

سیلیس آموروف در بتن با کارایی فوق العاده بالا: در مدت زمان اولیه

هیدراتاسیون

چکیده

سیلیس آموروف برای سرعت بخشیدن به هیدراتاسیون سیمان در اندازه ی محدود میکرومتر به طور گسترده استفاده می شود. این تحقیق شامل خواص سیلیکا است که اختلاف سطح ویژه ی آن کم است. در این مطالعه، واکنش انواع سیلیس مختلف بر اساس سطح ویژه ی آنها، چگالی سطحی گروه سیلانول، محتوای گروه سیلانول و حلالیت در آویز قلیایی ارزیابی می شود. سیلیکای گرمازا، گاز سیلیکا و سیلیکای سنتز شده توسط هیدرولیز و متراکم شده با الوکسیکال سیلان، به اصطلاح ذرات استوبر استفاده می شود. تأثیر سیلیکا در محدوده ی اولین ساعت در خمیری با نسبت آب به سیمان 0.23 با استفاده از پراش اشعه ی ایکس، تصاویر اسکن شده ی میکروسکوپی و تجزیه تحلیل انحلال منافذ بیشتر مورد بررسی قرار گرفت. نشان داده شد که تغییر ذرات استوبر ترکیبی از انحلال منافذ است. Na^+ ، k^+ ، ca^{2+} و یون سیلیکات به نظر می رسد که به الگومتر واکنش نشان می دهد. ممکن است برای ذرات استوبر به علت واکنش پذیری بالای خودشان میزان این واکنش بالاترین مقدار را داشته باشد.

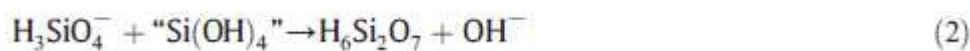
کلید واژه ها: سیلیکا دود (D)، مواد بی شکل (B)، هیدراتاسیون (A)، بتن فوق العاده بالا

مقدمه

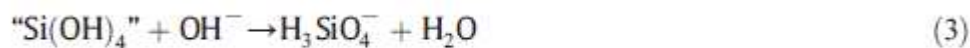
عملکرد بتن فوق بالا (UHPC) به تازگی توسط نعمان و وایل به عنوان یک بتن برپایه ی سیمان با مقاومت فشاری حداقل به مقدار 150 نیوتن به متر مربع تعریف شده است. این بتن بسیار متراکم و با دوام با کاهش نسبت آب به سیمان به کمتر از 0.3 جرم و اضاف کردن سیلیس آموروف بدست می آید. گاز سیلیکا اغلب در سیستم های سیمانی در سیلیس آموروف استفاده می شود. اثرات مثبت سیلیکا بر روی خواص بین از 1950 شناخته شده است اما موضوعی که در حال حاضر وجود دارد، بدست آوردن منافع قابل توجهی از اجزای سیلیس با ذرات اولیه ی کوچکتر از 100 نانومتر به اصطلاح نانوسیلیس است. این نانو سیلیس بدلیل خواص پیشرفته ی

خود می تواند باعث بهبود UHPC شود (به عنوان مثال، خلوص بالاتر، ذرات اولیه ی کوچکتر و سطح ویژه ی بالاتر)

قبل از اینکه اثرات سیلیکا در سیستم های سیمانی مورد بحث قرار گیرد لازم است انحلال سیلیکا در انحلال های قلیایی مورد بررسی قرار گیرد. واکنش های شیمیایی درگیر به عنوان پایه ای برای توصیف مکانیزم واکنش اجزای سیلیکا در سیستم های سیمانی در نظر گرفته می شوند. در آب، سطح سیلیکا و اسید مونسوسیلیک (Si(O)_4 ، به عدم قطعیت اشاره دارد) ارایه ی پلیمرزسیون معادله ی پلیمرزسیون در معادله ی 5 نشان داده شده است. Si(OH)_4 تنها ترکیب پایدار برای غلظت پایین (کمتر از $2 \cdot 10^3$ متر) در غیر این صورت (Si(OH)_4 و یون سیلیکات (به عنوان مثال H_3SiO_4) به اسیدهای پولیزسیک با وزن ملکولی کم متراکم می شود. (به اصطلاح گونه های الیگومریک سیلیکات، معادله ی (2)



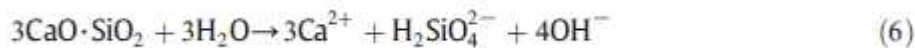
یون سیلیکات (H_3SiO_4 و H_2SiO_4 ، SiO_4) بر اساس معادله ی 3 زمانی که PH بالاتر از 9 است و انحلال سیلیکا (به عنوان مثال H_3SiO_4 طبق معادله ی 4 زمانی که PH بالاتر از 10.7 افزایش می یابد.



هیدراتاسیون سیمان پرتلند مواد معدنی کلینکر سیمان (آلیت C_3S ، بلیت C_2S ، آلومینات C_3A و فریت آلومینات C_4AF) ترکیبات واکنش پیچیده ای هستند و زیر فرآیندهایی آن هنوز در دست بررسی اند. فرآیندهای اصلی، باین حال، به خوبی شناخته شده اند. به طور کلی هیدرات آلیت و اشکال پرتلند (CH) و فاز 1 کلسیم سیلیکات (C-S-H و) این واکنش شیمیایی که در معادله ی 5 آمده است.



در نتیجه، آلیت ($\text{C}_3\text{S} = 3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) طبق معادله ی 6 در اولین ثانیه پس از مخلوط شدن با آب یونی بدست می آید.



علاوه بر این آلایت، فرآیندهای اولیه فاز آلومینات را تعیین می کند این واکنش با سولفات کلسیم (CS.H₂) معادله ی 7



اثرات سیلیس در سیستم‌های سیمانی اغلب برای بتن به اصطلاح معمولی (OC) به عنوان مثال برای بتن‌های با مقاومت فشاری کمتر از حدود 60 نیوتن برمتر مربع و نسبت بالاتر از 0.35 جرم مورد مطالعه قرار می گیرد. سهم مفید از سیلیکا در آن دو قسمت است. از یک طرف، مراحل C-S-H در واکنش پوزولانی با پرتلند (معادله ی 8) که در نتیجه از هیدراتاسیون آلایت (معادله ی 5) بدست می آید.



از سوی دیگر، ذرات سیلیکا بین ذرات سیمان و دیگر اجزا حفره‌ها را پرکنند (به اصطلاح پرکننده نامیده می شوند). شرط لازم برای یک اثر مطلوب پراکندگی ذرات اولیه است. اثر پرکننده بدلیل اینکه شکاف بین ذرات به حداقل برسد از یک میکروساختار متراکم تشکیل شده که باید با محصولات هیدراتاسیون مرتبط شود. علاوه بر این فاز C-S-H از هسته ی آلایت هیدراتاسیون روی سطح سیلیکا می باشد. این فرآیند همچنین به اثر پرکننده نسبت داده شده است اما به طور دقیق تر به نام اثر بذر نامیده می شود.

معمولا مشاهده شده و پذیرفته شده که علاوه بر این از سیلیکا برای سریع هیدراتاسیون سیمان استفاده شود، اما مکانیسم دقیق هنوز شناخته شده نیست و مدل‌های مختلفی ارائه شده است. شتاب به طور کلی به اثر بذر نسبت داده شده است زیرا حاصل فرایند سریعتر هیدراتاسیون در حضور هسته‌های C-S-H وجود دارد. برخی از نتایج سیلیکا نمی توانند حل شوند زیرا غلظت یون سیلیکات افزایش می یابد و بعد از آن هیدراتاسیون آلایت متوقف می شود. در مقابل، دیگر نویسندگان موضوعی که سیلیس به سرعت در منافذ بتن جذب می شود (معادله ی 4) قبل از واکنش پوزولانی (معادله 8) را اصل کار خود قرار دادند. آنها پیشنهاد کردند که واکنش پوزولانی غلظت یون OH^- و CA^{2+} کاهش می دهد و در نتیجه سرعت انحلال آلایت را افزایش می دهد.

بحث پیچیده ای است زیرا خواص انواع مختلف سیلیکا ممکن است بر ساز و کار واکنش تأثیر بگذارد. سطح مخصوص به عنوان مهم ترین عامل شناخته شده است. بیشتر نویسندگان فرض می کنند که محتوای گروه Si/oh (به اصطلاح گروه سیلانول) نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. چگالی گروه سیلانول به شرایط در طول سنتز سیلیس بستگی دارد. اگرچه گروه های سیلانول در مدت زمان سنتز در دمای بالایی هستند (به عنوان مثال هیدرولیز شعله آتش از $SiCl_4$) مقدار قابل توجهی از این گروه های متراکم از رابطه $Si-O-Si$ (به اصطلاح رابطه ی سیلوکسان نامیده می شود) و هنگامی که گروه هایی از ذرات مجاور سیلانول متراکم می شود مصالح با ذرات جدا از هم تشکیل می شود. در غیر این صورت مقدار قابل توجهی از گروه سیلانول پس از هیدرولیز و تراکم الکوکسیکان در دمای محیط باقی می ماند. (به عنوان مثال با استفاده از فرآیند استوبر) در جزییات یک مقدار مشخصی از گروه اتوکسی در طول فرآیند استوبر متراکم نمی شود. آنها پس از آن توسط گروه های سیلانول در یک محیط آبی جایگزین می شود. ممکن است انتظار رود که چگالی گروه سیلانول اثری روی نفوذ واکنش سیلیکا بدلیل جذب یون گروه سیلانول، آب و دیگر ملکولهای قطبی داشته باشد. اگر یک سطح متشکل از رابط سیلوکسان، بدلیل غلظت های پایین تر از محل جذب، به عنوان آگریز در نظر گرفته می شود.

تاکنون برای توصیف سرعت هیدراتاسیون سیمان دو مکانیسم پیشنهاد شده است. از یک طرف Björnström و همکاران، نشان می دهند که یون سیلیکات از آلیت حل می شود (معادله ی 6) ترجیحا با آن گروه واکنش نشان می دهد. از سوی دیگر Mostafa و Brown و Qing و همکاران فرض کردند که گروه های سیلانول با پرتلند به مرحله ی c-s-h واکنش نشان می دهند. (معادله ی 8) به علاوه تنها تعداد کمی از مطالعات انواع مختلفی از سیلیس (معادله ی 8 سیلیکا بدست آمده از هیدرولیز شعله یا سیلیکا تهیه شده توسط فرآیند استوبر) و تأثیر خاص خود روی هیدراتاسیون سیمان وجود دارد.

مشاهدات توصیف شده اکثرا بر روی OC ساخته شده، اما بررسی چگونگی و نتایج ممکن منتقل شده به UHPC جالب است. تاکنون در متون چینگ و همکاران کورپا و همکاران توصیف شده است. نسبت آب به سیمان کمتر از 0.3 توسط جرم که برای UHPC مناسب است. تفاوت عمده میان این دو سیستم سیمانی که به طور کامل مواد معدنی کلینکر در OC هیدراته شدند وجود دارد (تقریبا نسبت آب به سیمان 0.38 جرم لازم است) در

حالی که میزان آب برای هیدراتیسیون کامل در UHPC کافی است. پس از آن پرتلند کمتر در UHPC برای واکنش پوزولانی از سیلیکا در مقایسه با OC در دسترس است.

هدف از این مطالعه بررسی بیشتر خواص سیلیس خاص که دارای یک تأثیر بر روی آب اولیه UHPC و مکانیسم واکنش‌های رایج است. سه مولفه ی مختلف سیلیس استفاده می شود: میکروسیلیس معمولی، سیلیس گرمای تجاری و ذرات سنتز شده با هیدرولیز سیلان الوکسیالکان. آنها برای مناطق با سطح ویژه، چگالی گروه سیلانول و حلالیت در آویز قلیایی مشخص شدند. براساس نتایج، فرض آنها واکنش پذیری در یک محیط سیمانی ارزیابی می شود. اثرات بیشتر به طور مستقیم در مخلوط سیمان، سیلیس و آب مورد بررسی قرار گرفت. (به اصطلاح خمیر نامیده می شود) با نسبت بسیار پایین آب به سیمان (برای UHPC مناسب) توسط پراش‌های مختلف اشعه ی ایکس (XRD) تصاویر اسکن شده ی میکروسکوپ الکترونی (SEM) و تجزیه تحلیل منافذ مورد بررسی قرار گرفت.

فرآیندهای تجربی

1.2 مواد و روش

انواع سیلیس زیر مورد استفاده قرار گرفتند: گاز سیلیس، سیلیس گرما زاء، ذرات استوبر. گاز سیلیس و سیلیس گرمازا در فرآیند درجه حرارت بالا تشکیل می شوند. سیلیس گرمازا در واکنش هیدرولیز شعله از سیلیکون تتراکلرید در حدود 1800 درجه ی سانتی گراد تشکیل می شود. معادله ی 9، و گاز سیلیس به عنوان یک محصول از سیلیکون صنعتی از طریق اکسیداسیون گاز سیلیس در دمای بالاتر از 2000 درجه ی سانتی گراد تشکیل می شود. معادله ی 9



ذرات استوبرمعلق با هیدرولیز و تراکم تترا اتیل اورتوسیلیکات $(\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4)$ به ذرات سیلیکا آمورف ذرات سیلیکا در یک $(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH})$ انحلال اتانولی با آمونیاک (NH_3) تجزیه تحلیل می شود معادله ی 11.

6750 گرم از $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ، 337.5 گرم از NH_3 ، 337.5 گرم از $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ و 281.3 گرم آب دیونیزه شده در یک فلاسک پایین گرد به مدت 24 ساعت در دمای اتاق استراحت داده شد. اندازه ی متوسط ذره از

242 نانومتر با غلظت نسبی مواد اولیه (Si(OC₂H₅)₄, H₂O) و کاتالیزگر (NH₃) تنظیم شده است. پس از سنتز C₂H₅OH و NH₃ به صورت گام به گام با آب دیونیزه شده توسط تبخیر دوار رد و بدل می شود. این تبادل با سطح گروه اتوکسی با گروه سیلانول کافی است و حذف و جذب یون NH₃ از سطح سیلیکا انجام می شود. آب دوار و تعلیق توسط تبخیر بیشتر از 50٪ وزنی متمرکز است. درجه حرارت در طول کل فرآیند زیر 40 درجه نگهداری شد.



سیمان پرتلند CEM I 52.5R HS/NA (مقاومت اولیه ی بالا R، مقاومت بالای سولفات HS، محتوای قلیایی کم، 5 HolcimSulfo) با ترکیب زیر مواد معدنی کلینکر و محتویات قلیایی و درصد وزنی سولفات : C3S 64.6, C2S 12.8, C3A 0.2, SO₃ 2.19 و C4AF 16.6, K₂O 0.39, Na₂O 0.48 مورد استفاده قرار گرفت (طبق منبع ارایه شده است)

اتر پلی کربوکسیلات به عنوان فوق روان کننده استفاده شد. در محاسبه ی نسبت آب به سیمان محتوای آب (60درصد وزنی) در نظر گرفته شد.

2.2 تهیه ی خمیر

فرمول خمیر (جدول 1) بر اساس در فرمولاسیون M3Q, UHPC توسعه یافته توسط Schmidt و Fröhlich اعمال شد. نسبت آب به سیمان 0.23 جرم بود. گاز سیلیس، سیلیس گرمازا یا ذرات استوبر به عنوان جز سیلیکا استفاده شدند. این خمیر بیشتر به عنوان خمیر UHPC شناخته شده است. پودر سیلیکا (گاز سیلیکا و سیلیس گرمازا) توسط میکسر دستی (یک دقیقه) با سیمان مخلوط می شود. فوق روان کننده در آب دیونیزه حل می شود. سپس خمیر UHPC با مخلوط کردن ترکیب پودر با فوق روان کننده و آب تهیه می شود. اگر خمیر رقیق بود به مدت 4 دقیقه مخلوط می شوند.

برای خمیر UHPC با ذرات معلق استوبر از ذرات معلق استوبراز فوق رواننده برای اولین بار با سیمان در یک ظرف آسیاب به یک پودر هم وزن شده و سپس با سیلیس آبی مخلوط می شود (با توجه به M3Q 50درصد وزنی) با استفاده از مخلوط کن به مدت 4 دقیقه بدست می آید.

این اصلاح لازم بود زیرا تلاش برای حل فوق روان کننده در ژل سیلیکا به ذرات سیلیکا منجر می شود.

Table 1
Composition of UHPC paste based on M3Q [40] with w/c = 0.23 by mass.

Material	Density [g/cm ³]	Content per volume [kg/m ³]
Water	1.0	175.0
Portland cement	3.0	825.0
Silica	2.2	175.0
Superplasticizer	1.1	27.5

2.3 روش توصیف

تصویر ذرات سیلیکا توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی گرفته شد. سطح ویژه‌ی توسط جذب نیتروژن اندازه گیری می شود. پس از آن نمونه به مدت 16 ساعت در 110 درجه‌ی سانتی گراد و 6-10 بار خشک می شود. خصوصیات بیشتر توسط اشعه ی ایکس طیف فلورسانس و پراش اشعه ی ایکس بدست می آید.

ذرات استوبر برای بررسی‌های توسط زاویه ی 29 جامد در حال چرخش طیف سنجی NMR بدست می آیند. یخ خشک از طریق به حداقل رساندن تأثیر خشک کردن بر روی سطح سیلیکا بدست می آید. سیلیس گرمازا و گاز سیلیس به عنوان دریافت کننده اندازه گیری شد. میزان نسبی کمی سازی گروه (QN) $n = 1, 2, 3$ and براساس یک برازش گوسی از طیف بدست می آید (نرخ گردش = 7000 هرتز)

در تتراسیون سیرز مقدار هیدروکسید سدیم (NaOH) اندازه گیری شد که منجر به افزایش PH از یک سیستم تعلیق آبی از 4 به 9 و 1.5 گرم سیلیکا 100 میلی لیتر آب دیونیزه شده و 30 گرم NaCl در یک بشر مخلوط شد و به PH 4 با $MHC10.1$ رسید. سطح ویژه ی با استفاده از میزان مصرف شده ی NaOH بدست می آید فرض شد که 1.26 گروه سیلانول در هر متر مربع در سطح سیلیکا با PH بین 4 و 9 وجود دارد. روش‌های دقیق تجربی در سیرز داده شده است.

پراکندگی نور دینامیکی (DLS) با استفاده از یک Malvern Zetasizer Nano-ZS ZEN3600 انجام شد. دستگاه (کووت پلی استایرن، اندازه گیری دست نخورده، 25 درجه سانتی گراد) برای تعیین اندازه ذرات سیلیس در آب و برای نظارت بر فرایند انحلال می باشد. (اطلاعات بیشتر در بخش می باشد 2.4)

نمونه‌ی خمیر UHPC توسط XRD ثبت شده در محل با پراش PANalytical X'Pert Pro با استفاده از تابش $\text{Cu K}\alpha$ مورد بررسی قرار گرفت. یک فیلتر نیکل ثانویه جهت سرکوب فلورانس استفاده شد. نمونه‌ها بلافاصله پس از اختلاط به نگهدارنده‌ی نمونه منتقل شدند. برای جلوگیری از تبخیر آب سطح هموار و با فویل پلی آمید بسته شد. اندازه گیری با آشکار ساز X'Celerator (زمان شمارش 21 ثانیه) 1 ساعت و ده دقیقه پس از مخلوط کردن انجام شد.

خمیر UHPC برای تصویر برداری SEM در نیتروژن مایع (-196°C) برای جلوگیری از هیدراتاسیون بعد از یک ساعت یخ زده بود (100٪ رطوبت 20°C). نمونه‌ی منجمد به SEM منتقل می شود و یک شکست ترد با میکرو مانیپولاتور معرفی می شود. آب یخ زده (20 کیلو ولت، 2 میلی بار) برای 6 دقیقه - 7 دقیقه از سطح تصعید شده. پس از آن نمونه‌ها با Au/Pd پراکنده شدند. اطلاعات بیشتر درباره‌ی آماده سازی نمونه‌ها در قسمت‌های دیگر داده شده است.

طیف سنج نوری پلاسمای جفت القایی برای اندازه گیری ترکیب شیمیایی از محلول منافذی که از خمیر UHPC توسط سانتریفیوژ دو مرحله ای بدست می آید استفاده می کند. انحلال اولیه منافذ در مدت 5 دقیقه توسط خمیر سانتریفیوژ از هم جدا شد. پس از آن مایع رویی با یک پیپت و سانتریفیوژ به مدت 90 دقیقه برای جدا کردن ذرات سلیکا و محصولات واکنش در مقیاس نانو جمع آوری شد (اپندورف میکروسنتریفیوژ 130200.R5415 دور در دقیقه). مقدار PH از انحلال منافذ با یک الکتروود (WTW ریزپردازنده pH متر 535) برای خمیر UHPC با گاز سیلیکا و سیلیس گرمازا بدست می آید.

مقدار شاخص مقاله (محدوده ی PH 11 تا 13) که تا به حال برای خمیر UHPC با ذرات استوبر اعمال می شود به دلیل میزان خیلی کم از محلول بدست آمده از منافذ با یک الکتروود اندازه گیری می شود.

2.4 روش سنجش سرعت انحلال

رفتار انحلال سیلیس در یک سیستم بسیار قلیایی (با $\text{PH}=13.5$) مدت زمان وابسته بوسیله ی تعیین میانگین اندازه ی ذرات با DLS بدست می آید. سیلیس معلق برای اندازه گیری (5٪ وزنی) با رقیق سازی استوبر آب دیونیزه یا بوسیله ی پودر سیلیس پراکنده (سیلیس گرمازا یا گاز سیلیس) در آب دیونیزه با چوب گمانه‌ی مافوق صوت تهیه می شود. تعلیق سیلیس در حمام فراصوت به مدت 5 دقیقه تحت درمان قرار گرفتند و پس از آن با

محلول KOH با 0.3 درصد وزنی رقیق شد. اندازه گیری پس از یک دقیقه تماس با محلول KOH و تعلیق سیلیس آغاز شد. تعلیق سیلیس تا زمانی که همه ی ذرات (معیار خاتمه دادن: نسبت تعداد دفعات مشاهده 1 >تعداد در هر ثانیه) و یا تا 24 ساعت حل شود. به عنوان مرجع تعلیق آب دیونیزه (درصد ماده جامد 0.3 درصد وزنی) در همان روش اندازه گیری شد.

نتایج و بحث:

1.3 خواص سیلیکا

ذرات استوبر، گاز سیلیس و ذرات سیلیس گرمازا ذرات متفاوتی در اندازه ی اولیه ی کروی شکل دارند و توزیع اندازه‌ها که از تصاویر SEM از مواد خشک شده ظاهر می شود. (شکل 1 جدول 2) و DLS اندازه گیری از سوسپانسیون‌های آبی (شکل 2) اندازه ذرات استوبر در سوسپانسیون آبی (توسط DLS تشکیل شده و $d_{50}=242\text{nm}$) با مشاهدات پودر خشک شده قابل مقایسه است (sem تصاویر 200-250 نانومتر). این نتایج نشان می دهد که ذرات استوبر به ذرات اولیه در سوسپانسیون‌های آبی پراکنده شده اند. در مقابل، گاز سیلیس و سیلیس گرمازا تنها به مصالح ذرات اولیه پراکنده می شود. زیرا قطر هیدرو دینامیکی بدست آمده در سوسپانسیون‌های آبی از اندازه ی ذرات اولیه ی تعیین شده از تصاویر SEM متفاوت است. این نتیجه ی مشاهدات سابق است. سطح ویژه ی (روش BET) برای گاز سیلیس و سو ذرات استوبر در همان محدوده است، در حالی که تقریباً برای سیلیس گرمازا دو برابر است (جدول 2)

Table 2
Primary particle size, specific surface areas and surface silanol group density of silica.

		Silica fume	Pyrogenic silica	Stoeber particles
Primary particle size (SEM images)	nm	30-420	35-110	200-250
Specific surface area (BET method)	m ² /g	20	38	17
Specific surface area (Sears titration)	m ² /g	11	41	(603) ^a
Surface silanol group density [41] (pH = 9.0)	nm ⁻²	<1.26	≈1.26	≥1.26

^a Unreasonable high value because Sears' assumption is not valid (see Section 3.1).

جدول 2

ذرات استوبر و سیلیس گرمازا (درصد وزنی $\text{SiO}_2=99.97$ ، توسط XRF اندازه گیری شده) یک درجه خلوص بالاتر از گاز سیلیس ($\text{SiO}_2=98.58$) دارد. الگوی XRD سیلیس گرمازا (شکل 3) به طور معمول برای

سیلیس آمورف با گستره ی اوج در یک مقدار تقریبی D قرار دارد. A4 و آن شبیه به الگوهای گاز سیلیس و ذرات استوبر است.

محتوای متفاوت محدوده ی اتم Si (Q1, Q2, Q3 and Q4) می تواند توسط طیف سنج SiMAS 29 NMR در نظر گرفته شود. (شکل 4) Q3 نشان دهنده ی اتم Si محدود به اتم اکسیژن و سه پیوند سیلوکسان و مربوط به عنوان مثال یک گروه سیلان است. ذرات استوبر بالاترین مقدار محتوایی از Q3 و Q2 دارد (اشاره به سیلانول تکی و گروهی) که بیش از سه بار بیشتر است و برای سیلیس گرمازا و بیشتر از 5 برابر برای گاز سیلیس است. علاوه براین سیلیس گرمازا تنها کمی بیشتر از گروه میکرو سیلیس است.

برآورد چگالی سطح گروه سیلانول می تواند توسط روش BET و سیرزسیلانول در مقایسه با سطح مناطق تعیین شود. (جدول 2) در تیتراسیون سیرز فرض بر این است که 1.26 گروه سیلانول در nm^2 بر روی سطح سیلیکا بین pH4 و 9 پرتلند شده. یک گروه واحد از سیلانول پرتلند شده در معادله ی 12 نشان داده شده است.

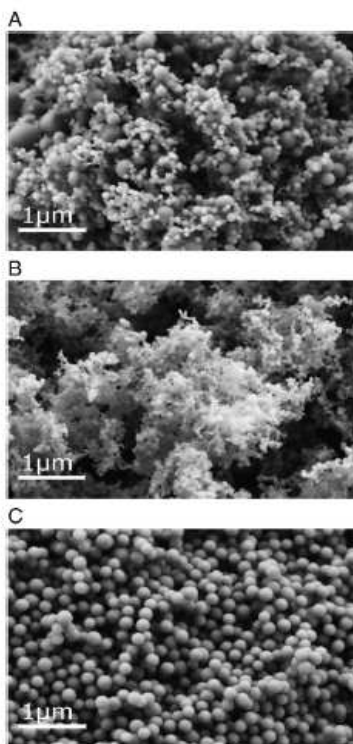
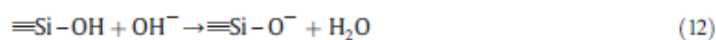
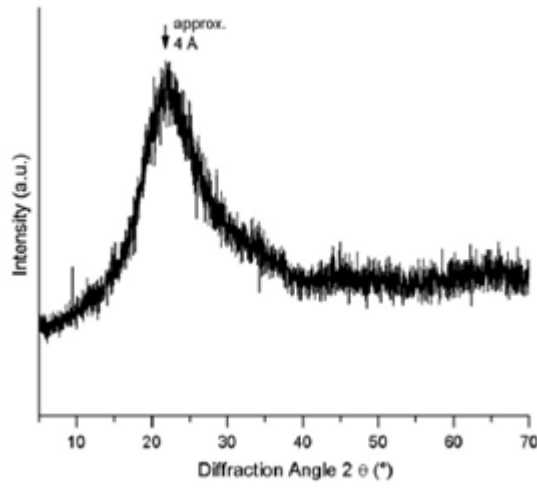
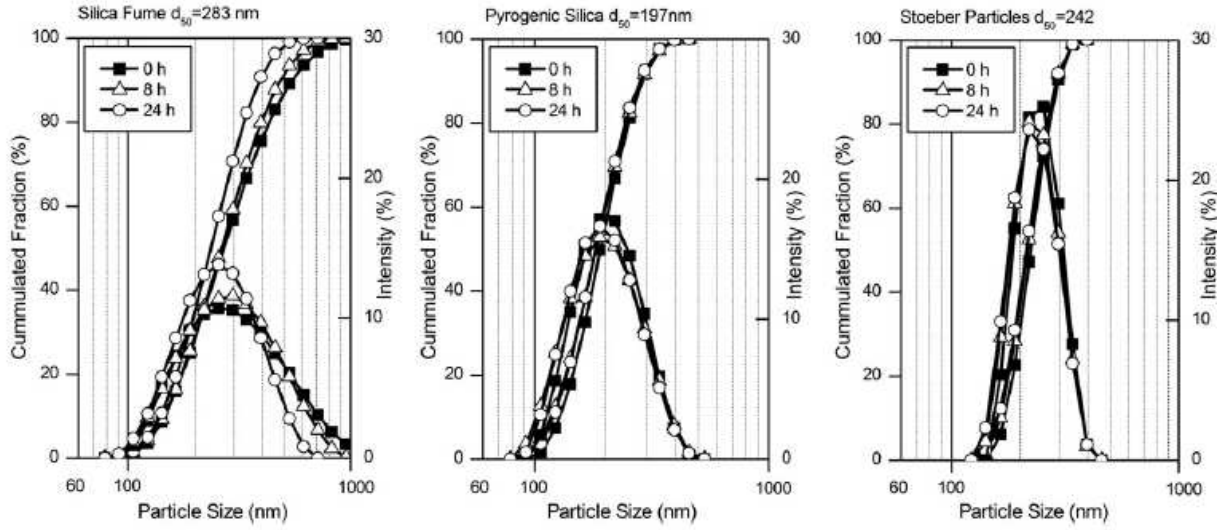
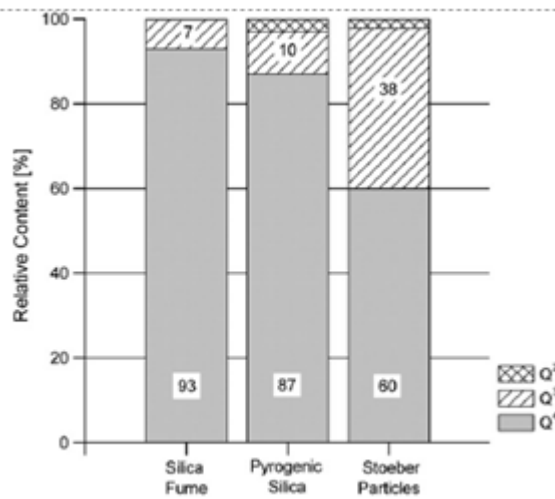


Fig. 1. SEM image of A) silica fume, B) pyrogenic silica and C) Stober particles. Stober particles show the narrowest particle size distribution.



شکل 3



شکل 4

نواحی سطح ویژه ی اندازه گیری شده توسط روش BET و سیرز تیتراسیون به خوبی برای سیلیس گرمازا که نشان دهنده ی چگالی سطحی گروه سیلانول مشابه به فرض سیرز از 1.26 nm^{-2} است. برای سیلیس دیگر، نواحی سطح ویژه ی بدست آمده از روش BET از روش بدست آمده از تیتراسیون سیرز متفاوت است. بنابراین انتظار می رود چگالی سطحی گروه سیلیس پایین تر از فرض 1.26 nm^{-2} و به طور قابل توجهی از این مقدار بیشتر است.

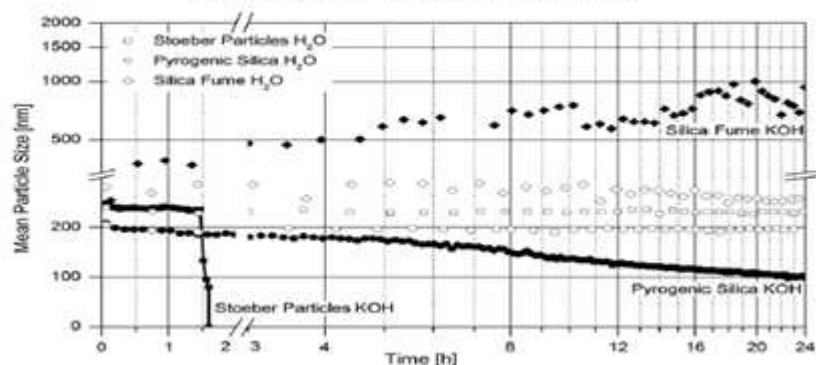
هنگام ارزیابی تیتراسیون ذرات استوبر لازم است یک مقدار مشخصی از گروه های سیلانول داخلی پرتلند شده با NaOH در نظر گرفته شود. زیرا یون OH^- به صورت میکرو وارد شد. از نتایج نویسندگان مختلف این بود که ذرات استوبر حفره های ریزی هستند که توسط روش BET تشخیص داده نشد بدلیل وجود خلل و فرج اگرچه توسط یون OH^- نفوذ می کنند، از نیتروژن یا محیط آبی نفوذ ناپذیر هستند. بعد از آن توسط یاتس و هیلی مورد بررسی قرار گرفت. استدلالی که لایه ی ژلی از اسید پولیسیلیک ذرات سلیکا را به شکلی که زمانی که مقدار گروه های سیانول دارای سطح کافی هستند. آنها بیشتر پیشنهاد کردند که منافذ تنها در سوسپانسیون آبی وجود دارد و در روش BET در طی خشک شدن نمونه ها فشرده می شوند. نتایج مربوط به چگالی سطحی گروه سیلانول در این مطالعه در مشاهدات سابق که چگالی سطحی گروه سیلیس گرمازا به 2.3 نانومتر مشخص شده و ذرات استابر تقریباً 4.9 نانومتر هستند علاوه بر این آنها با محتوای کل گروه سیلانول توسط طیف سنج ^{29}Si MAS NMR که شامل سطح و گروه سیلانول داخلی است تعیین می شوند.

پراکندگی و محتویات گروه سیلانول و چگالی سطحی گروه مطابق با شرایط شکل گیری سیلیکا طبق بخش 2.1 هستند. در مقدمه بیان شد که میزان زیاد گروه سیلانول باقی مانده پس از سنتز ذرات گسسته ی استابر در دمای محیط است در حالی که مقدار قابل توجهی از این گروه ها در شعله هیدرولیز از سیلیس گرمازا و ذرات منفرد مصالح تشکیل می شود. گاز سیلیس در شرایط آب آزاد تشکیل شده است. بنابراین گروه سیلانول ممکن است تنها پس از سنتز از طریق هیدروکسیل با مایع یا بخار آب تشکیل شود. علاوه بر این ذرات اولیه ی مصالح به سرعت در طول تشکیل گاز سیلیس در دمای بالا در حال ساخت و ساز هستند.

3.2 حلالیت سیلیس در محیط بسیار قلیایی

انحلال سیلیکا در یک پراکندگی آبی از 0.5 متر KOH و در آب دیونیزه با تعیین اندازه ی ذرات از طریق DSL در طول 24 ساعت مشاهده شد (شکل 5) انحلال نشان داده که با کاهش حجم ذرات متوسط اندازه ی توزیع ذرات به ذرات کوچکتر تغییر می کند (شکل 6) شروع غلظت ذرات سیلیکا از 0.3 نسبت آب به سیمان بوده است. این را باید در نظر گرفت که اندازه ی ذره ی اندازه گیری شده از ذرات استابری به ذرات اولیه ای که از سیلیکای گرمازا و گاز سیلیس هستند اشاره دارد (بخش 3.1).

برای گاز سیلیس پراکنده در آب دیونیز شده، میانگین اندازه ی ذرات تاحدودی کاهش می یابد (شکل 5) و توزیع اندازه ی دانه ها به ذرات کوچکتر تغییر می کند (شکل 2) در ابتدا 5٪ حجم از سنگدانه ها بزرگتر از 600 نانومتر می باشند. بعد از 24 ساعت تنها مقدار جزئی از ذرات باقی مانده بزرگ هستند که نشان دهنده ی این است مصالح گاز سیلیس در مدت 24 ساعت تجزیه تحلیل شد. متوسط اندازه و توزیع ذرات برای استوبر و سیلیس گرمازا در آب دیونیزه ثابت باقی می ماند. که نشان می دهد سوسپانسیون پایدار است. در نتیجه کاهش قابل ملاحظه ای در اندازه دانه ها و ذرات پراکندگی محلول KOH یک شاخص قابل اطمینان برای انحلال ذرات /مصالح است.



شکل 4

پراکندگی در محلول های آبی از KOH، ذرات استوبر

به طور کامل پس از حدود 1.5 ساعت حل می شود، در حالی که حل شدن در مصالح گرمازا سیلیس به آرامی و هنوز هم بعد از 24 ساعت انجام می شود. (شکل 5 و 6) ارتباط از نتایج را با نواحی سطح ویژه از نمونه سیلیکا نشان می دهد که انحلال سیلیکا نیز باید دیگر ویژگی های آنها وابسته است. در جزئیات، سطح مخصوص سیلیس گرمازا دو بار به عنوان ذرات استوبر شناخته شده است اما نسبت انحلال به طور قابل توجهی پایین تر است.

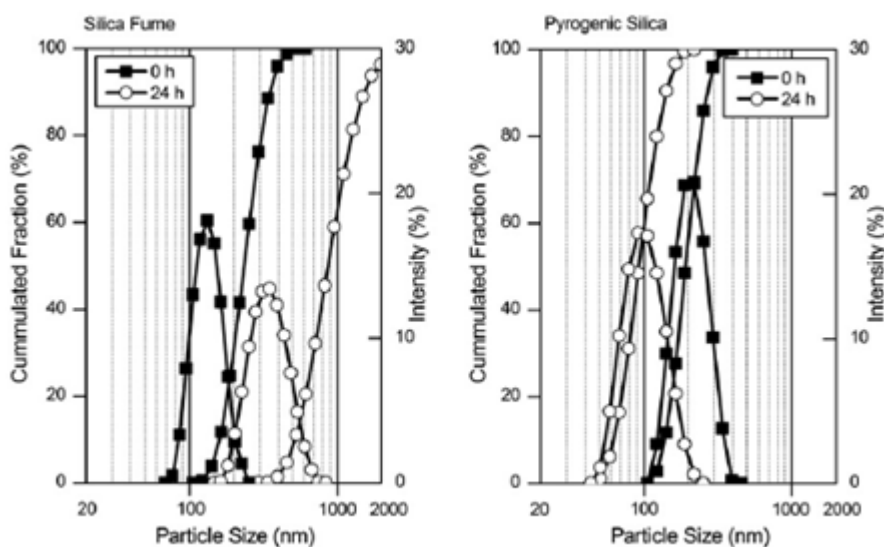
انحلال سریعتر از ذرات استوبر به میزان بالاتری از گروه‌های سیلانول و مقدار کمتر سیلوکسان نسبت داده شده است (بخش 3.1). بنابراین، سرعت انحلال سیلیس با افزایش مقدار اولیه گروه سیلانول بسته به شدت شرایط شکل‌گیری همانطور که قبلاً در بخش 3.1 مورد بحث قرار گرفت، افزایش می‌یابد. که در نتیجه‌گیری، به دلیل چگالی سطح پایین‌تر گروه سیلانول و محتوای کل کم گروه‌های سیلانول انحلال سیلیس گرمازا آهسته‌تر از ذرات استوبر است.

رفتار انحلال گاز سیلیکا در روش DLS نمی‌تواند مشاهده شود. مصالح در هر خوشه در KOH به سرعت در حال سفت شدن هستند (تقریباً 5 میکرون، نشان داده نشده است). آنها بیش از حد بزرگ توسط DLS اندازه‌گیری می‌شود معمولاً در محدوده 2-00.2 میکرومتر به کار گرفته می‌شود. اندازه باقی مانده‌ی خوشه‌ها می‌تواند پس از فیلتر تعلیق با 0.45 میکرومتر فیلتر سرنگ پس از 1 دقیقه آماده‌سازی آن تعیین شود (شکل 5 و 6). نتایج و شواهدی وجود دارد که درآمد حاصل از انعقاد سراسر اندازه‌گیری به دلیل اندازه ذرات افزایش می‌یابد. داده‌ی پراسر و صدا پس از تقریباً 10 ساعت ممکن است توسط یک تسویه همزمان آگلومره بزرگ توضیح داده تشکیل شود. هر دو، انعقاد و ته‌نشینی، برای تشخیص انحلال ذرات در این آزمایش دشوار است. با این حال، پیشنهاد کردند که گاز سیلیس انحلال آهسته‌تری نسبت به سیلیس گرمازا دارد علت آن است که چگالی گروه سیلانول پایین‌تر، محتوای کل پایین‌تر از گروه سیلانول است و یک ناحیه با سطح ویژه‌ی کوچکتر است (بخش 3.1).

ممکن است یک توضیح برای رفتار انعقاد مختلف داده توسط نظریه Derjaguin-لاندو--Verwey Overbeek (نظریه DLVO) داده شود. این توصیف تقریباً تمام اثر متقابل ذرات نزدیک اکسید مواد کلوئیدی توسط منشاء بالقوه از جذاب نیروهای واندروالس و نیروهای الکترواستاتیک دافعه است. به شدت ثبات ذرات سیلیکا به سمت انعقاد وابسته منفی است. بار سطحی که در نتیجه از گروه سیلانول پرتلند از طریق OH- (معادله 12)) بدست می‌آید. دافعه الکترواستاتیک نیروهای ناشی از همپوشانی از دو لایه الکتریکی نزدیک ذرات است. در واقع می‌توان گفت که سطح به اندازه کافی بالا باعث جلوگیری از انعقاد میکروسیلیس، سیلیس گرمازا و ذرات استوبر در آب دیونیزه می‌شود. (مقادیر مرجع).

نظریه DLVO درباره ی نفوذ قدرت یونی متوسط پراکندگی بیشتر توضیح می دهد. قدرت یونی از محلول KOH ضخامت ذرات دو لایه الکتریکی در مقایسه به آنهایی که در آب دیونیزه را کاهش می دهد. این فشردن سازی از دو لایه تحت نیروی دافعه الکترواستاتیک کاهش می یابد. در نتیجه، اگر نیروی دافعه خیلی کم باشد، فاصله ذرات به اندازه کافی کوچک می شود که جاذبه ی واندروالس ذرات می باشد. علاوه بر قدرت یونی، اندازه ذرات به طور قابل توجهی در نیروی دافعه الکترواستاتیک نفوذ دارد. ضخامت دو لایه از اندازه ذرات مستقل است. پس از آن، نسبت اندازه ذرات به ضخامت دو لایه کاهش می یابد و با افزایش اندازه ذرات، نیروی دافعه الکترواستاتیک کاهش می یابد.

با توجه به نتایج حاصل از این آزمایش به نظر می رسد، نیروهای دافعه به اندازه کافی بزرگ هستند ذرات استوبر و سیلیس گرمازا برای جلوگیری از انعقاد ذرات در سوسپانسیون KOH شرکت دارند.



شکل 6

اگر چه انحلال ذرات سیلیکا تحت شرایط داده شده در محلول KOH و در نتیجه رفتار لخته شدن آنها به طور کامل با نظریه DLVO ممکن نیست، اندازه توصیف شده از انعقاد با توجه به مشاهده شده مطابقت دارد که ذرات استوبر با اندازه 740 نانومتر لخته در تعلیق KOH است (روش در بخش 2.4، نشان داده نشده است). بنابراین، می توان نتیجه گرفت که مصالح گاز سیلیس (283 nm) ممکن است بیش از حد بزرگ باشند، در حالی که ذرات استوبر (242 نانومتر) و مصالح سیلیس گرمازا (197 nm) بیش از حد کوچک به نظر می رسند. به غیر از نظریه DLVO، برخی از نویسندگان پیشنهاد می کنند که ثبات لایه های دیگر از دو لایه تعیین ثبات

ذرات سیلیکا در سوسپانسیونهای آبی است. جنکینز و همکاران نشان می دهند که دافعه ذرات با افزایش مقدار گروه سیلانول پرتلند شده بر روی سطح سیلیکا افزایش یافته است. این گروه سیلانول جذب یونهای ضد حل شدنی می شوند و یک لایه در اطراف ذرات سیلیکا تشکیل می دهد. لایه ژل اسید پولی سالیک پیشنهاد شده توسط یاتس و هیلی (که قبلا در بخش 3.1 آمده است) نیز به شدت به مقدار مربوط گروه سیلانول سطح وابسته است. نتیجه گیری را می توان برای هر دو لایه بدست آورد که آگلومره از گاز سیلیس باید کمترین ثبات به سمت انعقاد در رسانه‌های قلیایی داشته باشد زیرا دارای کمترین مقدار گروه سیلانول است.

3.3 بحث واکنش پذیری سیلیکا در یک محیط سیمانی

خواص سیلیس باید برای ارزیابی اصلی اثرات سیلیس در واکنش پذیری هیدراتاسیون سیمان در نظر گرفته شود. تأثیر سطح ویژه از بارز ترین این دلایل است زیرا رابطه ی بین سیلیس جامد و انحلال منافذ را پیدا می کند. مقایسه‌ی شرط نواحی سطح ویژه BET اجازه می دهد تا برای رتبه بندی واکنش‌های زیر را داشته باشیم: سیلیس گرمازا < گازسیلیس \approx ذرات استوبر علاوه بر این نظر کاملا هندسی، شیمیایی ذاتی واکنش سطح سیلیکا نیز مهم است. دو واکنش متفاوت متوالی (مسیرهای I و II) باید رعایت شود: راه I انحلال سیلیکا (معادله (4)) و سپس در واکنش پوزولانی (معادله (8))، راه دوم) انحلال آلایت (معادله (6)) و هیدراتاسیون (معادله (5))، که در آن سیلیس مصرف نمی شود اما هسته ی فاز C-S-H بر روی سطح آن قرار دارد (بذر اثر).

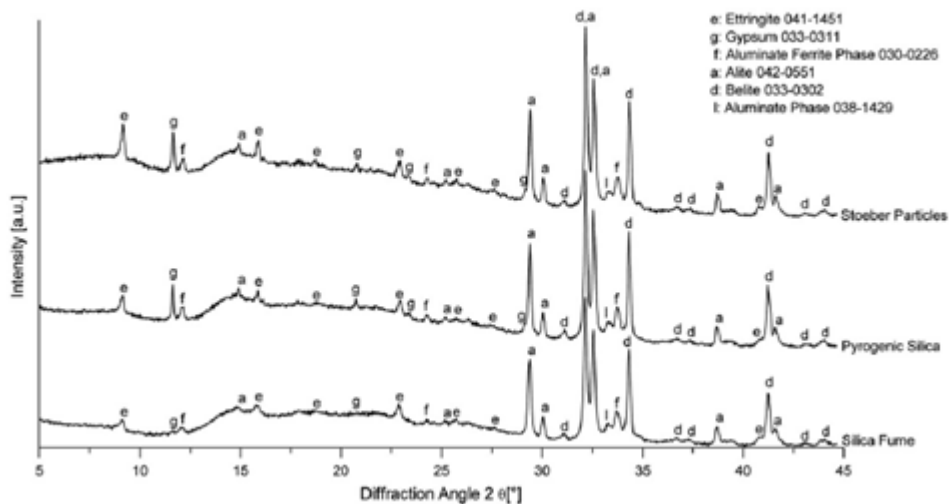
چگالی سطحی گروه سیلانول (بخش 3.1) برای مسیر تعیین کننده است به این دلیل که به طور قابل توجهی تحت تأثیر انحلال قرار می گیرد (در بخش 3.2 قبلا بحث شد) و جذب یون که احتمالا هسته ی فاز C-S-H را تحت تأثیر قرار می دهد. علاوه بر این، محتوای کل گروه سیلانول از یک ذره کل باید برای مسیر I در نظر گرفته شود. در نتیجه، ذرات استوبر باید تا حد واکنش پذیری، به دنبال سیلیس گرمازا و کمترین گاز سیلیس واکنش نشان دهند.

3.4 تحقیقات روی خمیر UHPC حاوی سیلیس

3.4.1 فاز جامد

مراحل خمیر UHPC کریستالی توسط آنالیز XRD در - جا ده دقیقه و 1 ساعت بعد از مخلوط کردن مشخص شد. الگوهای پراش برای هر دوزمان واکنش یکسان بود. بنابر این تنها الگوهای بعد از 1 ساعت در شکل 7 نشان

داده شده است. آلیت، بالیت، فاز فریت آلومینات و اترینگایت (تشکیل و پس از معادله (7)) در تمام خمیرها شناسایی شده اند. در حال حاضر سنگ گچ تمام نمونه‌ها از جمله پودر CEM I خشک (شکل 8) نشات داده شده است. علاوه بر این، به طور قابل توجهی شدت بالاتر از نقطه ی اوج (020) در 11.6 درجه سانتی در مقایسه با بازتاب (021) در 20.7 درجه سانتی در خمیر UHPC (شکل 9) مشاهده شد. چنین شدت نسبی فوق العاده ناشی از گرایش مورد نظر از کریستال است. نسبت توزیع شدت آماری کریستال گرا داده شده در -PDF 033 0311 یک گچ مورد نظر با گرایش [010] نشان می دهد. فرض بر این است که این جهت گیری بلورهای گچ نتایج FROMA رشد در امتداد فویل Kapton[®] است. این سازند را به اصطلاح گچ ثانویه که قبلا از bassanite حل شده بود و برای سیستم‌های سیمانی گزارش شده است.



شکل 7

T. Oertel et al. / Cement and Concrete Research 58 (2014) 131–142

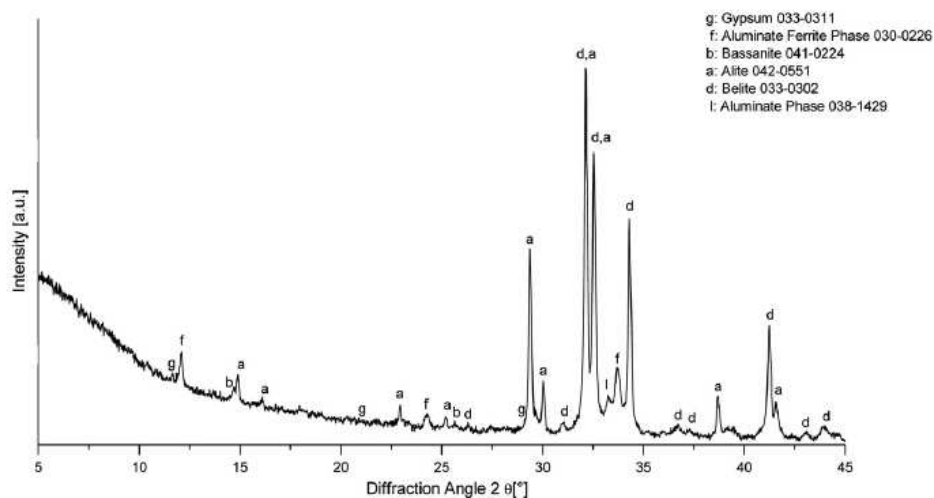


Fig. 8. XRD pattern of cement CEM I 52.5R HS/NA.

شکل 8

تصاویر SEM (شکل 10) نشان می دهد که در تمام ملات 1 ساعت بعد از مخلوط کردن آلیت دارای لبه های مستقیم و سطح صاف می شود. ذرات سیلیکا و کریستال اترینگایت ساختار غالب می باشد. گچ در خمیر با استوبر حاضر است و به رشد ذرات به نظر می رسد (شکل 11). ظاهر آن ممکن است با توجه به رشد ثانویه نشان داده شده با نتایج XRD موافق باشد. فاز C-S-H را شکل نمی دهد، حتی برای ذرات استوبر که در این مطالعه فرض می شود سیلیس فعال هستند (بخش 3.3 را ببینید). این نتیجه مربوط به مشاهدات انجام شده توسط فایفر و همکاران و Korpa و همکاران است که از عدم وجود فاز C-S-H به نسبت کند کردن (تاخیری) هیدراتاسیون فوق روان کننده است.

3.4.2 انحلال منافذ

یونهای Na⁺ و K⁺، CA₂، OH⁻، SO₄²⁻ و یونهای سیلیکات (به عنوان مثال H₃SiO₄⁻) خواهد بود به سرعت پس از افزودن آب به سیمان در محلول حل می شوند. آنها از سولفات قلیایی بسیار انحلال پذیر بر روی سطح کلینکر سیمان تشکیل می شوند (Na₂SO₄، K₂SO₄ و Na₂SO₄ · 3K₂SO₄)، عامل تنظیم (گچ، بیسینیت و انیدریت)، اکسید کلسیم و انحلال اولیه مواد معدنی کلینکر (عمدتا آلیت و فاز آلومینات) می باشد. شکل 12 نشان می دهد که غلظت یون و مقدار pH در انحلال منافذ از خمیر UHPC متفاوت است. نتایج تحلیلی به کل عنصر سدیم، پتاسیم، کلسیم، سولفات و سیلیکاتها اشاره دارد: غلظت، به عنوان نماینده تعیین شده است. در جزئیات، اندازه گیری گوگرد به احتمال زیاد به سولفات (SO₄²⁻) شبیه است. وقوع سیلیکاتهای مختلف بعدا در این بخش مورد بحث قرار خواهد گرفت. غلظت از Na، K و سولفات کمتر از حداکثر مقادیر ممکن (در میلی مول /لیتر : NA = 300، K = 350 و سولفات = 1190، مقدار احتمالی محاسبه شده از ترکیب تحلیلی آب /سیمان = 0.23 جرم) در تمام انحلال منافذ می باشد. مقدار مشخصی از سدیم و پتاسیم در مواد معدنی کلینکر آب دیده نشده محدود می باشد. غلظت سولفات توسط بارش از اترینگایت کاهش یافته است و نیز شناسایی XRD. Ca و سیلیکات ممکن است کنترل انحلال عوامل مقررات، آلیت و سیلیس صورت گیرد. مقدار pH اندازه گیری شده ی خمیر با مقدار مشابه مطابقت دارد. خمیر حاوی سیلیس گرمازا نشان دهنده ی غلظت کمی پایین تر برای همه عناصر اندازه گیری از نمونهها با گاز سیلیس است. شایان

ذکر است، در انحلال منافذ خمیر با ذرات استوبر، K و Na غلظت توسط یک عامل از مورد 3-10، سولفات رها حدود 1-10، در حالی که غلظت سیلیکات افزایش می یابد..

علاوه بر این، غلظت Ca در خمیر حاوی گاز سیلیس و ذرات استوبر به طور قابل توجهی بیشتر از غلظت اشباع های Ca^{2+} یون آهک (حدود 22 میلی مول / L) است. ممکن است فعل و انفعالات مختلف در فصل مشترک بین ذرات سیلیس و انحلال منافذ به نوع سیلیس وابسته باشد. فرضیات و نتایج در زیر مورد بحث قرار می گیرند.

برای یک فهم عمیق تر، فرآیندهای دقیق در سطح سیلیکا به در نظر گرفته می شود. همانطور که در مقدمه ذکر شد، به طور همزمان به انحلال سیلیس در رسانه عمومی (معادله (4))، سیلیکات الیگومریک گونه شکل می گیرد (معادله (2)) درجه این پلیمریزاسیون بستگی به مقدار pH و غلظت یون در انحلال دارد.

یون های Na^+ و K^+ بیشتر به شکل گیری کم مولکولی گونه های سیلیکات قلیایی منجر می شود (یون مونومر، دیمری یا تترامر، به عنوان مثال $(-Si(OH)_2O_2M^-$ و $(-Si(OH)_6O_6M^-$ with $Si_4(OH)_6O_6M^-$ = سدیم، K)، به اصطلاح الیگومر سیلیکات قلیایی مانند در انحلال های شیشه ای آب است. در نهایت، آنها را به یک ژل چگالش بیشتر منجر می شود. مکانیزم های مختلف برای این سازند پیشنهاد شد. محدوده ی سدیم و پتاسیم همچنین می تواند توسط کلسیم در الیگومر سیلیکات قلیایی جایگزین شود (به اصطلاح کلسیم الیگومر سیلیکات قلیایی) و احتمالاً ساختار کلسیم سیلیکات نزدیک به فاز C-S-H تشکیل می شود. داشتن درجه بندی در واکنش پذیری سیلیکا (بخش 3.3) و بحث تعامل یون Na^+ و K^+ و Ca^{2+} در ذهن، از نتایج تجزیه و تحلیل انحلال منافذ می توانند به عنوان نتایج از درک واکنش پذیری انحلال سیلیکا باشد. یونهای Na^+ و K^+ بلافاصله انحلال منافذ می شوند و ممکن است خیلی زود هنگام مخلوط کردن در سطح سیلیکا بار منفی را به خود جذب کنند. آنها از قلیایی سولفات که اثری از تولید سیمان و پوشش مواد معدنی کلینکر است سرچشمه می گیرند. یون Ca^{2+} تا حدودی بعد از وارد شدن حل می شود. که سولفات کلسیم سرعت انحلال کندتری نسبت به حل سولفات قلیایی دارد. پس از انحلال سولفات قلیایی، کلینکر مواد معدنی حل شده و یون های Ca^{2+} اضافی ارایه می شوند. یون Na^+ و K^+ و Ca^{2+} با یون سیلیکات محلول های قلیایی الیگومر سیلیکات، کلسیم الیگومر سیلیکات قلیایی و الیگومر کلسیم سیلیکات تعامل دارد. مقدار یون سیلیکات محلول و الیگومر بستگی به واکنش

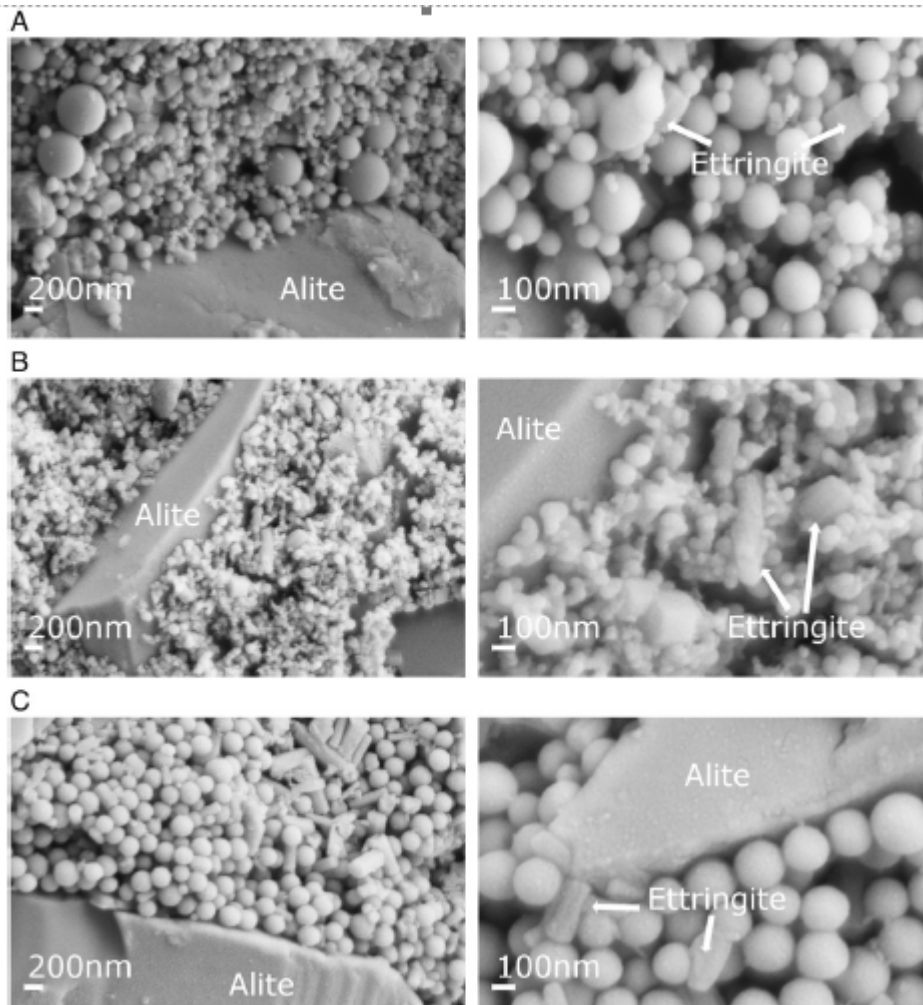
سیلیسی دارد که از تراکم گروه سیلانول سطح فرض و محتوای کل گروه سیلانول (بخش 3.3) بدست می آید.. به عنوان یک نتیجه، الیگومر سیلیکات قلیایی کمتر و کلسیم قلیایی الیگومر سیلیکات با گاز سیلیس تشکیل شده با حفظ مقدار کمتری کلسیم، سدیم، پتاسیم، K و سیلیکات در پس مانده سانتریفوژ باقی می ماند (شکل 12). این نتیجه با غلظت‌های بالاتر از این عناصر در حل منافذ درمورد خمیر حاوی گاز سیلیس موافق است.

4. نتیجه گیری

در این مطالعه، اثرانواع مختلفی از سیلیس (ذرات استوبر گازسیلیس و سیلیس گرمازا) در هیدراتاسیون خمیر UHPC در ساعت اول بررسی شد. دو واکنش مختلف متوالی برای سیلیس (مسیرهای I و II) را می توان در یک محیط سیمانی مشاهده کرد:

انحلال سیلیس توسط یک واکنش پوزولانی (مسیر I) و یا C-S-H دنبال عبارات از هیدراتاسیون آلیت در سطح آن (مسیر II). واکنش سیلیس با توجه خواص مختلف سیلیس مورد بحث قرار گرفت. چگالی سطحی گروه سیلانول، کل محتویات گروه سیلانول و حلالیت در تعلیق قلیایی نشان می دهد که ذرات استوبر باید تا حد زیادی واکنشی پذیرترین باشند، به دنبال سیلیس گرمازا و گازسیلیس کمتر واکنش نشان می دهند. رتبه بندی واکنش‌های مختلف به طور مسلم فرض شده است.

(سیلیس گرمازا < گاز سیلیس ≈ ذرات استوبر)

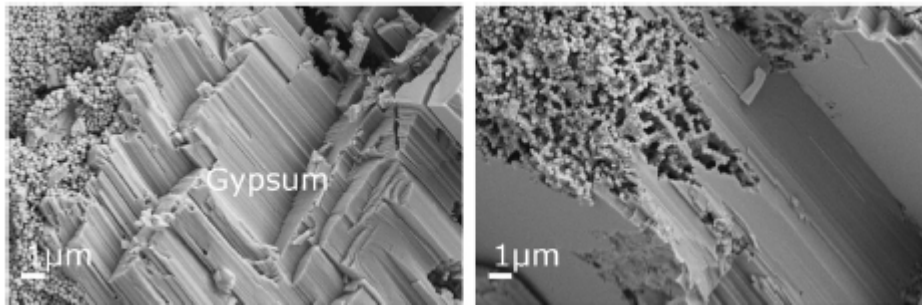


شکل 10

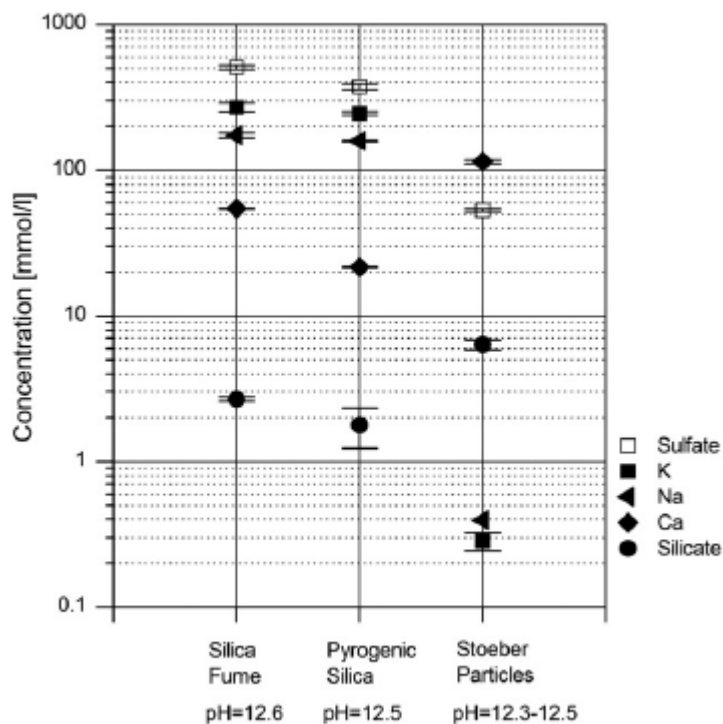
واکنش سیلیکا بیشتر در خمیر UHPC در ساعت اول از هیدراتاسیون با بررسی فازهای جامد و انحلال منافذ بررسی شد. نتایج به هیچ نشانه ای برای قرضیات رتبه بندی واکنش از سطح ویژه ی و یا به هر واکنش زیر مسیر I یا II اشاره نمی کند.

در عوض به نظر می رسد، ذرات سیلیکا تمایل به جذب کاتیون $(+Na)$ و K و (Ca^{2+}) از انحلال منافذ و به شکل الیگومر سیلیکات قلیایی و کلسیم الیگومر سیلیکات دارند. این الیگومر ممکن است به عنوان یک لایه در اطراف ذرات سیلیس و آب، فاز ژل آمورف تشکیل می دهد. فرض شده میزان اولیگومر شدن بستگی به واکنش سیلیکا از چگالی سطحی گروه سیلانول و محتوای کل گروه های سیلانول دارد. در واقع، به نظر می رسد به اندازه کافی خمیر با ذرات استور تقریبا همگی یون های قلیایی در الیگومر سیلیکات قلیایی متصل می شود. کاهش مربوطه به یونهای قلیایی در انحلال حفره ممکن است بر فرآیندهای پس از آن به دلیل سرعت بخشیدن به

یونهای قلیایی هیدراتاسیون آلیت تأثیر بگذارد. بنابراین، هیدراتاسیون آلیت در خمیر UHPC حاوی ذرات استوبر ممکن است به همان سرعتی که در خمیر UHPC حاوی سیلیس نباشد. مسیر واکنش I به احتمال زیاد به نظر می رسد برای ذرات استوبر برای سیلیس گرمازا کمتر HC واکنش و بخار سیلیس باشد. مطالعات بیشتر باید اثر واکنش پذیری سیلیس را برای مدت طولانی مشاهده به طور کامل روشن کند و نفوذ در هیدراتاسیون (مسیر I، II و یا هر دو) و خواص حاصل از UHPC را بررسی کند.



شکل 11



شکل 12