

بررسی اثر افزودن نانو ذرات بر پارامترهای مقاومت و پایداری بتن خود تراکم

فرید طاهرزاده

مربی آموزشگاه عالی غیر انتفاعی اترک، قوچان، ایران - کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سازه
f_taherzade@yahoo.com

امیر جواد احمدیان حسینی

کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران
ahmadian.mech@gmail.com

بهاره اشرف حصاری

کارشناسی ارشد مهندسی معماری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد، ایران
ba.tan20@gmail.com

چکیده

استفاده از یک رویکرد جامع و اصولی در مورد بتن و شناخت زیر ساخت آن در مقایسه های کوچک، زمینه تولید بتنی با خاصیت خود تراکمی را فراهم می نماید. بتن های مذکور دارای دوام و پایداری بهتری نسبت به بتن های معمولی می باشند. هدف از نانو تکنولوژی، رویکردی جدید در رشته های مختلف علوم با تغییر و یا کنترل خواص و رفتار مواد و اشیا است. این امر از طریق تغییر چیدمان ملکولی و ریز ساختارهای آن ها در مقیاس نانو صورت می گیرد. نانوتکنولوژی در صنعت بتن، برای تولید بتن هایی با مقاومت کششی و فشاری بیشتر و یا تولید بتنی با سطوح خود تمیز کنندگی و خود ترمیمی، کاربرد بیشتری دارد. از اکسیدهای مختلفی برای بهبود عملکرد و خواص بتن استفاده می شود که از آن جمله می توان به نانو اکسیدهای آهن، سیلیس، تیتانیوم، آلومینیوم و یا نانو ذراتی مثل رس ها، الیاف ها و لوله های کربنی اشاره کرد. در این تحقیق علاوه بر بررسی روش و نحوه استفاده از نانو اکسیدها و نانو ذرات در تولید بتن، به تفاوت خواص حاصل از استفاده از این نانو مواد در بتن پرداخته می شود.

واژگان کلیدی: نانوتکنولوژی، نانو ذرات، نانو اکسیدها، بتن خود تراکم

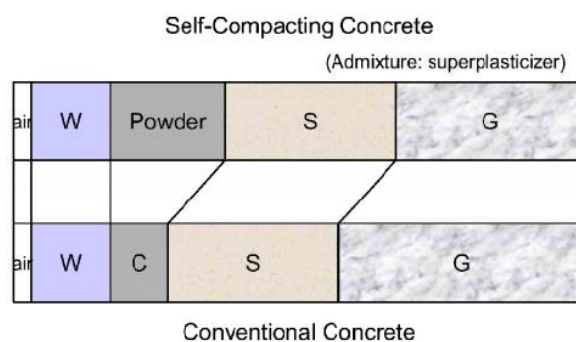
مقدمه

یکی از مصالح ساختمانی رایج و پرکاربرد بتن می‌باشد که بهینه‌سازی و رفع عیوب آن، به عنوان یکی از مباحث مهم توسط بسیاری از پژوهشگران مورد توجه قرار گرفته است. از سال ۱۹۸۳ تاکنون مساله دوام بتن به عنوان یکی از مسایل اساسی مورد توجه بسیاری از شرکت‌های بزرگ ساختمانی بوده است. ساخت سازه‌های بتنی با تراکم مناسب و دوام بالا نیازمند به کارگیری نیروهای زبده و کارآمد می‌باشد. همانگونه که می‌دانیم جهت خروج هوای داخل بتن و کاهش تخلخل آن و نیز افزایش مقاومت ناشی از تراکم، بتن لرزانده می‌شود. مشکلاتی که در اجرای بتن‌های معمولی می‌تواند وجود داشته باشد از جمله: لرزاندن بتن و در نتیجه تراکم ناهمگن بتن، جدا شدگی دانه‌های بتن و کرم شدن نقاطی از سطح بتن به علت ویریه زیاد بتن و یا در دسترس نبودن نقاطی از بتن و مشکلات استقرار وسایل و نیروی کار جهت لرزاندن بتن، محققین را بر آن داشت تا بتنی را بدون نیاز به لرزاندن و در عین حال با حفظ دانه‌بندی مناسب و دارا بودن تراکم مطلوب تولید نمایند. در نتیجه این تحقیقات آقای اوکامورا از ژاپن در سال ۱۹۸۸ نمونه اولیه این نوع بتن‌ها رو تولید نمود (H Okamura et al., 1993) که به بتن‌های خودتراکم (Self-Compacting Concrete یا SCC) معروف گردید.

خواص بتن خود تراکم

بتن‌های خود تراکم قابلیت افزایش دوام یک سازه بتنی همراه با توانایی تراکم در تمامی گوشه‌های قالب را براساس نیروی وزن خود و بدون نیاز به هیچگونه متراکم کننده‌ای دارا می‌باشند (Hajime Okamura et al., 2000). اجرای نمونه اولیه بتن خود تراکم بدلیل دارا بودن خواصی نظیر خشک شدن سریع، رسیدن به سخت‌شدگی نهایی، حرارت هیدراتاسیون^۱ و فشردگی مناسب مورد رضایت مهندسين قرار گرفت (Hajime Okamura & Ouchi, 2003). از دیگر مزیت‌هایی که امروزه در استفاده از بتن خود تراکم به آن توجه می‌شود، می‌توان به افزایش عمر میلگردها به دلیل پوشش کامل سطح آن‌ها توسط بتن، کاهش آلودگی صوتی محیط بدلیل کاهش استفاده از لرزاننده، افزایش کیفیت سطوح ظاهری بتن و امکان بتن ریزی با طرح و نقوش خاص اشاره نمود، ضمن اینکه بدلیل افزایش سرعت کار، کاهش قابل توجهی در هزینه‌ی نیروی انسانی را در پی خواهد داشت.

دانه بندی ماسه نسبت به دانه‌بندی شن، بر روی مشخصات بتن خود تراکم تاثیر بیشتری داشته و نسبت شن به ماسه مصرف شده در این گونه بتن‌ها از بتن‌های معمولی کمتر می‌باشد و بایستی این نسبت به گونه‌ای انتخاب شود که قابلیت عبور بتن از فضای قالب افزایش یافته، امکان بروز پدیده انسداد بتن‌ریزی کاهش و پایداری بتن در برابر جداشدگی اجزای آن افزایش یابد (Domone & Jin, 1999).



شکل ۱. مقایسه تناسبی بین بتن خود تراکم و بتن رایج (Hajime Okamura & Ouchi, 2003)

^۱ hydration

انواع بتن خود تراکم

در حال حاضر سه دسته از بتن های خودتراکم از نظر استفاده از ماده‌ی روان کننده در آن شناخته شده است. که به سه گروه ذیل تقسیم بندی می‌شوند (Dehn et al., 2000) :

1. بتن خود تراکم پودری
2. بتن خود تراکم دارای ماده اصلاح لزجت
3. بتن خود تراکم ترکیبی

در مقایسه با بتن‌های معمولی، برای تولید بتن‌های خودتراکم یکی از سه فرآیند ذیل به کار گرفته می‌شود؛ 1- محتوی پودری آن افزایش می‌یابد، (بتن خود تراکم پودری که این امر به وضوح در (شکل 1) مشاهده می‌گردد). 2- از عامل لزجی در بتن بهره گرفته می‌شود (بتن خود تراکم داری ماده اصلاح لزجت). 3- از هردوی این امکانات استفاده می‌گردد (بتن خود تراکم ترکیبی) (Dehn et al., 2000).

طرح اختلاط بتن خود تراکم

تاکنون محققین روش استاندارد خاصی را برای طرح مخلوط بتن خود تراکم بیان نکرده اند و بیشتر روش های ارایه شده برای طرح مخلوط بتن های خود تراکم بر اساس روش های تحقیقاتی بوده که در این روش ها علاوه بر مقاومت فشاری، کاهش حجم خمیر سیمان نیز به دلیل تاثیرات مثبت آن بر دوام و هزینه های تولید بتن هدف اصلی طراح بوده است (Hwang & Hung, 2005).

از بین روش های ارایه شده به چند روش ذیل برای طراحی بتن های خود تراکم اشاره می‌شود:

روش اول: در این روش که توسط اوکامورا و اوشی (H Okamura et al., 1993) برای طرح مخلوط بتن خود تراکم ارایه شده است، آزمایش روی ملات بتن برای بررسی خواص فوق روان کننده ها و درصد ماسه - سیمان، مد نظر قرار گرفته است. مقدار شن در حدود 50٪ و مقدار ماسه در حدود 45٪ حجم ملات در نظر گرفته شده و در صورت عدم استفاده از مواد پودری (بجز سیمان) امکان استفاده از آب با نسبت بیشتر از 30٪ وجود ندارد.

روش دوم : در این روش طرح مخلوط بتن خود تراکم که توسط بویی و مونتوگرمی (Van Khanh & Montgomery, 1999) ارایه شده است. ابتدا تعیین نسب های اختلاط اجزای بتن بر اساس حداقل مقدار خمیر سیمان، تعیین می گردد و سپس نمودار حداقل مقدار خمیر سیمان بر اساس درصد شن به کل حجم سنگ دانه‌ها رسم می‌شود. از این نمودار برای تعیین نسبت اجزای بتن خود تراکم استفاده کرده و در صورتی که درصد شن به کل سنگ دانه‌ها، از مقدار بهینه آن بیشتر و یا کمتر شود، مقدار حداقل حجم خمیر سیمان جهت دستیابی به بتن خود تراکم افزایش می‌یابد. مقدار خمیر سیمان به طور متوسط برابر 450 لیتر در متر مکعب بتن پیشنهاد شده است.

روش سوم : در این روش برای طرح مخلوط بتن خود تراکم که توسط سو و همکارانش (Su et al., 2001) پیشنهاد شده است، ابتدا درصد های سنگ دانه های ریز و درشت مشخص می‌شوند. سپس میزان خمیر سیمان که بایستی فضای خلل و فرج را بین اجزای بتن پر نماید، محاسبه می گردد. میزان خمیر سیمان به طور متوسط برابر 380 لیتر در متر مکعب بتن پیشنهاد شده است.

روش چهارم : در این روش، طرح مخلوط بتن خود تراکم توسط لاجمی و همکارانش (Lachemi et al., 2003) با حداقل هزینه پیشنهاد شده است که بدین منظور از خاکستر بادی و سرباره در طرح مخلوط بتن به ترتیب به میزان 50٪ و یا 60٪ استفاده شده است. میزان خمیر سیمان به کار رفته به طور متوسط به ترتیب برابر 320 و 305 لیتر در متر مکعب بتن ارایه گردیده است.

روش پنجم : در این روش، طرح مخلوط بتن خودتراکم توسط سونبی (Sonebi, 2004) پیشنهاد و بتن خود تراکم با نسبت آب به سیمان 45٪ ساخته شده و مقادیر سیمان و خاکستر بادی مورد استفاده در این روش به ترتیب برابر 290 و 220 کیلوگرم در حجم خمیر سیمان به کار رفته است. میزان خمیر سیمان به کار رفته به طور متوسط برابر 420 لیتر در متر مکعب بتن پیشنهاد شده است.

روش ششم : در این روش، طرح مخلوط بتن خود تراکم توسط هونگ و هوآنگ (Hwang & Hung, 2005) پیشنهاد و ابتدا نسبت‌های مختلف سنگ دانه های ریز و درشت برای دستیابی به بتن با تراکم بالا طبق استاندارد ASTM C29 بیان گردیده است. پس از تعیین بهترین نسبت برای سنگ دانه‌های به کار رفته، حجم خمیر سیمان برای پرکردن فضای بین سنگ دانه‌ها محاسبه می گردد. میزان خمیر سیمان به کار رفته به طور متوسط برابر 360 لیتر در متر مکعب بتن توصیه شده است.

کاربرد بتن خودتراکم

در سال 2006 تحقیق جامعی در مورد کاربرد بتن خود تراکم، توسط دومونه (Domone, 2006) برای سازه‌های ساخته شده از این نوع بتن که توسط کشورهای مختلف در طول مدت یازده سال مورد استفاده قرار گرفته بود، انجام گردید و در این تحقیق شصت و یک مورد از کاربردهای بتن خود تراکم مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. این موارد به منظور تحلیلی بر پایه جزئیات فرمولاسیون بتن و خواص آن انتخاب گردیده بودند. گستردگی خواص، مواد تشکیل دهنده و نسبت اختلاط این مواد، طبیعت متنوع بتن خود تراکم را نشان می‌داد و تاکید بر این نکته بود که این نوع بتن بایستی به عنوان یک خانواده شامل مخلوط‌های مختلف، برای کاربردهای گسترده مورد استفاده قرار گیرد.

استفاده از بتن‌های خود تراکم در موارد خاصی از سازه‌های بتنی ضرورت پیدا می‌کند که از آن جمله می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد: سازه‌های بلند و برج‌های بتنی که بتن‌ریزی در آن‌ها با مشکلات بسیاری مواجه است. سازه‌های معماری و هنری که ضمن میل گرد گذاری فشرده، نیاز به ظرافت خاصی جهت طراحی دارند. بتن‌ریزی در سازه‌های زیر آب که امکان ویریه کردن بتن و تراکم بتن با کیفیت مطلوب در آن‌ها میسر نمی‌باشد. ستون‌ها و دیواره‌های با ارتفاع زیاد که دارای میل گردهای متراکم می‌باشند. پل‌های با دهانه‌های بزرگ و تونل‌های شهری و آبی که امکان استفاده از بتن معمولی به دلیل طولانی بودن مسیر بتن‌ریزی، در آن‌ها با حفظ کیفیت و تراکم مطلوب امکان‌پذیر نمی‌باشد (Domone, 2006).

در ادامه برای درک بهتر از کاربرد بتن خودتراکم به ذکر یک مثال پرداخته می شود:

در این مثال (شکل 2) پیمانکار از بتن خودتراکم برای بتن ریزی دیواره یک ساختمان استفاده کرده است. دیواره ی مذکور 4 متر ارتفاع داشته و شامل درب و دریچه های تهویه مطبوع می باشد. با استفاده از بتن خود تراکم در این مثال، دیگر نیازی به استفاده از ویراتور جهت پرکردن بتن گوشه ها و کناره های دریچه از بتن نمی باشد و همانطور که از (Error! Reference source not found.) مشخص است، گوشه های درب ها و دریچه ها دارای کیفیت بالا از لحاظ بتن ریزی می باشند (NYHOLM THRANE, 2012).

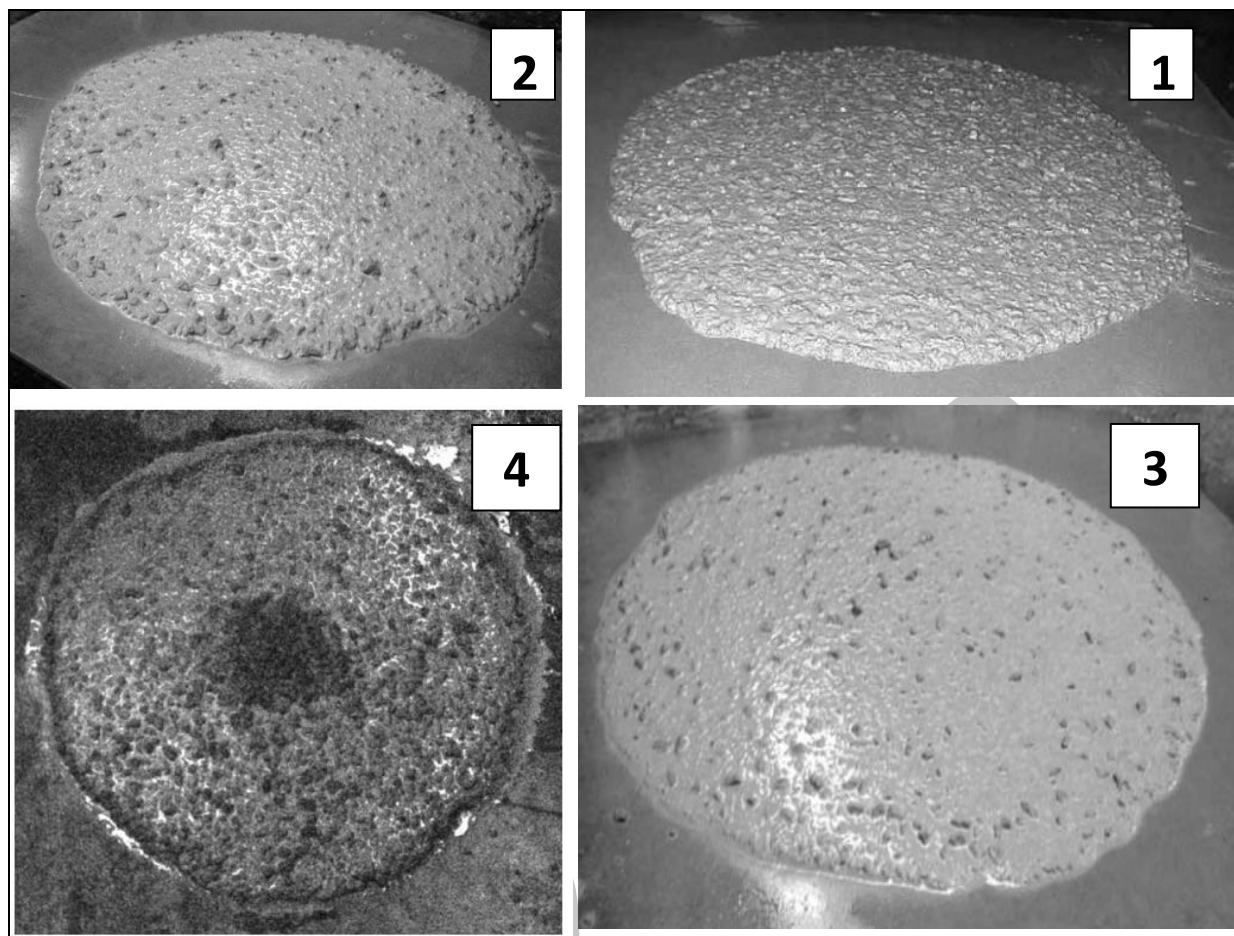


شکل ۲. مثالی از بتن ریزی با استفاده از بتن خود تراکم (NYHOLM THRANE, 2012)

پایداری بتن خود تراکم

شاخص پایداری بر اساس دیداری برای یک مخلوط بتن، با بازدید چشمی از نمونه‌ی مخروطی بتن، تعیین می‌شود که می‌تواند به عنوان معیاری برای کنترل کیفیت بتن خود تراکم مورد استفاده قرار گیرد. ضوابط تعیین این شاخص به شرح ذیل می‌باشد (ASTM, 2014).

- 1- در شرایطی که نشانه‌های جدا شدگی و آب انداختگی بتن وجود نداشته باشد، شاخص پایداری برای آن برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. به عبارتی مخلوط بتن کاملاً پایدار می‌باشد (شکل ۳).
- 2- اگر نشانه‌های جدا شدگی و آب انداختگی در مخلوط بتن به صورت مخلوط نازکی از آب در سطح دایره‌ای نمونه بتن پخش شده باشد، شاخص پایداری برابر با ۱ تعیین می‌گردد. یعنی نمونه بتنی پایدار می‌باشد (شکل ۳).
- 3- در صورتی که حلقه نازکی از ملات، به ضخامت کمتر از ۱۰ میلی‌متر و یا تجمع سنگ دانه‌ها در قسمتی از نمونه دایره‌ای بتن پخش شده باشد، شاخص پایداری برابر با ۲ تعیین می‌گردد. یعنی نمونه مخلوط بتنی ناپایدار می‌باشد. (شکل ۳).
- 4- در مواقعی که جداشدگی اجزای مخلوط بتن واضح باشد و حلقه‌ی نازکی از ملات بتن با ضخامت بیش از ۱۰ میلی‌متر و یا تجمع سنگ دانه‌ها در مرکز نمونه دایره‌ای بتن به صورت زیاد پخش شده باشد، شاخص پایداری برابر با ۳ تعیین می‌گردد. به عبارتی نمونه مخلوط بتن کاملاً ناپایدار می‌باشد (شکل ۳).



شکل 3. نمایش چهار حالت شاخص پایداری بتن 1. شاخص صفر، 2. شاخص یک، 3. شاخص دو، 4. شاخص سه (ASTM, 2014)

چالش بتن خود تراکم و روش‌های جدید بهبود خواص آن

همانگونه که ذکر شد، بتن خود تراکم گونه‌ای جدید از بتن محسوب می‌شود که بدون نیاز به ویبراتور، خاصیت پرکنندگی مطلوبی را ارائه می‌دهد. یکی از معایب استفاده از بتن خود تراکم، هزینه‌ی بالای آن است که خود از استفاده کردن حجم زیادی از سیمان پرتلند و ترکیبات شیمیایی نشات می‌گیرد. یکی از روش‌های جایگزین برای کاهش هزینه بتن خود تراکم، استفاده از افزودنی‌های معدنی همچون: سیلیکا فوم^۱، ترکیبات زاید صنعت فولاد^۲ و خاکستر^۳ است. هنگامی که مواد مذکور جایگزین بخشی از مخلوط سیمان بتن می‌گردند، هزینه‌های بتن کاهش پیدا می‌کند، بخصوص اگر ماده افزودنی، جزو مواد زاید باشد. علاوه بر مزیت فوق، افزودن این مواد به بتن، نه تنها هزینه تولید بتن خود تراکم را کاهش می‌دهد، بلکه موجب کاهش حرارت هیدراتاسیون^۴ بتن و همچنین باعث محدود کردن استفاده از مواد شیمیایی افزایش دهنده‌ی لزجت در بتن می‌گردد. در ادامه به ذکر چند مورد از پژوهش‌های اخیر، در رابطه با تاثیر مواد افزودنی در بهبود خواص بتن، پرداخته می‌شود (Ramanathan et al., 2013). (شکل 4) و (شکل 5) نتایج پژوهش آزمایشگاهی راماناتان و همکارانش (Ramanathan et al., 2013) را در استفاده از ترکیبات افزودنی معدنی به بتن خود تراکم را نشان می‌دهد. همانطور که

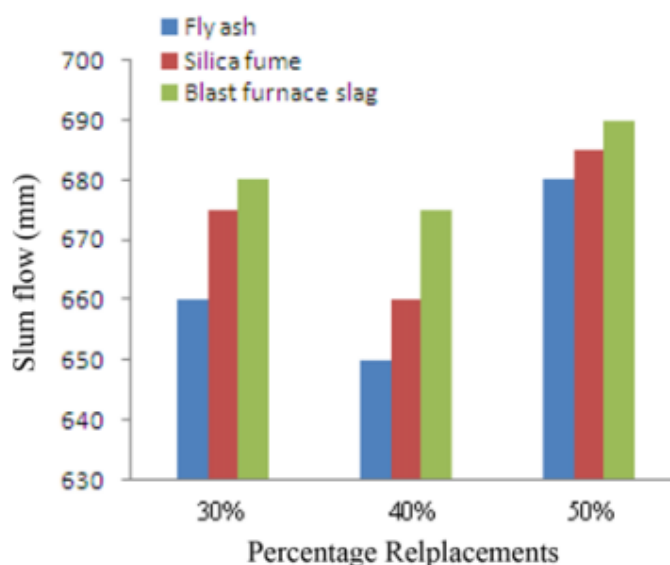
¹ Silica Fume

² Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS)

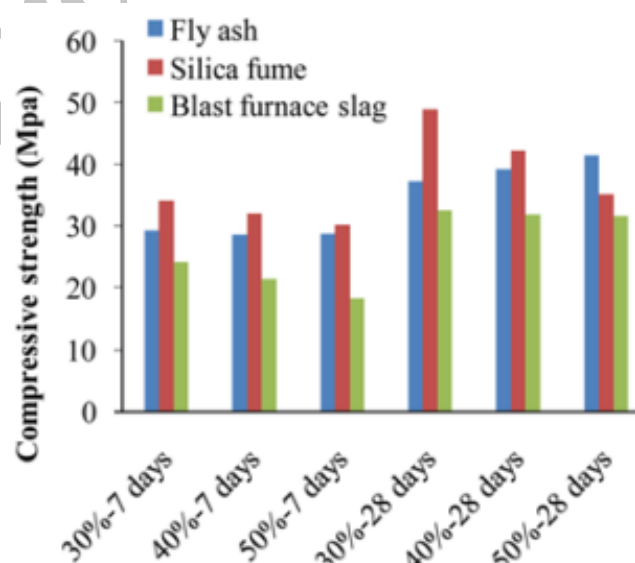
³ Fly Ash

⁴ Hydration

در (شکل ۴) مشخص است، با استفاده از ضایعات صنعت فولاد، اسلایم بتن بهتر و کارپذیری آن، مطلوب تر می شود. هنگامی که سیمان با افزودنی های معدنی جایگزین می گردد، به مقدار کمتری از ماده فوق روان کننده جهت ایجاد روانی در سیمان نیاز است. همچنین (شکل ۴) بیانگر آن است که هنگام استفاده از خاکستر (در مقایسه با سایر مواد افزودنی مورد مطالعه قرار گرفته) به مقدار بیشتری از مواد فوق روان کننده نیاز خواهد بود. در مقایسه با سایر افزودنی ها، خاکستر دارای دانه هایی درشت تر و هندسه ی کروی است، که این امر موجب کاهش سطح آن می گردد. علاوه بر این، با جایگزین کردن خاکستر به جای سیمان، حجم خمیر سیمان بدلیل کاهش چگالی آن، افزایش می یابد. این افزایش حجم موجب کاهش اصطکاک بین توده های مواد و بهبود انسجام، پلاستیسیته و کارپذیری بتن خود تراکم می گردد.



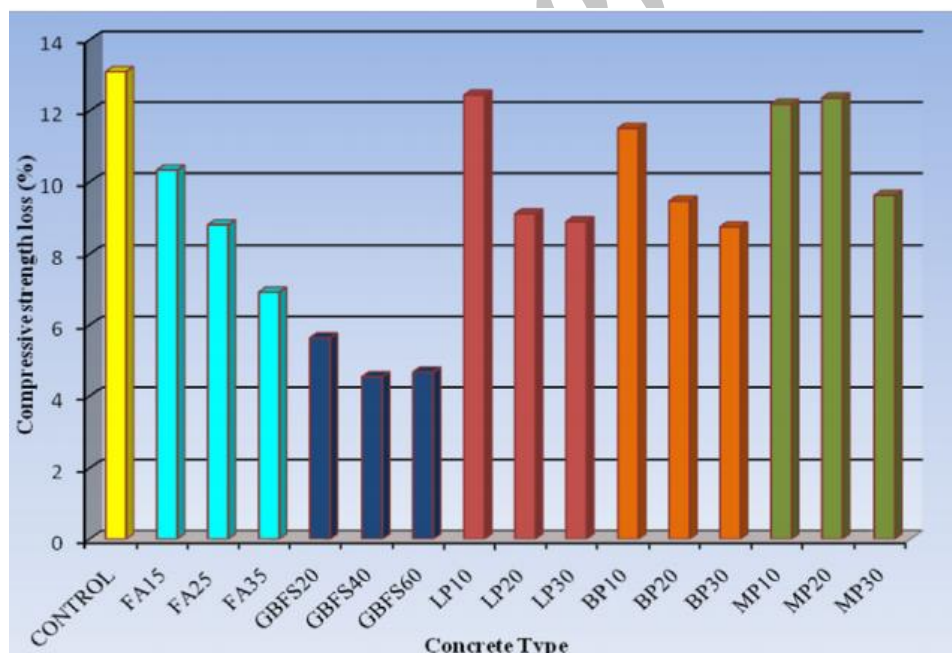
شکل ۴. تاثیر درصدهای افزودنی مختلف در بهبود کارپذیری بتن خود تراکم (Ramanathan et al., 2013)



شکل ۵. تاثیر جایگزینی درصدهای مختلف مواد افزودنی معدنی در مقاومت فشاری بتن خود تراکم (Ramanathan et al., 2013)

(شکل 5) تاثیر افزودن درصد‌های مختلفی از مواد معدنی را بر مقاومت فشاری بتن 7 و 28 روزه را نشان می‌دهد. همانطور که از (شکل 5) مشخص است، به طور عمومی، افزایش درصد هریک از مواد افزودنی فوق، موجب کاهش مقاومت بتن می‌گردد. طبق (شکل 5) سیلیکا فوم با نسبت 30 درصدی، بیشترین مقاومت فشاری را، هم در مورد بتن 7 روزه و هم بتن 28 روزه، دارا می‌باشد و با نسبت 50 درصد، کمترین مقاومت فشاری را در برای بتن خود تراکم 7 روزه، ارایه می‌دهد (Ramanathan et al., 2013).

وويسال و سامر (Uysal & Sumer, 2011) تاثیر افزودن مواد معدنی مختلف را به بتن خود تراکم و تغيير مقاومت آن در برابر سولفات‌هایی همچون سولفات منیزیم، مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها در این پژوهش بتنی با درصد‌های مختلف از ترکیبات زاید صنعت فولاد^۱، پودر بازالت^۲، پودر سنگ آهن^۳، خاکستر^۴، سیمان پرتلند^۵ و پودر سنگ مرمر^۶ را در محلول 10 درصدی سولفات منیزیم به مدت 400 روز قرار داده و در پایان این مدت، میزان کاهش مقاومت فشاری آن را مورد آزمایش قرار دادند. (شکل 6) تاثیرات افزودن مواد معدنی متفاوت، با درصد‌های مختلف را بر میزان تغییر مقاومت فشاری بتن پس از قرار گرفتن 400 روزه ی بتن در محلول سولفات منیزیم را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد، افزایش میزان درصد مواد معدنی، موجب کاهش کمتری از مقاومت فشاری بتن می‌گردد. همانطور که از (شکل 6) مشخص است، با مقایسه مواد معدنی مختلف، بتن دارای ماده‌ی ضایعات صنعت فولاد، بیشترین مقاومت را در برابر حمله‌ی سولفات منیزیم نشان می‌دهد (Uysal & Sumer, 2011).



شکل 6. میزان کاهش مقاومت فشاری بتن خود تراکم در برابر حمله سولفات منیزیم برای درصد‌های متفاوتی از مواد معدنی مختلف (Uysal & Sumer, 2011)

¹ GBFS

² Basalt Powder (BP)

³ Limestone Powder (LP)

⁴ Fly Ash (FA)

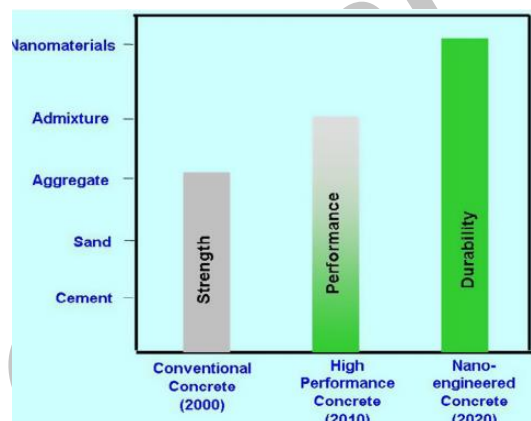
⁵ Portland Cement

⁶ Marble Powder (MP)

کاربرد نانوتکنولوژی در بتن

یافتن نسلی جدید از مصالح ساختمانی با عملکرد بالا و خواصی متفاوت نسبت به خواص مصالح معمولی، هدف نهایی از بررسی بتن در مقیاس نانو، است. از سال‌ها پیش استفاده از ذرات سیلیکا در ابعاد میکرون به صورت وسیعی در بتن مورد استفاده قرار گرفته است. به تازگی اثبات شده است که استفاده از ذراتی در مقیاس کوچکتر از میکرو سیلیس باعث افزایش مقاومت فشاری بتن گردیده و از طرفی تمامی ویژگی‌های یک بتن مربوط به فرآیندهایی است که در مقیاس نانو برای آن اتفاق می‌افتد. در واقع نانو فناوری علمی، مربوط به اندازه گیری و توصیف ساختار ملکولی در مقیاس نانو و میکرو، برای درک بهتر رفتار در مقیاس بزرگ (ماکرو) می‌باشد. مهندسی نانو شامل تکنیک‌های تغییر ساختار در مقیاس نانومتری جهت ایجاد نسلی جدید و مناسب از کامپوزیت‌های سیمانی با رفتار ایده‌آل مکانیکی است که میتوان با کمک آن، بتنی با خواصی جدید از جمله دارا بودن مقاومت الکتریکی پایین، هوشمند بودن، خود تمیز کنندگی، خود ترمیم کنندگی، شکل پذیری بالا و غیره را به وجود آورد (شکل ۷) (Perumalsamy Balaguru & Chong, 2006).

در صنعت سیمان به صورت پودر تولید می‌گردد که ابعاد آن عموماً در حد میلی‌متر و میکرون هستند. اخیراً دو روش برای تولید سیمان در ابعاد نانو پیشنهاد شده است: ۱- آسیاب کردن ذرات سیمان (در این روش از خرد کردن ماده اصلی، ترکیبات نانو ساخته می‌شوند). ۲- استفاده از ترکیبات شیمیایی (در این روش با استفاده از واکنش‌های شیمیایی، نانو ذرات شکل می‌گیرند).



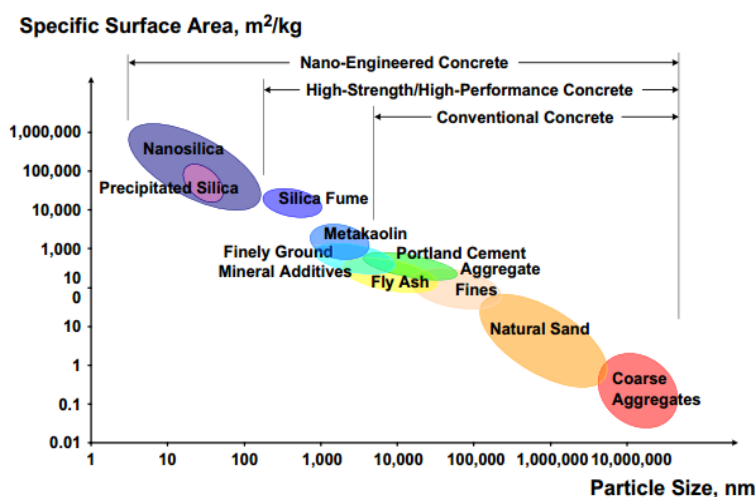
شکل ۷. حرکت به سوی بتنی مقاوم با استفاده از نانوتکنولوژی (Singh et al., 2013)

چالش‌های نانو تکنولوژی در صنعت بتن

نانوتکنولوژی یک حوزه تحقیقاتی وسیع و پویا در سراسر جهان می‌باشد که این حوزه بعد از ابداع لوله‌های نانو کربنی در زمینه‌های متعددی همچون الکترونیک، مهندسی پزشکی و کامپوزیت‌ها کاربرد پیدا کرده است. اخیراً محققین مختلفی به استفاده از فناوری نانو در صنعت سیمان روی آورده‌اند. با استفاده از ذرات نانو در سیمان، و دستیابی به خواصی جدید، سیمان مذکور می‌تواند به عنوان یک ماده‌ای با فناوری بالا، جایگزین سیمان‌های رایج گردد (PN Balaguru, 2005). مانند بسیاری از تکنولوژی‌های نوین، نانو تکنولوژی نیاز به توجیه اقتصادی داشته ولی در حال حاضر به علت هزینه‌های بالای این فناوری، توسعه روزافزون این محصولات و استفاده از آن‌ها در صنعت محدود گردیده است.

توزیع یکنواخت نانو ذرات در بتن یکی دیگر از چالش‌های استفاده از این ذرات می‌باشد. معمولاً این ذرات در حین اضافه شدن به بتن به توده‌ای انباشته تبدیل شده و در مخلوط به خوبی توزیع نمی‌شوند. البته می‌توان برای جبران این نقص از دستگاه‌های

مخلوط کن قوی استفاده کرد. چون ذرات نانو سطح ویژه بزرگی دارند، این امکان وجود دارد که مقدار زیادی آب جذب نمایند و در نتیجه آن، تاثیر منفی بر کارایی بتن بگذارند (شکل ۸) (PN Balaguru, 2005).

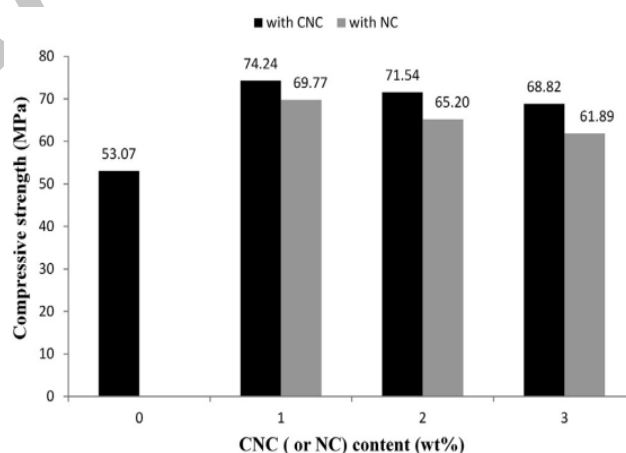


شکل ۸. مقایسه اندازه ذرات با سطح ویژه ذرات برای ذراتی در رابطه با بتن (Sanchez & Sobolev, 2010)

انواع نانو ذرات بکار برده شده در صنعت بتن خود تراکم

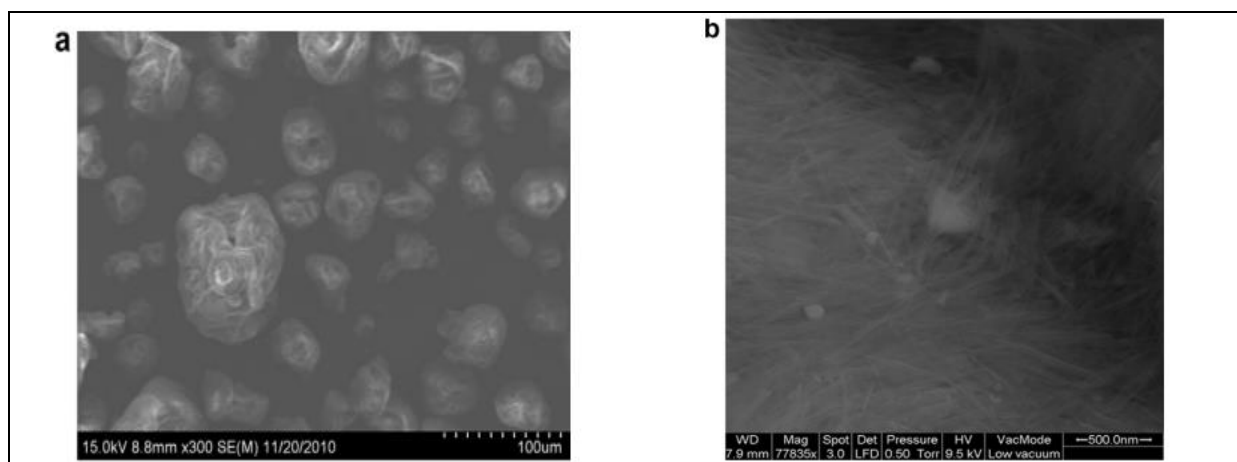
نانو رسها

استفاده از ذرات نانو رس (شکل ۱۰) موجب بهبود رفتار بتن مثل، ایجاد بتن خود تراکم، افزایش مقاومت فشاری، کاهش نفوذ پذیری، مقاومت در مقابل نفوذ کلریدها و کاهش جمع شدگی در بتن، می گردد (Sanchez & Sobolev, 2010).



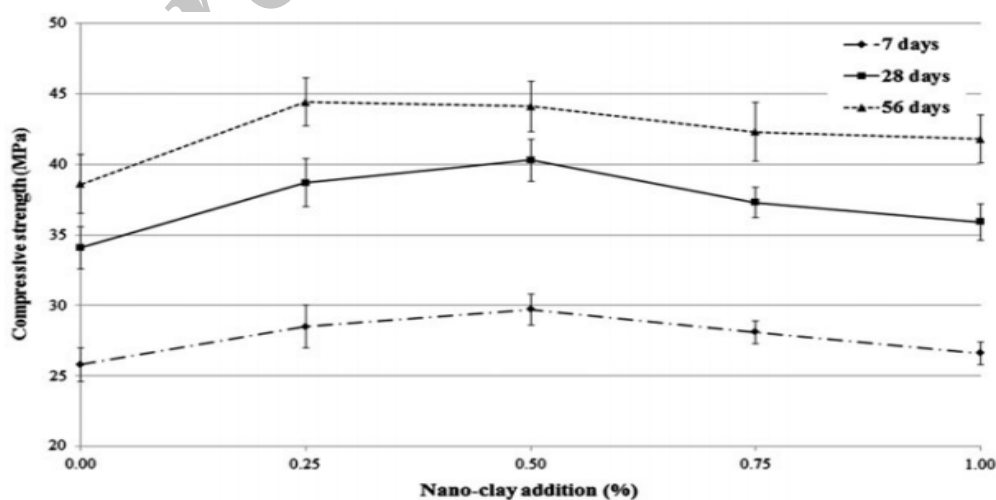
شکل ۹. مقایسه میزان مقاومت فشاری بتن در دو حالت سیمان نانو کامپوزیت (NC) و سیمان دارای نانوذرات رس (CNC) برای درصدهای وزنی متفاوت (Hakamy et al., 2015)

مطابق (شکل ۹) در بین درصدهای ارایه شده از نانو ذرات رس، میزان یک درصد وزنی نانو ذرات رس بیشترین مقاومت فشاری بتن را دارا می‌باشد ولی با افزایش درصد وزنی نانو ذرات رس، مقاومت فشاری بتن، به تدریج کاهش می‌یابد.



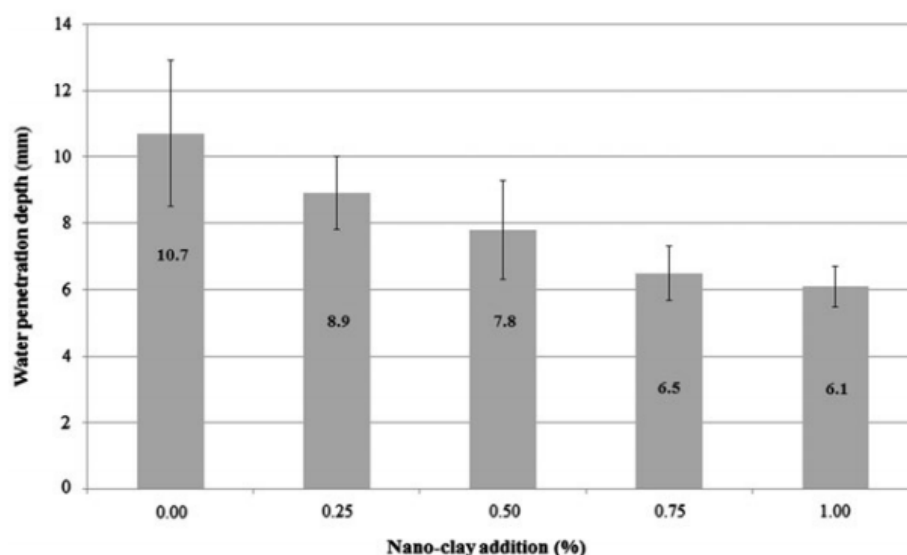
شکل ۱۰. نمایش نانو ذرات رس a. با بزرگنمایی ۱۰۰ میکرو متر. b. با بزرگنمایی ۵۰۰ نانو متر (Kawashima et al., 2012)

تغییرات مقاومت فشاری بتن خود تراکم، در هنگام استفاده از نانو ذرات رس با درصدهای متفاوت برای بتنی با سن های ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه، در (شکل ۱۱) نشان داده شده است. همانطور که انتظار می رود، افزایش سن بتن، موجب افزایش مقاومت فشاری آن می گردد. از طرفی دیگر، با افزایش درصد نانو ذرات رس در بتن خود تراکم، تا حدود ۰/۵ درصدی، مقاومت فشاری بتن به تدریج، افزایش می یابد، ولی برای نانو ذرات با درصد ۰/۵ الی ۱/۰، مقاومت فشاری بتن خود تراکم، به تدریج کاهش می یابد. بنابراین بیشترین مقاومت فشاری برای بتنی با سن ۷ و ۲۸ روز با نانو ذرات رس برابر ۰/۵ درصد و برای بتن با سن ۵۶ روز با ۰/۲۵ درصد می باشد. (Hosseini et al., 2015).

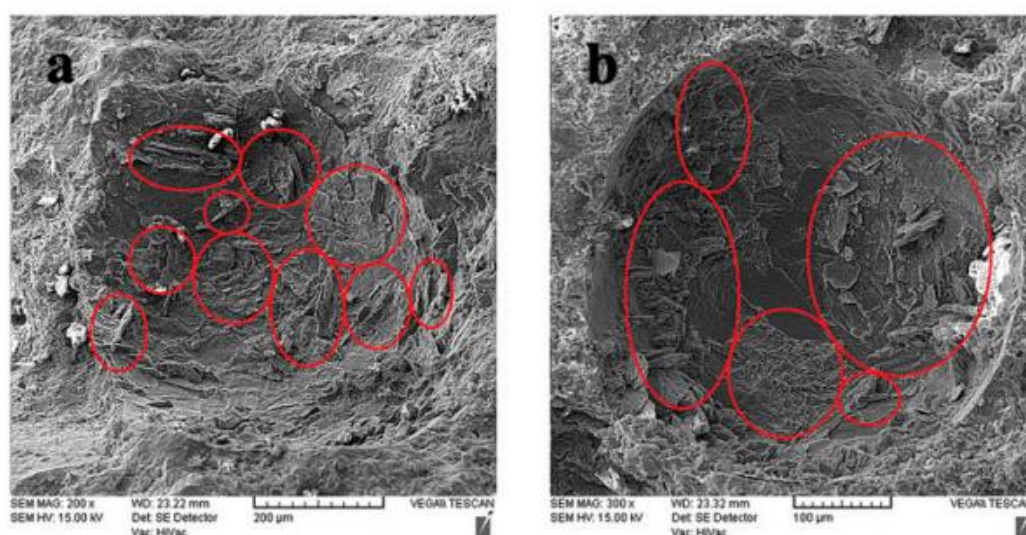


شکل ۱۱. تغییرات مقاومت فشاری بتن در هنگام استفاده از درصدهای مختلفی از نانو رس (Hosseini et al., 2015)

حسینی و همکاران (Hosseini et al., 2015)، تاثیر افزایش درصد نانو ذرات رس، بر مقدار نفوذ آب در بتن خود تراکم را مورد مطالعه قرار دادند (شکل ۱۲). آن‌ها دریافتند که افزایش درصد نانو ذرات رس، موجب کاهش نفوذ پذیری آب در آن بتن می‌گردد؛ که این امر از عملکرد پوزولانی این ذرات نشأت می‌گیرد.



شکل ۱۲. میزان نفوذ آب در بتن با درصد‌های مختلف نانو ذرات رس، در طی دوره ۲۸ روزه (Hosseini et al., 2015)



شکل ۱۳. خاصیت پرکنندگی حفره در هنگام استفاده از نانو رس به میزان ۱ درصد وزنی (Hosseini et al., 2015)

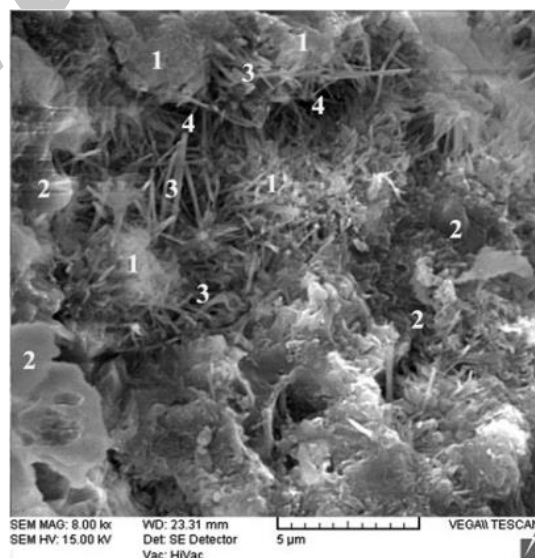
(شکل ۱۳) تجمع توده‌های نانو ذرات رس (با میزان یک درصد وزنی) و پرکنندگی حفره توسط آن‌ها را نشان می‌دهد.

میکروسیلیس‌ها و نانو سیلیس‌ها

برای بهبود خواص مکانیکی و افزایش دوام بتن استفاده از میکروسیلیس‌ها در کشورهای پیشرفته رو به افزایش است. استفاده از میکروسیلیس‌ها در بتن دارای فواید بسیار زیادی می‌باشد که از آن جمله می‌توان به: کاهش ترکهای ناشی از هیدراتاسیون سیمان، دوام بهتر در مقابل حمله سولفات‌ها، باران‌های اسیدی و دستیابی به مقاومت بالا اشاره کرد. از دیگر مزایای مصرف میکروسیلیس کاهش تحرک یون‌های کلر و در نتیجه کاهش عمق نفوذ کلر در بتن بویژه در مناطق ساحلی می‌باشد. از موارد مصرف آن می‌توان در بتن‌ریزی‌های مربوط به ساخت اسکله‌های دریایی، شمع‌ها، ستون‌ها و قطعات پیش ساخته، فونداسیون ماشین آلات و کلیه سازه‌های بتنی که در معرض حملات شیمیایی بویژه یون کلر و سولفات‌ها قرار دارند نام برد. افزودن نانو سیلیس به بتن موجب افزایش مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی، کاهش زمان گیرش بتن و کاهش نفوذ پذیری آب داخل بتن و نیز افزایش مقاومت بتن در برابر حملات عوامل شیمیایی است (Konstantin Sobolev & Gutiérrez, 2005). همچنین افزودن نانو ذرات سیلیس به بتن موجب کاهش زمان هیدراتاسیون آن و بالا رفتن پیک دمایی هیدراتاسیون می‌گردد (Singh et al., 2013).

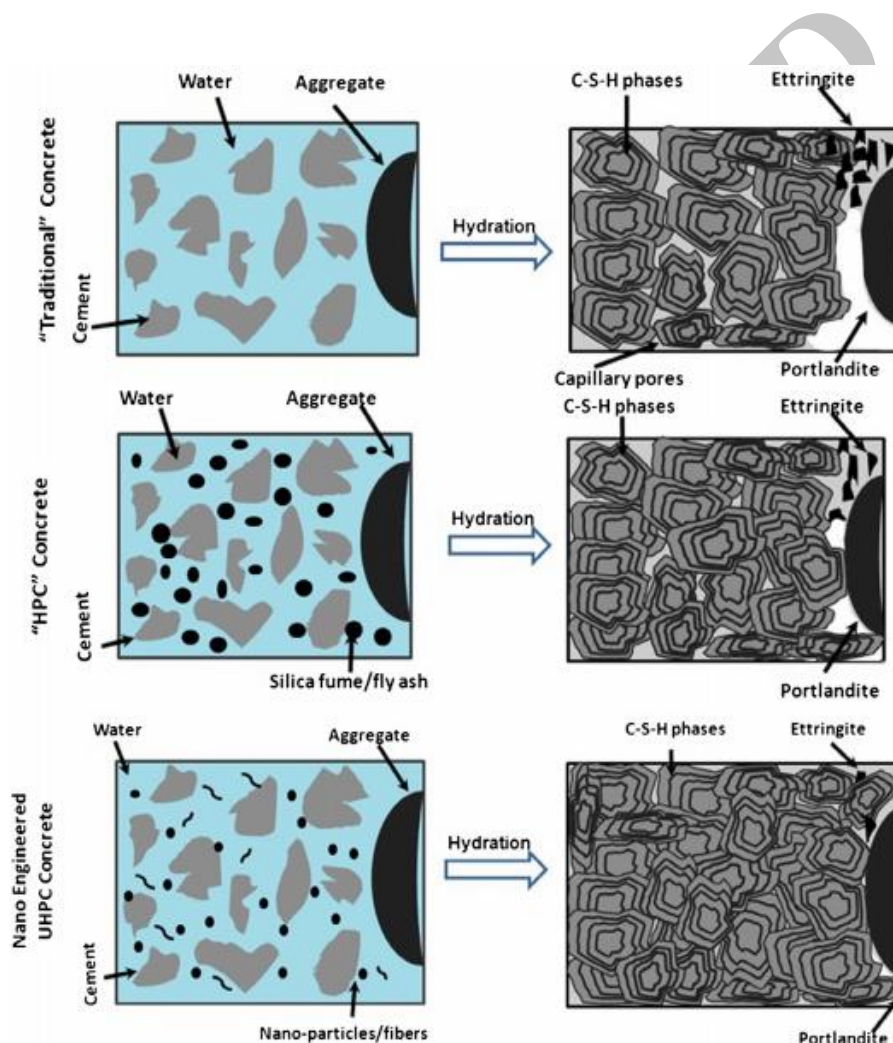
دو واکنش مکانیکی محتمل در هنگام هیدراتاسیون بتن در حضور ذرات نانوسیلیکا وجود دارد. هیدراتاسیون سیمان می‌تواند در حضور ذرات نانوسیلیکا شتاب پیدا کند. هنگامی که نانوسیلیکا به ذرات سیمان اضافه می‌گردد، $H_2SiO_4^{2-}$ شکل گرفته و با Ca^{2+} موجود شروع به واکنش می‌کند که موجب تولید کلسیم - سیلیکات - هیدرات (C-S-H) اضافی می‌گردد. سپس این ذرات ایجاد شده C-S-H درون آب بین ذرات سیمان پخش شده و نقش منبعی را برای ایجاد فاز فشرده C-S-H ایفا می‌کنند. تشکیل فاز C-S-H به عنوان عاملی به پرکردن خلل و فرج‌های بتن کمک می‌کند. تشکیل تعداد زیادی از این ذرات موجب شتاب بخشیدن در زمان هیدراتاسیون بتن می‌گردد (شکل ۱۴) (شکل ۱۵) (Singh et al., 2013).

با افزودن ۱۰ درصد نانو سیلیس، مقدار مقاومت فشاری بتن به میزان ۲۶ درصد افزایش یافته ولی با افزودن همین مقدار سیلیس در مقیاس میکرون، مقاومت فشاری بتن به میزان ۱۵ درصد افزایش می‌یابد (Li et al., 2004). حتی با اضافه کردن نانو سیلیس به مقدار بسیار کمی برابر ۰/۲۵ درصد، مقاومت فشاری به اندازه ۱۰ درصد و مقاومت خمشی به میزان ۲۵ درصد افزایش می‌یابد (K Sobolev et al., 2009).

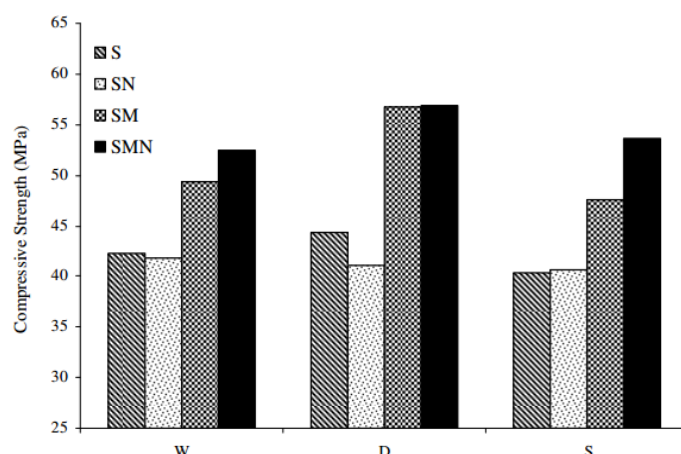


شکل ۱۴. حضور محصولات مختلف هیدراتاسیون در بتن ۱. C-S-H ۲. $Ca(OH)_2$ ۳. اترینگایت ۴. حفره (Hosseini et al., 2015)

(شکل 16) مقایسه‌ای بین تنش فشاری برای بتن خود تراکم را در شرایط مختلف و در سن 28 روزگی نشان می‌دهد. در این شکل S بیانگر بتن خود تراکم بدون ماده افزودنی، SN بیانگر بتن خود تراکم حاوی ذرات سیلیکا، SM بیانگر بتن خود تراکم با ذرات میکرو سیلیکا و SMN بیانگر بتن خود تراکم حاوی ذرات میکروسیلیکا و نانوسیلیکا می‌باشد. مطابق (شکل 16) با افزودن ذرات نانو سیلیکا (SN) مقاومت فشاری بتن خود تراکم اندکی کاهش می‌یابد در صورتی که با افزودن ذرات میکرو سیلیکا (SM) و یا با افزودن توام ذرات میکرو سیلیکا و نانو سیلیکا (SMN) مقاومت فشاری بتن خود تراکم افزایش می‌یابد. بیشترین میزان افزایش مقاومت فشاری مربوط به بتن های خود تراکم دارای ذرات میکرو و نانو سیلیکا (SMN) می‌باشد (Maghsoudi & Arabpour Dahooei, 2009)



شکل 15. واکنش هیدراتاسیون در بتن سنتی، بتن با عملکرد بالا و بتن با تکنولوژی نانو ذرات (Singh et al., 2013)



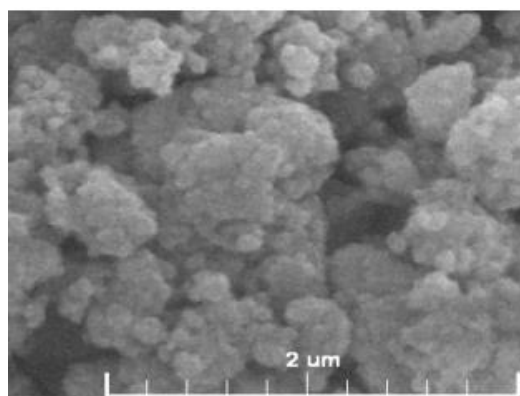
شکل ۱۶. مقایسه تنش فشاری برای حالات مختلف بتن خود تراکم در سن ۲۸ روزگی (بتن خیس‌انده شده (W) (بتن خشک (D) (بتن قرار داده شده درمحل پمپ پنج درصدی سولفات سدیم (D) (Maghsoudi & Arabpour Dahoei, 2009)

نانو ذرات اکسید آهن

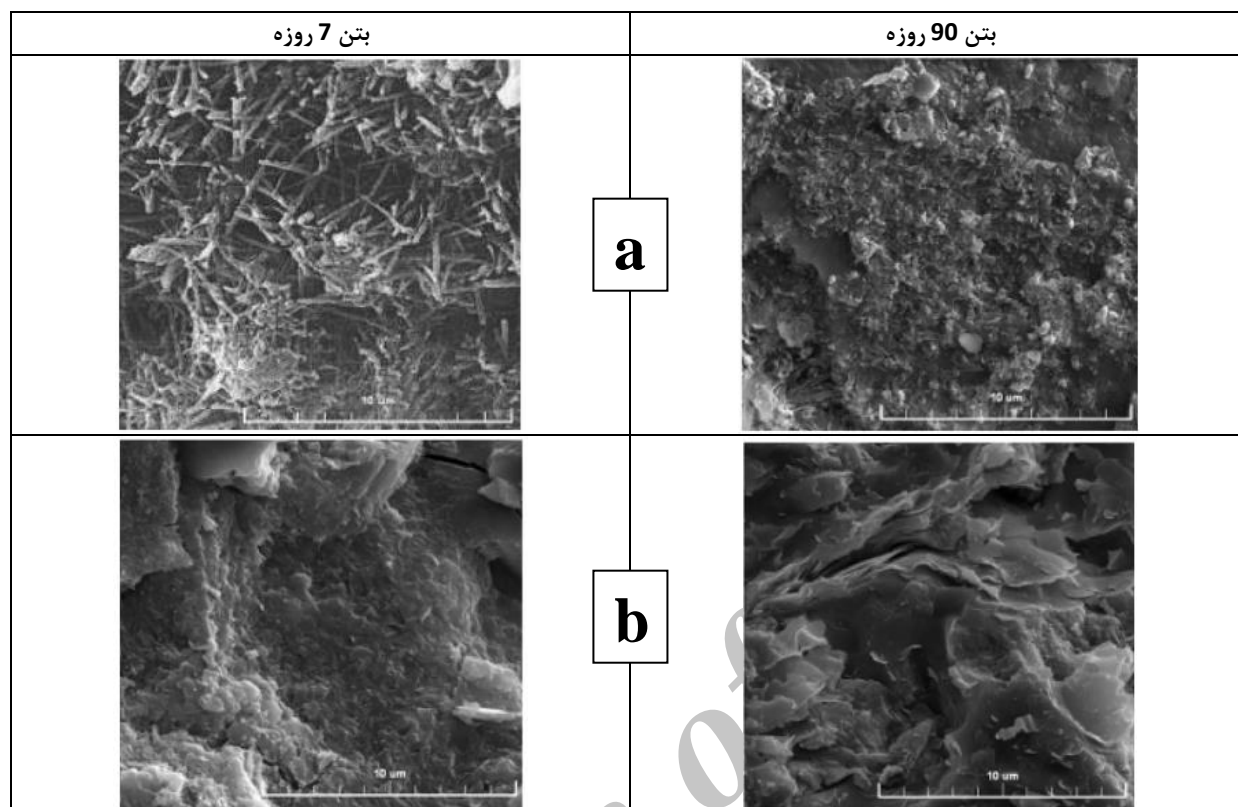
خوش اخلاق و همکاران (Khoshakhlagh et al., 2012) پژوهشی بر روی افزودن نانو ذرات اکسید آهن بر ویژگی بتن خود تراکم انجام دادند. آن‌ها دریافتند که افزایش درصد وزنی نانو ذرات اکسید آهن، برای مقادیر بیش از ۴ درصدی، موجب افزایش مقاومت فشاری، ترک خوردگی و پیچشی بتن خود تراکم می‌گردد. آنها همچنین دریافتند که این نانو ذرات می‌تواند همچون پرکننده‌ای عمل کرده و باعث افزایش مقاومت بتن در برابر نفوذ آب شود، که این حالت برای درصدهای وزنی بالای ۴ درصد رخ می‌دهد.

نانو اکسید تیتانیوم

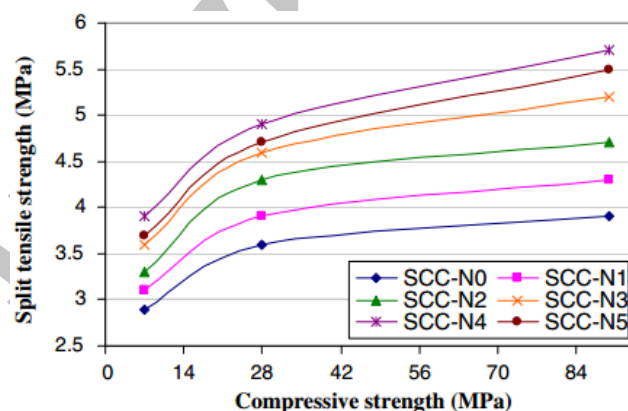
تحقیقات ثابت کرده است که استفاده از نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم (شکل ۱۷) علاوه بر خاصیت خود تمیزکنندگی بتن، باعث افزایش سرعت هیدراتاسیون و کاهش زمان گیرش بتن می‌گردد (Jayapalan et al., 2009). همچنین استفاده از این نانو ذرات باعث افزایش مقاومت خمشی و مقاومت فشاری بتن می‌شود (H. Li et al., 2006) (Li et al., 2007). (شکل ۱۸) تاثیر اضافه نمودن نانو ذرات اکسید تیتانیوم به بتن خود تراکم را نشان می‌دهند. همانطور که مشخص است، با اضافه نمودن نانو ذرات اکسید تیتانیوم، ریز ساختار بتن بهبود یافته و حفره‌های داخلی بتن کوچکتر می‌گردد. این امر موجب بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن می‌گردد (Jalal, Fathi, et al., 2013).



شکل ۱۷. نمایی از نانو ذرات اکسید تیتانیوم (Jalal, Ramezaniapour, et al., 2013)



شکل 18. مطالعه تاثیر افزودن درصد های مختلف ذرات نانو اکسید تیتانیوم بر ساختار بتن خود تراکم (a: درصد وزنی صفر) (b: درصد وزنی چهار) (Jalal, Fathi, et al., 2013)

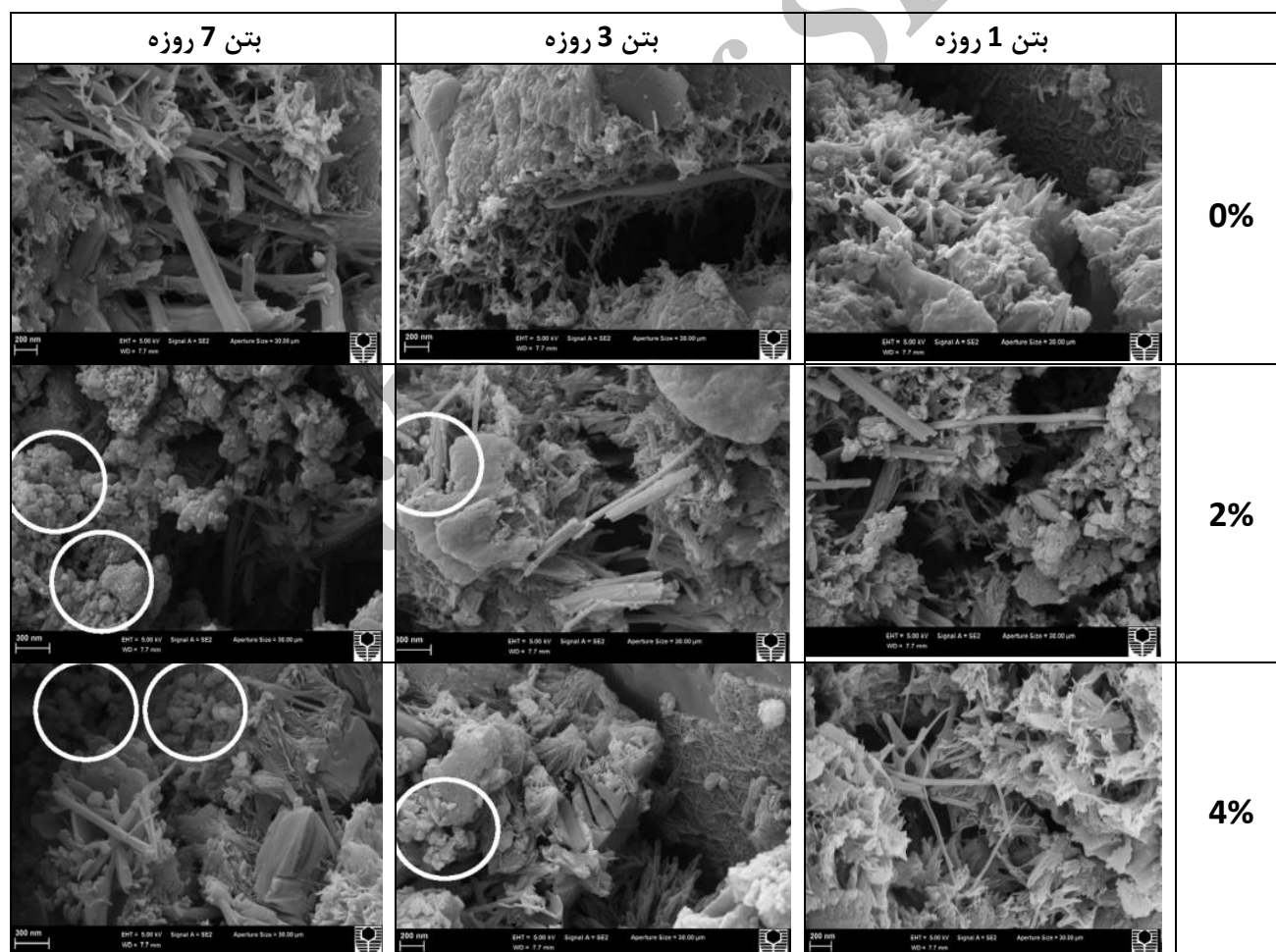


شکل 19. تغییرات مقاومت فشاری نسبت مقاومت ترک خوردگی در حضور درصد های متفاوتی از نانو ذرات اکسید تیتانیوم در بتن خود تراکم (Jalal, Fathi, et al., 2013)

(شکل 19) رابطه بین تغییرات مقاومت ترک خوردگی بتن، با تغییرات مقاومت فشاری بتن را بر اساس درصد های مختلف نانو ذرات اکسید تیتانیوم از صفر تا پنج درصد نشان می دهد که از آن نتیجه گیری می شود که با افزایش میزان درصد نانو ذرات اکسید تیتانیوم از صفر تا پنج درصد، در ابتدا میزان تنش ترک خوردگی، افزایش می یابد ولی بعد از این مقدار افزایش، قدری کاسته می شود. اما در مورد تنش های فشاری با تغییر درصد نانو ذرات اکسید تیتانیوم، در میزان تنش فشاری تغییری بوجود نمی آید (Jalal, Fathi, et al., 2013).

نانو اکسید آلومینیوم

افزودن نانو ذرات اکسید آلومینیوم به مخلوط بتن باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای مدول الاستیسیته بتن می‌شود. تجربه ثابت کرده است که با افزودن ۵ درصد نانو اکسید آلومینیوم، مدول الاستیسیته بتن به اندازه ۱۴۳ درصد افزایش پیدا می‌کند ولی تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی مقاومت بتن ندارد (Z. Li et al., 2006). نظری و ریاحی تاثیر اضافه نمودن نانوذرات اکسید آلومینیوم را بر هیدراتاسیون بتن مورد مطالعه قرار دادند و مشاهده کردند که اضافه نمودن این ذرات موجب کاهش حرارت آزاد شده و شتاب بخشی به پیک زمانی آزاد شدن این حرارت می‌گردد. به طوری که با افزودن ۳ درصد وزنی از نانو ذرات اکسید آلومینیوم به بتن، مقدار حرارت آزاد شده بیشترین افت را خواهد داشت (Rashad, 2013). نظری و ریاحی تاثیر کار پذیری بتن اصلاح شده با نانوذرات اکسید آلومینیوم را برای نسبت‌های وزنی ۰/۵، ۱/۰، ۱/۵ و ۲ درصدی مورد مطالعه قرار دادند و نتایج حاکی از آن بود که افزایش میزان نانو ذرات اکسید آلومینیوم موجب کاهش کار پذیری بتن می‌گردد. همانطور که از شکل مشخص است، استفاده از حداقل میزان استاندارد آب، به میزان اندکی کارپذیری بتن را کاهش می‌دهد (Rashad, 2013).

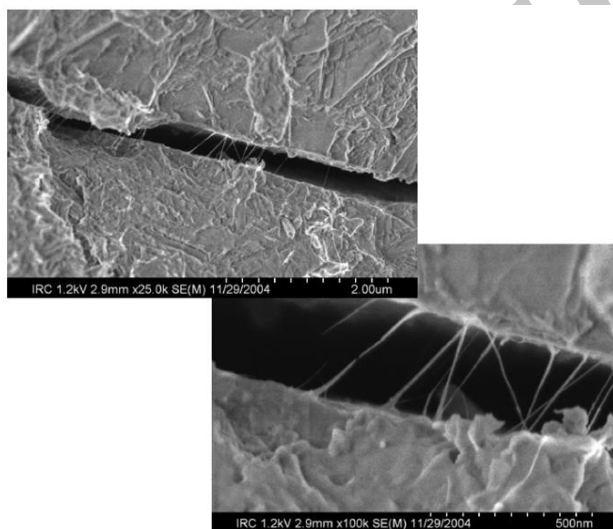


شکل ۲۰. تاثیر افزایش درصد نانو ذرات اکسید آلومینیوم بر ساختار بتن (Barbhuiya et al., 2014)

(شکل ۲۰) تاثیر افزایش درصد نانو ذرات اکسید آلومینیوم بر ساختار بتن را نشان می‌دهد، همانطور که انتظار می‌رفت، افزایش درصد نانو ذرات اکسید آلومینیوم در بتن موجب افزایش تراکم آن می‌گردد (Barbhuiya et al., 2014).

نانو لوله‌های کربنی و نانو الیاف‌ها

نانو لوله‌های کربنی (CNTs) و نانو رشته‌های کربنی (CNFs) به عنوان گزینه‌های اصلی نانو تکنولوژی برای مسلح کردن سیمان‌ها مطرح می‌شوند. مدول الاستیسیته و مقاومت بسیار بالای این نانو مواد، در کنار مقاومت کششی عالی و مشخصات منحصر به فرد الکتریکی و شیمیایی آن‌ها، توانایی مطلوب آن‌ها را برای ایجاد نسل جدیدی از مصالح ساختمانی نشان می‌دهد. استفاده از این نانو مواد به بهبود مشخصات مکانیکی، مقاومت در برابر گسترش ترک‌ها، محافظت در برابر امواج الکترومغناطیس و ایجاد قابلیت خود ترمیمی در مصالح سیمانی منجر می‌گردد (شکل 21). نانو رشته‌های کربنی برخلاف نانو لوله‌ها بسیار راحت‌تر در مخلوط سیمان توزیع می‌شوند و همچنین فرآوری آن‌ها راحت‌تر بوده و هزینه تمام شده آن‌ها برخلاف نانو لوله‌ها بسیار پایین‌تر است (Sanchez & Sobolev, 2010). یکی از مشکلات اصلی این نانو مواد، عدم امکان توزیع یکنواخت آن‌ها در مخلوط سیمان به دلیل آب گریزی بسیار بالای آن‌ها و جاذبه درونی بالای این نانو مواد است و مشکل دیگر این نانو مواد عدم چسبندگی مناسب بین آن‌ها با خمیر سیمان است (Makar et al., 2005).



شکل 21. ترمیم ترک در بتن حاوی نانو لوله‌های کربنی (Makar et al., 2005)

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به منظور بهبود عملکرد بتن خود تراکم، اثر اضافه کردن مواد افزودنی صنعتی (ضایعات صنعت فولاد، سیلیکا فوم، پودر بازالت، پودر سنگ آهک، خاکستر، پودر سنگ مرمر) و نانو ذرات‌ها و نانو اکسیدهای مختلف مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصله به شرح ذیل می‌باشد:

- با استفاده از ضایعات صنعت فولاد، اسلامپ بتن خود تراکم بهتر و کارپذیری آن مطلوب‌تر می‌گردد همچنین، به کار بردن خاکستر، مقدار استفاده از مواد فوق روان کننده به بتن را افزایش می‌دهد.
- با افزایش درصد هریک از مواد افزودنی صنعتی (همچون ضایعات صنعت فولاد، سیلیکا فوم و خاکستر)، میزان مقاومت فشاری بتن خود تراکم کاهش پیدا می‌کند.
- با افزایش درصد مواد معدنی مختلف در بتن خود تراکم، مقاومت بتن در برابر محلول سولفات منیزیم افزایش خواهد یافت.

- با افزودن نانو ذرات رس به بتن خود تراکم، میزان مقاومت فشاری بتن افزایش، نفوذ پذیری آب در بتن کاهش و مقاومت بتن حاصله در بتن نفوذ کلریدها کاهش می یابد.
- با افزودن نانو ذرات سیلیس به بتن خود تراکم، میزان مقاومت فشاری، کششی و خمشی افزایش، زمان گیرش بتن کاهش و نفوذ پذیری آب داخل بتن کاهش خواهد یافت.
- با اضافه کردن نانو ذرات اکسید آهن به بتن خود تراکم، مقاومت فشاری، خمشی و قابلیت خود ترمیمی بتن افزایش پیدا می کند.
- با کاربرد نانو ذرات اکسید تیتانیوم در بتن خود تراکم، مقاومت فشاری و خمشی بتن افزایش، سرعت هیدراتاسیون افزایش و زمان گیرش بتن کاهش می یابد.
- با افزودن نانو ذرات اکسید آلومینیوم به بتن خود تراکم، مدول الاستیسیته بتن به میزان قابل توجهی افزایش یافته ولی بر روی مقاومت فشاری بتن اثری ندارد.
- با به کار بردن نانو لوله های کربنی و نانو الیاف های کربنی در بتن خود تراکم، مقاومت در برابر گسترش ترک در بتن بیشتر می گردد.

منابع

- ASTM, A. (2014). C1611 Standard test method for slump flow of self-consolidating concrete: US: ASTM.
- Balaguru, P. (2005). *Nanotechnology and concrete: Background, opportunities and challenges*. Paper presented at the Proceedings of the International Conference-Application of Technology in Concrete Design.
- Balaguru, P., & Chong, K. (2006). Nanotechnology and concrete: research opportunities. *Proceedings of the ACI Session on Nanotechnology of Concrete: Recent Developments and Future Perspectives*.
- Barbhuiya, S., Mukherjee, S., & Nikraz, H. (2014). Effects of nano-Al₂O₃ on early-age microstructural properties of cement paste. *Construction and building materials*, 52, 189-193.
- Dehn, F., Holschemacher, K., & Weiße, D. (2000). Self-compacting concrete (SCC) time development of the material properties and the bond behaviour. *Selbstverdichtendem Beton*.
- Domone, P. (2006). Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies. *Cement and Concrete Composites*, 28(2), 197-208.
- Domone, P., & Jin, J. (1999). *Properties of mortar for self-compacting concrete*. Paper presented at the Proceedings of the 1st international RILEM symposium on self-compacting concrete.
- Hakamy, A., Shaikh, F., & Low, I. (2015). Characteristics of nanoclay and calcined nanoclay-cement nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*, 78, 174-184.
- Hosseini, P., Afshar, A., Vafaei, B., Booshehrian, A., Molaei Raisi, E., & Esrafil, A. (2015). Effects of nano-clay particles on the short-term properties of self-compacting concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1-21.
- Hwang, C.-L., & Hung, M.-F. (2005). Durability design and performance of self-consolidating lightweight concrete. *Construction and building materials*, 19(8), 619-626.
- Jalal, M., Fathi, M., & Farzad, M. (2013). Effects of fly ash and TiO₂ nanoparticles on rheological, mechanical, microstructural and thermal properties of high strength self compacting concrete. *Mechanics of Materials*, 61, 11-27.
- Jalal, M., Ramezani-pour, A. A., & Pool, M. K. (2013). Split tensile strength of binary blended self compacting concrete containing low volume fly ash and TiO₂ nanoparticles. *Composites Part B: Engineering*, 55, 324-337.
- Jayapalan, A., Lee, B., & Kurtis, K. (2009). Effect of nano-sized titanium dioxide on early age hydration of Portland cement *Nanotechnology in Construction 3* (pp. 267-273): Springer.
- Kawashima, S., Kim, J. H., Corr, D. J., & Shah, S. P. (2012). Study of the mechanisms underlying the fresh-state response of cementitious materials modified with nanoclays. *Construction and building materials*, 36, 749-757.

- Khoshakhlagh, A., Nazari, A., & Khalaj, G. (2012). Effects of Fe₂O₃ nanoparticles on water permeability and strength assessments of high strength self-compacting concrete. *Journal of Materials Science & Technology*, 28(1), 73-82.
- Lachemi, M., Hossain, K. M., Lambros, V., & Bouzoubaa, N. (2003). Development of cost-effective self-consolidating concrete incorporating fly ash, slag cement, or viscosity-modifying admixtures. *ACI Materials Journal*, 100(5), 419-425.
- Li, H., Xiao, H.-g., Yuan, J., & Ou, J. (2004). Microstructure of cement mortar with nano-particles. *Composites Part B: Engineering*, 35(2), 185-189.
- Li, H., Zhang, M.-h., & Ou, J.-p. (2006). Abrasion resistance of concrete containing nano-particles for pavement. *Wear*, 260(11), 1262-1266.
- Li, H., Zhang, M.-h., & Ou, J.-p. (2007). Flexural fatigue performance of concrete containing nano-particles for pavement. *International Journal of Fatigue*, 29(7), 1292-1301.
- Li, Z., Wang, H., He, S., Lu, Y., & Wang, M. (2006). Investigations on the preparation and mechanical properties of the nano-alumina reinforced cement composite. *Materials Letters*, 60(3), 356-359.
- Maghsoudi, A. A., & Arabpour Dahooei, F. (2009). APPLICATION OF NANOTECHNOLOGY IN SELFCOMPACTING CONCRETE DESIGN. *SID*, 22(3), 229-244.
- Makar, J., Margeson, J., & Luh, J. (2005). Carbon nanotube/cement composites-early results and potential applications.
- NYHOLM THRANE, L. (2012). Modelling the flow of self-compacting concrete. *woodheadpublishingonline*, 259-285.
- Okamura, H., Maekawa, K., & Ozawa, K. (1993). High performance concrete Gihoudou Pub: Tokyo.
- Okamura, H., & Ouchi, M. (2003). Self-compacting concrete. *Journal of advanced concrete technology*, 1(1), 5-15.
- Okamura, H., Ozawa, K., & Ouchi, M. (2000). Self-compacting concrete. *structural Concrete*, 1(1), 3-17.
- Ramanathan, P., Baskar, I., Muthupriya, P., & Venkatasubramani, R. (2013). Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures. *KSCE journal of Civil Engineering*, 17(2), 465-472.
- Rashad, A. M. (2013). A synopsis about the effect of nano-Al₂O₃, nano-Fe₂O₃, nano-Fe₃O₄ and nano-clay on some properties of cementitious materials—a short guide for Civil Engineer. *Materials & Design*, 52, 143-157.
- Sanchez, F., & Sobolev, K. (2010). Nanotechnology in concrete—a review. *Construction and building materials*, 24(11), 2060-2071.
- Singh, L., Karade, S., Bhattacharyya, S., Yousuf, M., & Ahalawat, S. (2013). Beneficial role of nanosilica in cement based materials—A review. *Construction and building materials*, 47, 1069-1077.
- Sobolev, K., Flores, I., Torres-Martinez, L., Valdez, P., Zarazua, E., & Cuellar, E. (2009). Engineering of SiO₂ nanoparticles for optimal performance in nano cement-based materials *Nanotechnology in construction* 3 (pp. 139-148): Springer.
- Sobolev, K., & Gutiérrez, M. F. (2005). How nanotechnology can change the concrete world. *American Ceramic Society Bulletin*, 84(10), 14.
- Sonebi, M. (2004). Medium strength self-compacting concrete containing fly ash: Modelling using factorial experimental plans. *Cement and Concrete Research*, 34(7), 1199-1208.
- Su, N., Hsu, K.-C., & Chai, H.-W. (2001). A simple mix design method for self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 31(12), 1799-1807.
- Uysal, M., & Sumer, M. (2011). Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures. *Construction and building materials*, 25(11), 4112-4120.
- Van Khanh, B., & Montgomery, D. (1999). *Mixture proportioning method for self-compacting high performance concrete with minimum paste volume*. Paper presented at the International RILEM symposium on self-compacting concrete.

Surf and download all data from SID.ir: www.SID.ir

Translate via STRS.ir: www.STRS.ir

Follow our scientific posts via our Blog: www.sid.ir/blog

Use our educational service (Courses, Workshops, Videos and etc.) via Workshop: www.sid.ir/workshop