

مقایسه اثرات نانو سیلیس و دوده سیلیس بر روی ریزساختار و دوام نمونه‌های بتنی

علی اکبر رمضانیان‌پور^۱؛ سید مسعود مروج جهرمی^۲؛ مهدی مهدی خانی^۳*؛ فرامرز مودی^۴

چکیده

فناوری نانو در سال‌های اخیر سبب تحولات وسیعی در دانش بشری شده است و محققین علوم مختلف از آن بهره گرفته‌اند. نانو ذرات به دلیل ویژگی‌های خاص فیزیکی و شیمیایی در بسیاری از زمینه‌ها برای ساخت مواد جدید با قابلیت‌های منحصر به فرد به کار می‌روند. از این رو استفاده از نانو سیلیس به عنوان یکی از محصولات فناوری نانو که می‌تواند نقش یک پوزولان مصنوعی بسیار فعال را در بتن ایفا نماید، مورد توجه قرار گرفته است. در این حال پیشرفت‌های اخیر در زمینه فناوری مصالح ساختمانی، امکان استفاده از نانو سیلیس کلونیدی را فراهم نموده است. در این مطالعه آزمایشگاهی، به بررسی خواص مکانیکی و دوامی بتن‌های حاوی نانو سیلیس و دوده سیلیس یا آزمایش-هایی مانند مقاومت فشاری، نفوذ و جذب آب، نفوذ تسریع شده یون کلراید و مقاومت الکتریکی بتن پرداخته شده است. به علاوه، جهت مطالعه ریزساختار خمیر سیمان حاوی دوده سیلیس و نانو سیلیس نیز از آزمایش‌های طیف‌سنجی تفرق اشعه ایکس و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شده است. نتایج تحقیق نشان دهنده افزایش مقاومت فشاری با افزایش نانو سیلیس (۳۷٪ افزایش مقاومت ۳ روزه با افزودن ۷/۵٪ نانو سیلیس) هستند. همچنین نانو سیلیس اثر بیشتری در کاهش نفوذپذیری بتن در مقابل آب و یون کلراید و افزایش مقاومت الکتریکی بتن (۶۸٪ بهبود مقاومت در برابر یون کلراید و ۵۶٪ افزایش مقاومت الکتریکی در سن ۲۸ روز با افزایش ۷/۵ درصد نانو سیلیس) در مقایسه با دوده سیلیس به خصوص در سنین اولیه دارد.

کلمات کلیدی

نانو سیلیس، دوده سیلیس، خصوصیات مکانیکی، ریزساختار، دوام

Comparative Study on Microstructure and Durability of Concretes Containing Nano Silica and Silica Fume

Ali Akbar Ramezaniapour; Seyed Masoud Moravej Jahromi; Mahdi Mahdikhani and Faramarz Moodi

ABSTRACT

Recently, Nanotechnology has caused a vast breakthrough worldwide and scientists in different fields have used it. Nano particles have been gaining increasing attention and been applied in many fields to fabricate new material with novel function due to their unique physical and chemical properties. Therefore, using Nano-silica as a Nano-scale additive in concrete is under further inspection by researchers. Recent contribution to the development of building materials compromise adding colloidal Nano-silica to concrete. In this paper, the influence of Nano-silica addition on mechanical and durability properties of concrete as compared with silica fume has been studied. Tests include compressive strength,

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۸/۹/۹

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۹۰/۷/۹

^۱ استاد؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر و رئیس مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست،

aramce@aut.ac.ir

^۲ کارشناس ارشد؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، sm_moravej@aut.ac.ir

^۳ نویسنده مسئول و دانشجوی دکتری؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، mahdikhani@aut.ac.ir

^۴ استادیار؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، fmoodi@aut.ac.ir

water permeability, rapid chloride penetration and electrical resistance test. Moreover, microstructure of the cement paste incorporating Nano-silica and Silica-fume were studied through X-ray diffraction and Scanning electron microscope tests. The experimental results show that Nano-silica as an artificial pozzolanic material can improve the compressive strength, water penetration resistance and electrical resistivity of concrete and reduce the chloride diffusion more effectively than SF at early ages. In addition, utilizing NS in cement paste improve its microstructure at early days.

KEYWORDS

Nano Silica, Silica Fume, Mechanical properties, Microstructure, Durability

۱- مقدمه

از جمله مواردی که در سال‌های اخیر امیدهای بسیاری برای بهبود خواص مختلف در جهان پدید آورده است، استفاده از فناوری نانو است. در سال‌های اخیر، با ورود فناوری نانو دیدگاه‌های جدیدی در زمینه فناوری بتن ایجاد شده است. از جمله می‌توان به بهبود دانش و درک فیزیکی و شیمیایی واکنش‌ها و ریز ساختار بتن و نیز بهبود کیفیت بتن‌های موجود و روش‌های اجرایی مرتبط با آن با استفاده از مواد جدید در مقیاس نانو یا همان نانو ذرات اشاره نمود.

طبق تعریف، نانو ذره به ذره‌ای گفته می‌شود که حداقل یکی از ابعاد آن‌ها کمتر از ۱۰۰ نانومتر باشد. با توجه به ریز ساختار سیمان هیدراته شده و وجود حفراتی در ابعاد نانو در آن، استفاده از نانو ذرات می‌تواند در پر نمودن تخلخل‌های بسیار ریز خمیر سیمان و افزایش مقاومت و بخصوص دوام بتن، مؤثر باشد. یکی از موارد جالب توجه در این زمینه، نانو اکسید سیلیسیم (نانو سیلیس) است. تحقیقات نشان می‌دهند که میزان لازم این ماده برای رسیدن به اثر مشابه دوده سیلیس بسیار کمتر است و این موضوع از جنبه‌های مختلفی باعث مزیت نسبی در استفاده از نانو سیلیس شده است. در ترکیب سیمان به همراه آب، پیوند Si-O دوده سیلیس به خاطر انرژی پیوندی بالای آن به راحتی شکسته نمی‌شود و واکنش مرحله اول دوده سیلیس کندتر از واکنش مرحله اول نانوسیلیس است. بنابراین نانوسیلیس می‌تواند فرایند گیرش و هیدراتاسیون را تسریع نماید. بنابراین وجود نانوسیلیس می‌تواند استحکام فشاری خمیر سخت شده سیمان و استحکام پیوندی سنگدانه با خمیر را افزایش داده و ساختار ناحیه انتقال را به طور مؤثرتری نسبت به دوده سیلیس بهبود بخشد [۱].

با توجه به اثرات استفاده از نانو سیلیس در بتن، از جمله بهبود ریزساختار، کاهش نفوذپذیری، کاهش اندازه حفرات خالی و افزایش مقاومت فشاری، می‌توان استدلال نمود که استفاده از نانو سیلیس در بتن سرعت نفوذ یون کلرید را در آن

کاهش می‌دهد. نتایج تحقیقات انجام شده توسط کلوپاردی و همکاران این مسأله را تایید می‌کند [۲]. در تحقیقات کینگ و همکارانش بر روی اثر افزایش نانو ذرات سیلیکا بر روی خواص خمیر سیمان سخت شده در مقایسه با دوده سیلیس، به بررسی نحوه واکنش این مواد در خمیر سیمان پرداخته شده است. آنها نشان دادند که ذرات نانو سیلیس واکنش‌پذیری بالاتری در مقایسه با دوده سیلیس دارد [۱]. لی نشان داد که در بتن‌های حاوی خاکستر بادی و نانو سیلیس مقاومت، بیش از بتن‌های حاوی خاکستر بادی و یا بتن‌های معمولی خواهد بود [۳]. در تحقیقی که در کشور کره جنوبی انجام شد [۴] ویژگی‌هایی را که ملات سیمان حاوی نانو ذرات سیلیس دارد مورد بررسی و آزمایش قرار داده‌اند. نتایج این مطالعه آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مقاومت‌های فشاری همه ملات‌ها با ذرات نانو سیلیس بالاتر از ملات‌هایی بوده است که حاوی دوده سیلیس در سنین ۷ و ۲۸ روز بودند. بنابراین ثابت می‌شود که نانو ذرات، در افزایش مقاومت نسبت به دوده سیلیس مؤثرتر هستند. بر اساس مطالعه دیگری که در چین بر روی اثر نانو ذرات بر روی مقاومت خمشی و فشاری ملات سیمان انجام شده است [۵]، افزودن نانو ذرات سیلیس به ملات سیمان باعث بهبود مقاومت فشاری و خمشی ملات نسبت به ملات معمولی شده است. در آزمایش‌های انجام شده توسط جی نمونه‌هایی از بتن حاوی خاکستر بادی تنها و نمونه‌هایی حاوی خاکستر بادی به همراه نانو سیلیس ساخته و میزان نفوذپذیری آنها در مقابل آب را اندازه‌گیری نمود [۶]. نتایج آزمایش‌ها رشد قابل توجهی در مقاومت بتن‌های حاوی نانو سیلیس در برابر نفوذ آب را نشان می‌دهد.

هدف این تحقیق بررسی اثر افزودن نانو سیلیس به ترکیب سنتی بتن و مقایسه آن با دوده سیلیس است. تاکید این مقاله بیشتر بر عوامل خواص مکانیکی و نفوذپذیری بتن بوده و برای این منظور در برنامه مطالعات آزمایشگاهی آن از آزمایش‌هایی مانند مقاومت فشاری، نفوذپذیری و جذب آب، نفوذ تسریع شده یون کلرید، جذب آب موئینه و مقاومت الکتریکی نمونه های بتنی



| | | |
|------|------|--------------------------------|
| ۲/۸۷ | ۰/۳۱ | Al ₂ O ₃ |
| ۲/۶۵ | ۰/۶ | Fe ₂ O ₃ |
| ۶۱/۶ | ۰/۳۶ | CaO |
| ۳/۹۵ | ۰/۷۸ | MgO |
| ۰/۱۲ | ۰/۲۲ | Na ₂ O |
| — | ۰/۲۳ | SO ₃ |
| ۲/۲۸ | ۱/۷۷ | LOI |

استفاده شده است. علاوه بر این، برای بررسی دقیق‌تر اثرات نانو سیلیس بر ریزساختار بتن از آزمایش‌های پراش اشعه ایکس و میکروسکوپ الکترونی روبشی برای نمونه‌های خمیر سیمان نیز استفاده شده است.

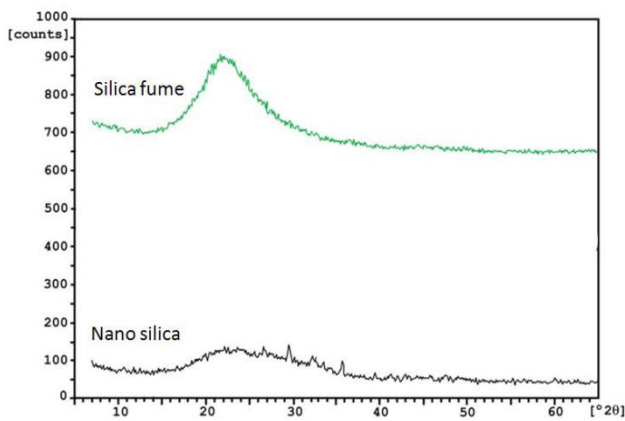
۲- برنامه آزمایش‌ها و ساخت نمونه‌ها

۱-۲- مواد و مصالح مصرفی

نانو سیلیس مصرفی در این تحقیق، نانو سیلیس آمورف کلوئیدی محلول در آب با غلظت ۵۰ درصد است. این نانو سیلیس دارای بیش از ۹۹ درصد سیلیس آمورف بوده که در جدول (۱) خصوصیات فیزیکی آن آمده است. شکل (۱) نمودار XRD این محصول را نشان می‌دهد. دوده سیلیس مصرفی نیز از شرکت صنایع فروآلیاژ ایران واقع در ازنا تهیه شده و دارای سطح ویژه‌ای برابر با ۲۰ مترمربع بر گرم است. نتایج آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی بر روی دوده سیلیس در جداول (۲) و (۳) آورده شده است. شکل (۱) نیز نمودار آزمایش توزیع ذرات دوده سیلیس را نشان می‌دهد. سنگدانه‌های ریزدانه (ماسه) مصرفی در این پژوهش از نوع طبیعی دو بارشوی بوده و مصالح درشت‌دانه (شن) از نوع شکسته می‌باشند. مشخصات فیزیکی سنگدانه‌ها در جدول (۴) قابل دیده می‌باشد. جدول (۵) معرف وضعیت دانه‌بندی انتخاب شده برای این مصالح سنگی است. مدول نرمی سنگدانه مصرفی برابر با ۵/۲۵ می‌باشد.

جدول (۴): مشخصات فیزیکی سنگدانه‌ها

| سنگدانه | نوع | وزن مخصوص gr/cm ³ | %SSD |
|---------|-------|------------------------------|------|
| شن | شکسته | ۲/۵۸ | ۱/۶۱ |
| ماسه | طبیعی | ۲/۵۶ | ۱/۸۲ |



شکل (۱): نمودار XRD نانو سیلیس و دوده سیلیس

جدول (۵): دانه بندی سنگدانه‌ها

| درصد وزنی مانده روی الک | درصد تجمعی عبور کرده از الک | اندازه الک | |
|-------------------------|-----------------------------|------------|------|
| | | ASTM | BS |
| ۲۱/۵ | ۷۸/۵ | ۱/۲ | ۱۲/۷ |
| ۱۱/۵ | ۶۷/۰ | ۳/۸ | ۹/۵ |
| ۲۱/۵ | ۴۵/۵ | # ۴ | ۴/۷۵ |
| ۱۵/۵ | ۳۰/۰ | # ۸ | ۲/۳۶ |
| ۱۱/۰ | ۱۹/۰ | # ۱۶ | ۱/۱۸ |
| ۸/۰ | ۱۱/۰ | # ۲۰ | ۰/۶ |
| ۶/۰ | ۵/۰ | # ۵۰ | ۰/۳ |
| ۳/۰ | ۲/۰ | # ۱۰۰ | ۰/۱۵ |
| ۲/۰ | -- | زیرالک | |

جدول (۶): طرح اختلاط نمونه‌های بتنی

| نام طرح | سیمان (Kg) | آب (Kg) | دوده سیلیس (Kg) | نانو سیلیس (Kg) | سنگدانه (Kg) |
|---------|------------|---------|-----------------|-----------------|--------------|
| CTL | ۴۰۰ | ۱۸۰ | ۰ | ۰ | ۱۷۵۰ |
| NS-4.5 | ۲۸۲ | ۱۸۰ | ۰ | ۱۸ | ۱۷۵۰ |
| NS-7.5 | ۳۷۰ | ۱۸۰ | ۰ | ۳۰ | ۱۷۵۰ |
| SF-4.5 | ۲۸۲ | ۱۸۰ | ۱۸ | ۰ | ۱۷۵۰ |

جدول (۱): مشخصات فیزیکی نانو سیلیس

| حالت | رنگ | pH | نقطه ذوب و جوش | وزن مخصوص | ویسکوزیته mPa.s |
|------|------|----|----------------|------------|-----------------|
| مایع | شیری | -۹ | ۱۰۰-۰ | ۱/۰۵-۱/۴۰۰ | <۵۰ |

جدول (۲): مشخصات فیزیکی دوده سیلیس

| محدوده اندازه ذرات μm | دانشیته مترام gr/cm ³ | دانشیته غیرمترام gr/cm ³ | سطح ویژه |
|-----------------------|----------------------------------|-------------------------------------|----------|
| ۰/۰۵-۰/۱۵ | ۰/۵-۰/۷ | ۰/۲۵-۰/۳۵ | ۲۰ |

جدول (۳): ترکیبات شیمیایی سیمان و دوده سیلیسی مصرفی

| سیمان | دوده سیلیس | مشخصات فیزیکی |
|--------------------|------------|--------------------------------|
| ۳/۱۸ | ۲/۱۴ | وزن ویژه (gr/cm ³) |
| ۳۲۰۰ | — | بلین (cm ² /gr) |
| آنالیز شیمیایی (%) | | |
| ۲۱/۵۷ | ۹۴/۶۶ | SiO ₂ |

| | | | | | |
|------|---|----|-----|-----|--------|
| ۱۷۵۰ | ۰ | ۲۰ | ۱۸۰ | ۲۷۰ | SF-7.5 |
|------|---|----|-----|-----|--------|

سیمان پرتلند مصرفی در این پژوهش، از نوع ۴۲۵-۱ است که ترکیبات شیمیایی و خواص فیزیکی آن در جدول شماره (۳) درج شده است. در این تحقیق از فوق روان کننده نسل سوم بر پایه کربوکسیک اتر با نام تجاری GLENIUM-110P استفاده شده است. این ماده، کدر و ابری رنگ بوده و در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد وزن مخصوص آن ۱/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. این فوق روان کننده جزو فوق‌روان‌کننده‌های خنثی بوده و به غیر از خاصیت روان‌کنندگی، خاصیت دیگری ندارد. آب مصرفی در پژوهش، آب شرب شهر تهران است.

۲-۲- طرح اختلاط نمونه‌های بتنی و ملات

در این پژوهش، برای بررسی خواص مکانیکی و دوام نمونه‌های بتنی، ۵ طرح اختلاط بتنی با برنامه آزمایشگاهی ۱۸۰ روزه طبق جدول (۵) با میزان جایگزینی ۴/۵ و ۷/۵ درصد با مقدار اسلامپ حدود ۱۰-۷ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. همچنین برای بررسی اثر بیشتر نانو سیلیس و دوده سیلیس بر ریزساختار بتن، ساخت نمونه‌های خمیر سیمان و انجام آزمایش‌هایی همچون پراش اشعه ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در دستور کار برنامه آزمایشگاهی قرار گرفت. برای این منظور سه طرح خمیر سیمان با نسبت آب به سیمان ۰/۲۷ و بدون حضور فوق روان کننده، حاوی ۴/۵ درصد جایگزینی دوده سیلیس، ۴/۵ درصد نانو سیلیس و یک نمونه شاهد، در نظر گرفته شد.

۲-۳- ساخت، آماده‌سازی و نگهداری نمونه‌های بتنی

گفتنی است که در ساخت مخلوطهایی که در آنها از دوده سیلیس یا نانوسیلیس استفاده می‌شود، ابتدا این مواد در یک مخلوط کن کوچکتر با قابلیت سرعت هم زدن بالا و پره‌های مخصوص اختلاط مایعات با مقداری از آب لازم در طرح، با بهم زن بصورت دوغاب در آمده و قبل از افزودن سیمان به مخلوط اضافه می‌شود. در دوغاب نمونه‌های بتنی مقدار بسیار کمی فوق روان کننده که با باردار کردن ذرات به پخش بهتر آنها کمک می‌کند نیز اضافه می‌شود.

نحوه ساخت مخلوطها بدین ترتیب است که مصالح مصرفی برای ساخت مخلوط، بطور کاملاً دقیق توزین می‌شود. آنگاه ابتدا شن و ماسه و فیلر خنثی توزین شده، داخل مخلوط‌کن الکتریکی کج شونده، ریخته شده و سپس مقداری از آب توزین شده به اندازه ای که برای رسیدن رطوبت دانه‌ها به حالت SSD (اشباع با سطح خشک) لازم است به آن اضافه می‌شود و به مدت ۳۰ ثانیه مخلوط می‌شود. سپس لجن دوده سیلیسی یا نانو سیلیسی آماده شده و در مرحله بعد سیمان به مخلوط اضافه

می‌شود و در ضمن بهم خوردن مخلوط، بقیه آب به غیر از اندکی به منظور اضافه کردن فوق روان کننده، اضافه می‌شود و دو دقیقه عملیات اختلاط انجام می‌شود. علت این کار پخش همگن مواد فوق در داخل مخلوط است. در مرحله آخر مقدار بسیار کم آب باقیمانده که فوق روان کننده نیز در آن ریخته شده، اضافه می‌شود و عمل اختلاط برای مدت دو دقیقه دیگر ادامه پیدا می‌کند. بلافاصله بعد از پایان یافتن اختلاط، آزمایشهای اسلامپ بر روی مخلوط انجام می‌گیرد. سپس نمونه ها قالب گیری شده و توسط میز لرزاننده متراکم می‌شوند. نمونه‌های ساخته شده پس از قالب‌گیری در حدود ۲۴ ساعت درون قالب باقی مانده، در این مدت به طور دائم سطح نمونه‌ها مرطوب نگهداشته می‌شود. برای ارزیابی مشخصات مکانیکی و دوام نمونه های بتنی، نمونه‌هایی با ابعاد مورد نیاز بر اساس استانداردهای مربوط و به شرح زیر ساخته شده است:

نمونه‌های بتنی مکعبی $10 \times 10 \times 10$ cm: این نمونه‌ها به منظور آزمایش‌های مکانیکی مقاومت فشاری در نظر گرفته شدند.

نمونه‌های مکعبی $15 \times 15 \times 15$ cm: این نمونه‌ها به منظور آزمایش‌های نفوذپذیری تحت فشار آب و نیز آزمایش مربوط به جذب آب مؤئینه در نظر گرفته شدند.

نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰ cm و ارتفاع ۲۰ cm: این نمونه‌ها برای استفاده در آزمایش تسریع شده یون کلراید در نظر گرفته شده‌اند. نمونه‌های قابل استفاده در دستگاه RCPT، به صورت استوانه‌های 5×10 می‌باشد.

۲-۴- ساخت، آماده‌سازی و نگهداری نمونه‌های خمیر

سیمان

جهت ساخت نمونه‌های خمیر سیمان، مخلوط سیمان و آب و نانوسیلیس و دوده سیلیس درون مخلوط کن به مدت یک دقیقه با سرعت متوسط مخلوط می‌شوند. سپس به مدت ۱۵ ثانیه مخلوط کن را متوقف کرده و قسمت‌هایی را که به بدنه مخلوط کن چسبیده اند را جدا کرده و عمل اختلاط با دور تند به مدت ۲ دقیقه دیگر ادامه می‌یابد. پس از اتمام اختلاط خمیر سیمان درون قالبهایی به شکل مکعب به ابعاد ۵ سانتیمتر در دو مرحله قالب گیری و ویبره می‌گردیدند. در هر یک از طرحها برای مدلسازی ناحیه انتقال بین سنگدانه و خمیر سیمان از قطعات شیشه‌ای که قالب‌ها را به دو نیم تقسیم می‌کنند، در تعدادی از قالب ها استفاده گردید. پس از قالب گیری نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت درون محفظه با پوشش گونی و پلاستیک قرار گرفته و پس از خارج شدن از قالب تا سن مورد نظر درون



محلول آب آهک اشباع نگهداری شدند.

۳- ارائه نتایج آزمایش

۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری

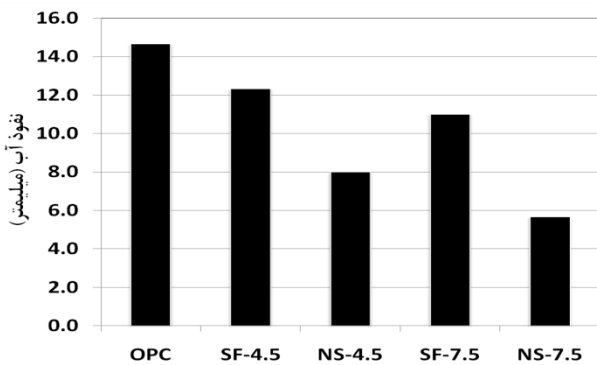
برای ۵ طرح اختلاط آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۳، ۷، ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روزه، نمونه‌ها با شکستن ۳ نمونه از هر طرح انجام گردید. نتایج این آزمایش در جدول ۷ آورده شده است. از نتایج آزمایش دیده می‌شود که در تمام سنین افزودن نانو سیلیس و یا دوده سیلیس به بتن موجب افزایش مقاومت فشاری نمونه های بتنی شده و این افزایش مقاومت با افزایش میزان پوزولان مصنوعی نانو سیلیس و یا دوده سیلیس در نمونه بیشتر می‌شود. مقایسه بین مقاومت نمونه‌های نانو سیلیسی و دوده سیلیسی حاکی از برتری نانو سیلیس در کسب مقاومت فشاری به خصوص در سنین اولیه دارد، اما با گذشت زمان و با رسیدن به سن ۲۸ روزگی این تفاوت میان نانو سیلیس و دوده سیلیس در افزایش مقاومت کاهش می‌یابد.

جدول (۷): مقاومت فشاری در سنین گوناگون (مگاپاسکال)

| | SF-7.5 | SF-4.5 | NS-7.5 | NS-4.5 | CTL | |
|--------|--------|--------|--------|--------|------|--|
| ۳روز | ۲۹/۳ | ۲۸/۱ | ۳۶/۵ | ۳۴/۰ | ۲۶/۵ | |
| ۷روز | ۴۰/۷ | ۴۱/۷ | ۴۸/۰ | ۴۶/۰ | ۳۶/۸ | |
| ۲۸روز | ۶۱/۰ | ۵۵/۲ | ۶۲/۰ | ۵۷/۸ | ۵۲/۳ | |
| ۹۰روز | ۶۲/۸ | ۵۸/۵ | ۶۳/۸ | ۶۰/۲ | ۵۶/۰ | |
| ۱۸۰روز | ۶۲/۵ | ۵۹/۷ | ۶۴/۵ | ۶۱/۷ | ۵۸/۷ | |

۳-۲- آزمایش نفوذ آب

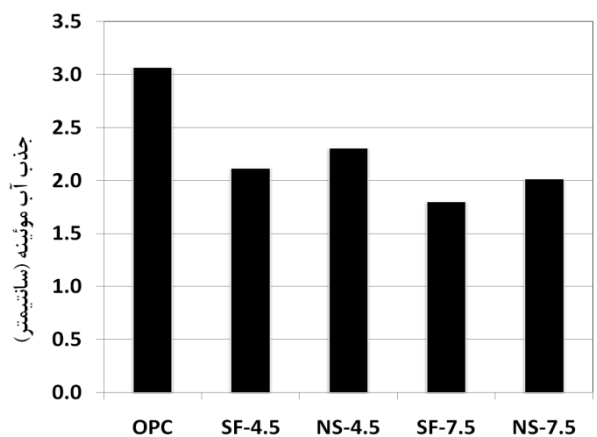
این آزمایش بر اساس استاندارد BSEN-12390-8:2000، در سن ۲۸ روزگی نمونه‌ها و بر روی ۳ نمونه از هر طرح انجام شده است. شکل (۲) نتایج این آزمایش را نشان می‌دهد. همانطور که از نمودارها مشخص است افزودن دوده سیلیس و نانو سیلیس در کاهش نفوذپذیری موثر بوده و با افزایش میزان آنها در طرح اختلاط، کاهش بیشتری در میزان نفوذپذیری دیده می‌شود. نتایج کسب شده نشان دهنده برتری نانو سیلیس بر دوده سیلیس در افزایش مقاومت در برابر نفوذ آب در سن ۲۸ روز است. این برتری را می‌توان دلیل واکنش‌های سریعتر پوزولانی و اثر پرکنندگی موثرتر ذرات نانو در کاهش حفرات موثر در نفوذپذیری آب به بتن نسبت به ذرات دوده سیلیس دانست. باید به این مورد دقت نمود که این نتایج و برتری نانو سیلیس بر دوده سیلیس فقط مربوط به سن ۲۸ روزگی بوده و این برتری ممکن است با افزایش زمان و تکمیل واکنش‌های پوزولانی دوده سیلیس کمرنگ‌تر شود.



شکل (۲): میزان نفوذ آب نمونه‌های بتنی در سن ۲۸ روزه

۳-۳- آزمایش جذب آب موئینه

آزمایش جذب آب موئینه برای تمامی طرح‌ها طبق استاندارد BS1881 در سن ۲۸ روزگی انجام شد که نتایج آن در شکل (۳) آمده است. در این آزمایش نیز استفاده از دوده سیلیس و نانو سیلیس بر کاهش میزان جذب آب نمونه‌های بتنی موثر بوده و با افزایش مقدار آنها در نمونه جذب آب کاهش یافته است. همان‌طور که از نمودار شکل (۳) مشخص است میزان جذب آب نمونه‌های حاوی دوده سیلیس در مقایسه با نانو سیلیس کمتر بوده و در نمونه حاوی ۷/۵ درصد دوده سیلیس کاهش ۴۰ درصدی در میزان جذب آب نسبت به نمونه شاهد داشته است. این موضوع در حالیکه میزان کاهش جذب آب نسبت به نمونه شاهد در نمونه حاوی ۷/۵ درصد نانو سیلیس به ۳۴ درصد محدود می‌شود.

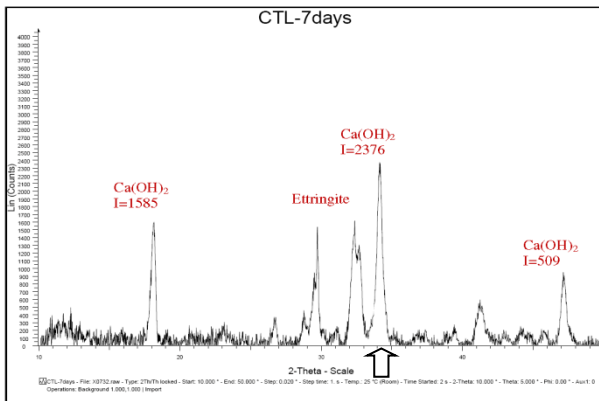


شکل (۳): میزان جذب آب موئینه نمونه‌های بتنی در سن ۲۸ روزه

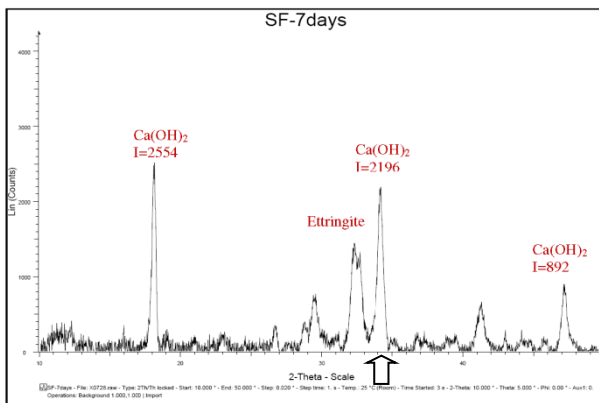
۳-۴- آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلرید (RCPT)

آزمایش RCPT طبق ASTM C2012 در سن ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روزگی انجام شده است. جدول (۸) نتایج این آزمایش را نمایش می‌دهد. دقت در نتایج نشان می‌دهد که استفاده از نانو سیلیس در مقادیر کم در مقایسه با دوده سیلیس با همان مقادیر به مراتب اثر بیشتری در کاهش شار عبوری از نمونه

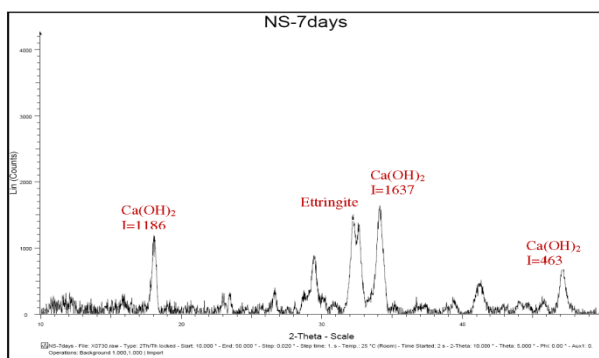
الف الی (۴) - و آورده شده اند. نتایج حاصل از آزمایش XRD شدت قله‌های هیدروکسید کلسیم موجود در آن‌ها نشان دهنده این مطلب است که نانو سیلیس و دوده سیلیس هر دو در کاهش میزان هیدروکسید کلسیم در ساختار خمیر سیمان موثر بوده‌اند. این مطلب با مطالعه قله حاصله در زاویه 2θ برابر ۳۴ درجه که قله بیشینه Ca(OH)_2 در ساختار خمیر سیمان است روشن می‌شود.



(الف-نمونه شاهد در سن ۷ روز)



(ب-نمونه دوده سیلیس در سن ۷ روز)



(ج-نمونه نانو سیلیس در سن ۷ روز)

داشته است اما با افزایش درصدهای جایگزینی نانو و دوده سیلیس این تفاوت اثر میان دو ماده کم‌رنگ‌تر می‌شود.

جدول (۸): نفوذ تسریع شده یون کلرید در سنین گوناگون (کولمب)

| SF-7.5 | SF-4.5 | NS-7.5 | NS-4.5 | CTL | |
|--------|--------|--------|--------|------|--------|
| ۲۱۷۱ | ۲۸۲۶ | ۱۴۳۰ | ۱۸۰۰ | ۴۴۴۷ | ۲۸روز |
| ۱۰۱۲ | ۱۱۷۴ | ۹۱۵ | ۱۴۶۱ | ۳۷۵۷ | ۹۰روز |
| ۹۴۶ | ۱۱۱۵ | ۸۷۸ | ۱۶۸۷ | ۳۵۴۸ | ۱۸۰روز |

۳-۵- آزمایش مقاومت الکتریکی بتن

آزمایش مقاومت الکتریکی بر روی نمونه‌های بتنی در سنین ۷، ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روزگی انجام شد. جدول (۹) نتایج این آزمایش را نشان می‌دهد. افزودن نانو سیلیس و دوده سیلیس به بتن موجب افزایش مقاومت الکتریکی نمونه‌ها شده و با افزایش میزان این مواد نیز مقاومت الکتریکی افزایش می‌یابد. همان‌طور که از نتایج مشخص است افزودن این مواد موجب افزایش بیش از ۲۵۰ درصدی مقاومت الکتریکی ۱۸۰ روزه در نمونه‌های حاوی نانو سیلیس و دوده سیلیس هنگام جایگزینی ۷/۵ درصدی این مواد با سیمان شده است. دقت در نتایج آزمایش‌های ۱۸۰ نشان دهنده نبود تفاوت قابل توجه میان مقاومت الکتریکی نمونه‌های حاوی نانو سیلیس و دوده سیلیس بوده و حداکثر میزان تفاوت مربوط به نمونه‌های حاوی ۷/۵ درصد نانو سیلیس و دوده سیلیس با حدود ۱۰ کیلو اهم سانتی‌متر برتری مقاومت الکتریکی در نمونه حاوی دوده سیلیس است.

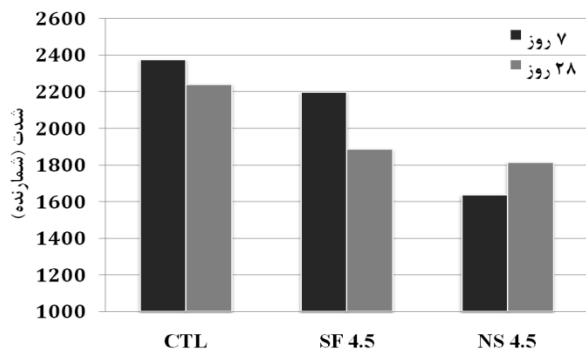
جدول (۹): مقاومت الکتریکی در سنین مختلف (کیلو اهم سانتی‌متر)

| SF-7.5 | SF-4.5 | NS-7.5 | NS-4.5 | CTL | |
|--------|--------|--------|--------|-----|--------|
| ۱۶ | ۱۴ | ۱۹ | ۱۵ | ۱۲ | ۷روز |
| ۳۵ | ۲۲ | ۵۰ | ۴۴ | ۱۵ | ۲۸روز |
| ۸۳ | ۴۶ | ۷۵ | ۴۶ | ۱۶ | ۹۰روز |
| ۸۵ | ۵۱ | ۷۵ | ۵۴ | ۲۰ | ۱۸۰روز |

۳-۶- آزمایش طیف سنجی تفرق اشعه x

به منظور تخمین فعالیت پوزولانی دوده سیلیس و نانو سیلیس از آزمایش تفرق اشعه x بر روی پودر حاصل از آسیاب نمودن نمونه‌های خمیر سیمان شامل نمونه شاهد، نمونه با جایگزینی ۴/۵ درصد دوده سیلیس و نمونه با جایگزینی ۴/۵ درصد نانو سیلیس استفاده شد. هیدراتاسیون نمونه‌های خمیر در سنین ۷ و ۲۸ روز با استفاده از استون متوقف شده و در نتیجه ۶ طیف به دست آمد که در شکل (۴) -

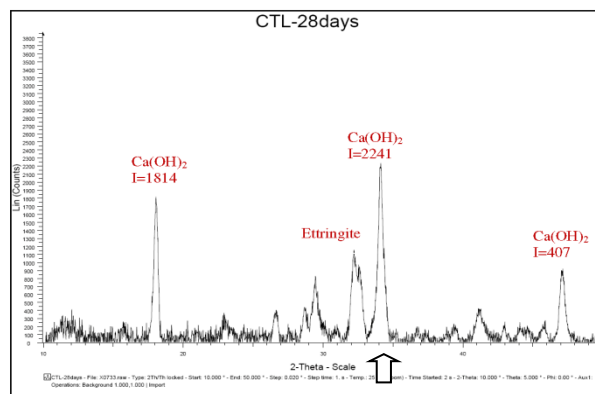
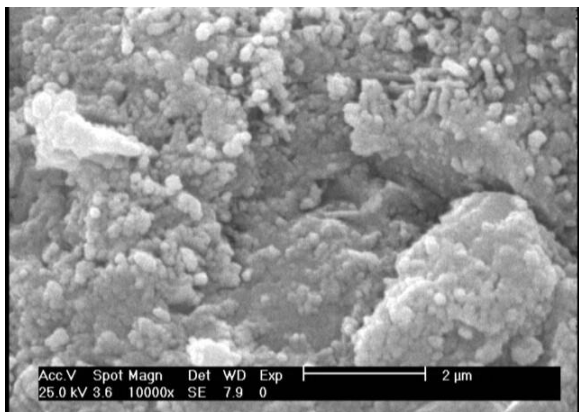
افزایش سن نمونه و رسیدن به ۲۸ روزگی بیشتر نمایان می‌شود. چنانکه از نمودار مشخص است نمونه نانو سیلیسی با افزایش سن به مقدار جزئی افزایش در میزان هیدروکسید کلسیم نیز داشته است که نشانه ضعیف شدن فعالیت پوزولانی این ماده و تولید هیدروکسید کلسیم بواسطه ادامه واکنش هیدراتاسیون خمیر سیمان است.



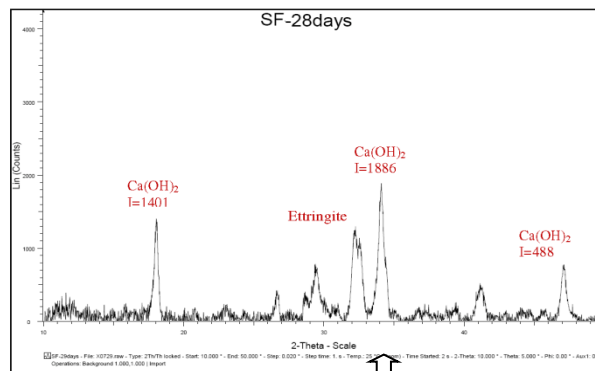
شکل ۵ - نمودار تغییرات شدت قله بیشینه $Ca(OH)_2$

۳-۷- نتایج آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی

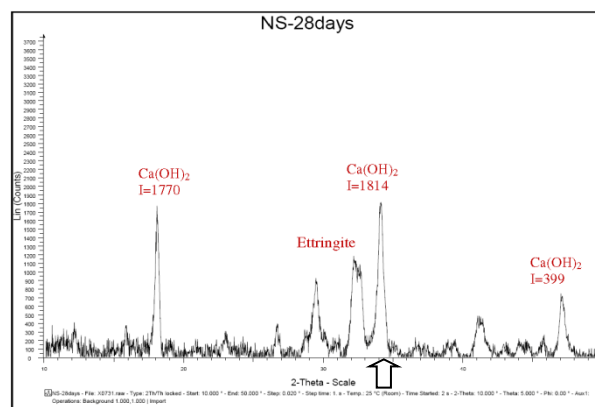
عکس‌های میکروسکوپ الکترونی (SEM) برای سه طرح خمیر سیمان شامل طرح شاهد، طرح حاوی ۴/۵ درصد دوده سیلیس و طرح حاوی ۴/۵ درصد نانو سیلیس که واکنش هیدراتاسیون آنها بوسیله استون در دو سن ۷ و ۲۸ روزگی متوقف شده بود انجام شد. تصاویر گرفته شده به دو گروه تقسیم می‌شوند که یکی مربوط به سطح شکست و دیگری تصاویر مربوط به ناحیه انتقال مدل سازی شده بین خمیر و شیشه است. چنانکه از تصاویر مربوط به سطوح شکست خمیر سخت شده مشخص است، حضور نانو سیلیس و میکرو سیلیس به تراکم ساختار خمیر سیمان کمک نموده و ساختار خمیر به وضوح در حضور این دو ماده تراکم و یکنواختی بیشتری دارد. شکل (۶) مقایسه بین تراکم و یکنواختی ساختار خمیر سیمان را در سه نمونه در سن ۷ روز نشان می‌دهد که تفاوت بین تراکم نمونه شاهد و دو نمونه دیگر به روشنی مشخص است.



(د-نمونه شاهد در سن ۲۸ روز)



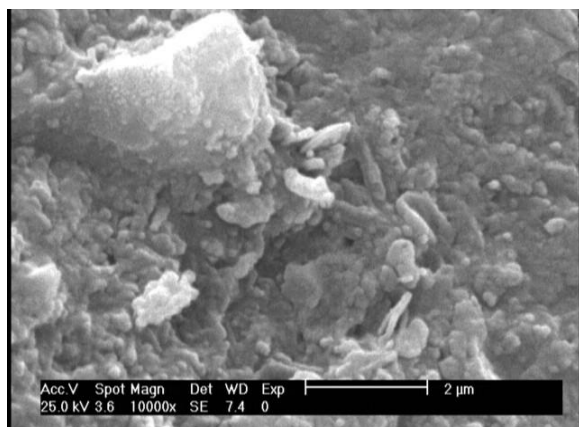
(ه-نمونه دوده سیلیس در سن ۲۸ روز)



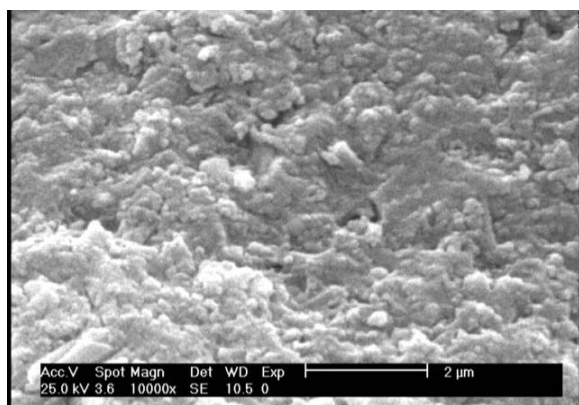
(و-نمونه نانو سیلیس در سن ۲۸ روز)

شکل (۴): طیف‌های حاصل از آزمایش طیف سنجی تفرقی اشعه X (XRD) مربوط به نمونه خمیر سیمان در سنین ۷ و ۲۸ روز

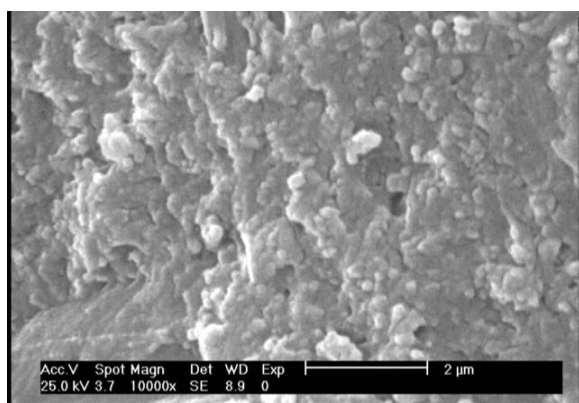
در سن ۷ روز شدت قله از ۲۳۷۶ مرتبه در نمونه شاهد با استفاده از ۴/۵ درصد دوده سیلیس به ۲۱۹۶ مرتبه و در نمونه حاوی همین مقدار نانو سیلیس به ۱۶۳۷ مرتبه کاهش یافته که نشان از کاهش میزان هیدروکسید کلسیم موجود در نمونه بواسطه واکنش‌های پوزولانی این دو ماده دارد. همان‌طور که از نمودار شکل (۵) مشخص است نانو سیلیس در سن ۷ روزگی اثر بیشتری بر کاهش میزان هیدروکسید کلسیم موجود در نمونه‌ها داشته است، در حالی‌که اثر کاهشی دوده سیلیس بر میزان هیدروکسید کلسیم موجود در نمونه‌ها با



(الف-نمونه شاهد)



(ب-نمونه دوده سیلیس)

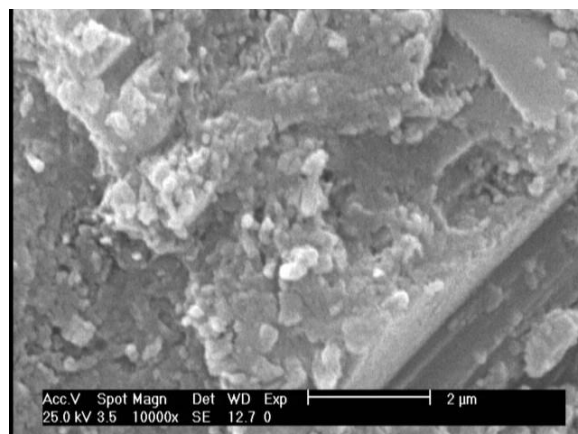


(ج-نمونه نانو سیلیس)

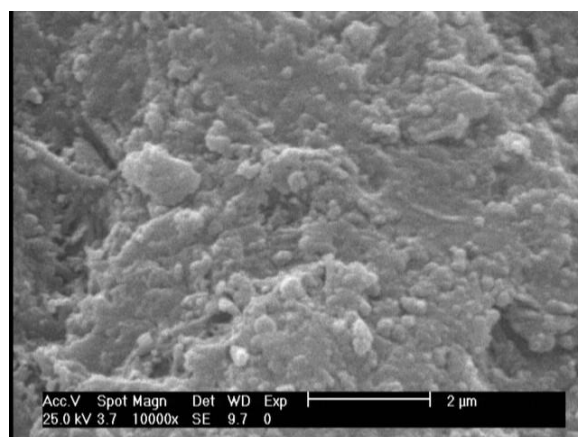
شکل (۷): مقایسه تراکم و یکنواختی ساختار نمونه‌های خمیر ۲۸ روزه با بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابر

با اشاره به این نکته که توده‌های سفید رنگ در تصاویر میکروسکوپ الکترونی همان کریستال‌های هیدروکسید کلسیم هستند، با توجه به شکل (۸) می‌توان گفت اضافه شدن دوده سیلیس و نانو سیلیس به ترکیب سیمان و آب در خمیر سیمان می‌تواند موجب کاهش مقدار و اندازه کریستال‌های هیدروکسید کلسیم در ناحیه انتقال بین خمیر و سنگدانه و در نتیجه تقویت این ناحیه شود.

(الف-نمونه شاهد)



(ب-نمونه دوده سیلیس)



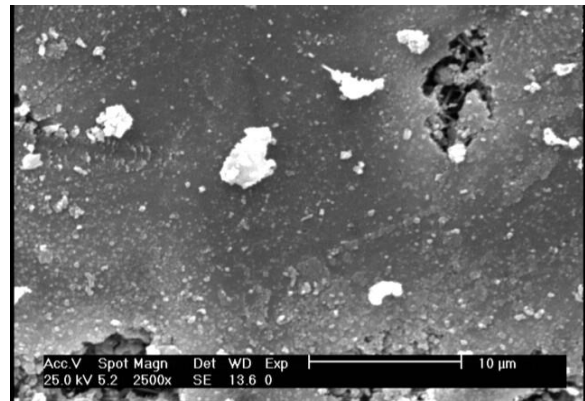
(ج-نمونه نانو سیلیس)

شکل (۶): مقایسه تراکم و یکنواختی ساختار نمونه‌های خمیر ۷ روزه با بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابر

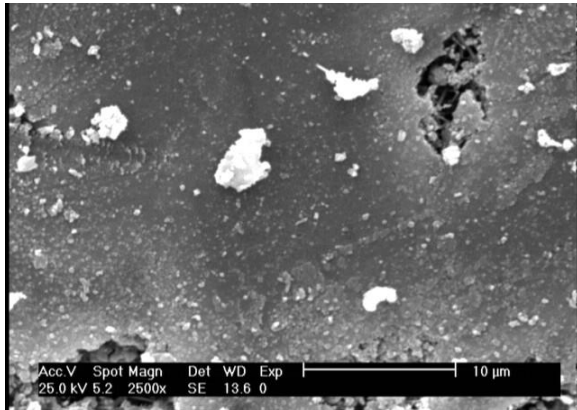
مقایسه تصاویر گرفته شده از نمونه‌های حاوی میکروسیلیس و نانوسیلیس در شکل (۶) نشان می‌دهد در سن ۷ روزگی نمونه‌های خمیر سیمان، نانو سیلیس اثر به مراتب بیشتری در متراکم‌تر نمودن ساختار خمیر و حذف حفرات آن داشته که این موضوع ناشی از فعال‌تر بودن نانو سیلیس نسبت به میکروسیلیس و در نتیجه انجام فعالیت‌های پوزولانی در سنین اولیه نمونه‌ها است.

با افزایش سن نمونه‌ها تراکم در کلیه نمونه‌ها افزایش می‌یابد که ناشی از تکمیل فرایند هیدراتاسیون در خمیر است. چنانکه از مقایسه تصاویر سطوح شکست نمونه‌ها (شکل ۷) دیده می‌شود، همچنان تراکم در نمونه‌های حاوی نانو و میکروسیلیس نسبت به نمونه شاهد بیشتر است اما با فعال شدن میکرو سیلیس در بازه زمانی منتهی به ۲۸ روز بین تصاویر نمونه نانو سیلیسی و میکرو سیلیسی تفاوت زیادی از نظر تراکم و یکنواختی سطوح دیده نمی‌شود.

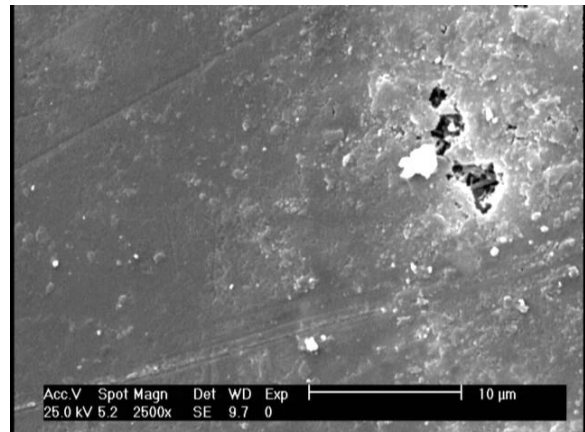
مقدار و اندازه هیدروکسید کلسیم با توجه به تصاویر موجود، حاکی از برتری نانو سیلیس در کاهش میزان این ماده در ناحیه انتقال مدل سازی شده می‌باشد. با دقت به تصاویر ناحیه انتقال در سن ۲۸ روزگی براحتی می‌توان این تفاوت را تشخیص داد (شکل ۱۰).



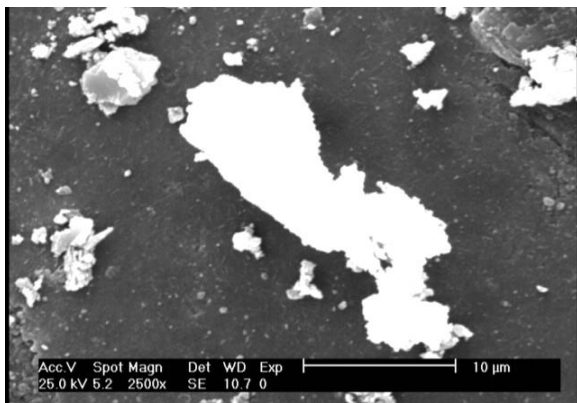
(الف-نمونه شاهد)



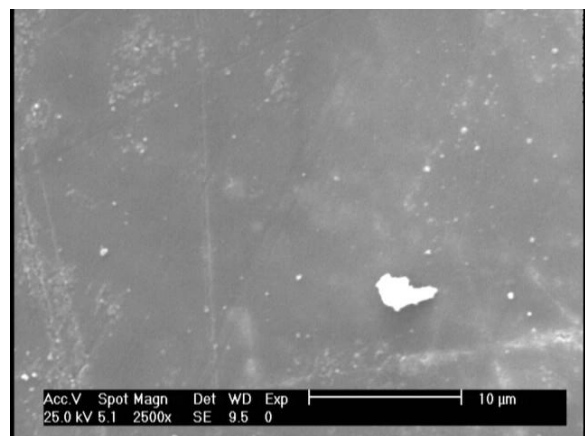
(الف-نمونه شاهد در سن ۷ روز)



(ب-نمونه دوده سیلیس)



(ب-نمونه شاهد در سن ۲۸ روز)



(ج-نمونه نانو سیلیس)

شکل ۹- مقایسه تصاویر مدل سازی ناحیه انتقال نمونه شاهد

۴- تجزیه و تحلیل و تفسیر نتایج

چنانکه گفته شد با رسیدن اندازه ذرات به مقیاس نانو مانند نانو سیلیس، سطح ویژه ذرات افزایش یافته و تعداد اتم‌ها در سطح به سرعت افزایش می‌یابند. وجود اتم‌ها در سطحی با این ابعاد، پیوندهای آزاد و اشباع نشده با نیروی ظرفیتی باقیمانده زیادی را به وجود می‌آورد که ناپایدار است.

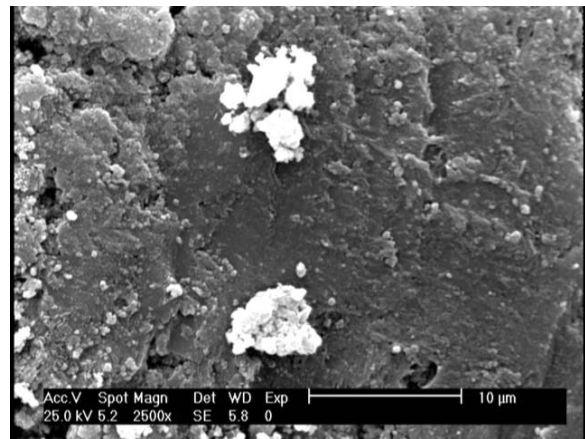
شکل (۸): مقایسه میزان حضور Ca(OH)_2 در ناحیه انتقال در تصاویر نمونه‌های ۷ روزه

با افزایش سن نمونه‌ها همان‌طور که از تصاویر شکل (۹) مشخص است بر مقدار و ابعاد کریستال‌های هیدروکسید کلسیم موجود در ناحیه انتقال مدل سازی شده افزوده می‌شود، که نتیجه ادامه فرایند هیدراتاسیون و تولید این ماده است. این موضوع به وضوح با مقایسه تصاویر نمونه شاهد در سن ۷ و ۲۸ روز قابل دیده است.

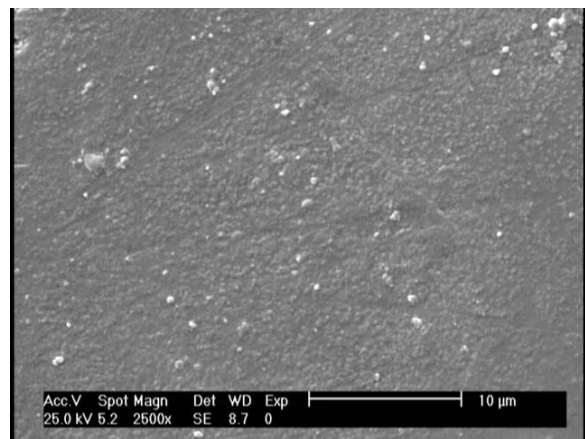
مقایسه عملکرد نانو سیلیس و دوده سیلیس در کاهش

کاهش می‌یابد و به جای آن ژل C-S-H فضاهای خالی موجود در سطح تماس سنگ دانه‌ها با خمیر سیمان را پر می‌کند. به این ترتیب ناحیه فصل مشترک سنگ دانه‌ها با خمیر سیمان بسیار متراکم تر می‌شود. همچنین ذرات نانو سیلیس می‌توانند فضاهای خالی موجود در ساختار ژل را پر کنند و ماتریس متراکم تری ایجاد نمایند. از سوی دیگر، همانگونه که ذکر شد، نتایج حاصل از آزمایش XRD و شدت پیک های هیدروکسید کلسیم موجود در آن‌ها نشان دهنده این مطلب است که نانو سیلیس و دوده سیلیس در کاهش میزان هیدروکسید کلسیم در ساختار خمیر سیمان موثر بوده‌اند. لیکن همانطور که از نمودار شکل (۵) مشخص است نانو سیلیس نسبت به دوده سیلیس اثر بیشتری در کاهش شدت قله بیشینه هیدروکسید کلسیم موجود در نمونه‌های خمیر سیمان داشته است. نتایج مشابهی نیز توسط کینگ ارائه شده است [۱]. آنها نشان دادند که در بتن معمولی کریستال های هیدروکسید کلسیم با ابعاد بزرگتر و لبه‌هایی صاف حضور دارند، این کریستال‌ها در نمونه حاوی دوده سیلیس با ابعادی کوچکتر و لبه‌هایی صاف حضور دارند، اما در نمونه حاوی نانو سیلیس کاهش ابعاد نمونه‌ها قابل توجه بوده و لبه‌های ناصاف و خورده‌شده آن‌ها حکایت از ادامه واکنش آنها دارد که نشان واکنش‌پذیری بالای نانو سیلیس در مقایسه با دوده سیلیس دارد.

در نتیجه همانطور در نتایج ملاحظه می‌شود نانو سیلیس بیشترین اثر خود در افزایش مقاومت فشاری را در سنین اولیه نشان داده و دقت در نتایج، بیانگر کاهش اثر این ماده با افزایش سن می‌باشد. این رفتار نانو سیلیس حاکی از انجام واکنش‌های پوزولانی این ماده با سرعت بسیار زیاد و در روزهای نخستین سن نمونه‌های بتنی است. در مورد دوده سیلیس همانطور که از جدول (۷) بر می‌آید، بیشترین فعالیت مربوط به محدوده سنی ۷ تا ۲۸ روز می‌باشد. نتایج مشابهی نیز توسط جو و همکارانش [۴] گزارش شده است. آنها در آزمایش‌هایی نشان دادند که افزودن مقاومت ۳ الی ۱۲ درصد نانو سیلیس باعث افزایش ۳ الی ۴ برابری مقاومت نمونه‌های ملات شده است. همچنین دقت در سیر افزایش دوام نمونه‌های بتنی نشان می‌دهد نمونه‌های حاوی نانو سیلیس سرعت بیشتری در افزایش دوام بتن نسبت به نمونه‌های دوده سیلیسی داشته‌اند و همانطور که از جداول و نمودارها مشخص است بیشترین میزان افزایش دوام در نمونه‌های حاوی نانو سیلیس مربوط به سنین اولیه بوده و پس از آن و با افزایش سن میزان افزایش دوام به طور چشمگیری کاهش می‌یابد.



(الف-نمونه دوده سیلیسی در سن ۲۸ روز)



(الف-نمونه نانو سیلیسی در سن ۲۸ روز)

شکل ۱۰- مقایسه حضور $Ca(OH)_2$ در ناحیه انتقال

از سوی دیگر با کاهش اندازه دانه درجات نا همواری اتمی زیادی به وجود می‌آید که واکنش شیمیایی را تشدید می‌کنند. به همین دلیل نانو ذراتی نظیر نانو سیلیس انرژی سطحی بالاتری دارند و فعالیت اتم‌ها در سطح خیلی بیشتر است که به راحتی با سایر اتم‌های دیگر بیرونی واکنش می‌دهند، در نتیجه فعالیت پوزولانی نانو سیلیس خیلی بیشتر از دوده سیلیس است. این امر با توجه به سطح ویژه نانو سیلیس که بسیار بیشتر از دوده سیلیس است منطقی به نظر می‌رسد. تصاویر مربوط به ریزساختار خمیر سیمان نیز تسریع واکنش‌های پوزولانی توسط نانو سیلیس را تایید می‌کنند. در تصویر مربوط به بتن حاوی نانو سیلیس در سن ۲۸ روز دیده می‌شود که ریز ساختار بتن به طور چشمگیری بهبود یافته و یکنواخت‌تر شده است. به این ترتیب می‌توان گفت استفاده از نانو سیلیس در بتن باعث بهبود چشمگیر ریز ساختار آن می‌شود. به عبارت دیگر می‌توان چنین ذکر کرد که نانو سیلیس می‌تواند با هیدروکسید کلسیم کریستالی به سرعت واکنش بدهد و C-S-H تولید نماید. به این ترتیب ابعاد و مقدار کریستال‌های هیدروکسید کلسیم

در انتها ذکر این نکته ضروری است که علاوه بر تفاوت بین مکانیزم‌های موثر بر دوام و افزایش مقاومت که ذکر شد، میزان بالاتر استفاده از فوق روان کننده در نمونه‌های نانو سیلیسی در مقایسه با دوده سیلیسی و در نتیجه وجود حفرات محصور بیشتر در هنگام تراکم، پر شدن حفره های بزرگتر بواسطه اثر پرکنندگی ذرات دوده سیلیسی، مصرف آب داخلی ساختار بتن توسط نانو سیلیس برای انجام واکنش‌ها و در نتیجه پتانسیل جذب آب بیشتر نسبت به دوده سیلیس در نقاط داخلی بتن و تردتر بودن بتن و در نتیجه به وجود آمدن ترک‌های بیشتر سطحی هنگام مغزه گیری در نمونه‌های نانو سیلیسی می‌توانند از دیگر علل موثر بر نتایج حاصله باشند.

۵- نتیجه گیری

بر اساس تحقیقات صورت گرفته و با در نظر گرفتن این مطلب که این نتایج منحصرًا مربوط به نمونه خاص نانو سیلیس دوده سیلیس به کار رفته در این پروژه آزمایشگاهی بوده و در بسیاری موارد برای اظهار نظر قطعی نیاز به برنامه آزمایشگاهی گسترده تری وجود دارد، موارد زیر قابل استنتاج و نتیجه گیری است:

۱. مقاومت فشاری نمونه های حاوی نانوسیلیس و دوده سیلیس در همه سنین از نمونه شاهد بیشتر بوده و با افزایش درصد جایگزینی نانو سیلیس و یا دوده سیلیس مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. در طرح های با درصد جایگزینی یکسان نمونه های حاوی نانو سیلیس مقاومت بیشتری را نسبت به نمونه های حاوی دوده سیلیس از خود نشان می‌دهند.
۲. سرعت کسب مقاومت نمونه های حاوی نانو سیلیس در سنین اولیه بسیار بیشتر از نمونه های دوده سیلیسی است، اما با گذشت زمان سرعت کسب مقاومت در نمونه‌های حاوی دوده سیلیس به خصوص در نمونه حاوی ۷/۵ درصد دوده سیلیس و در بازه زمانی ۷ تا ۲۸ روز، افزایش یافته و با رسیدن به سن ۲۸ روز اختلاف

۶- مراجع

۳. بین مقاومت فشاری نمونه‌های نانو سیلیسی و دوده سیلیسی با درصد جایگزینی یکسان بسیار ناچیز می‌شود. نتایج آزمایشهای گوناگون دوام از جمله نفوذ پذیری آب، جذب آب مؤئنه، نفوذ تسریع شده یون کلراید و مقاومت الکتریکی حاکی از اثر قابل ملاحظه نانو سیلیس در کاهش میزان نفوذ آب به بتن نسبت به نمونه شاهد در سن ۲۸ روزگی است. در نتیجه می‌توان گفت نانو سیلیس برتری محسوسی نسبت به دوده سیلیس در کاهش میزان نفوذ آب در این سن داشته است.
۴. نتایج آزمایش XRD نشان می‌دهد نانو سیلیس و دوده سیلیس هر دو موجب کاهش میزان هیدروکسید کلسیم موجود در ساختار خمیر سیمان می‌شوند. نانو سیلیس در مقایسه با دوده سیلیس اثر بیشتری در کاهش میزان هیدروکسید کلسیم داشته و اثر آن در کاهش میزان هیدروکسید کلسیم در سن ۷ روز نمایان تر است در حالیکه دوده سیلیس در سن ۲۸ روزگی در کاهش میزان هیدروکسید کلسیم موثر تر عمل نموده است.
۵. تصاویر میکروسکوپ الکترونی اخذ شده از سطح شکست نمونه‌ها حاکی از تراکم و یکنواختی بیشتر ساختار تمامی نمونه‌ها با افزایش سن از ۷ به ۲۸ روز می‌باشند. نانو سیلیس و دوده سیلیس هر دو در افزایش تراکم و کاهش حفرات نمونه ها موثر بوده و نانو سیلیس این اثر خود را در سن ۷ روزگی سریعتر از دوده سیلیس نمایان می‌سازد اما در سن ۲۸ روزگی تفاوت چندانی بین ساختار نمونه های حاوی دوده سیلیس و نانو سیلیس دیده نمی‌شود.
۶. تصاویر میکروسکوپ الکترونی مربوط به ناحیه انتقال مدل سازی شده نشان دهنده کاهش قابل ملاحظه کریستال های هیدروکسید کلسیم در حضور نانو سیلیس و دوده سیلیس می‌باشد.

- [۴] Jo, B.W, Kim, C.H., Tae, G.H., Park, J.B., "Characteristics of cement mortar with nano-SiO₂ particles", Construction and Building Materials, Vol.21, 2007, pp. 1351-1355.
- [۵] Li, H., Xiao, H.G., Yuan, J., Ou, J.P., "Microstructure of cement mortar with nano-particles", Composites: Part B, Vol. 35, 2004, pp. 185-189.
- [۶] Ji, T., "Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO₂" Cement and Concrete Research, Vol.35, 2005, pp. 1943-1947

- [۱] Qing, Y., Zenan, Z., Deyu, K. and Rongshen, k., "Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume", Construction and Building Materials, Vol.21, 2007, pp. 539-545.
- [۲] Collepardi, M., Ogoumah Olagot, J., Troli, R., Simonelli, F. and Collepardi, S., "Combination of Silica Fume, Fly Ash and Amorphous Nano-Silica in Superplasticized High-Performance Concretes", Enco, Engineering Concrete, Ponzano Veneto, Italy, 2007.
- [۳] Li, G., "Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO₂", Cement and Concrete Research, Vol.34, 2004, pp. 1043-1049.