

مقایسه سرعت عبور امواج فراصوت در بتن قلیافعال و بتن معمولی تحت حرارت بالا براساس آنالیز XRD و SEM، جهت مصرف در روسازی

مقاله علمی - پژوهشی

محمدحسین منصورقناعتی، دانش آموخته دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران

مرتضی بیگلریان*، گروه مهندسی عمران، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران

علیرضا مردوخپور، گروه مهندسی عمران، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: M.Biklaryan@iauc.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۵

صفحه ۲۱۶-۲۰۵

چکیده

یکی از معایب مصرف بتن معمولی در روسازی راه‌ها، مقاومت پایین آن در برابر بارهای وارده ترافیکی است. اما امروزه دانشمندان با به‌کارگیری از مصالح نوینی مانند سرباره کوره آهنگدازی در ترکیب بتن، توانسته‌اند میزان مقاومت بتن را بهبود ببخشند. این مصالح دارای چسباننده و پرکننده نظیر آلومینات و سیلیکات است که پس از فرایند واکنش شیمیایی با محلول قلیافعال، بهبود مقاومت در بتن را تضمین می‌کند. هدف این پژوهش آزمایشگاهی، ساخت بتن با مقاومت بالاتر نسبت به بتن معمولی مصرفی در روسازی راه‌ها است. در این راستا یک طرح اختلاط از بتن معمولی با عیار سیمان ۴۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب ساخته شد. یک طرح اختلاط نیز از بتن قلیافعال بر پایه سرباره کوره آهنگدازی ساخته شد تا میزان سرعت عبور امواج فراصوت (UPV) بتن تحت دمای محیط و حرارت ۵۰۰ درجه سلسیوس، در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه مورد مقایسه و ارزیابی قرار گیرد. در ادامه آنالیز طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس (XRD) و تصویربرداری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) به منظور بررسی بیشتر و راستی آزمایی نتایج آزمون UPV، در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در دمای محیط و تحت حرارت ۵۰۰ درجه سلسیوس بر روی نمونه‌های بتنی انجام گرفت. بر اساس نتایج حاصله، میزان UPV در دمای محیط، برای بتن معمولی به مقدار ۵۹۳۰ متر بر ثانیه و برای بتن قلیافعال به مقدار ۴۹۲۰ متر بر ثانیه کسب گردید که اختلاف ۱۷/۰۳ درصدی را دارا بود. با اعمال حرارت به نمونه‌های بتنی، میزان افت UPV در بتن معمولی به مقدار ۳۷/۲۶ درصد و در بتن قلیافعال به میزان ۴۵/۹۳ درصد رسید. نتایج آنالیز XRD و SEM، ضمن هماهنگی با یکدیگر، در همپوشانی با نتایج حاصل از آزمون UPV قرار داشت.

واژه‌های کلیدی: بتن قلیافعال، سرباره کوره آهنگدازی، سرعت عبور امواج فراصوت (UPV)، طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

۱- مقدمه

است. تحقیقات نشان داده است که توسعه بخش‌های پیش‌رو یکی از عوامل تأثیرگذار بر اقتصاد کشور است [Parvar, et al. 2021]. توسعه شبکه حمل و نقل موجب گردیده تا سیستم‌های روسازی نوین از قبیل روسازی‌های بتنی، پا به این عرصه بگذارند. روسازی‌های بتنی علاوه بر دارا بودن مزایای

با توجه به اینکه ترانزیت جاده‌ای یکی از پرسودترین تجارت‌ها به شمار می‌رود و موقعیت جغرافیایی بسیار مناسب کشور ما در منطقه، مزایای ترانزیتی قابل توجهی را برای کشور عزیزمان ایران به ارمغان آورده است [Bazdar Ardebili, et al. 2021]. لذا توسعه راه‌های کشور از اهمیت ویژه‌ای برخوردار

نشان می‌دهند [P. Duan, et al. 2013]. بتن‌های قلیافعال با مواد پلیمریزاسیون بالا و با ساختار آلومینوسیلیکاتی مشخص می‌شوند که عمدتاً از سه بُعد واحد متقاطع شامل $SiQ_4 (2A)$ و $SiQ_4 (3A)$ تشکیل شده‌اند [Du, and X. Liu, 2014]. فعال‌سازی سرباره کوره بلند با محلول قلیافعال (مانند $NaOH$ و Na_2SiO_3) برای تولید سیمان سرباره فعال شده با محلول قلیافعال در چند دهه گذشته مورد مطالعه قرار گرفته است [P. Duan, et al. 2013]. به‌کارگیری سرباره با جایگزینی مصالح معدنی مصرفی در بتن می‌تواند علاوه بر ملاحظات محیط‌زیستی، کاهش هزینه‌های بالای روسازی راه‌ها را به‌دنبال داشته باشد [Amouzadeh Omrani and Hasirchian. 2020].

افزایش تراکم و چگالی در بتن روسازی منجر به بالا رفتن مقاومت بتن در برابر بارهای ترافیکی می‌گردد [Choubdar, et al. 2021]. وجود ترک ناشی از پدیده خستگی در بتن روسازی یکی از عوامل اصلی خرابی راه‌ها به شمار می‌رود، لذا تامین مقاومت در برابر پدیده خستگی در طراحی روسازی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [ferdosi shahandashti, et al. 2021]. روش‌های آزمایشگاهی مختلفی برای تخمین مقاومت و میزان ترک موجود در بتن وجود دارد، آزمون غیرمخرب UPV یکی از روش‌های متداول برای تخمین و ارزیابی میزان مقاومت و ترک در بتن است. در این راستا تحقیقات سایرین نشان داده است که بررسی خاصیت رسانایی امواج الکتریکی در بتن روسازی می‌تواند روشی موثر برای تخمین میزان خرابی در این نوع از بتن باشد [Sun, et al. 2016; adresi, et al. 2014].

عملکرد مقاومت بتن در برابر گرما پیچیده است و مقابله با افت مقاومت بتن در مواجهه با آتش از دغدغه‌های دانشمندان علم عمران است. برخی از محققان گزارش کرده‌اند که این کاهش مقاومت عمدتاً به تجزیه هیدرواکسید کلسیم مرتبط است و این پدیده معمولاً در محدوده دمایی بین ۴۵۰ تا ۵۰۰ درجه سلسیوس رخ می‌دهد [Bentz. 2000, Zhang, and N. Bicanic, 2002]. هنگامی که بتن قلیافعال در معرض دمای بالا قرار می‌گیرد، تغییراتی را تجربه می‌کند که براساس محدوده حرارتی آنها به‌شرح زیر تقسیم‌بندی شده است [Bakhtiyari, et al. 2011].

محیط‌زیستی، در نواحی با ترافیک سنگین کارایی بهتری داشته و دارای چرخه عمر بیشتری نسبت به روسازی آسفالتی است. تحقیقات میدانی و ارزیابی خرابی راه‌های روستای براساس ارزیابی شاخص خرابی PCI^۱ نشان می‌دهد که در روسازی آسفالتی مقدار PCI برابر ۷۴ و در روسازی‌های بتنی مقدار PCI معادل ۸۷ است، این موضوع نشان از مقاومت بالاتر روسازی‌های بتنی نسبت به روسازی‌های آسفالتی است [Babagol, 2021]. از طرفی ساخت، نگهداری و ترمیم روسازی‌ها، اعتبار مالی بالایی را می‌طلبد و معمولاً هزینه‌های نگهداری ثانویه به مراتب بیشتری را به‌دنبال دارد [Choubdar, et al. 2021]. از این رو انتخاب مصالح مناسب به‌لحاظ کمی و کیفی در روسازی سازه راه‌ها باید با حساسیت بیشتری انجام گیرد. تولید سیمان همواره معایب محیط‌زیستی و مصرف آن ضعف مقاومتی را در بتن به‌همراه داشته است. پیرامون رفع این مضرات، دانشمندان خاکستر بادی، متاکائولین، سرباره کوره بلند و سایر پوزولان‌ها را به‌عنوان جایگزین‌های مناسب برای سیمان در بتن معرفی کرده‌اند [Nuaklong, et al. 2016, Singh, et al. 2015, Zhuang, et al. 2015]. از طرفی تحقیقات نشان می‌دهد که کارخانه‌های تولیدکننده سیمان مسئول انتشار حدود ۵ درصد از کل دی اکسیدکربن وارد شده به جو کره زمین است [Nosrati, et al. 2018]. در راستای کاهش مصرف انرژی و کاهش تولید و انتشار گاز سمی دی اکسیدکربن (CO_2) در فرایند تولید سیمان، ترکیب مقدار بالایی از سرباره کوره آهنگدازی با جایگزینی سیمان در بتن گزارش شده است [Hashimoto, et al. 2016]. با افزودن سرباره به داخل ترکیب بتن، ساختار منافذ در بتن بهینه‌سازی شده و توزیع اندازه منافذ به‌طور مناسب‌تر خواهد بود، ناحیه انتقال بین سطحی متراکم‌تر و مقاومت و جنبه‌های دوام بتن به‌تدریج افزایش می‌یابد، به‌عبارتی توسعه مقاومت و دوام رابطه نزدیکی با تکامل ساختار حفره و ناحیه انتقال بین سطحی در بتن قلیافعال سرباره‌ای دارد [P. Duan, et al. 2013]. از طرفی هر چه آسیاب کردن سرباره بیشتر و ذرات آن ریزتر باشند، برخی از ویژگی‌ها و پیوند آن در بتن بهتر خواهد بود [V. Václavík, et al. 2012]. جایگزینی کل سیمان با سرباره کوره آهنگدازی در بتن منجر به تولید بتن قلیافعال سرباره‌ای می‌گردد. سیمان‌های ژئوپلیمری، گروهی از مواد قلیافعال هستند، موادی که خواص مهندسی برتر را در مقایسه با سیمان پرتلند از خود

۲- ساخت نمونه و برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی

در ساخت بتن بر اساس طرح اختلاط تهیه شده در این تحقیق آزمایشگاهی، سرباره کوره آهنگدازی محصول شرکت ذوب آهن اصفهان، تحت استاندارد C989/C989MASTM 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 کارخانه‌های شن و ماسه شهرستان لاهیجان بوده که به لحاظ کمی و کیفی در محدوده استاندارد ASTM C33 قرار دارد، سایر مشخصات سنگدانه‌ها در جدول ۵ نشان داده شده است. ابر روان 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 قلیافعال مصرفی در ساخت بتن قلیافعال، ترکیبی از هیدرواکسید سدیم (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 قلیافعال 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 پیش رو (در بتن کنترل و ساخت محلول قلیافعال)، از آب شرب شهر لاهیجان استفاده گردید، این آب دارای pH در محدوده ۶/۵ الی ۷/۵ و وزن مخصوص کیلوگرم بر متر مکعب ۱۰۰۰ است.

- حذف آب به واسطه تبخیر در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس.
 - شروع فرایند شیمیایی ژئوپلیمریزاسیون (ژئوسپارش) کلسیم سیلیکات هیدراته از دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس، با افزایش دما به ۲۰۰ درجه سلسیوس، فشار بخار به‌طور مداوم در ساختار قلیافعال افزایش می‌یابد.
 - گروه‌های هیدرواکسیل (OH) در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس تبخیر می‌شوند. دی هیدرواکسیلاسیون ساختار آلومینوسیلیکات را تغییر می‌دهد و سطح مقاومت را کاهش می‌دهد.
 - یک ساختار سرامیکی به‌شدت متخلخل در دمای ۸۰۰ درجه سلسیوس تشکیل می‌شود.
 اهداف و نوآوری در این پژوهش آزمایشگاهی به‌واسطه تولید بتن (قلیافعال)، به چند مورد زیر خلاصه می‌گردد:
 - خواص مکانیکی و ریزساختاری بتن قلیافعال در مقایسه با بتن معمولی بهبود می‌یابد.
 - کمک به کاهش حجم انتشار گاز سمی CO_2 در مقایسه با تولید بتن معمولی، با توجه به گزارش ارایه شده توسط سایر محققین در این راستا.
 - کمک به حفظ سلامت محیط‌زیست به‌واسطه مصرف (در ترکیب بتن قلیافعال) سرباره‌های انباشته شده در کارخانه‌های ذوب آهن، شناخته شده به‌عنوان مواد مضر محیط‌زیستی.
 - حفظ و کاهش مصرف منابع معدنی مصرفی که به‌عنوان مصالح اصلی در طی فرایند ساخت سیمان معمولی استفاده می‌گردد.
 - حفظ و کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی که به‌عنوان سوخت مصرفی در کارخانه‌های تولید سیمان معمولی استفاده می‌گردد.
 - افزایش میزان مقاومت بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی تحت دمای اتاق و حرارت بالا، با توجه به نتایج آزمون UPV.
 - با توجه به بررسی‌های ریزساختاری، بهبود ریزساختار بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی که منجر به افزایش استحکام در بتن روسازی مصرفی در راه‌ها می‌گردد.

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
%	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 متر مکعب)	سطح مخصوص (سانتی متر مربع بر گرم)	مدول الاستیسیته کیلوپاسکال	چگالی ظاهری (کیلوگرم بر متر مربع)	اندازه ذرات (μm)	رنگ
۲۷۵۰	۲۲۰۰	۱/۲	۹۶۰	۲/۱	کرم

جدول ۳. مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ II

L.O.I	C ₃ A	I.R	Na ₂ O+0.658K ₂ O	SO ₃	MgO	Cao	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Cl
MAX 1/5	۵/۵ - ۷/۵	MAX 0/7	MAX 0.6	۲ - ۲/۳	Max ۱/۴۵	۴۲ - ۴۳	۳/۵ - ۳/۸	۴/۵ - ۴/۸	۲۲ - ۲۱	Max 0/003

جدول ۴. مشخصات فیزیکی و رئولوژیکی سیمان پرتلند تیپ II

وزن مخصوص (کیلوگرم بر متر مکعب)	سطح مخصوص (سانتی متر مربع بر گرم)	گیرش اولیه (ثانیه)	گیرش ثانویه (ثانیه)
۳۲۵۰	۳۲۰۰ - ۳۰۰۰	۱۱۵ < ۱۳۰	۱۹۰ < ۲۰۵

جدول ۵. مشخصات سنگدانه‌ها

مصلح دانه‌ای بتن	حداقل قطر	حداکثر قطر (میلی‌متر)	مدول نرمی (میلی‌متر)	وزن مخصوص (کیلوگرم بر متر مکعب)
شن	۴/۷۵ (میلی‌متر)	۱۹	۵/۷	۲۷۵۰
ماسه	۷۵ (μm)	۴/۷۵	۲/۸۵	۲۶۵۰

جدول ۶. مشخصات ابروان کننده پلی کربوکسیلات نرمال

فرمول شیمیایی	حالت فیزیکی	رنگ	وزن مخصوص (کیلوگرم بر متر مکعب)	استاندارد صرف	PH	نقطه اشتعال
پلی کربوکسیلات نرمال	مایع	قهوه‌ای	۱۱۰۰	ASTM C494	حدود ۷	ندارد

جدول ۷. مشخصات محلول قلیا فعال

نوع محلول	فرمول مولکولی	رنگ	مولاریته (mol/m^3)	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	مدول الاستیسیته (p)	دمای ذوب درجه سانتی‌گراد	جرم مولی (g/mol)
هیدراکسید سدیم	NaOH	سفید	۱۲	۲۱۳۰	۳/۳	۳۱۸	۳۹/۹۹
سیلیکات سدیم	Na ₂ SiO ₃	سفید	۱۲	۲۴۰۰	-	۱۰۸۸	۱۲۲/۰۶

۲-۲- طرح اختلاط، ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها

اختلاط مذکور، 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 قلیا فعال و ابروان کننده براساس نیاز هر طرح، به داخل دستگاه مخلوط‌کن در حال گردش ریخته شد و فرایند ترکیب مصالح، ۲ دقیقه دیگر (در مجموع ۴ دقیقه) به طول انجامید.

استاندارد مجزا برای طرح اختلاط بتن قلیا فعال در دست نمی‌باشد، لذا به پیروی از سایر تحقیقات در حوزه بتن ژئوپلیمری [Deb, et al. 2015]، از استاندارد طرح اختلاط بتن معمولی تحت توصیه کمیته ACI 211.1-89، برای ساخت بتن قلیا فعال در این پژوهش آزمایشگاهی استفاده گردید. مشخصات طرح اختلاط بتن در این تحقیق براساس جدول ۸ تنظیم شده است. در راستای ساخت بتن بر اساس جدول طرح

بتن قلیافعال، نمونه‌های بتن پس از خروج از کوره، تا زمان 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، مطابق با ضوابط 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 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. در سایر تحقیقات نیز، انجام فرایند دمایی تحت حرارت بالا بر روی بتن‌های قلیافعال، به شکل مشابه گزارش گردیده است [Kong, and Sanjayan, 2010]. شکل ۱ تصاویر برخی از مراحل ساخت بتن را به نمایش درآمده است.

در پایان ترکیب مصالح، مخلوط بتن در قالب‌های فلزی روغن کاری 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 انجام آزمون نگهداری و عمل‌آوری 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 [Ehsani, et al. 2017]. در پایان زمان عمل‌آوری حرارتی

جدول ۸ مشخصات طرح اختلاط بتن و مصالح مصرفی (کیلوگرم بر مترمکعب)

طرح و نوع بتن	سیمان	آب	مخلوط قلیافعال	سرباره	شن	ماسه	ابروان کننده	عمل‌آوری
OC پرتلند	۴۵۰	۲۰۲/۵	۰	۰	۱۰۰۰	۷۶۱/۱۳	۶/۷۵	آب
GC قلیافعال	۰	۰	۲۰۲/۵	۴۵۰	۱۰۰۰	۸۱۶/۱۰	۶/۷۵	خشک



شکل ۱. مراحل ساخت بتن

۲-۳- روش‌های آزمایش و استانداردها

آزمون تعیین سرعت عبور امواج فراصوت (UPV) در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در دمای محیط و تحت حرارت بالا (۵۰۰ درجه سلسیوس)، براساس استاندارد ASTM C597 بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر با دستگاه از نوع داندیت^۲ با فرکانس لرزشی ۵۵ کیلوهرتز و دقت زمان فاصله حرکت پالس ۰/۱٪ و ± 0.2 ٪، انجام گرفت. در این راستا در نمونه‌ها، ابعاد سطحی که در تماس با کف قالب قرار داشتند توسط کولیس اندازه‌گیری شد، سپس اتصال آکوستیک^۳ 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 موج از نمونه بتنی، با استفاده از روابط موجود در استاندارد ذکر شده، سرعت موج اولتراسونیک بر حسب متر بر ثانیه به دست آمد.

آنالیز نتایج طیف سنجی پراش اشعه ایکس (XRD) در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در دمای محیط و تحت حرارت بالا، توسط 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 شد و طی انجام آزمون، نمودار پراش کریستال‌های بتن تهیه گردید. 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.

آنالیز نتایج تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در دمای محیط 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.

۳- نتایج آزمایشگاهی و تفسیر نتایج

۳-۱- نتایج آزمون UPV

نتایج حاصل از آزمون تعیین سرعت عبور موج اولتراسونیک (UPV) بتن تحت دمای محیط (۲۰ درجه) و حرارت بالا (۵۰۰ درجه سلسیوس)، در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در نمودار شکل ۲ نشان داده شده است. رده‌بندی میزان کیفیت بتن در نمودار شکل ۲ براساس استاندارد IS 13311-1 انجام پذیرفته

است. در این راستا مشاهده می‌گردد که نمونه‌های بتن معمولی با سرعت ۵۹۳۰ متر بر ثانیه و نمونه‌های بتن قلیافعال با سرعت ۴۹۲۰ متر بر ثانیه در رده عالی از نمودار قرار گرفته‌اند. در این خصوص تحقیقات نشان داده است، تا زمانی که مقدار سرعت پالس اولتراسونیک در دسته عالی قرار بگیرد به این معنی است که بتن مورد نظر دارای ترک‌ها و یا حفره‌های بزرگی که بر تمامیت ساختار نمونه تاثیرگذار نیست [Kwan, et al. 2012]. این مزیت موجب می‌گردد تا بتن روسازی در مقابل بارهای وارده حاصل از ترافیک سنگین، مقاومت بالایی را از خود نشان دهد و منجر به افزایش عمر مفید سازه راه گردد.

اعمال حرارت به نمونه‌های بتنی موجب افت سرعت عبور امواج اولتراسونیک گردیده است، به طوری که در بتن معمولی، مقدار UPV به میزان ۳۷۲۰ متر بر ثانیه رسید که افت ۲۶/۳۷ درصدی را دارا بود و این بتن در محدوده رده‌بندی کیفیت بد (Bad) از نمودار قرار گرفت، اما در بتن قلیافعال میزان UPV به رقم ۲۶۶۰ متر بر ثانیه رسید و نسبت به سرعت در دمای محیط افت ۹۳/۴۵ درصدی را کسب نمود و در محدوده رده بندی کیفیت خوب (Good) از نمودار قرار گرفت. دلیل افت کمتر میزان UPV در نمونه بتن قلیافعال نسبت به نمونه بتن معمولی تحت حرارت بالا، عملکرد خوب و پوزولانی سرباره کوره آهنگدازی در ترکیب بتن قلیافعال می‌باشد که توانسته است ضمن تسریع در فرایند ژئوسپارش، حجم بالایی (با توجه به تصاویر SEM) از ژل‌های هیدراته شده را در مقایسه با بتن معمولی، در ترکیب بتن تولید نماید. ژل‌های هیدراته شده با پر کردن حفرات و منافذ بین لایه‌ای و نواحی انتقال بین سطحی (ITZ)، از افت بیشتر UPV نمونه‌های بتنی در حرارت بالا جلوگیری کرده است. به طور کلی، 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 [Comrie, and Kriven, 2004. Mane, and Jadhav, 2012. Bakharev. 2006].

نکته حائز اهمیت در نتایج آزمون UPV این است که سرعت عبور موج اولتراسونیک در نمونه‌های بتن قلیافعال کمتر از نمونه‌های بتن معمولی در هر یک از دماهای محیط و تحت حرارت بالا است. این امر بیشتر به دلیل وجود ریزترک‌های ایجاد شده در بخش ماتریس بتن می‌باشد که طی فرایند عمل‌آوری حرارتی (۶۰ درجه سلسیوس) در بتن قلیافعال ایجاد گردیده است. در این راستا تحقیقات نشان داده است که در بتن قلیافعال

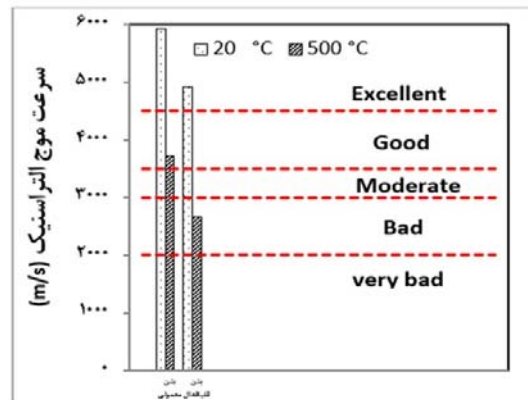
۲-۳- آنالیز نتایج XRD

آنالیز نتایج حاصل از طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس (XRD) در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه تحت دمای محیط (اتاق) در شکل ۳ و تحت دمای بالا (۵۰۰ درجه سانتی‌گراد)، در شکل ۴ به نمایش درآمده است. در دمای محیط (۲۰ الی 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 ۲θ به ترتیب در محدوده‌های ۵۹، ۲۴، ۲۹، ۲۶ و ۲۵ درجه برای عناصر مشخص شده اتفاق افتاده است. در این راستا عناصر آلومینیوم فسفات (AlPO₄) و بعد از آن کلسیم کربنات (کلسیت) با فرمول مولکولی (CaC₆O₁₈) و کلسیم منگنز کربنات (دولومیت) با فرمول شیمیایی (Ca₇Mg₅C₁₂O₃₆) بیشترین پراکندگی را دارند، در حالیکه 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 ۲θ به ترتیب در محدوده‌های ۲۹، ۲۶، ۳۹ درجه برای عناصر اتفاق افتاده است. در این راستا عناصری مانند سدیم آلومینیوم سیلیکات (NaAlSi₃O₈)، کوارتز (SiO₂) به دلیل وجود آنها در ترکیب سربراره کوره آهنگدازی، دارای بیشترین پراکندگی هستند. وجود قله‌ها با ارتفاع بیشتر در طیف بتن قلیافعال و کاهش قله‌های ناشی از حضور هیدرواکسیدکلسیم در این طیف، حاکی از فعالیت پوزولانی بالای سربراره کوره آهنگدازی در ترکیب بتن قلیافعال است. این ژل‌ها از طریق پر کردن فضاهای مویینه بین‌لایه‌ای در نواحی ITZ، موجب بهبود خواص مکانیکی از جمله سرعت عبور پالس اولتراسونیک (UPV)، در بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی گردیده است. در این راستا گزارش شده که قله قوی در نواحی مختلف به‌عنوان قله مشخص و اثر انگشت بتن قلیافعال (بر پایه سربراره) شناخته می‌شود [Phair, and van, 2002]. بر اساس تصاویر SEM و آنالیز نتایج حاصل از پراش اشعه ایکس (XRD)، اعمال حرارت بالا (۵۰۰ درجه سلسیوس)، موجب بروز اثرات مخربی در ترکیب و پیوند شیمیایی بخش ریزساختار بتن معمولی و بتن قلیافعال گردیده است. در دمای بالا، ژل CH دیگر تبدیل به کلسیم کربنات‌های

به دلیل عمل‌آوری در محیط خشک اون یک سری ترک‌های ریز در بتن تشکیل می‌شود که باعث می‌گردد بتن از یکپارچگی کامل که باعث انتقال امواج اولتراسونیک با سرعت بالاتر می‌باشد خارج شود و این امر موجب می‌گردد تا اندکی از سرعت‌های به دست آمده از مقادیر قابل پیش‌بینی کمتر باشد، البته گزارش شده است که وجود این ترک‌ها در ابعاد بسیار ریز بوده و تنها بر سرعت امواج اولتراسونیک تاثیر می‌گذارد و تاثیر چندانی بر سایر خواص مکانیکی در نمونه‌ها نخواهد گذاشت [Kwan, et al. 2012].

تامین مقاومت رویه بتنی در روسازی راه‌ها به دلیل تحمل بارهای سنگین ترافیکی از اهمیت بالایی برخوردار است، مقاومت این بخش از روسازی راه‌ها با انتخاب و ساخت بتن مناسب قابل تامین است. وجود ترک‌ها و ریزترک‌ها و تخلخل بالا در بتن این بخش از راه‌ها می‌تواند ضمن کاهش ضلبيت سازه، خسارات جبران‌ناپذیری به سازه راه‌ها وارد کند.

آزمون غیرمخرب تعیین سرعت عبور پالس اولتراسونیک (UPV) یکی از راه‌های تخمین تعیین میزان تراکم و حجم ترک‌ها و ریزترک‌های موجود در بتن می‌باشد. با توجه به نتایج این بخش (حاصل از آزمون UPV) از مقاله پیش‌رو، بتن قلیافعال به دلیل داشتن ساختاری متراکم تر نسبت به بتن معمولی، در مصرف روسازی بتنی راه‌ها مناسب‌تر است. اعمال حرارت بالا در بتن روسازی به هنگام آتش سوزی می‌تواند منجر به تخریب کامل ساختار بتن گردد، این امر ضمن کاهش و یا از دست دادن کامل مقاومت بتن، منجر به بالا بردن هزینه‌های تعمیر و نگهداری راه‌ها و در مواقع آسیب دیدن کمتر به ساختار بتن، در دراز مدت با قله کن شدن بتن در سطح زیاد منجر به بروز حوادث و تصادفات جاده‌ای می‌گردد.

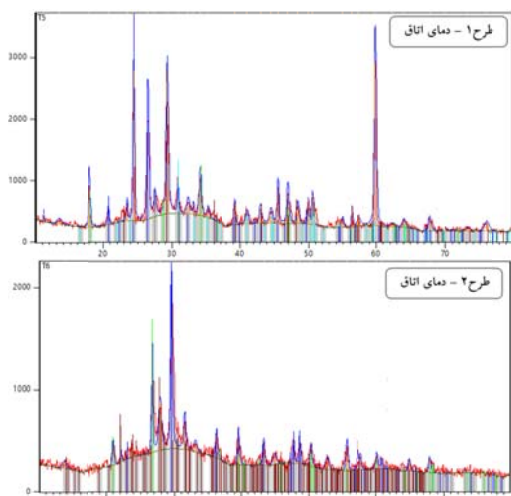


شکل ۲. نتایج آزمایش UPV

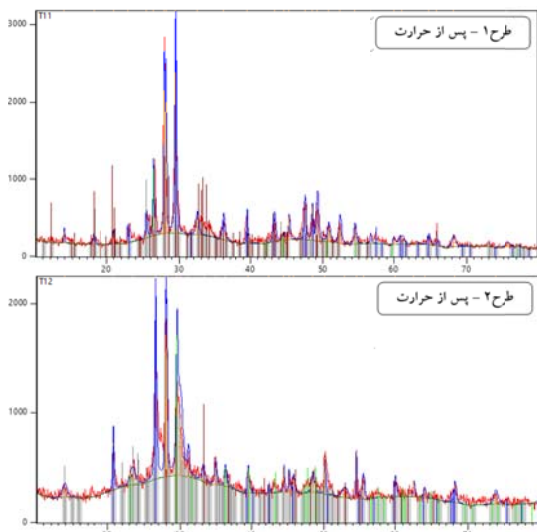
حاوی ژل‌های هیدراته که در تصاویر SEM عمدتاً به رنگ تیره هستند، است.

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

- فاز سوم شامل نحوه پیوندهای خمیر سیمان با سنگدانه در ناحیه انتقال بین سطحی (ITZ)^۱ تشکیل شده است.



شکل ۳. نتایج XRD در دمای اتاق



شکل ۴. نتایج XRD پس از حرارت

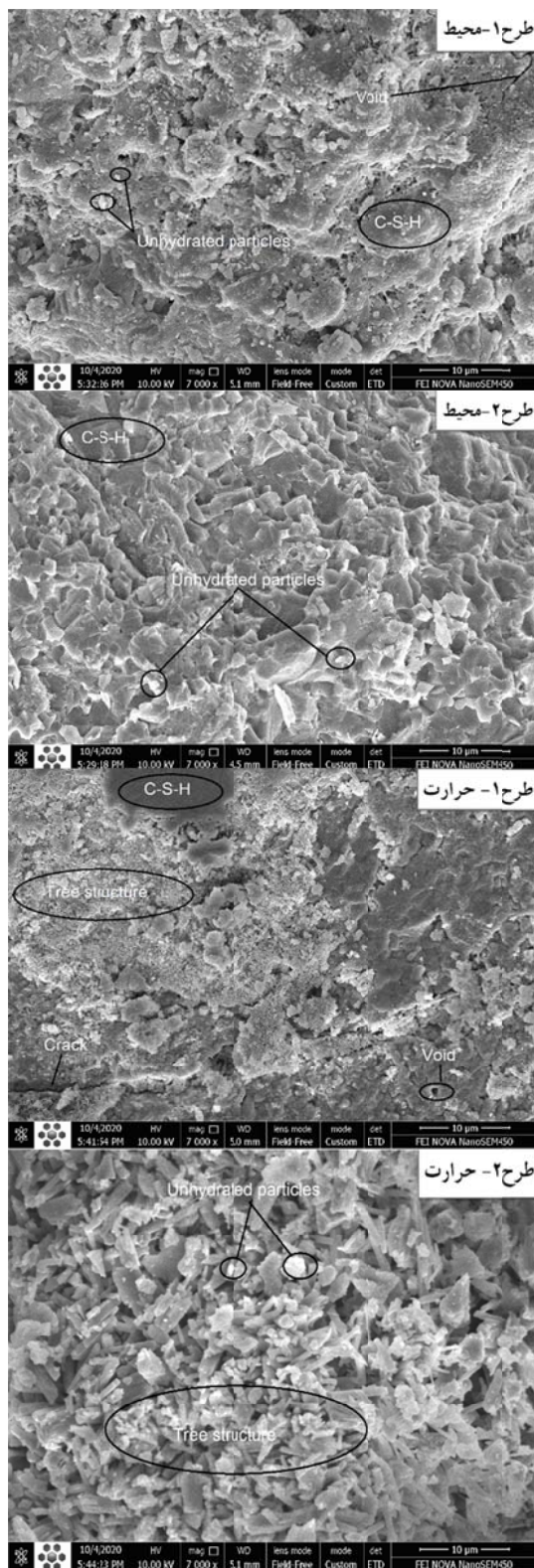
مانند Calcite نمی‌شود، در واقع این ژل به Carbon و C-A تبدیل شده است و این موضوع، علت اصلی ضعف بتن در دمای بالا می‌باشد [Rashad, 2019. P. Duan and et al, 2013]. بر این اساس، در سایر تحقیقات انجام گرفته در حوزه بتن قلیافعال، در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، فازهای کریستالی و شبه‌بلوری کرنات کلسیم، اکسید سیلیکون، پیروکسن، فسفات آلومینیوم و کلسیت مشاهده می‌گردد. علاوه بر این، در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس، اکسید سیلیکون، سیلیکات کرنات آلومینیوم کلسیم سدیم مشاهده شده است [Rashad, 2019. Mustakim and et al, 2020. Their and Özakça, 2018]. در این راستا در بتن معمولی، چهار پیک بیشینه با مقادیر اوج قله ۱۰۰، ۸۹/۱۵، ۸۱/۸۷ و ۳۴/۷۴ درصد در زوایای ۲۰، ۲۶، ۲۷، ۲۹ درجه در محدوده‌های ۲۸، ۲۶ و ۲۸ 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 ۲۰، ۲۶، ۲۸ و ۲۹ درجه در محدوده‌های ۲۸، ۲۶ و ۲۸ درجه برای عناصر اتفاق افتاده است.

۳-۴- آنالیز نتایج SEM

آنالیز نتایج حاصل از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در مقیاس ۱۰ میکرومتر، تحت دمای محیط و حرارت (۵۰۰ درجه سلسیوس)، در شکل ۵ به‌نمایش درآمده است.

نتایج به‌دست آمده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی می‌تواند کمک شایانی در تشخیص ساختار و رفتار بتن نماید و خصوصیات مکانیکی و فیزیکی ماتریس بتن به‌شدت به ریزساختار آن بستگی دارد. با توجه به تصاویر اخذ شده از SEM مشاهده می‌گردد که ریزساختار بتن در هر دو طرح اختلاط، از سه فاز اساسی مجزا و متفاوت به‌شرح ذیل تشکیل شده است:

- فاز اول شامل محصولات حاصل از فرایند شیمیایی هیدراتاسیون^۴ (بسپارش) و ژئوپلیمریزاسیون^۵ (ژئوسپارش)



شکل ۵. ریزساختار بتن در دمای اتاق

در تصاویر بتن معمولی تحت دمای محیط، وجود حفرات و منافذ مویینه را می‌توان اغلب نتیجه تبخیر آب از فضاهای مویینه بین‌لایه‌ای در ژل سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) موسوم به ژل توپر موریت دانست که به ایجاد ترک و پدیده جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن کمک می‌کند. آب موجود درون فضاهای کوچک بین‌لایه‌ای در ژل سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) می‌تواند توسط پیوند هیدروژنی نگه داشته شود و خروج آن تحت شرایط خاص می‌تواند موجب بروز پدیده جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن و خزش در خمیر سیمان گردد.

در تصاویر بتن قلیافعال، هیچگونه ساختار درختی که نشان از ضعف در ریزساختار نمونه باشد مشاهده نمی‌گردد. وجود نواحی تیره رنگ در تصاویر نشان از تکمیل فرایند ژئوبسیارش و تولید ژل‌های هیدراته است. توده‌های سفید رنگ موجود در تصاویر SEM در این طرح را می‌توان به کریستال‌های فعالساز قلیایی که در فرایند شیمیایی ژئوپلیمریزاسیون مشارکت نکرده‌اند نسبت داد و نقاط بسیار ریز موجود در ریزساختار بتن قلیافعال را می‌توان به ذرات هیدراته نشده سربراه نسبت داد. ریزترک‌های موجود در تصویر را می‌توان به دلیل عمل‌آوری حرارتی تحت دمای ۶۰ درجه سلسیوس در بتن قلیافعال دانست.

حرارت بالا در بتن موجب تغییرات اساسی در ریزساختار بتن و ماتریس خمیر سیمان پُرتلند و خمیر سیمان قلیافعال شده است. تأثیرات 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.

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 [R. Siddique, and D. Kaur, 2012]. براساس تصاویر بتن معمولی تحت حرارت بالا، مشاهده می‌گردد که ریزساختار بتن تحت تأثیر فراوان قرار گرفته است و به‌لحاظ ساختاری تضعیف گردیده. با توجه به تصاویر، ایجاد ساختار درختی، وجود منافذ مویینه متعدد ناشی از تبخیر آب بین فضاهای مویینه در ژل سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) و کاهش میزان ژل هیدراته C-S-H (نواحی تیره رنگ) مشهود است که مبین ضعف در ریزساختار بتن معمولی پس از اعمال حرارت بالا است. حرارت دادن نمونه بتن قلیافعال موجب خروج آب از فضاهای مویینه بین‌لایه‌ای در ساختار ژل‌های هیدراته گردیده و سبب بروز حفرات، منافذ متعدد بزرگ در نمونه شده است. افزایش سطوح شکست در نمونه و کاهش سطوح ژل‌های هیدراته (نواحی با رنگ تیره) از عوارض حرارت دادن نمونه بتنی در این طرح است.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق آزمایشگاهی، مقایسه میزان UPV در بتن قلیافعال و بتن معمولی براساس آنالیز نتایج حاصل از XRD و SEM در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در دمای محیط و تحت حرارت بالا (۵۰۰ درجه سلسیوس) انجام گرفت. اهم نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر است.

UPV در دمای محیط، برای بتن معمولی به مقدار ۵۹۳۰ متر بر ثانیه و برای بتن قلیافعال به مقدار ۴۹۲۰ متر بر ثانیه کسب گردید که اختلاف ۱۷/۰۳ درصدی را دارا است. کاهش سرعت موج اولتراسونیک در بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی بیشتر به دلیل وجود ریزترک‌های موجود در بتن قلیافعال در حین فرایند عمل‌آوری حرارتی تحت دمای ۶۰ درجه سلسیوس است. اعمال حرارت بالا در نمونه بتنی موجب تضعیف ریزساختار ماتریس بتن معمولی و بتن قلیافعال و افت نتایج حاصل از آزمون UPV به ترتیب به میزان ۳۷/۲۶ و ۴۵/۹۳ درصد گردید.

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

آنالیز حاصل از نتایج SEM، نشان از افزایش حجم ژل‌های هیدراته و بهبود تراکم در ریزساختار نمونه‌های بتن قلیافعال با حضور سرباره کوره آهنگدازی در ترکیب بتن است. اعمال حرارت بالا در نمونه‌های بتنی، ساختار بتن را از حالت متراکم خارج کرده و به صورت ساختار درختی و غیرهمگن تبدیل نموده است.

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

۵- پی‌نوشت‌ها

1. Pavement condition index
2. DUNDIT MODEL PC1012
3. Acoustic
4. Hydrolysis
5. Polymerization
6. Interfacial transition zone (ITZ)

۶- مراجع

- Adresi, M., hasani, A., soleimani, M., yazdian, A. (2016). Investigation of carbon nanotube and energy levels effects on Self-Sensing Concrete Sensor Performance in Dynamic Loading Pattern. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 2(3), 17-34. doi: 10.22075/jtie.2016.509
- A. M. Rashad (2019). The effect of polypropylene, polyvinyl-alcohol, carbon and glass fibres on geopolymers properties. *Materials Science and Technology*, vol. 35, no. 2, 127-146.
- Amouzadeh Omrani, M., Hasirchian, M. (2020). Assessing the Effect of Steel Slag and Reclaimed Asphalt Pavement on Mechanical Properties and Pollution of Roller Compacted Concrete Pavement. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 6(2), 87-108. doi: 10.22075/jtie.2020.19754.1444
- Allahverdi, A. L. I., Ebrahim Najafi Kani, and Mahshad Yazdanipour (2011). Effects of blast-furnace slag on natural pozzolan-based geopolymer cement. *Ceramics-Silikáty*, 55.1, 68-78.
- Babagoli, R. (2021). A Pavement Management System Model for Rural Roads in Mazandaran Province. *Journal of Transportation Research*, 18(4), 267-281. doi: 10.22034/tri.2021.142129
- Bakhtiyari, S., et al., (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.
- Bakharev, T., (2006). Thermal behaviour of geopolymers prepared using class F fly ash and elevated temperature curing. *Cement and concrete Research*, 36(6), 1134-1147.
- Bazdar Ardebili, P., Pejmanzad, P., Shamsaie, S. (2021). Investigating the role of regional and international markets in attracting road transport in Iran. *Journal of Transportation Research*, 18(4), 13-24. doi: 10.22034/tri.2021.273317.2871
- Bentz, D.P., (2000). Fibers, percolation, and spalling of high-performance concrete. *Materials Journal*, 97(3), 351-359.
- Choubdar, A., Farajollahi, A., Ameli, A. (2021). Roller Compacted Concrete with Recycled Concrete Aggregate for the Base of Pavement. *Journal of Transportation Research*, 18(4), 255-266. doi: 10.22034/tri.2021.142125
- Comrie, D.C. and W.M. Kriven. (2004). Composite cold ceramic geopolymer in a refractory application.

- Mustakim, S.M., et al., (2020). Improvement in fresh, mechanical and microstructural properties of fly ash-blast furnace slag based geopolymer concrete by addition of nano and micro silica. *Silicon*, 1-14.
- 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.
- Nuaklong, P., V. Sata, and P. Chindaprasirt, (2016). Influence of recycled aggregate on fly ash geopolymer concrete properties. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2300-2307.
- Parvar, M., Hassanvand, D., Khorsand, M., Tarahomi, F. (2021). Investigation and Analysis of the Role of Maritime Transport Sector on Economic Growth of Khuzestan Province. *Journal of Transportation Research*, 18(4), 85-98. doi: 10.22034/tri.2021.111710
- P. Duan, Z. Shui, W. Chen and C. Shen (2013). 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, 52-59.
- R. Siddique and D. Kaur (2012). Properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag (GGBFS) at elevated temperatures. *Journal of Advanced Research*, Vol. 3, No. 1, 45-51.
- Sun, M., Liew, R. J. Y., Zhang, M. H. and Li, W. (2014). Development of cement-based strain sensor for health monitoring of ultra-high strength concrete. *Constr. Build. Mater.*, 65: 630-637.
- Singh, B., et al., (2015). Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Construction and building materials*, 85, 78-90.
- Their, J.M. and M. Özakça, (2018). Developing geopolymer concrete by using cold-bonded fly ash aggregate, nano-silica, and steel fiber. *Construction and Building Materials*, 180, 12-22.
- V. Václavík, V. Dirner, T. Dvorský and J. Daxner (2012). The use of blast furnace slag. *Metallurgija*, Vol. 51, No. 4, 461-464.
- Zhuang, X.Y., et al., (2016). Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications. *Journal of Cleaner Production*, 125, 253-267.
- Zhang, B. and N. Bicanic (2002). Residual fracture toughness of normal-and high-strength gravel concrete after heating to 600 C. *Materials Journal*, 99(3), 217-226.
- in Advances in Ceramic Matrix Composites IX*, Proceedings.
- 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.
- Du, H., S. Du, and X. Liu, (2014). Durability performances of concrete with nano-silica. *Construction and building materials*, 73, 705-712.
- Ehsani, A., Nili, M., & Shaabani, K. (2017). 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), -1865.
- ferdosi shahandashti, A., Keymanesh, M., moghadassnejad, F., Izadi, A. (2021). Fatigue Response of Half-Warm Asphalt Concrete Pavement Containing Silica and Calcareous Aggregates Modified with the Addition of Organosilane Nanomaterial by Wasted Energy Method. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 7(1), 81-99. doi: 10.22075/jtie.2020.21538.1486
- J. W. Phair and J. S. van Deventer (2002). Effect of the silicate activator pH on the microstructural characteristics of waste-based geopolymers. *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 66, No. 1-4, 121-143.
- Kong, D.L. and J.G. Sanjayan, (2010). Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete. *Cement and concrete research*. 40(2), 334-339.
- 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.
- Mane, S. and H. Jadhav, (2012). Investigation of geopolymer mortar and concrete under high temperature. *Magnesium*, 1(5).
- M. Hashimoto, N. Sakata, E. Sakai, T. Yonezawa, D. Hayashi and T. Muroi (2016). Study on Concrete for Civil Engineering Structures Using High Volume Blast Furnace Slag Cement," *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 14, No. 4, 163-171.

Comparison of Ultrasonic Pulse Passage Velocity, in High-Strength Concrete and Ordinary Concrete, Under High Temperature Based on XRD and SEM Analyses, for Use in Pavement

Mohammadhossein Mansourghanaei, Ph.D., Grad., Department of Civil Engineering, Chalous Branch, Islamic Azad University, Chalous, Iran.

Morteza Biklaryan, Department of Civil Engineering, Chalous Branch, Islamic Azad University, Chalous, Iran.

Alireza Mardokhpour, Department of Civil Engineering, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran.

E-mail: M.Biklaryan@iauc.ac.ir

Received: February 2024- Accepted: June 2024

ABSTRACT

One of the disadvantages of using conventional concrete in road paving is its low resistance to traffic loads. But today, scientists have been able to improve the strength of concrete by using new materials such as slag in the composition of concrete. These materials contain adhesives and fillers such as aluminate and silicate, which ensure the improvement of strength in concrete after the process of chemical reaction with alkaline solutions. The purpose of this laboratory research is to make concrete with higher strength than ordinary concrete used in road pavement. In this regard, a mixing plan was made of ordinary concrete with a cement grade of 450 kg/m³. A mixing design was also made of fermented concrete based on composite kiln slag to compare and evaluate the ultrasonic pulse (UPV) rate of concrete under ambient temperature and temperature of 500 °C, at a 90-day curing age. Continuation of X-ray diffraction (XRD) spectroscopy and scanning electron microscopy (SEM) imaging tests to further evaluate and verify the UPV test results at 90 days of processing at ambient temperature and 500 °C on the sample Concrete works were carried out. Based on the results, the amount of UPV at ambient temperature was 5930 m/s for ordinary concrete and 4920 m/s for alkaline concrete, which had a difference of 17.03%. By applying heat to concrete samples, the rate of UPV drop in ordinary concrete was 37.26% and in quilted concrete was 45.93%. The results of XRD and SEM tests were in agreement with each other and overlapped with the results of UPV test.

Keywords: Active Alkali Concrete, Blast Furnace Slag, Ultrasonic Wave Passage Velocity (UPV), X-Ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscopy (SEM)