ویژگی‌های ملات سیمان دارای ذرات نانو سیلیس

مجید لطفی [*]، مصطفی زینلی، عباس رئوفی

۱- قوچان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قوچان، گروه مهندسی شیمی

پیام‌نگار: **malotfi@yahoo.com**

چکیده

اخیراً تولیدکنندگان سیمان دریافته‌اند که کاهش اندازه ذرات سیمان در مقیاس نانو، موجب تسریع در سفت شدن آن می‌شود. در این مقاله ویژگی ملاتهای سیمان دارای ذرات نانو سیلیس مورد تحقیق و مطالعه قرارگرفته است. سیلیس غیربلوری (آمورف) یا شیشه‌ای (عمده ترین بخش پوزولان) با هیدروکسیدکلسیم حاصل از هیدراتاسیون فازهای آلیت (C3S) و بلیت (C2S) سیمان واکنش می‌دهد. سرعت واکنش پوزولانی با مقدار سطح موجود برای واکنش متناسب است. بنابراین، می‌توان برای ساخت بتنهای دارای کارآیی بالا، از ذرات نانو سیلیس استفاده کرد. نتایج بدست آمده از آزمایشها نشان می‌دهند که مقاومت فشاری ملات دارای ذرات نانو سیلیس، بیشتر از ملات حاوی دوده سیلیسی در سنین ۷ و ۲۸ روزه است. روند هیدراتاسیون پیوسته مورد ارزیابی و کنترل قرار گرفته است که این کار با اسکن میکروسکپ الکترونی و مطالعه مقدار باقی مانده $Ca(OH)_2$ و سرعت گرم شدن، انجام شده است. با مطالعه بر روی تصاویر اسکن میکروسکپ الکترونی نیز به وضوح می‌توان دریافت که در ملات‌های حاوی مقادیر کم نانو سیلیس و میکرو سیلیس، ژل سیمان و ناحیه حد فاصل بین سنگدانه و ژل سیمان، در مقایسه با ملاتهای حاوی مقادیر بیشتر نانو سیلیس و میکرو سیلیس، دارای تخلخل بالاتری است.

کلمات کلیدی: نانو سیلیس، آبر روانساز (فوق روان‌کننده)، دوده سیلیسی، سیمان پرتلند معمولی، پوزولان

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، نانو تکنولوژی توجه بسیاری از دانشمندان را به خود جلب کرده است زیرا این علم توانایی استفاده از ذرات در اندازه نانو (10^{-9}) را در اختیار محققین قرار می‌دهد و بسیاری از صنایع می‌توانند مواد موجود را با استفاده از این ذرات تولید کرده و محصولات جدیدی بسازند. نانو تکنولوژی، توانمندی تولید مواد، ابزارها و سیستم‌های جدید با در دست گرفتن کنترل در سطح مولکولی و اتمی و استفاده از خواصی است که در آن سطوح ظاهر می‌شوند. در مورد استفاده از ذرات نانو در مصالح ساختمانی تحقیقات بسیار زیادی در سطح جهان انجام گرفته است. هدف نهایی از بررسی مواد در مقیاس نانو، یافتن طبقه جدیدی از مصالح ساختمانی با عملکرد بالاست که آنها را می‌توان به عنوان مصالح چند منظوره در نظر گرفت. منظور از عملکرد چند منظوره ظهور خواص جدید و متفاوت در مقایسه با خواص مواد معمولی است به گونه ای که مصالح بتوانند کاربردهای گوناگونی را ارائه نمایند.

هویی لی [۱] تحقیقاتی در مورد ملاتهای سیمانی با ذرات نانو سیلیس

یا نانو Fe_2O_3 انجام داده و ویژگیهای فیزیکی و مکانیکی آنها را بررسی کرده است. انستیتوی تحقیقاتی فوجی چیمرا در سال ۲۰۰۲ کاربردهای عملی نانو سیلیس را مورد بررسی قرار داد. اما تا به حال، تحقیقات انجام شده بیشتر برای دستیابی به کارآیی مکانیکی بالا از طریق جایگزینی مواد سیمانی با اندازه میکرو صورت گرفته است. لو و یانگ [۲] توانستند مقاومت فشاری[1] ۸۰۰MPa را در نمونه‌های تحت آزمایش بدست آورند.

ریچارد و چیرزی [۳] بتن‌هایی با توان واکنش پذیری[2] در بازهٔ ۲۰۰-۸۰۰MPa و انرژی شکافت تا ۴۰ KJ/m^2 ساختند. تولید بتنی با مقاومت بسیار بالا با کاربرد مواد زیر امکان پذیر است:

سیستم متراکم حاوی ذرات بسیار ریز و نرم همگن[3] و ابر روانساز و دوده سیلیسی.

هدف این مقاله، بررسی تاثیرات نانو سیلیس در ملات سیمان بوده است. سیلیس نا منظم یا شیشه ای که ماده اصلی پوزولان[4] بشمار می‌رود، با هیدروکسید کلسیم حاصل از هیدراتاسیون فازهای آلیت (C3S) و بلیت (C2S) سیمان، واکنش می‌دهد. سرعت این واکنش بستگی به مقدار سطح موجود برای آزمایش دارد. بنابراین می‌توان ذرات نانو سیلیس را با خلوص بالا (۹۹/۹٪) با مقدار نرمی (بلین) برابر ۶۰۰/۰۰۰ cm^2/g برای اصلاح ویژگیهای ملات سیمان بکار برد. نتایج این آزمایشها نشان می‌دهد که نانو سیلیس ها نه تنها می‌توانند به عنوان پر کننده برای اصلاح میکرو ساختارها بکار روند بلکه می‌توانند نقش فعال ساز واکنش پوزولانی را نیز داشته باشند. ذرات نانو سیلیس برای بهبود و اصلاح مقاومت بتن بیشتر از دوده سیلیسی ارزش دارند.

۲- مواد و مصالح

مواد سیمانی بکار رفته عبارتند از سیمان پرتلند معمولی، پودر دوده سیلیس و ذرات نانو سیلیس. ویژگیهای شیمیایی و فیزیکی آنها در جدول (۱) نشان داده شده است. SEM[5] و دیاگرام‌های انکسار اشعه ایکس (XRD)[6] مربوط به دوده سیلیس و نانو سیلیس در شکل‌های (۱) و (۲) نمایش داده شده اند.

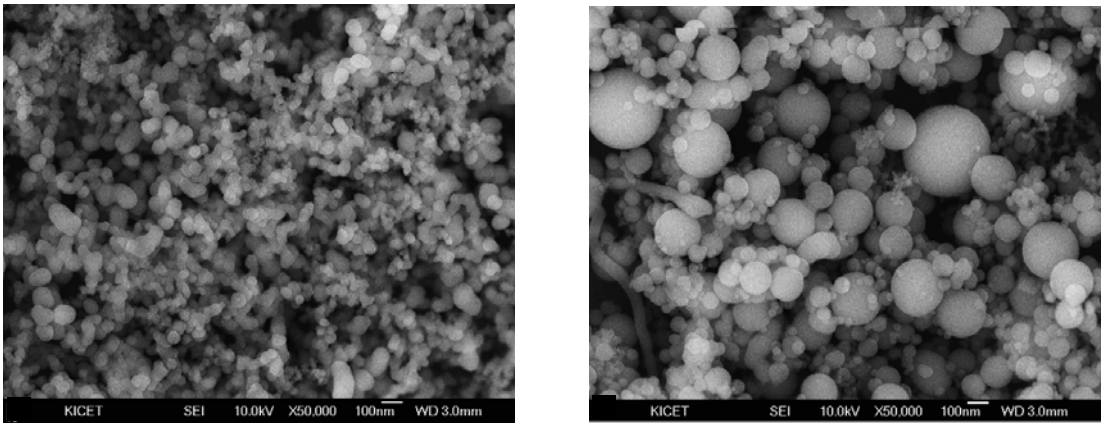
جدول ۱- ترکیبات شیمیایی و ویژگیهای فیزیکی مواد سیمانی با شناسائی مواد به کمک پرتو ایکس

		سیمان پرتلند معمولی	دودهٔ سیلیسی	نانو سیلیس
ویژگی‌های شیمیایی	دی اکسید سیلیسیم (SiO_2)	۲۲/۰	۹۵/۰	۹۹/۹
	اکسید آلومینیم (Al_2O_3)	۶/۶	۰/۹	-
	اکسید آهن (Fe_2O_3)	۲/۸	۰/۶	-
	اکسید کلسیم (CaO)	۶۰/۱	۰/۳	-
	اکسید منیزیم (MgO)	۳/۳	۰/۹	-
	تری اکسید گوگرد (SO_3)	۲/۱	۰/۵	-
	اتلاف حرارتی (LOI)	۲/۶	۲/۱	۰/۱
ویژگی‌های فیزیکی	چگالی (دانسیته)	۳/۱۵	۲/۳۳	-
	متوسط اندازه ذرات	۱۳ µm	۰/۱ µm	۴۰ nm
	نرمی (Blaine) (cm^2/gr)	۳۸۰۰	۲۰۰/۰۰۰	۶۰۰/۰۰۰

1. Compressive Strength
2. Reactive Power Concretes (RPC)
3. Densified System Particles (DSP)

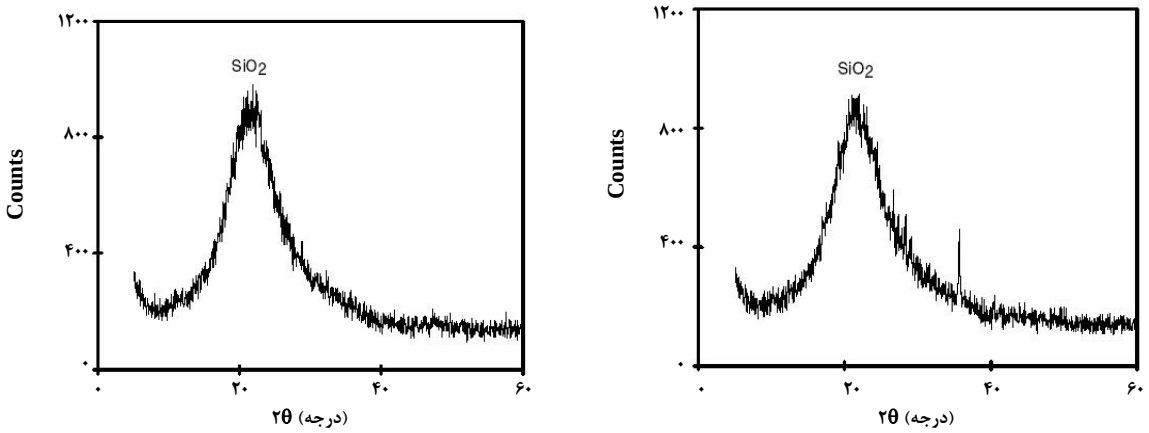
۴. نوعی خاکستر آتشفشانی متخلخل که در ترکیب با سیمان، به ماده سختی تبدیل می‌شود.

5. Scanning Electron Micrograph
6. X Ray Diffraction



(ب) (الف)

شکل ۱- تصاویر میکروسکپ الکترونی (الف) دوده سیلیسی و (ب) نانو سیلیس



(ب) (الف)

شکل ۲- دیاگرام‌های تابش پرتو x (الف) دوده سیلیس (ب) نانو سیلیس

۲-۱ دودهٔ سیلیس

اضافه کردن مواد نرم به سیمان روشی است که امروزه کاربرد زیادی دارد دوده سیلیسی را می توان به عنوان جایگزینی برای سیمان یا به عنوان یک ماده افزودنی در مواقع خاص بکاربرد. مقدار زیاد سیلیس (SiO_2) یکی از ویژگیهایی است که معمولاً مشخص می‌شود. به همین خاطر، دوده سیلیسی بکاررفته به شکل پودر حاوی ۹۵ درصد SiO_2 با ذرات به اندازه ۰/۱ میکرومتر و نرمی ۲۰۰۰۰۰ سانتی مترمربع بر گرم با بستر متخلخل ۰/۵ بوده است.

۲-۲ نانو سیلیس

خمیر سیمان از مواد زیر تشکیل می‌شود:

- ذرات ریز ژل سیلیکات کلسیم هیدراته
- سوراخهایی در ابعاد نانو
- منافذ مویینه[1]
- کریستالهای بزرگ مواد هیدراته

1. Capillary Pores

بنابراین باید فضایی برای مواد نانو وجود داشته باشد تا ذرات آن بتوانند منافذ خمیر سیمان را پرکنند. سیلیس غیربلوری یا شیشه ای در ابعاد نانو به عنوان پوزولان با هیدروکسید کلسیم حاصل از هیدراتاسیون فازهای آلیت (C3S) و بلیت (C2S) واکنش می‌دهد. سرعت واکنش پوزولان بستگی به نرمی آن دارد. بنابراین نانو سیلیس بکار رفته حاوی ۹۹/۹ درصد سیلیس و ذرّاتی به ابعاد ۴۰ نانومتر و نرمی ۶۰۰/۰۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم بوده است.

۲-۳ ابر روانساز[1]

این ماده، یک پلی کربوکسیلات تولید شده توسط شرکت کره ای اکونیست با چگالی ۱/۰۶ است که با همه ترکیبات مخلوط می‌شود. مقدار آن برای هر مخلوط باید تنظیم شود و هیچگونه تفکیکی نباید بوجود آید.

۲-۴ مصالح ریز

برای ساخت ملات[2]، سیمان و ماسه[3] دانه بندی شده اوتاوا با اندازهٔ حداکثر ۴/۷۶ میلی متر (in ۳/۱۶) را به نسبت ۱ به ۲/۴۵ ترکیب می‌کنند. چگالی ماسهٔ منظم ۲/۶، مدول نرمی آن ۲/۷، و جذب آب آن ٪۱/۵ است. ماسه براساس ASTM C33 [۹] درجه بندی شده است. برای ایجاد محیط اشباع، مقداری آب به مخلوط اضافه شده است.

۲-۵ ویژگی‌های مخلوط

جزئیات مربوط به ویژگیهای ملات حاوی دودهٔ سیلیس و نانو سیلیس در جدول (۲) آورده شده است. نسبت آب به سیمان ۰/۵ است و چهار نوع ملات با افزودن ۳، ۶، ۱۰ و ۱۲ درصد وزنی نانو سیلیس به سیمان تهیه شد. مقاومت ملات سیمان حاوی دوده سیلیس در برابر فشار در نسبت آب به سیمان ۰/۵ نیز اندازه‌گیری شده است تا بتوان آن را با ملات حاوی ذرات نانو سیلیس مقایسه کرد. ملات سیمان شامل ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی دودهٔ سیلیس نیز می‌باشد. مقدار مادهٔ ابر روانساز نیز به عنوان درصدی از وزن مواد سیمانی نشان داده شده است و این مواد با توجه به تاثیر مقادیر مختلف دودهٔ سیلیس و ذرات نانو تنظیم شده اند.

جدول ۲- نسبت ترکیبات نمونه‌های مورد آزمون

نام نمونه	درصد وزنی (w/cm)	آب (gr)	سیمان (gr)	ماسه (gr)	دودهٔ سیلیس (gr)	نانو سیلیس (gr)	درصد ابر روانساز
سیمان پرتلند معمولی	۵۰	۱۲۸	۲۵۵/۰	۶۲۵/۰	-	-	۱/۲
ملات سیمان شامل دوده سیلیس ٪۵	۵۰	۱۲۸	۲۴۲/۸	۶۲۵/۰	۱۲/۲	-	۱/۹
ملات سیمان شامل دوده سیلیس ٪۱۰	۵۰	۱۲۸	۲۳۱/۸	۶۲۵/۰	۲۳/۲	-	۲/۱
ملات سیمان شامل دوده سیلیس ٪۱۵	۵۰	۱۲۸	۲۲۱/۷	۶۲۵/۰	۳۳/۳	-	۲/۲
ملات سیمان شامل نانو سیلیس ٪۳	۵۰	۱۲۸	۲۴۷/۵	۶۲۵/۰	-	۷/۵	۱/۸
ملات سیمان شامل نانو سیلیس ٪۶	۵۰	۱۲۸	۲۴۰/۶	۶۲۵/۰	-	۱۴/۴	۲/۴
ملات سیمان شامل نانو سیلیس ٪۱۰	۵۰	۱۲۸	۲۳۱/۸	۶۲۵/۰	-	۲۳/۲	۲/۹
ملات سیمان شامل نانو سیلیس ٪۱۲	۵۰	۱۲۸	۲۲۷/۷	۶۲۵/۰	-	۲۷/۳	۳/۳

1. Super Plasticizer
2. Mortar
3. Sand

۲-۶ روش آزمون

ملات سیمان در یک مخلوط کن مخلوط می‌شود. ذرات نانو را نمی‌توان به خاطر داشتن انرژی سطحی بالا به راحتی بصورت نا منظم پراکنده کرد. به همین دلیل، عمل مخلوط کردن مواد به صورت زیر انجام می‌گیرد:

۱. ذرات نانو سیلیس با آب و با سرعت بالا (۱۲۰ rpm) به مدت یک دقیقه هم زده می‌شوند.
۲. سیمان و دوده سیلیس به مخلوط کن اضافه شده و مخلوط‌کن با سرعت متوسط (۸۰ rpm) به مدت ۳۰ ثانیه می‌چرخد.
۳. ماسه در هنگام اختلاط در سرعت متوسط به تدریج به مواد اضافه می‌شود.
۴. در این مرحله مادّهٔ ابر روانساز اضافه می‌شود و مخلوط‌کن با سرعت بالا به مدت ۳۰ ثانیه می‌چرخد.
۵. مخلوط حاصل، به مدت ۹۰ ثانیه بی حرکت باقی می‌ماند و آنگاه به مدت ۱ دقیقه با سرعت بالا دوباره مخلوط می‌شود.

۳- نتایج و بحث

۳-۱ مقاومت فشاری

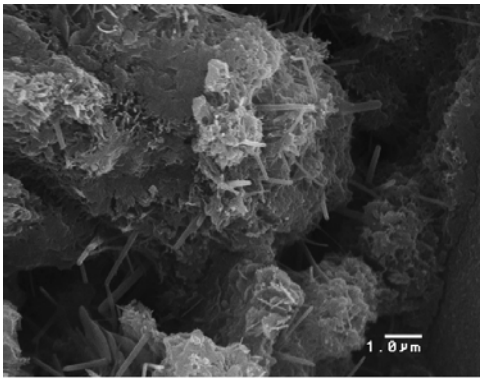
مقاومت فشاری پس از ۷ روز و ۲۸ روز در جدول (۳) نشان داده شده است. مقاومت فشاری در ملات حاوی ذرات نانو سیلس در هر مورد بیشتر از ملات کنترلی است. اختلاف مقاومت مذکور می‌تواند ناشی از واکنش پوزولانی باشد. ذرات نانو در واکنش پوزولانی مؤثرتر از دودهٔ سیلیس هستند. همچنین ذرات نانو سیلیس منافذ را پر می‌کنند و مقاومت ملات را افزایش می‌دهند. بنابراین مشخص می‌شود که اضافه کردن نانو سیلیس به ملات سیمان می‌تواند خصوصیات مقاومتی آن را افزایش دهد که این مقدار از ۳ تا ۱۲ درصد است.

۳-۲ میکروساختارها

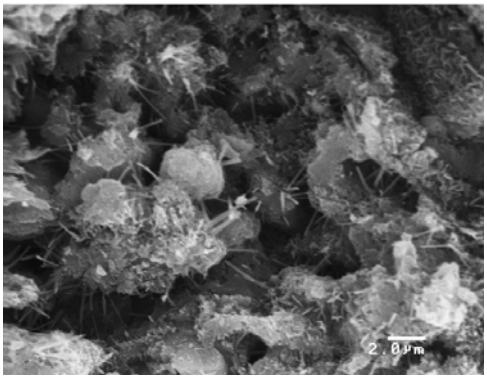
برای تعیین مکانیزم پیش‌بینی شده توسط آزمون مقاومت فشاری، آزمایشهای اسکن میکروسکپ الکترونی انجام می‌شود. افزودن ذرات نانو سیلیس بر هیدراتاسیون تاثیر می‌کند و منجر به ایجاد اختلافاتی در میکرو ساختار خمیر سیمان می‌شود. شکل‌های (۳) و (۴) تصاویر اسکن میکروسکپ الکترونی خمیر سیمان بدون ذرات نانو و با ذرات نانو را در ۷ روز نشان می‌دهند. به عبارت دیگر، میکرو ساختار مخلوط حاوی نانو سیلیس، شکلی فشرده و متراکم از مواد هیدراتاسیون و تعداد کریستالهای $Ca(OH)_2$ را نشان می‌دهد.

جدول ۳- نتایج مقاومت فشاری (MPa)

نمونه	۷ روزه	۲۸ روزه
ملات سیمان پرتلند معمولی	۱۸/۳	۲۵/۶
ملات دارای دوده سیلیس ٪۵	۲۲/۵	۳۵/۱
ملات دارای دوده سیلیس ٪۱۰	۲۴/۷	۳۷/۴
ملات دارای دوده سیلیس ٪۱۵	۲۶/۱	۳۸/۰
ملات دارای نانو سیلیس ٪۳	۳۹/۵	۵۴/۳
ملات دارای نانو سیلیس ٪۶	۴۶/۱	۶۱/۹
ملات دارای نانو سیلیس ٪۱۰	۴۹/۳	۶۸/۲
ملات دارای نانو سیلیس ٪۱۲	۵۰/۷	۶۸/۸

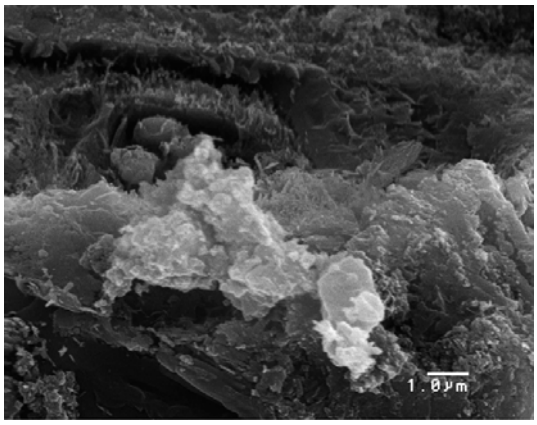


(الف)

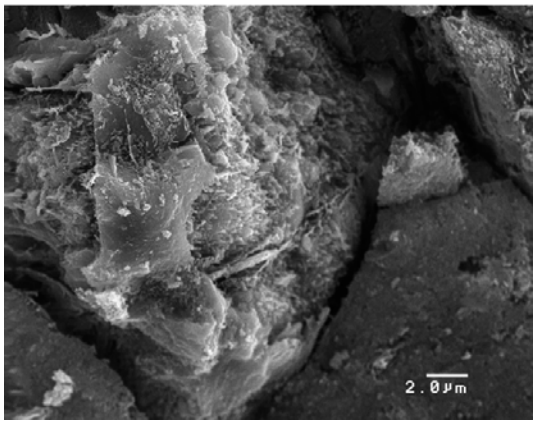


(ب)

شکل ۳- تصاویر اسکن میکروسکپ الکترونی خمیر بدون ذرات نانو سیلیس (الف) ۱۰۰۰۰ و (ب) ۵۰۰۰



(الف)



(ب)

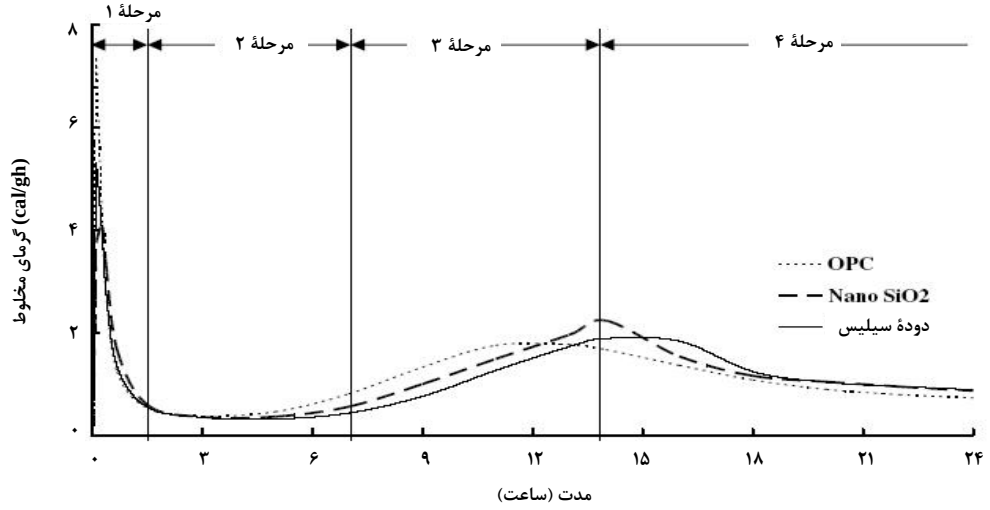
شکل ۴- تصاویر اسکن میکروسکپ الکترونی خمیر حاوی ذرات نانو سیلیس (الف) ۱۰۰۰۰ و (ب) ۵۰۰۰

۳-۳ میزان افزایش گرما

نرمی مواد در میزان افزایش گرما تاثیر بسیار دارد. سیمان نرم می‌تواند سرعت هیدراتاسیون را افزایش دهد. گرمای هیدراتاسیون را می‌توان بصورت مقداری از گرما که در تنظیم و سخت شدن ماده نقش دارد تعریف کرد.

مقدار گرمای مخلوط‌های مختلف در ۷۲ ساعت مطابق منحنی شکل (۵) و نتایج جدول (۴) است:

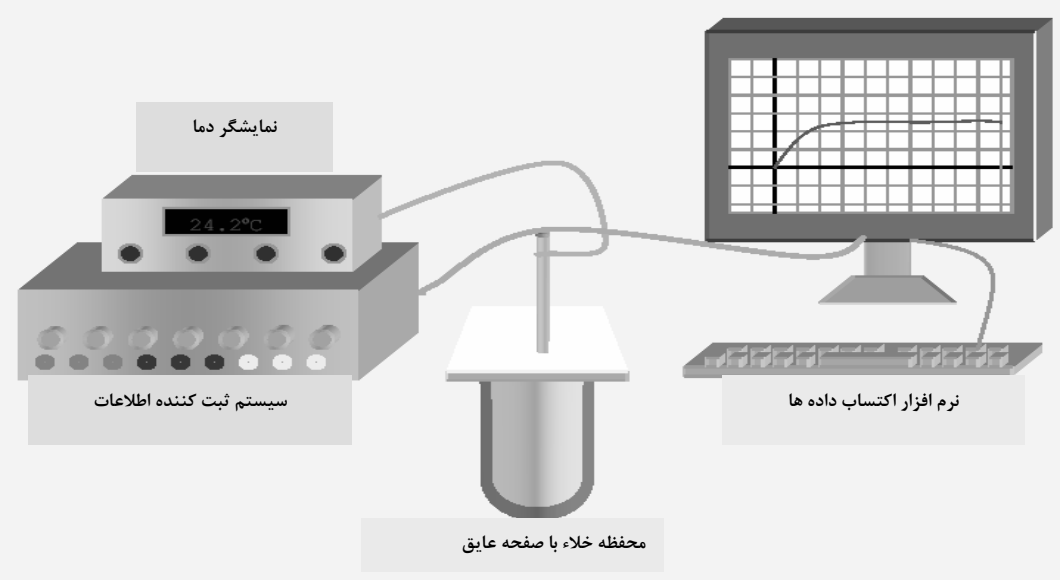
این نتایج نشان می‌دهند که اضافه کردن نانو سیلیس می‌تواند مقدار گرمای سیمان را در طول گیرش و سخت شدن زیاد کند. اگر چه مقدار زیادتر از معمول مادهٔ ابر روانساز هیدراتاسیون خمیر سیمان حاوی ذرات نانو سیلیس را کند می‌کند، برای سرعت گرفتن هیدراتاسیون و واکنش پوزولانی باید به درجهٔ حرارت توجه زیادی نشان داد. تجهیزات مورد نیاز در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۵- منحنی گرمای واکنش

جدول ۴- گرمای هیدراتاسیون مخلوطهای تهیه شده با دوده سیلیس و نانو سیلیس

نمونه	گرمای مخلوط در۷۲ساعت (ژول برگرم)
ملات سیمان پرتلند معمولی	۲۳۱/۱
ملات سیمان دارای دوده سیلیس ٪ ۱۰	۲۳۵/۷
ملات سیمان دارای نانو سیلیس ٪ ۱۰	۲۴۵/۵



شکل ۶- تجهیزات آزمون هیدراتاسیون (آبپوشی)

۳-۴ مقدار باقی مانده هیدروکسید کلسیم

سرعت واکنش پوزولانی را می‌توان با نظارت و کنترل کاهش هیدروکسید کلسیم، مشخص کرد.

سیلیس نا منظم یا شیشه ای با هیدروکسید کلسیم حاصل از هیدراتاسیون فازهای آلیت (C3S) و بلیت (C2S) سیمان واکنش می‌دهد و سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) تولید می‌کند. با آنالیزهای انجام شده در ۷ روز، مقدار $Ca(OH)_2$ باقیمانده در خمیر مطابق مقادیر جدول (۵) است:

تأثیر عمده واکنش پوزولانی، افزایش مقاومت و ایجاد سوراخ هایی با اندازه کوچکتر است.

جدول ۵- مقدار درصد باقیمانده $Ca(OH)_2$

نمونه	درصد $Ca(OH)_2$ باقیمانده
ملات سیمان پرتلند معمولی	۸/۸۹
ملات دارای دوده سیلیس ٪۱۰	۶/۰۹
ملات دارای نانو سیلیس ٪۱۰	۴/۰۶

۳-۵ اسکن میکروسکپ الکترونی

اسکن میکروسکپی الکترون، نوعی میکروسکپ است که از پرتو الکترونی برای اسکن کردن شئی و تولید تصاویر بزرگ از آن در یک لوله کاتدی استفاده می‌کند. این روش، مشکلات ناشی از عمق مسائل میدانی را نیز ندارد. عکس‌های اسکن میکروسکپی الکترون توسط میکروسکپ الکترونی مدل JSM 7400F مطابق شکل (۷) و دستگاه اسپوترینگ مطابق شکل (۸) برداشته شدند. شتاب ولتاژ ۲keV و مسافت کاری ۸/۲ mm به کار برده شد. آنالیز انرژی تفرق پرتو ایکس در شتاب ولتاژ ۱۸keV انجام شد. ۱/۲۸k-counts/s با ٪۳۵±۳ زمان مرده در طی اکتساب از ترکیب اتمی مشاهده شد. قبل از تصویربرداری برای افزایش و بهبود قابلیت رسانایی سطحی، نمونه ها با طلا کنار گذاشته شدند.

جدول ۶- روش‌های آزمون [۱۰-۱۷]

عنوان	روش آزمون
روانی ملات ها	۱۰±۵mm (استاندارد ۳۱۱ ASTM-C)
اندازه نمونهٔ استحکام فشاری	۵۰ ×۵۰ ×۵۰ میلی متر (ASTM – C 109)
ترتیب مخلوط کردن مواد	سیمان + نانو سیلیس + آب مقطر + ماسه استاندارد اوتاوا (ASTM – C 109) , (ASTM – C 311)
شرایط نگهداری	(ASTM – C 511) 23ºC ± 1.7
گرمای واکنش	مطابق جدول (۴) در متن

شکل ۷- اسکنر میکروسکپ الکترونی

شکل ۸- دستگاه اسپوترینگ

۴- نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج آزمون مقاومت فشاری، انتظار می‌رود که بتوان از ذرات نانو سیلیس در موارد زیر استفاده کرد:

- پرکننده و اصلاح کنندهٔ میکرو ساختارهای ملات سیمانی
- به عنوان ارتقا دهندهٔ واکنش پوزولانی
- نانو سیلیس معلق کاربردهای چند منظوره از خود نشان می‌دهد مانند: خاصیت ضد سایش - ضد لغزش، ضد حریق، ضد انعکاس سطوح.
- نمونه‌های حاوی میکرو سیلیس و نانو سیلیس، در مقایسه با ملات سیمان بدون این مواد، دارای خواص مکانیکی و شیمیایی به مراتب بالاتری می‌باشند.
- کاهش در اندازه ذرّه می‌تواند باعث شود که سیمان با سرعت بیشتری سفت گردد که در نتیجه به قوی تر شدن نیروی الکترواستاتیک و بزرگتر شدن سطح ویژه خواهد انجامید.

مراجع

[1] Li Hui, Xiao Hui-gang, Yuan Jie, Ou Jinping. "Microstructure of Cement mortar with Nano-particles". Composites Part B: Engineering, 35(March), (2003).

[2] Lu P, Young JF. Hot pressed DSP cement paste, Material Research Society Symposium Proceedings, 245, (1992).

[3] Richard P, Cheyrezy M. Reactive powder concretes with high ductility and 200- 800 MPa compressive strength, San Francisco: ACI Spring Convention, SP 144–24, (1994).

[4] S.Hanehara, M.Ichikawa.Nanotechnology of cement and Concrete. Journal of the Taiheiyo Cement Corporation, 141:47-58, (2001).

[5] www.ce.udel.e.du

[۶] عباس طائب، فرشته کوهی، سیمان، انتشارات مرکز تحقیقات سیمان دانشگاه علم وصنعت، (۱۳۷۴).

[۷] محمدرضا عزیزیان، سیمان‌های پوزولانی و آلومینی، (۱۳۷۱).

[۸] نانو تکنولوژی، آیینه تکنولوژی آفرینش، دفتر همکاری‌های فن آوری ریاست جمهوری کمیته مطالعات سیاست نانو تکنولوژی.

[9] ASTM C 33, Standard Specification for Concrete Aggregates, (2000).

[10] ASTM C 109, Standard Test Methods for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 50mm Cube Specimens), (2000).

[11] ASTM C 150, Standard Test Methods for Portland Cement, (2000).

[12] ASTM C 151, Standard Test Methods for Autoclave Expansion of Portland Cement, (2000).

[13] ASTM C 191, Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle, (2000).

[14] ASTM C 204, Standard Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus, (2000).

[15] ASTM C 311, Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete, (2000).

[16] ASTM C 511, Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes, (2000).

[17] ASTM C 618, Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, (2000).