

# مطالعه آزمایشگاهی نقش شرایط کیورینگ بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکاؤلن

علیرضا اسپرهم<sup>۱</sup>، امیربهادر مرادی<sup>۲</sup>

- ۱- کارشناس ارشد مهندسی زلزله، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، تهران، ایران.
- ۲- کارشناس ارشد مهندسی سازه، 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 تاثیرگذارند. یکی از این پارامترها شرایط کیورینگ شامل: دما و زمان کیورینگ، است. در این مقاله به بررسی نقش شرایط کیورینگ 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 زمانی (۱۲، ۲۴، ۳۶ و ۴۸ ساعت) عمل‌آوری شدند و از نمونه‌ها آزمون مقاومت فشاری گرفته شد تا تاثیر شرایط کیورینگ بر مقاومت فشاری بررسی شود. نتایج نشان داد افزایش زمان و دمای کیورینگ سبب افزایش مقاومت فشاری می‌شود.

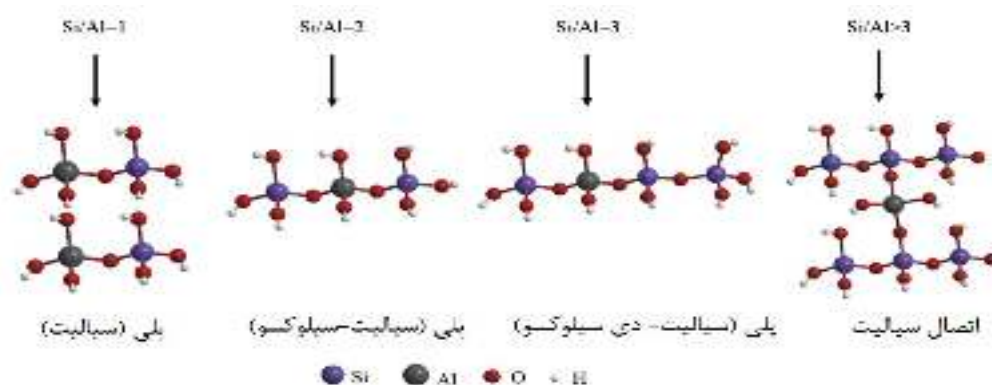
کلمات کلیدی: بتن ژئوپلیمری، خاکستر بادی، دمای کیورینگ، زمان کیورینگ، مقاومت فشاری.

## 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>

دی‌اکسید 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 Davidovits شیمیدان برجسته فرانسوی، به عنوان بایندهای جدیدی از خانواده پلیمرهای معدنی معرفی شد [۱۰]. وی همچنین استفاده از نام poly(sialate) 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

ژئوپلیمرها مواد آلومیناسیلیکاتی غیرآلی هستند که از ترکیب منبع اولیه ژئوپلیمریزاسیون<sup>۲</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. منبع آلومیناسیلیکاتی بسته به خواص مورد نیاز، هزینه و در دسترس بودن می‌تواند طبیعی مانند زئولیت، صنعتی مانند متاکائولن و یا ضایعاتی مانند خاکستر بادی یا سرباره کوره آهن گدازی باشد. یکی از انواع منابع آلومیناسیلیکاتی خاکستر بادی است. یکی از منابع آلومیناسیلیکاتی مورد استفاده در ساخت بتن و سیمان‌های ژئوپلیمری متاکائولن است. متاکائولن از کلسینه کردن کائولن در دمای ۶۰۰-۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به دست می‌آید. در این مقاله از متاکائولن به عنوان منبع آلومیناسیلیکاتی برای ساخت بتن 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 هیدروکسید سدیم<sup>۳</sup> یا پتاسیم<sup>۴</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، کیورینگ، نوع منبع آلومیناسیلیکاتی، محتوای اکسیدهای

<sup>۲</sup> Raw material

<sup>۳</sup> NaOH

<sup>۴</sup> KOH

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، کیورینگ است که خود شامل دو فاکتور دما و زمان کیورینگ است. در این زمینه پژوهش‌هایی توسط محققان انجام شده است که در ادامه به اختصار به آنها پرداخته می‌شود. Palomo و دیگران [۲۴] در پژوهش در مورد نقش کیورینگ بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی نتیجه گیری کردند که افزایش دمای کیورینگ روند ژئوپلیمریزاسیون را سرعت می‌بخشد و به همراه فاکتور زمان کیورینگ نقش مستقیم بر مقاومت‌های مکانیکی بتن دارد. این پژوهشگران عنوان کردند که دما و زمان بیشتر کیورینگ سبب دستیابی به مقاومت فشاری بیشتر بتن می‌شود. van Jaarsveld و همکاران [۱۴] نیز در پژوهشی در این رابطه نتیجه‌گیری کردند که کیورینگ از پارامترهای تاثیرگذار بر مقاومت فشاری ژئوپلیمرها است. این پژوهشگران از دماهای خیلی بالا نیز برای کیورینگ نمونه‌های بتن ژئوپلیمری استفاده کردند و دریافتند این شرایط کیورینگ به دلیل ایجاد ترک تاثیر منفی بر خواص بتن دارد و در پایان دماهای میانه را برای کیورینگ بتن ژئوپلیمری پیشنهاد کردند. Hardjito 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 نتیجه‌گیری کردند که افزایش دمای کیورینگ 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 Satpute Manesh و همکاران [۲۹] نتیجه‌گیری کردند که در دمای بالاتر از ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت فشاری بتن افزایش قابل ملاحظه‌ای پیدا نمی‌کند. در رابطه با زمان کیورینگ Palomo و دیگران [۲۴] نتیجه‌گیری کردند که با افزایش زمان کیورینگ مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری افزایش می‌یابد. Hardjito و همکاران [۱۷] نیز در پژوهش خود نتیجه‌گیری کردند که با کیورینگ تا ۲۴ ساعت مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری افزایش می‌یابد اما در زمان‌های بیشتر ۲۴ ساعت تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقاومت فشاری اتفاق نمی‌افتد در حالی که Ahmed و همکاران [۳۰] نتیجه‌گیری در زمان‌های بیشتر ۴۸ ساعت تغییر محسوسی در مقاومت فشاری دیده نمی‌شود.

در این پژوهش آزمایشگاهی سعی شد که در حد توان نقش شرایط کیورینگ بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی کلاس F، مورد مطالعه قرار گیرد. در همین راستا دو فاکتور دما و زمان کیورینگ مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های بتن ژئوپلیمری در شرایط مختلف دمایی و زمانی کیورینگ 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 تحلیل شدند.

## ۲. مواد

منبع اصلی ژئوپلیمریزاسیون در این مقاله متاکائولن 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 زیست فناوری خریداری شد. آنالیز 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 دانه‌بندی شد. در این پژوهش، از شن در ۲ اندازه ۱۰ و ۷ میلی‌متری استفاده شد. آزمایش وزن مخصوص و جذب آب مطابق با استاندارد ASTM C 127 [۳۱] از شن مصرفی، گرفته شد. این آزمایش از ماسه نیز مطابق با استاندارد ASTM C 128 [۳۲]، به عمل آمد که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین ضریب نرمی ماسه مطابق با استاندارد ASTM C 136 [۳۳]،  $3/0.113$ ، میزان رد شده از الک شماره ۲۰۰،  $0/72$  درصد و ارزش ماسه‌ای نیز بر اساس استاندارد ASTM D 2419 [۳۴]،  $73$  اندازه‌گیری شد. آب مصرفی نیز آب لوله کشی شهر تهران بود. روان‌کننده مورد استفاده نیز از نوع پلی‌کربوکسیلاتی با وزن مخصوص  $1/1$  گرم بر سانتی متر مکعب، بود که از کلنیک تخصصی بتن خریداری شده بود.

جدول ۱- آنالیز XRF متاکائولن

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MnO	L.O.I
54.45	30.21	1.23	1.41	4.89	0.10	4.05	2.32	0.11	1.41



شکل ۲- تصویر متاکائولین

جدول ۲- آنالیز شیمیایی محلول‌های هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم

NaOH			Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>		
Chemical substance	Result	Unit	Chemical substance	Result	Unit
NaOH	98	%	SiO <sub>2</sub>	30.00	%
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	1	%	Na <sub>2</sub> O	14.50	%
NaCl	200	ppm	Water	55.50	%
Fe	6	ppm			
SiO <sub>2</sub>	15.7	ppm			
Appearance	White flake		Appearance	Clear liquid	

جدول ۳- جذب آب و وزن مخصوص سنگدانه‌ها

Material	SSD Specific gravity (gr/cm <sup>3</sup> )	Water absorption (%)
Coarse aggregates	2.62	1.3
Fine aggregates	2.59	3.2

### 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	متاکائولن
Kg/m <sup>۳</sup>	30	14	840	840	210	140	350

در این طرح اختلاط:

- نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم برابر با ۱/۵ است.
- میزان روان کننده ۴ درصد وزنی متاکائولن است.
- نسبت شن به ماسه برابر ۱ است.
- نسبت شن ۷ به ۱۰ میلی متری برابر ۱ است.
- نسبت بایندر به سنگدانه ۰/۲ است.
- نسبت 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 استیرر 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 متاکائولن، شن و ماسه از زیر به درشت در میکسر پرتابی بتن ریخته و به مدت ۳ دقیقه به صورت خشک میکس 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 بتن مطابق با استاندارد ASTM قالب‌بندی شدند. به منظور تراکم نمونه‌ها به مدت ۱۰ ثانیه روی میز ویبره، متراکم شدند. دماهای کیورینگ مورد پژوهش در این مقاله ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سانتی‌گراد بود. به منظور بررسی این فاکتور، در بخش اول نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در این دماها کیورینگ شدند. پس از پایان کیورینگ نمونه‌ها در دمای محیط آزمایشگاه قرار گرفتند. از نمونه‌ها آزمون مقاومت فشاری مطابق با استاندارد BS 1881: Part 116 [۳۵] گرفته شد. پس از مشخص شدن نتایج این بخش در بخش بعدی به منظور بررسی فاکتور زمان کیورینگ، نمونه‌ها در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۱۲، ۲۴، ۳۶ و ۴۸ ساعت کیورینگ شدند و نمونه‌ها در پایان زمان کیورینگ از آون خارج و در دمای محیط آزمایشگاه قرار گرفتند. از نمونه‌ها آزمون مقاومت فشاری مطابق با استاندارد BS 1881: Part 116 [۳۵] گرفته شد. نتایج آزمون مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه در بخش نتایج و بحث ارائه خواهد شد.

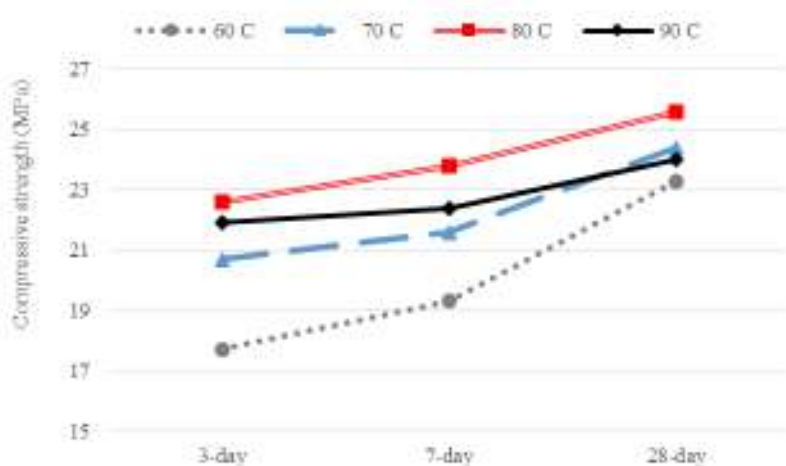
#### ۴. نتایج و بحث

نتایج بخش اول مربوط به بررسی اثر دمای کیورینگ بر مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن در شکل ۳ ارائه شده است. نتایج شکل ۳ نشان داد با افزایش دمای کیورینگ از ۶۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه بتن افزایش یافت و این افزایش مقاومت در مقاومت فشاری ۳ و ۷ روزه بسیار محسوس‌تر بود. همچنین با توجه به نتایج مشاهده شد که بر خلاف مقاومت فشاری ۳ و ۷ روزه، مقاومت ۲۸ روزه نمونه‌ها به هم نزدیک بود.

افزایش دمای کیورینگ سبب افزایش نسبی میزان ژئوپلیمریزاسیون و افزایش قابل ملاحظه سرعت روند ژئوپلیمریزاسیون می‌شود [۱۶، 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 در بتن ژئوپلیمری بیشتر می‌شود. در واقع به همین دلیل است که بهبود مقاومت فشاری با افزایش دمای کیورینگ، در مقاومت ۳ و ۷ روزه محسوس‌تر و قابل ملاحظه‌تر است. اما از سوی دیگر، افزایش بیشتر دما به ۹۰ درجه سانتی‌گراد اگرچه سبب بهبود مقاومت فشاری ۳ و ۷ روزه نمونه‌ها شد اما موجب کاهش

مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها شد. افزایش دما به بیش از دمای بهینه، سبب افزایش حفره‌ها و تخلخل در بتن به دلیل شکل گرفتن بسیار سریع ساختار ژئوپلیمری، می‌شود. در نتیجه مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری کاهش می‌یابد [۳۶].

جدول ۵ درصد کسب مقاومت نهایی (۲۸ روزه) در سن ۳ و ۷ روزگی نمونه‌ها را در دماهای مختلف کیورینگ نشان می‌دهد. همچنین تصویر نمونه بتن ژئوپلیمری نیز در شکل ۴ ارائه شده است.



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

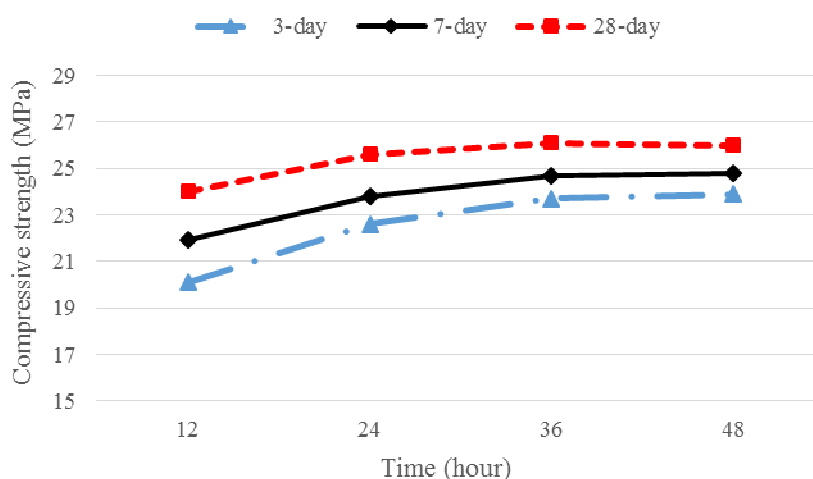
جدول ۵- نقش دمای کیورینگ بر مقاومت زودرس بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن

دمای کیورینگ (درجه سانتی-گراد)	تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ روزه نسبت به ۶۰ درجه سانتی گراد (%)	تغییرات مقاومت فشاری ۷ روزه نسبت به ۶۰ درجه سانتی گراد (%)	تغییرات مقاومت فشاری ۳ روزه نسبت به ۶۰ درجه سانتی گراد (%)	درصد کسب مقاومت در سن ۷ روزگی	درصد کسب مقاومت نهایی (۲۸ روزه) در سن ۳ روزگی
60	-	-	-	83	80
70	5	12	17	89	85
80	10	23	28	93	88
90	3	16	24	94	91



شکل ۴- تصویر نمونه ساخته شده بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن

نتایج بخش دوم در خصوص تاثیر زمان کیورینگ بر مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن در شکل ۵ ارائه شده است. نتایج شکل ۵ نشان می‌دهد در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد، با افزایش زمان کیورینگ از ۱۲ تا ۳۶ ساعت مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه بتن نیز افزایش می‌یابد. این موضوع نیز می‌تواند مربوط نقش حرارت در تسریع روند و میزان واکنش ژئوپلیمریزاسیون باشد [۱۴ و ۱۷]. با افزایش زمان کیورینگ از ۱۲ ساعت تا ۳۶ ساعت مقاومت فشاری به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد اما بر خلاف دمای کیورینگ، این افزایش مقاومت در هر ۳ مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه محسوس و قابل ملاحظه است. همچنین با توجه به جدول ۶ با افزایش زمان کیورینگ درصد مقاومت‌های زودرس بتن ژئوپلیمری نیز افزایش می‌یابد. اما بعد از ۳۶ ساعت، با افزایش زمان کیورینگ از ۳۶ ساعت به ۴۸ ساعت، تغییرات مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه به میزان تقریباً ۱ درصد افزایش می‌یابد. در واقع می‌توان گفت افزایش زمان کیورینگ بیشتر از ۳۶ ساعت، باعث ایجاد تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقاومت فشاری بتن نمی‌شود. این نتیجه با نتایج Hardjito و همکاران [۱۷] مطابقت و با Ahmed و همکاران [۳۰] نتایج مطابقت ندارد.



شکل ۵- تاثیر زمان‌های مختلف کیورینگ بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری (دمای کیورینگ ۸۰ درجه سانتی‌گراد)

جدول ۶- نقش زمان کیورینگ بر مقاومت زودرس بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن

زمان کیورینگ (ساعت)	تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ روزه نسبت به ۱۲ ساعت (%)	تغییرات مقاومت فشاری ۷ روزه نسبت به ۱۲ ساعت (%)	تغییرات مقاومت فشاری ۳ روزه نسبت به ۱۲ ساعت (%)	درصد کسب مقاومت در نهایی (۲۸ روزه) در سن ۷ روزگی	درصد کسب مقاومت در نهایی (۲۸ روزه) در سن ۳ روزگی
12	-	-	-	91	84
24	7	9	13	93	88
36	9	13	18	94	90
48	8	13	19	95	92

## ۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله سعی شد در حد توان به مطالعه نقش کیورینگ بر مقاومت فشاری ۳، 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 کیورینگ یعنی زمان و دمای کیورینگ و انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری، نتایج این آزمایش‌ها گردآوری و تجزیه تحلیل شد و در پایان موارد زیر به عنوان نتایج مشخص این مقاله ارائه می‌شود:

- پارامتر کیورینگ از فاکتورهای تاثیر گذار بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن است. این پارامتر شامل دو فاکتور دما و زمان کیورینگ است.
- افزایش دمای کیورینگ از ۶۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد، سبب افزایش مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن می‌شود اما این افزایش مقاومت فشاری در مقاومت فشاری ۳ و ۷ روزه محسوس‌تر است. همچنین افزایش بیشتر دما تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد سبب کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه می‌شود.
- افزایش دمای کیورینگ سبب افزایش مقاومت زود رس (Early strength) بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن می‌شود.
- افزایش زمان کیورینگ سبب افزایش مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن می‌شود و بر خلاف افزایش دما، این افزایش مقاومت فشاری در هر ۳ مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه قابل ملاحظه است. همچنین با افزایش زمان کیورینگ به بیش از ۳۶ ساعت، تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه بتن دیده نمی‌شود.
- مشابه با افزایش دمای کیورینگ، افزایش زمان کیورینگ سبب افزایش مقاومت زود رس (Early strength) بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن می‌شود.

## 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 ۱۵-9.
- [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 601-605.
- [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.



- [9] Bashir, I., Kapoor, K. and Sood, H. (2017). "An Experimental Investigation on the Mechanical Properties of Geopolymer Concrete". International Journal of Latest Research in Science and Technology, Vol. 9(3), pp 33-36.
- [10] Ekinci, E., Türkmen, I., Kantarci, F. and Karakoç, M.B. (2019). "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. 201, pp 257-267.
- [11] Davidovits, J. (1998a). "Soft Mineralurgy and Geopolymers". Paper presented at the Geopolymer '98, First European Conference on Soft Mineralurgy, Compiègne, France.
- [12] Davidovits, J. (1998b). "Geopolymer Chemistry and Properties". Paper presented at the Geopolymer '98, First European Conference on Soft Mineralurgy, Compiègne, France.
- [13] Davidovits, J. (1991). "Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials". J. Therm. Anal, Vol. 37, pp 1633-1656.
- [14] Van Jaarsveld, J.G.S., van Deventer, J.S.J. and Lukey, G.C. (2002). "The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based geopolymers". Chem. Eng. J, Vol. 8(1-3), pp 63-73.
- [15] De Silva, P., Sagoe-Crenstil, K. and Sirivivatnanon, V. (2007). "Kinetics of geopolymerization: role of  $Al_2O_3$  and  $SiO_2$ ". Cem. Concr, Vol. 37(4), pp 512-518.
- [16] Davidovits, J., (1999), "Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology". Geopolymer '99 International Conference, France.
- [17] Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J., and Rangan, B.V. (2004). "On the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete". ACI Materials Journal, Vol. 107(6), pp 467-472.
- [18] Amnadnua, K., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C. (2013). "Strength, water permeability: and heat evolution of high strength concrete made from the mixture of calcium carbide residue and fly ash". Mater. Des, Vol. 51, pp 894-901.
- [19] Duxson, P., Provis, J.L., Lukey, G.C. and van Deventer, J.S.J. (2007). "The Role of Inorganic Polymer Technology in the Development of Green Concrete". Cement and Concrete Research, Vol. 37(12), pp 1590-1597.
- [20] Lee, W.K.W. and van Deventer, J.S.J. (2002). "The effects of inorganic salt contamination on the strength and durability of geopolymers". Colloids Surf, A 111, pp 15-26.
- [21] Cheng, T.W. and Chiu, J.P. (2003). "Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag". Miner.Eng, Vol. 16(3), pp 205-210.
- [22] Sakkas, K., Pnias, D., Nomikos, P.P. and Sofianos, A.I. (2014). "Potassium based geopolymer for passive fire protection of concrete tunnels linings", Tunnell .Underground Space Technol, Vol. 43, pp 148-156.
- [23] Sarker, P.K., Kelly, S. and Yao, Z. (2014). "Effect of fire exposure on cracking: spalling and residual strength of fly ash geopolymer concrete". Mater. Des, Vol. 53, pp 584-592.
- [24] Palomo, A., Blanco-Varela, M.T., Granizo, M.L., Puertas, F., Vazquez, T. and Grutzeck, M.W. (1999). "Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin". Cem. Concr. Res, Vol. 27(7), pp 997-1000.
- [25] Zhang, M., Guo, H., El-Korchi, T., Zhang, G. and Tao, M. (2013). "Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer". Constr. Build. Mater, Vol. 47, pp 1468-1478.

- [٢٢] van Jaarsveld, J.G.S., van Deventer, J.S.J. and Lukey, G.C. (٢٠٠٣). "The Characterisation of Source Materials in Fly Ash-based Geopolymers". *Materials Letters*, Vol. ٥٧(٧), pp ١٢٧٢-١280.
- [٢٣] Barbosa, V.F.F., MacKenzie, K.J.D. and Thaumaturgo, C. (٢٠٠٠). "Synthesis and Characterisation of Materials Based on Inorganic Polymers of Alumina and Silica: Sodium Polysialate Polymers". *International Journal of Inorganic Materials*, Vol. ٢(٢), pp ٢٠٩-٢١٧.
- [٢٤] Xu, H. and van Deventer J.S.J. (٢٠٠٠). "The Geopolymerisation of Alumino-Silicate Minerals". *International Journal of Mineral Processing*, Vol. ٥٩(٣), pp ٢٢٧-٢٢٢.
- [٢٥] Satpute Manesh B. and W.M. (٢٠١٢). "Effect of Duration and Temperature of Curing on Compressive Strength of Geopolymer Concrete". *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, pp ٢٧٢-٢٩١.
- [٢٦] Ahmed, M.N.S., Nuruddin, M., Demie, S. and Shafiq, N. (٢٠١١). "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. ٥(٨), pp ٨-١2.
- [٢٧] ASTM C١٢٧-١5, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, ٢٠١٥.
- [٢٨] ASTM C١٢٨-15, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, ٢٠١٥.
- [٢٩] ASTM C١٣٢ / C١٣٢M-14, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, ٢٠١٤.
- [٣٠] ASTM D٢٤١٩-14, Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, ٢٠١٤.
- [٣١] Muhammad, N., Baharom, S., Ghazali, N.A.M. and Alias, N.A. (٢٠١٩). "Effect of Heat Curing Temperatures on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete". *International Journal of Engineering & Technology*, Vol. ٨(١,٢), pp ١٥-١٩.
- [٣٢] Rovnaník, P. (٢٠١٠). "Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer". *Construction and Building Materials*. Vol. ٢٢(٧), pp ١١٧٢-٨٣.