

ارزیابی رفتار بتن‌های ژئوپلیمری در مقایسه با بتن‌های معمولی در درجه حرارت‌های زیاد از منظر ریز ساختمانی

محمد امیری^{۱*}، مرضیه آریانپور^۲، نبی‌الله احمدی^۳

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان

۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران، گروه فنی مهندسی، واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران

۳- عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

amirii@hormozgan.ac.ir

تاریخ دریافت [۹۹/۴/۴]

تاریخ پذیرش [۹۹/۶/۲۷]

چکیده

امروزه محافظت از سازه‌های مختلف از جمله زیرساخت‌های تجاری، درمانی، صنعتی و مسکونی در برابر آتش امری بسیار پیچیده است. حرارت زیاد موجب تغییرات ریز ساختمانی و کاهش مقاومت فشاری بتن با سیمان پرتلند معمولی می‌شود؛ اما ژئوپلیمرها به عنوان نسل سوم سیمان با توجه به ساختار آمورف و شبکه‌های سه بعدی آلومینوسیلیکاتی، رفتار پایداری را در مقایسه با بتن معمولی تحت حرارت زیاد از خود نشان می‌دهد. نانوساختارهای هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) و هیدرات آلومینوسیلیکات کلسیم (C-A-S-H) محصول واکنش‌های هیدراتاسیون و ژئوپلیمریزاسیون است که نقش مهمی در افزایش مقاومت بتن ژئوپلیمری و معمولی دارد؛ اما حرارت چه در حالت گذرا چه در حالت پایدار موجب تغییر در مشخصات مکانیکی و ریز ساختمانی بتن می‌شود. بر این اساس به منظور درک عمیق‌تر از تغییر رفتار نانوساختارهای C-S-H و C-A-S-H بتن بر اثر اعمال حرارت‌های زیاد، بتن ژئوپلیمری با بتن معمولی مورد مقایسه قرار گرفته است. در این راستا حدود ۳۰۰ نمونه به مدت ۳، ۱۴ و ۲۸ روزه در حمام رطوبت عمل‌آوری شده است. سپس همه آزمون‌ها به مدت ۲ ساعت در دماهای ۲۵، ۱۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سلسیوس قرار گرفته است. همچنین برای تجزیه تحلیل رفتار ریز ساختمانی آزمون‌ها در دماهای مختلف از تصاویر میکروسکوپ الکترونیکی روبشی (SEM) و طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDX) استفاده شد. بر اساس نتایج این پژوهش با افزایش درجه حرارت‌های زیاد مقاومت هر دو نوع بتن کاهش می‌یابد. با افزایش دما به بیش از ۷۰۰ درجه سلسیوس ساختار بتن ژئوپلیمری تبدیل به ساختار سرامیکی متخلخل و نیمه پایدار شده است. این تغییر در ساختار سرامیکی باعث ایجاد تمایز در مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری نسبت به بتن معمولی تحت حرارت زیاد شده است. مقاومت فشاری نمونه ۲۸ روزه بتن ژئوپلیمری و معمولی تحت دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۷/۳۵ و ۴/۳۱ مگاپاسکال است.

واژگان کلیدی: حرارت زیاد، بتن ژئوپلیمری، مقاومت فشاری، نانوساختار C-A-S-H، نانوساختار C-S-H.

۱. مقدمه

دانش مهندسی امروزه می تواند سازه های بتنی و فولادی جدید را از لحاظ مقاوم بودن در برابر آتش ارتقا بخشد؛ اما هنگامی که بحث دفع زباله های رادیواکتیوی با سطح بالا و یا انفجار مخازن نفت و گاز مطرح می شود، حساسیت رفتار بتن به علت انتشار دمای زیاد مورد توجه بیشتری قرار می گیرد [1]. به طور کلی هیدرولیز فلزات سنگین می تواند pH را کاهش دهد و در نتیجه واکنش سیمان با تأخیر انجام شود. این امر تأثیر منفی بر مقاومت و ویژگی های مکانیکی خمیر سیمان دارد [2]. نتایج مطالعه روی ماتریس خمیر سیمان نشان می دهد هنگامی که فاز C_3S وارد واکنش با آب می شود، نانوساختار C-S-H بر اثر هیدراتاسیون فازهای سیمانی به وجود می آید. نانوساختار C-S-H بیشتر در فضاهای خالی برای پر کردن خلأ و تراکم ساختار پدید می آید [3]. در واقع پس از تماس آب با مخلوط سیمانی یون های کلسیم و سیلیکات آزاد می شود و پس از به اشباع رسیدن این نانوساختار با مقیاس نانو تشکیل شده است [4]. همچنین باگذشت زمان آب آزاد بیشتری به درون لایه ها نفوذ کرده و با C_3S دوباره واکنش نشان می دهد و مقدار زیادی C-S-H تولید می شود [3]. نانوساختار C-S-H یک فاز کریستالی ضعیف با استوکیومتری متغیر است؛ که تقریباً ۷۵٪ وزنی محصولات هیدراته شده خمیر سیمان پرتلند معمولی را تشکیل می دهد [5]. نتایج مطالعه در خمیر سیمان پرتلند معمولی (OPC^1) نشان می دهد که نانوساختار C-S-H باعث مقاومت در ملات سیمانی است که این ساختار در دمای زیاد دچار تغییرات می شود [6]. بتن معمولی به علت تغییرات گسترده فیزیکی و شیمیایی در دمای زیاد و تجزیه هیدروکسید رفتار پایداری از خود نشان نمی دهد و دچار کاهش مقاومت می شود.

ژئوپلیمرها نوعی از اتصال دهنده های آلومینوسیلیکاتی با عناصر اصلی CaO , Al_2O_3 , SiO_2 هستند که دارای مزایای زیست محیطی است. ژئوپلیمرها در مقایسه با سیمان پرتلند دارای ویژگی پایداری در برابر آتش، کارایی زیاد و پایداری شیمیایی خوب برای کاربردهای مختلف هستند [7-9].

برخی از کاربردهای ژئوپلیمر شامل تثبیت فلزات سنگین (Cs , Zn , Sr , Co)، تولید مواد نسوز و مقاوم در برابر آتش، عایق حرارتی است [10]. ژئوپلیمرها شبکه های سه بعدی Si-O-Al آمورف هستند که با استفاده از یک حلال قلیایی-سیلیکاتی فعال می شود [11, 12]. هنگامی که ژئوپلیمرها در تماس با محلول های قلیایی قرار می گیرند، فعال کننده های قلیایی به سرعت با ذرات سیمان ژئوپلیمر وارد واکنش شده و جذب می شوند. یون OH^- موجود در محلول قلیایی به پیوندهای Al-O و Si-O به منظور تشکیل منومرهای سیلیکات و آلومینیوم حمله کرده و آن ها را از هم جدا می کند [13]. در نتیجه محلول با منومرهای سیلیکات و آلومینیوم اشباع شده و پس از فرآیند پلیمریزاسیون منجر به تشکیل نانوساختار آلومینوسیلیکات در ژئوپلیمرها می شود. همچنین میزان واکنش ژئوپلیمرها با یک محلول قلیایی بستگی به میزان انحلال SiO_2 , Al_2O_3 و نسبت Si/Al دارد؛ زیرا این نسبت در شکل گیری زنجیره های اصلی ژئوپلیمر یعنی پلی سیالیت^۲ ($Si/Al=1$)، پلی سیالیت سیلیکسو^۳ ($Si/Al=2$) و پلی سیالیت دی سیلیکسو^۴ ($Si/Al=3$) نقش مهمی ایفا می کند [14]. مطالعات نشان داد با تغییر نسبت Si/Al می توان ویژگی های مقاومتی بتن ژئوپلیمر را در برابر آتش بهبود بخشید [15].

تفاوت در فرآیند عمل آوری بتن ژئوپلیمری را از بتن معمولی متمایز می کند. آب نقش مهمی در واکنش شیمیایی ژئوپلیمرها ندارد اما برای تولید یک مخلوط کارآ و قابل استفاده کمک می کند که نیاز آبی را کاهش دهد [16]. پژوهش ها نشان می دهد افزایش جزئی مقدار آب باعث افزایش تنش جاری در بتن خودتراکم می شود اما کاهش مقدار آب در طرح های دیگر بتن باعث افزایش و کاهش تنش جاری شده است [17].

برای فعال سازی واکنش ژئوپلیمریزاسیون معمولاً از فرآیند حرارتی به جای نگهداری در حمام رطوبت استفاده می شود. به گونه ای که توسعه ویژگی های مکانیکی و ریزساختاری بتن ژئوپلیمری به میزان زیادی وابسته به دما و واکنش ژئوپلیمریزاسیون است.

2 Poly (sialates)

3 Poly (sialates-siloxo)

4 Poly (sialates-di siloxo)

1 Ordinary Portland Cement

مطالعات بسیاری در مورد رفتار حرارتی بتن‌های معمولی و بتن‌های ژئوپلیمری صورت گرفته است. با این وجود اطلاعات کمی در مورد رفتار ریزساختاری این بتن‌ها با نگرش به تغییرات نانوساختار هیدرات آلومینوسیلیکات کلسیم (C-A-S-H)، نانوساختار هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) و تأثیر آن روی تغییرات مقاومت فشاری بتن و خواص مکانیکی بتن ژئوپلیمری و بتن معمولی وجود دارد. بر این اساس هدف این مطالعه بررسی تغییرات رفتاری نانوساختار C-A-S-H، C-S-H تحت تأثیر حرارت‌های زیاد و نقش آن بر پارامترهای مکانیکی و مقاومتی بتن ژئوپلیمری در مقایسه با بتن معمولی است.

۲. مواد و روش‌ها

در این پژوهش ماده اولیه بتن ژئوپلیمری، سرباره است. سیمان ژئوپلیمر از مواد اولیه بازیافتی و ضایعات صنعت ذوب‌آهن تولید می‌شود. از سویی برای ساخت نمونه‌های مرجع/شاهد از سیمان پرتلند معمولی تیپ II هرمرگان استفاده شد. هدف از این انتخاب بررسی تغییرات فیزیکی و شیمیایی بتن ژئوپلیمری نسبت به بتن معمولی در حرارت زیاد بوده است. سرباره مورد نیاز در این پژوهش از شرکت ایرانی بنا بنیان زیست فناوری همدان تهیه شده است. بخش اعظم آزمایش‌های انجام‌شده در این پژوهش بر اساس استاندارد ASTM صورت گرفته است. تست مقاومت فشاری نمونه‌ها با سرعت ۷۵ kg/sec توسط جک مکانیکی شرکت آزمون انجام‌شده است. مشخصات شیمیایی سیمان ژئوپلیمر و سیمان پرتلند تیپ II با آزمایش XRF تعیین شد و در جدول (۱) ارائه شده است.

استفاده از فعال‌کننده‌های هیدروکسید سدیم (NaOH) و سیلیکات سدیم (Na_2SiO_3) معمولاً رواج بیشتری برای ساخت بتن ژئوپلیمری دارد. یون‌های سدیم Na^+ حاصل از NaOH برای تسهیل واکنش شیمیایی می‌تواند به راحتی در سراسر شبکه ژئوپلیمر حرکت کند و سیلیکات ناشی از Na_2SiO_3 می‌تواند اشباع شدن OH^- در منافذ را کاهش دهد و ظرفیت پیوند ژئوپلیمر را افزایش دهد [22, 23]. بر این اصل، غلظت فعال‌کننده در طراحی بتن ژئوپلیمری به نوبه خواص خمیر یا بتن را تعیین می‌کند.

ویژگی نانوساختاری آلومینوسیلیکات را می‌توان مانند نانوساختار C-S-H در نظر گرفت. بیشتر مطالعات در مورد همزیستی نانوساختار C-S-H در بتن معمولی C-A-S-H° و N-A-S-H° در بتن ژئوپلیمری است که همواره این نتیجه حاصل فرآیند ژئوپلیمریزاسیون است. نانوساختار C-A-S-H و نانوساختار C-S-H به طور هم‌زمان در یک اتصال‌دهنده تشکیل می‌شود. همچنین پیش‌بینی می‌شود که حفره‌ها و منافذ درون گیرنده ژئوپلیمری با نانوساختار C-S-H پر شده است [18]. از سوی دیگر کلسیم موجود در خاکستربادی یا سرباره علاوه بر تشکیل شبکه آلومینوسیلیکات می‌تواند خود به طور مستقیم هیدراته شود و نانوساختار C-S-H پدید آید [19]. افزودن مقداری بتن معمولی به بتن ژئوپلیمری تغییرات قابل توجهی در ساختار بتن ژئوپلیمری ایجاد می‌کند. ذرات خاکستربادی واکنش نداده به همراه محصولات اضافی از فرآیند هیدراتاسیون با نانوساختارهای C-A-S-H و N-A-S-H با هم تشکیل شده‌اند. وجود این دو نانوساختار در بتن ژئوپلیمری باعث افزایش مقاومت فشاری و کاهش تخلخل می‌شود [20]. استفاده از ذرات زئولیت منجر به تشکیل ماده‌ای با محتوای آمورف حدود ۶۰٪ و مقاومت فشاری ۳۳ مگاپاسکال می‌شود [10]. همچنین تجزیه مواد شیمیایی و محصولات ژئوپلیمریزاسیون در محدوده دمای ۳۰۰ تا ۷۰۰ درجه سلسیوس منجر به کاهش وزن شده است. تیان^۷ و همکاران به بررسی نسبت Si/Al در ژئوپلیمرها پرداختند. نتایج نشان داد هرچه نسبت Si/Al بیشتر شود ماتریس ژئوپلیمر فشرده تر می‌شود؛ یعنی با کاهش حجم منافذ نسبت Si/Al افزایش می‌یابد [1]. پاتریک^۸ و همکاران به بررسی ژئوپلیمر حاوی خاکستربادی به همراه سرباره پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تنها با افزودن ۱۰٪ سرباره به خاکستربادی، پس از ۷ روز عمل‌آوری مقاومت فشاری ۸۵ مگاپاسکال افزایش داشته است. همچنین نانوساختارهای C-A-S-H و N-A-S-H برای افزایش مقاومت ژئوپلیمرها بایکدیگر به وجود می‌آید [21].

5 Calcium (alumino) Silicate Hydrate

6 Sodium (alumino) Silicate Hydrate

7 Tian

8 Patrick

بیشینه و کمینه سنگدانه های استفاده شده برای شن و ماسه به ترتیب، ۹/۵ تا ۴/۷۶ و ۴/۷۶ تا ۰/۷۵ میلی متر است. رطوبت طبیعی شن و ماسه به ترتیب ۰/۱۶ و ۱/۰۳ درصد است. در این پژوهش بیشینه قطر سنگدانه های استفاده شده ۹/۵ میلی متر و همچنین آب مصرفی در ساخت بتن، آب شرب هرمزگان با $pH=7/8$ است. در طراحی بتن ژئوپلیمری غلظت محلول به سیمان ژئوپلیمر ۰/۳۵ و محلول به فعال کننده ۰/۵۶ در نظر گرفته شده است. وزن مخصوص بتن ژئوپلیمری و بتن معمولی 2345 kg/m^3 و مدول نرمی بتن معمولی ۳/۲ و بتن بدون هوا در نظر گرفته شده است. طرح اختلاط نمونه های تهیه شده در جدول (۲) ارائه شده است.

مقدار فعال کننده هیدروکسید سدیم با غلظت ۱۰ مولار با نسبت سیلیکات به سدیم ۱:۲ انتخاب شده است. محلول سیلیکات سدیم با نسبت ۲/۰۷ ($\text{SiO}_2 = 30\%$ و $\text{Na}_2\text{O} = 14.5\%$) با خلوص ۴۴/۵٪ استفاده شده است. به طور کلی سنگدانه هایی که دارای منحنی دانه بندی پیوسته ای باشند، به گونه ای که برخی از اندازه دانه ها در آن ها بسیار کم و یا بسیار زیاد نباشد، رضایت بخش ترین نتایج را به همراه دارد. بدین منظور دانه بندی بتن ژئوپلیمری و بتن معمولی، برای ماسه و شن به ترتیب از استاندارد ASTM C136-96 و ASTM C136 استفاده شده است [24]. منحنی دانه بندی مصالح درشت دانه و ریزدانه در شکل (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات شیمیایی سیمان ژئوپلیمر و سیمان تیپ II

Type	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Cl	MnO	SO ₃	L.O.I
Geopolymer	35.7%	11.2%	1.2%	37%	11.0%	0.68%	0.6%	0.2%	1.58%	-	-
Cement II	22.00%	5.30%	4.00%	65.00%	2.50%	0.70%	0.50%	-	-	2.50%	2.50%

Table 1. The XRF results of cement and geopolymer analysis.

جدول ۲. طرح اختلاط بتن ژئوپلیمری و بتن با سیمان پرتلند تیپ II

Constituents	Cement (kg/m ³)	Water:Cement (kg/m ³)	NaOH solution (kg/m ³)	NaSiO ₄ solution (kg/m ³)	Gravel (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)
Geopolymer	400	0.32	38.13	121.58	984.9	656.6
Cement	300	0.45	-	-	704	906.34

Table 2. The mixing design of concrete with Portland cement and geopolymer cement

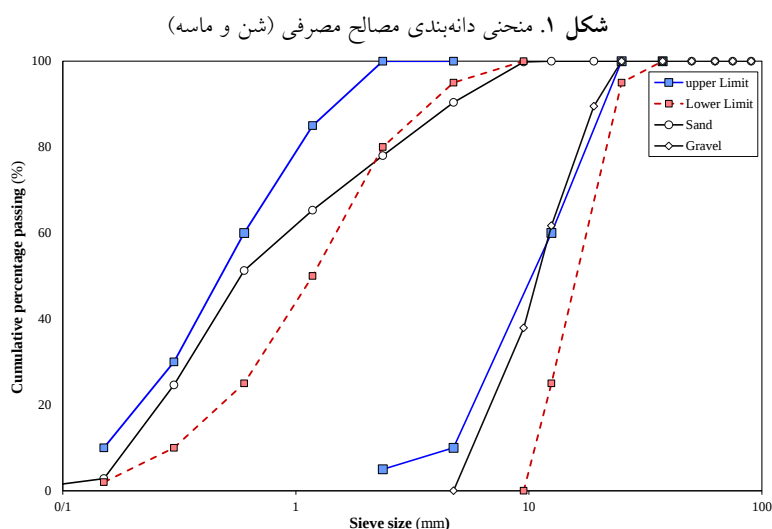


Fig. 1. Grading curve for the materials used (gravel and sand)

سیلیکات سدیم به آن اضافه شد. مصالح سنگی به همراه سیمان ژئوپلیمر به مدت ۶۰ ثانیه با یکدیگر مخلوط شده و محلول فعال کننده در نهایت به آن اضافه شد و عمل اختلاط به مدت ۲

برای ساخت بتن ژئوپلیمری و بتن معمولی طبق استاندارد ASTM C192/192M-2 عمل شد [25]. ابتدا برای ساخت بتن ژئوپلیمری محلول سدیم هیدروکسید ساخته شده است و سپس

تا ۳ دقیقه ادامه یافت. در بتن‌های ژئوپلیمر با افزایش زمان مخلوط کردن مقاومت فشاری بتن افزایش و کارایی بتن کاهش قابل توجهی دارد. برای ساخت بتن معمولی نیز سیمان پرتلند تیپ II با همراه مصالح درشت‌دانه و ریزدانه به مدت ۳۰ ثانیه درون میکسر مخلوط شدند و پس از آن آب اصلی طرح اضافه شد. در نهایت عمل اختلاط به مدت ۲ دقیقه ادامه داشت. قالب‌های مکعبی با ابعاد $50 \times 50 \times 50$ و $100 \times 100 \times 100$ میلی‌متر برای ساخت نمونه‌های بتنی برای آزمایش مقاومت فشاری استفاده شده است.

بر اساس استاندارد ASTM C31 بتن ساخته شده در ۳ لایه با ۲۵ ضربه (برای تراکم) درون قالب ریخته می‌شود [26]. پس از قالب‌گیری، عمل‌آوری به مدت زمان ۳، ۱۴ و ۲۸ روز در حمام رطوبت انجام شده است. پس از گذشت زمان عمل‌آوری، نمونه‌ها در سنین مختلف برای انجام آزمایش از درون حوضچه آب خارج می‌شود. قبل از حرارت دیدن نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت درون آون در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس، خشک می‌شود. پس از خشک شدن نمونه‌ها، آن‌ها درون کوره الکتریکی تحت دمای ۲۵، ۱۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۲ ساعت گذاشته می‌شود. حرارت کوره با نرخ ۵ درجه بر دقیقه به‌طور خودکار افزایش یافته و پس از رسیدن به دمای موردنظر ۲ ساعت در این دما باقی می‌مانند، سپس کوره خاموش شده و نمونه‌ها درون کوره خنک شده و به دمای محیط می‌رسد. شایان‌ذکر است که نمونه‌های دمای ۲۵ درجه سلسیوس در آون قرار نمی‌گیرد. سپس آزمایش‌های افت وزنی ([27], ASTM C1792-14) و مقاومت فشاری (ASTM C39, [28]) روی نمونه‌ها انجام شده است. برای ارزیابی ریزساختاری نمونه‌ها نیز از آزمون طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDX) و تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) توسط دستگاه‌های Tescan-Vega3 در دانشگاه شیراز استفاده شده است.

۳- بحث و بررسی نتایج

۳-۱- ریخت‌شناسی

شکل (۲) مقایسه تصاویر میکروسکوپ الکترونیکی روبشی آزمونه‌های ۲۸ روزه بتن ژئوپلیمری و سیمانی قبل و

بعد از در معرض حرارت دهی را نشان می‌دهد. در این تصاویر ساختار ترکیبات مختلف، ترک‌ها و حفره‌ها نیز قابل مشاهده است. در شکل (۲-الف) نمونه ژئوپلیمری تحت دمای ۲۵ درجه سلسیوس را نشان می‌دهد که دارای ساختارهای منسجم و متراکم C-S-H، C-A-S-H و پرتلندیت است. سرباره غنی از کلسیم است در طی فرآیند انحلال برخی از یون‌های Al و Ca آزاد می‌شود و نانو ساختار C-A-S-H در حین واکنش محلول قلیایی به وجود می‌آید [29]. همچنین ساختارهای کربنات کلسیم نیز به ندرت مشاهده می‌شود. شکل (۲-د) ریزساختارهای موجود در بتن معمولی تحت دمای محیط را نشان می‌دهد که در مقایسه با بتن ژئوپلیمری تمامی این ساختارها به جز نانو ساختار C-A-S-H قابل تشخیص است. در نمونه‌های سیمانی نیز نانو ساختار C-S-H به وفور یافت شده و ساختار مخرب اترینگایت هم نیز دیده می‌شود. از سویی بررسی ریزساختار ژئوپلیمر و سیمانی در دمای محیط نشان می‌دهد که میکرو ترک‌های بسیار ناچیزی وجود دارد.

میزان درصد وزنی عناصر Ca/Si و Si/Al در نقطه (۱) بتن ژئوپلیمری در شکل (۲-الف) توسط آزمون EDX اندازه‌گیری شد. بر اساس نتایج در آزمونه‌های ژئوپلیمری نسبت Ca/Si و Si/Al به ترتیب ۱/۲۹ و ۳/۴۶ درصد است. نانو ساختار C-S-H و C-A-S-H دارای تنوع گسترده‌ای است و با توجه به چگونگی تغییرات نسبت Ca/Si، ساختار سیلیکات و محتویات Si-OH و Ca-OH به هم مرتبط می‌شوند.

با نتایج به دست آمده از آزمون EDX می‌توان بیان کرد شاید در نقطه (۱) نانو ساختار C-A-S-H و در نقطه ۲ نانو ساختار C-S-H تشکیل شده باشد. به طور کلی فرض می‌شود نانو ساختار C-S-H همراه با نانو ساختار C-A-S-H در طی فرآیند ژئوپلیمریزاسیونی به‌منظور ایجاد پیوند محکم‌تر و برای ازبین بردن منافذ در ژئوپلیمرها به وجود می‌آید.

نسبت وزنی عناصر نمونه‌های سیمانی توسط آزمون EDX در شکل (۲-د) نشان داد که نسبت Ca/Si در نقطه یک ۱/۹۸٪ و نقطه دو ۲/۰۲٪ است؛ که می‌توان نتیجه گرفت محیط مناسبی برای تشکیل نانو ساختارهای C-S-H وجود دارد.

با افزایش دما به بیش از ۳۰۰ درجه سلسیوس تغییرات در ساختارهای هر دو آزمونه ژئوپلیمری و سیمانی مشاهده

نانوساختار C-S-H در نمونه‌های سیمانی نسبت به ژئوپلیمرها به شدت کاهش یافته و موجب کاهش دوام نمونه‌های بتن معمولی در برابر حرارت می‌شود.

پژوهش‌ها نشان داد با افزایش دما بین ۵۰۰ تا ۷۰۰ درجه سلسیوس نانوساختارهای C-A-S-H نمونه‌های ژئوپلیمر به علت فرآیند دی‌هیدروکسیلاسیون روبه‌زوال رفته است. همچنین ساختارهای پرتلندیت و C-S-H در هر دو نمونه سیمانی و ژئوپلیمر در حال تجزیه و تبدیل به کربنات کلسیم است. ساختار نمونه ژئوپلیمری در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس به شکل ساختار نیمه پایدار کریستالی تبدیل شده است [6, 30].

در نهایت در شکل (۲-ج) نانوساختار C-A-S-H نمونه‌های ژئوپلیمر که در معرض دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس بودند به شدت تغییر و کاهش پیدا کرده است. نکته قابل تأمل درباره ژئوپلیمرها این است که بر اثر حرارت زیاد ساختار شبکه آلومینوسیلیکاتی به ساختار متخلخل شیشه‌ای و پایدار تغییر پیدا کرده است، این ساختار دارای مقاومت زیاد نسبت سایر ترکیبات موجود در بتن‌های معمولی در دمای زیاد است.

در نمونه سیمانی شکل (۲-ی) مانند نمونه ژئوپلیمری در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس تغییر شدیدی در ساختار رخ داده است؛ اما ساختار نمونه سیمانی نسبت به ژئوپلیمرها ضعیف‌تر است. همچنین در این دما اکسید کلسیم به نسبت زیادی تشکیل شده است. در حقیقت با تجزیه کربنات کلسیم به اکسید کلسیم و دی‌اکسید کربن در دمای بیش از ۷۰۰ درجه سلسیوس، منجر به تشکیل حفرات و ترک‌ها نیز در نمونه‌های حرارت دیده می‌شود. وجود این حفره‌ها و ترک‌ها در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس منجر به ضعف موضعی ساختار اسکلت باربر نمونه‌ها در برابر تنش‌های اعمالی می‌شود و در نتیجه کاهش نسبی مقاومت فشاری نمونه ژئوپلیمری و سیمانی را به همراه دارد.

۳-۲- بررسی تغییرات مقاومت فشاری

شکل (۳) منحنی تغییرات مقاومت فشاری آزمون‌های بتن ژئوپلیمری و سیمانی تحت دمای ۲۵ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس در سنین ۳ و ۲۸ روزه را نشان می‌دهد. مقاومت فشاری نمونه‌های ژئوپلیمر که در دمای محیط عمل‌آوری شدند پس از ۳ و ۲۸ روزه به ترتیب ۳۲/۹۵، ۵۹/۲۳ مگاپاسکال و نمونه‌های

می‌شود. در نمونه‌های ژئوپلیمری تحت دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس شکل (۲-ب) به علت تبخیر آب آزاد ساختار پرتلندیت، نانوساختار C-A-S-H و C-S-H به‌خوبی قابل‌رؤیت است. همچنین ساختار کلسیت به‌صورت قسمت‌های تیره در مقدار بسیار کم مشاهده می‌شود؛ اما به علت شروع تبخیر آب ژئولیت یا پیوند شیمیایی از ساختار ژئوپلیمر میکرو ترک، انقباض و افت نمونه‌ها مشاهده می‌شود (شکل ۴-۱). پژوهش‌ها نشان داد با افزایش دما تا حدود ۱۰۰ درجه سلسیوس به علت تبخیر شدن آب فیزیکی یا آزاد ساختارهای هر دو نمونه تراکم بیشتری پیدا کرده است و با رشد نانوساختارهای C-A-S-H و C-S-H این میکرو ترک‌ها از بین رفته است [6, 30]. همچنین ساختار اترینگایت در نمونه‌های سیمانی پس از حذف آب فیزیکی در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس تجزیه شد [6].

نمونه‌های سیمانی (شکل ۲-ه) که معرض دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس بودند، آب از پیوند شیمیایی آن‌ها تجزیه و ساختارهای موجود به‌شدت تغییر کرده‌اند. پس از شروع فرآیند دی‌هیدراتاسیون ساختار پرتلندیت و نانوساختارهای C-S-H در این دما آغاز به تغییر شکل کرده است. نکته قابل‌توجه این است نانوساختارهای C-S-H نسبت به نمونه‌ی که تحت دمای محیط قرار گرفته بود روبه‌زوال رفته است. همچنین کربنات کلسیم نیز به علت تجزیه جزئی ساختار پرتلندیت تشکیل شده است. درواقع مطابق رابطه (۱) ساختار پرتلندیت بر اثر حرارت تبدیل به کربنات کلسیم و بخار آب شده است [3].



به‌طور کلی تغییرات در ساختار پرتلندیت^۹ بر اثر دما موجب ترک‌خوردگی در آزمون‌ها می‌شود که این امر بر افت وزن و مقاومت فشاری تأثیرگذار است. نتایج آزمون EDX در نمونه‌های ژئوپلیمر که تحت دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس بودند شکل (۲-ب) نشان داد که نسبت Ca/Si در نقطه یک و دو به ترتیب ۵۴/۴۸ و ۰/۹۹ درصد است. از تحلیل نسبت‌های Ca/Si در نمونه‌های ژئوپلیمری و سیمانی می‌توان نتایج آزمون EDX نمونه‌های تحت دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس نتیجه گرفت که

سیمانی ۱۸/۲۴ و ۲۶/۴۷ مگاپاسکال است. نانوساختار C-A-S-H و H در بتن ژئوپلیمری و نانوساختار C-S-H در بتن معمولی بخش مهم اتصال و از علل اصلی افزایش مقاومت فشاری بتن است [18].

شکل ۲. تصاویر SEM از نمونه‌های، (الف) بتن ژئوپلیمری در دمای محیط، (ب) بتن ژئوپلیمری تحت دمای 300°C ، (ج) بتن ژئوپلیمری تحت دمای 900°C ، (د) بتن معمولی تحت دمای 300°C ، (ه) بتن معمولی تحت دمای 300°C ، (ی) بتن معمولی تحت دمای 900°C .

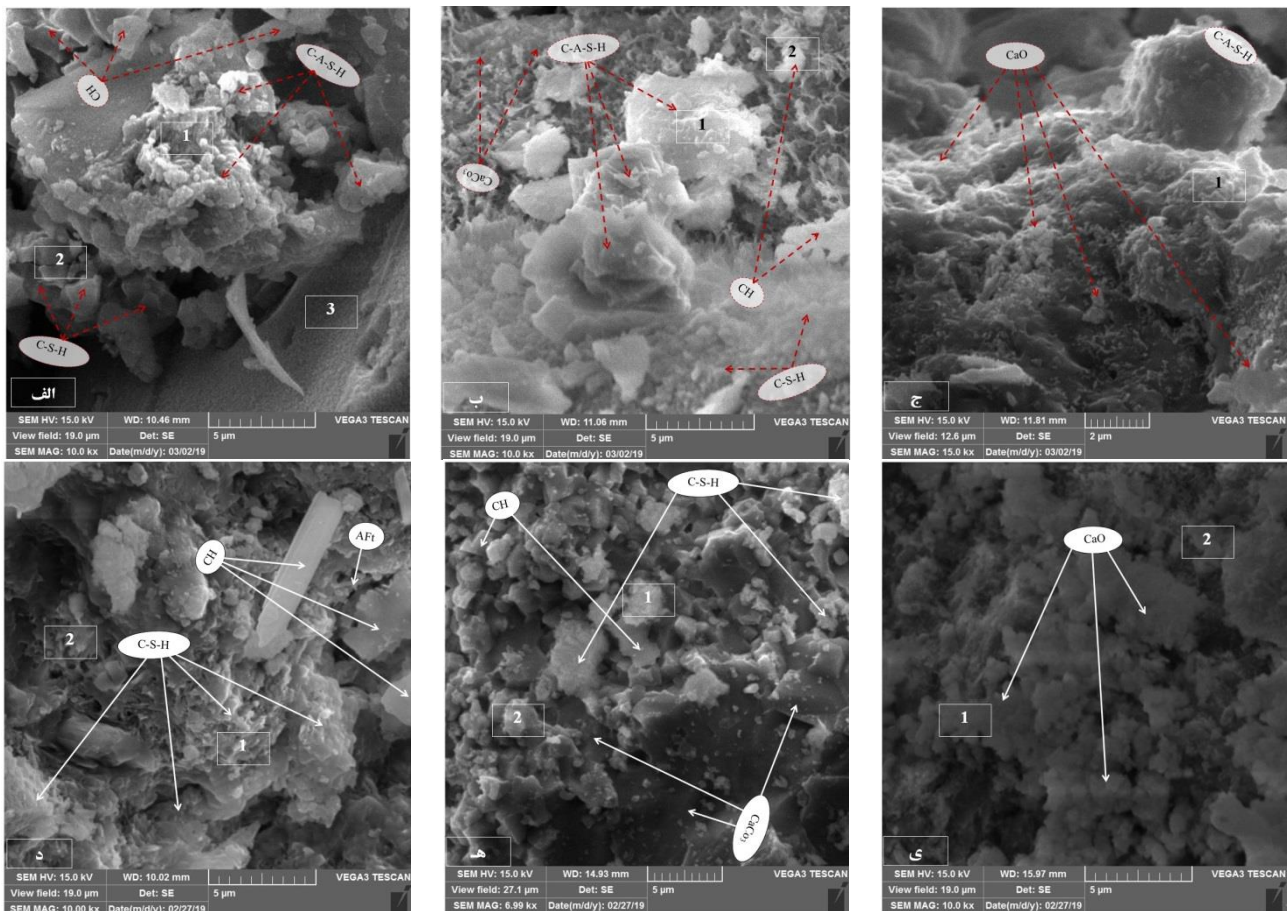


Fig. 2. SEM images of samples at (a) geopolymer concrete ambient temperature, (b) geopolymer concrete at 300°C , (g) geopolymer concrete at 900°C , (d) normal concrete ambient temperature, (h) normal concrete at 300°C , (e) normal concrete at 900°C

نمونه وجود دارد و هدایت حرارت با افزایش اندازه نمونه‌ها کاهش می‌یابد. از این رو در این مقاله آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه‌های $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}$ انجام شده است.

با افزایش دما تا 100°C درجه سلسیوس مشاهده می‌شود به علت تبخیر آب فیزیکی و کاهش تنش‌های ناشی از آن، مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری و معمولی افزایش داشته است. آزمونه‌های ۳ روزه مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری و سیمانی در دمای 100°C درجه سلسیوس به ترتیب حدود ۴۰ و ۲۱ مگاپاسکال است. با افزایش فرآیند حرارتی تا دمای 300°C درجه سلسیوس شکل (۳) مشاهده می‌شود مقاومت فشاری آزمونه‌ها رو به نوسان است. آزمونه‌های ۲۸ روزه بتن ژئوپلیمری که در دمای 300°C درجه سلسیوس بودند نسبت به نمونه‌های تحت

با توجه به نتایج SEM ارائه شده در شکل (۲-الف و ۲-د) مشاهده می‌شود که نانوساختار C-S-H و C-A-S-H در آزمونه‌های ژئوپلیمر بسیار بیشتر از سیمانی است. وجود زیاد این نانوساختارها در بتن ژئوپلیمری موجب شده است که مقاومت فشاری آن نسبت به بتن معمولی بیشتر باشد. همچنین در شکل (۳) مشاهده می‌شود با افزایش سن عمل‌آوری مقاومت فشاری آزمونه‌ها رو به افزایش است؛ که این موضوع نشان می‌دهد در طی دوره عمل‌آوری نانوساختارهای C-A-S-H و C-S-H رو به رشد بوده و ساختار نمونه‌ها را متراکم و منسجم‌تر کرده است.

مقاومت فشاری در درجه حرارت‌های زیاد وابسته به اندازه نمونه‌ها است. همچنین تفاوت قابل‌توجهی بین سطح و مرکز

دمای ۲۵ درجه سلسیوس قرار گرفته حدود ۲۳٪ افت و نمونه‌های سیمانی حدود ۱۵٪ افزایش مقاومت داشته است.

این کاهش مقاومت فشاری در ژئوپلیمرها به دلیل متراکم‌تر شدن ساختار بر اثر افزایش سن عمل‌آوری موجب کاهش نفوذپذیری در ژئوپلیمرها شده است، در حقیقت در دمای زیاد فشار بخار آب افزایش داشته و ساختار متراکم ژئوپلیمر قادر به محدود کردن تنش‌های حرارتی نیست در نهایت کاهش مقاومت فشاری در ژئوپلیمرها مشاهده می‌شود. شایان به ذکر است که این تغییرات مقاومت فشاری روی کاهش وزن نمونه‌ها و همچنین تغییرات طولی آن‌ها نیز تأثیر گذاشته است (شکل-۴).

در شکل (۳) با افزایش دما به بیش از ۵۰۰ درجه سلسیوس افت مقاومت فشاری تمامی آزمون‌ها واضح و روشن است. مقاومت فشاری آزمون‌های ۲۸ روزه بتن ژئوپلیمری و بتن معمولی در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۴۱/۱۸ و ۲۴/۷۱ مگاپاسکال است. درواقع آزمون‌های ژئوپلیمری و بتن معمولی حدود ۳۰٪ و ۶٪ نسبت به نمونه‌های شاهد به سبب شروع تغییرات ریزساختاری و فرآیند دی‌هیدراتاسیون، کاهش مقاومت داشته‌اند. از سویی در دمای بیش از ۵۰۰ درجه سلسیوس ساختار پرتلندیت در نمونه‌های سیمانی تجزیه شده است. آزاد شدن گاز دی‌اکسید کربن بر اثر تجزیه ساختار پرتلندیت موجب ایجاد ترک و حفره در نمونه‌ها می‌شود که این مورد نیز خود باعث کاهش ظرفیت مقاومتی در اسکلت نمونه‌ها است.

در دمای ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس افت مقاومت فشاری هر دو نمونه روند سریع‌تری داشته است. مقاومت فشاری آزمون‌های ژئوپلیمری و بتن معمولی تحت دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس در سن ۲۸ روزه به ترتیب ۱۹/۲۲ و ۱۴/۹۰ مگاپاسکال است. در آزمون‌های ۳ روزه در همین دما حدود ۵۲ تا ۶۷ درصد افت مشاهده شد. حرارت زیاد روی ریزساختار بتن ژئوپلیمری و بتن معمولی تأثیر مخرب گذاشته و در نمونه‌های سیمانی با توجه به تصاویر SEM شکل (۲)، ساختار پرتلندیت و کربنات کلسیم تجزیه شده است. همچنین نانوساختار C-S-H به شدت کم آب شده و دچار فروپاشی می‌شود؛ که این امر موجب تأثیر منفی در مقاومت فشاری بتن

معمولی است. همچنین ساختار بتن ژئوپلیمری تحت دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس به علت تجزیه آب ژئولیت به ساختار سرامیکی نیمه پایدار تبدیل شده است. این تبخیر آب از ساختار ژئوپلیمر موجب انبساط، ترک‌خوردگی حرارتی و افت وزن است که در مجموع کاهش مقاومت فشاری را نیز به همراه دارد. با توجه به شکل (۳) مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری نسبت به بتن معمولی تحت دماهای زیاد نیز بیشتر است و این به علت مقاومت بیشتر و تفاوت ساختار سرامیکی تشکیل شده است.

در نهایت تمامی آزمون‌ها تحت دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس با افت شدید مقاومت فشاری مواجه شدند. مقاومت فشاری آزمون‌های بتن ژئوپلیمری در سنین ۳ و ۲۸ روزه به ترتیب ۵/۲۹ و ۷/۳۵ مگاپاسکال و آزمون‌های بتن معمولی ۳/۵۳ و ۴/۳۱ مگاپاسکال است.

در واقع آزمون‌های ۲۸ روزه بتن ژئوپلیمری و بتن معمولی حدود ۸۳ تا ۸۷ درصد کاهش مقاومت فشاری را در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس تجربه کردند. این کاهش شدید مقاومت فشاری در بتن معمولی با توجه تصاویر SEM شکل (۲-ی)، نانوساختار C-S-H که باعث ایجاد پیوند و مقاومت بتن در برابر حرارت بود، تجزیه شده و اغلب ساختار را ساختار سرامیکی بسیار متخلخل تشکیل داده است.

در نمونه‌های ژئوپلیمری شکل (۲-ج) ساختار شبکه آلومینوسیلیکاتی کامل به ساختار شیشه‌ای پایدار و بسیار متخلخل تغییر کرده است. این ساختار در برابر حرارت نسبتاً پایدارتر از بتن معمولی است. به طور کلی افت مقاومت فشاری تمامی آزمون‌ها در حرارت زیاد غیرقابل انکار است اما آزمون‌های ژئوپلیمری دارای مقاومت فشاری بیشتری نسبت به نمونه‌های بتن معمولی است.

۳-۳- تغییرات وزنی نمونه‌ها تحت تأثیر دما

شکل (۴) نمودار افت وزنی بتن ژئوپلیمری و بتن معمولی تحت دماهای ۲۵ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس را نشان می‌دهد. درصد افت وزنی هر دو نمونه ژئوپلیمر و سیمانی که در دمای محیط نگهداری شدند، صفر است. با شروع فرآیند حرارتی افت اولیه وزن آزمون‌ها شروع شد.

شکل ۳-الف. منحنی تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ روزه در دماهای متفاوت

شکل ۳-ب. منحنی تغییرات مقاومت فشاری ۳ روزه در دماهای متفاوت

(GPC: Geopolymer Concrete, OPC: Ordinary Portland Cement)

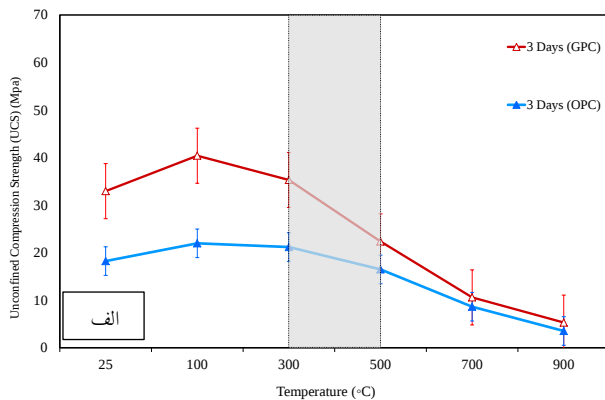


Fig. 3. a Compressive strength of GPC and OPC Concrete at 3 days at various temperatures.

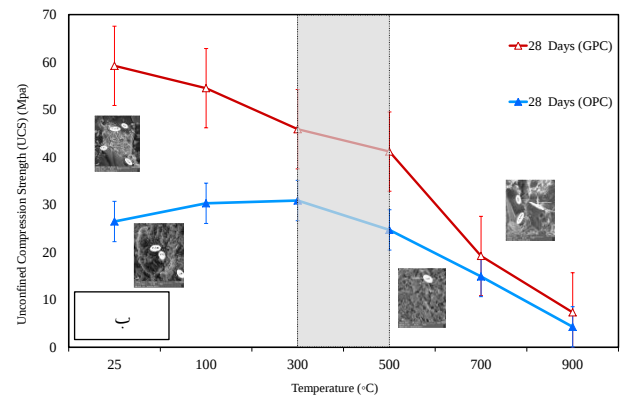


Fig. 3. b. Compressive strength of GPC and OPC Concrete at 28 days at various temperatures.

افت وزن آزمون‌های ۱۴ روزه بتن ژئوپلیمری و بتن معمولی تحت حرارت ۳۰۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۷ و ۵ درصد است. این افت وزن تا دمای نزدیک ۵۰۰ درجه سلسیوس به علت دی‌هیدراتاسیون و تغییرات کوچک ریزساختاری (به ویژه در نمونه‌های بتن معمولی که با توجه به شکل ۴ ساختارهای C-S-H و پرتلندیت تغییر شکل پیدا کرده بودند) است. تغییرات وزن نمونه‌ها پیوسته تا دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس نیز ادامه دارد. آزمون‌های ۳ روزه ژئوپلیمری و بتن معمولی به ترتیب حدود ۸ و ۵ درصد افت وزن را داشتند. افت وزن بیشتر ژئوپلیمرها در این دما به علت تبخیر آب پیوند شیمیایی ساختار ژئوپلیمر (آب ژئولیت) است.

به طور کل می‌توان بیان نمود که افت وزن آزمون‌های ژئوپلیمری به علت ساختار متخلخل بیشتر است که آب به راحتی از آن تبخیر می‌شود. در حقیقت پس از تبخیر آب پیوند شیمیایی از ساختار بتن ژئوپلیمر و بتن معمولی، ترک‌ها و افت وزنی شدیدی به وجود آمد. نتایج تحلیل تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی شکل (۲) و تصاویر ظاهری شکل (۵) نشان داد، افزایش دما سبب گسترش ترک‌های درونی و ظاهری شد. همچنین پوسیدگی‌های که بر اثر حرارت زیاد روی نمونه‌ها ایجاد شده ناشی از تجزیه ساختار و در ژئوپلیمرها تغییر فاز به حالت بلورین یا نیمه کریستالی است از مهم‌ترین علل کاهش وزن در دمای زیاد است.

افت وزن آزمون‌های بتن ژئوپلیمری ۳ و ۲۸ روزه تحت دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس حدود ۵٪ و آزمون‌های بتن معمولی ۱ تا ۲ درصد است. این افت وزن اولیه تحت تأثیر تبخیر آب آزاد از تمامی آزمون‌ها بوده است. از سویی با توجه به اینکه بتن ژئوپلیمری دارای ساختار متخلخل است در این دما می‌تواند به راحتی آب‌های تبخیر شده بر اثر تنش حرارتی را از خود خارج کند. با وجود اینکه مشاهده شد با تبخیر آب آزاد مقاومت فشاری نمونه‌ها در حالت خشک بیشتر از حالت اشباع است شکل (۳)، افت وزن در دمای کم تأثیر منفی بر مقاومت فشاری آزمون‌ها نداشته است (شکل ۴-ع).

به‌طور کلی حرارت گذرا یا پایدار موجب افت وزن بتن می‌شود. آب‌های موجود در بتن‌های ژئوپلیمری و معمولی به سه دسته طبقه‌بندی شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۴) افت وزنی تمامی نمونه‌ها از دمای ۱۰۰ تا ۵۰۰ درجه سلسیوس روند ملایمی را طی می‌کند. پن و سنجیان^{۱۰} [31] این کاهش وزن پیوسته با سرعت کم را نتیجه آزاد شدن آب از هر دو گروه شیمیایی و هیدروکسیل با متراکم شدن ساختار ژئوپلیمر می‌دانند که موجب آسیب سطحی و داخلی ساختار ژئوپلیمر می‌شود. در نهایت این فرآیند موجب کاهش مقاومت فشاری شکل (۳) نیز شده است.

پایدار (فرآیند کریستالیزاسیون) تغییر کرده است. این تغییر در ساختار ژئوپلیمر که همراه با ترک های ظاهری بسیار است، به علت تجزیه کربنات کلسیم و آزاد شدن گاز دی اکسید کربن، موجب کاهش وزن شدید در ژئوپلیمرها شد.

افت وزن در نمونه های بتن معمولی بر اثر حرارت زیاد (۹۰۰ درجه سلسیوس) در سنین ۳ و ۲۸ روزه حدود ۱۸ تا ۱۹ درصد بود. با توجه به ساختار ضعیف بتن معمولی در این دما، افت وزن ۱۹ درصدی برای تمامی آزمونه ها موجب ضعف در مقاومت فشاری شده است.

کاهش وزن با افزایش دما منجر به تغییر خواص مکانیکی در تمامی نمونه ها نیز شده است. فرآیند دی هیدروکسیلاسیون و تشکیل ساختار سرامیکی به شدت متخلخل تحت دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس شکل (۲-ج) علت اصلی افت وزن در ژئوپلیمرها است. به طور کلی سه عامل موجب افت وزن در بتن ژئوپلیمری و بتن معمولی می شود. تبخیر آب آزاد، فرآیند دی هیدراتاسیون و دی هیدروکسیلاسیون، خرابی شبکه ژئوپلیمری و سیمانی و تبدیل آن به اکسید کلسیم و دی اکسید کربن از علل افت وزن تحت تأثیر حرارت است. شیب نمودارهای افت وزنی آزمونه های ۲۸ روزه ژئوپلیمری و سیمانی در شکل (۴) نشان می دهد که درصد افت وزنی بتن معمولی کمتر از بتن ژئوپلیمری است.

در شکل (۴) مشاهده می شود که فرآیند دی هیدروکسیلاسیون از دمای بیش از ۵۰۰ درجه سلسیوس شروع شده است. دی هیدروکسیلاسیون به خروج یون هیدروکسیل از ترکیبات سیلیکاتی تشکیل دهنده بتن ژئوپلیمری به شکل آب گفته می شود؛ که به تبع آن وزن نمونه ها به شدت کاهش می یابد؛ بنابراین افت ناگهانی وزن معیار مناسبی برای تشخیص دمای دی هیدروکسیلاسیون است [32]. افت وزنی نمونه های ژئوپلیمری تحت دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس در حدود ۱۰ تا ۱۱ درصد است. پایداری حرارتی زیاد در ژئوپلیمرها به دلیل انتشار کمتر آب در سیستم های متراکم آن (نانوساختار C-A-S-H) است.

افت وزنی نمونه های ۳، ۱۴ و ۲۸ روزه بتن معمولی تحت دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس حدود ۷ تا ۸ درصد است. بر این اساس می توان نتیجه گرفت که فرآیند دی هیدروکسیلاسیون در نمونه های بتن معمولی از دمایی ۷۰۰ درجه سلسیوس آغاز شده است.

در نهایت افت وزنی تمامی آزمونه ها در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس به بیشینه خود می رسد. آزمونه های ۳ و ۲۸ روزه ژئوپلیمری به ترتیب ۲۴/۰۵ و ۲۲/۹۹ درصد کاهش وزن را تحت دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس تجربه کردند. با توجه تصاویر SEM شکل (۲-ج) مشاهده شد ساختار متراکم ژئوپلیمرها بر اثر حرارت زیاد تجزیه و به ساختار شیشه ای

شکل ۴. تغییرات وزنی بتن ژئوپلیمری و بتن معمولی تحت تأثیر حرارت زیاد

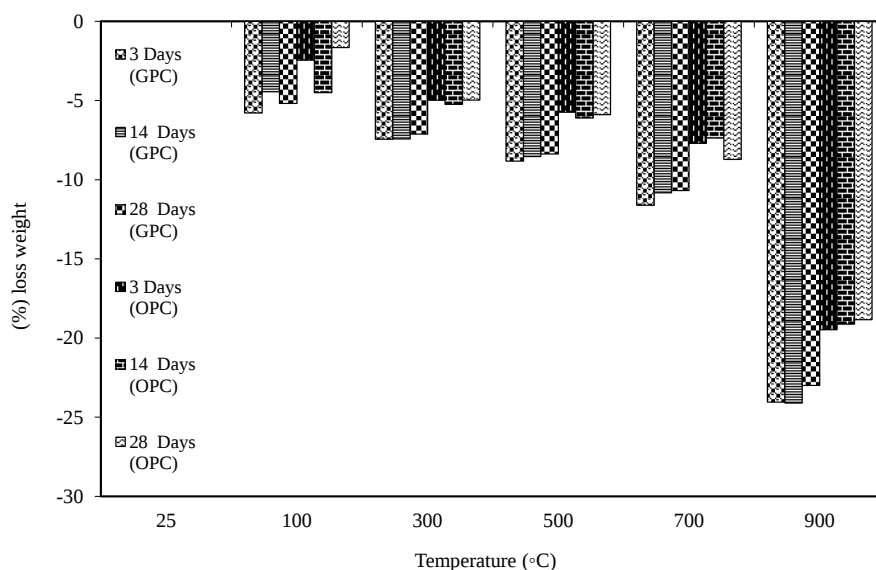


Fig. 4. The weight loss curve of the Normal and geopolymer concrete versus the applied high temperature

۴-۳- بررسی تغییرات و خواص ظاهری تحت تأثیر حرارت

شکل (۵) تصاویر آزمون‌های بتن ژئوپلیمری و بتن معمولی را نشان می‌دهد که بر اثر حرارت یکسری تغییرات فیزیکی روی آن‌ها رخ داده است. با بررسی سطح ظاهری نمونه‌های ژئوپلیمر شکل (۵-الف) که در دمای محیط (۲۵ درجه سلسیوس) نگهداری شدند، نشان می‌دهد که سطح ژئوپلیمرها به علت ساختار متراکم آلومینوسیلیکات‌ها و چسبندگی زیاد بتن ژئوپلیمری هنگام ساخت (خاصیت پرکنندگی)، دارای سطحی صاف و یکپارچه بدون خلل و فرج است. شایان به ذکر است که بتن ژئوپلیمری بافت سبزرنگ و تیره‌ای دارد در مقایسه با بتن معمولی که دارای بافت خاکستری رنگ است. در شکل (۵-ح) آزمون‌های بتن معمولی که در دمای محیط عمل‌آوری شدند دارای سطح زبرتر و ناهموارتری نسبت به بتن ژئوپلیمری است. سطح بتن معمولی دارای حفرات و ترک‌های مویی بسیار ریز است که در شکل (۶-ح) مشخص است.

تصاویر شکل (۵) نشان می‌دهد با افزایش دما در طی فرآیند حرارتی بر اثر انقباض و انبساط تمامی آزمون‌ها دچار ترک‌خوردگی شدند. در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس به علت شروع تبخیر آب فیزیکی در تمام آزمون‌ها میکرو ترک و تغییر رنگ مشاهده شد. در شکل (۵-ب و ۵-خ) بتن ژئوپلیمری و بتن معمولی که در معرض دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس بودند دارای رنگ روشن‌تری نسبت به نمونه‌های تحت دمای محیط قرارگرفته‌اند است. از سویی بنا بر نتایج شکل (۴) افت وزن و انقباض نمونه‌ها موجب ترک‌خوردگی تحت دمای بیش از ۱۰۰ درجه سلسیوس شد. به طور کلی هنگامی که فشار بخار به حداکثر خود می‌رسد، ساختار متراکم آزمون‌ها با نفوذپذیری کم، قادر به کنترل تنش‌های حرارتی نبوده و این امر موجب ترک‌های حرارتی بر روی سطح نمونه به علت انقباض می‌شود که این پدیده "اثر بخار" نام دارد [33].

با افزایش دما به بیش از ۳۰۰ درجه سلسیوس ترک‌ها و حفرات ایجادشده، گسترش پیدا کردند. از مقایسه شکل (۵-پ) و شکل (۵-ج) نتیجه می‌شود که آزمون‌های بتن معمولی در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس به علت ساختار ضعیف‌تر نسبت

به ژئوپلیمرها، دچار ترک‌خوردگی گسترده و ایجاد حفره شده است. از سویی با توجه به تصاویر SEM (شکل-۲) مشاهده می‌شود که ساختار آزمون‌های بتن معمولی در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس تغییر و رو به تجزیه رفته است. این تغییرات سبب بروز آسیب‌هایی روی سطح نمونه می‌شود. تغییر رنگ در هر دو آزمون تا دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس به سمت خاکستری روشن است. این تغییر رنگ به تغییرات اکسیداسیون در Fe_2O_3 موجود در ساختار سیمان ژئوپلیمری و بتن معمولی جدول (۱) وابسته است.

با افزایش روند حرارتی تا دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس تغییرات فیزیکی در سطح نمونه‌ها به شدت رشد کرده است. در شکل (۵-ت) آزمون ژئوپلیمری که در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس نگهداری شده مشاهده می‌شود. ترک‌های سطحی و داخلی وسیع به علت افت وزنی شدید، انبساط در دمای زیاد و تغییرات ریزساختاری از جمله تشکیل اکسید کلسیم و تبدیل شدن شبکه آلومینوسیلیکاتی به ساختار شیشه‌ای است (شکل-۲).

شکل (۵-ج) سطح ظاهری نمونه‌های بتن معمولی در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که به علت انبساط زیاد و افت وزن شدید ترک‌های عمیق با طول زیاد ایجادشده است. درواقع دمای زیاد در نمونه‌های بتن معمولی و ترک‌های عمیق منجر به شکاف و جدایش دو سطح از هم می‌شود. همچنین به علت تشکیل زیاد اکسید کلسیم به علت تجزیه کربنات کلسیم، سطح نمونه‌های بتن معمولی نسبت به نمونه‌های ژئوپلیمری سفیدتر است (شکل-۲). شایان به ذکر است از دمای بیش از ۵۰۰ درجه سلسیوس به علت تجزیه ساختار پرتلندیت، گاز دی‌اکسید کربن آزاد می‌شود و این گاز آزادشده خود سبب بروز ترک در تمامی آزمون‌ها است.

تصاویر شکل (۶) توسط میکروسکوپ استریو از نمونه‌ها پس از اعمال حرارت گرفته‌شده است. بررسی تصاویر میکروسکوپی نشان می‌دهد با افزایش دما ترک‌ها و حفره‌ها گسترش پیدا کردند. همچنین در این تصاویر مشخص است که بیشتر ترک‌خوردگی‌ها از محل حفره‌های ایجاد شده و گسترش پیدا کرده است.

شکل ۵. تغییرات فیزیکی نمونه های بتن ژئوپلیمری و بتن معمولی تحت حرارت

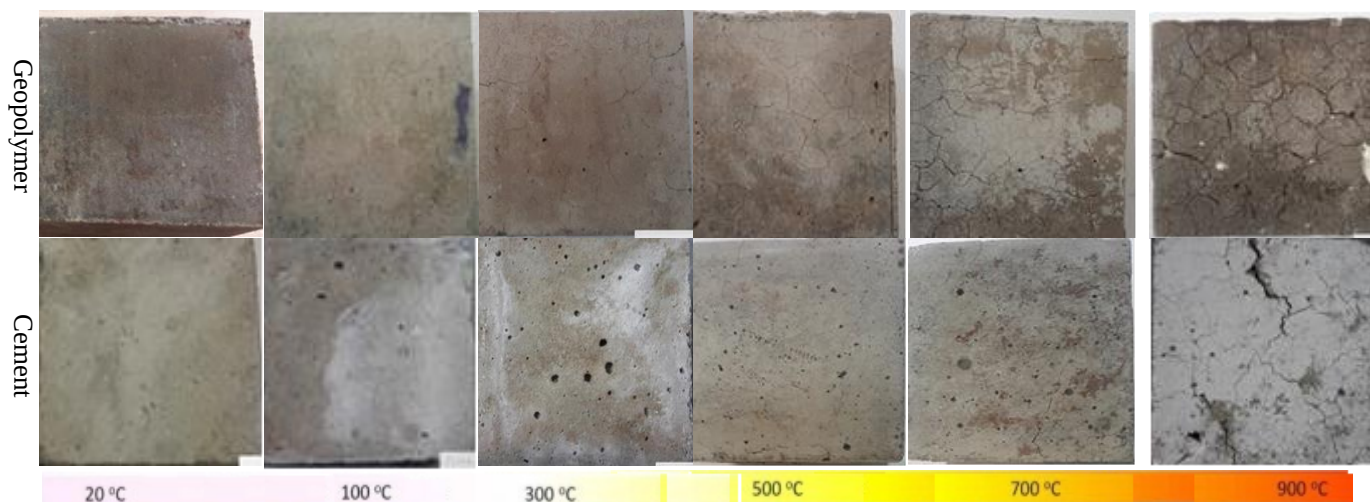


Fig. 5. Apparent changes of heated Normal and geopolymer concrete samples

شکل ۶. تغییرات ظاهری سطح بتن ژئوپلیمری و بتن معمولی در دمای زیاد

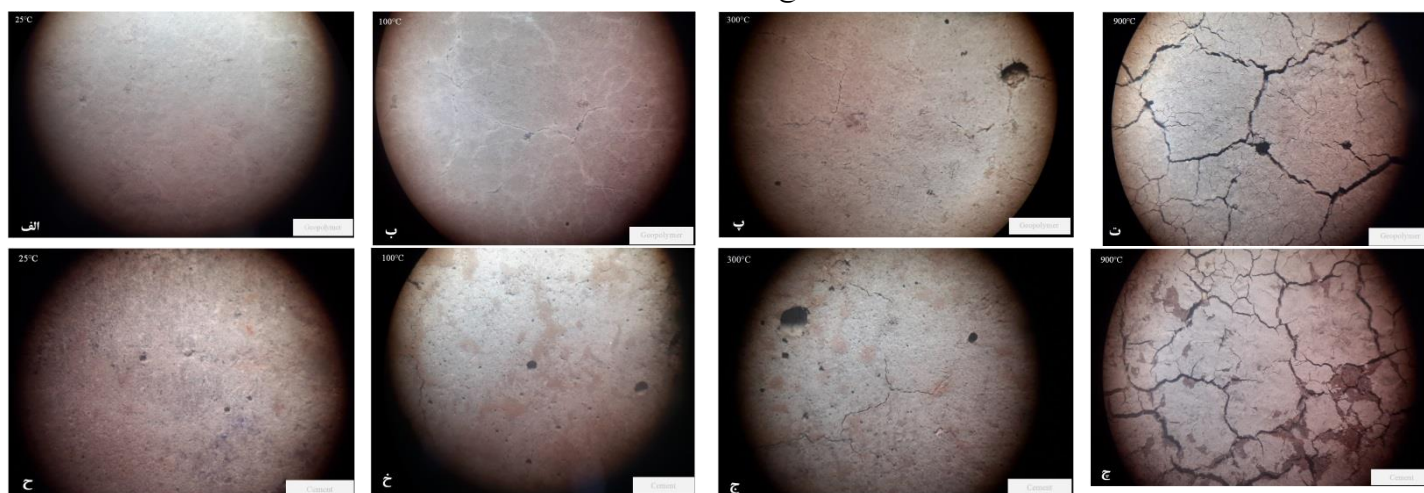


Fig. 6. The apparent changes of Normal and geopolymer concrete surface at high temperature

حفره ها را پوشش می دهد. هم زیستی دو نانوساختار C-A-S-H و S-H در ژئوپلیمرها منجر به تشکیل یک شبکه / ساختار محکم تری نسبت به بتن معمولی شده است. در نتیجه مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن ژئوپلیمری (۵۹/۲۳ مگاپاسکال) بیش از ۲ برابر بتن معمولی است.

۲- با افزایش دما تا ۳۰۰ درجه سلسیوس فشار بخار در نمونه ها پیوسته روبه افزایش است. با افزایش سن عمل آوری و متراکم تر شدن ساختار ژئوپلیمری نسبت به بتن معمولی، نفوذپذیری آن کاهش یافته و بخار آب ایجاد شده منجر به افزایش تنش های حرارتی می شود که منجر به کاهش مقاومت فشاری می شود. مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن ژئوپلیمری در این دما حدود ۲۲٪ افت داشته است.

با افزایش دما پیوسته عمق ترک ها و تغییر رنگ آن ها در حال رشد است. سفید شدن رنگ نمونه ها با افزایش دما (۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس) در شکل (۶) به درستی واضح است. در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس سطح نمونه ها تماماً ترک خورده است.

۴. نتیجه گیری

بر اساس مطالعه آزمایشگاهی صورت گرفته مهم ترین نتایج به شرح ذیل است.

۱- بر اساس نتایج تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، نانوساختار C-S-H در ژئوپلیمرها همزمان در یک پیوند تشکیل شده و با افزایش زمان پلیمریزاسیون ترک ها و

References

۵. مراجع

1. Tian Q, Nakama S, Sasaki K. Immobilization of cesium in fly ash-silica fume based geopolymers with different Si/Al molar ratios. *Science of the total environment*. 2019;687:1127-37.
2. Chen Q, Tyrer M, Hills CD, Yang X, Carey P. Immobilisation of heavy metal in cement-based solidification/stabilisation: a review. *Waste management*. 2009;29(1):390-403.
3. Tan H, Li M, Ren J, Deng X, Zhang X, Nie K, et al. Effect of aluminum sulfate on the hydration of tricalcium silicate. *Construction and Building Materials*. 2019;205:414-24.
4. Bellmann F, Sowoidnich T, Ludwig H-M, Damidot D. Dissolution rates during the early hydration of tricalcium silicate. *Cement and Concrete Research*. 2015;72:108-16.
5. Chen JJ, Thomas JJ, Taylor HF, Jennings HM. Solubility and structure of calcium silicate hydrate. *Cement and concrete research*. 2004;34(9):1499-519.
6. Aryanpour m, Amiri m. The Effects of High Temperatures on Concrete Performance based on Nanostructural Changes in Calcium Silicate Hydrate (C-S-H). *Concrete Research*. 2019;12(4):69-80 (In persian).
7. Aguirre-Guerrero AM, Robayo-Salazar RA, de Gutiérrez RM. A novel geopolymer application: Coatings to protect reinforced concrete against corrosion. *Applied Clay Science*. 2017;135:437-46.
8. Cheng T, Chiu J. Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag. *Minerals Engineering*. 2003;16(3):205-10.
9. Majidi B. Geopolymer technology, from fundamentals to advanced applications: a review. *Materials Technology*. 2009;24(2):79-87.
10. Amari S, Darestani M, Millar GJ, Rintoul L, Samali B. Microchemistry and microstructure of sustainable mined zeolite-geopolymer. *Journal of Cleaner Production*. 2019.
11. Su H, Xu J, Ren W. Mechanical properties of geopolymer concrete exposed to dynamic compression under elevated temperatures. *Ceramics International*. 2016;42(3):3888-98.
12. Zhang HY, Kodur V, Wu B, Cao L, Wang F. Thermal behavior and mechanical properties of geopolymer mortar after exposure to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*. 2016;109:17-24.
13. Nikolić V, Komljenović M, Bašćarević Z, Marjanović N, Miladinović Z, Petrović R. The influence of fly ash characteristics and reaction conditions on strength and structure of geopolymers. *Construction and Building Materials*. 2015;94:361-70.
14. Davidovits J. Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and calorimetry*. 1991;37(8):1633-56.
15. Temuujin J, Minjigmaa A, Rickard W, Van Riessen A. Thermal properties of spray-coated geopolymer-type compositions. *Journal of thermal analysis and calorimetry*. 2011;107(1):287-92.

۳- آب درونی پیوند شیمیایی بتن ژئوپلیمری و معمولی شروع به تبخیر می‌کند. به علت تجزیه آب از پیوند شیمیایی ساختارهای موجود در بتن معمولی شروع به تغییر و تجزیه می‌کند. تبخیر آب پیوند شیمیایی از ساختار ژئوپلیمر و سیمانی (دی‌هیدراتاسیون) موجب انقباض، ترک‌خوردگی حرارتی و افت وزن است که در مجموع کاهش مقاومت فشاری را نیز به همراه دارد.

۴- در دمای بیش از ۷۰۰ درجه سلسیوس به علت وقوع فرآیند دی‌هیدروکسیلاسیون ساختارهای موجود در نمونه‌ها از بین رفته و ساختارهای جدیدی تشکیل شده است. در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس ساختار بتن ژئوپلیمری بر اثر حرارت زیاد (تجزیه کربنات کلسیم به اکسید کلسیم) به ساختار شیشه‌ای پایدار و متخلخل تبدیل شده است. این ساختار علاوه بر افزایش حجم، کاهش ۸۹٪ مقاومت فشاری را به همراه دارد. در بتن‌های معمولی نیز مقاومت فشاری تا حدود ۸۳٪ کاهش داشته است.

۵- افت وزنی نمونه‌های ژئوپلیمر و معمولی با شروع روند حرارتی آغاز و تا دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس شیب ملایم حدود ۵ تا ۸ درصدی را دارد. افت وزن در بتن ژئوپلیمری و معمولی از دمای بیش از ۲۵ تا ۳۰۰ درجه سلسیوس به علت تجزیه آب فیزیکی (دی‌هیدراتاسیون) است. از دمای ۵۰۰ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس به علت فرآیند دی-هیدروکسیلاسیون و تغییرات ریزساختاری از جمله تجزیه کربنات کلسیم و فروپاشی نانوساختارهای C-A-S-H و C-S-H افت وزن صورت می‌گیرد. ژئوپلیمرها به علت ساختار متخلخل افت وزن بیشتری (۲۲٪) را نسبت به بتن معمولی (۱۸٪) دارد.

۶- نمونه‌های ژئوپلیمری و معمولی پس از قرار گرفتن در معرض حرارت زیاد تغییر رنگ پیدا می‌کنند. ابتدا رنگ نمونه‌ها به خاکستری روشن و سپس به رنگ سفید متمایل می‌شود. همچنین تصاویر میکروسکوپی نشان داد با افزایش دما و آزاد شدن گاز دی‌اکسید کربن ترک‌ها گسترده‌تر شده‌اند و بیشتر ترک‌ها از محل حفره‌ها آغاز شدند. همچنین نمونه‌های معمولی دارای ترک‌های عمیق‌تر و حفره‌های زیادتر بودند.

25. Standard A. standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory. ASTM C192/C192M. 2016:4-9.
26. Standard A. Standard practice for making and curing concrete test specimens in the field. ASTM C31, West Conshohocken, PA. 2003.
27. Standard A. Standard test method for measurement of mass loss ver-sus time for one-dimensional drying of saturated concretes. ASTM C1792-14, West Conshohocken, PA. 2014.
28. Standard A. Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. ASTM C39. 2010.
29. Yazdi MA, Liebscher M, Hempel S, Yang J, Mechtcherine V. Correlation of microstructural and mechanical properties of geopolymers produced from fly ash and slag at room temperature. *Construction and Building Materials*. 2018;191:330-41.
30. Amiri M, Aryanpour M. The Effect of High Temperatures on the Mechanical and Microstructural Properties of Geopolymer Concrete. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*. 2019 (In persian).
31. Pan Z, Sanjayan JG, Collins F. Effect of transient creep on compressive strength of geopolymer concrete for elevated temperature exposure. *Cement and concrete research*. 2014;56:182-9.
32. Brindley G, editor *Thermal transformations of clays and layer silicates*. Proceedings of International Clay Conference; 1975: Applied Publishing Ltd., Wilmette, Illinois, USA.
33. Hu S-g, Wu J, Yang W, He Y-j, Wang F-z, Ding Q-j. Preparation and properties of geopolymer-lightweight aggregate refractory concrete. *Journal of Central South University of Technology*. 2009;16(6):914.
16. Sreevidya V. Investigations on the flexural behaviour of ferro geopolymer composite slabs. 2013.
17. Ghoddousi P, Salehi AM. Study of self-consolidating concrete robustness containing limestone powder based on rheological parameters. *Modares Civil Engineering journal*. 2019;18(5):155-63.
18. Yip CK, Lukey G, van Deventer JS. The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation. *Cement and concrete research*. 2005;35(9):1688-97.
19. Guo XL, Shi HS, Lin MS, Dong WJ, editors. *Effects of Calcium Contents in Class C Fly Ash Geopolymer*. Advanced Materials Research; 2013: Trans Tech Publ.
20. Jindal BB. Investigations on the properties of geopolymer mortar and concrete with mineral admixtures: A review. *Construction and Building Materials*. 2019;227:116644.
21. Lemougna PN, Nzeukou A, Aziwo B, Tchamba A, Wang K-t, Melo UC, et al. Effect of slag on the improvement of setting time and compressive strength of low reactive volcanic ash geopolymers synthesized at room temperature. *Materials Chemistry and Physics*. 2020;239:122077.
22. Feng D, Tan H, Van Deventer J. Ultrasound enhanced geopolymerisation. *Journal of materials science*. 2004;39(2):571-80.
23. García-Lodeiro I, Palomo Ay, Fernández-Jiménez A. Alkali-aggregate reaction in activated fly ash systems. *Cement and Concrete Research*. 2007;37(2):175-83.
24. Standard A. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates," ASTM International. C136 ,West Conshohocken, PA 2006.

Assessment of the Geopolymer Concrete Performance Compared to Conventional Concrete at High Temperatures from Microstructural Perspective

M. Amiri^{1*}, M. Aryanpour², Nabi Allah Ahmadi³

1 Assistant Professor, University of Hormozgan, Faculty of Engineering, Bandar Abbas, Iran.

2 Master Student, Islamic Azad University of Bandar Abbas, Faculty of Engineering

3 Shahid Rajaii Teahet Training University (SRTTU), Tehran, Iran.

amirii@hormozgan.ac.ir

Abstract

When the concrete is exposed to high temperatures, maybe confront to reduction strength and load capacity after fire. The extent of fire damage is directly related to the duration of the fire and the resulted temperature. The resistance of the construction against high temperature is one of the main factors of building grading in its fire tolerance and protection. Nowadays, protecting various structures including commercial, medical, industrial, and residential infrastructures against fire is a very complex issue. High heat causes microstructural changes and decreases compressive strength of the concrete containing conventional portland cement, but geopolymers as the third generation of cement due to amorphous structure and aluminosilicate 3D networks lead to more stable behavior under high heat conditions considering the conventional concrete. Calcium silicate hydrate (C-S-H) and calcium aluminosilicate hydrate (C-A-S-H) nanostructures are products of the hydration and geopolymerization processes that play an important role in increasing the strength of conventional and geopolymeric concrete, But heat, either in transient or steady state, changes the mechanical properties and microstructure of the concrete. Hence for a deeper understanding of the behavior of C-S-H and C-A-S-H nanostructures affected by high temperatures, geopolymer concrete has been compared with conventional concrete. In this regard, about 300 samples were cured in the humidity bath for 1, 3, 7, 14, and 28 days. All samples were then put in of 25, 50, 100, 200, 300, 500, 700, and 900°C temperatures for 2 hours. Length and weight change percentages, compressive strength, and ultrasonic and cracking behavior tests were performed on all samples. Images from the scanning electron microscope (SEM) and the energy-dispersive X-ray (EDX) analysis were also used to evaluate the microstructural behavior of samples in various temperatures. At above 700 °C was observed the stability crystalline structure. In addition, increases pores and cracks were seen on the geopolymer structure. At 900 °C, the ceramic like structure (mostly porous) was formed, and this is due to increases volum and decline the compressive strength about 89% (75 kg/cm²). In this temperature, the aluminosilicate structure in the geopolymer has turned into the ceramic like structure and crystalline structure at high temperature. In fact, CaCO₃ has been decomposed to CaO (lime) and cause to changing in the aluminosilicate structure. According to the results, the strength of both types of concrete decreases with increasing temperature. By increasing the temperature to more than 700 °C, the geopolymer concrete structure has transformed to a porous and semi-stable ceramic structure. This change in the ceramic structure has made a difference in the high heat compressive strength of geopolymer concrete vs. conventional concrete. The compressive strength of 28-day aged geopolymer concrete and conventional concrete samples at 900 °C was 7.35 and 4.31 MPa, respectively.

KeyWords: High Temperatures, Conventional Concrete, Geopolymer Concrete, Compressive Strengths, C-A-S-H.