

(مقاله پژوهشی)

## مقایسه مقاومت فشاری بتن قلیافعال و بتن معمولی، تحت حرارت بالا بر اساس آزمون XRD و SEM، بمنظور بکارگیری در سازه‌های دریایی

محمدحسین منصورقناعی<sup>۱\*</sup>، مرتضی بیک‌لریان<sup>۲</sup>، علیرضا مردوخ‌پور<sup>۳</sup>

Mhm.ghanaei@iauc.ac.ir

- ۱- گروه مهندسی عمران، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران.  
 ۲- گروه مهندسی عمران، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران.  
 ۳- گروه مهندسی عمران، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران.

### چکیده

در دهه‌های اخیر بکارگیری بتن قلیافعال در سازه‌های دریایی با توجه به دارا بودن ویژگی‌های برتر در خواص مکانیکی و مقاومت حرارتی نسبت به بتن معمولی، مورد توجه دانشمندان علم مهندسی عمران قرار گرفته است. در این پژوهش آزمایشگاهی، یک طرح اختلاط از بتن معمولی با عیار سیمان ۴۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب ساخته شد. یک طرح اختلاط نیز از بتن قلیافعال بر پایه سرباره کوره‌آهن‌گدازی ساخته شد تا میزان مقاومت فشاری بتن تحت دمای محیط و پس از اعمال حرارت ۵۰۰ درجه سلسیوس، در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه مورد مقایسه و ارزیابی قرار گیرد. در ادامه آزمون‌های طیف سنجی پراش اشعه ایکس (XRD) و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در دمای محیط و تحت حرارت ۵۰۰ درجه سلسیوس به منظور بررسی ریزساختاری و راستی‌آزمایی نتایج آزمون مقاومت فشاری، بر روی نمونه‌های بتنی انجام گرفت. نتایج حاصله بیانگر این مطلب است که، میزان مقاومت فشاری بتن در دمای محیط، برای بتن معمولی به مقدار ۶۲/۴۳ مگاپاسکال و برای بتن قلیافعال به مقدار ۶۸/۰۳ مگاپاسکال می‌باشد که اختلاف حدود ۹ درصدی را با هم دارا هستند. با اعمال حرارت بالا به نمونه‌های بتنی، میزان افت مقاومت فشاری در بتن معمولی به مقدار ۳۷/۷ درصد و در بتن قلیافعال به میزان ۱۶/۴ درصد، کسب گردید. نتایج حاصل از آزمون‌های XRD و SEM ضمن هماهنگی با یکدیگر، در همپوشانی با نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری در دمای محیط و تحت حرارت بالا قرار گرفتند.

واژگان کلیدی: بتن قلیافعال، سرباره کوره‌آهن‌گدازی، آزمون مقاومت فشاری، طیف سنجی پراش اشعه ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM).



تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۱۵

تاریخ ویرایش مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۰۴

DOI: ۱۰,۲۲۰۳۴/IJMT.۲۰۲۲,۵۴۳۴۸۴,۱۷۲۵

صص ۳۶-۴۶

## ۱ - مقدمه

شده نشان می‌دهد که استفاده از محلول قلیایی بصورت ترکیبی از سیلیکات سدیم ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) و هیدرواکسیدسدیم ( $\text{NaOH}$ ) باعث افزایش مقاومت فشاری بتن در مقایسه با استفاده منفرد از آنها می‌شود [۸]. بهبود مقاومت فشاری در بتن قلیافعال (نسبت به بتن معمولی) بر پایه ۲۰ درصد خاکستر بادی، تا ۸ درصد گزارش شده است [۹]. افزایش مقاومت فشاری در بتن قلیافعال (نسبت به بتن معمولی) بر پایه خاکستر بادی و سرباره کوره آهنگدازی در تحقیقات لی و همکارانش نیز گزارش شده است [۱۰]. افزایش ۷۴ درصدی در مقاومت فشاری بتن قلیافعال بر پایه سرباره کوره آهنگدازی نسبت به بتن معمولی در سن عمل-آوری ۹۰ روزه در تحقیقات جعفری ندوشن و همکاران گزارش شده است، در پژوهش آنها، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) گویای تولید حجم بالایی از ژل-های هیدراته و تراکم ریزساختاری برتر در بتن ژئوپلیمری نسبت به بتن معمولی است [۱۱].

در دهه‌های اخیر افزایش مقاومت بتن در مواجهه با حرارت بالا مورد توجه فراوان محققین قرار گرفته است. در این راستا، اعتقاد بر این است که بتن قلیافعال به دلیل خواص شبه سرامیکی خود، عملکرد بهتری در مواجهه با آتش در مقایسه با بتن‌های معمولی دارد [۱۴-۱۲]. البته مقاومت بتن‌های قلیافعال در مواجهه با سطح قابل توجهی از عملیات حرارتی به ترکیبات شیمیایی تشکیل دهنده آن و همچنین دما و نحوه عمل‌آوری، در بتن بستگی دارد [۱۵]. هنگامی که بتن قلیافعال در معرض دمای بالا (تا  $500^\circ\text{C}$ ) قرار می‌گیرد، تعدادی از تغییرات را تجربه می‌کند که بر اساس محدوده حرارتی آنها به شرح زیر مشخص شده است [۱۶].

۱. حذف آب تبخیر در دمای  $100^\circ\text{C}$  درجه سلسیوس.
۲. ژئوپلیمریزاسیون (ژئوسپارش) کلسیم سیلیکات هیدراته از دمای  $180^\circ\text{C}$  درجه سلسیوس شروع می‌شود. با افزایش دما به  $200^\circ\text{C}$  درجه سلسیوس، فشار بخار به طور مداوم در ساختار بتن قلیافعال افزایش می‌یابد.
۳. گروه‌های هیدروکسیل OH در دمای  $500^\circ\text{C}$  درجه سلسیوس تبخیر می‌شوند. دی‌هیدروکسیلاسیون ساختار آلومینوسیلیکات موجود در ترکیب را تغییر داده و از این طریق سطح مقاومت ترکیب کاهش می‌یابد.

سازه‌های دریایی از نوع بتن مسلح، به دلیل همجواری با آب دریا و اقیانوس‌ها، همواره در معرض آسیب‌هایی از قبیل خوردگی و سولفات‌شدن بتن قرار دارند. از طرفی بروز حریق در سازه‌های دریایی از قبیل سکوها نفتی همواره اجتناب ناپذیر است. بکارگیری از مصالح با دوام و استحکام بالا در این راستا می‌تواند منجر به بالا رفتن عمر مفید و بهبود مقاومت حرارتی در این نوع از سازه‌ها گردد. از طرفی تولید بتن معمولی همواره با چالش‌های زیست محیطی همراه بوده است. در این راستا، تحقیقات نشان می‌دهد که کارخانه‌های تولیدکننده سیمان مسئول انتشار حدود ۵ درصد از کل دی‌اکسیدکربن ( $\text{CO}_2$ ) وارد شده به جو کره زمین می‌باشند [۱].

نیاز به خواص مکانیکی بالا در بتن موجب گردیده تا دانشمندان به فکر تولید بتنی باشند که معایب موجود در بتن معمولی را پوشش دهد. در این راستا جایگزینی پوزولان‌هایی مانند سرباره کوره آهنگدازی بجای سیمان در بتن مورد توجه محققین قرار گرفت. تحقیقات نشان داده است که به ازای تولید هر تن فولاد،  $300$  کیلوگرم تا یک تن سرباره کوره آهنگدازی انباشته می‌گردد که مصرف آن (در موارد مختلف به خصوص در بتن) می‌تواند از آلودگی محیط زیست جلوگیری کند، بتن‌های حاوی سرباره کوره آهنگدازی دارای مقاومت بیشتری در برابر حمله سولفات‌ها هستند [۲]. سرباره کوره آهنگدازی در مقایسه با سیمان پرتلند، حاوی ذرات ریزتری که دارای مساحت سطح ویژه‌ی بزرگ‌تر هستند می‌باشد، در نتیجه مساحت سطح واکنش بیشتری را در مجاورت با آب به همراه دارند [۳]. فعال‌سازی سرباره کوره بلند با مایعات قلیایی (مانند  $\text{NaOH}$  یا  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) برای تولید سیمان سرباره فعال شده با قلیایی در چند دهه گذشته مورد مطالعه قرار گرفته است [۴]. جایگزینی کل سیمان با سرباره کوره آهنگدازی در بتن، منجر به تولید بتن قلیافعال می‌گردد. ساختار بتن ژئوپلیمری (قلیافعال) ابتدا توسط دیویدویتز مطرح شد [۵]. میزان دی‌اکسیدکربن تولید شده در فرآیند ژئوپلیمری بسیار کمتر از فرآیند تولید سیمان است [۶]. مکنالتی با مقایسه بتن حاوی سیمان پرتلند معمولی با بتن قلیافعال، اعلام کرد که بتن‌های قلیافعال دارای مقاومت فشاری بالاتری نسبت به بتن معمولی هستند [۷]. مطالعات انجام

در مقایسه با بتن معمولی از اهداف اصلی این تحقیق حاضر می‌باشد.

۲. کمک به کاهش حجم انتشار گاز سمی  $CO_2$  در مقایسه با تولید بتن معمولی.

۳. کمک به حفظ سلامت محیط زیست به واسطه مصرف (در ترکیب بتن قلیافعال) سرباره‌های انباشته شده در کارخانجات ذوب آهن، شناخته شده بعنوان مواد مضر محیط زیستی.

۴. حفظ و کاهش مصرف منابع معدنی مصرفی که بعنوان مصالح اصلی در طی فرایند ساخت سیمان معمولی استفاده می‌گردد.

## ۲- ساخت نمونه بتنی و برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مصالح مصرفی

در این تحقیق آزمایشگاهی، سرباره کوره آهنگدازی محصول شرکت ذوب آهن اصفهان، تحت استاندارد ASTM C989/C989M مورد مصرف قرار گرفت، مشخصات این محصول در جداول ۱ و ۲ نشان داده شده است. سیمان مصرفی از نوع پرتلند تیپ II، محصول شرکت صنایع سیمان گیلان سبز (دیلمان)، تولید شده تحت استاندارد ISIRI 389 بر اساس مشخصات جداول ۳ و ۴ استفاده شد. سنگدانه‌های مصرفی محصول کارخانه های شن و ماسه شهرستان لاهیجان بوده است که به لحاظ کمی و کیفی در محدوده استاندارد ASTM C33 قرار داشتند، سایر مشخصات سنگدانه‌ها در جدول ۵ نشان داده شده است. ابروان کننده مصرفی با مشخصات جدول ۶، از نوع پلی کربوکسیلات نرمال، محصول شرکت دوروچم خاورمیانه با نام تجاری Flowcem R700 مورد استفاده قرار گرفت. محلول قلیایی مصرفی در ساخت بتن قلیافعال، ترکیبی از هیدرواکسیدسدیم (NaOH) و سیلیکات سدیم ( $Na_2SiO_3$ ) با نسبت سیلیکات به هیدرواکسید ۲/۵ و غلظت مولاریته ۱۲، وزن مخصوص ترکیبی ۱۴۸۳ کیلوگرم بر متر مکعب است، سایر مشخصات محلول قلیایی مصرفی به تفکیک هر محلول در جدول ۷ نشان داده شده است. آب مصرف شده به منظور تهیه آب آهک و ساخت طرح‌های اختلاط تحقیق پیش‌رو (در بتن کنترل و ساخت محلول قلیایی)، از آب شرب شهر لاهیجان استفاده گردید، این آب دارای pH در محدوده ۶/۵ الی ۷/۵ و وزن مخصوص  $1000 \text{ kg/m}^3$  است.

در تحقیقات سدکیو و کومار [۱۷] بر روی بتن ژئوپلیمری بر پایه ۶۰ درصد از سرباره کوره آهنگدازی، افت مقاومت فشاری با اعمال حرارت بالا تا ۳۵۰ درجه سلسیوس به میزان ۴۵ درصد گزارش شده است. تحقیقات نشان می‌دهد که اعمال حرارت بالا (تا ۴۰۰ درجه سلسیوس) در بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهنگدازی تا میزان ۴۵ درصد از مقاومت فشاری در این نوع از بتن می‌کاهد و با فراتر رفتن دما تا ۶۰۰ درجه سلسیوس، بر میزان افت مقاومت فشاری این نوع از بتن ۱۹ درصد می‌افزاید، آنالیز آزمون XRD تفسیری بر این افت مقاومت در بتن است [۱۸]. در تحقیقی دیگر بر روی بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی که تحت عمل‌آوری حرارتی ۷۵ درجه سلسیوس قرار گرفته است، اعمال حرارت تا ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس به نمونه‌های بتنی موجب افت مقاومت فشاری در این نوع از بتن به ترتیب تا میزان ۱۹، ۳۵ و ۴۴ درصد گردید [۱۹]. نتایج بدست آمده در تحقیق آزمایشگاهی مقاله پیش‌رو، علل اصلی افت نتایج آزمایشگاهی در بتن تحت حرارت بالا را به چند نکته ذیل خلاصه می‌کند.

۱. تبخیر آب از فضاها پیوند شیمیایی تحت اثر فشار زیاد بین حفره‌ای که منجر به ایجاد فضاها متخلخل در بتن می‌گردد.

۲. بروز تنش‌های مماسی در نواحی انتقال بین سطحی (ITZ) در فصل مشترک بین سنگدانه و خمیر سیمان که می‌تواند موجب بروز ریزترک در این نواحی گردد.

۳. تفاوت در انبساط حرارتی بین خمیر سیمان و سنگدانه در نواحی انتقال بین سطحی که منجر به بروز ریزترک‌ها در این نواحی می‌گردد.

۴. تضعیف در پیوند شیمیایی در ساختار ژل‌های هیدراته شده (بعنوان عامل اصلی ایجاد استحکام و پیوند در اعضای تشکیل دهنده بتن) در دماهای مختلف و گسستگی پیوند در دماهای فراتر از ۴۰۰ درجه سلسیوس.

۵. تضعیف پیوندهای اجزای سازنده بتن بر اثر فشار بالای ناشی از بخار آب موجود در ترکیب.

نوآوری در این پژوهش آزمایشگاهی به واسطه تولید بتن (قلیافعال)، به چند مورد زیر خلاصه می‌گردد:

۱. خواص مکانیکی و ریزساختاری بتن قلیافعال در مقایسه با بتن معمولی بهبود می‌یابد. تولید بتن قلیافعال با خواص مقاومت و ریزساختاری بالا تحت دمای محیط و حرارت بالا

۲-۲- طرح اختلاط، ساخت و عمل آوری نمونه‌ها

استاندارد مجزا برای طرح اختلاط بتن قلیافعال موجود نمی‌باشد، لذا به پیروی از سایر تحقیقات در حوزه بتن ژئوپلیمری [۲۰]، برای ساخت بتن قلیافعال در این پژوهش

آزمایشگاهی از استاندارد طرح اختلاط بتن معمولی تحت توصیه کمیته ۸۹-۱-۲۱۱ ACI، استفاده گردید. مشخصات طرح اختلاط بتن در این تحقیق براساس جدول ۸ تنظیم شده است.

جدول (۱) مشخصات شیمیایی سرباره کوره آهن‌گدازی

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

جدول (۲) مشخصات فیزیکی و مکانیکی سرباره کوره آهن‌گدازی

وزن مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )	سطح مخصوص (Cm <sup>3</sup> /gr)	مدول الاستیسیته (Pa)	چگالی ظاهری (kg/m <sup>3</sup> )	اندازه ذرات (μm)	رنگ
۲۴۵۰	۲۲۰۰	۱/۲	۹۶۰	۲/۱	کرم

جدول (۳) مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ II

L.O.I	C+A	I.R	Na <sub>2</sub> O+۰,۶۰۸K <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	Cl
MAX ۱/۵	۵/۵ - ۷/۵	MAX ۰/۷	MAX ۰,۶	۲ - ۲/۳	۱/۴۵Max	۳/۵ - ۳/۸	۴/۵ - ۴/۸	۴۲ - ۴۳	۲۲ - ۲۱	Max ۰/۰۰۳

جدول (۴) مشخصات فیزیکی و رئولوژیکی سیمان پرتلند تیپ II

وزن مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )	سطح مخصوص (Cm <sup>3</sup> /gr)	گیرش اولیه (min)	گیرش ثانویه (min)
۲۳۵۰	۳۲۰۰ - ۳۰۰۰	۱۱۵ < ۱۳۰	۱۹۰ < ۲۰۵

جدول (۵) مشخصات سنگدانه‌ها

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

جدول (۶) مشخصات ابرروان کننده پلی کربوکسیلات نرمال

فرمول شیمیایی	حالت فیزیکی	رنگ	وزن مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )	استاندارد صرف	PH	میزان یون کلر	نقطه اشتعال
پلی کربوکسیلات نرمال	مایع	قهوه	۱۱۰۰	ASTM C۴۹۴	حدود ۷	ندارد	ندارد

جدول (۷) مشخصات محلول قلیافعال

نوع محلول	فرمول مولکولی	رنگ	مولاریته (mol/m <sup>3</sup> )	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	مدول الاستیسیته (p)	دمای ذوب (C)	جرم مولی (gr/mol)
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

جدول (۸) مشخصات طرح اختلاط بتن

طرح و نوع بتن	سیمان	آب	محلول قلیایی	سرباره	شن	ماسه	ابرروان کننده	عمل آوری
OC ۱ پرتلند	۴۵۰	۲۰۲/۵	۰	۰	۱۰۰۰	۷۶۱/۱۳	۶/۷۵	آب
GC ۲ قلیافعال	۰	۰	۲۰۲/۵	۴۵۰	۱۰۰۰	۸۱۶/۱۰	۶/۷۵	خشک

استاندارد BS ۱۲۳۹۰-۳ بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی متری توسط دستگاه جک بتن‌شکن انجام گرفت. در این راستا، نمونه‌ها به نحوی در دستگاه جک بتن‌شکن قرار داده شدند که دو سطح مقابلی که در موقع بتن‌ریزی 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) بصورت ثابت، یکنواخت، بدون تغییرات ناگهانی و عمود بر جهت بتن‌ریزی تا لحظه شکست انجام گرفت، میزان حداکثر بار وارده، تعیین کننده مقدار مقاومت نمونه بتنی در برابر فشار وارده می‌باشد.

آزمون XRD در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در دمای محیط و تحت حرارت بالا، توسط دستگاه طیف سنج پراش اشعه ایکس با مدل Philips PW۱۷۳۰ انجام گرفت. در این راستا نمونه‌های خرد شده برگرفته از مرکز نمونه بتنی در داخل دستگاه قرار داده شد و طی انجام آزمون، نمودار پراش کریستال‌های بتن تهیه گردید. داده‌های حاصل از تفرق اشعه X بصورت شدت فوتون بر حسب زاویه دتکتور ۲θ است که بصورت لیستی از محل پیک و شدت آنها بر روی گرافها آورده می‌شود. آزمون SEM در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در دمای محیط و تحت حرارت بالا، توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی با مدل FEI Quanta ۲۰۰ انجام گرفت، در این راستا نمونه بتنی خرد شده در دستگاه قرار داده شد و تصاویر با بزرگ نمایی مورد نظر ضبط و در ادامه مورد بررسی ریزساختاری قرار گرفت.

### ۳- نتایج آزمایشگاهی و تفسیر نتایج

#### ۳-۱- نتایج آزمون مقاومت فشاری بتن

نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری تحت دمای محیط (۲۰°C) و حرارت بالا (۵۰۰°C) در شکل ۱ به نمایش در آمده است. شکل ۲ نمونه‌های بتنی در فرایند آزمون مقاومت فشاری در دمای محیط را نشان می‌دهد.

بر اساس نتایج آزمون مقاومت فشاری، برای نمونه‌های عمل‌آوری شده در دمای محیط، میزان مقاومت فشاری در طرح بتن معمولی به میزان ۶۲/۴۳ مگاپاسکال و در بتن قلیافعال به میزان ۶۸/۰۳ مگاپاسکال کسب گردید که بتن قلیافعال برتری در حدود ۹ درصدی را در این راستا از خود

در این راستا ابتدا مصالح خشک از قبیل سنگدانه، سیمان و سرباره کوره آهنگازی به فراخور نیاز هر طرح، در داخل مخلوط‌کن برقی در حال گردش ریخته شد و عملیات ترکیب، به مدت ۲ دقیقه به طول انجامید. سپس مصالح تر از قبیل آب، محلول قلیایی و ابرروان کننده بر اساس نیاز هر طرح، به داخل دستگاه مخلوط‌کن در حال گردش ریخته شد و فرایند ترکیب مصالح، ۲ دقیق دیگر (در مجموع ۴ دقیقه) به طول انجامید.

در پایان ترکیب مصالح، مخلوط بتن در قالب‌های فلزی روغن‌کاری شده از قبل ریخته شد، این فرایند برای هر قالب در سه مرحله انجام گرفت و در هر مرحله عملیات تراکم بتن با ۲۵ ضربه توسط میله مخصوص انجام شد. سپس نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط (۲۰ الی ۲۵ درجه سلسیوس)، و فضای خشک نگهداری شدند. در پایان سپری شدن این زمان، نمونه‌های بتنی از قالب جداسازی شدند و نمونه‌های بتن معمولی در آب آهک تحت دمای محیط تا سن عمل‌آوری نگهداری شدند.

نمونه‌های بتن قلیافعال پس از جداسازی از قالب، به منظور افزایش خواص استحکامی، به مدت ۴۸ ساعت درون کوره الکتریکی تحت دمای ۶۰ درجه سلسیوس، عمل‌آوری شدند. در این راستا گزارش شده است که مقاومت بتن قلیافعال با افزایش دمای عمل‌آوری افزایش می‌یابد [۲۱].

در پایان زمان عمل‌آوری حرارتی بتن قلیافعال، نمونه‌های بتن پس از خروج از کوره، تا هنگام انجام آزمون، در دمای اتاق و در محیط خشک نگهداری و عمل‌آوری شدند. قبل از انجام آزمون‌های تحت حرارت بالا (۵۰۰°C) که در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه انجام شد، براساس استاندارد ISO ۸۳۴، نمونه‌های بتنی به مدت ۱ ساعت در کوره تحت دمای ۵۰۰ 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. در سایر تحقیقات نیز انجام فرایند عمل‌آوری حرارتی در بتن‌های قلیافعال، به شکل مشابه گزارش شده است [۲۲].

#### ۳-۲- روش‌ها آزمون و استانداردها

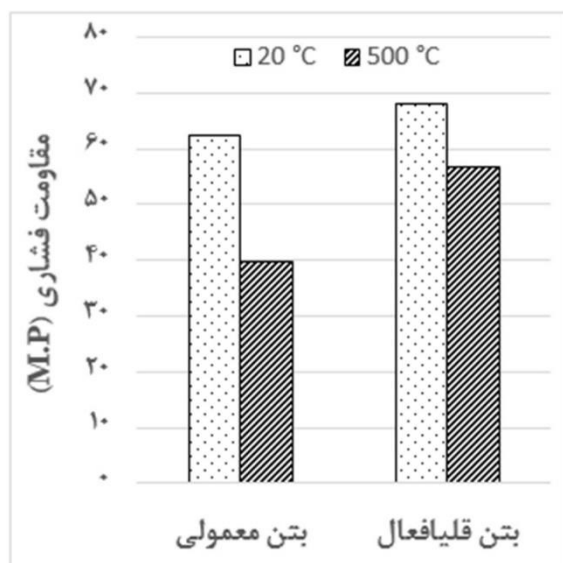
آزمون مقاومت فشاری بتن در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در دمای محیط و تحت حرارت بالا (۵۰۰°C)، براساس

تکامل ساختار حفره و ناحیه انتقال بین سطحی در بتن قلیافعال سرباره‌ای دارد [۲۳].

اعمال حرارت بالا توانسته است (با توجه به تصاویر SEM)، آسیب‌های جدی به بخش ریزساختار بتن معمولی و بتن قلیافعال وارد نماید و موجب افت قابل توجه‌ای از مقاومت ابتدا در بتن معمولی، سپس در بتن قلیافعال گردد. تحقیقات نشان داده است که با توجه به فشار زیاد بین حفره‌ای، خروج آب از فضاهای پیوند شیمیایی در سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H)، منجر به خرابی بتن در دمای بیش از ۴۵۰ درجه سلسیوس می‌شود [۱۷].

از طرفی تحقیقات نشان داده است که کاهش مقاومت فشاری در بتن تحت حرارت بالا می‌تواند ناشی از تنش‌های ایجاد شده در نواحی انتقال بین سطحی (ITZ) در حد فاصل بین سنگدانه و خمیر سیمان سخت شده به هنگام گرم شدن باشد، از طرفی تفاوت بین انبساط حرارتی خمیر سیمان و سنگدانه می‌تواند منجر به ایجاد ریزترک‌ها و اختلال در پیوند بین سیمان و سنگدانه گردد که این فرایند می‌تواند نقش موثری در میزان افت مقاومت فشاری بتن ایفاء نماید [۱۷].

در برخی از موارد مشاهده شده است که اعمال حرارت از ۱۰۰ تا ۳۵۰ درجه سلسیوس به نمونه‌های بتنی می‌تواند اندکی بر مقاومت فشاری بتن بیفزاید، این موضوع عمدتاً به دلیل خشک شدن سریع بتن گزارش شده است [۳۰-۲۴].



شکل (۱) نتایج مقاومت فشاری

نشان داد. این برتری ناشی از حضور ذرات فراوان آلومینوسیلیکاتی در سرباره کوره آهنگدازی است که توانسته ضمن سرعت بخشیدن به فرایند ژئوپلیمریزاسیون، با مشارکت بیشتر خود نسبت به تولید حجم زیادتری از ژل‌های هیدراته شده نظیر C-S-H کمک کند، ژل‌های هیدراته شده که محصول نهایی فرایند شیمیایی ژئوبسپارش می‌باشند عامل اصلی افزایش مقاومت در خمیر سیمان و بتن هستند، وجود حجم بالای ژل‌های هیدراته شده در ترکیب بتن ژئوپلیمری نسبت به بتن معمولی در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در شکل ۵ مشاهده می‌گردد. اعمال حرارت بالا در هر دو طرح از بتن، موجب افت نتایج حاصل از مقاومت فشاری در نمونه‌های بتنی گردید، علل اصلی این افت می‌تواند ناشی از تبخیر آب موجود در بتن که منجر به تخلخل در ترکیب بتن شده است باشد، بروز ریزترک‌ها در نواحی انتقال بین سطحی (ITZ)، تضعیف و یا تخریب پیوندها و از هم گسستگی ساختار ژل‌های هیدراته شده نیز از علل بعدی افت نتایج می‌باشد. در این راستا در نمونه بتن معمولی میزان مقاومت فشاری به ۳۸/۸۹ مگاپاسکال رسید که افت مقاومت ۳۷/۷ درصدی را تجربه کرد. و میزان مقاومت فشاری در بتن قلیافعال به میزان ۵۶/۸۷ رسید که افت مقاومت ۱۶/۴ درصدی را تجربه کرد.

در نمونه‌های بتن قلیافعال تحت دمای محیط و حرارت بالا، شاهد برتری میزان مقاومت فشاری کسب شده نسبت به نمونه‌های متناظر در بتن معمولی می‌باشیم. این موضوع نشان از فعالیت پوزولانی مناسب سرباره کوره آهنگدازی در ترکیب این نوع از بتن است که توانسته ضمن سرعت بخشیدن به فرایند شیمیایی ژئوبسپارش، به تولید حجم بالایی (بر اساس تصاویر SEM) از ژل‌های هیدراته شده کمک کند، این ژل‌ها توانسته‌اند با پر کردن حفرات و منافذ موئینه بین لایه‌ای و بین سطحی در ماتریس ساختار بتن قلیافعال، در بهبود استحکام و افزایش مقاومت فشاری در این نوع از بتن کمک نماید. تحقیقات سایرین نشان داده است که با افزودن سرباره‌کوره آهنگدازی به ترکیب بتن قلیافعال، ساختار منافذ در بتن بهینه‌سازی شده و توزیع اندازه منافذ بطور مناسب‌تر خواهد بود، ناحیه انتقال بین سطحی متراکم‌تر و مقاومت فشاری بتن به تدریج افزایش می‌یابد، به عبارتی توسعه مقاومت فشاری رابطه نزدیکی با



برای بتن قلیافعال در دمای محیط، وجود الگوی هاله و تپه مانند در نمودار، نشان از تشکیل محصول قلیافعال در این طرح است. همچنین در اوج قله‌ها نشانه‌ای از حضور هیدرواکسیدکلسیم نیست، این موضوع نشان از عملکرد مطلوب سرباره کوره آهنگدازی در ترکیب شیمیایی و مشارکت حداکثری ذرات آلومینوسیلیکاتی در راستای تولید ژل‌های هیدراته در فرایند ژئوسپارش می‌باشد. این امر از علل اصلی برتری مقاومت فشاری بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی در این پژوهش آزمایشگاهی است. در این راستا گزارش شده است که قله قوی در نواحی مختلف بعنوان قله مشخص و اثر انگشت بتن قلیافعال (بر پایه سرباره) شناخته می‌شود [۳۱].

براساس گراف Pick List حاصل از بتن قلیافعال، مشخص می‌گردد که چهار پیک بیشینه با مقادیر اوج قله‌های ۱۰۰، ۶۹/۳۵، ۲۶/۸۳، ۲۱/۸۵ و ۲۰/۸۷ درصد در زوایای ۲۵ به ترتیب در محدوده‌های ۲۹، ۲۶، ۳۹ درجه برای عناصر اتفاق افتاده است. در این راستا عناصری مانند سدیم آلومینوم سیلیکات ( $\text{NaAlSi}_2\text{O}_8$ )، کوارتز ( $\text{SiO}_2$ ) که علت آن وجود سرباره و واکنش‌های پوزولانی است دارای بیشترین پراکندگی هستند. براساس تصاویر SEM و نتایج حاصل از پراش اشعه ایکس (XRD)، اعمال حرارت بالا ( $500^\circ\text{C}$ )، موجب بروز تخریب در ترکیب و پیوند شیمیایی بخش ریزساختار بتن معمولی و بتن قلیافعال شده است. معمولاً در دمای بالا، ژل CH دیگر تبدیل به کلسیم کربنات‌های مانند Calcite نمی‌شود و در دمای بالا، ژل CH ناپدید شده و در واقع به Carbon و C-A تبدیل می‌گردد که این موضوع، علت اصلی ضعف بتن در دمای بالا است [۲۳، ۳۲]. در سایر تحقیقات انجام گرفته در حوزه بتن قلیافعال، گزارش شده است که، در دمای محیط، فازهای کریستالی و شبه بلوری کربنات کلسیم، اکسید سیلیکون، پیروکسن، فسفات آلومینیوم و کلسیت حضور دارند، اما در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس، حضور عناصری از قبیل اکسیدسیلیکون، سیلیکات کربنات آلومینیوم کلسیم سدیم مشاهده شده است [۳۲-۳۴]. در این راستا، در بتن معمولی، پس اعمال حرارت ۵۰۰ درجه سلسیوس و انجام فرایند کلسیناسیون<sup>۱</sup> (فرایند تصفیه حرارتی)، با توجه به خروج برخی از عناصر در معرض حرارت، تغییرات در فازهای



شکل (۲) تصاویر نمونه‌ها در آزمون مقاومت فشاری

### ۳-۲- نتایج آزمون XRD

نتایج حاصل از آزمون طیف سنجی پراش اشعه ایکس (XRD) در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه تحت دمای محیط (اتاق) در شکل ۳ و تحت دمای بالا ( $500^\circ\text{C}$ )، در شکل ۴ به نمایش در آمده است. در دمای محیط (۲۰ الی ۲۵ درجه سلسیوس)، برای بتن معمولی براساس گراف Pick List، مشخص می‌گردد که پنج پیک بیشینه با مقادیر اوج قله ۱۰۰، ۹۱/۸۴، ۶۷/۲۲، ۵۹/۹۴ و ۲۵/۱۴ درصد در زوایای ۲۵ به ترتیب در محدوده‌های ۲۴، ۲۹، ۲۶ و ۲۵ درجه برای عناصر مشخص شده اتفاق افتاده است. در این راستا عناصر آلومینیوم فسفات ( $\text{AlPO}_4$ ) و بعد از آن کلسیم کربنات (کلسیت) با فرمول مولکولی ( $\text{CaC}_6\text{O}_{18}$ ) و کلسیم منگنز کربنات (دولومیت) با فرمول شیمیایی ( $\text{CaMg}_0\text{C}_{12}\text{O}_{36}$ ) بیشترین پراکندگی را دارند.

<sup>۱</sup> Calcination

### ۳-۳- نتایج آزمون SEM

نتایج حاصل از آزمون تصویر برداری میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در سن عمل آوری ۹۰ روزه در مقیاس ۱ میکرومتر، تحت دمای محیط و تحت حرارت (۵۰۰°C)، در شکل ۵ به نمایش در آمده است. نتایج به دست آمده از میکروسکوپ الکترونی روبشی می تواند کمک شایانی در تشخیص ساختار و رفتار بتن نماید و خصوصیات مکانیکی و فیزیکی ماتریس بتن به شدت به ریز ساختار آن بستگی دارد.

با توجه به تصاویر اخذ شده از SEM مشاهده می گردد که ریزساختار بتن در هر دو طرح اختلاط، از سه فاز اساسی مجزا و متفاوت به شرح ذیل تشکیل شده است:

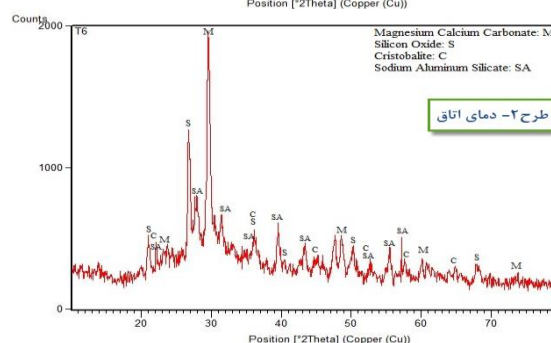
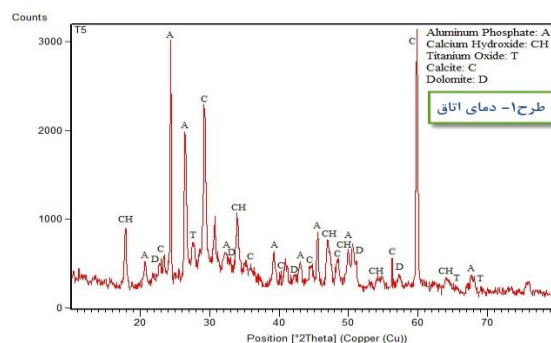
۱- فاز اول شامل محصولات هیدراتاسیون و ژئوپلیمریزاسیون حاوی ژل های هیدراته که در تصاویر SEM عمدتاً به رنگ تیره هستند، است.

۲- فاز دوم شامل بلورهای واکنش نکرده که در نتیجه ناخالصی های موجود در مواد اولیه و یا ذرات واکنش نکرده در فرایند هیدراتاسیون و ژئوپلیمریزاسیون هستند و در تصاویر SEM عمدتاً به رنگ سفید است.

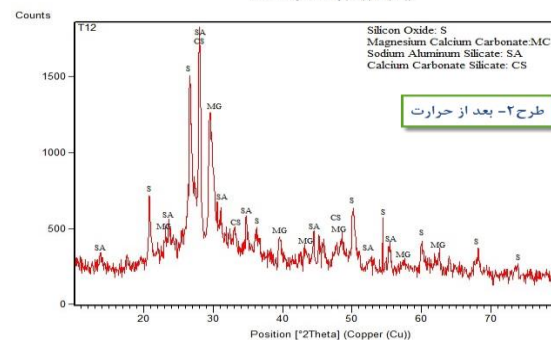
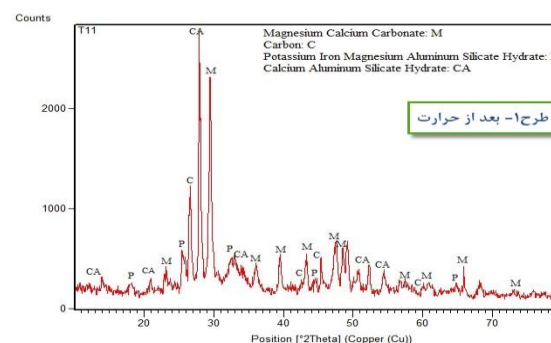
۳- فاز سوم شامل نحوه پیوندهای خمیر سیمان با سنگدانه در ناحیه انتقال بین سطحی (ITZ) تشکیل شده است.

در تصاویر بتن معمولی تحت دمای محیط، ساختار درختی شکل ناشی از غیرهمگنی در محصولات هیدراتاسیون (بسپارش) و کریستال های کوچک هیدراته نشده به ندرت مشاهده می گردد، وجود برخی از کریستال های کوچک، سطوح شکست و ذرات گروی سفید رنگ ناشی از حضور کریستال های هیدرواکسیدکلسیم هیدراته نشده در ساختار بتن این طرح که در تصاویر مشاهده می گردد را می توان ناشی از مصرف عیار بالای سیمان (۴۵۰ kg/m<sup>3</sup>) که به ایجاد پدیده هسته زایی و کلوخه شدن ذرات (ناشی از سرعت بالای فرایند هیدراتاسیون) کمک کرده است دانست، وجود ژل های هیدراته شده ناشی از فرایند شیمیایی هیدراتاسیون که عمدتاً از نوع C-S-H می باشند در ترکیب بتن معمولی در حد مناسبی وجود دارد، این ژل ها با ایجاد چسبندگی در بین اجزاء تشکیل دهنده بتن و با پر کردن خلل و فرج ها و ایجاد پیوندها از علل اصلی ایجاد مقاومت در بتن می باشند. در تصاویر بتن معمولی تحت حرارت بالا، ریزساختار بتن تحت تاثیر فراوان قرار گرفته است و به لحاظ ساختاری

تشکیل شده جدید با توجه به ایجاد پیک های موجود مشهود است. پراکندگی اوج پیک ها در گراف را می توان به دلیل کاهش میزان ماده هیدرواکسیدکلسیم موسوم به پرتلندایت در راستای تولید ژل سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) تحت دمای بالا نسبت داد. در بتن قلیافعال، چهار پیک بیشینه با مقادیر اوج قله های ۱۰۰، ۸۸/۴۹، ۸۳/۵۱ و ۶۶/۰۹ درصد در زوایای ۲θ به ترتیب در محدوده ۲۹، ۲۶، ۲۸ و ۲۹ درجه برای عناصر اتفاق افتاده است.



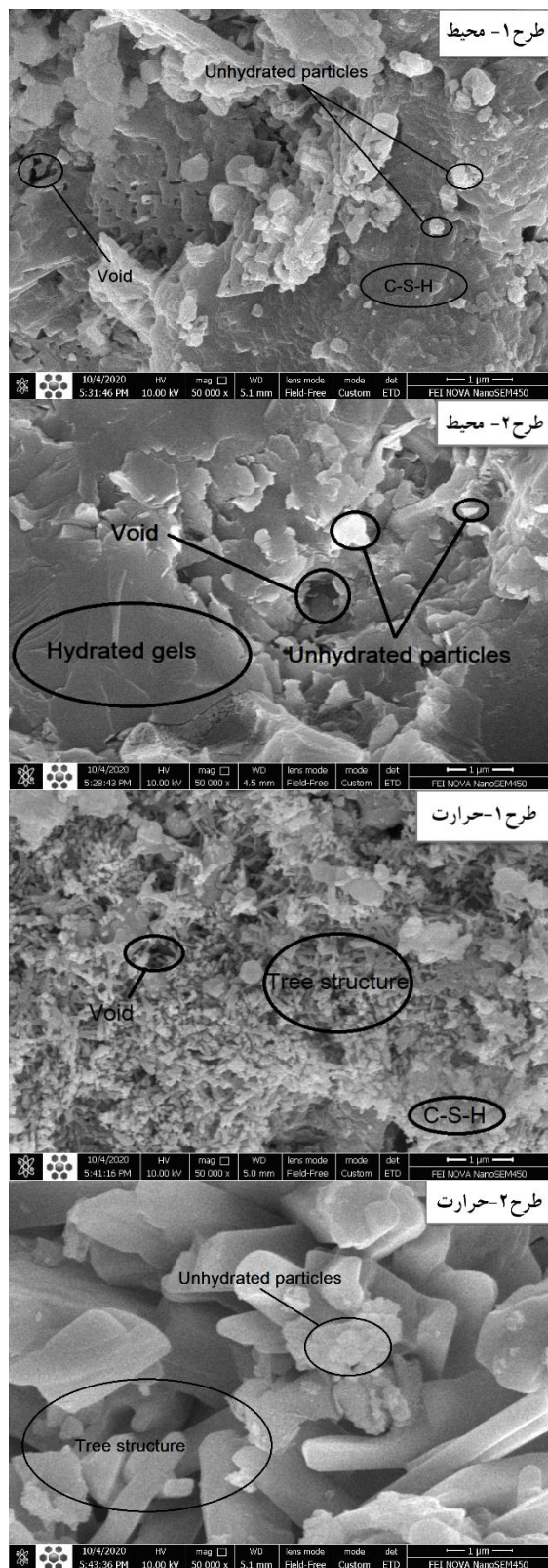
شکل (۳) نتایج XRD در دمای اتاق



شکل (۴) نتایج XRD پس از حرارت



حرارت بالا آسیب کمتری به بخش ریزساختار این نوع از بتن وارد کرده است.



شکل (۵) تصاویر SEM

تضعیف گردیده، با توجه به تصاویر، ایجاد ساختار درختی، وجود منافذ مویینه متعدد ناشی از تبخیر آب بین فضاهای مویینه و کاهش میزان حجم ژل هیدراته (نواحی تیره رنگ) مشهود است که مبین ضعف در ریزساختار بتن پس از اعمال حرارت بالا در این نوع از بتن است.

در تصاویر بتن قلیافعال تحت دمای محیط، هیچگونه ساختار درختی که نشان از ضعف در ریزساختار نمونه بتنی باشد مشاهده نمی‌گردد، این موضوع می‌تواند به دلیل فعالیت پوزولانی بالای ذرات سرباره کوره آهنگدازی که سرشار از ذرات آلومینوسیلیکاتی با خواص پرکنندگی و چسبندگی بالا هستند، در فرایند ژئوپلیمریزاسیون باشد و وجود نواحی تیره رنگ در تصاویر که محصول نهایی (شامل ژل‌های هیدراته شده) این فرایند است تصدیقی بر این مطلب می‌باشد. توده‌های سفید رنگ موجود در تصاویر SEM این طرح از بتن را می‌توان به کریستال‌های فعال‌ساز قلیایی که در فرایند ژئوپلیمریزاسیون مشارکت نکرده‌اند نسبت داد و نقاط بسیار ریز موجود در ریزساختار بتن قلیافعال را می‌توان به ذرات هیدراته نشده سرباره کوره آهنگدازی نسبت داد، ریز ترک‌های موجود در تصویر این طرح را می‌توان به دلیل عمل‌آوری حرارتی بتن قلیافعال تحت دمای ۶۰°C دانست. حرارت بالا در بتن قلیافعال موجب تغییرات اساسی در ریزساختار بتن و ماتریس خمیر سیمان قلیافعال شده است. آثار دمای بالا بر بتن را می‌توان به هیدراته نشدن خمیر سیمان، افزایش تخلخل، کاهش رطوبت موجود، انبساط حرارتی، تغییر فشار منافذ، کاهش مقاومت، ترک حرارتی ناشی از ناسازگاری، خزش و جداسازی حرارتی نسبت داد. 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 تحت دمای بیش از ۴۵۰ درجه سلسیوس می‌شود [۱۷]. حرارت دادن نمونه بتن قلیافعال موجب خروج آب از فضاهای مویینه بین لایه‌ای در ساختار ژل هیدراته گردیده و سبب بروز حفرات، منافذ متعدد بزرگ در نمونه شده است. افزایش سطوح شکست در نمونه بتن قلیافعال و کاهش سطوح ژل‌های هیدراته (نواحی با رنگ تیره) از عوارض حرارت بالا در نمونه بتنی در این طرح است. در مقایسه بتن معمولی و بتن قلیافعال در معرض حرارت بالا، در بتن قلیافعال به دلیل ساختار مقاوم‌تر و متراکم‌تر،

fineness. Smart structures and systems, ۲۲(۲), ۴۲۵-۴۳۲.

#### ۴- نتیجه گیری

در پژوهش آزمایشگاهی مقاله پیش‌رو، مقایسه میزان مقاومت فشاری در بتن قلیافعال و بتن معمولی بر اساس آنالیز نتایج آزمون‌های XRD و SEM در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در دمای محیط (۲۰ الی ۲۵ درجه سلسیوس) و تحت حرارت بالا (۵۰۰ °C) انجام گرفت. اهم نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر ارایه می‌گردد.

- میزان مقاومت فشاری در دمای محیط، برای بتن معمولی به مقدار ۶۲/۴۳ مگاپاسکال و برای بتن قلیافعال به مقدار ۶۸/۰۳ مگاپاسکال کسب گردید که اختلاف حدود ۹ درصدی را دارا بودند، این امر به دلیل فعالیت پوزولانی بالای سرباره کوره آهن‌گدازی در ترکیب بتن قلیافعال است.

- اعمال حرارت بالا (۵۰۰ °C)، در نمونه‌های بتنی موجب تضعیف ریزساختار ماتریس بتن معمولی و بتن قلیافعال و افت نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری به ترتیب به میزان ۳۷/۷ و ۱۶/۴ درصد برای هر یک از طرح‌های اختلاط گردید، حرارت بالا موجب بروز ریزترک، تخلخل و ضعف پیوندها در ساختار بتن شده است.

- در آزمون XRD، عدم حضور عنصر هیدرواکسید کلسیم  $(Ca(OH)_2)$  در اوج قله‌های گراف بتن قلیافعال، نشان از فعالیت پوزولانی مناسب سرباره کوره آهن‌گدازی در ترکیب شیمیایی ساختار خمیر سیمان قلیافعال می‌باشد. در گراف نمونه‌های تحت حرارت بالا، خروج برخی از عناصر به واسطه افت حرارتی (LOI) و کاهش ارتفاع اوج قله‌های عناصر، مشهود است.

- تصاویر حاصل از آزمون SEM، حاکی از افزایش حجم ژل‌های هیدراته و بهبود پیوند و تراکم در بخش ریزساختار نمونه‌های بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی است. اعمال حرارت بالا در نمونه‌های بتنی، ساختار بتن را از حالت متراکم خارج کرده و بصورت ساختار درختی و غیرهمگن در تصاویر SEM تبدیل نموده است.

- نتایج حاصل از آزمون طیف سنجی پراش اشعه ایکس، ضمن هماهنگی با نتایج حاصل از تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی، در همپوشانی با نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری قرار گرفت.

#### ۵- منابع

- [۲] P. Ganesh, A. Ramachandra Murthy, S. Sundar Kumar, M. Mohammed Saffiq Reheman and N. R. Iyer, "Effect of nanosilica on durability and mechanical properties of high-strength concrete," Magazine of Concrete Research, vol. ۶۸, no. ۵, pp. ۲۲۹-۲۳۶, ۲۰۱۶.
- [۳] V. Václavík, V. Dirner, T. Dvorský and J. Daxner, "The use of blast furnace slag," Metalurgija, vol. ۵۱, no. ۴, pp. ۴۶۱-۴۶۴, ۲۰۱۲.
- [۴] Allahverdi, A. L. I., Ebrahim Najafi Kani, and Mahshad Yazdanipour. "Effects of blast-furnace slag on natural pozzolan-based geopolymer cement." Ceramics-Silikáty ۵۵, ۱ (۲۰۱۱): ۶۸-۷۸.
- [۵] Davidovits J. Soft mineralogy and geopolymers. Proc. 1st Int. Conf. on geopolymers. ۱۹۸۸, p. ۱۹-۲۱.
- [۶] Neupane, Kamal, Des Chalmers, and Paul Kidd. "High-strength geopolymer concrete-properties, advantages and challenges." Advances in Materials ۷, ۲ (۲۰۱۸): ۱۵-۲۵.
- [۷] McNulty, E., Geopolymers: an environmental alternative to carbon dioxide producing ordinary Portland cement. Department of Chemistry, The Catholic University of America, ۲۰۰۹.
- [۸] Pilehvar, S., et al., Physical and mechanical properties of fly ash and slag geopolymer concrete containing different types of micro-encapsulated phase change materials. Construction and Building Materials, ۲۰۱۸, ۱۷۳: p. ۲۸-۳۹.
- [۹] Moghaddam, Shahin Charkhtab, et al. "Mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with crumb rubber and steel fiber under ambient and sulfuric acid conditions." Construction and Building Materials ۲۸۱, ۲۰۲۱: ۱۲۲۵۷۱.
- [۱۰] Zhuguo, L. I., and L. I. Sha. "Carbonation resistance of fly ash and blast furnace slag based geopolymer concrete." Construction and Building Materials ۱۶۳, ۲۰۱۸: ۶۶۸-۶۸۰.
- [۱۱] Afari Nadoushan, M., and A. A. Ramezaniapor. "Mechanical Properties of Alkali Activated Slag Pastes and Determination of Optimum Values of Effective Factors." Amirkabir Journal of Civil Engineering ۵۰, ۶, ۲۰۱۹: ۱۰۴۳-۱۰۵۲.
- [۱۲] Comrie, D.C. and W.M. Kriven. Composite cold ceramic geopolymer in a refractory application. in Advances in Ceramic Matrix Composites IX, Proceedings. ۲۰۰۴.
- [۱۳] Mane, S. and H. Jadhav, Investigation of geopolymer mortar and concrete under high temperature. Magnesium, ۲۰۱۲, ۱(۵).

- [۱] Nosrati, A., Zandi, Y., Shariati, M., Khademi, K., Aliabad, M., Marto, A., & Khorami, M. (۲۰۱۸). Portland cement structure and its major oxides and

- and metakaolin as cement replacement materials," Journal of Materials Research and Technology, vol. ۲, no. ۱, pp. ۵۲-۵۹, ۲۰۱۳.
- [۲۴] Xiao J, Koç nig G. Study on concrete at high temperature in China – an overview. Fire af J ۲۰۰۴;۳۹(۱):۸۹-۱۰۳.
- [۲۵] Li W, Guo Z. Experimental investigation on strength and deformation of concrete under high temperature. J Build Struct ۱۹۹۳;۱۴(۱):۸-۱۶.
- [۲۶] Lu ZD. A research on fire response of reinforced concrete beams. Tongji University; ۱۹۸۹.
- [۲۷] Niu H, Ma YF, Yao YX. Fire-resistance research on lightweight aggregate elements. Chin Build Struct ۱۹۹۶;۲۶(۷):۲۹-۳۳.
- [۲۸] Yao YX. Research on fire response of reinforced concrete frames and determination of temperature reached during a fire. Tongji University; ۱۹۹۱.
- [۲۹] Mahdy M, Speare PRS, Abdel Reheem AH. Effect of transient high temperature on heavyweight, high strength concrete. New York, NY: Columbia University; ۲۰۰۲.
- [۳۰] Phan LT, Lawson JR, Davis FL. Effects of elevated temperature exposure on heating characteristics, spalling and residual properties of high performance concrete. Mater Struct ۲۰۰۱;۳۴(۲۳۶):۸۳-۹۱.
- [۳۱] J. W. Phair and J. S. van Deventer, "Effect of the silicate activator pH on the microstructural characteristics of waste-based geopolymers," International Journal of Mineral Processing, vol. ۶۶, no. ۱-۴, pp. ۱۲۱-۱۴۳, ۲۰۰۲.
- [۳۲] A. M. Rashad, "The effect of polypropylene, polyvinyl-alcohol, carbon and glass fibres on geopolymers properties," Materials Science and Technology, vol. ۳۵, no. ۲, pp. ۱۲۷-۱۴۶, ۲۰۱۹.
- [۳۳] Mustakim, S.M., et al., Improvement in fresh, mechanical and microstructural properties of fly ash-blast furnace slag based geopolymer concrete by addition of nano and micro silica. Silicon, ۲۰۲۰: p. ۱-۱۴.
- [۳۴] Their, J.M. and M. Özakça, Developing geopolymer concrete by using cold-bonded fly ash aggregate, nano-silica, and steel fiber. Construction and Building Materials, ۲۰۱۸, ۱۸۰: p. ۱۲-۲۲.
- [۱۴] Bakharev, T., Thermal behaviour of geopolymers prepared using class F fly ash and elevated temperature curing. Cement and concrete Research, ۲۰۰۶, ۳۶(۶): p. ۱۱۳۴-۱۱۴۷.
- [۱۵] Türkmen, İ., et al. Fire resistance of geopolymer concrete produced from Ferrochrome slag by alkali activation method. in ۲۰۱۳ International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA). ۲۰۱۳. IEEE.
- [۱۶] Bakhtiyari, S., et al., Self-compacting concrete containing different powders at elevated temperatures–Mechanical properties and changes in the phase composition of the paste. Thermochimica acta, ۲۰۱۱, ۵۱۴(۱-۲): p. ۷۴-۸۱.
- [۱۷] R. Siddique and D. Kaur, "Properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag (GGBFS) at elevated temperatures," Journal of Advanced Research, vol. ۳, no. ۱, pp. ۴۵-۵۱, ۲۰۱۲.
- [۱۸] Mallikarjuna Rao, G., et al. "A study on the strength and performance of geopolymer concrete subjected to elevated temperatures." Recent Advances in Structural Engineering, Volume ۱. Springer, Singapore, ۲۰۱۹, ۸۶۹-۸۸۹.
- [۱۹] Hassan, Amer, Mohammed Arif, and Mohd Shariq. "Mechanical behaviour and microstructural investigation of geopolymer concrete after exposure to elevated temperatures." Arabian Journal for Science and Engineering ۴۵,۵. ۲۰۲۰: ۳۸۴۳-۳۸۶۱.
- [۲۰] Deb, Partha Sarathi, Pradip Nath, and Prabir Kumar Sarker. "Drying shrinkage of slag blended fly ash geopolymer concrete cured at room temperature." Procedia Engineering ۱۲۵. ۲۰۱۵: ۵۹۴-۶۰۰.
- [۲۱] Ehsani, Ahmad, Mahmoud Nili, and Keyvan Shaabani. "Effect of nanosilica on the compressive strength development and water absorption properties of cement paste and concrete containing Fly Ash." KSCE Journal of Civil Engineering ۲۱,۵. ۲۰۱۷: ۱۸۵۴-۱۸۶۵.
- [۲۲] Kong, D.L. and J.G. Sanjayan, Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete. Cement and concrete research, ۲۰۱۰, ۴۰(۲): p. ۲۳۴-۲۳۹.
- [۲۳] P. Duan, Z. Shui, W. Chen and C. Shen, "Enhancing microstructure and durability of concrete from ground granulated blast furnace slag