

Evaluation of Mechanical and Thermal Characteristics of Self-Compacting Alkali Activated and Cementitious Concrete

Shahriar Abdolazade¹, Mahmoud Nili^{2*}, Nikta Loghmani³

1. PhD, of Civil Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

2. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

3. PhD Candidate, Department of Civil Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

Received: 02 January 2024 Revised: 09 April 2024 Accepted: 26 May 2024

Research paper

Abstract

The development of novel concretes, such as self-compacting concrete, and employing new materials, including alkali activated slag and fly ash, seem necessary for environmental protection and sustainable development in infrastructure. In this study, alkali activated slag and fly ash are employed as an alternative eco-friendly binder to produce self-compacting concrete. Mechanical and thermal properties (using a semi-adiabatic calorimeter) of alkali activated- and cementitious-self compacting concretes with three binder contents (500–600–700 kg/m³) were compared. All mixes had a water-to-binder ratio of 0.45. The alkaline solutions used consist of sodium hydroxide and sodium silicate solutions with 5, 6, and 7% Na ions and a constant activator modulus (ratio of SiO₂/Na₂O) of one. The finding demonstrated that the workability of fresh self-compacting concrete with different binder content satisfied the EFNARC (European federation of national trade associations representing producers and applicators of specialist building products) limitation. Mixes with 700 kg/m³ binder content had the highest compressive and tensile strength and modulus of elasticity. Generally, the peak temperature and heat production of cementitious mixes were 14% and 56% more than those of alkali-activated mixes, respectively.

Keywords: Self-Compacting Alkali Activated Concrete, Modulus of Elasticity, Thermal Behavior, Slag, Fly Ash

*Corresponding Author: Mahmoud Nili

abdolazade, S., Nili, M., loghmani, N. Evaluation of Mechanical and Thermal Characteristics of Self-Compacting Alkali Activated and Cementitious Concrete. Journal of Concrete Structures and Materials, 2024; 9(1): 1-21.

<http://doi.org/10.30478/jcsm.2024.433445.1355>

2538-5828/ © 2024 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/>).

ارزیابی مشخصات مکانیکی و حرارتی بتن‌های خودتراکم حاوی چسباننده قلیافعال جایگزین سیمان

شهریار عبدالله‌زاده^۱، محمود نیلی^{۲*}، نیکتا لقمانی^۳

۱- دانش آموخته دکتری مهندسی عمران، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، ایران

۳- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، ایران

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m-nili@basu.ac.ir & nili36@yahoo.co.uk

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۲، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۲۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۶

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

امروزه بهره‌گیری از بتن‌های نوین مانند بتن‌های خودتراکم و به‌کارگیری مصالح جدید مانند سرباره و خاکستر بادی فعال شده، به‌منظور حفظ محیط‌زیست و توسعه پایدار در اجرای زیرساخت‌های بتنی ضروری به نظر می‌رسد. در پژوهش حاضر از چسباننده سرباره و خاکستر بادی قلیافعال به‌منظور ساخت بتن‌های خودتراکم بهره گرفته شده است. در سه مقدار مواد چسباننده ۵۰۰، ۶۰۰ و ۷۰۰ کیلوگرم در متر مکعب و نسبت ثابت آب به مواد چسباننده برابر با ۰/۴۵، مشخصات مکانیکی و رفتار حرارتی با گرماسنج نیمه‌آدیاباتی در بتن‌های خودتراکم قلیافعال و سیمانی ارزیابی گردیده‌اند. از محلول حاوی سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات با ۵، ۶ و ۷ درصد یون سدیم و مدول سیلیسی ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) برابر با یک برای فعال‌سازی سرباره و خاکستر بادی استفاده گردیده است. نتایج حاکی از آن است که کارایی بتن‌های خودتراکم تازه با تغییر چسباننده سیمانی به قلیافعال در محدوده مجاز بوده است. حداکثر مقاومت‌های فشاری و کششی و مدول ارتجاعی در طرح‌های حاوی ۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب مواد چسباننده و در طرح‌های قلیافعال بافعال‌ساز حاوی ۷ درصد یون سدیم حاصل شده است. پایش روند حرارت‌زایی نشان داده است که حداکثر دمای هیدراته‌شدن و میزان حرارت تولیدی طرح‌های سیمانی نسبت به طرح‌های قلیافعال به ترتیب ۱۴ و ۵۶ درصد بیشتر است.

کلمات کلیدی: بتن خودتراکم قلیافعال، مدول ارتجاعی، رفتار حرارتی، سرباره، خاکستر بادی

بتن به‌عنوان یکی از پرمصرف‌ترین مصالح مهندسی توسط جامعه بشری هم‌اکنون در سطح دنیا به کار می‌رود. طبق گزارش رسمی سایت انجمن جهانی تولید سیمان و بتن، در سال ۲۰۲۳ میلادی تولید سیمان در دنیا حدود ۴/۱ میلیارد تن و میزان استفاده از بتن در جهان حدود ۱۴ میلیارد مترمکعب بوده است. در راستای توسعه زیرساخت‌ها در سطح دنیا و کشور ایران، به‌عنوان یک کشور در حال توسعه، اجرای سازه‌های با ابعاد بزرگ و تراکم زیاد میلگرد مانند پایه و عرشه پل، ستون و شالوده حجیم سازه‌های مختلف، اجتناب‌ناپذیر است. در فرایند اجرای قطعات حجیم بتنی، حرارت‌زایی و روند کسب مشخصات مکانیکی حائز اهمیت است. روند حرارت‌زایی بتن شامل پنج مرحله‌ی آغاز هیدراسیون، دوره استراحت، دوره تسریع، دوره کاهش سرعت هیدراسیون و در نهایت دوره پایدار است (۲ و ۱). گزارش‌های متعدد از ترک‌خوردگی حرارتی قطعات بتنی در سنین اولیه اهمیت شناخت رفتار حرارتی بتن تازه را نشان می‌دهد (۳ و ۴). همچنین کسب مشخصات مکانیکی مطلوب و تأمین دوام لازم در سازه بتنی ارتباط مستقیمی با اجرای مناسب بتن مورد استفاده و تراکم کافی بتن تازه دارد.

استفاده از بتن خودتراکم به‌منظور اطمینان از اجرای بتن همگن به‌خصوص در قطعات بتن مسلح و تسهیل اجرای بتن‌ریزی برای اولین بار در سال ۱۹۸۸ توسط اوکامورا^۱ در ژاپن پیشنهاد گردیده است (۵). طبق تعریف ACI 237 (۶) بتن خودتراکم، بتنی با کارایی بالا و عدم جداشدگی است که می‌تواند در محل موردنظر ریخته شده، فضای درون قالب را پر کند و اطراف آرماتورهای اجراشده را بدون نیاز به تراکم مکانیکی در برگیرد. بتن خودتراکم دارای سه ویژگی اصلی قابلیت جریان، قابلیت عبور و مقاومت در برابر جداشدگی در حالت تازه است (۷). مشخصات بتن تازه و سخت شده بتن‌های خودتراکم به مصالح مورد استفاده و نسبت‌های اختلاط وابسته است (۸). بتن‌های خودتراکم مشخصات مکانیکی و حرارتی بهتری را در قطعات بتنی به‌دنبال دارند (۹ و ۱۰).

در ساخت بتن از جمله بتن‌های خودتراکم، سیمان به‌عنوان ماده اولیه چسباننده مورد استفاده است. مشکلات تولید گازهای گلخانه‌ای در فرایند تولید سیمان و صرف انرژی زیاد در تولید آن، محققین مختلف را بر آن داشته است تا به دنبال مصالحی جایگزین سیمان در بتن باشند. امروزه استفاده از سرباره، خاکستر بادی، دوده سیلیسی و خاکستر پوسته برنج به‌عنوان مواد زائد صنعتی در بتن با توجه مزایای محیط زیستی مورد توجه محققین و مهندسين قرار گرفته است (۱۱). با توجه به خصوصیات مناسب سرباره، می‌توان آن را جایگزین سیمان در ساخت بتن کرد. این امر از دیدگاه محیط‌زیستی بسیار مورد توجه جامعه جهانی قرار دارد (۱۲). اما جایگزینی بیش از حد سیمان با مواد مکمل سیمانی در بتن می‌تواند به دلیل عدم فعال‌شدن مواد مکمل سیمانی، موجب کاهش مشخصات مکانیکی بتن گردد. لذا فعال‌سازی مواد جایگزین سیمان در بتن‌های بدون سیمان ضروری است. پوردن^۲ (۱۳) در سال ۱۹۴۰ میلادی از طریق فعال‌سازی سرباره کوره بلند آهن‌گدازی به کمک محلول‌های قلیایی و آهک، چسباننده ای تولید کرد که سرعت کسب مقاومت و همچنین مقاومت نهایی مطلوبی داشت. گلوخوفسکی^۳ (۱۴) با توصیف خاک‌های سیلیکاتی مبانی نظری استفاده از مواد قلیافعال را پایه‌گذاری کرد. لازم به ذکر است که برخی محققین از اصطلاح ژئوپلیمر برای محصول آلومینوسیلیکات فعال‌شده استفاده می‌کنند. به‌طور کلی قلیافعال‌ها دامنه گسترده‌تری در تعریف را شامل می‌شوند. در بین محققین محصول نهایی قلیافعال با مواد اولیه آلومینوسیلیکاتی که Ca کمی داشته باشند ژئوپلیمر و با مواد اولیه‌ای مانند سرباره که Ca بیشتری داشته باشند معمولاً قلیافعال نامیده می‌شوند (۱۵).

¹ Okamura

² Purdon

³ Glukhovskiy

امروزه استفاده از بتن‌های قلیافعال با توجه به مشخصات مکانیکی و دوامی مشابه و حتی بهتر از بتن‌های معمولی از یکسو و کمک به حفظ محیط‌زیست با کاهش تولید کربن دی‌اکسید (CO_2)، در تحقیقات و پروژه‌های مختلفی مورد نظر قرار گرفته است (۲۱-۱۵). سرباره که محصول جانبی کارخانه‌های آهن‌گدازی است، دارای مقادیر قابل توجهی اکسیدهای سیلیس، آلومینیوم و کلسیم است؛ که منبع مناسبی برای تولید بتن‌های قلیافعال محسوب می‌گردد. نسبت CaO/SiO_2 از جمله مهم‌ترین شاخص‌ها در امکان‌پذیری فعال‌سازی سرباره است. محدوده مناسب CaO/SiO_2 سرباره بین ۰/۵ تا ۲ پیشنهاد شده است. همچنین کاهش Al_2O_3 موجب افزایش نرخ هیدراته‌شدن اولیه سرباره و کسب مقاومت فشاری اولیه بیشتر می‌گردد. محدوده مناسب Al_2O_3/SiO_2 بین ۰/۱ تا ۰/۶ عنوان شده است (۲۲ و ۲۳). در بین فعال‌سازهای مختلف، سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات نتایج مناسبی از نظر کسب مقاومت فشاری و دوام بتن‌های قلیافعال را به‌دنبال داشته‌اند (۲۴ و ۲۵).

امروزه استفاده از چسباننده‌های قلیافعال در ساخت بتن‌های خودتراکم نیز بیش از پیش مورد توجه محققین قرار گرفته است (۱۹ و ۲۶). کسب مقاومت فشاری تا ۹۰ مگاپاسکال و مدول ارتجاعی ۳۰ الی ۳۶ گیگاپاسکال در بتن‌های خودتراکم قلیافعال گزارش شده است (۲۶ و ۲۷). با توجه به گستردگی منابع آلومینوسیلیکاتی و تنوع فعال‌سازهای شیمیایی مورد استفاده در ساخت بتن‌های قلیافعال، بررسی مشخصات مکانیکی از جمله مقاومت‌های فشاری و کششی و مدول الاستیسیته برای بتن‌های در شرایط مختلف مورد توجه محققین بوده است (۲۴ و ۲۸). فعال‌ساز مبتنی بر سیلیکات سدیم و هیدروکسید سدیم، بهترین عملکرد را در توسعه مقاومت فشاری نشان داده‌اند (۲۹).

علاوه بر مشخصات مکانیکی بتن‌های قلیافعال، رفتار حرارتی این نوع بتن نیز در صورت استفاده در قطعات سازه‌ای با شرایط مرزی و ابعادی مختلف در عملکرد نهایی قطعه سازه‌ای تأثیرگذار است (۳۰). به‌طور کلی فعال‌سازی قلیایی مواد آلومینوسیلیکاتی واکنشی گرماده است (۳۱). فرآیند کلی حرارت‌زایی خمیر قلیافعال را می‌توان شبیه به سیمان پرتلند با لحاظ تفاوت‌هایی توصیف کرد (۳۲). لازم به ذکر است مدت زمان و چگونگی هر مرحله بسته به نوع ماده اولیه آلومینوسیلیکاتی و مواد فعال‌ساز متفاوت است. هیدراته‌شدن سرباره فعال‌شده با سدیم سیلیکات، در بین سرباره فعال‌شده با سدیم هیدروکسید، سدیم کربنات و یا سدیم سیلیکات به تغییر غلظت فعال‌کننده، دما و نسبت آب به سرباره، بیشترین حساسیت را دارد (۳۳). بررسی روند حرارت‌زایی مواد قلیافعال در تحقیقات مختلف صورت گرفته است (۳۲). نرخ توسعه حرارت و حرارت تولیدی سرباره قلیافعال در ۲۴ ساعت اول، می‌تواند از سیمان پرتلند پیشی بگیرد اما حرارت کل آن کمتر از مقدار سیمان پرتلند است (۳۴). اکثر تحقیقات رفتار حرارت‌زایی خمیر آلومینوسیلیکاتی قلیافعال را ارزیابی کرده و مطالعه رفتار حرارت‌زایی بتن قلیافعال کمتر مورد بررسی بوده است.

علیرغم وجود منابع فراوان آلومینوسیلیکاتی و لزوم توجه به حفظ محیط‌زیست، استفاده از بتن‌های خودتراکم قلیافعال در کشور، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. هدف از مقاله حاضر ارزیابی مشخصات بتن تازه، خصوصیات مکانیکی شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول ارتجاعی و مشخصات حرارتی بتن‌های خودتراکم ساخته شده از سرباره و خاکستر بادی قلیافعال در مقایسه با بتن‌های خودتراکم سیمانی متناظر با آن‌ها است.

۲- مواد و مصالح

از سیمان نوع دو کارخانه‌ی سیمان هگمتان همدان در طرح‌های سیمانی، استفاده شده است. برای ساخت بتن‌های قلیافعال نیز از سرباره کوره بلند آهن‌گدازی ذوب‌آهن اصفهان (سرباره) و همچنین از خاکستر بادی کلاس F بر اساس ASTM C618 (۳۵) محصول کشور آفریقای جنوبی استفاده گردیده است. مطابق با استاندارد ASTM C989 (۳۶) در آزمایشگاه شاخص فعالیت

پوزولانی ۷ و ۲۸ روزه سرپاره، درجه ۸۰ به دست آمده است. به منظور اصلاح خصوصیات بتن تازه و سخت شده بتن های قلیافعال، براساس نتایج حاصل از ساخت طرح های آزمایشی قبل از ساخت طرح های نهایی، خاکستر بادی به میزان ۱۵ درصد جایگزین سرپاره شده است. ذرات کروی شکل خاکستر بادی، کارایی بتن های خودتراکم قلیافعال را افزایش می دهد (۳۷). مشخصات شیمیایی و فیزیکی سرپاره، خاکستر بادی و سیمان مورد استفاده بر اساس اطلاعات شرکت های تولید کننده، در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ مشخصات شیمیایی و فیزیکی مصالح چسباننده

ترکیب شیمیایی	نام	سرپاره	خاکستر بادی	سیمان
CaO	اکسید کلسیم	37/77	0/79	62/95
SiO ₂	اکسید سیلیسیوم	37/94	62/86	21/27
Al ₂ O ₃	اکسید آلومینیوم	11/01	28/24	4/95
MgO	اکسید منیزیم	9/03	0/82	1/55
Fe ₂ O ₃	اکسید آهن	0/45	3/78	4/03
Na ₂ O	اکسید سدیم	0/63	1/13	0/49
K ₂ O	اکسید پتاسیم	0/66	0/13	0/65
SO ₃	اکسید گوگرد	0/26	.	2/62
.	افت ناشی از احتراق (LOI)	0/20	1/20	2/11
مشخصات فیزیکی	واحد			
سطح ویژه	سانتی متر مربع بر گرم	4200	2900	2950
چگالی	-	2/90	2/35	3/10

دو نسبت CaO/SiO_2 و Al_2O_3/SiO_2 در سرپاره مصرفی به ترتیب ۰/۹۹ و ۰/۲۹ است که برای فعال سازی قلیایی مناسب است (۲۲ و ۲۳). فعال سازی شیمیایی سرپاره و خاکستر بادی با مخلوطی از سدیم هیدروکسید (NaOH) محلول در آب و سدیم سیلیکات مایع (Na_2SiO_3) به عنوان محلول قلیایی، انجام گرفته است. ذرات پولکی شکل NaOH دارای خلوص ۹۹ درصدی و چگالی برابر با ۲/۱۳ گرم بر سانتی متر مکعب بوده اند (شکل ۱). Na_2SiO_3 مورد استفاده در فعال ساز، حاوی ($51H_2O + 43/6SiO_2 + 14/4Na_2O$)% و دارای چگالی ۱۵۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب بوده است. به منظور جلوگیری از گیرش سریع و آزاد سازی گرمای ناشی از انحلال، پولک های NaOH یک روز قبل از ساخت بتن، در آب حل شده اند. مدول فعال ساز (SiO_2/Na_2O)، در همه مخلوط های قلیافعال برابر ۱ بوده است.



شکل ۱ ذرات پولکی سدیم هیدروکسید

است. سه طرح مخلوط بتن خودتراکم قلیافعال (SCAAC^۴) و سه طرح مخلوط بتن خودتراکم سیمانی (SCC^۵) نظیر آن در سه مقدار ماده چسباننده (Binder) مختلف به منظور مقایسه اثر تغییر در نوع و مقدار چسباننده‌ها ساخته شده است. نسبت اجزای تشکیل دهنده هر دو نوع بتن به جز ماده چسباننده یکسان در نظر گرفته شده است. میزان یون سدیم محلول فعال ساز ۰/۰۱ درصد مقدار مواد چسباننده در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است بر اساس نتایج ساخت‌های آزمایشی محققین پژوهش حاضر و همچنین نتایج سایر محققین استفاده بیش از ۸ درصد یون سدیم در فعال‌ساز موجب شوره‌زدگی و کاهش دوام بتن‌های قلیافعال می‌گردد (۲۶).

مشخصات طرح‌های مخلوط در جدول ۳ نشان داده شده است. مقادیر تمام مواد تشکیل‌دهنده هر طرح مخلوط بر اساس روش حجم مطلق محاسبه و در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۳ مشخصات طرح‌های مخلوط بتن خودتراکم

افزودنی (%)	$\frac{C}{F}$	Na ₂ O (درصد وزنی)	$\frac{W}{B}$	Binder		طرح مخلوط
				(کیلوگرم بر مترمکعب)	نوع بتن براساس ماده چسباننده	
1/02	$\frac{25}{75}$	-	0/45	500	بتن خودتراکم سیمانی	SCC500
2	$\frac{25}{75}$	5	0/45	500	بتن خودتراکم قلیافعال	SCAAC500
1/02	$\frac{25}{75}$	-	0/45	600	بتن خودتراکم سیمانی	SCC600
2	$\frac{25}{75}$	6	0/45	600	بتن خودتراکم قلیافعال	SCAAC600
1/02	$\frac{25}{75}$	-	0/45	700	بتن خودتراکم سیمانی	SCC700
2	$\frac{25}{75}$	7	0/45	700	بتن خودتراکم قلیافعال	SCAAC700

جدول ۴ جزئیات طرح مخلوط بتن‌های خودتراکم سیمانی و قلیافعال (کیلوگرم در مترمکعب)

افزودنی	شن درشت	شن ریز	پودر سنگ	ماسه	آب	سدیم هیدروکسید	سدیم سیلیکات	خاکستر بادی	سرپاره	سیمان	طرح مخلوط
5	158	236	57	1091	225	-	-	-	-	500	SCC500
10	149	223	54	1026	188	18	72	75	425	-	SCAAC500
6	137	206	50	949	270	-	-	-	-	600	SCC600
12	125	187	45	863	217	27	104	90	510	-	SCAAC600
7	117	175	42	807	315	-	-	-	-	700	SCC700
14	101	151	37	698	243	36	142	105	595	-	SCAAC700

⁴ Self Compacting Alkali Activated Concrete (SCAAC)

⁵ Self Compacting Concrete (SCC)

۴- برنامه ساخت و آزمایش‌ها

برای تهیه مخلوط‌های بتن خودتراکم ابتدا سنگدانه‌ها و پودرسنگ به مدت سه دقیقه مخلوط و سپس سرباره و خاکسترآبی و با سیمان در طرح‌های سیمانی به آن اضافه و به مدت دو دقیقه دیگر مخلوط گردیده است. سپس آب، افزودنی و در طرح‌های قلیافعال، محلول قلیایی اضافه شده و حدود چهار دقیقه دیگر مخلوط کردن ادامه داشته است. آزمون‌های جریان اسلامپ (Slump flow)، زمان ۵۰ سانتی‌متر (T50) و حلقه جی (J-ring) براساس دستورالعمل موسسه اروپایی تحقیق بر روی مصالح بتن خودتراکم^۶ (۲۴) بر روی مخلوط‌های بتن خودتراکم تازه، انجام گرفته است. مخلوط‌ها از حیث جداسدگی بر اساس ASTM C1611 (۴۲) با شاخص ارزیابی چشمی^۷ (VSI) نیز کنترل گردیده‌اند. پس از ارزیابی بتن تازه، قالب‌گیری صورت گرفته است. برای تعیین خواص مکانیکی، از قالب‌های مکعبی ۱۰۰ میلی‌متری برای آزمایش مقاومت فشاری و از قالب‌های استوانه‌ای ۱۰۰×۲۰۰ میلی‌متر و ۱۵۰×۳۰۰ میلی‌متر به ترتیب برای تعیین مقاومت کششی دونیم‌شدن و مدول ارتجاعی استفاده گردیده است. نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج و در حوضچه آب در دمای 20±2 درجه سلسیوس، تا زمان انجام آزمایش‌ها نگهداری گردیده‌اند.

در این پژوهش به منظور محاسبه‌ی تولید حرارت هیدراسیون در بتن‌های مختلف، از یک محفظه‌ی نیمه آدیاباتیک به نام Hay-Box (شکل ۳)، یک دستگاه ثبت‌کننده‌ی نتایج (Data Logger) و نرم‌افزار مربوطه جهت ثبت دمای نمونه بتنی در هر لحظه استفاده شده است. محفظه نیمه آدیاباتیک، یک محفظه استوانه‌ای فلزی است که با مواد عایق، پوشانیده شده و از نظر حرارتی به‌طور نسبی عایق‌سازی شده است. زمانی که نمونه‌ی استوانه‌ای ۱۵۰×۳۰۰ میلی‌متری، مطابق با استاندارد تهیه و در درون محفظه قرار داده می‌شود، دمای بتن به علت تولید حرارت ناشی از واکنش‌های هیدراسیون افزایش پیدا می‌کند. تغییرات دمای نمونه‌ی بتنی، که تابعی از حرارت ناشی از هیدراسیون و هدرروی حرارتی از اطراف دستگاه است، توسط یک دماسنج اندازه‌گیری و ثبت می‌گردد. براساس رابطه HETEK (رابطه ۱) محاسبه تولید حرارت بتن براساس بلوغ و تاریخچه دمایی بتن امکان‌پذیر است (۴۳).

$$Q_M = Q_u \cdot \exp\left(-\left(\frac{T_e}{M}\right)^\alpha\right)$$

(رابطه ۱)

M: بلوغ بتن

Q_M : مقدار تولید حرارت بتن در بلوغ M

Q_u : تولید حرارت نهایی بتن

α و T_e : پارامترهای ثابتی هستند که از برازش منحنی تاریخچه حرارتی حاصل می‌گردند.



شکل ۳ محفظه نیمه آدیاباتیک سنجش حرارتی

^۶ EFNARC

^۷ Visual Segregation Index (VSI)

۵- نتایج، بحث و بررسی

۱-۵- نتایج بتن تازه

مشخصه‌های عبور، پرکردن و عدم جدادگی طرح‌های بتن خودتراکم قلیافعال و سیمانی نظیر آن‌ها مورد ارزیابی براساس EFNARC (۴۴) قرار گرفته و نتایج در جدول ۵ نشان داده شده است. طرح‌های مخلوط حاوی مواد چسباننده ۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب با مقدار ژل بیشتر، توزیع یکنواخت‌تری داشته و اختلاف ارتفاع در آزمایش حلقه جی در این طرح‌ها نسبت به طرح‌های حاوی ۵۰۰ و ۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب مواد چسباننده، کاهش یافته است.

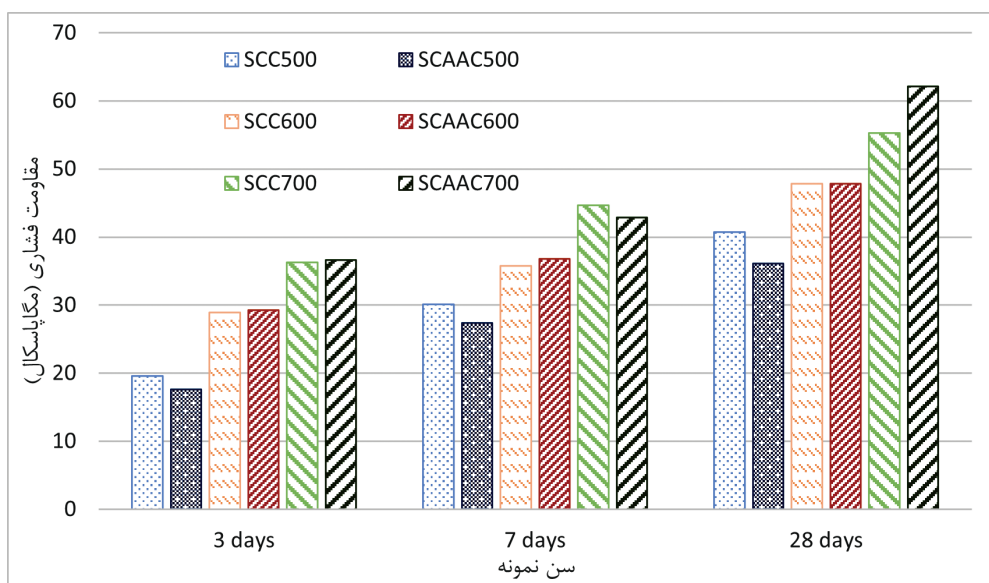
جدول ۵ خصوصیات بتن‌های خودتراکم در حالت تازه

وزن مخصوص تازه (کیلوگرم بر مترمکعب)	جدادگی		حلقه جی		جریان اسلامپ	
	VSI	اختلاف ارتفاع (میلی‌متر)	پخش شدگی (میلی‌متر)	T50 (ثانیه)	پخش شدگی (میلی‌متر)	طرح مخلوط
2288	0	7	686	7/3	698	SCC500
2245	0	8	657	2/3	672	SCAAC500
2237	0	7	690	6/3	705	SCC600
2184	0	5	667	3/4	689	SCAAC600
2178	0	3	689	2/3	704	SCC700
2126	0	4	671	8/2	711	SCAAC700
-	-	10-0	-	5-2	800-650	محدوده EFNARC

همان‌طور که از نتایج جدول ۵ مشخص است، تغییر چندانی در مشخصات بتن تازه خودتراکم با تغییر ماده چسباننده قلیافعال به سیمان رخ نداده است. با افزایش مقدار ماده چسباننده از ۵۰۰ به ۶۰۰ و ۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، میزان سنگ‌دانه کاهش یافته و موجب کاهش اختلاف ارتفاع در آزمون حلقه جی شده است. با توجه به وزن مخصوص کمتر سرباره، خاکستریادی و مواد فعال ساز، بتن‌های خودتراکم قلیافعال خمیر چسباننده با وزن مخصوص کمتری نسبت به طرح‌های بتن خودتراکم سیمانی دارند. کمتر بودن وزن مخصوص بتن‌های قلیافعال از بتن‌های سیمانی توسط سایر محققین نیز گزارش شده است (۱۹). در SCAAC استفاده از سدیم سیلیکات با توجه به تجزیه بیشتر ذرات سرباره و خاکستریادی، موجب چسبندگی بیشتر خمیر شده که می‌تواند عامل مهمی در جلوگیری از جدادگی نیز باشد.

۲-۵ مقاومت فشاری

آزمون مقاومت فشاری بتن‌های خودتراکم سیمانی و قلیافعال براساس BS-EN-12390 (۴۵) انجام و نتایج در شکل ۴ ارائه گردیده است. بیشترین مقاومت فشاری طرح‌های سیمانی و قلیافعال به ترتیب ۵۵/۳ و ۶۲/۱ مگاپاسکال بوده است.



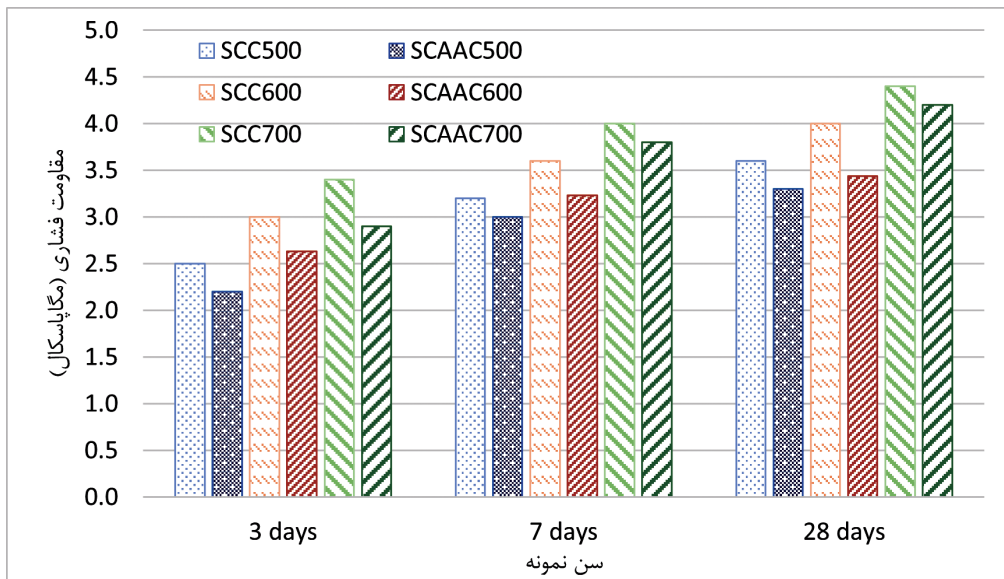
شکل ۴ نتایج مقاومت فشاری

بیشترین مقاومت فشاری در بین طرح‌های مخلوط در SCAAC700 با مقدار مواد چسباننده ۷۰۰ کیلوگرم در مترمکعب کسب گردیده است. کسب مقاومت فشاری در سن ۳ روز برای هر دو نوع بتن تقریباً یکسان است. در سن ۳ روز، SCAAC به‌طور متوسط ۵۶ درصد و SCC، ۵۷ درصد مقاومت فشاری نهایی خود را کسب کرده‌اند. نتایج حاکی از آن است که استفاده از مقدار مواد چسباننده بیشتر منجر به افزایش مقاومت فشاری نهایی طرح‌های SCAAC نسبت به طرح‌های SCC گردیده است. دلیل این افزایش در ریزساختار متراکم‌تر خمیر چسباننده قلیافعال نسبت به خمیر سیمانی است (۴۶). با ثابت بودن نسبت‌های مخلوط مانند آب به مواد چسباننده و نسبت مصالح سنگی، در SCAAC می‌توان با فعال‌سازی شیمیایی از ظرفیت بیشتر مواد آلومینوسیلیکاتی برای کسب مقاومت فشاری بهره گرفت؛ در حالی که در نسبت‌های ثابت اجزا مخلوط، سیمان دارای ظرفیت ثابتی در کسب مقاومت فشاری است. این رفتار از ویژگی‌های استفاده از بتن‌های خودتراکم قلیافعال است (۴۷ و ۲۶).

با افزایش مقدار مواد چسباننده از ۵۰۰ به ۶۰۰ و ۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب مقاومت فشاری ۲۸ روزه به ترتیب در طرح‌های سیمانی ۱۶/۵ و در طرح‌های قلیافعال ۳۱ درصد افزایش یافته است. این موضوع حاکی از امکان‌پذیری به کارگیری بتن‌های پرمقاومت در صورت استفاده از چسباننده‌های آلومینوسیلیکاتی قلیافعال است (۴۸ و ۱۹).

۳-۵ مقاومت کششی دونیم شدن

مقاومت کششی دونیم‌شدن طرح‌های مخلوط بر اساس ASTM C496 (۴۹) اندازه‌گیری و نتایج در شکل ۵ نشان داده شده است. از آنجا که عمده ترک‌خوردگی‌های سطحی در قطعات بتنی مربوط به مقاومت کششی ضعیف بتن است و بروز ترک‌خوردگی می‌تواند دوام و عمر مفید سازه را تهدید کند، لذا تمهیدات لازم به‌منظور افزایش مقاومت کششی بتن جهت افزایش عمر مفید سازه ضروری است (۵۰).



شکل ۵ نتایج مقاومت کششی دو نیم شدن

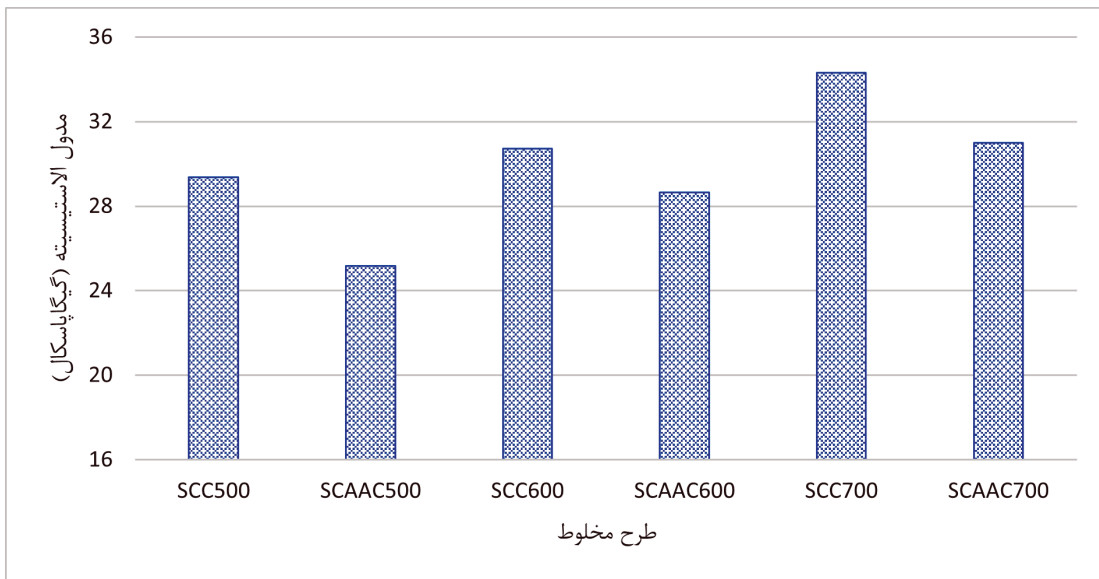
همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌گردد، بیشترین مقاومت کششی متعلق به طرح SCC700 بوده است. به‌طور متوسط رشد مقاومت کششی دو نیم شدن از سن ۳ تا ۲۸ روز در طرح‌های قلیا فعال و طرح‌های سیمانی به ترتیب ۴۲ و ۳۶ درصد است. در عمل‌آوری استاندارد، طرح‌های سیمانی ۱۰ درصد مقاومت کششی بیشتری را کسب نموده‌اند. البته کسب مقاومت کششی ۴/۲ مگاپاسکال در SCAAC700 حاکی از مقاومت کششی مناسبی است (۲۶ و ۱۷). باید توجه داشت که در طرح‌های SCAAC افزایش مقدار مواد چسباننده نمی‌تواند به‌تنهایی عاملی برای کسب مقاومت کششی بیشتر در بتن‌های خودتراکم قلیا فعال باشد. لذا برای فعال‌سازی سرباره و خاکستریادی، محیط قلیایی کافی باید در دسترس ذرات آلومینوسیلیکاتی باشد تا افزایش مشخصات مکانیکی، فراهم شود (۵۱).

۴-۵ مدول ارتجاعی

مدول ارتجاعی، مقاومت هر ماده در برابر تغییر شکل ارتجاعی می‌باشد که در طراحی سازه‌های بتنی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در پژوهش حاضر مدول ارتجاعی بتن‌های خودتراکم طبق استاندارد ASTM C469 (۵۲) بر اساس تنش و کرنش‌های ثبت شده مطابق رابطه ۲ محاسبه و در شکل ۶ ارائه شده است:

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0.0005} \quad (\text{رابطه ۲})$$

E مدول ارتجاعی، S_1 و S_2 به ترتیب تنش در محل کرنش ۰/۰۰۰۵ و تنش در محل ۴۰ درصد مقاومت نهایی و ε_2 مقدار کرنش در محل تنش S_2 است. در شکل ۷ نحوه قرارگیری کرنش سنج و قرارگیری آزمون بتنی نشان داده شده است.



شکل ۶ مدول ارتجاعی بتن‌های خودتراکم

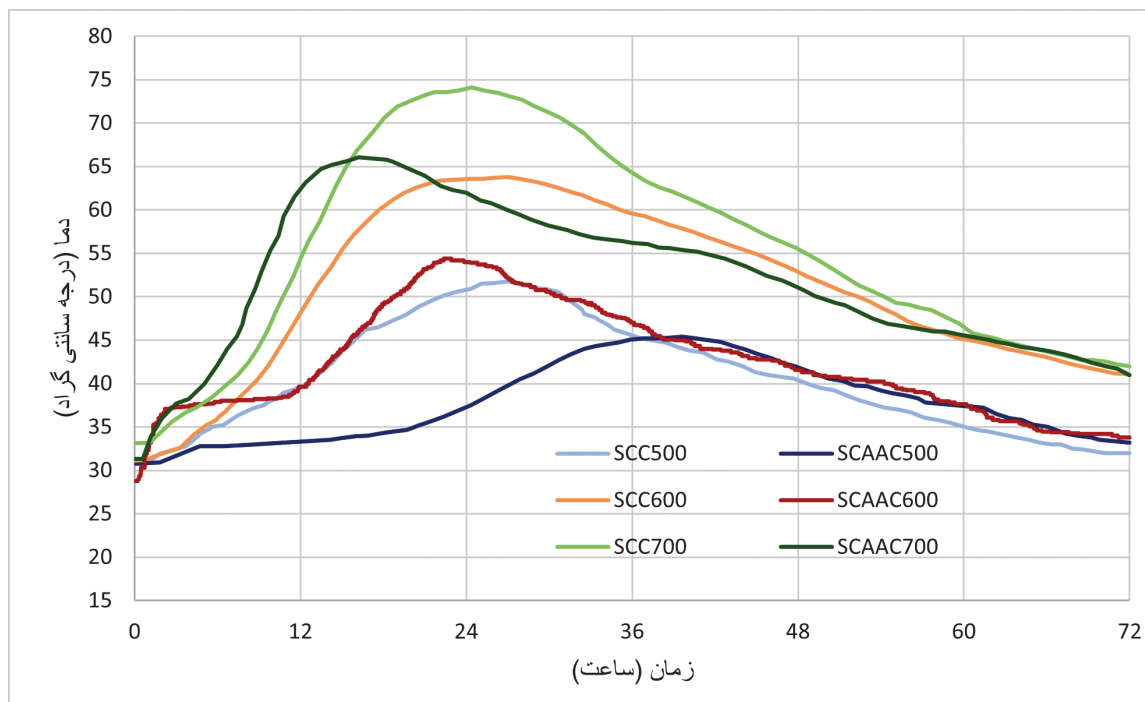
نتایج حاکی از آن است که به‌طور متوسط مدول ارتجاعی SCC حدود ۱۱ درصد بیش از SCAAC بوده است. کاهش مدول ارتجاعی بتن‌های قلیافعال نسبت به بتن‌های سیمانی در تحقیقات بسیاری مورد توجه محققین بوده است (۵۳، ۱۹ و ۵۴). مدول ارتجاعی کمتر در SCAAC حاکی از شکل‌پذیری بیشتر چسباننده قلیافعال نسبت به سیمان است. در ریزساختار چسباننده سیمانی عمده ترکیبات C-S-H است. در ترکیبات آلومینوسیلیکات قلیافعال اما عمده ترکیبات شامل C-A-S-H به همراه مقدار کمتری C-S-H است. مدول ارتجاعی C-A-S-H نسبت به C-S-H در نتایج سایر محققین کمتر گزارش شده است (۳۷ و ۵۵). لذا کاهش مدول ارتجاعی بخش چسباننده مخلوط بتن در SCAAC موجب کاهش مدول ارتجاعی آن نسبت به SCC شده است. افزایش مقدار مواد چسباننده از ۵۰۰ به ۶۰۰ و ۷۰۰ کیلوگرم در مترمکعب، در طرح‌های سیمانی به‌طور متوسط ۷/۵ درصد و در طرح‌های قلیافعال ۱۰/۵ درصد افزایش مدول ارتجاعی را به‌دنبال داشته است. لذا می‌توان با افزایش مواد چسباننده کمتر بودن مدول ارتجاعی در بتن‌های قلیافعال را نسبت به بتن‌های سیمانی تاحدی جبران نمود.



شکل ۷ انجام آزمایش مدول ارتجاعی

۵-۵ رفتار حرارتی

روند حرارت‌زایی ناشی از هیدراته‌شدن مواد چسباننده سیمانی و قلیافعال در طرح‌های مخلوط با استفاده از محفظه نیمه‌آدیباتیک پایش و در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸ تاریخچه دمایی بتن‌های خودتراکم

نتایج تاریخچه دمایی طرح‌های SCAAC وجود دو قله، یکی قبل از دوره استراحت و دیگری پس از این دوره را نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد استفاده از سدیم سیلیکات به‌عنوان فعال‌ساز دو نوع هیدرات سیلیکات کلسیم را ایجاد می‌کند. در سنین اولیه، سیلیکات تشکیل شده توسط فرایند چگالش یون‌های سیلیکات فعال‌ساز، با یون‌های Ca^{2+} سرباره در یک واکنش سریع تولید می‌شود. رسوب این سیلیکات باعث گیرش سریع خمیرهای قلیافعال شده با سدیم سیلیکات و پیدایش قله دوره پیش استراحت در منحنی‌های گرماسنجی می‌شود. در طرح‌های SCC روند تولید حرارت و افزایش دما از زمان اولیه یکنواخت ادامه داشته است. در طرح‌های SCC مقدار مواد چسباننده بر حداکثر دما تأثیر دارد، اما در زمان وقوع آن چندان تفاوتی ایجاد نکرده است. اما در طرح‌های SCAAC میزان مواد چسباننده و حجم خمیر هم در میزان افزایش دما و هم در زمان وقوع قله مؤثر است. همان‌گونه که مشخص است روند تولید حرارت، میزان حرارت تولیدی و شیب‌های صعود و نزول تاریخچه دمایی در طرح‌های مختلف، متفاوت‌اند. جدول ۶ مشخصات حرارتی طرح‌های مخلوط بتن خودتراکم را نشان داده است.

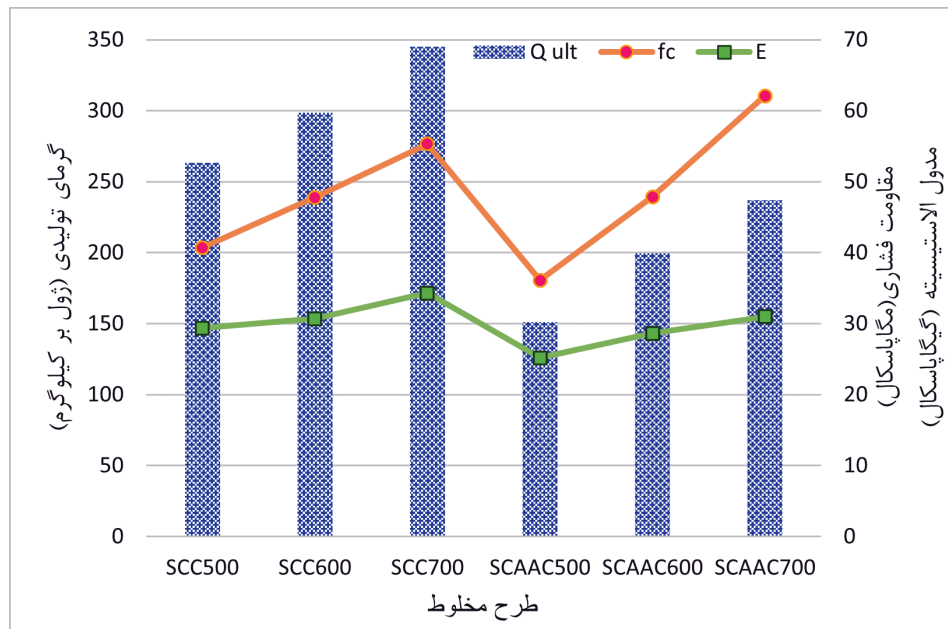
جدول ۶ مشخصات تاریخچه دمایی طرح‌های بتن خودتراکم سیمانی و قلیافعال نظیر

طرح مخلوط	دمای اولیه (°C)	دوره استراحت (ساعت)	شیب صعود	حداکثر دما (°C)	زمان رخداد حداکثر دما (ساعت)	خالص افزایش دما (°C)	حرارت تولیدی (ژول بر مترمکعب)
SCC500	7/30	<1	0/79	8/51	27	1/21	263/28
SCAAC500	8/30	16	0/53	4/45	39/6	14/6	151/19
SCC600	1/31	<1	1/25	63/8	27/1	32/7	298/64
SCAAC600	8/28	9	2/13	54/4	22/5	25/6	199/53
SCC700	1/33	<1	1/73	74/1	24/4	41/0	345/27
SCAAC700	3/31	1	2/27	66/1	16/2	8/34	237/06

همان‌گونه که در جدول ۶ مشاهده می‌گردد، زمان استراحت در SCC بسیار کمتر از SCAAC است. در دوره استراحت در SCC، افزایش دما در نمودار تاریخچه دمایی، حاکی از سرعت واکنش بیشتر در این بازه نسبت به SCAAC است. اما شیب صعودی نمودار در SCAAC پس از دوره استراحت به خصوص در مقدار مواد چسباننده بیشتر، مشهود است.

همچنین در SCAAC زمان رسیدن به حداکثر دما کمتر از SCC است. با افزایش مقدار مواد چسباننده در SCAAC زمان رسیدن به حداکثر دما نیز کاهش یافته است. سرعت واکنش‌های بیشتر در SCAAC با تولید حرارت در سنین اولیه همراه بوده است. با افزایش مقدار مواد چسباننده در هر دو طرح سیمانی و قلیافعال نظیر آن‌ها تقریباً به یک اندازه حداکثر دما افزایش پیدا کرده است. افزایش مقدار مواد چسباننده از ۵۰۰ به ۶۰۰ و سپس ۷۰۰ کیلوگرم در متر مکعب در طرح‌های سیمانی به ترتیب ۱۱/۶ و ۸/۳ درجه سلسیوس افزایش دما را به دنبال داشته است. این میزان در طرح‌های قلیافعال ۱۱ و ۹/۲ درجه سلسیوس بوده است. لذا می‌توان بیان داشت در صورت نیاز به افزایش مقدار مواد چسباننده در بتن خودتراکم به دلیل کسب خصوصیات مکانیکی برتر، چسباننده قلیافعال با کسب مقاومت‌های بیشتر، میزان حرارت تولیدی و دمای کمتری را در قطعه بتنی ایجاد می‌کند.

با افزایش مقدار مواد چسباننده حرارت تولیدی SCC از نمونه‌های بتن قلیا فعال بیشتر می‌شود. طرح‌های سیمانی به‌طور میانگین بیش از ۵۶ درصد تولید حرارت بیشتر و بیش از ۱۴ درصد حداکثر دمای بیشتری را نسبت به طرح‌های قلیافعال تجربه نموده اند. با افزایش مقدار مواد چسباننده در SCAAC شیب صعود و نرخ تولید حرارت نسبت به SCC بیشتر گردیده است. این امر حاکی از سرعت بیشتر تجزیه مواد آلومینوسیلیکاتی و تشکیل سریع‌تر خمیر C-A-S-H و C-S-H در SCAAC است که بر کسب مقاومت فشاری اولیه این طرح‌های مخلوط نیز موثر بوده است. در شکل ۹ نمودار ترکیبی از مشخصات مکانیکی و میزان حرارت تولیدی بتن‌های خودتراکم نشان داده شده است.



شکل ۹ نمودار ترکیبی مشخصات مکانیکی حرارتی بتن‌های خودتراکم

از نظر مشخصات خودتراکمی هر دو نوع بتن خودتراکم با چسباننده قلیافعال و سیمان با توجه به افتان محدودده‌های EFNARC (۴۴)، امکان اجرا در قطعات حجیم بتنی با تراکم زیاد آرماتور را دارند. همچنین در بتن‌های خودتراکم قلیافعال با افزایش مقدار مواد چسباننده در راستای تولید بتن‌های با مشخصات مکانیکی مطلوب‌تر، کارایی دچار تغییر محسوسی نگردیده است. با توجه به نتایج شکل ۹، نیز می‌توان بیان داشت که استفاده از SCAAC با حرارت‌زایی کمتر می‌تواند در اجرای قطعات حجیم بتنی مورد توجه باشد. طرح‌های SCAAC با مقدار مواد چسباننده ۶۰۰ و ۷۰۰ کیلوگرم در متر مکعب، نسبت به طرح‌های SCC متناظر، علاوه بر تولید حرارت کمتر، مقاومت فشاری بیشتری را به دنبال داشته‌اند. مدول ارتجاعی طرح‌های قلیافعال در مقایسه با طرح‌های سیمانی کمتر بوده که در گزارش سایر محققین نیز بدان اشاره شده است (۵۶). البته کسب مدول ارتجاعی حدود ۳۰ گیگاپاسکال پاسخگوی نیازهای طراحی سازه در عمده قطعات بتنی است که در SCAAC600 و SCAAC700 نیز بدست آمده است. روند تغییرات مدول الاستیسیته با تغییر در مقاومت فشاری در بتن‌های قلیافعال نسبت به بتن‌های معمولی متفاوت است که در نتایج سایر محققین نیز بدان اشاره شده است (۵۶ و ۵۷). با افزایش میزان مواد چسباننده از ۵۰۰ به ۶۰۰ و ۷۰۰ کیلوگرم در متر مکعب در هر دو نوع بتن گرچه روند کسب مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته صعودی است، اما نرخ تغییرات مقاومت فشاری بیش از نرخ تغییرات مدول الاستیسیته است و این امر در طرح‌های SCAAC بارزتر از طرح‌های SCC است. در ماتریس بتن‌های SCAAC تشکیل ریزترک‌ها بر تفاوت روند تغییرات مدول الاستیسیته نسبت به مقاومت فشاری اثرگذار بوده و در مقاومت‌های فشاری زیادتر این اثرگذاری تشدید نیز می‌گردد (۵۸).

۶. نتیجه‌گیری

به‌کارگیری بتن‌های قلیافعال در قطعات سازه‌ای نیازمند داشتن اطلاعاتی از مشخصات و رفتار این نوع بتن است. در کنار مشخصات مکانیکی، رفتار حرارتی به خصوص در سنین اولیه نیز مشخصه مهمی در بتن‌های قلیافعال است. در اجرای قطعات بتنی با مقدار مواد

چسباننده زیاد و یا با ابعاد بزرگ حرارت تولیدی می‌تواند بر مشخصات مکانیکی و دوام قطعه بتنی اثر منفی بگذارد. در این مقاله از چسباننده قلیافعال به جای سیمان در ساخت بتن‌های خودتراکم به منظور نیل به اهداف توسعه پایدار و کمک به حفظ محیط‌زیست با کاهش تولید کربن‌دی‌اکسید استفاده شده است. نتیجه‌گیری کلی حاصل از این پژوهش به شرح ذیل است:

- کلیه طرح‌های مخلوط مورد بررسی شرایط لازم برای تأمین مشخصات کارایی بتن خودتراکم را دارا بوده‌اند. لذا استفاده از بتن‌های خودتراکم قلیافعال در قطعات بتنی با چیدمان متراکم آرماتور نیز امکان‌پذیر است.
- با افزایش میزان مواد چسباننده از ۵۰۰ به ۶۰۰ و ۷۰۰ کیلوگرم در مترمکعب، مدول ارتجاعی و مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح‌های سیمانی به ترتیب ۷/۵ و ۱۶/۵ درصد افزایش یافته است؛ درحالی‌که در طرح‌های قلیافعال افزایش مدول ارتجاعی و مقاومت فشاری ۲۸ روزه به ترتیب ۱۰/۵ و ۳۱ درصد است. لذا افزایش مقدار مواد چسباننده در بتن‌های خودتراکم قلیافعال کسب مشخصات مکانیکی بیشتری را نسبت به بتن‌های خودتراکم سیمانی به همراه داشته است.
- مقاومت کششی دونیم شدن بتن‌های خودتراکم سیمانی حدود ۱۰ درصد بیش از بتن‌های قلیافعال است. البته کسب مقاومت کششی ۴/۲ مگاپاسکال در بتن خودتراکم قلیافعال در محدوده مقاومت کششی مناسب سازه‌ای قرار می‌گیرد.
- نتایج تاریخچه دمایی نیمه‌آدیاباتیکی نشان داده است که بتن‌های خودتراکم سیمانی بیش از ۵۶ درصد حرارت‌زایی بیشتر و بیش از ۱۴ درصد حداکثر دمای بیشتری را نسبت به طرح‌های قلیافعال تولید کرده‌اند.
- نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که بتن‌های خودتراکم قلیافعال علاوه بر کمک به حفظ محیط‌زیست، با داشتن مشخصه‌های مناسب بتن تازه و سخت شده و همچنین دارا بودن روند حرارت‌زایی مطلوب می‌تواند به‌عنوان گزینه مناسبی برای جایگزینی بتن‌های خودتراکم سیمانی در اجرای سازه‌های بتنی مورد توجه قرار گیرد.

قدردانی

کلیه مراحل پژوهش حاضر در آزمایشگاه تحقیقاتی بتن و مواد سازه‌ای دانشگاه بوعلی سینا صورت گرفته است. بدین‌وسیله از همکاری و حمایت آن مجموعه محترم کمال تشکر و قدردانی را داریم.

مراجع

- [1] John, E., & Lothenbach, B. (2023). *Cement hydration mechanisms through time—a review*. *Journal of Materials Science*, 58(24), 9805-9833.
- [2] Kim, S. G. (2010). *Effect Of Heat Generation From Cement Hydration On Mass Concrete*.
- [3] Bilcik, J., Sonnenschein, R., & Holly, I. (2018). *Causes of and responsibilities for an excessive amount of leaking cracks in a massive concrete mat foundation*. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 32(2), 04017134.
- [4] Liu, S., & Yin, Z. (2021). *Study on temperature control and crack resistance of mass concrete anchorage in suspension bridge*. *Vibroengineering Procedia*, 38, 124-128.
- [5] Okamura, H., Ouchi, M., Hibino, M., Ozawa, K., (1998). *A rational mix-design method for mortar in self-compacting concrete*. In the 6th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Taipei, ROC, 2, pp. 1307-1312.
- [6] Commitee, A. C. I. 237 (2007). *“Self-Consolidating Concrete”*. ACI 237-07. ACI Manual of Concrete Practice, Detroit, MI, USA.

- [7] EFNARC, F. (2002). *Specification and guidelines for self-compacting concrete. European federation of specialist construction chemicals and concrete system.*
- [8] Ling, G., Shui, Z., Sun, T., Gao, X., Wang, Y., Sun, Y., ... & Li, Z. (2018). Rheological behavior and microstructure characteristics of SCC incorporating metakaolin and silica fume. *Materials*, 11(12), 2576.
- [9] Huseien, G. F., & Shah, K. W. (2020). Durability and life cycle evaluation of self-compacting concrete containing fly ash as GBFS replacement with alkali activation. *Construction and Building Materials*, 235, 117458.
- [10] Ghorbankhani, A. H., & Nili, M. (2022). Experimental and numerical assessment of thermal properties of self-compacting mass concrete at early ages. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(16), 8194-8211
- [11] Moradi, N., Tavana, M. H., Habibi, M. R., Amiri, M., Moradi, M. J., & Farhangi, V. (2022). Predicting the compressive strength of concrete containing binary supplementary cementitious material using machine learning approach. *Materials*, 15(15), 5336.
- [12] Hassan, A., Arif, M., & Shariq, M. (2019). Use of geopolymer concrete for a cleaner and sustainable environment—A review of mechanical properties and microstructure. *Journal of cleaner production*, 223, 704-728.
- [13] Purdon, A. O. (1940). The action of alkalis on blast-furnace slag. *Journal of the Society of Chemical Industry*, 59(9), 191-202.
- [14] Glukhovskiy, V. D. (1965). *Soil silicates: their properties, technology and manufacturing and fields of application. DTech. Sc (Doctoral dissertation, Thesis, Civil Engineering Institute, Kiev, Ukraine).*
- [15] Gökçe, H. S., Tuyan, M., & Nehdi, M. L. (2021). Alkali-activated and geopolymer materials developed using innovative manufacturing techniques: A critical review. *Construction and Building Materials*, 303, 124483.
- [16] Srividya, T., PR, K. R., Sivasakthi, M., Sujitha, A., & Jeyalakshmi, R. (2022). A state-of-the-art on development of geopolymer concrete and its field applications. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00812.
- [17] Manjunath, R., & Narasimhan, M. C. (2018). An experimental investigation on self-compacting alkali activated slag concrete mixes. *Journal of Building Engineering*, 17, 1-12.
- [18] Shobeiri, V., Bennett, B., Xie, T., & Visintin, P. (2021). A comprehensive assessment of the global warming potential of geopolymer concrete. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126669.
- [19] Rahman, S. K., & Al-Ameri, R. (2021). A newly developed self-compacting geopolymer concrete under ambient condition. *Construction and Building Materials*, 267, 121822.
- [20] Kanaan, D., Safhi, A. E. M., Suleiman, A. R., & Soliman, A. M. (2023). Fresh, hardened, and microstructural properties of ambient cured one-part alkali-activated self-consolidating concrete. *Sustainability*, 15(3), 2451.
- [21] Collins, F. G., & Sanjayan, J. G. (1999). Workability and mechanical properties of alkali activated slag concrete. *Cement and concrete research*, 29(3), 455-458.
- [22] Haha, M. B., Lothenbach, B., Le Saout, G., & Winnefeld, F. (2012). Influence of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag—Part II: Effect of Al₂O₃. *Cement and Concrete Research*, 42(1), 74-83.

- [23] Winnefeld, F., Ben Haha, M., Le Saout, G., Coştoya, M., Ko, S. C., & Lothenbach, B. (2015). Influence of slag composition on the hydration of alkali-activated slags. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 4(2), 85-100.
- [24] Talkeri, A., & Shankar, A. R. (2022). Alkali activated slag-fly ash concrete incorporating precious slag as fine aggregate for rigid pavements. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 9(1), 78-92.
- [25] Nagaraj, V. K., & Venkatesh Babu, D. L. (2018). Effect and influence of fly ash and GGBS on properties of ambient cured self-compacting geopolymer concrete for in situ applications. In *International Conference on Sustainable Engineering and Technology (Vol. 2039, No. 1, p. 020064)*.
- [26] Manjunath, R., Narasimhan, M. C., Umesh, K. M., Kumar, S., & Bharathi, U. B. (2019). Studies on development of high performance, self-compacting alkali activated slag concrete mixes using industrial wastes. *Construction and Building Materials*, 198, 133-147.
- [27] Luukkonen, T., Abdollahnejad, Z., Yliniemi, J., Kinnunen, P., & Illikainen, M. (2018). One-part alkali-activated materials: A review. *Cement and Concrete Research*, 103, 21-34.
- [28] Wang, W., Fan, C., Wang, B., Zhang, X., & Liu, Z. (2023). Workability, rheology, and geopolymerization of fly ash geopolymer: Role of alkali content, modulus, and water–binder ratio. *Construction and Building Materials*, 367, 130357.
- [29] Chang, J. J. (2003). A study on the setting characteristics of sodium silicate-activated slag pastes. *Cement and Concrete Research*, 33(7), 1005-1011.
- [30] Bayat, A., Hassani, A., & Azami, O. (2020). Thermo-mechanical properties of alkali-activated slag–Red mud concrete. *Road Materials and Pavement Design*, 21(2), 411-433.
- [31] Huanhai, Z., Xuequan, W., Zhongzi, X., & Mingshu, T. (1993). Kinetic study on hydration of alkali-activated slag. *Cement and Concrete Research*, 23(6), 1253-1258.
- [32] Ma, H., Fu, C., Huang, K., Dai, E., Zhang, S., Fang, Y., & Feng, J. (2023). Study on the characteristics of alkali-activated fly ash-slag improved by cenosphere: Hydration and drying shrinkage. *Construction and Building Materials*, 372, 130822.
- [33] Li, N., Shi, C., Zhang, Z., Wang, H., & Liu, Y. (2019). A review on mixture design methods for geopolymer concrete. *Composites Part B: Engineering*, 178, 107490.
- [34] Kumarappa, D. B., Peethamparan, S., & Ngami, M. (2018). Autogenous shrinkage of alkali activated slag mortars: Basic mechanisms and mitigation methods. *Cement and Concrete Research*, 109, 1-9.
- [35] ASTM C618. (2012). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. American Society for Testing and Materials.
- [36] ASTM, C989. (2014). *Standard specification for slag cement for use in concrete and mortars*. Pennsylvania, USA: American Society for Testing and Materials.
- [37] Guo, X., Shi, H., & Dick, W. A. (2010). Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer. *Cement and concrete composites*, 32(2), 142-147.
- [38] ASTM C33. (2007). *Standard specification for concrete aggregates*. American Society for Testing and Materials.
- [39] ASTM C127. (2022). *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate*.
- [40] ASTM C128. (2022). *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity),*

and Absorption of Fine Aggregate.

- [41] ASTM C403. (2008). *Standard test method for time of setting of concrete mixtures by penetration resistance*. American Society for Testing and Materials.
- [42] ASTM C1611. (2018). *Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete*, American Society for Testing and Materials.
- [43] NT BUILD 388. (2003). *Concrete: Heat Development, "Nordtest Method*.
- [44] EFNARC, F. (2002). *Specification and guidelines for self-compacting concrete*. European federation of specialist construction chemicals and concrete system.
- [45] EN, B. (2000). 12390-4. *Testing hardened concrete—part 4: compressive strength—specification for testing machines*. British Standard Specification.
- [46] Wan, X., Hou, D., Zhao, T., & Wang, L. (2017). *Insights on molecular structure and micro-properties of alkali-activated slag materials: A reactive molecular dynamics study*. *Construction and Building Materials*, 139, 430-437.
- [47] Abdolazhade, S., & Nili, M. (2023). *Assessing the engineering properties of massive self-compacting geopolymer concretes utilising the Taguchi method*. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1-25.
- [48] Abdolazhade, S., & Nili, M. (2022). *An investigation on Engineering properties of Self-Compacting Geopolymer Concrete by Taguchi Method*. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 7(2), 213-228.
- [49] ASTM C496. (2004). *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. American Society for Testing and Materials.
- [50] Tankasala, A., & Schindler, A. K. (2020). *Early-age cracking of lightweight mass concrete*. *ACI Materials Journal*, 117(1), 223-232.
- [51] Fang, G., Ho, W. K., Tu, W., & Zhang, M. (2018). *Workability and mechanical properties of alkali-activated fly ash-slag concrete cured at ambient temperature*. *Construction and Building Materials*, 172, 476-487.
- [52] ASTM C469. (2002). *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson Ratio of Concrete in Compression*. American Society for Testing and Materials.
- [53] Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., & Criado, M. (2006). *Alkali activated fly ash binders. A comparative study between sodium and potassium activators*. *Materiales de Construcción*, 56(281)51.
- [54] Rossi, L., Patel, R. A., & Dehn, F. (2023). *Compressive behaviour of alkali-activated slag-based concrete and Portland cement concrete incorporating novel multiple hooked-end steel fibres*. *Materials and Structures*, 56(5), 96.
- [55] Fernandez-Jimenez, A. M., Palomo, A., & Lopez-Hombrados, C. (2006). *Engineering properties of alkali-activated fly ash concrete*. *ACI Materials Journal*, 103(2), 106.
- [56] Ding, Y., Dai, J. G., & Shi, C. J. (2016). *Mechanical properties of alkali-activated concrete: A state-of-the-art review*. *Construction and Building Materials*, 127, 68-79.
- [57] Thomas, R. J., & Peethamparan, S. (2015). *Alkali-activated concrete: Engineering properties and stress-strain behavior*. *Construction and building materials*, 93, 49-56.
- [58] Collins, F., & Sanjayan, J. G. (2001). *Microcracking and strength development of alkali activated slag concrete*. *Cement and Concrete Composites*, 23(4-5), 345-352.