

فاکتورهای تاثیر گذار بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن

علیرضا اسپرهم^۱، امیربهادر مرادی خو^{۲*}

۱. کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات

*amirbahador.mk@gmail.com

تاریخ دریافت ۹۷/۱۰/۱۰ تاریخ پذیرش ۹۸/۰۸/۱۷

چکیده

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. مقاومت فشاری به عنوان یکی از مشخصه‌های مهم بتن، متأثر از پارامترهای مختلفی است. در بتن ژئوپلیمری نیز با توجه به مواد تشکیل دهنده، پارامترهای مختلفی می‌تواند مقاومت فشاری را تحت تاثیر قرار دهد. در این پژوهش آزمایشگاهی، برخی از پارامترهای تاثیر گذار بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن شامل: نوع محلول فعال‌کننده قلیایی (سدیم و پتاسیم)، غلظت محلول هیدروکسید سدیم، نسبت وزنی محلول فعال‌کننده قلیایی به منبع آلومیناسیلیکاتی، نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم، دمای عمل‌آوری و میزان آب، مورد مطالعه قرار گرفت. در همین راستا نمونه‌های بتن ژئوپلیمری ساخته و عمل‌آوری شدند. سپس آزمون مقاومت فشاری از نمونه‌ها گرفته شد. نتایج نشان داد استفاده از محلول فعال‌کننده پتاسیمی منجر به دستیابی به مقاومت فشاری ۲۸ روزه بیشتر و محلول فعال‌کننده سدیمی سبب دستیابی به مقاومت زودرس بیشتر، می‌شود. افزایش غلظت محلول هیدروکسید سدیم تا ۱۴ مول، سبب افزایش مقاومت فشاری شد اما با افزایش بیشتر غلظت به ۱۶ مول، تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقاومت فشاری دیده نشد. افزایش میزان آب موجود در بتن ژئوپلیمری سبب افزایش نسبت آب به مواد خشک و کاهش چشمگیر مقاومت فشاری شد. میزان بهینه نسبت وزنی محلول فعال‌کننده قلیایی به منبع آلومیناسیلیکاتی ۰/۹ سنجش شد و با افزایش این نسبت مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش یافت. افزایش نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم از ۱ به ۱/۵ سبب دستیابی به بیشترین مقاومت فشاری شد. با افزایش این نسبت تا ۳، مقاومت فشاری به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافت. همچنین افزایش دمای عمل‌آوری تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد، سبب افزایش نسبی مقاومت فشاری ۲۸ روزه و افزایش قابل ملاحظه مقاومت ۳ و ۷ روزه بتن ژئوپلیمری شد اما با افزایش بیشتر دما تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت فشاری کاهش یافت.

واژه‌های کلیدی: بتن ژئوپلیمری، متاکائولن، مقاومت فشاری، محلول فعال‌کننده قلیایی، سدیم، پتاسیم.

۱. مقدمه

بتن به علت داشتن ویژگی‌های خاص مانند شکل‌پذیری، در دسترس بودن مصالح اولیه و ارزان بودن پرمصرف‌ترین مصالح در صنعت ساخت و ساز، بعد از آب است. پیش‌بینی می‌شود که نیاز به مصرف بتن در آینده بیشتر شود و این افزایش تقاضا به معنی افزایش تقاضا برای تولید سیمان پرتلند، به عنوان ماده اصلی سازنده بتن است [1]. اما فرایند تولید سیمان پرتلند معایب عمده‌ای نیز به دنبال دارد. تولید سیمان پرتلند باعث رهاسازی مقادیر زیادی از دی‌اکسید کربن به محیط زیست می‌شود. به طوری که تولید ۱ تن سیمان پرتلند سبب تولید تقریباً ۱ تن دی‌اکسید کربن می‌شود [2 و 3]. از سوی دیگر، 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 با میزان انتشار ۶۵ درصد، بیشترین نقش را در پدیده گرمایش جهانی دارد [4 و 5]. در نتیجه فرآیند تولید سیمان پرتلند به عنوان یکی از منابع مهم انتشار گاز دی‌اکسید کربن و گرمایش جهانی شناخته می‌شود [6]. کارشناسان تولید سیمان پرتلند را عامل انتشار ۷ تا ۱۰ درصد از انتشار جهانی دی‌اکسید کربن می‌دانند [7 و 8]. 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 [9]. ژئوپلیمر برای اولین بار در سال ۱۹۷۸ میلادی توسط Davidovits شیمیدان برجسته فرانسوی، به عنوان بایندهای جدیدی از خانواده پلیمرهای معدنی معرفی شد [10]. از نقطه نظر خواص مهندسی مورد نیاز در مهندسی عمران، بتن‌های ژئوپلیمری ویژگی‌های مکانیکی و شیمیایی بهتری نسبت به بتن‌های معمولی دارند که از جمله آنها می‌توان به مقاومت‌های مکانیکی بیشتر و سخت شدن سریع [11-14]، مقاومت در برابر آتش‌سوزی و حرارت بالا [15-17]، دوام بیشتر [18]، نفوذپذیری کمتر و مقاومت در برابر حمله نمک‌ها و اسیدها [19] و خزش کمتر

[20 و 21]، اشاره کرد. ژئوپلیمرها مواد آلومیناسیلیکاتی غیرآلی هستند که از واکنش ژئوپلیمریزاسیون منبع آلومیناسیلیکاتی غنی از سیلیکا (SiO_2) و آلومینا (Al_2O_3)، با یک محلول فعال‌کننده قلیایی حاصل می‌شوند [22]. ژئوپلیمریزاسیون واکنش سریع شیمیایی در شرایط قلیایی بین عناصر معدنی Si و Al است که باعث تشکیل زنجیره‌های سه بعدی پلیمری Si-O-Al می‌شود [23 و 24]. 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 آهن‌گدازی باشد. متاکائولن یکی از انواع منابع آلومیناسیلیکاتی است که از کلسینه کردن کائولن در دمای ۶۰۰-۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به دست می‌آید. در این مقاله از متاکائولن به عنوان منبع آلومیناسیلیکاتی استفاده شد. محلول فعال‌کننده قلیایی نیز 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 فعال‌کننده قلیایی استفاده شده در ژئوپلیمرها، ترکیبی از محلول هیدروکسید سدیم (NaOH) یا پتاسیم (KOH) با محلول سیلیکات سدیم (Na_2SiO_3) یا پتاسیم (K_2SiO_3) است [25].

مقاومت فشاری به عنوان یکی از مشخصه‌های مهم بتن به شمار می‌آید. این مقاومت متأثر از پارامترهای مختلفی است. در بتن ژئوپلیمری نیز با توجه به مواد تشکیل دهنده، پارامترهایی مانند نوع منبع آلومیناسیلیکاتی، عناصر موجود در منبع آلومیناسیلیکاتی، نوع محلول فعال‌کننده قلیایی، غلظت محلول هیدروکسیدی، نسبت وزنی محلول فعال‌کننده قلیایی به منبع آلومیناسیلیکاتی، نسبت وزنی محلول سیلیکاتی به محلول هیدروکسیدی، میزان آب موجود در طرح اختلاط و شرایط عمل‌آوری و غیره، از پارامترهای تاثیرگذار بر مقاومت فشاری، شمرده می‌شود. در همین راستا پژوهش‌های مختلفی انجام شده است. در پژوهش‌های آغازین در مورد ژئوپلیمرها توسط Davidovits [26 و 27]، از محلول هیدروکسید سدیم یا هیدروکسید پتاسیم بدون محلول سیلیکاتی، به عنوان محلول فعال‌کننده قلیایی استفاده می‌شد. Xu و همکاران [28] نیز در

مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بودند. در مورد نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم، **Hardjito** و همکاران [32] در پژوهش روی بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی گزارش کردند که در هنگام استفاده از محلول سیلیکات سدیم و محلول هیدروکسید سدیم با غلظت ۱۴ مول، نسبت وزنی بهینه محلول سیلیکات سدیم به محلول هیدروکسید سدیم برابر با ۲/۵ است. در حالی که **Petrus** و همکاران [33] در جریان پژوهش در مورد بتن ژئوپلیمری بر پایه بنتونیت و سیلیکا، میزان بهینه این نسبت را ۱/۵ گزارش کردند. این پژوهشگران نیز از محلول سیلیکات سدیم و محلول هیدروکسید سدیم با غلظت ۱۴ مول استفاده کردند. در مورد آب موجود در طرح اختلاط بتن ژئوپلیمری نیز اکثر پژوهشگران نتیجه گیری کردند که با افزایش آب موجود در طرح اختلاط، مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری کاهش می یابد [25، 30 و 32]. یکی دیگر از پارامترهای تاثیرگذار بر مقاومت فشاری بتن های ژئوپلیمری که در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفت، شرایط عمل آوری (کیورینگ) است. **van Jaarsveld** و همکاران [44] در پژوهشی در این رابطه نتیجه گیری کردند که شرایط عمل آوری از پارامترهای تاثیرگذار بر مقاومت فشاری ژئوپلیمرهاست. این پژوهشگران از دماهای بالا برای کیورینگ استفاده کردند و دریافتند که این شرایط کیورینگ به دلیل ایجاد ترک، تاثیر منفی بر خواص بتن دارد و در پایان دماهای میانه را برای عمل آوری بتن ژئوپلیمری پیشنهاد کردند. **Hardjito** و همکاران [25] نیز در پژوهشی نقش این پارامتر بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی، را بررسی کرده و علاوه بر تاثیرگذار بودن این پارامتر نتیجه گیری کردند که افزایش دمای کیورینگ سبب افزایش مقاومت فشاری بتن می شود اما در دماهای بالاتر از ۶۰ درجه سانتی گراد، تغییر قابل ملاحظه ای در مقاومت فشاری بتن دیده نمی شود در حالی که **Satpute Manesh** و همکاران [45] نتیجه گیری کردند که در دمای بالاتر از ۱۲۰ درجه سانتی گراد، مقاومت فشاری بتن افزایش قابل ملاحظه ای پیدا نمی کند.

در این پژوهش آزمایشگاهی، برخی از پارامترهای تاثیرگذار بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن، مورد مطالعه قرار گرفت. پارامترهای مذکور شامل: نوع محلول فعال کننده قلیایی (سدیم و پتاسیم)، غلظت محلول هیدروکسید سدیم،

جریان پژوهش در ژئوپلیمرها، از محلول هیدروکسید سدیم و هیدروکسید پتاسیم بدون محلول سیلیکاتی، به عنوان محلول فعال کننده قلیایی استفاده کردند و نتیجه گیری کردند در این نوع از محلول های فعال کننده قلیایی، هیدروکسید پتاسیم نتایج بهتری را ارائه می کند. **Palomo** و همکاران [19] در پژوهش های خود دریافتند که محلول فعال کننده قلیایی نقش مهمی در واکنش ژئوپلیمریزاسیون دارد و اضافه کردن یک محلول سیلیکاتی مانند سیلیکات سدیم یا پتاسیم به محلول هیدروکسید سدیم یا پتاسیم، می تواند به بالا رفتن نرخ واکنش کمک و نتایج بهتری را همراه داشته باشد و همچنین آنها نتیجه گیری کردند که استفاده از محلول هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم نتایج بهتری را در مقایسه با محلول هیدروکسید پتاسیم و سیلیکات پتاسیم، به دنبال دارد. **Cheng** و همکاران [15] نیز در جریان پژوهش خود روی ژئوپلیمرهای ضد حریق، نتایج مشابهی گرفتند. **Rashed** [29] در پژوهشی در مورد ژئوپلیمرها نتیجه گیری کرد که در حالت کلی، در اغلب موارد با افزایش غلظت محلول هیدروکسید سدیم تا یک غلظت خاص، مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری افزایش می یابد. **Sharma** و دیگران [30] نیز در پژوهشی در مورد فاکتورهای تاثیرگذار بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی، نتیجه گیری کردند که با افزایش غلظت محلول هیدروکسید سدیم تا ۱۶ مول، مقاومت فشاری بتن افزایش می یابد اما با افزایش بیشتر غلظت تا ۱۸ مول، تغییر قابل ملاحظه ای در مقاومت فشاری دیده نمی شود در حالی که **Patel** و دیگران [31] نتیجه گیری کردند که با افزایش غلظت محلول هیدروکسید سدیم تا ۱۲ مول در بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن، مقاومت فشاری افزایش می یابد و افزایش غلظت به بیشتر از ۱۲ مول سبب کاهش مقاومت فشاری می شود. در رابطه با نسبت وزنی محلول فعال کننده قلیایی به منبع آلومیناسیلیکاتی، **Sharma** و همکاران [30] نتیجه گیری کردند که با افزایش نسبت محلول فعال کننده قلیایی به منبع آلومیناسیلیکاتی (خاکستر بادی) از ۰/۳۵ تا ۰/۴۵، مقاومت فشاری افزایش می یابد اما با افزایش بیشتر این نسبت تا ۰/۵، مقاومت فشاری به صورت قابل ملاحظه ای کاهش می یابد در حالی که **Hardjito** و همکاران [32] با افزایش نسبت محلول فعال کننده قلیایی به منبع آلومیناسیلیکاتی (خاکستر بادی) از ۰/۳۵ تا ۰/۴۵ شاهد کاهش

جذب آب مطابق با استاندارد ASTM C127 [34] از شن مصرفی، گرفته شد. این آزمایش از ماسه نیز مطابق با استاندارد ASTM C128 [35]، به عمل آمد که نتایج آن در جدول (۴) ارائه شده است. همچنین ضریب نرمی ماسه مطابق با استاندارد ASTM C136 [36]، ۳/۰۱۱۳، میزان رد شده از الک شماره ۲۰۰، ۰/۷۲ درصد و ارزش ماسه‌ای نیز بر اساس استاندارد ASTM D2419 [37]، ۷۳ اندازه‌گیری شد.

جدول ۲. آنالیز شیمیایی هیدروکسید سدیم و هیدروکسید پتاسیم

NaOH			KOH		
Chemical substance	Result	Unit	Chemical substance	Result	Unit
NaOH	98	%	KOH	90.7	%
Na ₂ CO ₃	1	%	K ₂ CO ₃	0.3	%
NaCl	200	ppm	KCl	0.006	%
Fe	6	ppm	Fe	2	ppm
SiO ₂	15.7	ppm	NaOH	1.2	%

Table 2. Chemical analysis of NaOH and KOH

جدول ۳. آنالیز شیمیایی محلول سیلیکات سدیم و سیلیکات پتاسیم

Na ₂ SiO ₃			K ₂ SiO ₃		
Chemical substance	Result	Unit	Chemical substance	Result	Unit
SiO ₂	30	%	SiO ₂	30.5	%
Na ₂ O	14.5	%	K ₂ O	14.5	%
Water	55.5	%	Water	55	%
Ratio of model	2.07	-	Ratio of model	2.1	-

Table 3. Chemical analysis of Na₂SiO₃ and K₂SiO₃ solutions

جدول ۴. وزن مخصوص و جذب آب سنگدانه‌ها

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

Table 4. Specific gravity and Water absorption of aggregates

۲-۲-۲ ساخت نمونه‌ها

۲-۲-۱-۱ مطالعه تاثیر نوع محلول فعال کننده قلیایی بر مقاومت فشاری

در این بخش به منظور بررسی تاثیر نوع محلول فعال کننده قلیایی بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری، ۲ طرح اختلاط تنظیم شد که این طرح‌ها در جدول (۵) ارائه شده است. در این طرح‌های اختلاط از ۲ محلول فعال کننده قلیایی مختلف شامل: ۱- هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم و ۲- هیدروکسید پتاسیم و سیلیکات پتاسیم، برای ساختن بتن ژئوپلیمری استفاده شد. برای ساخت نمونه‌ها ابتدا

نسبت وزنی محلول فعال کننده قلیایی به منبع آلومیناسیلیکاتی، نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم، دمای عمل‌آوری و میزان آب، بود. در همین راستا نمونه‌های بتن ژئوپلیمری ساخته و عمل‌آوری شدند. سپس آزمون مقاومت فشاری از نمونه‌ها گرفته شد و نتایج بدست آمده تحلیل، جمع‌بندی و گزارش شدند.

۲. روش آزمایشگاهی

۲-۱- مواد

منبع آلومیناسیلیکاتی استفاده شده در این پژوهش متاکائولن است. مشخصات متاکائولن مصرفی در جدول (۱) ارائه شده است. از هیدروکسید سدیم با خلوص ۹۸ درصد، هیدروکسید پتاسیم با خلوص ۹۰ درصد، محلول سیلیکات سدیم مایع با نسبت SiO₂ به Na₂O برابر با ۲ و محلول سیلیکات پتاسیم مایع با نسبت SiO₂ به K₂O برابر با ۲/۱، برای ساخت محلول‌های فعال کننده قلیایی استفاده شد. آنالیز شیمیایی این مواد در جدول‌های (۲ و ۳) ارائه شده است. آب مصرفی نیز آب لوله کشی شهر اصفهان بود. از روان کننده پلی‌کربوکسیلاتی (SP) با وزن مخصوص ۱/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب، به منظور بالا بردن کارایی بتن استفاده شد.

جدول ۱. مشخصات متاکائولن (فیزیکی و شیمیایی)

Content	Result	Unit
SiO ₂	54	%
Al ₂ O ₃	31.7	%
TiO ₂	1.41	%
Fe ₂ O ₃	4.89	%
ZrO ₂	0.1	%
K ₂ O	4.05	%
Na ₂ O	2.32	%
MnO	0.11	%
L.O.I	1.41	%
SiO ₂ / Al ₂ O ₃	1.71	-
Specific Gravity	2.67	g/cm ³
Fineness	21400	cm ² /g

Table 1. Properties of Metakaolin (physical and chemical)

شن و ماسه مصرفی از معادن اطراف شهر اصفهان 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

ساخته و عمل آوری شدند و آزمون مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه از نمونه‌ها به عمل آمد.

۲-۲-۴- مطالعه تاثیر نسبت وزنی محلول فعال کننده قلیایی به متاکائولن بر مقاومت فشاری

در این بخش به منظور بررسی تاثیر پارامتر نسبت وزنی محلول فعال کننده قلیایی به متاکائولن بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری و بهینه یابی این پارامتر، با توجه به نتایج مراحل قبل، ۳ طرح اختلاط تنظیم شد. طرح‌های اختلاط این بخش در جدول (۸) ارائه شده است. در این بخش نیز نمونه‌های فشاری بتن ژئوپلیمری مانند مراحل قبل، ساخته و عمل آوری شدند. از نمونه‌ها آزمون مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه گرفته شد.

۲-۲-۵- مطالعه تاثیر نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم بر مقاومت فشاری

از دیگر پارامترهای تاثیرگذار بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری که در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفت نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم بود. به همین منظور ۵ طرح اختلاط تنظیم شد. این طرح‌های اختلاط در جدول (۹) ارائه شده است. در این بخش نیز نمونه‌های فشاری بتن ژئوپلیمری مانند مراحل قبل، ساخته و عمل آوری شدند. از نمونه‌ها آزمون مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه گرفته شد.

۲-۲-۶- مطالعه تاثیر دمای عمل آوری بر مقاومت فشاری

آخرین پارامتر مطالعه شده در این پژوهش تاثیر دمای عمل آوری (کیورینگ) بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن بود. به این منظور پس از مشخص شدن نتایج مراحل قبل، نمونه‌های بتن ژئوپلیمری از طرح MR1.5، آماده شد. این نمونه‌ها در آون و در دماهای ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سانتی گراد، به مدت ۲۴ ساعت عمل آوری شدند. در پایان از نمونه‌ها آزمون مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه گرفته شد.

محلول‌های فعال کننده قلیایی آماده شد. به همین منظور ابتدا محلول هیدروکسید سدیم و پتاسیم با غلظت ۱۴ مولار با محلول سیلیکات سدیم و پتاسیم و روان کننده مطابق با طرح‌های اختلاط، مخلوط شد. به محلول‌های به دست آمده ۲۴ ساعت زمان داده شد تا سرد شود. در روز آزمایش، ابتدا مواد خشک شامل: شن، ماسه و متاکائولن مطابق با طرح‌های اختلاط، در میکسر پرتابی بتن ریخته و به مدت ۳ دقیقه به منظور توزیع یکنواخت به صورت خشک، میکس شدند. سپس محلول‌های فعال کننده قلیایی و آب اضافه به میکسر اضافه شد و مخلوط بتن به مدت ۲ دقیقه میکس شد. بعد از اتمام میکس، نمونه‌های فشاری قالب بندی شدند. نمونه‌ها به مدت ۱۰ ثانیه روی میز ویبره، متراکم شدند. سپس نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آون و در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد عمل آوری شدند. پس از پایان عمل آوری، نمونه‌ها از آون خارج شده و در دمای محیط قرار گرفتند. از نمونه‌ها آزمون مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه بر اساس BS1881: Part116 [40] گرفته شد.

۲-۲-۲- مطالعه تاثیر آب بر مقاومت فشاری

پس از مشخص شدن نتایج مرحله قبل، ترکیب هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم به عنوان محلول فعال کننده قلیایی انتخاب شد. در مورد آب اضافه در طرح اختلاط، ۵ طرح اختلاط تنظیم شد که یکی بدون آب اضافه و نمونه‌های دیگر با ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ کیلوگرم در مترمکعب آب اضافه، ساخته شدند. این طرح‌های اختلاط در جدول (۶) ارائه شده است. روش ساخت و عمل آوری نمونه‌ها دقیقاً مشابه مرحله قبل بود. از نمونه‌های این بخش نیز آزمون مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه گرفته شد.

۲-۲-۳- مطالعه تاثیر غلظت محلول هیدروکسید سدیم بر مقاومت فشاری

در این بخش به منظور بررسی تاثیر غلظت محلول هیدروکسید سدیم بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری و بهینه یابی این پارامتر، با توجه به نتایج مراحل قبل، ۴ طرح اختلاط تنظیم شد. این طرح‌های اختلاط در جدول (۷) ارائه شده است. در این بخش نیز نمونه‌های فشاری بتن ژئوپلیمری همانند مرحله قبل،

جدول ۵. طرح‌های اختلاط مربوط به تاثیر نوع محلول فعال‌کننده قلیایی بر مقاومت فشاری

Mix ID	Metakaolin (Kg/m ³)	NaOH 14M (Kg/m ³)	KOH 12M (Kg/m ³)	Na ₂ SiO ₃ (Kg/m ³)	K ₂ SiO ₃ (Kg/m ³)	Coarse aggregates (Kg/m ³)	Fine aggregates (Kg/m ³)	SP (Kg/m ³)	Extra water (Kg/m ³)
MN	350	140	-	210	-	840	840	14	40
MK	350	-	140	-	210	840	840	14	40

Table 5. Mix design related to the effect of alkaline activator type on compressive strength

جدول ۶. طرح‌های اختلاط مربوط به تاثیر آب بر مقاومت فشاری

Mix ID	Metakaolin (Kg/m ³)	NaOH 14M (Kg/m ³)	Na ₂ SiO ₃ (Kg/m ³)	Coarse aggregates (Kg/m ³)	Fine aggregates (Kg/m ³)	SP (Kg/m ³)	Extra water (Kg/m ³)
M0	350	140	210	840	840	14	0
M20	350	140	210	840	840	14	20
M40	350	140	210	840	840	14	40
M60	350	140	210	840	840	14	60
M80	350	140	210	840	840	14	80

Table 6. Mix design related to the effect of extra water on compressive strength

جدول ۷. طرح‌های اختلاط مربوط به تاثیر غلظت محلول هیدروکسید سدیم بر مقاومت فشاری

Mix ID	Metakaolin (Kg/m ³)	NaOH (Kg/m ³)	Na ₂ SiO ₃ (Kg/m ³)	Coarse aggregates (Kg/m ³)	Fine aggregates (Kg/m ³)	SP (Kg/m ³)	Extra water (Kg/m ³)	NaOH concentration (M)
M10	350	140	210	840	840	14	40	10
M12	350	140	210	840	840	14	40	12
M14	350	140	210	840	840	14	40	14
M16	350	140	210	840	840	14	40	16

Table 7. Mix design related to the effect of NaOH concentration on compressive strength

جدول ۸. طرح‌های اختلاط مربوط به تاثیر نسبت وزنی محلول فعال‌کننده قلیایی به متاکائولن بر مقاومت فشاری

Mix ID	Metakaolin (Kg/m ³)	NaOH 14M (Kg/m ³)	Na ₂ SiO ₃ (Kg/m ³)	Coarse aggregates (Kg/m ³)	Fine aggregates (Kg/m ³)	SP (Kg/m ³)	Extra water (Kg/m ³)	alkaline activator/metakaolin weight ratio
M0.9	350	126	189	840	840	14	40	0.9
M1	350	140	210	840	840	14	40	1
M1.1	350	154	231	840	840	14	40	1.1

Table 8. Mix design related to the effect of alkaline activator/metakaolin ratio on compressive strength

جدول ۹. طرح‌های اختلاط مربوط به تاثیر نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم بر مقاومت فشاری

Mix ID	Metakaolin (Kg/m ³)	NaOH (Kg/m ³)	Na ₂ SiO ₃ (Kg/m ³)	Coarse aggregates (Kg/m ³)	Fine aggregates (Kg/m ³)	SP (Kg/m ³)	Extra water (Kg/m ³)	Na ₂ SiO ₃ /NaOH weight ratio
MR1	350	175	175	840	840	14	40	1
MR1.5	350	140	210	840	840	14	40	1.5
MR2	350	117	233	840	840	14	40	2
MR2.5	350	100	250	840	840	14	40	2.5
MR3	350	87.5	262.5	840	840	14	40	3

Table 9. Mix design related to the effect of Na₂SiO₃/NaOH ratio on compressive strength

که معمولاً پتاسیم به دلیل شعاع اتمی بزرگتر، باعث تشکیل اولیگومر سیلیکات‌های بزرگتر می‌شود که Al(OH)_4^- آن را ترجیح داده و به آن متصل می‌شود. بنابراین در حالت استفاده از محلول فعال‌کننده پتاسیمی، ژئوپلیمر بیشتری تشکیل می‌شود که منجر به تشکیل سیستم قوی‌تر و فشرده‌تر نسبت به محلول فعال‌کننده سدیمی، می‌شود [40] که نتیجه مقاومت فشاری ۳ و ۷ روزه کمتر، سخت شدن کندتر و مقاومت فشاری ۲۸ روزه بیشتر است. از سوی دیگر در محلول فعال‌کننده سدیمی، غلظت‌های مشابه هیدروکسید پتاسیم و هیدروکسید سدیم، دارد. همین امر باعث بالاتر بودن سرعت واکنش Na^+ در مقایسه با K^+ می‌شود [28, 41]. به دلیل همین سرعت بالای واکنش Na^+ ، در حالت استفاده از محلول فعال‌کننده سدیمی، مقاومت فشاری ۳ و ۷ روزه بیشتر و سخت شدن سریع‌تری نسبت به محلول پتاسیمی، بدست می‌آید. در پایان این بخش و جمع‌بندی نتایج به دست آمده، با توجه به این که مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها اختلاف زیادی نداشتند و توجه ویژه به این مطلب که قیمت محلول فعال‌کننده قلیایی پتاسیمی بیش از ۴ برابر بیشتر از نمونه سدیمی است، محلول فعال‌کننده قلیایی سدیمی برای انجام مراحل بعدی پژوهش انتخاب شد.

۳-۲- تاثیر میزان آب بر مقاومت فشاری

نتایج به دست آمده از آزمایش تاثیر میزان آب اضافه بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری در شکل (۲) ارائه شده است. شکل ۲. تاثیر میزان آب اضافه بر مقاومت فشاری

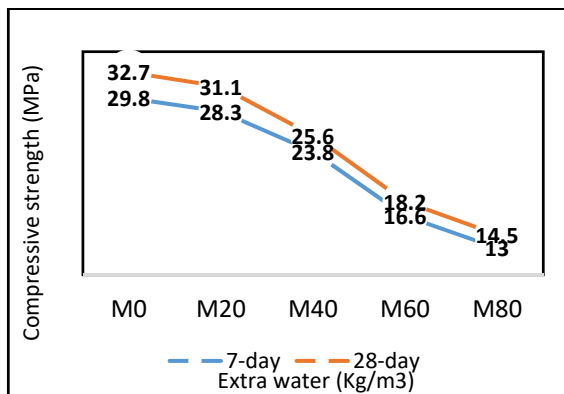


Fig. 2. Effect of extra water on compressive strength

نتایج نشان داد میزان آب اضافه موجود در طرح اختلاط تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری دارد. بیشترین

۳- نتایج

۳-۱- تاثیر نوع محلول فعال‌کننده قلیایی بر مقاومت فشاری

نتایج آزمایش تاثیر نوع محلول فعال‌کننده قلیایی بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری، در شکل (۱) ارائه شده است. مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه نمونه MN که برای ساخت آن از محلول هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم استفاده شده بود، $21/7$ و $23/8$ و $25/6$ مگاپاسکال و اندازه‌گیری شد. مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه نمونه MK که برای ساخت آن از محلول هیدروکسید پتاسیم و سیلیکات پتاسیم استفاده شده بود، $17/5$ ، $20/4$ و $27/3$ مگاپاسکال بود. نمونه MN تقریباً ۹۲ و ۸۸ درصد از مقاومت فشاری ۲۸ روزه خود را در ۷ و ۳ روزگی کسب کرد. این اعداد برای نمونه MK تقریباً ۷۴ و ۶۴ درصد بود. در مقایسه این ۲ نوع محلول فعال‌کننده قلیایی می‌توان گفت که نمونه MN مقاومت فشاری ۳ و ۷ روزه و همچنین روند کسب مقاومت در سنین پایین بیشتری را ارائه کرد. از سوی دیگر، در نمونه MK مقاومت فشاری ۲۸ روزه بیشتری مشاهده شد.

شکل ۱. تاثیر نوع محلول فعال‌کننده قلیایی بر مقاومت فشاری

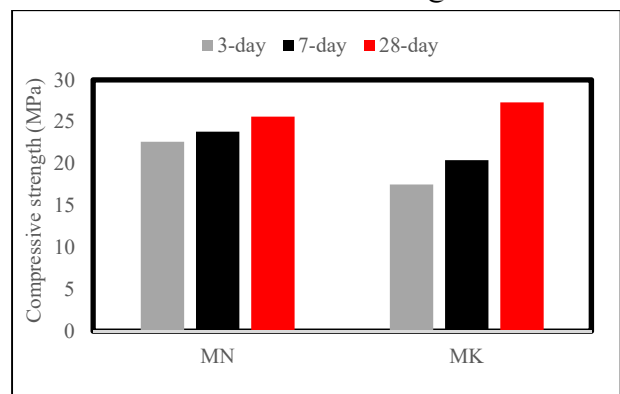


Fig. 1. Effect of alkaline activator type on compressive strength

این نتایج می‌تواند به تفاوت در سازوکار واکنش‌های K و Na مربوط باشد. سازوکار اثر محلول فعال‌کننده قلیایی برای شکستن ساختار سیلیکا و آلومینای منبع آلومیناسیلیکاتی، ایجاد یون سیلیکون و آلومینیوم و تشکیل خمیر ژئوپلیمر، طی ۳ مرحله انحلال، جهت‌گیری جزئی پیش‌ماده متحرک و بارگذاری مجدد ذرات از فاز جامد اولیه، انجام می‌شود [38 و 39]. نوع فعال‌کننده قلیایی نقش بسیار مهمی در پیشرفت فرآیند تولید ژئوپلیمر دارد

۳-۳- تاثیر غلظت محلول هیدروکسید سدیم بر مقاومت فشاری

نتایج مربوط به بررسی تاثیر غلظت محلول هیدروکسید سدیم بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری و بهینه یابی این پارامتر، در شکل (۳) ارائه شده است.

شکل ۳. تاثیر غلظت محلول هیدروکسید سدیم بر مقاومت فشاری

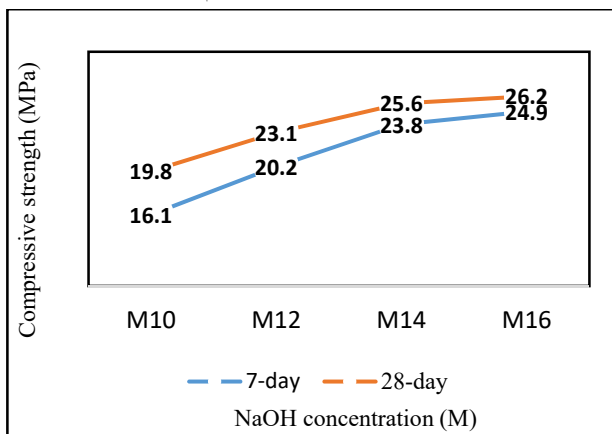


Fig. 3. Effect of NaOH concentration on compressive strength

با توجه به نتایج بدست آمده، کمترین مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه در حالت استفاده از هیدروکسید سدیم ۱۰ مول، به میزان ۱۶/۱ و ۱۹/۸ مگاپاسکال اندازه گیری شد. با افزایش غلظت محلول هیدروکسید سدیم از ۱۰ تا ۱۴ مول، مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نیز افزایش یافت. دلیل این موضوع این است که در غلظت های بالاتر، مقادیر بیشتری از سیلیکا و آلومینای منبع آلومیناسیلیکاتی در محلول فعال کننده قلیایی حل می شود، در نتیجه مقادیر بیشتری از ژل ژئوپلیمری تشکیل شده که نتیجه آن بالا رفتن مقاومت فشاری است [31]. اما با افزایش بیشتر غلظت از ۱۴ به ۱۶ مول، افزایش قابل ملاحظه ای در مقاومت فشاری مشاهده نشد. دلیل این موضوع می تواند این باشد که با افزایش غلظت محلول هیدروکسید سدیم به میزان بیشتر از حد بهینه (۱۴ مول)، یون های هیدروکسید بیشتری بلافاصله پس از شروع مراحل اول ژئوپلیمریزاسیون، در ژل آلومیناسیلیکاتی رسوب خواهند کرد. این موضوع می تواند سبب اختلال در واکنش ژئوپلیمریزاسیون و کاهش روند افزایش مقاومت فشاری و یا حتی کاهش مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری شود [42]. از سوی دیگر، یک روند افزایشی در کسب مقاومت زودرس (درصد کسب مقاومت

مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه در نمونه بدون آب اضافه، به میزان ۲۹/۱ و ۳۲/۷ مگاپاسکال، اندازه گیری شد. با اضافه کردن آب اضافه به ترکیب بتن، مقاومت فشاری کاهش یافت به طوری که در حالت آب اضافه ۸۰ کیلوگرم در مترمکعب، مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه ۵۴/۹ و ۵۵/۶ درصد کاهش یافت. دلیل این موضوع می تواند به پارامتر نسبت وزنی آب به مواد خشک، مربوط باشد که در آن آب شامل: وزن کل آب موجود در مخلوط بتن و مواد خشک شامل: وزن تمام مواد خشک شرکت کننده در ژئوپلیمریزاسیون شامل منبع آلومیناسیلیکاتی، مواد خشک موجود در محلول سیلیکات سدیم و هیدروکسید سدیم، است. با افزایش این نسبت (بیشتر از نسبت بهینه) مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد [25]. از سوی دیگر، اگرچه در حالتی که میزان آب اضافه و به تبع آن نسبت آب به مواد خشک، کمتر باشد مقاومت فشاری بیشتری به دست آمد اما مخلوط بتن کارایی بسیار پایینی داشت و استفاده از آن به لحاظ اجرایی دشوار بود. پس در این مقاله از آب اضافه به میزان ۴۰ کیلوگرم در مترمکعب استفاده شد تا با کمترین کاهش مقاومت فشاری، کارایی مناسب بتن تامین شود. در جدول (۱۰) نسبت آب به مواد خشک و مقاومت فشاری برای اندازه های مختلف آب اضافه، نشان داده شده است.

جدول ۱۰. نسبت آب به مواد خشک و مقاومت فشاری

Extra water (Kg/m ³)	Water/Solid ratio	Workability	28-days compressive strength (MPa)	Compressive strength loss than 0 Kg/m ³ (%)
0	0.4015	Very stiff	32.7	0
20	0.4415	Stiff	31.1	4.9
40	0.4816	Moderate	25.6	21.7
60	0.5216	High	18.2	44.3
80	0.5617	Very high	14.5	55.6

Table 10. Water/solid ratio and compressive strength

شکل ۴. تاثیر نسبت وزنی محلول فعال‌کننده قلیایی به متاکائولن، بر مقاومت فشاری

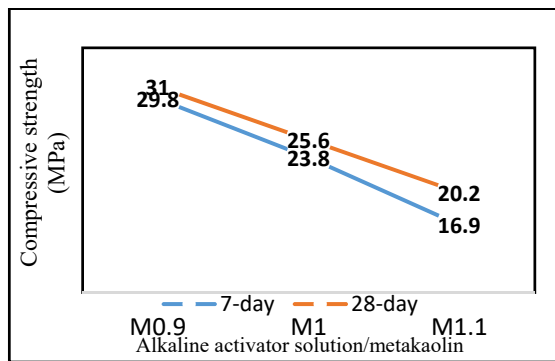


Fig. 4. Effect of alkaline activator solution/metakaolin ratio on compressive strength

۳-۵- تاثیر نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم، بر مقاومت فشاری

نتایج مربوط به بررسی اثر نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم، بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن و بهینه یابی این پارامتر، در شکل (۵) ارائه شده است. در نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم برابر با ۱، مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه، ۱۵ و ۱۶/۹ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. با افزایش نسبت به ۱/۵، مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت (۵۴ و ۵۱ درصد) و به ۲۳/۸ و ۲۵/۶ مگا پاسکال رسید. با افزایش بیشتر این نسبت تا ۳، مقاومت فشاری به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافت به طوری که در نسبت ۳، مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه ۴۱ و ۴۳ درصد، نسبت به ۱/۵ کاهش یافت. در نتیجه در این پژوهش ۱/۵ به عنوان نسبت بهینه برای این پارامتر سنجش شد.

شکل ۵. تاثیر نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم، بر مقاومت فشاری

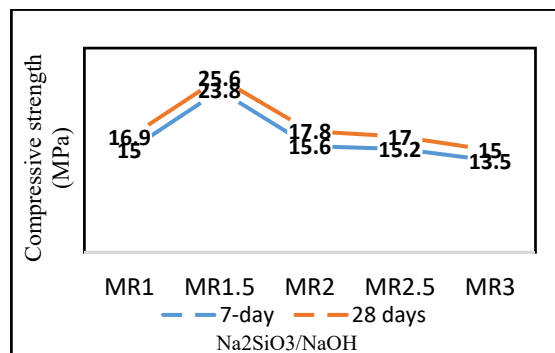


Fig. 5. Effect of Na₂SiO₃/NaOH ratio on compressive strength نقش محلول فعال‌کننده قلیایی به ویژه هیدروکسید سدیم یا پتاسیم، حل کردن Si و Al موجود در منبع آلومیناسیلیکاتی و تولید SiO₄ و AlO₄ برای تولید ژل ژئوپلیمری است. اضافه

فشاری ۲۸ روزه در ۷ روزگی) با افزایش غلظت محلول هیدروکسید سدیم، در نمونه‌ها دیده شد که می‌تواند مربوط به افزایش میزان انحلال آلومینا و سیلیکا و تسریع روند ژئوپلیمریزاسیون با افزایش غلظت، باشد. جدول (۱۱) تاثیر غلظت محلول هیدروکسید سدیم را بر روند کسب مقاومت زودرس، نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده، هیدروکسید سدیم با غلظت ۱۴ مول برای ادامه آزمایش‌ها انتخاب شد.

جدول ۱۱. غلظت محلول هیدروکسید سدیم و مقاومت زودرس

NaOH concentration (M)	28-days compressive strength (MPa)	Compressive strength development than NaOH 10M (%)	28-day compressive strength obtained in 7 days (%)
10	19.8	0	81.3
12	23.1	16.6	86.6
14	25.6	29.3	92.9
16	26.2	32.3	95

Table 11. NaOH concentration and early compressive strength

۳-۴- تاثیر نسبت وزنی محلول فعال‌کننده قلیایی به متاکائولن، بر مقاومت فشاری

نتایج مربوط به بررسی اثر نسبت وزنی محلول فعال‌کننده قلیایی به متاکائولن بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن و بهینه یابی این پارامتر، در شکل (۴) ارائه شده است. همان طور که نتایج می‌دهد، این پارامتر تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری دارد. در نسبت بیشترین مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ بتن به میزان ۲۸/۹ و ۳۱ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. با افزایش این نسبت به ۱ و ۱/۱، مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۱۷/۴ و ۳۴/۸ و مقاومت فشاری ۷ روزه ۲۱/۴ و ۴۴/۵ درصد کاهش یافت. دلیل این موضوع می‌تواند به افزایش نسبت آب به مواد خشک، با افزایش این نسبت، مربوط باشد.

در این پژوهش بیشترین مقاومت فشاری در نسبت ۰/۹ به دست آمد اما از سوی دیگر در نسبت ۰/۹ اگرچه بتن مقاومت فشاری بالایی را ارائه کرد اما این طرح اختلاط کارایی پایینی داشت و به لحاظ اجرایی دارای مشکل خشکی بتن بود. پس نسبت ۱ در این پژوهش برای این پارامتر انتخاب شد.

قابل ملاحظه سرعت روند ژئوپلیمریزاسیون می‌شود [47 و 46 و 39]. 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. از سوی دیگر، افزایش دما به بیش از دمای بهینه، سبب افزایش حفره‌ها و تخلخل در بتن به دلیل شکل گرفتن خیلی سریع ساختار ژئوپلیمری، می‌شود. در نتیجه مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری کاهش می‌یابد [48].

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش آزمایشگاهی، تلاش شد تا در حد توان به بررسی برخی از پارامترهای تاثیرگذار بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری پرداخته شود. در همین راستا پس از انجام آزمایش‌های مربوطه موارد زیر به عنوان نتایج مشخص این پژوهش ارائه می‌شود:

۱- نوع محلول فعال‌کننده قلیایی از پارامترهای تاثیرگذار بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری است. استفاده از محلول سیلیکات پتاسیم و هیدروکسید پتاسیم، به دلیل میل واکنشی K^+ به انجام واکنش تراکمی و تشکیل اولیگومر سیلیکات‌های بزرگ‌تر، سبب دستیابی به مقاومت فشاری ۲۸ روزه بیشتر نسبت به سیلیکات سدیم و هیدروکسید سدیم شد. استفاده از سیلیکات سدیم و هیدروکسید سدیم به دلیل میل واکنشی Na^+ به انجام سریع واکنش ژئوپلیمریزاسیون و میزان بیشتر انحلال Al و Si در محلول هیدروکسید سدیم، منجر به دستیابی به مقاومت فشاری ۳ و ۷ روزه بیشتر و همچنین کسب مقاومت زودرس بیشتر، نسبت به محلول سیلیکات پتاسیم و هیدروکسید پتاسیم شد.

۲- اضافه کردن آب اضافه به بتن ژئوپلیمری، سبب افزایش نسبت آب به مواد خشک شرکت کننده در ژئوپلیمریزاسیون شد. این نسبت از پارامترهای تاثیرگذار بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن است. با افزایش این نسبت مقاومت فشاری به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش یافت. میزان بهینه این پارامتر در این پژوهش 0.416 سنجش شد که با کمترین کاهش مقاومت فشاری، کارایی مناسب برای بتن را تامین کرد.

کردن یک محلول سیلیکاتی مانند سیلیکات سدیم یا پتاسیم به محلول فعال‌کننده قلیایی، به دلیل داشتن Si محلول، سبب افزایش میزان SiO_4 و نرخ واکنش ژئوپلیمریزاسیون و به تبع آن افزایش مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری می‌شود. در این میان، اضافه کردن میزان کم (کمتر از نسبت بهینه) محلول سیلیکات سدیم به دلیل کمتر شدن میزان Si محلول و در نتیجه آن کمتر شدن میزان SiO_4 ، سبب کاهش مقاومت فشاری می‌شود. اما از سوی دیگر، اضافه کردن میزان اضافی (بیشتر از نسبت بهینه) سیلیکات سدیم هم سبب کاهش مقاومت فشاری می‌شود زیرا در این حالت مقادیر بیش از حد SiO_4 تولید می‌شود در حالی که میزان AlO_4 در ترکیب ثابت (با محدود) است [43 و 33]. در نتیجه با خارج شدن نسبت Si/Al از محدوده بهینه، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد.

۳-۶- تاثیر دمای عمل‌آوری بر مقاومت فشاری

نتایج مربوط به بررسی اثر دمای عمل‌آوری بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن و بهینه یابی این پارامتر، در شکل (۶) ارائه شده است.

شکل ۶. تاثیر دمای عمل‌آوری بر مقاومت فشاری

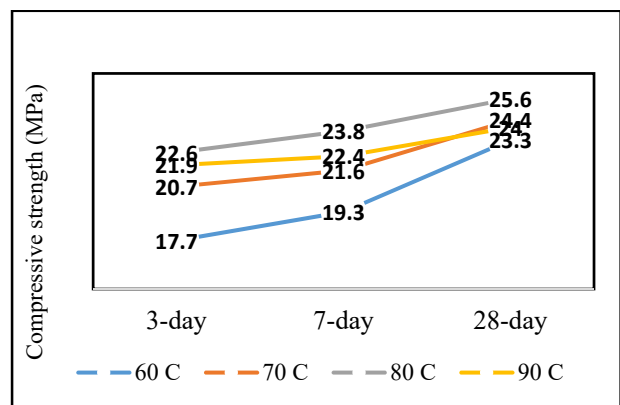


Fig. 6. Effect of curing temperature on compressive strength

نتایج شکل (۶) نشان می‌دهد با افزایش دمای کیورینگ از ۶۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه بتن افزایش می‌یابد و این افزایش مقاومت در مقاومت فشاری ۷ روزه بسیار محسوس‌تر است. اما افزایش بیشتر دما به ۹۰ درجه سانتی‌گراد سبب کاهش مقاومت فشاری شده است. همچنین با توجه به نتایج مشاهده شد که برخلاف مقاومت فشاری ۳ و ۷ روزه، مقاومت ۲۸ روزه نمونه‌ها به هم نزدیک بود. افزایش دمای کیورینگ سبب افزایش نسبی میزان ژئوپلیمریزاسیون و افزایش

۵. منابع

- ۳- غلظت محلول هیدروکسید سدیم نیز از دیگر پارامترهای تاثیرگذار بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن است. افزایش غلظت از ۱۰ به ۱۴ مول، سبب افزایش ۲۹/۳ درصدی مقاومت فشاری به دلیل افزایش میزان انحلال Si و Al (موجود در متاکائولن) توسط محلول فعال کننده قلیایی، شد. با افزایش بیشتر غلظت از ۱۴ به ۱۶ مول تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقاومت فشاری مشاهده نشد. همچنین افزایش غلظت محلول هیدروکسید سدیم علاوه بر افزایش مقاومت فشاری، سبب افزایش روند کسب مقاومت فشاری زودرس به دلیل افزایش میزان انحلال و در نتیجه آن تسریع روند ژئوپلیمریزاسیون، شد.
- ۴- نسبت وزنی محلول فعال کننده قلیایی به منبع آلومیناسیلیکاتی از پارامترهای تاثیرگذار بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن است. بیشترین مقاومت فشاری در نسبت ۰/۹/۱ اندازه‌گیری شد. با افزایش این نسبت به ۱ و ۱/۱، مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۱۷/۴ و ۳۴/۸ و کاهش یافت. دلیل این موضوع می‌تواند به افزایش نسبت آب به مواد خشک شرکت کننده در ژئوپلیمریزاسیون، مربوط باشد.
- ۵- نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به محلول هیدروکسید سدیم نیز یکی از پارامترهای تاثیرگذار در مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن است. در این نسبت‌های ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ مورد مطالعه قرار گرفت. با افزایش نسبت از ۱ به ۱/۵ (میزان بهینه) بیشترین مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری به دلیل افزایش Si محلول، اندازه‌گیری شد. با افزایش بیشتر این نسبت تا ۳، مقاومت فشاری به دلیل وجود مقادیر بیش از حد SiO₄ و خارج شدن نسبت Si/Al از محدوده بهینه، تقریباً ۴۲ درصد کاهش یافت.
- ۶- دمای عمل‌آوری (کیورینگ) نیز یکی از پارامترهای تاثیرگذار در مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن است. با افزایش دما تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد به دلیل افزایش نسبی میزان ژئوپلیمریزاسیون و افزایش قابل ملاحظه سرعت روند ژئوپلیمریزاسیون، سبب افزایش نسبی مقاومت فشاری ۲۸ روزه و افزایش قابل ملاحظه مقاومت فشاری ۳ و ۷ روزه بتن ژئوپلیمری شد اما با افزایش بیشتر دما به ۹۰ درجه سانتی‌گراد به دلیل ایجاد تخلخل در بتن، مقاومت فشاری کاهش یافت.
- [1] Malhotra VM. Making concrete 'greener' with fly ash. *ACI Concrete International*. 1999;21:61-6.
- [2] Assi LN, Eddie Deaver E, Ziehl P. Effect of source and particle size distribution on the mechanical and microstructural properties of fly Ash-Based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*. 2018;167:372-80.
- [3] Malhotra VM. Reducing CO2 Emissions. *ACI Concrete International*. 2006;28:42-5.
- [4] Phummiphan I, Horpibulsuk S, Rachan R, Arulrajah A, Shen S-L, Chindapasirt P. High calcium fly ash geopolymer stabilized lateritic soil and granulated blast furnace slag blends as a pavement base material. *Journal of Hazardous Materials*. 2018;341:257-67.
- [5] McCaffrey R. Climate Change and the Cement Industry. *Global Cement and Lime Magazine (Environmental Special Issue)*. 2002:15-9.
- [6] Andrejkovičová S, Sudagar A, Rocha J, Patinha C, Hajjaji W, da Silva EF, et al. The effect of natural zeolite on microstructure, mechanical and heavy metals adsorption properties of metakaolin based geopolymers. *Applied Clay Science*. 2016;126:141-52.
- [7] Chen C, Habert G, Bouzidi Y, Jullien A. Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation. *Journal of Cleaner Production*. 2010;18:478-85.
- [8] Meyer C. The greening of the concrete industry. *Cement & Concrete Composites*. 2009;31(8):601-5.
- [9] Bashir I, Kapoor K, Sood H. An Experimental Investigation on the Mechanical Properties of Geopolymer Concrete. *International Journal of Latest Research in Science and Technology*. 2017;6(3):33-6.
- [10] Ekinçi E, Türkmen İ, Kantarci F, Karakoç MB. 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. *Construction and Building Materials*. 2019;201:257-67.
- [11] Karakoç MB, Türkmen İ, Maras MM, Kantarci F, Demirbog̃a R, Ug̃ur Toprak M. Mechanical properties and setting time of ferrochrome slag based geopolymer paste and mortar. *Construction and Building Materials*. 2014;72(Supplement C):283-92.
- [12] Yaseri S, Hajiaghahi G, Mohammadi F, Mahdikhani M, Farokhzad R. The role of synthesis parameters on the workability,

- metakaolin-based geopolymers. *Construction and Building Materials*. 2013;48:441-7.
- [24] Görhan G, Kürklü G. The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures. *Composites Part B: Engineering*. 2014;58:371-7.
- [25] Hardjito D, Wallah SE, Sumajouw DMJ, Rangan BV. On the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *ACI Materials Journal*. 2004;101(6):467-72.
- [26] Davidovits J. *Geopolymer Chemistry and Properties*. Geopolymer '88; France 1988. p. 25-48.
- [27] Davidovits J. *Soft Mineralogy and Geopolymers*. Geopolymer '88; France 1988. p. 19-23.
- [28] Xu H, van Deventer JSJ. The Geopolymerisation of Alumino-Silicate Minerals. *International Journal of Mineral Processing* 2000;59(3):247-66.
- [29] Rashad AM. A comprehensive overview about the influence of different additives on the properties of alkali-activated slag – A guide for Civil Engineer. *Construction and Building Materials*. 2013;47:29-55.
- [30] Sharma A, Ahmad J. Experimental study of factors influencing compressive strength of geopolymer concrete. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2017;4(5):1306-13.
- [31] Patel YJ, Shah N. Study on Workability and Hardened Properties of Self Compacted Geopolymer Concrete Cured at Ambient Temperature. *Indian Journal of Science and Technology*. 2018;11(1):1-12.
- [32] Hardjito D, Rangan BV. Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete [Research Report]: Faculty of Engineering Curtin University of Technology, Perth, Australia; 2005.
- [33] Petrus HTBM, Hulu J, Dalton GSP, Malinda E, Prakosa RA. Effect of Bentonite Addition on Geopolymer Concrete from Geothermal Silica. *Materials Science Forum*. 2016;841:7-15.
- [34] ASTM C127-15, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
- [35] ASTM C128-15, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
- setting and strength properties of binary binder based geopolymer paste. *Construction and Building Materials*. 2017;157(Supplement C):534–45.
- [13] Karthik A, Sudalaimani K, Vijaya Kumar CT. Investigation on mechanical properties of fly ash-ground granulated blast furnace slag based self curing bio-geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*. 2017;157(Supplement C):338–49.
- [14] Bagheri A, Nazari A. Compressive strength of high strength class C flyash-based geopolymers with reactive granulated blast furnace slag aggregates designed by Taguchi method. *Materials & Design*. 2014;54:483–90.
- [15] Cheng TW, Chiu JP. Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag. *Minerals Engineering*. 2003;16(3):205-10.
- [16] Sakkas K, Panyas D, Nomikos PP, Sofianos AI. Potassium based geopolymer for passive fire protection of concrete tunnels linings. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2014;43:148-56.
- [17] Sarker PK, Kelly S, Yao Z. Effect of fire exposure on cracking, spalling and residual strength of fly ash geopolymer concrete. *Materials & Design*. 2014;63:584-92.
- [18] Lee WKW, van Deventer JSJ. The effects of inorganic salt contamination on the strength and durability of geopolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2002;211(2):115-26.
- [19] Palomo A, Blanco-Varela MT, Granizo ML, Puertas F, Vazquez T, Grutzeck MW. Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin. *Cement and Concrete Research*. 1999;29(7):997-1004.
- [20] Zhang M, Guo H, El-Korchi T, Zhang G, Tao M. Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer. *Construction and Building Materials*. 2013;47:1468-78.
- [21] Wallah SE. Creep Behaviour of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *Civil Engineering Dimension*. 2010;12(2):73-8.
- [22] DeSilva P, Sagoe-Crenstil K, Sirivivatnanon V. Kinetics of geopolymerization: role of Al₂O₃ and SiO₂. *Cement and Concrete Research*. 2007;37(4):512-8.
- [23] Gao K, Lin K-L, Wang D, Hwang C-L, Anh Tuan BL, Shiu H-S, et al. Effect of nano-SiO₂ on the alkali-activated characteristics of

- [43] Kusumastuti E. Coal Fly Ash Geopolymer: A Study of SiO₂/Al₂O₃ Mol Ratio and The Resulted Geopolymer Properties [Master Program Thesis]: Institut Teknologi Sepuluh 2009.
- [44] van Jaarsveld JGS, van Deventer JSJ, Lukey GC. The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based geopolymers. *Chemical Engineering Journal*. 2002;89(1-3):63-73.
- [45] Satpute Manesh B, Wakchaure Madhukar R, Patankar Subhash V. Effect of duration and temperature of curing on compressive strength of geopolymer concrete. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)* Volume. 2012;1:372-91.
- [46] Ahmed MNS, Nuruddin M, Demie S, Shafiq N. Effect of curing conditions on strength of fly ash based self-compacting geopolymer concrete. *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*. 2011;5(8):8-22.
- [47] Muhammad N, Baharom S, Ghazali NAM, Alias NA. Effect of Heat Curing Temperatures on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *International Journal of Engineering & Technology*. 2019;8(1.2):15-9.
- [48] Rovnaník P. Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials*. 2010;24(7):1176-83.
- [36] ASTM C136 / C136M-14, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [37] ASTM D2419-14, Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [38] Duxson P, Provis JL, Lukey GC, van Deventer JSJ. The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete'. *Cement and Concrete Research*. 2007;37(12):1590-7.
- [39] Davidovits J. Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology In: Proceedings of 99 International Conference. eds Joseph Davidovits, R Davidovits & C James, France. 1999.
- [40] Komnitsas K, Zaharaki D, Perdikatsis V. Effect of synthesis parameters on the compressive strength of low-calcium ferronickel slag inorganic polymers. *Journal of Hazardous Materials*. 2009;161(2):760-8.
- [41] Panagiotopoulou C, Kakali G, Tsvivilis S, Perraki T, Perraki M. Synthesis and Characterisation of Slag Based Geopolymers. *Materials Science Forum*. 2010;636-637:155-60.
- [42] Memon FA, Nuruddin MF, Shafiq N. Effect of silica fume on the fresh and hardened properties of fly ash-based self-compacting geopolymer concrete. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. 2013;20(2):205-13.

Factors Influencing Compressive Strength of Metakaolin-based Geopolymer Concrete

Alireza Esparham, Amir Bahador Mordikhou*

MSc. of civil engineering, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Abstract

Concrete due to its special feature, is the most widely consumed material in the world, after water. But the production process of ordinary Portland cement as a main component of conventional concretes, has major disadvantages such as high amount of carbon dioxide emission and high energy consumption. Therefore, it seems necessary to find an alternative to ordinary Portland cement. In recent years, geopolymer has been introduced as a novel cementing agent and green alternative to the Portland cement which can eliminate the extensive negative of ordinary Portland cement production process. According to the needed engineering characteristics perspective in civil engineering, the geopolymer concretes have better chemical and mechanical properties than the ordinary ones such as high compressive, flexural and tensile strength, rapid hardening, resistance against high heat and firing, low penetration, resistance against salts and acids attacks and low creep. Compressive strength is considered as one of the important characteristics of concrete. In geopolymer concretes, according to the ingredients, several factors have been identified as important parameters affecting the compressive strength like: the type of aluminosilicate source, the molar composition of the oxides present in the aluminosilicate source, the curing regime, the water content, the weight ratio of alkaline activator solution to aluminosilicate source, alkaline activator solution parameters and etc. Hence, in this experimental research, several factors affecting the compressive strength of metakaolin-based geopolymer concrete including: the type of alkaline activator solution, the weight ratio of water to solid material participated in geopolymerization, sodium hydroxide concentration, the weight ratio of alkaline activator solution to aluminosilicate source and sodium silicate to sodium hydroxide weight ratio, were studied. In this regard, geopolymer concrete specimens were made and cured in 80 °C for 24 hours. After curing, specimens were placed in the ambient condition and compressive strength test, were performed. The obtained results indicated that using potassium hydroxide and potassium silicate as an alkaline activator solution, result in higher 28-day compressive strength of geopolymer concrete compare to sodium-based alkaline activator solution. On the other hand, using sodium hydroxide and sodium silicate as an alkaline activator solution, result in higher 3- and 7-day compressive strengths and also, faster hardening compare to potassium-based alkaline activator solution. Furthermore, increasing the weight ratio of water to solid material result in significant decreasing geopolymer concrete compressive strength. Also, 7-and 28-day compressive strength of geopolymer concrete is increases with increase in concentration of sodium hydroxide up to 14 M, but for 16 M, there is no remarkable changes in compressive strength. Besides, increasing sodium hydroxide concentration, causes faster hardening of geopolymer concrete. It is also absorbed that increasing the alkaline activator solution to metakaolin weight ratio result in decreasing geopolymer concrete compressive strength. Moreover, Increasing the weight ratio of sodium silicate to sodium hydroxide up to 1.5 (the optimum ratio), leads to achieve the highest 7-and 28-day compressive strengths of geopolymer concrete, but 7-and 28-day compressive strengths of geopolymer concrete is decreases noticeably, with further increase in weight ratio of sodium silicate to sodium hydroxide ratio up to 3. Compressive strength of geopolymer concrete is increases with increase in curing temperature up to 80 °C, but further increase up to 90 °C, result in decreasing geopolymer concrete compressive strength.

Keyword: geopolymer concrete, metakaolin, compressive strength, alkaline activator solution, sodium, potassium.