



## بررسی مقاومت فشاری و کاهش وزن در بتن قلیافعال حاوی سرباره کوره آهنگدازی دوستدار محیط زیست، تحت حرارت بالا

محمدحسین منصورقناعی<sup>\*</sup>

۱- دکتری تخصصی مهندسی عمران سازه، گروه مهندسی عمران، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: پژوهشی	حفظ محیط زیست نقش موثری در سلامت انسان ها ایفاء می کند. در این راستا در دهه های اخیر، بتن قلیافعال به منظور برتری خواص مکانیکی و دوام و رفع معایب محیط زیستی (ناشی از تولید گاز سمی دی اکسید کربن) در فرایند تولید بتن معمولی، مورد توجه دانشمندان حوزه مهندسی عمران قرار گرفت. در این پژوهش آزمایشگاهی، یک طرح مخلوط از بتن معمولی حاوی سیمان پرتلند با عیار ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و یک طرح مخلوط از بتن قلیافعال بر پایه سرباره کوره آهنگدازی ساخته شد. به منظور بررسی خواص مکانیکی و دوام، آزمون های مقاومت فشاری و کاهش وزن بتن تحت دمای ۲۱ و ۶۰۰ درجه سلسیوس در سن عمل آوری ۹۰ روزه در بتن انجام گرفت. اعمال حرارت بالا در نمونه های بتنی موجب افت نتایج آزمون مقاومت فشاری در بتن معمولی و بتن قلیافعال به ترتیب به میزان ۴۲/۳۱ و ۱۴/۹ درصد شد و در آزمون کاهش وزن، به ترتیب به میزان ۰/۰۰۶۷ و ۰/۰۰۶۴ درصد افت وزن در بتن معمولی و بتن قلیافعال کسب شد. بتن قلیافعال در آزمون مقاومت فشاری تحت دمای ۲۱ و ۶۰۰ درجه سلسیوس، به میزان ۱۱/۴۱ و ۶۴/۳۵ درصد برتری را نسبت به بتن معمولی از خود نشان داد. نتایج حاصل از آنالیز تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی از بتن، در هماهنگی و همپوشانی با نتایج سایر آزمون ها در این پژوهش قرار گرفت.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۲	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۵	
دسترسی آنلاین: ۱۴۰۲/۰۵/۱۰	
کلید واژه ها: بتن معمولی، بتن قلیافعال، مقاومت فشاری، کاهش وزن، میکروسکوپ الکترونی روبشی.	



## Investigating the Compressive Strength and Weight Loss in Activated Alkali Concrete Containing Blast Furnace Slag, Environment-Friendly Casting, Under High Temperature

Mohammadhossein Mansourghanaei\*<sup>1</sup>

1- PhD in Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Chalous Branch, Chalous, Iran.

### Article Info

### Abstract

**Article type:**  
Research Article

**Article history:**  
**Received:**  
22/01/2022

**Accepted:**  
16/07/2023

**Available online:**  
01/08/2023

**Keywords:**  
Ordinary concrete,  
Activated alkaline  
concrete,  
Compressive  
strength,  
Weight loss,  
Scanning electron  
microscope.

Environmental protection plays an effective role in human health. In this regard, in recent decades, activated alkali concrete has been considered by civil engineering researchers in order to excel mechanical properties and durability and eliminate environmental disadvantages (arising from production of toxic carbon dioxide) in ordinary concrete production process. In this laboratory study, a mixing plan was made of ordinary concrete containing Portland cement with a grade of 500 kg/m<sup>3</sup> and a mixing plan was made of alkaline concrete based on slag from a composing furnace. In order to evaluate the mechanical properties and durability, compressive strength and weight reduction tests of concrete were performed at 21 and 600 °C at the curing age of 90 days in concrete. Applying high heat in concrete samples caused a decrease in the results of compressive strength test in ordinary concrete and reinforced concrete by 42.31% and 14.9%, respectively, and in weight loss test by 0.0067 and 0.0064%, weight loss was achieved in ordinary concrete and activated alkaline concrete, respectively. Activated alkaline concrete in the compressive strength test at 21 and 600 °C, showed an advantage of 11.41 and 64.35 percent compared to ordinary concrete. The results of scanning electron microscopy imaging test were in coordination with the results of other tests in this study.

\* Corresponding author E-mail address: [Mhm.Ghanaei@iauc.ac.ir](mailto:Mhm.Ghanaei@iauc.ac.ir)

## مقدمه

تولید سیمان همواره همراه با مصرف بالای منابع معدنی است، از طرفی کارخانه‌های تولیدکننده سیمان مقادیر زیادی از سوخت‌های فسیلی را مصرف می‌کنند که منتج به تولید گاز سمی دی‌اکسیدکربن<sup>۱</sup> در جو و بروز مشکلات محیط‌زیستی می‌شود (Mansourghanaei<sup>۱</sup>) (Mansourghanaei and et al., 2022; Mansourghanaei and et al., 2022)<sup>۲</sup>. به‌طوری‌که تحقیقات نشان می‌دهد که کارخانه‌های تولیدکننده سیمان، مسئول انتشار حدود ۵ درصد از کل دی‌اکسیدکربن وارد شده به جو کره زمین هستند (Nosrati and et al., 2018). خواص مکانیکی و دوام پایین در بتن معمولی از معایب دیگر این نوع از بتن است، این موضوع دانشمندان را به فکر یافتن ماده‌ای با خواص چسبندگی و پرکنندگی بالا، به‌عنوان جایگزین سیمان در بتن، سوق داد. در این راستا، به‌کارگیری از مواد با خصوصیات قلیایی مانند سرباره کوره-آهنگدازی به‌عنوان جایگزین سیمان، در دستور کار محققین حوزه تولید بتن قرار گرفت. تحقیقات سایرین نشان داده است که، استفاده از سرباره کوره‌آهنگدازی به‌جای سیمان می‌تواند مقاومت بتن را بهبود ببخشد و تقاضای فزاینده برای استفاده از سیمان در بتن را کاهش دهد (Mansourghanaei and et al., 2022; Siddique and Kaur., 2012; Yüksel and et al., 2011)<sup>۳</sup>. تحقیقات نشان داده است که سرباره کوره‌آهنگدازی متشکل از سیلیکات کلسیم و آلومینات، الزامات مربوط به مواد پوزولانی را برآورده می‌سازد (Mansourghanaei<sup>۴</sup>) (Mansourghanaei and et al., 2022; Huseien and et al., 2018)<sup>۵</sup>. فعال‌سازی سرباره کوره‌آهنگدازی با محلول قلیافعال برای تولید بتن قلیافعال سرباره‌ای در چند دهه گذشته مورد مطالعه فراوان قرار گرفته است (Mansourghanaei and et al., 2022; Allahverdi and et al., 2011)<sup>۶</sup>. به‌کارگیری از خاکستر بادی، متاکائولن، سرباره کوره-آهنگدازی و سایر پوزولان‌ها به‌عنوان جایگزین‌های مناسب سیمان در بتن، در سایر تحقیقات نیز گزارش شده است (Nuaklong and et al., 2016; Singh and et al., 2015; Zhuang and et al., 2016). مطالعات نشان داده است که محصولات حاصل از فرآیند ژئوپلیمریزاسیون مزایای ویژه‌ای از قبیل خواص مکانیکی عالی، مقاومت مناسب در برابر دمای بالا و حملات شیمیایی، جمع‌شدگی کم و دیگر موارد دارند (Yunsheng and et al., 2010). ساختار بتن قلیافعال در ابتدا توسط محقق فرانسوی بنام ژوزف داویدوویتس<sup>۲</sup> در سال ۱۹۷۲ میلادی مطرح شد (Davidovits., 2008). میزان دی‌اکسیدکربن تولیدشده در فرآیند تولید مصالح قلیافعال بسیار کمتر از فرآیند تولید سیمان است (Neupane and et al., 2018). تولید بتن قلیافعال توسط روش‌های متداول تکنولوژی بتن انجام می‌گیرد (Vora and Dave., 2013). اعمال حرارت بالا در بتن، آثار مخربی را به بخش ریزساختار بتن وارد می‌کند، تبخیر آب تحت حرارت بالا، ضمن تاخیر و تضعیف فرآیند هیدراتاسیون<sup>۳</sup> و ژئوپلیمریزاسیون<sup>۴</sup> در بتن، موجب بروز خسارت‌های جبران‌ناپذیر به بخش ماتریس ساختار ژل‌های هیدراته‌شده، می‌شود. مک‌نالتی<sup>۵</sup> (McNulty., 2009) و برخی از محققین دیگر با مقایسه بتن حاوی سیمان پرتلند معمولی و بتن ژئوپلیمری، گزارش کرده‌اند که مواد قلیایی به‌دلیل ویژگی‌های سرامیکی مانند خود، عملکرد بهتری نسبت به بتن‌های معمولی در مواجهه با آتش دارد (Bakharev., 2006; Mane and Jadhav., 2012; Comrie and Kriven., 2004). هنگامی‌که بتن قلیافعال در معرض درجه حرارت بالا قرار می‌گیرد تغییراتی در آن به‌وقوع می‌پیوندد که بر اساس محدوده‌های دمایی این تغییرات عبارتند از (Bakhtiyari and et al., 2001).

الف) خارج شدن آب قابل تبخیر در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس.

ب) هیدراتاسیون هیدرات‌های کلسیم‌سیلیکات در دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس شروع می‌شود و با افزایش دما تا ۲۰۰ درجه سلسیوس فشار بخار در ساختار قلیافعال پیوسته در حال افزایش است.

ج) در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس گروه‌های هیدرواکسیل (OH<sup>-</sup>) تبخیر می‌شود. فرآیند دی‌هیدرواکسیلاسیون موجب تغییر ساختار آلومینیوسیلیکات و کاهش مقاومت می‌شود.

د) در دمای ۸۰۰ درجه سلسیوس ساختار سرامیکی به‌شدت متخلخلی تشکیل می‌شود.

اهداف و نوآوری در این پژوهش آزمایشگاهی به‌واسطه تولید بتن قلیافعال، به چند مورد زیر خلاصه می‌شود:

<sup>۱</sup> . CO<sub>2</sub>

<sup>۲</sup> . Joseph Davidovits

<sup>۳</sup> . Hydrolysis

<sup>۴</sup> . Geopolymerization

<sup>۵</sup> . McNulty

- الف) خواص مکانیکی و ریزساختاری بتن قلیافعال در مقایسه با بتن معمولی بهبود می‌یابد.
- ب) کمک به کاهش حجم انتشار گاز سمی دی‌اکسیدکربن در مقایسه با تولید بتن معمولی، با توجه به گزارش ارایه شده توسط سایر محققین در این راستا.
- ج) کمک به حفظ سلامت محیط‌زیست به‌واسطه مصرف (در ترکیب بتن قلیافعال) سرباره‌های انباشته شده در کارخانه‌های ذوب آهن، شناخته شده به‌عنوان مواد مضر محیط‌زیستی.
- د) حفظ و کاهش مصرف منابع معدنی مصرفی که به‌عنوان مصالح اصلی در طی فرایند ساخت سیمان معمولی استفاده می‌شود.
- ه) حفظ و کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی که به‌عنوان سوخت مصرفی در کارخانه‌های تولید سیمان معمولی استفاده می‌شود.

### مواد و روش‌ها

در این پژوهش آزمایشگاهی، از سیمان پرتلند نوع ۲ محصول کارخانه صنایع سیمان گیلان سبز (دیلمان) با وزن مخصوص ۳۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و سطح مخصوص ۳۰۰۰ الی ۳۲۰۰ سانتی مترمربع بر گرم که تحت استاندارد ISIRI 389 تولید شده است، استفاده شد. سرباره کوره‌آهن‌گدازی، محصول کارخانه ذوب‌آهن اصفهان با وزن مخصوص ۲۷۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، سطح مخصوص ۲۲۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم و چگالی ظاهری ۹۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب تحت استاندارد ASTM C989/C989M مورد مصرف قرار گرفت، مشخصات شیمیایی این محصول در جدول (۱) نشان داده شده است. آب مصرف‌شده به‌منظور تهیه آب‌آهک و ساخت طرح مخلوط در تحقیق پیش-رو، از آب شرب شهر لاهیجان است، این نوع از آب دارای pH در محدوده ۶/۵ الی ۷/۵ و وزن مخصوص ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. براساس بند ۲-۴-۱۰-۹ و ۳-۴-۱۰-۹ ویرایش چهارم آیین‌نامه مقررات ملی ساختمان ایران، آبی که قابل آشامیدن است، مزه و بوی مشخصی ندارد و تمیز و صاف است را می‌توان بدون آزمون در بتن استفاده کرد، مگر آن‌که سوابق قبلی نشان دهنده‌ی نامناسب بودن این نوع از آب برای بتن باشد. سنگدانه‌های مصرفی در تهیه طرح مخلوط بتن در این پژوهش آزمایشگاهی از نوع مصنوعی و براساس ملزومات استاندارد ASTM C33، تهیه شده از کارخانه‌های شن و ماسه شهرستان لاهیجان است، برخی از مشخصات سنگدانه مصرفی در این تحقیق در جدول (۲) به‌نمایش درآمده است. تحقیقات نشان داده است که بتن قلیافعال تازه به‌علت لزجت بالای موجود در محلول قلیافعال در مقایسه با بتن حاوی سیمان پرتلند معمولی تازه، کارایی ضعیف‌تری دارد، برای حل این مشکل یک فوق‌روان‌کننده مبتنی بر پلی‌کربوکسیلات، اغلب به‌علت پیوندهای قوی مابین کلسیم با بار مثبت و پلی‌کربوکسیلات با بار منفی، بهترین گزینه است (Pilehvar and et al., 2018). در این راستا از ابرروان‌کننده نسل چهارم مبتنی بر پلی‌کربوکسیلات‌نرمال محصولی از شرکت دوروچم خاورمیانه براساس ویژگی‌های جدول (۳) استفاده گردید. محلول قلیافعال مصرفی در این تحقیق ترکیبی از محلول سیلیکات‌سدیم و هیدرواکسیدسدیم با نسبت وزنی ۲/۵ است که با وزن مخصوص ترکیبی برابر با ۱۴۸۳ کیلوگرم بر متر مکعب مورد استفاده قرار گرفت، برخی از مشخصات محلول قلیافعال مصرفی در این پژوهش در جدول (۴) نشان داده شده است. استاندارد مجزایی برای طرح مخلوط بتن قلیافعال موجود نمی‌باشد، بنابراین به‌تبعیت برخی از پژوهش‌های آزمایشگاهی (Deb and et al., 2015)، طرح مخلوط بتن قلیافعال مطابق با استاندارد تهیه بتن معمولی تحت توصیه کمیته ACI 211.1-89 براساس جدول (۵) تهیه و تنظیم شد.

جدول (۱) مشخصات شیمیایی سرباره کوره‌آهن‌گدازی (%)

L.O.I	MnO	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO
۰/۰۲	۰/۱۸	۲/۴۹	۰/۹۲	۱/۲۱	۰/۱۲	۶/۲۴	۷/۴۵	۹/۱۷	۳۵/۵	۳۶/۷۲

جدول (۲) مشخصات سنگدانه‌ها

درصد جذب آب	وزن مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )	مدول نرمی (mm)	حداکثر قطر (mm)	حداقل قطر	مصالح دانه‌ای بتن
۲/۲	۲۷۵۰	۵/۷	۱۹	۴/۷۵ (mm)	شن
۲/۹	۲۶۵۰	۲/۸۵	۴/۷۵	۷۵ (µm)	ماسه

جدول (۳) مشخصات ابرروان کننده پلی کربوکسیلات نرمال

فرمول شیمیایی	حالت فیزیکی	رنگ	وزن مخصوص ( $\text{kg/m}^3$ )	استاندارد صرف	pH	میزان یون	نقطه اشتعال
پلی کربوکسیلات- مایع	قهوه‌ای	۱۱۰۰	ASTM C494	حدود ۷	ندارد	ندارد	ندارد

جدول (۴) مشخصات محلول قلیافعال

نوع محلول	فرمول مولکولی	رنگ	مولاریته ( $\text{mol/m}^3$ )	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	مدول الاستیسیته ذوب (p)	دمای مولی (C)	جرم مولی (gr/mol)	نسبت وزنی (مولار)	نسبت سیلیکات به سدیم (مولار)	وزنی سیلیکات
هیدراکسید سدیم	NaOH	سفید	۱۲	۲۱۳۰	۳/۳	۳۱۸	۳۹/۹۹	-	-	-
سیلیکات سدیم	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	سفید	۱۲	۲۴۰۰	-	۱۰۸۸	۱۲۲/۰۶	۲/۴	۴۷	۴۷

جدول (۵) مشخصات طرح مخلوط بتن

نوع بتن	کمیت سیمان سرباره	آب	شن	ماسه	ابرروان کننده	شرایط عمل آوری		نسبت W/C
						وزن مخصوص مخلوط بتن ( $\text{kg/m}^3$ )	پس از قالب برداری	
معمولی	۵۰۰ $\text{kg/m}^3$	۰	۲۲۵	۱۰۰۰	۷	در آب	۲۴۹۷	۴۵ درصد
	۲۰/۰۲	۰	۹/۰۱	۴۰/۰۴	۳۰/۶۳	۰/۰۰۲۸		درصد
قلیافعال	۵۰۰ $\text{kg/m}^3$	۵۰۰	۲۲۵	۱۰۰۰	۷	حرارت + محیط	۲۴۹۴/۶۳	۴۵ درصد
	۲۰/۰۴	۰	۹/۱۹	۴۰/۰۸	۳۰/۵۷	خشک		درصد

- در بتن قلیافعال منظور از نسبت W/C، نسبت محلول قلیافعال به سرباره کوره آهنگدازی مصرفی است.

در ابتدا، براساس جدول (۵) حاوی طرح مخلوط بتن، مصالح مصرفی توزین شدند و در ادامه مصالح خشک شامل سیمان (یا سرباره) و سنگدانه در داخل دستگاه مخلوط کن برقی در حال گردش ریخته شد و فرایند ترکیب مصالح به مدت ۱/۵ دقیقه به طول انجامید. در ادامه، مصالح تر شامل آب (یا محلول قلیافعال) به مخلوط اضافه شدند و ترکیب مصالح به مدت ۲/۵ دقیقه دیگر به طول انجامید. سپس مخلوط بتن تازه در قالب‌های فلزی فویل دار و روغن کاری شده از قبل در سه مرحله ریخته شد، در این راستا به منظور اعمال تراکم و خروج هوای اضافی در نمونه بتنی، در هر مرحله، ۲۵ ضربه به وسیله میله مخصوص به ترکیب بتن وارد شد. در پایان، قالب‌ها حاوی نمونه‌های بتنی در محیط خشک و تحت دمای ۲۱ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شدند. پس از سپری شدن این زمان، قالب برداری نمونه‌ها انجام گرفت و نمونه‌های بتن معمولی در آب آهک تحت دمای ۲۱ درجه سلسیوس تا سن انجام آزمون نگهداری و عمل آوری شدند. نمونه‌های بتن قلیافعال پس از قالب برداری، به مدت ۴۸ ساعت درون کوره تحت عمل آوری حرارتی در دمای ۶۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند تا میزان استحکام در این نوع از بتن بهبود یابد، پس از سپری شدن این زمان، نمونه‌های بتنی از کوره خارج شدند و در محیط خشک تحت دمای ۲۱ درجه سلسیوس تا فرارسیدن زمان آزمون نگهداری و عمل آوری شدند. در راستای عمل آوری حرارتی در بتن قلیافعال، تحقیقات نشان داده است که نمونه‌های بتن قلیافعال تحت عمل آوری حرارتی در محدوده دمای ۵۰ الی ۷۰ درجه سلسیوس دارای استحکام بیشتر از نمونه‌های عمل آوری شده تحت دمای ۲۰ درجه سلسیوس هستند (Mehta and Monteiro., 2017).

آزمون مقاومت فشاری بتن در سن عمل آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه مطابق با استاندارد BS 12390-3 بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متر انجام گرفت. در این راستا، نمونه‌ها به نحوی در دستگاه جک بتن شکن قرار داده شدند که دو سطح مقابلی که در موقع بتن ریزی مجاور قالب بودند، در تماس با رکاب‌های فوقانی و تحتانی دستگاه باشند و پس از محکم شدن نمونه‌ها، بارگذاری نیرو

در محدوده استاندارد با سرعت ۰/۹ مگاپاسکال بر ثانیه (۵۴ مگاپاسکال بر دقیقه) به صورت ثابت، یکنواخت، بدون تغییرات ناگهانی و عمود بر جهت بتن ریزی تا لحظه شکست نمونه بتنی انجام گرفت، میزان حداکثر بار وارده، تعیین کننده مقدار مقاومت نمونه بتنی در برابر فشار وارده است. آزمون کاهش وزن نمونه‌های بتن در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در دمای اتاق و تحت حرارت بالا (۶۰۰ درجه سلسیوس)، مطابق با استاندارد ISO834 بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد  $10 \times 10 \times 10$  انجام گرفت. در این استاندارد، دمای اعمال شده به نمونه‌های بتنی تا ۱۰۰۰ درجه سلسیوس و مدت زمان اعمال حرارت یک ساعت توصیه شده است. در این راستا، نمونه‌ها ابتدا در دمای اتاق وزن شدند، سپس نمونه‌ها به مدت ۱ ساعت درون کوره در معرض دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند، این عمل موجب تبخیر آب از فضاهای مویینه و حفرات احتمالی موجود در بتن می‌شود، در پایان زمان حرارت و پس از رسیدن دمای نمونه‌ها به دمای اتاق، نمونه‌ها مجدداً وزن شدند و میانگین میزان کاهش وزن نمونه‌ها به عنوان نتیجه نهایی درج گردید. تحلیل و آنالیز SEM در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در دمای اتاق و تحت حرارت بالا (۶۰۰ درجه سلسیوس)، توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی با مدل FEI Quanta200 انجام گرفت، در این راستا نمونه بتنی خردشده در دستگاه قرار داده شد و تصاویر با بزرگنمایی مورد نظر ضبط و در ادامه مورد بررسی ریزساختاری قرار گرفت. قبل از انجام آزمون‌های تحت حرارت بالا که در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه انجام شد، براساس استاندارد ISO834، نمونه‌های بتنی به مدت ۱ ساعت در کوره تحت دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند، سپس نمونه‌ها به مدت ۱ ساعت دیگر در کوره خاموش باقی ماندند تا تحت تاثیر شُک دمایی قرار نگیرند، پس از خروج نمونه‌ها از کوره، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق نگهداری شدند تا به تعادل دمایی برسند. استفاده از این استاندارد در سایر تحقیقات پیرامون آزمون‌های تحت حرارت بالا در بتن، گزارش شده است (Kong and Sanjayan., 2010).

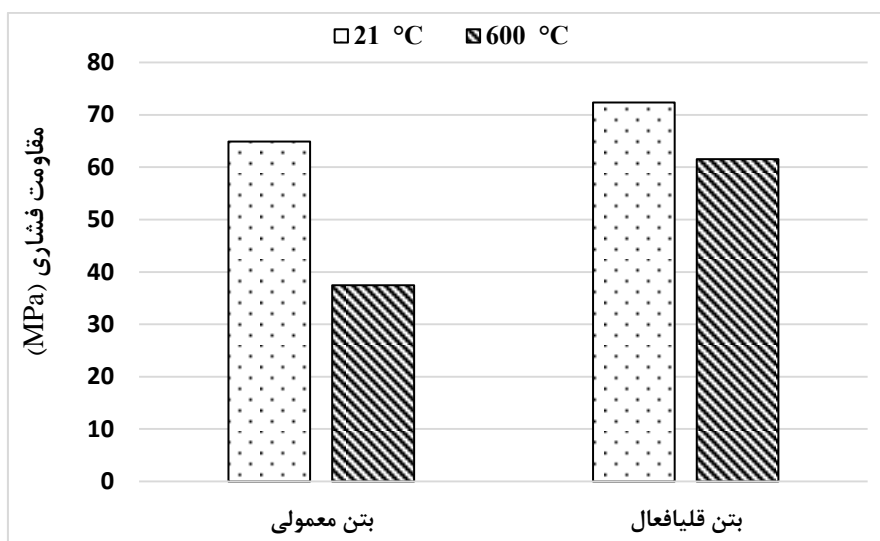
### یافته‌های پژوهش

#### تفسیر و نتایج آزمون مقاومت فشاری

در این پژوهش، نتایج حاصل از آزمون مخرب و مکانیکی مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های بتن معمولی و بتن قلیافعال، تحت دمای ۲۱ و حرارت ۶۰۰ درجه سلسیوس در نمودار شکل (۱) نشان داده شده است. در دمای ۲۱ و ۶۰۰ درجه سلسیوس، به ترتیب به میزان ۱۱/۴۱ و ۶۴/۳۵ درصد برتری مقاومت فشاری در بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی کسب گردید. این برتری در بتن قلیافعال تحت حرارت ۶۰۰ درجه سلسیوس، بیش از دمای ۲۱ درجه سلسیوس است. این امر به دلیل تولید حجم بالایی از ژل‌های هیدراته شده در ساختار خمیر بتن قلیافعال به واسطه حضور مواد آلومینوسیلیکاتی فراوان در ترکیب سرباره کوره‌آهنگدازی موجود در مخلوط این نوع از بتن است. عامل اصلی ایجاد تراکم و مقاومت در بتن سخت‌شده، ژل‌های هیدراته شده نظیر سیلیکات کلسیم‌هیدراته (C-S-H)، سیلیکات آلومینیوم کلسیم‌هیدراته (C-A-S-H) و سیلیکات آلومینیوم سدیم‌هیدراته (N-A-S-H) می‌باشند، این ژل‌ها با پرکردن منافذ، حفرات، ترک‌ها و ایجاد چسبندگی در نواحی انتقال، تراکم و استحکام را در بتن سخت‌شده تضمین می‌کنند. در این راستا تحقیقات نشان داده است که در واکنش ژئوپلیمریزاسیون، براساس مکانیسم ژئوسپارش، با تبدیل CH به ژل هیدراته شده نظیر C-S-H، ریزساختارها در بتن متراکم شده و موجب همگنی بتن می‌شود (Hongjian and et al., 2014). براساس نمودار مقاومت فشاری در این بخش، حرارت بالا موجب افت نتایج شده است. در این راستا، در بتن معمولی و بتن قلیافعال، به ترتیب شاهد افت ۴۲/۳۱ و ۱۴/۹ درصدی مقاومت فشاری در بتن تحت دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس نسبت به دمای ۲۱ درجه سلسیوس می‌باشیم.

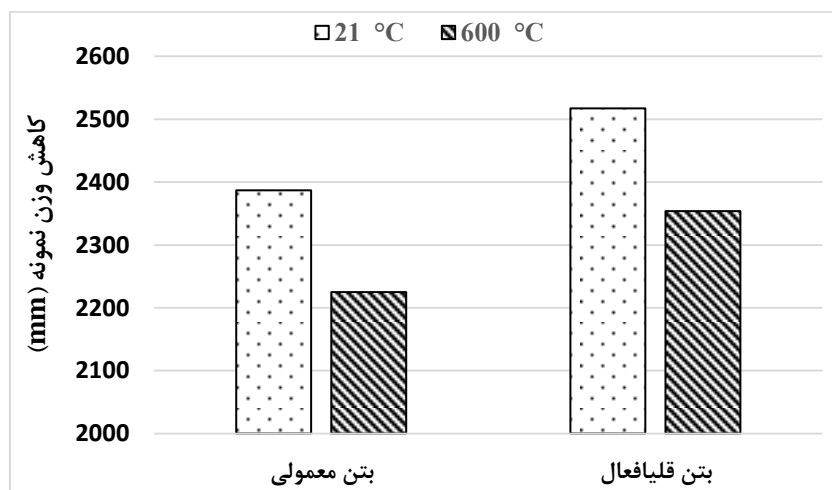
#### تفسیر و نتایج آزمون کاهش وزن

نتایج حاصل از آزمون دوام از نوع کاهش وزن بر روی نمونه‌های بتن معمولی و بتن قلیافعال در این پژوهش، تحت دمای ۲۱ و حرارت ۶۰۰ درجه سلسیوس در شکل (۲) نشان داده شده است. پیرو این نتایج، مشاهده می‌شود که نمونه‌های بتن معمولی و بتن قلیافعال در دمای ۲۱ درجه سلسیوس دارای وزن بالاتری نسبت به، پس از اعمال حرارت بالا (۶۰۰ درجه سلسیوس) در نمونه‌های بتنی هستند. این موضوع به دلیل وجود آب در حفرات، منافذ مویینه بین لایه‌ای و بین سطحی در ریزساختار ژل‌های هیدراته شده بتن است، اما با اعمال حرارت بالا به نمونه‌های بتنی و خروج آب موجود در ریزساختار بتن در اثر تبخیر، وزن نمونه‌های بتنی کاهش یافته است. از طرفی با توجه به تراکم بیشتر و منافذ و حفرات کمتر در ریزساختار بتن قلیافعال، این نوع از بتن کاهش وزن کمتری را نسبت به بتن معمولی تجربه کرده است. در



شکل (۱) نتایج آزمون مقاومت فشاری

این راستا، در بتن معمولی و بتن قلیافعال کاهش وزن به ترتیب به میزان ۰/۰۰۶۷ و ۰/۰۰۶۴ درصد را کسب کردند. تحقیقات نشان داده است که با توجه به فشار زیاد بین حفره‌ای، خروج آب از فضای پیوند شیمیایی در سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) منجر به خرابی بتن در دمای بیش از ۴۵۰ درجه سلسیوس می‌شود (Pilehvar and et al., 2018). کاهش وزن کمتر نمونه‌های بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی حاکی از خصوصیات برتر دوام در این نوع از بتن در مقایسه با بتن معمولی است. تصاویر ریزساختاری از ترکیب بتن معمولی و بتن قلیافعال در این تحقیق، نشانه‌های تراکم بالاتر و حجم حفرات و منافذ کمتر را در بتن قلیافعال نشان می‌دهد و این موضوع در هم‌پوشانی با نتایج حاصل از آزمون کاهش وزن در این بخش است.



شکل (۲) نتایج آزمون کاهش وزن

#### تفسیر نتایج SEM

تصاویر حاصل از SEM در مقیاس ۱ میکرومتر بر روی نمونه‌های بتن معمولی و بتن قلیافعال در دمای ۲۱ و ۶۰۰ درجه سلسیوس حاصل از این پژوهش آزمایشگاهی در شکل (۳) به نمایش درآمده است. به‌طور کلی تصاویر حاصل از ریزساختار خمیر بتن معمولی و بتن قلیافعال را می‌توان به چند بخش به شرح ذیل تقسیم‌بندی کرد.

الف) شامل ژل‌های هیدراته‌شده ناشی از فرایند بسپارش و ژئوسپارش، که به‌طور عمده به‌صورت نواحی با رنگ تیره در شکل‌ها مشاهده می‌گرد می‌شوند.

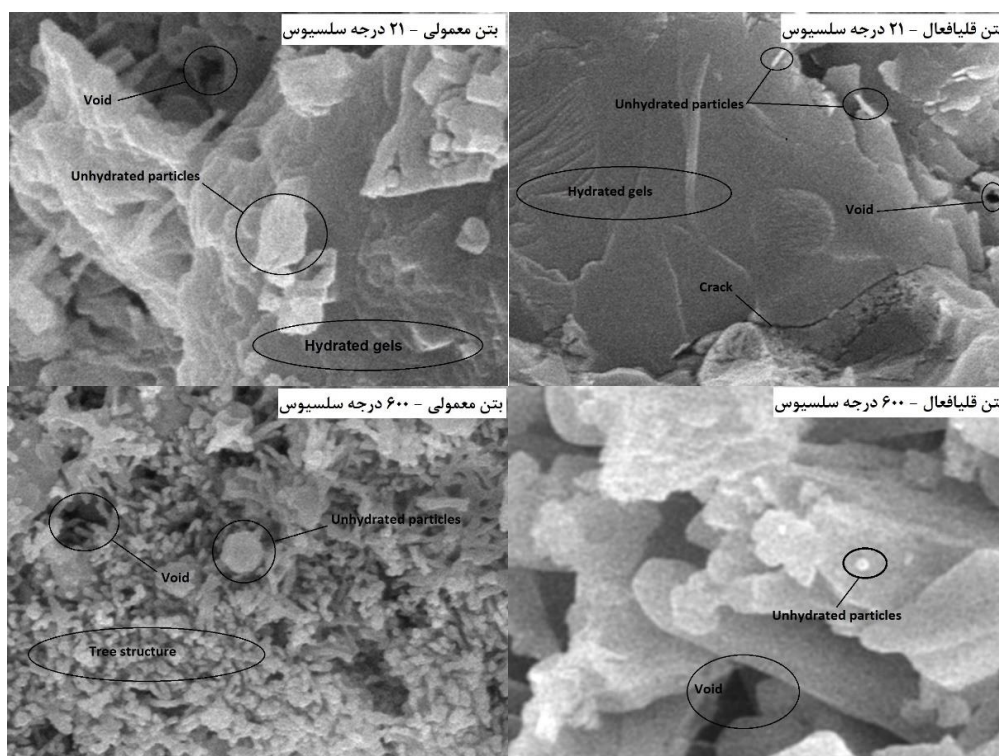
ب) دانه‌های کلینکری هیدراته‌نشده و ذرات ناشی از وجود ناخالصی‌ها در مواد اولیه، که به‌طور عمده به‌صورت نواحی با رنگ سفید در شکل‌ها مشاهده می‌شوند.

پ) ترک‌ها و ریزترک‌های موجود در مخلوط، به‌دلیل انقباض حرارتی ناشی از عمل‌آوری حرارتی و حرارت هیدراتاسیون و ژئوپلیمریزاسیون با توجه به عیار بالا از سیمان پرتلند و سرباره کوره‌آهنگدازی در ترکیب بتن.

ت) حفرات و منافذ مویینه بین‌لایه‌ای در ساختار ژل‌های هیدراته و حفرات و منافذ مویینه بین‌سطحی در نواحی انتقال.

ث) سایر ذرات مشارکت نکرده در فرایند شیمیایی.

با توجه به تصاویر، مشهود است که حجم ژل‌های هیدراته‌شده در ترکیب بتن قلیافعال بیش از بتن معمولی است، این امر به‌دلیل فعالیت پوزولانی بالای سرباره کوره‌آهنگدازی در فرایند ترکیب شیمیایی با محلول قلیافعال است. ذرات فراوان آلومینوسیلیکاتی موجود در ترکیب سرباره در فرایند واکنش شیمیایی با محلول قلیافعال ژل‌های متراکم با قدرت چسبانندگی و پرکنندگی بالا، نظیر ژل سیلیکات کلسیم-هیدراته (C-S-H) را تولید می‌کنند. این ژل‌ها عامل اصلی ایجاد تراکم و استحکام در بتن سخت‌شده هستند. اندازه و حجم حفرات و منافذ در بتن معمولی بیش از بتن قلیافعال است اما ریزترک‌های موجود در بتن قلیافعال که ناشی از عمل‌آوری حرارتی این نوع از بتن در دمای ۶۰ درجه سلسیوس است، در ریزساختار بتن قلیافعال بیش از بتن معمولی به‌چشم می‌خورد. اعمال حرارت بالا (۶۰۰ درجه سلسیوس) در نمونه‌های بتنی موجب افت تراکم در بخش ریزساختار بتن معمولی و بتن قلیافعال شده است، به‌طوری‌که با خروج آب تحت حرارت از نمونه‌های بتنی، حجم و اندازه منافذ و حفرات موجود در مخلوط بیشتر از حالت نمونه در معرض دمای ۲۱ درجه سلسیوس است و با تخریب ساختار ژل‌های هیدراته به‌واسطه اعمال حرارت بالا، از حجم آنها در ترکیب کاسته شده است. در این راستا، وجود ساختار متخلخل و درختی شکل در ترکیب مخلوط بتن معمولی و بتن قلیافعال از عوارض حرارت بالا در نمونه‌های بتنی است. تحقیقات سایرین نشان می‌دهد که حرارت بین ۵۰۰ الی ۹۰۰ درجه سلسیوس می‌تواند موجب بروز تغییرات کریستالی، تخریب ریزساختار ژل‌های هیدراته و تشکیل کانی‌های کرناتی در ماتریس بتن شود (Amiri and Aryanpoor., 2019; Provis and Van Deventer., 2009; Brindley..).



شکل (۳) تصاویر SEM



### بحث و نتیجه گیری

در این مطالعه آزمایشگاهی، یک طرح مخلوط از بتن معمولی و یک طرح مخلوط از بتن قلیافعال به منظور ارزیابی خواص مکانیکی و دوام بتن در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه و دمای ۲۱ و ۶۰۰ درجه سلسیوس، ساخته شد. در این راستا آزمون‌های مقاومت فشاری و کاهش وزن نمونه‌های بتنی انجام گرفت و در ادامه، بررسی ریزساختاری توسط آنالیز تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) صورت گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش آزمایشگاهی به شرح ذیل ارائه می‌شود.

الف) اعمال حرارت بالا در نمونه‌های بتنی موجب افت نتایج در آزمون مقاومت فشاری در بتن معمولی و بتن قلیافعال به ترتیب به میزان ۴۲/۳۱ و ۱۴/۹ درصد گردید.

ب) در آزمون کاهش وزن، میزان ۰/۰۰۶۷ و ۰/۰۰۶۴ درصد افت وزن به ترتیب در بتن معمولی و بتن قلیافعال کسب شد.

پ) بتن قلیافعال در آزمون مقاومت فشاری تحت دمای ۲۱ و ۶۰۰ درجه سلسیوس، به ترتیب به میزان ۱۱/۴۱ و ۶۴/۳۵ درصد برتری مقاومت را نسبت به بتن معمولی از خود نشان داد.

ت) نتایج حاصل از تحلیل تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، در هماهنگی و هم‌پوشانی با نتایج سایر آزمون‌ها در این پژوهش قرار گرفت. در این راستا، در نمونه‌های بتنی حرارت دیده شده نسبت به نمونه‌های بتنی حرارت ندیده، با توجه به تبخیر آب و گسستگی پیوند بین اجزاء تشکیل دهنده بتن، نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری و آزمون کاهش وزن، افت قابل توجهی را کسب کردند.

ث) استفاده از بتن قلیافعال به جای بتن معمولی در ساخت سازه‌ها و ابنیه‌های مختلف، (با توجه به عدم انتشار گاز سمی CO<sub>2</sub> در پی از عدم مصرف سیمان)، منجر به کاهش آلودگی محیط زیست می‌شود. از طرفی با توجه به اینکه سرباره کوره آهن‌گدازی اغلب توسط کارخانه‌های ذوب آهن در محیط رهاسازی می‌شوند و به دلیل سمی بودن این ماده و مخاطرات محیط زیستی بعدی، استفاده از سرباره کوره آهن‌گدازی در ترکیب بتن، کاهش تخریب محیط زیست به واسطه عدم رهاسازی این مواد را به دنبال دارد.

### منابع

- Allahverdi, A. L. I., Kani, E. N., & Yazdanipour, M. (2011). Effects of blast-furnace slag on natural pozzolan-based geopolymer cement. *Ceramics-Silikaty*, 55(1), 68-78.
- Amiri, M., & Aryanpoor, M. (2019). The Effects of High Temperatures on Concrete Performance based on Nanostructural Changes in Calcium Silicate Hydrate (CSH). *Concrete Research*, 12(4), 69-80.
- Brindley, G. W. (1975). Thermal transformations of clays and layer silicates. In *Proceedings of the international clay conference* (pp. 119-129). Applied Publishers Wilmette, IL.
- Bakharev, T. (2006). Thermal behaviour of geopolymers prepared using class F fly ash and elevated temperature curing. *Cement and concrete Research*, 36(6), 1134-1147.
- Bakhtiyari, S., Allahverdi, A., Rais-Ghasemi, M., Zarrabi, B. A., & Parhizkar, T. (2011). Self-compacting concrete containing different powders at elevated temperatures—Mechanical properties and changes in the phase composition of the paste. *Thermochimica acta*, 514(1-2), 74-81.
- Comrie, D. C., & Kriven, W. M. (2004). Composite cold ceramic geopolymer in a refractory application. In *Advances in Ceramic Matrix Composites IX, Proceedings* (pp. 211-225).
- Davidovits, J. (2008). *Geopolymer chemistry and applications*. Geopolymer Institute.
- Deb, P., Nath, P., & Sarker, P. (2015). Drying shrinkage of slag blended fly ash geopolymer concrete cured at room temperature. *Procedia Engineering*, 125, 594-600.
- Nosrati, A., Zandi, Y., Shariati, M., Khademi, K., Aliabad, M., Marto, A., & Khorami, M. (2018). Portland cement structure and its major oxides and fineness. *Smart structures and systems*, 22(2), 425-432.
- Huseien, G. F., Mirza, J., Ismail, M., Ghoshal, S. K., & Ariffin, M. A. M. (2018). Effect of metakaolin replaced granulated blast furnace slag on fresh and early strength properties of geopolymer mortar. *Ain Shams Engineering Journal*, 9(4), 1557-1566.
- Hongjian, D., Suhuan, D., & Liu, X. (2014). Durability performances of concrete with nano-silica. *Construction and building materials*, 73, 705-712.
- Kong, D. L., & Sanjayan, J. G. (2010). Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete. *Cement and concrete research*, 40(2), 334-339.

- <sup>1</sup>Mansourghanaei, M., Biklaryan, M., & Mardookhpour, A. (2022). Experimental study of the effects of adding silica nanoparticles on the durability of geopolymer concrete. *Australian Journal of Civil Engineering*, 1-13.
- <sup>2</sup>Mansourghanaei, M., Biklaryan, M., & Mardookhpour, A. (2022). Experimental study of properties of green concrete based on geopolymer materials under high temperature. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, (), -. doi: 10.22059/cej.2022.345402.1856
- <sup>3</sup>Mansourghanaei, M., & Biklaryan, M. (2022). Experimental evaluation of compressive, tensile strength and impact test in blast furnace slag based geopolymer concrete, under high temperature. *Journal of Civil Engineering Researchers*, 4(2), 12-21.
- <sup>4</sup>Mansourghanaei, M., & Biklaryan, M. (2022). Experimental study of compressive strength, permeability and impact testing in geopolymer concrete based on Blast furnace slag. *Journal of Civil Engineering Researchers*, 4(3), 31-39.
- <sup>5</sup>Mansourghanaei, M., Biklaryan, M., & Mardookhpour, A. (2022). Experimental Study of Mechanical Properties of Geopolymer Concrete as Green Concrete with a Sustainable Development Approach in the Construction Industry, Under High Temperature. *Journal of Civil Engineering Researchers*, 4(4), 1-11.
- <sup>6</sup>Mansourghanaei, M., biklaryan, M., & Mardookhpour, A. (2021). Evaluate Effect of Temperature On mechanical properties of Geopolymer Concretes blast furnace slag by using nanosilica and polyolefin fiber. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(10), 334-352. doi: 10.22065/jsce.2021.277150.2382
- <sup>7</sup>Mansourghanaei, M., Biklaryan, M., & Mardookhpour, A. (2022). Experimental Investigation of the Effect of Nanosilica on the Mechanical Properties and Durability of Slag Geopolymer Concrete. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 7(1), 76-89. doi: 10.30478/jcsm.2022.333669.1260
- Mane, S., & Jadhav, H. S. (2012). Investigation of geopolymer mortar and concrete under high temperature. *Magnesium*, 1(5).
- McNulty, E. (2009). Geopolymers: an environmental alternative to carbon dioxide producing ordinary Portland cement. *Department of Chemistry, The Catholic University of America*.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. (2014). *Concrete: microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill Education.
- Nuaklong, P., Sata, V., & Chindaprasirt, P. (2016). Influence of recycled aggregate on fly ash geopolymer concrete properties. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2300-2307.
- Neupane, K., Chalmers, D., & Kidd, P. (2018). High-strength geopolymer concrete—properties, advantages and challenges. *Advances in Materials*, 7(2), 15-25.
- Pilehvar, S., DuyCao, V., M.Szczotok, A., Carmona, M., Valentini, L., Lanzón, M., LenaKjønicksen, A. (2018). Physical and mechanical properties of fly ash and slag geopolymer concrete containing different types of micro-encapsulated phase change materials. *Construction and Building Materials*, 173, 28-39.
- Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. (2009). Introduction to geopolymers. In *Geopolymers* (pp. 1-11). Woodhead Publishing.
- Siddique, R., & Kaur, D. (2012). Properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag (GGBFS) at elevated temperatures. *Journal of Advanced Research*, 3(1), 45-51.
- Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., & Bhattacharyya, S. K. (2015). Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Construction and building materials*, 85, 78-90.
- Vora, P. R., & Dave, U. V. (2013). Parametric studies on compressive strength of geopolymer concrete. *Procedia Engineering*, 51, 210-219.