

## تأثیر غلظت مولاریته محلول هیدروکسید سدیم و نسبت مقدار سیلیکات

سدیم به هیدروکسید سدیم بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه

### سرباره کوره آهنگدازی

محمد حسین نوفلاح<sup>۱</sup>، محمد حسن رامشت<sup>۲\*</sup>

۱ کارشناس ارشد سازه، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی - تهران مرکزی؛

۲\* دکترای سازه، استادیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی - تهران مرکزی؛

#### چکیده

بتن ژئوپلیمری یک ماده جدید و نوین در صنعت ساخت و ساز دارای عملکرد و کارایی مطلوب بوده که با مصرف پوزولان‌های طبیعی و پسماندهای صنعتی حاوی سیلیکات آلومینیوم، سازگار با محیط زیست بوده و می‌تواند به عنوان یک ماده جایگزین در مقابل انتشار آلودگی ناشی از تولید سیمان‌های پرتلند برای تولید بتن مورد استفاده قرار گیرد. از سوی دیگر خصوصیات مکانیکی و دوامی این بتن تحقیقات بیشتر در مورد عوامل موثر بر این دو مشخصه را حائز اهمیت گردانیده است. در این مقاله سعی بر مطالعه ی ساخت بتن‌های پر مقاومت ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهنگدازی با استفاده از محلول قلیایی فعال کننده پایه سدیم گردیده است که در آن سه غلظت مختلف ۱۸/۷۵، ۱۵ و ۱۱/۲۵ مولار محلول هیدروکسید سدیم و سه نسبت ترکیبی سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم برابر با ۲، ۲/۵ و ۳ مورد بررسی قرار گرفته اند. همچنین نسبت آب به مواد چسباننده در کلیه طرح‌ها ثابت در نظر گرفته شده است. در این تحقیق عمل آوری نمونه‌ها به صورت مستغرق در آب در دمای محیط بوده و آزمونه‌های هر طرح در سنین ۱، ۳، ۷، ۱۴، ۲۱، ۲۸ و ۴۲ روزه شکسته شده اند. که نشان میدهد با کاهش غلظت محلول هیدروکسید سدیم به ۱۱/۲۵ مولار خواص مکانیکی و این بتن کاهش می‌یابد و این در حالی است که با کاهش غلظت مولاریته محلول هیدروکسید سدیم از ۱۸/۷۵ به ۱۵ تغییرات چشمگیری مشاهده نمی‌گردد.

واژگان کلیدی: بتن ژئوپلیمری، سرباره کوره آهنگدازی، غلظت مولاریته، هیدروکسید سدیم، سیلیکات سدیم، مقاومت فشاری،

رشد روز افزون صنعت ساخت و ساز در حوزه ی سازه‌های بتنی که موجب شده است این ماده به عنوان یکی از پرمصرفترین مواد در قرن اخیر شناخته شود، افزایش میزان تقاضا برای تولید و مصرف سیمان‌های پرتلند را در پی داشته است [۱]، این در حالی است که از یک سو تولید سیمان‌های پرتلند علاوه بر مصرف منابع طبیعی چون سنگ آهک ، مصرف سوخت‌های فسیلی و انرژی الکتریکی، سبب انتشار مقدار قابل توجهی از گازهای گلخانه ای و در نتیجه آلودگی زیست محیطی می‌شوند و از سوئی دیگر امروزه تفکر، توجه و تلاشی جدی در راستای حفظ محیط زیست امری اجتناب ناپذیر و غیر قابل انکار می‌باشد [۲ و ۳] از این رو در دو دهه ی اخیر بتن ژئوپلیمری با عمکردی بالا و هزینه ی ساخت پایین به عنوان دوست دار محیط زیست با قابلیت جایگزینی برای بتن‌های ساخته شده با سیمان معمولی مطرح شده است. [۴] پلیمرهای غیر آلی سیلیکات آلومینیوم [۵] یا به تعریف دیویدوویتس<sup>۱</sup> ژئوپلیمرها [۶، ۷] می‌توانند در یک فرآیند پلیمری شدن [۴] گستره ی وسیعی از پسماندهای صنعتی مانند سرباره کوره آهنگدازی ، خاکستر بادی، خاکستر مواد سوختی، خاکستر پوسته ی برنج، متاکائولن، پوزولان‌های طبیعی و هر منبعی که دارای سیلیکات آلومینیوم غیر بلوری [۶] باشد را به تولیدات ساختمانی تبدیل کند [۸، ۹]. ژئوپلیمرها همچنین از خواص مکانیکی بسیار خوبی همچون مقاومت فشاری بالا، مقاومت سایشی بالا، مقاومت در برابر حمله‌های سولفاتی و اسیدی، گیرش سریع، مقاومت در برابر دمای بالا، عدم شرکت در واکنش با سنگدانه‌های مصرفی و نفوذ پذیری پایین ، محافظت بالا از فولاد در برابر خوردگی برخوردار می‌باشد [۱۰، ۱۱].

ژئوپلیمر ترکیبی از مصالح ژئولوژی طبیعی سیلیکا و آلومین با یک حلال قلیایی-سیلیکاتی بوده که در یک واکنش شیمیایی توسط پیوندهای پلیمری تشکیل می‌شود، شکل گیری پیوندهای پلیمری ( $Si-O-Al$ ) و ساختار مولکولی آن، با معرفی سه زنجیره ی اصلی پلی سیالیت<sup>۲</sup> ( $Al-O-Si$ )، پلی سیالیت سیلیکسو<sup>۳</sup> ( $Al-O-Si-Si$ ) و پلی سیالیت دی سیلیکسو<sup>۴</sup> ( $Al-O-Si-Si-Si$ ) تشریح شده است بدینگونه که حلال قلیایی سیلیکاتی سبب شکستن پیوندهای اکسید آلومینیوم و اکسید سیلیس موجود در پودر سیلیکات آلومینیوم شده و پس از حل شدن و فعال شدن ذرات  $Si$  و  $Al$ ، در یک واکنش سریع پلیمریزاسیونی و با توجه به مقادیر اکسید سیلیس و اکسید آلومینیوم موجود در منبع (نسبت مولی  $Si/Al$ ) زنجیره ی اصلی مذکور شکل می‌گیرد. [۱۲]

محلول فعال کننده ی قلیایی-سیلیکاتی شامل یک محلول هیدروکسید قلیایی همچون سدیم هیدروکسید ( $NaOH$ ) ، پتاسیم هیدروکسید ( $KOH$ ) و کلسیم هیدروکسید ( $Ca(OH)_2$ ) به تنهایی، یا یک محلول دوترکیبی شامل یک هیدروکسید قلیایی به همراه محلول سیلیکاتی مثل سدیم سیلیکات ( $Na_2SiO_3$ ) یا پتاسیم سیلیکات ( $K_2SiO_3$ ) با نسبت‌های مولی و وزنی مشخص می‌باشد . مطالعات نشان می‌دهد نوع هیدروکسید قلیایی  $MOH$  (که  $M$  نوع کاتیون قلیایی می‌باشد) ، غلظت آن (مولاریته) و همچنین نسبت های محلول دوترکیبی که شامل نسبت وزنی  $MOH / M_2SiO_3$  یا نسبت مولی  $SiO_2/M_2O$  می‌باشد، نقش بسیار مهمی را بر خصوصیات شیمیایی و مکانیکی ژئوپلیمر دارد. [۱۳]

تغییر در خواص ژئوپلیمر تنها به محلول فعال کننده‌ها محدود نمی‌شود، مقادیر واکنش پذیر  $Si$  و  $Al$  موجود در مصالح پودری، مقدار مولکول‌های آب و نسبت‌های مولی کل همچون  $SiO_2/Al_2O_3$  و  $M_2O/SiO_2$  و  $H_2O/M_2O$  در تشکیل ژل پلیمری  $M-A$   $M-S-H$  کاتیون قلیایی،  $A$  اکسید آلومینیوم،  $S$  اکسید سیلیس،  $H$  آب) تاثیر نهایی را می‌گذارند. در نتیجه به طور کلی می‌توان ترکیب ژئوپلیمری را با عبارت  $[n M_2O.Al_2O_3.xSiO_2.yH_2O]$  بیان کرد. [۱۱، ۱۴، ۱۵]

<sup>1</sup> Davitovits

<sup>2</sup> poly(sialates)

<sup>3</sup> poly(sialate-siloxo)

<sup>4</sup> poly(sialate-disiloxo)

## هشتمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران - تهران - ۱۵ مهرماه ۱۳۹۵

ژئوپلیمر به عنوان یک ماده ی جدید با مزیت های آنچه که ذکر شده برای شناخت بیشتر و توسعه ی بهتر همچنان نیاز به تحقیقات گسترده دارد چرا که نتایج به دست آمده هنوز قاطع و نهایی نیستند و از نگاهی دیگر ارائه، انتشار و گسترش آن با مواد و مصالح بومی و موجود در کشورمان در راستای توسعه ی این تکنولوژی نوین، تحقیق امری ضروری به نظر می رسد. از این سبب در پژوهش انجام شده طرح ها با غلظت های مولاریته ۱۸/۷۵ ، ۱۵ و ۱۱/۲۵ که معادل محلول هیدروکسید سدیم با غلظت ماده جامد ۵۰٪ ، ۴۰٪ و ۳۰٪ می باشد و همچنین نسبت های ۲ ، ۲/۵ و ۳ مقدار محلول سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم مورد بررسی قرار گرفته اند. باقی پارامترهای موثر از قبیل آب به ذرات چسباننده نسبت حجم محلول فعال کننده به چسباننده ثابت حفظ شده تا تاثیر پارامترهای مذکور در بررس شود.

### ۲-۲-۱ آزمایشگاهی

#### ۲-۱-۲ مواد و مصالح

#### ۲-۱-۱ چسباننده

از سرباره کوره آهنگدازی به عنوان منبع سیلیکات آلومینیوم برای این بتن استفاده گردید. این سرباره پسماند تولید فولاد شرکت ذوب آهن اصفهان بوده که در کارخانه سیمان سپاهان آسیاب و گردیده و به ریزی برابر با ۴۵۰۰ سانتی متر مربع بر گرم رسیده است. آنالیز شیمیایی این سرباره توسط دستگاه FRX انجام گردیده که در جدول شماره ۱ قابل ملاحظه می باشد.

Sio2	Al2O3	Fe2O3	CaO	Fe2O3	MgO	SO3	K2O	Na2O
۳۲/۰۹	۱۵/۱۴	۱/۵۳	۳۹/۳۲	۱/۵۳	۸/۷۵	۲/۲۸	۰/۴۷	۰/۴۲

جدول ۱ آنالیز شیمیایی سرباره کوره آهنگدازی (درصد وزنی)

### ۲-۱-۲-۱ محلول قلیایی-سیلیکاتی

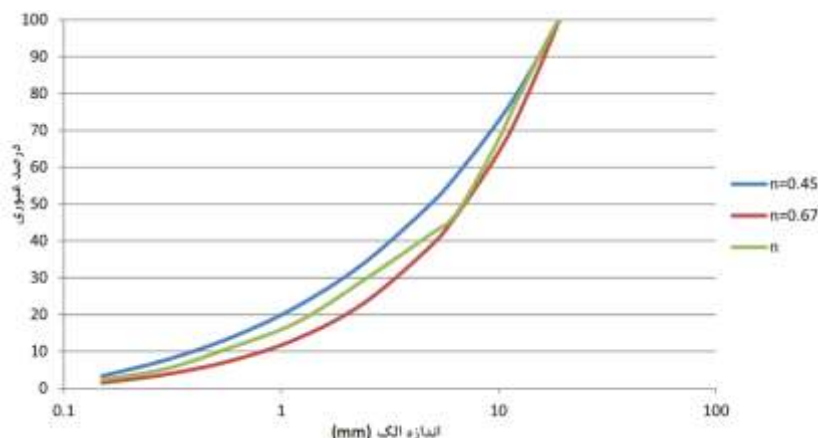
محلول قلیایی-سیلیکاتی این بتن متشکل از سیلیکات سدیم با غلظت ۵۰ درصد ماده جامد و مدول آن برابر با ۲/۵ می باشد (نسبت اکسید سدیم به اکسید سیلیس). چگالی اندازه گیری شده سیلیکات سدیم برابر ۱۵۰۲ کیلوگرم بر متر مکعب باشد. همچنین هیدروکسید مصرفی طرح ها تهیه شده از هیدروکسید مایع تولیدی صنایع پتروشیمی بندر امام با درصد ماده خشک ۵۰٪ بوده است که معادل با غلظت مولاریته ۱۸/۷۵ می باشد و خلوص کل محلول در حدود ۹۸٪ تخمین زده شده است.

### ۲-۱-۳ آب

اب مصرفی برای ساخت بتن ژئوپلیمری آب شرب تهران بوده است

### ۲-۱-۴ سنگدانه

سنگدانه مصرفی نسبت ماسه به شن ۱/۵ می باشد. و نسبت شن درشت دانه به شن ریز دانه برابر با ۱ می باشد. (۶۰٪ ماسه ، ۲۰٪ شن بادمی و ۲۰٪ شن نخودی) مدول نرمی برابر با ۵/۱۹ می باشد و حداکثر سایز سنگدانه برابر با ۱۹ میلیمتر می باشد. جدول و منحنی دانه بندی مصالح در ذیل قابل مشاهده می باشند.



نمودار ۱ منحنی دانه بندی سنگدانه مصرفی

## ۲-۱-۱۵ اختلاط مواد و ساخت بتن:

در این پژوهش عیار سرباره برای تمامی طرح‌ها برابر با ۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است. نسبت آب به چسباننده (تمامی مواد پودری اعم از سرباره کوره آهنگدازی و مقدار ماده خشک موجود در محلول قلیایی-سیلیکاتی که در عمل پلیمریزاسیون شرکت میکنند) برابر با ۰/۳۵ در نظر گرفته شده است. نسبت جرمی محلول فعال کننده قلیایی-سیلیکاتی به سرباره برابر با ۰/۵۶ در نظر گرفته شده است. و با تغییر غلظت مولار محلول هیدروکسید سدیم از ۱۸/۷۵ (حالت خالص) که محلولی با غلظت ۵۰٪ هیدروکسید جامد در واحد حجم میباشد-به ۱۵ و ۱۱/۲۵ مول بر لیتر که به ترتیب معادل ۴۰٪ و ۳۰٪ ماده خشک می‌باشد تغییر میزان غلظت در مشخصات بتن مورد بررسی قرار گرفت. از سوی دیگر با تغییر نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم مقدار محلول سیلیکاتی تغییر کرده تا نتایج این تغییر بر ساختار بتن بررسی گردد.

در پاره ای از تحقیقات مشاهده گردیده که بدون در نظر گرفتن نسبت آب به چسباننده کل و تاثیر تغییر غلظت محلول هیدروکسید سدیم بر میزان آب کل بتن تحقیقات انجام گردیده است. اما میبایست این نکته مورد توجه قرار گیرد که مقدار ماده خشک موجود در محلول قلیایی-سیلیکاتی در مجموع وزن چسباننده محاسبه شود و از سوی دیگر مقدار آب موجود در این محلول نیز جز آب کل محاسبه شود. در این صورت آب به چسباننده به صورت دقیق می‌توان محاسبه نمود و از سویی دیگر میتوان تاثیر دقیق غلظت محلول هیدروکسید سدیم بر مشخصات بتن ژئوپلیمری مورد بررسی و بحث قرار داد.

برای محلول‌های هیدروکسید سدیم با غلظت‌های کمتر با اضافه کردن آب سرد به محلول خالص تهیه گردیده است و پس از شفاف شدن محلول هم دما شدن با محیط در ساخت بتن مورد استفاده قرار گرفته اند. محلول هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم هریک در ظروف جدا نگهداری شده و در زمان اختلاط به صورت مجزا به بتن اضافه گردیدند.

## ۲-۱-۶ مراحل ساخت بتن

برای ساخت بتن ابتدا سنگدانه و مواد پودری به آرامی با یکدیگر به مدت ۶۰ ثانیه مخلوط شده و سپس محلول فعال کننده و پس از آن آب به عنوان آخرین جز به بتن اضافه گردید. بتن به مدت زمان ۳-تا ۴ دقیقه جهت تشکیل بتن یکنواخت و همگن در مخلوط کن مخلوط گردیده است. برای نمونه گیری از بتن از مکعب‌های ۱۰ سانتیمتری چدنی استفاده گردیده است.

با توجه به سرعت بالای گیرش و سخت شدن این بتن پس از طی یک ساعت اماکن باز کردن قالب‌ها از نمونه‌ها وجود دارد. اما برای یکسان سازی شرایط عمل آوری تمام نمونه‌ها ۳ ساعت بعد از نمونه گیری از قالب باز شده و در حوضچه‌های عمل آوری قرار داده شده اند.

## هشتمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران - تهران - ۱۵ مهرماه ۱۳۹۵

۲-۱-۷ طرح مخلوط نمونه‌ها:

نام طرح	عیار سر باره	جرم محلول فعال کننده	غلظت مولار هیدروکسید سدیم	نسبت مقدار سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم	مقدار هیدروکسید سدیم	مقدار سیلیکات سدیم	شن	ماسه
Gpc18.75-3	۴۰۰	۲۲۴	۱۸/۷۵	۳	۵۰	۱۵۰	۶۶۳	۱۰۱۷
Gpc18.75-2.5	۴۰۰	۲۲۴	۱۸/۷۵	۳	۵۷	۱۴۲	۶۶۳	۱۰۱۷
Gpc18.75-2	۴۰۰	۲۲۴	۱۸/۷۵	۳	۶۶	۱۳۳	۶۶۳	۱۰۱۷
Gpc15-3	۴۰۰	۲۲۴	۱۵	۲/۵	۵۰	۱۵۰	۶۶۳	۱۰۱۷
Gpc15-2.5	۴۰۰	۲۲۴	۱۵	۲/۵	۵۷	۱۴۲	۶۶۳	۱۰۱۷
Gpc15-2	۴۰۰	۲۲۴	۱۵	۲/۵	۶۶	۱۳۳	۶۶۳	۱۰۱۷
Gpc11.25-3	۴۰۰	۲۲۴	۱۱/۲۵	۲	۵۰	۱۵۰	۶۶۳	۱۰۱۷
Gpc11.25-2.5	۴۰۰	۲۲۴	۱۱/۲۵	۲	۵۷	۱۴۲	۶۶۳	۱۰۱۷
Gpc11.25-2	۴۰۰	۲۲۴	۱۱/۲۵	۲	۶۶	۱۳۳	۶۶۳	۱۰۱۷

\*در عبارت Gpc18.75-3 عدد اول بیانگر غلظت سود و عدد دوم نشان از نسبت وزنی محلول آب شیشه به محلول سود دارد

### جدول ۲ طرح مخلوط بتن‌های ژئوپلیمری پایه سر باره

#### ۲-۱-۸ شرایط عمل آوری

نمونه‌ها پس از باز شدن از قالب برای حفظ رطوبت و ایجاد شرایط عمل آوری رطوبتی-دمایی یکسان برای تمامی طرح‌ها به صورت مسغرق در آب عمل آوری شده‌اند.

#### ۳-آزمایش‌ها و نتایج

##### ۳-۱آزمایش بتن تازه

##### ۳-۱-۱ روانی بتن تازه و مقدار پخش شدگی

میزان روانی بتن قبل از نمونه گیری توسط آزمایش جریان اسلامپ طبق استاندارد SIRI 11270 اسنجیده شده و بازه روانی تمامی طرح‌ها در بین ۶۳-۶۵ سانتی متر بوده است. باز شدگی ۵۰ سانتی متر (t50) بتن‌ها در بازه ۳/۵ تا ۴/۵ ثانیه به طول انجامید.

##### ۳-۲آزمایش بتن سخت شده

##### ۳-۲-۱ مقاومت فشاری

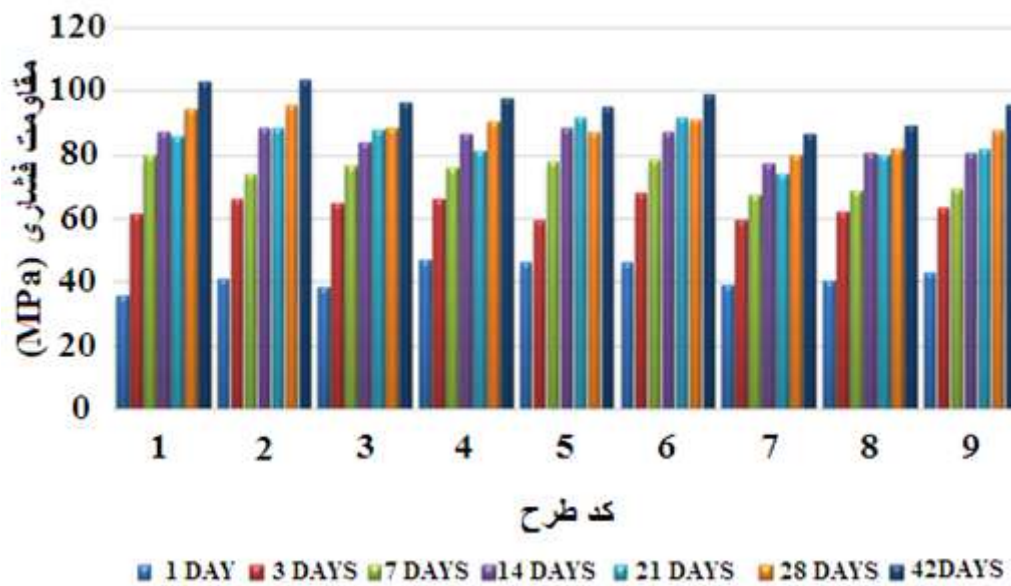
آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین ۱ (۲۴ ساعت)، ۳، ۷، ۱۴، ۲۱، ۲۸ و ۴۲ روزه توسط جک مکانیکی با سرعت بارگذاری ۴۶۰ کیلوگرم بر ثانیه بر روی نمونه‌ها انجام گردیده که از هر نمونه تعداد ۲ نمونه شکسته شده در صورت تفاوت بیش از ۲۰٪ نمونه سوم نیز شکسته شده و نتیجه نمونه مردود حذف گردیده است. و میانگین نتایج در شکل و جدول ذیل قابل ملاحظه است.

## هشتمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران - تهران - ۱۵ مهرماه ۱۳۹۵

شماره	نام طرح	۱ روزه	۳ روزه	۷ روزه	۱۴ روزه	۲۱ روزه	۲۸ روزه	۴۲ روزه
۱	Gpc18.75-3	۳۶	۶۱	۸۰	۸۷	۸۶	۹۴	۱۰۲
۲	Gpc18.75-2.5	۴۱	۶۶	۷۴	۸۸	۸۸	۹۵	۱۰۳
۳	Gpc18.75-2	۳۸	۶۵	۷۶	۸۴	۸۷	۸۸	۹۶
۴	Gpc15-3	۴۷	۶۶	۷۶	۸۶	۸۱	۹۰	۹۸
۵	Gpc15-2.5	۴۶	۶۰	۷۸	۸۸	۹۲	۸۸	۹۵
۶	Gpc15-2	۴۶	۶۸	۷۸	۸۷	۹۱	۹۱	۹۹
۷	Gpc11.25-3	۳۹	۵۹	۶۷	۷۷	۷۴	۷۹	۸۶
۸	Gpc11.25-2.5	۴۰	۶۲	۶۹	۸۰	۸۰	۸۲	۸۹
۹	Gpc11.25-2	۴۳	۶۳	۷۰	۸۰	۸۲	۸۸	۹۵

جدول ۳ نتایج مقاومت فشاری بتن‌های ژئوپلیمری پایه (mpa)

### مقاومت فشاری بتن‌های ژئوپلیمری



نمودار ۲ نتایج مقایسه ای مقاومت فشاری بتن‌های ژئوپلیمری پایه سرباره

### ۴.۴ آنالیز و تحلیل نتایج

مشاهده می‌شود که بتن‌های ژئوپلیمری پایه سرباره مقاومت فشاری بالایی در سنین نخستین کسب می‌کنند و پس از گذشت ۲۴ ساعت از زمان نمونه‌گیری تمام نمونه‌ها به مقاومتی بیش از ۳۵ مگاپاسکال دست یافته و آماده بار گذاری می‌شوند. از سوی دیگر نتایج نشان دهنده آن است که نمونه‌ها پس از گذشت ۷ روز از زمان ساخت رشد مقاومتی در حدود ۷۰ مقاومت نهایی خود را کسب می‌کنند. و این روند رشد همچنان با گذشت زمان ادامه می‌یابد.

در سنین بین ۱۴ تا ۲۱ روزگی این بتن نرخ رشد به سمت صفر میل کرده و میتوان گفت که افزایش مقاومت متوقف می‌شود. محدوده ی کلی مقاومت‌های فشاری نمونه‌ها در حدود ۸۰ تا ۱۰۰ مگاپاسکال می‌باشد که نشان دهنده آن است که عامل اصلی در میزان مقاومت فشاری نسبت آب به مواد چسباننده کل می‌باشد.

نتایج نشان میدهند که که تغییر غلظت محلول هیدروکسید سدیم باعث ایجاد تغییر در مقاومت فشاری نمونه‌ها شده است. با کاهش غلظت از ۱۸/۷۵ به ۱۵ مولار مقاومت نمونه‌ها مقدار ناچیزی کاهش یافته است که این کاهش در حدود ۵ درصد میباشد. این در حالی است که تفاوت غلظت در این دو طرح در حدود ۲۰ درصد مقدار بیشینه می‌باشد. و همچنین در مقایسه بتن‌های ساخته شده با غلظت ۱۵ مولار با بتن‌های دسته سوم با غلظت مولاریته برابر با ۱۱/۲۵ مقاومت فشاری تغییر بیشتری را نشان میدهند. که میزانی در حدود ۱۵-۲۰٪ کاهش مقاومت را سبب گردیده است. کاهش غلظت مولاریته از ۱۸/۷۵ به ۱۱/۲۵ باعث کاهش ۴۰ درصدی غلظت محلول اولیه شده و این کاهش غلظت تاثیر بسزایی در قیمت تمام شده بتن ساخته شده میگذارد.

در تحلیل تاثیر نسبت محلول سیلیکات سدیم به محلول هیدروکسید سدیم این نکته حائز اهمیت است که در طرح‌های دسته اول و دوم که غلظت محلول هیدروکسید زیاد بوده کاهش این نسبت تاثیر چندانی در مقاومت فشاری نمونه‌ها را سبب نگردیده در حالی که در دسته سوم با کاهش این نسبت افزایش مقاومت را خواهیم داشت که نشان دهنده آن است که کم بودن میزان هیدروکسید سدیم بسان عاملی محدود کننده عمل کرده و مقاومت را متاثر می سازد.

### ۵. نتیجه گیری:

بر اساس مشاهدات و نتایج بدست آمده در این پژوهش این نتیجه حاصل میگردد که:

بتن‌های ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی دارای گیرشی سریع و مقاومت مطلوبی بوده که در همان روزهای نخستین مقاومت بالایی را از خود نشان می‌دهند و قابلیت آن را دارند که بتوانند به عنوان یک ماده ی جدید، جایگزینی برای بتن‌های ساخته شده با سیمان‌های پرتلند باشند. روند رشد کسب مقاومت بتن ژئوپلیمری در روزهای نخستین بسیار سریع بوده و این بتن مقاومتی در حدود ۷۰ درصد مقاومت فشاری نهایی خود را در ۷ روزه ابتدایی استحکام بتن کسب می‌نماید. رشد مقاومتی این بتن در سن ۱۴ الی ۲۱ روزگی بتن تقریباً متوقف گردیده است. اما طبق نتایج مشاهده می‌شود که بتن تا سن ۲۸ روزگی مجدد شروع به سخت شدن می‌نماید و افزایش مقاومت را شاهد می‌باشیم. در این مطالعه با ثابت نگه داشتن نسبت آب به مواد چسباننده در بتن مشاهده می‌گردد که با کاهش غلظت مولاریته محلول هیدروکسید سدیم از ۱۸/۷۵ به ۱۵ مول بر لیتر مقاومت فشاری کاهش کمی پیدا کرده اما با کاهش این متغیر به ۱۱/۲۵ مول بر لیتر کاهش مقاومت محسوس تر می‌گردد. کاهش نسبت مقدار سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم در غلظت ۱۱/۲۵ مولار باعث افزایش مقاومت می‌شود اما در غلظت‌های مولاریته ۱۵ و ۱۸/۷۵ تاثیر چندانی ندارد. ساخت بتن های ژئوپلیمری از نقطه نظر مهندسی و مشخصه های مکانیکی بسیار توجیه پذیر بوده اما از نقطه نظر اقتصادی به دلیل پایین بودن قیمت سیمان پرتلند در کشور هزینه تمام شده بالا تری را برای ساخت تحمیل می‌کند. زین سبب می‌توان با کاهش غلظت محلول هیدروکسید سدیم بدون کاهش چشمگیر در مقاومت مکانیکی هزینه ساخت این بتن را تا حدود ۱۷ درصد کاهش داد.

### ۶. مراجع

- 1 Ramesht, M.H., 2009, "Technology of Concrete"
- 2 Davidovits J.( 1994) , "High-Alkali Cements for 21 st century Concretes in Concrete Technology, Past, Present and Future", Proceedings of V.Mohan Malhotra Symposium, ACI SP-144, pp.383-397.

- 3 Peter Duxson, John L. Provis, Grant C. Lukey, Jannie S.J. van Deventer (2007),” The role of inorganic polymer technology in the development of ‘ green concrete’ ”, Cement and Concrete Research 37 , 1590 – 1597
- 4 Zhu Pan, Jay G. Sanjayan , Frank Collins (2014) .” Effect of transient creep on compressive strength of geopolymer concrete for elevated temperature exposure”, Cement and Concrete Research 56 , 182–189
- 5 Davidovits, J., (1991),” Geopolymer chemistry and application”, Joseph Davidovits, Institut Géopolymère, SaintQuentin, France, 2008, ISBN 9782951482050 (3rd ed., 2011)
- 6 Davidovits, J. (1994).” Properties of Geopolymer Cements”. First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Kiev, Ukraine, 1994, SRIBM, Kiev State Technical University
- 7 Davidovits J (1991) “ Geopolymers: inorganic polymeric new materials” Journal of Thermal Analysis and Calorimetry;37(8):1633–56
- 8 Hui Xu, Weiliang Gong , Larry Syltebo, Werner Lutze, Ian L. Pegg ,(2014),” DuraLith geopolymer waste form for Hanford secondary waste: Correlating setting behavior to hydration heat evolution” , Journal of Hazardous Materials 278 (2014) 34–39
- 9 K.Parthiban , K.Saravananarajamohan , S.Shobana , A.Anchal Bhaskar ,(2013)” Effect of Replacement of Slag on the Mechanical Properties of Flyash Based Geopolymer Concrete” , International Journal of Engineering and Technology (IJET) , Vol 5 No 3 Jun-Jul 2013
- 10 Kang Gao,Kae-Long Lin,DeYing Wang,Chao-Lung Hwang,Hau-Shing Shiu,Yu-Min Chang,Ta-Wui Cheng(2014),. Effects SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O molar ratio on mechanical properties and the microstructure of nano-SiO<sub>2</sub> metakaolin-based geopolymers,. Construction and Building Materials 53 , 503–510
- 11 Vanchai Sata , Apha Sathonsaowaphak , Prinya Chindapasirt (2012) ,” Resistance of lignite bottom ash geopolymer mortar to sulfate and sulfuric acid attack”, Cement & Concrete Composites 34 , 700–708
- 12 Davidovits, J., (1991),” Geopolymer chemistry and application”, Joseph Davidovits, Institut Géopolymère, SaintQuentin, France, 2008, ISBN 9782951482050 (3rd ed., 2011)
- 13 Behzad Nematollahi, Jay Sanjayan ,(2014),” Effect of different superplasticizers and activator combinations on workability and strength of fly ash based geopolymer”, Materials and Design 57, 667–672
- 14 Sakonwan Hanjitsuwan , Sitchai Hunpratub , Prasit Thongbai , Santi Maensiri , Vanchai Sata ,Prinya Chindapasirt,(2014), Effects of NaOH concentrations on physical and electrical properties of high calcium fly ash geopolymer paste, Cement & Concrete Composites 45 , 9–14
- 15 Elie Kamseu , Maria Cannio, Esther A. Obonyo , Fey Tobias , Maria Chiara Bignozzi , Vincenzo M. Sglavo , Cristina Leonelli,(2014), Metakaolin-based inorganic polymer composite: Effects of fine aggregate composition and structure on porosity evolution,microstructure and mechanical properties, Cement & Concrete Composites 53 ,258–269