

## تأثیر نسبت محلول قلیایی-سیلیکاتی به سرباره در 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

سیمان پرتلندی از پرمصرفترین مصالح در صنعت ساختمان می‌باشد و تولید آن مستلزم استفاده از مقدار قابل توجهی انرژی و همچنین باعث انتشار حجم زیادی گاز CO<sub>2</sub> در اتمسفر میگردد. این حجم تا میزانی است که بین ۵٪-۸٪ گاز CO<sub>2</sub> موجود در اتمسفر را ناشی از تولید سیمان پرتلندی می‌دانند. مشکلات محیط زیستی ناشی از تولید سیمان پرتلندی محققان را بر آن داشته که بر امکان جایگزینی این سیمان با مصالح جدید متمرکز گردند. ژئوپلیمرها در اوایل دهه هفتاد میلادی توسط پروفیسور دیویدوویس معرفی شدند که توصیفی برای مصالح معدنی دارای پیوندهای پلیمری Si-O-Al می‌باشند. گسترش مصرف این مصالح بررسی پارامترهای موثر بر خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی این بتن را حائز اهمیت گردانیده است. در کنار متغیرهایی چون نسبت آب به مصالح چسباننده (سیمانی)، عیار مواد چسباننده و ... نسبت وزنی محلول قلیایی-سیلیکاتی به سرباره از پارامترهای موثر بر خواص این بتن می‌باشد. در این تحقیق مقادیر مختلف نسبت محلول قلیایی-سیلیکاتی به سرباره با ثابت نگاه‌داشتن غلظت مولاریته محلول و نسبت مقدار سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم مورد بررسی قرار گرفته اند. غلظت هیدروکسید سدیم برابر با ۱۸/۷۵، نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم برابر با ۳ عیار سرباره طرح مخلوطها برابر با ۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و نسبت آب به مواد چسباننده برابر با ۰/۳۵ می‌باشد و مقادیر ۰/۲۵، ۰/۳۰، ۰/۳۵، ۰/۴۰، ۰/۴۵، ۰/۵۰، ۰/۵۵ و ۰/۶۰ محلول قلیایی-سیلیکاتی به سرباره در نظر گرفته شده و مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده به عنوان اصلی‌ترین مشخصه بتن مورد سنجش قرار گرفته است. که مشاهده میگردد با افزایش نسبت تا ۰/۴۵ منجر به افزایش مقاومت گردیده اما در ادامه با افزایش نسبت محلول قلیایی-سیلیکاتی به سرباره مقاومت نمونه‌ها کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی: بتن ژئوپلیمری، بتن سبز، سرباره، محلول قلیایی-سیلیکاتی، مقاومت فشاری

## ۱- مقدمه

امروزه بتن سیمان پرتلندی به عنوان پرمصرفترین مصالح ساختمانی شناخته می‌شود. [۱] مصرف زیاد این مصالح ناشی از مشخصات خوب این مصالح مانند هزینه کم، امکان دسترسی و عملکرد آن دانست. اما از نقطه نظر مصرف انرژی و حفاظت از محیط زیست برخی ویژگی‌های ذاتی تولید سیمان پرتلندی باعث ایجاد نگرانی‌های جدی در جامعه مدرن امروزی شده است. تولید سیمان پرتلندی نیازمند دمای بسیار بالا (۱۴۰۰ تا ۱۵۰۰ درجه سانتیگراد) همچنین استفاده از منابع طبیعی و استخراج مواد اولیه می‌باشد و از سوی دیگر باعث انتشار مقدار زیادی گازهای گلخانه‌ای می‌گردد. تولید سیمان ۸ تا ۱۰٪ گاز CO<sub>2</sub> موجود در جو را به خود اختصاص می‌دهد [۲ و ۳]. تا جایی که تولید ۱ تن سیمان پرتلندی منجر به تولید ۰/۶ تا ۱ تن گاز دی‌اکسید کربن می‌گردد [۴ و ۵]. این موضوع محققان را به سوی بررسی مصالح سیمانی دوستدار محیط زیست که میزان مصرف انرژی کمتری دارند تشویق نموده است.

راهکار دیگر استفاده از مواد چسباننده فعال شده قلیایی می‌باشد که با نام ژئوپلیمرها شناخته شده است [۶ و ۷]. یکی از مصالح اولیه برای ساخت این بتن سرباره کوره آهنگدازی می‌باشد که به عنوان مواد پوزولانی یا شبه سیمانی برای بهبود خواص بتن سیمان پرتلندی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برآورد می‌شود که با جایگزینی بتن ژئوپلیمری با بتن سیمان پرتلندی بین ۲۶ تا ۴۵٪ CO<sub>2</sub> منتشر شده کاهش می‌یابد. این میزان کاهش انتشار بدون تحمیل هیچگونه هزینه اضافی میسر می‌گردد [۸ و ۹]. محققان به این نتیجه دست پیدا کرده‌اند که بتن ژئوپلیمری می‌تواند مقاومت نه تنها برابر بلکه بیشتر از بتن سیمان پرتلندی کسب کند [۱۰ و ۱۱]. ژئوپلیمر ترکیبی از مصالح ژئولوژی طبیعی سیلیکات و آلومین با یک حلال قلیایی-سیلیکاتی بوده که در یک واکنش شیمیایی توسط پیوند های پلیمری تشکیل می‌شود، شکل گیری پیوند های پلیمری *Si-O-Al* و ساختار مولکولی آن، با معرفی سه زنجیره ی پلی سیالیت  $(Al-O-Si)$ ، پلی سیالیت سیلکسو  $(Al-O-Si-Si)$  و پلی سیالیت دی سیلکسو  $(Al-O-Si-Si-Si)$  تشریح شده است بدینگونه که حلال قلیایی سیلیکاتی سبب شکستن پیوند های اکسید آلومینیوم و اکسید سیلیس موجود در سیلیکات آلومینیوم شده و پس از حل شدن و فعال شدن ذرات *Al* و *Si*، 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. [۵]

مقادیر واکنش پذیر *Si* و *Al* موجود در پودر، مقدار مولکول های آب و نسبت های مولی کل همچون  $SiO_2/Al_2O_3$  و  $M_2O/SiO_2$  در تشکیل ژل پلیمری *M-A-S-H* ( *M* 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  $[n M_2O \cdot Al_2O_3 \cdot x SiO_2 \cdot y H_2O]$  بیان کرد. [۵، ۱۲، ۱۳]

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 نسبت های 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  $M_2SiO_3 / MOH$  یا نسبت مولی  $SiO_2/M_2O$  می‌باشد، نقش بسیار مهمی را بر خصوصیات شیمیایی و مکانیکی و دوامی ژئوپلیمر دارد. [۱۴ و ۱۵]

یکی از پارامترهای تاثیر گذار بر مقاومت فشاری این بتن نسبت ورنی محلول قلیایی-سیلیکاتی به سرباره می‌باشد که با ۸ مقدار مختلف مورد بررسی قرار گرفته است تا میزان بهینه آن از نظر مقاومتی مشخص گردد.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

<sup>1</sup> poly(sialates)

<sup>2</sup> poly(sialate-siloxo)

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

۱-۲ مواد و مصالح

۱-۱-۲ 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 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.

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
۳۲	۱۵	۱	۳۹	۱	۹	۲	۱	۱

جدول ۱ آنالیز شیمیایی سرباره کوره آهنگدازی (درصد وزنی)

۲-۱-۲ محلول قلیایی-سیلیکاتی

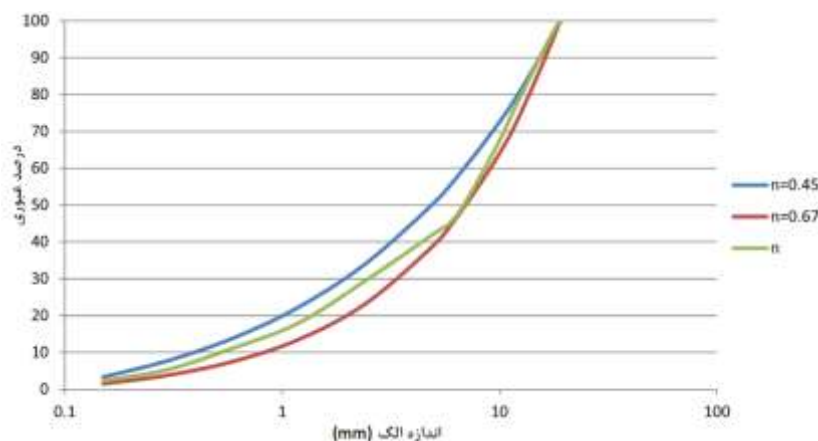
محلول قلیایی-سیلیکاتی این بتن متشکل از سیلیکات سدیم با غلظت ۵۰ درصد ماده جامد و مدول آن برابر با ۲/۳ می باشد. (نسبت اکسید سدیم به اکسید سیلیسوم) چگالی اندازه گیری شده سیلیسکات سدیم برابر ۱۵۰۲ کیلوگرم بر متر مکعب باشد. همچنین هیدروکسید مصرفی طرحها تهیه شده از هیدروکسید مایع تولیدی صنایع پتروشیمی بندر امام با درصد ماده خشک ۵۰٪ بوده که معادل با غلظت مولاریته ۱۸/۷۵ می باشد و خلوص کل محلول در حدود ۹۸٪ تخمین زده شده است.

۳-۱-۲ آب

آب مصرفی برای ساخت بتن ژئوپلیمری آب شرب تهران بوده است

۴-۱-۲ سنگدانه

سنگدانه مصرفی برای ساخت بتن تهیه شده با 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 بادامی و ۲۰٪ شن نخودی) مدول نرمی برابر با ۵/۱۹ می باشد و حداکثر اندازه سنگدانه برابر با ۱۹ میلیمتر می باشد. منحنی دانه بندی مصالح در ذیل قابل مشاهده می باشد که در بازه دو ضریب ۰/۴۵ و ۰/۶۷ د برای منحنی فولر-تامسون قرار دارد.



نمودار ۱ دانه بندی سنگدانه

## ۲-۲ 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 می‌کند) برابر با ۰/۳۵ در نظر گرفته شده است. غلظت مولار محلول هیدروکسید سدیم ۱۸/۸ در نظر گرفته شده که محلولی با غلظت ۵۰٪ هیدروکسید جامد در واحد حجم می‌باشد. نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم مقدار محلول سیلیکاتی تغییر نکرده و در تمامی طرح‌های مخلوط این نسبت برابر با ۳ در نظر گرفته شده است. اما نسبت جرمی محلول فعال کننده قلیایی-سیلیکاتی به سرباره برابر مقادیر ۰/۲۵ ، ۰/۳۰ ، ۰/۳۵ ، ۰/۴۰ ، ۰/۴۵ ، ۰/۵۰ ، ۰/۵۵ و ۰/۶۰ میباشد که نتیجه این تغییر بر مقاومت فشاری مورد بررسی قرار گرفته است.

مقدار شن	مقدار ماسه	مقدار سیلیکات سدیم	مقدار هیدروکسید سدیم	نسبت مقدار سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم	جرم محلول فعال کننده	غلظت مولار هیدروکسید سدیم	نسبت آب به چسباننده کل	نسبت محلول قلیایی-سیلیکاتی به سرباره	عیار سرباره	نام طرح
۶۴۹	۹۹۶	۱۸۰	۶۰	۳	۲۴۰	۱۸/۸	۰/۳۵	۰/۶۰	۴۰۰	Gpc60
۶۵۷	۱۰۰۷	۱۶۵	۵۵	۳	۲۲۰	۱۸/۸	۰/۳۵	۰/۵۵	۴۰۰	Gpc55
۶۶۳	۱۰۱۷	۱۵۰	۵۰	۳	۲۰۰	۱۸/۸	۰/۳۵	۰/۵۰	۴۰۰	Gpc50
۶۷۰	۱۰۲۸	۱۳۵	۴۵	۳	۱۸۰	۱۸/۸	۰/۳۵	۰/۴۵	۴۰۰	Gpc45
۶۷۷	۱۰۳۹	۱۲۰	۴۰	۳	۱۶۰	۱۸/۸	۰/۳۵	۰/۴۰	۴۰۰	Gpc40
۶۸۴	۱۰۴۹	۱۰۵	۳۵	۳	۱۴۰	۱۸/۸	۰/۳۵	۰/۳۵	۴۰۰	Gpc35
۶۹۱	۱۰۶۰	۹۰	۳۰	۳	۱۲۰	۱۸/۸	۰/۳۵	۰/۳۰	۴۰۰	Gpc30
۶۹۷	۱۰۷۰	۷۵	۲۵	۳	۱۰۰	۱۸/۸	۰/۳۵	۰/۲۵	۴۰۰	Gpc25

جدول ۲ نسبت‌ها و مقادیر طراح مخلوط‌ها

## ۲-۲-۱ مراحل ساخت بتن

برای ساخت بتن ابتدا سنگدانه و مواد پودری به آرامی با یکدیگر به مدت ۶۰ ثانیه مخلوط شد و سپس محلول فعال کننده و پس از آن آب به عنوان آخرین جز به بتن اضافه گردید. بتن به مدت زمان ۳-۴ دقیقه جهت تشکیل بتن یکنواخت و همگن در مخلوط کن مخلوط گردیده‌است. برای نمونه گیری از بتن از قالب‌های مکعبی ۱۰ سانتیمتری چدنی استفاده گردیده است. با توجه به سرعت بالای گیرش و سخت شدن این بتن پس از طی ۱ ساعت امکان باز کردن قالب‌ها از نمونه‌ها وجود دارد.

## ۲-۲-۲ 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 تحلیل داده‌ها

### ۱-۳ مقاومت فشاری

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

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

### ۴- آنالیز و تحلیل نتایج

همانطور که در جداول قابل مشاهده است ابتدا با افزایش مقدار نسبت محلول قلیایی-سیلیکاتی به سرباره از ۰/۲۵ تا ۰/۴۵ شاهد افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها هستیم اما افزایش بیش از ۰/۴۵ منجر به کاهش مقاومت می‌باشیم. از همین سو میزان ۰/۴۵ مقدار بهینه مقاومتی میباشد.

از سوی دیگر شاهد هستیم که طرح‌های اجرا شده با نسبت ۰/۴۰ و ۰/۵۰ و همچنین طرح‌های ۰/۳۵ و ۰/۵۵ دو به دو مقاومتی یکسان کسب کرده و افزایش مقدار محلول به سرباره به یک مقدار باعث تغییر برابری در مقاومت نمونه‌ها گردیده است. در جهت بهینه سازی مصرف محلول نظاره می‌گردد که با کاهش ۱۱ درصدی مقدار محلول به سرباره تنها ۵ درصد مقاومت نمونه‌ها افت کرده و کاهش می‌یابد

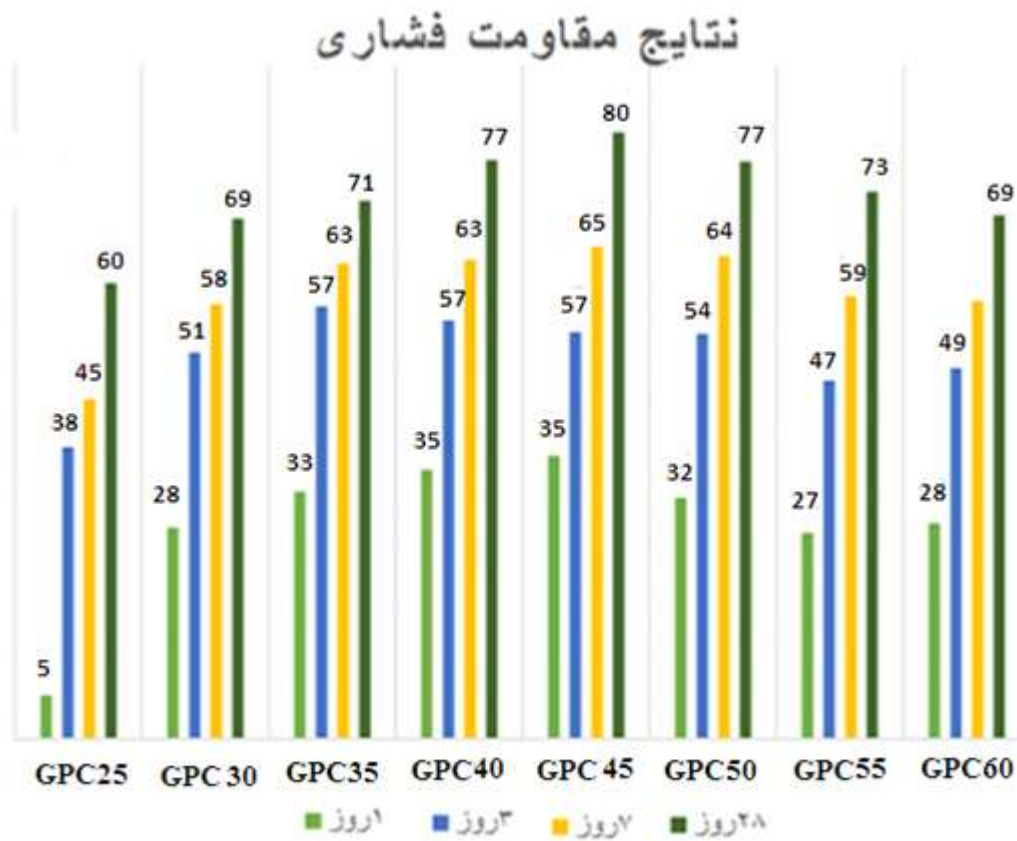
در طرح GPC25 ملاحظه می‌گردد که در سن یک روزه نمونه‌های مقاومتی بسیار پایین کسب نموده اند اما سن ۳ روزگی مقاومتی ۶ برابر مقاومت ۲۴ ساعت کسب کرده و به روند رشد خوبی کسب کرده اند

### ۵- نتیجه گیری

مقدار نسبت وزنی ۰/۴۵ محلول سیلیکاتی-قلیایی به سرباره مقدار بهینه برای طرح مخلوط‌های ساخته شده بود. در نسبت محلول به سرباره بسیار پایین مقاومت کسب شده در روز اول بسیار کم بوده اما در سن ۳ روزگی روند رشد افزایش چشمگیری پیدا میکند. افزایش و یا کاهش نسبت محلول از مقدار بهینه به یک مقدار بر مقاومت فشاری نمونه‌ها تاثیر گذارده است

نام طرح	W/b	محلول به سرباره	۱روزه	۳روزه	۷روزه	۲۸روزه
GPC60	۰/۳۵	۰/۶	۲۸	۴۹	۵۸	۶۹
GPC55	۰/۳۵	۰/۵۵	۲۷	۴۷	۵۹	۷۳
GPC50	۰/۳۵	۰/۵۰	۳۲	۵۴	۶۴	۷۷
GPC45	۰/۳۵	۰/۴۵	۳۷	۵۴	۶۵	۸۰
GPC40	۰/۳۵	۰/۴۰	۳۵	۵۷	۶۳	۷۷
GPC35	۰/۳۵	۰/۳۵	۳۳	۵۷	۶۳	۷۱
GPC30	۰/۳۵	۰/۳۰	۲۸	۵۱	۵۸	۶۹
GPC25	۰/۳۵	۰/۲۵	۵	۳۸	۴۵	۶۰

جدول ۳ نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین مختلف (MPa)



نمودار ۲ نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین مختلف (MPa)

## مراجع

- [1] Ramesht, M.H., 2013, "Technology of Concrete"
- [2] Meyer, Christian. "The greening of the concrete industry." *Cement and concrete composites* 31.8 (2009): 601-605.
- [3] Chen, C., Habert, G., Bouzidi, Y., & Jullien, A. (2010). Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 18(5), 478-485.
- [4] Li, C., Gong, X. Z., Cui, S. P., Wang, Z. H., Zheng, Y., & Chi, B. C. (2011). CO<sub>2</sub> emissions due to cement manufacture. In *Materials Science Forum*(Vol. 685, pp. 181-187). Trans Tech Publications.
- [5] Peng, J. X., Huang, L., Zhao, Y. B., Chen, P., & Zeng, L. (2013). Modeling of carbon dioxide measurement on cement plants. In *Advanced Materials Research* (Vol. 610, pp. 2120-2128). Trans Tech Publications..
- [6]. Davidovits, J., 1994. High-alkali cements for 21st century concretes. ACI Special Publication, 144, 383-398.
- [7] Palomo, A., Grutzeck, M. W., & Blanco, M. T. (1999). Alkali-activated fly ashes: a cement for the future. *Cement and concrete research*, 29(8), 1323-1329.
- [8] Habert, G., De Lacaillerie, J. D. E., & Roussel, N. (2011). An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends. *Journal of Cleaner Production*, 19(11), 1229-1238.
- [9] Turner, L. K. and F. G. Collins, 2013. Carbon dioxide equivalent (CO<sub>2</sub>-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Construction and Building Materials*, 43, 125-130.
- [10] Bakharev, T., 2005b. Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing.

Cement and Concrete Research, 35, 1224-1232 .

[11] Guo, X., Shi, H., & Dick, W. A. (2010). Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer. *Cement and Concrete Composites*, 32(2), 142-147.

[12] 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

[13] Sakonwan Hanjitsuwan , Sitchai Hunpratub , Prasit Thongbai , Santi Maensiri , Vanchai Sata ,Prinya Chindaprasirt,(2014), Effects of NaOH concentrations on physical and electrical properties of high calcium fly ash geopolymer paste, *Cement & Concrete Composites* 45 , 9–14

[14] M. S. Morsy · S. H. Alsayed · Y. Al-Salloum · T. Almusallam(2014),” Effect of Sodium Silicate to Sodium Hydroxide Ratios on Strength and Microstructure of Fly Ash Geopolymer Binder” *Arab J Sci Eng* , 39:4333–4339

[15] 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