

## مقایسه مدول الاستیسیته بتن قلیافعال روسازی و بتن معمولی تحت دمای بالا براساس آزمون‌های XRD و SEM

محمدحسین منصورقنای\*، دکتری تخصصی عمران سازه، گروه مهندسی عمران، واحد چالوس،

دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران

مرتضی بیک‌لریان، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد چالوس، چالوس، ایران

Email: Mhm.Ghanaei@iauc.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۰۱ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۶

### چکیده

در دهه‌های اخیر، به کارگیری مصالح قلیایی در بتن به دلیل خواص پوزولانی و وجود مواد آلومینوسیلیکاتی با خواص پرکنندگی و چسبندگی زیاد، چشم‌انداز گسترده‌ای در صنعت بتن پیدا کرده است. به کارگیری این نوع بتن (با توجه به مزایای برتر نسبت به بتن معمولی) در روسازی راه‌ها می‌تواند موجب بهبود استحکام و افزایش عمر مفید راه‌ها گردد. در این پژوهش آزمایشگاهی، یک نسبت مخلوط از بتن معمولی با عیار سیمان ۴۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب ساخته شد. یک نسبت مخلوط نیز از بتن قلیافعال بر پایه سرباره کوره‌آهنگدازی ساخته شد تا میزان مدول الاستیسیته بتن تحت دمای محیط و دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس، در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه مورد مقایسه و ارزیابی قرار گیرد. در ادامه، طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس (XRD) و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) به منظور بررسی بیشتر و راستی آزمایشی نتایج حاصل از آزمون مدول الاستیسیته، در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در دمای محیط و تحت دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس روی نمونه‌های بتنی انجام گرفت. مدول الاستیسیته در دمای محیط، برای بتن معمولی به مقدار ۳۲ گیگاپاسکال و برای بتن قلیافعال به مقدار ۳۵ گیگاپاسکال به دست آمد که اختلاف ۸ درصدی داشتند. با اعمال حرارت بالا به نمونه‌های بتنی، میزان افت مدول الاستیسیته در بتن معمولی به مقدار ۵۹ درصد و در بتن قلیافعال به میزان ۴۲ درصد رسید. نتایج XRD و SEM ضمن هماهنگی با یکدیگر، در همپوشانی با نتایج حاصل از آزمون مدول الاستیسیته قرار گرفتند.

واژه‌های کلیدی: سرباره کوره‌آهنگدازی، مدول الاستیسیته بتن، طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس، میکروسکوپ الکترونی روبشی.

## ۱. مقدمه

اغلب روسازی‌های بتنی در راه‌ها از بتن معمولی ساخته می‌شوند. اما با افزایش بار ترافیکی و توسعه شبکه حمل‌ونقل، نیاز به بتن مقاوم‌تر (از بتن معمولی) احساس گردید. از طرفی، تحقیقات نشان می‌دهد که کارخانه‌های تولیدکننده سیمان مسئول انتشار حدود ۵ درصد از کل گاز سمی دی‌اکسیدکربن ( $CO_2$ ) وارد شده به جو کره زمین می‌باشند (نصرتی و همکاران، ۲۰۱۸). در این راستا، بررسی‌ها نشان می‌دهد که به‌منظور کاهش تولید و انتشار گاز سمی دی‌اکسیدکربن ناشی از تولید سیمان، جایگزینی مقدار زیادی از سرباره کوره‌آهنگدازی با سیمان در ترکیب بتن، مناسب است (هاشیموتو و همکاران، ۲۰۱۶). همچنین تحقیقات نشان داده است که بتن‌های ژئوپلیمری (قلیافعال) مبتنی بر سرباره کوره‌آهنگدازی دارای خواص مکانیکی و ریزساختاری برتری در مقایسه با بتن‌های معمولی هستند (منصورقناعی و همکاران، ۲۰۲۱). منصورقناعی و همکاران، ۲۰۲۲). از طرفی، به ازای تولید هر تن فولاد، ۳۰۰ کیلوگرم تا یک تن سرباره کوره‌آهنگدازی حاصل می‌گردد که اهمیت به‌کارگیری این فرآورده ثانویه در صنایع مختلف مشخص می‌شود. تحقیقات نشان داده است که بتن‌های حاوی سرباره کوره‌آهنگدازی دارای مقاومت بیشتری در برابر حمله سولفات‌ها هستند (پراکاسام و همکاران، ۲۰۱۶). سرباره کوره‌آهنگدازی سرشار از مواد آلومینوسیلیکاتی با ویژگی چسبانندگی و پرکنندگی در واکنش با محلول‌های قلیافعال در ترکیب بتن است. شبکه آلومینوسیلیکات از  $SiO_4$  و  $AlO_4$  تشکیل شده است؛ واحدهای ساختاری چهاروجهی که می‌توانند با یکدیگر متصل شوند و اتم‌های اکسیژن خود را به اشتراک بگذارند (الله‌وردی و همکاران، ۲۰۱۱). جایگزینی کل سیمان با سرباره کوره‌آهنگدازی منجر به تولید بتن قلیافعال می‌گردد. ساختار ژئوپلیمری (قلیافعال) در ابتدا توسط دیویدویتس (۱۹۸۸) مطرح شد. تحقیقات نشان داده است که جایگزینی سیمان

با سرباره کوره‌آهنگدازی، آلودگی محیط‌زیستی را کاهش می‌دهد، خواص مکانیکی بتن را بهبود می‌بخشد و نیاز قابل توجه به سیمان را کاهش می‌دهد (ریو و همکاران، ۲۰۱۳؛ مهدی‌پور و همکاران، ۲۰۲۰). میزان دی-اکسیدکربن تولید شده در فرایند ژئوپلیمری بسیار کمتر از فرایند تولید سیمان است (نئوپین و همکاران، ۲۰۱۸). بتن‌های قلیافعال شامل یک خانواده از مواد مبتنی بر آلومینوسیلیکات‌های مصنوعی به‌دست آمده از پلیمریزاسیون هیدروترمال در یک محیط بسیار قلیایی هستند (دیویدویتس، ۱۹۹۴؛ وانگ و همکاران، ۲۰۰۵). در خمیر سیمان پرتلند، ژل سیلیکات کلسیم هیدراته C-S-H از گروه‌های سیلیکونی، اما ژل‌های هیدراته شده در بتن قلیافعال از مواد با پلیمریزاسیون زیاد و ساختار آلومینوسیلیکات تشکیل شده است (دو و همکاران، ۲۰۱۴). حضور پوزولان‌هایی نظیر سرباره کوره‌آهنگدازی در ترکیب بتن قلیافعال ضمن تسریع فرایند ژئوسپارش، حجم زیادی از ژل‌های هیدراته نظیر C-S-H را تولید می‌کنند. این ژل‌ها عامل اصلی ایجاد استحکام و بهبود خواص مکانیکی در بتن‌های قلیافعال هستند.

صنعت بتن در راستای مقابله با مضرات ناشی از حرارت زیاد در بتن، به راه‌کارهای مفیدی دست پیدا کرده است. بهبود بخش ریزساختار بتن از طریق افزایش چگالی و تراکم، می‌تواند مقاومت بتن را در برابر حرارت، بالا ببرد. البته نوع، میزان و خصوصیات مصالح مصرفی و نحوه، شرایط و سن عمل‌آوری بتن و همچنین مدت زمان و دمای اعمال حرارت می‌تواند نقش به‌سزایی در افزایش مقاومت بتن سخت‌شده در برابر حرارت داشته باشد. در بتن‌های قلیافعال، فرایندهای تراکم و تورم سیلیکات‌های واکنش نکرده، مقاومت در برابر آتش نمونه‌های بتن قلیافعال را کاهش می‌دهد (عبدالکریم و همکاران، ۲۰۱۴). لذا، میزان مشارکت ذرات آلومینوسیلیکاتی در فرایند ژئوسپارش می‌تواند نقش مهمی در جلوگیری از تخریب بتن سخت‌شده در مواجهه

در بخش ریزساختار این نوع از بتن منجر به افزایش مقاومت در برابر بارهای ترافیکی سنگین می‌گردد. ۳- کمک به حفظ محیطزیست سالم از طریق کاهش انتشار گاز سمی  $CO_2$ ، کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و کاهش مصرف منابع معدنی به‌واسطه عدم مصرف سیمان در بتن قلیافعال.

## ۲. ساخت نمونه و برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱. مصالح مصرفی

در این تحقیق آزمایشگاهی، سرباره‌کوره‌آهنگدازی، محصول شرکت ذوب‌آهن اصفهان، تحت استاندارد ASTM C989/C989M مورد مصرف قرار گرفت. مشخصات این محصول در جداول ۱ و ۲ نشان داده شده است. سیمان مصرفی از نوع پرتلند تیپ II، محصول شرکت صنایع سیمان گیلان سبز (دیلمان)، تولید شده تحت استاندارد ISIRI 389 و دارای مشخصات جداول ۳ و ۴ است. سنگدانه‌های مصرفی محصول کارخانه‌های شن و ماسه شهرستان لاهیجان بودند که به لحاظ کمی و کیفی در محدوده استاندارد ASTM C33 قرار داشتند. سایر مشخصات سنگدانه‌ها در جدول ۵ نشان داده شده است. ابرروان‌کننده مصرفی با مشخصات جدول ۶، از نوع پلی‌کربوکسیلات نرمال، محصول شرکت دوروچم ایتالیا با نام تجاری Flowcem R700 در ترکیب بتن قلیافعال استفاده گردید. محلول قلیافعال مصرفی در ساخت بتن قلیافعال، ترکیبی از هیدروکسیدسدیم (NaOH) و سیلیکات سدیم ( $Na_2SiO_3$ ) با نسبت سیلیکات به هیدروکسید ۲/۵ و غلظت مولاریته ۱۲، چگالی ترکیبی ۱۴۸۳ کیلوگرم بر متر مکعب است. سایر مشخصات محلول قلیافعال به تفکیک هر محلول در جدول ۷ نشان داده شده است. آب مصرف شده به‌منظور تهیه آب‌آهک و ساخت طرح‌های اختلاط تحقیق پیش‌رو (در بتن کنترل و ساخت محلول قلیافعال)،

با آتش داشته باشد. برتری مقاومت در بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی در مواجهه با آتش، در سایر تحقیقات نیز گزارش شده است (کُنگ و سنجایان، ۲۰۱۰؛ ترکمن و همکاران، ۲۰۱۳؛ دب و همکاران، ۲۰۱۵؛ اصلانی، ۲۰۱۶).

در سال‌های اخیر، به دلیل هزینه‌های زیاد روسازی راه‌ها و ملاحظات زیست‌محیطی، از زیاله و ضایعات صنعتی نظیر سرباره‌کوره‌آهنگدازی در ترکیب بتن استفاده می‌گردد (سینگ و همکاران، ۲۰۲۲؛ پاتل و همکاران، ۲۰۲۲؛ عموزاده عمرانی و حصیرچیان، ۲۰۲۰). خواص مکانیکی و دوامی بتن‌های ژئوپلیمری مصرفی در روسازی راه در تحقیقات متعددی گزارش شده است (شفابخش و محمدی جانکی، ۲۰۲۱). بتن‌های قلیافعال به لحاظ عملکرد بهتر (ریزساختاری و تراکم به‌واسطه انجام آزمون فراصوت) نسبت به بتن معمولی می‌توانند در روسازی راه‌ها مورد استفاده قرار گیرند (منصورقناعی و همکاران، ۲۰۲۲). در بررسی انجام شده روی نمونه‌های بتن قلیافعال مصرفی در روسازی راه، نتایج حاصل از آزمون مدول الاستیسیته برتری عملکرد بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی را تأیید کرد (عیسی و همکاران، ۲۰۲۲). از طرفی، با توجه به عملکرد مطلوب بتن‌های ژئوپلیمری تحت حرارت زیاد، استفاده از این نوع از بتن‌ها در روسازی راه به‌منظور بهبود حفظ ساختار بتن تحت حرارت توصیه شده است (سریویدیا و همکاران، ۲۰۲۲). نوآوری در این پژوهش آزمایشگاهی به‌واسطه تولید بتن قلیافعال به‌عنوان بتنی با عملکرد برتر در مقایسه با بتن معمولی جهت مصرف در روسازی راه‌ها، به چند مورد زیر خلاصه می‌گردد:

- ۱- خواص مکانیکی برتر بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی جهت مصرف در روسازی راه‌ها، منجر به افزایش طول عمر مفید راه‌ها می‌گردد.
- ۲- خواص ریزساختاری برتر بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی جهت مصرف در روسازی راه‌ها، با افزایش تراکم

آب شرب شهر لاهیجان بوده که دارای pH در محدوده ۶/۵ الی ۷/۵ و چگالی ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است.

جدول ۱. مشخصات شیمیایی سرباره کوره آهن‌گدازی

ماده	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	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

چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	سطح مخصوص (cm <sup>2</sup> /gr)	مدول الاستیسیته (GPa)	چگالی ظاهری (kg/m <sup>3</sup> )	اندازه ذرات (μm)	رنگ	pH
۲۷۹۰	۲۲۰۰	۱/۲	۹۶۰	۲/۱	کرم	۶-۸

جدول ۳. مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ II

L.O.I	C <sub>3</sub> A	I.R	Na <sub>2</sub> O+0.658K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Cl
Max ۱/۵	۵/۵ - ۷/۵	Max ۰/۷	Max ۰/۶	۲ - ۲/۳	Max ۱/۴۵	۴۲-۴۲	۳/۵ - ۳/۸	۴/۵ - ۴/۸	۲۲-۲۱	Max ۰/۰۰۳

جدول ۴. مشخصات فیزیکی و رئولوژیک سیمان پرتلند تیپ II

چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	سطح مخصوص (cm <sup>2</sup> /gr)	گیرش اولیه (min)	گیرش ثانویه (min)	اندازه ذرات
۲۳۵۰	۳۲۰۰-۳۰۰۰	۱۱۵ < ۱۳۰	۱۹۰ < ۲۰۵	۱۳ μm

جدول ۵. مشخصات سنگدانه‌ها

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

جدول ۶. مشخصات ابرروان‌کننده پلی کربوکسیلات نرمال

فرمول شیمیایی	حالت فیزیکی	رنگ	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	استاندارد مصرف	pH	نقطه اشتعال
پلی کربوکسیلات نرمال	مایع	قهوه‌ای	۱۱۰۰	ASTM C494	حدود ۷	ندارد

جدول ۷. مشخصات محلول قلیافعال

نوع محلول	فرمول مولکولی	رنگ	مولاریته (mol/m <sup>3</sup> )	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	مدول الاستیسته (p)	دمای ذوب (C)	جرم مولی (g/mol)	نسبت وزنی (مولار)	سیلیکات به سدیم
هیدروکسید سدیم	NaOH	سفید	۱۲	۲۱۳۰	۳/۳	۳۱۸	۳۹/۹۹	-	
سیلیکات سدیم	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	سفید	۱۲	۲۴۰۰	-	۱۰۸۸	۱۲۲/۰۶	۲/۴	

## ۲-۲. نسبت‌های مخلوط، ساخت و عمل‌آوری

### نمونه‌ها

استانداردی مجزا برای نسبت‌های مخلوط بتن قلیافعال موجود نمی‌باشد. لذا، به پیروی از سایر تحقیقات در حوزه بتن ژئوپلیمری (دب و همکاران، ۲۰۱۵)، از استاندارد نسبت‌های مخلوط بتن معمولی تحت توصیه کمیته ACI 211.1-89، برای ساخت بتن قلیافعال در این پژوهش آزمایشگاهی استفاده گردید. مشخصات نسبت-های مخلوط بتن در این تحقیق براساس مشخصات جدول ۸ تهیه و 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 دو دقیقه به طول انجامید. سپس، مصالح تراز قبیل آب، محلول قلیافعال و ابرروان‌کننده براساس نیاز هر طرح، به داخل دستگاه مخلوط‌کن در حال گردش ریخته شد و فرایند ترکیب مصالح، دو دقیقه دیگر (در مجموع چهار دقیقه) به طول انجامید. در پایان ترکیب مصالح، مخلوط بتن در قالب‌های فلزی از قبل روغن‌کاری شده ریخته شد. این فرایند برای هر قالب در سه مرحله انجام گرفت و در هر مرحله عملیات تراکم بتن و خروج هوای اضافی از ترکیب 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 بتنی معمولی در آب‌آهک تحت دمای محیط تا سن عمل‌آوری نگهداری شدند. نمونه‌های بتن قلیافعال پس از جداسازی از قالب، به منظور افزایش خواص استحکامی، به مدت ۴۸ ساعت درون کوره الکتریکی تحت دمای ۶۰ درجه سلسیوس، عمل‌آوری حرارتی شدند. در این راستا، گزارش شده است که مقاومت بتن قلیافعال با افزایش دمای عمل‌آوری افزایش می‌یابد (احسانی و همکاران، ۲۰۱۷). 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 زیاد (۵۰۰°C) که در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه انجام شد، براساس استاندارد ISO834، نمونه‌های بتنی به مدت یک ساعت در کوره تحت دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند. سپس، نمونه‌ها به مدت یک ساعت دیگر در کوره خاموش باقی ماندند تا تحت تأثیر 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 زیاد روی بتن‌های قلیافعال، به شکل مشابه گزارش شده است (کُنگ و همکاران، ۲۰۱۰).

لازم به ذکر است که در تهیه طرح مخلوط بتن در این تحقیق آزمایشگاهی، مصرف ابرروان‌کننده در محدوده ۰/۱۵ الی ۰/۰۲ وزن سیمان (یا سرباره کوره-آهنگدازی) است و وزن شن در ترکیب طرح مخلوط ثابت (۱۰۰۰ کیلوگرم در هر متر مکعب از مخلوط بتن) در نظر گرفته شده است. برای تهیه محلول قلیافعال،

سیلیکات سدیم به همراه هیدروکسید سدیم با چگالی ۱۴۸۳ کیلوگرم بر متر مکعب استفاده شد. در این راستا، نسبت مصرف سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم جهت تهیه این محلول، ۲/۵ در نظر گرفته شد و به منظور حل شدن کامل ذرات هیدروکسید سدیم و از بین رفتن گرمای حاصل از انحلال هیدروکسید سدیم، یک روز قبل (۲۴ ساعت) محلول مصرفی تهیه شد و جهت جلوگیری از کربناسیون محلول به طور نفوذناپذیر نگهداری گردید.

جدول ۸. مشخصات نسبت‌های مخلوط بتن

طرح و نوع بتن	مصالح مصرفی (kg/m <sup>3</sup> )						
	سیمان	آب	محلول قلیافعال	سرباره	شن	ماسه	ابرروان‌کننده
OC پرتلند	۴۵۰	۲۰۲/۵	۰	۰	۱۰۰۰	۷۶۱	۶/۷۵
GC قلیافعال	۰	۰	۲۰۲/۵	۴۵۰	۱۰۰۰	۸۱۶	۶/۷۵

### ۲-۳. روش‌های آزمون و استانداردها

آزمون مدول الاستیسیته در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در دمای محیط و تحت دمای زیاد (۵۰۰ °C)، براساس استاندارد STM C469 روی نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد ۱۵×۳۰ سانتی‌متر از بتن، توسط دستگاه جک بتن‌شکن انجام گرفت. در این راستا، نمونه بتنی مورد نظر داخل قاب آزمون مدول الاستیسیته بتن جانمایی گردید. سپس، نمونه بتنی از مقطع ۱۵ سانتی‌متر به طور عمود بین دو صفحه دستگاه جک بتن‌شکن قرار گرفت. در ادامه، بار اعمالی با سرعت بین ۰/۵ الی ۰/۹ کیلونیوتن بر ثانیه تا زمان تغییرشکل در نمونه، بر محور عمود آن وارد شد. تغییرشکل طولی نمونه بتنی با استفاده از گیج یا کرنش-سنج متصل به قاب اندازه‌گیری شد. طیف سنجی XRD در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در دمای محیط و تحت حرارت زیاد، توسط دستگاه طیف‌سنج پراش اشعه ایکس با مدل Philips PW1730 انجام گرفت. در این راستا، نمونه‌های خرد شده برگرفته از مرکز نمونه بتنی، داخل دستگاه قرار داده شد و طی انجام آزمون، نمودار پراش

کریستال‌های بتن تهیه گردید. داده‌های حاصل از تفوق اشعه X به صورت شدت فوتون بر حسب زاویه دکتور ۲θ است که به صورت لیستی از محل اوج و شدت آنها روی گراف‌ها آورده می‌شود. تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در سن عمل-آوری ۹۰ روزه در دمای محیط و تحت حرارت زیاد، 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 بزرگ-نمایی مورد نظر ضبط و در ادامه مورد بررسی ریزساختاری قرار گرفت.

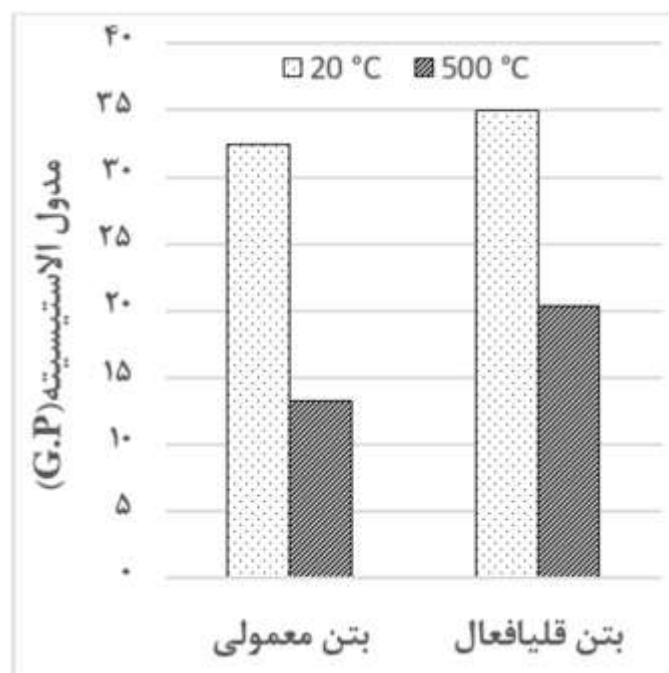
### ۳. نتایج آزمایشگاهی و تفسیر آنها

#### ۳-۱. نتایج آزمون مدول الاستیسیته

نتایج حاصل از آزمون مدول الاستیسیته بتن در سن عمل-آوری ۹۰ روزه در دمای محیط (۲۰°C) و حرارت زیاد (۵۰۰ °C)، در شکل ۱ به نمایش درآمده است. شکل ۲ نمونه بتنی در حال انجام آزمون مدول الاستیسیته را نشان

مزایا در برتری مدول الاستیسیته در بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی تحت حرارت زیاد نیز نقش به‌سزایی داشته است. اما اعمال حرارت زیاد در بتن، موجب افت نتایج حاصل از آزمون مدول الاستیسیته گردیده است. در این راستا، مدول الاستیسیته در بتن معمولی به مقدار ۱۳/۳ گیگاپاسکال رسید که افت ۵۹ درصدی را نسبت به دمای محیط به‌همراه داشته است، مدول الاستیسیته تحت حرارت زیاد در بتن قلیافعال به میزان ۲۰/۳۱ گیگاپاسکال رسید که افت ۴۱/۹۸ درصدی را نسبت به دمای محیط به‌همراه داشت. افت مدول الاستیسیته در بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی تحت اعمال حرارت زیاد، کمتر بوده است. این موضوع به‌دلیل خواص ریزساختاری و تراکم برتر بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی است. برخی از محققان گزارش داده‌اند که کاهش مقاومت (تحت اعمال حرارت زیاد) در بتن، عمدتاً به‌دلیل تجزیه هیدروکسیدکلسیم است و این پدیده معمولاً در محدوده دمایی بین ۴۵۰ تا ۵۰۰ درجه سلسیوس رخ می‌دهد (بتنر، ۲۰۰۰؛ ژانگ و بیکانیک، ۲۰۰۲).

می‌دهد. براساس نتایج، در دمای محیط، میزان مدول-الاستیسیته در بتن معمولی به مقدار ۳۲/۴۴ گیگاپاسکال و در بتن قلیافعال به مقدار ۳۹/۲۴ گیگاپاسکال به‌دست آمد که برتری ۲۰/۹۶ درصدی را در نتایج بتن قلیافعال در پی داشت. این برتری به دلیل نقش پوزولانی سرباره-کوره‌آهنگدازی در ترکیب بتن قلیافعال می‌باشد که توانسته است ضمن تسریع در فرایند ژئوسپارش، به تولید حجم بالایی از ژل‌های هیدراته شده کمک نماید، این ژل‌ها با پر کردن حفرات، منافذ و ترک‌های موجود در ساختار بتن قلیافعال موجب بهبود استحکام و افزایش مدول‌الاستیسیته در بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی گردیده‌اند. از طرفی، تحقیقات نشان داده است که سرباره‌کوره‌آهنگدازی حاوی ذرات ریزتری نسبت به سیمان پرتلند و دارای مساحت سطح ویژه‌ی بزرگ‌تر است و در نتیجه مساحت سطح واکنش آب بزرگ‌تری را به همراه دارد. علاوه بر این، سرباره‌کوره‌آهنگدازی اتصال مواد متشکله با افزودنی‌های ریز و ماسه و سطوح‌شن را نیز بهبود می‌بخشد (واکلاویک و همکاران، ۲۰۱۲). این



شکل ۱. نتایج مدول الاستیسیته



شکل ۲. نمونه بتنی در حال انجام آزمون مدول الاستیسیته

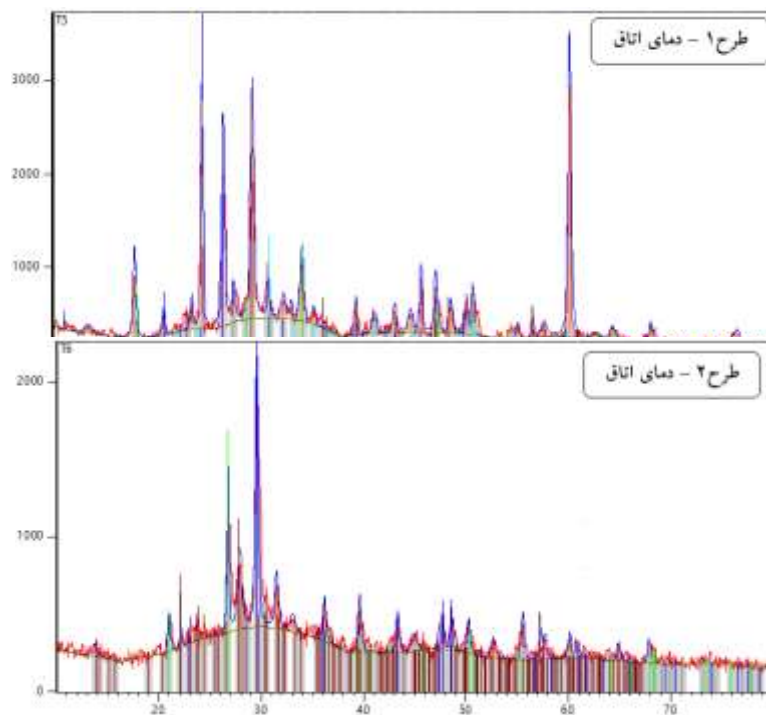
### ۳-۲. نتایج طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس

#### (XRD)

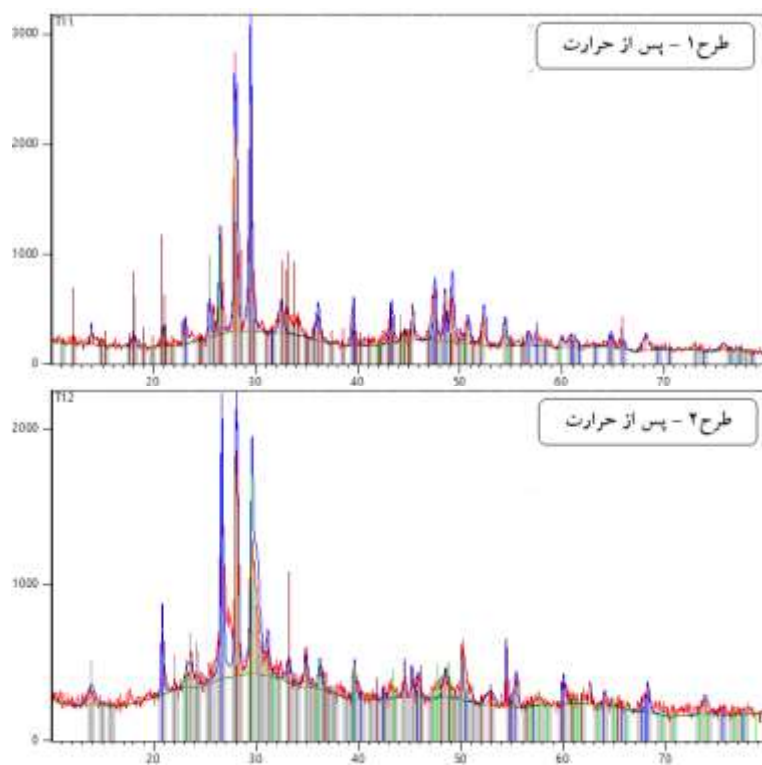
نتایج حاصل از طیف‌سنجی XRD در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه تحت دمای محیط (اتاق) در شکل ۳ و تحت دمای زیاد (۵۰۰ °C)، در شکل ۴ به نمایش درآمده است. در دمای محیط (۲۰ الی ۲۵ درجه سلسیوس) برای بتن معمولی، پنج اوج بیشینه با مقادیر اوج قله ۱۰۰، ۹۱/۸۴، ۶۷/۲۲، ۵۹/۹۴ و ۲۵/۱۴ درصد در زوایای ۲θ به ترتیب در محدوده‌های ۲۹، ۲۴، ۲۶ و ۲۵ درجه برای عناصر مشخص شده اتفاق افتاده است. در این راستا، عناصر آلومینیوم فسفات (AIPO<sub>4</sub>) و بعد از آن کلسیم کربنات (کلسیت) با فرمول مولکولی CaC<sub>6</sub>O<sub>18</sub> کلسیم‌مگنزی کربنات (دولومیت) با فرمول شیمیایی Ca<sub>7</sub>Mg<sub>5</sub>C<sub>12</sub>O<sub>36</sub> بیشترین پراکندگی را دارند. در حالی که برای بتن قلیافعال در دمای محیط، چند اوج بیشینه ۱۰۰، ۶۹/۳۵، ۲۶/۸۳، ۲۱/۸۵ و ۲۰/۸۷ درصد در زوایای ۲θ به ترتیب

در محدوده‌های ۲۹، ۲۶ و ۳۹ درجه برای عناصر اتفاق افتاده است. عناصری مانند سدیم آلومینیوم سیلیکات (NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) و کوارتز (SiO<sub>2</sub>) به علت حضور در سرباره کوره آهن‌گدازی و مشارکت در واکنش‌های پوزولانی، دارای بیشترین پراکندگی هستند. وجود قله‌هایی با ارتفاع بیشتر در طیف بتن قلیافعال نسبت به طیف بتن معمولی، نشانه‌ای از فعالیت پوزولانی مناسب سرباره کوره آهن‌گدازی در ترکیب بتن قلیافعال می‌باشد که توانسته است ضمن تسریع فرایند ژئوسپارش، مشارکت خوبی در حجم بیشتری از تولید ژل‌های هیدراته شده در فرایند شیمیایی انجام دهد. این عامل موجب بهبود خواص مکانیکی برتر از جمله مدول الاستیسیته در بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی شده است. در این راستا، گزارش شده است که قله قوی در نواحی مختلف به عنوان قله مشخص و اثر انگشت بتن قلیافعال (بر پایه سرباره-کوره آهن‌گدازی) در طیف‌های حاصل از آزمون XRD شناخته می‌شود (فیر و ون دوتتر، ۲۰۰۲).





شکل ۳. نمودار XRD نمونه‌های بتنی در دمای اتاق



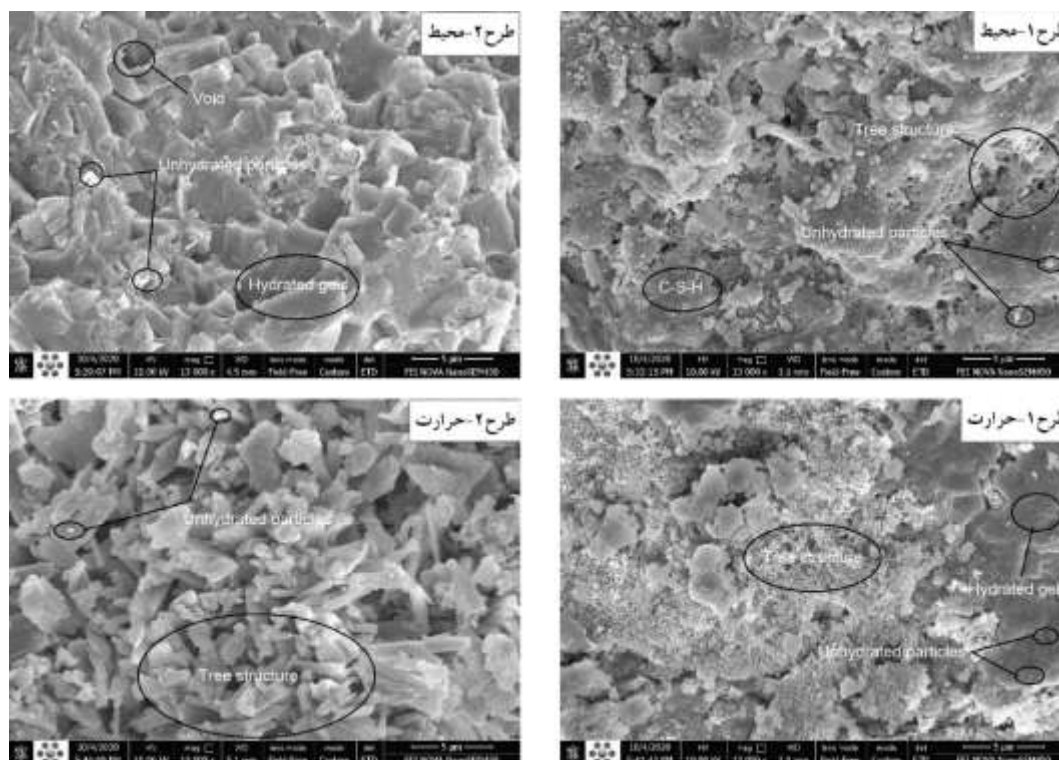
شکل ۴. نمودار XRD نمونه‌های بتنی پس از حرارت دادن

مانند کربن، دولومیت، سیلیکات آلومینیوم منگنز آهن - فسفات هیدراته و سیلیکات آلومینیوم کلسیم هیدراته دارای بیشترین پراکندگی هستند. براساس گراف Pick List بتن قلیافعال این پژوهش مشخص می‌گردد که چهار اوج بیشینه با مقادیر اوج قله‌های ۱۰۰، ۸۸/۴۹، ۸۳/۵۱ و ۶۶/۰۹ درصد در زوایای ۲θ به ترتیب در محدوده‌های ۲۶، ۲۸ و ۲۹ درجه برای عناصر اتفاق افتاده است.

### ۳-۳. نتایج حاصل از تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

نتایج حاصل از SEM در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در مقیاس ۵ میکرومتر، تحت دمای محیط و تحت حرارت زیاد (۵۰۰ °C) در شکل ۵ به نمایش درآمده است. نتایج به دست آمده از میکروسکوپ الکترونی می‌تواند کمک شایانی در تشخیص ساختار و رفتار بتن نماید. از طرفی، خصوصیات مکانیکی و فیزیکی ماتریس بتن به شدت به ریزساختار آن بستگی دارد.

براساس تصاویر SEM و نتایج حاصل از XRD، اعمال حرارت زیاد (۵۰۰ °C)، موجب بروز اثرات مخربی در ترکیب و پیوند شیمیایی بخش ریزساختار بتن معمولی و بتن قلیافعال گردیده است. بررسی‌های سایر محققین نشان می‌دهد که در دمای زیاد، ژل CH دیگر تبدیل به کلسیم کربنات‌هایی مانند کلسیت نمی‌شود. در این حالت، CH ناپدید شده و در واقع به کربن و C-A تبدیل می‌گردد که این موضوع، علت اصلی ضعف بتن در دمای زیاد است (رشاد، ۲۰۱۹). بر این اساس، در سایر تحقیقات انجام گرفته در حوزه بتن قلیافعال، در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، فازهای کریستالی و شبه بلوری کربنات کلسیم، اکسیدسیلیکون، پیروکسن، فسفات آلومینیوم و کلسیت مشاهده می‌گردد. علاوه بر این، در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس، اکسیدسیلیکون، سیلیکات کربنات آلومینیوم-کلسیم سدیم مشاهده شده است (مستکیم و همکاران، ۲۰۲۰؛ دیر و آزاچکا، ۲۰۱۸). در بتن معمولی، عناصری



شکل ۵. تصاویر SEM

موجب تغییرات اساسی در ریزساختار بتن و ماتریس خمیر سیمان پرتلند و قلیافعال شده است. تأثیرات دمای زیاد بر بتن را می‌توان به هیدراته نشدن خمیر سیمان، افزایش تخلخل، کاهش رطوبت موجود، انبساط حرارتی، تغییر فشار منافذ، کاهش مقاومت، ترک حرارتی ناشی از ناسازگاری، خزش و جداسازی حرارتی نسبت داد. تحقیقات نشان داده است که با توجه به فشار زیاد بین حفره‌ای، خروج آب از فضای پیوند شیمیایی در ژل سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) منجر به خرابی بتن در دمای بیش از ۴۵۰ درجه سلسیوس شده است (سیدیک و کائور، ۲۰۱۲).

برای تصاویر SEM حاصل از بتن معمولی تحت حرارت زیاد، ژل‌های هیدراته موجود در ریزساختار بتن قلیافعال در دمای زیاد تحت تأثیر قرار گرفته‌اند. ژل سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) از دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس شروع به تضعیف مقاومت می‌کند در حالی که ژل آلومینوسیلیکات کلسیم هیدراته (C-A-S-H) و ژل آلومینوسیلیکات سدیم هیدراته (N-A-S-H) دماهای زیادتر را نیز می‌تواند تحمل نماید. این ویژگی یکی از دلایل افزایش مقاومت بیشتر بتن‌های قلیافعال نسبت به بتن معمولی در برابر حرارت است.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق آزمایشگاهی، مقایسه میزان مدول-الاستیسیته در بتن قلیافعال و بتن معمولی براساس آنالیز نتایج XRD و SEM در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در دمای محیط (۲۰ الی ۲۵ درجه سلسیوس) و تحت حرارت زیاد انجام گرفت. اهم نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر ارائه می‌گردد.

- مدول‌الاستیسیته در دمای محیط، برای بتن معمولی به مقدار ۳۲/۴۴ گیگاپاسکال و برای بتن قلیافعال به مقدار ۳۵/۰۱ گیگاپاسکال کسب گردید که اختلاف ۷/۹۲

با توجه به تصاویر اخذ شده از SEM مشاهده می‌گردد که ریزساختار بتن در هر دو نسبت مخلوط از سه فاز اساسی مجزا و متفاوت به شرح زیر تشکیل شده است:

۱- فاز اول شامل محصولات هیدراسیون (بسپارش) و ژئوپلیمریزاسیون (ژئوبسپارش) شامل ژل‌های هیدراته که در تصاویر SEM عمدتاً به رنگ تیره هستند، است.

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

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

در تصاویر بتن معمولی تحت دمای محیط، وجود ژل هیدراته شده در نمونه موجب اتصال سطوح شکست، همگنی محصول هیدراسیون و متراکم‌تر شدن ساختار خمیر سیمان پرتلند شده است. همچنین، این ژل، با پرکردن فضای ITZ موجب تقویت در حد مرز خمیر و سنگدانه یا ناحیه چسبندگی بین سنگدانه و خمیر سیمان (ناحیه انتقال بین سطحی) گردیده است.

در تصاویر بتن قلیافعال، هیچ‌گونه ساختار درختی که نشان از ضعف در ریزساختار نمونه بتنی باشد مشاهده نمی‌گردد. وجود نواحی تیره رنگ در تصاویر نشان از تکمیل فرایند ژئوپلیمریزاسیون (ژئوبسپارش) و تولید ژل‌های هیدراته دارد. توده‌های سفید رنگ موجود در تصاویر SEM این طرح را می‌توان به کریستال‌های فعال-ساز قلیایی که در فرایند ژئوپلیمریزاسیون مشارکت نکرده‌اند نسبت داد و نقاط بسیار ریز موجود در ریزساختار بتن قلیافعال را می‌توان به ذرات هیدراته نشده سرباره‌کوره‌آهنگدازی نسبت داد. ریزترک‌های موجود در تصویر را می‌توان به دلیل عمل‌آوری حرارتی تحت دمای ۶۰ °C در بتن قلیافعال دانست. حرارت زیاد در بتن

<sup>1</sup>- Interfacial transition zone (ITZ)

بتن قلیافعال نشان از فعالیت پوزولانی مناسب سرباره- کوره آهنگدازی در ترکیب شیمیایی ساختار خمیر مخلوط قلیافعال دارد. در گراف نمونه‌های تحت حرارت زیاد، خروج برخی از عناصر به واسطه افت حرارتی (LOI)<sup>۱</sup> و کاهش ارتفاع اوج قله‌های عناصر، مشهود می‌باشد.

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

- نتایج حاصل از طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس، ضمن هماهنگی با نتایج حاصل از تصویربرداری میکروسکوپ- الکترونی روبشی، در همپوشانی با نتایج حاصل از آزمون مدول الاستیسیته قرار گرفت. از طرفی، بررسی نتایج تحقیق رحمان و ختاک (۲۰۲۲) نشان از برتری ریزساختاری (در تصاویر SEM و نتایج XRD) بتن قلیافعال نسبت به بتن معمولی جهت مصرف در روسازی راه دارد.

درصدی را دارا بودند. برتری میزان مدول الاستیسیته در بتن قلیافعال روسازی نسبت به بتن معمولی در سایر تحقیقات نیز گزارش شده است (بدکول و همکاران، ۲۰۲۲) که این امر به دلیل فعالیت زیاد پوزولانی سرباره- کوره آهنگدازی در ترکیب بتن قلیافعال می‌باشد که منجر به تولید حجم بیشتری از ژل‌های هیدراته در ترکیب بتن شده است. این ژل‌ها عامل اصلی استحکام و پیوستگی ذرات در ترکیب بتن سخت شده هستند.

- اعمال حرارت زیاد (۵۰۰ °C)، در نمونه‌های بتنی موجب تضعیف ریزساختار ماتریس بتن معمولی و بتن قلیافعال و افت نتایج حاصل از آزمون مدول الاستیسیته به ترتیب به میزان ۵۹ و ۴۱/۹۸ درصد شده است. حرارت زیاد از طریق اثرگذاری مستقیم بر ریزساختار بتن، گسستگی پیوند در نواحی انتقال بین‌سطحی (ITZ) و تضعیف ساختار ژل‌های هیدراته، منجر به تضعیف خواص بتن می‌گردد.

- در انجام فرایند طیف‌سنجی XRD، عدم حضور عنصر هیدروکسید کلسیم (Ca(OH)<sub>2</sub>) در اوج قله‌های گراف

## ۵. مراجع

- Abdulkareem, O. A., Al Bakria, A. M. M., Kamarudin, H., Khairul Nizar, I. and Saif, A. A. 2014. "Effects of elevated temperatures on the thermal behavior and mechanical performance of fly ash geopolymer paste, mortar and lightweight concrete". *Constr. Build. Mater.*, 50: 377-387.
- Allahverdi, A. L. I., Najafi Kani, E. and Yazdanipour, M. 2011. "Effects of blast-furnace slag on natural pozzolan-based geopolymer cement". *Ceramics-Silikáty*, 55(1): 68-78.
- Amouzadeh Omrani, M. and Hasirchian, M. 2020. "Assessing the effect of steel slag and reclaimed asphalt pavement on mechanical properties and pollution of roller compacted concrete pavement". *J. Transport. Infrastruct. Eng.*, 6(2): 87-108. <https://doi.org/10.22075/jtie.2020.19754.1444>
- Aslani, F. 2016. "Thermal performance modeling of geopolymer concrete". *J. Mater. Civ. Eng.*, 28(1): 04015062.
- Badkul, A., Paswan, R., Singh, S. K. and Tegar, J. P. 2022. "A comprehensive study on the performance of alkali activated fly ash/GGBFS geopolymer concrete pavement". *Road Mater. Pavement Design*, 23(8): 1815-1835.

<sup>1</sup>- Loss on ignition

- Bentz, D. P. 2000. "Fibers, percolation, and spalling of high-performance concrete". *Mater. J.*, 97(3): p. 351-359.
- Davidovits, J. 1988. "Soft mineralurgy and geopolymers". *Proc. 1st International Conference on Geopolymers*, pp. 19-21.
- Davidovits, J. 1994. "Geopolymers: Man made rocks, geosynthesis and the resulting development of very early high strength cements". *J. Mater. Educ.*, 16: 91-139.
- Deb, P., Nath, P. and Sarker, P. 2015. "Drying shrinkage of slag blended fly ash geopolymer concrete cured at room temperature". *Proc. Eng.*, 125: 594-600.
- Du, H., Du, S. and Liu, X. 2014. "Durability performances of concrete with nano-silica". *Constr. Build. Mater.*, 73: 705-712.
- Duan, P., Shui, Z., Chen, W. and Shen, C. 2013. "Enhancing microstructure and durability of concrete from ground granulated blast furnace slag and metakaolin as cement replacement materials". *J. Mater. Res. Technol.*, 2(1): 52-59.
- Ehsani, A., Nili, M. and Shaabani, K. 2017. "Effect of nanosilica on the compressive strength development and water absorption properties of cement paste and concrete containing fly ash". *KSCE J. Civ. Eng.*, 21(5): 1854-1865.
- Eisa, M. S., Fahmy, E. A. and Basiouny, M. E. 2022. "Using metakaolin-based geopolymer concrete in concrete pavement slabs". *Innov. Infrastruct. Solut.*, 7(1): 1-11.
- Hashimoto, M., Sakata, N., Sakai, E., Yonezawa, T., Hayashi D. and Muroi, T. 2016. "Study on concrete for civil engineering structures using high volume blast furnace slag cement". *J. Adv. Concrete Technol.*, 14(4): 163-171.
- Kong, D. L. and Sanjayan, J. G. 2010. "Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete". *Cement Concrete Res.*, 40(2): 334-339.
- Mansourghanaei, M., Biklaryan, M., & Mardookhpour, A. (2021). Evaluate Effect of Temperature On mechanical properties of Geopolymer Concretes blast furnace slag by using nanosilica and polyolefin fiber. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(10), 334-352.
- Mansourghanaei, M., Biklaryan, M. and Mardookhpour, A. 2022. "Experimental study of the effect of high temperature on the passage speed of Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) in alkaline slag concrete used in pavement". *J. Transport. Infrastruct. Eng.*, 8(1): 119-131. <https://doi.org/10.22075/jtie.2022.25104.1572>
- Mansourghanaei, M., Biklaryan, M., & Mardookhpour, A. (2022). Experimental study of the effects of adding silica nanoparticles on the durability of geopolymer concrete. *Australian Journal of Civil Engineering*, 1-13. DOI: 10.1080/14488353.2022.2120247
- Mansourghanaei, M. (2022). Experimental evaluation of compressive, tensile strength and impact test in blast furnace slag based geopolymer concrete, under high temperature. *Journal of Civil Engineering Researchers*, 4(2), 12-21. DOI: <https://doi.org/10.52547/JCER.4.2.12>
- Mansourghanaei, M. (2022). Experimental study of compressive strength, permeability and impact testing in geopolymer concrete based on Blast furnace slag. *Journal of Civil Engineering Researchers*, 4(3), 31-39.
- Mehdipour, S., Nikbin, I. M., Dezhampanah, S., Mohebbi, R., Habibi Moghadam, H., Chakhtab, S. and Moradi, A. 2020. "Mechanical properties, durability and environmental evaluation of rubberized concrete incorporating steel fiber and metakaolin at elevated temperatures". *J. Clean. Prod.*, 254: 120126.
- Mustakim, S., Das, S. K., Mishra, J., Aftab, A., Alomayri, T., Assaedi, H. and Kaze, C. R. 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*, 13: 2415-2428.
- Neupane, N., Chalmers, D. and Kidd, P. 2018. "High-strength geopolymer concrete properties: Advantages and challenges". *Adv. Mater.*, 7(2): 15-25.

- Nosrati, A., Zandi, Y., Shariati, M., Khademi, K., Aliabad, M., Marto, A. and Khorami, M. 2018. "Portland cement structure and its major oxides and fineness". *Smart Struct. Syst.*, 22(2): 425-432.
- Patel, J., Gupta, N., Chouhan, R. K. and Mudgal, M. 2022. "Structural behavior of fly ash-based geopolymer for roller-compacted concrete pavement". *J. Mater. Civ. Eng.*, 34(11): 04022300.
- Phair, J. W. and Van Deventer, J. S. 2002. "Effect of the silicate activator pH on the microstructural characteristics of waste-based geopolymers". *Int. J. Min. Process.*, 66(1-4): 121-143.
- Prakasam, G., Ramachandra Murthy, A., Sundar Kumar, S., Saffiq Reheman, M. M. and Iyer, N. R. 2016. "Effect of nanosilica on durability and mechanical properties of high-strength concrete". *Mag. Concrete Res.*, 68(5): 229-236.
- Rahman, S. S. and Khattak, M. J. 2022. "Feasibility of reclaimed asphalt pavement geopolymer concrete as a pavement construction material". *Int. J. Pavement Res. Technol.* <https://doi.org/10.1007/s42947-022-00169-8>.
- Rashad, A. M. 2019. "The effect of polypropylene, polyvinyl-alcohol, carbon and glass fibres on geopolymers properties". *Mater. Sci. Technol.*, 35(2): 127-146.
- Ryu, G. S., Lee, Y. B., Koh, K. T. and Chung, Y. S. 2013. "The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators". *Constr. Build. Mater.*, 47: 409-418.
- Shafabakhsh, G. and Mohammadi Janaki, A. 2021. "Evaluation of mechanical properties and durability of geopolymer concrete pavement fly ash and silica fume". *Quarterly J. Transport. Eng.*, 12(4): 855-872. <https://doi.org/10.22119/jte.2021.88173>
- Siddique, R. and Kaur, D. 2012. "Properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag (GGBFS) at elevated temperatures". *J. Adv. Res.*, 3(1): 45-51.
- Singh, S., Sharma, S. K. and Akbar, M. A. 2022. "Developing zero carbon emission pavements with geopolymer concrete: A comprehensive review". *Transport. Res., Part D: Transport Environ.*, 110: 103436.
- Srividya, T., Kannan Rajkumar, P. R., Sivasakthi, M., Sujitha, A. and Jeyalakshmi, R. 2022. "A state-of-the-art on development of geopolymer concrete and its field applications". *Case Stud. Constr. Mater.*, 16: e00812.
- Their, J. M. and Özakça, M. 2018. "Developing geopolymer concrete by using cold-bonded fly ash aggregate, nano-silica, and steel fiber". *Constr. Build. Mater.*, 180: 12-22.
- Türkmen, İ., Maraş, M. M., Karakoç, M. B., Demirboğa, R. and Kantarci, F. 2013. "Fire resistance of geopolymer concrete produced from ferrochrome slag by alkali activation method". In: *International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), IEEE*.
- Václavík, V., Dirner, V., Dvorský, T. and Daxner, J. 2012. "The use of blast furnace slag". *Metalurgija*, 51(4): 461-464.
- Wang, H., Li, H. and Yan, F. 2005. "Synthesis and mechanical properties of metakaolinite-based geopolymer". *Colloids Surf A: Physicochem. Eng. Aspects*, 268: 1-6.
- Zhang, B. and Bicanic, N. 2002. "Residual fracture toughness of normal-and high-strength gravel concrete after heating to 600 °C". *Mater. J.*, 99(3): 217-226.