

Evaluation of Mechanical Properties of Reinforced Concrete Based on Ultrasonic Nondestructive Testing at High Temperatures

Mohammadhossein Mansourghanaei

Department of Civil Engineering, Chalous Branch, Islamic Azad University, Chalous, Iran
Mhm.ghanaei@iauc.ac.ir

Abstract

In this laboratory study, a mixing design was made of ordinary concrete containing Portland cement with a grade of 500 kg/m³ and a mixing design was made of alkaline concrete based on slag from the composing furnace. To investigate the mechanical properties, a nondestructive test was performed to determine the velocity of ultrasonic vibrations in concrete at 21 and 600 °C at a 90-day curing age. In order to evaluate the microstructure of the concrete and verify the results of ultrasonic test, compressive strength test and scanning electron microscopy imaging was performed on concrete samples. The results showed a decrease in the speed of ultrasonic vibrations after applying high temperature (600 °C) in concrete, so that in ordinary concrete and hard concrete, the deceleration rate was 44.79% and 40.58% in the results after and before, respectively. In this regard, the velocity of ultrasonic waves in ferrous concrete were lower than ordinary concrete, so that at 21 and 600°C, the percentage of velocity drop in ferrous concrete compared to conventional concrete was equal to 10.48 and 3.66%, respectively. The results of the compressive strength test and the images obtained from the scanning electron microscope were in good agreement with the results of the ultrasonic tests in concrete at 21 and 600°C.

Keywords: Alkaline Concrete, Nondestructive Ultrasonic Testing, High Temperature, Concrete Microstructure, Hydrated Gels

ارزیابی خواص مکانیکی بتن قلیافعال بر اساس آزمون غیرمخرب امواج فراصوتی تحت حرارت بالا

محمدحسین منصورقناعی

گروه مهندسی عمران، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران
Mhm.ghanaei@iauc.ac.ir

چکیده

در این مقاله 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 کوره آهن‌گدازی ساخته شد. به منظور بررسی خواص مکانیکی، آزمون غیرمخرب تعیین سرعت ارتعاشات فراصوتی در بتن تحت دمای ۲۱ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه انجام گرفت. به منظور بررسی ریزساختاری بتن و راستی‌آزمایی نتایج آزمون فراصوتی، آزمون مقاومت فشاری و تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی بر روی نمونه‌های بتنی انجام گرفت. نتایج حاصله حاکی از افت سرعت امواج فراصوتی، پس از اعمال حرارت بالا (۶۰۰ درجه سانتی‌گراد) در بتن بود، به طوری که در بتن معمولی و بتن قلیافعال به ترتیب افت سرعت ۴۴/۷۹ و ۴۰/۵۸ درصدی در نتایج بعد و قبل از اعمال حرارت مشاهده شد. در این راستا سرعت عبور ارتعاشات فراصوتی در بتن قلیافعال کمتر از بتن معمولی بود، به طوری که در دمای ۲۱ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، درصد افت سرعت در بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی به ترتیب برابر با ۱۰/۴۸ و ۳/۶۶ درصد به دست آمد. در ادامه نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری و تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی، در هماهنگی و همپوشانی با نتایج حاصل از آزمون فراصوتی در بتن تحت دمای ۲۱ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت.

واژگان کلیدی: بتن قلیافعال، آزمون غیرمخرب فراصوتی، حرارت بالا، ریزساختار بتن، ژل‌های هیدراته.

۱- مقدمه

۱. عدم نیاز به تخریب در نمونه یا عضو سازه ای نسبت به آزمون های مخرب.
۲. هزینه پایین انجام آزمون با توجه به قیمت پایین دستگاه اولتراسونیک نسبت به سایر آزمون ها نظیر SEM و XRD.
۳. تخمین مناسب مقادیر وجود ریزترکها، منافذ و حفرات موجود در بتن، نسبت به سایر آزمون ها.
مصرف سیمان معمولی همواره با دغدغه‌های محیط زیستی همراه بوده است. تحقیقات نشان داده است که کارخانه‌های تولیدکننده سیمان، مسئول انتشار حدود ۵ درصد از کل دی اکسیدکربن وارد شده به جو کره زمین می‌باشند [۳]. از طرفی ضعف بتن سیمانی در مواجهه با مواد شیمیایی و خورنده‌ها، همچنین نیاز به بتن مستحکم در برخی از سازه‌های با اهمیت زیاد، محققان را به فکر یافتن ماده‌ای جایگزین با سیمان در بتن روبرو کرد. آنها خاکستر بادی، متاکائولن، سرباره کوره آهن‌گدازی و سایر پوزولان‌ها را به عنوان جایگزین‌های مناسب سیمان معرفی کردند [۴-۵].

سرعت ارتعاشات صوتی به لحاظ شنیداری به سه دسته فرکانسی تقسیم بندی می‌شود، دسته اول فرکانس‌هایی با سرعت در محدوده ۰ الی ۲۰ هرتز می‌باشند که موسوم به امواج فروسوتی است و قابل شنیدار برای انسان نیست. دسته دوم فرکانس‌هایی با سرعت در محدوده ۲۰ هرتز الی ۲۰ کیلوهرتز هستند که قابل شنیدن برای انسان است و دسته سوم فرکانس‌هایی با سرعت بالاتر از ۲۰ کیلوهرتز است که موسوم به امواج فراصوتی یا اولتراسونیک می‌باشد، این امواج قابل شنیدار برای انسان نیست [۱-۲]. امواج فراصوتی در علوم مختلف بطور گسترده کاربرد دارد، در علم مهندسی عمران، این امواج تحت آزمون غیرمخرب اولتراسونیک به منظور تعیین میزان تراکم و کیفیت در بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد.
از عمده مزایای آزمون غیرمخرب فراصوتی در بتن نسبت به سایر آزمون ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

نظیر سدها، مدارس، تاسیسات نظامی و هسته ای می تواند مورد مصرف قرار گیرد.

هنگامیکه بتن در برابر آتش یا حرارت زیاد قرار می گیرد، ممکن است به دلیل کاهش مقاومت و سختی، ظرفیت باربری پس از آتش سوزی در بتن کاهش قابل توجهی یابد [۱۳]. میزان خسارت ناشی از آتش، ارتباط مستقیم با مدت و دمای ایجاد شده در بتن دارد [۱۴]. در سال های اخیر، مواد قلیافعال به دلیل پایداری شیمیایی، مقاومت زیاد در برابر حرارت و انقباض کم نسبت به سیمان پرتلند مورد توجه بیشتری قرار گرفته است [۱۵]. همچنین مطالعات سایرین نشان می دهد که محصولات حاصل از فرایند ژئوپلیمریزاسیون مزایای ویژه ای از قبیل خواص مکانیکی عالی، مقاومت مناسب در برابر دمای بالا و حملات شیمیایی، جمع شدگی کم و دیگر موارد را دارند [۱۶]. بختیاری [۱۴] معتقد است که هنگامی که بتن قلیافعال در معرض درجه حرارت بالا قرار می گیرد تغییراتی در آن به وقوع می پیوندد که بر اساس محدوده های دمایی، این تغییرات عبارتند از:

۱- خروج آب قابل تبخیر در دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد.
 ۲- هیدراتاسیون هیدرات های کلسیم سیلیکات در دمای ۱۸۰ درجه سانتی گراد شروع می شود و با افزایش دما تا ۲۰۰ درجه سانتی گراد فشار بخار در ساختار قلیافعال پیوسته در حال افزایش است.

۳- در دمای ۵۰۰ درجه سانتی گراد گروه های هیدرواکسید (OH-) تبخیر می شود. فرآیند دی هیدرواکسیلاسیون موجب تغییر ساختار آلومینوسیلیکات و کاهش مقاومت می شود.

۴- در دمای ۸۰۰ درجه سانتی گراد ساختار سرامیکی به شدت متخلخلی تشکیل می شود.

تحقیقات انجام شده سایر محققین پیرامون سرعت عبور امواج فراصوتی (اولتراسونیک) در بتن قلیافعال نشان می دهد که سرعت این نوع از امواج در بتن های معمولی در قیاس با بتن های قلیافعال بیشتر است [۱۷]. در تحقیق نیک بین و همکاران، سرعت موج اولتراسونیک در نمونه های بتن معمولی تحت حرارت بالا فراتر از 3000 متر بر ثانیه گزارش شده است [۱۸]. در تحقیق سرنی واسولو و همکاران بر روی میزان سرعت عبور امواج اولتراسونیک بر روی بتن

در دهه های اخیر، بکارگیری مصالح با ویژگی قلیافعالی نظیر سرباره کوره آهنگدازی و خاکستر بادی بمنظور افزایش تراکم و مقاومت در ترکیب بتن، چشم انداز گسترده ای پیدا کرده است. بطوریکه تحقیقات سایرین نشان می دهد که استفاده از سرباره کوره آهنگدازی به جای سیمان می تواند مقاومت بتن را بهبود ببخشد و تقاضای فزاینده برای استفاده از سیمان در بتن را کاهش دهد [۷-۶]. فعال سازی سرباره کوره آهنگدازی با محلول قلیایی برای تولید سیمان سرباره فعال شده با محلول قلیایی در چند دهه گذشته مورد مطالعه فراوان قرار گرفته است [۸]. بتن حاصل از این فرایند را بتن قلیافعال می نامند، حضور مصالح سرشار از مواد آلومینوسیلیکاتی در ترکیب بتن قلیافعال با توجه به خواص پوزولانی خود، می تواند ضمن مشارکت در واکنش پذیری، موجب تسریع در فرایند ژئوپلیمریزاسیون^۱ گردد، محصول نهایی فرایند ژئوپلیمریزاسیون، ژل های هیدراته از قبیل سیلیکات کلسیم هیدراته^۲، سیلیکات آلومینیم کلسیم هیدراته^۳ و سیلیکات آلومینیم سدیم هیدراته^۴ هستند، این ژل ها ضمن داشتن تراکم و چگالی بالا در خود، بخوبی می توانند حفرات و منافذ موجود در ملات را پر نمایند و اتصال بین سنگدانه و خمیر سیمان در نواحی انتقال بین سطحی^۵ را تقویت کنند و از این طریق منجر به تولید بتن متراکم و مستحکم قلیافعال گردند. میزان درصد جایگزینی سرباره کوره آهنگدازی با سیمان مصرفی در بتن در سایر تحقیقات داخلی و خارجی بطور متغیر از ۵ درصد در سیمان ژئوپلیمری تا ۱۰۰ درصد در بتن ژئوپلیمری گزارش شده است [۸، ۱۲-۹].

به دلیل کمبود مصالح اولیه و هزینه بالای تامین مصالح اولیه بتن قلیافعال، این نوع از بتن تاکنون به تولید انبوه در کارخانه های شن و ماسه نرسیده است. در مقطع کنونی هزینه تولید بتن قلیافعال مبتنی بر سرباره کوره آهنگدازی در ایران ۲۸ برابر هزینه تولید بتن معمولی در حجم متناظر آن می باشد، هزینه تولید بتن قلیافعال بر پایه سرباره کوره آهنگدازی در کشورهای توسعه یافته صنعتی به دلیل در دسترس بودن مصالح اولیه با هزینه پایین تر، تا ۳۰ درصد کاهش می یابد. بتن قلیافعال به دلیل خواص برتر مکانیکی و دوام نسبت به بتن معمولی، در سازه هایی با اهمیت بالا

⁴ N-A-S-H

⁵ Interfacial transition zone(ITZ)

¹ GeoPolymerization

² Tobermorite (C-S-H)

³ Ettringite (C-A-S-H)

تحقیقات نشان داده است که بتن قلیافعال تازه به علت لزجت بالای موجود در محلول قلیایی در مقایسه با بتن حاوی سیمان پرتلند معمولی تازه، کارایی ضعیف‌تری 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 [۲۲]. در این راستا از ابرروان کننده نسل چهارم مبتنی بر پلی کربوکسیلات نرمال محصولی از شرکت دوروچم خاورمیانه براساس ویژگی‌های جدول ۳ استفاده گردید.

محلول قلیایی مصرفی در این تحقیق ترکیبی از محلول سیلیکات سدیم و هیدرواکسیدسدیم با نسبت وزنی ۲/۵ می‌باشد که با وزن مخصوص ترکیبی برابر با ۱۴۸۳ کیلوگرم بر متر مکعب مورد استفاده قرار گرفت، برای تهیه این محلول ابتدا آب و هیدرواکسید سدیم با هم ترکیب شدند و پس از سپری شدن چند ساعت، مایع سیلیکات سدیم به آنها اضافه گردید، در این مرحله پس از سپری شدن حداقل ۲۴ ساعت، محلول فعال کننده قلیایی قابل مصرف در ترکیب بتن گردید. برخی از مشخصات محلول قلیافعال مصرفی در این پژوهش در جدول ۴ نشان داده شده است. در این پژوهش 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 سانتی‌متر مربع بر گرم که تحت استاندارد ISIRI 389 [۲۳] تولید شده است، استفاده گردید، مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی در جدول ۵ ارایه شده است.

۳- طرح اختلاط

استاندارد داخلی و خارجی مجزایی برای تهیه طرح اختلاط بتن قلیافعال موجود نمی‌باشد، بنابراین به تبعیت از برخی پژوهش‌های آزمایشگاهی در این حوزه [۲۴]، طرح اختلاط بتن قلیافعال مطابق با استاندارد تهیه بتن معمولی تحت توصیه کمیته ACI 211.1-89 براساس جدول ۶ تهیه و تنظیم گردید.

قلیافعال، نشان دهنده تراکم ریزساختاری بالا در این نوع از بتن است [۱۹].

اهداف و نوآوری در این پژوهش آزمایشگاهی به واسطه تولید بتن قلیافعال، شامل بهبود خواص مکانیکی و ریزساختاری بتن قلیافعال در مقایسه با بتن معمولی، کمک به کاهش تولید و انتشار گاز سمی دی‌اکسیدکربن در مقایسه با تولید بتن معمولی، کمک به حفظ سلامت محیط زیست به واسطه مصرف (در ترکیب بتن قلیافعال) سرباره-های انباشته شده در کارخانه‌های ذوب آهن و حفظ و کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی که بعنوان سوخت مصرفی در کارخانه‌های تولید سیمان معمولی استفاده می‌گردد، را می‌توان ذکر کرد.

۲- مصالح و مواد مصرفی

در این پژوهش آزمایشگاهی، سرباره کوره آهنگدازی، محصول کارخانه ذوب آهن اصفهان با وزن مخصوص ۲۴۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، سطح مخصوص ۲۲۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم و چگالی ظاهری ۹۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب تحت استاندارد ASTM C989/C989M [۲۰] مورد مصرف قرار گرفت، مشخصات شیمیایی این محصول در جدول ۱ نشان داده شده است. آب مصرف شده بمنظور ساخت طرح اختلاط در تحقیق پیش رو 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 متر مکعب است. بر اساس بند ۹-۱۰-۴ و ۹-۱۰-۳ ویرایش چهارم آیین نامه 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 دهنده ی 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 [۲۱]، 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. شکل ۱ منحنی دانه بندی شن و ماسه را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات شیمیایی سرباره کوره آهنگدازی (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 سنگدانه‌ها

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

جدول ۳- مشخصات ابر روان کننده پلی کربوکسیلات نرمال

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

جدول ۴- مشخصات محلول قلیا فعال

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

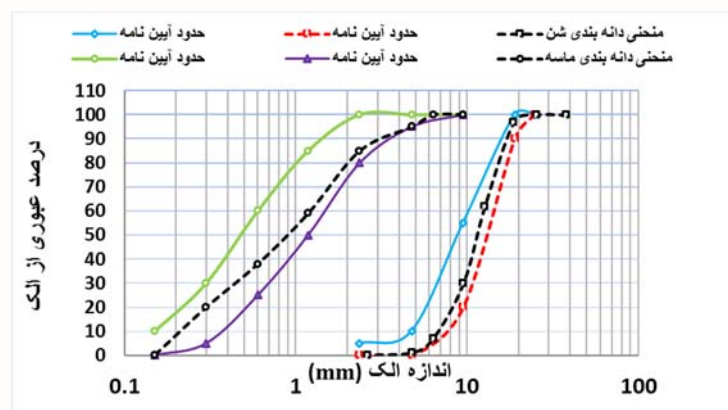
جدول ۵- جدول مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند

فرمول شیمیایی	Cl	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O+0.65 8K ₂ O	I.R	C ₃ A	L.O.I
مقدار مواد	Max 0/003	۲۲	۴/۵	۴۲-۴۳	۳/۵	Max ۱/۴۵	۲	MAX 0.6	MAX 0/7	-۷/۵ ۵/۵	MAX 1/5

جدول ۶- مشخصات طرح مخلوط بتن

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

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



شکل ۱- منحنی دانه بندی شن و ماسه

۴- ساخت و عمل آوری

در ابتدا براساس جدول ۴ طرح اختلاط، مصالح مصرفی توزین شدند و در ادامه مصالح خشک شامل سیمان (یا سرباره) و سنگدانه در داخل دستگاه مخلوطکن برقی در حال گردش ریخته شد و فرایند ترکیب مصالح به مدت ۱/۵ دقیقه به طول انجامید. در ادامه، مصالح تر شامل آب (یا محلول قلیایی) به مخلوط اضافه شدند و ترکیب مصالح به مدت ۲/۵ دقیقه دیگر به طول انجامید. سپس مخلوط بتن تازه در قالب‌های فلزی فویل‌دار 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 سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شدند. پس از سپری شدن این زمان، قالب برداری نمونه‌ها انجام گرفت و نمونه‌های بتن معمولی در آب تحت دمای ۲۱ درجه سانتی‌گراد تا سن انجام آزمون نگهداری و عمل آوری شدند. نمونه‌های بتن قلیافعال پس از قالب‌برداری، به مدت ۴۸ ساعت درون کوره تحت عمل آوری حرارتی در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد 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 سانتی‌گراد تا فرارسیدن 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 سانتی‌گراد دارای استحکام بیشتر از نمونه‌های عمل آوری شده تحت دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد هستند [۲۵].

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 $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر انجام گرفت. در این راستا، نمونه‌ها به نحوی در دستگاه جک بتن شکن 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 نمونه بتنی انجام پذیرفت، میزان حداکثر بار وارده، تعیین کننده مقدار مقاومت نمونه بتنی در برابر فشار وارده می‌باشد. آزمون غیرمخرب تعیین سرعت عبور ارتعاشات فراصوتی (UPV) در بتن، تحت استاندارد ASTM C597 بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر در دمای اتاق و حرارت بالا، با دستگاه از نوع داندیت^۱ با فرکانس لرزشی ۵۵ کیلوهرتز و دقت زمان فاصله حرکت امواج ۰/۱ و ± 2 درصد، اندازه‌گیری شد. در این راستا در سن عمل آوری ۹۰ روزه، ابعاد سطحی نمونه‌ها که در تماس با کف قالب قرار داشتند توسط کولیس اندازه‌گیری شد، سپس اتصال آکوستیک مناسب بین سطح بتن (سطوح صاف که در تماس با وجوه قالب بودند) و سطح مبدل برای حذف بسته‌های هوا از طریق وازلین در سطح نمونه‌ها حاصل گردید. پس از تعیین زمان عبور امواج از نمونه بتنی، با استفاده از روابط موجود در استاندارد ذکر شده، سرعت امواج اولتراسونیک بر حسب متر بر ثانیه بدست آمد. آزمون SEM در سن عمل آوری ۹۰ روزه در دمای اتاق و تحت حرارت بالا، توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی با 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. 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 سانتی‌گراد قرار گرفتند، سپس نمونه‌ها به مدت ۱ ساعت دیگر در کوره خاموش باقی ماندند تا تحت تاثیر شوک 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 [۲۶].

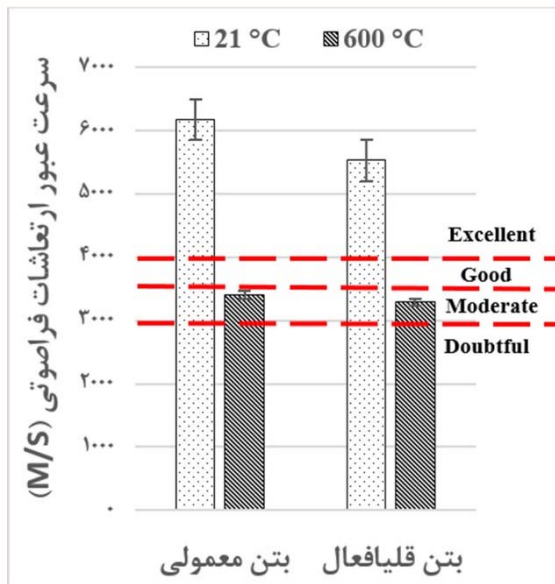
۶- تفسیر و نتایج آزمون

۶-۱- تفسیر و نتایج آزمون مقاومت فشاری

^۱ DUNDIT MODEL PC1012

تحقیقات سایرین نشان داده است که با توجه به فشار زیاد بین حفره ای، خروج آب از فضای پیوند شیمیایی در ژل سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) منجر به خرابی بتن در دمای بیش از ۴۵۰ درجه سانتی گراد می شود، تغییرات قابل توجهی از خواص مکانیکی بتن تحت دمای بین ۲۷ تا ۱۰۰ درجه سانتی گراد مشاهده نمی گردد اما کاهش تا ۴۰ درصد در مقادیر خواص مکانیکی بتن، بعد از اعمال دمای ۳۵۰ درجه سانتی گراد در مراحل اولیه اتفاق می افتد [۲۶].

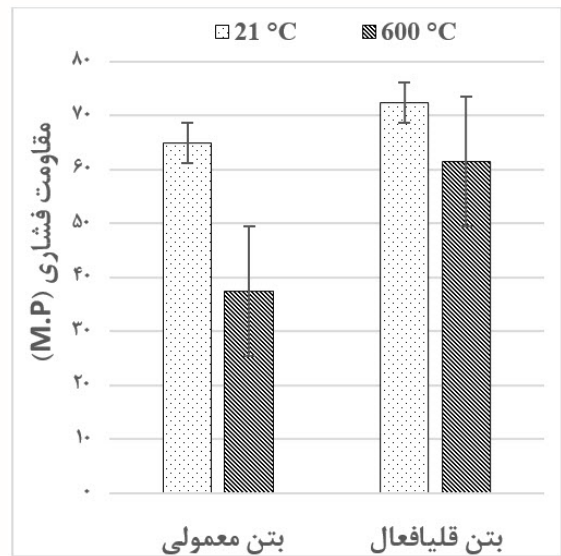
از طرفی تحقیقات نشان داده است که سرعت امواج فراصوتی در بتن معمولی در سن عمل آوری ۹۰ روزه با توجه به تکمیل بخش اعظمی از فرایند هیدراتاسیون، دارای کمترین تغییرات نسبت به سنین ۷ و ۲۸ روزه می باشد [۲۷].



شکل ۳- نمودار سرعت ارتعاشات فراصوتی در بتن

در این پژوهش، سرعت عبور ارتعاشات فراصوتی در بتن قلیافعال کمتر از بتن معمولی است، بطوریکه تحت دمای ۲۱ و ۶۰۰ درجه سانتی گراد، به ترتیب افت سرعت ۱۰/۴۸ و ۳/۶۶ درصدی را در بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی حاصل گردید. این موضوع بیشتر به دلیل وجود ریزترکها در بخش ریزساختار بتن قلیافعال ناشی از عمل آوری حرارتی تحت دمای ۶۰ درجه سانتی گراد در این نوع از بتن می باشد. تحقیقات سایر محققین در این راستا نشان داده است که در بتن قلیافعال به دلیل عمل آوری در محیط خشک کوره، یک سری ریزترکهایی در بتن تشکیل می شود که باعث می گردد تا بتن از یکپارچگی کامل که

نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری در بتن معمولی و بتن قلیافعال تحت دمای ۲۱ و ۶۰۰ درجه سانتی گراد در نمودار شکل ۲ به نمایش در آمده است. بر اساس این نتایج مشاهده می گردد که میزان مقاومت فشاری کسب شده در بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی در دمای ۲۱ و ۶۰۰ درجه سانتی گراد به ترتیب به میزان ۱۱ و ۶۴ درصد برتری را کسب نموده است، از طرفی اعمال حرارت بالا به نمونه های بتنی موجب افت مقاومت فشاری به میزان ۴۲ و ۱۵ درصد در بتن معمولی و بتن قلیافعال شده است، که نشان از مقاومت تقریباً سه برابری بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی تحت اعمال حرارت بالا به نمونه های بتنی است.



شکل ۲- نمودار مقاومت فشاری بتن

۲-۶- تفسیر و نتایج آزمون غیرمخرب اولتراسونیک

نتایج حاصل از آزمون غیرمخرب تعیین ارتعاشات فراصوتی در بتن معمولی و بتن قلیافعال در نمودار شکل ۳ به نمایش در آمده است.

پیرو این نمودار مشاهده می گردد که اعمال حرارت بالا (۶۰۰ درجه سانتی گراد) به نمونه های بتنی موجب افت سرعت عبور ارتعاشات فراصوتی در بتن شده است، در این راستا در بتن معمولی و بتن قلیافعال به ترتیب افت سرعت ۶۱/۷۱ و ۴۹/۱۹ درصدی سرعت ارتعاشات فراصوتی را پس از اعمال حرارت ۶۰۰ درجه سانتی گراد نسبت به دمای ۲۱ درجه سانتی گراد شاهد می باشیم.

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

۳) ترک‌ها و ریزترک‌های موجود در مخلوط به دلیل انقباض حرارتی ناشی از عمل‌آوری حرارتی و حرارت هیدراتاسیون و ژئوپلیمریزاسیون با توجه به عیار بالا از سیمان پرتلند و سرباره کوره آهنگدازی 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. بر اساس این تصاویر مشاهده می‌گردد که در ترکیب بتن قلیافعال تحت دمای ۲۱ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، میزان ژل‌های هیدراته شده نظیر سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H)، از حجم بالایی نسبت به ترکیب بتن معمولی برخوردار است.

این امر به دلیل حضور مقادیر بیشتری از مواد آلومینوسیلیکاتی در ترکیب سرباره کوره آهنگدازی است که توانسته‌اند با خواص بالای پوزولانی خود، در ترکیب با محلول قلیایی، ضمن سرعت بخشیدن به فرایند ژئوسپارش، حجم بالاتری از ژل‌های هیدراته شده را در ترکیب مخلوط قلیافعال تولید نمایند. در این راستا تحقیقات نشان داده است که در واکنش ژئوپلیمریزاسیون بر اساس مکانیسم ژئوسپارش، با تبدیل CH به ژل هیدراته شده نظیر C-S-H، ریزساختارها در بتن متراکم شده و موجب همگنی بتن می‌گردد [۳۲]. تصاویر SEM حاکی از این موضوع می‌باشد که با اعمال حرارت بالا (۶۰۰ درجه سانتی‌گراد) در نمونه‌های بتنی، افت قابل توجهی از کیفیت بتن را در بخش ریزساختار آن مشهود می‌سازد. این امر به دلیل خروج آب و تخریب ساختار ژل‌های هیدراته شده در بخش ریزساختار بتن تحت حرارت بالا است. در این راستا ساختار درختی ناشی از پکیدگی ریزساختار بتن مشاهده می‌گردد و اندازه و حجم حفرات، منافذ و ترک‌ها در نمونه‌های بتنی بیش از نمونه‌های بتنی تحت دمای ۲۱ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. بررسی‌های سایر محققین در این راستا نشان داده شده است که حرارت بین ۵۰۰ الی ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌تواند موجب تغییرات کریستالی، تخریب ریزساختار ژل

باعث انتقال امواج اولتراسونیک با سرعت بالاتر می‌گردد خارج شود و این امر موجب می‌گردد تا اندکی از سرعت‌های به دست‌آمده امواج در بتن قلیافعال نسبت به 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 [۲۸].

استاندارد IS 13311-1، محدوده کیفیت بتن را در آزمون سرعت ارتعاشات فراصوتی (UPV) نشان می‌دهد [۲۹]. این استاندارد کیفیت بتن را در چهار سطح، نامناسب (Doubtful) با سرعت زیر ۳۰۰۰ متر بر ثانیه، متوسط (Moderate) با سرعت ۳۰۰۰ الی ۳۵۰۰ متر بر ثانیه، خوب (Good) با سرعت ۳۵۰۰ الی ۴۵۰۰ متر بر ثانیه و عالی (Excellent) با سرعت بیش از ۴۵۰۰ متر بر ثانیه تقسیم بندی کرده است. بکارگیری از این استاندارد برای رده بندی کیفیت سرعت عبور ارتعاشات فراصوتی در سایر تحقیقات نیز گزارش شده است [۳۰]. در این راستا، با توجه به نتایج نمودار شکل ۳ حاصل از تحقیق حاضر، مشاهده می‌گردد که بتن معمولی و بتن قلیافعال در دمای ۲۱ درجه سانتی‌گراد در محدوده کیفیت عالی از بتن قرار دارند، اما پس از اعمال حرارت بالا در این دو نوع از بتن، کیفیت بتن به محدوده متوسط تنزل پیدا نموده است. بر اساس استاندارد IS 1331-1، تا زمانی که مقادیر UPV در دسته‌ی "عالی" قرار بگیرند، به این معنی است که بتن مورد نظر دارای ترک‌ها و یا حفره‌های بزرگی که بر تمامیت ساختار نمونه بتن تاثیر بگذارد نیست [۳۱].

۶-۳- تفسیر و نتایج آزمون SEM

نتایج حاصل از آزمون تصویر برداری میکروسکوپ الکترونی روبشی با مقیاس ۵۰ میکرو متر بر روی نمونه‌های بتن معمولی و بتن قلیافعال در این پژوهش آزمایشگاهی در شکل ۴ 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 تقسیم بندی کرد.

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

۷- نتیجه گیری

در این مطالعه آزمایشگاهی، یک طرح اختلاط از بتن معمولی و یک طرح اختلاط از بتن قلیافعال به منظور بررسی تحت آزمون غیرمخرب تعیین سرعت عبور ارتعاشات فراصوتی در بتن تحت دمای ۲۱ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، ساخته شد. در ادامه پس از انجام آزمون مقاومت فشاری، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه از بخش ریزساختار بتن سخت شده گرفته شد و نتایج آن مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش به شرح ذیل ارائه می‌گردد.

۱- میزان مقاومت فشاری کسب شده در بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی در دمای ۲۱ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب به میزان ۱۱ و ۶۴ درصد برتری را کسب نموده است، از طرفی اعمال حرارت به نمونه‌های بتنی موجب افت مقاومت فشاری به میزان ۴۲ و ۱۵ درصد در بتن معمولی و بتن قلیافعال شده است.

۲- نتایج حاصله حاکی از افت سرعت عبور ارتعاشات فراصوتی در بتن با اعمال حرارت بالا (۶۰۰ درجه سانتی‌گراد) در نمونه‌های بتنی است، بطوریکه در بتن معمولی و بتن قلیافعال به ترتیب شاهد افت سرعت ۴۴/۷۹ و ۴۰/۵۸ درصدی در نتایج بعد و قبل از اعمال حرارت بالا می‌باشیم.

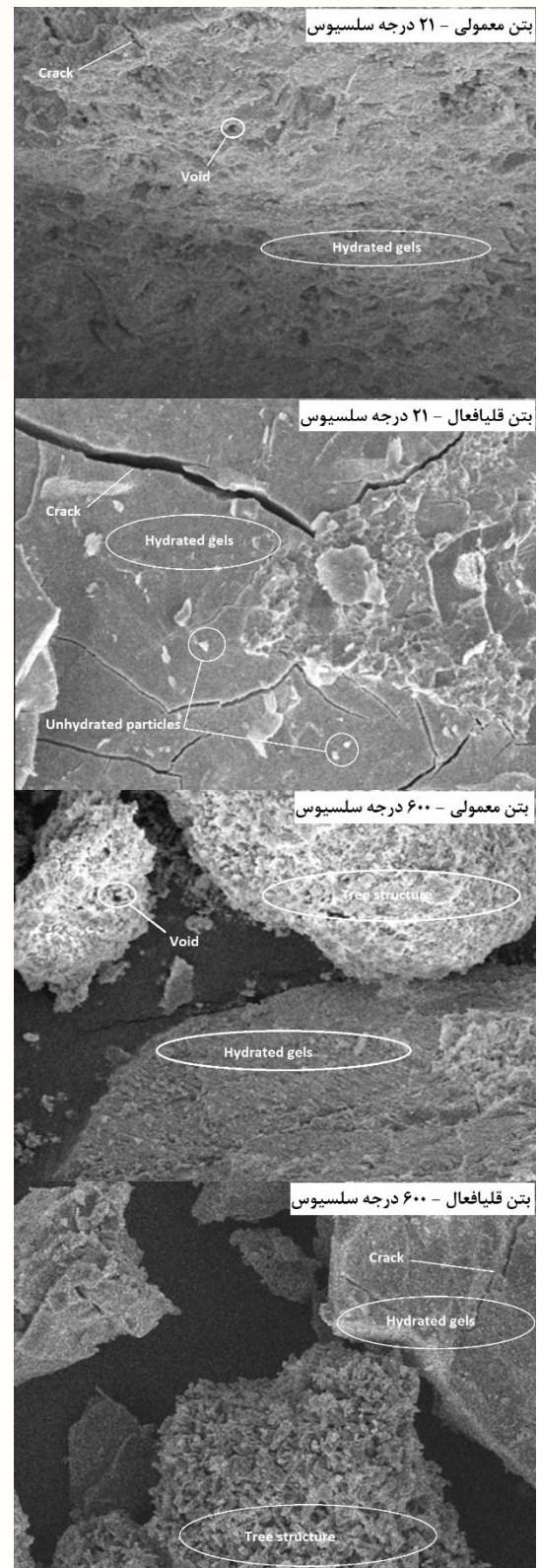
۳- سرعت عبور ارتعاشات فراصوتی در بتن قلیافعال کمتر از بتن معمولی کسب گردید، بطوریکه در دمای ۲۱ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، درصد افت سرعت در بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی به ترتیب برابر با ۱۰/۴۸ درصد و ۳/۶۶ درصد به دست آمد. این امر بیشتر به دلیل ریزترک‌های موجود در بخش ریزساختار بتن، ناشی از عمل‌آوری حرارتی تحت دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد است.

۴- تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی در بتن، در هماهنگی و همپوشانی کامل با نتایج حاصل از آزمون تعیین سرعت عبور ارتعاشات فراصوتی در بتن تحت دمای ۲۱ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت.

۸- منابع

- [1] Czechowska-Biskup, R., Rokita, B., Lotfy, S., Ulanski, P., & Rosiak, J. M. (2005). Degradation of chitosan and starch by 360-kHz ultrasound. *Carbohydrate Polymers*, 60(2), 175-184.
- [2] J Mason, T., Chemat, F., & Vinatoru, M. (2011). The extraction of natural products using ultrasound or microwaves. *Current Organic Chemistry*, 15(2), 237-247.

های هیدراته و تشکیل کانی‌های کربناتی در ماتریس بتن گردد [۳۳-۳۵].



شکل ۴- نتایج آزمون SEM

- properties of Geopolymer Concretes blast furnace slag by using nanosilica and polyolefin fiber. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(10), 334-352. doi: 10.22065/jsce.2021.277150.2382
- [18] M. Nikbin, I., Mehdipour, S., Dezhampannah, S., Mohammadi, R., Mohebbi, R., Habibi, H., & Sadrmomtazi, A. (2020). Effect of high temperature on mechanical and gamma ray shielding properties of. *Radiation Physics and Chemistry*, 174.
- [19] Sreenivasulu, C., Guru Jawahar, J., & Sashidhar, C. (2018). Predicting compressive strength of geopolymer concrete using NDT techniques. *Asian Journal of Civil Engineering*, 19(4), 513-525.
- [20] ASTM C989/C989M-18a. (2018). Standard specification for slag cement for use in concrete and mortars. *ASTM International*.
- [21] ASTM, C. (2003). Standard specification for concrete aggregates. *Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials*.
- [22] Pilehvar, S., Cao, V. D., Szczotok, A. M., Carmona, M., Valentini, L., Lanzón, M., ... & Kjøniksen, A. L. (2018). Physical and mechanical properties of fly ash and slag geopolymer concrete containing different types of micro-encapsulated phase change materials. *Construction and Building Materials*, 173, 28-39.
- [23] ISIRI 389, "standards and the specification for the PORTLAND CEMENT". (2020). Institute of Standards and Industrial Research of Iran.
- [24] Deb, P., Nath, P., & Sarker, P. (2015). Drying shrinkage of slag blended fly ash geopolymer concrete cured at room temperature. *Procedia Engineering*, 125, 594-600.
- [25] Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. (2014). *Concrete: microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill Education.
- [26] Kong, D. L., & Sanjayan, J. G. (2010). Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete. *Cement and concrete research*, 40(2), 334-339.
- [27] Ghasemzadeh Mousavinejad, S. H., & Rudy, B. (2020). Study of Ultrasonic Pulse Wave Velocity in Plain Concrete Using Different Water to Cement Ratio at Different Stress Level. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 50(100), 37-43.
- [28] Ren, W., Xu, J., & Bai, E. (2016). Strength and ultrasonic characteristics of alkali-activated fly ash-slag geopolymer concrete after exposure to elevated temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(2), 04015124.
- [29] "IS 13311-1): Method of Non-destructive testing ofconcret, Part 1: Ultrasonic pulse velocity [CED 2: Cement and Concrete]," 1992.
- [30] Whitehurst, E. A. (1951, February). Soniscope tests concrete structures. In *Journal Proceedings* (Vol. 47, No. 2, pp. 433-444).
- [31] Kwan, W. H., Ramli, M., Kam, K. J., & Sulieman, M. Z. (2012). Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. *Construction and Building Materials*, 26(1), 565-573.
- [32] Hongjian, D., Suhuan, D., & Liu, X. (2014). Durability performances of concrete with nano-silica. *Construction and building materials*, 73, 705-712.
- [33] Zhuang, X. Y., Chen, L., Komarneni, S., Zhou, C. H., Tong, D. S., Yang, H. M., ... & Wang, H. (2016). Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and
- [3] Nosrati, A., Zandi, Y., Shariati, M., Khademi, K., Aliabad, M., Marto, A., & Khorami, M. (2018). Portland cement structure and its major oxides and fineness. *Smart structures and systems*, 22(2), 425-432.
- [4] Nuaklong, P., Sata, V., & Chindaprasirt, P. (2016). Influence of recycled aggregate on fly ash geopolymer concrete properties. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2300-2307.
- [5] Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., & Bhattacharyya, S. K. (2015). Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Construction and building materials*, 85, 78-90.
- [6] Siddique, R., & Kaur, D. (2012). Properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag (GGBFS) at elevated temperatures. *Journal of Advanced Research*, 3(1), 45-51.
- [7] Yüksel, İ., Siddique, R., & Özkan, Ö. (2011). Influence of high temperature on the properties of concretes made with industrial by-products as fine aggregate replacement. *Construction and building materials*, 25(2), 967-972.
- [8] Allahverdi, A. L. I., Kani, E. N., & Yazdanipour, M. (2011). Effects of blast-furnace slag on natural pozzolan-based geopolymer cement. *Ceramics-Silikáty*, 55(1), 68-78.
- [9] Zhuguo, L. I., & Sha, L. I. (2018). Carbonation resistance of fly ash and blast furnace slag based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 163, 668-680.
- [10] Mallikarjuna Rao, G., Gunneswara Rao, T. D., Siva Nagi Reddy, M., & Rama Seshu, D. (2019). A study on the strength and performance of geopolymer concrete subjected to elevated temperatures. In *Recent Advances in Structural Engineering, Volume 1* (pp. 869-889). Springer, Singapore.
- [11] Jafari Nadoushan, M., Ramezaniapor, A. (2019). Mechanical Properties of Alkali Activated Slag Pastes and Determination of Optimum Values of Effective Factors. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 50(6), 1043-1052. doi: 10.22060/ceej.2017.11113.4977
- [12] Mansourghanaei, M., Biklaryan, M., Mardookhpour, A. (2022). Experimental Study of Compressive Strength of Geopolymer Concrete Based on XRF and SEM Analysis. *Analysis of Structure and Earthquake*, 18(4), 55-64. doi: 10.30495/civil.2022.689960
- [13] Caetano, H., Ferreira, G., Rodrigues, J. P. C., & Pimienta, P. (2019). Effect of the high temperatures on the microstructure and compressive strength of high strength fibre concretes. *Construction and Building Materials*, 199, 717-736.
- [14] Bakhtiyari, S., Allahverdi, A., Rais-Ghasemi, M., Zarrabi, B. A., & Parhizkar, T. (2011). Self-compacting concrete containing different powders at elevated temperatures—Mechanical properties and changes in the phase composition of the paste. *Thermochimica acta*, 514(1-2), 74-81.
- [15] Amiri, M., & Aryanpoor, M. (2019). The Effects of High Temperatures on Concrete Performance based on Nanostructural Changes in Calcium Silicate Hydrate (CSH). *Concrete Research*, 12(4), 69-80.
- [16] Yunsheng, Z., Wei, S., & Zongjin, L. (2010). Composition design and microstructural characterization of calcined kaolin-based geopolymer cement. *Applied Clay Science*, 47(3-4), 271-275.
- [17] Mansourghanaei, M., biklaryan, M., Mardookhpour, A. (2021). Evaluate Effect of Temperature On mechanical

international clay conference (pp. 119-129). Applied Publishers Wilmette, IL

applications. *Journal of Cleaner Production*, 125, 253-267.

[34] Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. (2009). Introduction to geopolymers. In *Geopolymers* (pp. 1-11). Woodhead Publishing.

[35] Brindley, G. W. (1975). Thermal transformations of clays and layer silicates. In *Proceedings of the*