وزن سیمان		10	90	4
0/485	2/75 برابر وزن سیمان	10		90	5

ماسه اتاوا⁴ یک ماسه استاندارد متشکل از کوارتز با دانه‌بندی یکنواخت (0/3 تا 0/6 میلی‌متر) است که مطابق استاندارد ASTM C788 به‌عنوان 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 1-2/75 به ماسه اتاوا و نسبت آب به سیمان 0/485 مطابق ASTM C305 تهیه شد.

فرآیندهای اختلاط، تراکم و عمل‌آوری نمونه‌ها نیز براساس موارد و نکات ارائه شده در استاندارد ASTM C109 انجام گرفت. به‌طور کلی استفاده از این ماسه تضمین می‌کند که نتایج به‌دست آمده عاری از تأثیرات متغیرهای ناخواسته (مانند ناهمگنی ذرات، حضور فوق‌روان‌کننده و سایر افزودنی‌ها) بوده و حتی قابلیت تکرارپذیری آزمایش‌ها را نیز افزایش می‌دهد. شکل (1) نمونه‌های مکعبی تولید شده حاوی ماسه اتاوا را نشان می‌دهد.

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.



شکل 1- نمونه‌گیری در قالب‌های مکعبی 5 سانتی‌متری

2- مواد و روش‌ها

2-1- مواد مصرفی و طرح‌ها

در این تحقیق تمامی نمونه‌ها در قالب مکعبی 5 سانتی‌متری، با استفاده از سیمان پرتلند تیپ 2 کارخانه سیمان فارس نو و دو نوع سیمان CSA با اسامی IRC50 و IRC40 ساخته شدند که جزئیات مصالح مورد استفاده در هر طرح در جدول (1) ارائه شده است. تمامی نمونه‌ها بلافاصله پس از ساخت به مدت شش ساعت در یک محیط ایزوله تحت بخار آب تا رسیدن به دمای 60 درجه نگهداری شدند. به‌منظور جلوگیری از ایجاد شوک و اعمال تنش حرارتی به بتن، تغییرات دما برای رسیدن به ماکزیمم 65 درجه سانتی‌گراد، در گام‌های 20 درجه در هر ساعت مطابق با ASTM C511 و ASTM C192 بوده است. پس از گذشت 6 ساعت عمل‌آوری در محیط بخار، نمونه‌ها در حوضچه آب قرار داده شدند تا در ادامه به سن مورد نظر رسیده و آزمایش‌های مدنظر بر روی آن‌ها انجام گردند. مقادیر جایگزینی به دلیل قیمت بالای این

4. Ottawa sand

جدول 2- ترکیبات شیمیایی سیمان‌های مصرفی

	CaO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Ti ₂ 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 2- تست مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده و قرارگیری آن‌ها در آون و قرارگیری در سیکل تنش حرارتی

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.

2-2-2- تعیین درصد جذب آب کل

این آزمون مطابق استاندارد ASTM C642 برای سنجش میزان جذب آب کل نمونه انجام شد. ابتدا نمونه مکعبی 5 سانتی‌متری پس از خشک‌شدن در آون (دمای 110 درجه سانتی‌گراد به مدت 24 ساعت) تا رسیدن به جرم ثابت، وزن می‌شود. سپس نمونه به مدت 24 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 100 محاسبه می‌گردد. پس از اعمال 24 سیکل حرارتی (تا 110 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 7٪ پس از حرارت‌دهی، هشداردهنده کاهش عملکرد بتن محسوب می‌شود.

در این پژوهش، آب شرب شهر شیراز به‌عنوان 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 7 تا 8/5، میزان کلرید کمتر از 500 ppm و سولفات کمتر از 1000 ppm است که همگی در محدوده مجاز استانداردهای بین‌المللی قرار دارند. لازم به‌ذکر 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 به‌علاوه، این استاندارد تأکید می‌کند که آب آشامیدنی شهری در صورت نداشتن ناخالصی‌های مضر، به‌طور پیش‌فرض برای بتن قابل استفاده است.

2-2- روش تحقیق و آزمایش‌ها

2-2-1- مقاومت فشاری

آزمون مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی 5 سانتی‌متری در سنین 1، 3، 7 و 28 روزه پس از عمل‌آوری در شرایط کنترل شده (دمای 23±2° و رطوبت نسبی حداقل 95%) انجام گردید. پس از تکمیل مراحل عمل‌آوری، نمونه‌ها تحت 24 سیکل حرارتی در آون قرار گرفتند که در هر سیکل، دما تا 110° سانتی‌گراد افزایش یافته و فیکس شده و سپس به دمای محیط بازگردانده شدند.

2-2-3- تعیین وزن مخصوص

برای محاسبه وزن مخصوص بتن در نمونه‌های مکعبی 5 سانتی‌متری، ابتدا نمونه پس از عمل‌آوری در شرایط استاندارد (دمای 23 درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی 95%)، به مدت 24 ساعت در آون با دمای 110 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 24 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 24 سیکل حرارتی (افزایش دمای نمونه تا 110 درجه سانتی‌گراد و سپس کاهش دما و خنک‌سازی تا رسیدن به دمای محیط)، نمونه مکعبی 5 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.

2-2-4- آنالیز شیمیایی (XRD)⁵

این آنالیز بر روی نمونه‌های 28 روزه پس از اعمال تنش حرارتی انجام گردید تا ترکیبات شیمیایی تشکیل شده طی یک فاز هیدراتسیون کامل مشخص گردد تا شواهد و توجیح دقیق‌تری برای نتایج مقاومت فشاری و سایر آزمایش‌های مکانیکی باشد. این تست در شرایط استاندارد آزمایشگاهی با زاویه تابش $\text{Cu Ka}=1.540$ آنگستروم انجام شد. این آزمایش علاوه بر شناسایی میزان کوارتز و کلسیم هیدروکسید، به‌طور خاص برای شناسایی پیک اترینگایت انجام شد تا با توجه به آن میزان حضور آن دلیل تغییرات خواص مکانیکی زود هنگام مشخص گردد.

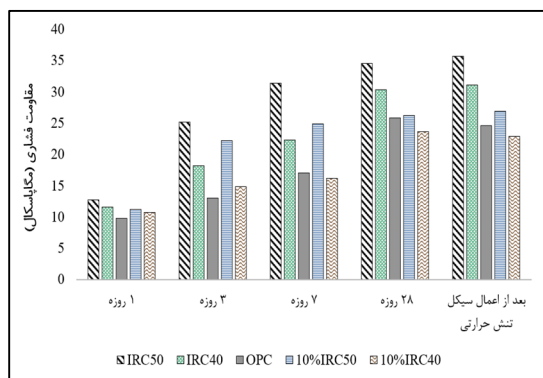
2-2-5- بررسی ریزساختار با اسکنر الکترونی روبشی (SEM)⁶

این آزمایش به‌منظور 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.

3- نتایج

3-1- مقاومت فشاری

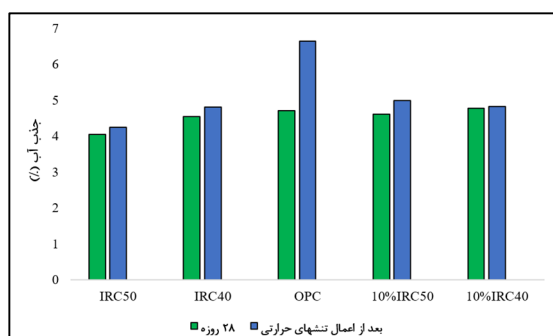
نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها در شکل (3) ارائه شده است. نتایج مقاومت فشاری حاکی از گیرش سریعتر سیمان‌های CSA نسبت به سیمان پرتلند بوده است. این موضوع به‌دلیل گیرش سریع‌تر ترکیبات موجود در این دو نوع سیمان بوده که ذاتاً زودتر به گیرش اولیه می‌رسند. سیمان پرآلومین به‌دلیل دارا بودن درصد بالایی از ترکیبات آلومینات کلسیم (نظیر CA و CA_2)، که به‌سرعت با آب وارد واکنش می‌شوند، گیرش اولیه سریعی از خود نشان می‌دهد (Jahani و همکاران، 2023؛ Najeeb و همکاران، 2023). مکانیسم این فرایند مبتنی بر واکنش هیدراتاسیون آلومینات کلسیم است که منجر به تشکیل فازهای هیدراته مانند CAH_{10} (ده هیدرات) و C_2AH_8 (هشت هیدرات) می‌شود. این ترکیبات هیدراته به‌شکل 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.



شکل 3- نتایج آزمون مقاومت فشاری بر روی نمونه‌ها

3-2- جذب آب کل

نتایج جذب آب نمونه‌ها در سن 28 روزگی و پس از اعمال تنش حرارتی در شکل (4) آورده شده است. نتایج بررسی میزان جذب آب نشان می‌دهد که نمونه حاوی IRC50 کمترین مقدار جذب آب را در سن 28 روزه (4٪) داشته که 14٪ کمتر از OPC و 10٪ کمتر از IRC40 است، در حالی که OPC با مقدار 4/71 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 (41٪) را داشته و مقدار جذب آب آن به 6/64٪ رسیده است. این موضوع نشان‌دهنده ضعف ساختاری آن در برابر سیکل‌های حرارتی است. در مقابل، IRC50 همچنان کمترین جذب آب (4٪) را نشان داده و تنها 4/7٪ افزایش داشته که بیانگر ساختار متراکم‌تر و پایداری بالای آن در برابر آسیب‌های ناشی از سیکل‌های حرارتی است. IRC40 نیز با جذب آب 4/8٪ پس از سیکل‌های حرارتی، 5/7٪ افزایش را نشان می‌دهد.



شکل 4- نتایج آزمون جذب آب کل نمونه‌ها

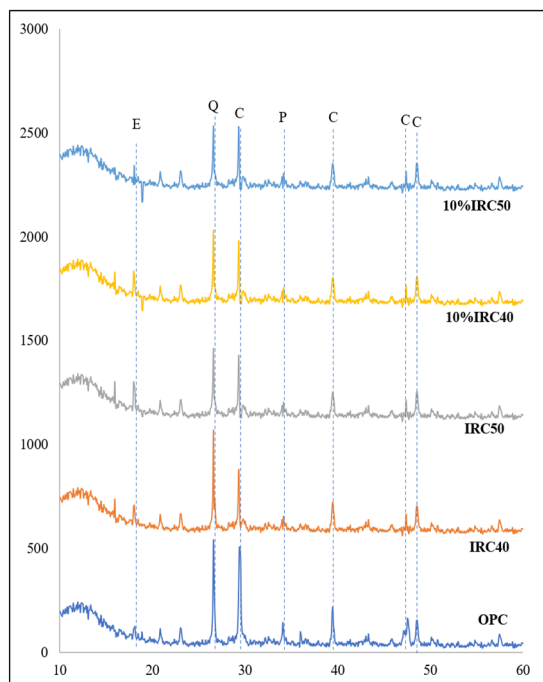
نمونه‌های حاوی 10٪ جایگزینی سیمان‌های CSA عملکردی بین دو حالت داشتند، به طوری که افزودن 10٪ IRC50 بهبود نتایج این آزمایش به مقدار 5٪ و افزودن 10٪ IRC40 بهبود نتایج به مقدار 82٪/4 را ثبت کرده‌اند، که بیانگر تأثیر مثبت این سیمان‌ها در کاهش جذب آب است. در مجموع، IRC50 بهترین عملکرد را در کاهش جذب آب و پایداری در برابر سیکل‌های حرارتی داشته، در حالی که OPC بیشترین تخلخل و کاهش دوام را نشان داده است.

3-3- وزن مخصوص

نتایج آزمایش وزن مخصوص در شکل (5) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که وزن مخصوص نمونه‌های حاوی IRC50 در تمامی سنین آزمایش، کمی بالاتر از سایر نمونه‌ها بوده و مقدار آن تا سن 28 روزگی تغییرات اندکی داشته است.

این ویژگی، سیمان پرتلند را به گزینه‌ای ایده‌آل برای کاربردهای نیازمند مقاومت فوری تبدیل می‌کند (Zhang و همکاران، 2023؛ Li و همکاران، 2020).

مطالعه بر روی مقاومت فشاری ملات‌های ساخته شده 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. در سن 1 روزه، مقاومت فشاری IRC50 به 17 مگاپاسکال رسید که 9/5٪ و 29٪ به ترتیب بالاتر از IRC40 و OPC است، که ناشی از مکانیسم هیدراتاسیون سریع‌تر و تشکیل فازهای اولیه پایدارتر مانند اترینگایت در این سیمان می‌باشد. این روند در سنین میان‌مدت نیز ادامه یافت، به طوری که در سه روزگی، مقاومت IRC50 نسبت به OPC حدود دو برابر (94٪ افزایش) و در 7 روزگی 84٪ بیشتر بود. با رسیدن به سن 28 روزه، اگرچه اختلاف مقاومت بین IRC50 و IRC40 به 14٪ کاهش یافت، اما IRC50 همچنان با 34/5 مگاپاسکال، برتری 34٪ خود نسبت به OPC را حفظ کرد. تحت تأثیر سیکل‌های تنش حرارتی، پایداری IRC50 با 45٪ مقاومت بیشتر نسبت به OPC و 15٪ نسبت به IRC40 تأیید شد، در حالی که OPC با مقاومت فشاری 24/6 مگاپاسکالی، آسیب‌پذیری بالایی نسبت به تنش حرارتی نشان داد. نمونه‌های ترکیبی حاوی 10٪ IRC50 نیز عملکردی بینابینی داشتند و پس از تنش حرارتی، 8/5٪ مقاومت بیشتری نسبت به نمونه‌های حاوی 10٪ 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 میکروتکرک‌های ناشی از انبساط حرارتی است. بنابراین، 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 10٪ IRC50 می‌تواند به‌عنوان راهکاری اقتصادی برای ارتقای عملکرد ملات‌های مبتنی بر OPC مورد توجه قرار گیرد (Shi و همکاران، 2011؛ Wang و همکاران، 2017؛ Sun و همکاران، 2025). نتایج بررسی میزان جذب آب نشان می‌دهد که نمونه حاوی IRC50 کمترین مقدار جذب آب را در سن 28 روزه (4٪) داشته که 14٪ کمتر از OPC و 10٪ کمتر از IRC40 است، در حالی که OPC با مقدار 4/71 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 41٪) را داشته و مقدار جذب آب آن به 6/64٪ رسیده است.

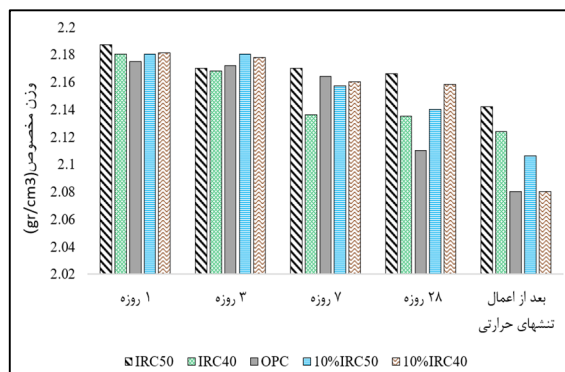


شکل 6- آزمایش XRD [Position [°2 Theta]]، که در این شکل Q بیانگر کوارتز یا SiO_2 ، C بیانگر کلسیت یا CaCO_3 ، E بیانگر اترینگایت و P نیز نشان‌دهنده پرتلندیته می‌باشد

این ترکیب به دلیل حضور بالای Al_2O_3 زودتر از فازهای ژلی (که دارای CaO و SiO_2 بیشتری هستند) به گیرش اولیه می‌رسد که اصلی‌ترین دلیل گیرش بتن در 1 تا 3 روزگی می‌باشد. از طرفی با توجه به مقادیر کمتر SiO_2 در ترکیبات شیمیایی دو نوع سیمان CSA، کوارتز کمتری نسبت به سیمان پرتلند تشکیل شده است. به‌علاوه، حضور کمتر CaO نیز منجر به تشکیل کمتر کلسیت در هر دو نوع سیمان CSA شده است. لازم به‌ذکر است که تشکیل پرتلندیته نیز تابعی مستقیم از حضور 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 به‌صورت پایدارتر تشکیل می‌شوند باعث حفظ بهتر پارامترهای دوام در طی سیکل‌های حرارتی شده است (Jahani و همکاران، 2023).

3-5- بررسی ریزساختار با اسکنر الکترونی روبشی

نتایج آنالیز میکروسکوپی ملات‌های ساخته شده پس از قرارگیری در سیکل تنش حرارتی در شکل (7) نشان داده شده 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 5- نتایج بررسی وزن مخصوص نمونه‌ها در سنین مختلف

این مسئله می‌تواند به‌میزان 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 کاهش مقدار Al_2O_3 است. افزودن 10% از این نوع سیمان‌ها به OPC تغییرات قابل‌توجهی در وزن مخصوص ایجاد نکرده، اما وزن مخصوص نمونه‌های حاوی 10% IRC40 اندکی بیشتر از IRC50 ثبت شده که می‌تواند به‌نحوه تشکیل محصولات هیدراسیون و تغییرات در میزان تراکم ساختار خمیر سخت‌شده مرتبط باشد (Huang و همکاران، 2021؛ Wang و همکاران، 2021). بعد از اعمال سیکل‌های تنش حرارتی، تمامی نمونه‌ها کاهش وزن مخصوص را تجربه کرده‌اند، اما این کاهش در OPC و نمونه حاوی 10% IRC40 محسوس‌تر بوده است که نشان می‌دهد ترکیبات سولفوآلومیناتی در IRC50 مقاومت بهتری در برابر سیکل‌های حرارتی داشته‌اند.

این رفتار می‌تواند به‌حضور 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 به‌دلیل 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، 2015).

3-4- آنالیز شیمیایی با XRD

نتایج آزمایش XRD (شکل (6)) 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.

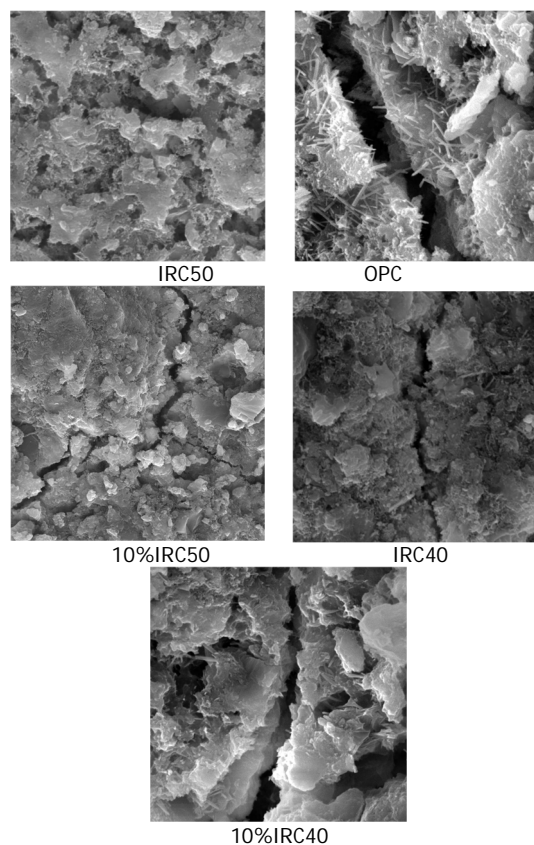
حضور حفرات و ترک‌های بین‌دانه‌ای به چشم می‌خورد. در این میان، نمونه حاوی 10% IRC50 نسبت به 10% IRC40 ساختار همگن‌تر و ترک‌های باریک‌تری دارد، که نشان‌دهنده تأثیر مثبت حتی درصد کم IRC50 در بهبود پایداری حرارتی است. در مجموع، از منظر ریزساختاری و مقاومت در برابر سیکل‌های تنش حرارتی، ترتیب بهبود به صورت $10\%IRC50 > IRC40 > OPC$ قابل مشاهده است.

4- 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 به سرعت متراکم کرده و در نهایت موجب رشد مقاومت اولیه بتن شده‌اند. در مقایسه با سیمان پرتلند، مقاومت فشاری نمونه حاوی سیمان CSA در 24 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، 2023؛ Tsampali و همکاران، 2019؛ Szeląg و همکاران، 2024؛ Bertola و همکاران، 2020؛ Ansari و همکاران، 2022).

همچنین به دلیل عدم تشکیل مقادیر قابل‌توجه هیدروکسید کلسیم ($Ca(OH)_2$)، تخلخل کاهش یافته و دوام بتن افزایش می‌یابد. این سیمان در برابر حملات شیمیایی، به‌ویژه محیط‌های سولفاته 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، 2022؛ Pimraksa و همکاران، 2018؛ Jahani و همکاران، 2022).

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، 2018).



شکل 7- نتایج آزمایش الکترونی روبشی نمونه ملات‌های ساخته شده پس از فرارگیری در سیکل تنش حرارتی

در نمونه حاوی 100% 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 Al_2O_3 در IRC50 سبب تشکیل بیشتر فازهای پایدار نظیر 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 گردیده است. 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 (100% 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. در طرح‌های ترکیبی (10% IRC40 و 10% IRC50)، گرچه نسبت به OPC بهبودهایی از نظر کاهش ترک و تخلخل مشاهده می‌شود، اما همچنان ساختارشان به‌طور کامل متراکم نیست و

5- 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:

(1) 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 هیدراتاسیون ثانویه باعث تشکیل و تورم اترینگایت شد که با ایجاد ساختاری متراکم و درهم‌تنیده، مقاومت فشاری در سنجش‌های زود هنگام (24 و 72 ساعت) را بیش از 20% نسبت به سیمان پرتلند افزایش داد.

(2) 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 110 درجه سانتی‌گراد، افت مقاومت فشاری کمتر از 5% 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.

(3) بررسی نتایج جذب آب و تخلخل نشان داد که حضور Al_2O_3 در ملات حاوی 10% سیمان IRC50 موجب کاهش تخلخل کل و مقاومت سیمان پرتلند در برابر سیکل‌های حرارتی می‌گردد که به ترتیب تا حدود 15% و 3% مشاهده شد. این پارامترها دوام حرارتی ملات را نیز به‌گونه‌ای بهبود بخشید که نمونه‌ها طی سیکل‌های حرارتی متوالی بدون افت چگالی ظاهری قابل‌ملاحظه (تا 5%) پایداری خود را حفظ کردند.

(4) بهینه‌سازی ساختار هیدراته در حضور مقادیر بالاتر آلومینا موجب افزایش پایداری بلندمدت ملات ساخته شده با سیمان پرتلند گردید؛ به‌طوری‌که نمونه‌ها طی 28 روز سنجش دوام، رفتار قابل‌توجهی در مهار گسترش ترک‌های مویینه 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 15 تا 20 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 پایان، برای تکمیل پژوهش و پیشنهاداتی برای محققان آینده، بررسی تأثیر Al_2O_3 بر پارامترهای بلندمدتی مانند انقباض و خزش پیشنهاد می‌شود. همچنین، برای افزایش سرعت گیرش بتن، استفاده از لیتیم کربنات در درصدهای بهینه نیز به‌دلیل خواص منحصر به‌فرد این ماده و بررسی پارامترهای دوام بتن ساخته شده از سیمان‌های CSA پیشنهاد می‌گردد.

6- مراجع

- Afrouhsabet V, Biolzi L, Monteiro PJ, Gastaldi MM, "Investigation of the mechanical and durability properties of sustainable high-performance concrete based on calcium sulfoaluminate cement", *Journal of Building Engineering*, 2021, 43, 102656.
- Ansari WS, Chang J, Ur Rehman Z, Nawaz U, Junaid, MF, "A novel approach to improve carbonation resistance of Calcium Sulfoaluminate cement by assimilating fine cement-sand mix", *Construction and Building Materials*, 2022, 317, 125598.
- ASTM International. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory (ASTM C192/C192M-19), 2019. https://doi.org/10.1520/C0192_C0192M-19.
- ASTM International Standard practice for mechanical mixing of hydraulic cement pastes and mortars of plastic consistency (ASTM C305-20), 2020.
- ASTM International. "Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens)", (ASTM C109/C109M-21), 2021.
- ASTM International. 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), 2021.
- ASTM International. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete (ASTM C642-21), 2021.
- ASTM International. Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete (ASTM C1602/C1602M-22), 2022.
- Bertola F, Gastaldi D, Irico S, Paul G, Canonico F, Behavior of blends of CSA and Portland cements in high chloride environment. *Construction and Building Materials*, 2020, 262, 120852.
- Ghosh D, Ma ZJ, Hun D, "Effect of GGBFS slag on CSA-based ternary binder hydration, and concrete performance", *Construction and Building Materials*, 2023, 386, 131554.
- Ghosh SK, Cleland NM, "Performance of precast concrete building structures", *Earthquake Spectra*, 2012, 28 (1_suppl1), 349-384.
- Guo C, Wang R, "Influence of calcium sulfoaluminate cement on early-age properties and microstructure of Portland cement with hydroxypropyl methyl cellulose and superplasticizer", *Journal of Building Engineering*, 2022, 45, 103470.
- Huang G, Pudasainee D, Gupta R, Liu WV, "Thermal properties of calcium sulfoaluminate cement-based mortars incorporated with expanded perlite cured at cold temperatures", *Construction and Building Materials*, 2021, 274, 122082.
- Jahani A, Raeesi Estabragh A, Jahani M, Vakili G, "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*, 2024, 54 (11), 1647-1665. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.365905.669>
- 583
- Jahani M, Moradi S, Shahnoori S, "4-year monitoring of degradation mechanisms of seawater sea-sand concrete exposed to tidal conditions: development

- Pimraksa K, Chindapasirt P, "Sulfoaluminate cement-based concrete. In Eco-efficient repair and rehabilitation of concrete infrastructures (pp. 355-385)", Woodhead Publishing, 2018.
- Pooni J, Robert D, Giustozzi F, Setunge S, Xie YM, Xia JTG, "Performance evaluation of calcium sulfoaluminate as an alternative stabilizer for treatment of weaker subgrades", *Transportation Geotechnics*, 2021, 27, 100462.
- Scrivener KL, Nonat A, "Hydration of cementitious materials, present and future", *Cement and Concrete Research*, 41 (7), 651-665.
- Shi C, Jiménez AF, Palomo A, "New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement", *Cement and Concrete Research*, 2011, 41 (7), 750-763.
- Sun D, Wang X, Wang H, Mi R, Liu J, Li J, Wang W, "Influence of antifreeze, accelerator, and pre-curing on properties and hydration of iron-rich calcium sulfoaluminate cement under cold temperatures", *Construction and Building Materials*, 2025, 471, 140728.
- Szeląg M, Rajczakowska M, Rumiński P, Franus W, Cwirzen A, "Macro and microstructural evolution of cement paste modified with MWCNTs under thermal shock conditions", *Journal of Building Engineering*, 2024, 93, 109919.
- Tang SW, Zhu HG, Li ZJ, Chen E, Shao HY, "Hydration stage identification and phase transformation of calcium sulfoaluminate cement at early age", *Construction and Building Materials*, 2015, 75, 11-18.
- Tsampali E, Tsardaka EC, Pavlidou E, Paraskevopoulos KM, Stefanidou M, "Comparative study of the properties of cement pastes modified with nano-silica and nano-alumina", *Solid State Phenomena*, 2019, 286, 133-144.
- Wang J, Zhang R, Luo Q, Lu L, Zhang F, Fu Q, Xing F, "Influence of hybrid steel-polyacrylonitrile fibers on the mechanical toughness and freeze-thaw resistance of sulfoaluminate cement composites", *Cement and Concrete Composites*, 2024, 148, 105489.
- Wang P, Li N, Xu L, "Hydration evolution and compressive strength of calcium sulfoaluminate cement constantly cured over the temperature range of 0 to 80°C", *Cement and Concrete Research*, 2017, 100, 203-213.
- Wang S, Lang L, Liu Z, Pu S, "Hardening properties, water resistance and associated micro-mechanism of nano-modified calcium sulfoaluminate cement", *Case Studies in Construction Materials*, 2024, 21, e03969.
- Zhang J, Ye C, Tan H, Liu X, "Potential application of Portland cement-sulfoaluminate cement system in precast concrete cured under ambient temperature", *Construction and Building Materials*, 2020, 251, 118869.
- Zhang Y, Zhao Q, Gao Z, Chang J, "Nanostructural evolution of Al (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*, 2021, 150, 106607.
- of chemical composition and micro-performance", *Construction and Building Materials*, 2023, 409, 133475.
- Jahani M, Shahnoori S, Moradi S, Ershadi C, "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*, 2022, 6 (1), 43-59.
- Jahani M, Shahnoori S, Moradi S, Yazdani M, Ershadi C, "Effect of tidal conditions, supplementary cementitious materials and marine's materials on some of concrete durability parameters", *Ferdowsi Civil Engineering*, 2023, 36 (3), 63-82. <https://doi.org/10.22067/jfcei.2023.83067.1239> (in Persian)
- Juenger MCG, Winnefeld F, Provis JL, Ideker JH, "Advances in alternative cementitious binders", *Cement and Concrete Research*, 2011, 41 (12), 1232-1243.
- Li P, Gao X, Wang K, Tam VW, Li W, "Hydration mechanism and early frost resistance of calcium sulfoaluminate cement concrete", *Construction and Building Materials*, 2020, 239, 117862.
- Lv L, Luo S, Šavija B, Zhang H, Li L, Ueda T, Xing F, "Effect of particle size distribution on the pre-hydration, hydration kinetics, and mechanical properties of calcium sulfoaluminate cement", *Construction and Building Materials*, 2023, 398, 132497.
- Ma J, Wang H, Yu Z, Shi H, Wu Q, Shen X, "A systematic review on durability of calcium sulfoaluminate cement-based materials in chloride environment", *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 2023, 12 (6), 687-698.
- Moharrer AM, Ghaedian D, Eftekhari MH, "Investigating the effects of substituting non-fired black soil waste for cement on the mechanical and fluidity properties of Concrete", *Iranian Concrete Society*, 2023, 8 (1), 176-193. <https://doi.org/10.30478/jcsm.2023.419013.1345>
- Moharrer A, Gholhaki M, Rezaifar O, Kheyroddin A, "Study on mechanical and microstructural properties of the magnetized cement mortar incorporating quartz grains and natural zeolite", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 2023, 47 (3), 1399-1410.
- Moharrer A, Gholhaki M, Rezaifar O, Kheyroddin A, "Investigation of the effect of magnetic field on the compressive strength of cement mortar containing quartz aggregate and zeolite powder", *Karfan Scientific Quarterly*, 2021, 18 (Special Issue 1), 151-166. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.132815>
- Moharrer A, "Investigating the effect of silica fume powder of sand blasting as cement replacement in the rheological and mechanical properties of concrete", *Karfan Journal*, 21 (3), 325-346. <https://doi.org/10.48301/kssa.2023.409074.2640>
- Najeeb Z, Mosaberpanah MA "Mechanical and durability properties of modified high-performance mortar by using cenospheres and nano-silica", *Construction and Building Materials*, 2023, 362, 129782.