بسم الله الرحمن الرحيم

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

دانشگاه تفرش

دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد

استفاده از افزودنی نانو سیلیس برای تولید بتن‌های با خواص ویژه

استاد راهنما:

جناب آقای دکتر سحاب

دانشجو:

سمانه آقامحمدی

۱۳۸۹

تقـدیـم بـه

پدر و مادر و همسر عزیزم

که یاریشان دلیل تلاشم بود.

جناب آقای دکتر محمدقاسم سحاب

از زحماتتان در تهیه این پایان‌نامه، بسیار سپاس‌گذارم.

چکیده

یکی از دغدغه‌های صنعت ساختمان تولید بتن با کیفیت بالا می‌باشد. نزدیک ۶۰ سال است که برای بالاتر بردن خواص مکانیکی بتن از دوده سیلیسی استفاده می‌شود. اخیرا با پیشرفت فناوری نانو در صنعت، محققین به استفاده از نانو سیلیس برای افزایش کیفیت بتن توجه بیشتری نشان می‌دهند. از آنجا که نانو سیلیس سطح مخصوص بالایی دارد انتظار می‌رود که فعالیت پوزولانی زیادی از خود نشان دهد و باعث شود سرعت واکنش‌های هیدراسیون افزایش یابد.

در این تحقیق به بررسی تاثیر درصدهای مختلف نانو سیلیس بر خواص بتن تازه و سخت شده و تعیین درصد مطلوب نانوسیلیس بر کیفیت بتن و نیز اثر دوده سیلیسی در درصدهای مختلف بر خواص بتن تازه و سخت شده و همچنین اثر توام نانوسیلیس و دوده سیلیسی بر خواص بتن تازه و سخت شده می‌پردازیم. پس از مقایسه دانه‌بندی ناحیه مطلوب توصیه شده در ASTM و مقایسه آن با آیین نامه ملی ۳۰۲ ایران ، دانه‌بندی مورد نظر انتخاب شده ، درصدهای مختلف دانه‌ها تعیین گردیده و دانه‌بندی مطلوب با مدول نرمی‌مشخص تعیین شده است. سپس با آزمایش چهار عیار مختلف سیمان طرح اختلاط بتن شاهد انتخاب شده است، با طرح اختلاط مشخص شده و افزودن درصدهای مختلف نانوسیلیس و دوده سیلیسی و نیز هردو به صورت همزمان نمونه‌ها ساخته شده که در هر مورد با آزمایش اسلامپ و مقاومت فشاری خواص بتن تازه و سخت شده بررسی گردیده است. همچنین مقایسه دو ساختمان بتنی مدل شده با نرم افزار ETABS با دو مقاومت بتن $210\ kg/cm^2$ و $500\ kg/cm^2$ نشان می‌دهد اگر از بتن با مقاومت $500\ kg/cm^2$ در ساختمان استفاده شود حجم اسکلت سازه تا ۲۵٪ کاهش می‌یابد.

بعلاوه با بررسی عکس‌های میکروسکوپی از ساختار نمونه‌های بتن ساخته شده با نانوسیلیس و دوده سیلیسی و مقایسه آن‌ها با نمونه شاهد تاثیر این این افزودنی‌ها بر روی بهبود و انسجام بهتر بتن ساخته شده با نانوسیلیس و دوده سیلیسی مشاهده شده است.

واژه‌های کلیدی : نانو سیلیس، دوده سیلیسی، دانه‌بندی، اسلامپ، مقاومت فشاری، عکس میکروسکوپی

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: ۱

موضوع پایان نامه و اهمیت آن..... ۱

نانو، علم نانو و فناوری نانو..... ۱

فناوری نانو در تولید بتن..... ۲

موضوع این پایان نامه..... ۳

ساختار پایان نامه..... ۴

فصل دوم: ۵

بررسی تحقیقات انجام شده در زمینه تولید بتن با نانو و میکرو افزودنی‌ها..... ۵

مقدمه..... ۵

اثر دوده سیلیسی در تولید بتن با مقاومت بالا..... ۵

دوده سیلیسی و اثرات آن برسایش در بتن..... ۷

اثر دوده سیلیسی بر داوم بتن در برابر یخبندان و ذوب..... ۸

نفوذپذیری در بتن حاوی دوده سیلیسی..... ۹

اثر جمع‌شدگی و خزش در بتن حاوی دوده سیلیسی..... ۹

خوردگی آرماتور در بتن حاوی دوده سیلیسی..... ۱۱

بررسی حرارت‌زایی بتن حاوی دوده سیلیسی..... ۱۱

اثر دوده سیلیسی بر مدول الاستیسیته و ضریب پواسون..... ۱۲

نتیجه گیری..... ۱۶

فصل سوم ۱۷

بتن با عملکرد بالا..... ۱۷

فصل چهارم:..... ۲۳
مطالعه آزمایشگاهی در استفاده از نانو سیلیس و دوده سیلیسی بر روی مقاومت و کارایی بتن..... ۲۳
مصالح مورد استفاده و مشخصات آنها:..... ۲۳
فصل پنجم: ٦۳
نتیجه گیری..... ۶۳

فصل اول:

موضوع پایان نامه و اهمیت آن

نانو علم نانو و فناوری نانو

موادی که حداقل یکی از ابعاد آنها در مقیاس ۱ الی ۱۰۰ نانومتر باشد، مواد نانویی یا نانو مواد خوانده می‌شوند. یک نانومتر برابر با یک میلیاردم متر (۹-^۱۰ متر) می‌باشد. به طور میانگین ۳ تا ۶ اتم در کنار یکدیگر طولی معادل یک نانومتر را می‌سازند که این خود به نوع اتم بستگی دارد. نانوفناوری، توانمندی تولید و ساخت مواد، ابزار و سیستم‌های جدید با در دست گرفتن کنترل در مقیاس نانومتری یا همان سطوح اتمی‌و مولکولی، و استفاده از خواصی است که در این سطوح ظاهر می‌شوند. به طور کلی، فناوری نانو، گسترش، تولید و استفاده از ابزار و موادی است که ابعادشان در حدود ۱-۱۰۰ نانومتر می‌باشد. فناوری نانو به سه سطح مواد، ابزارها و سیستم‌ها قابل تقسیم است. موادی که در سطح نانو در این فناوری به کار می‌رود، را نانو مواد می‌گویند. ماده ی نانو ساختار، به هر ماده ای که حداقل یکی از ابعاد آن در مقیاس نانومتری (زیر ۱۰۰ نانومتر) باشد اطلاق می‌شود. این تعریف به وضوح انواع بسیار زیادی از ساختارها، اعم از ساخته دست بشر یا طبیعت را شامل می‌شود. منظور از یک ماده ی نانو ساختار، جامدی است که در سراسر بدنه آن انتظام اتمی، کریستال‌های تشکیل دهنده و ترکیب شیمیایی در مقیاس چند نانومتری گسترده شده باشند. در حقیقت این مواد متشکل از کریستال‌ها یا دانه‌های نانومتری هستند که هر کدام از آنها ممکن است از لحاظ ساختار اتمی، جهات کریستالوگرافی یا ترکیب شیمیایی با یکدیگر متفاوت باشند. همه مواد از جمله فلزات، نیمه‌هادی‌ها، شیشه‌ها، سرامیک‌ها و پلیمرها در ابعاد نانو می‌توانند وجود داشته باشند. همچنین محدوده فناوری نانو می‌تواند به صورت ذرات بی شکل(آمورف)، کریستالی، آلی، غیرآلی و یا به صورت منفرد، مجتمع، پودر، کلوئیدی، سوسپانسیونی یا امولسیون باشد.[1] در ساده‌ترین تعریف، علم نانو مطالعه اصول اساسی ساختارهایی از اجتماع مولکول‌ها است که حداقل یکی از ابعادشان بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر باشد. فناوری نانو کاربرد نانوساختارها در ابزارهایی در مقیاس نانو می‌باشد[2]

بطور کلی خواص مواد بستگی به اتم‌های تشکیل دهنده مواد و نحوه قرار گیری اتم‌ها در ساختار ماده دارد. یکی ازخصوصیات مشخص کننده مواد نانو این است که رفتاری متفاوت با رفتار مواد درشت ساختاری و یا میکرو ساختاری دارند. تغییر اندازه دانه‌ها باعث تغییر خواص فیزیکی مواد می‌شود و افزایش سطح تماس باعث تغییر در واکنش پذیری شیمیایی و در نتیجه تغییر خواص شیمیایی آنها می‌گردد. [3] در مقیاس نانو ، نیروهای بین‌مولکولی و نیروهای دیگر مرتبط وارد محاسبات می‌شوند. کنترل مواد در مقیاس نانو به معنای ساختن ساختارهای بنیانی در مقیاسی است که در آن اندازه‌ها خواص اساسی معین می‌شود و بنابراین کنترل خواص مواد حاوی ذرات نانو بهتر امکان‌پذیر می‌باشد.[3]

فناوری نانو در تولید بتن

در زمینه مصالح ساختمانی تلاش می‌شود خواص مطلوب در بتن بهبود یابد. در زمینه تولید بتن‌های با مقاومت زیاد، کارایی زیاد، مقاوم در برابر سایش، مقاوم در برابر خوردگی، خاصیت عدم عبور دهی اشعه گاما و ... نو آوری‌های فراوانی در صنعت بتن صورت گرفته است. در همین راستا فناوری نانو با محصولاتی با خواص ویژه و متنوع مورد توجه محققین مصالح ساختمانی قرار گرفته است.

خواص ، رفتار و عملکرد بتن بستگی به نانو ساختار ماده زمینه بتن و سیمانی دارد که چسبندگی ، پیوستگی و یکپارچگی را بوجود می‌آورد. بنابراین ، مطالعات بتن و خمیر سیمان در مقیاس نانو برای توسعه مصالح ساختمانی جدید و کاربرد آنها بسیار حائز اهمیت می‌باشد. با توجه به مقاومت بالا در برابر خوردگی و سایش در مناطقی که نیاز به استفاده از بتنهای با کارایی بالا می‌باشد، برای مثال باندها، فرودگاه، پلها، ساختمانهای بلند (آسمان خراشها) و پارکینگها کاربرد زیادی دارند. با استفاده از نانو ذرات در بتن می‌توان خواص دیگری از جمله خاصیت الکترومغناطیسی و قابلیت به کارگیری در سازه‌های اتمی(محافظت از تشعشعات) و حفظ انرژی ساختمانها و ... را کنترل نمود. همچنین با توجه به اینکه می‌تواند از نانو ذراتی در بتن استفاده نمود که جلوی تشعشعات رادیو اکتیو را بگیرد، از این نوع بتن‌ها در ساخت بلوکهای نگهداری ضایعات هسته‌ای نیز استفاده می‌شود. بکارگیری فناوری نانو در بتن به دو طریق انجام می‌گیرد.[4]

۱- استفاده از نانو سیمان

۲- استفاده از نانو افزودنیها (نانو لوله‌های کربنی، نانو اکسید تیتانیوم ، نانو الیاف ، نانو سیلیس)

با توجه به تأثیرافزایش نانو ذرات در سیمان و بهبود خواص سیمان ، مشخص است که استفاده از نانو سیمان‌ها در بتن نیز باعث بهبود خواص بتن می‌شود در ادامه به بررسی تأثیر انواع نانو افزودنیها و نانو سنگ دانه‌ها پرداخته خواهد شد.

نانو ذرات افزودنی به سیمان هم می‌تواند از نوع ترکیبات تشکیل دهنده خود سیمان (اکسید سیلیس ، اکسید آهن و آلومینا) باشند و هم از ترکیباتی دیگر (برای مثال نانو لوله کربنی) که در جهت ایجاد خواصی مشخص و معین در سیمان ، کاربرد دارند. به عنوان مثال ، برای حصول به سیمانی با خواص مناسب جهت استفاده در چاه‌های نفت افزودن نانو ذرات مناسب می‌باشد. همچنین استفاده از نانو لوله کربنی به عنوان نانو افزودنی در سیمان پتانسیل فوق‌العاده قوی (سیمان سخت) ایجاد می‌کند چون هم یک ماده تقویت کننده ایده‌آل می‌باشد و هم قطر آن شبیه اندازه کلسیم ـ سیلیکات ـ هیدرات است از دیگر کاربردهای نانو لوله کربنی در صنعت ساختمان استفاده از آن به عنوان اجزای ساختاری و عامل انتقال حرارت می‌باشد به نحوی که یکی از کاربردهای آن ، استفاده از آن برای گرم کردن ساختمان‌ها می‌باشد.[4]

نانوسیمانهای حاوی نانو سیلیس :

از جمله مواد بسیار موثر بر خواص سیمان، سیلیکا آمورف و یا سیلیس شیشه ای می‌باشد. میکرو سیلیس به عنوان یک ماده پوزولانی فعال شناخته شده است و افزودن آن به بتن و یا جایگزین کردن آن با بخشی از سیمان بسیاری از خواص مطلوب بتن

را بهبود می‌بخشد. ریزتر شدن اندازه ذرات تا حد نانومتری خواص فیزیکی و شیمیایی بی نظیری به مواد می‌دهد، به همین خاطر نانوذرات با پایه سیمانی نیز خواص ویژه و منحصر به فردی دارند. نانوسیلیس با سطح مخصوص بسیار بالای خود می‌تواند واکنش‌پذیری بیشتری از خود نشان دهد. تحقیقات انجام شده که بیشتر بر روی خمیر و ملات سیمان است حاکی از این است که نانوذرات سیلیس می‌تواند با کریستال‌های هیدروکسید کلسیم موجود در ناحیه انتقالی بین خمیر سیمان سخت شده و سنگ دانه واکنش داده و ژل سیلیکات کلسیم هیدراته شده تولید کند، بدین ترتیب اندازه و مقدار کریستال‌های هیدروکسید کلسیم به طور قابل توجهی کاهش یافته و در نتیجه مقاومت سنین اولیه خمیر سیمان سخت شده افزایش یابد.[۴و۱۰] علاوه بر این، ذرات نانو سیلیس با جایگزینی در حفرات ریز نانومتری ژل سیلیکاتی حاصل از هیدراسیون سیمان می‌توانند ساختار آن را به عنوان فیلرهای در ابعاد نانو بهبود بخشند[۶و۸و۹و۱۰] مشاهدات میکروسکوپی با کمک دستگاه SEM Scanning Electron) (Microscope و میزان هیدروکسید باقی مانده و نیز سرعت تغییرات حرارتی، نشان دهنده افزایش واکنش پذیری سیمان‌های حاوی نانوسیلیس می‌باشد.[۴و۱۰]

اثر دیگر نانوذرات در بتن

نتایج حاصل از تحقیقات حاصل از افزودن نانو اکسید آلومینیوم به سیمان نشان داده است، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته سیمانهای حاوی نانو اکسید آلومینیوم نسبت به سیمانهای معمولی افزایش می‌یابد. افزودن۳ درصد نانو اکسید آهن مقاومت نهایی بتن را تا ۲۸ درصد افزایش می‌دهد ولی با افزایش ذرات نانو اکسید آهن مقاومت کاهش می‌یابد و میزان مفید آن برای هر طرح اختلاطی متغییر است. علت این ضعف ممکن است به دلیل خوب پخش نشدن درسطح سیمان و زیاد بودن ذرات در مناطقی، به صورت کلوخه در می‌آیند و باعث عدم همگنی بتن می‌شوند. در نتیجه در بتن خلل و فرج ایجاد می‌گردد. بررسی نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد بهترین حالت، افزودن نانو اکسید آهن کمتر از ۱۰ درصد از لحاظ مقاومتی مناسب تر می‌باشند. تحقیقات انجام شده نشان داده است که استفاده از نانو مونتموریلونیت اصلاح شده، با مواد آلی در سیمان باعث می‌شود، نفوذپذیری ملات سیمان تا ۱۰۰ مرتبه کاهش یابد و مقاومت فشاری ۴۰٪ و مقاومت خمشی تا ۱۵٪ افزایش یابد. اگر اکسید روی با بخشی از CaO جایگزین شود باعث پایداری فاز C_3S در ترکیبات سیمان می‌شود و اضافه کردن ۵٪ مول نانو اکسید روی منتج به بالاترین مقاومت فشاری یعنی مقاومتی در حدود ۱۶۶ مگاپاسکال خواهد شد. افزودن نانو اکسید تیتانیم به سیمان باعث افزایش مقاومت فشاری و نیز مقاومت در برابر سایش در بتن می‌شود طوری که از بتن‌های معمولی و حتی بتن حاوی نانوسیلیس نیز کیفیت بهتری دارد. آزمایش‌ها نشان داده عملکرد خستگی خمشی بتن حاوی نانو اکسید تیتانیم نسبت به نانوسیلیس بهتر می‌باشد.

نانولوله‌های کربنی از کربن گرافیتی ساخته شده اند، مقاومت بسیار خوبی در برابر حملات شیمیایی داشته و نیز پایداری حرارتی خیلی خوبی دارند. نانولوله‌ها می‌توانند با سیمان در حد نانو در آمیخته شوند و سیمانی با مقاومت بسیار بالا حاصل کنند. سیمان حاوی نانو لوله کربنی می‌تواند سیمانی هوشمند و فعال باشد بطوریکه بتواند خود را در راستای ترک خوردگی خود ترمیم نماید .[11,17]

موضوع این پایان نامه

در این پایان نامه تاثیر استفاده از دوده سیلیسی و نانوسیلیس بر روی خواص کارایی و مقاومت بتن بررسی شده است. در این پژوهش با مقایسه ناحیه دانه‌بندی توصیه شده در ASTM و آیین نامه ۳۰۲ ایران ، حد میانگینی به عنوان دانه‌بندی طرح انتخاب گردیده است و برای ساخت نمونه‌ها از مطلوب ترین دانه‌بندی توصیه شده استفاده شده است. با استفاده از چهار عیار مختلف سیمان و نسبت‌های آب به سیمان ثابت ۲۴ نمونه ساخته شده و با مقایسه مقاومت ۷ و ۲۸ روزه بهترین طرح برای ساخت نمونه‌ها انتخاب شده است، سپس از اندازه‌های مختلف سیلیس به عنوان افزودنی در بتن بهره گرفته شده ، دوده سیلیسی با

درصدهای مختلف ۵،۱۰و ۱۵ درصد وزنی سیمان به بتن افزوده شده و اثر آن بر کارایی و مقاومت بتن مقایسه شده است، از هر طرح ۶ نمونه ساخته شده و ۳ نمونه در ۷ روزگی و ۳ نمونه در ۲۸روزگی شکسته و مقاومت فشاری آن مورد بررسی قرار گرفته است.

نانوسیلیس به صورت کلوییدی با سطح مخصوص در حدود ۵۰۰ متر مربع بر گرم با درصدهای ۱، ۱/۵ و۲ درصد وزنی سیمان به بتن افزوده گردیده است، از هر طرح ۶ نمونه ساخته شده و ۳ نمونه در ۷ روزگی و ۳ نمونه در ۲۸ روزگی شکسته و مقاومت فشاری آن مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی اثر مشترک دوده سیلیسی و نانوسیلیس ، با استفاده از دوده سیلیسی به میزان ۱۰ درصد وزنی سیمان و درصدهای مختلف نانوسیلیس (۱، ۱/۵و۲ درصد وزنی سیمان) ۱۸ نمونه مکعبی ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی متر ساخته شده و اثر آن بر کارایی مشاهده گردیده است و نیز از هر طرح ۳ نمونه در سن ۷ روز و ۳ نمونه در سن ۲۸ روز شکسته شده و مقاومت فشاری آنها مقایسه گردیده است. همچنین تاثیر استفاده از دوده سیلیسی و نانوسیلیس بر روی شکل بافت بتن با تهیه عکس از مقاطع برش خورده نمونه‌های بتنی بررسی گردیده است.

ساختار پایان نامه

در فصل اول که از نظر می‌گذرد توضیحات مختصری در مورد فناوری نانو و کاربرد آن در تولید بتن همچنین خلاصه ای از عملکرد و اهداف مورد نظر در پایان نامه مطرح گردیده است. در فصل دوم مروری بر پژوهش‌های انجام شده در زمینه استفاده از نانو و میکرو افزودنی‌ها در زمینه تولید بتن صورت گرفته است که مهم ترین این مباحث در مورد اثر دوده سیلیسی بر خواص بتن نظیر مقاومت فشاری، مقاومت در برابر سایش، دوام بتن در برابر یخ زدگی و ذوب شدگی، نفوذ پذیری بتن، جمع شدگی و خزش در بتن، خوردگی آرماتورهای بتن مسلح، حرارت زایی بتن و بررسی مدول الاستیسیته و ضریب پواسون بررسی گردیده است. همچنین در این پژوهش‌های انجام شده در زمینه اثر نانوسیلیس بر خواص بتن مرور گردیده است. اثر سایر نانو ذرات نیز به صورت اجمالی بررسی شده است.

در فصل سوم به بتن با عملکرد بالا و طرح آن و نیز عوامل موثر بر خواص بتن توانمند می‌پردازیم. در فصل چهارم راجع به آزمایش‌های انجام شده و نتایج گرفته شده بحث می‌شود این آزمایش‌ها با ساخت ۵ طرح اختلاط با عیارهای سیمان مختلف به منظور یافتن طرح اختلاط پایه شروع می‌شود و پس از تعین طرح اختلاط پایه سری اول آزمایش‌ها با افزودن درصدهای مختلف میکرو سیلیس به طرح پایه انجام گردیده و کارایی و معاونت آنها با نمونه شاهد مقایسه می‌گردد. سری دوم آزمایش‌ها با افزودن درصدهای مختلف نانوسیلیس به بتن پایه صورت گرفته و کارایی و مقاومت آن‌ها با بتن شاهد مقایسه گردیده است.سری سوم آزمایش‌ها با افزودن همزمان درصدهای مختلف نانوسیلیس و میکرو سیلیس به بتن پایه ساخته و کارایی و مقاومت آن‌ها مطالعه می‌گردد. در این فصل مقایسه اقتصادی استفاده از بتن با مقاومت بالا و بتن معمولی نیز صورت گرفته است. بعلاوه ساختار نمونه‌های هر سه سری با نمونه شاهد در مقیاس نانومتری مقایسه گردیده است. در فصل پنجم نتیجه گیری و پیشنهاداتی برای تحقیقات آینده عنوان گردیده است.

فصل دوم:

بررسی تحقیقات انجام شده در زمینه تولید بتن با نانو و میکرو افزودنی‌ها نانو علم نانو و فناوری

مقدمه

در این فصل به مروری اجمالی بر برخی تحقیقات صورت گرفته در زمینه افزودن دوده سیلیسی در بتن و اثر آن بر خواص مختلف بتن می‌پردازیم. همچنین تحقیقات انجام شده بر روی بررسی اثر نانو ذرات بر خواص گوناگون بتن مرور می‌شود. لازم به ذکر است استفاده از دوده سیلیسی (سیلیکا فیوم) در بتن سالهاست که به عنوان افزودنی و یا جایگزین سیمان مرسوم است و مطالعات متعددی در زمینه اثر میکروسیلیس بر خواص گوناگونی که در بتن ایجاد میکند صورت گرفته است در حالی که نانوذراتی چون نانوسیلیس محصولات جدیدی از فناوری نانو هستند و کاربرد آنها در صنعت ساختمان کمتر از ۱۰ سال قدمت دارد و اثرات نانو سیلیس در خواص مختلف بتن به طور کامل بررسی نشده است. مطالب زیر بر گرفته از مقالات منتشر شده از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۹ می‌باشد.

اثر دوده سیلیسی در تولید بتن با مقاومت بالا

Madandoost [۱۸] در تحقیق خود به بررسی خواص مکانیکی بتن با مقاومت بالا پرداخته است. او مخلوط‌های بتنی حاوی میکروسیلیس که با سنگ دانه‌های مختلف ساخته شده است را با خواص مکانیکی بتن معمولی مقایسه نموده است. در این تحقیق از سیمان تیپ I و ۱۰٪ وزنی سیمان دوده سیلیسی و فوق‌روان‌کننده از نوع ملایس سولفونات تغلیظ شده استفاده شده است. دو مخلوط شرایط مشابهی دارند و تنها تفاوت آنها جنس سنگ دانه درشت در آنهاست که در یکی از سنگ دانه‌های آهکی و در دیگری از سنگ دانه گرانیتی که حداکثر اندازه آن ۱۰ میلیمتر می‌باشد،

استفاده شده است. در این مطالعه ۴۲ نمونه جهت انجام آزمایشات مطابق استاندارد ASTM به کارگرفته شده است. نمونه‌های مکعبی با ابعاد 10 سانتیمتر به منظور بررسی مقاومت فشاری بتن اختیار گردیده است. برای بررسی مقاومت‌کششی و تعیین مدول الاستیسیته بتن از نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد 30×15 سانتیمتر به کار گرفته شده است.

مقایسه نتایج بتن‌های با مقاومت بالا و مقاومت معمولی نشان می‌دهد که بتن‌های با مقاومت بالا در سنین اولیه به درصد قابل توجهی از مقاومت دست می‌یابند نتایج این آزمایش نشان داده است که در سن ۳ روزه مقاومت کششی بتن با مقاومت بالا در حدود ۹۵ درصد مقاومت ۲۸ روزه می‌باشد در حالی که برای بتن با مقاومت معمولی این درصد به حد ۷۵ درصد محدود می‌گردد. نتایج نظیر بر روی مقاومت فشاری برای بتن‌های با مقاومت بالا و معمولی در سن ۳ روزه به ترتیب در حدود ۶۸ و ۵۰٪ مقاومت ۲۸ روز را به دست می‌دهد.

از بررسی‌های انجام شده در این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت، با افزودن دوده سیلیسی و فوق‌روان‌کننده برای بتن‌های با نسبت آب به سیمان کم می‌توان مقاومت بتن را در سنین اولیه افزایش داد. این تأثیر در مورد مدول الاستیسیته نیز دیده می‌شود. همچنین اثر نوع سنگ‌دانه بر خواص مکانیکی بتن نشان داده شده است. این تأثیر به مراتب بر مدول الاستیسته و مقاومت فشاری بتن دیده شده است. در این مطالعه بتن‌های ساخته شده با سنگ‌دانه گرانیتی مقادیر بالاتری را نسبت به بتن‌های ساخته شده با سنگ‌دانه‌های آهکی را نشان داده‌اند.

Yuan [19] و همکارانش نشان دادند مقاومت بتن‌های حاوی دوده سیلیسی ممکن است تا ۱۴۰ مگا پاسکال نیز برسد این افزایش مقاومت نسبت به زمان براساس تداوم آبگیری سیمان و کاهش درصد تخلخل و فضای خالی بین مواد متشکله در مرحله ایجاد چسبندگی می‌باشد. ادامه آبگیری سیمان در نسبت‌های کم آب به سیمان به حدود یک روز معدود می‌شود و این امر تأثیر مستقیم در افزایش مقاومت خواهد داشت.

مطابق آنچه در استانداردهای BS و ASTM ذکر شده است تأثیر دوده سیلیسی بر مقاومت بتن بستگی به روش استفاده و هدف از کاربرد این ماده دارد.[۲۰و۲۱] چنانچه این ماده به عنوان ماده افزودنی مصرف شود تأثیر منفی روی مقاومت‌های کوتاه مدت بتن ندارد و افزایش نسبتاً قابل توجهی در خلال ۳ تا ۲۸ روز عمل‌آوری و نگهداری در شرایط مرطوب ایجاد می‌گردد، ولی هنگامی‌که به عنوان جایگزین بخشی از سیمان پرتلند مصرف شود با توجه به میزان مصرف آن، مقاومت‌های کوتاه مدت بتن خصوصاً برای مخلوط‌هایی با نسبت آب به سیمان بیش از ۰/۵ مقداری کاهش می‌یابد.

Carette و همکارانش[۲۲] در تحقیقی مقاومت بتن حاوی دوده سیلیسی در کوتاه مدت و بلندمدت تحت شرایط عمل‌آوری در آب و نیز عمل‌آوری خشک در هوا پس از ۷ روز عمل‌آوری در شرایط مرطوب را بررسی کرده است. او در تحقیق خود بتن حاوی فوق روان‌کننده و نیز حاوی ۵ و ۱۰٪ وزن سیمان دوده سیلیسی به عنوان جایگزین سیمان که نسبت آب به مواد سیمانی بین ۰/۲۵ و ۰/۴ می‌باشد. مقاومت فشاری تا سن ۳/۵ سال در شرایط عمل‌آوری مرطوب اندازه‌گیری شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، سهم بیشتر دوده سیلیسی بر مقاومت بتن قبل از ۲۸ روز می‌باشد و بیشترین مقاومت بتن حاوی دوده سیلیسی در سنین بین ۲۸ تا ۹۱ روز گزارش شده است. این پیشرفت با گذشت زمان کندتر می‌شود. برای بتن‌های با نسبت آب به مواد سیمانی بین ۰/۳ و ۰/۴ این روند در سنین بالاتر متوقف می‌شود. در شرایط عمل‌آوری در هوای خشک الگوی مقاومت بتن تا سن ۹۱ روز تفاوت چندانی با بتن عمل‌آوری شده در آب ندارد.

عمل‌آوری در شرایط بالا برمقاومت بتن حاوی دوده سیلیسی در سنین ۹۱ روز تا ۳/۵ سال تأثیر شدیدتری گذاشته است (مخصوصاً برای بتن با نسبت آب به مواد سیمانی بین ۰/۳ و ۰/۴) و در برخی گزارشات کاهش مقاومت بتن را نشان داده است.

دمای عمل‌آوری نیز بر مقاومت بتن حاوی دوده سیلیسی تأثیرگذار است. تحقیقات نشان داده است فعالیت پوزولانی دوده سیلیسی به شدت تحت‌تأثیر دمای عمل‌آوری بتن می‌باشد.

افزایش دمای عمل‌آوری بتن در تسریع مقاومت بتن حاوی دوده سیلیسی اثر بیشتری نسبت به بتن معمولی دارد میزان دوده سیلیسی مصرفی در بتن به شدت بر مقاومت بتن حاوی دوده سیلیسی تأثیرگذار است. در حالت کلی این میزان بین ۷ تا ۱۰٪ بهینه می‌باشد. در شرایط خاص تا ۱۵٪ دوده سیلیسی نیز در بتن موفقیت‌آمیز بوده است.

دوده سیلیسی و اثرات آن برسایش در بتن

Berra [۲۳] در تحقیقات خود ملات‌های حاوی ۱۵٪ دوده سیلیسی، حاوی اکریلیک و همراه با پوشش سنگ‌دانه‌های حاوی آهن را با ملات شاهد مقایسه نمود، او نشان داد سایش ملات حاوی دوده سیلیسی به طور قابل توجهی نسبت به ملات شاهد و ملات حاوی پوشش سنگ دانه‌های آهنی کاهش یافته است، اگرچه ملات حاوی اکریلیک کمترین میزان سایش را نشان می‌دهد ولی استفاده از آن از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیست.

تحقیقات Berra نشان داد میزان پیوستگی و چسبندگی ملات حاوی دوده سیلیسی نسبت به ملات شاهد به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. به همین جهت در تعمیر آسیب‌دیدگی‌های ناشی از سایش و فرسایش از این نوع ملات استفاده می‌شود.

Mirza [۲۴] نشان داده است به‌کارگیری الیاف همراه با دوده سیلیسی در بتن برای بهبود و افزایش مقاومت سایشی نیز مؤثر است. او بر روی ملات‌های مختلف که با سیمان کوره آهن‌گدازی ساخته شده‌اند، از نظر مقاومت سایشی تحقیقاتی انجام داد. او سه ملات شاهد، حاوی الیاف و حاوی دوده سیلیسی و الیاف را مورد بررسی قرار داد.

نتایج گزارش او نشان می‌دهد اگرچه مقاومت فشاری و خمشی ملات حاوی الیاف نسبت به ملات شاهد بهبود یافته ولی افزودن الیاف بر مقاومت سایشی اثر چندانی ندارد، اما استفاده از دوده سیلیسی در ملات حاوی الیاف علاوه بر بهبود قابل توجه مقاومت فشاری و خمشی، مقاومت سایشی را نیز تا ۵۰٪ افزایش داده است.

تحقیقات Causey [۲۵و۲۶] بر روی سه‌نوع بتن معمولی، حاوی مواد پلیمری و حاوی دوده سیلیسی نشان می‌دهد، خواص این سه نوع بتن براساس آزمایش مقاومت سایشی در زیرآب مورد بررسی قرار گرفت. او نشان داد بتن‌های حاوی دوده سیلیسی و حاوی مواد پلیمری نسبت به بتن معمولی بهبود قابل توجهی از نظر مقاومت سایشی از خود نشان می‌دهند. بتن‌های حاوی دوده سیلیسی در سازه‌های آبی مانند سرریز سدها و تونل‌های انتقال آب که در معرض سایش قرار دارند می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند.

دهقانیان و همکاران [۲۷] در تحقیقی به بررسی تأثیر شن و ماسه سیلیسی و دوده سیلیسی برمقاومت فشاری، زمان‌گیرش اولیه، درصد انبساط حجمی‌و مقاومت الکتریکی بتن پرداخته‌اند. او به بررسی تأثیر اضافه نمودن درصدهای مختلف دوده سیلیسی از صفر تا ۲۰٪ همراه با شن و ماسه سیلیسی بر مقاومت فشاری زمان‌گیرشی، درصد انبساط حجمی‌و مقاومت الکتریکی بتن پرداخت. او در این تحقیق علاوه بر آزمایشات مکانیکی، آزمایش الکتروشیمی‌نیز برای تعیین مقدار بار عبور کرده از بتن که نشان‌دهنده مقاومت الکتریکی بتن است، پرداخته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که افزودن دوده سیلیسی باعث افزایش درصد انبساط حجمی‌بتن، زمان‌گیرشی و مقاومت الکتریکی بتن می‌شود. همچنین افزودن تنها ۱۰٪ دوده سیلیسی سبب افزایش مقاومت فشاری بتن می‌گردد. افزودن ۵٪ دوده سیلیسی بدون تأثیر و ۲۰٪ سبب کاهش مقاومت فشاری می‌شود. اثر دوده سیلیسی در مقاومت الکتریکی بتن در دانشگاه علم و صنعت نیز بررسی گردیده است. در این پژوهش بتن معمولی به بتن ساخته شده با جایگزینی ۱۰درصد سیمان با دوده سیلیسی، ساخته و ۲۸ روز در آب عمل‌آوری شدند، تعدادی از آزمون با در

معرض آب و تعدادی دیگر در محلول ۱۳درصد Nacl قرار داده شوند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد مقاومت الکتریکی بتن معمولی و دوده سیلیسی در آب روند افزایشی دارند، زیرا با افزایش سن بتن و افزایش محصولات هیدراتاسیون از مقدار یون‌ها کاسته می‌شود و همچنین به دلیل کاهش تخلخل تحریک یون‌ها نیز کاهش می‌یابد. ولی در محلول نمک، به دلیل وجود یون‌های Cl در بتن و تحریک این یون‌ها از مقدار مقاومت الکتریکی کاسته شده است.[۲۸] دو نمونه بتن معمولی و بتن دوده سیلیسیی در محلول نمک کاهش در مقاومت الکتریکی را نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج آزمایشات قدوسی و همکاران [۲۸]شاید بتوان این نظریه را قبول کرد که مقاومت الکتریکی بتن مهم‌ترین عامل در نفوذ عناصر مخرب و نیز شدت خوردگی است و تعیین مقاومت الکتریکی بتن‌ها روشی مناسب برای ارزیابی آسیب‌پذیری بتن آرمه در قابل خوردگی می‌باشد. Andrade و همکارانش[۲۸] معتقدند که مقاومت الکتریکی تنها آزمایش سریع ارزان، آسان و مورد اطمینان است که می‌تواند کیفیت بتن را در مقابل نفوذ کار و در نتیجه‌خوردگی مورد ارزیابی قرار دهد.

اثر دوده سیلیسی بر داوم بتن در برابر یخبندان و ذوب

صدر ممتازی [۲۹] در تحقیقی دوام بتن‌های با مقاومت زیاد در برابر یخبندان و ذوب را مورد بررسی قرار داد سپس در ابتدا دو نوع دوده سیلیسی مورد ارزیابی قرار گرفته است و از بین آنها دودۀ سیلیسی که مقاومت مکانیکی بالاتری داشت مورد استفاده آزمون‌های یخبندان و ذوب قرار گرفته است. نمونه‌های بتنی با دودۀ سیلیسی مورد نظر ساخته شدند و تحت ۳۰۰ چرخه یخبندان و ذوب [+4°C, -18°C] قرار گرفتند. او نشان داده است که با توجه به مقاومت فشاری و عبور امواج ماورای صوت و نیز ابعاد نمونه‌ها در قبل و بعد از چرخه‌های یخبندان و ذوب نیز قابل ملاحظه‌ای در آن مشاهده نشده است و تا ۳۰۰ چرخه انجماد و ذوب نتیجه آزمایش‌ها بسیار عالی بوده است. او اشاره کرده است با توجه به اینکه نمونه‌های بتنی در شرایط یخبندان در وضعیت جدی‌تری نسبت به شرایط طبیعی هستند، دوام نمونه‌ها در آزمایشگاه، دوام آنها را در شرایط طبیعی تضمین می‌کند، علت این مساله را سرعت بسیار بیشتر تغییرات دمایی در شرایط آزمون و کوچک بودن ابعاد نمونه‌ها در مقایسه با اعضای سازه‌ای واقعی داشت که منجر به رسوخ سریعتر تغییرات دمایی در درون بتن می‌شود.

محققان زیادی مطالعاتی بر مقاومت بتن حاوی دوده سیلیسی در یخبندان و ذوب انجام داده‌اند، از جمله :

Malhotra Yamato Etal. Hooton Vitanen Sellevold & Malhotra & Carette وGjorv وSovensen Batrakov Et al وPigeone وHammer

Canement [۳۰] در تحقیقی، بر مقاومت بتن در برابر یخزدگی و ذوب‌شدگی در بتن حاوی مواد حباب‌زا و فاقد حباب که حاوی درصدهای مختلفی دوده سیلیسی است مقایسه شده است. این تحقیق نتایج زیر را نشان می‌دهد:

بتن هوادهی نشده : بتن بدون حباب، صرفه‌نظر از نسبت آب به مواد سیمانی و مقدار دوده سیلیسی، فاکتورهای دوام پایین را نشان داده است و گسترش فراوان را در حین آزمایشات مطابق ASTMC666 (دستورالعمل A یا B) نمایش داده است. نتیجه‌گیری شده است که استفاده از بتن حاوی سیلیکافیوم هوادهی نشده برای شرایط یخبندان و آب‌شدگی توصیه نشده است.

بتن هوادهی شده : بتن هوادهی شده، بدون در نظر گرفتن نسبت آب به مواد سیمانی و محتوی ۱۵٪ سیلیکافیوم به عنوان جایگزینی بخشی از سیمان، حین آزمایشات مطابق ASTMC 666 دستورالعمل A و B رضایت‌بخش عمل کرده است. اگرچه، بتن حاوی ۳۰٪ فیوم و نسبت آب به مواد سیمانی برابر ۰/۴۲، بدون در نظر گرفتن روش مورد استفاده، بسیار ضعیف عمل کرده است (فاکتور دوام کمتر از ۱۰).

نفوذپذیری در بتن حاوی دوده سیلیسی

به طور کلی تخلخل و نیز توزیع اندازه حفرات بر نفوذپذیری بتن موثر است. مخصوصاً حفرات بزرگ (بزرگتر از 0.1µm) در نفوذپذیری تأثیر فراوانی دارد. درباره اثر دوده سیلیسی در ساختار حفرات دو نظریه کاملاً متضاد وجود دارد:

Mehta[i] Gjorv [۲۸] معتقدند که با افزودن دوده سیلیسی به بتن، منافذ بزرگتر به اندازه کوچکتر تغییر می‌یابند. ولی براساس نتایج تحقیقات دیگران میزان حفرات بزرگ (بزرگتر از0.1µm) در بتن دوده سیلیسی در مقایسه با بتن معمولی (ساخته شده با سیمان معمولی پرتلند) بیشتر است. Mangat و Molloy بر روی مقدار منافذ بتن معمولی و دوده سیلیسی تحقیق کردند، این تحقیق با استفاده از روش تخلخل سنج جیوه‌ای انجام شده است. همچنین مقدار تبخیر نمونه‌های بتن معمولی و بتن دوده سیلیسی را پس از خشک کردن نمونه‌ها در 105°C بدست آوردند. نتایج این تحقیق نشان داده است که مقدار تبخیر آب در بتن معمولی ۷ درصد و از بتن دوده سیلیسی ۹ درصد است. به عبارت دیگر مقدار تخلخل در بتن دوده سیلیسی بیشتر از بتن معمولی می‌باشد.[۲۸]

درباره نفوذپذیری بتن دوده سیلیسی در مقابل آب، تحقیقات وسیعی انجام نشده است. Bamforth و Pocock و Gjorv معتقدند که نفوذپذیری بتن دوده سیلیسی در مقایسه با بتن معمولی کمتر است. نتایج تحقیقات Mangat و Khatib نشان می‌دهد میزان جذب آب بتن با افزودن دوده سیلیسی تغییر نمی‌کند. هرچند مکانیزم نفوذپذیری در دو تحقیق فوق متفاوت است (نفوذ و جذب) ولی نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که درباره نفوذپذیری بتن دوده سیلیسی نظریه‌های متضاد وجود دارد.[۲۸]

درباره نفوذپذیری بتن دوده سیلیسی در مقابل کلر تقریباً نظریه واحدی موجود است. براساس این نظریه نفوذپیذیری بتن دوده سیلیسی در مقایسه با بتن معمولی به مراتب کمتر است. Li و Ray در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که نفوذپذیری بتن دوده سیلیسی در برابر کلر [با بتن ساخته شده با نسبت آب به سیمان 0.35] $7/6\times10^{-13}\frac{m^2}{S}$ متر مربع بر ثانیه و نفوذپذیری بتن معمولی برابر با $156\times10^{-13}\frac{m^2}{S}$ است. در واقع نفوذپذیری بتن معمولی در مقابل کلر حدود ۲۰ برابر بتن دوده سیلیسی است. Gjorv نیز در تحقیق خود نشان داد که نفوذپذیری خمیر دوده سیلیسی در مقابل کلر کمتر از خمیر معمولی می‌باشد.

قدوسی و همکارانش به این نتیجه رسیده‌اند که مکانیزم نفوذ کلر در بتن دوده سیلیسی متفاوت از بتن معمولی است. در بتن دوده سیلیسی کاهش تحریک یون‌ها بخصوص یون کلر عامل اصلی کنترل‌کننده عمق نفوذ کلر و شدت‌خوردگی است، در حالی که در بتن معمولی، مقدار و اندازه منافذ عامل مهم در نفوذ کلر می‌باشد. Plane و همکارانش گزارش داده‌اند که با افزودن ۸٪ دوده سیلیسی به طور مشخصی نفوذ یون کلر در بتن کاهش یافته است. با افزایش مواد سیمانی و کاهش نسبت آب به مواد سیمانی، نفوذ یون کلر در بتن کاهش بیشتری یافته است. در نسبت آب به مواد سیمانی برابر ۰/۲۱ و ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب سیمان و۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب دوده سیلیسی نفوذ یون کلر در بتن 196 Coulombs در ۲۸ روز گزارش شده است که برای بتن شاهد این مقدار برابر (1246 Coulombs) می‌باشد. دلیل این کاهش تصحیح ساختار تخلخل و افزایش چگالی ماتریس بتن ذکر شده است.[۲۸]

اثر جمع‌شدگی و خزش در بتن حاوی دوده سیلیسی

قدوسی و همکارانش در تحقیقی خزش و جمع‌شدگی بتن را با بتن‌های دوده سیلیسی بررسی کرده‌اند. آزمایش‌های اندازه‌گیری جمع‌شدگی برنمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۸۰ میلیمتر و به ارتفاع ۲۱۰ میلیمتر و برای اندازه‌گیری خزش بر نمونه‌های

استوانه‌ای با قطر ۸۰ و به ارتفاع ۲۸۰ میلیمتر انجام گردیده است. در این گزارش مشاهده شده است که نرخ افزایش جمع‌شدگی بتن معمولی تا سن ۵۸ روز زیاد است. در این زمان مقدار جمع‌شدگی به حدود ۹۳۳ ریز کرنش می‌رسد. نرخ افزایش جمع‌شدگی بتن حاوی دوده سیلیسی تا سن ۶۴ روز قابل ملاحظه است، که مقدار آن ۱۰۰۸ ریزکرنش می‌باشد.

قدوسی و همکارانش[۲۸] به این نتیجه رسیده‌اند که جمع‌شدگی مربوط به بتن معمولی کمتر از جمع‌شدگی مربوط به بتن حاوی دوده سیلیسی می‌باشد. افزایش جمع‌شدگی بتن حاوی دوده سیلیسی نسبت به بتن معمولی قابل انتظار است، زیرا بتن حاوی دوده سیلیسی دارای ژل C-S-H بیشتری است و از آنجائی که جمع‌شدگی تابع خروج مولکول‌های آب از ژل می‌باشد بنابراین جمع‌شدگی بتن حاوی دوده سیلیسی بیشتر از بتن معمولی است. نتایج آزمایش نشان داده است که خزش در تمام سنین آزمایش در بتن حاوی دوده سیلیسی در مقایسه با بتن معمولی بیشتر است.

مقصودی و همکاران [۳۱] در بررسی خزشی و جمع‌شدگی در بتن مقاومت بالا، از درصدهای سفتلن ۵ و ۱۰ و ۱۵٪ دوده سیلیسی و میزان فوق روان‌کننده ثابت و نسبت آب به سیمان‌های ۰/۳ و ۰/۳۲ ، ۰/۳۵ و ۰/۴ نمونه‌های ۱۰×۱۰×۱۰ ساخته‌اند و از بین نمونه‌ها درصد ۱۵٪ دوده سیلیسی و نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ را برای آزمایش انتخاب کرده‌اند. در این گزارش نتایج حاصل از مقایسه جمع‌شدگی بتن با بتن مقاومت بالا (حاوی دوده سیلیسی) با بتن معمولی نشان می‌دهد میزان جمع‌شدگی بتن با مقاومت بالا بسیار کمتر از مقدار نظیر برای بتن معمولی می‌باشد.

سرعت افزایش جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن برای بتن با مقاومت بالا بسیار کم است. جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن بتن به جمع‌شدن خمیر سیمان بستگی دارد و جمع‌شدگی خمیر سیمان در ارتباط با نسبت آب به سیمان می‌باشد. جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن بستگی به واحد حجم خمیر سیمان و مقاومت فشاری بتن دارد و این نتیجه برای انواع بتن‌های با مقاومت‌های مختلف صادق است. نتایج نشان می‌دهد جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن بر واحد حجم خمیر سیمان در بتن با مقاومت بالا درصدد نصف بتن با مقاومت معمولی می‌باشد و نیز یک رابطه خطی بین جمع شدگی ناشی از خشک‌شدن بر واحد حجم خمیر سیمان و نسبت آب سیمان (W/C) وجود دارد. در این گزارش ذکر شده است نسبت W/C باید در حدود ۶۳-۲۷٪ باشد و دیگر در این مرحله نسبت آب به سیمان کمتر از ۲۷٪ باشد رابطه خطی بین این دو فاکتور عملی نمی‌باشد در بررسی جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن بتن معمولی که با بخار آب عمل‌آوری شده است کمی‌کمتر از حالتی است که بتن تحت شرایط استاندارد مقاومت لازم را کسب نموده است.

این اختلاف با افزایش مقاومت فشاری کاهش می‌یابد و در مقاومت حدود ۹۸ مگاپاسکال جمع‌شدگی در هر دو حالت تقریباً معادل می‌گردد. نتایج نشان داده است این اختلاف با افزایش مقاومت فشاری کاهش می‌یابد.

از این رو می‌توان نتیجه گرفت تأثیر روش‌های عمل‌آوری بر روی جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن در بتن‌های با مقاومت بالا کمتر از بتن با مقاومت معمولی می‌باشد. در این گزارش ذکر شده است که نفوذ آب بر واحد حجم آب مخلوط بتن با مقاومت بالا کمتر از نصف مقدار آن در بتن با مقاومت معمولی می‌باشد لذا جمع‌شدگی در بتن با مقاومت بالا به مقدار قابل توجهی کمتر از بتن با مقاومت کمتر است[۳۱]

در نهایت نتایج گزارش مقصودی و همکاران نشان می‌دهد جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن بتن با مقاومت بالا کمتر از بتن معمولی است، گرچه بتن با مقاومت بالا به طور معمول واحد حجم خمیر سیمان بیشتری دارد و نیز خزش در بتن بیشتر تحت‌تأثیر واحد حجم خمیر سیمان می‌باشد تا مقاومت فشاری بتن، همچنین خزش نمونه‌های بتن با مقاومت بالا که در شرایط طبیعی آزمایش شده‌اند در مقایسه با خزش بتن‌های معمولی مقدار کمتری دارد. در مورد اثر نسبت آب به سیمان با خزش بتن با مقاومت بالا ذکر کرده‌اند که کاهش نسبت آب به سیمان در بتن مقاومت بالا خزش را کاهش می‌دهد.[۳۱]

Parrott [۳۲] در پژوهش خود نشان داده است که کرنش کلی مشاهده شده روی یک آزمون بتن با مقاومت زیاد که روکش و عایق‌بندی شده است و تحت بار طولانی به مدت ۳۰ درصد مقاومت نهایی قرار گرفته است، معادل و مشابه آزمونه بتنی معمولی هنگامی‌که به عنوان ضریب کرنش کوتاه مدت بیان می‌شود، خواهد بود. تحت شرایط خشک، این ضریب ۲۵ درصد کمتر از بتن معمولی می‌باشد. کرنش بلندمدت خشک و عایق شده بتن با مقاومت زیاد به ترتیب ۱۵ و ۶۵ درصد بیشتر از بتن معمولی در تنش نسبی مشابه خواهد بود. بعضی از این آزمایش‌ها مقداری اختلاف جزئی بین وارفتگی بتن (خزش) با مقاومت زیاد تحت شرایط خشک و عایق شده را نشان داده‌اند.

حداکثر خزش ویژه برای بتن‌هایی که در شرایط سنی یکنواخت بارگذاری شده‌اند برای بتن با مقاومت زیاد کمتر بوده است. از آنجا که بتن با مقاومت زیاد تحت بار و سپس تنش‌های بیشتری قرار می‌گیرد بنابراین وارفتگی کلی حدود همان مقدار بتن‌های دیگر و با هر مقاومتی خواهد بود. همان‌طور که در بتن‌های معمولی دیده شده است، وارفتگی با افزایش عمر بارگذاری کاهش یافته و وارفتگی ویژه با افزایش نسبت آب به سیمان افزایش می‌یابد.

خوردگی آرماتور در بتن حاوی دوده سیلیسی

دهقانیان و همکاران[۳۳] در بررسی اثر کاربرد دوده سیلیسی در ساخت بتن برخوردگی آرماتورهای تقویت‌کننده بتن در محیط‌های حاوی یون سولفات، نمونه‌های حاوی ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ درصد دوده سیلیسی جایگزین سیمان تهیه و در دو محلول ۰/۵ و ۱ درصد وزنی So_4^{-2} که با نمک $MgSo_4$ و آب مقطر تهیه شده، مورد آزمایش قرار داده‌اند. از سیمان نوع I با عیار سیمان $400V\,{}^{g}\!/_{m^3}$ بتن و نسبت آب به سیمان ۰/۵ استفاده شده است و نیز نمونه‌ای با سیمان ضدسولفات ساخته شده است.

در این تحقیق نمونه‌های بتنی مکعبی $7\times7\times7_{Cm}$ تهیه گردیده و در داخل هر نمونه بتنی دو قطعه می‌گردد به عنوان الکترودکاری (Working) یک قطعه می‌گردد به عنوان الکترود کمکی (Auxillary) قرار داده شده است.

کلیه میلگردها مورد استفاده دارای 4Cm طول و 7mm قطر بوده و سطح کلیه آنها به طور یکسان پرداخت گردیده است.

در این تحقیق برای بررسی وضعیت خوردگی آرماتورهای داخل نمونه‌های بتنی از روش پلاریزاسیون خطی بهره گرفته شده است و آزمایش‌های پلاریزاسیون خطی و پلاریزاسیون کمکی بر روی کلیه الکترودها در زمان‌های ۳۰ و ۶۰ و ۹۰ روز پس از قرار گرفتن نمونه‌های بتنی در محلول‌های مذکور انجام شده است.[۳۳]

از این گزارش می‌توان نیتجه گرفت که کاربرد دوده سیلیسی در بتن باعث کاهش سرعت خوردگی الکترودهای داخل بتن در هر دو محلول شده است. همچنین در هر دو محیط حاوی یون سولفات در بین کلیه الکترودها، الکترود داخل بتن حاوی ۵ درصد دوده سیلیسی دارای کمترین سرعت‌خوردگی بوده است. نتیجه گرفته شده است که کاربرد دوده سیلیسی باعث شده است که باعث سرعت خوردگی آرماتور داخل بتن دوده سیلیسی در محیط حاوی یون سولفات تقریباً برابر با سرعت‌خوردگی آرماتور داخل بتن ساخته شده از سیمان ضد سولفات و یا حتی کمتر از آن باشد و با توجه به جنبه‌های مکانیکی، بتن دوده سیلیسی می‌تواند مرجع باشد.[۳۳]

بررسی حرارت‌زایی بتن حاوی دوده سیلیسی

در سازه‌های بتن حجیم حرارت‌زایی بتن نقش مؤثری در طراحی دارد. نتایج تحقیقات مختلف انجام شده درباره حرارت‌زایی دوده سیلیسی در بتن در بسیاری موارد اطلاعات ضدونقیضی در این رابطه بدست می‌دهند برخی حرارت‌زایی بیشتر از بتن معمولی را مطرح کرده و برخی کمتر از بتن معمولی.[۳۴]حرارت‌زایی بتن کنترل و بتن حاوی دوده سیلیسی به مقدار ۱۰درصد

جرم مواد سیمانی، با استفاده از روش حرارت‌سنجی آدیاباتیک توسط Maage اندازه‌گیری شده است. براساس گرمای ویژه، جرم حجمی‌بتن و مقدار مواد سیمانی به کار رفته در هر مخلوط مقدار حرارت تولید شده در هر زمان قابل محاسبه می‌باشد. باقری و همکارانش [۳۴] اثر پارامترهایی که برحرارت‌زایی دوده سیلیسی در بتن دخیل می‌باشند نظیر نسبت آب به مواد سیمانی و درصد جایگزینی سیمان با دوده سیلیسی بررسی کرده‌اند.

اثر دوده سیلیسی بر مدول الاستیسیته و ضریب پواسون

مدول الاستیسیته که معمولاً شیب منحنی تنش – کرنش در سطح تنش‌کاری (کمتر از ۲۵ درصد تنش حداکثر) می‌باشد، در چنین بتن‌هایی تقریباً بیش از $50\ GP_a$ خواهد شد که در بتن با مقاومت زیاد بیشتر بستگی به نوع محاسبه مدول‌الاستیسیته دارد از نتایج تحقیق Oluoleun و همکارانش [۳۲] برمی‌آید که میزان الاستیسیته این بتن‌ها به احجام نسبی و الاستیسیته مصالح و ماتریس مصالح سیمانی که بر روی ضریب تخلخل تأثیر دارند، بستگی خواهد داشت، مدول الاستیسیته دینامیکی در این تنها حدود ۱۵–۲۵ مدول الاستیسیته استاتیکی اشان بیشتر می‌باشد.

ضریب پواسون معمولاً برای بتن معمولی، سبک، پرمقاومت و مقاومت بسیار زیاد معمولاً بین ۰/۲ تا ۰/۲۴ در تنش‌های معمولی قبل از ایجاد ترک می‌باشند. این ضریب با افزایش نسبت آب به سیمان کاهش پیدا می‌کند این ضریب برای بتن‌های فوق‌الذکر و در ناحیه الاستیک به نظر می‌رسد با مقادیر مورد انتظار برای بتن‌های با مقاومت کمتر قابل مقایسه باشند.[۳۲]

براساس نتایج منتشر شده توسط محققان مختلف، تفاوت مشخصی بین مدول الاستیته یانگ "E" در بتن با و بدون دوده سیلیسی دیده نشده است. Malhotra [۳۰] نتایج مطالعات خود در مورد مدول الاستیته یانگ بتن حاوی سیمان/سرباره کوره آهن‌گدازی/دوده سیلیسی را گزارش می‌دهد. او نشان داده است که بدون در نظر گرفتن درصدهای مختلف دوده سیلیسی موجود در بتن و نسبت آب به مواد سیمانی، اختلاف مشخصی بین "E" گرفته شده در ۲۸ روز وجود ندارد.

بررسی تحقیقات انجام شده در جهت بهبود دوام بتن و مقاومت فشاری آن با افزودنی نانوسیلیس

در بررسی اثر نانوسیلیس بر خمیر سیمان انجام شده توسط Shih و همکاران [۳۵] درصد بهینه مصرف نانوسیلیس حدود ۰/۶ ٪ گزارش شده است. نانو سیلیس مصرفی در این گزارش کلوییدی با ۴۰٪ سیلیس و ابعاد ۲۰ نانومتر بوده و در مقادیر ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ وزنی سیمان مورد استفاده قرارگرفته است. بیان شده که بیشینه افزایش مقاومت در درصد بهینه مصرف نسبت به نمونه شاهد در ۱۴ روز و به میزان ۶۰٪ بوده است. در سایر سنین این مقدار کاهش یافته و در ۵۶ روز به ۴۳٪ می‌رسد.

Lin و همکاران [۳۶] نانوسیلیس پودری با ابعاد ۱۰ نانومتر و سطح ویژه ۶۷۰ متر مربع بر گرم را در مقادیر مصرف ۱ ، ۲ و ۳ درصد وزنی سیمان در خمیر به کار بردند. نتایج گزارش نشان داد که مقدار بهینه نانوسیلیس در ۳ درصد است و افزایش مقدار مقاومت نسبت به نمونه شاهد در ۷ روز ۶ درصد و در ۲۸ روز ۴/۵ درصد می‌باشد.

Jo و همکاران [۳۷] در مورد اثر نانوسیلیس به شکل پودر و با متوسط اندازه ذرات ۴۰ نانومتر و سطح ویژه ۶۰ متر مربع بر گرم در مقادیر مصرف ۱۰،۳ و ۱۲٪ وزنی سیمان بیشینه افزایش مقاومت در ۷ روز با مصرف ۱۲٪ نانوسیلیس ،۱۷۷ درصد نسبت به ملات شاهد بالاتر بوده است در حالی که این بیشینه در دوده سیلیسی در ۱۵٪ رخ داده و ۴۲٪ است. در ۲۸ روز افزایش مقاومت نسبت به شاهد در مورد نانوسیلیس به ۱۶۹٪ کاهش می‌یابد و در دوده سیلیسی به ۴۸٪ افزایش می‌یابد.

خانزادی و همکاران [۳۸] در پژوهشی در مورد اثر نانوسیلیس بر خواص مکانیکی ملات سیمان گزارش داده اند نانوسیلیس پودری با سطح ویژه ۱۶۰ متر مربع بر گرم و متوسط ابعاد ۱۵ نانومتر به میزان ۵،۳ و ۱۰٪ جایگزینم سیمان شده، مشاهده شده

است که افزایش مقاومت در ۱۰٪ مصرف در سن ۷ روز برابر ۲۰٪ و در ۲۸ روز ۲۶٪ نسبت به ملات شاهد است.(از نظر درصد مصرف بهینه ، مقدار افزایش مقاومت نسبت به ملات معمولی و درصد افزایش مقاومت نسبت به سنین مختلف با بررسی‌های قبلی متفاوت است.) خانزادی و همکاران اثر نانوسیلیس با نام تجاری CEMBINDER8 که از نوع نانوسیلیس کلوییدی با سطح ویژه ۸۰ متر مربع بر گرم می‌باشد را در درصدهای مصرف ۲/۵، ۷/۵،۵و ۱۰ درصد ملات سیمان مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان از افزایش مقاومت در ۱۰ درصد مقدار مصرف نانوسیلیس دارد.

در بررسی انجام شده توسط صدر ممتازی و همکاران [۳۹و۴۰] اثر نانوسیلیس با ریزی ۵۰ نانومتر در حالت کلوییدی با مصرف ۱،۳،۵،۷ و ۹ ٪ جایگزینی سیمان بر خواص ملات سیمان مورد مطالعه قرار گرفت. بهینه درصد مصرف نانوسیلیس ۷٪ بوده و افزایش مقدار مصرف بالاتر از آن ، در مقاومت فشاری تاثیر چندانی نداشته است.

رمضانیان پور و همکاران [۴۱] نیز اثر کاربرد نانوسیلیس کلوییدی با نام تجاری CEMBINDER8 در بتن را مورد بررسی قرار داده اند. بیشینه افزایش مقاومت نسبت به بتن شاهد در ۳ روز و در ۷/۵ درصد مصرف و به میزان ۳۸٪ حاصل شد. این مقدار افزایش در سنین بالاتر دچار افت شده و در ۹۰ روز مقدار افزایش نسبت به نمونه شاهد به ۱۴٪ می‌رسد. بر اساس این گزارش ۷/۵٪ مصرف نانوسیلیس مقدار بهینه مصرف بوده و روند افزایش در مصرف دیده می‌شود. اثر نانوسیلیس پودری با ابعاد ۱۰ نانومتر و سطح ویژه ۶۴۰ متر مربع بر گرم روی مقاومت بتن توسط Li و همکاران [۴۲] گزارش شد. در این گزارش ، نانوسیلیس در مقادیر ۱و ۳ درصد وزنی سیمان به بتن افزوده گردید و بیان شد که مقدار بهینه مصرف ۱ درصد بوده است و مقاومت فشاری نسبت به بتن شاهد ۱۲ درصد در ۲۸ روز افزایش نشان داده است.