تحقیقات بتن
سال پنجم، شماره دوم
پاییز و زمستان ۹۱
ص۶۷-۵۵
تاریخ دریافت: ۹۲/۷/۱۷
تاریخ پذیرش: ۹۲/۸/۱۶
Arvhive of SID

تأثیر مواد نانو بر خواص مهندسی ملات خودتراکم حاوی خاکستر بادی

رحمت مدندوست*
دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکدهٔ فنی دانشگاه گیلان
ملک محمد رنجبر
استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکدهٔ فنی دانشگاه گیلان
احسان محسنی
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه، دانشکدهٔ فنی دانشگاه گیلان

چکیده

اخیراً مواد نانوساختار با توجه به عملکرد برتر خود مورد توجه قرار گرفته‌اند.در این میان صنعت بتن نیز با توجه به نیازهای خود از نظر استحکام و دوام، از استفاده‌کنندگان مهم مواد نانوساختار می‌باشد. لذا، مطالعات بتن و ملات حاوی افزودنی‌هایی در مقیاس نانو برای توسعهٔ مصالح ساختمانی جدید حائز اهمیت می‌باشد.

هدف از این مطالعه بررسی ملات خودتراکم با استفاده از نانوذرات به عنوان جایگزین بخشی از سیمان است. در راستای کاهش مقدار سیمان و رسیدن به کارایی بهتر، ۲۵ درصد خاکستر بادی جایگزین سیمان شد. به کارگیری نانوذرات در کاهش مصرف سیمان به عنوان نمودی از کاربرد فناوری نانو در این راستا است. در این مقاله به بررسی خواص مهندسی ملات خودتراکم ساخته شده با به کارگیری ۱ تا ۵ درصد نانوذرات سیلیس، آهن و مسپرداخته شده است. خواص ملات تازه توسط آزمایش‌های جریان اسلامپ و جریان قیف V شکل و خواص مکانیکی ملات سخت شده با آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت خمشی در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه و جذب آب نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه بررسی شدند. نتایج آزمایش‌ها نشان‌دهندهٔ عملکرد مناسب نانو ذرات مذکور به خصوص نانوسیلیس و مس در بهبود کارایی، خواص مکانیکی و دوام ملات خودتراکم می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ملات خودتراکم، خواص مهندسی، دوام، مصالح در مقیاس نانو

*نویسنده مسؤول: rmadandoust@guilan.ac.ir

www.SID.ir

Arvhive of SID

۱- مقدمه

یکی از برجسته‌ترین پیشرفت‌ها در تکنولوژی بتن در سال‌های اخیر، بتن خودتراکم است. بتن خودتراکم بتنی است که به راحتی تحت اثر وزن خود بدون هیچ‌گونه لرزاندنی به طور کامل در تمام قالب پخش و آن را پر نماید و بتواند از میان میلگردها و مقاطع باریک عبور کند. بتن خودتراکم دارای سه ویژگی توانایی پرکنندگی، توانایی عبور کردن و مقاومت در برابر جداشدگی است.

روش‌های دستیابی به خودتراکمی محدود کردن حجم مواد درشت‌دانه، کاهش نسبت آب به مواد چسبنده و استفاده از فوق‌روان‌کننده می‌باشد[۱]. یکی از مضرات بتن خودتراکم هزینهٔ آن است و با توجه به این موضوع که بعضی از افزودنی‌های معدنی همچون خاکستر بادی باعث افزایش کارایی، دوام و بهبود ویژگی‌های طولانی مدت می‌شود و از طرفی ارزان‌تر از سیمان پرتلند می‌باشد، بنابراین استفاده از این نوع افزودنی‌های معدنی نه تنها باعث کاهش هزینه SCC می‌شود، بلکه باعث بهبود ایفای نقش طولانی مدت آن می‌شود[۲].

از آنجائیکه اندازه‌گیری خواص رئولوژی بتن خودتراکم به خاطر نیاز به وسایل پیچیده اغلب مشکل است، لذا برای تعیین ویژگی کارایی SCC از ملات خودتراکم(SCM) استفاده می‌شود[۳ و۴]. مطابق با نظر Domone و همکاران [۴] ملات‌ها با اهداف زیر مورد آزمایش قرار می‌گیرند:

۱. بتن خود تراکم نسبت به بتن معمولی شامل درشت‌دانه کمتری می‌باشد(۳۱ تا ۳۵درصد حجمی)است. بنابراین خواص ملات بسیار نمایان می‌باشد.

۲. ارزیابی خواص ملات یک قسمت کامل طراحی فرآیند طرح اختلاط بسیاری از بتن‌های خود تراکم می‌باشد، بنابراین آگاهی از خواص ملات به‌خودی‌خود مهم است.

۳. ترکیب مصالح پودری همچنین برای کنترل خواص سخت شده همچون مقاومت استفاده می‌شود. دلیل چهارم اینکه آزمایش‌های ملات راحت‌تر از آزمایش‌های بتن می‌باشد.

نانوتکنولوژی، درک و به کارگیری خواص جدیدی از مواد و سیستم‌هایی در این ابعاد است که اثرات فیزیکی جدیدی از خود نشان می‌دهند. زمانی که ذرات بسیار ریز در خمیر سیمان، ملات و یا بتن شرکت داده می‌شوند، مصالحی با خواص متفاوت تولید می‌شود.

به نظر نویسندگان مطالعات محدودی در خصوص حضور نانوذرات در بتن و ملات خودتراکم برای دستیابی به ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی انجام پذیرفته است. چندین گزارش دربارهٔ حضور نانوذرات در بتن‌های معمولی موجود است که اکثر آنها نیز بر روی نانوذرات سیلیس متمرکز شده اند و حضور دیگر نانو ذرات بسیار کم گزارش شده است.

Senff و همکاران به بررسی اثر نانو سیلیس بر رئولوژی و خواص خمیر سیمان و ملات تازه پرداختند و متوجه تغییراتی در خواص رئولوژی ملات تازهٔ حاوی نانوذرات سیلیس شدند[۵]. Lin و همکاران گزارش کردند که ذرات نانو سیلیس مقاومت فشاری ملات سیمانی حاوی خاکستر لجن را بهبود می‌بخشد[۶]. Ltifi و همکاران گزارش کردند که با حضور نانوسیلیس خمیر سیمان ضخیم‌تر می‌گردد و روند هیدراتاسیون سیمان را تسریع می‌بخشد و مقاومت فشاری ملات با افزایش مقدار نانوسیلیس افزایش می‌یابد[۷]. همچنین Li و همکاران گزارش کردند که مقاومت فشاری و خمشی اندازه‌گیری شدهٔ نمونه‌های حاوی نانوسیلیس و نانو اکسید آهن بیشتر از نمونه‌های بدون نانو ذرات است[۸].

در این مقاله اثرات استفاده از نانوذرات‌سیلیس، آهن و مس به منظور بررسی خواص مکانیکی و جذب آب ملات خودتراکم ارائه می‌شود که شامل خاکستر بادی به عنوان افزودنی معدنی جهت بهبود روانی و یک نوع فوق‌روان‌کننده بر پایهٔ پلی‌کربوکسیلات جهت رسیدن به خودتراکمی است.

۲- برنامهٔ آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مورد استفاده

در این مطالعه از سیمان پرتلند نوع دو مطابق با آئین نامهٔ ASTM C150[۹] استفاده شد و برای افزایش روانی و بهبود شرایط از خاکستر بادی استفاده گردید. ترکیب شیمیایی و مشخصات فیزیکی سیمان و خاکستر بادی در جدول ۱ آورده شده است. از ماسهٔ رودخانه‌ای به عنوان سنگدانه استفاده شده است. دانه‌بندی ماسهٔ مورد استفاده در جدول ۲ نشان داده شده است. برای رسیدن

www.SID.ir

Arvhive of SID

به خودتراکمی از یک فوق‌روان‌کننده بر پایه پلی‌کربوکسیلات اتر با نام تجاری Vand super plast PCE مطابق با آئین‌نامهٔ C494 TYPE F ASTM با غلظت ۱/۰۳g/cm^3 استفاده شد.

سه نوع متفاوت نانو ذرات شامل نانوسیلیس، نانوآهن و نانومس به صورت محلول در آب که مقدار مادهٔ جامدآن ۳۰ درصد می‌باشد به مخلوط‌ها اضافه شد. سایر مشخصات نانوذرات در جدول ۳ ارائه شده است. این ذرات به همراه فوق‌روان‌کننده پلی کربوکسیلات اتر PCE مصرف گردید.

جدول۱- ترکیب شیمیایی و مشخصات فیزیکی سیمان و خاکستر بادی

تجزیهٔ شیمیایی (٪)	سیمان	خاکستر بادی
SiO_2	۲۱/۵۶	۵۵/۸
Al_2O_3	۶/۶۷	۲۰/۷۵
Fe_2O_3	۶/۱۷	۶/۶۶
CaO	۴۹/۸۸	۴/۱۲
MgO	۴/۵۱	۱/۹
SO_3	۲/۷۵	۰/۴۴
K_2O	۰/۷۶	۱/۷۳
Na_2O	۰/۴۳	۰/۷۸
LOI	۲/۷۹	۱/۹۵
وزن مخصوص(g/cm^3)	۳/۱۵	۲/۲
سطح مخصوص(g/cm^2)	۳۲۵۰	۲۸۵

جدول۲-دانه‌بندی ماسهٔ مورد استفاده

الزامات ASTM C136-01 (٪)	درصد عبوری	اندازه الک
۸۷-۱۰۰	۹۶	mm۴/۷۵
۷۴-۹۸	۸۲/۴	mm۲/۳۶
۵۸-۸۰	۶۸/۲	mm۱/۱۸
۳۸-۶۰	۴۲/۵	µm۶۰۰
۱۵-۳۴	۲۰/۷	µm۳۰۰
۲-۱۲	۶/۹	µm۱۵۰

جدول ۳- مشخصات نانو ذرات مصرفی

نوع نانو	قطر نانوذرات (نانومتر)	ویسکوزیته(CPS)	PH
نانو سیلیس	۱۵	۸	۱۰
نانوآهن	۶۰	۳	۱۰
نانومس	۱۵	۸	۱۰

۲-۲- نسبت‌های اختلاط

در این مطالعه ۱۶ طرح اختلاط ملات با نسبت‌های مختلف ساخته شد. مقدار خاکستر بادی ۲۵درصد وزن سیمان در نظر گرفته شد و نسبت آب به مواد چسباننده (شامل سیمان + خاکستربادی + نانوذرات) به طور ثابت در تمام نمونه‌ها ۰/۴ در نظر گرفته شد. ذرات نانو، به میزان ۱تا ۵درصد وزنی، جایگزین سیمان در نظر گرفته شد.

کدگذاری نمونه‌ها به این گونه است که عدد مربوط به آن نشانگر درصد وزنی استفاده شدهٔ نانوذرات است و حرف آخر مربوط به نوع نانو ذرهٔ استفاده شده می‌باشد که شامل ۳ نوع نانوسیلیس(NS) ، نانو آهن(NF) و نانو مس (NC) می‌باشد.

برای رسیدن به جریان اسلامپ که در محدوده EFNARC باشد، مقدار فوق‌روان‌کننده از ۳/۵ تا ۴/۵ کیلوگرم بر متر مکعب متغیر بود[۳]. جزئیات طرح اختلاط‌ها در جدول ۴ آورده شده است.کمیت‌های ارائه شده برحسب کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد.

۲-۳- آماده کردن نمونه‌ها

مساحت رویهٔ نانوذرات بسیار زیاد می‌باشد. همچنین از طرفی، ذرات نانو ممکن است توزیع یکنواختی در مخلوط نداشته باشند و این موضوع به طور مستقیم روی خواص فیزیکی و مکانیکی ملات‌ها اثر می‌گذارد. به همین دلیل روند تولید نمونه‌ها در این مطالعه بعد از چندین آزمایش مقدماتی به شکل زیر نتیجه داد:

۱. سیمان و ماسه برای مدت ۱دقیقه با سرعت متوسط (۸۰rpm) مخلوط شدند.

۲. خاکستربادی و ۳۰٪ آب اختلاط به همراه ذرات نانو اضافه شد و برای مدت ۱دقیقه با سرعت بالا (۱۲۰rpm) مخلوط شدند.

۳. برای مدت ۱/۵ دقیقه به مخلوط اجازه استراحت داده شد.

۴. بعد از آن ۷۰٪ آب باقیمانده به همراه فوق‌روان‌کننده اضافه شد و برای مدت ۲ دقیقه مخلوط شدند.

ملات‌ها برای رسیدن به جریان اسلامپ ۲۴ تا ۲۶ سانتی‌متر طراحی شدند که با تغییر در مقدار فوق روان‌کننده نتیجه داد[۳].

مخلوط‌ها در قالب‌های مکعبی ۵×۵×۵ سانتی‌متری و قالب‌های منشوری ۲۰×۵×۵ سانتی‌متری ریخته شدند و بعد از یک روز که

www.SID.ir

Arvhive of SID

جدول۴- جزئیات طرح اختلاط‌ها

مخلوط	سیمان	خاکستر بادی	نانوسیلیس	نانوآهن	نانومس	آب	ماسه	فوق‌روان‌کننده
Control	۵۲۵	۱۷۵	۰	۰	۰	۲۸۰	۱۲۱۰	۴/۲
1NS	۵۱۸	۱۷۵	۷	۰	۰	۲۸۰	۱۱۹۸	۳/۷
2NS	۵۱۱	۱۷۵	۱۴	۰	۰	۲۸۰	۱۱۸۷	۴
3NS	۵۰۴	۱۷۵	۲۱	۰	۰	۲۸۰	۱۱۷۶	۴
4NS	۴۹۷	۱۷۵	۲۸	۰	۰	۲۸۰	۱۱۶۴	۴/۱
5NS	۴۹۰	۱۷۵	۳۵	۰	۰	۲۸۰	۱۱۵۳	۴/۲
1NF	۵۱۸	۱۷۵	۰	۷	۰	۲۸۰	۱۱۹۸	۳/۵
2NF	۵۱۱	۱۷۵	۰	۱۴	۰	۲۸۰	۱۱۸۷	۳/۵
3NF	۵۰۴	۱۷۵	۰	۲۱	۰	۲۸۰	۱۱۷۶	۴
4NF	۴۹۷	۱۷۵	۰	۲۸	۰	۲۸۰	۱۱۶۴	۴
5NF	۴۹۰	۱۷۵	۰	۳۵	۰	۲۸۰	۱۱۵۳	۴
1NC	۵۱۸	۱۷۵	۰	۰	۷	۲۸۰	۱۱۹۸	۳/۷
2NC	۵۱۱	۱۷۵	۰	۰	۱۴	۲۸۰	۱۱۸۷	۳/۹
3NC	۵۰۴	۱۷۵	۰	۰	۲۱	۲۸۰	۱۱۷۶	۴
4NC	۴۹۷	۱۷۵	۰	۰	۲۸	۲۸۰	۱۱۶۴	۴/۵
5NC	۴۹۰	۱۷۵	۰	۰	۳۵	۲۸۰	۱۱۵۳	۴/۵

نمونه‌ها درون قالب شکل گرفتند برای عمل‌آوری داخل آب با دمای۱±۲۰ درجه سانتی‌گراد تا روز آزمایش نگهداری شدند.

خواص ملات تازه توسط آزمایش‌های جریان اسلامپ و جریان قیف‌V شکل و خواص مکانیکی ملات سخت‌شده با آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت خمشی در سنین ۳، ۷، ۲۸و ۹۰ روزه و جذب آب نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه بررسی شدند.

۳- نتایج و تحلیل آزمایش‌ها

۳-۱- خواص ملات خود تراکم تازه

نتایج آزمایش‌های جریان اسلامپ و قیف Vشکل برای ملات‌های خودتراکم مختلف در جدول ۵ آورده شده است. تمامی نمونه‌های سیمانی برای رسیدن به قطر جریان اسلامپ ۲۵±۱cm که با تنظیم کردن مقدار فوق‌روان‌کننده حاصل شده بود طراحی شدند. بنابراین تمام مخلوط‌های تازه، قطر جریان اسلامپ توصیه شده توسط EFNARC را دارا هستند[۳].

همچنین باید در نظر داشت مقدار فوق‌روان‌کننده با رعایت حد مجاز به حدی اضافه شده است که نمونه‌ها دچار آب‌انداختگی یا جداشدگی نشوند.

همانطور که مشخص است استفاده از نانوذرات قطر جریان اسلامپ را افزایش داده است. بنابراین مشخص می‌شود استفاده از نانوذرات‌سیلیس، آهن و مس دارای نفوذ زیادی روی خواص ملات تازه خود تراکم داشته است.

الگوی مشاهده شده در راستای افزایش کارایی در جریان اسلامپ، در آزمایش زمان جریان قیفV شکل نیز دیده شد. درواقع ملات سیمانی پایه (شاهد) دارای زمان جریان ۱۱ثانیه می باشد که با اضافه شدن نانوذرات‌سیلیس زمان جریان تا ۸/۳ ثانیه، با اضافه شدن نانوذرات‌آهن تا ۷/۶ ثانیه و با اضافه شدن نانوذرات‌مس تا ۷/۷ ثانیه هم کاهش داشته است.

۳-۲- مقاومت فشاری

مقادیر مقاومت فشاری ملات‌های خودتراکم در جدول ۶ آورده

www.SID.ir

Arvhive of SID

شده است. تغییرات مقاومت فشاری نیز در طول زمان در شکل‌های ۱ تا ۳ نشان داده شده است. در مقایسه با نمونهٔ کنترل، در تمامی نمونه‌ها افزایش در مقاومت فشاری ملاحظه می‌گردد.

از جدول ۶ ملاحظه می‌شودکه مقاومت فشاری نمونه‌ها با اختلاط‌های 1NS، 2NS، 3NS، 4NS و 5NS (ملات‌های خودتراکم حاوی نانوذرات‌سیلیس) در همهٔ سنین بالاتر از مقاومت فشاری ملات خودتراکم کنترل با نسبت w/b یکسان می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود نمونه‌هایی که حاوی ۴٪ وزنی نانوذرات‌سیلیس می‌باشد مقاومت فشاری بیشتری در مقایسه با دیگر نمونه‌ها دارند.

جدول۵- نتایج آزمایش‌های جریان اسلامپ و قیف Vشکل

مخلوط	قطر جریان اسلامپ (cm)	زمان جریان قیف V شکل (s)
Control	۲۴/۵	۱۱
1NS	۲۴/۵	۱۰/۲
2NS	۲۴/۶	۹/۹
3NS	۲۴/۸	۹/۷
4NS	۲۵	۹/۱
5NS	۲۵	۸/۳
1NF	۲۴/۷	۱۰/۸
2NF	۲۴/۷	۱۰/۳
3NF	۲۴/۹	۹/۸
4NF	۲۵	۸/۵
5NF	۲۵/۵	۷/۶
1NC	۲۴/۵	۹/۸
2NC	۲۴/۸	۹/۲
3NC	۲۴/۸	۸/۲
4NC	۲۵	۸/۲
5NC	۲۵/۵	۷/۷
معیار پذیرفته شدهٔ ملات خودتراکم توسط EFNARC		
۲۴-۲۶		۷-۱۱

نتایج نشان می‌دهد که مقاومت فشاری نمونه‌ها با اختلاط‌های 1NF، 2NF، 3NF، 4NF و 5NF (ملات‌های خودتراکم حاوی نانوذرات‌آهن) در سنین اولیه (۳ و ۷ روز) مقاومت کمتری در مقایسه با نمونهٔ کنترل دارند، اما در سنین بالاتر (۲۸ و ۹۰روز) مقاومت فشاری آنها نسبت به نمونهٔ کنترل افزایش یافته است که می تواند به علت واکنش‌پذیری نانوذرات‌آهن در طولانی مدت باشد. افزایش مقاومت فشاری در اختلاط حاوی ۲٪ وزنی نانوذرات‌آهن بیشترین مقدار را داراست و به علت اینکه قطر این ذرات نسبت به دو نوع نانوی دیگر بیشتر است، ملاحظه می‌شود که در درصدهای بالاتر استفاده از این نوع نانوذرات، مقاومت را کاهش می‌دهد.

همچنین از نتایج مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری نمونه‌ها با اختلاط‌های 1NC، 2NC، 3NC، 4NC و 5NC (ملات‌های خودتراکم حاوی نانوذرات مس) در همهٔ سنین بالاتر از مقاومت فشاری ملات خودتراکم کنترل با نسبت w/b یکسان می‌باشد. نمونه‌هایی که حاوی ۳٪ وزنی نانوذرات‌مس می‌باشد مقاومت فشاری بیشتری در مقایسه با دیگر نمونه‌ها دارند.

اگر ذرات نانو به خوبی پخش نشوند جمع شدن نانو ذرات باعث ایجاد یک ناحیهٔ ضعیف به شکل حفره می‌شود و به تبع آن میکروساختار هیدرات سیمان نمی‌تواند شکل بگیرد و در نتیجه انتظار می‌رود مقاومت پایین‌تری بدست آید.

دلایل اصلی افزایش مقاومت فشاری ملات‌های خودتراکم این است که زمانی که ذرات‌نانو به‌طور یکنواختی در خمیر سیمان پخش می‌شوند، به عنوان هسته‌ای برای گره‌خوردن و ارتباط برقرار کردن با هیدرات سیمان عمل می‌کنند و همچنین به علت انرژی سطحی بالا باعث تسریع هیدراتاسیون سیمان می‌شوند که این قضیه برای افزایش مقاومت مطلوب می‌باشد. دلیل دیگر این که توزیع ذرات بی‌شمار نانو می‌تواند با تولیدات هیدراته در اطراف نواحی انتقال بین نانو ذرات و تولیدات هیدراته به شکل محکمی مقید شود. به عبارت دیگر، ذرات نانو مانع از رشد کریستال‌هایی مانند $Ca(OH)_2$ در میان تولیدات هیدراته می‌شوند. دلیل سوم اینکه ذرات نانو حفرات سیمانی را پر می‌کنند که موجب افزایش مقاومت می‌شوند. هرچند، به علت اینکه قطر ذرات نانوآهن نسبت به سایر نانو ذرات‌ها بسیار زیاد بودند، این ذرات نتوانستند به خوبی پخش شوند و بدین ترتیب نواحی ضعیف شکل گرفته است.

www.SID.ir

Arvhive of SID

۳-۳- مقاومت خمشی

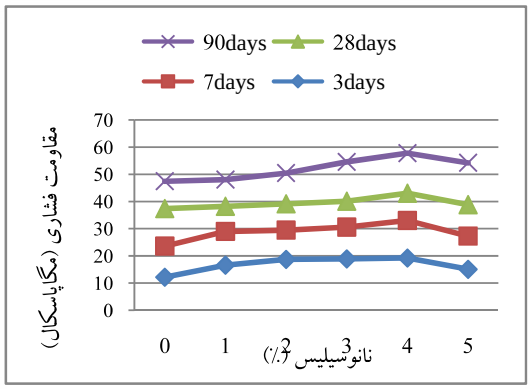
مقاومت خمشی ملات‌های خودتراکم در جدول ۷ ارائه شده است و تغییرات مقاومت خمشی در سنین مختلف در شکل‌های ۴ تا ۶ نشان داده شده است. در مقایسه با نمونهٔ کنترل در تمامی نمونه‌ها می‌توان افزایش در مقاومت را مشاهده نمود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد نانوذرات مختلف تا میزان ۳٪، مقاومت خمشی افزایش می‌یابد و پس از آن مقاومت رو به کاهش می‌رود. به علاوه می‌توان پیش‌بینی نمود که اثر نانوذرات در بتن خودتراکم نیز باعث افزایش مقاومت آن گردد، زیرا نه‌تنها خمیر سیمان را بهبود می‌بخشد بلکه سطح مشترک بین خمیر و سنگدانه‌ها رابهبود می‌بخشد.

۳-٤- جذب آب

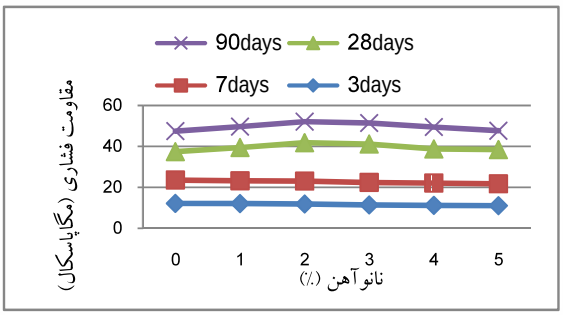
نمونه‌های مکعبی ۵×۵×۵ سانتی متر پس از ۲۸ روز عمل‌آوری از آب خارج و براساس ASTM C642 [۱۰] برای آزمایش جذب آب آماده شدند.

جدول۶- مقاومت فشاری ملات‌های خود تراکم

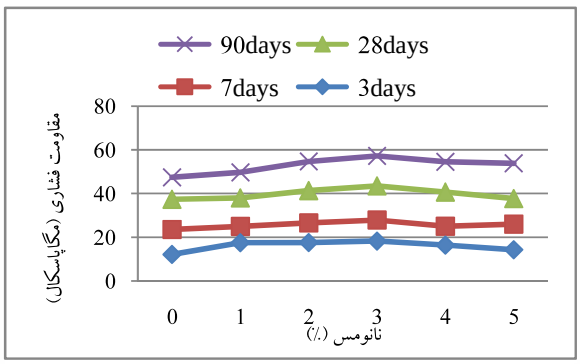
مخلوط	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)			
	۳ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه	۹۰ روزه
Control	۱۲/۱۳	۲۳/۵۷	۳۷/۴	۴۷/۴۳
1NS	۱۶/۵۷	۲۸/۹۷	۳۸/۲۳	۴۸/۰۷
2NS	۱۸/۷	۲۹/۴۳	۳۹/۱۳	۵۰/۴۳
3NS	۱۸/۸۷	۳۰/۵۷	۴۰/۱	۵۴/۵۷
4NS	۱۹/۲	۳۳	۴۳/۰۳	۵۷/۷۷
5NS	۱۵/۰۳	۲۷/۲۷	۳۸/۸۳	۵۴/۲
1NF	۱۲/۰۳	۲۳/۲	۳۹/۴۳	۴۹/۴۷
2NF	۱۱/۸۳	۲۳/۰۳	۴۱/۷۷	۵۲/۱
3NF	۱۱/۳۷	۲۲/۴	۴۱/۱۳	۵۱/۴۷
4NF	۱۱/۱۷	۲۲/۰۷	۳۸/۷	۴۹/۴۷
5NF	۱۱	۲۱/۷۳	۳۸/۴۳	۴۷/۶۳
1NC	۱۷/۵۳	۲۴/۹۷	۳۸/۰۳	۴۹/۷
2NC	۱۷/۶	۲۶/۵۷	۴۱/۳۷	۵۴/۷
3NC	۱۸/۲۷	۲۷/۹	۴۳/۵۳	۵۷/۲۳
4NC	۱۶/۴	۲۵/۰۳	۴۰/۷	۵۴/۵۳
5NC	۱۴/۳	۲۶	۳۷/۷۳	۵۳/۸۷



شکل۱- مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی نانوسیلیس



شکل۲- مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی نانوآهن



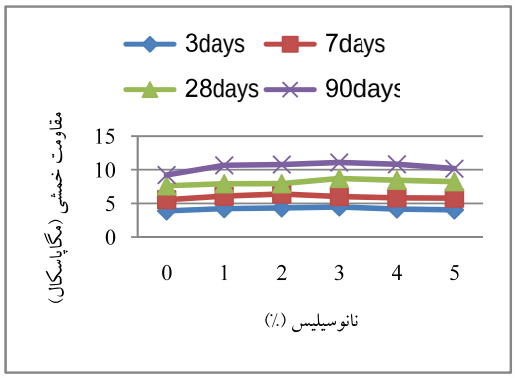
شکل۳- مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی نانومس

نتایج جذب آب ملات‌های خودتراکم در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که در شکل پیداست، اضافه شدن نانوذرات‌سیلیس تا ۴ درصد به ملات خودتراکم باعث کاهش جذب آب نسبت به نمونه کنترل شد ولی اضافه شدن ۵ درصد نانوسیلیس به ملات باعث افزایش ناچیز جذب آب شده است. اضافه شدن نانوذرات‌آهن نیز باعث کاهش مقدار جذب آب ملات خودتراکم نسبت به نمونهٔ کنترل شد و فقط افزودن ۴

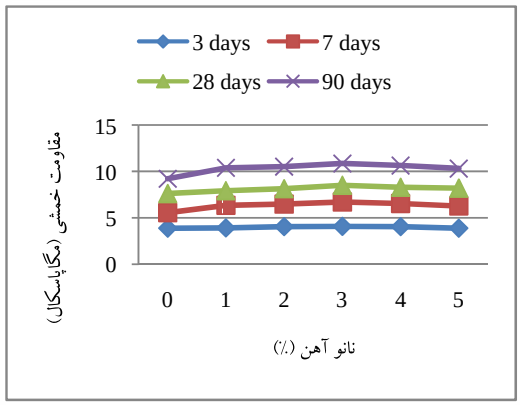
www.SID.ir

Arvhive of SID

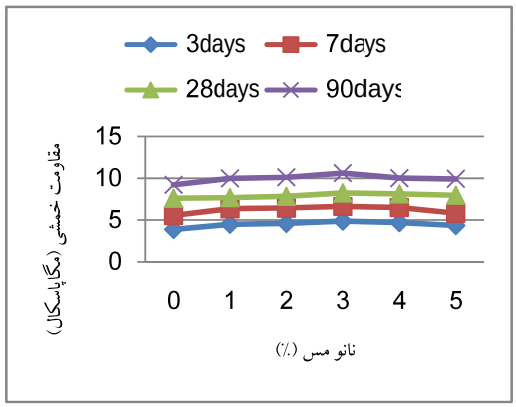
درصد نانوآهن به ملات به مقدار غیر قابل توجهی جذب آب نمونه را افزایش داد که می‌تواند به علت توزیع غیر یکنواخت نانو ذرات در این نمونه باشد که حفرات موجود را پوشش دهد. در اختلاط‌هایی که ذرات نانومس به آن افزوده شد مقدار جذب آب در تمامی آنها کاهش یافت.



شکل۴- مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی نانوسیلیس



شکل۵- مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی نانوآهن



شکل۶- مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی نانومس

جدول۷- مقاومت خمشی ملات‌های خود تراکم

مخلوط	مقاومت خمشی (مگاپاسکال)			
	۳روزه	۷روزه	۲۸روزه	۹۰روزه
Control	۳/۸۸	۵/۵۵	۷/۶۱	۹/۲۱
1NS	۴/۲۲	۶/۰۷	۷/۹	۱۰/۶۶
2NS	۴/۳۳	۶/۳۸	۷/۹۲	۱۰/۷۷
3NS	۴/۴۷	۶/۰۱	۸/۶	۱۱/۰۸
4NS	۴/۱۶	۵/۸۴	۸/۴۴	۱۰/۸
5NS	۴/۰۳	۵/۷۸	۸/۲۱	۱۰/۱۷
1NF	۳/۹۱	۶/۳۵	۷/۹۲	۱۰/۳۹
2NF	۴/۰۵	۶/۴۷	۸/۱۴	۱۰/۵۱
3NF	۴/۰۸	۶/۷۱	۸/۵۱	۱۰/۸۵
4NF	۴/۰۵	۶/۵	۸/۲۹	۱۰/۶۳
5NF	۳/۸۸	۶/۲۷	۸/۲	۱۰/۳۱
1NC	۴/۵	۶/۳۵	۷/۶۹	۹/۹۹
2NC	۴/۵۹	۶/۴۴	۷/۸۴	۱۰/۱۱
3NC	۴/۸۷	۶/۶۲	۸/۲۴	۱۰/۶۲
4NC	۴/۷	۶/۵	۸/۱۴	۱۰/۰۲
5NC	۴/۳۴	۵/۸۲	۷/۹۸	۹/۹۲

با نگاهی اجمالی به مقادیر جذب آب بدست آمده می‌توان دریافت که استفاده از نانوذرات‌سیلیس، آهن و مس در ملات خودتراکم باعث کاهش میزان جذب آب شده است. دربین نانوذرات مذکور، مخلوط 3NC که حاوی ۳ درصد نانو مس می‌باشد بیشترین اثر را برخواص جذب آب ملات‌ها داشته و موجب کاهش میزان جذب آب از ۸/۶۷ به ۷/۹ شده است. کاهش مقدار جذب آب در ملات‌های خودتراکم با افزودن نانوذرات‌سیلیس، آهن و مس می‌تواند به علت کاهش مقدار حفرات موجود در نمونه‌ها باشد. به عبارت دیگر، درصد جذب آب، مربوط به تخلخل نمونه در حال اشباع می‌باشد که با آب در ارتباط می‌باشد.

ذرات بسیار ریز نانوذرات با احاطهٔ ذرات درشت‌تر سیمان همچون کانون‌های واکنش جهت رسوب محصولات هیدراتاسیون عمل کرده و از این طریق زمینهٔ شکل‌گیری بافتی همگن و یکنواخت از محصولات هیدراته را فراهم می‌کنند. لذا

www.SID.ir

Arvhive of SID

به آسانی می‌توان نتیجه گرفت حضور این ذرات بسیار ریز با پرکردن حفرات موبین هم وجود در بافت خمیر سیمان و مسدود کردن راه‌های ارتباطی شبکهٔ موبینه از یک سو، و ایجاد میکروساختار یکنواخت و توزیع بهتر محصولات هیدراتاسیون و درنتیجه کاهش حفرات نفوذپذیر از سوی دیگر، موجبات کاهش جذب آب ملات را فراهم می‌کنند.

۳-۵- میکروساختار ملات خود تراکم

بررسی‌ها حاکی از آن است که خصوصیات فیزیکی مصالح سیمانی از جمله مقاومت و نفوذپذیری تا حد بسیار زیادی به میکروساختار خمیر سیمان سخت‌شده وابسته است. از این‌رو، بررسی میکروساختار سیمان می‌تواند راهی در جهت پیش‌بینی خواص محصولات سیمانی باشد. به همین دلیل، اثر افزودن نانوذرات‌سیلیس، آهن و مس برمیکرو ساختار ملات خودتراکم ساخته شده با مخلوط‌های مختلف موردبررسی قرار گرفته است. شکل ۸ نشان‌دهندهٔ میکروساختار ملات خودتراکم کنترل می‌باشد. با توجه به تصاویر، مشاهده می‌شود که نمونه‌های فاقد نانوذرات دارای سطح یک مو بیش ناهموار می‌باشد که توسط کریستال‌های بزرگی احاطه شده است. در بخش‌هایی از تصویر مربوطه، رشد موضعی کریستال‌های هیدراته مشاهده می‌شود که بر عدم یکنواختی آن می‌افزاید. همچنین وجود خلل و فرج‌هایی که در حدود ۱۰ میکرومتر عرض دارند در تصویر مشخص است.

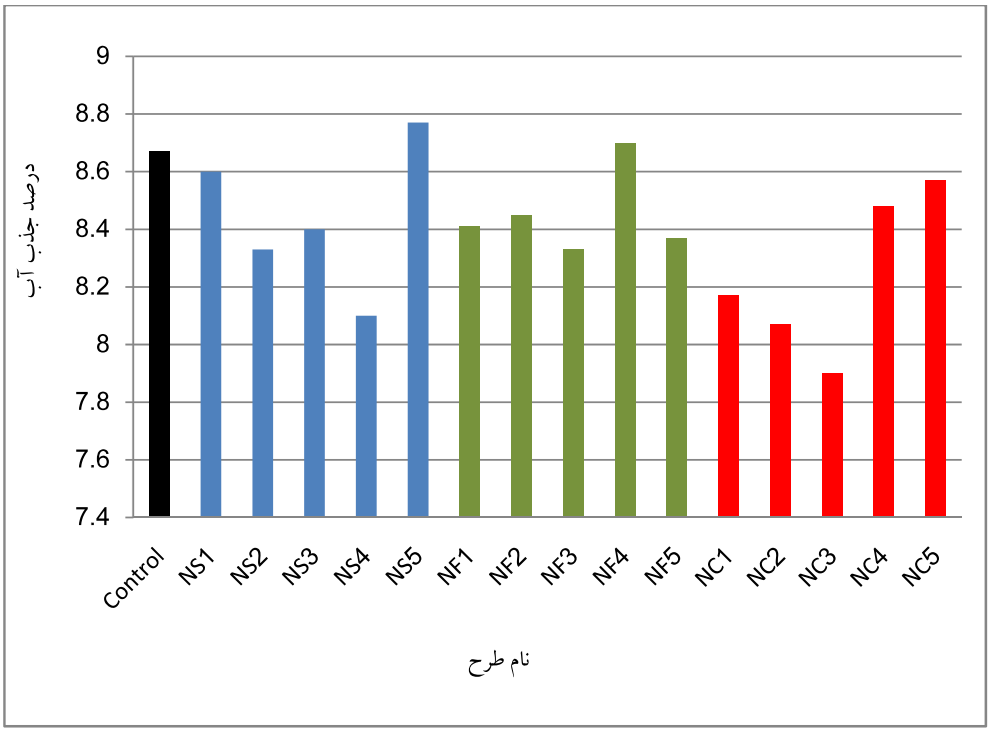
در شکل ۹ می‌توان میکروساختار ملات‌های خودتراکم حاوی ۱ درصد، ۳ درصد و ۴ درصد نانوسیلیس را به ترتیب مشاهده کرد. در تصویری که مربوط به حضور ۱ درصد نانوسیلیس می‌باشد مشخص است که با وجود ذرات نانو همچنان نمونه دارای عدم یکنواختی و خلل و فرج‌هایی می‌باشد. تصویری که از ملات خودتراکم ساخته شده با ۳ درصد نانوسیلیس تهیه شده، موید افزایش تراکم و افزایش یکنواختی ملات سخت شده با حضور نانوذرات سیلیس می‌باشد. اما همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، در نمونهٔ حاوی ۴ درصد نانوسیلیس نسبت به حضور ۳ درصدی نانوسیلیس شاهد افزایش تخلل هستیم. روندی مشابه توسط دیگر محققان نیز برای بتن خودتراکم حاوی روباره و درصدهای مختلف نانوسیلیس گزارش شده است[۱۱].

در شکل ۱۰ می‌توان میکروساختار ملات‌های خودتراکم حاوی ۱ درصد، ۲ درصد و ۳ درصد نانوآهن را به ترتیب مشاهده کرد. در تصویری که مربوط به حضور ۱درصد نانو آهن می‌باشد مشخص است که نمونه سطحی ناهموار دارد. تصویری که از ملات خودتراکم ساخته‌شده با ۲ درصد نانوآهن تهیه شده، موید افزایش تراکم و افزایش یکنواختی ملات سخت شده با حضور نانو آهن می‌باشد و در تصویر مربوط به نمونهٔ حاوی ۳ درصد نانو آهن همچنان سطحی هموار به همراه خلل و فرج‌های بسیار ریز به عرض حدود ۱ میکرومتر می‌باشد. به نظر می‌رسد عدم ریزی کافی ذرات نانوآهن موجب شکل‌گیری چنین ساختاری شده است و با وجود مقدار بیشتر نانوذرات (۳ درصد) همچنان خلل و فرج‌هایی در حدود ۱ میکرومتر در سطح نمونه به وجود آمده است.

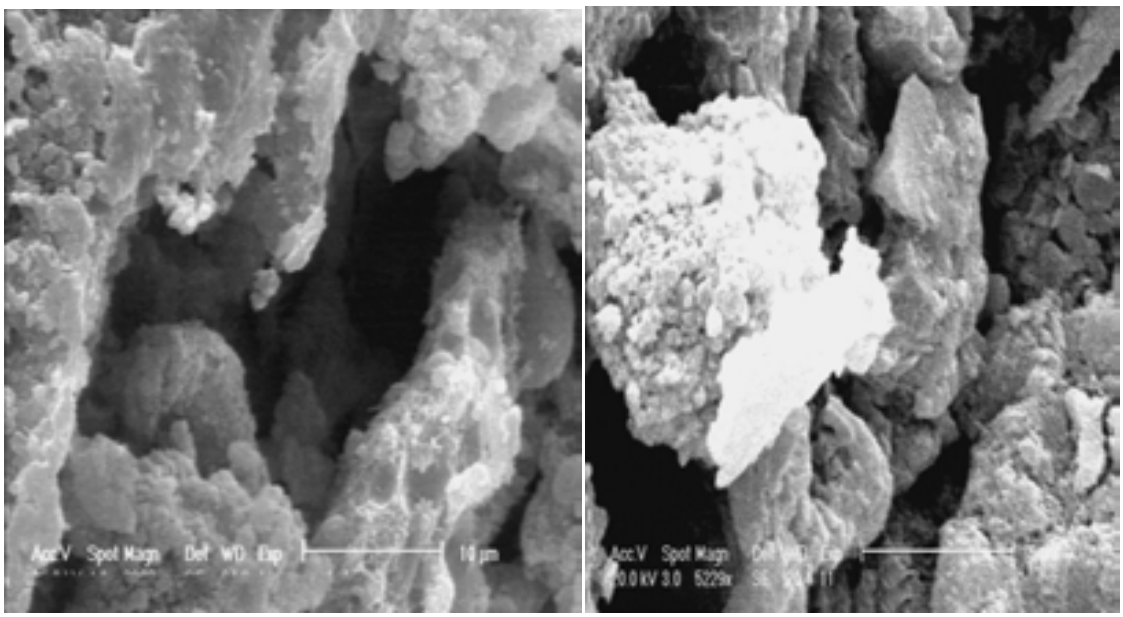
در شکل ۱۱ می‌توان میکروساختار ملات‌های خودتراکم حاوی ۱ درصد، ۳ درصد و ۴ درصد نانومس را به ترتیب مشاهده کرد. در شکل ۱۱(a)که مربوط به حضور ۱ درصد نانومس است، مشخص است که ذرات نانو مس نتوانسته‌اند خلل و فرج‌های موجود در نمونه را به‌خوبی پوشش دهند و حفره‌های موجود در سطح نمونه این قضیه را نشان می‌دهد. شکل ۱۱ (b و c) که از ملات خودتراکم ساخته‌شده با ۳ درصد و ۴ درصد نانومس تهیه شده، موید افزایش تراکم و افزایش یکنواختی ملات سخت‌شده با حضور نانومس می‌باشد. به نظر می‌رسد اثر پرکنندگی نانو ذرات عامل اصلی افزایش تراکم بافت ملات خودتراکم سخت‌شده باشد. در عین حال نانوذرات به دلیل فراهم کردن تعداد بسیار زیادی کانون‌های واکنش جهت رسوب محصولات هیدراتاسیون، زمینهٔ شکل‌گیری میکروساختاری یکنواخت و همگن را فراهم ساخته است. نکتهٔ قابل توجه همخوانی بسیار خوب نتایج حاصل از آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و جذب آب با تصاویرگرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی است. چرا که در اکثر موارد بهبود میکروساختار ملات خودتراکم متناظر با بهبود خصوصیات مکانیکی و فیزیکی ملات‌های ساخته شده با آن می‌باشد.

www.SID.ir

Arvhive of SID



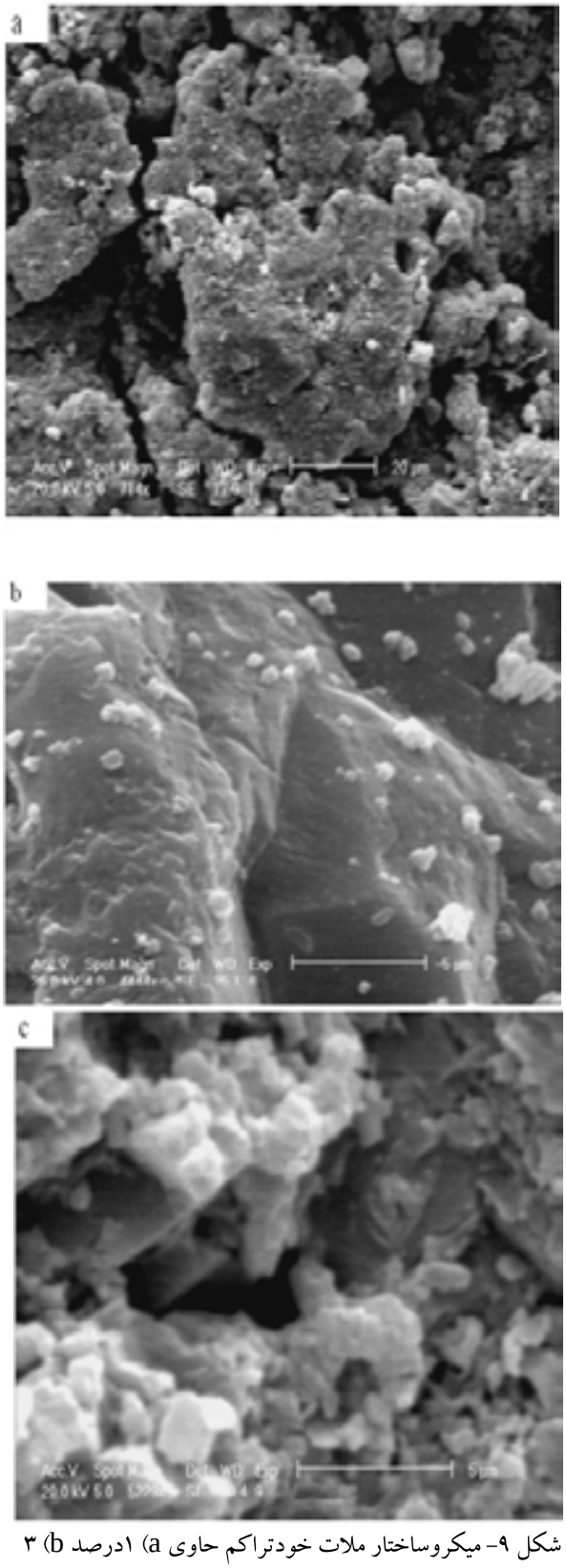
شکل ۷- نتایج جذب آب ملات‌های خودتراکم



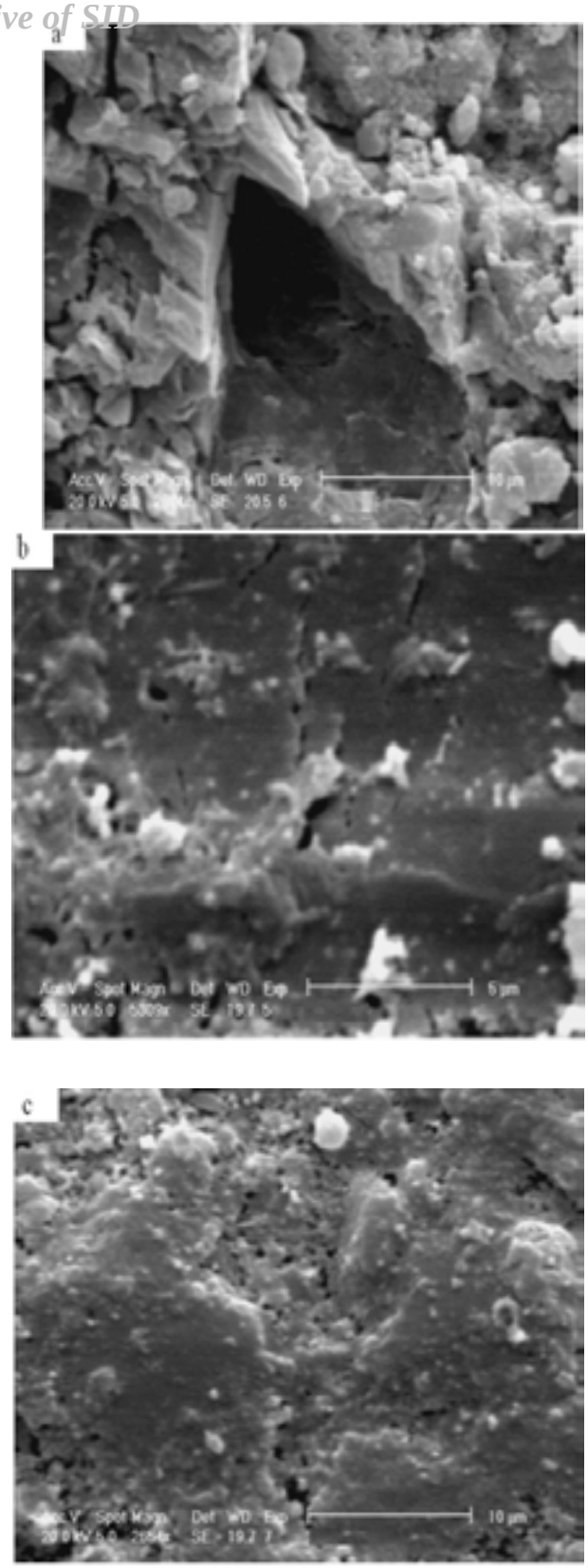
شکل ۸- میکروساختار ملات خودتراکم نمونهٔ کنترل

www.SID.ir

Arvhive of SID



شکل ۹- میکروساختار ملات خودتراکم حاوی a) ۱درصد b) ۳ درصد و c)۴ درصد نانوسیلیس



شکل ۱۰- میکروساختار ملات خودتراکم حاوی a) ۱ درصد b) ۲ درصد و c) ۳ درصد نانوآهن

www.SID.ir

Arvhive of SID

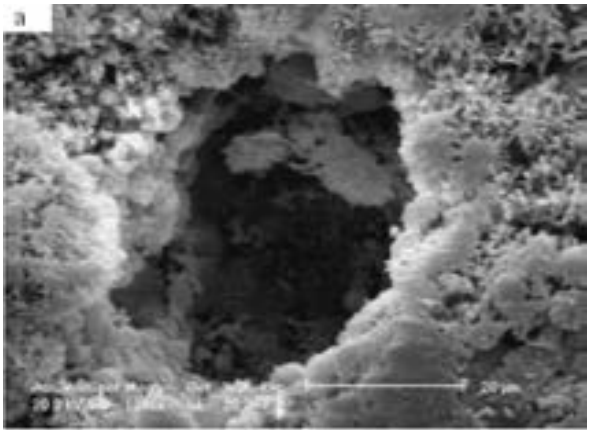
شده است. در واقع ملات سیمانی پایه (شاهد) دارای زمان جریان ۱۱ ثانیه می‌باشد که با اضافه شدن نانوذرات‌سیلیس زمان جریان تا ۸/۳ ثانیه، با اضافه‌شدن نانوذرات آهن تا ۷/۶ ثانیه و با اضافه‌شدن نانوذرات‌مس تا ۷/۷ ثانیه هم کاهش داشته است. لذا انتظار می‌رود استفاده از نانوذرات‌سیلیس،آهن و مس دارای نفوذ زیادی روی خواص ملات تازهٔ خودتراکم داشته باشد.

۲.افزودن نانوسلیس به ملات خودتراکم، موجب بهبود قابل‌ملاحظه‌ای در مقاومت‌های فشاری و خمشی ملات‌های خودتراکم گردید.جایگزین کردن نانوسلیس تا ۴ درصد وزنی بر میزان بهبود مقاومت فشاری افزود و در درصدهای بالاتر مقاومت فشاری رو به کاهش گذاشت. همچنین با افزایش نانوسلیس تا ۳ درصد وزنی بر میزان بهبود مقاومت خمشی افزوده شد و پس از آن مقاومت رو به کاهش گذاشت. اگرچه با وجود کاهش در مقاومت‌های فشاری و خمشی، همچنان مقاومت نمونه بالاتر از نمونهٔ شاهد می‌باشد.

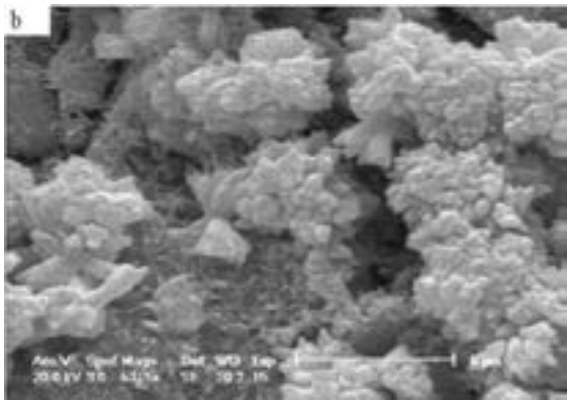
۳.همراه کردن نانوآهن با ملات خودتراکم، موجب بهبود در مقاومت‌های فشاری و خمشی ملات‌های خودتراکم گردید. در سنین اولیه (۳ و ۷ روز) مقاومت فشاری کمتری در مقایسه با نمونهٔ کنترل بدست آمد اما در سنین بالاتر (۲۸ و ۹۰ روز) مقاومت فشاری آنها نسبت به نمونهٔ کنترل افزایش یافته است که این افزایش در اختلاط شامل ۲ درصد نانوآهن بیشترین مقدار را داراست. همچنین با افزایش درصد جایگزینی نانوآهن تا ۳ درصد وزنی بر میزان بهبود مقاومت خمشی افزوده شد و بعد از آن مقاومت رو به کاهش گذاشت. اگرچه با وجود کاهش در مقاومت خمشی، همچنان مقاومت نمونهٔ بالاتر از نمونهٔ کنترل بود. البته روند افزایش مقاومت در مقایسه با نمونه‌های حاوی نانوسیلیس و نانومس بسیار کندتر بوده است.

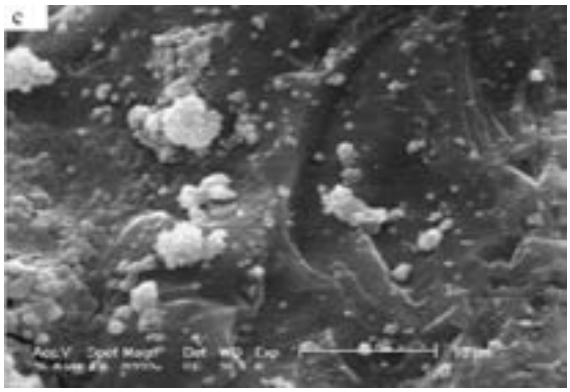
۴.بررسی‌ها نشان داد که افزودن نانوذرات‌مس به ملات خودتراکم نیز باعث بهبود در مقاومت‌های فشاری و خمشی شده است.

۵.در میان نمونه‌های حاوی نانوذرات مختلف، نمونه‌های خودتراکم حاوی ۴ درصد نانوسیلیس بیشترین روند کسب مقاومت فشاری در سنین مختلف را نسبت به دیگر نمونه‌های حاوی نانوذرات‌آهن و مس نشان داده است.



شکل۱۱(a)- میکروساختارملاتخودتراکم حاوی ۱درصد نانومس





شکل۱۱(b و c)- میکروساختار ملات خودتراکم حاوی b) ۳ درصد و c) ۴ درصد نانومس

۴- نتیجه‌گیری

۱.استفاده از نانو ذرات به‌روشنی قطر جریان اسلامپ را افزایش می‌دهد. الگوی مشابه در آزمایش زمان جریان قیف V نیز دیده

www.SID.ir

Arvhive of SID

۶.استفاده از نانوسلیس باعث کاهش جذب آب ملات‌ها گردید که حکایت از پتانسیل بالای این ماده افزودنی درکاهش نفوذپذیری کامپوزیت‌های سیمانی دارد. میزان جذب آب ملات حاوی ۴درصد نانو سیلیس کمتر از نمونه‌های حاوی نانوسیلیس با درصدهای دیگر بوده است.

۷.اضافه شدن نانوذرات‌آهن و مس نیز باعث کاهش مقدار جذب آب ملات‌های خوداتراکم نسبت به نمونه کنترل شد و فقط افزودن ۴ درصد نانوآهن به ملات خوداتراکم به مقدار غیرقابل توجه‌ای جذب آب نمونهٔ را نسبت به نمونهٔ کنترل افزایش داد. در بین نانوذرات مذکور، مخلوط 3NC که حاوی ۳ درصد نانومس می‌باشد بیشترین اثر را بر خواص جذب آب ملات‌ها داشته و موجب کاهش میزان جذب آب از ۸/۶۷ به ۷/۹ شده است.

۸.کاهش مقدار جذب آب در ملات‌های خود تراکم با افزودن نانو ذرات سیلیس، آهن و مس می تواند به علت کاهش مقدار حفرات موجود در نمونه‌ها باشد. به عبارت دیگر درصد جذب آب، مربوط به تخلخل نمونه در حال اشباع می باشد که باآب در ارتباط می باشد.

۵- مراجع

1. Okamura H and Ouchi M "Application of self compacting concrete in Japan" Proceeding of the first International RILEM self compacting concrete. Japan, pp. 3-9 (2000).

2. "The Europen Guidline for self compacting concrete specification", production and use. May (2005).

3. EFNARC"Specification and guidlines for self compacting concrete", pp. 29-35, Feb (2002)http://efnarc.org.

4. Domone PL, Jin J "Proprties of mortar for self-compacting concrete". In: Proceeding of the first International RILEM symposium on self-compacting concrete. Stockholm, Sweden, pp. 109-120 (1999).

5. Senff L, Labrincha J.A, Ferreira V, Hotza D, L. Repette W.L, "Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars", Construction and Building Materials 23 pp. 2487–2491 (2009).

6. Lin K.L, Chang W.C, Lin D.F, Luo H, Tsai M.C, "Effects of nano-SiO2 and different ash particle sizes on sludge ash–cement mortar", Journal of Environmental Management 88 pp. 708–714 (2008).

7. Ltifi M , Guefrech A, Mounanga P, Khelidj A, "Experimental study of the effect of addition of nano-silica on the behavior of cement mortars ", Proceeding Engineering 10 pp. 900–905 (2011).

8. Li H, Xiao H, Yuan J, Ou J, "Microstructure of cement mortar with nano-particles", Composites: Part B 35 pp. 185–189 (2004).

9. ASTM C150 "Standard Specification for Portland Cement", Annual book of ASTM standards, 4.01, 186-189, (2000).

10. ASTM 642 "Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete", Annual book of ASTM standards, 4.01, pp. 186-189, (2000).

11. Ali Nazari, Shadi Riahi, "The role of SiO2 nanoparticles and ground granulated blast furnace slag admixtures on physical, thermal and mechanical properties of self compacting concrete", Materials Science and Engineering A 528 pp. 2149–2157(2011).

www.SID.ir

Arvhive of SID

Effect of Nano Materials on Engineering Properties of Self Compacting Mortar Containing Fly Ash

R. Madandoust*
Associate Professor Department of Civil Engineering, University of Guilan
M. M. Ranjbar
Assistant Professor Department of Civil Engineering, University of Guilan
E. Mohseni
M.Sc student, Department of Civil Engineering, University of Guilan

(Received: 2013/9/23 - Accepted: 2013/11/20)

Abstract

Nano-structurematerials recently attracted much scientific interest due to their superior performance. As well as concrete industry, according to its needs both in terms of strength and durability is one of the important users of nano structured materials. Therefore, concrete and mortar studies containing additive in nano scale is so important to development of new building materials.

The aim of this study is to assess the self compacting mortars (SCMs) by using nano particles as a replacement of cement. In addition to reducethe amount of cement and to achieve the better workability, 25% fly ash was replaced in cement in all samples. Reduction of cement usage is a symbol of sustainable development and application of nano particles is a mark of nano technology helping in the same direction to make a brighter future. In this paper, the engineering properties of SCMs made by using of 1- 5% of SiO_2, Fe_2O_3 and CuO nano particles are investigated. The fresh properties of mortar determined using mini V-funnel and mini slump flow tests and the hardened properties that determined by compressive strength, flexural strength tests at 3, 7, 28 and 90 days and water absorption test determined at 28 days.The results of experiments show the appropriate performance of the mentioned nanoparticles especially for SiO_2 and CuO nano particles in improvement of workability, mechanical properties and durability of self compacting mortars.

Key words: Self Compacting Mortar, Engineering Properties, Durability, Nano Scale Materials

* Corresponding author**:** rmadandoust@guilan.ac.ir

www.SID.ir