

مقاله پژوهشی

مقایسه مقاومت کششی بتن قلیافعال و بتن معمولی در دمای بالا

محمدحسین منصورقنای^۱، مرتضی بیک لریان^{۲*}، علیرضا مردوخ پور^۳

۱. دانشجوی دکتری عمران سازه، گروه مهندسی عمران، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران

۲. گروه مهندسی عمران، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران، M.biklaryan@iauc.ac.ir

۳. گروه مهندسی عمران، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران

دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۱۵ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۶

چکیده

در سال‌های اخیر به کارگیری از منابع معدنی فرآوری شده در علم مهندسی عمران چشم انداز گسترده‌ای را به خود اختصاص داده است. برخی از این مصالح مانند سرباره کوره آهن‌گدازی به دلیل دارا بودن مواد سیلیسی آلومیناتی فراوان در خود می‌تواند موجب بهبود چسبندگی و پرکنندگی در ساختار بتن شود. 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 کوره آهن‌گدازی ساخته شد تا میزان مقاومت کششی بتن تحت دمای محیط و حرارت ۵۰۰ درجه سلسیوس، در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه مورد مقایسه و ارزیابی قرار گیرد. در ادامه آزمون‌های طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس (XRD) و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در دمای محیط و تحت حرارت ۵۰۰ درجه سلسیوس، برای بررسی بیشتر و راستی آزمایی نتایج حاصل از آزمون مقاومت کششی، بر روی نمونه‌های بتنی انجام گرفت. نتایج حاصل حاکی از کسب مقاومت کششی در دمای محیط، برای بتن معمولی به مقدار ۵،۰۴۸ مگاپاسکال و برای بتن قلیافعال به مقدار ۴،۴۱ مگاپاسکال است که اختلاف ۱۲،۶۳ درصدی را دارا بود. با اعمال حرارت بالا به نمونه‌های بتنی، میزان افت مقاومت کششی در بتن معمولی به مقدار ۵۱ و در بتن قلیافعال به میزان ۲۱ درصد رسید. نتایج حاصل از آزمون‌های XRD و SEM ضمن هماهنگی با یکدیگر، در همپوشانی با نتایج حاصل از آزمون مقاومت کششی قرار داشتند.

کلمات کلیدی

بتن قلیافعال، سرباره کوره آهن‌گدازی، آزمون مقاومت کششی، طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس، میکروسکوپ الکترونی روبشی.

۱- مقدمه

قلیافعال سرباره‌ای دارد [۱۲].

حرارت بالا همواره چالش‌های جدی در بتن ایجاد کرده است، حرارت بالا موجب تخریب بخش اعظمی از ریزساختار ماتریس بتن می‌شود، این تخریب ناشی از تضعیف در پیوندها و ساختار ژل‌های هیدراته شده در ریزساختار بتن است که منجر به افت مقاومت در بتن می‌شود. برخی از محققان گزارش کرده‌اند که این کاهش مقاومت عمدتاً به تجزیه هیدرواکسیدکلسیم در ترکیب بر می‌گردد و این پدیده معمولاً در محدوده دمایی بین ۴۵۰ تا ۵۰۰ درجه سلسیوس رخ می‌دهد [۱۳، ۱۴]. بهبود خواص مقاومتی بتن تحت حرارت بالا یکی از دغدغه‌های دانشمندان است. در این راستا، عملکرد بهتر بتن قلیافعال در مقایسه با بتن معمولی در دمای بالا گزارش شده است [۱۵]. البته مقاومت بتن‌های قلیافعال در مواجهه با سطح قابل توجهی از عملیات حرارتی به ترکیبات شیمیایی تشکیل‌دهنده آن و همچنین دما و نحوه عمل‌آوری در بتن، نیز بستگی دارد [۱۶].

تحقیقات نشان داده است که بتن قلیافعال در مقایسه با بتن معمولی عملکرد مکانیکی بهتری در برابر حرارت بالا از خود نشان می‌دهد [۲۲-۱۷]. در این راستا عملکرد برتر بتن قلیافعال در کسب مقاومت کششی تحت حرارت بالا، نسبت به بتن معمولی در تحقیقات متعددی گزارش شده است [۲۴-۲۳]. همچنین عملکرد ریزساختاری بتن قلیافعال تحت حرارت بالا در مقایسه با بتن معمولی، نشان از برتری ماتریس ساختار این نوع از بتن به دلیل تراکم بالای ریزساختاری آن است [۲۶-۲۵].

اهداف و نوآوری در این پژوهش آزمایشگاهی به واسطه تولید بتن (قلیافعال) و میزان مقاومت کششی در آن تحت حرارت بالا، به چند مورد زیر خلاصه می‌شود:

- تولید بتن سبز به واسطه کاهش تولید و انتشار گاز سمی CO_2 در مقایسه با بتن معمولی، با توجه به گزارش ارایه شده توسط سایر محققان در این راستا
- تولید بتن (قلیافعال) با خواص برتر در مقاومت کششی تحت حرارت بالا نسبت به بتن معمولی به واسطه بهره‌گیری از سرباره کوره آهن‌گدازی
- تولید بتن (قلیافعال) با خواص ریزساختاری و شیمیایی برتر از بتن معمولی در حرارت زیاد به واسطه بهره‌گیری از سرباره کوره آهن‌گدازی
- حفظ و کاهش مصرف منابع معدنی مصرفی که به عنوان مصالح اصلی در طی فرآیند ساخت سیمان معمولی استفاده

مصالح معدنی که مقادیر فراوانی از عناصر قلیایی چسباننده مانند سیلیس و آلومینات در خود دارند، با توجه به نقش چسبندگی و پرکنندگی بالا در ترکیب با سایر اجزا بتن، می‌توانند به عنوان پوزولان‌های مناسب جایگزین بخش یا کل سیمان مصرفی در بتن شوند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که سیمان پرتلند نوعی سیمان هیدرولیکی است که به طور عمده شامل CaO ، SiO_2 ، Al_2O_3 و Fe_2O_3 است، این اکسیدها عمدتاً به صورت پیوندیافته در بتن وجود دارند [۱]. از مهم‌ترین مشکلات فنی در فرآیند تولید سیمان پرتلند، نیاز به تقریباً یک و نیم تن مواد اولیه برای تولید یک تن سیمان است که در این حالت ۰/۹۴ تن گاز سمی دی‌اکسید کربن وارد محیط زیست می‌شود [۲، ۳]. از طرفی نیاز به بتن مستحکم در برخی از سازه‌ها با اهمیت زیاد و خیلی زیاد، محققان را به فکر ساختن نوع دیگر از بتن انداخت. در این راستا، استفاده از پوزولان‌های حاصل از فرآوری مواد معدنی مانند سرباره کوره آهن‌گدازی که حاوی مقادیر زیادی از مواد آلومینوسیلیکاتی با خواص پرکنندگی و چسبانندگی بالا در ترکیب بتن است، به یکی از راهکارهای مقابله با مضرات تولید سیمان معمولی پیشنهاد شد. تحقیقات نشان داده است که سرباره کوره بلند دانه‌بندی شده از جمله مواد معدنی فرآوری شده است که استفاده از آن به جای سیمان می‌تواند مقاومت بتن را بهبود ببخشد و تقاضای فزاینده برای استفاده از سیمان را در بتن کاهش دهد [۴، ۵]. سرباره کوره آهن‌گدازی دارای خواص هیدرولیکی پنهان است که می‌تواند با استفاده از فعال‌کننده‌های مناسب فعال شود [۶]. فعال‌سازی سرباره کوره بلند با محلول قلیایی (مانند $NaOH$ و Na_2SiO_3) برای تولید سیمان سرباره فعال شده با قلیایی در چند دهه گذشته مورد مطالعه قرار گرفته است [۷]. جایگزینی سرباره کوره آهن‌گدازی با کل سیمان مصرفی در بتن، منجر به تولید بتن قلیافعال می‌شود. ژئوپلیمری (قلیافعال) نامی است که توسط دیویدویتز ابداع شده است [۸]. میزان دی‌اکسید کربن تولید شده در فرآیند ژئوپلیمری بسیار کمتر از فرآیند تولید سیمان است [۹]. مزایای زیست‌محیطی بتن قلیافعال، یکی از دلایل مناسب برای جایگزینی این نوع از بتن با بتن معمولی است [۱۰، ۱۱]. تحقیقات نشان داده است که با افزودن سرباره به داخل ترکیب بتن، ساختار منافذ داخل بتن بهینه‌سازی می‌شود و توزیع اندازه منافذ به طور مناسب‌تر خواهد بود، ناحیه انتقال بین سطحی متراکم‌تر و مقاومت بتن به تدریج افزایش می‌یابد، به عبارتی توسعه مقاومت رابطه نزدیکی با تکامل ساختار حفره و ناحیه انتقال بین سطحی (ITZ) در بتن

می‌شود.

- حفظ و کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی که به عنوان سوخت مصرفی در کارخانه‌های تولید سیمان معمولی استفاده می‌شود.
- کمک به توسعه پایدار در صنعت سازه‌ای به دلیل تولید بتن مقاوم و دوستدار طبیعت و محیط زیست
- کمک به حفظ سلامت محیط زیست به واسطه مصرف سرباره‌های انباشته شده در کارخانه‌های ذوب آهن (در ترکیب بتن قلیافعال)، شناخته شده به عنوان مواد مضر محیط زیستی

۲- ساخت نمونه و برنامه آزمایشگاهی

۱-۲- مصالح مصرفی

در این مطالعه، سرباره کوره آهن‌گدازی محصول شرکت ذوب آهن اصفهان، تحت استاندارد ASTM C989/C989M استفاده شد، مشخصات این محصول در جدول‌های 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 جدول‌های ۳ و ۴ استفاده شد. سنگدانه‌های مصرفی محصول کارخانجات شن و ماسه شهرستان لاهیجان بود که به لحاظ کمی و کیفی در محدوده استاندارد ASTM C33 قرار داشت، سایر مشخصات سنگدانه‌ها در جدول ۵ نشان داده شده است. در این پژوهش ابر روان‌کننده مصرفی با مشخصات جدول ۶، از نوع پلی‌کربوکسیلات‌نرمال، 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 مولار 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 برای تهیه آب آهک و ساخت طرح‌های اختلاط تحقیق پیش رو (در بتن معمولی و ساخت محلول قلیایی)، از آب شرب شهر لاهیجان استفاده شد، این آب دارای pH در محدوده ۶/۵ تا ۷/۵ و وزن مخصوص ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب است.

۲-۲- طرح اختلاط، ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها

استاندارد مجزایی برای طرح اختلاط بتن قلیافعال موجود

نیست، بنابراین به پیروی از سایر تحقیقات در حوزه بتن قلیافعال [۲۷]، از استاندارد طرح اختلاط بتن معمولی تحت توصیه کمیته ACI 211.1-89، برای ساخت بتن قلیافعال در این پژوهش آزمایشگاهی استفاده شد.

مشخصات طرح اختلاط بتن در این تحقیق بر اساس جدول ۸ تنظیم شده است. در این راستا ابتدا مصالح خشک از قبیل سنگدانه، سیمان و سرباره کوره آهن‌گدازی 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 ابرروان‌کننده بر اساس نیاز هر طرح، به داخل دستگاه مخلوط‌کن در حال گردش ریخته شد و فرآیند ترکیب مصالح، ۲ دقیقه دیگر (در مجموع ۴ دقیقه) به طول انجامید. در پایان ترکیب مصالح، مخلوط بتن در قالب‌های فلزی روغن‌کاری شده از قبل ریخته شد، این فرآیند 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 تا 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، برای 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 [۲۸]. 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 درجه سانتی‌گراد) که در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه انجام شد، بر اساس استاندارد ISO834، 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 این راستا، در سایر تحقیقات نیز انجام فرآیند دمایی تحت حرارت بالا بر روی بتن‌های قلیافعال، به شکل مشابه (در این تحقیق) گزارش شده است [۲۹].

جدول ۱ - مشخصات شیمیایی سرباره کوره آهنگدازی

نام ماده	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	L.O.I
درصد	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 (کیلوگرم بر مترمکعب)	سطح مخصوص (سانتی متر مکعب بر گرم)	مدول الاستیسیته (پاسکال)	چگالی ظاهری (کیلوگرم بر مترمکعب)	اندازه ذرات (میکرومتر)	رنگ
۲۴۵۰	۲۲۰۰	۱٫۲	۹۶۰	۲٫۱	کرم

جدول ۳ - مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ II

L.O.I	C ₃ A	IR	Na ₂ O+0.658K ₂ O	SO ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	Cl
MAX ۱٫۵	۵٫۵ تا ۷٫۵	۰٫۷ MAX	۰٫۶ MAX	۲ تا ۲٫۳	۱٫۴۵ Max	۳٫۵ تا ۳٫۸	۴٫۵ تا ۴٫۸	۴۲ تا ۴۳	۲۱ تا ۲۲	۰٫۰۳ Max

جدول ۴ - مشخصات فیزیکی و رئولوژیکی سیمان پرتلند تیپ II

وزن مخصوص (کیلوگرم بر مترمکعب)	سطح مخصوص (سانتی متر مکعب بر گرم)	گیرش اولیه (دقیقه)	گیرش ثانویه (دقیقه)
۲۳۵۰	۳۰۰۰ تا ۳۲۰۰	۱۱۵ < ۱۳۰	۱۹۰ < ۲۰۵

جدول ۵ - مشخصات سنگدانه‌ها

مصالح دانه‌ای بتن	حداقل قطر	حداکثر قطر (میلی متر)	مدول نرمی (میلی متر)	وزن مخصوص (کیلوگرم بر مترمکعب)	درصد جذب آب
شن	۴٫۷۵ (میلی متر)	۱۹	۵٫۷	۲۷۵۰	۲٫۲
ماسه	۷۵ (میکرومتر)	۴٫۷۵	۲٫۸۵	۲۶۵۰	۲٫۹

جدول ۶ - مشخصات ابرروان کننده پلی کربوکسیلات نرمال

فرمول شیمیایی	حالت فیزیکی	رنگ	وزن مخصوص (کیلوگرم بر مترمکعب)	استاندارد صرف	pH	میزان یون کلر	نقطه اشتعال
پلی کربوکسیلات نرمال	مایع	قهوه	۱۱۰۰	ASTM C494	حدود ۷	ندارد	ندارد

جدول ۷ - مشخصات محلول قلیا فعال

نوع محلول	فرمول مولکولی	رنگ	مولاریته (مول بر مترمکعب)	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	مدول الاستیسیته (پاسکال)	دمای ذوب (سانتی گراد)	جرم مولی (گرم بر مول)	نسبت وزنی (مولار) سیلیکات به سدیم
هیدراکسید سدیم	NaOH	سفید	۱۲	۲۱۳۰	۳٫۳	۳۱۸	۳۹٫۹۹	-
سیلیکات سدیم	Na ₂ SiO ₃	سفید	۱۲	۲۴۰۰	-	۱۰۸۸	۱۲۲٫۰۶	۲٫۴

جدول ۸ - مشخصات طرح اختلاط بتن

طرح و نوع بتن	مصالح مصرفی (کیلوگرم بر مترمکعب)						
	سیمان	آب	محلول قلیایی	سرباره	شن	ماسه	ابرروان کننده
۱ OC معمولی	۴۵۰	۲۰۲٫۵	۰	۰	۱۰۰۰	۷۶۱٫۱۳	۶٫۷۵
۲ GPC قلیا فعال	۰	۰	۲۰۲٫۵	۴۵۰	۱۰۰۰	۸۱۶٫۱۰	۶٫۷۵

۲-۳- روش‌های آزمایش و استانداردها

در این پژوهش، آزمون مقاومت کششی در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در دمای محیط و تحت حرارت بالا (۵۰۰ درجه سانتی‌گراد) بر اساس استاندارد ASTM C496 بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد ۱۵×۳۰ سانتی‌متری به وسیله دستگاه جک بتن‌شکن انجام گرفت. در این راستا نمونه‌ها از وجه طولی در زیر دستگاه جک بتن‌شکن قرار داده شدند و نیرو در محدوده استاندارد با سرعت ۰/۹ مگاپاسکال بر دقیقه تا لحظه شکست نمونه بتنی بر آن اعمال شد. میزان حداکثر بار وارده، تعیین‌کننده مقدار مقاومت نمونه بتنی در برابر فشار وارده است.

آزمون XRD در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در دمای محیط و تحت حرارت بالا، با دستگاه طیف‌سنج پراش اشعه ایکس با مدل Philips PW1730 انجام گرفت. در این راستا نمونه‌های خرد شده بر گرفته از مرکز نمونه بتنی در داخل دستگاه قرار داده شده و طی انجام آزمون، نمودار پراش کریستال‌های بتن تهیه شد. داده‌های حاصل از تفرق اشعه X به صورت شدت فوتون بر حسب زاویه دکتور ۲θ است که به صورت 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، با دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل FEI Quanta200 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.

۳- نتایج آزمایشگاهی و تفسیر نتایج

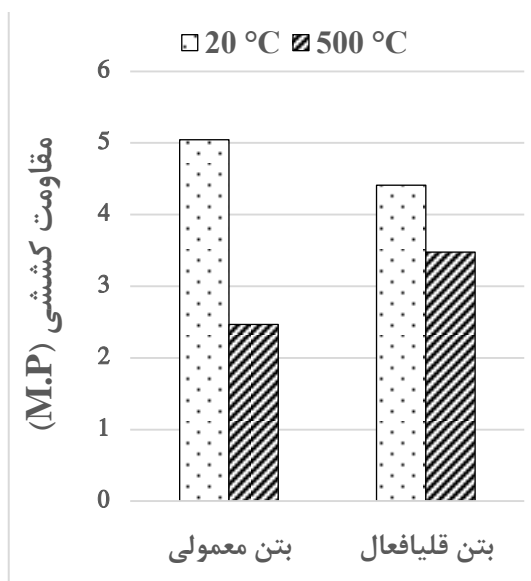
۱-۳- نتایج آزمون مقاومت کششی

نتایج حاصل از آزمون مقاومت کششی بتن در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در دمای محیط (۲۰ درجه سانتی‌گراد) و حرارت بالا (۵۰۰ درجه سانتی‌گراد) در شکل ۱ نشان داده شده است. شکل ۲ نمونه‌های بتنی در آزمون مقاومت کششی در دمای محیط را به نمایش در آورده است. بر اساس نتایج این آزمون در دمای محیط، بتن معمولی دارای مقاومت کششی برابر با ۵/۰۴۸ مگاپاسکال و بتن قلیافعال دارای مقاومت کششی برابر ۴/۴۱ مگاپاسکال است. در این راستا بتن قلیافعال اختلاف مقاومت (دارای مقاومت کمتر) ۱۲/۶۳ درصدی را نسبت به بتن معمولی نشان می‌دهد. اعمال حرارت زیاد به نمونه‌های بتنی موجب افت در میزان مقاومت کششی شده است. در این راستا مقاومت کششی در نمونه بتن معمولی به میزان ۲/۴۷

مگاپاسکال رسید که ۵۱ درصد افت نسبت به دمای محیط را تجربه کرد.

در بتن قلیافعال میزان مقاومت کششی به رقم ۳/۴۸ مگاپاسکال رسید که به میزان ۲۱ درصد افت مقاومت نسبت به دمای محیط را به همراه داشت. میزان افت مقاومت کششی در نمونه‌های بتن قلیافعال تحت حرارت بالا، کمتر از نمونه‌های بتن معمولی است. این موضوع به نقش پوزولانی سرباره کوره آهن‌گدازی در ترکیب بتن قلیافعال مرتبط است که توانسته است ضمن تسریع در فرآیند ژئوپلیمریزاسیون^۱ (ژئوسپارش) موجب تولید حجم بالاتری از ژل‌های هیدراته شده نسبت به بتن معمولی در فرآیند شیمیایی شود. تحقیقات نشان داده است، استفاده از سرباره کوره آهن‌گدازی به جای سیمان می‌تواند مقاومت بتن را بهبود ببخشد و تقاضای فزاینده برای استفاده از آن در بتن را کاهش دهد [۴، ۵].

ژل‌های هیدراته‌شده با پر کردن منافذ و ترک‌ها در ساختار ماتریس قلیافعال موجب برتری در استحکام و مقاومت کششی نمونه‌های این نوع از بتن نسبت به بتن معمولی تحت حرارت شده است. این مزیت باعث شده تا بتن قلیافعال پس از اعمال حرارت بالا، افت مقاومت کششی کمتری را نسبت به بتن معمولی تجربه کند. در راستای این موضوع به طور کلی، اعتقاد بر این است که بتن قلیافعال به دلیل خواص شبه‌سرامیکی خود، عملکرد بهتری در مواجهه با آتش در مقایسه با بتن‌های معمولی دارد [۳۲-۳۰].



شکل ۱- نتایج مقاومت کششی

¹ Geopolymerization

به ترتیب در محدوده‌های ۲۹، ۲۶ و ۳۹ درجه برای عناصر اتفاق افتاده است. در این راستا، عناصری مانند سدیم آلومینیوم سیلیکات ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)، کوارتز (SiO_2) به دلیل وجود سرباره و واکنش‌های پوزولانی، بیشترین پراکندگی را دارند. در طیف بتن قلیافعال، نبود عنصر هیدرواکسیدکلسیم (Ca(OH)_2) در اوج قله‌ها، نشان از فعالیت پوزولانی مناسب سرباره کوره آهن‌گدازی در ترکیب شیمیایی ساختار خمیر قلیافعال است. این موضوع یکی از علل اصلی برتری میزان مقاومت کششی در بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی در این پژوهش آزمایشگاهی است. پیرامون این موضوع، گزارش شده است که قله قوی در نواحی مختلف به عنوان قله مشخص و اثر انگشت بتن قلیافعال (بر پایه سرباره)، در طیف‌های XRD شناخته می‌شود [۳۳]. بر اساس تصاویر SEM و نتایج حاصل از پراش اشعه ایکس، اعمال حرارت بالا (۵۰۰ درجه سانتی‌گراد)، موجب بروز اثرات مخربی در ترکیب و پیوند شیمیایی بخش ریزساختار بتن معمولی و بتن قلیافعال شده است. در دمای بالا ژل CH دیگر تبدیل به کلسیم کربنات‌های مانند Calcite نمی‌شود بلکه در دمای بالا، CH ناپدید شده و در واقع به Carbon و C-A تبدیل شده است و این موضوع، علت اصلی ضعف بتن در دمای بالا است [۳، ۱۲]. بر این اساس، در سایر تحقیقات انجام گرفته در حوزه بتن قلیافعال گزارش شده است که در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، فازهای کریستالی و شبه بلوری کربنات کلسیم، اکسید سیلیکون، پیروکسن، فسفات آلومینیوم و کلسیت مشاهده می‌شود اما در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس، اکسید سیلیکون، سیلیکات کربنات آلومینیوم کلسیم مشاهده شده است [۳، ۳۴، ۳۵]. در این راستا در بتن قلیافعال پژوهش حاضر، پراکندگی اوج پیک‌ها در گراف را می‌توان به دلیل کاهش میزان ماده هیدرواکسیدکلسیم موسوم به پرتلندایت در راستای تولید ژل سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) تحت دمای بالا نسبت داد. با توجه به تغییرات در نوع عناصر باقی مانده پس از حرارت بتن، بر اساس گراف Pick List مشخص شد که چهار پیک بیشینه با مقادیر اوج قله ۱۰۰، ۸۹/۱۵، ۸۱/۸۷ و ۳۴/۷۴ درصد در زوایای ۲۵ به ترتیب در محدوده‌های ۲۹، ۲۷، ۲۸ و ۲۶ درجه برای عناصر اتفاق افتاده است. در بتن قلیافعال، چهار پیک بیشینه با مقادیر اوج قله‌های ۱۰۰، ۸۸/۴۹، ۸۳/۵۱ و ۶۶/۰۹ درصد در زوایای ۲۵ به ترتیب در محدوده‌های ۲۹، ۲۶، ۲۸ و ۲۹ درجه برای عناصر اتفاق افتاده است.



شکل ۲- نمونه بتنی در آزمون مقاومت کششی

۲-۳- نتایج آزمون XRD

نتایج حاصل از آزمون طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه تحت دمای محیط (اتاق) در شکل ۳ و تحت دمای بالا (۵۰۰ درجه سانتی‌گراد)، در شکل ۴ به نمایش در آمده است. در دمای محیط (۲۰ تا ۲۵ درجه سلسیوس)، برای بتن معمولی 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 ۲۹، ۲۴، ۲۶ و ۲۵ درجه برای ترکیبات مشخص شده، اتفاق افتاده است. در این راستا عناصر آلومینیوم فسفات (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 ($\text{Ca}_7\text{Mg}_5\text{C}_{12}\text{O}_{36}$) بیشترین پراکندگی را دارند. در حالی که برای بتن قلیافعال در دمای محیط، چهار پیک بیشینه با مقادیر اوج قله‌های ۱۰۰، ۶۹/۳۵، ۲۶/۸۳، ۲۱/۸۵ و ۲۰/۸۷ درصد در زوایای ۲۵

۳-۳- نتایج آزمون SEM

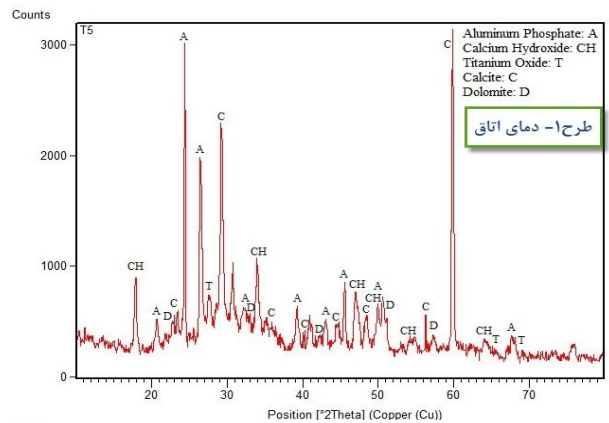
نتایج حاصل از آزمون تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در مقیاس ۵ میکرومتر، تحت دمای محیط و حرارت ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، به ترتیب در شکل ۵ و ۶ به نمایش در آمده است.

نتایج به دست آمده از میکروسکوپ الکترونی کمک شایانی در تشخیص ساختار و رفتار بتن می‌کند و ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی ماتریس بتن به شدت به ریزساختار آن بستگی دارد. با توجه به تصاویر اخذ شده از میکروسکوپ الکترونی روبشی، مشاهده می‌شود که ریزساختار بتن در هر دو طرح اختلاط از سه فاز اساسی مجزا و متفاوت به شرح زیر تشکیل شده است:

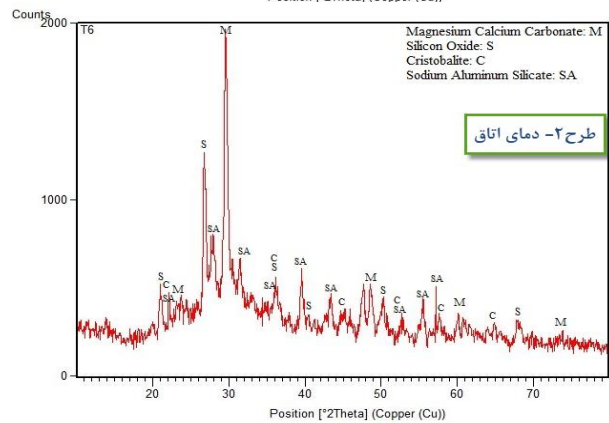
- فاز اول شامل محصولات هیدراتاسیون^۱ (بسپارش) و ژئوپلیمریزاسیون شامل ژل‌های هیدراته که در تصاویر SEM عمدتاً به رنگ تیره‌اند، است.
- فاز دوم شامل بلورهای واکنش نکرده‌ای است که در نتیجه ناخالصی‌های موجود در مواد اولیه و یا ذرات واکنش نکرده در فرآیند هیدراتاسیون و ژئوپلیمریزاسیون و در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی عمدتاً به رنگ سفید است.
- فاز سوم شامل نحوه پیوندهای ایجاد شده در خمیر سیمان با سنگدانه‌ها در ناحیه انتقال بین سطحی^۲ در تصاویر تشکیل شده است.

در تصاویر بتن معمولی تحت دمای محیط، ساختار درختی شکل ناشی از غیرهمگنی در محصولات هیدراتاسیون و کریستال‌های کوچک هیدراته نشده به ندرت مشاهده می‌شود، این امر نشان از پیشرفت فرآیند هیدراتاسیون و تولید فاز ژل سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) موسوم به ژل توبرموریت که بخش اعظمی از محصول فرآیند هیدراتاسیون است، می‌باشد. این ژل به صورت توده‌هایی با رنگ تیره در تصاویر دیده می‌شود.

در این راستا، تحقیقات نشان داده است که در قسمت توده خمیر سیمان معمولی (حاوی سیمان پرتلند)، یون‌هایی مانند کلسیم، سولفات و هیدرواکسید و آلومینات که از طریق هواری (حل) شدن به سیلیکات کلسیم و آلومینات کلسیم ناشی شده با هم ترکیب می‌شوند و تشکیل ژل اترینگایت (C-A-S-H) و هیدرواکسید کلسیم $(Ca(OH)_2)$ را می‌دهند، بدین مفهوم که در اثر واکنش کلسیم آلومینات با کلسیم سولفات، اترینگایت ایجاد می‌شود و با پیشرفت در مرحله هیدراتاسیون، بلورهای ضعیف

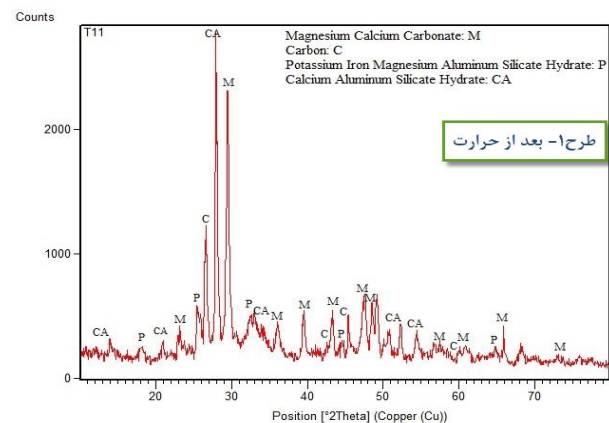


طرح ۱- دمای اتاق

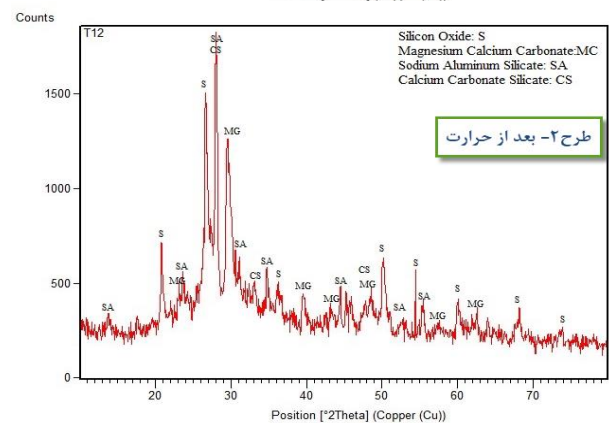


طرح ۲- دمای اتاق

شکل ۳- نتایج XRD در دمای اتاق



طرح ۱- بعد از حرارت

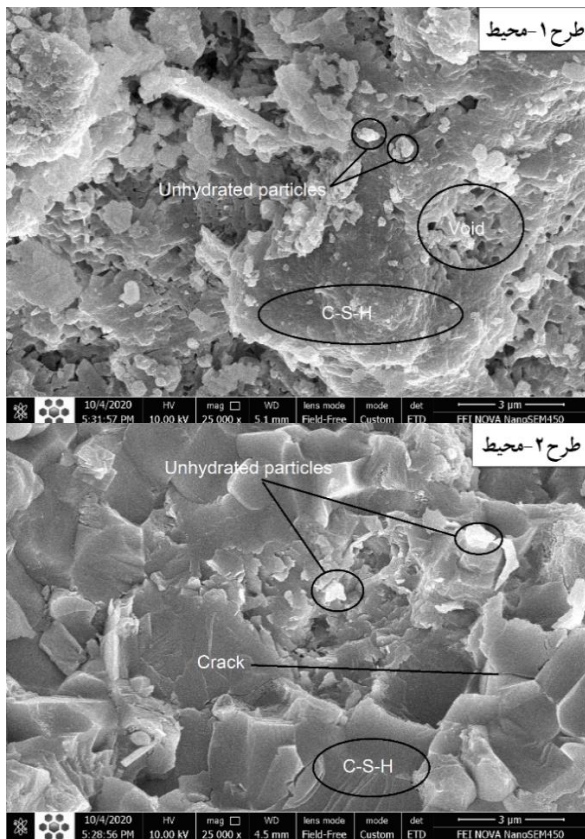


طرح ۲- بعد از حرارت

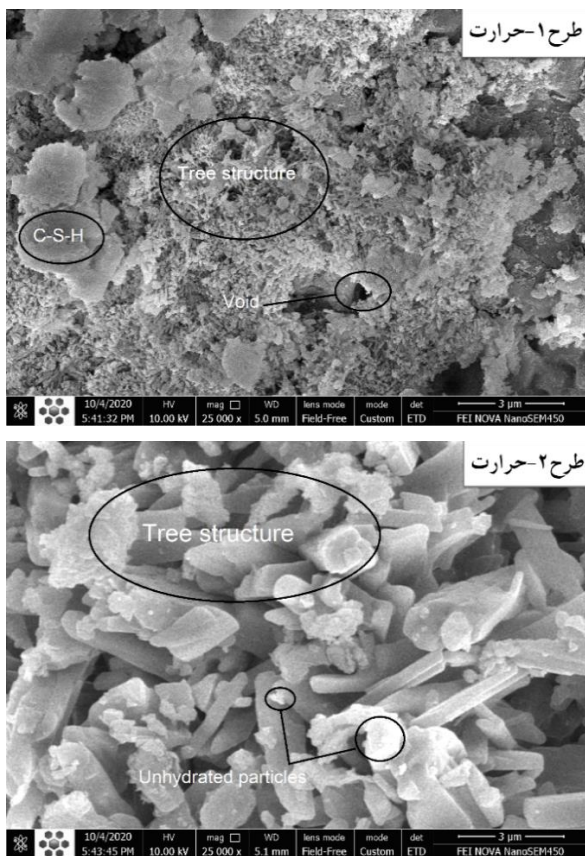
شکل ۴- نتایج XRD پس از حرارت

¹ Hydrolysis

² Interfacial transition zone (ITZ)



شکل ۵- تصاویر SEM تحت دمای محیط



شکل ۶- تصاویر SEM تحت حرارت

با نام C-S-H و نسل دوم کریستال‌ها که از عناصر هیدرواکسیدکلسیم (Ca(OH)_2) و ژل اترینگایت (C-A-S-H) شکل گرفته است شروع به پر کردن فضاهای خالی در شبکه اترینگایت و هیدرواکسیدکلسیم موسوم به پرتلندایت^۱ می‌کند و با این عملیات، تراکم و سختی و مقاومت ITZ (ناحیه انتقال بین سطحی) بتن زیاد می‌شود [۳۶].

در تصاویر بتن قلیافعال، هیچگونه ساختار درختی که نشان از ضعف در ریزساختار نمونه باشد، مشاهده نمی‌شود. وجود نواحی تیره رنگ در تصاویر نشان از تکمیل فرآیند ژئوپلیمریزاسیون (ژئوسپارش) و تولید ژل‌های هیدراته است. توده‌های سفید رنگ موجود در تصاویر SEM این طرح را می‌توان به کریستال‌های فعال ساز قلیایی که در فرآیند 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 را می‌توان به دلیل فرآیند عمل‌آوری حرارتی تحت اعمال دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد در بتن قلیافعال دانست.

حرارت بالا در بتن موجب تغییرات اساسی در ریزساختار بتن و ماتریس خمیر سیمان پرتلند و قلیافعال شده است. تاثیرات 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 جداسدگی حرارتی نسبت داد. 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 [۴].

برای تصاویر بتن معمولی تحت حرارت بالا، ژل C-S-H در ریزساختار بتن بیشترین تخریب را به دنبال دارد. افزایش حجم و میزان حفرات را می‌توان به خروج آب تحت حرارت از حفرات مویینه در ریزساختار بتن نسبت داد، همچنین این مقدار با افزایش نسبت آب به سیمان در تهیه طرح اختلاط بتن، می‌تواند افزایش یابد و به تخلخل و ترد شدن ساختار بتن کمک کند.

حرارت دادن نمونه بتن قلیافعال با توجه به استحکام ریزساختاری مناسب این نوع از بتن به واسطه وجود سرباره کوره آهن‌گدازی و تولید ژل‌های هیدراته بیشتر، منجر به آسیب کمتری نسبت به بتن معمولی شده است. ساختار درختی و حفرات ناشی از تبخیر آب در ماتریس ساختار بتن قلیافعال نشان از تاثیر حرارت بالا بر این نوع از بتن است.

¹ Portlandite (Ca(OH)_2)

۴- نتیجه گیری

- پیشنهاد می شود تا محققان بعدی در این حوزه، نسبت به بررسی سایر خواص مکانیکی بتن قلیافعال تحت حرارت بالا و مقایسه نتایج آن با بتن معمولی، اقدام کنند.

منابع

1. Ministry of Roads and Urban Development, Topic 9 of National Building Regulations, Design and Implementation of Reinforced Concrete Buildings (4th Edition), Tehran: Iran Development Publishing House, 2012.
2. E. Gartner, "Industrially interesting approaches to "low-CO₂" cements," *Cement and Concrete research*, vol. 34, no. 9, pp. 1489-1498, 2004.
3. A. M. Rashad, "The effect of polypropylene, polyvinyl-alcohol, carbon and glass fibres on geopolymers properties," *Materials Science and Technology*, vol. 35, no. 2, pp. 127-146, 2019.
4. 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): p. 45-51.
5. 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): p. 967-972.
6. Ryu, G.S., et al., The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. *Construction and Building Materials*, 2013. 47: p. 409-418.
7. Allahverdi, A. L. I., Ebrahim Najafi Kani, and Mahshad Yazdanipour. "Effects of blast-furnace slag on natural pozzolan-based geopolymer cement." *Ceramics-Silikáty* 55.1 (2011): 68-78.
8. Davidovits J. Soft mineralurgy and geopolymers. *Proc. 1st Int. Conf. on geopolymers*. 1988. p. 19-21.
9. Neupane, N., Chalmers, D., & Kidd, P. (2018). High-strength geopolymer concrete properties, advantages and challenges. *Advances in Materials*, 7(2), 15-25.
10. Davidovits J. Geopolymeric reactions in the economic future of cements and concretes, worldwide mitigation of carbon dioxide emission, pp. 111-122. In: G'99 Geopolymer International conference, Saint Quentin, France, 1999.
11. Duxson P, Provis JL, Lukey GC, van Deventer JSJ. The role of inorganic polymer technology in the development of "green concrete". *Cem Concr Res* 2007;37:1590-7.
12. P. Duan, Z. Shui, W. Chen and C. Shen, "Enhancing microstructure and durability of concrete from ground granulated blast furnace slag and metakaolin as cement replacement materials," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 2, no. 1, pp. 52-59, 2013.

در این تحقیق آزمایشگاهی، مقایسه میزان مقاومت کششی در بتن قلیافعال و بتن معمولی بر اساس آنالیز نتایج آزمون های SEM و XRD در سن عمل آوری ۹۰ روزه در دمای محیط (۲۰ تا ۲۵ درجه سلسیوس) و تحت حرارت بالا انجام گرفت. مهم ترین نتایج حاصل از این پژوهش عبارتند از:

- مقاومت کششی در دمای محیط، برای بتن معمولی به مقدار ۵٫۴۸ و برای بتن قلیافعال به مقدار ۴٫۴۱ مگاپاسکال به دست آمد که اختلاف ۱۲٫۶۳ درصدی (مقاومت کمتر در بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی) را نشان داد. این موضوع می تواند به دلیل مصرف عیار بالا از سیمان پرتلند در ترکیب بتن معمولی باشد.
- اعمال حرارت بالا (۵۰۰ درجه سانتی گراد)، در نمونه های بتنی موجب تضعیف ریزساختار ماتریس بتن معمولی و بتن قلیافعال و افت نتایج حاصل از آزمون مقاومت کششی به ترتیب به میزان ۵۱ و ۲۱ درصد شد. در این راستا مقاومت برتر بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی تحت حرارت بالا به دلیل حجم بالاتر تولید ژل های هیدراته در فرایند ژئوپلیمریزاسیون در بتن قلیافعال است که منجر به برتری تراکم و مقاومت در این نوع از بتن شده است.
- در آزمون XRD برای بتن قلیافعال، نبود عنصر هیدرواکسیدکلسیم (Ca(OH)₂) در اوج قله های گراف این نوع از بتن، نشان از فعالیت پوزولانی مناسب سرباره کوره آهن گدازی در ترکیب شیمیایی ساختار خمیر بتن است. در گراف نمونه های بتنی تحت حرارت بالا، خروج برخی از عناصر به واسطه افت حرارتی (LOI)^۵ و کاهش ارتفاع اوج قله های عناصر، مشهود است.
- تصاویر حاصل از آزمون SEM، افزایش حجم ژل های هیدراته و بهبود تراکم در ریزساختار نمونه های بتن قلیافعال با وجود سرباره کوره آهن گدازی در ترکیب بتن، را به خوبی نشان می دهد. اعمال حرارت بالا در نمونه های بتنی، ساختار بتن را از حالت متراکم خارج کرده و به صورت ساختار درختی و غیرهمگن تبدیل کرده است. بر اساس SEM مشاهده می شود که تاثیر حرارت بر ریزساختار بتن معمولی بیشتر از ریزساختار بتن قلیافعال بوده است.
- نتایج حاصل از آزمون طیفسنجی پراش اشعه ایکس، ضمن هماهنگی با نتایج حاصل از تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی، در همپوشانی با نتایج حاصل از آزمون مقاومت کششی قرار گرفت.

- sustainability: a review of thermal, mechanical and microstructure properties. *Environment, Development and Sustainability*, 1-36. 2022.
25. Razak, S. N. A., Shafiq, N., Guillaumat, L., Farhan, S. A., & Lohana, V. K. Fire-Exposed Fly-Ash-Based Geopolymer Concrete: Effects of Burning Temperature on Mechanical and Microstructural Properties. *Materials*, 15(5), 1884. 2022.
 26. Abd Razak, S. N., Shafiq, N., Nikbakht, E. H., Mohammed, B. S., Guillaumat, L., & Farhan, S. A. Fire performance of fly-ash-based geopolymer concrete: Effect of burning temperature on mechanical and microstructural properties. *Materials Today: Proceedings*. 2022.
 27. Deb, P., Nath, P., & Sarker, P. Drying shrinkage of slag blended fly ash geopolymer concrete cured at room temperature. *Procedia Engineering*, 125, 594-600. 2015.
 28. Ehsani, A., Nili, M., & Shaabani, K. 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*, 21(5), 1854-1865. 2017.
 29. Kong, D.L. and J.G. Sanjayan, Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete. *Cement and concrete research*, 2010. 40(2): p. 334-339.
 30. Comrie, D.C. and W.M. Kriven. Composite cold ceramic geopolymer in a refractory application. in *Advances in Ceramic Matrix Composites IX*, Proceedings. 2004.
 31. Mane, S. and H. Jadhav, Investigation of geopolymer mortar and concrete under high temperature. *Magnesium*, 2012. 1(5).
 32. Bakharev, T., Thermal behaviour of geopolymers prepared using class F fly ash and elevated temperature curing. *Cement and concrete Research*, 2006. 36(6): p. 1134-1147.
 33. 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. 66, no. 1-4, pp. 121-143, 2002.
 34. 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*, 2020: p. 1-14.
 35. 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*, 2018. 180: p. 12-22.
 36. Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. *Concrete: microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill Education. 2014.
 13. Zhang, B. and N. Bicanic, Residual fracture toughness of normal-and high-strength gravel concrete after heating to 600 C. *Materials Journal*, 2002. 99(3): p. 217-226.
 14. Ahmad, S.I. and M.A. Hossain, Water permeability characteristics of normal strength concrete made from crushed clay bricks as coarse aggregate. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017. 2017.
 15. Aslani, F., Thermal performance modeling of geopolymer concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016. 28(1): p. 04015062.
 16. Türkmen, İ., et al. Fire resistance of geopolymer concrete produced from Ferrochrome slag by alkali activation method. in 2013 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA). 2013. IEEE.
 17. Derinpınar, A. N., Karakoç, M. B., & Özcan, A. Performance of glass powder substituted slag based geopolymer concretes under high temperature. *Construction and Building Materials*, 331, 127318. 2022.
 18. Tayeh, B. A., Hakamy, A., Amin, M., Zeyad, A. M., & Agwa, I. S. Effect of air agent on mechanical properties and microstructure of lightweight geopolymer concrete under high temperature. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00951. 2022.
 19. Amran, M., Huang, S. S., Debbarma, S., & Rashid, R. S. Fire resistance of geopolymer concrete: A critical review. *Construction and Building Materials*, 324, 126722. 2022.
 20. Guler, S., & Akbulut, Z. F. Effect of high-temperature on the behavior of single and hybrid glass and basalt fiber added geopolymer cement mortars. *Journal of Building Engineering*, 57, 104809. 2022.
 21. Zhang, D., Xu, J., Sun, F., & Xu, Z. Study on High-Temperature Behavior of Coal Gangue-Based Geopolymer Concrete Beams. *Advances in Civil Engineering*, 2022.
 22. Ravi, A., & Ansari, M. A. Comparative study on thermal and fire resisting behaviour of conventional cement and geopolymer mortar. In *AIP Conference Proceedings* (vol. 2463, no. 1, p. 020030). AIP Publishing LLC. 2022.
 23. Albidah, A., Alqarni, A. S., Abbas, H., Almusallam, T., & Al-Salloum, Y. Behavior of Metakaolin-Based geopolymer concrete at ambient and elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 317, 125910. 2022.
 24. Hassan, A., Arif, M., Shariq, M., Alomayri, T., & Pereira, S. Fire resistance characteristics of geopolymer concrete for environmental