

مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری ساخته شده از خاک‌های منطقه خراسان و تاثیر پارامترهای مختلف بر آن

میثم صمدی *

استادیار گروه عمران دانشگاه آزاد واحد مشهد.

علی برزنونی

کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد.

مسعود عطاریان

کارشناس ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد.

چکیده

ژئوپلیمرها گروهی از پلیمرهای معدنی هستند که عمدتاً ریزساختاری آمورف یا نیمه بلورین در مقیاس نانو داشته و معمولاً در دمای محیط با دماهای حداکثر ۱۲۰ درجه سانتیگراد از طریق پلیمریزاسیون مونومرهای آلومینوسیلیکاتی در محلول‌های قلیایی تولید می‌شوند. مقدار مقاومت فشاری بتن‌های ژئوپلیمری تابعی از ترکیبات شیمیایی مواد تشکیل دهنده شامل مواد آلومینوسیلیکاتی و حلال‌های قلیایی است. از میان ۱۴ نوع خاک آلومینوسیلیکاتی منطقه خراسان، یک نوع پوزولان برای ساخت بتن ژئوپلیمری در محیط قلیایی هیدروکسید سدیم انتخاب شد. در این مقاله نتایج آزمایش‌های انجام شده روی بتن‌های ژئوپلیمری ساخته شده با خاک پوزولانی مزبور ارائه شده و در آن به بررسی اثر پارامترهای مختلف نظیر نسبت حلال به جامد، نسبت هیدروکسید سدیم به سیلیکات سدیم، دمای عمل‌آوری، زمان عمل‌آوری، غلظت هیدروکسید سدیم، آب موجود در نمونه‌ها، نسبت سیلیس به آلومینا و همچنین درصد مواد تشکیل دهنده سیلیکات سدیم بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری حاصل پرداخته شده است. نتایج نشان داد که افزایش سیلیکات سدیم، سیلیس، غلظت هیدروکسید سدیم و دمای عمل‌آوری، منجر به افزایش مقاومت بتن ژئوپلیمری می‌شود. از سوی دیگر با افزایش مقادیر آب، اکسید سدیم و نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم، مقاومت بتن ژئوپلیمری کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: بتن ژئوپلیمری، خاک آلومینوسیلیکاتی، حلال قلیایی، مقاومت فشاری.

* نویسنده مسئول: mapsamadi@gmail.com

۱- مقدمه

فشاری بتن ژئوپلیمری می‌توان به بررسی اثر نوع و شکل فعال کننده قلیایی [۱۷] و اثر نسبت مولاریته $\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$ [۱۸] و اثر نسبت‌های طرح اختلاط [۱۹] را نام برد.

لازم به ذکر است تحقیقات فاپوندا و همکاران نشان داده است که ژئوپلیمرها از دوام بسیار خوبی برخوردار هستند [۲۰].

باتوجه به فقدان روشی جهت تعیین طرح اختلاط برای ساخت بتن‌های ژئوپلیمری، برای تعیین مشخصات بتن ژئوپلیمری ساخته شده از خاک موجود در هر منطقه نیاز به انجام آزمایش‌های متعدد وجود دارد. به عنوان اولین مرحله نیاز به انجام آزمایش‌های متداول جهت بررسی ترکیبات خاک‌های آلومینوسیلیکاتی محلی می‌باشد. هدف اصلی در این تحقیق بررسی امکان ساخت بتن ژئوپلیمری با خاک‌های آلومینوسیلیکاتی ناحیه خراسان به نحوی که توانایی رسیدن به مقاومت‌های مناسب را داشته باشد.

۲- بررسی خاک‌های آلومینوسیلیکاتی منطقه خراسان

بخش اصلی بتن ژئوپلیمری ماده آلومینوسیلیکاتی آن می‌باشد که علاوه بر توانایی ایجاد پیوندهای قوی، به وفور در دسترس باشد. از آن جایی که منطقه خراسان دارای کوه‌های آتش فشانی متعدد می‌باشد احتمال یافتن پوزولان مناسب جهت ساخت بتن ژئوپلیمری در آن بالاست. علاوه بر پوزولان‌های طبیعی، کائولن‌ها نیز توانایی ساخت بتن ژئوپلیمری را دارند، از این رو نسبت به تهیه و بررسی کائولن‌های موجود در منطقه خراسان نیز اقدام گردید. در اکتشافات زمین‌شناسی، طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس (XRF) یک روش سریع و ارزان جهت اندازه‌گیری مقادیر اکسیدهای اصلی و عناصر فرعی می‌باشد که در این روش پرتو ایکس به نمونه تابانده شده و در اثر برانگیختن اتم‌ها باعث پدید آمدن پرتو ایکس ثانویه می‌شود که با تعیین طول موج (روش WDS) یا تعیین انرژی پرتو ایکس ثانویه (روش EDS) عناصر مورد نظر را می‌توان شناسایی کرد. در ضمن روش پراش پرتو ایکس (XRD) روش مستقیمی برای تعیین ساختار بلورین مواد می‌باشد.

با مراجعه به معادن اصلی خاک‌های آلومینوسیلیکاتی شناخته شده در منطقه خراسان و نیز کارخانجات تولید ظروف چینی، ۱۴ نمونه غنی از ترکیبات آلومینوسیلیکاتی تهیه شد. این معادن در مناطق سبزوار، گناباد، درگز، قوچان و مشهد واقع هستند. با انجام آزمایش‌های

بعد از صنایع فولاد و آلومینیوم، سیمان سومین صنعت انرژی بر در جهان می‌باشد. از این رو سهم تولید گازهای گلخانه‌ای ناشی از فرایند تولید سیمان در کل جهان سالانه در حدود ۳۵.۱ میلیون تن بوده که تقریباً ۷٪ کل گازهای گلخانه‌ای انتشار یافته در جو می‌باشد [۱]. زمانی که بخشی از سیمان مصرفی در فرایند تولید بتن معمولی را با خاک آلومینوسیلیکاتی مانند fly ash، پوزولان، روباره کوره‌های بلند، کائولن، متاکائولن و... جایگزین می‌کنیم، در حضور آب و دمای مناسب، خاک آلومینوسیلیکاتی با هیدروکسید کلسیم موجود در فرایند هیدراتاسیون سیمان واکنش داده و ژل سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) تولید می‌کند [۲].

فرایند پلیمریزاسیون شامل یک واکنش سریع شیمیایی تحت شرایط قلیایی بر روی سیلیس و آلومینیوم موجود در مواد معدنی آلومینوسیلیکاتی (Si-Al) می‌باشد که نهایتاً منجر به تشکیل ساختار سه بعدی زنجیره‌ای پلیمری حلقوی شامل پیوندهای Si-O-Al-O می‌گردد پیوندها در بتن ژئوپلیمری از نوع یونی می‌باشند [۳].

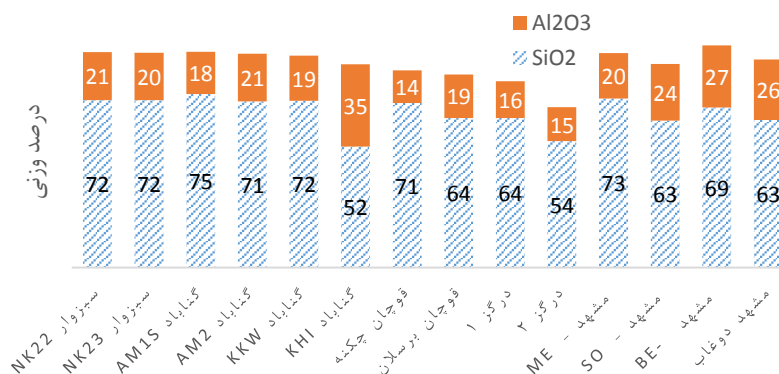
تحقیقات نشان داده است که واکنش‌پذیری و روند کسب مقاومت در سنین اولیه ژئوپلیمرها را می‌توان به چند روش بهبود داد. تسریع واکنش‌ها با استفاده از افزایش دمای پیرامون مخلوط، [۵ و ۴] و یا کاهش اندازه ذرات [۶-۸]. و همچنین استفاده از افزودنی‌های فعال کننده شیمیایی امکان‌پذیر است [۹-۱۲].

در تحقیقات انجام شده توسط هوا و دونتر بر روی شانزده خاک آلومینوسیلیکاتی مختلف مشخص گردید که پارامترهای مقدار CaO و K_2O و نسبت $\frac{Si}{Al}$ منبع آلومینوسیلیکاتی و همچنین نوع مایع قلیایی اثر قابل توجهی بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری می‌گذارند [۲]. جارسولد و همکاران اعلام نمودند که بتن ژئوپلیمری ساخته شده از fly ash با مقادیر بالای CaO و مقادیر کمتر K_2O دارای مقاومت فشاری بیشتری می‌باشد، که این به دلیل تولید آلومینات کلسیم و دیگر ترکیبات کلسیم می‌باشد [۱۳]. هاردجیتو و همکاران به بررسی اثر پارامترهای دمای عمل‌آوری، زمان عمل‌آوری، فوق روان‌کننده و نسبت حلال به خاک بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری اقدام نمودند [۱۴]. علاوه بر موضوعات مورد بررسی هاردجیتو اثر غلظت NaOH بر مقاومت فشاری نیز توسط برخی محققین بررسی شد [۱۵ و ۱۶]. از دیگر موضوعات بررسی شده و موثر بر مقاومت

XRF و XRD روی نمونه‌های تهیه شده، ترکیبات شیمیایی آن‌ها با عنایت به اینکه سیلیس و آلومینا دو ماده اصلی و تعیین کننده در استخراج شد. در جدول ۱ درصد وزنی ترکیبات موجود در این نمونه خاک‌های انتخاب شده ترسیم شده است.

جدول ۱- اطلاعات آزمایش XRF از نمونه خاک‌های آلومینوسیلیکاتی خراسان

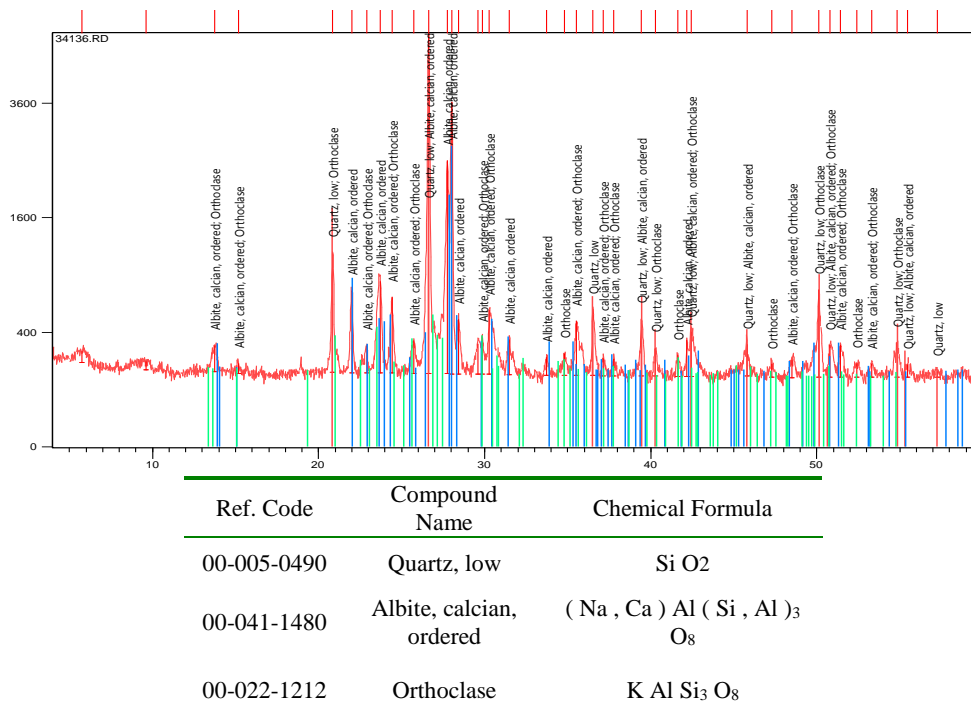
درصد وزنی ترکیبات تشکیل دهنده											نام نمونه	موقعیت معدن
LOI	SO ₃	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	CaO	TiO ₂	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂		
3.80	0.50	0.20	-	0.50	0.14	2.01	0.30	0.30	20.63	71.86	NK22	سبزوار
3.8	0.6	0.30	-	0.50	0.40	2.01	0.30	0.30	20.41	71.86	NK23	سبزوار
6.02	-	0.34	-	0.66	0.08	0.04	0.07	0.02	18.07	74.53	AM1S	گناباد
4.8	0.03	2.40	-	0.03	0.63	0.35	0.16	0.22	20.53	71.34	AM2	گناباد
4.20	-	0.50	-	0.32	0.54	2.95	0.32	0.08	19.28	71.67	KKW	گناباد
9.94	0.54	0.39	-	0.05	0.99	0.07	0.00	0.01	35.30	51.92	KHI	گناباد
1.74	0.00	2.55	0.08	3.50	0.28	2.20	0.58	4.06	14.13	70.58	نمونه چکنه	قوچان
3.60	0.41	2.60	-	6.00	-	0.78	3.00	0.54	18.70	64.23	نمونه برسلان	قوچان
3.60	0.41	2.60	-	9.00	-	0.78	3.00	0.54	15.70	64.23	نمونه ۱	درگز
14.47	0.50	1.91	-	6.54	-	0.31	5.81	1.64	14.53	54.27	نمونه ۲	درگز
6.39	0.00	0.49	0.04	0.40	0.06	0.14	0.16	0.04	19.59	72.54	میکرونیزه - ME	مشهد
9.48	0.00	0.88	0.05	1.13	0.06	0.37	0.35	0.09	24.32	63.06	سوپر - SO	مشهد
0.32	0.00	0.95	0.06	0.79	0.06	1.44	0.32	0.39	26.69	68.71	بیسکوئیت BE-	مشهد
7.19	0.06	0.54	-	0.87	-	1.40	0.24	0.23	25.90	63.40	دوغاب	مشهد



شکل ۱- نسبت وزنی سیلیس و آلومینا در نمونه‌های انتخاب شده

همچنانکه ملاحظه می‌شود به جز خاک‌های درگز و گناباد، سایر خاک‌های انتخابی غنی از سیلیس و آلومینا هستند که به طور بالقوه جهت تولید بتن ژئوپلیمری کاندیداهای مناسبی محسوب می‌شوند. بر مبنای اطلاعات به دست آمده از آزمایش XRF، روی چهار نمونه از این خاک‌ها شامل منطقه چکنه و نیز خاک‌های میکرونیزه، سوپر و بیسکوئیت (که دورریز کارخانجات

تولید محصولات چینی در کارخانجات مشهد هستند) آزمایش XRD انجام شد. در شکل ۲ نتایج آزمایش XRD روی خاک چکنه نشان داده شده است که همچنانکه ملاحظه می گردد مقادیر کوارتز قابل ملاحظه‌ای در آن وجود دارد.



شکل ۲- نتایج آنالیز XRD نمونه خاک چکنه قوچان

نمونه‌های تهیه شده از معادن قوچان از خاک‌های پوزولانی دو معدن در روستاهای چکنه و برسلان نیز مقدار و نسبت SiO_2 و Al_2O_3 مناسبی دارند و یک پوزولان خوب محسوب میگردند. شایان ذکر است بر اساس آئین نامه ASTM C618 پوزولان‌هایی که مقدار SiO_2 آن‌ها از ۶۱٪ بیشتر باشد به‌عنوان پوزولان خوب شناخته می‌شوند. با بررسی دقیق تر پوزولان منطقه برسلان می‌توان دریافت که به جهت پایین بودن مقادیر Na_2O و K_2O و همچنین بالا بودن مقدار LOI آن در مقایسه با نتایج آنالیز خاک‌های موفق به کار رفته در ساخت بتن‌های ژئوپلیمری منتشر شده در مقالات مختلف، شرایط ایده آل را برای ساخت بتن ژئوپلیمری ندارد درحالیکه نتایج آنالیز XRF پوزولان منطقه چکنه به نتایج مقالات نزدیکتر است.

نمونه اول تهیه شده از معدن درگز، شرایط یک پوزولان خوب را داراست ولی به دلیل پایین بودن مقادیر Na_2O و K_2O و همچنین بالا بودن مقدار LOI آن شرایط ایجاد فرایند پلیمریزاسیون را ندارد. در مقابل نمونه دوم به دلیل درصد SiO_2 کمتر از ۶۱٪ بر اساس ASTM C618 شرایط یک پوزولان

با توجه به ترکیبات شیمیایی نمونه‌های فوق از آزمایش‌های XRF و بررسی ترکیبات شیمیایی خاک‌های موفق در تولید بتن ژئوپلیمری در مقالات، می‌توان به نتایج ذیل در خصوص این نمونه خاک‌ها اشاره نمود.

نمونه خاک‌های معدن سبزوار به دلیل بالا بودن مقادیر SiO_2 و Al_2O_3 شرایط اولیه یک خاک آلمینوسیلیکاتی، یعنی بالا بودن مقدار سیلیس و آلومینیوم را دارا می‌باشد. اما به جهت پایین بودن مقادیر ترکیب‌های دیگر موجود در آن‌ها، شرایط لازم جهت ساخت بتن ژئوپلیمری را ندارند.

تمامی نمونه خاک‌های معدن گناباد نیز مقادیر SiO_2 و Al_2O_3 مناسبی دارند، ولی نمونه‌های AM1S و KHI به دلیل بالا بودن مقدار LOI و همچنین پایین بودن باقی ترکیب‌هایشان قابل استفاده نمی‌باشند. در مقابل به دلیل بالا بودن مقدار Fe_2O_3 در نمونه AM2 و همچنین K_2O در نمونه KKW شرایط این دوخاک بهتر می‌باشد ولی به جهت پایین بودن مقادیر دیگر ترکیبات و همچنین بالا بودن مقدار LOI، شرایط این دوخاک نیز جهت ساخت بتن ژئوپلیمری مساعد نمی‌باشد.

۳-۱-۱- بررسی مقایسه‌ای روش‌های اختلاط بتن ژئوپلیمری:
برای اختلاط و تهیه بتن ژئوپلیمری، به علت بالا بودن ویسکوزیته به جای استفاده از میکسرهای وزنی از pan mixer (میکسر سیمان) استفاده می‌گردد. با هدف تعیین روش مناسب و زمان لازم برای اختلاط هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم و خاک آلومینوسیلیکاتی با هم از سه روش استفاده گردید و در نهایت بر اساس مشاهدات و نتایج، بهترین روش اختلاط انتخاب گردید.

۳-۱-۱- روش اول اختلاط

در این روش ابتدا خاک آلومینوسیلیکاتی داخل کاسه میکسر ریخته شده و در حین چرخش همزن، نسبت به افزودن هیدروکسید سدیم اقدام و ترکیب حاصل برای مدت ۳ دقیقه هم زده می‌شود که در این مدت شکل ظاهری مخلوط به صورت یک دست گلوله‌ای گردیده است. در ادامه سیلیکات سدیم به ترکیب افزوده می‌گردد که در نتیجه ۳ دقیقه اختلاط دیگر تمامی گلوله‌ها باز شده و ترکیب شکلی خمیری به خود می‌گیرد. از محاسن این طرح اختلاط ایجاد ترکیب همگن در تمامی مراحل ساخت می‌باشد.

۳-۱-۲- روش دوم اختلاط

در این حالت ابتدا خاک آلومینوسیلیکاتی داخل کاسه میکسر ریخته شده و در حین اختلاط سیلیکات سدیم افزوده می‌گردد و ترکیب برای مدت ۳ دقیقه هم زده می‌شود که البته به جهت بالا بودن ویسکوزیته سیلیکات سدیم ترکیب ناهمگنی بوجود می‌آید که بیشتر آن به بدنه کاسه میکسر می‌چسبد. در ادامه هیدروکسید سدیم به ترکیب افزوده می‌گردد و برای حدود ۴ دقیقه دیگر اختلاط صورت می‌گیرد تا مخلوط همگنی ایجاد شود.

۳-۱-۳- روش سوم اختلاط

در این حالت ابتدا هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم با هم ترکیب شده و سپس به خاک آلومینوسیلیکاتی افزوده می‌شود که به جهت بالا بودن ویسکوزیته سیلیکات سدیم، ترکیب بین هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم نیز دارای ویسکوزیته بالا بوده که در نهایت بتن ساخته شده ناهمگن بوده و وضعیت این مخلوط مشابه روش دوم می‌باشد. با توجه به اینکه در روش اول، زمان و شرایط کار مناسبتر از سایر روش‌ها است، از این روش در

خوب را نداشته و به علاوه به جهت بالا بودن مقدار LOI آن نیز نمی‌تواند به عنوان یک خاک آلومینوسیلیکاتی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

- نمونه‌های سوپر SO و میکرونیز ME و دوغاب بدنه چینی تهیه شده از منابع مشهد به دلیل پایین بودن مقادیر غیر از SiO_2 و Al_2O_3 و از طرفی بالا بودن مقدار LOI قابل استفاده نمی‌باشند. البته در مورد نمونه بیسکوئیت BE علاوه بر موارد فوق می‌توان گفت که به جهت پخته شده بودن دارای ترکیب جدید و پایدار Sillimanite می‌باشد که به وضوح در نتیجه آنالیز XRD آن قابل مشاهده بوده و این خود مانع ایجاد هر گونه پیوند جهت تشکیل فرایند پلیمریزاسیون می‌گردد.

در مجموع باتوجه به نتایج آنالیزهای XRF و XRD نمونه‌های مختلف تهیه شده می‌توان دریافت که تنها، نمونه پوزولان منطقه چکنه قابلیت مناسبی جهت ساخت بتن ژئوپلیمری را دارا می‌باشد.

۳- ساخت نمونه‌های بتن ژئوپلیمری

جهت انجام آزمایش‌ها، مصالح کافی از معدن انتخاب شده (چکنه) حمل و پس از آسیاب نمودن، نسبت به عبور تمامی مصالح از الک ۲۰۰ اقدام شد. نمونه‌های آزمایشگاهی بتن ژئوپلیمری با استفاده از منابع آلومینوسیلیکاتی ناحیه خراسان جهت بررسی مقاومت فشاری بتن‌های ژئوپلیمری ساخته شد. در مجموع حدود ۴۰۰ نمونه استوانه‌ای و مکعبی در ابعاد گوناگون با استفاده از قالب‌های آماده فلزی یا پلاستیکی و نیز قالب‌های ساخته شده از لوله پی وی سی، ساخته شد (شکل ۳).



شکل ۳- تعدادی نمونه ساخته شده

تمامی بتن‌های ساخته شده از لحاظ ظاهری همانند ژله براق بوده و به بدنه قالب نمی‌چسبند و در هنگام قالب‌گیری به دلیل ویبره زدن، حباب‌های ریزی از عمق نمونه به سطح می‌آیند که نشان دهنده حباب‌زا بودن فرآیند تولید بتن ژئوپلیمری می‌باشد، که این خود به دو علت مجبوس ماندن حباب‌های هوا در داخل بتن و همچنین عامل تولید بخار آب به دلیل دمای بالای بتن می‌باشد که حجم این حباب‌ها با توجه به طرح اختلاط‌ها متفاوت است. از آنجا که پوزولان‌ها از نظر ظاهری، رنگی مانند سیمان معمولی (OPC) دارند؛ رنگ بتن ژئوپلیمری ساخته شده با آن‌ها نیز هم‌رنگ بتن معمولی می‌باشد.

۴- بررسی اثر پارامترهای مختلف بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری

باتوجه به ناشناخته بودن رفتار خاک‌های آلومینوسیلیکاتی انتخاب شده در فرایند ساخت بتن ژئوپلیمری و عدم وجود هرگونه نتیجه آزمایش مشابه با این خاک، تمامی پارامترهای مؤثر بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری حاصل، از قبیل ترکیبات شیمیایی خاک، هیدروکسید سدیم، سیلیکات سدیم، دمای عمل‌آوری، زمان عمل‌آوری در برنامه‌ریزی نمونه‌ها برای آزمایش‌ها در نظر گرفته شد. جهت بررسی اثر هر پارامتر، نمونه‌هایی ساخته شد که در آن‌ها سایر پارامترها ثابت گرفته شده و تنها اثر تغییرات یک پارامتر مورد نظر بر مقاومت فشاری بتن بررسی گردید (شکل ۶). جدول ۲ طرح مخلوط‌های مختلف مورد بررسی را نشان می‌دهد. از این رو با توجه به اینکه در هر نمودار صرفاً پارامتر مورد نظر متغیر می‌باشد تعداد نقاط هر نمودار محدود می‌باشد.



شکل ۶- نمونه بتن ژئوپلیمری در آزمایش فشاری و پس از تخریب در ادامه نتایج آزمایشگاهی اثر هر یک از پارامترهای مؤثر بر مقادیر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری با احتساب ثابت بودن سایر پارامترها ارائه شده است.

ساخت کلیه نمونه‌های بتن ژئوپلیمری استفاده گردید. شایان ذکر است در نمونه‌هایی که در آن‌ها از آب اضافی (Base water) در اختلاط استفاده شد، قبل از افزودن هیدروکسید سدیم آب را به خاک آلومینوسیلیکاتی افزوده و ۳ دقیقه اختلاط صورت می‌گرفت و در ادامه مشابه روش اول عمل شد.

۳-۲- مشاهدات اختلاط

به محض افزودن آب و هیدروکسید سدیم به خاک آلومینوسیلیکاتی (پوزولان) ترکیب گل مانند بوجود می‌آید که پس از مدتی اختلاط از این حالت خارج شده و کل مخلوط تبدیل به گلوله‌های کوچک می‌گردد. پس از افزودن سیلیکات سدیم به ترکیب (به دلیل خاصیت چسب مانند سیلیکات سدیم)، تمامی گلوله‌ها به هم چسبیده و در پی اختلاط، از این حالت گلوله‌ای خارج شده و تبدیل به مخلوط خمیری شکل می‌شود (شکل ۴ و ۵). در هنگام اختلاط به دلیل گرمازا بودن فرایند پلیمریزاسیون و نیز اصطکاک بین ذرات نمونه و همچنین بین نمونه و بدنه میکسر (ناشی از ویسکوزیته و غلظت بالای مخلوط) افزایش دمای محسوس نمونه ملاحظه می‌گردد. معمولاً غلظت بتن ژئوپلیمری به قدری بالاست که جهت قالب‌گیری آن نمی‌توان از میله کوبش استفاده کرد و به ناچار باید ریختن مخلوط در قالب بر روی میز ویبره انجام شود.



شکل ۴- تصویر نمونه گلوله شده



شکل ۵- ملات ژئوپلیمری

سیلیکات سدیم، هیدروکسید سدیم و روان کننده مورد استفاده در مخلوط‌ها به ترتیب تولید شرکت صنایع سیلیکات ایران، صنایع شیمیایی دکتر مجلی است. مواد تشکیل دهنده سیلیکات سدیم مصرفی آب، SiO_2 و Na_2O است که مقدار هر کدام از آنها به ترتیب ۵۵، ۳۳/۷۵ و ۱۱/۲۵ درصد می‌باشد. می‌باشد.

جدول ۲- طرح اختلاط های مورد بررسی

شماره طرح	حلال / جامد	سیلیکات سدیم / هیدروکسید سدیم	دمای عمل آوری (درجه سانتی گراد)	زمان عمل آوری (hr)	غلظت NaOH (Mol)	نسبت فوق	
						روان کننده / مواد جامد	عایق بندی
مقدار آب اضافی (kg/m^3)							
1	0.5	2	40	24	10	0	ندارد
2	0.45	2	40	24	10	0	ندارد
3	0.4	2	40	24	10	0	ندارد
4	0.35	2	40	24	10	0	ندارد
5	0.35	2	60	24	14	0	دارد
6	0.35	1	60	24	14	0	دارد
7	0.35	0.5	60	24	14	0	دارد
8	0.35	2	60	24	8	0.24	دارد
9	0.35	2	60	24	10	0.24	دارد
10	0.35	2	60	24	14	0.24	دارد
11	0.35	2	25	24	14	0.24	دارد
12	0.35	2	40	24	14	0.24	دارد
13	0.35	2	60	24	14	0.24	دارد
14	0.35	2	70	24	14	0.24	دارد
15	0.5	0.5	60	24	10	0	دارد
16	0.5	0.5	60	48	10	0	دارد
17	0.5	0.5	60	72	10	0	دارد
18	0.5	0.5	60	96	10	0	دارد
19	0.35	2	60	24	8	0	دارد
20	0.35	2	60	24	8	0.35	دارد
21	0.35	2	60	24	8	0.59	دارد
22	0.35	2	60	24	14	0	دارد
23	0.35	2	60	24	14	0	دارد
24	0.35	2	60	24	14	0	دارد
25	0.35	2	60	24	14	0	دارد
26	0.35	2	60	24	8	0.24	دارد
27	0.35	2	60	24	8	0	ندارد

تحقیقات منتشر شده، نسبتهای ۰/۵، ۰/۴۵، ۰/۴ و ۰/۳۵ برای نسبت

حلال

۴-۱- بررسی اثر نسبت وزنی جامد

حلال به جامد انتخاب گردید. مشاهده شد که هرچه نسبت حلال

به جامد کمتر باشد کارایی بتن تازه نیز کمتر بوده و جهت

در بتن ژئوپلیمری حلال شامل سیلیکات سدیم و هیدروکسید

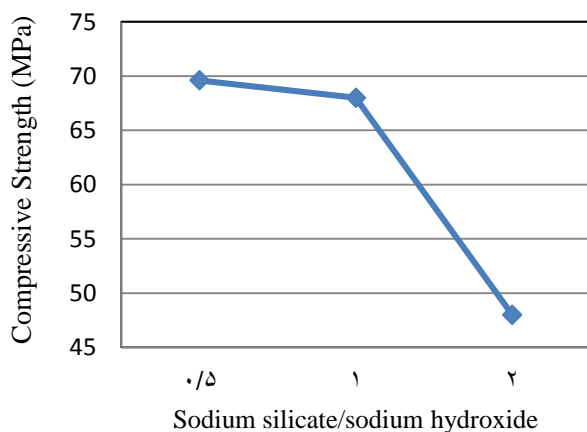
قالب گیری نمونه به ناچار باید به جای استفاده از میله کوبش از میز

سدیم و جامد همان خاک آلومینوسیلیکاتی می‌باشد. با بررسی

و ۰/۵ می‌باشد که به همین جهت در این طرح نیز این مقادیر انتخاب گردید. همچنان که در نمودار شکل ۸ دیده می‌شود، افزایش نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم منجر به کاهش مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری می‌گردد. البته کاهش چشمگیر مقاومت در نسبت‌های بزرگتر از ۱ ملاحظه می‌گردد.

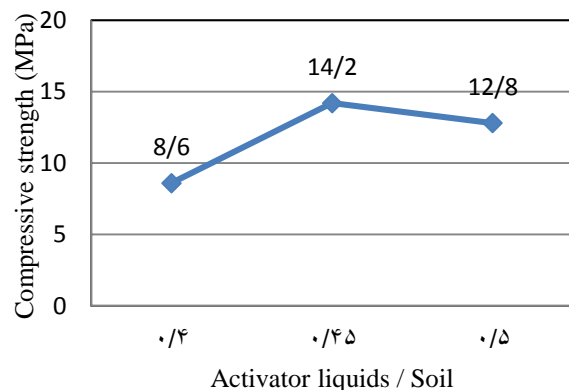
در شرایطی که نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم برابر ۲ بوده است (یعنی در شرایطی که مقدار سیلیکات سدیم بیشتری مصرف شده است)، مشاهده شد که مخلوط دقیق بیشتری را در حالت خمیری باقی می‌ماند. در حالیکه پس از گذشت ۲۴ ساعت، در قیاس با نمونه‌های با سایر نسبت‌های سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم، گیرش اولیه بهتری داشته و گرمای بتن نیز به شدت بیشتر است. شایان ذکر است که در صورت استفاده از نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم برابر ۲، حجم حباب‌زائی بتن کمتر بوده در حالیکه کارایی آن بیشتر می‌باشد که البته این نتیجه در خصوص کارایی با مشاهدات اعلامی چندپراسپرت و همکاران [۱۵] متفاوت می‌باشد.

در شکل ۸، اثر نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم بر مقاومت فشاری بتن، نمایش داده شده است. ملاحظه می‌گردد با افزایش نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم، مقاومت فشاری بتن کاهش می‌یابد. شایان ذکر است در این آزمایش‌ها، سایر پارامترهای موثر ثابت و به شرح ذیل می‌باشند. نسبت حلال به جامد برابر ۰.۳۵، دمای عمل‌آوری ۶۰ درجه سانتیگراد، زمان عمل‌آوری ۲۴ ساعت، غلظت NaOH برابر ۱۴ مولار و نمونه‌ها بدون فوق روان کننده بودند. همچنین نمونه‌ها پس از قالب‌گیری و قبل از عمل‌آوری عایق شده‌اند.



شکل ۸- اثر نسبت $\frac{\text{سیلیکات سدیم}}{\text{هیدروکسید سدیم}}$ بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری

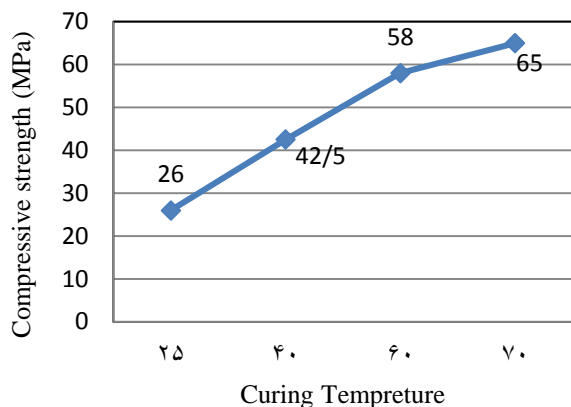
و بیره استفاده شود. در نسبت‌های حلال به جامد برابر ۰/۳۵ و ۰/۴ کارایی مخلوط ساخته شده به قدری پایین است که دستگاه میکسر توانایی اختلاط آنرا ندارد، به همین جهت در ادامه ساخت نمونه‌ها تنها از نسبت‌های ۰/۴۵ و ۰/۵ استفاده گردید. در شکل ۷ اثر این پارامتر بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که با افزایش مقدار پارامتر نسبت حلال به جامد تا مقدار ۰/۴۵، مقاومت فشاری افزایش یافته و پس از آن مقاومت فشاری اندکی کاهش می‌یابد. شایان ذکر است در این آزمایش‌ها، پارامترهای غیر از نسبت حلال به جامد ثابت و به شرح ذیل می‌باشد. نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم برابر ۲، دمای عمل‌آوری ۴۰ درجه سانتیگراد، زمان عمل‌آوری ۲۴ ساعت، غلظت NaOH ۱۰ مولار و نمونه‌ها بدون فوق روان کننده بودند که پس از قالب‌گیری و قبل از عمل‌آوری عایق نشدند. به نظر می‌رسد اثر افزایشی نسبت حلال به جامد بر مقاومت بتن، عمدتاً به دلیل نقش حلال‌ها در تشکیل پیوندهای جدید می‌باشد و در این آزمایش‌ها میزان بهینه این نسبت حدود 0.45 بدست آمد.



شکل ۷- اثر نسبت $\frac{\text{حلال}}{\text{جامد}}$ بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری

۴-۲- بررسی اثر نسبت وزنی سیلیکات سدیم / هیدروکسید سدیم

شروع کننده و تعیین کننده سرعت فرایند پلیمریزاسیون، هیدروکسید سدیم است، زیرا شروع فرایند شکستن پیوندهای بین Si و Al موجود در خاک آلومینوسیلیکاتی توسط هیدروکسید سدیم انجام می‌شود. از سوی دیگر مسئولیت ساخت پیوندهای جدید و عامل تعیین کننده مقدار مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری، مقدار سیلیکات سدیم مصرفی است [۲۱]. بر اساس تحقیقات مختلف منتشر شده، بهترین نسبت‌های وزنی سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم ۱، ۲

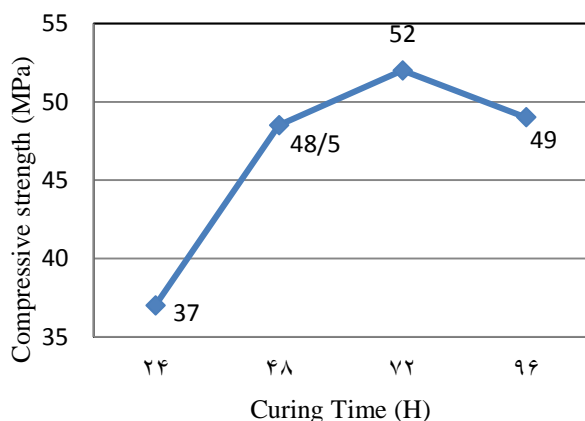


شکل ۱۰- اثر دمای عمل‌آوری بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری

بر اساس نمودار فوق روشن است که با افزایش دمای عمل‌آوری مقاومت فشاری بتن افزایش می‌یابد.

۴-۵- بررسی اثر زمان عمل‌آوری

برای بررسی اثر زمان عمل‌آوری، چهار گروه نمونه برای یکی از مدت زمان‌های ۲۴، ۴۸، ۷۲ و ۹۶ ساعت در دمای ثابت ۶۰ درجه سانتیگراد نگهداری شدند. سایر شاخص‌های مؤثر برای کلیه این نمونه‌ها برابر مقادیر ذیل ثابت گرفته شد. نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم برابر ۰/۵ و نسبت حلال به جامد معادل ۰/۵ و غلظت NaOH، ۱۰ مولار و دمای عمل‌آوری برابر ۶۰ درجه سانتیگراد و نمونه‌ها بدون فوق روان کننده بوده است که پس از قالب‌گیری و قبل از عمل‌آوری نمونه‌ها عایق شده‌اند (شکل ۱۱).

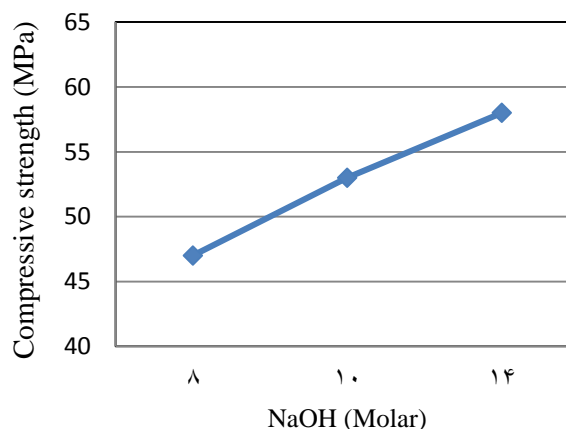


شکل ۱۱- اثر تغییر مقدار زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری

ملاحظه می‌شود که افزایش زمان عمل‌آوری تا ۷۲ ساعت، افزایش مقاومت فشاری را سبب شده و پس از آن به کاهش مقاومت فشاری می‌انجامد.

۴-۳- بررسی اثر غلظت NaOH

سه غلظت مختلف ۸، ۱۰ و ۱۴ مولار هیدروکسید سدیم در ساخت نمونه‌های بتن ژئوپلیمری استفاده گردید. با توجه به اینکه هر چه غلظت سود مصرفی بیشتر باشد عملاً مقدار NaOH موجود در یک حجم مشخص بیشتر است، سرعت انجام واکنش بیشتر خواهد بود و در نتیجه دمای بتن در حین ساخت افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش غلظت NaOH در ساخت نمونه‌های بتن ژئوپلیمری، افزایش حباب‌زایی و نیز ویسکوزیته بالاتر مشاهده گردید. در شکل ۹، نشان داده شده که با افزایش غلظت NaOH، مقاومت فشاری بتن، افزایش می‌یابد.



شکل ۹- اثر غلظت NaOH بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری

در این آزمایش‌ها، سایر پارامترهای مؤثر به جز غلظت NaOH به شرح ذیل ثابت در نظر گرفته شدند. نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم برابر ۲ و نسبت حلال به جامد برابر ۰/۳۵ و دمای عمل‌آوری ۶۰ درجه سانتیگراد و زمان عمل‌آوری ۲۴ ساعت و در نمونه‌ها ۰/۲۴ درصد وزن پوزولان مصرفی، فوق روان استفاده شده است که پس از قالب‌گیری و قبل از عمل‌آوری نمونه‌ها عایق شده‌اند.

۴-۴- بررسی اثر دمای عمل‌آوری

چهار دمای عمل‌آوری ۲۵ (دمای محیط)، ۴۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتیگراد برای عمل‌آوری بتن ژئوپلیمری مورد بررسی قرار گرفت. در نمونه‌هایی که عمل‌آوری آن‌ها تحت یکی از این دماها انجام شد، نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم برابر ۲، نسبت حلال به جامد معادل ۰/۳۵، غلظت NaOH ۱۴ مولار و زمان عمل‌آوری ۲۴ ساعت در نظر گرفته شد. همچنین در تمامی مخلوط‌ها ۰/۲۴ درصد وزن پوزولان، فوق روان استفاده شد که پس از قالب‌گیری و قبل از عمل‌آوری نمونه‌ها عایق شدند (شکل ۱۰).

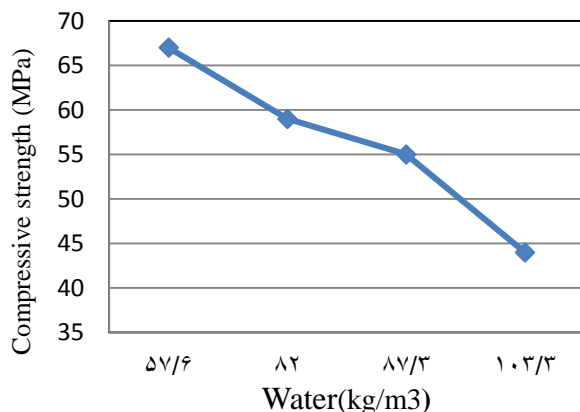
۶-۴- بررسی اثر فوق روان کننده

صورت نیاز به افزودن آب اضافه بهتر است این آب قبل از هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم به خاک آلومینوسیلیکاتی افزوده شود تا شرایط اولیه واکنش را بهتر نماید. در صورت افزودن آب اضافه، بتی با کارایی بیشتر به همراه حرارت تولیدی و حباب‌زایی کمتر خواهیم داشت که البته گیرش اولیه کمتری نیز دارد.

چنانکه در شکل ۱۳ ملاحظه می‌گردد، با افزایش مقدار آب در ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی، مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش می‌یابد. برای بررسی صرف اثر مقدار آب، سایر پارامترهای موثر به شرح ذیل ثابت در نظر گرفته شدند. نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم برابر ۲، نسبت حلال به جامد معادل ۰/۳۵، غلظت NaOH ۱۴ مولار، دمای عمل‌آوری ۶۰ درجه سانتیگراد، زمان عمل‌آوری ۲۴ ساعت است. پس از قالب‌گیری و قبل از عمل‌آوری، نمونه‌ها عایق شده‌اند.

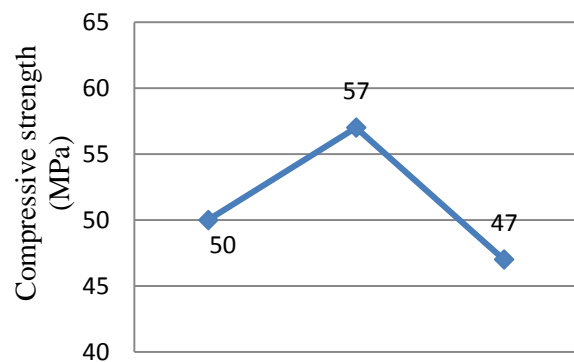
۸-۴- بررسی اثر عمل‌آوری بسته

دو گروه نمونه با شرایط یکسان مورد بررسی قرار گرفت که پس از ریختن بتن در قالب دور یکی پوشش پلاستیکی استفاده شده بود و گروه دوم بدون هرگونه پوششی عمل‌آوری انجام شد. سایر پارامترهای موثر به شرح ذیل ثابت گرفته شد. نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم برابر ۲، نسبت حلال به جامد معادل ۰/۳۵، غلظت NaOH ۸ مولار، دمای عمل‌آوری ۶۰ درجه سانتیگراد، زمان عمل‌آوری ۲۴ ساعت و نمونه‌ها بدون فوق‌روان‌کننده ساخته شدند. در شکل ۱۴ مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری این دو گروه با هم مقایسه شده است. در این نمودار، مقدار یک بیانگر حالت دارای عایق و مقدار صفر بیانگر حالت بدون عایق می‌باشد.



شکل ۱۳- اثر مقدار آب موجود بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری

جهت بررسی اثر فوق روان کننده، از محصول تجاری STRUCTURO 335، محصول شرکت FOSROC استفاده گردید. حضور فوق روان کننده باعث افزایش محسوس کارایی بتن تازه گردید و امکان قالب‌گیری و ویریه‌بتری را ایجاد نمود، در حالیکه باعث افزایش حباب‌زایی بتن ژئوپلیمری نیز می‌گردد. براساس آزمایش‌های صورت گرفته در هر دو حالت بدون استفاده از فوق روان کننده و با استفاده از آن، مشاهده شد که دمای بتن تغییری نمی‌کند. آزمایش‌های بررسی اثر فوق روان کننده با سه نسبت وزنی مختلف فوق روان کننده انجام شد که در آن‌ها سایر پارامترها به شرح ذیل ثابت گرفته شد. نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم برابر ۲، نسبت حلال به جامد معادل ۰/۳۵، غلظت NaOH ۸ مولار، دمای عمل‌آوری ۶۰ درجه سانتیگراد و زمان عمل‌آوری ۲۴ ساعت و پس از قالب‌گیری و قبل از عمل‌آوری، نمونه‌ها عایق شدند (شکل ۱۲). در نمودار شکل ۱۲ نشان داده شده که با افزایش مقدار فوق روان کننده مصرفی تا مقدار ۰/۳۵ درصد وزن خاک مصرفی، مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد.



نسبت وزنی فوق روان کننده به وزن کل پوزولان (/)

شکل ۱۲- اثر مقدار فوق روان کننده بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری

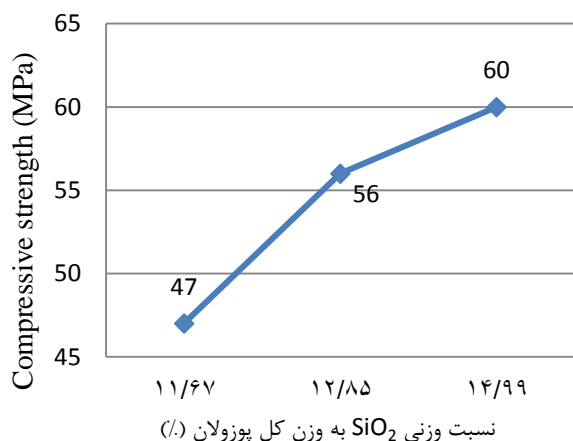
۷-۴- بررسی اثر مقدار آب

باید توجه نمود که در فرایند ساخت بتن ژئوپلیمری بیشتر آب موجود در ترکیب، در واقع به صورت حلال هیدروکسید سدیم مایع و سیلیکات سدیم مایع وارد مخلوط می‌شود و گاهی درصد کمی آب اضافی به ترکیب افزوده می‌شود. براساس آزمایش‌های انجام شده در

نمودار شکل فوق نشان می‌دهد، با افزایش مقدار Al_2O_3 در ترکیب، مقاومت فشاری بتن کاهش می‌یابد.

۴-۱۰- بررسی اثر مقدار SiO_2

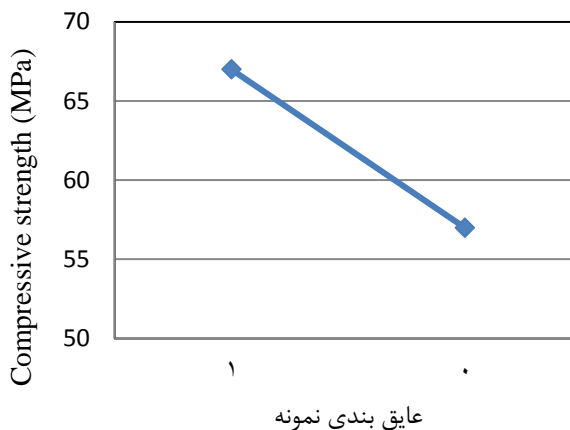
برای بررسی اثر درصد وزنی SiO_2 موجود در خاک به وزن کل خاک، بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری حاصل، در سه نمونه (که در آن‌ها مقادیر کلیه پارامترهای دیگر ثابت گرفته شده بود)، رابطه این نسبت با مقاومت فشاری بتن نمونه‌ها مطابق شکل ۱۶ بررسی شد. در این سه نمونه، سایر پارامترهای اصلی ثابت و به شرح ذیل می‌باشد. نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم برابر ۲ و نسبت حلال به جامد معادل ۰/۳۵ و غلظت $NaOH$ ۸ مولار و دمای عمل‌آوری ۶۰ درجه سانتیگراد و زمان عمل‌آوری ۲۴ ساعت و در نمونه‌ها ۰/۲۴ درصد وزن پوزولان مصرفی، فوق روان استفاده شده است و پس از قالب‌گیری و قبل از عمل‌آوری نمونه‌ها عایق شده‌اند.



شکل ۱۶- اثر تغییر مقدار SiO_2 بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری چنانکه ملاحظه می‌شود همواره افزایش نسبت SiO_2 در ترکیب، افزایش مقاومت فشاری را به ارمغان می‌آورد.

۴-۱۱- بررسی اثر مقدار K_2O

برای بررسی اثر درصد وزنی K_2O موجود در خاک به وزن کل خاک، بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری حاصل، در سه نمونه (که در آن‌ها مقادیر کلیه پارامترهای دیگر ثابت گرفته شده بود)، رابطه این نسبت با مقاومت فشاری بتن نمونه‌ها مطابق شکل ۱۷ بررسی شد. در این سه نمونه، سایر پارامترهای اصلی به شرح ذیل ثابت می‌باشد. نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم برابر ۲ و

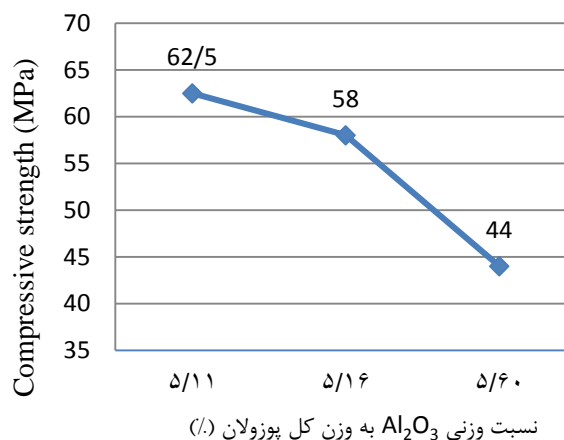


شکل ۱۴- اثر حضور / فقدان عایق‌بندی بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری

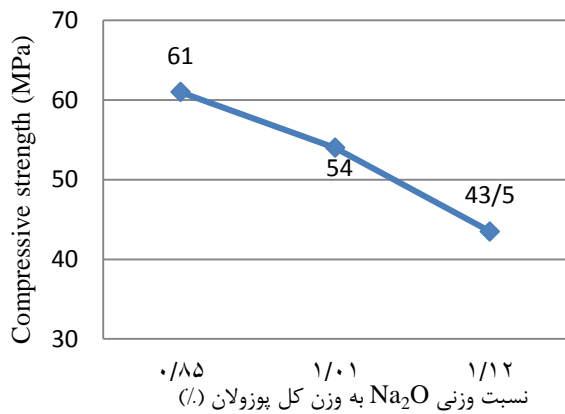
با مقایسه نتایج این دو گروه می‌توان نتیجه گرفت که در صورت عایق بودن نمونه‌ها در هنگام عمل‌آوری، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد.

۴-۹- بررسی اثر مقدار Al_2O_3

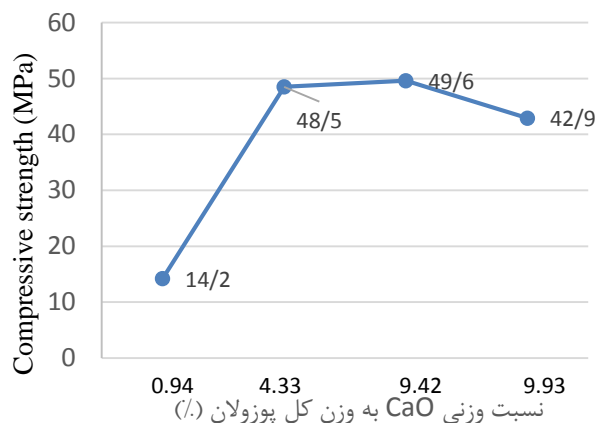
برای بررسی اثر درصد وزنی Al_2O_3 موجود در خاک به وزن کل خاک، بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری حاصل، سه نمونه مطابق شکل ۱۵ بررسی شدند که در آن‌ها سایر پارامترهای اصلی ثابت و به شرح ذیل می‌باشد. نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم ۲ و نسبت حلال به جامد ۰/۳۵ و غلظت $NaOH$ ۱۴ مولار و دمای عمل‌آوری ۶۰ درجه سانتیگراد و زمان عمل‌آوری ۲۴ ساعت و در نمونه‌ها ۰/۲۴ درصد وزن پوزولان مصرفی، فوق روان استفاده شده است و پس از قالب‌گیری و قبل از عمل‌آوری نمونه‌ها عایق شده‌اند.



شکل ۱۵- اثر تغییر مقدار Al_2O_3 بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری

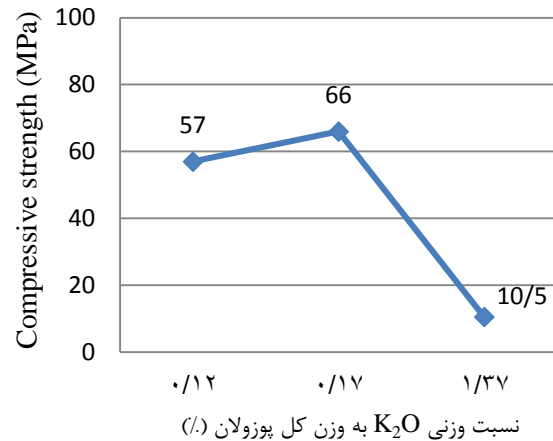


شکل ۱۸- اثر تغییر مقدار Na₂O بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری در این سه نمونه، سایر پارامترهای اصلی ثابت و به شرح ذیل می‌باشد. نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم برابر ۲ و نسبت حلال به جامد معادل ۰/۳۵ و غلظت NaOH ۱۰ مولار و دمای عمل آوری ۶۰ درجه سانتیگراد و زمان عمل آوری ۲۴ ساعت و در نمونه‌ها از فوق روان استفاده نشده است و پس از قالب‌گیری و قبل از عمل آوری نمونه‌ها عایق شده‌اند.



شکل ۱۹- اثر تغییر مقدار CaO بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری با توجه به نمودار افزایش مقدار CaO تا حدود ۴/۳۳ درصد، سبب افزایش مقاومت فشاری با نرخ زیاد شده ولی پس از این درصد، افزایش مقاومت تقریباً متوقف شده است. این نتیجه‌گیری قدری متفاوت با مشاهدات ژو [۲۱] از بتن ژئوپلیمری مرکب از دو نوع خاک آلومینوسیلیکاتی می‌باشد که نشان داد با افزایش نسبت خاک حاوی CaO بیشتر، همواره مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. این تفاوت اندک احتمالاً به دلیل آن است که وی از ترکیب دو خاک استفاده کرده که علاوه بر درصد CaO، نسبت سایر ترکیبات شیمیایی دو خاک نیز با هم متفاوت هستند.

نسبت حلال به جامد معادل ۰/۳۵ و غلظت NaOH ۸ مولار و دمای عمل آوری ۶۰ درجه سانتیگراد و زمان عمل آوری ۲۴ ساعت و در نمونه‌ها از فوق روان استفاده نشده است و پس از قالب‌گیری و قبل از عمل آوری نمونه‌ها عایق نشده‌اند.



شکل ۱۷- اثر تغییر مقدار K₂O بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری با توجه به نمودار افزایش مقدار K₂O تا حدود ۰/۱۷ درصد، باعث افزایش مقاومت فشاری خواهد شد ولی پس از آن با کاهش مقاومت فشاری مواجه هستیم.

۴-۱۲- بررسی اثر مقدار Na₂O

برای بررسی اثر درصد وزنی Na₂O موجود در خاک به وزن کل خاک، بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری حاصل، سه نمونه مطابق شکل ۱۸ بررسی شدند که در آنها سایر پارامترهای اصلی ثابت و به شرح ذیل می‌باشد. نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم برابر ۲ و نسبت حلال به جامد معادل ۰/۳۵ و غلظت NaOH ۸ مولار و دمای عمل آوری ۶۰ درجه سانتیگراد و زمان عمل آوری ۲۴ ساعت و در نمونه‌ها از فوق روان استفاده نشده است و پس از قالب‌گیری و قبل از عمل آوری نمونه‌ها عایق نشده‌اند. چنانکه در این نمودار دیده می‌شود، افزایش مقدار Na₂O در ترکیب منجر به کاهش مقاومت فشاری می‌گردد.

۴-۱۳- بررسی اثر مقدار CaO

برای بررسی اثر درصد وزنی CaO موجود در خاک به وزن کل خاک، بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری حاصل، در سه نمونه (که در آنها مقادیر کلیه پارامترهای دیگر ثابت گرفته شده بود)، رابطه این نسبت با مقاومت فشاری بتن نمونه‌ها مطابق شکل ۱۹ بررسی شد.

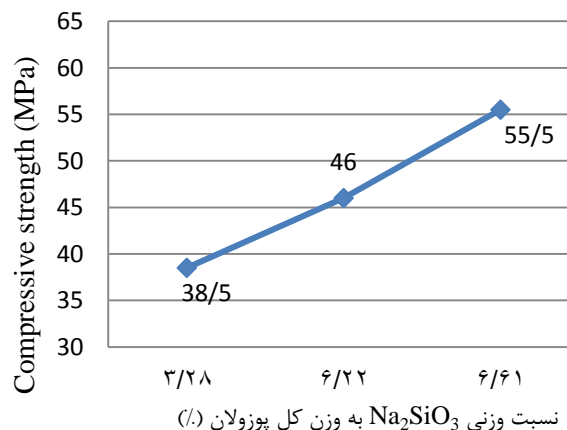
افزایش نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم، افزایش نسبت اکسید سدیم خاک در حجم مخلوط بتن همواره مقاومت بتن ژئوپلیمری حاصل کاهش می‌یابد. نهایتاً پارامترهایی نظیر نسبت اکسید پتاسیم و اکسید کلسیم خاک، درصد وزنی فوق روان کننده، زمان عمل‌آوری و نسبت حلال به جامد اثری دو وجهی روی مقاومت بتن حاصل دارند به نحوی که تا حدودی با افزایش مقدار آن‌ها مقاومت بتن ژئوپلیمری افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

۶- منابع

- [1] Malhotra, V. M. "High-performance high-volume fly ash concrete." *Concrete International* 24. 7: 30-34 (2002).
- [2] Hua, X., and Van Deventer, J. S. J. "The geopolymerisation of aluminosilicate minerals." *International journal of mineral processing* 59. 3: 247-266 (2000).
- [3] Davidovits, J. "Recent progresses in concretes for nuclear waste and uranium waste containment." *Concrete International* 16. 12: 53-58 (1994).
- [4] Kakali, G., Perraki, T., Tsvivilis, S., Badogiannis E. "Thermal treatment of kaolin: the effect of mineralogy on the pozzolanic activity." *Appl Clay Sci.* 20:73-80 (2001).
- [5] Jorgen, S., Ruiz, S. Q. C. "Reactivity of heated kaolinite from a combination of chemical methods and solid-state NMR spectroscopy." *Proceedings the 14th international congress on the chemistry of cement ICCC 2015 Beijing*, p. 310 (2015).
- [6] Fernandez, R., Martirena, F., Scrivener, K. L. "The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: a comparison between kaolinite, illite and montmorillonite." *Cem Concr Res.* 41:113-22 (2011).
- [7] Paya, J., Monzo, J., Borrachero, M. V., Peris, E., "Gonzalez-Lopez, E. Mechanical treatment of fly ashes. Part III: studies on strength development of ground fly ashes (GFA)—cement mortars." *Cem Concr Res.* 27:1365-77 (1997).
- [8] Mehdipour, A., Khayat, H. K. "Effect of particle-size distribution and specific area of different binder systems on packing density and flow characteristics of cement paste." *Cem Concr Compos.* 78:120-31 (2017).
- [9] Shi, C., Day, R. L. "Pozzolanic reaction in the presence of chemical activators Part II: reaction products and mechanism." *Cem Concr Res.* 30:607-13 (2000).

۴-۱۴- بررسی اثر مقدار Na_2SiO_3

برای بررسی اثر درصد وزنی Na_2SiO_3 موجود در خاک به وزن کل خاک، بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری حاصل، سه نمونه مطابق شکل ۲۰ بررسی شدند که در آن‌ها سایر پارامترهای موثر به شرح ذیل ثابت گرفته شدند. نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم برابر ۲ و نسبت حلال به جامد معادل ۰/۳۵ و غلظت NaOH ۱۰ مولار و دمای عمل‌آوری ۶۰ درجه سانتیگراد و زمان عمل‌آوری ۲۴ ساعت و در نمونه‌ها از فوق روان استفاده نشده است و پس از قالب‌گیری و قبل از عمل‌آوری نمونه‌ها عایق شده‌اند. ملاحظه می‌گردد که با افزایش مقدار Na_2SiO_3 در ترکیب، افزایش مقاومت فشاری خواهیم داشت.



شکل ۲۰- اثر درصد Na_2SiO_3 بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری

۵- نتیجه‌گیری

پس از بررسی ترکیبات شیمیایی ۱۴ نمونه از خاک‌های آلومینوسیلیکاتی منطقه خراسان، پوزولان منطقه چکنه جهت بررسی مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری حاصل از واکنش آن در محیط قلیایی هیدروکسید سدیم انتخاب شد. با برنامه گسترده آزمایشگاهی، اثر پارامترهای مختلف بر مقاومت فشاری بتن‌های ژئوپلیمری حاصل بررسی شد.

نتایج آزمایش نشان داد که با ترکیب مناسب پارامترها می‌توان به بتن ژئوپلیمری با مقاومت بالا دست یافت. همچنین مشاهده شد که با افزایش مقدار سیلیکات سدیم، افزایش غلظت هیدروکسید سدیم، افزایش نسبت سیلیس خاک در حجم مخلوط بتن و افزایش دمای عمل‌آوری، همواره مقاومت بتن ژئوپلیمری حاصل افزایش می‌یابد. از سوی دیگر با افزایش مقدار آب کل موجود در نمونه،

- [21] Xu, H. "The geopolymerisation of aluminosilicate minerals", PhD thesis, university of Melbourne, 2002.
- [10] Garcia-Lodeiro, I., Fernández-Jiménez, A., Palomo, A. "Variation in hybrid cements over time. Alkaline activation of fly ash-portland cement blends." *Cem Concr Res.* 52:112–22 (2013).
- [11] Alahrache, S., Winnefeld, F., Champenois, J. B., Hesselbarth, F., Lothenbach, B. "Chemical activation of hybrid binders based on siliceous fly ash and Portland cement." *Cem Concr Compos.* 66:10–23 (2016).
- [12] Garcia-Lodeiro, I., Donatello, S., Fernández-Jiménez, A., Palomo, A. "Hydration of hybrid alkaline cement containing a very large proportion of fly ash: a descriptive model." *Materials.* 9:605 (2016).
- [13] Van Jaarsveld, J. G. S. , Van Deventer, J. S. J. , and Lukey G. C. "The characterisation of source materials in fly ash-based geopolymers." *Materials Letters* 57. 7: 1272-1280 (2003).
- [14] Hardjito, D., Wallah S. E., Sumajouw, D. M. J., and Rangan, B. V. "Factors influencing the compressive strength of Fly ash-based geopolymer concrete." *Civil Engineering Dimension*, 6. 2:88–93 (2004).
- [15] Chindapasirt, P., Homwuttiwong, S., Jaturapitakkul, C. "Strength and water permeability of concrete containing palm oil fuel ash and rice husk-bark ash." *Construction and Building Materials* 21. 7: 1492-1499 (2007).
- [16] Komnitsas, K., Zaharaki, D., and Perdikatsis, V. "Effect of synthesis parameters on the compressive strength of low-calcium ferronickel slag inorganic polymers." *Journal of Hazardous Materials* 161. 2-3: 760-768 (2009).
- [17] Bondar, D., Lynsdale, C. J. , Milestone, N. B. , Hassani, N. , Ramezani-pour, A. A. "Effect of type, form, and dosage of activators on strength of alkali-activated natural pozzolans." *Cement and Concrete Composites* 33. 2: 251-260 (2011).
- [18] Bernal, S. A. , Provis, J. L. , Rose, V. , Mejía de Gutierrez, R. "Evolution of binder structure in sodium silicate-activated slag-metakaolin blends", *Cement and Concrete Composites*, 33. 1: 46-54 (2011).
- [19] ASTM C618 - 15 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete." ASTM, (2015).
- [20] Fapohunda, Ch., Bolatito A., Akintoye O. A "Review of the Properties, Structural Characteristics and Application Potentials of Concrete Containing Wood Waste as Partial Replacement of one of its Constituent Material." *YBL Journal of Built Environment* 6.1: 63-85 (2018).

Studying the Effect of Various Parameters on Compressive Strength of Geopolymer Concrete Produced By Khorasan Pozzolans

Maysam Samadi *

Assistant professor, department of civil engineering, Azad University of Mashhad.

Ali Barzanoni

MSc of structural engineering, Azad University of Mashhad.

Masoud Attarian

MSc of Geotechnical engineering, Azad University of Mashhad.

Abstract

Geopolymers, as a type of mineral polymers, are nano-structural Amorphous solid. They are usually produced in temperatures below 120 °C by polymerization of aluminosilicate monomers in alkaline solutions. The compressive strength of geopolymer concretes mainly depends on its chemical ingredients, including Aluminosilicate minerals and alkaline solution. This paper presents the results of an experimental study on compressive strength of geopolymer concretes made by using Khorasan province pozzolan. Effects of various parameters such as solution-to-solid ratio, sodium silicate-to-sodium hydroxide ratio, curing temperature, curing time, Sodium hydroxide Concentration, base water, silice-to-aluminium ratio, sodium silicate chemical composition on geopolymer compressive strength was studied. It was observed that the compressive strength of geopolymer concrete is increased by increasing the sodium silicate and silica in the mixture and increasing sodium hydroxide molarity and curing temperature, the concrete compressive strength is increased. On the other hand, increasing the water and sodium oxide weights in the mixture and sodium silicate-to-sodium hydroxide ratio results in decreasing the concrete strength.

Keywords: geopolymer concrete, aluminosilicate minerals, alkaline solutions, compressive strength.

* Corresponding Author: mapsamadi@gmail.com

