

## مطالعه آزمایشگاهی نقش شرایط عمل آوری بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی

امیر بهادر مرادی خوا<sup>۱</sup>، علیرضا اسپرهم<sup>۲</sup>

- ۱- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، تهران، ایران.
- ۲- کارشناس ارشد مهندسی زلزله، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، تهران، ایران.

آدرس پست الکترونیکی نویسنده رابط : amirbahador.mk@gmail.com

### چکیده

در سال‌های اخیر ژئوپلیمر به عنوان جایگزینی سبز و مناسب برای سیمان پرتلند مطرح شده است. پارامترهای متعددی بر مقاومت فشاری بتن‌های ژئوپلیمری تاثیر گذارند. یکی از این پارامترها شرایط عمل آوری عمل آوری شامل: دما و عمل آوری مدت عمل آوری، است. در این مقاله به بررسی نقش شرایط عمل آوری بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی، پرداخته شد. به همین منظور نمونه‌های بتن ژئوپلیمری در شرایط مختلف دمایی (۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) و در مدت (۲، ۴، ۸، ۱۲، ۱۶، ۱۸، ۲۴ و ۳۶ ساعت) عمل آوری شدند و از نمونه‌ها آزمون مقاومت فشاری گرفته شد تا تاثیر شرایط عمل آوری بر مقاومت فشاری بررسی شود. نتایج نشان داد افزایش زمان و دمای عمل آوری سبب افزایش مقاومت فشاری می‌شود.

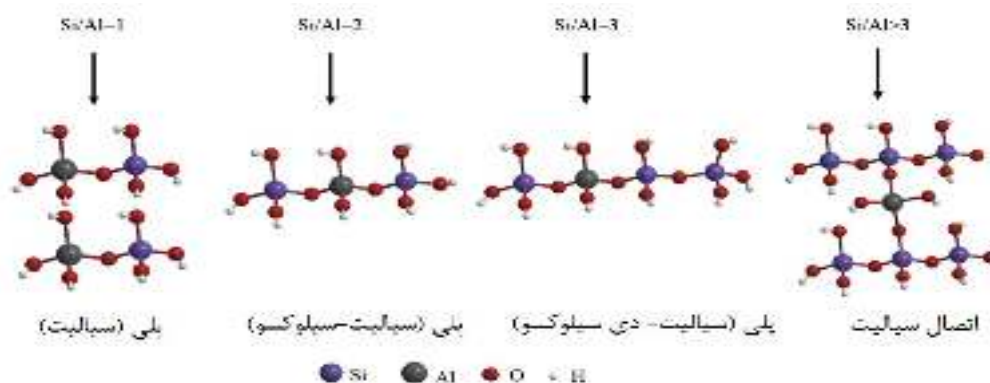
کلمات کلیدی: بتن ژئوپلیمری، خاکستر بادی، دمای عمل آوری، زمان عمل آوری، مقاومت فشاری.

### ۱. مقدمه

تغییرات اقلیمی ناشی از پدیده گرمایش جهانی به یکی از جدی‌ترین نگرانی‌های محیط زیستی در سراسر جهان تبدیل شده است. علت اصلی پدیده گرمایش جهانی انتشار گازهای گلخانه‌ای است و در میان گازهای گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن<sup>۱</sup> با میزان انتشار ۶۵ درصد، بیشترین نقش را در پدیده گرمایش جهانی دارد [۱ و ۲]. فرایند تولید سیمان پرتلند معمولی به عنوان یکی از منابع انتشار گاز دی‌اکسید کربن و گرمایش جهانی شناخته می‌شود [۳ و ۴] زیرا برای تولید ۱ تن سیمان پرتلند تقریباً ۱ تن دی‌اکسید کربن تولید می‌شود [۵ و ۶]. همچنین تولید سیمان پرتلند عامل انتشار ۷ تا ۱۰ درصد از انتشار جهانی گاز

<sup>۱</sup> CO<sub>2</sub>

دی اکسید کربن است [۳ و ۷ و ۸]. از این رو نیاز به استفاده از جایگزین برای سیمان پرتلند ضروری به نظر می‌رسد. در سال‌های اخیر ژئوپلیمر به عنوان یک عامل سیمانی جدید و دوستدار محیط زیست، به عنوان جایگزینی برای سیمان پرتلند مطرح شده است که می‌تواند منجر به کاهش مشکلات زیست محیطی ناشی از تولید سیمان پرتلند شود [۹]. ژئوپلیمر برای اولین بار در سال ۱۹۷۸ میلادی توسط داویدوویتس<sup>۲</sup> آشمیدان برجسته فرانسوی، به عنوان چسباننده‌های جدیدی از خانواده پلیمرهای معدنی معرفی شد [۱۰]. وی همچنین استفاده از نام پلی سیالیت<sup>۳</sup> را برای شناسایی شیمیایی ژئوپلیمرها پیشنهاد کرد که عبارت "poly" پیشوند پلیمری و "sialate" نیز مخفف زنجیره silicon-oxo-aluminate است [۱۴-۱۱]. در شکل ۱ انواع مختلف poly(sialate) نشان داده شده است.



شکل ۱- ساختار شیمیایی poly(sialate) ها [۱۳]

ژئوپلیمرها مواد آلومیناسیلیکاتی غیرآلی هستند که از ترکیب منبع اولیه ژئوپلیمریزاسیون<sup>۴</sup> (منبع آلومیناسیلیکاتی) غنی از سیلیکا ( $\text{SiO}_2$ ) و آلومینا ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) با یک محلول قلیایی فعال کننده حاصل می‌شوند [۱۵]. ژئوپلیمریزاسیون واکنش سریع شیمیایی در شرایط قلیایی بین مینرال‌های Si و Al است که باعث تشکیل زنجیره‌های سه بعدی پلیمری Si-O-Al-O می‌شود [۱۶]. از نقطه نظر خواص مهندسی مورد نیاز در مهندسی عمران، بتن‌های ژئوپلیمری خصوصیات مکانیکی و شیمیایی بهتری نسبت به بتن‌های معمولی دارند که از جمله آنها می‌توان مقاومت فشاری، خمشی و کششی بالا [۱۷-۱۹]، مقاومت در آتش سوزی و حرارت بالا [۲۰-۲۳]، نفوذپذیری کم و مقاومت در برابر حمله نمک‌ها و اسیدها [۱۷ و ۲۴] و خزش پایین [۲۵] اشاره کرد. البته در مقابل، جمع شدگی بیشتری نسبت به بتن معمولی دارند. منبع آلومیناسیلیکاتی بسته به خواص مورد نیاز، هزینه و در دسترس بودن می‌تواند طبیعی مانند ژئولیت، صنعتی مانند متاکائولن و یا ضایعاتی مانند خاکستر بادی یا سرباره کوره آهن گدازی باشد. یکی از انواع منابع آلومیناسیلیکاتی خاکستر بادی است. خاکستر بادی محصول جانبی نیروگاه ذغالسنگ سوز است که به دلیل ماهیت ساختاری آمورف می‌تواند یکی از بهترین منابع اولیه ژئوپلیمریزاسیون باشد. خاکستر بادی در دو کلاس C (دارای مقادیر زیاد اکسید کلسیم<sup>۵</sup>) و F (حاوی مقادیر کم اکسید کلسیم) دسته‌بندی می‌شود. در این مقاله از خاکستر بادی کلاس F به عنوان منبع آلومیناسیلیکاتی، برای ساخت بتن ژئوپلیمری استفاده شد.

محلول فعال کننده قلیایی به عنوان یکی از دو بخش اصلی ژئوپلیمرها نقش مهمی را در تجزیه و تشکیل ساختار کریستالی Si و Al ایفا می‌کند و معمولاً بر مبنای سدیم یا پتاسیم که از فلزات قلیایی حلال هستند، انتخاب می‌شود. رایج‌ترین محلول قلیایی مورد استفاده در ژئوپلیمریزاسیون، ترکیبی از محلول

<sup>۲</sup> Davidovits  
<sup>۳</sup> poly(sialate)  
<sup>۴</sup> Raw material  
<sup>۵</sup> CaO

هیدروکسید سدیم<sup>۶</sup> یا پتاسیم<sup>۷</sup> با محلول سیلیکات سدیم یا پتاسیم است [۱۷]. در این مقاله از محلول هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم به عنوان محلول فعال کننده قلیایی استفاده شد.

پژوهشگران پارامترهای مختلفی را به عنوان پارامترهای تاثیرگذار بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری مورد مطالعه قرار داده‌اند که از جمله آنها می‌توان به نوع محلول فعال کننده قلیایی، غلظت محلول قلیایی، غلظت محلول هیدروکسید سدیم یا پتاسیم، عمل آوری، نوع منبع آلومیناسیلیکاتی، محتوای اکسیدهای منبع آلومیناسیلیکاتی، میزان آب موجود در طرح اختلاط بتن، اندازه ذرات و غیره را نام برد [۱۴ و ۲۱ و ۲۶-۲۸].

یکی از پارامترهای تاثیرگذار بر مقاومت فشاری بتن‌های ژئوپلیمری که در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفت، عمل آوری است که خود شامل دو فاکتور دما و مدت عمل آوری است. در این زمینه پژوهش‌هایی توسط محققان انجام شده است که در ادامه به اختصار به آنها پرداخته می‌شود. پالومو<sup>۸</sup> و همکاران [۲۴] در پژوهش در مورد نقش عمل آوری بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی نتیجه گیری کردند که افزایش دمای عمل آوری روند ژئوپلیمریزاسیون را سرعت می‌بخشد و به همراه فاکتور زمان عمل آوری نقش مستقیم بر مقاومت‌های مکانیکی بتن دارد. این پژوهشگران عنوان کردند که دما و زمان بیشتر عمل آوری سبب دستیابی به مقاومت فشاری بیشتر بتن می‌شود. ون جارسولد<sup>۹</sup> و همکاران [۱۴] نیز در پژوهشی در این رابطه نتیجه گیری کردند که عمل آوری از پارامترهای تاثیرگذار بر مقاومت فشاری ژئوپلیمرها است. این پژوهشگران از دماهای خیلی بالا نیز برای عمل آوری نمونه‌های بتن ژئوپلیمری استفاده کردند و دریافتند این شرایط عمل آوری به دلیل ایجاد ترک تاثیر منفی بر خواص بتن دارد و در پایان دماهای میانه را برای عمل آوری بتن ژئوپلیمری پیشنهاد کردند. هاردیجیتو<sup>۱۰</sup> و همکاران [۱۷] نیز در پژوهش خود این نقش این پارامتر را بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی مورد بررسی قرار داده و علاوه بر تاثیرگذار بودن این پارامتر نتیجه گیری کردند که افزایش دمای عمل آوری سبب افزایش مقاومت فشاری بتن می‌شود اما در دماهای بالاتر از ۶۰ درجه سانتی‌گراد هیچ تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقاومت فشاری بتن دیده نمی‌شود در حالی که ساتپوت منش<sup>۱۱</sup> و همکاران [۲۹] نتیجه گیری کردند که در دمای بالاتر از ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت فشاری بتن افزایش قابل ملاحظه‌ای پیدا نمی‌کند. در رابطه با زمان عمل آوری پالومو و همکاران [۲۴] نتیجه گیری کردند که با افزایش زمان عمل آوری مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری افزایش می‌یابد. هاردیجیتو و همکاران [۱۷] نیز در پژوهش خود نتیجه گیری کردند که با زمان عمل آوری تا ۲۴ ساعت مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری افزایش می‌یابد اما در مدت‌های بیشتر از ۲۴ ساعت تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقاومت فشاری اتفاق نمی‌افتد در حالی که احمد و همکاران [۳۰] نتیجه گیری در زمان‌های بیشتر ۴۸ ساعت تغییر محسوسی در مقاومت فشاری دیده نمی‌شود.

در این پژوهش آزمایشگاهی سعی شد که در حد توان نقش شرایط عمل آوری بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی کلاس F، مورد مطالعه قرار گیرد. در همین راستا دو فاکتور دما و زمان عمل آوری مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های بتن ژئوپلیمری در شرایط مختلف دمایی و زمانی عمل آوری قرار گرفتند و از نمونه‌ها آزمون مقاومت فشاری بر اساس استاندارد BS 1881: Part 116 گرفته شد. در پایان نتایج بدست آمده گردآوری و تجزیه و تحلیل شدند.

## ۲. مصالح مصرفی

منبع اصلی ژئوپلیمریزاسیون در این مقاله خاکستر بادی بود که آنالیز XRF آن در جدول ۱ و تصویر آن در شکل ۲ ارائه شده است. هیدروکسید سدیم (NaOH) با خلوص ۹۸ درصد از شرکت قطران شیمی خریداری شد. محلول سیلیکات سدیم مایع با نسبت  $\text{Na}_2\text{O}$  به  $\text{SiO}_2$  برابر با ۲، از شرکت بتن

<sup>۶</sup> NaOH

<sup>۷</sup> KOH

<sup>۸</sup> Palomo

<sup>۹</sup> van Jaarsveld

<sup>۱۰</sup> Hardjito

<sup>۱۱</sup> Satpute Manesh

زیست فناوری خریداری شد. آنالیز شیمیایی این ۲ ماده در جدول ۲ ارائه شده است. شن و ماسه مصرفی از معادن اطراف شهریار تهیه شد. شن مصرفی از نوع شن شکسته بود که پس از تهیه، توسط الک استاندارد ASTM C136 [۳۱] دانه بندی شد. در این پژوهش، از شن در ۲ اندازه ۱۰ و ۷ میلی متری استفاده شد. آزمایش وزن مخصوص و جذب آب مطابق با استاندارد ASTM C127 [۳۲] از شن مصرفی، گرفته شد. این آزمایش از ماسه نیز مطابق با استاندارد ASTM C128 [۳۳]، به عمل آمد که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین ضریب نرمی ماسه ۳، میزان رد شده از الک شماره ۲۰۰، ۰/۷۲ درصد اندازه گیری شد. آب مصرفی نیز آب لوله کشی شهر تهران بود. روان کننده مورد استفاده نیز از نوع پلی کربوکسیلاتی با وزن مخصوص ۱/۱ گرم بر سانتی متر مکعب، بود که از کلنیک تخصصی بتن خریداری شده بود.

جدول ۱- آنالیز XRF خاکستر بادی کلاس F

P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۲۶	۰/۹۲	۱/۰۹	۰/۷۷	۳/۹	۱/۱۳	۲۱/۱	۷۰/۷



شکل ۲- تصویر خاکستر بادی

جدول ۲- آنالیز شیمیایی محلول های هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم

سیلیکات سدیم مایع			هیدروکسید سدیم		
واحد	نتیجه	ترکیب شیمیایی	واحد	نتیجه	ترکیب شیمیایی
%	۳۰	SiO <sub>2</sub>	%	۹۸	NaOH
%	۱۴/۵	Na <sub>2</sub> O	%	۱	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
%	۵۵/۵	آب	ppm	۲۰۰	NaCl
-	۲/۰۷	ریشوی مدل	ppm	۶	Fe
			ppm	۱۵/۷	SiO <sub>2</sub>

جدول ۳- جذب آب و وزن مخصوص سنگدانه ها

جذب آب (%)	وزن مخصوص اشباع با سطح خشک (گرم بر سانتی متر مکعب)	ماده
۱/۳	۲/۶۲	شن
۳/۲	۲/۵۹	ماسه

### ۳. روش آزمایشگاهی

پس از انجام آزمایش‌های اولیه و استفاده از نتایج تحقیقات قبلی طرح اختلاط بتن ژئوپلیمری انتخاب شد. این طرح در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴ - طرح‌های اختلاط بتن ژئوپلیمری

مقیاس	آب اضافه	روان کننده	ماسه	شن	سیلیکات سدیم	هیدروکسید سدیم	خاکستر بادی
kg/m <sup>3</sup>	۱۰	۸	۸۴۰	۸۴۰	۱۲۰	۸۰	۴۰۰

در این طرح اختلاط:

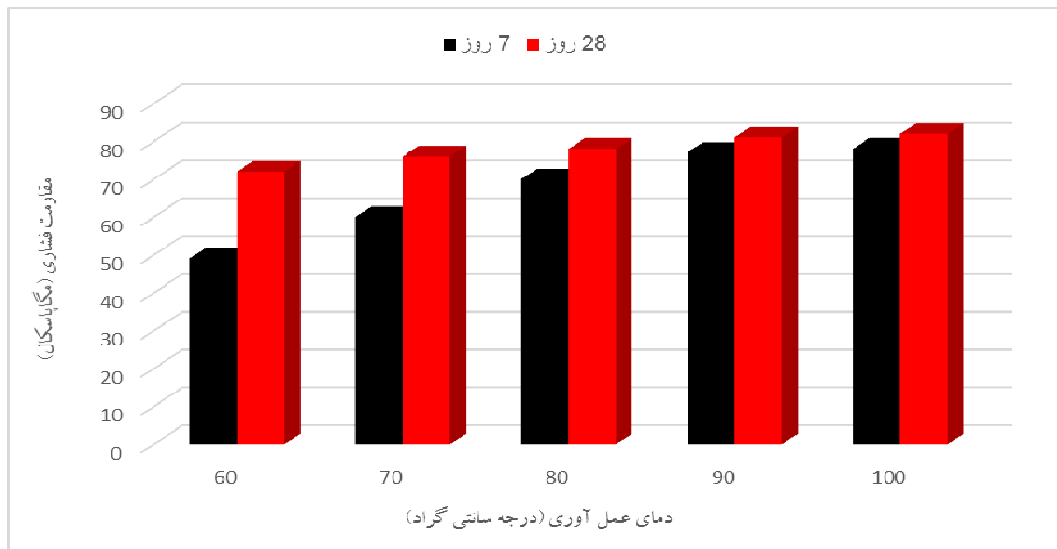
- نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم برابر با ۱/۵ است.
- میزان روان کننده ۲ درصد وزنی خاکستر بادی است.
- نسبت وزنی شن به ماسه برابر ۱ است.
- نسبت وزنی شن ۷ به ۱۰ میلی‌متری برابر ۱ است.
- نسبت وزنی بایندر به سنگدانه ۲۳ درصد است.
- نسبت وزنی سنگدانه به وزن کل بتن ۸۰ درصد است.

ابتدا محلول هیدروکسید سدیم با غلظت ۱۴ مولار آماده شد. برای تهیه هر لیتر محلول هیدروکسید سدیم ۱۴ مولار با توجه به وزن مولی هیدروکسید سدیم که ۴۰ گرم بر مول است، ۵۴۰ (۴۰×۱۴) گرم هیدروکسید سدیم خشک در بشر مدرج ریخته شد سپس به آرامی آب به بشر اضافه شد تا حجم محلول به ۱ لیتر برسد. محلول هیدروکسید سدیم به مدت ۲ ساعت توسط هم‌زن مغناطیسی، هم زده شد تا کاملاً حل و شفاف شود. پس از آماده شدن محلول هیدروکسید سدیم ۱۴ مولار، این محلول با محلول سیلیکات سدیم مایع، آب اضافه و روان کننده مطابق با طرح اختلاط بتن، ترکیب شد تا محلول فعال کننده قلیایی حاصل شود. به محلول فعال کننده قلیایی ۲۴ ساعت زمان داده شد تا سرد شود. در روز آزمایش ابتدا مواد خشک شامل خاکستر بادی (ماده چسباننده)، شن و ماسه از زیر به درشت در میکسر بتن ریخته و به مدت ۳ دقیقه به صورت خشک مخلوط شدند. سپس در ادامه محلول فعال کننده قلیایی به مخلوط بتن اضافه شد و به مدت ۳ دقیقه میکس شدند. پس از اتمام میکس، نمونه‌های فشاری با ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متر و از هر طرح به تعداد ۳ عدد، تهیه شدند. به منظور تراکم نمونه‌ها به مدت ۱۰ ثانیه روی میز ویبره، تراکم شدند. دماهای عمل‌آوری مورد پژوهش در این مقاله ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بود. به منظور بررسی این فاکتور، در بخش اول، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در این دماها عمل‌آوری شدند. پس از پایان عمل‌آوری نمونه‌ها در دمای محیط آزمایشگاه قرار گرفتند. از نمونه‌ها آزمون مقاومت فشاری مطابق با استاندارد BS 1881: Part 116 [۳۴] گرفته شد. پس از مشخص شدن نتایج این بخش در بخش بعدی به منظور بررسی فاکتور مدت عمل‌آوری، نمونه‌ها در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۳۶ ساعت عمل‌آوری شدند و از آن خارج و در دمای محیط آزمایشگاه قرار گرفتند. از نمونه‌ها آزمون مقاومت فشاری مطابق با استاندارد BS 1881: Part 116 گرفته شد. نتایج آزمون مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه در بخش نتایج و بحث ارائه خواهد شد.

### ۴. نتایج و بحث

نتایج بخش اول مربوط به بررسی اثر دمای عمل‌آوری بر مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی در شکل ۳ ارائه شده است. همان‌طور که نتایج شکل ۳ نشان می‌دهد با افزایش دمای عمل‌آوری از ۶۰ تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن ژئوپلیمری افزایش یافت. این افزایش مقاومت در مقاومت فشاری ۷ روزه بسیار محسوس‌تر بود. در ادامه با افزایش دما از ۹۰ به ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تغییر محسوسی در

مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن دیده نشد و فقط مقاومت‌ها اندکی افزایش یافت. افزایش دمای عمل‌آوری سبب افزایش نسبی میزان ژئوپلیمریزاسیون و افزایش قابل ملاحظه سرعت روند ژئوپلیمریزاسیون می‌شود [۱۷ و ۳۰ و ۳۵]. با افزایش سرعت روند ژئوپلیمریزاسیون، بتن ژئوپلیمری درصد بیشتری از مقاومت خود را در سنین پایین کسب می‌کند در نتیجه میزان مقاومت زودرس (Early strength) در بتن ژئوپلیمری بیشتر می‌شود. در واقع به همین دلیل است که افزایش مقاومت فشاری با افزایش دمای عمل‌آوری در مقاومت ۷ روزه نمونه‌ها محسوس‌تر و قابل ملاحظه‌تر است. اما علت محسوس نبودن تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ روزه، می‌تواند به ماهیت واکنش ژئوپلیمریزاسیون مربوط باشد. بر خلاف واکنش آبیوشی (هیدراتاسیون) که در بتن معمولی انجام می‌شود و تا ۱ ماه ادامه دارد و تا ۱ سال کامل می‌شود، ژئوپلیمریزاسیون یک واکنش سریع شیمیایی است که در شرایط شدید قلیایی بین عناصر معدنی Si و Al در یک مدت زمان بسیار کوتاه (نسبت به بتن معمولی) اتفاق می‌افتد. در نتیجه در صورت تامین مناسب انرژی فعالسازی، این نوع بتن بسته به نوع محلول فعال کننده قلیایی (سدیم یا پتاسیم)، غلظت محلول فعال کننده قلیایی، شرایط عمل‌آوری و غیره، درصد زیادی از مقاومت نهایی خود را در چند ساعت اولیه به دست می‌آورد. در نتیجه در این بخش با توجه به زمان عمل‌آوری که ۲۴ ساعت بود (زمان مناسب برای تامین انرژی فعالسازی)، مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها با افزایش دما تغییر محسوسی نیافتند چراکه بخش اعظمی از واکنش در همان سنین کم روی داده است. جدول ۵ درصد کسب مقاومت نهایی (۲۸ روزه) در سن ۷ روزگی را در دماهای مختلف عمل‌آوری نشان می‌دهد. نتایج این مقاله در بخش دمای عمل‌آوری با نتایج پالومو و همکاران [۲۴] مطابقت و با نتایج هاردیجیتو و همکاران [۱۷]، ساتپوت منش و همکاران [۲۹] و احمد و دیگران [۳۰] مغایرت دارد. اما به نتایج محمد و همکاران [۳۵] نزدیک است. این پژوهشگران دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد را به عنوان دمای بهینه برای عمل‌آوری بتن ژئوپلیمری اعلام کرده و همچنین گزارش کرده‌اند که با افزایش دما به بیش از ۸۰ درجه سانتی‌گراد تغییرات محسوسی در مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری دیده نمی‌شود. تصویر نمونه بتن ژئوپلیمری نیز در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۳- تاثیر دمای‌های مختلف عمل‌آوری بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری (زمان عمل‌آوری ۲۴ ساعت)

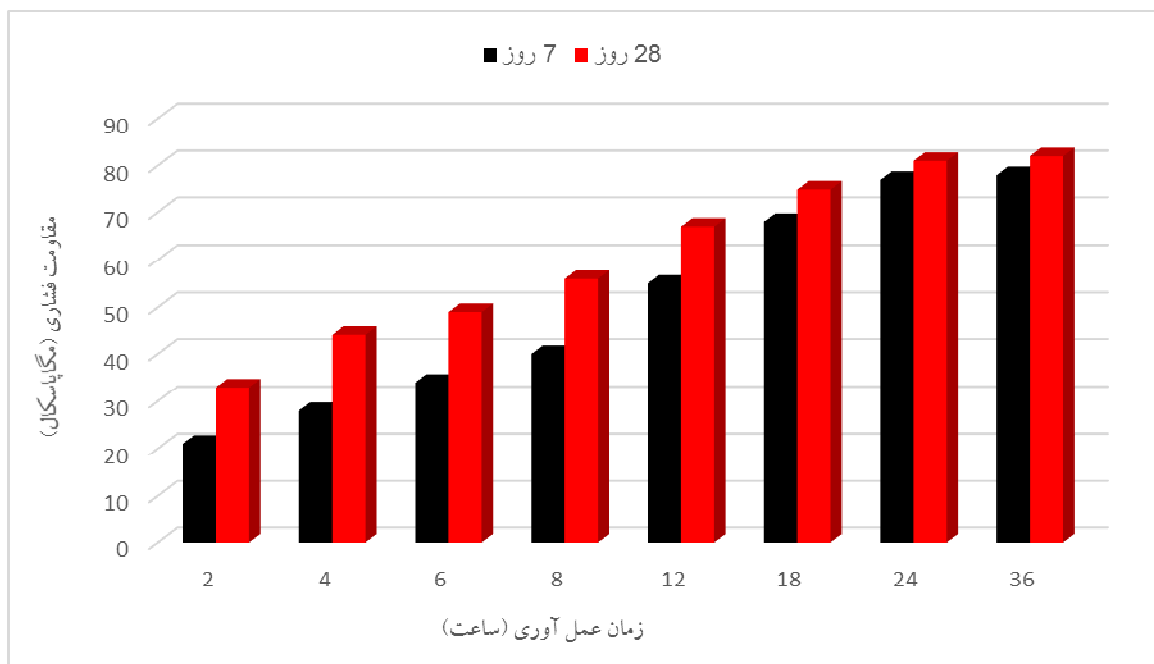
جدول ۵- نقش دمای عمل‌آوری بر مقاومت زودرس بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی

دمای عمل‌آوری (درجه سانتی‌گراد)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (مگاپاسکال)	تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ روزه نسبت به ۶۰ درجه سانتی‌گراد (%)	تغییرات مقاومت فشاری ۷ روزه نسبت به ۶۰ درجه سانتی‌گراد (%)	درصد کسب مقاومت نهایی (۲۸ روزه) در سن ۷ روز
۶۰	۷۲	-	-	۶۸
۷۰	۷۶	۵	۲۱	۷۹
۸۰	۷۸	۸	۴۰	۸۹
۹۰	۸۱	۱۲	۵۶	۹۵
۱۰۰	۸۲	۱۳	۵۹	۹۶



شکل ۴- تصویر نمونه ساخته شده بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی

نتایج بخش دوم در خصوص تاثیر زمان عمل آوری بر مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی در شکل ۵ ارائه شده است. نتایج شکل ۵ نشان می‌دهد در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد با افزایش زمان عمل آوری مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن نیز افزایش می‌یابد. این موضوع نیز می‌تواند مربوط به نقش حرارت در تسریع روند و میزان واکنش ژئوپلیمریزاسیون باشد [۱۴ و ۱۷]. با افزایش زمان عمل آوری از ۲ ساعت تا ۲۴ ساعت مقاومت فشاری به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد اما بر خلاف دمای عمل آوری، این افزایش مقاومت در هر دو مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه محسوس و قابل ملاحظه است. همچنین با توجه به جدول ۶ با افزایش زمان عمل آوری درصد مقاومت‌های زودرس بتن ژئوپلیمری نیز افزایش می‌یابد. اما بعد از ۲۴ ساعت، با افزایش زمان عمل آوری از ۲۴ ساعت به ۳۶ ساعت مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه به میزان تقریباً ۱ درصد افزایش می‌یابد. در واقع می‌توان گفت افزایش زمان عمل آوری بیشتر از ۲۴ ساعت، باعث ایجاد تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقاومت فشاری بتن نمی‌شود. این نتیجه با نتایج هاردجیتو و همکاران [۱۷] مطابقت و با نتایج احمد و همکاران [۳۰] مغایرت دارد.



شکل ۵- تاثیر زمان‌های مختلف کورینگ بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری (دمای عمل آوری ۹۰ درجه سانتی‌گراد)

جدول ۶ - نقش زمان عمل آوری بر مقاومت زودرس بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی

زمان عمل آوری (ساعت)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (مگاپاسکال)	تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ روزه نسبت به ۲ ساعت (%)	تغییرات مقاومت فشاری ۷ روزه نسبت به ۲ ساعت (%)	درصد کسب مقاومت نهایی (۲۸ روزه) در سن ۷ روزگی
۲	۳۳	-	-	۶۲
۴	۴۴	۳۰	۳۴	۶۴
۶	۴۷	۴۶	۶۳	۶۹
۸	۵۶	۶۷	۹۵	۷۲
۱۲	۶۷	۱۰۱	۱۶۶	۸۲
۱۸	۷۵	۱۲۴	۲۲۹	۹۱
۲۴	۸۱	۱۴۲	۲۷۱	۹۵
۳۶	۸۲	۱۴۴	۲۷۴	۹۶

## ۵. نتیجه گیری

در این مقاله سعی شد در حد توان به مطالعه نقش شرایط عمل آوری بر مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن ژئوپلیمری و همچنین مقاومت زودرس این بتن پرداخته شود. در همین راستا پس از تنظیم برنامه آزمایشگاهی و بررسی دو فاکتور عمل آوری یعنی زمان و دمای عمل آوری و انجام آزمایش های مقاومت فشاری، نتایج این آزمایش ها گردآوری و تجزیه تحلیل شد و در پایان موارد زیر به عنوان نتایج مشخص این مقاله ارائه می شود:

- افزایش دمای عمل آوری سبب افزایش مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی می شود اما این افزایش مقاومت فشاری در مقاومت فشاری ۷ روزه محسوس تر است. همچنین در دمای بیشتر از ۹۰ درجه سانتی گراد تغییر قابل ملاحظه ای در مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن دیده نمی شود.
- افزایش دمای عمل آوری سبب افزایش مقاومت در سن ۷ روز بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی می شود.
- افزایش زمان عمل آوری سبب افزایش مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی می شود و بر خلاف افزایش دما، این افزایش مقاومت فشاری در هر دو مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه قابل ملاحظه است. همچنین با افزایش زمان عمل آوری به بیش از ۲۴ ساعت، تغییر قابل ملاحظه ای در مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن دیده نمی شود.

## ۶. مراجع

- [۱] Phummiphana, I., Horpibulsuk, S., Rachan, R., Arulrajah, A., Shen, S.L. and Chindaprasirt, P. (۲۰۱۸). "High calcium fly ash geopolymer stabilized lateritic soil and granulated blast furnace slag blends as a pavement base material". J. Hazard. Mater, Vol. ۳۴۱, pp ۲۵۷-۲۶۷.
- [۲] McCaffrey, R. (۲۰۰۲). "Climate change and the cement industry". Global. Cem. Lime Mag, pp ۱۵-۹.
- [۳] Andrejkovičová, S., Sudagar, A., Rocha, J., Patinha, C., Hajjaji, W., Ferreira da Silva, E., Velosa, A., and Rocha, F. (۲۰۱۶). "The effect of natural zeolite on microstructure, mechanical and heavy metals adsorption properties of metakaolin based geopolymers". Appl. Clay Sci, Vol. ۱۲۶, pp ۱۴۱-152.



- [۴] Neupane, K., Chalmers, D. and Kidd, P. (۲۰۱۸). “High-Strength Geopolymer Concrete-Properties, Advantages and Challenges”. *Advances in Materials*, Vol. ۷(۲), pp ۱۵-۲۵.
- [۵] Assi, L.N., Deaver, E. and Ziehl, P. (۲۰۱۸). “Effect of source and particle size distribution on the mechanical and microstructural properties of fly Ash-Based geopolymer concrete”. *Constr. Build. Mater*, Vol. ۱۶۷, pp ۳۷۲-۳۸۰.
- [۶] Davidovits, J. (۲۰۱۳). “Geopolymer Cement Geopolymer Cement”. a review.
- [۷] Meyer, C. (۲۰۰۹). “The greening of the concrete industry”. *Cem. Concr. Compos*, Vol. ۳۱(۸), pp ۶۰۱-605.
- [۸] Chen, C., Habert, G., Bouzidi, Y. and Jullien, A. (۲۰۱۰). “Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation”. *J. Clean. Prod*, Vol. ۱۸, pp ۴۷۸-۴۸۵.
- [۹] Bashir, I., Kapoor, K. and Sood, H. (۲۰۱۷). “An Experimental Investigation on the Mechanical Properties of Geopolymer Concrete”. *International Journal of Latest Research in Science and Technology*, Vol. ۶(۳), pp ۳۳-۳۶.
- [۱۰] Ekinci, E., Türkmen, I., Kantarci, F. and Karakoç, M.B. (۲۰۱۹). “The improvement of mechanical, physical and durability characteristics of volcanic tuff based geopolymer concrete by using nano silica, micro silica and Styrene-Butadiene Latex additives at different ratios”. *Constr. Build. Mater*, Vol. ۲۰۱, pp ۲۵۷-۲۶۷.
- [۱۱] Davidovits, J. (۱۹۸۸a). “Soft Mineralurgy and Geopolymers”. Paper presented at the Geopolymer ۸۸, First European Conference on Soft Mineralurgy, Compiègne, France.
- [۱۲] Davidovits, J. (۱۹۸۸b). “Geopolymer Chemistry and Properties”. Paper presented at the Geopolymer ۸۸, First European Conference on Soft Mineralurgy, Compiègne, France.
- [۱۳] Davidovits, J. (۱۹۹۱). “Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials”. *J. Therm. Anal*, Vol. ۳۷, pp ۱۶۳۳-۱۶۵۶.
- [۱۴] Van Jaarsveld, J.G.S., van Deventer, J.S.J. and Lukey, G.C. (۲۰۰۲). “The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based geopolymers”. *Chem. Eng. J*, Vol. ۸ (۱-3), pp 63-73.
- [۱۵] De Silva, P., Sagoe-Crenstil, K. and Sirivivatnanon, V. (۲۰۰۷). “Kinetics of geopolymerization: role of  $Al_2O_3$  and  $SiO_2$ ”. *Cem. Concr*, Vol. ۳۷(۴), pp ۵۱۲-۵۱۸.
- [۱۶] Davidovits, J., (۱۹۹۹), “Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology”. *Geopolymer ۹۹ International Conference*, France.
- [۱۷] Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J., and Rangan, B.V. (۲۰۰۴). “On the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete”. *ACI Materials Journal*, Vol. ۱۰۱(۶), pp ۴۶۷-۴۷۲.
- [۱۸] Amnadnua, K., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C. (۲۰۱۳). “Strength, water permeability: and heat evolution of high strength concrete made from the mixture of calcium carbide residue and fly ash”. *Mater. Des*, Vol. ۵۱, pp ۸۹۴-۹۰۱.
- [۱۹] Duxson, P., Provis, J.L., Lukey, G.C. and van Deventer, J.S.J. (۲۰۰۷). “The Role of Inorganic Polymer Technology in the Development of Green Concrete”. *Cement and Concrete Research*, Vol. 37(12), pp 1590-1597.
- [۲۰] Lee, W.K.W. and van Deventer, J.S.J. (۲۰۰۲). “The effects of inorganic salt contamination on the strength and durability of geopolymers”. *Colloids Surf, A* ۲۱۱۱, pp ۱۵-۱۲6.
- [۲۱] Cheng, T.W. and Chiu, J.P. (۲۰۰۳). “Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag”. *Miner.Eng*, Vol. ۱۶(۳), pp ۲۰۵-۲۱۰.

- [۲۲] Sakkas, K., Pnias, D., Nomikos, P.P. and Sofianos, A.I. (۲۰۱۴). “Potassium based geopolymer for passive fire protection of concrete tunnels linings”, Tunnell .Underground Space Technol, Vol. ۴۳, pp 148–156.
- [۲۳] Sarker, P.K., Kelly, S. and Yao, Z. (۲۰۱۴). “Effect of fire exposure on cracking: spalling and residual strength of fly ash geopolymer concrete”. Mater. Des, Vol. ۶۳, pp ۵۸۴–۵۹۲.
- [۲۴] Palomo, A., Blanco-Varela, M.T., Granizo, M.L., Puertas, F., Vazquez, T. and Grutzeck, M.W. (۱۹۹۹). “Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin”. Cem. Concr. Res, Vol. 27(7), pp 997–1000.
- [۲۵] Zhang, M., Guo, H., El-Korchi, T., Zhang, G. and Tao, M. (۲۰۱۳). “Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer”. Constr. Build. Mater, Vol. ۴۷, pp ۱۴۶۸–۱478.
- [۲۶] van Jaarsveld, J.G.S., van Deventer, J.S.J. and Lukey, G.C. (۲۰۰۳). “The Characterisation of Source Materials in Fly Ash-based Geopolymers”. Materials Letters, Vol. ۵۷(۷), pp ۱۲۷۲-۱۲۸۰.
- [۲۷] Barbosa, V.F.F., MacKenzie, K.J.D. and Thaumaturgo, C. (۲۰۰۰). “Synthesis and Characterisation of Materials Based on Inorganic Polymers of Alumina and Silica: Sodium Polysialate Polymers”. International Journal of Inorganic Materials, Vol. ۲(۴), pp ۳۰۹-۳۱۷.
- [۲۸] Xu, H. and van Deventer J.S.J. (۲۰۰۰). “The Geopolymerisation of Alumino-Silicate Minerals”. International Journal of Mineral Processing, Vol. ۵۹(۳), pp ۲۴۷-۲۶۶.
- [۲۹] Satpute Manesh B. and W.M. (۲۰۱۲). “Effect of Duration and Temperature of Curing on Compressive Strength of Geopolymer Concrete”. International Journal of Engineering and Innovative Technology, pp ۳۷۲-۳۹۱.
- [۳۰] Ahmed, M.N.S., Nuruddin, M., Demie, S. and Shafiq, N. (۲۰۱۱). “Effect of curing conditions on strength of fly ash based self-compacting geopolymer concrete”. International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering, Vol. ۵(۸), pp ۸-۲2.
- [۳۱] ASTM C۱۳۶ / C۱۳۶M-14, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, ۲۰۱۴.
- [۳۲] ASTM C۱۲۷-۱5, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, ۲۰۱۵.
- [۳۳] ASTM C۱۲۸-15, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, ۲۰۱۵.
- [۳۴] British Standards Institution, Testing Concrete: Method for Determination of the Compressive Strength of Concrete Cubes, BS۱۸۸۱: Part ۱۱۶: ۱۹۸۳, London.
- [۳۵] Muhammad, N., Baharom, S., Ghazali, N.A.M. and Alias, N.A. (۲۰۱۹). “Effect of Heat Curing Temperatures on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete”. International Journal of Engineering & Technology, Vol. ۸(۱,۲), pp ۱۵-۱۹.