



# Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir



## Evaluation of setting time and compressive strength of geopolymer paste containing blast furnace slag and zeolite

Maryam Mohammadi Fatideh<sup>1</sup>, Malek Mohammad Ranjbar Taklimi<sup>2\*</sup>

1- MSc Student of Structural Engineering, Department of Civil Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

### ABSTRACT

Production of Portland Cement (PC) is a highly energy-intensive process and causes significant environmental damages. Thus scientists are always after ways to reduce these negative effects and find a more efficient process of producing cement. Geopolymers are amongst materials that are used as a substitute for cement in concrete. Geopolymer consists of one or more source materials containing alumino-silicate with an alkali activator. This study is done for the purpose of evaluating the setting time and compressive strength of geopolymer paste containing blast furnace slag and zeolite. Hence the setting time of geopolymer paste based on blast furnace slag and zeolite activated with sodium hydroxide solution of concentrations 6, 8, 10 and 12 molar and sodium silicate modulus of 2 was measured. In the next step, compressive strength of geopolymer paste samples under curing were gauged in the lab ambient temperature and also in the 60°C temperature. Results showed that with an increase in sodium hydroxide concentration, the setting time increased. Also compressive strength of geopolymer paste containing slag and zeolite rose with the raise of sodium hydroxide concentration. Geopolymer paste samples based on slag, showed increase in compressive strength in sodium hydroxide concentrations 6, 8 and 10 molar. Though with an increase in concentration of sodium hydroxide to 12 molar, compressive strength decreased. Also with an increase in the percentage of zeolite substitute in the source material, setting time increased but compressive strength decreased. Samples cured in 60°C temperature showed better strength, too.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 15 December 2018

**Revise Date:** 04 March 2019

**Accept Date:** 01 May 2019

### Keywords:

Alumino-silicate

Curing

Geopolymer

Sodium hydroxide

Sodium silicate

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.161256.1740

\*Corresponding author: Malek Mohammad Ranjbar Taklimi

Email address: ranjbar@guilan.ac.ir

## ارزیابی زمان گیرش و مقاومت فشاری خمیر ژئوپلیمر حاوی سرباره کوره آهنگدازی و ژئولیت

مریم محمدی فتیده<sup>۱</sup>، ملک محمد رنجبر تکلیمی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران سازه، دانشکده فنی دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۲- دانشیار گروه عمران، دانشکده فنی دانشگاه گیلان، رشت، ایران

### چکیده

از آنجا که تولید سیمان پرتلند فرآیند بسیار انرژی بری است و آثار مخرب زیست محیطی به همراه دارد، محققین همواره در صدد یافتن راهکاری برای کاهش مضرات و بهینه سازی این فرآیند می باشند. ژئوپلیمرها از جمله موادی هستند که جهت جایگزینی سیمان در بتن مورد استفاده قرار می گیرند. ژئوپلیمر از ترکیب یک یا چند ماده پایه که حاوی آلومینوسیلیکات است با فعال ساز قلیایی حاصل می شود. این بررسی به منظور ارزیابی زمان گیرش و مقاومت فشاری خمیر ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهنگدازی و ژئولیت انجام گرفته است. بدین منظور اندازه گیری زمان گیرش خمیر ژئوپلیمر بر پایه سرباره کوره آهنگدازی و ژئولیت فعال سازی شده با هیدروکسید سدیم ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ مولار و سیلیکات سدیم با مدول سیلیکاتی ۲ انجام شد. در مرحله بعد مقاومت فشاری نمونه های خمیر ژئوپلیمری عمل آوری شده در دمای محیط آزمایشگاه و نیز دمای ۶۰ درجه سانتی گراد اندازه گیری شد. نتایج نشان داد که افزایش غلظت هیدروکسید سدیم زمان گیرش را افزایش می دهد، همچنین مقاومت فشاری نمونه خمیر ژئوپلیمر حاوی سرباره و ژئولیت با بالا رفتن غلظت هیدروکسید سدیم افزایش یافته است. نمونه های خمیر بر پایه سرباره با بالا رفتن غلظت هیدروکسید سدیم در غلظت های ۶، ۸ و ۱۰ مولار با افزایش مقاومت فشاری مواجه شدند اما با افزایش غلظت هیدروکسید سدیم به ۱۲ مولار مقاومت فشاری کاهش یافته است. همچنین با بالا رفتن درصد جایگزینی ژئولیت در ماده پایه زمان گیرش افزایش و مقاومت فشاری کاهش یافت. نمونه های عمل آوری شده در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد نیز مقاومت بهتری از خود نشان دادند

کلمات کلیدی: آلومینوسیلیکات، ژئوپلیمر، سیلیکات سدیم، هیدروکسید سدیم، عمل آوری

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi:
۱۳۹۷/۰۹/۲۴	۱۳۹۷/۱۲/۱۳	۱۳۹۸/۰۲/۱۱	۱۳۹۸/۰۲/۱۱	۱۴۰۰/۰۲/۳۰	10.22065/JSCE.2019.161256.1740
<p>ملک محمد رنجبر تکلیمی ranjbar@guilan.ac.ir</p>					<p>*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:</p>

## ۱- مقدمه

سیمان یک ماده پر مصرف ساختمانی می باشد که تولید و مصرف آن روز به روز در حال افزایش است. اما تولید سیمان پرتلند مستلزم مصرف انرژی و انتشار گاز گلخانه ای می باشد. به طوری که به ازای تولید هر یک تن سیمان پرتلند، یک تن دی اکسید کربن وارد محیط زیست می شود. این موضوع محققین را به سوی مطالعه به منظور یافتن راهکاری جهت کاهش آسیب های زیست محیطی ترغیب نموده است [۱-۳].

دانشمند فرانسوی دیویدویتز، در سال ۱۹۷۹ ژئوپلیمر ۱ را به عنوان ماده ای به منظور جایگزینی سیمان در بتن معرفی کرد. ژئوپلیمر از ترکیب یک یا چند ماده پایه که حاوی آلومینوسیلیکات ۲ می باشد با محلول قلیایی حاصل می شود که این واکنش منجر به شکل گیری پیوند پلیمری Si-O-Al-O- می گردد [۴-۵].

از جمله موادی که به عنوان ماده پایه برای ساخت ژئوپلیمر مورد استفاده قرار می گیرد می توان به سرباره کوره آهنگدازی ۳، خاکستر بادی ۴، گل سرخ ۵، زئولیت ۶ و... اشاره کرد. ماده فعال کننده قلیایی نیز معمولاً سیلیکات سدیم به همراه هیدروکسید سدیم یا هیدروکسید پتاسیم می باشد. نتایج تحقیقات نشان داده است که استفاده از هیدروکسید پتاسیم می تواند باعث افزایش مقاومت فشاری شود [۶]. تاکنون محققین مطالعاتی در زمینه بررسی خواص ژئوپلیمر انجام دادند که از آن جمله می توان به استحکام بالاتر، نفوذپذیری کمتر، مقاومت به خوردگی بیشتر در مقایسه با سیمان پرتلند اشاره کرد [۷-۹].

Chindapasirt و Rattanasak در سال ۲۰۰۹ از خاکستر بادی به عنوان ماده پایه برای ساخت ملات ژئوپلیمر استفاده کردند. از هیدروکسید سدیم با غلظت های مختلف ۵، ۱۰ و ۱۵ مولار استفاده شد. نمونه ملات ساخته شده به مدت ۱۸ ساعت در دمای ۶۵ درجه سانتی گراد عمل آوری شد. نتایج مقاومت فشاری روی نمونه های ملات نشان داد که در غلظت ۱۰ مولار هیدروکسید سدیم و در نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم برابر ۱، نمونه ها مقاومت بهتری داشته اند [۱۰].

Hanjitsuwan و همکاران در سال ۲۰۱۴ از خاکستری بادی کلاس c برای ساخت نمونه خمیر ژئوپلیمر استفاده کردند. هیدروکسید سدیم با غلظت های ۰.۸، ۱.۰، ۱.۲، ۱.۵ و ۱.۸ مولار مورد استفاده قرار گرفت. همچنین نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم برابر ۱/۵ و نسبت محلول های قلیایی به ماده پایه، ۰/۴ بود. نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد عمل آوری شدند. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت هیدروکسید سدیم زمان گیرش اولیه و نهایی افزایش یافت، همچنین مقاومت فشاری نمونه های خمیر به قطر ۳ سانتیمتر و ارتفاع ۶ سانتیمتر در سن ۷ روز اندازه گیری شد. افزایش غلظت هیدروکسید سدیم سبب افزایش مقاومت فشاری گردید [۱۱].

Gorhan و همکاران در سال ۲۰۱۷ از متاکائولن ۷ و خاکستر بادی به عنوان ماده پایه برای ساخت خمیر ژئوپلیمر استفاده کردند، همچنین محلول قلیایی هیدروکسید سدیم با غلظت ۹ مولار بکار بردند، نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم برابر ۲ بود. عمل آوری در دمای ۶۰ و ۸۰ درجه سانتی گراد به مدت ۴،۲ و ۲۴ ساعت انجام گرفت. نتایج نشان داد که در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲۴ ساعت نمونه ها مقاومت بهتری از خود نشان دادند [۱۲].

Rajasekaran و Saha در سال ۲۰۱۷ از خاکستر بادی به عنوان ماده پایه برای ساخت خمیر ژئوپلیمر استفاده کردند، همچنین سرباره کوره آهنگدازی با نسبت های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد جایگزین ماده پایه شد. نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم برابر ۱

1 Geopolymer  
2 Alumino-silicate  
3 Blast furnace slag  
4 Fly ash  
5 Red mud  
6 Zeolite  
7 Metakaolin

و نسبت مواد محلول به مواد پایه برابر ۰/۴ بود. نتایج نشان داد که با افزایش مقدار جایگزینی ماده پایه با سرباره زمان گیرش کاهش یافت، اما مقاومت فشاری نمونه با زیاد شدن مقدار سرباره افزایش پیدا کرد. [۱۳].

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

در این قسمت، مصالح مورد استفاده و همچنین آنالیز شیمیایی سرباره<sup>۸</sup> و زئولیت<sup>۹</sup> مصرف شده برای ساخت خمیر ژئوپلیمر و نوع فعال کننده‌های قلیایی معرفی شده است. این بررسی به منظور تعیین زمان گیرش و مقاومت فشاری نمونه خمیر ژئوپلیمر انجام شده است. به همین منظور ابتدا، اندازه‌گیری زمان گیرش خمیر ژئوپلیمر حاوی ماده پایه سرباره انجام شد. در مرحله بعد، زمان گیرش خمیر حاوی ۹۰ درصد سرباره و ۱۰ درصد زئولیت و ۸۰ درصد سرباره و ۲۰ درصد زئولیت اندازه‌گیری شد. همچنین تعیین مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین ۷، ۱۴، ۲۸ و ۵۶ روز برای خمیر حاوی سرباره و نمونه‌های خمیر حاوی سرباره و زئولیت انجام شد. نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم در تمامی نمونه‌ها برابر ۱/۵ و نسبت مواد محلول قلیایی به ماده پایه ۰/۳۵ در نظر گرفته شد.

## ۲-۱- مشخصات مصالح مورد استفاده

### ۲-۱-۱- سرباره و زئولیت

از سرباره کوره آهن‌گدازی به‌عنوان ماده پایه حاوی آلومینوسیلیکات<sup>۱۰</sup> استفاده گردید، همچنین از زئولیت از نوع کلینوپتیلولیت<sup>۱۱</sup> به‌عنوان جایگزین بخشی از ماده پایه برای ساخت خمیر استفاده شد. آنالیز شیمیایی سرباره و زئولیت در جدول ۱ آورده شده است، همچنین شکل ۱ ماده سرباره و زئولیت را نشان می‌دهد.

جدول ۱: آنالیز شیمیایی سرباره و زئولیت (درصد وزنی)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	
۳۴	۱۲	۳۴	۰/۶	۱۰	۱/۸	۰/۸	۱/۱۵	سرباره
۶۸/۹۵	۱۱/۱۴	۴/۸۳	۰/۹۷	۰/۷۹	۰/۰۶۸	۰/۹۵	۰/۹۵	زئولیت



شکل ۱: سمت راست، سرباره؛ سمت چپ، زئولیت

<sup>8</sup> Slag

<sup>9</sup> Zeolite

<sup>10</sup> Alumino-silicate

<sup>11</sup> Clinoptilolite

## ۲-۱-۲-۲- محلول قلیایی

به طور کلی هر ماده قابل حل شدن که بتواند PH واکنش را افزایش دهد و فرآیند حل شدن ماده پودری را سرعت بخشد می تواند یک منبع قلیایی باشد. در این بررسی محلول فعال کننده قلیایی که مورد استفاد قرار گرفت، سیلیکات سدیم با مدول سیلیکاتی ۲ بود؛ نسبت  $\text{SiO}_2$  به  $\text{Na}_2\text{O}$  مدول سیلیکاتی نام دارد. همچنین از هیدروکسید سدیم با درجه خلوص ۹۸ درصد استفاده گردید. هیدروکسید سدیم با غلظت های مختلف ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ مولار ساخته شد. آماده سازی محلول قلیایی حتما باید ۲۴ ساعت قبل از ساخت ژئوپلیمر صورت گیرد تا محلول فرصت هم دما شدن با محیط را داشته باشد.

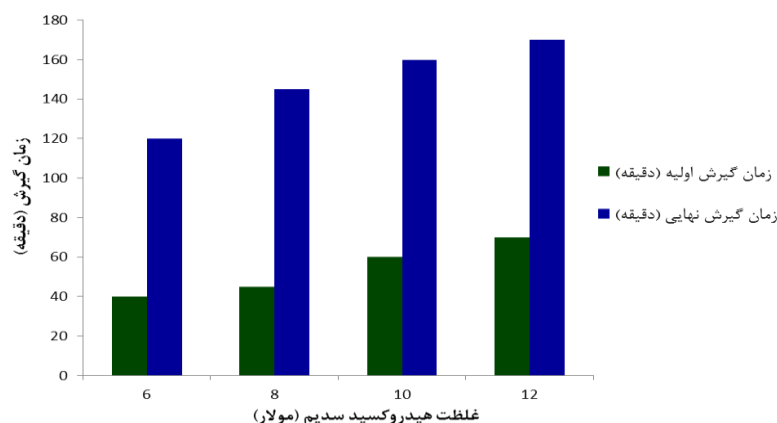
## ۲-۲-۲- ساخت نمونه های آزمایشگاهی

### ۲-۲-۲-۱- آزمایش زمان گیرش

بر مبنای استاندارد ASTM C191، زمان گیرش اولیه هنگامی خواهد بود که سوزن دستگاه ویکات<sup>۱۲</sup> در مدت ۳۰ ثانیه ۲۵ میلیمتر داخل خمیر نفوذ کند، زمان گیرش نهایی زمانی است که سوزن بوضوح داخل خمیر فرو نرود [۱۴]. بدین منظور ابتدا ماده پایه به همراه هیدروکسید سدیم در غلظت های مختلف ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ مولار به مدت ۲ دقیقه با یکدیگر مخلوط شدند، سپس سیلیکات سدیم به مخلوط اضافه گردید و عملیات اختلاط به مدت ۲ دقیقه دیگر تکرار شد. پس از ساخت خمیر، ظرف دستگاه ویکات را از خمیر پر کرده و سطح آن را صاف می کنیم و ظرف را زیر دستگاه قرار داده و سوزن ویکات تنظیم می شود. نتایج آزمایش زمان گیرش اولیه و نهایی خمیر ژئوپلیمر با پایه سرباره و غلظت های مختلف ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ مولار هیدروکسید سدیم در جدول ۲ و شکل ۲ گزارش شده اند.

جدول ۲: گیرش اولیه و نهایی خمیر ژئوپلیمر بر پایه سرباره

ماده پایه	غلظت هیدروکسید سدیم (مولار)	زمان گیرش اولیه (دقیقه)	زمان گیرش نهایی (دقیقه)
سرباره	۶	۴۰	۱۲۰
۱۰۰ درصد	۸	۴۵	۱۴۵
	۱۰	۶۰	۱۶۰
	۱۲	۷۰	۱۷۰



شکل ۲: تاثیر غلظت هیدروکسید سدیم بر زمان گیرش اولیه و نهایی خمیر ژئوپلیمر حاوی سرباره

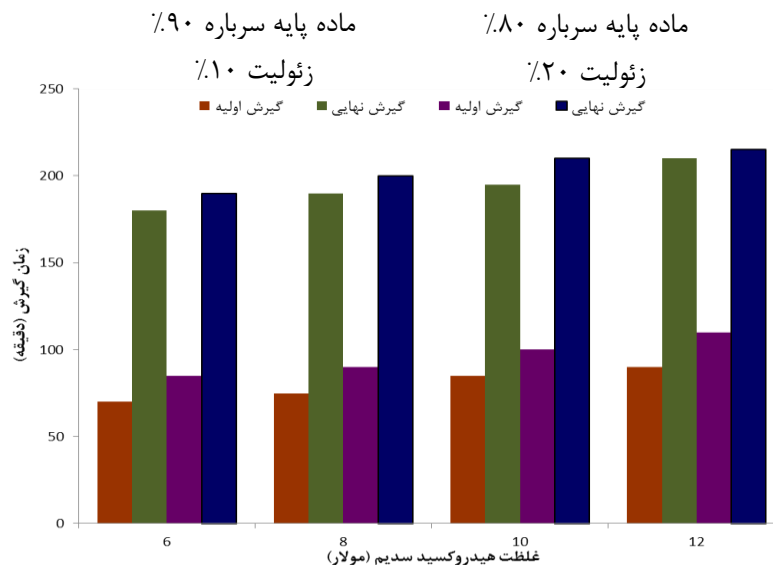
<sup>12</sup> Vicat

همان طور که در شکل ۲ مشاهده می شود با افزایش غلظت هیدروکسید سدیم، زمان گیرش اولیه و نهایی افزایش پیدا کرد. علت آن است که با افزایش غلظت هیدروکسید سدیم انحلال آلومینا و سیلیکا افزایش می یابد و در نتیجه زمان گیرش زیاد می شود. این مساله با نتایج به دست آمده در مطالعه محققین دیگر نیز همخوانی دارد. Chindaprasirt و همکاران بیان کردند که زمان گیرش به مقدار یون  $Ca^{2+}$  در سیستم بستگی دارد. در مولاریته های بالا انحلال آلومینا و سیلیکا زیادتر می شود و مانع افزایش بیشتر یون کلسیم در سیستم می شود و به همین دلیل زمان گیرش افزایش می یابد [۱۵].

به منظور بررسی اثر ژئولیت بر زمان گیرش اولیه و نهایی، در مرحله بعد ژئولیت به میزان ۱۰ و ۲۰ درصد، جایگزین سرباره شد و مجدداً مراحل تعیین گیرش اولیه و ثانویه برای خمیر ژئوپلیمر حاوی سرباره و ژئولیت انجام شد. نتایج زمان گیرش اولیه و نهایی خمیر ژئوپلیمر با پایه سرباره و ژئولیت و غلظت های مختلف ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ مولار هیدروکسید سدیم در جدول ۳ و شکل ۳ گزارش شده اند.

جدول ۳: گیرش اولیه و نهایی خمیر ژئوپلیمر بر پایه سرباره و ژئولیت

گیرش نهایی (min)	گیرش اولیه (min)	غلظت هیدروکسید سدیم (M)		ماده پایه
		۶	۸	
۱۸۰	۷۰	۶	۸	سرباره ۹۰٪
۱۹۰	۷۵	۸	۱۰	ژئولیت ۱۰٪
۲۱۰	۹۰	۱۲		
۱۹۰	۸۵	۶	۸	سرباره ۸۰٪
۲۱۰	۹۰	۱۰	۱۰	ژئولیت ۲۰٪
۲۱۵	۱۱۰	۱۲		



شکل ۳: تاثیر غلظت هیدروکسید سدیم بر زمان گیرش اولیه و نهایی خمیر ژئوپلیمر حاوی سرباره و ژئولیت

با بررسی شکل ۳ مشاهده می شود، با افزایش غلظت هیدروکسید سدیم، زمان گیرش افزایش یافته است. در واقع افزایش غلظت سبب افزایش انحلال آلومینا و سیلیکا در ماده پایه می شود و به همین دلیل زمان گیرش افزایش می یابد که با نتایج به دست آمده از تحقیقات Chindaprasirt و Rattanasak، Chindaprasirt و Hanjitsuwan و همکاران، همکاران، تطابق دارد. همچنین با افزایش درصد جایگزینی

ژئولیت به عنوان ماده پایه نیز، زمان گیرش افزایش یافت که از جمله دلایل آن می‌تواند به علت جذب آب بالای ژئولیت باشد [۱۰، ۱۱ و ۱۵].

## ۲-۲-۲- آزمایش مقاومت فشاری

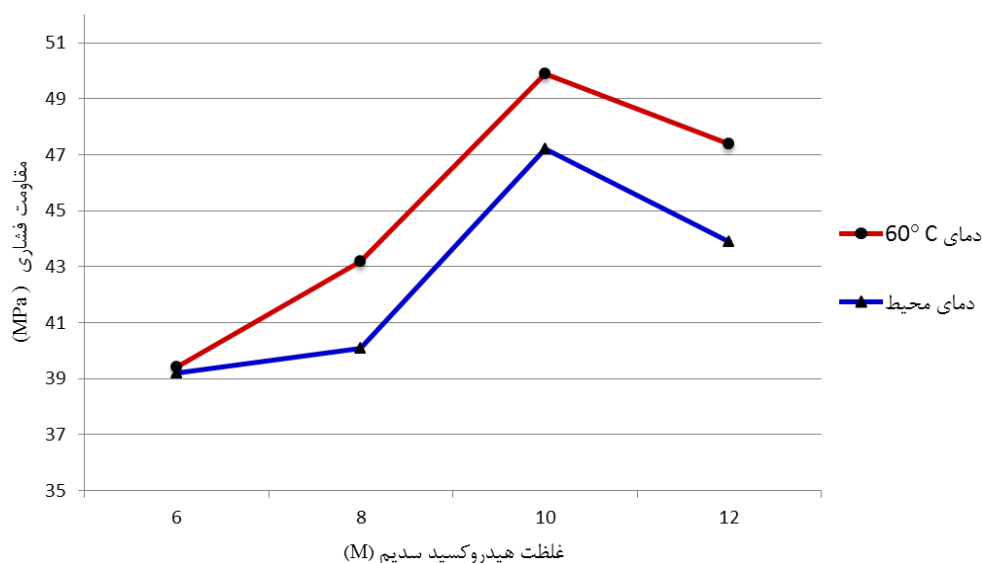
به منظور تعیین مقاومت فشاری، نمونه‌های خمیر ژئوپلیمر حاوی سرباره در قالب‌های  $5 \times 5 \times 5$  سانتی‌متری ریخته شد. نمونه‌ها بعد از خارج کردن از قالب به دو روش عمل‌آوری شدند. در روش اول به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد در اون قرار گرفتند و بعد از بیرون آوردن از اون تا سن انجام آزمایش در محیط آزمایشگاه نگهداری شدند. در روش دوم نمونه‌ها بعد از خارج کردن از قالب تا سن انجام آزمایش در محیط آزمایشگاه نگهداری شدند. شکل ۴ نمونه‌های خمیر ژئوپلیمر را نشان می‌دهد. نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها در جدول ۴ و شکل ۵ گزارش شده‌اند.



شکل ۴: نمونه‌های خمیر ژئوپلیمر

جدول ۴: مقاومت فشاری خمیر ژئوپلیمر بر پایه سرباره در دمای محیط آزمایشگاه و در اون

مقاومت فشاری سدیم (M)	مقاومت فشاری ۷ روزه (MPa)	مقاومت فشاری ۱۴ روزه (MPa)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)	مقاومت فشاری ۵۶ روزه (MPa)	
۶	۳۴/۲	۳۶/۳	۳۷/۱	۳۹/۲	عمل‌آوری در
۸	۳۷/۶	۳۸/۲	۳۹/۳	۴۰/۱	دمای محیط
۱۰	۴۲/۱	۴۳/۴	۴۵/۱	۴۷/۲	
۱۲	۳۹/۲	۴۱/۲	۴۲/۱	۴۳/۹	
۶	۳۵/۱	۳۶/۹	۳۷/۸	۳۹/۴	عمل‌آوری در
۸	۳۹/۷	۴۰/۱	۴۱/۴	۴۳/۲	دمای
۱۰	۴۵/۲	۴۷/۲	۴۸/۳	۴۹/۹	۶۰°C
۱۲	۴۱/۱	۴۳/۲	۴۵/۱	۴۷/۴	



شکل ۵: تاثیر غلظت هیدروکسید سدیم بر مقاومت فشاری ۵۶ روزه خمیر ژئوپلیمر حاوی سرباره در دمای محیط آزمایشگاه و در اون

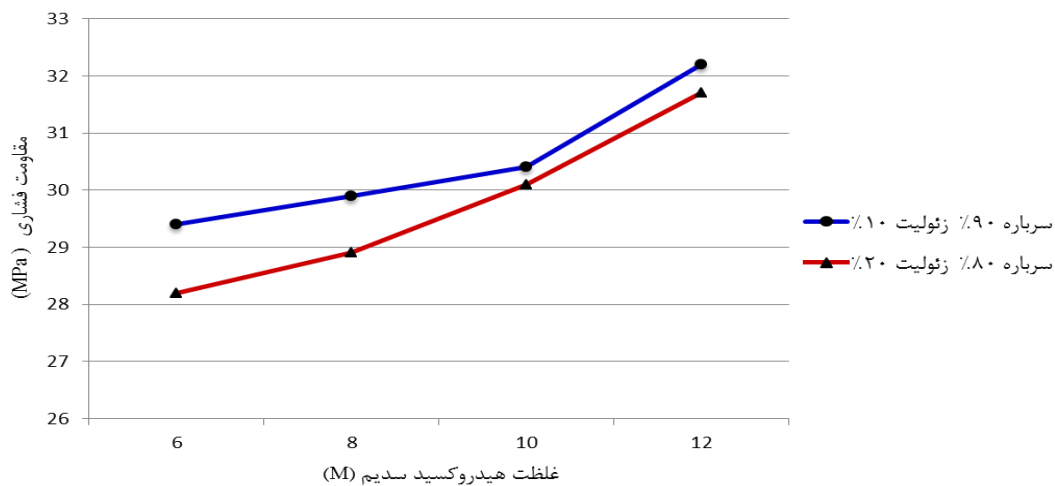
همان طور که از شکل ۵ مشاهده می‌شود، نمونه‌های عمل‌آوری شده در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت فشاری بالاتری نسبت به نمونه‌های عمل‌آوری شده در دمای محیط دارند. این نتیجه توسط محققین دیگر نیز تایید شده است. Mo و همکاران بیان کردند افزایش دمای عمل‌آوری باعث قوی تر شدن و شکل‌گیری بهتر ساختمان ژئوپلیمر می‌شود و در نتیجه مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. البته همیشه با افزایش دمای عمل‌آوری افزایش مقاومت اتفاق نمی‌افتد. در واقع به ماده پایه و ساختار آن بستگی دارد. Gorhan و همکاران گزارش کردند که مقاومت فشاری نمونه‌های خمیر ژئوپلیمر حاوی متاکائولن در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به عمل‌آوری در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت [۱۲ و ۱۶].

به منظور بررسی اثر ژئولیت بر مقاومت فشاری، نمونه‌های خمیر ژئوپلیمر حاوی سرباره و ژئولیت در قالب‌های ۵ × ۵ × ۵ سانتی متری ریخته شد. نمونه‌ها بعد از بیرون آورده شدن از قالب به دو روش عمل‌آوری شدند. در روش اول به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد در اون قرار گرفتند و بعد از خارج کردن از اون تا سن انجام آزمایش در محیط آزمایشگاه نگهداری شدند. در روش دوم نمونه‌ها بعد از بیرون آورده شدن از قالب تا سن انجام آزمایش در محیط آزمایشگاه نگهداری شدند. نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها در جدول ۵ و ۶ و شکل ۶ و ۷ گزارش شده‌اند.

جدول ۵: مقاومت فشاری خمیر ژئوپلیمر بر پایه سرباره و ژئولیت در دمای محیط آزمایشگاه

مقاومت فشاری	مقاومت فشاری	مقاومت فشاری	مقاومت فشاری	سدیم	غلظت هیدروکسید سدیم (M)	ماده پایه
۵۶ روزه (MPa)	۲۸ روزه (MPa)	۱۴ روزه (MPa)	۷ روزه (MPa)			
۲۹/۴	۲۷/۲	۲۶/۱	۲۵/۲	۶	۶	
۲۹/۹	۲۸/۴	۲۷/۲	۲۵/۷	۸	۸	سرباره ۹۰٪
۳۰/۴	۲۹/۲	۲۸/۵	۲۶/۳	۱۰	۱۰	ژئولیت ۱۰٪
۳۲/۲	۳۱/۸	۲۹/۸	۲۸/۱	۱۲	۱۲	
۲۸/۲	۲۷/۱	۲۵/۴	۲۴/۱	۶	۶	
۲۸/۹	۲۷/۴	۲۶/۱	۲۵/۲	۸	۸	سرباره ۸۰٪ ژئولیت
۳۰/۱	۲۸/۲	۲۶/۹	۲۵/۴	۱۰	۱۰	۲۰٪
۳۱/۷	۲۸/۹	۲۸/۱	۲۷/۴	۱۲	۱۲	



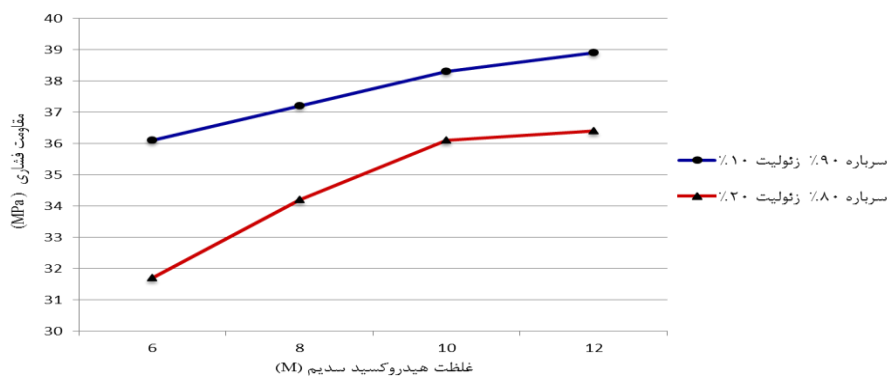


شکل ۶: تاثیر غلظت هیدروکسید سدیم بر مقاومت فشاری ۵۶ روزه خمیر ژئوپلیمر حاوی سرباره و زئولیت در دمای محیط آزمایشگاه

از بررسی شکل ۶ نتیجه می‌شود که با افزایش غلظت هیدروکسید سدیم مقاومت فشاری نمونه خمیر افزایش یافته است. در واقع زیاد شدن غلظت هیدروکسید سدیم باعث بالا رفتن درجه ژئوپلیمریزاسیون می‌شود و در نتیجه مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. این مساله توسط محققین دیگر تایید شده است. Hanjitsuwan و همکاران، Heah و همکاران گزارش کردند که با بالا رفتن غلظت، انحلال سیلیکا و آلومینا افزایش می‌یابد و منجر به افزایش مقاومت می‌شود [ ۱۱ و ۱۷ ].

جدول ۶: مقاومت فشاری خمیر ژئوپلیمر بر پایه سرباره و زئولیت در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد

مقاومت فشاری	مقاومت فشاری	مقاومت فشاری	مقاومت فشاری	غلظت هیدروکسید سدیم	ماده پایه
روزه ۵۶ (MPa)	روزه ۲۸ (MPa)	روزه ۱۴ (MPa)	روزه ۷ (MPa)	(M)	
۳۶/۱	۳۵/۲	۳۱/۳	۲۶/۱	۶	سرباره ۹۰٪ زئولیت ۱۰٪
۳۷/۲	۳۴/۲	۳۲/۲	۲۷/۲	۸	
۳۸/۳	۳۴/۹	۳۳/۴	۲۸/۱	۱۰	
۳۸/۹	۳۶/۹	۳۴/۷	۲۹/۴	۱۲	
۳۱/۷	۲۹/۴	۲۸/۱	۲۵/۳	۶	سرباره ۸۰٪ زئولیت ۲۰٪
۳۴/۲	۳۳/۹	۳۱/۷	۲۶/۴	۸	
۳۶/۱	۳۴/۲	۳۱/۸	۲۸/۱	۱۰	
۳۶/۴	۳۵/۱	۳۰/۸	۲۹/۹	۱۲	



شکل ۷: تاثیر غلظت هیدروکسید سدیم بر مقاومت فشاری ۵۶ روزه خمیر ژئوپلیمر حاوی سرباره و زئولیت در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد

همان طور که از شکل ۷ مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت هیدروکسید سدیم مقاومت فشاری نمونه افزایش یافت. همچنین با افزایش درصد جایگزینی زئولیت به عنوان بخشی از ماده پایه مقاومت فشاری کاهش یافت. از آنجائیکه زئولیت دارای ساختار صفحه ای شکل می باشد، در هنگام انجام فرآیند ژئوپلیمریزاسیون این ساختار به هم می‌ریزد و به یک ماده آمورف تبدیل می‌شود، به همین دلیل کاهش مقاومت روی می‌دهد. این مساله با نتایج تحقیق Papa و همکاران مطابقت دارد [۱۸].

### ۳- نتیجه گیری

در این مقاله اثر غلظت‌های مختلف هیدروکسید سدیم بر زمان گیرش و مقاومت فشاری خمیر ژئوپلیمر مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. نتایج مهم آزمایش‌های گیرش اولیه و نهایی خمیر ژئوپلیمر و همچنین مقاومت فشاری آن به شرح زیر می‌باشد:

الف) زمان گیرش اولیه و نهایی:

- با افزایش غلظت هیدروکسید سدیم، زمان گیرش اولیه و نهایی برای خمیر ژئوپلیمر بر پایه سرباره، افزایش یافته است.
- با زیاد شدن درصد جایگزینی زئولیت به جای بخشی از ماده پایه، زمان گیرش افزایش یافته است.
- با افزایش غلظت هیدروکسید سدیم، زمان گیرش اولیه و نهایی برای خمیر ژئوپلیمر حاوی ۹۰ درصد سرباره و ۱۰ درصد زئولیت و همچنین ۸۰ درصد سرباره و ۲۰ درصد زئولیت، افزایش یافته است.

ب) مقاومت فشاری خمیر ژئوپلیمر:

- مقاومت فشاری نمونه‌های خمیر ژئوپلیمر بر پایه سرباره، با زیاد شدن غلظت هیدروکسید سدیم در غلظت‌های ۶، ۸ و ۱۰ مولار افزایش یافته است اما در ادامه با افزایش بیشتر غلظت هیدروکسید سدیم به ۱۲ مولار، مقاومت فشاری کاهش یافته است.
- مقاومت فشاری نمونه‌های خمیر حاوی ۹۰ درصد سرباره و ۱۰ درصد زئولیت و همچنین ۸۰ درصد سرباره و ۲۰ درصد زئولیت، با زیاد شدن غلظت هیدروکسید سدیم، افزایش یافته است.
- با زیاد شدن درصد جایگزینی زئولیت به جای بخشی از ماده پایه، مقاومت فشاری کاهش یافته است.
- نمونه‌هایی که در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت عمل‌آوری شده بودند، نسبت به نمونه‌های عمل‌آوری شده در دمای محیط مقاومت بالاتری را نتیجه دادند.

### مراجع

- [1] Prasanna Venkatesan, R. and Pazhani, K.C. (2015). Strength and durability properties of geopolymer concrete made with ground granulated blast furnace slag and black rice husk ash. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(6), 2384-2391.
- [2] Li, Zh. and Li, Sh. (2018). Carbonation resistance of fly ash and blast furnace slag based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 163, 668-680.
- [3] Gunasekara, C., Law, D.W., Setunge, S. and Sanjayan, J.G. (2015). Gel formation and compressive strength of low calcium fly ash geopolymers. *Construction and Building Materials*, 95, 592-599.
- [4] Revathi, T., Jeyalakshmi, R. and Rajamane, N.P. (2018). Geopolymeric binder: The effect of silica fume addition on fly ash activation by using response surface methodology. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 8727-8734.
- [5] Davidovits, J. (2009). *Geopolymer chemistry and applications book*. Geopolymer Institute, St Quentin, France.
- [6] Jafari Nadoushan, M. and Ramzaniyanpour, A.A. (2016). The effect of type and concentration of activators on flowability and compressive strength of natural pozzolan and slag-based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 111, 337-347.

- [7] Deb, P.S., Nath, P. and Sarker, P.K. (2015). Drying shrinkage of slag blended fly ash geopolymer concrete cured at room temperature. *Procedia Engineering*, 125, 594-600.
- [8] Chen, L., Wang, Z., Wang, Y. and Feng, J. (2016). Preparation and properties of alkali activated metakaolin based geopolymer. *Materials*, 9(9), 767.
- [9] Duan, P., Yan, Ch. And Zhou, W. (2017). Compressive strength and microstructure of fly ash based geopolymer blended with silica fume under thermal cycle. *Cement and composites*, 78, 108-119.
- [10] Rattanasak, U. and Chindapasirt, P. (2009). Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. *Minerals Engineering*, 22(12), 1073-1078.
- [11] Hanjitsuwan, S., Hunpratub, S., Thongbai, P., Maensiri, S., Sata, V. and Chindapasirt, P. (2014). Effects of NaOH concentrations on physical and electrical properties of high calcium fly ash geopolymer paste. *Cement and Concrete Composites*, 45, 9-14.
- [12] Gorhan, G., Aslaner, R. and Sinik, O. (2016). The effect of curing on the properties of metakaolin and fly ash based geopolymer paste. *Composites Part B: Engineering*, 97, 329-335.
- [13] Saha, S. and Rajasekaran, C. (2017). Enhancement of the properties of fly ash based geopolymer paste by incorporating ground granulated blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, 146, 615-620.
- [14] American Society for Testing and Materials (ASTM) C191-08. Standard test method for time of setting of hydraulic cement by vicat needle.
- [15] Chindapasirt, P., De Silva, P., Sagoe-Crentsil, K. and Hanjitsuwan, S. (2012). Effect of SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer system. *Materials Science*, 47(12), 4876-4883.
- [16] Mo, B.H., He, Zh., Cui, X.M., He, Y. and Gong, S.Y. (2014). Effect of curing temperature on geopolymerization of metakaolin based geopolymers. *Applied Clay Science*, 99: 144-148.
- [17] Heah, C.Y., Kamarudin, H., Mustafa Al Bakri, A.M., Bnhussain, M., Luqman, M., Khairul Nizar, I., Ruzaidi, C.M. and Liew, Y.M. (2012). Study on solids-to-liquid and alkaline activator ratios on kaolin-based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 35: 912-922.
- [18] Papa, E., Medri, V., Amari, S., Manaud, J., Benito, P., Vaccari, A. and Landi, E. (2018). Zeolite geopolymer composite materials production and characterization. *Cleaner Production*.