

تأثیر محلول‌های قلیایی مختلف بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی

علیرضا اسپرهم^۱، امیر بهادر مرادی خو^۲

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

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

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

چکیده

بتن به علت دارا بودن ویژگی‌های خاص پرمصرف‌ترین مصالح در صنعت ساخت و ساز، بعد از آب است. اما فرآیند تولید سیمان پرتلند معایب عمده زیست محیطی به دنبال دارد. در سال‌های اخیر ژئوپلیمر به عنوان یک جایگزین دوستدار محیط زیست برای سیمان پرتلند مطرح شده است. محلول فعال‌کننده قلیایی به عنوان یکی از دو بخش اصلی ژئوپلیمرها، نقش مهمی را در تجزیه و تشکیل ساختار کریستالی Si و Al ایفا می‌کند. از این رو مطالعه نقش و میزان تاثیرگذاری محلول‌های فعال‌کننده قلیایی مختلف بر خواص بتن ژئوپلیمری ضروری به نظر می‌رسد. در این مطالعه آزمایشگاهی سه نوع محلول قلیایی KOH، NaOH و ترکیب KOH و NaOH و همچنین پارامترهای مربوطه بررسی شد. نتایج نشان داد استفاده از محلول فعال‌کننده قلیایی سدیمی سبب دستیابی به مقاومت زودرس بیشتر و استفاده از محلول پتاسیمی منجر به دستیابی به مقاومت نهایی بیشتر می‌شود. همچنین غلظت مولار بهینه محلول هیدروکسید پتاسیم ۱۴ و نسبت بهینه محلول سیلیکات سدیم به هیدروکسید پتاسیم ۱/۵، سنجش شد.

کلمات کلیدی: بتن ژئوپلیمری، خاکستر بادی، هیدروکسید سدیم، هیدروکسید پتاسیم، مقاومت فشاری.

۱. مقدمه

بتن به علت دارا بودن ویژگی‌های خاص مانند شکل پذیری، 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 [۲]. به طوری که تولید یک تن سیمان پرتلند سبب تولید تقریباً یک تن دی‌اکسید کربن می‌شود [۳]. 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 [۴]. همچنین فرآیند تولید سیمان پرتلند عامل تولید ۵ تا ۷ درصد از کل میزان انتشار جهانی گاز دی‌اکسید کربن است [۵]. از این رو نیاز به استفاده از یک 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. ژئوپلیمر برای اولین بار در سال ۱۹۷۸ میلادی توسط Davidovits شیمیدان برجسته فرانسوی، به عنوان بایندهای جدیدی از خانواده پلیمرهای معدنی معرفی شد. وی همچنین استفاده از نام poly(sialate) را برای شناسایی شیمیایی ژئوپلیمرها پیشنهاد کرد که poly پیشوند پلیمری و sialate نیز عبارت اختصاری برای زنجیره silicon-oxo-aluminate است. در شکل ۱ ساختار مختلف poly(sialate) نشان داده شده است [۶-۹].



شکل ۱- ساختار شیمیایی poly(sialate) ها

ژئوپلیمرها مواد آلومیناسیلیکاتی غیرآلی هستند که از ترکیب منبع اولیه ژئوپلیمرزاسیون (منبع آلومیناسیلیکاتی) غنی از سیلیکا (SiO_2) و آلومینا (Al_2O_3) با یک محلول قلیایی فعال‌کننده حاصل می‌شوند [۱۰]. منبع اولیه ژئوپلیمرزاسیون بسته به خواص مورد نیاز، هزینه و در دسترس بودن می‌تواند طبیعی مانند زئولیت، صنعتی مانند متاکولن و یا ضایعاتی مانند خاکستر بادی (فل‌اش) یا سرباره کوره آهن‌گدازی باشد. ترکیب شیمیایی مواد ژئوپلیمری مشابه زئولیت است ولی دارای ساختار آمورف هستند برخلاف زئولیت که ساختار کریستالی دارد [۱۱]. ژئوپلیمرزاسیون واکنش سریع شیمیایی در شرایط قلیایی بین مینرال‌های Si و Al است که باعث تشکیل زنجیره سه بعدی پلیمری Si-O-Al می‌شود [۱۲]. از نقطه نظر خواص مهندسی مورد نیاز در مهندسی عمران، بتن‌های ژئوپلیمری خصوصیات مکانیکی و شیمیایی بهتری نسبت به بتن‌های معمولی دارند که از جمله آنها می‌توان مقاومت فشاری، خمشی و کششی بالا [۱۳-۱۵]، سخت شدن سریع [۱۶]، مقاومت در برابر آتش سوزی و حرارت‌های بالا [۱۷-۱۹]، نفوذپذیری کم و مقاومت در برابر حمله نمک‌ها و اسیدها [۲۰، ۲۱] و خزش پایین [۲۱] اشاره کرد.

یکی از منابع اولیه ژئوپلیمرزاسیون خاکستر بادی است. خاکستر بادی محصول جانبی نیروگاه ذغال سنگ سوز است که به دلیل ماهیت ساختاری آمورف می‌تواند یکی از بهترین منابع اولیه ژئوپلیمرزاسیون باشد. خاکستر بادی در دو کلاس C (دارای مقادیر زیاد CaO) و F (حاوی مقادیر کم CaO) دسته‌بندی می‌شود. در این مقاله از خاکستر بادی کلاس F به عنوان منبع آلومیناسیلیکاتی، برای ساخت بتن ژئوپلیمری استفاده شد.

محلول فعال‌کننده قلیایی به عنوان یکی از دو بخش اصلی ژئوپلیمرها نقش مهمی را در تجزیه و تشکیل ساختار کریستالی Si و Al ایفا می‌کند و معمولاً بر مبنای سدیم یا پتاسیم که از فلزات قلیایی حلال هستند، انتخاب می‌شود. رایج‌ترین محلول قلیایی مورد استفاده در ژئوپلیمرزاسیون، ترکیبی از محلول هیدروکسید سدیم (NaOH) یا پتاسیم (KOH) با محلول سیلیکات سدیم یا پتاسیم است [۱۳]. با توجه به نقش مهم محلول فعال‌کننده قلیایی در بتن‌های ژئوپلیمری، بررسی و مطالعه نقش و میزان تاثیرگذاری محلول‌های فعال‌کننده قلیایی مختلف ضروری به نظر می‌رسد. در همین راستا تحقیقات مختلفی توسط پژوهشگران در این زمینه انجام شده است که در ادامه به اختصار به برخی از آنها پرداخته می‌شود. در پژوهش‌های آغازین در مورد ژئوپلیمرها توسط Davidovits [۲۲-۲۴] از محلول NaOH یا KOH بدون محلول سیلیکاتی، به عنوان محلول فعال‌کننده قلیایی استفاده می‌شد. Xu و همکاران [۱۷] نیز در جریان تحقیقات خود بر روی ژئوپلیمرها از محلول NaOH یا KOH بدون محلول سیلیکاتی، به عنوان محلول فعال‌کننده قلیایی استفاده کردند و نتیجه‌گیری کردند در این نوع از محلول‌های فعال‌کننده قلیایی، KOH نتایج بهتری را ارائه می‌کند. Palomo و همکاران [۲۰] در تحقیقات خود دریافته‌اند که محلول فعال‌کننده قلیایی نقش مهمی در واکنش پلیمرزاسیون دارد و اضافه کردن یک محلول سیلیکاتی مانند سیلیکات سدیم یا پتاسیم به محلول NaOH یا KOH، می‌تواند به بالا رفتن نرخ واکنش کمک و نتایج بهتری را همراه داشته باشد و همچنین آنها در جریان تحقیقات خود دریافته‌اند که استفاده

از محلول NaOH و سیلیکات سدیم نتایج بهتری را در مقایسه با محلول KOH و سیلیکات پتاسیم به دنبال دارد. Cheng و همکاران [۴۵۲۴] نیز در جریان تحقیقات خود بر روی ژئوپلیمرهای ضد حریق، نتایج مشابهی گرفتند. Panagiotopoulou و پاپان-همکاران [۴۴۲۵] در تحقیقات خود از ترکیب محلول NaOH و KOH به عنوان محلول هیدروکسید به اضافه سیلیکات سدیم استفاده کردند و نتایج آزمایشات نشان داد که استفاده از دو محلول NaOH و KOH به طور همزمان باعث کاهش مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری می شود.

Rashed [۲۶] 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. Shama و دیگران همکاران [۲۷] 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 همکاران دیگران [۲۸] 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 مورد نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم، Hardjito و همکاران [۲۹] 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 [۳۰] در جریان پژوهش در مورد بتن ژئوپلیمری بر پایه بتونیت 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.

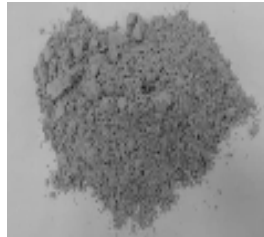
با توجه به موارد گفته شده، در اکثر مقالات و پژوهش ها از محلول های فعال کننده قلیایی بر پایه سدیم استفاده شده است و تحقیقات زیادی در مورد محلول های قلیایی بر پایه سدیم و پارامترهای تاثیرگذار محلول فعال کننده قلیایی بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری مانند غلظت محلول NaOH، غلظت محلول سیلیکات سدیم، نسبت Na_2O به SiO_2 در محلول سیلیکات سدیم، نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به محلول NaOH و همچنین بهینه بای این پارامترها انجام شده است که محققان می توانند از این نتایج استفاده کنند. اما در مورد محلول KOH، ترکیب محلول NaOH و KOH، بررسی پارامترهای مربوطه و بهینه بای آنها و همچنین مقایسه این سه محلول فعال کننده قلیایی مختلف، تحقیقات بسیار اندکی انجام صورت گرفته است. بنابراین در این پژوهش آزمایشگاهی تلاش شده است که در حد توان به بررسی و مقایسه این محلول ها و بهینه بای پارامترهای مربوطه پرداخته شود.

۲. مواد مصالح مصرفی

منبع اصلی ژئوپلیمریزاسیون در این مقاله خاکستر بادی بود که آنالیز XRF آن در جدول ۱ و تصویر آن در شکل ۲ ارائه شده است. هیدروکسید سدیم (NaOH) با خلوص ۹۸ درصد و هیدروکسید پتاسیم (KOH) با خلوص ۹۰ درصد از شرکت قطران شیمی خریداری شد. محلول سیلیکات سدیم مایع با نسبت Na_2O به SiO_2 برابر با ۲، از شرکت بتن زیست فن آور خریداری شد. آنالیز این ۳ ماده در جدول ۲ ارائه شده است. شن و ماسه مصرفی از معادن اطراف شهریار تهیه شد. شن مصرفی از نوع شن شکسته بود که پس از تهیه، توسط الکت استاندارد ASTM دانه بندی شد. در این پژوهش، از شن در ۲ اندازه ۱۰ و ۷ میلی متری استفاده شد. آزمایش وزن مخصوص و جذب آب مطابق با استاندارد ASTM C۱۲۷ [۳۱] از شن مصرفی، گرفته شد. این آزمایش از ماسه نیز مطابق با استاندارد ASTM C۱۲۸ [۳۲]، به عمل آمد که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین ضریب نرمی ماسه مطابق با استاندارد ASTM C۱۳۶ [۳۳]، ۳۰/۱۱۳، میزان رد شده از الک شماره ۲۰۰، ۰/۷۲ درصد و ارزش ماسه ای نیز بر اساس استاندارد ASTM D۲۴۱۹ [۳۴]، ۷۳ اندازه گیری شد. آب مصرفی نیز آب لوله کشی شهر تهران بود. روان کننده مورد استفاده نیز از نوع پلی کربوکسیلاتی بود.

جدول ۱- آنالیز XRF خاکستر بادی کلاس F

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	TiO ₂	Na ₂ O	MnO	P ₂ O ₅
70.7	21.1	1.13	3.90	0.77	1.09	0.92	0.26	0.05	0.05



شکل ۲- تصویر خاکستر بادی

جدول ۲- آنالیز شیمیایی محلول‌های هیدروکسید سدیم، هیدروکسید پتاسیم و سیلیکات سدیم

NaOH			KOH			Na ₂ SiO ₃		
Chemical substance	Result	Unit	Chemical substance	Result	Unit	Chemical substance	Result	Unit
NaOH	98	%	NaOHKOH	90.7	%	SiO ₂	30.00	%
Na ₂ CO ₃	1	%	K ₂ CO ₃	0.2	%	Na ₂ O	14.50	%
NaCl	200	ppm	NaCl	0.006	%	Water	55.50	%
Fe	6	ppm	Fe	0.2	ppm	Appearance	Clear liquid	
SiO ₂	15.7	ppm	NaOH	0.6	%			
Appearance	White flake		Appearance	White flake				

جدول ۳- جذب آب و وزن مخصوص سنگدانه‌ها

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

۳. روش آزمایشگاهی

بخش اول آزمایش معطوف به مقایسه تاثیر محلول‌های فعال‌کننده قلیایی مختلف بر مقاومت فشاری بود. به این منظور ۵ طرح محلول فعال‌کننده قلیایی

شامل:

- طرح N:NaOH و سیلیکات سدیم
- طرح K:KOH و سیلیکات سدیم
- طرح ۵۰:۵۰:۵۰:NaOH + ۵۰ درصد KOH و سیلیکات سدیم
- طرح ۲۵:۷۵:۲۵:NaOH + ۲۵ درصد KOH و سیلیکات سدیم
- طرح ۲۵:۷۵:۲۵:NaOH + ۷۵ درصد KOH و سیلیکات سدیم

آماده شد. غلظت محلول‌های NaOH و KOH، ۱۴ مول انتخاب شد. نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به محلول هیدروکسیدی در هر ۵ طرح برابر با ۱/۵ انتخاب شد. همچنین در هر سه طرح نسبت وزنی محلول فعال‌کننده قلیایی به خاکستر بادی ۰/۵ بود. طرح‌های اختلاط بخش اول در جدول ۴ ارائه گردیده است.

جدول ۴ - طرح‌های اختلاط بخش اول

مقیاس	آب اضافه	روان کننده	ماسه	شن	سیلیکات سدیم	KOH	NaOH	خاکستر بادی	نام طرح
Kg/m ^۳	10	8	850	850	120	-	80	400	N
Kg/m ^۳	10	8	850	850	120	40	40	400	N۵۰K۵۰
Kg/m ^۳	10	8	850	850	120	20	60	400	N۷۵K۲۵
Kg/m ^۳	10	8	850	850	120	60	20	400	N۲۵K۷۵
Kg/m ^۳	10	8	850	850	120	80	-	400	K

برای ساخت نمونه‌ها ابتدا 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 خاکستر بادی مطابق با طرح‌های اختلاط، در میکسر پرتابی پرتابل بتن ریخته و به مدت ۳ دقیقه به منظور توزیع یکنواخت به صورت خشک، میکس مخلوط شدند. سپس محلول‌های فعال کننده قلیایی، روان کننده و آب اضافه به میکسر اضافه شد و مخلوط بتن به مدت ۲ دقیقه میکس مخلوط شد. بعد از اتمام میکس مخلوط کردن، نمونه‌های فشاری قالب‌بندی شدند. نمونه‌ها به مدت ۱۰ ثانیه روی میز ویبره، متراکم شدند. سپس نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آون و در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شدند. 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 BS۱۸۸۱: Part ۱۱۶ [۳۵] گرفته شد.

در بخش دوم آزمایش، تاثیر غلظت محلول KOH بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی مورد مطالعه قرار گرفت. به همین منظور ۳ طرح اختلاط تنظیم شد. طرح‌های اختلاط این بخش در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵ - طرح‌های اختلاط بخش دوم

غلظت مولار محلول KOH	مقیاس	آب اضافه	روان کننده	ماسه	شن	سیلیکات سدیم	KOH	خاکستر بادی	نام طرح
10	Kg/m ^۳	10	8	850	850	120	80	400	FK۱۰
12	Kg/m ^۳	10	8	850	850	120	80	400	FK۱۲
14	Kg/m ^۳	10	8	850	850	120	80	400	FK۱۴

در این بخش نیز نمونه‌های فشاری بتن ژئوپلیمری همانند مرحله قبل، ساخته و عمل‌آوری شدند و آزمون مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه از نمونه‌ها به عمل آمد.

در بخش سوم، به منظور بررسی تاثیر پارامتر نسبت وزنی محلول فعال کننده قلیایی به خاکستر بادی بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری و بهینه یابی این پارامتر، با توجه به نتایج مراحل قبل، ۴ طرح اختلاط تنظیم شد. طرح‌های اختلاط این بخش در جدول ۶ ارائه شده است. لازم به ذکر است که به منظور ثابت نگه داشتن شرایط آزمایش، نسبت محلول سیلیکات سدیم به هیدروکسید پتاسیم در تمامی طرح‌ها ۱/۵ و غلظت محلول هیدروکسید پتاسیم ۱۴ مول بود. در این بخش نیز نمونه‌های فشاری بتن ژئوپلیمری همانند مراحل قبل، ساخته و عمل‌آوری شدند. از نمونه‌ها آزمون مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه گرفته شد.

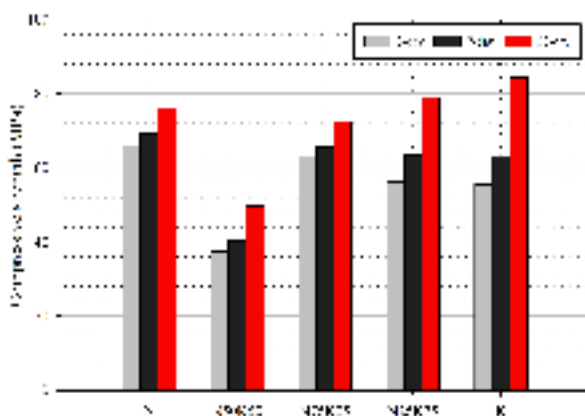
جدول ۶ - طرح‌های اختلاط بخش سوم

نام طرح	خاکستر بادی	KOH	سیلیکات سدیم	شن	ماسه	روان کننده	آب اضافه	مقیاس	نسبت وزنی سیلیکات سدیم به KOH
FK ^۱	400	100	100	850	850	8	10	Kg/m ^۳	1
FK ^{۱.۵}	400	80	120	850	850	8	10	Kg/m ^۳	1.5
FK ^۲	400	66	134	850	850	8	10	Kg/m ^۳	2
FK ^{۲.۵}	400	57	143	850	850	8	10	Kg/m ^۳	2.5
FK ^۳	400	50	150	850	850	8	10	Kg/m ^۳	3

۴. نتایج و بحث‌جزیه و تحلیل نتایج

۴-۱- نتایج بخش اول - تاثیر نوع محلول فعال‌کننده قلیایی بر مقاومت فشاری

نتایج آزمایش تاثیر نوع محلول فعال‌کننده قلیایی بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری، در شکل ۳ ارائه شده است. مقاومت فشاری ۷،۳ و ۲۸ روزه نمونه N که برای ساخت آن از محلول هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم استفاده شده بود، ۶۶/۱، ۶۹/۲ و ۷۶ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. مقاومت فشاری ۷،۳ و ۲۸ روزه نمونه K که برای ساخت آن از محلول هیدروکسید پتاسیم و سیلیکات سدیم استفاده شده بود، به ترتیب برابر با ۵۵/۵، ۶۳/۱ و ۸۴/۴ مگاپاسکال بود. نمونه N تقریباً ۹۱ و ۸۷ درصد از مقاومت فشاری ۲۸ روزه خود را در ۷ و ۳ روزگی کسب کرد. این اعداد برای نمونه K تقریباً ۷۵ و ۶۶ درصد بود. در مقایسه این ۲ نوع محلول فعال‌کننده قلیایی می‌توان گفت که نمونه N مقاومت فشاری ۳ و ۷ روزه و همچنین روند کسب مقاومت در سنین پایین، بیشتری را ارائه کرد. از سوی دیگر، در نمونه K مقاومت فشاری ۲۸ روزه بیشتری مشاهده شد.



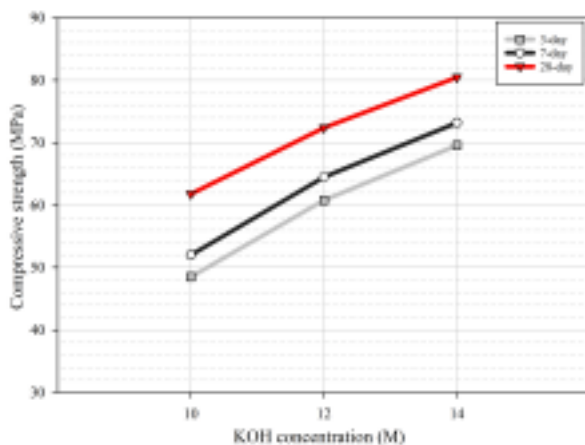
شکل ۳- نتایج تاثیر محلول‌های فعال‌کننده قلیایی مختلف بر مقاومت فشاری

نتایج نشان داد استفاده همزمان از دو محلول NaOH و KOH و به میزان ۵۰ درصد از هر کدام، سبب کاهش قابل ملاحظه مقاومت فشاری هم نسبت به طرح N و هم K می‌شود (تقریباً ۳۵ درصد نسبت به N و ۴۲ درصد نسبت به K) به طوری که مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه نمونه $N50K50$ به ترتیب برابر با ۳۷/۵، ۴۰/۴ و ۴۹/۷ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. همچنین مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه نمونه طرح $N25K75$ به ترتیب برابر با ۵۶/۳، ۶۳/۴ و ۷۱ مگاپاسکال و طرح $N75K25$ به ترتیب برابر با ۶۳، ۶۵/۶ و ۷۲/۵ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد.

این نتایج می‌تواند به تفاوت در مکانسیم واکنش‌های Na و K مربوط باشد. مکانسیم اثر محلول فعال‌کننده قلیایی برای شکستن ساختار SiO_2 و Al_2O_3 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 [۱۵ و ۳۶]. نوع فعال‌کننده قلیایی نقش بسیار مهمی در پیشرفت فرآیند تولید ژئوپلیمر دارد که معمولاً پتاسیم به دلیل شعاع اتمی بزرگ‌تر، باعث تشکیل اولیگومرسیلیکات‌های بزرگ‌تر می‌شود که $Al(OH)_3$ 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 [۳۷] 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 [۱۱ و ۴۴۲۵]. 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. استفاده هم‌زمان از دو محلول NaOH و KOH ($N50K50$) به دلیل تداخل امیال واکنشی Na^+ و K^+ سبب کاهش مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری می‌شود. تاثیر نقش قدرت و سرعت Na در حل کردن Si و Al موجود در منبع آلومیناسیلیکاتی بسیار قوی است و نمی‌تواند با نقش K در میل به انجام واکنش تراکمی، بالانس شود [۴۴۲۵]. با کمتر شدن درصد ترکیب دو محلول NaOH و KOH از ۵۰-۵۰ به ۲۵-۷۵ این تداخل کمتر شده و نمونه‌های طرح $N25K75$ و $N75K25$ مقاومت فشاری بیشتری نسبت به طرح $N50K50$ ارائه کردند.

۲-۴- نتایج بخش دوم - تاثیر غلظت محلول KOH بر مقاومت فشاری

نتایج مربوط به بررسی تاثیر غلظت محلول KOH بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری و بهینه‌یابی این پارامتر، در شکل ۴ ارائه شده است.

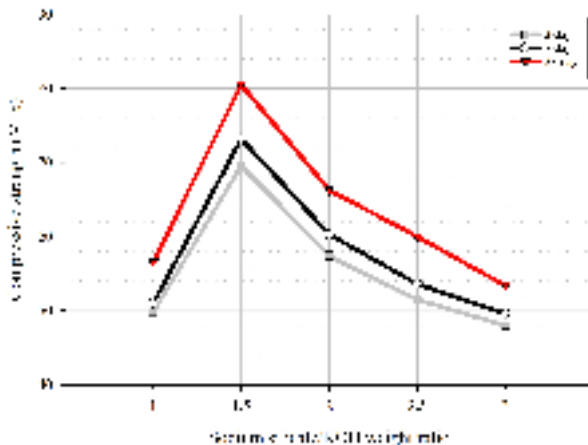


شکل ۴- نتایج تاثیر غلظت محلول KOH بر مقاومت فشاری

با توجه به نتایج بدست آمده، کمترین مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه در حالت استفاده از KOH ۱۰ مول، به میزان ۴۸/۵، ۵۲ و ۶۱/۸ مگاپاسکال اندازه گیری شد. با افزایش غلظت محلول KOH از ۱۰ تا ۱۴ مول، مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه نیز تقریباً ۴۲، ۳۹ و ۳۰ درصد افزایش یافت. دلیل این موضوع این است که در غلظت‌های بالاتر، مقادیر بیشتری از SiO_2 و Al_2O_3 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 [۲۸]. در نتیجه غلظت ۱۴ مول به عنوان غلظت بهینه محلول KOH سنجش شد.

۲۳-۴- نتایج بخش سوم - تاثیر نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به محلول KOH بر مقاومت فشاری

نتایج مربوط به بررسی اثر نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به محلول KOH، 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 پتاسیم برابر با ۱، مقاومت 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 (۴۳، ۴۱ 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.



شکل ۵- نتایج تاثیر نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به محلول KOH بر مقاومت فشاری

نقش محلول فعال‌کننده قلیایی به ویژه هیدروکسید سدیم یا پتاسیم، حل کردن Si و Al موجود در منبع آلومیناسیلیکاتی و تولید SiO_2 و Al_2O_3 برای تولید ژل ژئوپلیمری است. اضافه کردن یک محلول سیلیکاتی مانند سیلیکات سدیم یا پتاسیم به محلول فعال‌کننده قلیایی، به دلیل داشتن Si محلول، سبب افزایش میزان SiO_2 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_2 ، 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_2 تولید می‌شود در حالی که میزان AlO_2^- در ترکیب ثابت (یا محدود) است [۳۰ و ۳۷]. در نتیجه با خارج شدن نسبت Si/Al از محدوده بهینه، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله سعی شد که در حد توان به بررسی محلول‌های قلیایی مختلف و پارامترهای تأثیرگذار و تأثیر آنها بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره پرداخته شود. در همین راستا با توجه به نتایج به دست آمده در بخش قبل می‌توان موارد زیر را به عنوان نتایج ارائه کرد:

- نوع محلول فعال‌کننده قلیایی از پارامترهای تأثیرگذار بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری است. استفاده از محلول سیلیکات پتاسیم و هیدروکسید سدیم، 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 Si و Al 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 سدیم و هیدروکسید پتاسیم شد.
- استفاده از ترکیب محلول‌های NaOH و KOH (۵۰ درصد-۵۰ درصد) و محلول سیلیکات سدیم به عنوان محلول فعال‌کننده قلیایی در بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی، به دلیل تداخل در امیال واکنشی K^+ و Na^+ ، باعث کاهش قابل ملاحظه مقاومت فشاری ۳، ۷ و ۲۸ روزه شد. با تغییر در درصد ترکیب محلول‌های NaOH و KOH به ۷۵-۲۵ درصد، این تداخل کمتر شده و مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش یافت.
- غلظت محلول هیدروکسید پتاسیم نیز از دیگر پارامترهای تأثیرگذار بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری است. افزایش غلظت هیدروکسید پتاسیم از ۱۰ به ۱۴ مول، سبب افزایش ۲۳ درصدی مقاومت فشاری به دلیل افزایش میزان انحلال Si و Al (موجود در خاکستر بادی) توسط محلول فعال‌کننده قلیایی، شد.
- نسبت وزنی محلول سیلیکات سدیم به محلول هیدروکسید پتاسیم 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_2 و خارج شدن نسبت Si/Al از محدوده بهینه، ۳۱، ۳۲ و ۳۶ درصد کاهش یافت.

۶. مراجع

- [۱] Malhotra, V.M. (۱۹۹۹). "Making concrete 'greener' with fly ash". ACI Concrete International, Vol. ۲۱, pp ۶۱-۶۶.
- [۲] Davidovits, J. (۱۹۹۴c). "Global Warming Impact on the Cement and Aggregates Industries". World Resource Review, Vol. ۶(۲), pp ۲۶۳-۲۷۸.
- [۳] Malhotra, V.M. (۲۰۰۴). "Reducing CO₂ Emissions". ACI Concrete International, Vol. ۲۸, pp ۴۲-45.
- [۴] McCaffrey, R. (۲۰۰۲). "Climate Change and the Cement Industry". Global Cement and Lime Magazine (Environmental Special Issue), pp ۱۵-۱۹.

- [Δ] Alzeer, M. and Mackenzie, K. (2013). "Synthesis and mechanical properties of novel composites of inorganic polymers (geopolymers) with unidirectional natural flax fibres (phormium tenax)". *Appl. Clay Sci*, Vol. 48-49, pp 148-152.
- [Ε] Davidovits, J. (1988a). "Soft Mineralurgy and Geopolymers". Paper presented at the Geopolymer '88, First European Conference on Soft Mineralurgy, Compiègne, France.
- [Υ] Davidovits, J. (1988b). "Geopolymer Chemistry and Properties". Paper presented at the Geopolymer '88, First European Conference on Soft Mineralurgy, Compiègne, France.
- [Α] Davidovits, J. (1991). "Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials". *Journal of Thermal Analysis*, Vol. 37, pp 1633-1656.
- [Β] Van Jaarsveld, J.G.S., van Deventer, J.S.J. and Lukey, G.C. (2004a). "The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based geopolymers". *Chemical Engineering Journal*, Vol. 93(1-3), pp 83-93.
- [10] DeSilva, P., Sagoe-Crenstil, K. and Sirivivatnanon, V. (2007). "Kinetics of geopolymerization: role of Al³⁺O³⁻ and SiO²⁻". *Cem. Concr.*, Vol. 37 (4), pp 512-51.
- [11] Xu, H. and van Deventer J.S.J. (2000). "The Geopolymerisation of Alumino-Silicate Minerals". *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 59(2), pp 247-256.
- [12] Davidovits, J. (1999). "Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology". *Geopolymer '99 International Conference*, France.
- [13] Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J., and Rangan, B.V. (2004b). "On the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete". *ACI Materials Journal*, Vol. 107(4), pp 474-484.
- [14] Amnadnua, K., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C. (2013). "Strength, water permeability: and heat evolution of high strength concrete made from the mixture of calcium carbide residue and fly ash". *Mater. Des.*, Vol. 41, pp 894-901.
- [15] Duxson, P., Provis, J.L., Lukey, G.C. and van Deventer, J.S.J. (2007). "The Role of Inorganic Polymer Technology in the Development of Green Concrete". *Cement and Concrete Research*, Vol. 37(12), pp 1590-1597.
- [16] Lee, W.K.W. and van Deventer, J.S.J. (2002). "The effects of inorganic salt contamination on the strength and durability of geopolymers". *Colloids Surf, A* 111, 15-24.
- [17] Cheng, T.W. and Chiu, J.P. (2002). "Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag". *Miner.Eng.*, Vol. 16 (2), pp 202-210.
- [18] Sakkas, K., Panias, D., Nomikos, P.P. and Sofianos, A.I. (2004). "Potassium based geopolymer for passive fire protection of concrete tunnels linings". *Tunnell .Underground Space Technol*, Vol. 19, pp 148-156.
- [19] Sarker, P.K., Kelly, S. and Yao, Z. (2004). "Effect of fire exposure on cracking: spalling and residual strength of fly ash geopolymer concrete". *Mater. Des.*, Vol. 25, pp 584-592.
- [20] Palomo, A., Blanco-Varela, M.T., Granizo, M.L., Puertas, F., Vazquez, T. and Grutzeck, M.W. (1999). "Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin". *Cem. Concr. Res*, Vol. 27 (7), pp 997-1000.
- [21] Zhang, M., Guo, H., El-Korchi, T., Zhang, G. and Tao, M. (2013). "Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer". *Constr. Build. Mater.*, Vol. 47, pp 1468-1474.
- [22] — Panagiotopoulou, C., Kakali, G., Tsivilis, S., Perraki, T. and Perraki, M. (2011). "Synthesis and Characterisation of Slag Based Geopolymers". *Materials Science Forum*, Vol. 637, pp 155-160.

Formatted: Indent: Before: 1,26 cm, No bullets or numbering

- [132][133] Davidovits, J. (1988c). "Geopolymers of the First Generation: SILIFACE-Process". Paper presented at the Geopolymer '88, First European Conference on Soft Mineralogy, Compiègne, France.
- [134][135] Davidovits, J. (1988d). "Geopolymeric Reactions in Archaeological Cements and in Modern Blended Cements". Paper presented at the Geopolymer '88, First European Conference on Soft Mineralogy, Compiègne, France.
- [136] Cheng, T.W. and Chiu, J.P. (2003). "Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag". *Minerals Engineering*, Vol. 18(3), pp 205-210.
- [137] Panagiotopoulou, C., Kakali, G., Tsvivilis, S., Perraki, T. and Perraki, M. (2010). "Synthesis and Characterisation of Slag Based Geopolymers". *Materials Science Forum*, Vol. 636-637, pp 155-160.
- [138] Rashad, A.M. (2013). "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*, Vol. 45, pp 19-22.
- [139] Sharma, A., and Ahmad, J. (2011). "Experimental study of factors influencing compressive strength of geopolymer concrete". *International Research Journal of Engineering and Technology*, Vol. 4(2), pp 1206-1213.
- [140] Patel, Y.J., and Shah, N. (2018). "Study on Workability and Hardened Properties of Self Compacted Geopolymer Concrete Cured at Ambient Temperature". *Indian Journal of Science and Technology*, Vol. 11(1), pp 1-12.
- [141] Hardjito, D., and Rangan, B.V. (2004). "Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete". (Research Report), Faculty of Engineering Curtin University of Technology, Perth, Australia
- [142] Petrus, H.T.B.M., Hulu, J., Dalton, G.S.P., Malinda, E., and Prakosa, R.A. (2016). "Effect of Bentonite Addition on Geopolymer Concrete from Geothermal Silica". *Materials Science Forum*, Vol. 841, pp 7-12.
- [143] ASTM C119-12, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- [144] ASTM C128-12, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- [145] ASTM C136 / C136M-14, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [146] ASTM D2484-14, Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [147] British Standards Institution, Testing Concrete: Method for Determination of the Compressive Strength of Concrete Cubes, BS1881: Part 1: 1983, London.
- [148] Davidovits, J. Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology In: Proceedings of 99 International Conference, eds. Joseph Davidovits, R. Davidovits and C. James, France, 1999.
- [149] Komnitsas, K., Zaharaki, D., and Perdikatsis, V. (2006). "Effect of synthesis parameters on the compressive strength of low-calcium ferronickel slag inorganic polymers". *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 131(1), pp 160-168.