

تأثیر نانوسیلیس بر خصوصیات مکانیکی و دوام بتن

شبنم فیروزمکان^۱، علی اکبر رمضانپور*^۲، تقی عبادی^۳ و حامد بهرامی^۴^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر^۲ استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر و رئیس مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن^۳ استادیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر^۴ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-مدیریت ساخت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

در هزاره جدید افق فعلی علم را نانوفناوری ترسیم کرده است. نانوفناوری به معنای توسعه، ساخت، طراحی و استفاده از محصولاتی است که اندازه آنها بین یک تا صد نانومتر قرار دارند. استفاده از نانوسیلیس خصوصیات مکانیکی و دوام بتن را بهبود بخشیده و با افزایش عمر مفید سازه، آلودگی‌های زیست‌محیطی همچون تولید گاز گل‌خانه‌ای دی‌اکسید کربن را کاهش داده و دستیابی به توسعه پایدار را تسهیل می‌نماید. هدف از این تحقیق بررسی اثر نانوسیلیس بر خواص مکانیکی و دوام بتن می‌باشد. به این منظور از آزمایش‌هایی چون مقاومت فشاری، نفوذپذیری و جذب مویبندی آب، نفوذ سریع شده یون کلراید و مقاومت الکتریکی بهره گرفته شده است. علاوه بر این جهت بررسی دقیق‌تر اثرات نانوسیلیس بر ریزساختار بتن از آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی بر روی نمونه‌های خمیر سیمان نیز استفاده شده است. جهت ساخت نمونه‌های بتنی از مقادیر مختلف نانو سیلیس با جایگزینی ۰، ۰/۲۱۵، ۰/۴۱۵، ۰/۶۱۵ و ۰/۸۱۵ وزنی سیمان استفاده گردید. تمامی نمونه‌ها با نسبت آب به مواد سیمانی ثابت و برابر با ۰/۴۵ و عیار سیمان 400 kg/m^3 ساخته شدند. بطور کلی نتایج، بهبود خواص و میکروساختار بتن را با افزایش میزان نانوسیلیس نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: نانوسیلیس، بتن، مقاومت فشاری، دوام.

۱- مقدمه

فناوری نانو توانایی بدست گرفتن کنترل ماده در ابعاد نانومتری و بهره‌برداری از خواص و پدیده‌های این بعد در مواد، ابزارها و سیستم‌های نوین است.

مواد نانو به عنوان موادی که حداقل یکی از ابعاد آن‌ها زیر ۱۰۰ نانومتر باشد، تعریف شده‌اند. خواص فیزیکی و شیمیایی مواد نانو با مواد میکروسکوپی تفاوت اساسی دارند. تغییرات اصولی که وجود دارد نه تنها از نظر کوچکی اندازه بلکه از نظر خواص جدید آن‌ها در سطح مقیاس نانو می‌باشند. در سال‌های اخیر با ورود فناوری نانو دیدگاه‌های جدیدی در زمینه فناوری بتن ایجاد شده است. به طور کلی، با کاهش یافتن اندازه ذرات، نسبت سطح مؤثر به حجم ذرات افزایش می‌یابد که بدین معنی خواهد بود که واکنش‌پذیری مواد در ابعاد نانو در قیاس با مواد در ابعاد بزرگتر افزایش می‌یابد بنابراین این انتظار می‌رود استفاده از نانوذرات تأثیرات قابل توجهی در خواص بتن داشته باشد.

نانوذرات استفاده شده در بتن از یک سو نقش پرکنندگی حفرات بسیار ریز در خمیر سیمان را دارند و از سوی دیگر می‌توانند تغییراتی در فرآیند هیدراتاسیون ایجاد نمایند که با

توجه به خواص موادی چون نانوذرات سیلیس می‌توان به نتایج مطلوبی در زمینه فناوری بتن دست یافت.

در تحقیقات Qing و همکاران [۱] اثر افزایش نانوسیلیس بر روی خواص سیمان سخت شده در مقایسه با دوده سیلیس و نحوه واکنش این مواد در خمیر سیمان مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که فعالیت پوزولانی نانوسیلیس در سننن پایین بسیار بیشتر از دوده سیلیسی است. در تحقیق مروج [۲] دوام بتن‌های حاوی نانوسیلیس و دوده سیلیس مورد بررسی قرار گرفت، نتایج نشان دادند که نانوسیلیس تأثیر بیشتری در کاهش نفوذپذیری بتن در مقابل یون کلراید و افزایش مقاومت الکتریکی بتن در مقایسه با دوده سیلیس به خصوص در سننن اولیه دارد. در تحقیق Senff و همکاران [۳]، رئولوژی و خصوصیات خمیر سیمان و ملات سخت نشده مورد بررسی قرار گرفت، نتایج نشان دادند که با افزودن نانوسیلیس زمان گیرش و دانسیته ظاهری ملات کاهش و میزان لنگر لازم جهت پیچش افزایش یافته است [۳]. تحقیق Ou و Li [۴] نشان داد هنگامی که

جدول ۱- مشخصات فیزیکی سنگدانه‌های مصرفی

سنگدانه	جذب آب (%)	چگالی (gr/cm ³)	مدول نرمی	حداکثر قطر سنگدانه (mm)
شن	۱/۷۴	۲/۵۷	۶/۶	۱۹
ماسه	۲/۳	۲/۵۶	۳/۳	

خصوصیات شیمیایی این مواد در جدول (۲) و خصوصیات فیزیکی محلول نانوسیلیس در جدول (۳) ارائه شده است. نانوذرات به علت ریزی فوق‌العاده زیاد و سطح ویژه بالا، باعث کاهش کارایی بتن می‌شوند، به این علت در این پژوهش از فوق‌روان‌کننده نسل سوم با پایه کربوکسیلیک اتر با نام تجاری GELENUM-110P استفاده گردید.

این ماده کدر و به رنگ ابری بوده و مقدار یون کلرید موجود در آن کمتر از ۰/۱ درصد است. علاوه بر این غیر از خاصیت روان‌کنندگی خاصیت دیگری ندارد و جزء فوق‌روان‌کننده‌های خنثی محسوب می‌شود. آب مورد استفاده در ساخت نمونه‌های بتن، آب شرب شهر تهران می‌باشد.

۲-۲-۲- طرح اختلاط

در این پژوهش، به منظور بررسی خواص مکانیکی و دوام نمونه‌های بتنی ۵ طرح اختلاط بتنی شامل طرح اختلاط شاهد و طرح‌های حاوی نانوسیلیس با درصدهای جایگزینی مختلف و برنامه آزمایشگاهی ۱۸۰ روزه در نظر گرفته شد. خلاصه طرح‌های اختلاط در جدول (۴) آورده شده است. کلیه طرح‌ها دارای نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۵ و میزان مواد سیمانی ۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشند.

در ساخت مخلوط‌های بتنی، اسلالمپ مخلوط‌ها به وسیله فوق‌روان‌کننده در محدوده ۱۰ - ۷ سانتی‌متر نگه داشته شدند. همچنین جهت بررسی تأثیر بیشتر نانوسیلیس 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. به همین منظور سه طرح خمیر سیمان با روانی یکسان بدون حضور فوق‌روان‌کننده و نسبت آب به سیمان ۰/۴ حاوی ۴/۵ درصد جایگزینی نانوسیلیس و نسبت آب به سیمان ۰/۴۲ حاوی ۸/۵ درصد جایگزینی نانوسیلیس در نظر گرفته شد.

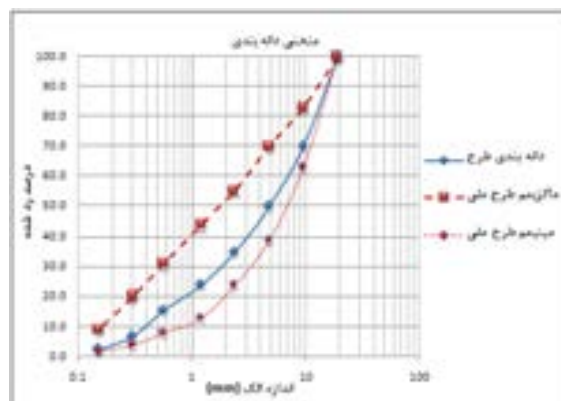
نانوذرات سیلیس به مقدار کمی به مخلوط اضافه شوند مقاومت فشاری و خمشی و همچنین مقاومت سایشی می‌تواند افزایش یابد. در تحقیق دیگری که توسط Ji و همکاران [۵] انجام گردید، خصوصیات نانوسیلیس بر روی تراوش و نفوذپذیری بتن مورد بررسی قرار گرفت و کمترین میزان تراوش در نمونه‌ای که بیشترین میزان سیمان، کمترین نسبت آب به سیمان و بیشترین میزان نانوسیلیس را دارا بود، مشاهده شد.

این مقاله به بررسی اثر افزودن نانوسیلیس به بتن بر پارامترهای دوام بتن در کنار روند افزایش مقاومت فشاری بتن‌های حاوی نانوسیلیس می‌پردازد. به این منظور در برنامه مطالعات آزمایشگاهی از آزمایش‌هایی چون مقاومت فشاری، نفوذپذیری و جذب مویینگی آب، نفوذ تسریع شده یون کلراید و مقاومت الکتریکی بهره گرفته شده است. علاوه بر این جهت بررسی دقیق تر اثرات نانوسیلیس بر ریزساختار بتن از آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی بر روی نمونه‌های خمیر سیمان نیز استفاده شده است.

۲- مصالح مصرفی و روش ساخت

۲-۱- مواد و مصالح مصرفی

سنگ‌دانه ریز مصرفی، ماسه شسته طبیعی و شن مصرفی، شن شکسته با حداکثر قطر سنگ‌دانه ۱۹ میلیمتر می‌باشد. سنگ‌دانه مصرفی مطابق شکل (۱) دانه‌بندی گردید و به منظور تثبیت رطوبت در کیسه‌های پلاستیکی در بسته و در فضایی بسته نگهداری شدند. جدول (۱) مشخصات فیزیکی سنگ‌دانه مصرفی را نشان می‌دهد. سیمان مورد استفاده در ساخت تمامی نمونه‌ها، سیمان تیپ ۴۲۵-۱ تهران و نانوسیلیس مصرفی از نوع آمورف و کلوئیدی با غلظت ۳۰٪ تولیدی شرکت Chems آلمان می‌باشد.



شکل ۱- نمودار دانه‌بندی سنگدانه‌های مصرفی

جدول ۲- ترکیبات شیمیایی سیمان و نانوسیلیس مصرفی

	آنالیز شیمیایی (%)								
	SiO ₂	MgO	CaO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	
سیمان	۲۱/۳۲	۳/۴۴	۶۲/۰۲	۲/۰۹	۲/۹۸	۳/۸۳	۰/۱۲	۰/۷۳	
نانوسیلیس	۹۴/۰۶	۰/۰۹	۰/۱	۰/۰۲۶	۰/۰۳۷	۰/۱۳	۱/۱۳	۰/۰۰۲	
	آنالیز شیمیایی (%)					قانون بوگ (%)			
	Cl ₂	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	LOI	C ₂ S	C ₃ S	C ₃ A	C ₄ AF
سیمان	۰/۰۲۵	۰/۴۴	۰/۰۵	۰/۲	۲/۷۶	۲۰	۵۴/۶	۵/۱	۹/۰۶
نانوسیلیس	۰/۰۷۶	۰/۰۱۳	۰/۱۱	۰/۰۰۴	۴/۲۶	-	-	-	-

جدول ۳- خصوصیات فیزیکی محلول نانوسیلیس مصرفی

ذرات جامد (%)	ویسکوزیته (cps)	وزن مخصوص (gr/cm ³)	PH	رنگ	حالت
۳۰	<۱۰	۱/۰۵-۱/۴	۱۳	شفاف	مایع

جدول ۴- مشخصات طرح‌های اختلاط

نام طرح	آب (kg/m ³)	سیمان (kg/m ³)	نانوسیلیس (%)	میزان نانوسیلیس (kg/m ³)	میزان فوق روان کننده نسبت به سیمان (%)	میزان روانی (cm)
CTL	۱۸۰	۴۰۰	-----	-----	۰	۸/۶
NS2.5	۱۸۰	۳۹۰	۲/۵	۱۰	۰/۶۲	۹/۴
NS4.5	۱۸۰	۳۸۲	۴/۵	۱۸	۰/۸۳	۸/۳
NS6.5	۱۸۰	۳۷۴	۶/۵	۲۶	۱/۲۱	۸/۱
NS8.5	۱۸۰	۳۶۶	۸/۵	۳۴	۱/۸۴	۷/۸

۳-۲- ساخت و عمل‌آوری

جهت تهیه نمونه‌های بتن ابتدا مقداری از فوق روان کننده لازم در ساخت نمونه‌ها، به محلول کلئیدی نانوسیلیس اضافه شد و به مدت ۱۵ دقیقه توسط همزن اولتراسونیک مخلوط گردید. در این پژوهش همزن اولتراسونیک جهت پخش همگن ذرات نانوسیلیس و عدم انباشتگی و کلوخگی آن در محلول کلئیدی و فوق روان کننده مورد استفاده قرار گرفت. سپس مصالح ریزدانه و درشت‌دانه در مخلوط‌کن الکتریکی کج شونده ریخته شد و پس از مخلوط شدن سنگ‌دانه‌ها به صورت خشک توسط مخلوط‌کن، در طرح شاهد مقدار آب لازم جهت رسیدن

مصالح سنگی به حالت SSD^۱ و در سایر طرح‌ها مقداری از محلول همگن آماده شده، به سنگ‌دانه‌ها افزوده شد و ادامه اختلاط انجام گرفت. سپس سیمان همراه با بقیه محلول کلئیدی نانوسیلیس، اضافه و در حین اختلاط آب باقی‌مانده به صورت تدریجی به مخلوط افزوده گردید. زمان اختلاط ۳ الی ۴ دقیقه به طول انجامید.

پس از اختلاط، اسلامپ مخلوط‌های بتنی اندازه‌گیری شده و نمونه‌ها قالب‌گیری و توسط میز لرزاننده متراکم شدند. نمونه‌ها پس از یک روز از قالب خارج شده و به منظور عمل‌آوری و

1- Saturated Surface Dry

همان‌طور که در شکل (۲) مشخص است، مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی نانوسیلیس در همه سنین از نمونه شاهد بیشتر بوده و با افزایش درصد جایگزینی نانوسیلیس مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. البته در نمونه حاوی ۲/۵٪ نانوسیلیس نسبت به سایر نمونه‌های حاوی نانوسیلیس این بهبود چشم‌گیر نبوده که دلیل آن را می‌توان مربوط به پایین بودن درصد جایگزینی و عدم اثرگذاری قابل توجه آن در حجم زیاد بتن دانست. با کاهش اندازه ذرات و ریزتر کردن آن به ساختار نانو، درجات ناهم‌واری اتمی زیادی به وجود می‌آیند که واکنش شیمیایی را تشدید می‌کنند. بنابراین نانوسیلیس انرژی سطحی زیادی دارد و اتم‌ها در سطح فعالیت بالایی قرار دارند که منجر به این می‌شود که اتم‌ها با اتم‌های دیگر بیرونی واکنش دهند و در نتیجه فعالیت پوزولانی نانوسیلیس در سنین پایین بسیار بالا رود [۱].

در شکل (۲) مشخص است که سرعت کسب مقاومت نمونه‌های حاوی نانوسیلیس تا سن ۷ روز بیشترین مقدار و با افزایش سن نمونه‌ها کاهش می‌یابد. به طوری که بهبود مقاومت فشاری کسب شده در نمونه حاوی ۸/۵٪ نانوسیلیس نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۸۳٪ و ۱۸٪ در سنین ۷ و ۱۸۰ روز می‌باشد. همچنین در سنین ۹۰ و ۱۸۰ روز اختلاف کمی بین نتایج نمونه‌های ۴/۵٪، ۶/۵٪ و ۸/۵٪ مشاهده می‌شود.

جولوگیری از نشت $Ca(OH)_2$ از بتن به خارج آن، تا سن آزمایش در محلول آب آهک اشباع نگهداری شدند.

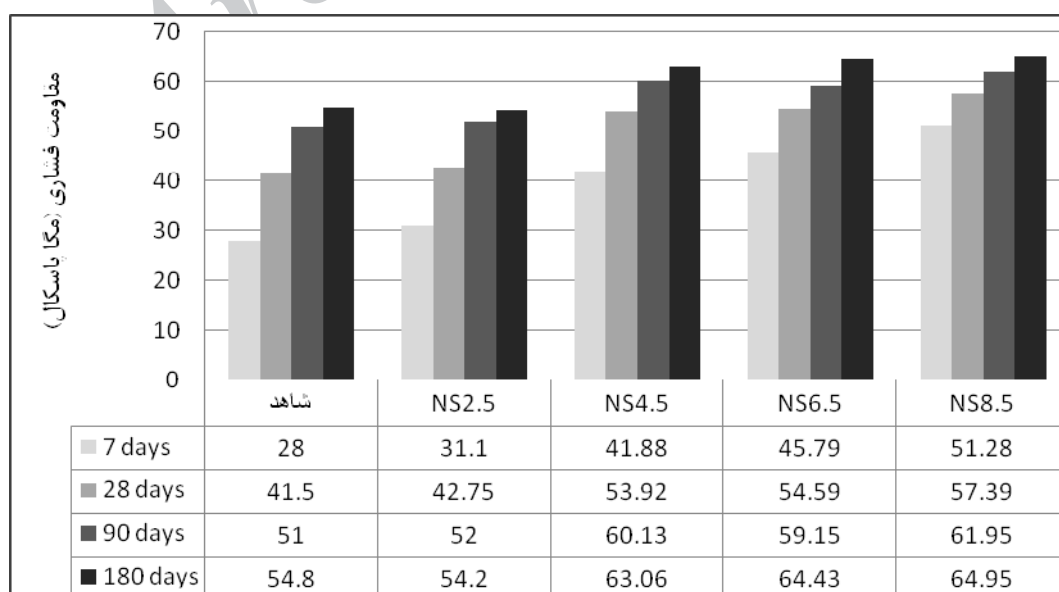
جهت ساخت نمونه‌های خمیر سیمان، آب و نانوسیلیس به مدت ۱۵ دقیقه توسط هم‌زن اولتراسونیک مخلوط شده و بعد از ۳۰ ثانیه اختلاط سیمان و محلول آماده شده درون مخلوط کن با دور کند، اختلاط به مدت ۱۵ ثانیه متوقف گردید و پس از آن عمل اختلاط با دور متوسط پره‌های مخلوط کن به مدت ۱ دقیقه ادامه یافت. پس از اتمام اختلاط، خمیر سیمان درون قالب‌هایی به شکل مکعب به ابعاد ۵ سانتی‌متر، در دو مرحله قالب‌گیری و ویریه گردید. پس از قالب‌گیری، نمونه‌ها 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- نتایج آزمایش‌ها و تجزیه و تحلیل

۳-۱- مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری با استفاده از نمونه‌های مکعبی ۱۰ سانتی‌متری در سنین ۷، ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روز با شکستن ۳ نمونه از هر طرح انجام گردید. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری برای سنین مذکور در شکل (۲) آمده است.

با استفاده از نانوسیلیس می‌توان وجوه هسته‌ای بیشتری را برای فرآورده‌های هیدراتاسیون ایجاد کرد و متعاقب آن با شکل‌گیری ساختار ژل پایدار، خواص مکانیکی خمیر سیمان سخت شده را با افزایش میزان نانوسیلیس بهبود داد [۹-۶].



شکل ۲- مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در سنین مختلف

۳-۲- نفوذ آب

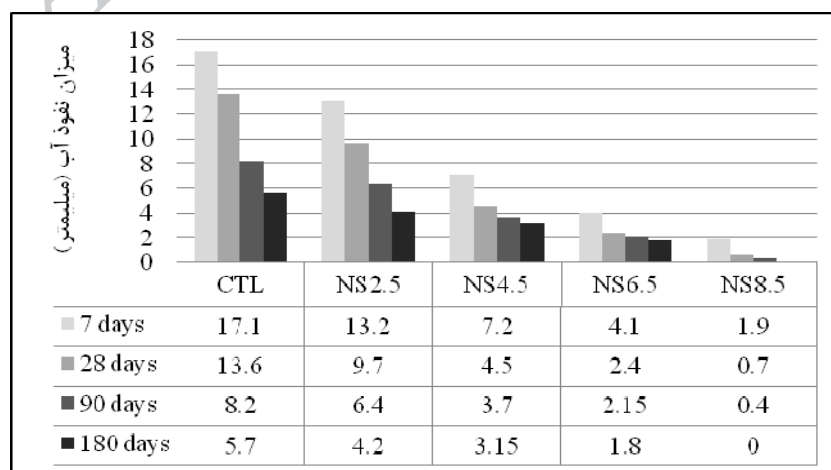
این آزمایش طبق استاندارد BS EN 12390-8:2000 در سنین ۷، ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روز بر روی نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۵ سانتی‌متر انجام گردید. پس از قرارگیری نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت تحت فشار آب 5×10^5 پاسکال، نمونه‌ها شکسته شده و مقدار نفوذ آب در آن‌ها قرائت شد. عدد معرفی شده در تعیین مقدار نفوذ آب در نمونه‌ها به صورت میانگینی از مقادیر مختلف نفوذ آب در طول ۱۵ سانتیمتری نمونه محاسبه شد. نتایج مربوط به هر طرح اختلاط بر اساس متوسط عمق نفوذ سه نمونه بدست آمد. نتایج حاصل از آزمایش در شکل (۳) نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، با بالا رفتن سن نمونه‌ها از میزان نفوذ آب در آن‌ها کاسته می‌شود که حاکی از کامل‌تر شدن واکنش‌های هیدراتاسیون و کاسته شدن تخلخل، حفرات موئینه و پیوستگی آن‌ها است. ضمناً مشاهده می‌شود که افزودن نانو سیلیس در کاهش نفوذپذیری مؤثر بوده و با افزایش میزان آن در طرح اختلاط کاهش بیشتری در نفوذپذیری مشاهده می‌شود. این بهبود را می‌توان به دلیل فعالیت بالای پوزولانی نانو سیلیس و تولید ژل C-S-H، خاصیت پرکنندگی خلل و فرج بتن و حذف حفرات ریز موجود در ساختار ژل سیلیکاتی دانست. بطوری که در طرح حاوی ۸/۵٪ نانو سیلیس، هیچ‌گونه نفوذی در سن ۱۸۰ روز مشاهده نگردید. با جایگزینی بیش از ۴/۵٪ نانو سیلیس در طرح‌ها، میزان نفوذ از سن ۲۸ تا ۱۸۰ روز تغییر چندانی نکرده که این مطلب نشان دهنده انجام بخش اعظم فرآیند هیدراتاسیون تا سن ۲۸ روز در این نمونه‌ها می‌باشد.

۳-۳- جذب موئینی آب

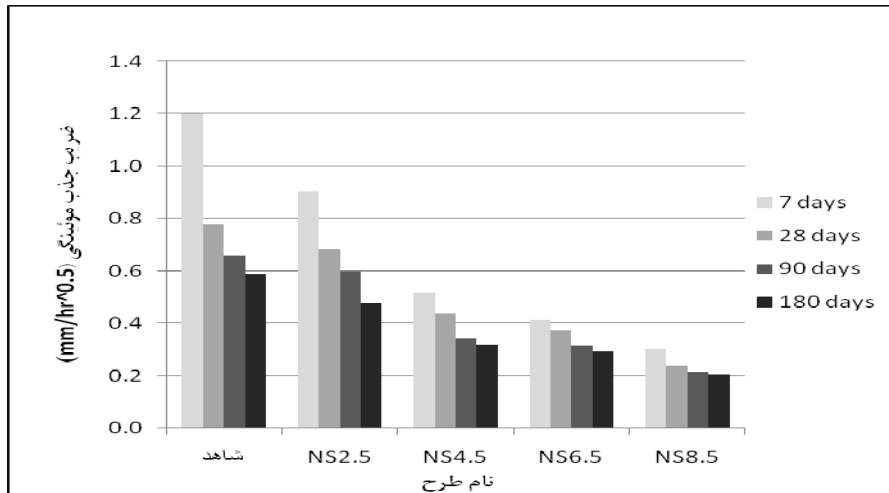
میزان آب جذب شده را می‌توان با مقدار فضاهای موئینه نمونه‌های گوناگون بتنی و شکل و پیوستگی آن‌ها ارتباط داد. بالا بودن مقدار جذب آب موئینه و مقدار بالآمدگی آب در نمونه‌های بتن، می‌تواند نشانگر ضعف ساختار ماتریس سیمانی، نفوذپذیری بالای آن و خطر تخریب در حملات کلرایدی باشد. جهت انجام این آزمایش طبق استاندارد BS EN 480-5:1997، نمونه‌های مکعبی ۱۰ سانتی‌متری در سن آزمایش از محلول آب آهک خارج و جهت رسیدن به وزن ثابت به مدت ۱۴ روز در آون با دمای ۵۰ درجه سانتیگراد قرار داده شدند. سپس نمونه‌ها پس از توزین درون ظرف آبی قرار داده شدند، به گونه‌ای که سطح آب به اندازه ۵ میلیمتر از تراز کف نمونه‌ها بالاتر باشد، وزن نمونه‌ها پس از ۳، ۶، ۲۴ و ۷۲ ساعت قرارگیری در آب، قرائت شد. جذب موئینی آب را با پارامتری به نام ضریب جذب موئینی نیز می‌توان بیان نمود که در حقیقت نرخ جذب سطحی مایع توسط جسم جامد متخلخل را نشان می‌دهد. ضریب جذب موئینی آب از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۰].

$$S = \frac{W}{A\sqrt{t}} \quad (1)$$

که در آن W میزان آب جذب شده توسط نمونه در انتهای آزمایش، A سطح مقطع نمونه و t مدت زمان که همان ۷۲ ساعت می‌باشد. جرم مخصوص آب برابر با 1 gr/cm^3 است، بنابراین واحد S را می‌توان به جای $\text{gr/cm}^2 \text{hr}^{0.5}$ با $\text{cm/hr}^{0.5}$ بیان نمود. ضرایب جذب موئینی آب (S) نمونه‌های بتن در شکل (۴) نشان داده شده‌اند.



شکل ۳- نفوذ آب در نمونه‌های بتنی



شکل ۴- ضرایب جذب مویبستگی آب در نمونه‌های بتنی

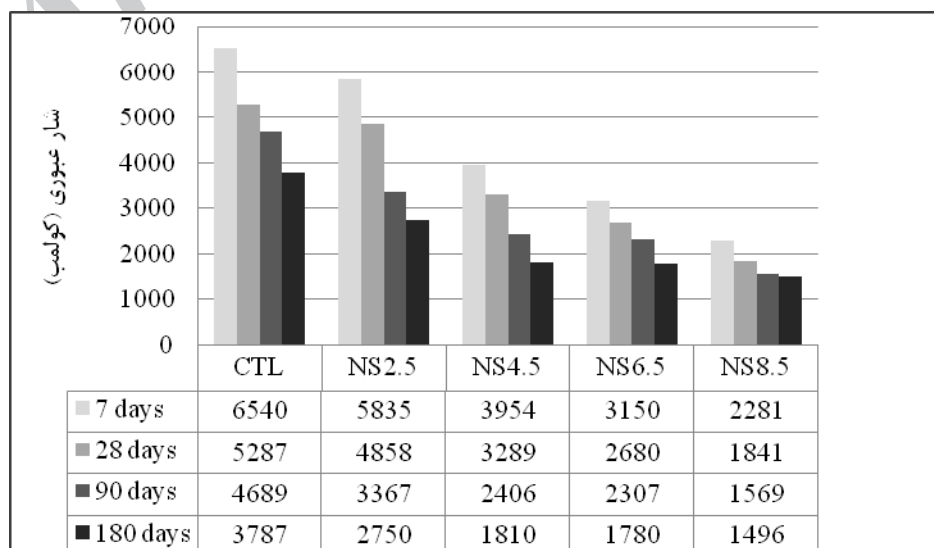
حالی که اختلاف پتانسیل ۶۰ ولت به دو سر نمونه که در تماس با محلول کلرید سدیم از یک سو و محلول هیدروکسید سدیم از سمت دیگر می‌باشد، اعمال می‌شود. نتایج حاصل از میزان بار الکتریکی عبوری آزمایش در شکل (۵) نمایش داده شده است.

نانو سیلیس به علت سطح ویژه بزرگ و واکنش پذیری بالا می‌تواند به سرعت با کریستال‌های هیدروکسید کلسیم که اغلب در ناحیه انتقال بین خمیر سیمان و سنگ‌دانه شکل گرفته‌اند واکنش دهد و تولید ژل ثانویه C-S-H نماید. بنابراین اندازه و میزان هیدروکسید کلسیم به شدت کاهش یافته و ژل C-S-H فضای خالی ناحیه انتقال بین سنگ‌دانه و ماتریس سیمان را پر می‌کند [۱، ۴، ۶، ۷، ۸ و ۱۱].

در این آزمایش نیز استفاده از نانو سیلیس بر کاهش میزان جذب آب نمونه‌های بتنی مؤثر بوده و با افزایش مقدار آن‌ها در نمونه جذب آب به خصوص در سنین اولیه کاهش یافته است. به عنوان مثال افزودن ۸/۵٪ نانو سیلیس جایگزین سیمان باعث کاهش جذب آب به میزان ۷۵٪ در سن ۷ روز و ۷۰٪ در سن ۲۸ روز نسبت به نمونه شاهد می‌شود.

۴-۳- نفوذ تسریع شده یون کلراید (RCPT)

آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید بر اساس استاندارد ASTM C1202 در سنین ۷، ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روز بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵ سانتی‌متر انجام و میزان بار الکتریکی عبوری از نمونه اندازه‌گیری گردید. در



شکل ۵- نتایج حاصل از آزمایش RCPT در سنین مختلف

خالی توسط ذرات نانوسیلیس و ژل ثانویه سیلیکاتی و در نتیجه متراکم نمودن ساختار خمیر سیمان و ناحیه انتقالی دانست.

۳-۶- میکروسکوپ الکترونی روبشی

اشکال (۷) و (۸) مربوط به عکس‌های میکروسکوپ الکترونی (SEM) سه طرح خمیر سیمان سخت شده شامل طرح شاهد، طرح حاوی ۴/۵ درصد نانوسیلیس و طرح حاوی ۸/۵ درصد نانوسیلیس که واکنش هیدراتاسیون آن‌ها به وسیله استون در سنین ۷ و ۲۸ روز متوقف گردید، می‌باشد. لازم به ذکر است که این آزمایش در آزمایشگاه دانشکده مهندسی معدن دانشگاه صنعتی امیرکبیر انجام شد.

همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، ساختار محصولات هیدراتاسیون (C-S-H) در بتن حاوی نانوسیلیس بسیار متراکم‌تر و فشرده‌تر می‌باشد و با افزایش میزان نانوسیلیس در طرح‌ها، بلورهای سوزنی شکل اترینگایت (Ettringite) و کریستال‌های بزرگ مونوسولفات هیدراته (Afm) و $Ca(OH)_2$ ناپدید شده و ژل متراکم C-S-H جایگزین آن می‌گردد.

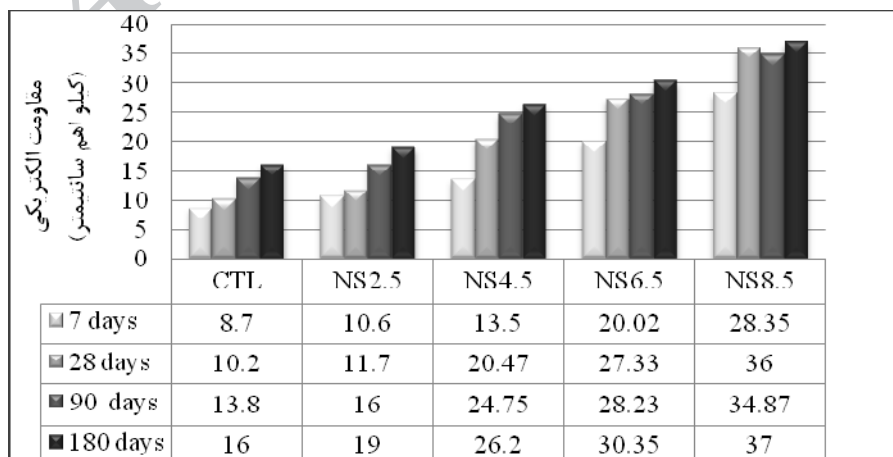
با افزایش سن نمونه‌ها تراکم در کلیه نمونه‌ها افزایش می‌یابد که ناشی از تکمیل فرآیند هیدراتاسیون در خمیر سیمان می‌باشد. با مقایسه تصاویر سطوح شکست نمونه‌ها مشاهده می‌شود که همچنان تراکم در نمونه‌های حاوی نانوسیلیس نسبت به نمونه شاهد بیشتر است.

همانطور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، نانوسیلیس باعث کاهش قابل ملاحظه‌ای در میزان بار عبوری از نمونه و در نتیجه افزایش مقاومت آن در مقابل نفوذ یون کلراید نسبت به نمونه شاهد شده است. به طوری که میزان نفوذپذیری در برابر یون کلراید در نمونه‌های با جایگزینی بیش از ۴/۵٪ نانوسیلیس در سن ۱۸۰ روز طبق استاندارد مذکور در محدوده کم قرار می‌گیرد.

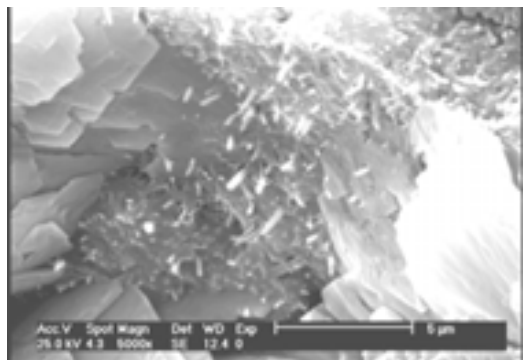
۳-۵- مقاومت الکتریکی

برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی سطحی بتن از دستگاه Wenner چهار الکترودی با فواصل مساوی ۴۰ میلی‌متر استفاده شد. نمونه‌های استوانه‌ای 100×200 میلی‌متری اشباع برای هر سن بکار رفت. چهار قرائت بر روی محیط نمونه‌ها انجام شده و میانگین آن‌ها در نظر گرفته شد [۱۲]. نتایج حاصل از آزمایش مقاومت الکتریکی در شکل (۶) نمایش داده شده است. با جایگزینی بیش از ۴/۵٪ نانوسیلیس در هر یک از طرح‌ها، میزان نفوذ یون کلراید از سن ۲۸ تا ۱۸۰ روز تغییر چندانی نکرده که این مطلب نشان دهنده انجام بخش اعظم فرآیند هیدراتاسیون تا سن ۲۸ روز در این نمونه‌ها می‌باشد.

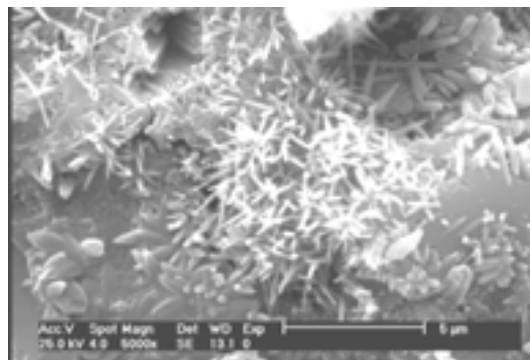
دقت در نتایج نشان می‌دهد که افزودن نانوسیلیس به بتن موجب افزایش مقاومت الکتریکی نمونه‌ها شده و با افزایش این مواد نیز مقاومت الکتریکی افزایش می‌یابد. همان‌طور که از نتایج مشخص است افزودن این مواد موجب افزایش بیش از ۱۳۰ درصدی مقاومت الکتریکی ۱۸۰ روزه در نمونه‌های حاوی نانوسیلیس هنگام جایگزینی ۸/۵ درصدی این مواد با سیمان شده است. دلیل بهبود را می‌توان مربوط به پر شدن فضاهای



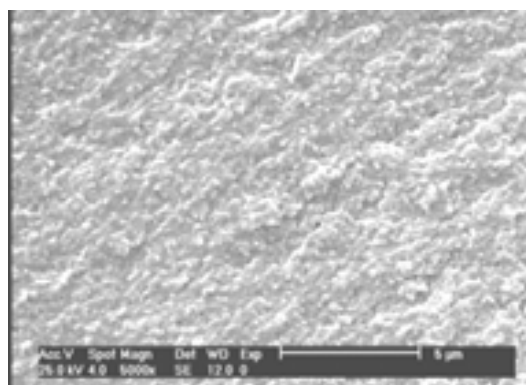
شکل ۶- نتایج حاصل از آزمایش مقاومت الکتریکی



(ب) نمونه حاوی ۰/۴/۵ نانوسیلیس

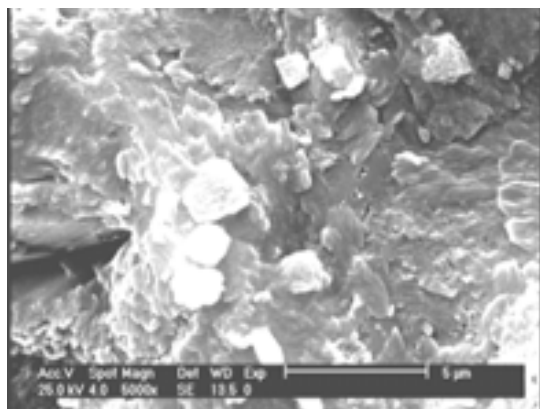


(الف) نمونه شاهد

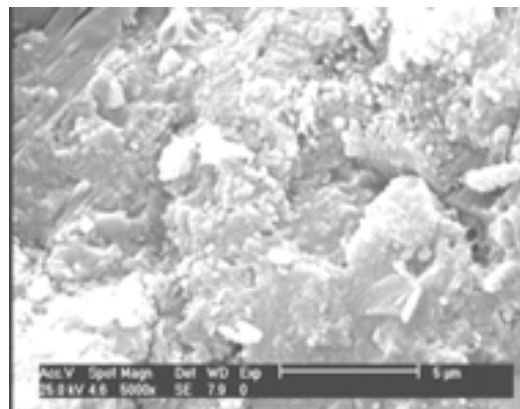


(ج) نمونه حاوی ۰/۸/۵ نانوسیلیس

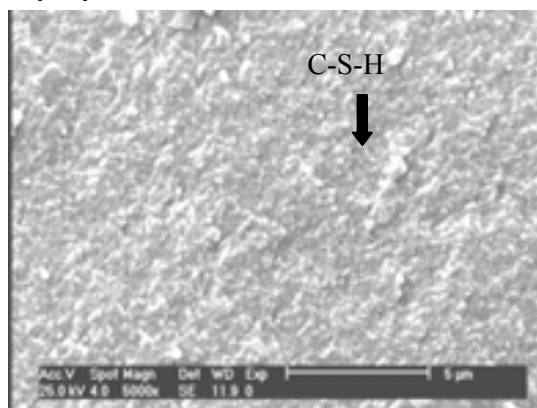
شکل ۷- مقایسه ریزساختار نمونه های خمیر سیمان در سن ۷ روز با بزرگنمایی ۵۰۰۰ برابر



(ب) نمونه حاوی ۰/۴/۵ نانوسیلیس

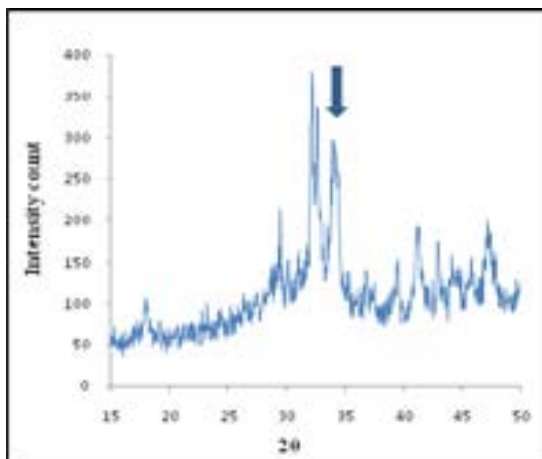


(الف) نمونه شاهد

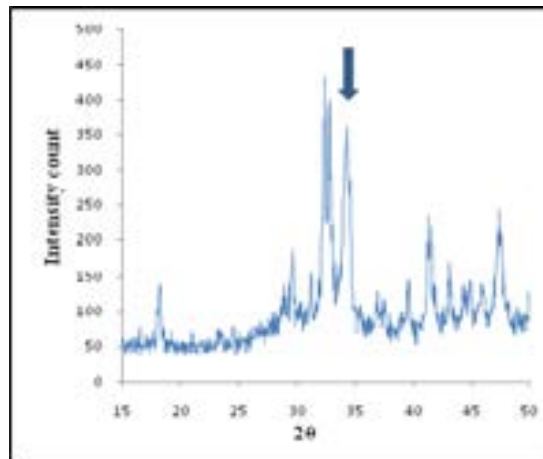


(ج) نمونه حاوی ۰/۸/۵ نانوسیلیس

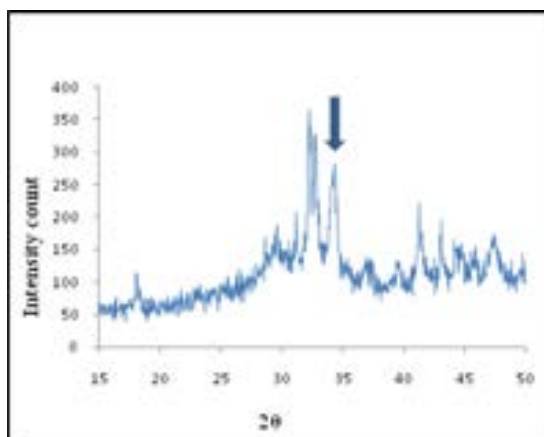
شکل ۸- مقایسه ریزساختار نمونه های خمیر سیمان در سن ۲۸ روز با بزرگنمایی ۵۰۰۰ برابر



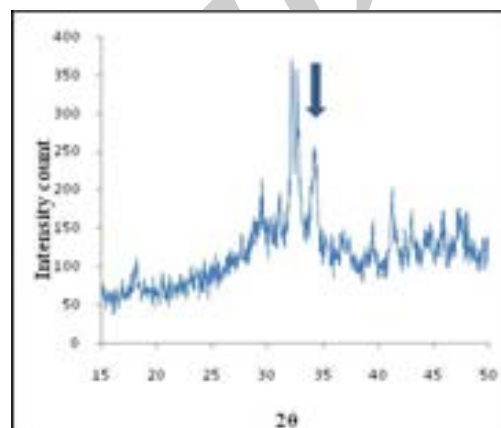
(ب) نمونه شاهد در سن ۲۸ روز



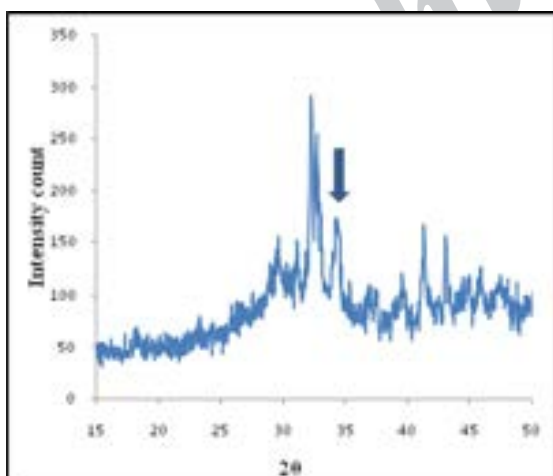
(الف) نمونه شاهد در سن ۷ روز



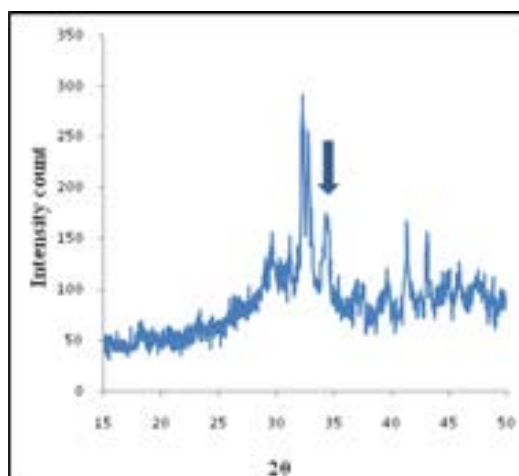
(د) نمونه حاوی ۴/۵ درصد نانوسیلیس در سن ۲۸ روز



(ج) نمونه حاوی ۴/۵ درصد نانوسیلیس در سن ۷ روز



(و) نمونه حاوی ۸/۵ درصد نانوسیلیس در سن ۲۸ روز



(ه) نمونه حاوی ۸/۵ درصد نانوسیلیس در سن ۷ روز

شکل ۹- طیف‌های حاصل از آزمایش XRD در نمونه‌های خمیر سیمان

۲۸ روز تفاوت قابل ملاحظه‌ای از لحاظ تراکم و محصولات هیدراتاسیون مشاهده نمی‌گردد. جهت بررسی ریزساختار خمیر سیمان حاوی نانوسیلیس از آزمایش تفرق اشعه X بر روی پودر

با توجه به فعالیت پوزولانی بالای نانوسیلیس و تسریع فرآیند هیدراتاسیون و انجام بخش اعظم واکنش‌ها در سنین اولیه، بین تصاویر هر طرح نمونه حاوی نانوسیلیس در سنین ۷ و

می‌شود. به طوری که میزان کاهش نفوذ و جذب موینگی آب نسبت به نمونه شاهد در نمونه NS8.5 در سن ۱۸۰ روز، به ترتیب برابر با ۱۰۰٪ و ۶۴٪ می‌باشد. این بهبود را می‌توان به دلیل فعالیت بالای پوزولانی نانوسیلیس و تولید ژل C-S-H، خاصیت پرکنندگی خلل و فرج بتن و حذف حفرات ریز موجود در ساختار ژل سیلیکاتی دانست.

۴) افزودن نانوسیلیس به بتن موجب افزایش مقاومت الکتریکی و مقاومت در مقابل نفوذ یون کلر در نمونه‌ها شده و با افزایش سطح جایگزینی این افزایش ادامه می‌یابد.

۵) بهبود در نمونه حاوی ۲/۵٪ نانوسیلیس نسبت به سایر نمونه‌های حاوی نانوسیلیس چشمگیر نبوده که دلیل آن را می‌توان مربوط به پایین بودن درصد جایگزینی و عدم اثرگذاری قابل توجه آن در حجم زیاد بتن دانست.

۶) در هر یک از طرح‌ها با جایگزینی بیش از ۴/۵٪ نانوسیلیس، نتایج هر یک از آزمایش‌های انجام شده بر بتن از سن ۲۸ تا ۱۸۰ روز تغییر چندانی نکرده که این مطلب نشان دهنده فعالیت پوزولانی بالای نانوسیلیس و انجام بخش اعظم فرآیند هیدراتاسیون تا سن ۲۸ روز در این نمونه‌ها می‌باشد.

۷) تصاویر میکروسکوپ الکترونی اخذ شده از سطح شکست نمونه و نتایج آزمایش XRD نشان می‌دهند که افزودن نانوسیلیس به سیمان پرتلند، باعث انجام فعالیت پوزولانی در سنین پایین و کاهش میزان هیدروکسید کلسیم و بلورهای سوزنی شکل اترینگایت شده و ساختار محصولات هیدراتاسیون را متراکم‌تر می‌نماید. این نتایج تأییدی بر نتایج حاصل از آزمایشات انجام شده در این پروژه می‌باشد.

۵- مراجع

- [1] Qing, Y., Zenan, Z., Deyv, K., Rongshen, Ch., "Influence of Nano-sio₂ Addition on Properties of Hardened Cement Paste as Compared with Silica Fume", *Construction and Building Materials*, 2007, 21, 539-545.
- [۲] مروج جهرمی، م.، رضانیانپور، ع. ا.، مودی، ف.، "تأثیر نانوسیلیس بر خواص مکانیکی و دوام بتن در مقایسه با میکروسیلیس"، هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، شیراز، ایران، ۲۳-۲۱ اردیبهشت، ۱۳۸۸.

حاصل از آسیاب نمودن نمونه‌های خمیر سیمان شامل نمونه شاهد، طرح حاوی ۴/۵ و ۸/۵ درصد نانوسیلیس که واکنش هیدراتاسیون آن‌ها به وسیله استون در دو سن ۷ و ۲۸ روز متوقف گردیده بود، تهیه شد. نتیجه طیف‌های حاصل از آزمایش در شکل (۹) نمایش داده شده است. نتایج حاصل از آزمایش XRD و شدت پیک‌های هیدروکسید کلسیم در آن و مقایسه سه پیک ماکزیمم هیدروکسید کلسیم موجود در نمونه‌ها در زاویه 2θ برابر ۳۴ درجه، نشان می‌دهند که نانوسیلیس در کاهش میزان هیدروکسید کلسیم در ساختار خمیر سیمان مؤثر بوده است. با افزودن ۴/۵ درصد نانوسیلیس در سن ۷ روز پیک ماکزیمم هیدروکسید کلسیم در نمونه، از شدت ۳۶۱ در خمیر سیمان شاهد به شدت ۲۸۲ و با افزودن میزان ۸/۵ درصد نانو سیلیس به شدت ۱۷۷ در نمونه رسیده است که نشان از فعالیت پوزولانی و واکنش‌پذیری بالای نانوسیلیس در سنین اولیه دارد و با افزایش میزان نانوسیلیس این بهبود افزایش می‌یابد. به طور کلی با افزایش سن نمونه‌ها از شدت پیک‌های مربوط به هیدروکسید کلسیم کاسته می‌شود که حاکی از پیشرفت فرایند هیدراتاسیون و کامل‌تر شدن آن می‌باشد. در سن ۲۸ روز پیک ماکزیمم هیدروکسید کلسیم در نمونه، از شدت ۲۹۹ در خمیر سیمان شاهد به شدت ۲۵۶ و با افزودن میزان ۸/۵ درصد نانوسیلیس به شدت ۱۷۳ در نمونه رسیده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر افزودن نانوسیلیس بر مقاومت فشاری، نفوذپذیری و دوام بتن بررسی گردید و نتایج زیر حاصل شد:

- ۱) استفاده از هم‌زن اولتراسونیک جهت پخش همگن ذرات نانوسیلیس و عدم انباشتگی و کلوخگی آن در محلول کلونیدی و فوق روان‌کننده امری الزامی است.
- ۲) افزودن نانوسیلیس به بتن باعث افزایش مقاومت فشاری می‌شود و با افزایش درصد جایگزینی نانوسیلیس مقاومت فشاری بهبود می‌یابد. سرعت کسب مقاومت فشاری در نمونه‌های حاوی نانوسیلیس تا سن ۷ روز بیشترین مقدار و با افزایش سن نمونه‌ها کاهش می‌یابد. میزان بهبود مقاومت فشاری نمونه NS8.5 در سن ۷ روز ۸۳٪ نسبت به نمونه شاهد بوده و در سن ۱۸۰ روز میزان بهبود ۱۸٪ می‌باشد.
- ۳) افزودن نانوسیلیس در کاهش نفوذپذیری و جذب موینگی آب مؤثر بوده و با افزایش میزان آن در طرح اختلاط کاهش بیشتری در نفوذپذیری مشاهده

- Particles", Composite Part B: Engineering, 2004, 35, 185-189.
- [8] Li, H., Zhang, M. H., Ou, J. P., "Flexural Fatigue Performance of Concrete Containing Nano-Particles for Pavement", International Journal of Fatigue, 2007, 29, 1292-1301.
- [9] Li, G., "Properties of High-Volume Fly Ash Concrete Incorporating Nano-SiO₂", Cement Concrete Research, 2004, 34, 1043-1049.
- [10] BS EN-480-5, "Tests methods, Determination of Capillary Absorption", British Standards Institution, 1997.
- [11] Björnström, J., Martinelli, A., Matic, A., Börjesson, L., Panas, I., "Accelerating Effects of Colloidal Nano-Silica for Beneficial Calcium-Silicate-Hydrate Formation in Cement", Chemistry Physics Letters, 2004, 392, 242-248.
- [12] FM 5-578, "Florida Method of Test for Concrete Resistivity as an Electrical Indicator of its Permeability", 2004.
- [3] Senff, L., Labrincha, J. A., Ferreira, V. M., Hotza, D. Repette, W. L., "Effect of Nano-Silica on Rheology and Fresh Properties of Cement Pastes and Mortars", Construction and Building Materials, 2009, 23, 2487-2491.
- [4] Li, H., Zang, M. H., Ou, J. P., "Abrasion Resistance of Concrete Containing Nano-Particles for Pavement", Wear, 2006, 260, 1262-1266.
- [5] Ji, T., Mirzayee, A., Zangeneh-Madar, Z., Zangeneh-Madar, E., "Preliminary Study on Water Infiltration of Concrete Containing Nano-SiO₂ and Silicone", 8th International Congress on Civil Engineering, Shiraz, Iran, 10-12 May, 2009.
- [6] Ji, T., "Preliminary Study on the Water Permeability and Microstructure of Concrete Incorporating Nano-SiO₂", Cement Concrete Research, 2005, 35, 1943-1947.
- [7] Li, H., Xiano, H. G., Yuan, J., Ou, J., Microstructure of Cement mortar with Nano-

Archive of SID

Effects of Nano-Silica on Mechanical Properties and Durability of Concrete

S. Firoozmakan¹, A.A. Ramezaniapour^{*2}, T. Ebadi¹ and H. Bahrami¹

¹ Faculty of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology

² Concrete Technology and Durability Research Center, Amirkabir University of Technology

Abstract

Right now, knowledge horizon has set by Nanotechnology. Nanotechnology refers to development, manufacture, design and use of products with a size between one up to one hundred nanometers. Mechanical properties and durability of concrete may get improved using nano-silica as well as increasing the useful life of the structure which results in environmental pollutions-such as production of greenhouse gas (CO₂)- decreasing and make it more easier to achieve sustainable development. Present paper aims to consider influences of nano-silica addition on mechanical and durability properties of concrete. Some experiments including compressive strength, water permeability, sorptivity, rapid chloride penetration and electrical resistance were conducted. Moreover, nano-silica impact on cement paste microstructures incorporating were studied through SEM test. The percentages of nano-silica that replace PC (Portland Cement) in this research are 0%, 2.5%, 4.5%, 6.5% and 8.5% by mass. The water/ (clinker + nano-silica) or (w/c) ratio is 0.45 having a constant total binder content of 400 kg/m³. Generally, the results showed that all the investigated properties as well as microstructure of concrete are improved by increasing content of nano-silica. Nano-SiO₂ particles can react with calcium hydroxide Ca(OH)₂ crystals, which are mostly formed in the interfacial transition zone (ITZ) between hardened cement paste and aggregates and produce secondary C-S-H gel. Thus, the size and amount of calcium hydroxide crystals are significantly reduced, and more C-S-H fills the voids in interfacial transition zone (ITZ) to improve the density of matrix. Hence, the improvement in the concrete having 2.5% nano-silica was insignificant compared with other specimens due to the low amount of nano-silica. In addition, no significant improvement was observed at more than 28 days old. This trend deals with high pozzollanic activity of nano-silica and the acceleration of hydration progress. According to the scanning electron micro-graphs (SEM) of cement paste and the results of X-ray diffraction (XRD) tests, it can be concluded that the size of needle-shaped of ettringite and the amount of calcium hydroxide are reduced and formation of hydration products was denser and more homogenous at early ages.

Keywords: Nano-silica, Concrete, Compressive strength, Durability.

Received: April 2011

Accepted: November 2011