

## تأثیر غلظت مولاریته محلول سود و نسبت مقدار آب شیشه به سود بر جذب آب حجمی 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 پوزولان های طبیعی و پسماند های صنعتی حاوی سیلیکات آلومینیوم، سازگار با محیط زیست بوده و می تواند به عنوان یک ماده جایگزین در مقابل انتشار آلودگی ناشی از تولید سیمان های 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 بتن های 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 طرح ها ثابت در نظر گرفته شده است. در این تحقیق عمل آوری نمونه ها به صورت مستغرق در آب در دمای محیط بوده و آزمایش جذب آب حجمی در سن ۲۸ روزگی بر روی نمونه های هر طرح مخلوط صورت گرفته است. آزمایش جذب آب نیم ساعته، جذب آب ۲۴ ساعته و جذب آب نهایی بر روی نمونه ها نشان دهنده تاثیر کاهنده افزایش غلظت هیدروکسید سدیم بر جذب آب بتن های ژئوپلیمری دارد.

واژگان کلیدی: بتن ژئوپلیمری، سرباره کوره آهنگدازی، غلظت مولاریته، هیدروکسید سدیم، سیلیکات سدیم، جذب آب حجمی،

## ۱. مقدمه

رشد روز افزون صنعت ساخت و ساز در حوزه ی سازه های 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 سیمان های پرتلند را در پی داشته است [۱]، این در حالی است که از یک سو تولید سیمان های پرتلند علاوه بر مصرف منابع طبیعی چون سنگ آهک ، مصرف سوخت های فسیلی و انرژی الکتریکی، سبب انتشار مقدار قابل توجهی از گازهای گلخانه ای و در نتیجه آلودگی زیست محیطی می شوند و از سوئی دیگر امروزه تفکر، توجه و تلاشی جدی در راستای حفظ محیط زیست امری اجتناب ناپذیر و غیر قابل انکار می باشد. [۲ و ۳] از این رو در دو دهه ی اخیر بتن ژئوپلیمر با عملکردی بالا و هزینه ی ساخت پایین به عنوان دوست دار محیط زیست با قابلیت جایگزینی برای بتن های ساخته شده با سیمان معمولی مطرح شده است. [۴ و ۵] پلیمرهای غیر آلی سیلیکات آلومینیوم [۶] یا به تعریف دیویدوویتس<sup>۱</sup> ژئوپلیمرها [۷ و ۸] می توانند در یک فرآیند پلیمری شدن [۵] گستره ی وسیعی از پسماند های صنعتی مانند سرباره کوره آهنگدازی ، خاکستر بادی، خاکستر مواد سوختی، خاکستر پوسته ی برنج، متاکائولن، پوزولان های طبیعی و هر منبعی که دارای سیلیکات آلومینیوم غیر بلوری [۷] باشد را به تولیدات ساختمانی تبدیل کند [۹ و ۱۰] ژئوپلیمرها همچنین از خواص مکانیکی بسیار خوبی همچون مقاومت فشاری بالا، مقاومت سایشی بالا، مقاومت در برابر حمله های سولفاتی و اسیدی، گیرش سریع، مقاومت در برابر دمای بالا، عدم شرکت در واکنش با سنگدانه های مصرفی و نفوذ پذیری پایین ، محافظت بالا از فولاد در برابر خوردگی برخوردار می باشد [۱۱ و ۱۲].

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 می شود، شکل گیری پیوند های پلیمری  $Si-O-Al$  و ساختار مولکولی آن، با معرفی سه زنجیره ی اصلی پلی سیالیته<sup>۲</sup>  $(Al-O-Si)$ ، پلی سیالیته سیلکسو<sup>۳</sup>  $(Al-O-Si-Si)$  و پلی سیالیته دی سیلکسو<sup>۴</sup>  $(Al-O-Si-Si-Si)$  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  $Si$  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 می گیرد. [۵]

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 می باشد . مطالعات نشان می دهد نوع هیدروکسید قلیایی  $MOH$  (، که  $M$  نوع کاتیون قلیایی می باشد) ، غلظت آن (مولاریته) و همچنین نسبت های محلول دوترکیبی که شامل نسبت وزنی  $MOH / M_2SiO_3$  یا نسبت مولی  $SiO_2 / M_2O$  می باشد، نقش بسیار مهمی را بر خصوصیات شیمیایی و مکانیکی و دوامی ژئوپلیمر دارد. [۱۳ و ۱۴]

تغییر در خواص ژئوپلیمر تنها به محلول فعال کننده ها محدود نمی شود، 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  $M_2O / SiO_2$  و  $H_2O / M_2O$  در تشکیل ژل پلیمری  $M-A-S-H$  (  $M$  کاتیون قلیایی،  $A$  اکسید آلومینیوم،  $S$  اکسید سیلیس،  $H$  آب) تاثیر نهایی را می گذارند. در نتیجه به طور کلی می توان ترکیب ژئوپلیمری را با عبارت  $[n M_2O \cdot Al_2O_3 \cdot x SiO_2 \cdot y H_2O]$  بیان کرد. [۱۵، ۱۶]

<sup>1</sup> Davitovits

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

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

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

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. بقیه پارامتر های موثر از قبیل آب به مواد چسباننده نسبت حجم محلول فعال کننده به چسباننده و ... ثابت حفظ شده تا تاثیر پارامترهای مذکور در ابتدا بررسی شود.

## ۲. برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱ 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 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 شماره ۱ آنالیز شیمیایی سرباره کوره آهنگدازی (درصد وزنی)

### ۲-۱-۲ محلول قلیایی-سیلیکاتی

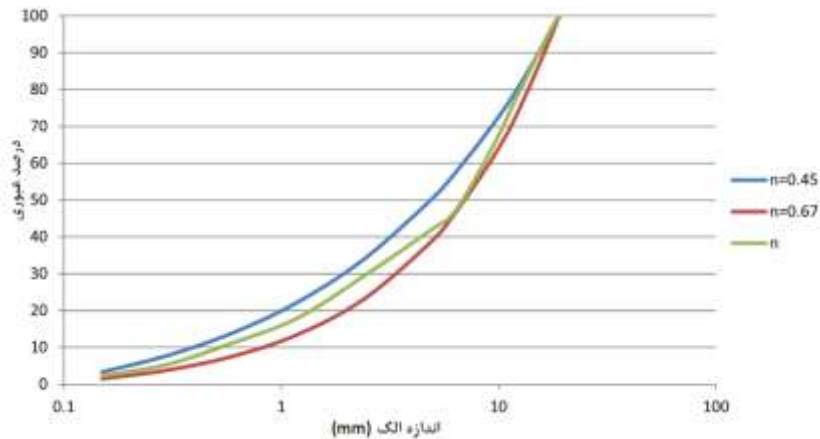
محلول قلیایی-سیلیکاتی این بتن متشکل از سیلیکات سدیم با غلظت ۵۰ درصد ماده جامد و مدول آن برابر با ۲/۵ می باشد (نسبت اکسید سدیم به اکسید سلیس). چگالی اندازه گیری شده سیلیکات سدیم برابر ۱۵۰۲ کیلوگرم بر متر مکعب باشد. همچنین هیدروکسید مصرفی طرح ها تهیه شده از هیدروکسید مایع تولیدی صنایع پتروشیمی بندر امام 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

آب مصرفی برای ساخت بتن ژئوپلیمری آب شرب تهران بوده است

### ۲-۱-۴ 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 باشند.



نمودار دانه بندی سنگدانه

## ۲-۲ اختلاط مواد و ساخت بتن:

در این پژوهش عیار سرباره برای تمامی طرح ها 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 می کند) 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 می باشد ۱۵ و ۱۱/۲۵ مول بر لیتر که به ترتیب معادل ۴۰٪ و ۳۰٪ ماده خشک می باشد، 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.

محلول های هیدروکسید سدیم با غلظت های 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.

## ۲-۲-۱ مراحل ساخت بتن

برای ساخت بتن ابتدا سنگدانه و مواد پودری به آرامی با یکدیگر به مدت ۶۰ ثانیه مخلوط 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 گردیده است. برای نمونه گیری از بتن از قالب های مکعبی ۱۰ سانتیمتری چدنی استفاده گردیده است.

با توجه به سرعت بالای گیرش و سخت شدن این بتن پس از گذشت ۱ ساعت امکان باز کردن قالب ها از نمونه ها وجود دارد.

۲-۲-۲ طرح مخلوط نمونه ها:

نام طرح	عیار سر باره	جرم محلول فعال کننده	غلظت مولار هیدروکسد ید سدیم	نسبت مقدار سیلیکات سدیم به هیدروکسد ید سدیم	مقدار هیدروکسد ید 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

جدول ۲ نسبت ها و مقادیر طراح مخلوط ها

۳-۲-۲ شرایط عمل آوری

نمونه ها پس از باز شدن از قالب برای حفظ رطوبت و ایجاد شریط عمل آوری رطوبتی-دمایی یکسان برای تمامی طرح ها به صورت مسغرق در آب عمل آوری شده اند

۳. آزمایش ها و نتایج تحلیل داده ها

۳-۱-۳ آزمایش 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 طرح ها در بین ۶۳-۶۵ سانتی متر بوده است. باز شدگی ۵۰ سانتی متر (t50) بتن ها در بازه ۳/۵ تا ۴/۵ ثانیه به طول انجامید.

۳-۲-۳ آزمایش بتن سخت شده

۳-۲-۱ جذب آب حجمی

جهت انجام آزمایش جذب آب حجمی از نمونه های ۱۰\*۱۰\*۱۰ استفاده گردید که تمامی نمونه ها در شرایط برابر عمل آوری شده و آزمایش جذب آب حجمی پس از گذشت ۲۸ روز از سن نمونه ها انجام گردیده است. ابتدا سطح تمامی نمونه ها تمیز گشت و سپس در داخل اون ۱۱۰ درجه قرار گرفت تا زمانی که تمامی نمونه ها به وزن ثابت برسند و کاملاً خشک شوند. وزن نمونه های خشک

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

اندازه گیری شد و سپس در داخل آب در دمای محیط مستغرق شده اند و پس از گذشت ۰/۵ و ۲۴ ساعت از آب خارج شده، آب سطحی آنها جمع آوری و توزین میگردند و سپس به داخل آب بازگردانده شد تا به وزن ثابت برسند و میزان جذب آب نهایی آنها مشخص گردد.

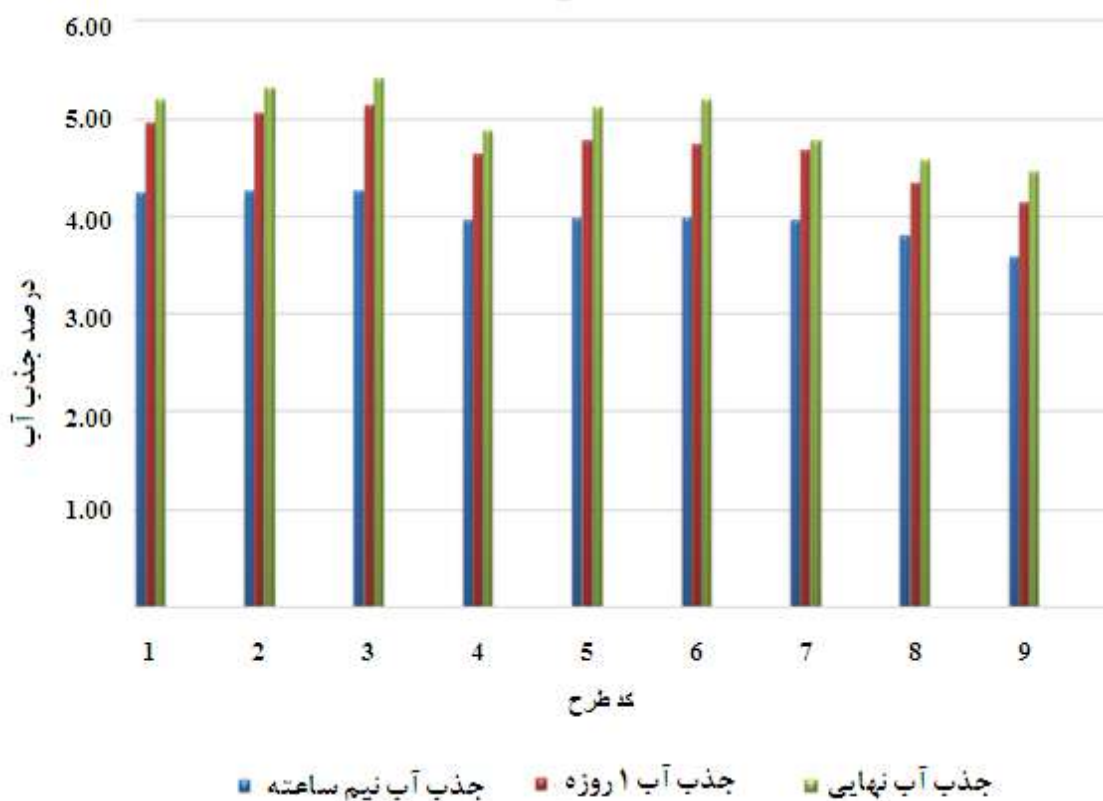
حجم نمونه های اشباع با سنجش وزن غوطه وری حجم آنها محاسبه گردیده است و نتایج زیر حاصل گردیده است.

نام طرح	درصد جذب آب نیم ساعته	درصد جذب آب ۲۴ ساعته	درصد جذب آب نهایی	درصد تخلخل	درصد جذب آب نیم ساعته	درصد جذب آب ۲۴ ساعته	درصد جذب آب نهایی	درصد تخلخل
GPC18.75-3	4.13	4.78	5.06	11.43	4.24	4.96	5.20	11.71
	4.25	5.06	5.29	11.90				
	4.34	5.03	5.25	11.80				
GPC18.75-2.5	4.26	5.01	8.54	17.94	4.25	5.06	5.30	11.63
	4.27	5.20	2.19	5.27				
	4.23	4.96	5.18	11.69				
GPC18.75-2	4.12	5.82	5.33	12.03	4.26	5.13	5.42	12.20
	4.28	5.15	5.41	12.18				
	4.36	4.40	5.50	12.38				
GPC15-3	3.69	4.39	4.64	10.59	3.96	4.64	4.88	11.08
	4.08	4.77	5.00	11.33				
	4.12	4.77	5.00	11.32				
GPC15-2.5	4.01	4.78	4.97	11.22	3.98	4.77	5.11	12.33
	4.24	5.08	7.07	15.12				
	3.67	4.45	4.69	10.66				
GPC15-2	4.02	4.72	5.42	12.16	3.99	4.74	5.20	12.64
	4.04	4.79	5.92	13.17				
	3.90	4.72	5.63	12.58				
GPC11.25-3	4.02	4.71	2.73	6.48	3.96	4.67	4.77	8.32
	3.73	4.50	2.31	5.51				
	4.14	4.79	5.91	12.98				
GPC11.25-2.5	3.72	4.22	4.45	10.10	3.80	4.34	4.57	10.36
	3.74	4.32	4.54	10.24				
	3.94	4.49	4.71	10.74				
GPC11.25-2	4.00	4.59	6.63	14.74	3.57	4.14	4.37	9.92
	3.57	4.13	4.36	9.91				
	3.13	3.69	2.12	5.10				

جدول ۳ مقادیر جذب آب نمونه ها

در نامگذاری طرح ها عدد اول نشان دهنده غلظت محلول هیدروکسید سدیم و عدد دوم مقدار نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم می باشد

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



نمودار ۲ مقادیر جذب آب نمونه ها

### نتیجه گیری:

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

جذب آب نیم ساعته تمامی نمونه ها بالا بوده و درصد زیادی از مقدار آب جذب شده را در این زمان جذب می نمایند و جذب آب نیم ساعته طرح های ساخته شده با غلظت مولاریته برابر به استثنای غلظت ۱۱/۲۵ تقریباً یکسان بوده و نشان می دهد که تغییر نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم در طرح مخلوط آنها تاثیر ناچیزی بر جذب آب اولیه نمونه ها دارد. همچنین پس از گذشت ۲۴ ساعت از زمان مستغرق نمودن نمونه ها در آب بیش از ۹۰ درصد میزان ظرفیت جذب آب نمونه ها اشباع گردیده و این مقدار فرق ناچیزی با میزان جذب آب نهایی نمونه ها دارد. و اینکه در دو غلظت ۱۸/۷۵ و ۱۵ مولار مشاهده می شود که با کاهش نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم میزان جذب آب کاهش می یابد اما در غلظت مولاریته ۱۱/۲۵ هیدروکسید سدیم کاهش نسبت مقدار سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم باعث افزایش میزان جذب آب نمونه ها گشته است.

مراجع

- 1 Ramesht, M.H., 2009, "Technology of Concrete "
- 2 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
- 3 A. Buchwald, M. Schulzb (2005) , "Alkali-activated binders by use of industrial by-products", *Cement and Concrete Research* 35 , 968–973
- 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 Caijun Shi , A. Fernández Jiménez , Angel Palomo (2011)." New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement" , *Cement and Concrete Research* 41 , 750–763
- 6 Davidovits, J., (1991)," Geopolymer chemistry and application", Joseph Davidovits, Institut Géopolymère, Saint-Quentin, France, 2008, ISBN 9782951482050 (3rd ed., 2011)
- 7 Davidovits J (1991) " Geopolymers: inorganic polymeric new materials" *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*;37(8):1633–56
- 8 Davidovits, J. (1994)." Properties of Geopolymer Cements". First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Kiev, Ukraine, 1994, SRIBM, Kiev State Technical University
- 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 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
- 11 Kang Gao, Kae-Long Lin, DeYing Wang, Chao-Lung Hwang, Hau-Shing Shiu, Yu-Min Chang, Ta-Wui Cheng (2014), " Effects of 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
- 12 William D.A. Rickard a, Jadambaa Temuujin, Arie van Riessen. (2012)," Thermal analysis of geopolymer pastes synthesised from five fly ashes of variable composition" ; *Journal of Non-Crystalline Solids* 358 , 1830–1839
- 13 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
- 14 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
- 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

16 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