عنوان رساله دوره دکتری سازه

بررسی تاثیر نوع و ابعاد (سطح ویژه) نانوذرات سیلیسی بر خواص مقاومتی و دوام بتن و موادپایه سیمانی

ارائه دهنده

سید حسام مدنی

استادان راهنما

دکتر علیرضا باقری

دکتر طیبه پرهیزکار

پاییز ۱۳۹۱

چکیده

عملکرد موفق دوده سیلیسی در بهبود قابل توجه خواص مکانیکی و دوام بتن باعث شده تا استفاده از مواد نانوسیلیسی در محصولات پایه سیمانی مورد توجه جدی محققین چه در سطح جهان و چه در داخل کشور قرار گیرد. خلوص نزدیک به ۱۰۰ درصد مواد نانوسیلیسی در مقایسه با خلوص حدود ۹۰ درصد دوده سیلیسی و همچنین سطح ویژه بالاتر این مواد که محدوده ای از ۵۰ تا قریب به ۱۰۰۰ مترمربع برگرم را در بر میگیرد در مقایسه با سطح ویژه ۲۰ مترمربع برگرم دوده سیلیسی سبب شده است تا عملکرد بسیار موثری از این ماده در ارتقاء خواص بتن مورد انتظار باشد. لیکن نتایج گزارش شده متنوع و در مواردی متناقض بوده و از عملکرد بسیار موثر تا عملکردهای پایین تر از دوده سیلیسی را شامل میشود. شایان توجه است که بر خلاف دوده سیلیسی که محصول جانبی صنایع تولید فروسیلیسیم میباشد، نانوسیلیس ها با روش های مختلف و با خواص متفاوت قابل تولید هستند و بنظر میرسد بخشی از تفاوت های گزارش شده توسط محققین در خصوص عملکرد نانوسیلیس ها در بتن ناشی از تفاوت در سطح ویژه و نوع این مواد باشد.

با توجه به اینکه اثر تغییرات در خواص نانوسیلیس ها در عملکرد آنها در مواد پایه سیمانی قبلا به صورت منسجم موردبررسی قرار نگرفته بود تحقیق حاضر با هدف مشخص کردن تاثیر تغییرات در سطح ویژه دو نوع عمده از نانوسیلیس ها شامل نانوسیلیس های پایروژنیک و سل های نانوسیلیس روی عملکرد آنها در محصولات پایه سیمانی در مقایسه آنها با دوده سیلیسی انجام پذیرفت. نانوسیلیس های مورد مطالعه شامل نانوسیلیس های پایروژنیک Aerosil 90،Aerosil 200 و Aerosil 300 با سطوح ویژه ۹۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ مترمربع برگرم و سل های نانوسیلیس شامل Levasil100/45، Levasil200/30 و Levasil300/30 با سطوح ویژه ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ مترمربع بر گرم بوده اند.

چکیده

مطالعات میکروسکوپی و بررسی های توزیع ابعادی نشانگر آن میباشند که نانوسیلیس های پایروژنیک در حالت کلوخه ای بوده و پخش موثر آنها در محیط های آبی با دشواری های بسیار همراه است. لیکن سل های نانوسیلیس دارای پخش مناسب به صورت ذرات مجزا و غیر کلوخه در محیط آبی میباشند. نکته قابل توجه آنکه پس از ورود نانوسیلیس ها در مخلوط های پایه سیمانی، کلوخه شدگی قابل توجه این مواد توسط یون های موجود در آب منفذی سیمان رخ میدهد، لذا فرضیات بر مبنای بهبود ریزساختار مواد پایه سیمانی در استفاده از این مواد با چالش های جدی مواجه میباشد. نتایج آزمایش های ترموگراویمتری روی خمیره های آهکی و سیمانی نشانگر سرعت واکنش پوزولانی بسیار سریع تر نانوسیلیس ها در مقایسه با دوده سیلیسی میباشد که با افزایش سطح ویژه سرعت واکنش آنها بیشتر میشود. ضمنا سرعت واکنش پوزولانی نانوسیلیس های پایروژنیک قدری بالاتر از سل های نانوسیلیس مشاهده گردید. همچنین نتایج نشانگر این هستند که نانوسیلیس ها اثر تسریع کنندگی بر هیدراسیون سیمان در سنین اولیه دارند اما با گذشت زمان سبب کاهش درجه هیدراسیون سیمان در مقایسه با نمونه های کنترل میگردند.

برای سنجش تاثیر نانوسیلیس ها بر دوام و مقاومت مواد پایه سیمانی، آزمایش های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، نفوذ یون کلرید و جذب آب انجام پذیرفت. بر اساس نتایج حاصله هرچند نانوسیلیس های ریزتر دارای نرخ واکنش پوزولانی بیشتر در سنین اولیه نسبت به انواع درشت تر هستند، لیکن نانوسیلیس های درشت تر دارای عملکرد بهتر در بهبود شاخصه های دوام همچون محدود کردن نفوذ یون کلر میباشند. جالب است که دوده سیلیسی که به مراتب سرعت واکنش پوزولانی کندتری نسبت به نانوسیلیس ها دارد در سن ۲۸ روز بهتر از نانوسیلیس های ریز عمل نموده و رفتار مشابهی با نانوسیلیس های درشت داشته و در سن ۹۰ روز حتی از نانوسیلیس های

درشت نیز پیشی گرفته است، همچنین مشاهده گردید که نانوسیلیس ها اثر تسریع کنندگی بر روند کسب مقاومت مخلوط های سیمانی دارند، هرچند در سن ۲۸ روز از مقدار ارتقاء اولیه در مقاومت بصورت قابل توجه کاسته میشود. در سن ۹۰ روز عملکرد اغلب نانوسیلیس ها ضعیف تر از دوده سیلیسی میباشد. لذا بنظر میرسد که تنها مزیت نانوسیلیس ها نسبت به دوده سیلیسی عملکرد سریع تر آنها در ارتقاء خواص بتن در سنین اولیه باشد.

کلمات کلیدی: سل نانوسیلیس، نانوسیلیس پایروژنیک، دوام، مقاومت، واکنش پوزولانی، هیدراسیون.

فهرست مطالب

	عنوان	شماره صفحه
۱	مقدمه و ضرورت انجام تحقیق حاضر	۱
۱-۱	مقدمه	۱
۱-۲	ضرورت انجام مطالعه	۳
۱-۳	روند انجام مطالعه	٤
۲	روش های تولید و خصوصیات انواع نانوسیلیس	٦
۲-۱	تعاریف	٦
۲-۲	روش های مختلف تولید نانوسیلیس	۱۱
۲-۲-۱	روش های تولید سل سیلیس	۱۲
۲-۲-۱-۱	سل سیلیس تهیه شده از پلیمریزاسیون اسیدسیلیسیک	۱۲
۲-۲-۱-۱-۱	روش جابجایی یونی	۱۳
۲-۲-۱-۲	سل های سیلیس تهیه شده از طریق پایدارسازی سیلیس های پایروژنیک	۱۷
۲-۲-۲	روش های تولید نانوسیلیس های پودری	۱۷
۲-۲-۲-۱	روشهای تولید تر نانوسیلیس های پودری	۱۸
۲-۲-۲-۱-۱	روش سل – ژل	۱۸
۲-۲-۲-۱-۲	روش تولید سیلیس رسوبی	۱۹
۲-۲-۲-۲	روش تهیه نانوسیلیس پایروژنیک (یا دوده ای)	۲۲
۲-۳	وضعیت شیمی سطح نانوسیلیس	۲٦
۲-۳-۱	گروه های سطحی	۲٦
۲-۳-۲	بارهای سطحی	۳۰
۲-٤	بررسی مشخصات میکروسیلیس های مورد استفاده در مصالح پایه سیمانی	۳۲
۲-۵	بررسی و مقایسه میکروسیلیس ونانوسیلیس های استفاده شده در مواد پایه	۳۳

	سیمانی	
۲-٦	بررسی روش پایدارسازی ذرات جامد نانوسایز در فاز مایع	۳۸
۲-٦-۱	پایدارسازی الکترواستاتیکی	۳۹
۲-٦-۲	پایدارسازی استریک	٤۰
۲-٦-۳	روش التراسونیک و سایر روش های مکانیکی	٤۱
۳	مروری بر ادبیات فنی در مورد تاثیر نانوسیلیس بر خصوصیات مواد پایه سیمانی	٤۳
۳-۱	بررسی فعالیت پوزولانی نانوسیلیس در مقایسه با میکروسیلیس	٤۳
۳-۲	تأثیر نانوسیلیس بر ساختار ژل C-S-H و ریز ساختار	۵۱
۳-۳	هیدراسیون مصالح سیمانی در حضور میکروسیلیس و نانوسیلیس	۵٤
۳-٤	بررسی تاثیر نانوسیلیس بر خواص رئولوژیکی مواد پایه سیمانی	۵۸
۳-۵	بررسی تاثیر نانوسیلیس بر خواص مکانیکی مواد پایه سیمانی	۵۹
۳-۵-۱	تاثیر نانوسیلیس بر مقاومت فشاری مصالح پایه سیمانی	۵۹
۳-۵-۲	تاثیر بر سایر پارامترهای مکانیکی	٦٦
۳-۵-۳	مطالعات انجام گرفته در ایران در مورد تاثیر نانوسیلیس بر خصوصیات مکانیکی مصالح پایه سیمانی	٦۸
۳-٦	بررسی مطالعات انجام شده در زمینه تاثیر نانوسیلیس بر خصوصیات دوامی مصالح با پایه سیمانی	۷۲
۳-۷	جمع بندی فصل حاضر	۷۹
٤	مشخصات فیزیکی و شیمیایی نانوسیلیس ها و دوده سیلیسی تهیه شده برای مطالعات آزمایشگاهی	۸۱
٤-۱	مواد انتخاب شده جهت انجام تحقیق	۸۱
٤-۲	مشخصات فیزیکی و شیمیایی انواع نانوسیلیس و دوده سیلیسی	۸۱

٤-٣	تعیین بی شکل یا کریستالی بودن نانوسیلیس ها و میکروسیلیس تامین شده	٨٣
٥	بررسی وضعیت پخش نانوذرات سیلیسی و دوده سیلیسی	٨٦
٥-١	مقدمه	٨٦
٥-٢	برنامه آزمایشگاهی	٩٢
٥-٣	نتایج آزمایشات انجام گرفته برای بررسی وضعیت پخش نانومواد و دوده سیلیسی	٩٥
٥-٣-١	وضعیت پخش نانوسیلیس های پایروژنیک و دوده سیلیسی در حالت پودری	٩٥
٥-٣-٢	بررسی وضعیت پخش نانوسیلیس های پایروژنیک و دوده سیلیسی در محیط آبی	٩٩
٥-٣-٣	بررسی وضعیت پخش ذرات در سل های نانوسیلیس تهیه شده به روش پلیمریزاسیون اسیدسیلیسیک	١٠٠
٥-٣-٤	بررسی اثر افزایش انرژی پخش در وضعیت پخش نانوسیلیس های پایروژنیک در آب	١٠٣
٥-٣-٥	بررسی اثر pH روی پخش نانوسیلیس های پایروژنیک	١٠٦
٥-٤	روش پخش انتخاب شده برای پخش نانوسیلیس های پایروژنیک در محیط آبی جهت مطالعات آزمایشگاهی	١١١
٥-٥	اثر محیط منفذی مواد پایه سیمانی بر وضعیت پخش نانوسیلیس ها	١١٤
٥-٦	بررسی فرضیات بر اساس اثر نانوپرکنندگی نانوذرات سیلیسی	١١٨
٥-٧	جمع بندی فصل حاضر	١٢٠
٦	واکنش پوزولانی نانوسیلیس ها و اثر آنها بر خواص خمیره های سیمانی	١٢٤
٦-١	نرخ واکنش پوزولانی انواع نانوسیلیس با سطوح ویژه مختلف و تاثیر این مواد بر درجه هیدراسیون سیمان در خمیره های سیمانی	١٢٤
٦-١-١	روش های آنالیز حرارتی	١٢٤
٦-١-٢	محدوده های دمایی مربوط به تغییرفاز محصولات واکنش سیمان	١٢٧
٦-١-٣	محاسبه مقدار هیدروکسیدکلسیم	١٣٣

٦-١-٣-١	محاسبه مقدار هیدروکسیدکلسیم در مطالعات دیگران	١٣٣
٦-١-٣-٢	میزان مصرف آهک در خمیره های آهکی حاوی نانوسیلیس و میکروسیلیس در تحقیق حاضر	١٣٧
٦-١-٣-٣	بررسی فعالیت پوزولانی نانوسیلیس ها از طریق اندازه گیری مصرف آهک در خمیره های سیمانی در تحقیق حاضر	١٤٢
٦-١-٤	آب غیر قابل تبخیر و درجه هیدراسیون سیمان	١٥٠
٦-١-٤-١	محاسبه آب غیرقابل تبخیر و درجه هیدراسیون در مطالعات دیگران	١٥٠
٦-١-٤-٢	محاسبه درجه هیدراسیون سیمان خمیره های سیمانی در تحقیق حاضر	١٥٣
٦-١-٤-٣	تعیین درجه هیدراسیون سیمان	١٥٥
٦-٢	تاثیر انواع نانوسیلیس با سطوح ویژه مختلف بر سایر خواص موادپایه سیمانی	١٦٠
٦-٢-١	زمان گیرش	١٦٢
٦-٢-٢	مقاومت فشاری	١٦٦
٦-٣	جمع بندی فصل حاضر	١٦٩

٧	بررسی تاثیر نوع و ابعاد نانوذرات سیلیسی بر خواص مکانیکی و دوام ملات	١٧٠
٧-١	مواد و نحوه اختلاط	١٧٠
٧-٢	روش های آزمایش	١٧٤
٧-٣	نتایج و بحث	١٧٥
٧-٣-١	مقدار فوق روانساز لازم برای دستیابی به سیلان موردنظر ملات های سیمانی	١٧٥
٧-٣-٢	مقاومت فشاری	١٧٧
٧-٣-٣	جذب آب	١٨٥
٧-٣-٤	مقاومت خمشی	١٨٦
٧-٤	جمع بندی فصل حاضر	١٨٧

٨	بررسی تاثیر نوع و ابعاد نانوذرات سیلیسی بر خواص مکانیکی و دوام بتن	١٨٩
٨-١	روش ساخت مخلوط ها و نحوه انجام آزمایشات انجام گرفته	١٨٩

۸-۱-۱	مصالح استفاده شده	۱۸۹
۸-۱-۲	نحوه ساخت و قالب گیری مخلوط ها	۱۹۱
۸-۱-۳	روش های آزمایش	۱۹۳
۸-۲	نتایج	۱۹۷
۸-۲-۱	نیاز آبی مخلوط های بتنی	۱۹۷
۸-۲-۲	مقاومت فشاری	۱۹۹
۸-۲-۳	نتایج نفوذ تسریع شده یون کلر (RCPT)	۲۰۳
۸-۲-٤	جذب آب نهایی مخلوط های بتن	۲۰۹
۸-۳	تاثیر استفاده همزمان نانوسیلیس و دوده سیلیسی بر خواص بتن	۲۰۹
۸-٤	جمع بندی فصل حاضر	۲۱۲
۹	نتیجه گیری و پیشنهادها	۲۱٤
۹-۱	نتیجه گیری	۲۱٤
۹-۲	پیشنهادها	۲۱۸
۱۰	مراجع	۲۲۰

فهرست جداول

	عنوان	شماره صفحه
۲-۱	ترکیبات شیمیایی میکروسیلیس های تولید داخل کشور و الزامات ASTM C1240	۳٤
۳-۱	تغییرمقدار هیدروکسیدکلسیم در خمیره های آهکی حاوی نانوسیلیس و میکروسیلیس	٤۷
۳-۲	طرح اختلاط های ارائه شده در مطالعه Zhao-qi and young 1984	٤۸
۳-۳	میزان آهک مصرف شده مخلوطهای آهکی حاوی اروزیل	٤۹
۳-٤	مقایسه بین درجات مختلف پلیمریزاسیون ژل C-S-H در خمیره های آهکی	۵۲
۳-۵	طرح های اختلاط و مقاومتهای فشاری و اتصال خمیره های حاوی مقادیر میکروسیلیس و نانوسیلیس	٦۱
۳-٦	مقاومتهای فشاری ۷ و ۲۸ روزه ملاتهای کنترل و ملاتهای حاوی میکروسیلیس و نانوسیلیس	٦۳
۳-۷	مقاومتهای خمشی نمونه ها	٦٦
۳-۸	مقاومت خمشی ملاتهای حاوی سل سیلیس	٦۷
۳-۹	مقاومت فشاری نمونه ها در سنین مختلف	۷۱
۳-۱۰	تاثیر نانوسیلیس بر مقاومت در برابر حملات سولفاتی	۷۵
۳-۱۱	تاثیر نانوسیلیس بر مقاومت در برابر نفوذ یون کلر	۷۵
۳-۱۲	.نفوذ یون کلر در نمونه های منشوری ملات حاوی سل سیلیس	۷۷
٤-۱	مشخصات فیزیکی و شیمیایی انواع نانوسیلیس و دوده سیلیسی	۸۲

٦-١	محدوده دمایی تجزیه هیدروکسیدکلسیم در مطالعات متعدد	١٢٨
٦-٢	محدوده دمایی تجزیه فازهای کربناته در مطالعات متعدد	١٢٩
٦-٣	نتایج TG و مقادیر آب برای فازها در خمیره سیمانی (Taylor 1997)	١٣٠
٦-٤	نحوه اختلاط خمیره های آهکی و یک طرح اختلاط نمونه	١٣٨
٦-٥	آنالیز شیمیایی سیمان مورد استفاده در خمیره های سیمانی	١٤٢
٦-٦	نحوه اختلاط خمیره های سیمانی	١٤٤
٦-٧	طرح های خمیره سیمان استفاده شده برای آنالیزهای ترموگراویمتری	١٤٤
٦-٨	طرح های استفاده شده برای بررسی تاثیر نانوسیلیس ها بر خواص خمیره های سیمانی	١٦٠
٦-٩	زمان های گیرش خمیره های سیمانی حاوی سل های نانوسیلیس و دوده سیلیسی	١٦٥
٦-١٠	مقاومت فشاری نمونه های حاوی سل های سیلیس در مقایسه با خمیره کنترل	١٦٧
٦-١١	مقاومت نمونه های حاوی نانوسیلیس های پایروژنیک و دوده سیلیسی در مقایسه با خمیره کنترل	١٦٨
٧-١	آنالیز شیمیایی سیمان مورد استفاده در ملات های سیمانی	١٧٠
٧-٢	طرح های استفاده شده برای بررسی تاثیر نانوسیلیس ها بر خواص مخلوط های ملات	١٧٢
٧-٣	نحوه اختلاط ملات های سیمانی	١٧٤

۸-۱	آنالیز شیمیایی سیمان مورد استفاده در مخلوط های بتن	۱۹۱
۸-۲	طرح مخلوط های بتن استفاده شده در مطالعه حاضر	۱۹٤
۸-۳	نحوه اختلاط مخلوط های بتن	۱۹۵
۸-٤	مقاومتهای فشاری مخلوط های بتنی نانوسیلیس و دوده سیلیسی بصورت توام در مقایسه با مخلوط های حاوی این مواد به تنهایی	۲۱۰
۸-۵	بررسی اثر استفاده تلفیقی از نانوسیلیس و دوده سیلیسی روی نتایج آزمایش های ارزیابی تسریع شده مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلر در مقایسه با سایر مخلوط ها	۲۱۱

فهرست تصاویر

	عنوان	شماره صفحه
۲-۱	حالت شماتیک لایه دوگانه	۹
۲-۲	نحوه شماتیک بهم پیوستن و پلیمریزاسیون اسیدسیلیسیک	۱٤
۲-۳	روند هسته زایی و رشد	۱۵
۲-٤	روند رشد ذرات سیلیس در سل	۱۵
۲-۵	روند تولید نانوسیلیس با محدوده سایز باریک و گسترده	۱۷
۲-٦	روند تهیه صنعتی متداول سیلیس رسوبی	۲۰
۲-۷	مقایسه بین شکل a) سیلیس رسوبی وb) ژل سیلیس	۲۲
۲-۸	روند تهیه شماتیک سیلیس دوده ای	۲٤
۲-۹	روند تهیه و سایزهای ذرات، کلوخه و توده در سیلیس های پایروژنیک	۲۵
۲-۱۰	نمونه ای از کلوخه های تشکیل شده دراروزیل a)تولیدی دگوسا وb) تولیدی شرکت واکر	۲۵
۲-۱۱	انواع گروه های تشکیل شده در سطح سیلیس	۲٦
۲-۱۲	روند برقراری پیوند هیدروزنی بینa) اکسیژن سیلانول و هیدروژن آب و b) هیدروژن سیلانول و اکسیژن آب	۲۸
۲-۱۳	نسبت بین سطح مخصوص و مقدار هیدروکسیل موجود در سطح به ازای وزن واحد	۲۸
۲-۱٤	هیدروکسید شدن (هیدراته شدن) سطح سیلیس حاوی گروه های سیلکسان	۲۹
۲-۱۵	تشکیل لایه انتشار دوگانه الکتریکی اطراف ذره دارای بار سطحی مثبت	۳۱
۲-۱٦	روند باردارسازی سطح سیلیس در محیطهای بازی و اسیدی	۳۲
۲-۱۷	مقایسه ای بین ابعاد ذرات نانوسیلیس و میکروسیلیس	۳۵

۲-۱۸	درصد واحدهای سیلیس در سطح به کل واحدهای سیلیس بر حسب ابعاد ذرات	۳۷
۲-۱۹	پایدارسازی a) پایدارسازی الکترواستاتیکی،b) پایدارسازی ااستریک و c)ترکیب دو روش	۳۹
۲-۲۰	مکانیزم های پایداری سازی استریک	٤۱
۳-۱	مقدار هیدروکسیدکلسیم واکنش داده در برابر سطح مخصوص پوزولان	٤۷
۳-۲	تصاویرa) توپوگرافی و b) اسکن فازی نمونه کنترل بدون پوزولان	۵۳
۳-۳	تصاویرa) توپوگرافی و b) اسکن فازی نمونه حاوی ۲۵ درصد میکروسیلیس	۵۳
٤-۳	تصاویرa) توپوگرافی و b) اسکن فازی نمونه حاوی ۲۰ درصد جایگزینی میکروسیلیس و ۳/۵۵ درصد سل سیلیس با اندازه کلوخه ۲۵۰nm	۵٤
۵-۳	هیدراسیون متصاعدشده از خمیره های C_3S حاوی ۲۰ درصد سیلیس آمورف افزوده به وزن C_3S با سطوح مخصوص مختلف در نسبت های آب به C_3S برابر۱ و بدون استفاده از فوق روانساز	۵۷
٦-۳	مقایسه مقاومتهای فشاری نمونه های حاوی نانوسیلیس و بتن کنترل	٦۵
۳-۷	نتایج آزمون نفوذ تسریع شده یون کلر	۷٦
۳-۸	میزان انقباض ناشی از خشک شدن برای ملاتهای حاوی نانوسیلیس	۷۸
٤-۱	انواع مختلف نانوسیلیس و دوده سیلیسی استفاده شده در مطالعه حاضر	۸۳
٤-۲	تصویر دستگاه پراش پرتو ایکس	۸٤
٤-۳	منحنی XRD تهیه شده برای اروزیل ۹۰	۸٤
٤-٤	منحنی XRD تهیه شده برای اروزیل ۲۰۰	۸۵
٤-۵	منحنی XRD تهیه شده برای اروزیل ۳۰۰	۸۵
٤-٦	منحنی XRD تهیه شده برای دوده سیلیسی	۸۵

۵-۱	تصویر دستگاه سنجش توزیع اندازه ذرات Mastersizer 2000	۹۲
۵-۲	دستگاه Zetasizer 3000 HS, Malvern, UK	۹۳
۵-۳	تصویر دستگاه Hitachi FE-SEM model S-4160	۹٤
۵-٤	تصویر دستگاه TEM مدل TEM Zeiss EM900	۹۵
۵-۵	منحنی های توزیع الف) غیرتجمعی وب) تجمعی اندازه کلوخه ها در پودرهای اروزیل ۹۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ و دوده سیلیسی	۹۷
۵-٦	تصاویر میکروسکوپی از کلوخه های اروزیل ۹۰	۹۷
۵-۷	تصاویر میکروسکوپی از کلوخه های اروزیل ۲۰۰	۹۸
۵-۸	تصویر میکروسکوپی از کلوخه های اروزیل ۲۰۰ با بزرگنمایی ۹۰۰۰ برابر	۹۸
۵-۹	. تصاویر میکروسکوپی از کلوخه های اروزیل ۳۰۰	۹۸
۵-۱۰	توزیع اندازه کلوخه های نانوسیلیس های پایروژنیک و دوده سیلیسی پخش شده در آب با انرژی پخش نسبتا کم الف) غیرتجمعی و ب)تجمعی	۱۰۱
۵-۱۱	توزیع اندازه سل های نانوسیلیس بدون اعمال انرژی پخش الف)غیرتجمعی و ب)تجمعی	۱۰۲
۵-۱۲	تصاویر TEM اخذشده از سل سیلیس با سطح ویژه ۱۰۰ مترمربع برگرم	۱۰۳
۵-۱۳	اثر انرژی پخش روی توزیع اندازه کلوخه های نانوسیلیس پایروژنیک اروزیل ۲۰۰ الف) غیرتجمعی و ب) تجمعی	۱۰۵
۵-۱٤	بررسی اثر pH روی پخش ذرات نانوسیلیس اروزیل ۲۰۰ در آب تحت امواج التراسونیک به مدت ٦۰ دقیقه الف) منحنی توزیع اندازه غیرتجمعی و ب) منحنی توزیع اندازه تجمعی	۱۰۸
۵-۱۵	تاثیر pH روی توزیع اندازه کلوخه های نانوسیلیس اروزیل ۲۰۰ پخش شده توسط مخلوط کن با دور بالا (۳۰۰۰ دور بر دقیقه) الف) توزیع غیرتجمعی و ب)توزیع تجمعی	۱۱۰
۵-۱٦	منحنی های توزیع اندازه انواع نانوسیلیس های پایروژنیک و دوده سیلیسی تحت	۱۱۳

	پخش با مخلوط کن دور بالا	
۵-۱۷	منحنی های توزیع اندازه انواع نانوسیلیس های پایروژنیک و دوده سیلیسی تحت پخش با مخلوط کن دور بالا (مورد استفاده در خمیره های آهکی)	۱۱٤
۵-۱۸	فشردگی لایه دوگانه و تاثیر آن بر پتانسیل زتا	۱۱۷
۵-۱۹	حالت شماتیک عملکرد هسته زایی نانوذرات سیلیسی در فضای منفذی بتن	۱۱۹
٦-۱	محدوده پیک فاز کربناته در خمیره سیمانی (Jakonta and Mojumdar 2007)	۱۳۱
٦-۲	نمودار TG/DSC از کربنات کلسیم با خلوص بالا	۱۳۲
٦-۳	نمونه ای از نمودارهای TG خمیره سیمان، کلیه مقادیر نسبت به وزن سوخته سنجیده شده اند	۱۳٤
٦-٤	میزان آهک مصرف شده در خمیره های آهکی حاوی سل های سیلیس	۱٤۰
٦-۵	مقایسه میزان آهک مصرف شده در خمیره های آهکی حاوی نانوسیلیس های پایروژنیک و سل های نانوسیلیس	۱٤۱
٦-٦	میزان هیدروکسید کلسیم موجود در خمیره های سیمانی حاوی سل های سیلیس و میکروسیلیس	۱٤۷
٦-۷	مقایسه میزان هیدروکسید کلسیم موجود در خمیره های سیمانی حاوی نانوسیلیس پایروژنیک و سل نانوسیلیس با سطح ویژه ۲۰۰ مترمربع برگرم	۱٤۷
٦-۸	مقدار هیدروکسیدکلسیم نرمالیزه شده برای مقدار برابر سیمان با خمیره کنترل، حاوی سل های سیلیس و حاوی دوده سیلیسی	۱٤۸
٦-۹	مقدار هیدروکسیدکلسیم نرمالیزه شده برای مقدار برابر سیمان با خمیره کنترل، حاوی نانوسیلیس پایروژنیک و سل سیلیس با سطح ویژه ۲۰۰ مترمربع برگرم	۱٤۸
٦-۱۰	درجه هیدراسیون در خمیره های سیمانی حاوی سل های سیلیس و میکروسیلیس	۱۵۷
٦-۱۱	مقایسه بین درجه هیدراسیون در خمیره سیمانی حاوی نانوسیلیس پایروژنیک و سل نانوسیلیس با سطح ویژه ۲۰۰ مترمربع برگرم	۱۵۸
٦-۱۲	تراکم پذیری الف)خمیره حاوی سل سیلیس ۱۰۰ با ۷/۵ درصد جایگزینی سیمان	۱٦٦

و ب)خمیره شاهد

۷-۱	دانه بندی ماسه استفاده شده در ملات و سطوح بالا و پایین استاندارد ۳۰۴۰ ایران	۱۷۱
۷-۲	میزان فوق روانساز (درصد نسبت به وزن سیمان) ملات های سیمانی حاوی نانوسیلیس ها و دوده سیلیسی برای حفظ کارآیی	۱۷٦
۷-۳	همبستگی بین فوق روانساز (بصورت نسبت وزنی سیمان) ملات های سیمانی حاوی سل های نانوسیلیس و نانوسیلیس های پایروژنیک	۱۷٦
۷-٤	مقاومت فشاری ۱ روزه ملات های سیمانی حاوی انواع نانوسیلیس الف)مقاومت فشاری و ب) مقدار ارتقاء یافته مقاومت نسبت به مخلوط کنترل	۱۷۹
۷-۵	مقاومت فشاری ۷ روزه ملات های سیمانی حاوی انواع نانوسیلیس و دوده سیلیسی الف)مقاومت فشاری و ب) مقدار ارتقاء یافته مقاومت نسبت به مخلوط کنترل	۱۸۱
۷-٦	مقاومت فشاری ۲۸ روزه ملات های سیمانی حاوی انواع نانوسیلیس و دوده سیلیسی الف)مقاومت فشاری و ب) مقدار ارتقاء یافته مقاومت نسبت به مخلوط کنترل	۱۸۲
۷-۷	مقاومت فشاری ۹۰ روزه ملات های سیمانی حاوی انواع نانوسیلیس و دوده سیلیسی الف)مقاومت فشاری و ب) مقدار ارتقاء یافته مقاومت نسبت به مخلوط کنترل	۱۸۳
۷-۸	نسبت بین ارتقاء مقاومت ملات های حاوی سل های سیلیس و نانوسیلیس های پایروژنیک الف) اروز، ب) ۳ روز، ج) ۷ روز و د) ۹۰ روز	۱۸٤
۷-۹	میزان جذب آب نهایی نمونه کنترل و نمونه های حاوی سل های نانوسیلیس و دوده سیلیسی	۱۸۵
۷-۱۰	میزان جذب آب نهایی نمونه کنترل و نمونه های حاوی نانوسیلیس های پایروژنیک و دوده سیلیسی	۱۸٦
۷-۱۱	مقاومت خمشی ملات های حاوی نانوسیلیس و دوده سیلیسی در سن ۷ روز	۱۸۷
۷-۱۲	مقاومت خمشی ملات های حاوی نانوسیلیس و دوده سیلیسی در سن ۲۸ روز	۱۸۷

۸-۱	توزیع ابعادی سنگدانه استفاده شده در مطالعه حاضر و سطوح ارائه شده در طرح مخلوط بتن ایران	۱۹۰
۸-۲	تصویر قالب RCPT بصورت شماتیک	۱۹۶
۸-۳	تجهیزات بکار رفته در این تحقیق جهت آزمایش RCPT	۱۹۷
۸-٤	فوق روانساز لازم برای حفظ کارآیی بتن های حاوی سل های نانوسیلیس	۱۹۸
۸-۵	فوق روانساز لازم برای حفظ کارآیی بتن های حاوی نانوسیلیس های پایروژنیک	۱۹۸
۸-٦	همبستگی بین فوق روانساز لازم برای حفظ کارآیی بتن های حاوی سل های سیلیس و انواع اروزیل	۱۹۹
۸-۷	مقاومت فشاری مخلوط های بتن حاوی الف)سل های نانوسیلیس و ب) نانوسیلیس های پایروژنیک	۲۰۱
۸-۸	مقاومت فشاری مخلوط های بتن حاوی الف)سل های نانوسیلیس و ب) نانوسیلیس های پایروژنیک	۲۰۲
۸-۹	مقدار شار عبوری مخلوط های بتنی حاوی الف)سل های نانوسیلیس و ب) نانوسیلیس های پایروژنیک	۲۰٦
۸-۱۰	میزان تفاوت شار عبوری نسبت به کنترل برای مخلوط های بتنی حاوی الف)سل های نانوسیلیس و ب) نانوسیلیس های پایروژنیک	۲۰۷
۸-۱۱	ارتقاء مقاومت بتن ها در برابر نفوذ یون کلر بین سنین ۷ و ۲۸ روز نسبت به شار عبوری در ۷ روز	۲۰۸
۸-۱۲	ارتقاء مقاومت بتن ها در برابر نفوذ یون کلر بین سنین ۲۸ و۹۰ روز نسبت به شار عبوری در۲۸ روز	۲۰۸
۸-۱۳	جذب آب نهایی مخلوط های بتنی	۲۰۹

۱- مقدمه و ضرورت انجام تحقیق حاضر

۱-۱- مقدمه

طی سالیان اخیر حجم گسترده ای از مطالعات به بررسی تاثیر نانومواد بر خواص موادپایه سیمانی پرداخته و سالانه همایش های متعدد و بودجه های تحقیقاتی قابل توجه به این امر اختصاص یافته است. گروهی از نانومواد که مورد توجه جدی محققین قرار گرفته اند نانومواد با قابلیت واکنش پوزولانی میباشند. ایده اصلی انجام این تحقیقات در این مسئله نهفته است که فرض میشود ریزترشدن ذرات پوزولان میتواند سرعت واکنش پوزولانی را تسریع کند، لذا این مواد اثر تسریع کنندگی بر بهبود خواص موادپایه سیمانی بخصوص از لحاظ دوام و مشخصه های مکانیکی دارند. همچنین فرض میشود که نانومواد میتوانند فضاهای نانومتری موجود در بتن را پرنموده، لذا احتمالا به بهبود ریزساختار کمک شایانی خواهند نمود.

اگرچه در ظاهر ایده های فوق منطقی بوده و میتوانند سرمنشا بهبود قابل توجه خواص گردند، اما بایستی برخی از خواص نانومواد را نیز موردتوجه قرار داد. بعنوان مثال اگر نانومواد در فضای منفذی بتن به حالت کلوخه های میکرومتری باشند، دیگر این مواد نخواهند توانست به بهبود ریزساختار بتن از طریق پرکنندگی فضاهای نانومتری کمک کنند. از سوی دیگر در سنین پایین توسعه چندانی برای ریزساختار بتن متصور نمیباشد، لذا شاید نانومواد با توانایی واکنش زایی بسیار سریع نتوانند تاثیر قابل توجهی بر بهبود دوام بتن داشته باشند.

عملکرد بسیار مطلوب دوده سیلیسی بر بهبود خواص مکانیکی و بویژه مشخصه های دوام بتن بخوبی شناخته شده است. نانوسیلیس ها به لحاظ دارا بودن ساختار بی شکل، خلوص بالای سیلیس و ساختار کروی ذرات شباهت زیادی به میکروسیلیس دارند. هرچند در نگاه اول ممکن است

نانوسیلیس ماده ای مشابه با میکروسیلیس لیکن با سایز ذره ای کوچکتر دیده شود اما در بررسی و مقایسه این مواد توجه به برخی تفاوت های اساسی بین آنها ضروری میباشد.

بر خلاف دوده سیلیسی که دارای سطح ویژه حدود ۲۰ مترمربع برگرم میباشد، نانوسیلیس ها در محدوده وسیعی از سطوح ویژه از ۵۰ تا ۱۰۰۰ مترمربع بر گرم تولید میشوند. از سوی دیگر روش های تولید نانوسیلیس ها بسیار متنوع بوده و در یک گروه بندی کلی میتوان آنها را به سل های نانوسیلیس، نانوسیلیس های پایروژنیک، نانوسیلیس های رسوبی و ژل های نانوسیلیس تقسیم نمود.

مسلماً نمیتوان انتظار داشت که نانوسیلیس با سطح مخصوص ۵۰ مترمربع برگرم همان اثری را بر خواص بتن داشته باشد که نانوسیلیس با سطح مخصوص ۱۰۰۰ مترمربع برگرم بر بتن میگذارد. از سوی دیگر خواص نانوسیلیس های تولید شده در روش های مذکور متفاوت بوده و میتواند رفتار آنها را تحت تاثیر قرار دهد. بعنوان مثال در برخی از انواع نانوسیلیس ها این مواد درحالت کلوخه ای هستند و در برخی به شکل تک ذرات مجزا از یکدیگر حضور دارند.

با وجود مطالعات متعدد انجام گرفته در مورد تاثیر نانوسیلیس ها بر خواص موادپایه سیمانی، هنوز میزان تاثیرگذاری این مواد بر خواص موادپایه سیمانی مشخص نبوده و نتایج متفاوت و بعضا متناقض گزارش گردیده است. به عنوان مثال خالو و حسینی ۱۳۸۸ مشاهده نموده اند که در نسبت آب به موادسیمانی برابر جایگزینی ۳ درصد سیمان با نانوسیلیس افزایش ۱۰۵درصدی مقاومت فشاری ملات را در سن ۲۸ روز ایجاد نموده، در حالیکه در مقاله Ji 2005 گزارش شده که ۳٪ جایگزینی موادسیمانی با نانوسیلیس پودری دارای اندازه میانگین ذرات ۱۵nm سبب کاهش مقاومت ۲۸ روزه بتن به اندازه ۸ درصد در نسبت آب به مواد سیمانی برابر گردیده است. بنظر میرسد که تفاوت در