

مطالعه آزمایشگاهی شکل پذیری و برخی خواص مکانیکی بتن ژئوپلیمری تولید شده با مواد آلومینوسیلیکاتی

ساناز موذن چی *

دانشجوی دکترای مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی.

اصغر وطنی اسکوئی

دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی.

چکیده

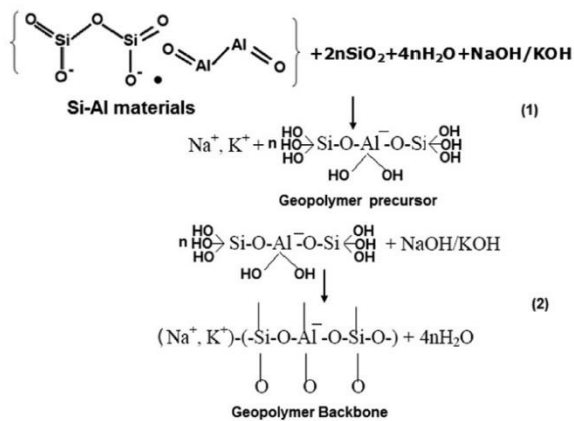
هدف این تحقیق تولید بتن ژئوپلیمری به منظور کاهش مصرف سیمان در صنعت ساختمان جهت حفظ منابع زیست محیطی است. در این مطالعه، تولید بتن ژئوپلیمری با استفاده از خاک‌های معدنی مناطق مختلف ایران و مواد جانبی صنعت، بررسی شده و پارامترهایی همچون نوع ماده اولیه، دمای عمل آوری، اعمال فشار هنگام ساخت، نوع محلول قلیایی و سن نمونه‌ها روی مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی مطالعه شده است. ۱۲۰ نمونه مکعبی با ابعاد ۵۰×۵۰ میلی‌متر و ۶۴ نمونه ی مکعبی با ابعاد ۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر جهت آزمایش مقاومت فشاری، ۷۶ نمونه استوانه‌ای با قطر ۱۵۰ و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر جهت بررسی مقاومت فشاری و کششی و ۹ تیر با ابعاد ۱۲۰۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر جهت بررسی مقاومت خمشی ساخته شدند. شکل پذیری و بار نهایی قابل تحمل نمونه‌های بتن ژئوپلیمری و سیمانی مقایسه شده و نتایج مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند. مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری تولید شده در این تحقیق با استفاده از مواد آلومینوسیلیکاتی سرباره که مصالح جانبی صنعت است و خاک‌های معدنی ژئولیت، پرلیت و بنتونیت، بین ۱۰ تا ۶۲ مگاپاسکال در شرایط عمل آوری مختلف به دست آمد. بتن ژئوپلیمری نتایج بهتری نسبت به بتن سیمانی متداول در آزمایش‌های کشش روی نمونه‌های استوانه‌ای و خمش چهارنقطه‌ای روی تیرهای مسلح با میلگرد فولادی از خود نشان داد. شکل پذیری نمونه‌های تیر ساخته شده از بتن ژئوپلیمری حاوی ژئولیت و سرباره در آزمایش مقاومت خمشی به ترتیب حدود ۱۴٪ و ۴۳٪ بیشتر نسبت به نمونه‌های ساخته شده از بتن سیمانی است.

واژه‌های کلیدی: بتن ژئوپلیمری، مواد آلومینوسیلیکاتی، ظرفیت نهایی، شکل پذیری، مقاومت فشاری و خمشی.

* نویسنده مسئول: s.moazzenchi@yahoo.com

۱- مقدمه

می‌گردد. مواد ابتدا تبدیل به الیگومر و سپس ژئوپلیمر می‌شوند. واکنش انجام شده در شکل ۱ نشان داده شده است. آب استفاده شده در طول تجزیه در پلیمریزاسیون طبق معادلات آمده در این شکل آزاد می‌شود [۹].



شکل ۱- واکنش های ژئوپلیمریزاسیون [۹]

این آب در طول مدت عمل آوری و اعمال فشار از نمونه‌ها خارج می‌گردد. آب در فرایند ژئوپلیمری نقشی در واکنش شیمیایی ندارد، بلکه جهت افزایش کارایی و به‌عنوان کاتالیزور جهت عملکرد کاتیون‌ها به مخلوط اضافه می‌شود. این مسئله برخلاف واکنش‌های انجام شده در سیمان پرتلند در طی مراحل هیدراتاسیون است [۲]. در واقع آب محیط واکنش است و وارد واکنش ژئوپلیمریزاسیون نمی‌شود. ژئوپلیمر دو جزء دارد که در تحقیقات مختلف از انواع آنها استفاده شده است. قاعدتا مواد و مصالح دیگری نیز وجود دارند که محققین می‌توانند از آنها نیز در تولید این نوع بتن استفاده کنند. لیستی از این مصالح در جدول شماره ۱ آمده است [۱۳-۱۰].

نوع محلول قلیایی و غلظت آنها حاکم بر مراحل پلیمریزاسیون است. ژئوپلیمریزاسیون یک واکنش گرمازا است که به‌صورت نشان داده شده در شکل ۲ شرح داده شده است [۱۴].

در این شکل نشان داده شده که از ترکیب مواد آلومینوسیلیکاتی مختلف با محلول‌های قلیایی، مخلوط کردن و در نهایت اختلاط با سنگدانه، بتن ژئوپلیمری تشکیل می‌شود. بتن ساخته شده از سیمان ژئوپلیمری مشخصات مهندسی بسیار خوبی دارد [۱۷-۱۵] و جایگزین مناسبی برای بتن معمولی می‌تواند باشد. این بتن نوعی

یکی از مهمترین و کاربردی‌ترین مصالح در صنعت ساختمان، بتن است. از مهمترین مصالح بتن، سیمان می‌باشد. تولید سیمان پرتلند مسئول تولید ۵ تا ۷ درصد گاز دی‌اکسید کربن در محیط است که در طول مراحل تولید سیمان آزاد شده و این موضوع باعث گرم شدن زمین و افزایش گازهای گلخانه‌ای و در نتیجه آسیب جدی به محیط زیست می‌شود. استفاده از بتن ژئوپلیمری در صنعت ساخت و ساز می‌تواند تا حدود زیادی مشکلات استفاده از سیمان پرتلند را حل کند. به‌طوری‌که استفاده از بتن ژئوپلیمری به جای بتن معمولی می‌تواند تولید دی‌اکسید کربن را تا ۶۴ درصد کاهش دهد [۱]. ولی به دلیل نبودن مواد همگن و نبودن استاندارد بین‌المللی برای تولید و درک ناقص از خصوصیات بتن ژئوپلیمری، استفاده از آن محدود شده است. در مراحل تولید سیمان پرتلند به علت کلسیناسیون سنگ آهک و سوختن سوخت‌های فسیلی، دی‌اکسید کربن زیادی وارد اتمسفر می‌شود. در واقع برای تولید یک تن سیمان پرتلند یک تن دی‌اکسید کربن تولید شده و وارد محیط زیست می‌گردد [۳ و ۲]. در سال ۱۹۵۷، محققى به نام گلوخوفسكى، فرضیه‌ای ارائه داد که قلیا و مواد سیمانی در کنار هم تجزیه می‌شوند و نوع جدیدی از مخلوط را آماده می‌کنند که سیمان قلیایی نام دارد [۴]. در سال ۱۹۸۸، دیویدویتس^۱ بیان کرد که محلول‌های فعال قلیایی با سیلیکون و آلومینیوم موجود در مصالح منشا زمین‌شناسی و محصولات جانبی صنعت حاوی آلومیناسیلیکات واکنش داده و ایجاد چسبندگی می‌کند که می‌تواند جایگزین سیمان در بتن معمولی گردد. این بتن را بتن ژئوپلیمری نامید [۵]. بتن ژئوپلیمری پتانسیل قابل قیاس با بتن سیمانی متداول را داراست [۶]. مخلوط ژئوپلیمر با سنتز آلومینا و سیلیکا به همراه محلول قلیایی به عنوان فعال‌کننده از طریق مراحل ژئوپلیمریزاسیون تولید می‌شود که گزینه‌ای برای جایگزینی سیمان پرتلند است [۷]. ژئوپلیمر یک پلیمر غیرارگانیک است که در اثر واکنش محلول قلیایی و مصالح معدنی یا زائد صنعتی حاوی آلومینوسیلیکات تولید می‌شود [۸]. مراحل ژئوپلیمریزاسیون به تجزیه‌ی مصالح خام حاوی آلومینوسیلیکات در محلول قلیایی انجام می‌شود که منجر به تشکیل مونومر آلومین و سیلیکات

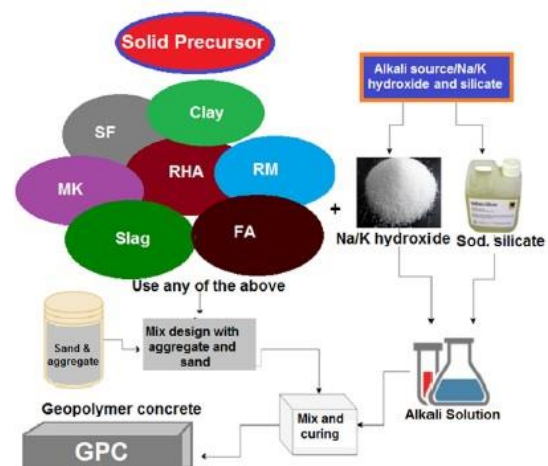
¹ Davidovits

کمترا ۸- دوام بالا می‌باشند [۲۵]. تحقیق در خصوص تاثیر غلظت محلول قلیایی NaOH بر قابلیت حل مواد خام آلومینوسیلیکاتی نشان داده است که با افزایش غلظت این ماده قابلیت انحلال مواد خام افزایش یافته و باعث افزایش ژئوپلیمریزاسیون و در نتیجه مقاومت بالاتر است. ولی اگر غلظت آن از یک مقداری بیشتر شود باعث ته‌نشینی ژل آلومینوسیلیکات شده، درجه‌ی ژئوپلیمریزاسیون را کاهش داده و منجر به تنزل مشخصات مکانیکی می‌شود [۲۶]. غلظت ۱۴ مولار این ماده باعث کاهش مقاومت فشاری بتن شده است [۲۷]. این بتن کم‌کلسیم مقاومت یک‌روزه‌ی عالی دارد. هزینه‌ی تولید بتن ژئوپلیمر ۱۰ تا ۳۰ درصد ارزانتر از بتن سیمان پرتلند برآورد شده است [۲۸]. محمد جاوید و همکارانش مطالعاتی روی طرح اختلاط بتن ژئوپلیمری انجام دادند. این بتن با اختلاط محلول هیدروکسید سدیم، سیلیکات سدیم، خاکستر بادی، سرباره، سنگدانه‌ی ریز و درشت و عمل‌آوری تولید شد. انگیزه‌ی اصلی تحقیق، توسعه‌ی بتن ژئوپلیمر، پایداری و کاهش انرژی تولید با استفاده از تکنیک‌های عمل‌آوری بود. با افزایش غلظت هیدروکسید سدیم، مقاومت فشاری بتن افزایش یافت. همچنین با استفاده از سرباره به اندازه‌ی ۲۰ درصد وزن خاکستر بادی در بتن ژئوپلیمر، مقاومت فشاری بتن افزایش می‌یابد [۲۹]. بتن ژئوپلیمر مشتق شده از محصولات جانبی صنعتی مختلف در یک مطالعه‌ی مروری بررسی شد و عنوان شد که بتن ژئوپلیمری تولید شده از این محصولات، خصوصیات بسیار خوبی دارد ولی به علت تفاوت خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و کانی‌شناسی هر ماده در هر منطقه و صنعت، امکان ایجاد روش استاندارد تولید این نوع بتن امکان‌پذیر نیست و با توجه به خصوصیات مواد در هر ناحیه بررسی و آزمایش‌های لازم مورد نیاز است [۳۰]. بتن ژئوپلیمری با استفاده از مواد جانبی صنعت در مطالعات زیادی مورد بررسی قرار گرفت. احماری و همکارانش^۱ بر روی تولید بتن ژئوپلیمری از محصولات جانبی معدن مس مطالعه کردند و با عمل‌آوری در دمای ۹۰ درجه‌ی سانتیگراد برای ۷ روز به مقاومت فشاری ۸ تا ۵۰ مگاپاسکال دست یافتند [۳۱]. بتن ژئوپلیمری که از خاکستر بادی به همراه سرباره و محلول هیدروکسید سدیم ۶ مولار تولید شد با ۸ ساعت عمل‌آوری در ۱۱۰ درجه سانتیگراد و یا ۲۷ درجه

بتن سبز است که منافع زیست محیطی مهمی را در بردارد [۱۹ و ۱۸ و ۱۱]، زیرا نه تنها ماده‌ی اولیه‌ی آن می‌تواند از مواد زائد صنعتی و خاک‌های معدنی هر منطقه باشد، استفاده از آن به عنوان جایگزین سیمان، مصرف گاز دی‌اکسید کربن را کاهش داده و مشکلات صنعت سیمان وابسته به آلودگی محیط زیست را حل می‌کند [۲۴-۲۰].

جدول ۱- مواد آلومینوسیلیکاتی و فعال‌کننده‌های قلیایی استفاده شده در تحقیقات مختلف [۱۰-۱۳]

مواد آلومینوسیلیکاتی	فعال‌کننده قلیایی
رس‌های کلسینه، خاکستر بادی، خاکستر پوسته برنج، سرباره، بقایای معدن مس، زئولیت، پودر خالص $Al_2O_3-2SiO_2$ و Na_2SiO_3	NaOH, KOH, Ca(OH) ₂ , NaOH+Na ₂ C O ₃ , K ₂ CO ₃ +Ca(OH) ₂
مواد معدنی حاوی منیزیم، خاکستر سوخت روغن پالم	سیلیکات سدیم و دیگر سیلیکات‌ها



شکل ۲- مراحل ژئوپلیمریزاسیون [۱۵]

مهمترین مزایای بتن ژئوپلیمری نسبت به بتن سیمانی که تاکنون توسط محققین گزارش شده است: ۱- مقاومت فشاری مناسب ۲- جذب آب مناسب ۳- گیرش و سخت شدن در زمان کوتاهتر نسبت به بتن معمولی ۴- مقاومت در برابر حرارت تا ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد ۵- مقاومت بالا در برابر اسید و نمک ۶- واکنش قلیایی سنگدانه کمتر نسبت به بتن معمولی ۷- انقباض و هدایت حرارتی

¹ Ahmari et al

هیدروکسیدسدیم، هیدروکسیدکلسیم و سیلیکات سدیم مورد بررسی قرار گرفته است و روی نتایج مقاومت فشاری، کششی، خمشی و شکل پذیری نمونه‌های تولید شده مطالعه شده است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح

مصالح استفاده شده در این تحقیق جهت تهیه بتن ژئوپلیمری عبارت از مواد آلومینوسیلیکاتی، محلول‌های قلیایی هیدروکسید-سدیم، سیلیکات سدیم و هیدروکسیدکلسیم، شن، ماسه، آب و روان کننده هستند. مواد آلومینوسیلیکاتی استفاده شده جهت تولید بتن ژئوپلیمر، خاکهای معدنی ژئولیت، بنتونیت، پرلیت، سرباره محصول جانبی کوره‌ی ذوب آهن و میکروسیلیس بودند. تجزیه‌ی شیمیایی این مصالح در جدول شماره ۲ آمده است. در نمونه‌های حاوی سیمان نیز از سیمان نوع ۱ تهران استفاده شد که آنالیز آن در جدول شماره ۳ آمده است.

در این تحقیق خاک ژئولیت از معدن دماوند، پرلیت از معدن اردبیل، بنتونیت از معدن اصفهان و سرباره از محصول جانبی کوره آهنگدازی اصفهان تهیه شدند. در بخشی از نمونه‌ها درصدی از سیمان نیز استفاده شده است. محلول‌های قلیایی استفاده شده، محلول هیدروکسیدسدیم و سیلیکات سدیم، و محلول قلیایی هیدروکسید کلسیم هستند. محلول سیلیکات سدیم به شکل ژل با ترکیب ۵۴٫۱ درصد آب، ۳۲٫۵ درصد SiO_2 و ۱۳٫۴ درصد Na_2O تهیه شده است. محلول‌های هیدروکسیدسدیم و هیدروکسیدکلسیم با غلظت ۱۰ مولار تهیه شدند. NaOH به صورت پرک با خلوص ۹۵ درصد و محلول هیدروکسیدکلسیم از انحلال پودر اکسیدکلسیم در آب تهیه شد. فوق روان کننده‌ی استفاده شده نیز در این تحقیق C494: Type F بر پایه‌ی کربوکسیلاتی است.

۲-۲- طرح اختلاط

مخلوط ملات ژئوپلیمری از اختلاط ماده‌ی خام آلومینوسیلیکاتی با محلول قلیایی تولید شده است. در این تحقیق، محلول قلیایی، ترکیب هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم با نسبت یکسان و یا

سانتیگراد برای ۲۷ روز، به مقاومت ۵ تا ۹۳٫۴ مگاپاسکال رسید [۳۲]. آداک و همکاران^۱ او این نتیجه را در تحقیقات خود بیان کردند که با افزودن ۶٪ نانو سیلیکا به بتن ژئوپلیمری حاوی خاکستری و عمل آوری در ۲۷ درجه سانتیگراد افزایش قابل توجهی در مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری مشاهده می‌گردد [۳۳]. بتن ژئوپلیمری که در آن جایگزینی خاکستر پوسته‌ی برنج در خاکستری کنار قلیا بررسی شد، نشان داد که جایگزینی ۷ درصد خاکستر پوسته برنج بهترین مقاومت فشاری را نتیجه می‌دهد [۳۴]. بتن ژئوپلیمری که از متاکائولن^۲ در دمای اتاق تهیه شد، پس از ۵ روز از قالب خارج شد و بعد از ۹ روز مقاومت ۱۰٫۶ تا ۳۱ مگاپاسکال را نتیجه داد [۳۵]. در بتن ژئوپلیمری حاوی متاکائولن با افزایش غلظت هیدروکسیدسدیم تا ۱۲ مولار، کاهش کارایی و افزایش مقاومت فشاری و خمشی مشاهده شد [۳۶]. افزودن اکسید آلومینیوم به بتن ژئوپلیمری حاوی متاکائولن و عمل آوری در دمای اتاق باعث افزایش مقاومت فشاری شده و مقاومت ۴۸ مگاپاسکال به دست آمد [۳۷]. بتن ژئوپلیمری که با استفاده از سرباره‌ی فولاد در دمای عمل آوری ۶۰ درجه تولید شد، بهترین مقاومت فشاری خود را با محلول هیدروکسید سدیم با غلظت ۱۰ مولار در ۳ روز به دست آورد [۳۸]. همچنین در بتن تولید شده از سرباره و قلیا بدون استفاده از سیمان این نتیجه عنوان شده که افزایش غلظت محلول قلیایی و مدول سیلیکات سدیم محلول فعالساز سبب افزایش اسلامپ بتن تازه و سرعت کسب مقاومت فشاری اولیه طرح شده ولی زمان گیرش را کاهش داده است [۳۹]. از خاکستر روغن پالم نیز برای تولید بتن ژئوپلیمری استفاده شد. این بتن در دمای ۲۸ درجه سانتیگراد عمل آوری شد و پس از نگهداری ۱۸ ماه در اسیدسولفوریک مقاومت فشاری ۱۸ تا ۳۰ مگاپاسکال را نتیجه داد که نشان می‌دهد بتن ژئوپلیمری دوام مناسبی در برابر عوامل شیمیایی دارد و مقاومت آن در برابر اسیدسولفوریک ۳ برابر بتن معمولی است [۴۰]. بنابراین بررسی مواد مختلف برای تولید بتن ژئوپلیمری در شرایط مختلف نتایج متفاوتی در بردارد.

در این مطالعه بتن ژئوپلیمری حاوی مواد معدنی معادن ایران و سرباره محصول جانبی کوره آهنگدازی در کنار محلول‌های قلیایی

² metakaolin

¹ Adak et al

هیدروکسید کلسیم است. هیدروکسید سدیم به صورت پُرک تهیه شده است که برای تهیه‌ی محلول ۱۰ مولار آن، ۴۰۰ گرم از آن با یک لیتر آب مخلوط می‌شود. این واکنش به شدت گرمازا مورد استفاده نیز شن و ماسه معمولی هستند.

جدول ۲- آنالیز شیمیایی مصالح آلومینوسیلیکاتی استفاده شده در بتن

درصد اکسید موجود در ماده (%)													مصالح
SO ₃	L.O.I	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂		
۰/۰۲	۶/۸۹	۲/۶۸	۱/۸۹	۰/۰۱۵	۰/۰۵۲	۰/۱۸۸	۰/۵۶	۱/۵۳	۱/۲۹	۱۱/۶۳	۷۲/۹۸	ژئولیت	
<۰/۱	-	۱/۲۴	۲/۷	<۰/۱	<۰/۱	<۰/۱	۲/۱	۴/۵۴	۳/۰۱	۱۷/۷۹	۶۱/۲۸	بتونیت	
۰	-	<۰/۱	<۰/۱	۰/۱۱	۲/۵	-	۰/۵	۰/۸	۰/۹۴	۱۲/۸	۶۹/۵	پرلیت	
<۰/۱	-	۰/۳	۰/۴	۰/۱	<۰/۱	<۰/۱	۹/۵	۳۷	۱/۲	۹/۵۳	۳۵/۷	سرباره	
۰/۲	۵/۰۲	۱/۰	۰/۷	۰/۱	۰/۱	<۰/۱	۰/۹	۰/۸	۱/۱	۱/۲	۸۸/۷	میکروسیلیس	

جدول ۳- آنالیز شیمیایی سیمان

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	MNO	Na ₂ O	K ₂ O	L.O.I	SO ₃	C ₃ A	C ₄ AF	C ₃ S	C ₂ S	اکسید
۲۱/۳	۳/۸۳	۲/۷۶	۶۲/۰۲	۳/۴۴	۰/۴۴	۰/۰۵	۰/۲	۰/۱۲	۰/۷۳	۲/۹۸	۲/۰۹	۵/۱	۹/۰۶	۵۴/۶	۲۰	مقدار (%)

کشتی قرار گرفتند. جهت مقایسه‌ی نتایج آزمایش با بتن سیمانی، ۳۶ نمونه‌ی استوانه‌ای بتن معمولی نیز تهیه شد. جهت بررسی مقاومت خمشی این نوع بتن، ۹ عدد تیر بتن ژئوپلیمری و بتن معمولی با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۱۲۰۰ میلی‌متر ساخته شدند و مورد آزمایش خمش قرار گرفتند. هر سه نوع تیر کاملاً یکسان مسلح شدند و به جز نوع بتن، کلیه‌ی شرایط ساخت و آزمایش تیرها کاملاً یکسان انجام شد. به این طریق که از آرماتوربندی فولادی با میلگرد قطر ۱۴ میلی‌متر در بخش کشتی و میلگرد با قطر ۸ میلی‌متر در قسمت فشاری تیرها استفاده شد و جهت تامین مقاومت برشی، خاموت‌های فولادی با قطر ۸ میلی‌متر و فاصله‌ی ۱۰۰ میلی‌متر از یکدیگر قرار گرفتند. تصویر آرماتوربندی در شکل شماره ۳ نشان داده شده است. در هنگام آزمایش دو بار عمودی متمرکز در یک سوم وسط دهانه وارد شدند و نتایج بررسی شد.

در مرحله‌ی اول نمونه‌ها با طرح اختلاط آمده در جدول شماره ۴ با چهار ماده‌ی اولیه‌ی متفاوت و در سه دمای عمل‌آوری ساخته شدند و مقاومت فشاری آن‌ها در دو سن ۷ و ۲۸ روز مورد ارزیابی قرار گرفت. در مرحله‌ی دوم نمونه‌هایی ساخته شد که ۳۰ درصد از ماده‌ی آلومینوسیلیکاتی آن‌ها با سیمان جایگزین شد و بقیه

برای تهیه‌ی بتن ژئوپلیمری ابتدا مواد خام آلومینوسیلیکاتی را با محلول قلیایی در میکسر ریخته تا کاملاً با یکدیگر مخلوط شده و واکنش‌های اولیه صورت گیرد. سپس مواد دیگر شامل سنگدانه و آب در دو مرحله به آن افزوده و به مدت ۵ دقیقه مخلوط می‌شوند. فوق‌روان‌کننده در پایان مراحل اختلاط به آن افزوده و در نهایت مخلوط را در قالب‌های موردنظر ریخته و در حرارت عمل‌آوری می‌کنند. جهت بررسی دمای عمل‌آوری مناسب، نمونه‌ها در سه حالت دمای اتاق، دمای ۱۰۰ و ۱۸۰ درجه قرار گرفتند. بعد از گذشت ۲۴ ساعت نمونه‌ها را از قالب بیرون آورده و تا زمان انجام آزمایش در دمای اتاق قرار داده می‌شوند. جهت تهیه‌ی نمونه‌هایی که حاوی مقادیری سیمان هستند بعد از خروج از قالب و نگهداری در دمای محیط به مدت ۲۴ ساعت، جهت تکمیل واکنش هیدراتاسیون سیمان آن‌ها را داخل آب قرار می‌دهند. ابتدا جهت به دست آوردن درصد اختلاط صحیح مصالح با قلیاها، ۱۲۰ نمونه‌ی مکعبی با ابعاد ۵ در ۵ سانتیمتر بدون سنگدانه‌ی درشت ساخته شد و سپس ۶۴ نمونه‌ی بتنی با ابعاد ۱۰ در ۱۰ سانتیمتر و در نهایت ۴۰ نمونه‌ی استوانه‌ای با قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتیمتر ساخته شدند و تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری و

عمل آوری دو روز در دمای اتاق و بعد از آن نمونه‌ها در آب عمل آوری شدند. در این حالت هم واکنش هیدراتاسیون و هم واکنش ژئوپلیمریزاسیون در نمونه انجام می‌شود. گرمای هیدراتاسیون به انجام واکنش ژئوپلیمریزاسیون کمک کرده و از آنجا که بخش اعظم این واکنش در روزهای اولیه‌ی تولید انجام می‌شود قبل از قرار دادن نمونه در آب جهت تکمیل فرآیند هیدراتاسیون، واکنش ژئوپلیمریزاسیون انجام شده و می‌تواند به افزایش مقاومت فشاری کمک کند. جهت انجام واکنش ژئوپلیمریزاسیون از دو محلول قلیایی فعال‌کننده‌ی هیدروکسید-سدیم و هیدروکسید کلسیم استفاده شد. مقدار ۳۰ درصد جایگزینی با انجام آزمایشات و یافتن درصد بهینه انتخاب شده است. نمونه‌های بتن معمولی سیمانی با طرح اختلاط عیار ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب سیمان و آب ۴۵ درصد به همراه شن و ماسه با نسبت ۶۵ به ۳۵ و فوق روان کننده ساخته شدند.

مصلح با همان طرح قبلی استفاده شدند. به دلیل این که نمونه‌های ژئوپلیمری مرحله اول برای کسب مقاومت نیاز به عمل آوری در حرارت دارند، با هدف تولید نمونه‌هایی که در دمای اتاق به مقاومت مطلوب برسند بخشی از ماده‌ی آلومینوسیلیکاتی با سیمان جایگزین شد تا نتایج مقاومت فشاری ارزیابی شود.

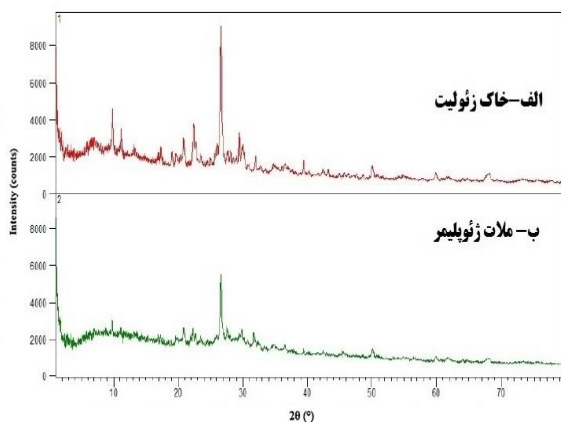


شکل ۳- نمونه ای از آرماتوربندی نمونه های خمشی

جدول ۴- طرح اختلاط نمونه های ژئوپلیمری

ماده آلومینوسیلیکاتی	مقدار	محلول قلیایی (نسبت ۱ به ۱)	مقدار محلول به کل	میکروسیلیس	آب به مواد آلومینوسیلیکاتی	سنگدانه به کل مخلوط	دمای عمل آوری
ژئولیت- بنتونیت پرلیت - سرپاره	عیار ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب	NaOH+Na ₂ (SiO ₃)	٪۲۰	۱۰ درصد مواد آلومینوسیلیکاتی	٪۲۵	٪۶۰	اتاق-۱۰۰-۱۸۰

ژئوپلیمری وجود دارند. وضعیت این نمودار در مقاله‌های دیگر نیز بررسی شده است که نتایج مربوط به آنها در اشکال شماره ۵ و ۶ نشان داده شده است.



شکل ۴- مقایسه‌ی پراش اشعه X در

الف- خاک ژئولیت ب- ملات ژئوپلیمر ساخته شده با آن

۳- آزمایش‌ها و تحلیل نتایج آن‌ها

۳-۱- آنالیز XRD

آزمون XRD روی خاک ژئولیت و نمونه‌های ژئوپلیمری حاوی این خاک در آزمایشگاه دانشگاه صنعتی شریف انجام شد. نتایج این آزمایش در شکل ۴ نشان داده شده است. در این شکل، تصویر الف نمایش نتیجه‌ی آزمایش پراش اشعه X مربوط به نمونه‌ی خاک قبل از واکنش و تصویر ب مربوط به نمونه‌ی خاک واکنش داده با قلیا است.

مقایسه‌ی این دو نمودار نشان می‌دهد که فازهای بلورین ماده که همان نقاط اوج در نمودار هستند در هر دو حالت وجود دارند. اما شدت این اوج‌ها بعد از انجام واکنش ژئوپلیمریزاسیون کم شده است. به طور کلی فازهای بلورین به راحتی وارد واکنش نمی‌شوند، بنابراین بعد از واکنش نیز به مقدار کمتر در ماده‌ی

تصویر برخی از نمونه‌های ساخته شده در اشکال ۷ تا ۹ نشان داده شده است.



شکل ۷- نمونه‌ی بتن ژئوپلیمری حاوی زئولیت+سیمان



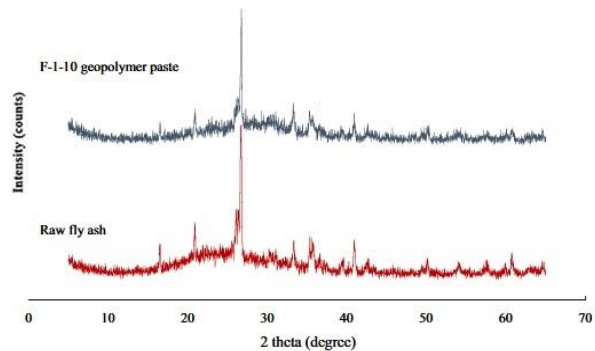
شکل ۸- نمونه‌های کاملاً ژئوپلیمری با سرباره



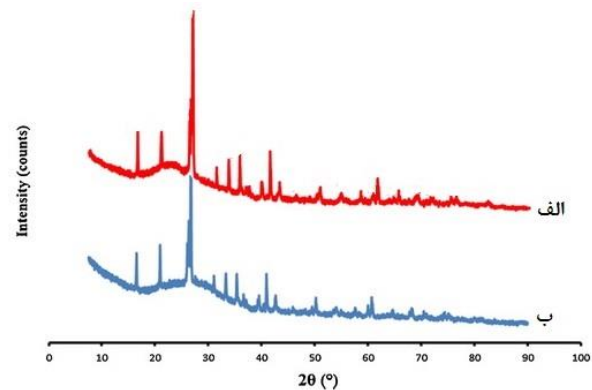
شکل ۹- نمونه‌های ۵*۵ کاملاً ژئوپلیمری با مصالح مختلف

۳-۲-۱- اثر نوع ماده‌ی اولیه روی مقاومت فشاری

در این تحقیق نمونه‌های بتن ژئوپلیمری با چهار ماده‌ی اولیه‌ی آلومینوسیلیکاتی مختلف زئولیت، پرلیت، بنتونیت و سرباره تولید



شکل ۵- نتیجه آزمون پراش اشعه X روی خاکستر بادی خام و ملات ژئوپلیمر [۴۱]



شکل ۶- نتیجه آزمون پراش اشعه X روی (الف) خاکستر بادی قبل از واکنش (ب) ملات ژئوپلیمر تشکیل شده بعد از واکنش [۴۲]

همانطور که در این اشکال نیز مشخص است محل اوج نمودارها در دو نمودار مربوط به قبل از واکنش ماده‌ی آلومینوسیلیکاتی و بعد از انجام واکنش تغییر نکرده است. [۴۱ و ۴۲]. یک قله در تمام نمودارها گسترده از مرکز در فاصله‌ی بین ۲۳ تا ۳۵ درجه وجود دارد که نشانه‌ی واکنش ژئوپلیمریزاسیون است [۴۳]. کاهش ارتفاع قله‌ها نیز در اثر تشکیل فاز بی شکل^۱ ماده در اثر فعال شدن با محلول قلیایی است [۴۴].

۳-۲- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

نمونه‌ها بعد از گذشت ۷ و ۲۸ روز بعد از ساخت، تحت آزمایش مقاومت فشاری طبق استاندارد ASTM C39 [۴۵] در آزمایشگاه دانشگاه شهید رجایی قرار گرفتند. در این تحقیق اثر چندین پارامتر روی مقاومت فشاری نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت که در بخش‌های بعدی به آنالیز آن‌ها پرداخته شده است.

^۱ amorphous

تجزیه‌ی شیمیایی خاک‌های معدنی مورد استفاده و سرباره که در جدول ۲ آمده است دقت شود، اکسید کلسیم در سرباره مقدار زیادی دارد که می‌تواند یکی از علل واکنش‌پذیری بالاتر این ماده باشد. در یک مطالعه دو نوع خاکستر بادی یکی با محتوای کم اکسید کلسیم (زیر ۱۰ درصد) در ترکیب شیمیایی و دیگری با مقدار بالای اکسید کلسیم در ترکیب شیمیایی در تولید بتن ژئوپلیمری استفاده شدند. مقاومت فشاری نمونه‌ها با خاکستر بادی محتوای اکسید کلسیم بیشتر در ترکیب شیمیایی، بالاتر از نوع دیگر حاوی اکسید کلسیم کمتر به دست آمد [۴۶]. نتیجه‌ی این تحقیق نیز اثبات می‌کند که وجود اکسید کلسیم در ماده‌ی آلومینوسیلیکاتی می‌تواند تاثیر بسزایی در افزایش مقاومت فشاری داشته باشد. همچنین نمونه‌های ساخته شده با خاک پرلیت بعد از ساخته شدن افزایش حجم داده و بسیار سبک هستند. وزن نمونه‌ی پرلیتی به طور تقریبی ۶۰ درصد وزن سایر نمونه‌ها با مصالح دیگر است. بنابراین استفاده از آنها در صنعت ساخت جهت کاهش وزن سازه می‌تواند موثر باشد.

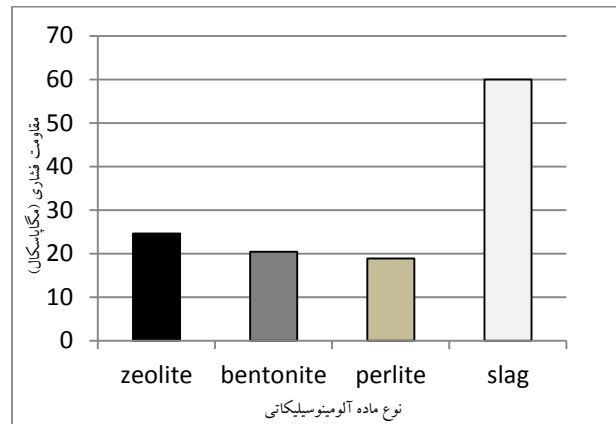
۳-۲-۲- اثر دمای عمل آوری روی مقاومت فشاری

عمل آوری یکی از مهمترین مراحل واکنش ژئوپلیمریزاسیون است که روی مقاومت فشاری نمونه‌ها تاثیر زیادی می‌گذارد. در تولید بتن ژئوپلیمری از روش عمل آوری در حرارت استفاده می‌شود. عمل آوری در آب کمکی به پیشرفت واکنش ژئوپلیمریزاسیون نمی‌کند [۴۷]. نمونه‌های ژئوپلیمری ساخته شده در مرحله‌ی اول از مصالح اولیه‌ی مختلف و طرح اختلاط یکسان تحت عمل آوری در دماهای مختلف داخل گرمخانه قرار گرفتند تا اثر عمل آوری بر روی این نمونه‌ها بررسی شود. تصویری از عمل آوری نمونه‌های مکعبی در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

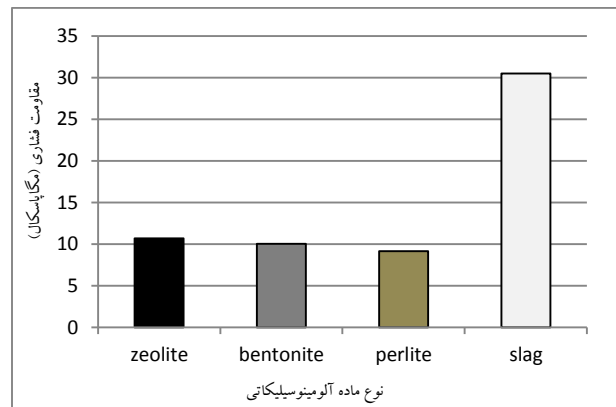


شکل ۱۲- عمل آوری نمونه‌ها در گرمخانه

شدند و مورد آزمایش قرار گرفتند. نتیجه‌ی آزمایش مقاومت فشاری این نمونه‌ها به تفکیک پیش ماده‌ی استفاده شده در اشکال شماره ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. نمودار شکل ۱۰ مقاومت فشاری نمونه‌ها با عمل آوری در دمای ۱۰۰ درجه‌ی سانتیگراد و نمودار شکل ۱۱ مربوط به مقاومت فشاری نمونه‌ها با عمل آوری در دمای اتاق است. اعداد نشان داده شده برای هر یک از مصالح میانگین مقاومت فشاری ۳ نمونه هستند.

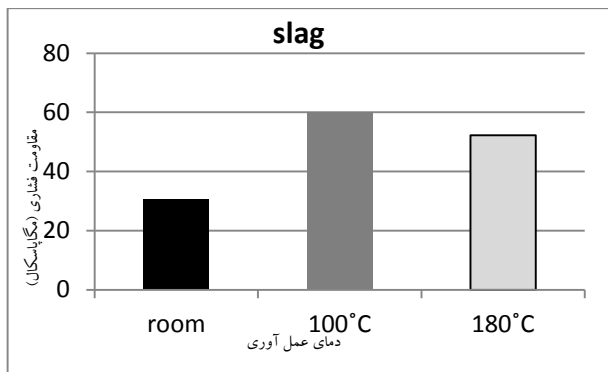


شکل ۱۰- اثر ماده‌ی آلومینوسیلیکاتی بر مقاومت فشاری در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد



شکل ۱۱- اثر ماده‌ی آلومینوسیلیکاتی بر مقاومت فشاری در دمای اتاق

همانطور که از نمودارها مشخص است سرباره به عنوان پیش ماده‌ی بتن ژئوپلیمری بهتر از بقیه‌ی مواد عمل می‌کند. این ماده از بقایای کوره‌ی آهن‌گدازی به دست آمده و از مواد زائد صنعتی به شمار می‌رود. بقیه مصالح خاک‌های طبیعی هستند که مسلماً واکنش‌پذیری کمتری دارند و از این رو مقاومت فشاری کمتری از خود نشان داده‌اند. در میان این خاک‌ها زئولیت نسبت به بقیه بهتر عمل کرده است و بهتر توانسته در واکنش ژئوپلیمریزاسیون شرکت کند و مقاومت فشاری بهتری از خود نشان داده است. اگر به مقایسه‌ی

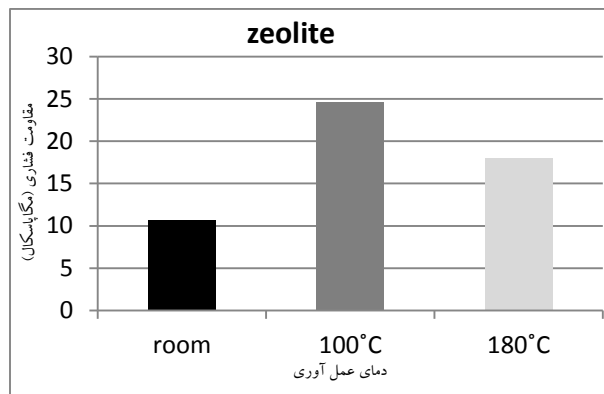


شکل ۱۶- اثر دمای عمل‌آوری بر مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده با سرباره

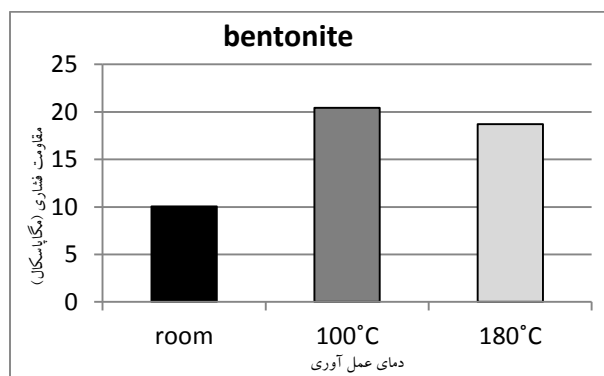
نمونه‌های ساخته شده با مصالح ژئولیت، بنتونیت، پرلیت و سرباره، از هر نظر کاملاً یکسان هستند و تنها عامل تأثیرگذار روی مقاومت فشاری آنها، دمای عمل‌آوری است که مورد مطالعه قرار گرفته است. همانطور که از نمودارها پیداست در هر چهار ماده، عمل‌آوری در دمای ۱۰۰ درجه‌ی سانتیگراد بهترین مقاومت فشاری را منتج شده است و نشانگر این است که در این دما واکنش‌های ژئوپلیمریزاسیون کامل‌تر انجام می‌شوند و نمونه به مقاومت مطلوب‌تری می‌رسد. به طور کلی افزایش دمای عمل‌آوری باعث پیشرفت واکنش ژئوپلیمریزاسیون و در نتیجه افزایش مقاومت فشاری نمونه است. ولی این افزایش بعد از دمایی خاص، باعث کاهش مقاومت فشاری در نمونه‌ها می‌شود که به دلیل کند یا متوقف شدن واکنش ژئوپلیمری به دلیل تبخیر آب مخلوط است [۴۸]. این دمای خاص طبق مطالعه‌ی سعید احماری و همکارانشان ۹۰ درجه برآورد شده است [۴۹].

در تحقیقاتی مشابه افزایش دمای عمل‌آوری تا ۱۸۰ درجه‌ی سانتیگراد در نمونه‌های ژئوپلیمری باعث کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها گردیده است. افزایش دمای عمل‌آوری باعث تسریع تجزیه‌ی سیلیکا و آلومینا و سپس ژئوپلیمریزاسیون تراکمی است. وقتی دما از حد خاصی بالاتر رود، تشکیل سریع ژل ژئوپلیمری و نبودن آب کافی، تجزیه‌ی سیلیکا و آلومینا را به تأخیر می‌اندازد و روی مقاومت اثر عکس می‌گذارد [۵۲-۵۰]. از آنجا که عمل‌آوری نمونه‌ها بدون پوشش انجام شده است افزایش حرارت باعث تبخیر سریع آب می‌شود و از آنجا که آب محیط واکنش ژئوپلیمری است، این مساله باعث ژئوپلیمریزاسیون ناقص شده و مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش می‌یابند. وجود آب باعث می‌شود مونومرهای تجزیه

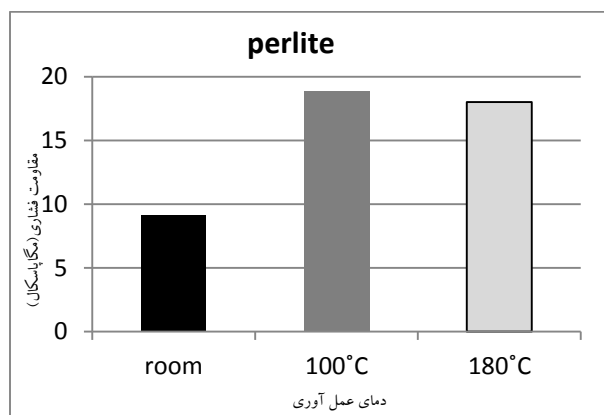
عمل‌آوری این نمونه‌ها در سه حالت دمای اتاق، دمای ۱۰۰ درجه‌ی سانتیگراد و دمای ۱۸۰ درجه‌ی سانتیگراد انجام گرفت. میانگین مقاومت فشاری ۳ نمونه در هر دما اندازه‌گیری شد و نتایج این بررسی در نمودارهای اشکال ۱۳ تا ۱۶ نشان داده شده است.



شکل ۱۳- اثر دمای عمل‌آوری بر مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده با خاک ژئولیت

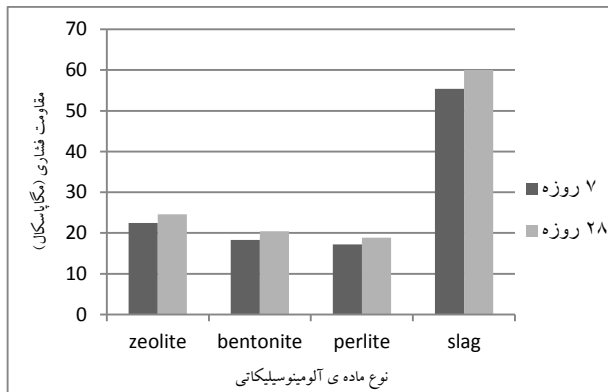


شکل ۱۴- اثر دمای عمل‌آوری بر مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده با خاک بنتونیت



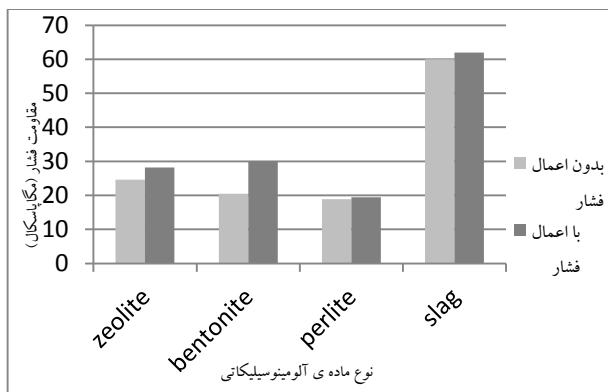
شکل ۱۵- اثر دمای عمل‌آوری بر مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده با خاک پرلیت

داده شده است. نتایج نشان داده شده در نمودار میانگین مقاومت فشاری ۳ نمونه برای هریک از مصالح است.



شکل ۱۷- اثر زمان بر مقاومت فشاری نمونه های ساخته شده

بامصالح مختلف



شکل ۱۸- اثر اعمال فشار روی نمونه های ژئوپلیمری

همانطور که از نمودار پیداست اعمال فشار روی نمونه ها با مصالح مختلف اثر مثبتی روی افزایش مقاومت فشاری گذاشته است و می تواند به عنوان یکی از عوامل تاثیر گذار روی مقاومت فشاری نمونه های ژئوپلیمری مطرح شود. زیرا اعمال فشار باعث متراکم شدن نمونه و کاهش خلل و فرج داخل آن شده و از این رو باعث افزایش مقاومت فشاری می گردد. افزایش مقاومت فشاری برای هریک از مصالح ژئولیت، بنتونیت، پرلیت و سرپاره به ترتیب ۱۴، ۴۶، ۲ و ۳ درصد بوده است. تاثیر اعمال فشار برای نمونه های حاوی بنتونیت از بقیه محسوس تر و برای نمونه های حاوی پرلیت از بقیه کمتر است.

۳-۲-۵- بررسی مقاومت فشاری نمونه های ژئوپلیمری حاوی سیمان

۳۶ نمونه در مرحله دوم با جایگزینی ۳۰ درصد سیمان در مواد آلومینوسیلیکاتی ساخته شدند و تحت آزمایش مقاومت فشاری

شده به الیگومر تبدیل شوند و اگر آب کافی موجود باشد ذرات واکنش نداده، واکنش می دهند و مخلوط ژئوپلیمری تشکیل می شود [۴۹]. این نتایج گویای این واقعیت است که برای مصالح مختلف که جهت تولید ملات ژئوپلیمر استفاده می شوند وجود آب در مخلوط اهمیت بالایی در انجام واکنش دارد و در دمای بالا که منجر به تبخیر آب می گردد شاهد کاهش مقاومت فشاری نمونه ها هستیم. بر اساس نمودارها بالاترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه های عمل آوری شده در دمای ۱۰۰ درجه است.


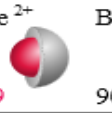


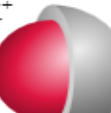
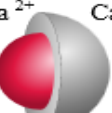
۳-۲-۳- اثر افزایش سن نمونه ها روی مقاومت فشاری

مقاومت فشاری نمونه های ساخته شده در این تحقیق در دو زمان ۷ و ۲۸ روز مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج که در نمودار شکل ۱۷ آمده است، نشان می دهد که نمونه ها در ۷ روز بیش از ۸۰ درصد مقاومت خود را به دست آورده اند و مقاومت ۷ روزه و ۲۸ روزه تفاوت چندانی ندارند. نتایج نشان داده شده، میانگین مقاومت فشاری ۳ نمونه برای هریک از مصالح هستند. در حالی که در بتن متداول سیمانی، زمان نقش مهمی در گیرش و افزایش مقاومت بتن دارد. تحقیقات دیگر نیز نشان داده اند که ماده ی چسباننده ی ژئوپلیمری بر خلاف سیمان پرتلند بخش زیادی از مقاومت ۲۸ روزه را در دو روز اول بعد از تولید به دست می آورد [۵۳ و ۵۲]. این یکی دیگر از مزایای واکنش ژئوپلیمریزاسیون نسبت به هیدراتاسیون سیمان است که نمونه ها در مدت زمان کمی قابل بهره برداری هستند.

۳-۲-۴- اثر فشار روی مقاومت فشاری نمونه ها

در بسیاری از تحقیقات مربوط به بتن ژئوپلیمری، بعد از ساخت نمونه و ریختن بتن در قالب، نمونه را تحت فشار قرار می دهند تا کاملاً متراکم شود [۵۵ و ۵۴]. در این تحقیق اثر اعمال فشار روی نمونه ها بررسی شده تا مشخص گردد این عامل تا چه حدی می تواند روی مقاومت فشاری نمونه ها تاثیر گذار باشد. فشار ۱۰ مگاپاسکال در مدت ۹ ثانیه برای حذف حفرات داخل نمونه وارد شده است. فشار روی نمونه در حالی وارد می شود که نمونه داخل قالب قرار دارد و کاملاً محصور شده است. میزان این فشار به حدی انتخاب شد که آب از داخل نمونه خارج نشود و تغییری در طرح اختلاط به وجود نیاید. نتیجه ی این مقایسه در نمودار شکل ۱۸ نشان

عمل می‌کند، در واقع قلیای قوی‌تری محسوب می‌شود. تصویر شعاع یونی سدیم و کلسیم در شکل ۲۰ نشان داده شده است. افزودن سیمان به نمونه‌های ژئوپلیمری با هدف حذف عملیات حرارت دادن به ژئوپلیمر جهت عمل آوری و به دست آوردن مقاومت فشاری مناسب انجام شد. زیرا همانطور که در قسمتهای قبل اشاره شد نمونه‌های ژئوپلیمری با مصالح ژئولیت، پرلیت و بنتونیت در دمای اتاق و بدون عمل آوری در حرارت، مقاومت فشاری کمتری را از خود نشان دادند.

Group 1		Group 2	
Li ⁺  90	Li 134	Be ²⁺  59	Be 90
Na ⁺  116	Na 154	Mg ²⁺  86	Mg 130
K ⁺  152	K 196	Ca ²⁺  114	Ca 174

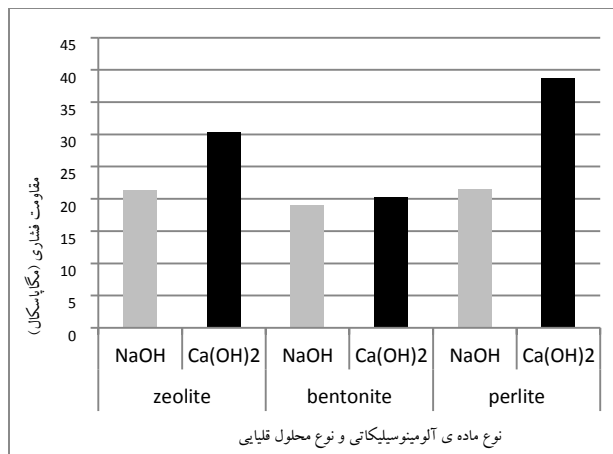
شکل ۲۰- شعاع یونی سدیم و کلسیم

۳-۳- مقاومت کششی نمونه‌ها:

مقاومت کششی نمونه‌ها بر اساس روش برزیلی طبق استاندارد ASTM C496 در آزمایشگاه دانشگاه شهید رجایی مورد آزمایش قرار گرفت که نتایج آن در جدول شماره ۵ آمده است [۵۶]. روی ۱۸ نمونه‌ی استوانه‌ای آزمایش کششی انجام شد و نتایج نشان داد که در مقایسه‌ی مقاومت کششی نمونه‌های ژئوپلیمری و بتن سیمانی متداول، مقاومت کششی نمونه‌های ژئوپلیمری تقریباً یکسان و در مواردی بهتر از مقاومت کششی نمونه‌های بتن معمولی به دست آمد. مقاومت فشاری این نمونه‌ها تقریباً یکسان هستند. تصویر آزمایش و نمونه‌ی دو نیم شده بعد از آزمایش کششی در اشکال شماره ۲۱ و ۲۲ آمده است. راموجیا و همکاران^۱ او نیز در تحقیقات خود عنوان کرده اند که مقاومت کششی بتن ژئوپلیمری بهتر از بتن سیمانی متداول است [۵۷]. این نتایج نشان می‌دهد که ارزیابی بتن ژئوپلیمری از لحاظ مقاومت کششی با بتن معمولی سیمانی یکسان است.

قرار گرفتند که نتایج آن در نمودار شکل ۱۹ آمده است. نتایج آمده در نمودار، میانگین مقاومت فشاری ۳ نمونه است. هدف تولید و آزمایش این نمونه‌ها، حذف نیاز به عمل آوری در گرما بدون کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های ژئوپلیمری است.

همانطور که از نمودار شکل ۱۹ مشخص است نمونه‌های حاوی محلول قلیایی هیدروکسید کلسیم، مقاومت بهتری از نمونه‌های حاوی هیدروکسید سدیم داشته‌اند. تحقیقات نشان داده است در نمونه‌های بدون سیمان قلیای قوی‌تر باعث افزایش مقاومت فشاری می‌گردد و از آنجا که محلول هیدروکسید سدیم نسبت به هیدروکسید کلسیم قویتری است سبب می‌شود یون‌های آلومینیوم و سیلیکون در مصالح منبع بهتر تجزیه شوند و ملات ژئوپلیمر را تشکیل دهند [۵۲]. در حالی که در نمونه‌های ژئوپلیمری حاوی سیمان، هیدروکسید کلسیم اثر بهتری را در افزایش مقاومت فشاری از خود نشان داده است. محلول هیدروکسید کلسیم به عنوان قلیا علاوه بر اینکه باعث واکنش ژئوپلیمریزاسیون شده، در واکنش هیدراتاسیون سیمان نیز نقش موثری داشته و باعث روند بهتر واکنش در نمونه‌های حاوی سیمان شده است.



شکل ۱۹- مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی سیمان با مواد اولیه و محلول قلیایی متفاوت

از آنجا که شعاع یونی سدیم از یون کلسیم بیشتر است جاذبه روی OH⁻ کمتر بوده و راحت‌تر می‌تواند آن را در واکنش از دست بدهد. بنابراین محلول هیدروکسید سدیم به عنوان فعال‌کننده در واکنش‌های ژئوپلیمریزاسیون بهتر از محلول هیدروکسید کلسیم

¹ Rumujee

جدول ۵- مقایسه‌ی مقاومت کششی نمونه‌های ژئوپلیمری و بتن سیمانی

مقاومت کششی (مگاپاسکال)	نوع نمونه
۳/۶۳	بتن ژئوپلیمری حاوی سرباره (عمل آوری دردمای اتاق)
۴/۰۵۹	بتن ژئوپلیمری حاوی زئولیت و سیمان
۳/۳۵	بتن معمولی

طرح اختلاط آمده در جدول ۴ که در دمای اتاق عمل آوری شد، ساخته شدند. طرح‌های اختلاط تیر بتن ژئوپلیمری و بتن سیمانی به‌طور مفصل در بخش ۲-۲ توضیح داده شد. مقاومت فشاری هر سه نوع بتن در روز آزمایش خمشی در حدود ۳۰ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. نمونه‌ای از این تیرها قبل از انجام آزمایش در شکل شماره ۲۳ نشان داده شده است. نمونه‌ها در اثر اعمال دو بار متمرکز در فاصله‌ی یک سوم وسط دهانه، دچار گسیختگی در ناحیه‌ی خمش خالص شدند.



شکل ۲۳ - نمونه‌ی خمشی آماده‌ی آزمایش خمش چهارنقطه‌ای

شکست تیرهای ساخته شده از بتن ژئوپلیمری و بتن سیمانی در اثر خردشدگی بتن ناحیه‌ی فشاری اتفاق افتاد. نتایج این آزمایش شامل بار نهایی قابل تحمل و خیز نهایی تیرها از نمودارهای بار-تغییر مکان با انواع مختلف بتن مورد بررسی قرار گرفت. همچنین یکی از مهمترین خصوصیت مواد یعنی شکل پذیری با استفاده از این نمودارها محاسبه شده است. شکل‌پذیری توانایی جذب انرژی غیرالاستیک بدون از دست دادن ظرفیت باربری است. در واقع جذب انرژی بالاتر به معنی شکل‌پذیری بیشتر است. برای محاسبه‌ی شکل‌پذیری از رویکردهای متفاوتی استفاده می‌شود. این رویکردها بر پایه‌ی تغییر مکان یا بر پایه‌ی ظرفیت انرژی هستند. در اینجا ضریب شکل‌پذیری بر پایه‌ی تغییر مکان محاسبه می‌شود. طبق پیشنهاد کهن و بارتلت^۱ رابطه‌ی شماره ۱ با تعریف مناسبی برای شاخص شکل‌پذیری پیشنهاد شد [۵۸].

$$i = \frac{\Delta_{0.85}}{4y} \quad (1)$$

در این رابطه i شاخص شکل‌پذیری، $\Delta_{0.85}$ تغییر مکان متناظر با ۸۵ درصد بار بیشینه و $4y$ تغییر مکان متناظر اولین تسلیم تیر روی



شکل ۲۱ - آزمایش مقاومت کششی برزلی



شکل ۲۲ - تصویر دونیم شده‌ی نمونه بعد از آزمایش کششی

۳-۴- مقایسه‌ی مقاومت خمشی بتن ژئوپلیمری و

بتن معمولی

در این تحقیق، آزمایش خمش چهارنقطه‌ای روی ۹ تیر بتنی مسلح شده با میلگرد فولادی که در بخش ۲-۲ توضیح داده شد، در آزمایشگاه دانشگاه شهید رجایی انجام شد. این ۹ تیر با انواع مختلف بتن ژئوپلیمری حاوی زئولیت و سیمان، بتن ژئوپلیمری حاوی سرباره و عمل آوری شده در دمای اتاق و بتن متداول سیمانی در شرایط یکسان بتن‌ریزی شدند. از هر نوع بتن ۳ تیر ساخته و مورد ارزیابی قرار گرفت. تیر بتن ژئوپلیمری حاوی زئولیت با طرح اختلاط ۷۰٪ خاک زئولیت و ۳۰٪ سیمان همراه با محلول قلیایی هیدروکسید کلسیم و تیر ژئوپلیمری حاوی سرباره با

¹ Cohn, Bartlett

جدول ۶ - محاسبه‌ی ضریب شکل پذیری

ضریب شکل پذیری (i)	Δ_y	$\Delta_{0.85}$	نوع تیر بتنی
۱/۸۱	۱۵/۶	۲۸/۳۵	تیر بتنی ژئوپلیمری ژئولیت+سیمان (شکل ۲۵)
۲/۲۷	۱۷/۳۵	۳۹/۴۴	تیر بتنی ژئوپلیمری سرباره (شکل ۲۶)
۱/۵۸	۱۷/۴۴	۲۷/۶	تیر بتنی سیمانی (شکل ۲۷)

جدول ۷ - نتایج نمودارهای بار-تغییر مکان

نوع بتن	بار نهایی (نیوتن)	خیز نهایی در نقطه شکست (میلیمتر)
تیر بتنی ژئوپلیمری ژئولیت+سیمان	۸۹۲۶۲	۵۲/۴۱
تیر بتنی ژئوپلیمری سرباره	۹۹۲۶۲	۵۵/۸۶
تیر بتنی سیمانی	۹۰۰۰۰	۳۷/۸۷

راتنا اسریواس و همکارانش^۱ نیز در مقاله‌ی خود به این نتیجه رسیده‌اند که عملکرد بتن ژئوپلیمری نسبت به بتن سیمانی در خمش مناسب‌تر بوده است [۶۰]. همچنین در مطالعات گزارش شده است که تیرهای بتن ژئوپلیمری که با میلگرد فولادی مسلح شده‌اند، ظرفیت باربری بهتری نسبت به بتن معمولی دارند، زیرا مشخصات مکانیکی بتن ژئوپلیمری در مقایسه با بتن متداول با مقاومت فشاری یکسان به علت چسبندگی بهتر ملات ژئوپلیمر نسبت به مصالح سیمانی بهتر است. بنابراین می‌توان مقاومت خمشی مناسب را یکی از ویژگی‌های خوب بتن ژئوپلیمری برشمرد [۶۱-۶۳].

۴- نتایج

این مطالعه روی بتن ژئوپلیمری تولید شده با خاک‌های معادن ایران شامل ژئولیت، پرلیت، بتونیت و مواد زائد صنعتی، سرباره انجام

شد و عوامل مختلف موثر بر مقاومت فشاری، مقاومت کششی و خمشی نمونه‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین جهت سهولت تولید در صنعت و حذف عمل‌آوری نمونه‌های حاوی خاک‌های معدنی، تولید بتن ژئوپلیمری با ۷۰ درصد مواد آلومینوسیلیکاتی و ۳۰ درصد سیمان نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده در موارد زیر توضیح داده شده است:

- با توجه به نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های تولید شده با مصالح مختلف، مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی سرباره، بیشترین مقاومت فشاری (۶۰ مگاپاسکال) را داشتند و در بین نمونه‌های آزمایش شده حاوی خاک‌های معدنی، نمونه‌های ساخته شده با خاک ژئولیت و عمل‌آوری شده در ۱۰۰ درجه‌ی سانتیگراد (۲۵ مگاپاسکال) مقاومت فشاری بیشتری از سایر نمونه‌ها داشتند.

- نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان داد افزایش دمای عمل‌آوری تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد و اعمال فشار روی مخلوط اثر مثبتی روی مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌گذارد. ولی عمل‌آوری در دمای ۱۸۰ درجه سانتیگراد اثر نامطلوبی روی مقاومت فشاری گذاشت.

- بررسی آنالیز شیمیایی مصالح نشان داد که وجود اکسید کلسیم در ترکیب شیمیایی مصالح، اثر مثبتی در واکنش‌پذیری ماده با محلول قلیایی دارد و بتن با مقاومت فشاری بالاتری تولید می‌کند.

- برای حذف مرحله‌ی عمل‌آوری از مراحل تولید بتن ژئوپلیمری حاوی خاک‌های معدنی، استفاده از ۳۰ درصد جایگزینی مواد آلومینوسیلیکاتی با سیمان آزمایش شد و نتایج نشان داد که مقاومت فشاری این نمونه‌ها در حد مقاومت فشاری نمونه‌های بتن ژئوپلیمری عمل‌آوری شده در ۱۰۰ درجه‌ی سانتیگراد است.

- آزمایش مقاومت کششی روی بتن ژئوپلیمری نشان داد که بتن ژئوپلیمری با مقاومت کششی بین ۳ تا ۴ مگاپاسکال مقاومت خوب و مشابه بتن سیمانی دارد.

- مقاومت خمشی و نمودار بار-تغییر مکان نمونه‌های تیر ساخته شده از بتن ژئوپلیمری با دو نوع مختلف و بتن متداول سیمانی مقایسه شدند. نتایج نشان داد که بار نهایی قابل تحمل و مقاومت خمشی تیر بتن ژئوپلیمری حاوی سرباره از نمونه‌های دیگر بیشتر است. همچنین خیز نهایی این تیر بتنی در لحظه‌ی شکست بیش از نمونه‌های دیگر بوده و بنابراین شکست نرم‌تری اتفاق می‌افتد.

¹ Ratna srinivas et al.

- [11] Singh, B. Ishwarya, G. Gupta, M. Bhattacharyya, S.K. "Geopolymer concrete: a review of some recent developments", *Constr. Build. Mater.* 85 (2015) 78–90, 2015.
- [12] Esaifan, M. Khoury, H. Aldabsheh, I. Rahier, H. Hourani, M. Wastiels, J. "Hydrated lime/potassium carbonate as alkaline activating mixture to produce kaolinitic clay based inorganic polymer", *Appl. Clay Sci.* 126 (2016) 278–286, 2016.
- [13] Salih, M.A. Abang Ali, A.A. Farzadnia, N. "Characterization of mechanical and microstructural properties of palm oil fuel ash geopolymer cement paste", *Constr. Build. Mater.* 65 (2014) 592–603, 2014.
- [14] Singh, N.B. Middendorf, B. "Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview", *Construction and Building Materials*, Volume 237, 117455, 2020.
- [15] Suwan, T. Fan, M. "Effect of manufacturing process on the mechanisms and mechanical properties, of fly ash-based geopolymer in ambient curing temperature", *Materials and Manufacturing Processes* Volume 32- Issue 5 , 2017.
- [16] Mehta, A. Siddique, R. "An overview of geopolymers derived from industrial by-products". *Constr. Build. Mater.* 127 (2016) 183–198, 2016.
- [17] Liew, Y.-M. Heah, C.-Y. Mohd Mustafa, A.B. Kamarudin, H. "Structure and properties of clay-based geopolymer cements: a review", *Progress in Materials Science*, Volume 83, Pages 595-629, 2016.
- [18] Part, W.K. Ramli, M. Cheah, C.B. "An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial by products", *Constr. Build. Mater.* 77 (2015) 370–395, 2015.
- [19] Payne, J. Gautron, J. Doudeau, J. Rossignol, S. "Development of low temperature lightweight geopolymer aggregate, from industrial Waste, in comparison with high temperature processed aggregates", *J. Cleaner Prod.* 189 p 47–58, 2018.
- [20] Geraldo, R.H. Fernandes, L.F.R. Camarini, G. "Water treatment sludge and rice husk ash to sustainable geopolymer production", *J. Cleaner Prod.* 149 (2017) 146–155, 2017.
- [21] El-Gamal, S.M.A. Selim, F.A. "Utilization of some industrial wastes for ecofriendly cement production", *Sustainable Mater. Technol.* 12 (2017) 9–17, 2017.
- [22] Gharzouni, A. Joussein, E. Samet, B. Baklouti, S. Rossignol, S. "Effect of the reactivity of alkaline solution and metakaolin on geopolymer formation", *J. Non-Cryst. Solids* 410 (2015) 127–134 ,2015.

– شکل‌پذیری بتن ژئوپلیمری حاوی زئولیت و سیمان و همچنین بتن ژئوپلیمری حاوی سرباره به ترتیب ۱۴ و ۴۳ درصد بالاتر از شکل‌پذیری بتن معمولی به دست آمد. شکل‌پذیری بالا یکی از مزایای مهم بتن ژئوپلیمری در برابر بتن متداول سیمانی است.

۵- مراجع

- [1] M.c.Lellan, B.C, Williams, R.P, Lay, J, Riessen, A, Corder, G.D, "Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary Portland cement" *Journal of Cleaner Production*, Volume 19, Issues 9–10, Pages 1080-1090, June–July 2011.
- [2] Hardjito, D. Rangan, B.V. "Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-based Geopolymer Concrete", *Faculty of Engineering Curtin University of Technology Perth, Australia*, pp. 1–94, 2005.
- [3] McCaffrey, R. "Climate change and the cement industry", *Global cement and lime magazine*, *Environ. Special Issue* 15–19, 2002.
- [4] Palomo, A. Krivenko, P. Garcia-Lodeiro, I. Kavalerova, E. Maltseva, O. Fernández-Jiménez, A. "A review on alkaline activation: new analytical perspectives", *Materiales de Construcción* 64 (315) 022, 2014.
- [5] Hardjito, D. Wallah, S.E. "Introducing fly ash-based geopolymer concrete manufacture and engineering properties", *30th Conference on Our World in Concrete & Structures: 23-24, Singapore*, 2005.
- [6] Lloyd, N.A. Rangan, B.V. "Geopolymer Concrete with Fly Ash", *Second International Conference on sustainable construction Materials and Technologies*, The University of Wisconsin Milwaukee, Ancona, Italy, 2010.
- [7] Luhan, S. Chaudhary, S. Luhan, I. "Development of rubberized geopolymer concrete, strength and durability studies", *Constr. Build. Mater.* 204 740–753, 2019.
- [8] Provis, J.L. Bernal, S.A. "Geopolymers and related alkali-activated materials", *Annual Review of Materials Research*, Vol. 44:299-327, 2014.
- [9] Zhang M. Deskins N.A. Zhang, G. Cygan, R.T. Tao, M. "Modeling the Polymerization Process for Geopolymer Synthesis through Reactive Molecular Dynamics Simulations", *J. Phys. Chem. C* 122 (2018) 6760–6773, 2018.
- [10] Liew, Y.-M. Heah, C.-Y. Mohd Mustafa, A.B. Kamarudin, H. "Structure and properties of clay-based geopolymer cements: a review", *Prog. Mater. Sci.* 83(2016) 595–629, 2016.

- from metakaolin and red mud-fly ash admixture: a comparative study”, *Constr. Build. Mater.* 30 (2012) 80–91, 2012.
- [36] Pacheco-Torgal, F. Moura, D. Ding, Y. Jalali, S. “Composition, strength and workability of alkali-activated metakaolin based mortars”, *Constr. Build. Mater.* 25 (2011) 3732–3745, 2011.
- [37] Kouamo, H.T. Elimbi, A. Mbey, J.A. Ngally, S.C.J. Njopwouo, D. “The effect of adding alumina-oxide to metakaolin and volcanic ash on geopolymer products: a comparative study”, *Constr. Build. Mater.* 35 (2012) 960–969, 2012.
- [38] Yusuf, M.O. Johari, M.A.M. Ahmad, Z.A. Maslehuddin, M. “Influence of curing methods and concentration of NaOH on strength of the synthesized alkaline activated ground slag-ultrafine palm oil fuel ash mortar/concrete”, *Constr. Build. Mater.* 66 (2014) 541–548, 2014.
- [39] بهفرنیا، کیاچهر. تقوائی یزدلی، حامد. " بررسی آزمایشگاهی اثر مدول و غلظت محلول قلیایی بر خصوصیات بتن قلیا فعال سرباره‌ای "، تحقیقات بتن سال دوازدهم، شماره چهارم، ص ۹۸–۲۹، زمستان ۸۹.
- [40] Ariffin, M.A.M. Bhutta, M.A.R. Hussin, M.W. Mohd-Tahir, M. “Sulfuric acid resistance of blended ash geopolymer concrete”, *Constr. Build. Mater.* 43 (2013) 80–86, 2013.
- [41] Rashidian-Dezfouli, Hassan. Rangaraju, Prasada Rao. Sai Kumar Kothala, Venkat. “Influence of selected parameters on compressive strength of geopolymer produced from ground glass fiber”, *Construction and Building Materials*, Volume 162, 20 February 2018, Pages 393-405, 2018.
- [42] Alomayri, Thamer. “Effect of glass microfibre addition on the mechanical performances of fly ash-based geopolymer composites”, *Journal of Asian Ceramic Societies*, Volume 5, Issue 3, Pages 334-340, 2017.
- [43] Alomayri, T. Shaikh, F.U.A. Low, I.M. “Characterisation of cotton fibre-reinforced geopolymer composites”, *Composites Part B: Engineering*, Volume 50, Pages 1-6, 2013.
- [44] Lemougna, P.N. MacKenzie, K.J.D. Melo, U.F.C. “Synthesis and thermal properties of inorganic polymers (geopolymers) for structural and refractory applications from volcanic ash”, *Ceramics International*, Volume 37, Issue 8, Pages 3011-3018, 2011.
- [45] ASTM C39-Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens
- [46] Lee, Yuna. Kang, Seunggu. “Effect of the CaO Content on Microstructure and Mechanical Strength
- [23] Abdollahnejad, Z. Pacheco-Torgal, F. Félix, T. Tahri, W. Aguiar, J.B. “Mix design, properties and cost analysis of fly ash-based geopolymer foam”, *Constr. Build. Mater.* 80 (2015) 18–30, 2015.
- [24] Sanjayan, J.G. Nazari, A. Chen, L. Nguyen, G.H. “Physical and mechanical properties of lightweight aerated geopolymer”, *Constr. Build. Mater.* 79 p236–244, 2015.
- [25] Thamilselvi, P. Siva, A. Damilola Oyejobi. “Geopolymer concrete: overview, International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET) Volume 8, Issue 6, pp. 10–14, 2017.
- [26] Sekou, Traore. Sine, Diakite. Laucine, Traro D. Bakaridjan, Conde. “Synthesis and characterization of a red mud and rice husk based geopolymer for engineering applications”, *Macromolecul. Symp.* 373 (2017) 1600090, 2017.
- [27] Hafid, . El. Hajjaji, M. H. Hafid, El. “Influence of NaOH concentration on microstructure and properties of cured alkali-activated calcined clay”, *J. Build. Eng.* 11 p 158–165, 2017.
- [28] Anuradha, R. Sreevidya, V. Venkatasubramani, R. Rangan, B.V. “Modified guidelines for geopolymer concrete mix design using indian standard”, *Asian Journal of Civil Engineering* 13(3):353-364, Australia, 2012.
- [29] Aquib Javeed, Mohamed. Kumar .M, Veerendra. Narendra, H. “Studies on Mix Design of sustainable Geo-Polymer Concrete”, *International Journal of Innovative Research in Engineering & Management (IJIREM)*, 2015.
- [30] Mehta, Ankur. Siddique, Rafat. “An overview of geopolymers derived from industrial by-products”, *Construction and Building Materials*, Volume 127, Pages 183-198, 2016.
- [31] Ahmari, S. Zhang, L. “Utilization of cement kiln dust (CKD) to enhance mine tailings-based geopolymer bricks”, *Constr. Build. Mater.* 40 (2013) 1002–1011, 2013.
- [32] Nath, S.K. Kumar, S. “Influence of iron making slags on strength and microstructure of fly ash geopolymer”, *Constr. Build. Mater.* 38 (2013) 924–930, 2013.
- [33] Adak, D. Sarkar, M. Mandal, S. “Effect of nano-silica on strength and durability of fly ash based geopolymer mortar”, *Constr. Build. Mater.* 70 (2014) 453–459, 2014.
- [34] Kusbiantoro, A. Nuruddin, M.F. Shafiq, N. Qazi, S.A. “The effect of microwave incinerated rice husk ash on the compressive and bond strength of fly ash based geopolymer concrete”, *Constr. Build. Mater.* 36 (2012) 695–703, 2012.
- [35] He, J. Zhang, J. Yu, Y. Zhang, G. “The strength and microstructure of two geopolymers derived

- of Geopolymer Concrete Beams with GGBS”, International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE), Volume-7, Issue-6C2, 2019.
- [61] Abraham, R. Raj, S.D. Abraham, V. ”Strength and behaviour of geopolymer concrete beams”, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology ; 2:159-66, 2013.
- [62] Dattatreya, JK. Rajamane, NP. Sabitha, D. Ambily, PS. Nataraja, MC. “Flexural behaviour of reinforced geopolymer concrete beams”, International Journal of Civil and Structural Engineering;2:138-59,2011.
- [63] Kumaravel, S. Thirugnanasambandam, S. “Flexural behaviour of geopolymer concrete beams”, International Journal of Advanced Engineering Research and Studies;3:4-6.27, 2013.
- of Fly Ash-Based Geopolymer”, Contemporary Engineering Sciences 9(29):1413-1424, 2016
- [47] Anas, M. lutfi, A. "engineering properties of geopolymer mortar bricks", Thesis for Bachelor Civil Engineering, , Malaysia, 2011.
- [48] Qhatani, M. Nasser Yossef, M. "Investigating the possibility of utilizing low kaolinitic clays in production of geopolymer bricks", Journal Ceramics – Silikáty, Hawayia, Taif, Saudi Arabia, 54(2):160-168, 2010.
- [49] Ahmari, S. Lianyang, Z. "Production of eco-friendly bricks from copper mine tailings through geopolymerization", Construction and Building Materials, 29, 323-331, 2012.
- [50] Dongxu, L. Zhongzi ,X. Zhimin, L. Zhihua, P. Cheng, L. "The activation and hydration of glassy cementitious materials", Cement and Concrete Research, 1145–1152, 2002.
- [51] Kayali, O. Zhu,B. "Chloride induced reinforcement corrosion in lightweight aggregate high-strength fly ash concrete", Construction and Building Materials, 327–336, 2005.
- [52] طریقت، امیر. مودن چی، ساناز. "ارزیابی آزمایشگاهی استفاده از واکنش ژئوپلیمریزاسیون در تولید آجر"، تحقیقات بتن سال دهم دوره ۱۰، شماره ۳، صفحه ۸۰-۶۷، پاییز ۱۳۹۶.
- [53] Comrie, D. C. Paterson, J. H. Ritchey, D. J. "Geopolymer Technologies in Toxic Waste Management", First European Conference on Soft Mineralurgy, Compiègne, France, 1988.
- [54] Ranjbar, N. Mehrali, M. Maheri, M.R. Mehrali, M. “Hot-pressed geopolymer”, Cem. Concr. Res. 100 (2017) 14–22, 2017.
- [55] Ranjbar, N. Kashefi, A. Maheri, M.R. “Hot-pressed geopolymer: dual effects of heat and curing time”, Cem. Concr. Compos. 86 (2018) 1–8, 2018.
- [56] ASTM C496- Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- [57] Kolli, Ramujee. PothaRajub, M. “Mechanical Properties of Geopolymer Concrete Composites”, 5th International Conference of Materials Processing and Characterization, Volume 4, Issue 2, Part A, Pages 2937-2945, 2017.
- [58] Cohn, M.Z. Bartlett, M. Computer-simulated flexural tests of partially pre-stressed concrete sections. ASCE Journal of Structural Division, 108(ST12): 2747–2765, 1982.
- [59] Esfahani, M. R. Kianoush, R. Mousavi, R. Flexural ductility of reinforced concrete beams with lap-spliced bars, Canadian Journal of Civil Engineering, DOI: 10.1139/cjce-2013-0074, 2014.
- [60] Ratna srinivas, M. Himath Kumar, Y. Sarath Chandra Kumar, B. “Studies on Flexural Behavior

Experimental study of ductility and mechanical properties of geopolymer concrete produced with aluminosilicate materials

Sanaz Moazzenchi *

Ph.D. student, Department of Civil Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran,
Asghar Vatani Oskouei

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran,
Iran.

Abstract

The purpose of this research is producing geopolymer concrete in order to reduce the consumption of cement in the construction industry to preserve environmental benefits. In this study, the production of geopolymer concrete using mineral soils of different regions of Iran and industrial by-products has been studied and parameters such as type of raw material, curing temperature, applying pressure during construction, type of alkaline solution and age of samples on compressive strength of concrete samples have been studied. 120 cubic samples with dimensions of 50×50 mm and 64 cubic samples with dimensions of 100×100 mm for compressive strength test, 76 cylindrical specimens with a diameter of 150 mm and a height of 300 mm for compressive and tensile strength test and 9 beams with dimensions of $150 \times 150 \times 1200$ mm for flexural strength test were made. The ductility and load bearing capacity of the geopolymer and cement concrete samples were compared and the results were analyzed. The compressive strength of the geopolymer concrete produced in this study by using slag, which are the by-products of the industry, and the mineral soils of zeolite, perlite and bentonite, was obtained between 10 and 62 MPa under different curing conditions. Geopolymer concrete showed better results in tensile tests on cylindrical specimens and four-point bending tests than conventional concrete on steel reinforced beams. The ductility of beam samples made of geopolymer concrete containing zeolite and slag is about 14% and 43% higher than that of cement concrete samples in the flexural strength test, respectively.

Keywords: Geopolymer concrete, aluminosilicate materials, final capacity, compressive and flexural strength.

* Corresponding Author: s.moazzenchi@yahoo.com