

Investigation of the effects of high temperature on compressive and tensile strength and modulus of elasticity of alkali-activated concrete

Mohammadhossein Mansourghanaei

Department of Civil Engineering, Chalous Branch, Islamic Azad University, Chalous, Iran

Mhm.ghanaei@iauc.ac.ir

DOI: 10.30495/CIVIL.2022.696525

Keywords:

Ordinary concrete,
Alkali-activated concrete,
Compressive strength,
Tensile strength,
Modulus of elasticity

Abstract

In recent years, improving the mechanical properties of alkali-activated concrete with the aim of being superior compared to those of the conventional concrete and reducing environmental hazards caused by the lack of mineral resources and release of toxic carbon dioxide gas (in cement production process) has been noticed by civil engineering researchers. In this laboratory research, a mixing design of ordinary concrete containing Portland cement with a grade of 500 kg/m³ and a mixing design of alkali-activated concrete based on blast furnace slag were made. In order to check the mechanical properties, tests of compressive strength, tensile strength and modulus of elasticity of concrete were performed under the temperatures of 21 and 600 °C at the age of 90 days of curing. Based on the results, applying high temperature (600 °C) to concrete samples caused a 42% and 15% drop in compressive strength, a 56% and 21% drop in tensile strength, and a 63% and 49% drop in modulus of elasticity for ordinary and alkali-activated concretes, respectively. The compressive strength of alkali-activated concrete was 11% and 64% more than that of the normal concrete at 21 and 600 °C, respectively. The tensile strength of alkali-activated concrete exhibited a 9% decrease and 63% superiority compared to normal concrete at 21 and 600 °C, respectively. The elasticity modulus of alkali-activated concrete was 16% and 62% higher than that of the normal concrete at 21 and 600 °C, respectively. The results of the scanning electron microscope images are in accordance with the other test results of this research.



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license:

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

بررسی آثار حرارت بالا بر مقاومت فشاری، کششی و مدول الاستیسیته بتن قلیافعال

محمدحسین منصورقناعی

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

Mhm.ghanaei@iauc.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۰۲ مرداد ۱۴۰۱

تاریخ دریافت: ۲۸ فروردین ۱۴۰۱

چکیده

در سال‌های اخیر، بهبود خواص مکانیکی در بتن قلیافعال با هدف برتری نسبت به خواص مکانیکی بتن معمولی و کاهش مخاطرات زیست محیطی ناشی از کمبود منابع معدنی و انتشار گاز سمی دی‌اکسیدکربن در هوا (در راستای تولید سیمان)، مورد توجه محققین حوزه عمران قرار گرفت. در این پژوهش آزمایشگاهی، یک طرح اختلاط از بتن معمولی حاوی سیمان پرتلند با عیار ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و یک طرح اختلاط از بتن قلیافعال بر پایه سرباره - کوره‌آهنگدازی ساخته شد. به منظور بررسی خواص مکانیکی، آزمون‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول - الاستیسیته بتن تحت دمای ۲۱ و ۶۰۰ درجه سلسیوس در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه انجام شد. در بخش نتایج، اعمال حرارت بالا (۶۰۰ درجه سلسیوس) به نمونه‌های بتنی موجب افت ۴۲ و ۱۵ درصدی در مقاومت فشاری، افت ۵۶ و ۲۱ درصدی در مقاومت کششی و افت ۶۳ و ۴۹ درصدی در مدول‌الاستیسیته به ترتیب برای بتن معمولی و بتن قلیافعال گردید. مقاومت فشاری بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی در دمای ۲۱ و ۶۰۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۱۱ و ۶۴ درصد برتری را نشان داد. مقاومت کششی بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی در دمای ۲۱ و ۶۰۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۹ درصد کاهش و ۶۳ درصد برتری را نشان داد. مدول‌الاستیسیته بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی در دمای ۲۱ و ۶۰۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۱۶ و ۶۲ درصد برتری را کسب کرد. نتایج حاصل از آزمون تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در هماهنگی و همپوشانی با سایر نتایج آزمون‌های این پژوهش قرار دارد.

کلید واژگان: بتن معمولی، بتن قلیافعال، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول‌الاستیسیته.

۱- مقدمه

ضعف بتن معمولی در مواجهه با مواد شیمیایی و خوردنده‌ها از یک طرف، نیاز به بتن مستحکم در برخی از سازه‌های با اهمیت زیاد از طرفی دیگر، محققان را به فکر یافتن ماده‌ای جایگزین با سیمان در بتن روبرو کرد. آنها خاکستر بادی، متاکائولن، سرباره کوره آهن‌گدازی و سایر پوزولان‌ها را به‌عنوان جایگزین‌های مناسب سیمان معرفی کردند [۱-۲]. این مصالح حاوی مواد چسباننده و پرکننده فراوان نظیر آلومینات‌ها و سیلیکات‌ها در ترکیب خود هستند و در همجواری و واکنش شیمیایی با محلول‌های قلیایی، ژل‌های هیدراته شده متراکمی از قبیل سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) و سیلیکات آلومینیوم کلسیم-هیدراته (C-A-S-H) و سیلیکات آلومینیوم سدیم هیدراته (N-A-S-H) را در مخلوط بتن تولید می‌کنند، این ژل‌ها با پر کردن حفرات، منافذ و اتصال در نواحی انتقال بین سطحی^۱ در حد فاصل سنگدانه و خمیر سیمان، موجب ایجاد تراکم و استحکام در بتن سخت‌شده می‌گردند. تحقیقات سایرین نشان داده است که عامل اصلی ایجاد و بهبود خواص مکانیکی و دوام در بتن سخت‌شده، حضور ژل‌های هیدراته شده در ترکیب بتن است [۳-۴].

در سال‌های اخیر، بتن قلیافعال به دلیل برتری خواص مکانیکی و دوام نسبت به بتن معمولی، مورد توجه محققین قرار گرفت. از طرفی میزان دی‌اکسیدکربن (CO₂) منتشر شده در فرآیند تولید بتن قلیافعال بسیار کمتر از فرآیند تولید بتن معمولی است [۵]. استفاده از سرباره کوره آهن‌گدازی به جای سیمان می‌تواند مقاومت بتن را بهبود ببخشد و تقاضای فزاینده برای استفاده از سیمان را در بتن کاهش دهد [۶-۷]. فعال‌سازی سرباره کوره آهن‌گدازی با محلول قلیایی برای تولید بتن قلیافعال سرباره‌ای در چند دهه گذشته مورد مطالعه فراوان قرار گرفته است [۸]. مطالعات نشان می‌دهد 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 [۹]. مک‌نالتی^۲ [۱۰] و برخی از محققین دیگر با مقایسه بتن حاوی سیمان پرتلند معمولی و بتن قلیافعال، گزارش کردند که مصالح قلیایی به دلیل ویژگی‌های سرامیکی مانند خود، عملکرد بهتری نسبت به بتن‌های معمولی در مواجهه با آتش دارند [۱۱-۱۳]. هنگامی که بتن قلیافعال در معرض درجه حرارت بالا قرار می‌گیرد تغییراتی در آن به وقوع می‌پیوندد که بر اساس محدوده‌های دمایی این تغییرات عبارتند از [۱۴]:

۱- خارج شدن آب قابل تبخیر در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس.

۲- هیدراتاسیون هیدرات‌های کلسیم سیلیکات 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.

۳- در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس گروه‌های هیدرواکسیل (OH) تبخیر می‌شود. فرآیند دی‌هیدرواکسیلاسیون موجب تغییر ساختار آلومینیوسیلیکات و کاهش مقاومت بتن می‌شود.

۴- در دمای ۸۰۰ درجه سلسیوس ساختار سرامیکی به شدت متخلخلی تشکیل می‌شود.

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

۱- خواص مکانیکی و ریزساختاری بتن قلیافعال در مقایسه با بتن معمولی بهبود می‌یابد.

۲- کمک به کاهش حجم انتشار گاز سمی دی‌اکسیدکربن در مقایسه با تولید بتن معمولی، با توجه به گزارش آرایه شده توسط سایر محققین در این راستا.

۳- کمک به حفظ سلامت محیط زیست به‌واسطه مصرف (در ترکیب بتن قلیافعال) سرباره‌های انباشته شده در کارخانه‌های ذوب آهن، شناخته شده به‌عنوان مواد مضر محیط زیستی.

۴- حفظ و کاهش مصرف منابع معدنی مصرفی که به‌عنوان مصالح اصلی در طی فرآیند ساخت سیمان معمولی استفاده می‌گردد.

۵- حفظ و کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی که به‌عنوان سوخت مصرفی در کارخانه‌های تولید سیمان معمولی استفاده می‌گردد.

۲- مصالح و مواد مصرفی

در این پژوهش آزمایشگاهی، از سیمان پرتلند نوع ۲ محصول کارخانه صنایع سیمان گیلان سبز (دیلمان) با وزن مخصوص ۳۲۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و سطح مخصوص ۳۰۰۰ الی ۳۲۰۰ سانتی متر مربع برگرم که تحت استاندارد ISIRI 389 تولید شده است، استفاده گردید.

سرباره کوره آهن‌گدازی، محصول کارخانه ذوب آهن اصفهان با وزن مخصوص ۲۴۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، سطح مخصوص ۲۲۰۰ سانتی

مترمربع 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 مصرف شده به‌منظور تهیه آب آهک و ساخت طرح اختلاط در

تحقیق پیش‌رو از آب شرب شهر لاهیجان می‌باشد، این نوع از آب دارای pH در محدوده ۶/۵ الی ۷/۵ و وزن مخصوص ۱۰۰۰ کیلوگرم

بر مترمکعب است. براساس بند ۹-۱۰-۲ و ۹-۱۰-۴-۳ 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. سنگدانه مصرفی در تهیه طرح اختلاط 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 به نمایش درآمده است. تحقیقات

¹ Interfacial transition zone (ITZ)

² McNulty

وزن مخصوص ترکیبی برابر با ۱۴۸۳ کیلوگرم بر مترمکعب مورد استفاده قرار گرفت، برخی از مشخصات محلول قلیا فعال مصرفی در این پژوهش در جدول ۴ نشان داده شده است.

۳- طرح اختلاط

استاندارد مجزایی برای طرح اختلاط بتن قلیا فعال موجود نمی باشد، بنابراین به تبعیت برخی از پژوهش های آزمایشگاهی [۱۶]، طرح اختلاط بتن قلیا فعال مطابق با استاندارد تهیه بتن معمولی تحت توصیه کمیته ACI 211.1-89 براساس جدول ۵ تهیه و تنظیم گردید.

نشان داده است که بتن قلیا فعال تازه به علت لزجت بالای موجود در محلول قلیایی در مقایسه با بتن حاوی سیمان پرتلند معمولی تازه، کارایی ضعیف تری دارد، جهت حل این مشکل یک فوق روان کننده مبتنی بر پلی کربوکسیلات، اغلب به علت پیوندهای قوی ما بین کلسیم با بار مثبت و پلی کربوکسیلات با بار منفی، بهترین گزینه است [۱۵]. در این راستا از ابر روان کننده نسل چهارم مبتنی بر پلی کربوکسیلات نرمال محصولی از شرکت دوروچم خاورمیانه براساس ویژگی های جدول ۳ استفاده گردید. محلول قلیایی مصرفی در این تحقیق ترکیبی از محلول سیلیکات سدیم و هیدرواکسید سدیم با نسبت وزنی ۲/۵ می باشد که با

جدول ۱- مشخصات شیمیایی سرباره کوره آهن گدازی (براساس درصد)

L.O.I	MnO	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	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 سنگدانه ها

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

جدول ۳- مشخصات ابر روان کننده پلی کربوکسیلات نرمال

نقطه اشتعال	میزان یون کلر	pH	استاندارد صرف	وزن مخصوص (kg/m ³)	رنگ	حالت فیزیکی	فرمول شیمیایی
ندارد	ندارد	حدود ۷	ASTM C494	۱۱۰۰	قهوه ای	مایع	پلی کربوکسیلات نرمال

جدول ۴- مشخصات محلول قلیا فعال

نسبت وزنی (مولار)	نسبت وزنی (مولار)	جرم مولی (gr/mol)	دمای ذوب (C)	مدول الاستیسیته (p)	چگالی (kg/m ³)	مولاریته (mol/m ³)	رنگ	فرمول مولکولی	نوع محلول
-	-	۳۹/۹۹	۳۱۸	۳/۳	۲۱۳۰	۱۲	سفید	NaOH	هیدرواکسید سدیم
۴۷	۲/۴	۱۲۲/۰۶	۱۰۸۸	-	۲۴۰۰	۱۲	سفید	Na ₂ SiO ₃	سیلیکات سدیم

جدول ۵- مشخصات طرح مخلوط بتن

نوع بتن	کمیت	سیمان	سرباره	آب	شن	ماسه	ابر روان کننده	شرایط عمل آوری		نسبت W/C
								وزن مخصوص مخلوط بتن (kg/m ³)	پس از قالب برداری	
معمولی	kg/m ³	۵۰۰	۰	۲۲۵	۱۰۰۰	۷۶۵	۷	در آب	۲۴۹۷	۴۵ درصد
	درصد	۲۰/۰۲	۰	۹/۰۱	۴۰/۰۴	۳۰/۶۳	۰/۰۰۲۸			
قلیافعال	kg/m ³	۰	۵۰۰	۲۲۵	۱۰۰۰	۷۶۲/۶۳	۷	حرارت + محیط خشک	۲۴۹۴/۶۳	۴۵ درصد
	درصد	۰	۲۰/۰۴	۹/۱۹	۴۰/۰۸	۳۰/۵۷	۰/۰۰۲۸			

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

۴- ساخت و عمل آوری

در ابتدا براساس جدول ۵ طرح اختلاط، 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 (و یا محلول قلیایی) 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 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 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 فرار سیدن زمان آزمون نگهداری و عمل آوری گردیدند. 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 [۱۷].

۵- استانداردها و روش آزمون

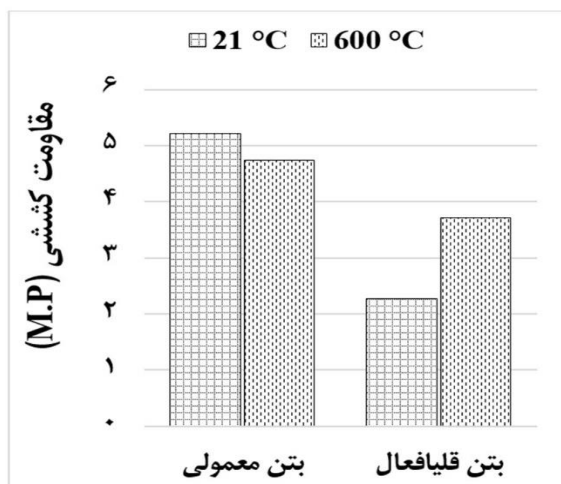
آزمون مقاومت فشاری بتن در سن عمل آوری ۹۰ روزه مطابق با استاندارد BS 12390-3 بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی متر انجام گرفت. در این راستا نمونه‌ها در زیر دستگاه چک بتن شکن قرار داده شدند و نیرو مطابق با استاندارد تا

لحظه شکست نمونه بتنی اعمال گردید. آزمون مقاومت کششی بتن در سن عمل آوری ۹۰ روزه مطابق با استاندارد ASTM C496 بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد ۱۵×۳۰ سانتی متر انجام گرفت. در این راستا نمونه‌ها از وجه طولی در زیر دستگاه چک بتن شکن قرار داده شدند و نیرو مطابق با استاندارد تا لحظه شکست نمونه بتنی اعمال گردید. میزان حداکثر بار وارده، تعیین کننده مقدار مقاومت نمونه بتنی در برابر فشار وارده است. آزمون مدول الاستیسیته بتن در سن عمل آوری ۹۰ روزه مطابق با استاندارد ASTM C469 بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد ۱۵×۳۰ سانتی متر انجام گرفت. در این راستا نمونه مورد نظر داخل قاب آزمایش مدول الاستیسیته بتن جانمایی گردید، سپس نمونه بتنی از مقطع ۱۵ سانتی متر بطور عمود بین دو صفحه دستگاه چک بتن شکن قرار گرفت، در ادامه بار اعمالی با سرعت بین ۰/۵ الی ۰/۹ کیلو نیوتن بر ثانیه تا زمان تغییر شکل نهایی نمونه بر محور عمود آن وارد شد، تغییر شکل طولی نمونه بتنی با استفاده از گیج یا کرنش سنج متصل به قاب اندازه‌گیری گردید. آزمون SEM در سن عمل آوری ۹۰ روزه در دمای اتاق و تحت حرارت بالا، توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام گرفت، در این راستا نمونه بتنی خرد شده 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 عمل آوری 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 [۱۸]. آزمون‌های این تحقیق در آزمایشگاه موسسه آموزش عالی دیلمان واقع در شهر لاهیجان انجام شده است. شکل ۱ نمونه بتنی تحت حرارت داخل کوره را نشان می دهد.

۶-۲- تفسیر و نتایج آزمون مقاومت کششی

نتایج حاصل از آزمون مقاومت کششی بتن معمولی و بتن قلیافعال حاصل از تحقیقات انجام شده در این پژوهش آزمایشگاهی تحت دمای ۲۱ درجه سلسیوس و حرارت ۶۰۰ درجه سلسیوس در نمودار شکل ۱ به نمایش در آمده است.

پیرو این نتایج مشهود است که اعمال حرارت بالا (۶۰۰ درجه سلسیوس) به نمونه‌های بتنی موجب افت مقاومت کششی در بتن حاصله شده است، به طوری که در بتن معمولی و بتن قلیافعال، به ترتیب به میزان ۵۶ و ۲۱ درصد افت مقاومت کششی تحت دمای بالا، نسبت به دمای ۲۱ درجه سلسیوس حاصل شد. از طرفی مقاومت کششی در بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی در دمای ۲۱ درجه سلسیوس به میزان ۹ درصدافت دارد اما در تحت حرارت ۶۰۰ درجه سلسیوس مقدر مقاومت کششی در بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی ۶۳ درصد برتری را نشان می‌دهد. مقاومت بیشتر بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی تحت حرارت بالا (۶۰۰ درجه سلسیوس)، به دلیل ساختار متراکم‌تر بتن قلیافعال به واسطه تولید حجم بالایی از ژل‌های هیدراته از قبیل سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) و سیلیکات آلومینیوم کلسیم-هیدراته (C-A-S-H) و سیلیکات آلومینیوم سدیم هیدراته (N-A-S-H)، تولید شده در فرایند شیمیایی (موسوم به ژئوپلیمریزاسیون یا ژئوسپارش) بین مواد سیمانی و محلول قلیایی است. نقش این ژل‌ها در ترکیب بتن که به عنوان محصول اصلی فرایند ژئوپلیمریزاسیون شناخته می‌شود، پر کردن منافذ، حفرات و ترک‌های موجود در ریزساختار و کلان‌ساختار بتن و ایجاد پیوند در نواحی انتقال بین سطحی (ITZ) و بین لایه‌ای می‌باشد. 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 ساختار بتن می‌گردد [۱۹].



شکل ۳- نتایج آزمون مقاومت کششی

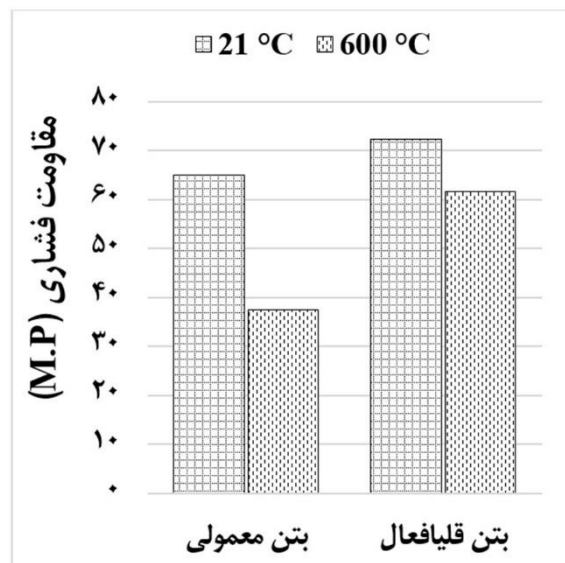


شکل ۱- نتایج آزمون مقاومت کششی

۶-۳- تفسیر و نتایج آزمون

۶-۱- تفسیر و نتایج آزمون مقاومت فشاری

نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری نمونه‌های بتن معمولی و بتن قلیافعال تحت دمای ۲۱ و ۶۰۰ درجه سلسیوس در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه براساس شکل ۲ ارائه شده است. براساس این نمودار مشاهده می‌گردد که اعمال حرارت به نمونه‌های بتنی موجب افت نتایج شده است، در این راستا میزان افت نتایج در بتن معمولی به مقدار ۴۲ درصد و در بتن قلیافعال به میزان ۱۵ درصد رسید. نمونه‌های بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی مقاومت فشاری بیشتری را کسب کردند به طوری که در دمای ۲۱ و ۶۰۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۱۱ و ۶۴ درصد مقاومت بالاتر در نمونه‌های بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی مشاهده گردید، این فرایند به دلیل کیفیت ریزساختاری برتر ترکیب بتن قلیافعال است که حجم ژل‌های هیدراته بیشتری را در خود جای داده است. این ژل‌ها از طریق پر کردن منافذ و حفرات بتن موجب استحکام بیشتر بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی شده‌اند.



شکل ۲- نتایج آزمون مقاومت فشاری



شکل ۵- نمونه بتنی تحت آزمون مدول الاستیسیته

۴-۶- تفسیر و نتایج آزمون SEM

تصاویر میکروسکوپ الکترونی در مقیاس ۱۰ میکرومتر حاصل از ریزساختار بتن معمولی و بتن قلیافعال تحت دمای ۲۱ و ۶۰۰ درجه سلسیوس در سن عمل آوری ۹۰ روزه در شکل ۶ به نمایش در آمده است. بطور کلی تصاویر حاصل از ریزساختار خمیر بتن معمولی و بتن قلیافعال را می‌توان به چند بخش به شرح ذیل تقسیم‌بندی کرد.

۱) شامل ژل‌های هیدراته شده ناشی از فرایند بسپارش و ژئوسپارش، که به‌طور عمده بصورت نواحی با رنگ تیره در شکل‌ها مشاهده می‌گردند.

۲) دانه‌های کلینکری هیدراته نشده و ذرات ناشی از وجود ناخالصی‌ها در مواد اولیه، که به‌طور عمده به‌صورت نواحی با رنگ سفید در شکل‌ها مشاهده می‌گردند.

۳) ترک‌ها و ریز ترک‌های موجود در مخلوط به‌دلیل انقباض حرارتی ناشی از عمل آوری حرارتی و حرارت هیدراتاسیون و ژئوپلیمریزاسیون با توجه به عیار بالا از سیمان پرتلند و سرباره کوره‌آهن‌گدازی در ترکیب بتن.

۴) حفرات و منافذ مویینه بین لایه‌ای در ساختار ژل‌های هیدراته و حفرات و منافذ مویینه بین سطحی در نواحی انتقال.

۵) سایر ذرات مشارکت نکرده در فرایند شیمیایی.

براساس تصاویر، میزان ریزترک‌های موجود در ترکیب بتن قلیافعال بیشتر از ترکیب بتن معمولی به چشم می‌خورد، این امر بیشتر به علت عمل آوری حرارتی نمونه‌های بتن قلیافعال تحت دمای ۶۰ درجه

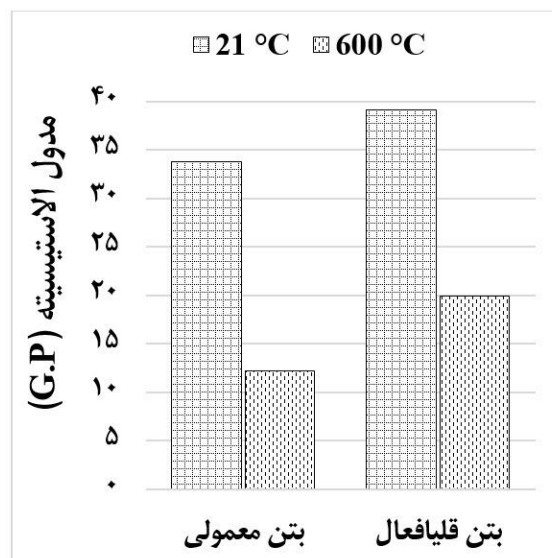
۳-۶- تفسیر و نتایج آزمون مدول الاستیسیته

نتایج حاصل از آزمون مدول الاستیسیته بتن معمولی و بتن قلیافعال حاصل از تحقیقات در این پژوهش آزمایشگاهی تحت دمای ۲۱ درجه سلسیوس و حرارت ۶۰۰ درجه سلسیوس در نمودار شکل ۴ به نمایش در آمده است.

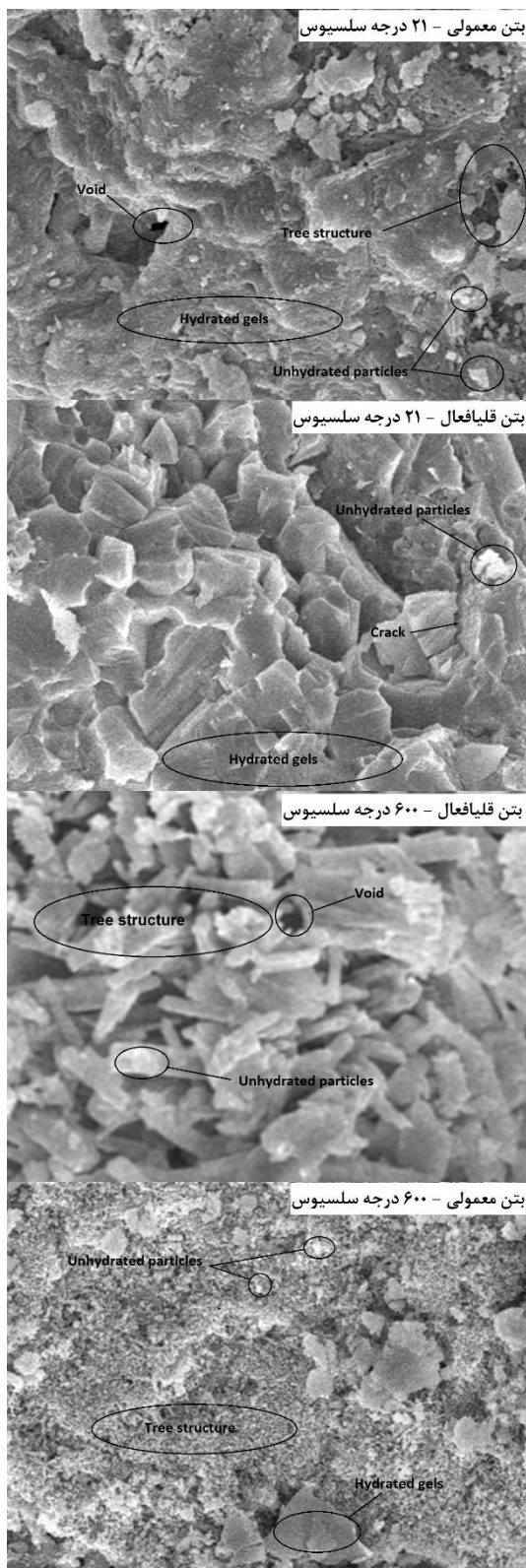
بر اساس این نتایج مشهود است که مدول الاستیسیته بتن قلیافعال در دمای ۲۱ و ۶۰۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۱۶ و ۶۲ درصد برتری را نسبت به بتن معمولی کسب نموده است. این امر به دلیل فعالیت بالای پوزولانی موجود در سرباره کوره‌آهن‌گدازی در زمان ترکیب با محلول قلیایی می‌باشد که منجر به تولید حجم زیادی از ژل‌های هیدراته شده در ترکیب بتن شده است، در حالی که حجم ژل‌های هیدراته شده در ترکیب بتن معمولی به مراتب کمتر از بتن قلیافعال می‌باشد.

در این راستا تحقیقات نشان داده است که به علت ایجاد بتن متراکم‌تر، سختی بتن و در نتیجه مدول الاستیسیته بتن افزایش می‌یابد [۲۰]. در راستای تولید بتن قلیافعال، دباغ و همکاران معتقدند که افزایش تراکم و سختی در بتن منجر به افزایش مدول الاستیسیته بتن می‌گردد [۲۱]. از طرفی تحقیقات نشان داده است که عیار سیمان مصرفی در ترکیب بتن، اثر مستقیمی بر مدول الاستیسیته آن دارد [۲۲]. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی اخذ شده از بخش ریزساختار بتن معمولی و بتن قلیافعال در این مقاله، تصدیقی بر این تفاسیر می‌باشد.

اعمال حرارت بالا (۶۰۰ درجه سلسیوس) به نمونه‌های بتن معمولی و بتن قلیافعال موجب افت نتایج مدول الاستیسیته در هر دو نوع از بتن شده است. در این راستا بتن معمولی و بتن قلیافعال به ترتیب افت ۶۳ و ۴۹ درصدی در میزان مدول الاستیسیته را در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس نسبت به دمای ۲۱ درجه سلسیوس کسب نمودند. شکل ۵ نمونه بتنی تحت انجام آزمون مدول الاستیسیته را به نمایش درآورده است.



شکل ۴- نتایج آزمون مدول الاستیسیته



شکل ۶- نتایج آزمون SEM

سلسیوس می‌باشد که منجر به ایجاد ریزترک‌ها در ریزساختار این نوع از بتن شده است. در این راستا تحقیقات سایر محققین نشان می‌دهد که در بتن قلیافعال به دلیل عمل‌آوری در محیط خشک کوره یک سری ریزترک‌هایی در بتن تشکیل می‌شود که باعث می‌گردد تا بتن از یکپارچگی کامل که باعث انتقال امواج اولتراسونیک با سرعت بالاتر می‌گردد خارج شود و این امر باعث می‌گردد که اندکی سرعت‌های به دست آمده از مقادیر بتن معمولی کمتر باشد، البته وجود این ترک‌ها در ابعاد بسیار ریز بوده و تنها بر سرعت امواج اولتراسونیک تاثیر می‌گذارد و تاثیر چندانی بر سایر خواص نمونه‌ها نخواهد داشت [۲۳].

در تصاویر، حجم ژل‌های هیدراته نظیر سیلیکات کلسیم هیدراته (C-H) در ترکیب بتن قلیافعال بیشتر از ترکیب بتن معمولی دیده می‌شود. این امر به دلیل حضور ذرات آلومینوسیلیکاتی فراوان در ترکیب سرباره کوره‌آهنگدازی می‌باشد که توانسته‌اند با ترکیب شیمیایی با محلول قلیایی، ژل‌های هیدراته بیشتری را در مقایسه با سیمان پرتلند در ترکیب بتن معمولی، تولید نمایند. با اعمال حرارت بالا (۶۰۰ درجه سلسیوس) به نمونه‌های بتنی، افت ساختاری در ماتریس خیمر معمولی و قلیافعال مشهود است. در این راستا، تحقیقات نشان داده است که با توجه به فشار زیاد بین حفره‌ای، خروج آب از فضای پیوند شیمیایی در ژل سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) منجر به خرابی بتن در دمای بیش از ۴۵۰ درجه سلسیوس می‌شود، تغییرات قابل توجهی از خواص مکانیکی بتن تحت دمای بین ۲۷ تا ۱۰۰ درجه سلسیوس مشاهده نمی‌گردد اما کاهش تا ۴۰ درصد در مقادیر مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته، بعد از اعمال دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس در مراحل اولیه اتفاق می‌افتد [۱۷]. تعداد و اندازه ترک‌ها، حفرات و منافذ در ریزساختار بتن معمولی و بتن قلیافعال تحت حرارت ۶۰۰ درجه سلسیوس، بیشتر از نمونه‌های قرار گرفته در معرض دمای ۲۱ درجه سلسیوس است. وجود ساختار متخلخل و درختی شکل در تصاویر از آثار حرارت بالا بر ریزساختار نمونه‌های بتنی است.

- [2] Singh B. *Geopolymer concrete: A review of some recent developments*. Construction and building materials. 2015; 85: 78-90.
- [3] Juenger M. C. G, Winnefeld F, Provis J, L Ideker, J. H. Advances in alternative cementitious binders. *Cem. Concr. Res.* 2011; 41: 1232-1243.
- [4] Richardson I. G. The calcium silicate hydrates. *Cement and concrete research.* 2008; 38(2): 137-158.
- [5] Kamal Ne, Des C, Paul K. High-Strength Geopolymer Concrete- Properties Advantages and Challenges. *Advances in Materials.* 2018; 7(2): 15-25. doi: 10.11648/j.am.20180702.11
- [6] Siddique R. and D. Kaur. Properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag (GGBFS) at elevated temperatures. *Journal of Advanced Research.* 2012; 3(1): 45-51.
- [7] Yüksel, İ, R. Siddique, and Ö. Özkan. Influence of high temperature on the properties of concretes made with industrial by-products as fine aggregate replacement. *Construction and building materials.* 2011; 25(2): 967-972.
- [8] Allahverdi A. L. I, Ebrahim Najafi Kani, and Mahshad Yazdanipour. Effects of blast-furnace slag on natural pozzolan-based geopolymer cement. *Ceramics-Silikaty.* 2011; 68-78.
- [9] Yunsheng Z, Sun Z and Li Z. Composition design and microstructural characterization of calcined kaolin-based geopolymer cement. *Applied Clay Science.* 2010; 47(3-4): 271-275.
- [10] McNulty E. Geopolymers: an environmental alternative to carbon dioxide producing ordinary Portland cement. *Department of Chemistry, The Catholic University of America.* 2009.
- [11] Bakharev T. Thermal behaviour of geopolymers prepared using class F fly ash and elevated temperature curing. *Cement and Concrete Research.* 2006; 36(6): 1134-1147.
- [12] Mane S and Jadhav H. Investigation of Geopolymer Mortar and Concrete Under High Temperature. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering.* 2012; 2(12).
- [13] Comrie D and Kriven W. M. Composite cold ceramic geopolymer in a refractory

۷- نتیجه گیری

در این مطالعه آزمایشگاهی، یک طرح اختلاط از بتن معمولی و یک طرح اختلاط از بتن قلیافعال به منظور ارزیابی خواص مکانیکی بتن در سن عمل آوری ۹۰ روزه و دمای ۲۱ و ۶۰۰ درجه سلسیوس، ساخته شد. در این راستا آزمون‌های مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بتن انجام گرفت و در ادامه، بررسی ریزساختاری توسط انجام آزمون تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) صورت پذیرفت. نتایج حاصل از این پژوهش به شرح ذیل ارائه می‌گردد.

۱- تحت حرارت بالا (۶۰۰ درجه سلسیوس)، افت مقاومت فشاری در بتن معمولی و بتن قلیافعال به ترتیب به میزان ۵۶ و ۲۱ درصد نسبت به بتن معمولی حاصل شد.

۲- اعمال حرارت بالا (۶۰۰ درجه سلسیوس)، به نمونه‌های بتنی موجب افت ۵۶ و ۲۱ درصدی در مقاومت کششی به ترتیب برای بتن معمولی و بتن قلیافعال شد.

۳- افت ۶۳ و ۴۹ درصدی نتایج آزمون مدول الاستیسیته، برای نمونه‌های بتن معمولی و بتن قلیافعال تحت حرارت بالا نسبت به دمای ۲۱ درجه سلسیوس کسب گردید.

۴- مقاومت فشاری در بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی در دمای ۲۱ و ۶۰۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۱۱ و ۶۴ درصد برتری را نشان داد.

۵- مقاومت کششی بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی در دمای ۲۱ و ۶۰۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۹ درصد کاهش و ۶۳ درصد برتری را نشان می‌دهد.

۶- مدول الاستیسیته بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی در دمای ۲۱ و ۶۰۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۱۶ و ۶۲ درصد برتری را کسب کرد.

۷- نتایج حاصل از آزمون تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در هماهنگی و همپوشانی با سایر نتایج آزمون‌های این پژوهش قرار داشت.

۸- در این پژوهش آزمایشگاهی، برتری خواص مکانیکی بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی در دمای ۲۱ و ۶۰۰ درجه سلسیوس کسب گردید، این برتر بیشتر به دلیل حضور فراوان‌تر (در مقایسه با سیمان پرتلند) مواد چسباننده و پرکننده از جنس سیلیس و آلومینات در سرباره- کوره آهن‌گدازی مصرفی در ترکیب بتن قلیافعال است که توانسته‌اند طی انجام فرایند واکنش‌پذیری با محلول قلیایی، حجم بالاتری (نسبت به بتن معمولی) از ژل‌های هیدراته شده نظیر C-S-H را تولید کنند، این ژل‌ها با ایجاد اتصال در نواحی انتقال بین سطحی (ITZ) و با پر کردن حفرات و منافذ بین سطحی و بین لایه‌ای، موجب افزایش خواص مکانیکی بتن قلیافعال (نسبت به بتن معمولی) گردیده‌اند.

مراجع

- [1] Nuaklong P, Sata V, and P Chindaprasirt. Influence of recycled aggregate on fly ash geopolymer concrete properties. *Journal of Cleaner Production.* 2016; 112: 2300-2307.

- application. *Advances in Ceramic Matrix Composites IX*. 2004;153: 211-225.
- [14] Bakhtiyari S, Allahverdi A, Rais-Ghasemi M, Zarrabi B and Parhizkar T. Self-compacting concrete containing different powders at elevated temperatures–Mechanical properties and changes in the phase composition of the paste. *Thermochimica acta*. 2011; 514(1-2): 74-81.
- [15] Pilehvar S, DuyCao V, Szczotok M, , Carmona A, Valentini M, Lanzón L, , LenaKjønksen M. Physical and mechanical properties of fly ash and slag geopolymer concrete containing different types of micro-encapsulated phase change materials. *Construction and Building Materials*. 2018; 173: 28-39.
- [16] Deb P, Nath P and Sarker P. Drying shrinkage of slag blended fly ash geopolymer concrete cured at room temperature. *Procedia Engineering*. 2015; 125, 594-600.
- [17] Mehta P. K and Monteiro P. J. *Concrete: microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill Education. 2014.
- [18] Kong D.L and J.G. Sanjayan. Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete. *Cement and concrete research*. 2010; 40(2): 334-339.
- [19] Hongjian D, Suhuan D and Liu X. Durability performances of concrete with nano-silica. *Construction and building materials*. 2014; 73: 705-712.
- [20] Dabbagh H and Akbarpour S. Behavior of Structural Lightweight Concrete Containing Nano Silica and Steel Fibers under Compressive Monotonic Loading. *Concrete Research*. 2017; 10(1): 35-46.
- [21] Dabbagh H & Akbarpour S. Behavior of Structural Lightweight Concrete Containing Nano Silica and Steel Fibers under Compressive Monotonic Loading. *Concrete Research*. 2017; 10(1): 35-46.
- [22] Kazemian S, Ghareh S. Effects of Cement, Different Bentonite, and Aggregates on Plastic Concrete in BeshGhardash Dam, Iran. *Journal of Testing and Evaluation*. 2017; 45(1): 242-248.
- [23] Ren W, Xu J and Bai E. Strength and ultrasonic characteristics of alkali-activated fly ash-slag geopolymer concrete after exposure to elevated temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2016; 28(2): 04015124.