بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده فنی

گروه مهندسی عمران

گرایش سازه

نقش نانوسیلیس بر دوام بتن‌های خودتراکم (SCC) حاوی پودر سنگ آهک، دوده سیلیس، خاکستر پوسته شلتوک برنج و خاکستر بادی در محیط های خورنده

از

ایمان ضیغمی

استاد راهنما

دکتر علی صدر ممتازی

شهریور ۱۳۹۱

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

بتن یکی از پر مصرف ترین مصالح شناخته شده در مهندسی عمران است که روز به روز بر استفاده از آن افزوده می‌شود. در این میان از یک سو، با پیشرفت علم و پیدایش سیستم‌های پیچیده‌تر ساختمانی و از سوی دیگر با روند رو به گسترش ساخت و سازهای عمرانی در سطح کلان، نیاز به‌کارگیری مصالح ساختمانی جدیدتر با کارآیی بیشتر، بسیار محسوس است.

بتن از جمله پر مصرف‌ترین مصالح ساختمانی در دنیا شناخته می‌شود. با گسترش استفاده از بتن ویژگی‌هایی همچون دوام، کیفیت، تراکم و بهینه سازی آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌شوند. بتن خود تراکم بتنی بسیار سیال و روان و مخلوطی همگن است که بسیاری از مشکلات بتن معمولی نظیر جداشدگی، آب انداختن، نفوذ پذیری و ... را مرتفع نموده و علاوه بر آن بدون نیاز به هیچ لرزاننده‌ای تحت اثر وزن خود متراکم شود این ویژگی کمک شایانی به اجرای اعضای ساختمانی با فشردگی زیاد آرماتور خواهد نمود.

جایگزین کردن بتن با مصالح دیگر به لحاظ کاربرد متنوع آن تقریبا غیر ممکن و نشدنی است. از طرفی توجه به بتن از توجه به مواد تشکیل دهنده آن امری تفکیک ناپذیر است. کارایی و خواص بتن تا حد زیادی به مقدار و ابعاد ریز ساختارهای به کار رفته در آن وابسته است. ذرات در ابعاد نانو خصوصیات فیزیکی و شیمیایی متفاوت و منحصر به فردی از خود نشان می‌دهند و از این رو به نظر می‌رسد استفاده از سیمانی مبتنی بر نانو مواد، منجر به تولید بتن با خواص مقاومتی بالا و نفوذ پذیری بسیار پایین گردد[۱].

ساختن بتنی با دوام از دیرباز چالش ذهنی و عملی مهندسین عمران بوده و هست. خوردگی فولاد در بتن یکی از عوامل بسیار موثر در کاهش دوام سازه‌های بتن مسلح می‌باشد. منابع هنگفت لازم برای تعمیر خرابی‌های ناشی از خوردگی فولاد در بتن، ضروت بهبود بخشیدن به وضعیت دوام سازه‌های در دست ساخت و همچنین تضمین دوام سازه‌های موجود تازه تعمیر شده را چند برابر کرده است.

۱-۲- اهداف پژوهش

امروزه به منظور دستیابی به مقاومت و پایایی بیشتر علاوه بر مواد متشکله اصلی بتن، یعنی سیمان، آب و سنگدانه، از مواد دیگری در بتن استفاده می‌شود که مواد پوزولانی نامیده می‌شوند. در حقیقت از این مواد می‌توان به عنوان یک عامل چهارم در تولید بتن ناو برد. ضمن اینکه مواد پوزولانی دوام و کیفیت بتن را در شرایط مختلف تامین می‌کنند. استفاده فوق از این مواد به مقدار زیادی به غنای دانش فنی در ارتباط با استفاده از آنها در حین اجرا و نگهداری پس از اجرا بستگی دارد.

از جمله مواد پوزولانی بسیار جدیدی که به مدد پیشرفت‌های اخیر در عرصه فناوری نانو حاصل شده است، نانو سیلیس می‌باشد تاکنون تحقیقات محدودی در ارتباط با ویژگی‌ها و خصوصیات بتن‌های حاوی این پوزولانی انجام شده است. نظر به اهمیت شناخت مسایل مربوط به استفاده از این ماده افزودنی در بتن و آشنایی با روش‌های صحیح مصرف و ویژگی‌های مثبت و منفی آن، ضروریست که تحقیقات اساسی در این زمینه انجام پذیرد. چرا که شناخت این ماده سبب می‌شود که از آن بتوان به نحو مطلوب جهت بهبود کیفیت و دوام بتن استفاده نمود.

از آنجائیکه نتایج تحقیقات تعداد زیادی از پژوهشگران در سطح جهان نشان از این دارد که استفاده از مواد پوزولانی بعنوان جایگزین بخشی از سیمان پرتلند در ساخت بتن عملکرد این قبیل بتن را در مقابله با حملات سولفات ها وکلرها و دیگر مواد مضر چند برابر کرده است. لذا در تحقیق حاضر، خواص و دوام بتن‌های خود تراکم حاوی سه پوزولان میکروسیلیس، خاکستر بادی، خاکستر پوسته شلتوک برنج به همراه نانو سیلیس و بتن خود تراکم حاوی پودر سنگ آهک و نانو سیلیس به همراه بتن کنترل SCC مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته است.

۱-۳- ساختار کلی پایان نامه

پایان‌نامه حاصل شامل پنج فصل است. در فصل اول، به بیان اهداف تحقیق اختصاص داده شده است. فصل دوم به تحقیقات و کارهای انجام شده در زمینه بتن خود تراکم، استفاده از نانو سیلیس در مصالح سیمانی و دوام و پایایی بتن اختصاص داده شده است. فصل سوم بیان کننده ویژگی‌ها و خصوصیات مواد و مصالح بکار رفته و شرح آزمایشات انجام شده پرداخته شده است. فصل چهارم به کارها و برنامه‌های آزمایشگاهی انجام شده متناسب با تحقیق حاضر شامل: طرح اختلاط‌ها و نحوه ساخت نمونه‌ها، نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها و بحث و بررسی نتایج اختصاص دارد. در فصل پایانی (پنجم) به جمع بندی نتایج، مقایسه نتایج این مطالعه با یافته‌های دیگر محققین در این زمینه و ارائه پیشنهاداتی برای ادامه تحقیقات اختصاص یافته است.

فصل دوم

مروری بر کارهای گذشته

۲-۱- بتن خود تراکم

۲-۱-۱- مقدمه

بتن خود تراکم تقریبا از گروه بتن با کارآیی بالا (بتن توانمند) محسوب می‌گردد. این بتن به آسانی می‌تواند از بین ازدحام میلگردها عبور نماید وحجم قالی را پر نماید و همچنین تحت اثر وزن خود بدون جداشدگی و آب انداختگی می‌تواند تراکم یابد. روانی بالا بتن خود تراکم زمینه را برای پر کردن قالب بدون اعمال هیچگونه لرزش فراهم نموده است[۲-۳]

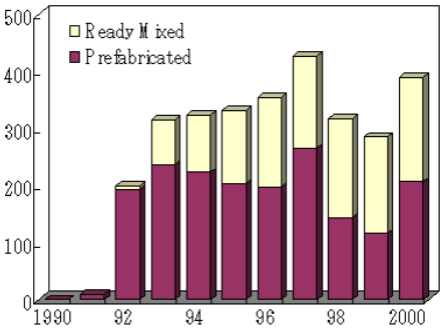
بتن خود تراکم می‌تواند مشکلات عدیده بتن معمولی را به آسانی مرتفع سازد. لذا از اهمیت به سزایی در صنعت بتن و ساختمان بر خوردار می‌باشد، موضوع بسیاری از تحقیقات مهم مخصوصا در ژاپن و اروپا بتن خود تراکم می‌باشد[۴] و همین مطلب نشان از اهمیت دو چندان این مهم دارد.

لازم به ذکر است که در بتن خود تراکم برای دستیابی به تراکم کافی و پر نمودن فضای بین آرماتورها، بتن تازه باید هر دو حالت سیالیت بالا و چسبندگی خوب را همزمان داشته باشد، زیرا که فقط سیالیت بالا کافی نیست، در حقیقت وقتی که بتن از چسبندگی بالا برخوردار نباشد، زمانی که بتن در نزدیک یک مانع جریان می‌یابد سنگدانه‌های درشت ممکن است توسط مانع متوقف شده و شروع به بریدن ملات بتن نماید و جریان بتن را متوقف می‌نماید[۵]. در سال ۱۹۷۵ و ۱۹۷۶ بعضی از بتن‌ها که دارای این شرایط بودند مورد مطالعه قرار گرفتند. در آن زمان هیچ یک از مصالح مدرن که مبنای فوق روان‌کنندها و عامل اصلاح کننده لزجت بودند، در دسترس نبود. با این وجود مصرف همزمان ملامین و یا نفتالین با درصدهای بالای مصالح ریزدانه ثابت کرد که می‌تواند در اصلاح لزجت و روانی موثر باشد.[۶]

کاربرد بتن خود تراکم به دلیل خصوصیات ذکر شده آن در حالت بتن تازه و همچنین بعد از گیرش به صورت جهانی در حال گسترش می‌باشد[۷]

در نمودار شکل(۲-۱) میزان استفاده بتن خود تراکم در کشور ژاپن در سال‌های مختلف آمده است. به عنوان مثال در سال ۲۰۰۰ مقدار بتن خود تراکمی که در قطعات پیش ساخته و در سایر کارهای ساختمانی استفاده شده در حدود ۴۰۰۰۰۰ متر مکعب بوده است[۸]

در سال ۲۰۰۳ موسسه بتن پیش ساخته و پیش تنیده(PCI) و موسسه بتن آمریکا (ACI) و مجموعه ASTM اولین تعریف‌های خود را از بتن خود تراکم ارائه نمودند که به شرح زیر می‌باشد:



شکل ۲-۱- مقدار بتن خود تراکم مصرفی در ژاپن[۸]

تعریف موسسه بتن پیش ساخته و پیش تنیده(PCI):

بتنی با کارایی بسیار بالا که می‌تواند از میان آرماتورهای بهم فشرده و از بین اعضای پیچیده سازه‌ها، تحت اثر وزن خود جریان یافته، بدون جداشدگی و افزایش آب انداختگی قالب را با بی نیازی کامل از لرزش بطور کامل پر نماید[۹].

تعریف موسسه بتن آمریکا (ACI):

بتنی با جریان پذیری بالا و بدون جداشدگی که می‌تواند در تمامی سطح قالب، پخش شده و قالب را پر نموده و فضای اطراف آرماتورها را بدون هیچگونه تراکم خارجی در برگیرد[۱۰].

تعریف موسسه ASTM:

بتنی که می‌تواند در اطراف آرماتورها جریان یافته و با حفظ یکنواختی در داخل قالب، تحت اثر وزن خود، بدون اثر نیروی خارجی متراکم شود[۱۱].

۲-۱-۲- مشخصات بتن خود تراکم

امروزه برای بتن خود تراکم مشخصات کلی زیر را پیشنهاد می‌کنند[۱۲]:

۱) کارایی[۱]

۲) مشخصات مکانیکی[۲]

۳) دوام[۳]

[1]-Workability
[2]- Mechanical Characteristics
[3]- Durability

۲-۱-۳- ویژگی‌های اصلی بتن خود متراکم:

۱- شکل‌پذیری بالا

۲- جریان پذیری کنترل شده

۳- مقاومت در برابر جداشدگی و آب انداختگی

شکل‌پذیری بالا مربوط به توانایی بتن برای تغییر شکل و پخش شدن آزادانه (بدون نیروی خارجی) به منظور پر کردن فضای داخل قالب می‌باشد. این فاکتور تابعی از شکل، اندازه، مقدار سنگدانه‌ها و اصطحکاک بین ذرات جامد می‌باشد.لازم به توضیح است که اصطحکاک بین ذرات جامد را می‌توان با اضافه کردن روان کننده‌ها و کاهش دهنده‌های آب، کاهش داد.

جریان پذیری کنترل شده، بیان کننده چگونگی جریان بتن از میان موانع مانند میلگرد و هندسه قالب می‌باشد. جداشدگی نیز مربوط به چسبندگی بتن تازه می‌باشد که این ویژگی را می‌توان با اضافه کردن خمیرکننده‌ها، تنظیم و کنترل نمود.

افزودن کاهش دهنده آب باعث کم شدن آب مازاد و افزایش خمیر سیمان شده، که از این طریق می‌توان آب انداختگی را کنترل نمود. بتن خود تراکم معمولا حاوی مقادیر مواد سیمانی بیشتر و نسبت آب به سیمان کمتر نسبت به بتن معمولی می‌باشد (افزایش سطح سنگدانه‌ها به دلیل افزایش مقدار مصرفی ریز دانه در بتن خود تراکم نیاز به افزایش مقدار آب مصرفی دارد، این نیاز با استفاده از فوق روان کننده‌ها و کاهنده‌های قوی آب بر طرف می‌گردد) همچنین مقاومت فشاری بزرگ‌تری از بتن معمولی دارد. معمولا در بتن خود تراکم از میکروسیلیس، خاکستر بادی، سرباره کوره ذوب آهن یا دیگر مواد پزولانی و همچنین فیلرهای خنثی مانند پودر سنگ اهک استفاده می‌شود، که بکارگیری مصالح ریزدانه فوق باعث افزایش خزش و انقباض و کاهش مدول الا ستیسیته می‌گردد[۴].

۲-۱-۴- مزایای بتن خود تراکم

استفاده از بتن خود تراکم مزایای بسیار ارزشمندی را در امر ساخت و ساز فراهم می‌آورد که از جمله این مزایا عبارتند از:

۱- کاهش نفوذپذیری: به علت حجم بالای ذرات زیز در مخلوط، تراکم بتن وهمگنی را حفظ می‌نماید[۱۳].

۲- شکل‌پذیری بهتر: به دلیل کاهش مدول الاستیسیته بتن خود تراکم در مقایسه با بتن های نرمال این بتن از شکل پذیری نسبتا بیشتری برخوردار می‌باشد[۱۴].

۳- طول عمر بیشتر قالب ها: به دلیل فشار کمتر اعمال شده به قالب ها (تا حدود ۵۰٪) در اثر فقدان ویبره خارجی طول عمر قالب‌ها افزایش می‌یابد[۱۵-۱۶].

۴- ساخت در زمان کوتاه تر: به دلیل تراکم بیشتر و استفاده از فیلر در مقایسه با بتن‌های معمولی کسب مقاومت اولیه با سرعت بیشتری رخ داده و امکان بهره برداری سریع از سازه و بهره‌دهی در تولید فراهم می‌شود[۱۷].

۵- توسعه تغیرات معماری

۶- کاهش در نیروی کار در محل

۷- سطوح کار تمام شده بهتر

۸- بهبودی دوام: به علت تراکم بالا و مصرف بالاتر پودر، امکان نفوذ مواد مضر در بتن کمتر شده و دوام آن افزایش می‌یابد.

۹- کاهش سر و صدای ناشی از ویبره نمودن

۱۰- رسیدن به مقاومت بالاتر

۲-۱-۵- معایب بتن خود تراکم

این نوع بتن به علت مقدار زیاد فیلر و همچنین نسبت آب به سیمان کمتر، در مقابل آتش نسبت به بتن ویبره شده ضعیف تر می‌باشد. همچنین در صورت استفاده از فیلر آهکی، این نوع بتن در مقابل حمله سولفات‌ها، مقاومت ضد سولفات کمتری را نسبت به بتن ویبره شده از خود نشان می‌دهد[۱۸]. همچنین به دلیل ماهیت بتن خود تراکم در صورت عدم نظارت دقیق ممکن است مشکلاتی در ساخت بتن در مقایسه با بتن معمولی بوجود آید.

۲-۱-۶- بررسی عملکرد اجزای تشکیل دهنده بتن خود تراکم

۲-۱-۶-۱- حجم بالای خمیر در بتن خود تراکم

خمیر وسیله‌ای است برای انتقال دانه‌ها، بنابراین حجم خمیر باید از فضاهای خالی در دانه‌ها بیشتر باشد و تمام ذرات دانه‌ها باید کاملا با یک لایه از خمیر پوشیده شوند. با افزایش حجم خمیر جریان پذیری افزایش یافته و اصطحکاک دانه‌ها کاسته می‌شود، زیرا اصطحکاک مابین سنگ دانه‌ها با افزایش در تنش داخلی، سرعت پخش شدن و توانایی پر نمودن توسط بین خود تراکم را محدود می‌نماید. در مطالعات انجام شده [۱۹]، حجم خمیر شامل (سیمان + افزودنی + آب) در حدود ۳۰ الی ۴۲ درصد گزارش شده و بر اساس پیشنهاد اروپایی بین ۳۰۰ الی ۳۸۰ لیتر بر متر مکعب می‌باشد[۲۰].

۲-۱-۶-۲- حجم بالای ذرات ریز کوچکتر از ۸۰µm

مخلوط‌های بتن‌های خود تراکم غالبا شامل یک مقدار عظیمی از مواد پودری است که لازم است تا ویسکوزیته و توانایی پر کنندگی را در مخلوط تازه این بتن تامین نماید. از طرفی این موضوع باعث کاهش آب انداختن و جداشدگی و نشست دانه‌ها می‌گردد.

از آنجائیکه استفاده از مقدار زیاد سیمان باعث افزایش هزینه شده و منجر به بالا رفتن حرارت ناشی از هیدراسیون و همچنین جمع‌شدگی ناشی از آن می‌گردد، از دیگر مواد پودری نظیر پودر سنگ آهک، خاکستر بادی و ... در بتن خود تراکم استفاده می‌شود[۲۱-۲۲-۲۳]، مقدار مواد فیلر به نحوی انتخاب می‌شوند که مقاومت و دوام مورد نیاز را ایجاد نمایند[۲۴]. بر اساس پیشنهاد استاندارد اروپا میزان پودر در حدود ۳۸۰ الی ۶۰۰ کیلوگرم به متر مکعب برای تولید بتن خود تراکم لازم می‌باشد.

۲-۱-۶-۳- انواع مواد پودری مورد استفاده در بتن خود تراکم

مواد پودری مورد استفاده در بتن های خود تراکم بر حسب واکنش آنها با آب در جدول۲-۱ آمده است.

جدول۲-۱- مواد پودری مورد استفاده در بتن خود تراکم بر حسب واکنش پذیری با آب[۲۰]

رده پودر	وضعیت شیمیایی	نوع پودر
I رده	خنثی و نیمه خنثی	فیلرهای معدنی (پودر سنگ آهک و دولومیت و ...)
II رده	پوزولانی	خاکستر بادی، میکروسیلیس
	هیدرولیکی	سرباره کوره

۲-۱-۶-۳-۱- کاربرد پودر سنگ آهک در بتن خود تراکم

فیلرهای غیر پوزولانی برای بهبود بخشیدن فشردگی ذرات و رفتار جریان پذیری خمیر سیمان در مخلوط های بتن خود تراکم استفاده می‌شوند. استفاده از پودر سنگ در بتن در کشورهای سوئد و فرانسه گسترش پیدا نمود[۲۵-۲۶]

مشخص شد که اضافه کردن این فیلر به اختلاط بتن خود تراکم باعث افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه ، به دلیل اثر فیلر در بهبود ریز دانه‌های ترکیب و افزایش فشردگی می‌شود [۲۲]. هر چه این نوع فیلر ریز دانه و منظم تر باشد، در ترکیب با سیمان درجه حرارت هیدراسیون بالاتر و در نتیجه مقاومت و چسبندگی نهایی بیشتری ایجاد می‌کند. همچنین باعث تغییرات رطوبت در بتن

می‌شود که کنترل کننده انقباض و فشارهای خزشی می‌باشد. در ضمن اختلاط‌های بتن با مخلوط سیمان و سنگ آهک، نسبت به قطع انجام عمل آوری، حساسیت بیشتری به دلیل افزایش نرخ هیدراسیون در سن اولیه دارد.

همچنین اگر از فیلر آهک در بتن خود تراکم استفاده شود، این نوع بتن علیرغم کم بودن خلل و فرج در سطح آن در مقابل حمله سولفات‌ها آسیب پذیر خواهد بود، و علت آن وجود پودر سنگ آهک می‌باشد که باعث حل شدن CO_2 در آب و در نتیجه فساد بتن می‌شود[۲۳].

۲-۱-۶-۳-۲- میکروسیلیس و کاربرد آن در بتن خود تراکم

استفاده از میکروسیلیس با سطح بالایی از ذرات ریز و خصوصا کروی شکل بودن آن، منجر به چسبندگی خوب و بهبودی مقاومت در برابر جداشدگی می‌گردد. همچنین میکروسیلیس در محدود نمودن آب انداختگی مفید است[۲۷]

۲-۱-۶-۳-۳- خاکستر بادی و کاربرد آن در بتن خود تراکم

خاکستر بادی به عنوان یک ماده مضاعف موثر برای تولید بتن خود تراکم و کاهش حساسیت آن به تغییرات آب می باشد. البته لازم به ذکر است که مقدار زیاد خاکستر بادی ممکن است منجر به تولید یک خمیر با چسبندگی بسیار بالا شود که در برابر جریان یابی بتن خود تراکم مقاومت نماید[۲۷].

۲-۱-۶-۳-۴- مواد مضاعف دیگر و کاربرد آنها در بتن خود تراکم

متاکائولن، پوزولانهای طبیعی، سرباره سرد شده توسط هوا و دیگر فیلرهای زیر می‌توانند در بتن خود تراکم استفاده شوند اما باید توجه نمود که آثار دراز مدت این فیلرها در بتن قبل از مصرف به دقت مورد ارزیابی قرار گیرد[۲۷].

۲-۱-۶-۴- مصرف افزودنی ها در بتن خود تراکم

مهمترین افزودنی‌ها فوق روان کننده‌ها می‌باشندکه استفاده از آنها میزان آب را تا میزان ۲۰ درصد یا بیشتر کاهش می‌دهد استفاده از افزودنی‌هایی که خاصیت ویسکوزیته مخلوط را زیاد می‌کنند(VMA) امکان بیشتری برای کنترل جداشدگی را فراهم می‌کنند خصوصا زمانیکه مقدار پودر محدود شده باشد[۲۷].

۲-۱-۶-۵- حجم کم سنگدانه‌های درشت

این امکان وجود دارد که در تولید بتن خود تراکم از سنگدانه گرد طبیعی یا شبه شکسته و یا شکسته استفاده شود. زمانی که حجم سنگدانه‌های درشت در بتن از حد معینی فراتر می‌رود امکان بسته شدن مسیر جریان عبور بتن در فضای بین میله‌گردها وجود دارد بنابراین حجم آن باید محدود شود. حجم بهینه سنگدانه به پارامترهای زیر بستگی دارد:

ماکزیمم اندازه دانه

گرد گوشه بودن یا شکسته بودن دانه‌ها

هر چه اندازه دانه‌ها کوچکتر باشد، نسبت درشت دانه‌ها بیشتر خواهد بود

اگر دانه‌ها گرد گوشه باشند در مقایسه با دانه‌های شکسته می‌توان از حجم بیشتری از سنگدانه‌های درشت استفاده نمود.

تحقیقات به عمل آمده نشان می‌دهد که با کاهش نسبت حجم درشت دانه‌ها به حجم مواد جامد، اندرکنش بین ذرات درشت دانه وقتی که بتن تغییر شکل می‌دهد کاهش می‌یابد[۲۸]. با ملاحظه تفاوت سنگدانه مشاهده می‌شود که سنگدانه‌های شکسته باعث بهبود مقاومت می‌شود زیرا باعث قفل و بست بیشتر شده در حالی که سنگدانه‌های گرد گوشه باعث بهبودی جریان می‌شوند چون که اصطحکاک داخلی کمتری بوجود می‌آورند.

۲-۱-۷-طرح اختلاط بتن خود تراکم

اصولا مطالعه خواص بتن به منظور طرح مخلوط آن می‌باشد. خواص لازم برای بتن سخت شده توسط طراحان سازه مشخص می‌گردد. ولی خواص بتن تازه تابع نوع عنصر، نحوه نقل و انتقال بتن و روش بتن ریزی می‌باشد. این دو گروه از الزامات، با در نظر گرفتن ، درجه کنترلی که در کارگاه اعمال خواهد شد، مهندس طراح را قادر به تعیین ترکیب مخلوط بتن می‌نماید. بنابراین می‌توان طرح اختلاط بتن را به عنوان عمل انتخاب مواد متشکله مناسب و تعیین مقدار نسبی آنها دانست، با این هدف که بتن تولید شده حتی الامکان اقتصادی بوده و دارای حداقل خواص لازم، بخصوص کارایی، مقاومت و دوام باشد تعریف نمود.

برای آنکه بتن خود تراکم بتواند بعنوان یک بتن استاندارد و بجای یک بتن خاص بکار رود، لازم است سیستم جدیدی برای طرح، تولید و ساخت آن بنیان گذاشته شود. هنوز هیچ روش استانداردی برای طراحی اختلاط بتن خود تراکم وجود ندارد.

تحقیقات انجام شده نشان می دهد که دامنه طرح اختلاط و مواد ترکیبی در انواع بتن خود تراکم بسیار گسترده می‌باشد و محدوده فراوانی از مخلوط های مناسب بتن خود تراکم برای کاربردهای مختلف وبا توجه به نیازمندی های متقاوت تعریف شده است[۲۹]. بر اساس طرح اولیه اصلی Zava Okamura ،[۳۰] در کل سه نوع بتن خود تراکم می‌تواند وجود داشته باشد.

۱- روش استفاده از فوق روان کننده و اصلاح ویسکوزیته

در این روش برای تولید بتن خود تراکم از یک عامل چسباننده و لزج ساز در بتن استفاده می‌شودکه خاصیت ویسکوزیته مخلوط را افزایش می‌دهد.

۲- روش پودری

در این روش تولید بتن خود تراکم با افزایش حجم مواد پودری در بتن امکان پذیر است.

۳- روش ترکیبی

در این روش برای تولید بتن خود تراکم با ترکیب دو روش گفته شده یعنی هم افزایش مواد پودری و هم استفاده از فوق روان کننده و ماده لزج ساز در بتن می‌باشد

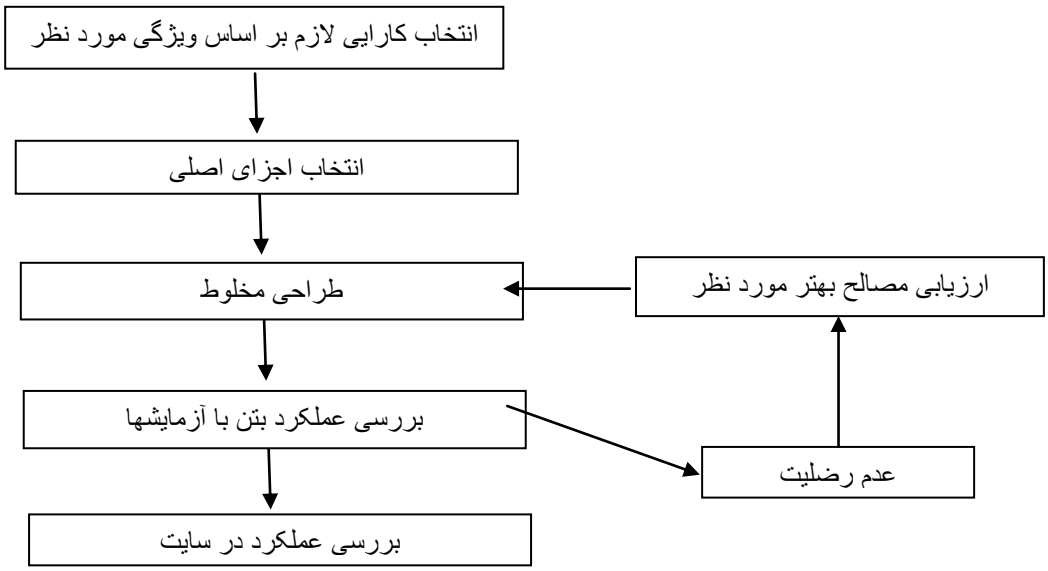
روند فعلی تولید بتن خود تراکم بطور عمومی، تجربی می‌باشد. این طرح اختلاط بر اساس تجربه‌ای در ژاپن، اروپا و امریکا بنا نهاده شده است. از تحقیقات انجام شده بنظر می‌رسد که نسبت‌های اختلاط در اکثر موارد بر اساس نوع اول و یا نوع سوم می‌باشد.

اکامورا و اگاوا در سال ۱۹۹۵ یک روش ساده برای نسبت های اختلاط، با فرض تولید کلی در کارگاه پیشنهاد کردند[۱۸]. در این روش مقدار مصالح سنگدانه درشت و ریز ثابت نگه داشته می‌شود و بتن خود تراکم می‌تواند به آسانی با تنظیم نسبت‌های آب، پودر و روان کننده تهیه شود.

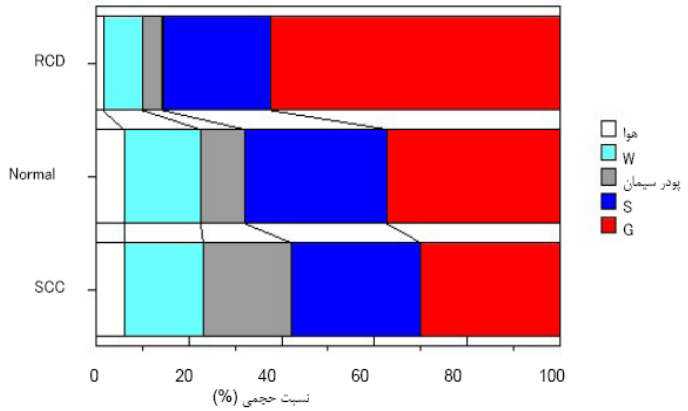
در کشور سوئد Peterson یک روش بهتر را برای طراحی اختلاط بر اساس کنترل گرفتگی مسیر بحرانی جریان توسعه داد. این روش از تغییر شکل بتن مشتق شده است[۳۱].

شکل ۲-۲ مراحل اصولی بتن خود تراکم را نشان می‌دهد. از طرفی دیگر برای تولید بتن خود تراکم طرح اختلاط باید طوری اجرا شود که به مشخصات از پیش تعیین شده برای بتن تازه و سخت شده با اطمینان برسد و اجزا باید طوری یک به یک با هم ترکیب شوند که از جدایی سنگدانه‌ها، آب انداختن اجتناب شود[۲۳].

همچنین اسکارندهال و پترسن برای توصیف اجزای تشکیل دهنده بتن خود تراکم در مقابل بتن‌های متداول که با روش‌های سنتی متراکم می‌شوند شکل ۲-۲ را ارائه نمودند. با توجه به این شکل می‌توان تفاوت میزان هر یک از اجزای اصلی دو بتن فوق را در ترکیب اختلاط مشاهده نمود[۱۳].



شکل۲-۲- روند طراحی بتن خود تراکم [۲۷]



شکل۲-۳- مقایسه اجزای تشکیل دهنده بتن خود تراکم و بتن معمولی[۱۳]

۲-۱-۸- آزمایش‌های لازم برای تعیین خصوصیات مختلف بتن تازه خود تراکم

چون کیفیت اصلی بتن خود تراکم، رفتار آن در حالت تازه می‌باشد، لذا باید طرح اختلاط خصوصا بر این قسمت متمرکز شده باشد. آزمایش‌های توصیه شده توسط استانداردهای اروپایی با توجه به ویژگی‌های لازم و مورد نیاز بتن خود تراکم در جدول۲-۲ ارائه شده است.[۲۷].

لازم به ذکر است نحوه انجام آزمایش‌های Slump-flow، V-funnel، L-Box به طور مفصل در فصل ۴ تشریح می‌شود.

۲-۲- نانو سیلیس

۲-۲-۱- مقدمه :

پژوهش‌های انجام شده در زمینه ی بهره‌گیری از نانو مواد در مصالح سیمانی چون خمیر سیمان، ملات و بتن بسیار محدود بوده است. آنچه مسلم است تحقیقات صورت گرفته عموماً بر استفاده از نانو TiO_2 ، نانو Fe_2O_3 و نانو SiO_2 متمرکز بوده است. از بین نانو مواد مذکور، نانو SiO_2 به دلیل دارا بودن خواص پوزولانی از جایگاه بهتری برخوردار بوده و عملکرد مناسب‌تری را از خود نشان داده است.

جدول۲-۲- آزمایش های توصیه شده توسط استانداردهای اروپایی[۲۷]

واحد اندازه گیری شده	عنوان آزمایش	ویژگی مورد ارزیابی
قطر نهایی	Slump-flow	جریان پذیری و توانایی پرکنندگی
زمان جریان	T 50	ویسکوزیته وجریان پذیری
زمان جریان	V-funnel	
زمان جریان	O-funnel	
زمان جریان	Orimet	
نسبت عبور	L-Box	توانایی عبور
اختلاف ارتفاع	U-Box	
جریان کلی و ارتفاع	J-Box	
عمق نفوذ	Penetration	مقاومت در برابر جداشدگی
درصد جداشدگی	Sieve Segregation	
نسبت جداشدگی	Settlement column	

۲-۲-۲- اثر نانو مواد بر خمیر سیمان :

کوینگ و همکاران [۳۲] به بررسی خصوصیات خمیر سیمان حاوی نانوسیلیس ($Nano\text{-}SiO_2$) در مقایسه با میکروسیلیس پرداختند. بدین منظور از نانو ذرات دی اکسید سیلیس با قطر متوسط ۱۵ نانومتر استفاده کردند. درصدهای جایگزینی نانو سیلیس ۱، ۲، ۳ و ۵ درصد نسبت به وزن سیمان مصرفی و درصدهای جایگزینی میکروسیلیس نیز ۲، ۳ و ۵ درصد نسبت به وزن سیمان مصرفی در نظر گرفته شد . پس از بررسی مقاومت فشاری در سنین مختلف دریافتند که نانو سیلیس دارای واکنش پذیری بیشتر و فعالیت پوزولانی بهتری خصوصاً در سنین اولیه می‌باشد. بررسی میزان کریستال‌های هیدروکسید کلسیم (CH) موجود در سطح مشترک خمیر سیمان و سنگدانه توسط اشعه ایکس نشان داد که میزان کریستال‌های هیدروکسید کلسیم در نمونه‌ی حاوی نانو سیلیس به شدت کاهش یافت. نانوسیلیس با مصرف کریستال‌های ضعیف CH و ایجاد ژل سیلکات کلسیم هیدراته (CSH) باعث

بهبود ساختار میکروسکوپیک سطح تماس گردید. مشاهده عکس‌های گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی (SEM) نیز موید کاهش اندازه و مقدار کریستال‌های هیدروکسید کلسیم در سطح تماس بود (شکل ۲-۴). آنها سطح مخصوص بیشتر نانوسیلیس را در مقایسه با میکروسیلیس، عامل اصلی واکنش پذیری بیشتر این مواد معرفی کرده و اظهار داشتند واکنش پذیری به مساحت رویه مربوط می‌شود. مواد با سطح رویه بیشتر، مکان‌های بیشتری برای پیوند، بر هم کنش و واکنش با سایر عوامل شیمیایی خواهد داشت. هر چه اندازه ذره کوچکتر شود، مساحت رویه بیشتر می‌گردد با این فرض که کل جرم ماده بدون تغییر باقی بماند. بنابراین با کوچکتر شدن اندازه ذرات با مقیاس نانو، مواد بیشترین مساحت رویه و بیشترین واکنش پذیری ممکن را به دست می‌آورند. از این رو، وجود اتم‌های بیشمار در محیط واکنش باعث می‌شود تا مرحله اول واکنش پوزولانی نانو سیلیس یعنی ترکیب سیلیس با آب و تشکیل هیدروکسید سیلیس (شکل ۲-۴) بسیار سریعتر از واکنش مشابه در مورد میکروسیلیس رخ دهد [۳۳].

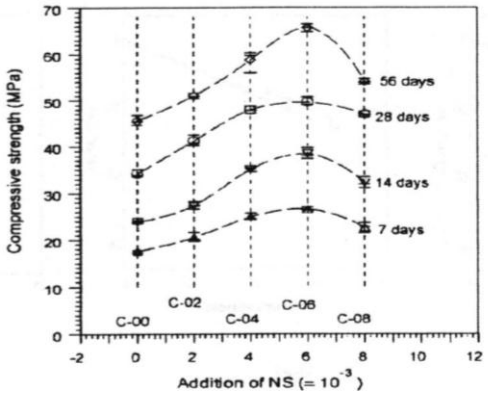
(ج) (ب) (الف)

شکل۲-۴- کریستال‌های هیدروکسید کلسیم در سطح تماس بین خمیر سیمان و سنگدانه در نمونه‌های ۲۸ روزه: الف) خمیر سیمان حاوی ۳ درصد نانو سیلیس ب) خمیر سیمان حاوی ۳ درصد میکرو سیلیس ج) خمیر سیمان معمولی[۳۲].

شیخ و همکاران [۳۴] در تحقیقات خود با بهره‌گیری از نانوسیلیسی به صورت محلول در آب و قطر متوسط ذرات ۲۰ نانومتر به بررسی تاثیر درصدهای مختلف (۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸) نانوسیلیس بر مقاومت فشاری خمیر سیمان پرداخته و ۰/۶ درصد نسبت به وزن سیمان) را به عنوان درصد بهینه نانوسیلیس در کامپوزیت‌های سیمانی معرفی کردند (شکل ۲-۵). آنها با بهره‌گیری از شیوه نفوذ جیوه (MIP) نشان دادند که استفاده از نانوسیلیس موجب افزایش تراکم سیلیکات های هیدراته موجود در خمیر سیمان می‌گردد.

$$SiO_2 + H_2O \rightarrow SiOH \qquad (۱-۲)$$

$$SiOH + Ca(OH)_2 \rightarrow C_3S_2H_3 \quad (۲-۲)$$

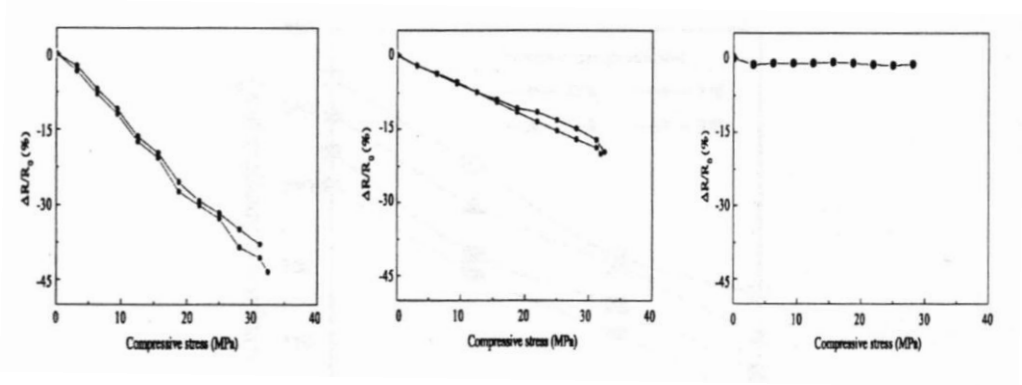


شکل۲-۵- تغییرات مقاومت فشاری خمیر سیمان با درصدهای مختلف نانوسیلیس[۳۴].

۲-۲-۳- اثر نانومواد بر خواص ملات سیمانی :

هوبی لی و همکاران [۳۵] خصوصیات مکانیکی و قابلیت خود کنترلی ملات سیمانی حاوی $Nano-SiO_2$ یا $Nano-Fe_2O_3$ را مورد بررسی قرار داده و با خمیر سیمان معمولی مقایسه کردند. نانو ذرات SiO_2 , Fe_2O_3 در مقادیر ۳ ، ۵ و ۱۰ درصد وزن مصالح سیمانی (مجموع سیمان و نانو ذرات) استفاده شدند. متوسط اندازه دانه‌های $Nano-Fe_2O_3$، ۳۰ نـانومتر و $Nano-SiO_2$ ۵ ± ۱۵ نانومتر بوده است. نتایج آزمایش مقاومت فشاری و خمشی در سنین ۷ و ۲۸ روزه نشان داد که مقاومت مکانیکی همه نمونه‌ها بـا افـزودن نـانوذرات نسـبت بـه مـلات سـیمانی معمـولی افـزایش مـی‌یابـد. در سـن ۲۸ روزگـی، مقاومـت فشـاری ملاتهـای حـاوی $Nano-Fe_2O_3$ با افزایش مقدار این نانوذرات، کاهش می‌یابد. این در حالی است که افزایش مقدار نانوسیلیس در ملاتهای حـاوی $Nano-SiO_2$ مقاومت فشاری آنها را افزایش می‌دهد. ولیکن در مورد مقاومت خمشی، هم در ملاتهای حاوی $Nano-Fe_2O_3$ و هم در ملاتهای حاوی $Nano-SiO_2$ با افزایش مقدار این نانوذرات، بر مقاومت خمشی افزوده می‌گردد. مشاهده تصاویر SEM بـر آمده از میکرو ساختار بین ملات سیمانی معمولی و ملات سیمانی حاوی نانوذرات نشان داد که این نانوذرات خلل و فرجها را پر کرده و مقدار کریستال‌های Ca(OH) را کاهش می‌دهد. شکل ۲-۵ به ترتیب تغییرات الکتریکـی $\frac{\Delta R}{RO}$ را در مقابـل تـنش فشـاری بـرای ملاتهای حاوی ۰ ، ۳ و ۵ درصد $Nano-Fe_2O_3$ نشان می‌دهد. این تصاویر نشان می‌دهند که تغییرات مقاومـت الکتریکـی $\frac{\Delta R}{RO}$

به صورت خطی با افزایش بار فشاری تغییر می‌کند. $\frac{\Delta R}{RO}$ نمونه‌های حاوی ۵ درصد $Nano-Fe_2O_3$ با شیب تندتری نسبت به نمونه‌های حاوی ۳ درصد از این نانو مواد کاهش می‌یابد. این مطلب نشان دهنده این است که ملاتهای سیمانی حاوی $Nano-Fe_2O_3$ در کنترل تنش‌های فشاری خود تواناترند و قابلیت خود تشخیصی آنان یا افزایش مقدار $Nano-Fe_2O_3$ افزایش می‌یابد. به این ترتیب این گونه ملاتها می‌توانند تنش‌های خود را کنترل کرده و در زمره مصالح ساختمانی هوشمند به شمار آیند. از مزایای استفاده از بتن هوشمند در مقایسه با سنسورهای هوشمند مانند فیبرهای نوری، پیزوالکتریک و غیره می‌توان هزینه کم، دوام و پایداری بیشتر و عدم کاهش مقاومت مکانیکی در نتیجه جاسازی سنسورها در بتن و غیره را نام برد.



(ج) (ب) (الف)

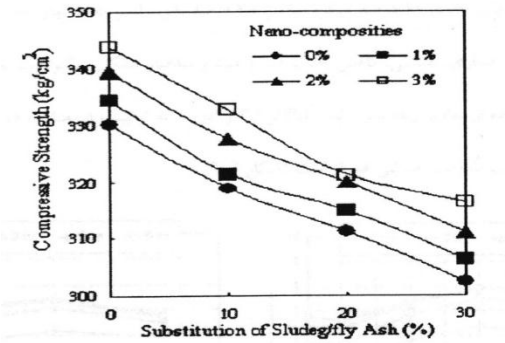
شکل۲-۶- تغییرات مقاومت الکتریکی با افزایش تنش فشاری در ملات های حاوی درصدهای مختلف نانو اکسید آهن

الف) ۰ درصد ب) ۳ درصد ج) ۵ درصد[۳۵].

در تلاشی که توسط لین و همکارانش [۳۶] صورت گرفت، تاثیر ۲ درصد نانوسیلیس با اندازه متوسط ذرات ۱۰ نانومتر بر روی ملاتهای حاوی خاکستر لجن فاضلاب بررسی شد. این محققین دریافتند که جایگزین کردن بخشی از سیمان با خاکستر لجن فاضلاب مقاومت فشاری ملاتها را کاهش می‌دهد. نتایج آزمایش ها نشان می‌دهند که نانوسیلیس می‌تواند این اثر منفی خاکستر لجن فاضلاب را جبران کند. (شکل ۲-۷). نانوسیلیس همچنین زمان گیرش[1] ملاتها، به خصوص ملاتهای با اندازه ذرات خاکستر کوچکتر، را کاهش می‌دهد. در این تحقیق زمان گیرش اولیه و نهایی نمونه‌های حاوی نانو سیلیس به ملاتهای ساخته شده با سیمان پرتلند تیپ I نزدیک بود. نتایج به دست آمده از آزمایش MIP و تصاویر TEM نشان می‌دهند که این نانو ذرات روی خاکستر لجن فاضلاب

[1]-setting time

با اندازه ذرات بزرگتر عملکرد بهتری را در مقایسه با خاکستر بـا انـدازه ذرات کـوچکتر از خـود نشـان مـی‌دهنـد. همچنـین افـزودن نانوسیلیس به ملاتهای حاوی خاکستر لجن فاضلاب و یا خاکستر بادی می‌تواند موجب تسریع در عمل هیدراتاسیون و بهبود خـواص ملاتها گردد [۳۷].



شکل۲-۷- مقاومت مقاومت فشاری ملات‌های حاوی مقادیر مختلف خاکستر بادی/خاکستر لجن فاضلاب و نانوسیلیس

در سن ۲۸ روز[۳۷].

وان جو و همکاران [۳۸] در تحقیقی به اندازه‌گیری گرمای هیدراتاسیون و مقدار هیدروکسید کلسیم بـاقی مانـده در خمیـر سـیمان پرداختند نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که نانو سیلیس در مقایسه با میکروسیلیس باعث افزایش گرمای هیدراتاسیون بیشـتری در طول فرایند گیرش و سخت شدن می‌گردد. (شکل ۲-۷) مقادیر هیدروکسید کلسیم باقی مانده در خمیـر سـیمان پـس از ۷ روز، در ملاتهای سیمانی معمولی ۸/۹۸ ، ملات حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس ۶/۰۹ ، و ملات حاوی ۱۰ درصـد نانوسـیلیس ۴/۰۶ ، درصـد است که این امر بیانگر فعالیت پوزولانی بسیار زیاد نانوسیلیس می‌باشد.

صدر ممتازی و همکاران [۳۹] در مقاله‌ای تحت عنوان «استفاده از نانوسیلیس جهت بهبود خـواص سـیمان‌هـای کامپوزیـت حـاوی میکروسیلیس» به بررسی اثر این نانو ذرات روی خواص فیزیکی و مکانیکی ملاتهای سیمانی پرداختند. آنها با افـزودن ۳ درصـد نـانو سیلیس به ملاتهای حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس و ۷ درصد نانوسیلیس به ملاتهای معمولی، به اثرات مثبت این نانو مواد در بهبود مقاومت فشاری، خمشی، کاهش جذب آب و میکروساختار همگن و یکنواخت نمونه ها پی بردند. آنها همچنین دریافتند که اسـتفاده از مقادیر زیاد نانوسیلیس (بالاتر از ۳ و ۷ درصد به ترتیب در ملات های حاوی میکروسیلیس و ملات معمولی) با خطر افت مقاومـت خمشی همراه است (شکل ۲-۹).