



فاکتورهای تأثیرگذار بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی

علیرضا اسپرهم، امیربهادر مرادی خو*

باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۰۱

بازنگری: ۱۳۹۸/۰۹/۱۰

پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۱۲

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۰۹/۱۹

کلمات کلیدی:

بتن ژئوپلیمری

خاکستر بادی

مقاومت فشاری

محلول فعال کننده قلیایی

فاکتورهای تأثیرگذار بر مقاومت

فشاری

خلاصه: در سال‌های اخیر ژئوپلیمر به عنوان یک عامل سیمانی جدید و دوست‌دار محیط زیست، به عنوان جایگزینی برای سیمان پرتلند مطرح شده است. 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 تأثیر قرار دهد. در این پژوهش آزمایشگاهی، برخی از پارامترهای تأثیرگذار شامل: نوع محلول فعال کننده قلیایی، غلظت محلول هیدروکسید سدیم، نسبت وزنی محلول فعال کننده قلیایی به منبع آلومیناسیلیکاتی، نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم، دما و زمان عمل‌آوری و میزان آب، مورد مطالعه قرار گرفت. در همین راستا نمونه‌ها ساخته و عمل‌آوری شدند و آزمون مقاومت فشاری از نمونه‌ها گرفته شد. نتایج نشان داد استفاده از محلول فعال کننده پتاسیمی منجر به دستیابی به مقاومت فشاری ۲۸ روزه بیشتر و محلول فعال کننده 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 در بتن ژئوپلیمری سبب افزایش نسبت آب به مواد خشک و کاهش چشمگیر مقاومت فشاری شد. میزان بهینه نسبت وزنی محلول فعال کننده قلیایی به منبع آلومیناسیلیکاتی و نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم به ترتیب ۰/۵ و ۱/۵ سنجش شد. افزایش دما و زمان عمل‌آوری تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد و ۳۶ ساعت، سبب افزایش نسبی مقاومت فشاری ۲۸ روزه و افزایش قابل ملاحظه مقاومت ۳ و ۷ روزه بتن ژئوپلیمری شد.

۱- مقدمه

پرتلند سبب تولید تقریباً ۱ تن دی‌اکسید کربن می‌شود [۳،۲]. 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 [۵،۴]. در نتیجه فرآیند تولید سیمان پرتلند به عنوان یکی از منابع مهم انتشار گاز دی‌اکسید کربن و گرمایش جهانی شناخته می‌شود [۶]. کارشناسان تولید سیمان پرتلند را عامل انتشار ۷ تا ۱۰ درصد از انتشار جهانی دی‌اکسید کربن می‌دانند [۸،۷]. از این رو نیاز به

بتن به علت دارا بودن 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 [۱]. اما فرآیند 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

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: amirbahador.mk@gmail.com



استفاده از جایگزین برای سیمان پرتلند ضروری به نظر می‌رسد.

در سال‌های اخیر ژئوپلیمر به عنوان یک عامل سیمانی جدید و دوست‌دار محیط زیست، به عنوان جایگزینی برای سیمان پرتلند مطرح شده است که می‌تواند منجر به کاهش مشکلات زیست محیطی ناشی از تولید سیمان پرتلند شود [۹]. ژئوپلیمر برای اولین بار در سال ۱۹۷۸ میلادی توسط داویدوویتس شیمیدان برجسته فرانسوی، به عنوان بایندهای جدیدی از خانواده پلیمرهای معدنی، معرفی شد [۱۰]. 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 به مقاومت‌های مکانیکی بیشتر و سخت شدن سریع [۱۱-۱۴]، مقاومت در برابر آتش‌سوزی و حرارت‌های بالا [۱۵-۱۷]، دوام بیشتر [۱۸]، نفوذپذیری کمتر و مقاومت در برابر حمله نمک‌ها و اسیدها [۱۹] و خزش کمتر [۲۰، ۲۱]، اشاره کرد.

ژئوپلیمرها مواد آلومیناسیلیکاتی غیرآلی هستند که از واکنش ژئوپلیمریزاسیون منبع آلومیناسیلیکاتی غنی از سیلیکا و آلومینا، با یک محلول فعال‌کننده قلیایی حاصل می‌شوند [۲۲]. 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 [۲۳، ۲۴]. منبع آلومیناسیلیکاتی بسته به خواص مورد نیاز، هزینه و در دسترس بودن می‌تواند طبیعی مانند زئولیت، صنعتی مانند متاکاتولن و یا ضایعاتی مانند خاکستر بادی یا سرباره کوره آهن‌گدازی باشد. خاکستر بادی محصول ضایعاتی نیروگاه‌های حرارتی زغال‌سنگ سوز است. پس از سوختن زغال‌سنگ، خاکستر به دست آمده به وسیله ته‌نشین کننده الکترواستاتیکی یا فیلتر کیسه‌ای (و یا هر دو) که در محل گازهای خروجی کوره قرار دارد، جمع‌آوری می‌شود. ترکیب شیمیایی خاکستر بادی بسته به نوع زغال‌سنگ مصرفی متغیر است، اما در حالت کلی، خاکستر بادی در دو کلاس C (دارای مقادیر زیاد اکسید کلسیم)، فلی‌اش کلاس F (حاوی مقادیر کم اکسید کلسیم) تقسیم‌بندی می‌شود. 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 مورد استفاده در

ژئوپلیمرها، ترکیبی از محلول هیدروکسید سدیم یا پتاسیم با محلول سیلیکات سدیم یا پتاسیم است [۲۵].

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 مخلوط و شرایط عمل‌آوری و غیره، از پارامترهای تأثیرگذار بر مقاومت فشاری، شمرده می‌شود. در همین راستا تحقیقات مختلفی انجام شده است.

در پژوهش‌های آغازین در مورد ژئوپلیمرها توسط داویدوویتس [۲۶، ۲۷]، از محلول هیدروکسید سدیم یا هیدروکسید پتاسیم بدون محلول سیلیکاتی، به عنوان محلول فعال‌کننده قلیایی استفاده می‌شد. ژو و همکاران [۲۸] نیز در جریان پژوهش در ژئوپلیمرها، از محلول هیدروکسید سدیم و هیدروکسید پتاسیم بدون محلول سیلیکاتی، به عنوان محلول فعال‌کننده قلیایی استفاده کردند و نتیجه‌گیری کردند در این نوع از محلول‌های فعال‌کننده قلیایی، هیدروکسید پتاسیم نتایج بهتری را ارائه می‌کند. پالومو و همکاران [۱۹] در تحقیقات خود دریافتند که محلول فعال‌کننده قلیایی نقش مهمی در واکنش ژئوپلیمریزاسیون دارد و اضافه کردن یک محلول سیلیکاتی مانند سیلیکات سدیم یا پتاسیم به محلول هیدروکسید سدیم یا پتاسیم، می‌تواند به بالا رفتن نرخ واکنش کمک و نتایج بهتری را همراه داشته باشد و همچنین آنها نتیجه‌گیری 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. چنگ و همکاران [۱۵] نیز در جریان تحقیقات خود بر روی ژئوپلیمرهای ضد حریق، نتایج مشابهی گرفتند.

راشد [۲۹] در پژوهشی در مورد ژئوپلیمرها نتیجه‌گیری کرد که در حالت کلی، در اغلب موارد با افزایش غلظت محلول هیدروکسید سدیم تا یک غلظت خاص، مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری افزایش می‌یابد. شارما و دیگران [۳۰] نیز در پژوهشی در مورد فاکتورهای تأثیرگذار بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی، نتیجه‌گیری

دلیل ایجاد ترک، تأثیر منفی بر خواص بتن دارد و در پایان دماهای میانه را برای عمل‌آوری بتن ژئوپلیمری پیشنهاد کردند. هاردجیتو و همکاران [۲۵] نیز در پژوهشی نقش این پارامتر را بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی، مورد بررسی قرار داده و علاوه بر تأثیرگذار بودن این پارامتر نتیجه‌گیری کردند که افزایش دمای عمل‌آوری سبب افزایش مقاومت فشاری بتن می‌شود؛ اما در دماهای بالاتر از ۶۰ درجه سانتی‌گراد، تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقاومت فشاری بتن دیده نمی‌شود. این در حالی است که ساتپوت منش و همکاران [۳۵] نتیجه‌گیری کردند که در دمای بالاتر از ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت فشاری بتن افزایش قابل ملاحظه‌ای پیدا نمی‌کند. در رابطه با زمان عمل‌آوری، پالومو و دیگران [۱۹] نتیجه‌گیری کردند که با افزایش زمان عمل‌آوری مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری افزایش می‌یابد. هاردجیتو و همکاران [۳۲] نیز در پژوهش خود نتیجه‌گیری کردند که با افزایش زمان عمل‌آوری تا ۲۴ ساعت، مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری افزایش می‌یابد؛ اما در زمان‌های بیشتر از ۲۴ ساعت، تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقاومت فشاری اتفاق نمی‌افتد. این در حالی است که احمد و همکاران [۳۶] نتیجه‌گیری کردند که در زمان‌های عمل‌آوری بیشتر از ۴۸ ساعت، تغییر محسوسی در مقاومت فشاری دیده نمی‌شود.

در این پژوهش آزمایشگاهی، برخی از پارامترهای تأثیرگذار بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی، مورد مطالعه قرار گرفت. پارامترهای مذکور 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، زمان 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- مصالح مصرفی

منبع آلومیناسیلیکاتی مورد استفاده در این تحقیق خاکستر بادی کلاس F بود. مشخصات خاکستر بادی مصرفی در جدول ۱ ارائه شده است. از هیدروکسید سدیم با خلوص ۹۸ درصد، هیدروکسید پتاسیم

کردند که با افزایش غلظت محلول هیدروکسید سدیم تا ۱۶ مول، مقاومت فشاری بتن افزایش می‌یابد اما با افزایش بیشتر غلظت تا ۱۸ مول، تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقاومت فشاری دیده نمی‌شود؛ در حالی که پاتل و دیگران [۳۱] نتیجه‌گیری کردند که با افزایش غلظت محلول هیدروکسید سدیم تا ۱۲ مول در بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد و افزایش غلظت به بیشتر از ۱۲ مول سبب کاهش مقاومت فشاری می‌شود. در رابطه با نسبت وزنی محلول فعال‌کننده قلیایی به منبع آلومیناسیلیکاتی، شارما و همکاران [۳۰] نتیجه‌گیری کردند که با افزایش نسبت محلول فعال‌کننده قلیایی به منبع آلومیناسیلیکاتی (خاکستر بادی) از ۰/۳۵ تا ۰/۴۵، مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری افزایش می‌یابد؛ اما با افزایش بیشتر این نسبت تا ۰/۵، مقاومت فشاری به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. این در حالی است که هاردجیتو و همکاران [۳۲] با افزایش نسبت محلول فعال‌کننده قلیایی به منبع آلومیناسیلیکاتی (خاکستر بادی) از ۰/۳۵ تا ۰/۴۵، شاهد کاهش مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بودند. در مورد نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم، هاردجیتو و همکاران [۳۲] 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 پتروس و همکاران [۳۳] 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 مخلوط بتن ژئوپلیمری نیز اکثر پژوهشگران نتیجه‌گیری کردند که با افزایش آب موجود در طرح مخلوط، مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری کاهش می‌یابد [۲۵، ۳۰، ۳۲].

یکی دیگر از پارامترهای تأثیرگذار بر مقاومت فشاری بتن‌های ژئوپلیمری که در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفت، شرایط عمل‌آوری (کیورینگ) است. که خود شامل دو فاکتور دما و زمان است. ون جارسولد و همکاران [۳۴] در پژوهشی در این رابطه نتیجه‌گیری کردند که شرایط عمل‌آوری از پارامترهای تأثیرگذار بر مقاومت فشاری ژئوپلیمرهاست. این پژوهشگران از دماهای بالا برای عمل‌آوری استفاده کردند و دریافتند که این شرایط عمل‌آوری به

نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین ضریب نرمی ماسه مطابق با استاندارد ASTM C136 [۳۹، ۳/۰۱۱۳، میزان رد شده از الک شماره ۲۰۰، ۰/۷۲ درصد و ارزش ماسه‌ای نیز بر اساس استاندارد ASTM D2419 [۴۰]، ۷۳ اندازه‌گیری شد.

۲-۲- مطالعه تأثیر نوع محلول فعال‌کننده قلیایی بر مقاومت فشاری

در این بخش به منظور بررسی تأثیر نوع محلول فعال‌کننده قلیایی بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری، ۲ طرح مخلوط تنظیم شد که این طرح‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. در این طرح‌های مخلوط، از ۲ محلول فعال‌کننده قلیایی مختلف شامل: ۱- هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم و ۲- هیدروکسید پتاسیم و سیلیکات پتاسیم، برای ساختن بتن ژئوپلیمری استفاده شد. از نمونه‌ها آزمون مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه گرفته شد.

با خلوص ۹۰ درصد، محلول سیلیکات سدیم مایع با نسبت SiO_2 به Na_2O برابر با ۲ و محلول سیلیکات پتاسیم مایع با نسبت SiO_2 به K_2O برابر با ۲/۱، برای ساخت محلول‌های فعال‌کننده قلیایی استفاده شد. آنالیز شیمیایی این مواد در جدول ۲ ارائه شده است. آب مصرفی نیز آب لوله کشی شهر تهران بود. از روان‌کننده پلی‌کربوکسیلاتی با وزن مخصوص ۱/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب، به منظور بالا بردن کارایی بتن استفاده شد.

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 C127 [۳۷] از شن مصرفی، گرفته شد. این آزمایش از ماسه نیز مطابق با استاندارد ASTM C1۲۸ [۳۸]، به عمل آمد که

جدول ۱. ترکیبات شیمیایی خاکستر بادی

Table 1. Chemical Composition of fly ash

ترکیب شیمیایی (%)									
P_2O_5	TiO_2	MgO	MnO	Na_2O	K_2O	Fe_2O_3	CaO	Al_2O_3	SiO_2
۰/۰۵	۰/۹۲	۰/۷۷	۰/۰۵	۰/۲۶	۱/۰۹	۳/۹	۱/۱۳	۲/۱	۷۰/۷

جدول ۲. آنالیز شیمیایی محلول‌های قلیایی

Table 2. Chemical analysis of alkaline solution

سیلیکات پتاسیم مایع		سیلیکات سدیم مایع		هیدروکسید پتاسیم		هیدروکسید سدیم	
ترکیب شیمیایی	نتیجه واحد	ترکیب شیمیایی	نتیجه واحد	ترکیب شیمیایی	نتیجه واحد	ترکیب شیمیایی	نتیجه واحد
SiO_2	۳۰/۵ %	SiO_2	۳۰ %	KOH	۹۰/۷ %	NaOH	۹۸ %
Na_2O	۱۴/۵ %	Na_2O	۱۴/۵ %	K_2CO_3	۰/۳ %	Na_2CO_3	۱ %
آب	۵۵ %	آب	۵۵/۵ %	KCl	۰/۰۰۶ %	NaCl	۲۰۰ ppm
ریشوی مدل	۲/۱ -	ریشوی مدل	۲/۰۷ -	Fe	۲ ppm	Fe	۶ ppm
				NaOH	۱/۲ %	SiO_2	۱۵/۷ ppm

جدول ۳. جذب آب و وزن مخصوص سنگدانه‌ها

Table 3. Specific gravity and Water absorption of aggregates

ماده	وزن مخصوص اشباع با سطح خشک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	جذب آب (%)
شن	۲/۶۹	۰/۸
ماسه	۲/۶۵	۲/۲

جدول ۴. طرح‌های مخلوط مربوط به تأثیر نوع محلول فعال‌کننده قلیایی بر مقاومت فشاری

Table 4. Mix designs related to the effect of alkaline activator solution type on compressive strength

نام طرح	خاکستر بادی	هیدروکسید سدیم (۱۴ مول)	هیدروکسید پتاسیم (۱۴ مول)	سیلیکات سدیم	سیلیکات پتاسیم	شن	ماسه	روان کننده	آب اضافه	واحد
FN	۴۰۰	۸۰	-	۱۲۰	-	۸۵۰	۸۵۰	۸	۰	Kg/m ³
FK	۴۰۰	-	۸۰	-	۱۲۰	۸۵۰	۸۵۰	۸	۰	Kg/m ³

جدول ۵. طرح‌های مخلوط مربوط به تأثیر آب اضافه بر مقاومت فشاری

Table 5. Mix designs related to the effect of extra water content on compressive strength

نام طرح	خاکستر بادی	هیدروکسید سدیم	سیلیکات سدیم	شن	ماسه	روان کننده	آب اضافه	واحد
F0	۴۰۰	۸۰	۱۲۰	۸۵۰	۸۵۰	۸	۰	Kg/m ³
F10	۴۰۰	۸۰	۱۲۰	۸۵۰	۸۵۰	۸	۱۰	Kg/m ³
F20	۴۰۰	۸۰	۱۲۰	۸۵۰	۸۵۰	۸	۲۰	Kg/m ³
F30	۴۰۰	۸۰	۱۲۰	۸۵۰	۸۵۰	۸	۳۰	Kg/m ³

فعال‌کننده قلیایی به خاکستر بادی بر مقاومت فشاری و بهینه یابی این پارامتر، با توجه به نتایج مراحل قبل، ۴ طرح مخلوط تنظیم شد. طرح‌های مخلوط این بخش در جدول ۷ ارائه شده است. لازم به ذکر است که به منظور ثابت نگه داشتن شرایط آزمایش، نسبت محلول سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم در تمامی طرح‌ها ۱/۵ و غلظت محلول هیدروکسید سدیم ۱۴ مول بود. در این بخش نیز از نمونه‌ها آزمون مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه گرفته شد.

۲-۶- مطالعه تأثیر نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به هیدروکسید

سدیم بر مقاومت فشاری

از دیگر پارامترهای تأثیرگذار 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 ۷ طرح مخلوط تنظیم شد که در جدول ۸ ارائه شده است. در این بخش نیز از نمونه‌ها آزمون مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه گرفته شد. لازم به ذکر است با توجه به نتایج مرحله قبل، نسبت وزنی محلول فعال‌کننده قلیایی به خاکستر بادی در تمامی طرح‌ها ۰/۵ انتخاب شد.

۲-۷- تأثیر دمای عمل‌آوری بر مقاومت فشاری

در این بخش تأثیر دمای عمل‌آوری بر مقاومت فشاری بتن

۲-۳- مطالعه تأثیر آب اضافه بر مقاومت فشاری

پس از مشخص شدن نتایج مرحله قبل، ترکیب هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم به عنوان محلول فعال‌کننده قلیایی انتخاب شد. در مورد آب اضافه در طرح مخلوط، ۴ طرح مخلوط تنظیم شد که یکی بدون آب اضافه و نمونه‌های دیگر با ۱۰، ۲۰ و ۳۰ کیلوگرم در مترمکعب آب اضافه، ساخته شدند. این طرح‌های مخلوط در جدول ۵ ارائه شده است. از نمونه‌های این بخش نیز آزمون مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه گرفته شد.

۲-۴- مطالعه تأثیر غلظت محلول هیدروکسید سدیم بر مقاومت

فشاری

در این بخش به منظور بررسی تأثیر غلظت محلول هیدروکسید سدیم بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری و بهینه یابی این پارامتر، با توجه به نتایج مراحل قبل، ۴ طرح مخلوط تنظیم شد. این طرح‌های مخلوط در جدول ۶ ارائه شده است. در این بخش نیز آزمون مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه از نمونه‌ها به عمل آمد.

۲-۵- مطالعه تأثیر نسبت وزنی محلول فعال‌کننده قلیایی به خاکستر

بادی بر مقاومت فشاری

در این بخش به منظور بررسی تأثیر پارامتر نسبت وزنی محلول

جدول ۶. طرح‌های مخلوط مربوط به تأثیر غلظت محلول هیدروکسید سدیم بر مقاومت فشاری

Table 6. Mix designs related to the effect of NaOH solution concentration on compressive strength

غلظت مولار	محلول هیدروکسید سدیم	واحد	آب اضافه	روان کننده	ماسه	شن	سیلیکات سدیم	هیدروکسید سدیم	خاکستر بادی	نام طرح
۱۰	Kg/m ³	۱۰	۸	۸۵۰	۸۵۰	۱۲۰	۸۰	۴۰۰	FN10	
۱۲	Kg/m ³	۱۰	۸	۸۵۰	۸۵۰	۱۲۰	۸۰	۴۰۰	FN12	
۱۴	Kg/m ³	۱۰	۸	۸۵۰	۸۵۰	۱۲۰	۸۰	۴۰۰	FN14	
۱۶	Kg/m ³	۱۰	۸	۸۵۰	۸۵۰	۱۲۰	۸۰	۴۰۰	FN16	

جدول ۷. طرح‌های مخلوط مربوط به تأثیر نسبت وزنی محلول فعال کننده قلیایی به خاکستر بادی بر مقاومت فشاری

Table 7. Mix designs related to the effect of alkaline activator solution/fly ash ratio on compressive strength

نسبت وزنی محلول فعال کننده به خاکستر بادی	واحد	آب اضافه	روان کننده	ماسه	شن	سیلیکات سدیم	هیدروکسید سدیم	خاکستر بادی	نام طرح
۰/۴	Kg/m ³	۱۰	۸	۸۵۰	۸۵۰	۹۶	۶۴	۴۰۰	F40
۰/۴۵	Kg/m ³	۱۰	۸	۸۵۰	۸۵۰	۱۰۸	۷۲	۴۰۰	F45
۰/۵	Kg/m ³	۱۰	۸	۸۵۰	۸۵۰	۱۲۰	۸۰	۴۰۰	F50
۰/۵۵	Kg/m ³	۱۰	۸	۸۵۰	۸۵۰	۱۳۲	۸۸	۴۰۰	F55

جدول ۸. طرح‌های مخلوط مربوط به تأثیر نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم بر مقاومت فشاری

Table 8. Mix designs related to the effect of Na₂SiO₃/NaOH ratio on compressive strength

نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم	واحد	آب اضافه	روان کننده	ماسه	شن	سیلیکات سدیم	هیدروکسید سدیم (۱۴ مول)	خاکستر بادی	نام طرح
۱	Kg/m ³	۱۰	۸	۸۵۰	۸۵۰	۱۰۰	۱۰۰	۴۰۰	F1
۱/۵	Kg/m ³	۱۰	۸	۸۵۰	۸۵۰	۱۲۰	۸۰	۴۰۰	F1.5
۲	Kg/m ³	۱۰	۸	۸۵۰	۸۵۰	۱۳۴	۶۶	۴۰۰	F2
۲/۵	Kg/m ³	۱۰	۸	۸۵۰	۸۵۰	۱۴۳	۵۷	۴۰۰	F2.5
۳	Kg/m ³	۱۰	۸	۸۵۰	۸۵۰	۱۵۰	۵۰	۴۰۰	F3

مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه گرفته شود.

۸-۲- تأثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری

در این بخش تأثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری، مورد مطالعه قرار گرفت. در همین راستا پس از مشخص

ژئوپلیمری، مورد مطالعه قرار گرفت. در همین راستا پس از مشخص شده نتایج مراحل قبل، طرح F1.5 برای انجام این آزمایش انتخاب شد. در ادامه این نمونه‌ها در دماهای ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، به مدت ۱ روز عمل‌آوری شدند. پس از پایان عمل‌آوری نمونه‌ها در دمای محیط آزمایشگاه قرار گرفتند تا از آنها آزمون

سپس محلول‌های فعال‌کننده قلیایی و آب اضافه با طرح‌های مخلوط هر بخش، به ترتیب و بدون فاصله زمانی، اضافه شدند و مخلوط بتن به مدت ۲ دقیقه مخلوط شد. بعد از اتمام مخلوط کردن، نمونه‌های فشاری بتن قالب‌بندی شدند. نمونه‌ها به مدت ۱۰ ثانیه روی میز لزران، متراکم شدند. سپس نمونه‌های بخش‌های ۲-۲ تا ۶-۲، به مدت ۲۴ ساعت در آون و در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شدند. لازم به ذکر است نمونه‌های بخش‌های ۲-۲ و ۷-۲ با توجه به این که موضوع این ۲ بخش بررسی شرایط عمل‌آوری بود، در شرایط عمل‌آوری متفاوت با بخش‌های قبلی عمل‌آوری شدند که در بخش‌های نام برده به آن اشاره شد. پس از پایان عمل‌آوری، 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 [۴۱] گرفته شد. لازم به ذکر است که ابعاد نمونه‌ها ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متر بود و از هر کدام از طرح‌های مخلوط ۳ آزمون ساخته و میانگین نتایج به دست آمده گزارش شد.

۳- نتایج و بحث

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

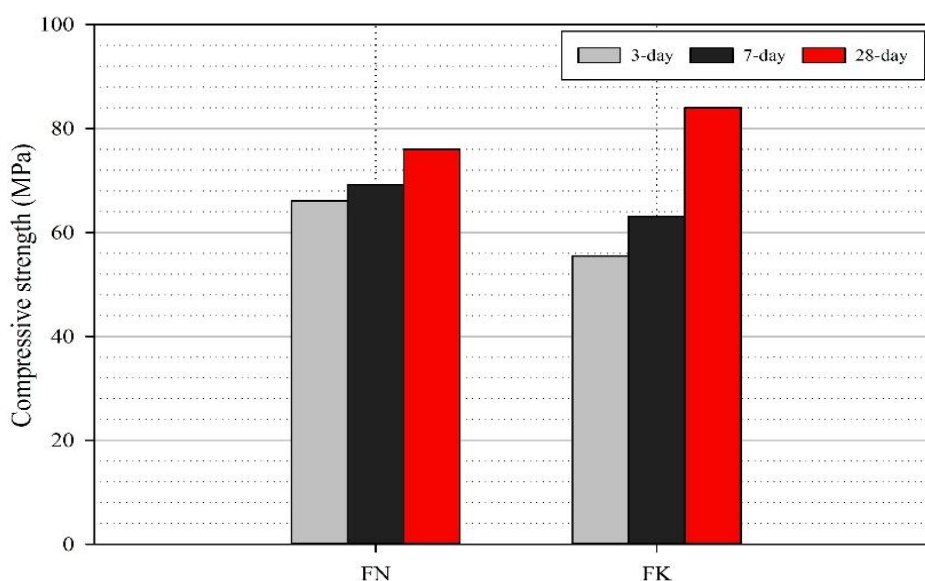
نتایج آزمایش تأثیر نوع محلول فعال‌کننده قلیایی بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری، در شکل ۱ ارائه شده است. مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه نمونه FN که برای ساخت آن از محلول هیدروکسید

شده نتایج مراحل قبل، نمونه‌های طرح F1.5 در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد، به مدت ۱۲، ۲۴، ۳۶ و ۴۸ ساعت عمل‌آوری شدند. پس از پایان عمل‌آوری نمونه‌ها در دمای محیط آزمایشگاه قرار گرفتند تا از آنها آزمون مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ گرفته شود.

۲-۹- نمونه‌گیری و روش‌های انجام آزمایش

برای برای ساخت نمونه‌ها ابتدا محلول‌های فعال‌کننده قلیایی آماده شد. به همین منظور ابتدا محلول هیدروکسید سدیم با غلظت مشخص در هر بخش آماده شد. سپس این محلول با محلول‌های سیلیکات سدیم و روان‌کننده، مطابق با طرح‌های مخلوط هر بخش، مخلوط شد. لازم به ذکر است در بخش ۲-۲ با توجه به این که این بخش از پژوهش معطوف به بررسی تأثیر نوع محلول فعال‌کننده بر مقاومت فشاری بود، یک سری نمونه نیز با محلول فعال‌کننده پتاسیمی ساخته شدند که برای ساخت این نمونه‌ها، ابتدا محلول هیدروکسید پتاسیم با غلظت مشخص ساخته شد سپس این محلول با محلول سیلیکات پتاسیم و روان‌کننده با طرح‌های مخلوط این بخش، مخلوط شد.

به محلول‌های فعال‌کننده قلیایی به دست آمده ۲۴ ساعت زمان داده شد تا سرد شوند. در روز آزمایش، ابتدا مواد خشک شامل: شن، ماسه و خاکستر بادی، در میکسر پرتابی بتن ریخته و به مدت ۳ دقیقه به منظور توزیع یکنواخت به صورت خشک، مخلوط شدند.



شکل ۱. تأثیر نوع محلول فعال‌کننده قلیایی بر مقاومت فشاری

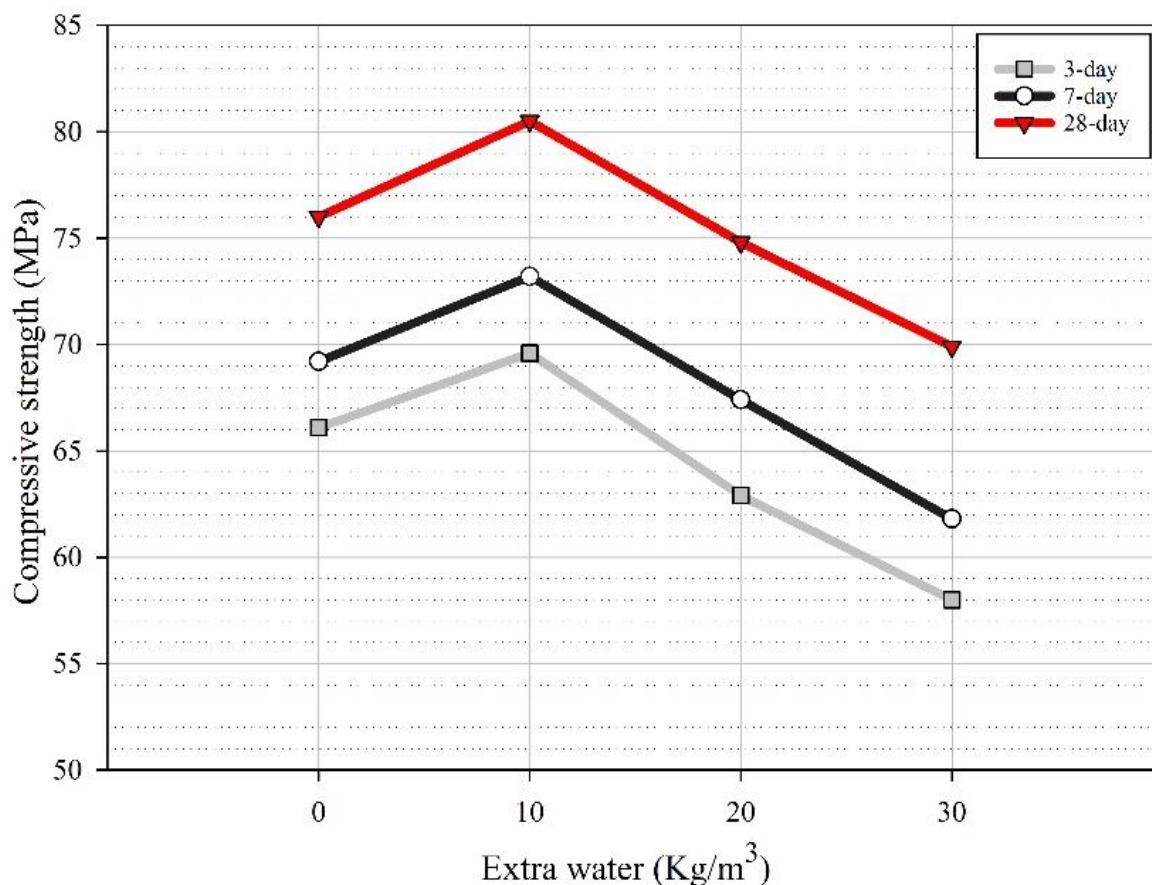
Fig. 1. Effect of alkaline activator solution type on compressive strength

گیری جزئی پیش‌ماده متحرک و بارگذاری مجدد ذرات از فاز جامد اولیه، انجام می‌شود [۴۳،۴۲]. نوع فعال‌کننده قلیایی نقش بسیار مهمی در پیشرفت فرآیند تولید ژئوپلیمر دارد که معمولاً پتاسیم به دلیل شعاع اتمی بزرگ‌تر، باعث تشکیل اولیگومر سیلیکات‌های بزرگ‌تر می‌شود که AlOH 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 [۴۴] 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، هیدروکسید سدیم توانایی انحلال مواد معدنی بیشتری را در غلظت‌های مشابه هیدروکسید پتاسیم و هیدروکسید سدیم، دارد. همین امر باعث بالاتر بودن سرعت واکنش Na^+ در مقایسه با K^+ می‌شود [۴۵،۲۸]. به

سدیم و سیلیکات سدیم استفاده شده بود، $۶۶/۱$ و $۶۹/۲$ و $۷۶/۱$ مگاپاسکال و اندازه‌گیری شد. مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه نمونه FK که برای ساخت آن از محلول هیدروکسید پتاسیم و سیلیکات پتاسیم استفاده شده بود، $۵۵/۵$ ، $۶۳/۱$ و ۸۴ مگاپاسکال بود. نمونه FN تقریباً ۹۱ و ۸۷ درصد از مقاومت فشاری ۲۸ روزه خود را در ۷ و ۳ روزگی کسب کرد. این اعداد برای نمونه FK تقریباً ۷۵ و ۶۶ درصد بود. در مقایسه این ۲ نوع محلول فعال‌کننده قلیایی می‌توان گفت که نمونه FN مقاومت فشاری ۳ و ۷ روزه و همچنین روند کسب مقاومت در سنین پایین، بیشتری را ارائه کرد. از سوی دیگر، در نمونه FK مقاومت فشاری ۲۸ روزه بیشتری مشاهده شد.

این نتایج می‌تواند به تفاوت در مکانسیم واکنش‌های Na و K مربوط باشد. مکانسیم 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، جهت



شکل ۲. تأثیر آب اضافه بر مقاومت فشاری

Fig. 2. Effect of extra water content on compressive strength

جدول ۹. نسبت آب به مواد خشک و مقاومت فشاری

Table 9. Water/solid ratio versus compressive strength

درصد کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه نسبت به حالت بهینه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (مگاپاسکال)	کارایی	نسبت آب به مواد خشک	آب اضافه
۶	۷۶	پایین	۰/۲۳۶۳	۰
-	۸۰/۵	متوسط	۰/۲۵۶۹	۱۰
۷	۷۴/۸	بالا	۰/۲۷۷۵	۲۰
۱۴	۶۹/۹	بالا	۰/۲۹۸۱	۳۰

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 ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد [۲۵]. از سوی دیگر، در حالتی که میزان آب اضافه و به تبع آن نسبت آب به مواد خشک، کمتر از مقدار بهینه باشد مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. این موضوع می‌تواند به کارایی پایین بتن و ایجاد خلل و فرج به دلیل خشک بودن بتن، مربوط باشد.

با توجه به نتایج به دست آمده، در این مقاله از آب اضافه به میزان ۱۰ کیلوگرم در مترمکعب استفاده شد. در جدول ۹ نسبت آب به مواد خشک و مقاومت فشاری برای اندازه‌های مختلف آب اضافه، نشان داده شده است. لازم به ذکر است که کارایی بتن با انجام آزمایش قطر بازشدگی سنجش شد و اعداد ۵۰، ۶۰ و ۷۰ سانتی‌متر به ترتیب برای حدود کارایی پایین، متوسط و بالا، در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است نتایج به دست از این بخش از پژوهش با نتایج پژوهش هاردیجیتو و همکاران [۳۲] مغایرت دارد.

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

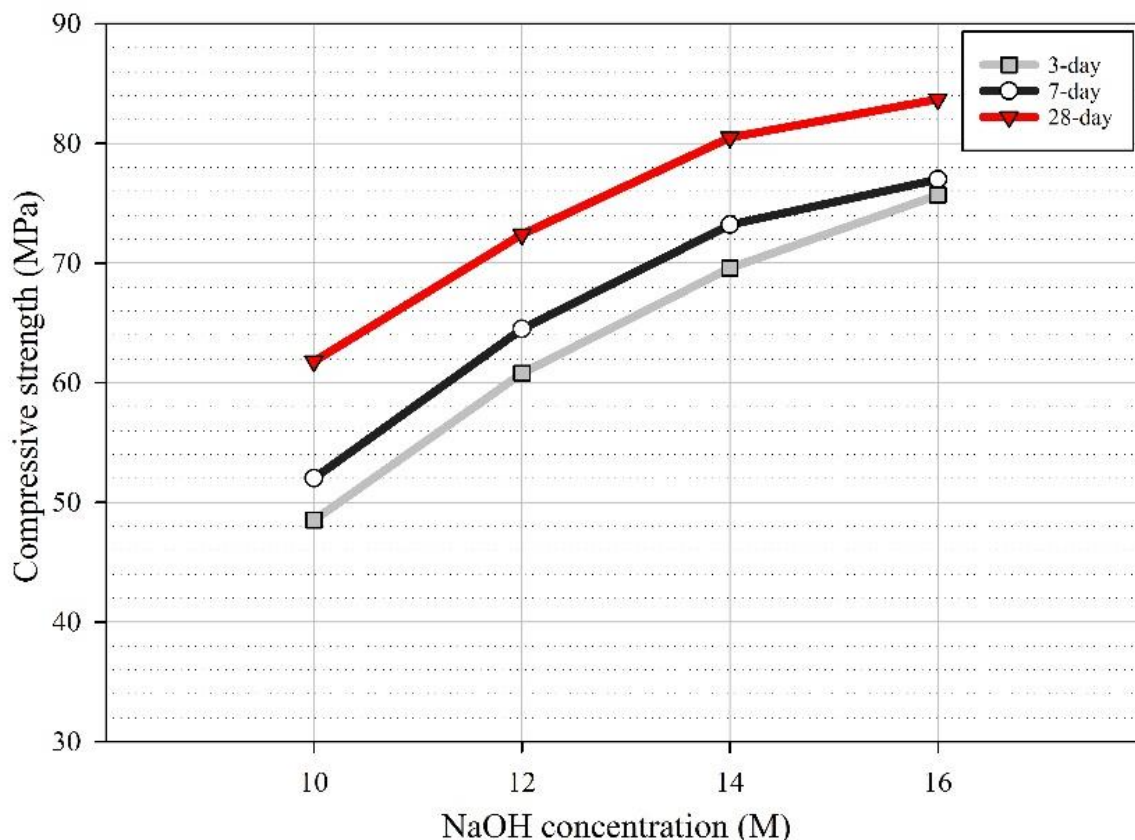
نتایج مربوط به بررسی تأثیر غلظت محلول هیدروکسید سدیم بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری و بهینه یابی این پارامتر، در شکل ۳ ارائه شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، کمترین مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه در حالت استفاده از هیدروکسید سدیم ۱۰ مول، به میزان ۴۸/۵، ۵۲ و ۶۱/۸ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. با

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.

لازم به ذکر است نتایج به دست آمده از این بخش تقریباً با نتایج اکثر پژوهش‌های انجام شده در این زمینه مانند پالومو و همکاران [۱۹] و چنگ و همکاران [۱۵] مغایرت دارد. 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.

۲-۳- تأثیر آب اضافه بر مقاومت فشاری

نتایج به دست آمده از آزمایش تأثیر میزان آب اضافه بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری، در شکل ۲ ارائه شده است. نتایج نشان داد میزان آب اضافه موجود در طرح مخلوط تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری دارد. مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌ای که در ترکیب خود آب اضافه نداشت به ترتیب ۶۶/۱، ۶۹/۲ و ۷۶ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. با اضافه کردن آب اضافه به میزان ۱۰ کیلوگرم در مترمکعب، بیشترین مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه به میزان ۶۹/۶، ۷۳/۲ و ۸۰/۵ مگاپاسکال، اندازه‌گیری شد. با اضافه کردن آب اضافه بیشتر به ترکیب بتن، مقاومت فشاری کاهش یافت؛ به طوری که در حالت آب اضافه ۳۰ کیلوگرم در مترمکعب، مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه تقریباً ۱۷، ۱۶ و ۱۴ درصد کاهش یافت. دلیل این موضوع می‌تواند به پارامتر نسبت وزنی آب به مواد خشک،



شکل ۳. تأثیر غلظت محلول هیدروکسید سدیم بر مقاومت فشاری

Fig. 3. Effect of NaOH solution concentration on compressive strength

جدول ۱۰. غلظت محلول هیدروکسید سدیم و مقاومت فشاری زودرس

Table 10. NaOH solution concentration versus early compressive strength

درصد کسب مقاومت فشاری ۲۸ روزه در ۳ روزگی	درصد کسب مقاومت فشاری ۲۸ روزه در ۷ روزگی	درصد تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ روزه نسبت به غلظت ۱۴ مول	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (مگاپاسکال)	غلظت محلول هیدروکسید سدیم
۷۸	۸۴	-۲۳	۶۱/۸	۱۰
۸۴	۸۹	-۱۰	۷۲/۴	۱۲
۸۷	۹۱	-	۸۰/۵	۱۴
۹۰	۹۲	+۴	۸۳/۷	۱۶

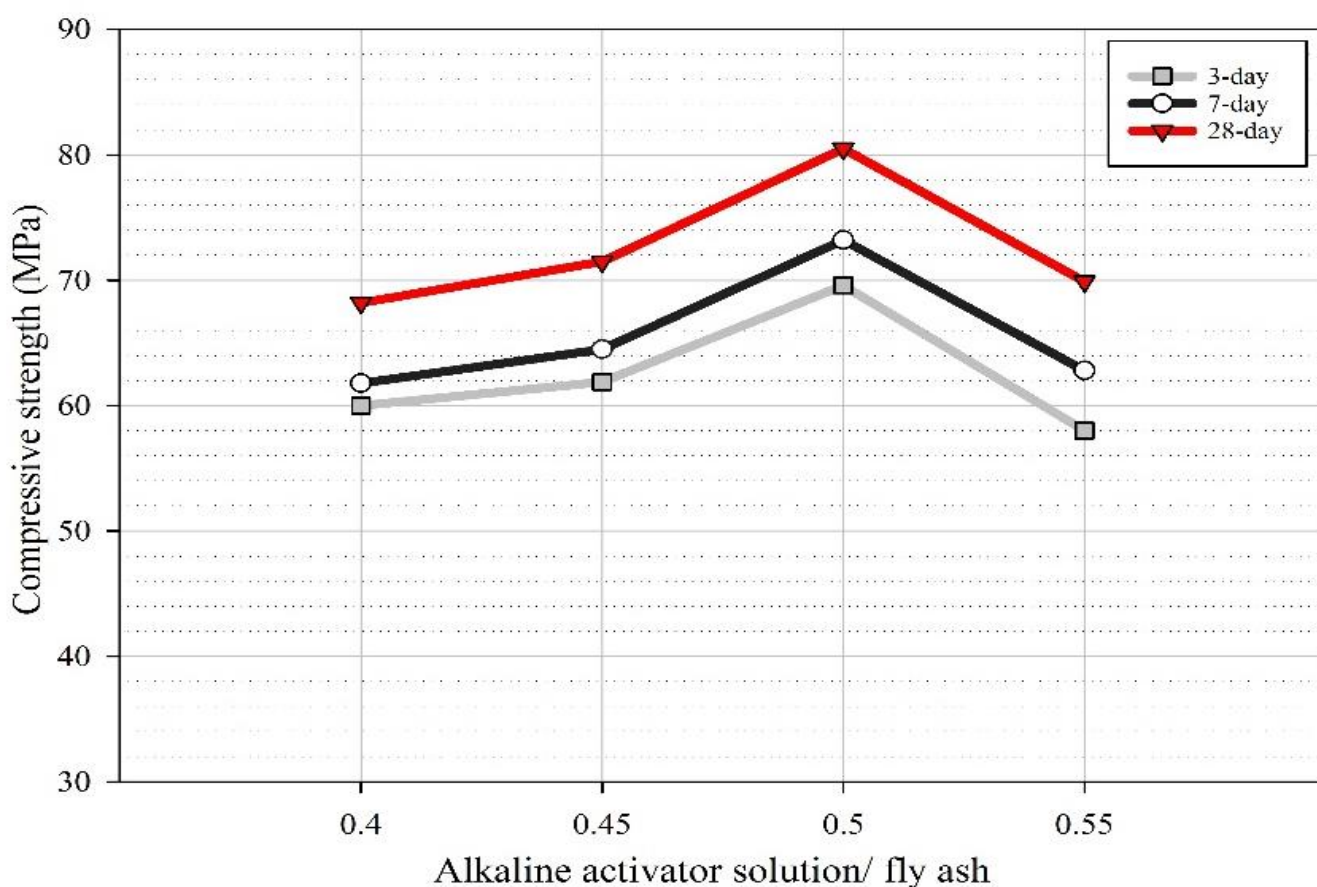
مول، افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقاومت فشاری مشاهده نشد. دلیل این موضوع می‌تواند این باشد که با افزایش غلظت محلول هیدروکسید سدیم به میزان بیشتر از حد بهینه (۱۴ مول)، یون‌های هیدروکسید بیشتری بلافاصله پس از شروع مراحل اول ژئوپلیمریزاسیون، در ژل آلومیناسیلیکاتی رسوب خواهند کرد. این موضوع می‌تواند سبب اختلال در واکنش ژئوپلیمریزاسیون و کاهش روند افزایش مقاومت

افزایش غلظت محلول هیدروکسید سدیم از ۱۰ تا ۱۴ مول، مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه نیز افزایش یافت. دلیل این موضوع این است که در غلظت‌های بالاتر، مقادیر بیشتری از سیلیکا و آلومینای منبع آلومیناسیلیکاتی در محلول فعال‌کننده قلیایی حل می‌شود، در نتیجه مقادیر بیشتری از ژل ژئوپلیمری تشکیل شده که نتیجه آن بالا رفتن مقاومت فشاری است [۳۱]. اما با افزایش بیشتر غلظت از ۱۴ به ۱۶

نتایج مربوط به بررسی اثر نسبت وزنی محلول فعال کننده قلیایی به خاکستر بادی بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی و بهینه یابی این پارامتر، در شکل ۴ ارائه شده است. همان طور که نشان نتایج می دهد، این پارامتر تأثیر قابل ملاحظه ای بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری دارد. در نسبت ۰/۴، مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه به میزان ۶۰، ۶۱/۸ و ۶۸/۲ مگاپاسکال اندازه گیری شد. با افزایش این نسبت تا ۰/۵، مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه تقریباً ۱۴، ۱۶ و ۱۵ درصد افزایش یافت و بیشترین مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه سنجش شد. افزایش این نسبت سبب افزایش میزان محلول فعال کننده قلیایی و به تبع آن افزایش نرخ ژئوپلیمریزاسیون و تشکیل مقادیر بیشتری از ژل ژئوپلیمر، می شود که نتیجه آن افزایش مقاومت فشاری بتن است. از سوی دیگر، با افزایش بیشتر این نسبت به ۰/۵۵، مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه تقریباً ۱۶، ۱۴ و ۱۳ درصد کاهش یافت. دلیل این موضوع می تواند به افزایش نسبت آب به مواد

فشاری و یا حتی کاهش مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری شود [۴۶]. از سوی دیگر، یک روند افزایشی در کسب مقاومت زودرس (درصد کسب مقاومت فشاری ۲۸ روزه در ۳ و ۷ روزگی) با افزایش غلظت محلول هیدروکسید سدیم، در نمونه ها دیده شد که می تواند مربوط به افزایش میزان انحلال آلومینا و سیلیکا و تسریع روند ژئوپلیمریزاسیون با افزایش غلظت، باشد. جدول ۱۰ تأثیر غلظت محلول هیدروکسید سدیم را بر روند کسب مقاومت زودرس، نشان می دهد. با توجه به نتایج به دست آمده، هیدروکسید سدیم با غلظت ۱۴ مول برای ادامه آزمایش ها انتخاب شد. نتایج به دست از این بخش از پژوهش با نتایج پژوهش های شارما و دیگران [۳۰] و پاتل و دیگران [۳۱] مغایرت دارد.

۳-۴- تأثیر نسبت وزنی محلول فعال کننده قلیایی به خاکستر بادی بر مقاومت فشاری



شکل ۴. تأثیر نسبت وزنی محلول فعال کننده قلیایی به خاکستر بادی بر مقاومت فشاری
 Fig. 4. Effect of alkaline activator solution/fly ash ratio on compressive strength

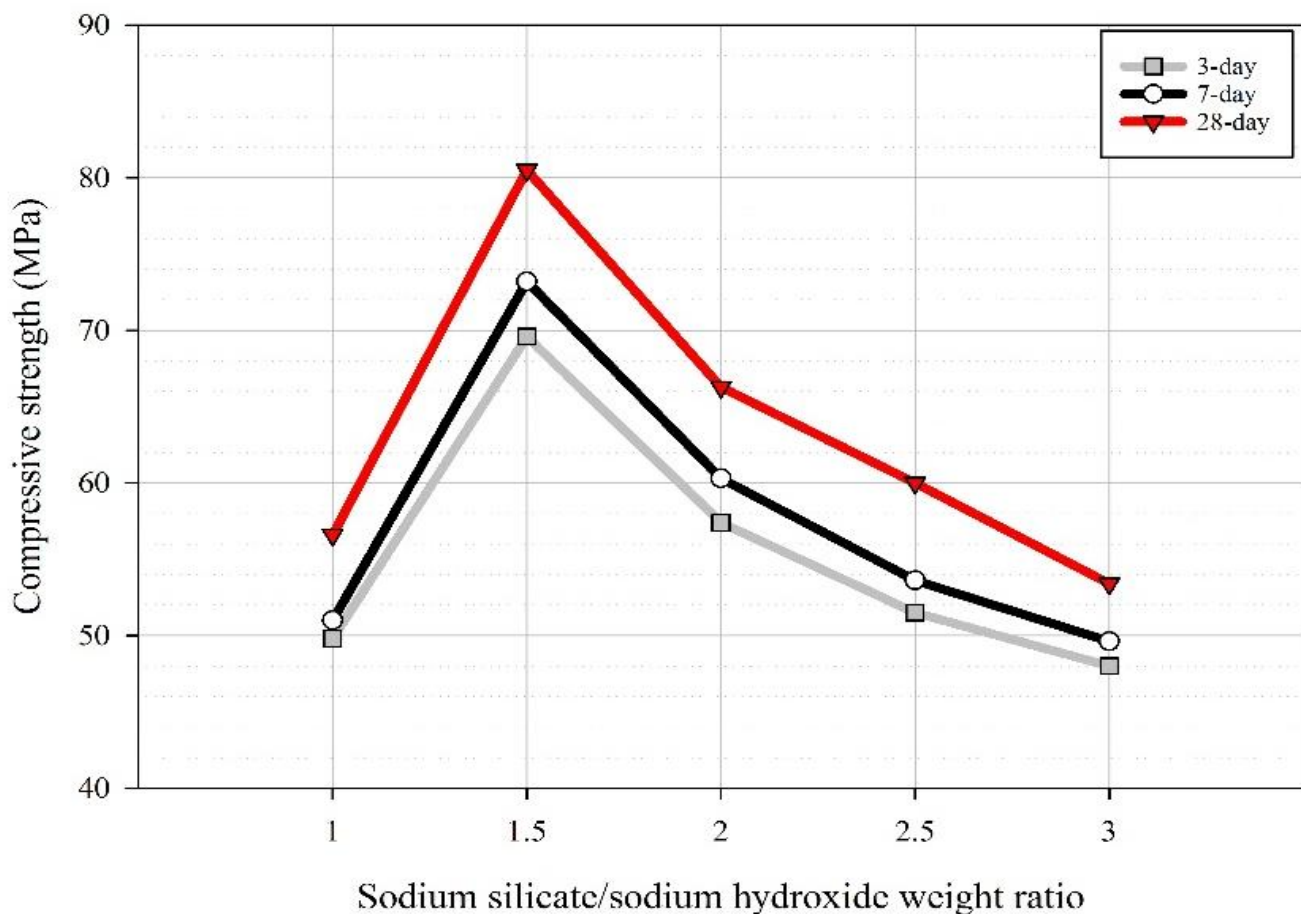
فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه، ۴۹/۸، ۵۱ و ۵۶/۶ مگاپاسکال اندازه گیری شد. با افزایش نسبت به ۱/۵، مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت (۴۱، ۴۳ و ۴۲ درصد) و به ۶۹/۶، ۷۳/۲ و ۸۰/۵ مگا پاسکال رسید. با افزایش بیشتر این نسبت تا ۳، مقاومت فشاری به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافت به طوری که در نسبت ۳، مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه ۳۱، ۳۲ و ۳۶ درصد، نسبت به ۱/۵ کاهش یافت. در نتیجه در این تحقیق ۱/۵ به عنوان نسبت بهینه برای این پارامتر سنجش شد.

نقش محلول فعال‌کننده قلیایی به ویژه هیدروکسید سدیم یا پتاسیم، حل کردن Si و Al موجود در منبع آلومیناسیلیکاتی و تولید SiO_4 و AlO_4 برای تولید ژل ژئوپلیمری است. اضافه کردن یک محلول سیلیکاتی مانند سیلیکات سدیم یا پتاسیم به محلول

خشک، با افزایش این نسبت، مربوط باشد. با توجه به نتایج به دست آمده، ۰/۵ به عنوان نسبت بهینه برای این پارامتر سنجش و برای ادامه روند آزمایش‌ها انتخاب شد. نتایج به دست از این بخش از پژوهش با نتایج پژوهش‌های شارما و همکاران [۳۰] و هاردیجیتو و همکاران [۳۲] مغایرت دارد.

۳-۵- تأثیر 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 خاکستر بادی و بهینه یابی این پارامتر، در شکل ۵ ارائه شده است. در نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم برابر با ۱، مقاومت



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

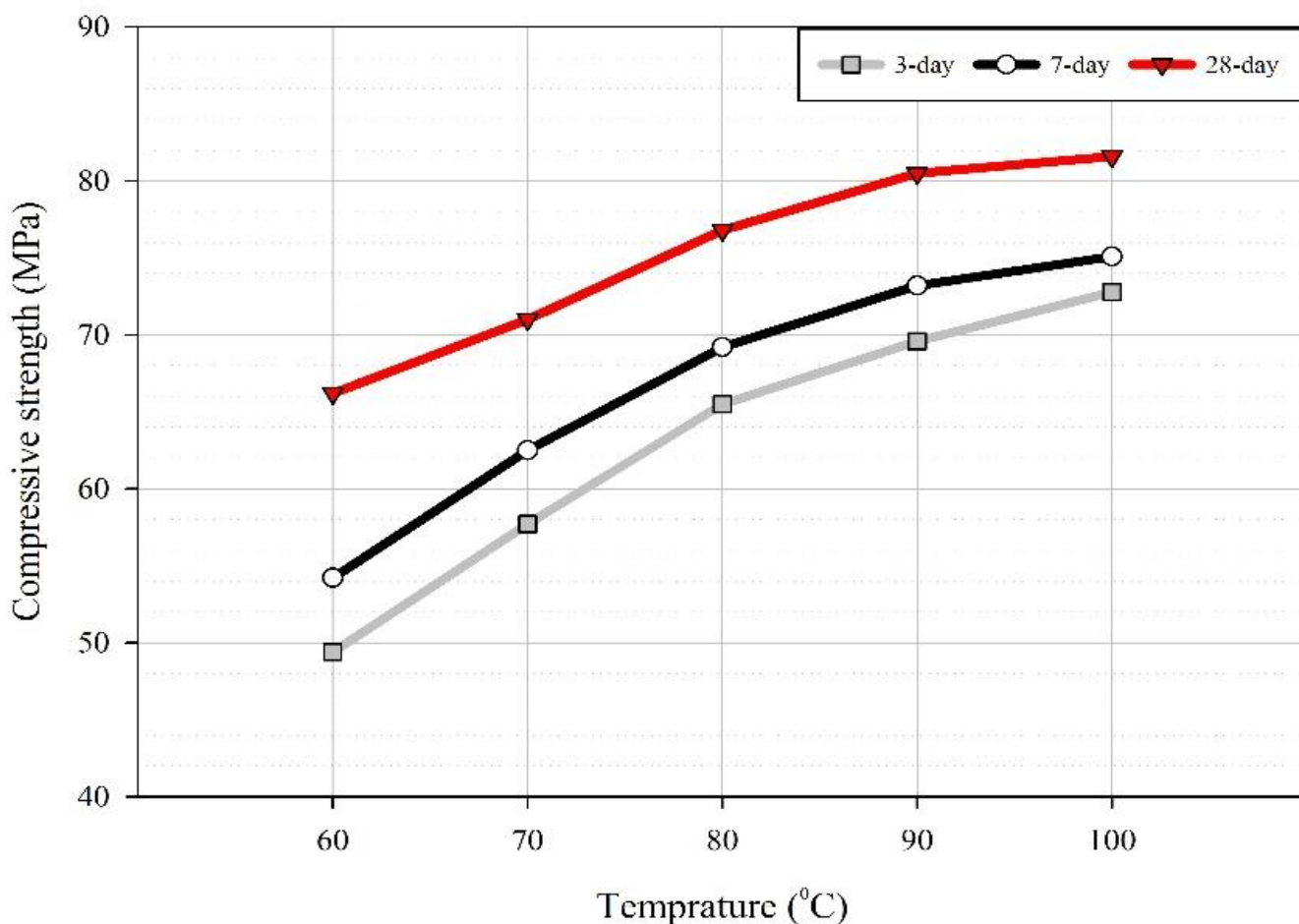
Fig. 5. Effect of $Na_2SiO_3/NaOH$ ratio on compressive strength

از پژوهش با نتایج پژوهش‌های سانی و همکاران [۴۷]، جونايد و همکاران [۴۸]، دياز لویا و همکاران [۴۹] و لويد و همکاران [۵۰] مغایرت دارد. اما با نتایج پتروس و همکاران [۳۳] مطابقت دارد البته لازم به ذکر است که پتروس و همکاران این نتایج را در مورد ژئوپلیمر ساخته شده از بنتونیت و سیلیکا گزارش کرده‌اند.

۳-۶- تأثیر دمای عمل‌آوری بر مقاومت فشاری

نتایج مربوط به بررسی اثر دمای عمل‌آوری بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری و بهینه یابی این پارامتر، در شکل ۶ ارائه شده است. نتایج نشان داد با افزایش دمای کیورینگ از ۶۰ تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه بتن افزایش یافت و این

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 (یا محدود) است [۴۴،۳۳]. در نتیجه با خارج شدن نسبت Si/Al از محدوده بهینه، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. نتایج به دست از این بخش



شکل ۶. تأثیر دمای عمل‌آوری بر مقاومت فشاری

Fig. 6. Effect of curing temperature on compressive strength

جدول ۱۱. دمای عمل‌آوری و مقاومت فشاری زودرس

Table 11. Curing temperature versus early compressive strength

درصد کسب مقاومت فشاری ۲۸ روزه در ۳ روزگی	درصد کسب مقاومت فشاری ۲۸ روزه در ۷ روزگی	درصد تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ روزه نسبت به ۶۰ درجه سانتی‌گراد	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (مگاپاسکال)	دمای عمل‌آوری
۷۵	۸۲	-	۶۶/۲	۶۰
۸۱	۸۸	۷	۷۱	۷۰
۸۵	۹۰	۱۶	۷۶/۸	۸۰
۸۷	۹۱	۲۲	۸۰/۵	۹۰
۸۹	۹۳	۲۴	۸۲/۳	۱۰۰

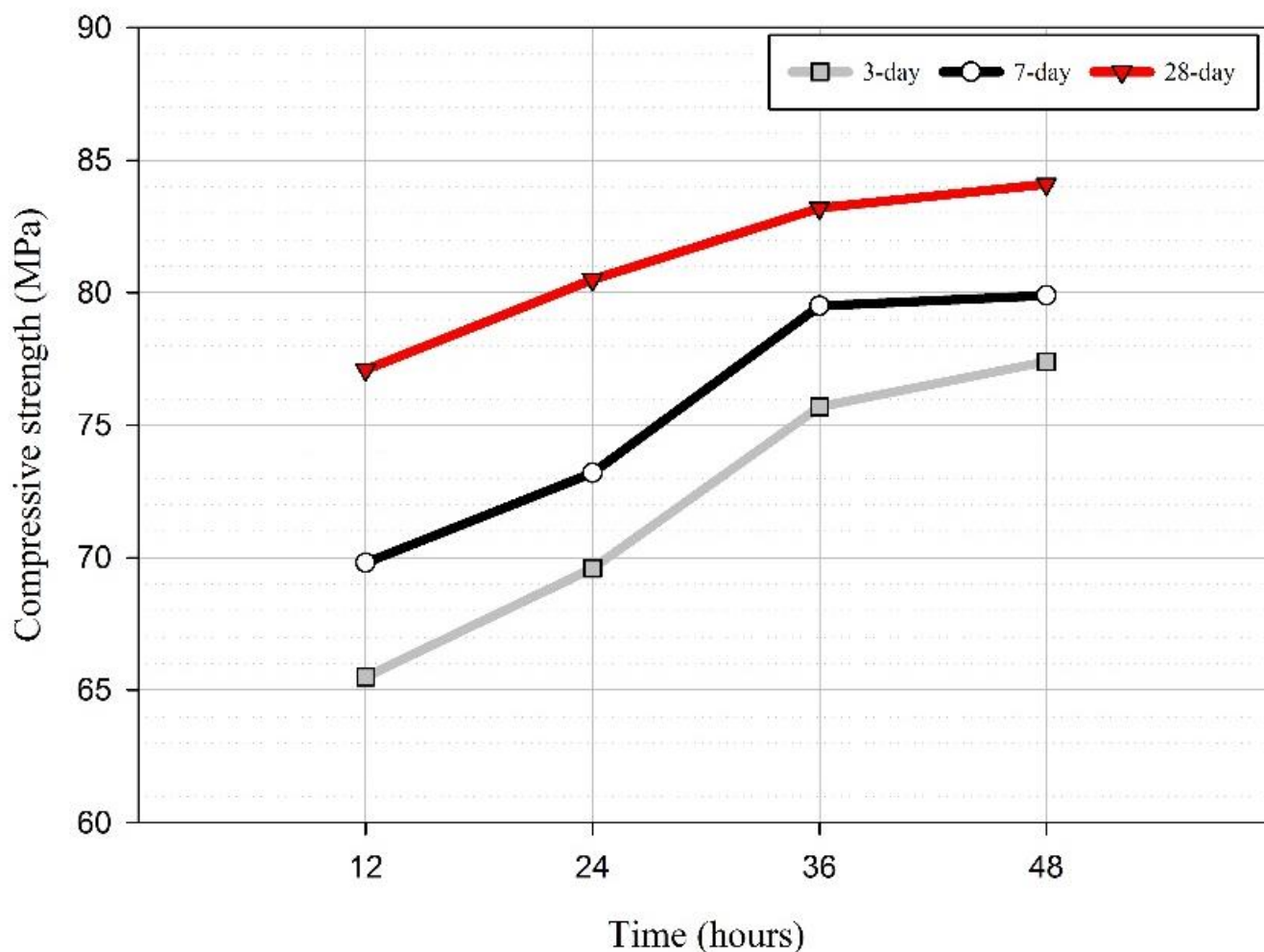
موجب اندکی تغییرات در مقاومت فشاری زودرس (مقاومت ۳ و ۷ روزه) می‌شود که این موضوع به دلیل سرعت بیشتر پلیمریزاسیون و تشکیل مونومرها در سنین پایین با افزایش دما، است (در واقع تأثیری در میزان تشکیل مقدار ژل سیمان ژئوپلیمری ندارد و همان میزان از ژل، فقط در زمان کوتاه‌تر یا به عبارت دیگر سریع‌تر تشکیل می‌شود). در پایان این بخش باید اشاره کرد که نتایج به دست آمده از این بخش با نتایج اکثر پژوهش‌های پیشین در این رابطه مانند هاردجیتو و همکاران [۲۵]، ساتپوت منش و همکاران [۳۵]، احمد و همکاران [۳۶] و محمد و همکاران [۵۱]، مطابقت ندارد.

۷-۳- تأثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری

نتایج مربوط به بررسی اثر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری و بهینه‌یابی این پارامتر، در شکل ۷ ارائه شده است. نتایج نشان داد با افزایش زمان کیورینگ از ۱۲ تا ۳۶ ساعت، مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه بتن افزایش یافت و این افزایش مقاومت در مقاومت فشاری ۳ و ۷ روزه بسیار محسوس‌تر بود. اما با افزایش بیشتر زمان تا ۴۸ ساعت، تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقاومت فشاری دیده نشد. در واقع با توجه به نتایج مشاهده شد که بیشترین تأثیرگذاری این پارامتر در افزایش مقاومت ۳ و ۷ روزه و کسب درصد بیشتری از مقاومت نهایی در این سنین بود و نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها در زمان‌های مختلف عمل‌آوری، به هم نزدیک بود. درصد کسب مقاومت زودرس در سنین ۳ و ۷ روزگی نمونه‌ها در زمان‌های مختلف عمل‌آوری در جدول ۱۲ ارائه شده است. در پایان این بخش

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. درصد کسب مقاومت زودرس در سنین ۳ و ۷ روزگی نمونه‌ها در دماهای مختلف عمل‌آوری در جدول ۱۱ ارائه شده است. افزایش دمای عمل‌آوری سبب افزایش نسبی میزان ژئوپلیمریزاسیون و افزایش قابل ملاحظه سرعت روند ژئوپلیمریزاسیون می‌شود [۳۶، ۴۳، ۵۱]. این موضوع سبب افزایش مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری می‌شود. از سوی دیگر، با افزایش سرعت روند ژئوپلیمریزاسیون، بتن ژئوپلیمری درصد بیشتری از مقاومت خود را در سنین پایین کسب می‌کند. در نتیجه میزان مقاومت زودرس بتن ژئوپلیمری با افزایش دمای عمل‌آوری، بیشتر می‌شود. در واقع به همین دلیل است که بهبود مقاومت فشاری با افزایش دمای عمل‌آوری، در مقاومت ۳ و ۷ روزه محسوس‌تر و قابل ملاحظه‌تر است.

اما با افزایش بیشتر دما به ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقاومت فشاری نهایی (۲۸ روزه) دیده نشد و فقط اندکی تغییرات در مقاومت زودرس نمونه‌ها مشاهده شد. دلیل این موضوع می‌تواند به تامین بخش زیادی از انرژی مورد نیاز برای بسپارش ذرات و تشکیل مونومرها، با ۲۴ ساعت عمل‌آوری نمونه‌ها در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد مربوط باشد. در نتیجه، با توجه به نتایج به دست آمده، افزایش دمای عمل‌آوری به ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد سبب تحمیل هزینه‌های اضافی و اتلاف انرژی می‌شود و عملاً تأثیر قابل ملاحظه‌ای در تأمین انرژی و مقاومت فشاری نهایی ندارد و فقط



شکل ۷. تأثیر زمان عمل آوری بر مقاومت فشاری
 Fig. 7. Effect of curing time on compressive strength

جدول ۱۲. زمان عمل آوری و مقاومت فشاری زودرس
 Table 12. Curing time versus early compressive strength

زمان عمل آوری	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (مگاپاسکال)	درصد تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ روزه نسبت به ۱۲ ساعت	درصد کسب مقاومت فشاری ۲۸ روزه در ۷ روزگی	درصد کسب مقاومت فشاری ۲۸ روزه در ۳ روزگی
۱۲	۷۷/۱	-	۹۰	۸۴
۲۴	۸۰/۵	۴	۹۱	۸۷
۳۶	۸۳/۲	۸	۹۴	۹۰
۴۸	۸۴/۱	۹	۹۵	۹۲

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

باید اشاره کرد که نتایج به دست آمده از این بخش با نتایج پژوهش هاردیجیتو و همکاران [۳۲] مطابقت و با نتایج پژوهش احمد و همکاران [۳۶]، مطابقت ندارد.

۴- نتیجه‌گیری

ارائه می‌شود:

۱. نوع محلول فعال‌کننده قلیایی از پارامترهای تأثیرگذار 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 شرکت‌کننده در ژئوپلیمریزاسیون شد. این نسبت از پارامترهای تأثیرگذار بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری است. میزان بهینه آب اضافه و نسبت آب به مواد خشک در این پژوهش به ترتیب ۱۰ کیلوگرم در متر مکعب و ۲۵۶۹/۰ اندازه‌گیری شد. با افزایش میزان آب اضافه و به تبع آن افزایش نسبت آب به مواد خشک شرکت‌کننده در ژئوپلیمریزاسیون، مقاومت فشاری به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافت.

۳. غلظت محلول هیدروکسید سدیم نیز از دیگر پارامترهای تأثیرگذار بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری است. افزایش غلظت از ۱۰ به ۱۴ مول، سبب افزایش ۲۳ درصدی مقاومت فشاری به دلیل افزایش میزان انحلال Al و Si (موجود در متاکائولن) توسط محلول فعال‌کننده 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 فعال‌کننده قلیایی به منبع آلومیناسیلیکاتی از پارامترهای تأثیرگذار بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری است. با افزایش این نسبت از ۰/۴ به ۰/۵ به دلیل افزایش میزان محلول فعال‌کننده قلیایی و به تبع آن افزایش نرخ ژئوپلیمریزاسیون و

تشکیل مقادیر بیشتری از ژل ژئوپلیمر، مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه ۱۴، ۱۶ و ۱۵ درصد افزایش یافت و سبب دست‌یابی به بیشترین مقاومت فشاری شد. اما با افزایش بیشتر این نسبت به ۰/۵۵، مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه تقریباً ۱۶، ۱۴ و ۱۳ درصد کاهش یافت که دلیل این موضوع می‌تواند به افزایش نسبت آب به مواد خشک شرکت‌کننده در ژئوپلیمریزاسیون مربوط باشد.

۵. نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به محلول هیدروکسید سدیم نیز یکی از پارامترهای تأثیرگذار در مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری است. در این تحقیق 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 ۳، ۷ و ۲۸ روزه به دلیل وجود مقادیر بیش از حد SiO_4 و خارج شدن نسبت Si/Al از محدوده بهینه، ۳۱، ۳۲ و ۳۶ درصد کاهش یافت.

۶. دمای عمل‌آوری (کیورینگ) نیز یکی از پارامترهای تأثیرگذار در مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری است. با افزایش دما تا ۹۰ 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 ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تغییرات قابل ملاحظه‌ای در مقاومت‌ها دیده نشد.

۷. زمان عمل‌آوری (کیورینگ) نیز یکی از پارامترهای تأثیرگذار در مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری است. نتایج نشان داد با افزایش زمان کیورینگ از ۱۲ تا ۳۶ ساعت، مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه بتن افزایش یافت و این افزایش مقاومت در مقاومت فشاری ۳ و ۷ روزه بسیار محسوس‌تر بود. اما با افزایش بیشتر زمان تا ۴۸ ساعت، تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقاومت فشاری دیده نشد. در واقع با توجه به نتایج مشاهده شد که بیشترین تأثیرگذاری این پارامتر در افزایش مقاومت ۳ و ۷ روزه و کسب درصد بیشتری از مقاومت نهایی در این سنین بود و نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها در زمان‌های مختلف عمل‌آوری به هم نزدیک بود.

- [11] M.B. Karakoç, İ. Türkmen, M.M. Maras, F. Kantarci, R. Demirbog̃a, M. Ug̃ur Toprak, Mechanical properties and setting time of ferrochrome slag based geopolymer paste and mortar, *Construction and Building Materials*, 72(Supplement C) (2014) 283–292.
- [12] S. Yaseri, G. Hajiaghahi, F. Mohammadi, M. Mahdikhani, R. Farokhzad, The role of synthesis parameters on the workability, setting and strength properties of binary binder based geopolymer paste, *Construction and Building Materials*, 157(Supplement C) (2017) 534–545.
- [13] A. Karthik, K. Sudalaimani, C.T. Vijaya Kumar, Investigation on mechanical properties of fly ash-ground granulated blast furnace slag based self-curing bio-geopolymer concrete, *Construction and Building Materials*, 157(Supplement C) (2017) 338–349.
- [14] Bagheri, A. Nazari, Compressive strength of high strength class C flyash-based geopolymers with reactive granulated blast furnace slag aggregates designed by Taguchi method, *Materials & Design*, 54 (2014) 483–490.
- [15] T.W. Cheng, J.P. Chiu, Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag, *Minerals Engineering*, 16(3) (2003) 205-210.
- [16] K. Sakkas, D. Pania, P.P. Nomikos, A.I. Sofianos, Potassium based geopolymer for passive fire protection of concrete tunnels linings, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 43 (2014) 148-156.
- [17] P.K. Sarker, S. Kelly, Z. Yao, Effect of fire exposure on cracking, spalling and residual strength of fly ash geopolymer concrete, *Materials & Design*, 63 (2014) 584-592.
- [18] W.K.W. Lee, J.S.J. van Deventer, The effects of inorganic salt contamination on the strength and durability of geopolymers, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 211(2) (2002) 115-126.
- [19] A. Palomo, M.T. Blanco-Varela, M.L. Granizo, F. Puertas, T. Vazquez, M.W. Grutzeck, Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin, *Cement and Concrete Research*, 29(7) (1999) 997-1004.
- [1] V.M. Malhotra, Making concrete 'greener' with fly ash, *ACI Concrete International*, 21 (1999) 61-66.
- [2] L.N. Assi, E. Eddie Deaver, P. Ziehl, Effect of source and particle size distribution on the mechanical and microstructural properties of fly Ash-Based geopolymer concrete, *Construction and Building Materials*, 167 (2018) 372-380.
- [3] V.M. Malhotra, Reducing CO2 Emissions, *ACI Concrete International*, 28 (2006) 42-45.
- [4] I. Phummiphan, S. Horpibulsuk, R. Rachan, A. Arulrajah, S.-L. Shen, P. Chindapasirt, High calcium fly ash geopolymer stabilized lateritic soil and granulated blast furnace slag blends as a pavement base material, *Journal of Hazardous Materials*, 341 (2018) 257-267.
- [5] R. McCaffrey, Climate Change and the Cement Industry, *Global Cement and Lime Magazine (Environmental Special Issue)*, (2002) 15-19.
- [6] S. Andrejkovičová, A. Sudagar, J. Rocha, C. Patinha, W. Hajjaji, E.F. da Silva, A. Velosa, F. Rocha, The effect of natural zeolite on microstructure, mechanical and heavy metals adsorption properties of metakaolin based geopolymers, *Applied Clay Science*, 126 (2016) 141-152.
- [7] C. Chen, G. Habert, Y. Bouzidi, A. Jullien, Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation, *Journal of Cleaner Production*, 18 (2010) 478–485.
- [8] C. Meyer, The greening of the concrete industry, *Cement & Concrete Composites*, 31(8) (2009) 601-605.
- [9] I. Bashir, K. Kapoor, H. Sood, An Experimental Investigation on the Mechanical Properties of Geopolymer Concrete, *International Journal of Latest Research in Science and Technology*, 6(3) (2017) 33-36.
- [10] E. Ekinçi, İ. Türkmen, F. Kantarci, M.B. Karakoç, 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*, 201 (2019) 257-267.

- and Technology, 11(1) (2018) 1-12.
- [32] D. Hardjito, B.V. Rangan, Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete, Research Report, Faculty of Engineering Curtin University of Technology, Perth, Australia, 2005.
- [33] H.T.B.M. Petrus, J. Hulu, G.S.P. Dalton, E. Malinda, R.A. Prakosa, Effect of Bentonite Addition on Geopolymer Concrete from Geothermal Silica, Materials Science Forum, 841 (2016) 7-15.
- [34] J.G.S. van Jaarsveld, J.S.J. van Deventer, G.C. Lukey, The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based geopolymers, Chemical Engineering Journal, 89(1-3) (2002) 63-73.
- [35] Satpute Manesh, R. Wakchaure Madhukar, V. Patankar Subhash, Effect of duration and temperature of curing on compressive strength of geopolymer concrete, International Journal of Engineering and Innovative Technology, 1 (2012) 372-391.
- [36] M.N.S. Ahmed, M. Nuruddin, S. Demie, N. Shafiq, Effect of curing conditions on strength of fly ash based self-compacting geopolymer concrete, International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering, 5(8) (2011) 8-22.
- [37] ASTM C127-15, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
- [38] ASTM C128-15, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
- [39] ASTM C136 / C136M-14, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [40] ASTM D2419-14, Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [41] British Standards Institution, Testing Concrete: Method for Determination of the Compressive Strength of Concrete Cubes, BS1881: Part 116: 1983, London.
- [20] M. Zhang, H. Guo, T. El-Korchi, G. Zhang, M. Tao, Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer, Construction and Building Materials, 47 (2013) 1468-1478.
- [21] S.E. Wallah, Creep Behaviour of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, Civil Engineering Dimension, 12(2) (2010) 73-78.
- [22] P. DeSilva, K. Sagoe-Crenstil, V. Sirivivatnanon, Kinetics of geopolymerization: role of Al₂O₃ and SiO₂, Cement and Concrete Research, 37(4) (2007) 512-518.
- [23] K. Gao, K.-L. Lin, D. Wang, C.-L. Hwang, B.L. Anh Tuan, H.-S. Shiu, T.-W. Cheng, Effect of nano-SiO₂ on the alkali-activated characteristics of metakaolin-based geopolymers, Construction and Building Materials, 48 (2013) 441-447.
- [24] G. Görhan, G. Kürklü, The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures, Composites Part B: Engineering, 58 (2014) 371-377.
- [25] D. Hardjito, S.E. Wallah, D.M.J. Sumajouw, B.V. Rangan, On the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, ACI Materials Journal, 101(6) (2004) 467-472.
- [26] J. Davidovits, Geopolymer Chemistry and Properties, in: Geopolymer '88, France, 1988, pp. 25-48.
- [27] J. Davidovits, Soft Mineralogy and Geopolymers, in: Geopolymer '88, France, 1988, pp. 19-23.
- [28] H. Xu, J.S.J. van Deventer, The Geopolymerisation of Alumino-Silicate Minerals, International Journal of Mineral Processing 59(3) (2000) 247-266.
- [29] A.M. Rashad, 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, 47 (2013) 29-55.
- [30] A. Sharma, J. Ahmad, Experimental study of factors influencing compressive strength of geopolymer concrete, International Research Journal of Engineering and Technology, 4(5) (2017) 1306-1313.
- [31] Y.J. Patel, N. Shah, Study on Workability and Hardened Properties of Self Compacted Geopolymer Concrete Cured at Ambient Temperature, Indian Journal of Science

- [47] S.H. Sanni, R. Khadiranaikar, Performance of alkaline solutions on grades of geopolymer concrete, *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2(11) (2013) 366-371.
- [48] M.T. Junaid, O. Kayali, A. Khennane, J. Black, A mix design procedure for low calcium alkali activated fly ash-based concretes, *Construction and Building Materials*, 79 (2015) 301-310.
- [49] E.I. Diaz-Loya, E.N. Allouche, S. Vaidya, Mechanical properties of fly-ash-based geopolymer concrete, *ACI Materials Journal*, 108(3) (2011) 300.
- [50] N. Lloyd, V. Rangan, Geopolymer concrete with fly ash, in: *Proceedings of the Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, UWM Center for By-Products Utilization, 2010, pp. 1493-1504.
- [51] N. Muhammad, S. Baharom, N.A.M. Ghazali, N.A. Alias, Effect of Heat Curing Temperatures on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, *International Journal of Engineering & Technology*, 8(1.2) (2019) 15-19.
- [42] P. Duxson, J.L. Provis, G.C. Lukey, J.S.J. van Deventer, The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete', *Cement and Concrete Research*, 37(12) (2007) 1590-1597.
- [43] J. Davidovits, *Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology* In: *Proceedings of 99 International Conference*, eds. Joseph Davidovits, R. Davidovits & C. James, France, (1999).
- [44] K. Komnitsas, D. Zaharaki, V. Perdikatsis, Effect of synthesis parameters on the compressive strength of low-calcium ferronickel slag inorganic polymers, *Journal of Hazardous Materials*, 161(2) (2009) 760-768.
- [45] Panagiotopoulou, G. Kakali, S. Tsivilis, T. Perraki, M. Perraki, *Synthesis and Characterization of Slag Based Geopolymers*, *Materials Science Forum*, 636-637 (2010) 155-160.
- [46] F.A. Memon, M.F. Nuruddin, N. Shafiq, 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*, 20(2) (2013) 205-213.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. R. Esparham, A. B. Moradikhou, *Factors Influencing Compressive Strength of Fly Ash-based Geopolymer Concrete*. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(3) (2021) 1117_1136

DOI: [10.22060/ceej.2019.16813.6356](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16813.6356)



