

# Cement design for making high-strength self-compacting mass concrete (C50)

Saeed Rahmati<sup>1</sup>, Emad Tavakoli<sup>2</sup>, Mansor Fakhri<sup>3\*</sup>

1-Master of Science, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Iran

2-Master of Science, Department of Civil Engineering, K.N. toosi University of Technology, Tehran, Iran

3-Professor, Department of Civil Engineering, K.N. toosi University of Technology, Tehran, Iran

Email: fakhri@kntu.ac.ir

Received: 19 June 2023    Revised: 21 November 2023    Accepted: 09 December 2023

Research paper

## ABSTRACT

Increase in temperature during cement hydration is still a major challenge in the construction of mass concrete structures. In mass concrete, the internal temperature increases due to the cement hydration process, while the external concrete may cool and shrink. Significant temperature variations across the structure can cause cracks in the concrete. Additionally, high temperatures can delay the formation of ettringite and reduce the strength and durability of concrete. Using natural pozzolans as replacements is one of the most effective methods to reduce thermal stresses and control cracking. This research aims to design cement for self-compacting mass concrete with high strength (C50). Considering the country's conditions and the availability of the best natural pozzolan, iron smelting furnace slag and microsilica were selected as alternative pozzolans. Thus, three two-component cements with 35%, 40%, and 45% slag replacement, and a three-component cement containing 45% slag and 6% microsilica, were investigated. After conducting physical and chemical tests on cement and cement mortar, and with the consultation of concrete technology experts, the obtained technical parameters were validated. The results showed that slag could play a crucial role in improving the mechanical workability and thermal properties of concrete. Based on the results, the cement with 45% slag exhibited the best performance.

**Keywords:** Mass Concrete, Slag Cement, Natural Pozzolan, Heat of Hydration.

---

\*Corresponding Author: Mansor Fakhri

Rahmati S. Tavakoli E. Fakhri M. Cement Design for Making high-Strength Self-Compacting Concrete (C50). *Journal of Concrete Structures and Materials* 2023; 8(2): 1-14.

<http://doi.org/10.30478/jcsm.2023.403141.1329>

2538-5828/ © 2023 The Authors. Published by Iranian Concrete Society

This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## طراحی سیمان برای ساخت بتن حجیم خودتراکم مقاومت بالا (C50)

سعید رحمتی<sup>۱</sup>، عماد توکلی<sup>۲</sup>، منصور فخری<sup>۳\*</sup>

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی علم و صنعت، تهران، ایران

۲- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۳- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: fakhri@kntu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۲۹، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۸/۳۰، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۱۸

نوع مقاله: پژوهشی

### چکیده

افزایش دما در طول هیدراسیون سیمان هنوز یک مشکل اساسی در ساخت سازه‌های بتنی حجیم است. دمای داخلی بتن حجیم به دلیل فرآیند هیدراسیون سیمان افزایش می‌یابد در حالی که بتن بیرونی ممکن است در حال خنک شدن و انقباض باشد. هنگامی که درجه حرارت به‌طور قابل توجهی در ساختار متفاوت است می‌تواند در بتن باعث ایجاد ترک شود. همچنین دماهای بالا می‌تواند منجر به تأخیر در تشکیل اترینگایت و کاهش مقاومت و دوام بتن شود. جایگزینی پوزولان‌های طبیعی یکی از مؤثرترین روش‌ها برای کاهش تنش‌های حرارتی و کنترل ترک خوردگی است. در این تحقیق هدف طراحی سیمانی برای ساخت بتن حجیم خودتراکم با مقاومت بالا (C50) است. بر این اساس و پس از بررسی منابع و در دسترس بودن بهترین پوزولان طبیعی از سرباره کوره ذوب آهن و میکرو سیلیس به‌عنوان پوزولان‌های جایگزین استفاده شد. بدین‌صورت که سه سیمان دوجزئی با ۳۵٪، ۴۰٪ و ۴۵٪ جایگزینی سرباره و یک سیمان سه‌جزئی حاوی ۴۵٪ سرباره و ۶٪ میکرو سیلیس بررسی شدند. برای طراحی این سیمان‌ها پس از انجام آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی سیمان و ملات سیمان شاخصه‌های موردنیاز فنی که با نظرسنجی از کارشناسان تکنولوژی بتن به‌دست‌آمده‌اند بررسی شدند. نتایج نشان داد که سرباره می‌تواند در بهبود ویژگی‌های مکانیکی کارپذیری و حرارتی بتن نقش اساسی ایفا کند. بر اساس نتایج بهترین عملکرد را سیمان دارای ۴۵ درصد سرباره داشته است.

**کلمات کلیدی:** بتن حجیم سیمان سرباره‌های پوزولان طبیعی حرارت هیدراسیون

واکنش شیمیایی سیمان با آب یک واکنش گرمازایی است که مقدار زیادی گرما آزاد می‌کند. گرمای تولیدشده اغلب گرمای هیدراسیون نامیده می‌شود و به ترکیب شیمیایی و کمیت سیمان بستگی دارد. افزایش دما در طول هیدراسیون سیمان هنوز یک مشکل اساسی در ساخت سازه‌های بتنی حجیم است. با توجه به ضخامت قابل توجه این سازه‌ها میزان گرمای تولیدشده قابل توجه بوده و هسته عضو بتنی به دمای بالایی می‌رسد که از دمای لایه‌های سطحی آن نیز بالاتر است. چنین توزیع غیریکنواخت دما و تغییرات آن در زمان باعث ایجاد کرنش‌های حرارتی می‌شود. علاوه بر این به دلیل فرآیند هیدراسیون و تبادل رطوبت با محیط کرنش‌های انقباض در بتن سنین پایین نیز مشاهده می‌شود. در نتیجه تنش‌هایی در سازه بتنی ایجاد می‌شود که در صورت عدم کنترل صحیح می‌تواند منجر به ترک خوردگی شود و عمر مفید سازه را تحت تأثیر قرار دهد. این ترک در سنین پایین با منشأ حرارتی و انقباض ممکن است شروع به خوردگی آرماتورها کند. علاوه بر این در سنین بالاتر عرض ترک ممکن است به دلیل بارهای محیطی و مکانیکی افزایش یابد.

اندازه تغییرات حجم انقباض حرارتی در سنین پایین و ترک احتمالی هم به عوامل مرتبط با متریال و هم به عوامل فنی بستگی دارد. از جمله ترکیب مخلوط بتن نوع ترکیبات بتن شرایط عمل‌آوری بتن اندازه حجم بتن و شرایط مهار سازه را می‌توان مشخص کرد [۱-۲]. از این نظر ترکیب بتن تأثیر قابل توجهی بر تغییرات حجم مورد بحث دارد [۳-۶]. از طرف دیگر در بتن حجیم زمانی که دمای بتن بالاتر از حدود ۷۰ درجه سانتی‌گراد باشد اترینگایت ناپایدار است و تشکیل اترینگایت اولیه<sup>۱</sup> (EEF) متوقف می‌شود. اجزای تشکیل‌دهنده اترینگایت به صورت هیدرات‌های مونو سولفات و سیلیکات کلسیم پراکنده می‌شوند. این اجزاء تشکیل اترینگایت ثانویه یا تشکیل اترینگایت تأخیری<sup>۲</sup> (DEF) را در بتن از قبل سخت شده زمانی که شرایط ترمودینامیکی مساعد می‌شوند یعنی در دمای نسبتاً پایین‌تر با رطوبت موجود منجر به انبساط خمیر و به دنبال آن ترک خوردگی می‌شود که این ترک خوردگی به مرور زمان بر اثر شرایط محیطی باعث بازشدگی بیشتر ترک در بتن می‌شود [۷]. اترینگایت ثانویه ممکن است ماه‌ها یا سال‌ها پس از زمان ساخت مشهود نباشد [۸]. بر این اساس اکثر مشخصات استاندارد بتن حجیم حداکثر آستانه دمای بتن را زیر ۷۱ درجه سانتی‌گراد برای جلوگیری از تشکیل اترینگایت تأخیری محدود می‌کنند و حداکثر دمای بتن بالاتر از ۸۲ درجه سانتی‌گراد نیز مشخص شده است [۹]. دماهای بالا می‌تواند منجر به تأخیر در تشکیل اترینگایت و کاهش مقاومت و دوام بتن شود [۱۰]. یکی از روش‌های کاهش اثرات منفی گرمازایی سازه‌های حجیم استفاده از سیمان‌هایی با حرارت هیدراسیون متوسط یا کم است؛ بنابراین عملی‌ترین راه برای محدود کردن حرارت هیدراسیون و در نتیجه دمای سخت شدن جایگزینی سیمان پرتلند با برخی از اجزای غیر کلینکر مانند پوزولان‌ها یا مواد شبه سیمانی است.

پوزولان‌ها به دودسته مصنوعی و طبیعی تقسیم می‌شوند که برای پوزولان طبیعی می‌توان خاک دیاتمه دار توف‌های شیش‌های و پوک‌سنگ‌های طبیعی را نام برد و برای پوزولان‌های مصنوعی می‌توان خاکستر بادی میکرو سیلیس و سرباره کوره‌های ذوب‌آهن را نام برد. به دلیل محدودیت درصد جایگزینی پوزولان طبیعی در سیمان در ساخت بتن‌های با عیار بالای سیمان مانند بتن‌های خودتراکم نمی‌توان از آن برای کاهش حرارت این نوع بتن استفاده کرد بدین منظور از پوزولان‌های مصنوعی استفاده می‌شود. چنین جایگزینی یک اتصال‌دهنده ایجاد می‌کند که گرمای بسیار کمتری تولید می‌کند [۱۱-۱۴]. بوزوبا<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۰۱) اثر جایگزینی خاکستر بادی به جای سیمان را در بتن حجیم بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که جایگزینی خاکستر بادی باعث افزایش مقاومت

<sup>1</sup> Early Ettringite Formation

<sup>2</sup> Delayed Ettringite Formation

<sup>3</sup> Bouzoubaa

فشاری خمشی و کششی نسبت به نمونه شاهد شده است و همچنین زمان گیرش را کاهش داده است [۱۳]. ژانگ<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۰۸) با بررسی جایگزینی میکرو سیلیس با سیمان به این نتیجه رسیدند که جایگزینی ۸ درصد میکرو سیلیس ضمن کاهش حرارت نهایی مخلوط موجب افزایش ۲۲ درصدی مقاومت فشاری ۲۸ روزه نسبت به نمونه شاهد می‌گردد [۱۴]. هانگ<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۳) اثر جایگزینی ۲۰ تا ۸۰ درصد خاکستری بادی به جای سیمان را بر ویژگی‌های آن بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که زمان گیرش بتن با افزایش درصد خاکستر بادی افزایش یافت. همچنین نمونه‌های دارای خاکستری بادی در سنین عمل‌آوری پایین کاهش مقاومت فشاری و خمشی داشت‌هاند ولی با افزایش زمان عمل‌آوری افزایش مقاومت نسبت به نمونه شاهد مشاهده شده است [۱۵]. کردیانی و همکاران (۲۰۱۹) بررسی اثر جایگزینی میکرو سیلیس و پوزولان تفتان به جای سیمان را بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که جایگزینی میکرو سیلیس و پوزولان عمدتاً باعث کاهش حداکثر دمای مخلوط می‌شود و همچنین باعث افزایش مقاومت فشاری در سنین اولیه و نهایی نمونه‌ها می‌گردد [۱۶].

هدف از این پژوهش طراحی سیمانی برای ساخت بتن حجیم خودتراکم با مقاومت بالا (C50) است. بدین منظور در صورت تجاوز دمای بتن حجیم از ۷۰ درجه و تا ۸۵ درجه سانتی‌گراد ACI 201.2R-16 بیان کرده که در صورت رعایت بعضی موارد خاص می‌توان امکان تشکیل اترینگایت تأخیری که یکی از عوامل مخرب و تأثیرگذار بر عملکرد سازه و طول عمر آن می‌باشد را به شدت کاهش داد [۱۷] و یکی از این شرایط مصرف سیمان حاوی ۳۵ درصد (یا بیشتر) سرباره کوره ذوب آهن است. در ACI 207.1R-05 به صراحت بیان شده با توجه به ماهیت پوزولان‌ها خصوصاً سرباره کوره ذوب آهن در صورت استفاده در بتن امکان بروز مشکلاتی چون انبساط و انقباض شدیداً کاهش می‌یابد [۱۸]. از طرف دیگر به سه دلیل «بومی و در دسترس بودن» «درصد شاخص فعالیت»<sup>۶</sup> که باعث کاهش چشمگیر حرارت زایی ناشی از واکنش هیدراسیون می‌شود و «ریزی»<sup>۷</sup> آن به این دلیل که نوع مورفولوژی دانه‌های سرباره در صورت آسیاب شدن با آسیاب گلول‌های به شکلی است که به کارپذیری بتن خودتراکم کمک می‌کند از سرباره استفاده می‌شود. براساس آیین‌نامه ACI 201.2R-16 نمی‌توان از ۳۵ درصد کمتر جایگزینی سرباره با سیمان استفاده کرد و همچنین جایگزینی ۴۵ درصد (یا بیشتر) سرباره با سیمان به دلیل پدیده جمع شدگی ذاتی<sup>۷</sup> استفاده نمی‌شود. در نتیجه در این تحقیق سیمان دوجزئی ۳۵ درصد سرباره و ۶۵ درصد سیمان (C35) یک سیمان دوجزئی ۴۰ درصد سرباره و ۶۰ درصد سیمان (C40) یک سیمان دوجزئی ۴۵ درصد سرباره و ۵۵ درصد سیمان (C45) و یک سیمان سه‌جزئی ۶ درصد میکرو سیلیس ۴۵ درصد سرباره و ۴۹ درصد سیمان (CM45-6) طراحی شد.

در انت‌های این تحقیق و در قسمت نتایج شاخصه‌های فنی موردنظر را که با نظرسنجی از محققین و متخصصین برای این تحقیق به دست آمده‌اند به صورت جامع و دقیق مورد بررسی قرار گرفته است. این شاخصه‌ها توسط کارشناسان حوزه تکنولوژی بتن شامل اساتید دانشگاه‌ها و متخصصین صنعت تولید بتن به عنوان معیارهای مهم در ارزیابی و کنترل کیفیت ملات سیمان معرفی شده‌اند. بر اساس تحقیقات و پژوهش‌های صورت گرفته می‌توان تأکید کرد که این شاخصه‌ها به عنوان مراجع معتبر و قابل اعتماد در صنعت ساخت و ساز مورد استفاده قرار می‌گیرند. این شاخصه‌ها شامل مقاومت فشاری و خمشی ملات سیمان زمان گیرش سیمان (ویکات) انبساط اتوکلاو سیمان نرمی و دانسیته سیمان (بلین) زبره حرارت زایی سیمان عدم تشکیل اترینگایت تأخیری و کارپذیری سیمان برای بتن خودتراکم می‌باشند. این شاخصه‌ها به دلیل تأثیر مستقیم و مهمی که در کیفیت و عملکرد ملات سیمان دارند توسط متخصصین به عنوان پارامترهای حیاتی در ارزیابی و انتخاب ملات سیمان برای ساخت بتن معرفی شده‌اند.

4 Zhang

5 Huang

6 Activity index

7 Autogenous shrinkage

## ۲- برنامه آزمایشی

برنامه آزمایشی برای ارزیابی و شناخت بهتر خواص و عملکرد سیمان در شرایط مختلف طراحی می‌شود. این برنامه شامل یک سری آزمایش‌های استاندارد و خاص است که به منظور ارزیابی ویژگی‌های مختلف سیمان انجام می‌شود. در این بخش از مقاله به توضیح مختصری از مواردی که در برنامه آزمایشی سیمانی مشاهده شود پرداخته می‌شود.

### ۲-۱- مصالح مصرفی

موارد مورد استفاده در این تحقیق شامل سیمان سرپاره کوره ذوب آهن ماسه و میکرو سیلیس است. این مواد از منابع معتبر تأمین شده‌اند و ویژگی‌های آن‌ها با دقت بررسی شده است.

#### ۲-۱-۱- سیمان

سیمان مورد استفاده در این تحقیق از کارخانه تولید سیمان سپاهان انتخاب شد. وزن مخصوص این سیمان ۳۱۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب است.

#### ۲-۱-۲- سرپاره کوره ذوب آهن

سرپاره مورد استفاده از خط ۳ ذوب آهن اصفهان تأمین شد. پوزولان سرپاره اصفهان دارای سطح ویژه در محدوده ۴۵۰۰ سانتی‌مترمربع بر گرم است و دارای وزن مخصوص ۲۹۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد. همچنین شاخص فعالیت این پوزولان حدود ۸۰ درصد و سنجش فاز آمورف آن حدود ۹۵ درصد است. ترکیبات شیمیایی سرپاره کوره ذوب آهن در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: ترکیبات شیمیایی کوره ذوب آهن

IR	L.O.I	TiO <sub>2</sub>	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S--	Cl	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	ترکیب شیمیایی
۰,۵	۰,۵	۱,۴	۱,۵	۱	۰,۰۲	۰,۶	۰,۷	۰,۵	۷,۵	۳۸,۵	۱	۱۱	۳۶	درصد

#### ۲-۱-۳- میکرو سیلیس

میکرو سیلیس مورد استفاده در این پژوهش دارای سطح مخصوص در حدود ۲۰۰۰۰۰ سانتی‌مترمربع بر گرم و وزن مخصوص ۲۲۱۶ کیلوگرم بر مترمکعب است. آنالیز شیمیایی میکرو سیلیس در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲: آنالیز شیمیایی میکرو سیلیس

L.O.I	TiO <sub>2</sub>	S	Sg	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	ترکیب شیمیایی
۳,۵۱	۰,۰۵۲	۰,۰۴۲	۲,۱۶	۰,۶	۱,۵۲	۰,۰۷۲	۱,۰۱	۰,۷۱	۲,۷۲	۰,۵۸	۸۹,۰۲	درصد

#### ۴-۱-۲- ماسه

ماسه مورد استفاده در این تحقیق دارای توده ویژه (چگالی اشباع با سطح خشک)  $2/52$  بوده است و دانه بندی آن در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳: دانه بندی ماسه

۲۰۰	۱۰۰	۵۰	۳۰	۱۶	۸	۴	۸/۳	۲/۱	۴/۳	الک
۱	۶	۲۲	۳۸	۵۵	۷۸	۹۷	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	درصد عبوری ماسه

#### ۲-۲- طرح های مخلوط

در طراحی مخلوط ملات سیمان توجه به نسبت مصالح بسیار حائز اهمیت است. بر اساس استاندارد ASTM C 109 [۱۹] نسبت بهینه برای ملات استاندارد به این صورت تعیین شده است که یک قسمت سیمان به  $2/75$  قسمت ماسه استاندارد درجه بندی شده باشد. همچنین نسبت آب به سیمان باید برابر با  $0/485$  برای سیمان های پرتلند باشد.

#### ۲-۳- آزمایش ها

##### ۱-۲-۳- آزمایش های مکانیکی ملات سیمان

آزمایش های مقاومت فشاری و مقاومت خمشی ملات سیمان مطابق با استانداردهای ASTM C 109 و ASTM C 348 [۲۰] انجام شد. بر اساس این آزمایش مقاومت فشاری ملات های سیمان های هیدرولیکی با استفاده از آزمون های مکعبی و منشوری با ابعاد مشخص تعیین شد. برای این منظور ملات سیمان با طرح اختلاط بیان شده آماده شد و آزمون ها از آن گرفته شدند. پس از گذشت یک روز آزمون ها از قالب ها خارج و تا رسیدن به سن مشخص در محلول آب و آهک اشباع عمل آوری شدند. در نهایت آزمون ها مورد انجام آزمایش مقاومت فشاری مطابق استاندارد ذکر شده با استفاده از جک بتن شکن هیدرولیکی ۲۰۰ تنی مورد انجام آزمایش قرار گرفتند. مطابق با این استاندارد نرخ بارگذاری باید در محدوده ۹۰۰ تا ۱۸۰۰ نیوتن بر ثانیه باشد. به همین دلیل نرخ بارگذاری آزمایش ۱۶۴۰ نیوتن بر ثانیه تنظیم شد.

##### ۲-۲-۳- آزمایش تعیین زمان گیرش سیمان (ویکات)

زمان گیرش سیمان های هیدرولیکی به وسیله سوزن ویکات تعیین شدند. برای این منظور خمیر مناسب بر مبنای نسبت آب به سیمان نرمال (به دست آمده از آزمایش روانی متعارف سیمان) ساخته شد و آزمایش نفوذ دورهای روی این خمیر با نشست میزان مشخصی از سوزن ویکات داخل خمیر انجام گرفت. زمان گیرش اولیه مدت زمانی است که بین اولین تماس تا زمانی که سوزن ویکات حد مشخصی نفوذ کند. زمان گیرش نهایی نیز زمانی است که سوزن ویکات دیگر نفوذ مشخصی داخل خمیر نداشته باشد. این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM C 191 [۲۱] انجام شد.

##### ۲-۳-۲- آزمایش انبساط سیمان

انبساط (سلامت) سیمان (روش اتوکلاو) به ثبات حجم خمیر سیمان سخت شده بعد از گیرش اطلاق می شود. معمولاً عدم سلامت

سیمان یا انبساط مخرب به علت مقادیر بیش از اندازه آهک آزاد خوب پخته نشده است که در این صورت در خمیر سیمان پس از حصول گیرش تغییرات حجمی زیادی رخ می‌دهد. اگر مواد خام تغذیه شده به داخل کوره حاوی مقداری آهک بیش از آنچه می‌تواند با اکسیدهای اسیدی ترکیب شود باشد مقدار اضافی به حالت آزاد باقی خواهد ماند. آهک آزاد که در کلینکر موجود است به آرامی هیدراته شده و حجمی به مراتب بیشتر از حجم اولیه اکسید کلسیم پیدا می‌کند. این نکته مهم است که خمیر سیمان پس از گیرش اولیه و سخت شدن تغییر حجم عمده‌ای پیدا نکند. علت این محدودیت خرابی و ترکی است که خمیر سیمان در صورت انبساط (در محلی که امکان این انبساط نیست) پیدا می‌کند. چنین انبساطی غالباً ناشی از فعل و انفعالات آهک و منیزیم آزاد و سولفات کلسیم می‌باشد. به جهت کنترل سلامت سیمان آزمایش انبساط سیمان به روش اتوکلاو مطابق با استاندارد ASTM C 151 [۲۲] انجام شد.

#### ۲-۳-۴- آزمایش تعیین نرمی و دانسیته سیمان (بلین)

این آزمایش جهت تعیین نرمی سیمان هیدرولیکی با استفاده از دستگاه نفوذپذیری هوا (بلین) مطابق با استاندارد ASTM C 204 [۲۳] انجام شد. مبنای انجام این آزمایش نفوذ هوای بلین با مقدار معینی از مکش هوا از میان بستر آماده شده سیمان با تخلخل معین می‌باشد. تعداد و اندازه منافذ در بستر آماده شده با تخلخل معین تابعی از اندازه ذرات و سرعت جریان هوای عبوری از آن است.

#### ۲-۳-۵- آزمایش تعیین گرمای هیدراته شدن سیمان

همانند هر واکنش شیمیایی هیدراسیون ترکیبات سیمان نیز حرارت زا است و به میزان حرارتی که در هر گرم از سیمان هیدراته در اثر هیدراسیون در دمای معینی تولید می‌گردد حرارت هیدراسیون گفته می‌شود و به روش‌های مختلفی قابل اندازه‌گیری است. درجه حرارت و دمایی که در آن عمل هیدراسیون انجام می‌شود تأثیر قابل ملاحظه‌ای در نرخ حرارت تولید شده است دارد. این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM C 186 [۲۴] انجام شد.

#### ۲-۳-۶- آزمایش درصد عبوری از الک ۴۵ میکرون

آزمایش درصد عبوری از الک ۴۵ میکرون (زبره) برای بررسی نرمی سیمان مورد استفاده قرار گرفت.

#### ۲-۳-۷- آزمایش تجزیه شیمیایی سیمان

این آزمایش مطابق با استاندارد ASTM C114 [۲۵] انجام شد. هدف از این آزمایش تعیین و اندازه‌گیری درصد اجزای شیمیایی اصلی در سیمان است. این اجزا عمدتاً شامل کلسیم سیلیسیم آلومینیم و آهن هستند. این اطلاعات شیمیایی این امکان را می‌دهد تا کیفیت و خواص نهایی محصول سیمان قابل پیش‌بینی و کنترل باشد.

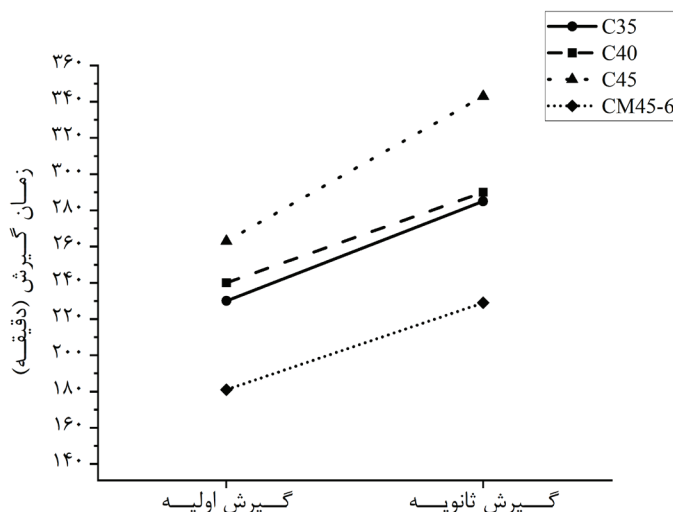
### ۳- نتایج آزمایش‌ها

#### ۳-۱- آزمایش‌های مکانیکی ملات سیمان

همان‌طور که در جدول ۱ و شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است بیشترین مقدار مقاومت فشاری متعلق به سیمان حاوی میکروسیلیس (CM45-6) است. سطح ویژه بسیار زیاد آن سبب افزایش سرعت هیدراسیون می‌شود و گیرش اولیه و نهایی بتن سریع‌تر اتفاق می‌افتد. مصرف میکروسیلیس سبب چسبندگی بتن و در نتیجه کاهش اسلامپ می‌شود و نیاز به افزودنی‌های بتن در



دهد. از طرفی با بالا رفتن زمان گیرش سرعت سخت شدن بتن پایین رفته و حرارت زایی بتن کاهش پیدا می‌کند. مطابق با نتایج جدول ۲ و شکل ۵ کمترین زمان گیرش برای سیمان حاوی میکرو سیلیس است. همچنین چهار نوع سیمان زمانی بیشتر از حداقل مقدار آیین‌نامه به گیرش اولیه می‌رسند.



شکل ۵: مقایسه نتایج آزمایش ویکات

### ۳-۳- آزمایش انبساط سیمان

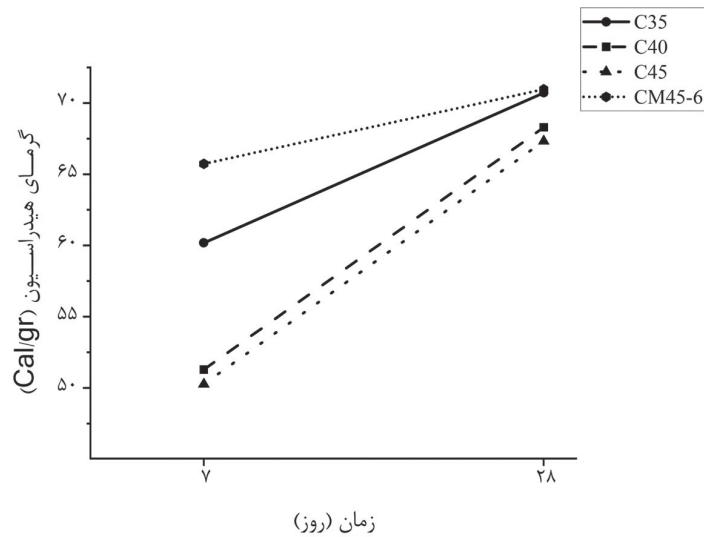
بر اساس استاندارد ملی سیمان ایران (INSO 17518) حداکثر انبساط مجاز نباید از ۰,۸ درصد بیشتر باشد. مطابق با نتایج جدول ۲ حداکثر انبساط سیمان‌های مورد آزمایش کمتر از مقدار آیین‌نامه است. هرچند انبساط چهار نوع سیمان بسیار پایین و نزدیک به هم هستند باین‌حال کمترین مقدار متعلق به سیمان CM45-6 است.

### ۳-۴- آزمایش تعیین نرمی و دانسیته سیمان

بر اساس استاندارد ملی سیمان ایران (INSO 17518) حداقل مقدار نرمی برای سیمان‌های حاوی پوزولان با رده مقاومتی بالا باید ۲۸۰۰ (و بیشتر) باشد. مطابق با نتایج جدول ۵ بهترین نتایج این آزمایش متعلق به سیمان CM45-6 است. این نتایج نشان می‌دهند سیمان CM45-6 ریز تر و در نتیجه کارایی بیشتری برای بتن خودتراکم ایجاد می‌کنند.

### ۳-۵- آزمایش تعیین گرمای هیدراته شدن سیمان

بر اساس متن استاندارد ملی سیمان ایران (INSO 17518) گرمای هیدراته شدن سیمان‌های با گرمای کم در سن ۷ روزه نباید بیشتر از ۲۷۰ J/g (حدود ۶۵ درجه سانتی‌گراد) باشد. مطابق با جدول ۵ و شکل ۶ پایین‌ترین گرمای هیدراته متعلق به سیمان C45 است و سیمان CM45-6 بیشترین گرما هیدراسیون را ایجاد می‌کند.



شکل ۶: مقایسه نتایج آزمایش تعیین گرمای هیدراته

### ۳-۶- آزمایش درصد عبوری از الک ۴۵ میکرون

مطابق جدول ۵ کمترین درصد عبوری سیمان روی الک ۴۵ میکرون متعلق به سیمان C45 است. در نتیجه سیمان C45 بهترین عملکرد را در این زمینه برای بتن خودتراکم مورد تحقیق دارد.

جدول ۵: نتایج آزمایش‌های سیمان

CM45-6	C45	C40	C35	آزمایش
۱۸۱	۲۶۳	۲۴۰	۲۳۰	تعیین زمان گیرش سیمان (ویکات)
۲۲۹	۳۴۳	۲۹۰	۲۸۵	گیرش ثانویه (دقیقه)
۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۸	انبساط سیمان (%)
۵۰۲۳	۳۷۵۰	۳۵۰۳	۳۱۸۷	بلین cm <sup>2</sup> /gr تعیین نرمی و دانسیته سیمان (بلین)
۲/۹۳	۲/۹۹	۲/۹۲	۲/۸۸	دانسیته gr/cm <sup>3</sup>
۶۵/۷۳	۵۰/۲۶	۵۱/۲۹	۶۰/۱۸	گرمای هیدراسیون ۷ روزه (Cal/gr) تعیین گرمای هیدراته شدن سیمان
۷۰/۹۶	۶۷/۳۳	۶۸/۲۹	۷۰/۷۱	گرمای هیدراسیون ۲۸ روزه (Cal/gr)
۷/۴	۶/۷	۹/۲	۱۲/۶	درصد باقی مانده روی الک ۴۵μm (%)

### ۷-۳- آزمایش تجزیه شیمیایی سیمان

در صورت بالا رفتن دما یکی از فاکتورهای تعیین کننده نسبت  $SO_3$  به  $Al_2O_3$  است که می بایست کمتر از ۰/۷ باشد. دلیل آن بروز واکنش های ناشی از قلیایی موجود در سیمان می باشد و بر اساس متن استاندارد ملی سیمان ایران (INSO 17518) مقدار  $SO_3$  برای بتن مقاومت بالا باید کمتر از ۳/۵ باشد. مطابق با جدول ۶ نسبت  $SO_3$  به  $Al_2O_3$  برای سیمان C35 برابر است با ۰/۴۱۱۷ برای سیمان C40 برابر است با ۰/۳۶۳۸ برای سیمان C45 برابر است با ۰/۱۹۸۲ و برای سیمان CM45-6 برابر است با ۰/۵۶۵۴. این نشان دهنده آن است سیمان C45 کمترین نسبت را دارد که باعث کاهش شدید امکان بروز اتریگانت تاخیری خواهد شد. همچنین چهار نوع بتن مورد استفاده در تحقیق  $SO_3$  کمتر از ۳/۵ درصد دارند.

جدول ۶: آنالیز شیمیایی سیمان ها

CM45-6	C45	C40	C35	ترکیب شیمیایی (درصد)
۲۵/۴	۲۹/۹۲	۲۵/۹۸	۲۵/۴	SiO <sub>2</sub>
۴/۵۱	۸/۰۷	۷/۵۳	۶/۸	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۴/۱۲	۲/۶	۲/۸۵	۲/۶	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۵۸/۵۲	۴۸/۸۸	۵۴/۴۳	۵۵	CaO
۱/۷	۴/۹۱	۴/۰۶	۴	MgO
۲/۵۵	۱/۶	۲/۷۴	۲/۸	SO <sub>3</sub>
۰/۳۵	۰/۴۹	۰/۷۴	۰/۴	Na <sub>2</sub> O
۰/۷۴	۰/۷۸	۰/۷	۰/۶۶	K <sub>2</sub> O
۲/۳۷	۱/۷۳	۱/۲۶	۱/۳	Loss of ignition
۱/۳۹	۳/۶	۰/۵۳	۰/۵۵	IR

### ۴- نتیجه گیری

با توجه به نتایج و مشاهدات انجام شده در این مطالعه در مورد سیمان سرباره های می توان به نتیجه های مهم زیر اشاره کرد: بر اساس نتایج هرچه درصد جایگزینی سرباره نسبت به سیمان بیشتر شده است مقاومت های فشاری کششی و خمشی آن بیشتر شده و طرح C45 حدود ۱/۲٪ افزایش مقاومت نسبت به طرح پایه C35 داشته است اما طرح CM45-6 با دارا بودن ۶٪ میکروسیلیس حدود ۲۳٪ نسبت به طرح پایه C35 افزایش مقاومت داشته است که می توان امیدوار بود دوام این بتن هم بالاتر از سیمان حاوی سرباره باشد.

بهترین عملکرد زمان گیرش سیمان را سیمان C45 و بدترین عملکرد را سیمان CM45-6 داشته است که حدود ۳۳٪ سیمان C45 عملکرد بهتری داشته است.

حرارت زایی سیمان یکی از مهمترین پارامترها در این تحقیق بوده است که کمترین حرارت را سیمان C45 و بیشترین حرارت را سیمان CM45-6 داشته است. اختلاف گرمای هیدراته این دو سیمان حدود ۲۳٪ بوده است.

از آنجا که بتن حجیم به شدت مستعد ایجاد DEF است یکی از مهمترین پارامترهای مورد بررسی در بحث بتن حجیم برای

جلوگیری از ایجاد DEF کاهش نسبت  $SO_3$  به  $Al_2O_3$  است که با افزایش مقدار سرباره این نسبت به شدت کاهش یافته است. در نتیجه آن سیمان C45 بیشترین کاهش را داشته است و نسبت به سیمان CM45-6 حدود ۶۵٪ بهتر عمل کرده است. گرچه در بحث کارپذیری نرمی و زیره سیمان بهترین گزینه را می‌توان سیمان CM45-6 را نام برد اما اختلاف قابل توجهی با سیمان C45 ندارد و این سیمان هم نتایج بسیار خوبی را برای کارپذیری نشان داده است. به طور کلی نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهند که سرباره به‌عنوان یک پوزولان مؤثر می‌تواند در بهبود ویژگی‌های مکانیکی کارپذیری و حرارتی بتن نقش اساسی ایفا کند. بر اساس نتایج بهترین عملکرد را سیمان C45 با جایگزینی ۴۵ درصد سرباره با سیمان داشته است که تاثیرات آن مشاهده شد. چنانچه بتنی با مقاومت دوام و کارپذیری بالا مورد نیاز باشد سیمان CM45-6 می‌تواند گزینه مناسبی باشد. توجه به این نتایج در طراحی و تولید بتن‌های با عملکرد بهتر و مقاومت بالاتر امری حائز اهمیت است.

#### ۵- تقدیر و تشکر

از شرکت فیدار بتن برای حمایت در به سرانجام رساندن این تحقیق صمیمانه تشکر می‌کنیم.

#### ۶- منابع

- [1] ACI Committee 207(2006). *Guide to Mass Concrete*; American Concrete Institute: Farmington Hills MI USA.
- [2] ACI Committee 207 (2007) . *Report on Thermal and Volume Change Effects on Cracking of Mass Concrete*; American Concrete Institute: Farmington Hills MI USA.
- [3] Batog M. & Giergiczny Z. (2017). *Influence of mass concrete constituents on its properties. Construction and Building Materials* 146 221-230.
- [4] Pane I. & Hansen W. (2008). *Investigation on key properties controlling early-age stress development of blended cement concrete. Cement and Concrete Research* 38(11) 1325-1335.
- [5] Zhou W. Feng C. Liu X. Liu S. Zhang C. & Yuan W. (2016). *Contrastive numerical investigations on thermo-structural behaviors in mass concrete with various cements. Materials* 9(5) 378.
- [6] Jędrzejewska A. Benboudjema F. Lacarriere L. Azenha M. Schlicke D. Dal Pont S. ... & Troyan V. (2018). *COST TU1404 benchmark on macroscopic modelling of concrete and concrete structures at early age: Proof-of-concept stage. Construction and Building Materials* 174 173-189.
- [7] Larosche C. J. (2009). *Types and causes of cracking in concrete structures. In Failure distress and repair of concrete structures (pp. 57-83). Woodhead Publishing.*
- [8] Gajda J. & Alsamsam E. (2006). *Engineering mass concrete structures. Structural Engineer* November.
- [9] Bamforth P. B. (2007). *Early-age thermal crack control in concrete (Vol. 660). Ciria.*
- [10] Riding K. A. Poole J. L. Schindler A. K. Juenger M. C. & Folliard K. J. (2006). *Evaluation of temperature prediction methods for mass concrete members. ACI Materials Journal* 103(5) 357-365.
- [11] Klemczak B. & Batog M. (2016). *Heat of hydration of low-clinker cements. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 123(2) 1351-1360.
- [12] Pacewska B. Blonkowski G. & Wilińska I. (2006). *Investigations of the influence of different*

*fly ashes on cement hydration. Journal of thermal analysis and calorimetry 86(1) 179-186.*

- [13] Rahmati, S., Tavakoli, E., & Fakhri, M. (2024). Impact of slag replacement with cement on durability and workability of self-compacting concrete. *Journal of Structural and Construction Engineering*
- [14] Tavakoli, E., & Fakhri, M. (2023). Durability and Performance Evaluation of Lightweight Self-Compacting Concrete Using Artificial and Natural Lightweight Aggregates in Sulfuric Acid Environment: An Experimental and Analytical Study. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 8(2), 1-16.
- [15] Bouzoubaa, N., Zhang, M. H., & Malhotra, V. M. (2001). Mechanical properties and durability of concrete made with high-volume fly ash blended cements using a coarse fly ash. *Cement and Concrete Research*, 31(10), 1393-1402.
- [16] Zhang, M.H., Swaddiwudhipong, S., Tay, K.Y.J., and Tam, C.T. (2008). Effect of silica fume on cement hydration and temperature rise of concrete in tropical environment. *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering M*, 1(2): 154-162.
- [17] Huang, C. H., Lin, S. K., Chang, C. S., & Chen, H. J. (2013). Mix proportions and mechanical properties of concrete containing very high-volume of Class F fly ash. *Construction and Building Materials*, 46, 71-78.
- [18] Ameri Kordiani, B., attarian, M., & Varastehpour, H. (2020). Study of replacement of Silica Fume & Taftan Pozzolan to Large hardened concrete properties. *Concrete Research*, 13(4), 123-136.
- [19] ACI 201.2R-16, (2000), "Guide to Durable Concrete", Reported by ACI Committee 201, USA: American Concrete Institute.
- [20] ACI 207.1R-05 (2012), "Guide to Mass Concrete", Reported by ACI Committee, USA: American Concrete Institute.
- [21] ASTM C 109/C 109M – 08, (2009), "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)", Copyright by ASTM Int'l, United States.
- [22] ASTM C 348 – 02, (2002), "Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars", Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.01, United States.
- [23] ASTM C 191 – 08, (2009), "Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle", Copyright by ASTM Int'l, United States.
- [24] ASTM C 151/C 151M – 09, (2009), "Standard Test Method for Autoclave Expansion of Hydraulic Cement", Gonnerman, H. F., Lerch, W. and Whiteside, T. M. , United States.
- [25] ASTM C 204 – 07, (2009), "Standard Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus", Copyright by ASTM Int'l, United States.
- [26] ASTM C 186 – 05, (2009), "Standard Test Method for Heat of Hydration of Hydraulic Cement", Copyright by ASTM Int'l, United States.