

مقایسه ی بتن حاوی نانو سیلیس و نانو لوله های کربنی

منصور باقری^۱، سیدمحمدجواد دلاوری^۲، مبین استواری^۳

۱- استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه صنعتی بیرجند

۲- دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران دانشگاه صنعتی بیرجند

۳- دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران دانشگاه صنعتی بیرجند

Smjdelavari@gmail.com

چکیده

طی سالهای اخیر تحقیقات گسترده ای برای به دست آوردن بتن هایی با مقاومت بالا انجام شده است. بتن با مقاومت فشاری ۵۰ مگاپاسکال کاربردهای زیادی در صنعت ساخت و ساز دارد. امروزه به کارگیری فناوری نانو به عنوان یک دانشی نو در جهان شاهد پیشرفتی بزرگ را در تولید و ساخت مواد و محصولات با امتیازاتی خاص به دنبال داشته است. از مهمترین پیشرفت های به دست آمده با فناوری نانو ساخت بتن با عملکرد بالا در صنعت ساختمان می باشد. یکی از دلایلی که فناوری نانو توانسته است در بتن دچار تحول گردد این است که در بتن های معمولی کوچکترین ریز دانه های ساختمان بتن سیمان و میکرو سیلیس می باشد که اندازه ایشان به طوری است که نمی تواند خلل و فرج بین بتن را کاملا پر نماید، اما ذرات نانو به دلیل اندازه ی کوچک تر می توانند با پر کردن خلل و فرج باقی مانده باعث بهبود بتن شوند و به عنوان یک مکمل در ساخت به کار گرفته شوند. استفاده ی بیش از حد از مواد نانو در بتن باعث تاثیر مکانیسم هسته زایی و کلوخه شدگی می شود و تاثیر منفی بر خواص مکانیکی بتن از جمله مقاومت فشاری، دارد. در این مطالعه نانو سیلیس و نانو لوله ی کربنی به میزان ۳ درصد مورد بررسی قرار گرفته است و مقایسه ای بین مقاومت فشاری، خمشی و سایشی نمونه ها انجام شد.

کلمات کلیدی: فناوری نانو، بتن با عملکرد بالا، میکرو سیلیس، نانو سیلیس و نانو لوله کربنی

Comparison of concrete containing nano-silica and carbon nanotubes

Mansour Bagheri ¹, Seyed Mohammadjavad Delavari ², Mobin Ostovari ³

1-Assistant Professor of Civil Engineering Department, Birjand University of Technology

2- Student of Civil Engineering, Birjand University of Technology

3- Student of Civil Engineering, Birjand University of Technology

Smjdelavari@gmail.com

Abstract

In recent years, extensive research has been carried out to obtain high strength concrete. High-strength concrete has a compressive strength of 50 MPa and has many applications in the construction industry. Today, the use of nanotechnology as a new knowledge in the world has seen a huge improvement in production, and the production of materials and products with special advantages. The most significant improvements made with nano technology are high-performance concrete in the building industry. One of the reasons why nanotechnology has been able to develop in concrete is that in ordinary concrete, the smallest grains of the building, concrete cement and micro-silica are their size so that they can not fill the gap between the concrete completely. However, nanoscale particles can, due to their smaller size, improve the concrete by filling the remaining porosity and are used as a complement to the construction. Excessive use of nanoscale materials in concrete results in the effect of nucleation and agglutination mechanism and has a negative effect on the mechanical properties of concrete including compressive strength. In this study, the nanosilica and carbon nanotubes were studied at 3%, and a comparison was made between the compressive strength, flexural strength and abrasive properties of the samples.

Keywords: Nanotechnology, High Performance Concrete, Micro Silica, Nano Silica and Carbon Nanotubes

۱. مقدمه

علم نانو نخستین بار توسط ریچارد فایمن در سال ۱۹۵۹ بیان شد. فایمن در مورد "وجود فضایی گسترده در انتها" مطالبی را ارائه نمود. فایمن ایده‌ی تغییر در مواد را برای مقیاس‌های خیلی کوچک مانند اتم، مولکول‌ها و در حالت دقیق‌تر در مقیاس نانو ارائه نمود [۱] و در سال ۱۹۷۴ اصطلاح نانو توسط نوربو تانگوچی برای تعریف دقت مورد نیاز در مورد سطح‌هایی مصالح بیان شد. نانو، که برای تعیین یک میلیاردم یا ۱۰ یک کمیت استفاده می‌شود برابر است با یک میلیاردم متر که این اندازه تقریباً معادل نصف ضخامت یک مولکول دی‌اکسید سیلیسیم است. مواد نانو به عنوان موادی که حداقل یکی از ابعاد آن (طول، عرض، ضخامت) زیر صد نانومتر باشد تعریف شده‌اند. در واقع می‌توان گفت فناوری نانو توانایی بدست گرفتن کنترل ماده در ابعاد نانومتری و بهره‌برداری از خواص و پدیده‌های این بعد در موارد، ابزارها و سیستم‌های نوین است. مواد نانو به عنوان موادی که حداقل یکی از ابعاد آن زیر ۵۰۰ نانومتر باشد، تعریف شده‌اند [۲]. به طور معمول فناوری نانو از دو روش پایه شکل می‌گیرد، ۱- روش بالا به پایین (در این روش بزرگ ساختارها تا مقیاس نانو با حفظ خواص ابتدایی خود و بدون کنترل در سطح اتمی همانند قطعات یک کامپوزیت ریز می‌شوند) ۲- روش پایین به بالا (نام دیگر این روش نانو تکنولوژی مولکولی می‌باشد در این روش ریز ساختارها یا اجزای مولکولی از طریق فرآیندهای خودتجمع و مونتاژ بزرگ می‌شوند) [۳]. بتن دارای خلل و فرج می‌باشد این منافذ و واکنش شیمیایی که بین سیمان و آب صورت می‌گیرد، در مقیاس نانو می‌باشند. حملات شیمیایی بوسیله‌ی منافذ بتن به فولاد درون آن نفوذ کرده و آن را اکسید می‌کند، که نتیجه‌ی آن خوردگی، شکست و ترک خوردگی بتن می‌شود [۴]. ذرات نانو به دلیل اندازه‌ی کوچک تر می‌توانند با پر کردن خلل و فرج باقی مانده باعث بهبود بتن شوند. در این مطالعه نانو سیلیس و نانو لوله‌های کربنی به طور کامل بیان شده‌اند و مقایسه شده‌اند.

۲. نانو سیلیس

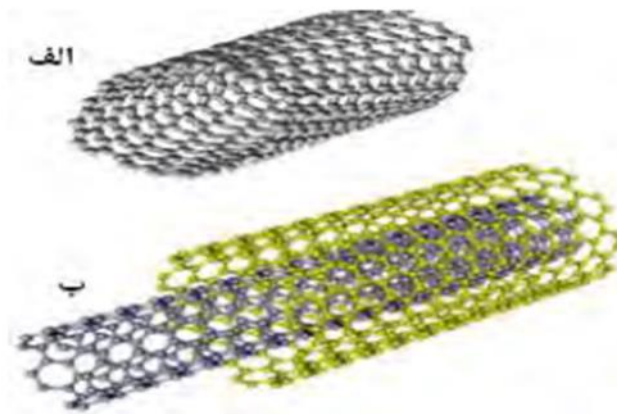
نانو سیلیس متشکل از مجموعه‌ای ذرات کوچک می‌باشد که از بوسیله‌ی پیوندهای کووالانسی و هیدروژنی SiO_2 به هم متصل می‌شوند و ذرات بزرگتری را تشکیل می‌دهند. بر اساس اندازه ذرات اولیه، اندازه دانه‌ها و آگلومره‌های نهایی نانو سیلیس می‌توانند کاربردهای گوناگونی داشته باشند. مزیت اصلی نانو سیلیس مساحت سطح بالای آن می‌باشد که می‌تواند در بسترهای مورد استفاده برهمکنش بیشتری از خود نشان دهد [۵]. کریستال هیدروکسید شش وجهی زیادی در طول واکنش هیدراسیون بین سیمان و آب تولید می‌شوند. این کریستال‌ها در مرز بین سنگدانه‌ها و خمیر سیمان که ناحیه انتقال نام دارد قرار دارند و یک عامل مخرب بتن شناخته می‌شوند. نانو سیلیس دارای سطح ویژه‌ی بسیار بالا و فعالیت خیلی بالا می‌باشد و می‌تواند با واکنش سریع کریستال‌های هیدروکسید ژل کلسیم سیلیکات هیدراته را تولید کند. ژل کلسیم سیلیکات هیدراته باعث پر شدن حفرات بتن می‌شود [۶]. ژل کلسیم سیلیکات ۶۰ درصد محصول هیدراسیون آب و سیمان می‌باشد. قطر ژل کلسیم سیلیکات هیدراته در حدود ۱۰ نانومتر می‌باشد. به همین دلیل نانو سیلیس به خوبی می‌تواند حفرات در بین ساختار ژل کلسیم سیلیکات هیدراته را به خوبی پر نماید [۷].

۲-۱ روش‌های تولید نانو سیلیس

در این مطالعه دو روش برای تولید نانو سیلیس بیان شده است:
روش اول: این روش بر مبنای تخمیر سیلیس در دمای ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ درجه سلسیوس و کم کردن کوارتز در کوره الکتریکی می‌باشد.
روش دوم: این روش کمی متداول تر از روش اول می‌باشد و این روش بر مبنای روش سل-ژل و یا رسوب دهی محلول شیمیایی که در دمای معمولی انجام می‌شود. در این روش ماده آغازکننده واکنش که به طور معمول سدیم سیلیکات و اتم‌های فلزی رادیکال‌های آلی متصل شده می‌باشند، در حلال وارد شده و hp محلول در حال تغییر می‌شود و به تدریج ژل سیلیکا تولید می‌شود. پس از مدتی ژل اضافی گذرانیده می‌شود تا به صورت ژل در بیاید [۸].

۳. نانو لوله های کربنی

نانو لوله های کربنی بر اساس ساختمان گرافیت بنا می شوند. گرافیت از لایه های مجزایی تشکیل شده از اتم های کربن تشکیل شده است که به صورت واحدهایی شش ضلعی که در شش رأس آن اتم کربن قرار دارد آرایش یافته اند. قطر نانو لوله های کربنی بین یک تا دو نانومتر و طول آن گاه تا چند میکرومتر نیز می باشد. انتهای هر دو سوی نانو لوله ها می تواند با نیمه ای از یک فولرین مسدود باشد یا نباشد [۹]. اما نانو لوله ها ممکن است علاوه بر داشتن اجزای شش ضلعی، اجزای پنج ضلعی داشته باشند [۱۰]. طول نانو لوله های کربنی تا یک سانتیمتر هم رسیده است. اما نسبت طول به شعاع نانو لوله های کربنی تا ۱۰۷ می رسد. طول نانو لوله های کربنی می تواند به بیش از یک سانتیمتر برسد. به طور معمول چگالی نانو لوله ها کمتر از 1500 K/m^3 می باشد [۱۱ و ۱۲]. ویژگی مهم نانو لوله ها نسبت طول به شعاع کم و چگالی جرمی کم می باشد این ویژگی باعث می شود تا نانو لوله های کربنی باعث مسلح شدن بتن شوند. در نانو لوله های کربنی به طور قوی اتصال بین سطوح تقویت شده است با وجود وزن اندک نانو لوله ها، می توان عملکرد بهتری را نسبت به الیاف شاهد بود. نانو لوله های کربنی ۱۰۰ برابر فولاد استحکام دارند، در حالی که فولاد ۶ برابر نانو لوله ها چگالی دارد. استحکام نانو لوله ها به قطر، چگونگی رول شدن صفحات گرافیت و تبدیل شدن به نانو لوله (کایدالیتی)، و تک و چند دیواره بودن نانو لوله ها مربوط می باشد. نانو لوله های تک جداره در مقایسه با نانو لوله های چند جداره از استحکام کمتر (به دلیل پیوند ضعیف داخلی) برخوردار هستند [۱۳].



شکل ۱- نانو لوله های تک جداره و چند جداره

۳-۱ ویژگی های نانو لوله های کربنی

نانو لوله های کربنی دارای ویژگی های "خاصیت جذب و گسیل نور، دارای ضریب تحرک الکتریسیته بسیار بالا، مدول یانگ بالا، بروز خواص الکتریکی و میکانیکی منحصر به فرد، قدرت رسانایی خیلی بالا، اندازه بسیار ریز و برخورداری از خاصیت منحصر به فرد ترابری پرتابهای " می باشند [۱۴]. نانو لوله های کربنی در بتن، روی حفره ها و ترک ها را همانند پل هایی می پوشانند و با انتقال بار اطراف ترک ها و حفره ها بهبود می یابند. نانو لوله های کربنی به علت نیروی قوی و اندروالسی تمایل به ته نشینی دارند و به همین علت برای پراکنده کردن آن ها در خمیر سیمان با مشکلات فراوانی روبه رو هستند. راهای فراوانی برای توزیع نانو لوله ها وجود دارد، از جمله استفاده از محلول های آبی، استفاده از مواد نگهدارنده و دستگاه التراسونیک [۱۵].

۳-۲ روش های تولید نانو لوله های کربنی

نانو لوله های کربنی به روش های زیر تولید می شوند [۱۶]:

- الکترولیز
- رشد فاز بخار
- سنتز شعله
- رسوب دهی شیمیایی بخار به کمک حرارت
- رسوب دهی شیمیایی بخار به کمک پلاسما
- تبخیر یا ساییش لیزر

۳-۳ الکترولیز

به کمک این روش می توان نانو لوله های چند دیواره تولید کرد. در این روش الکترولیز کلرید لیتیوم مذاب در یک محفظه گرافیتی و آند آن یک بوته گرافیتی می باشد.

۳-۴ رشد فاز بخار

این روش یکی از روش های تولید انبوه نانو لوله ها می باشد، به طوری که بدون استفاده از هیچ لایه ای، فقط با مخلوط کردن هیدروکربن ها و فلز کاتالیست در محفظه واکنش، نانولوله ها تهیه می شوند.

۳-۵ سنتز شعله

این روش هم یکی از روش های انبوه می باشد، اما در این روش مقدار فراوانی کربن بی شکل تولید می شود. در این روش که با احتراق متان باعث ایجاد شعله می شود، وارد نمودن هیدروکربن های دیگر و کاتالیست ها در آن، باعث تولید نانو لوله ها می شود.

۳-۶ رسوب دهی شیمیایی بخار به کمک حرارت

این روش شامل رشد کاتالیزوری عنصر کربن در دمای بالا می باشد. در این فرآیند از نانو ذرات فلزی (که به عنوان کاتالیست مورد استفاده قرار می گیرند) نیز استفاده می شود. در این روش باید کربن به شکل گازی تبدیل شود، سپس با استفاده از منبع انرژی، مولکول های گازی کربن را شکسته و به رادیکال های آزاد و واکنشی تبدیل کرده، آن گاه این گونه های واکنشی بر روی etartsbus گرم می شوند و پوشش داده شده از کاتالیست ها نفوذ پیدا می کنند. تولید نانو لوله ها به کمک رسوب دهی شیمیایی بخار به کمک حرارت یک فرآیند دو مرحله ای می باشد، مرحله ی اول تولید نانو لوله های کربنی با روش کاتالیست و مرحله ی دوم آن سنتز عملی نانولوله ها تشکیل شده می باشد.

۳-۷ رسوب دهی شیمیایی بخار به کمک پلاسما

این روش واکنش توسط پلاسما فعال می شود و رسوب گذاری در دمای بسیار پایین صورت می گیرد. نانو لوله های کربنی را می توان روی شیشه سود آهکی تولید کرد.

۳-۸ تبخیر یا سایش لیزری

در این روش از دو میله گرافیکی به عنوان الکتروود استفاده می شود. در امتداد محور آند حفرهای ایجاد شده و با مخلوطی از پودر گرافیت و کاتالیست پر می شود. کاتد و آند درون یک راکتور به صورت افقی نصب می شوند. هنگامی که خلا مناسب برقرار شد گاز هلیوم یک جرایان CD بین ۵۰ تا ۱۰۰ آمپر از بین دو الکتروود گرافیکی عبور می کند و قوس الکتریکی ایجاد می کند. گرمای زیاد حاصل از قوس الکتریکی، آند گرافیتی تو خالی را تبخیر و یونیزه می کند. کاتیونهای کربن اتمی تولید شده، به طرف کاتد حرکت کرده و با گرفتن الکترون بر روی سطح کاتد شروع به رشد می کنند. علیرغم سهولت این روش در تولید نانولوله های کربنی، مقدار کربن آمورف تولید شده در این روش زیاد بوده و فرایند پیوسته نیست. همچنین اندازه الکتروودها و راکتور، راندمان واکنش را محدود می سازند. محصول روش قوس الکتریکی، معمولاً محتوی نانولوله های چنددیواره می باشد که به شرایط آزمایش مانند جریان قوس الکتریکی، فشار و نوع گاز بستگی دارد. این روش نیاز به الکتروودهای گرافیتی با خلوص بالا و ذرات فلزی و گازهای هلیوم، آرگون، یا هیدروژن با خلوص بالا دارد. به علاوه، محصول تولید شده توسط این روش، نیاز به عملیات خالص سازی نیز دارد. بنابراین، این روش، روش گرانی است.

۴. طرح اختلاط نمونه ها

در این مطالعه طرح اختلاط نمونه ها بر اساس آییننامه ACI انجام شده است و در جدول ۱ مشاهده می شود. در این پژوهش به منظور بررسی خواص مکانیکی و دوام نمونه های بتنی ۳ طرح اختلاط بتنی شامل طرح اختلاط شاهد و طرح های حاوی نانو سیلیس و نانو لوله های کربنی به میزان ۳ درصد در نظر گرفته شده است. کلیه طرح ها دارای نسبت آب به سیمان ۰٫۴۷ و میزان مواد سیمانی ۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب می باشد.

جدول ۱- طرح اختلاط چند نمونه حاوی نانو سیلیس و نانو لوله های کربنی

نام نمونه	مقدار سیمان (گرم)	مقدار آب (CC)	نانو سیلیس %	نانو لوله ی کربنی %	سنگ دانه (گرم)
CMW3	۲۶۳۸	۱۳۱۹	۰	۳	۱۳۲۰۰
NCi3	۲۶۳۸	۱۳۱۹	۳	۰	۱۳۲۰۰
PC	۲۶۳۸	۱۳۱۹	۰	۰	۱۳۲۰۰

۵. مقاومت فشاری و خمشی نمونه PC

مقاومت فشاری و خمشی نمونه های شاهد (PC) در جدول ۲ نشان داده شده است. در این طرح طبق استاندارد ملی شماره ISIRI581 نمونه های فشاری و خمشی را در روزهای ۷ و ۱۴ و ۲۸ مورد آزمایش قرار گرفته شد.

جدول ۲- مقاومت فشاری و مقاومت خمشی نمونه های PC

نام نمونه	مقاومت فشاری ۷ روزه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه	مقاومت خمشی ۱۴ روزه	مقاومت خمشی ۲۸ روزه
PC1	۲۰۶/۵	۲۸۵	۵۹/۲	۶۳/۶
PC2	۲۱۱/۲	۲۹۳/۶	۵۸/۴	۶۶
PC3	۲۰۹/۶	۲۹۱/۴	۶۰/۳	۶۵/۷
میانگین	۲۰۹/۱	۲۹۰	۵۹/۳	۶۵/۱

۶. مقاومت فشاری و خمشی نمونه NCI3

مقاومت فشاری و خمشی نمونه های حاوی ۳ درصد نانو سیلیس (NCi) در جدول ۳ نشان داده شده است. در این طرح طبق استاندارد ملی شماره ISIRI581 نمونه های فشاری و خمشی را در روزهای ۷ و ۱۴ و ۲۸ مورد آزمایش قرار گرفته شد.

جدول ۳- مقاومت فشاری و مقاومت خمشی نمونه های NCI3

نام نمونه	مقاومت فشاری ۷ روزه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه	مقاومت خمشی ۱۴ روزه	مقاومت خمشی ۲۸ روزه
NCi31	۲۹۹/۳	۳۸۹/۲	۷۰/۶	۸۵/۲
NCi32	۳۰۹	۳۹۸/۷	۷۰	۸۱/۳
NCi33	۲۹۸/۷	۳۸۵/۴	۶۶/۷	۸۰/۴
میانگین	۳۰۲/۳	۳۹۱/۱	۶۹/۱	۸۲/۳

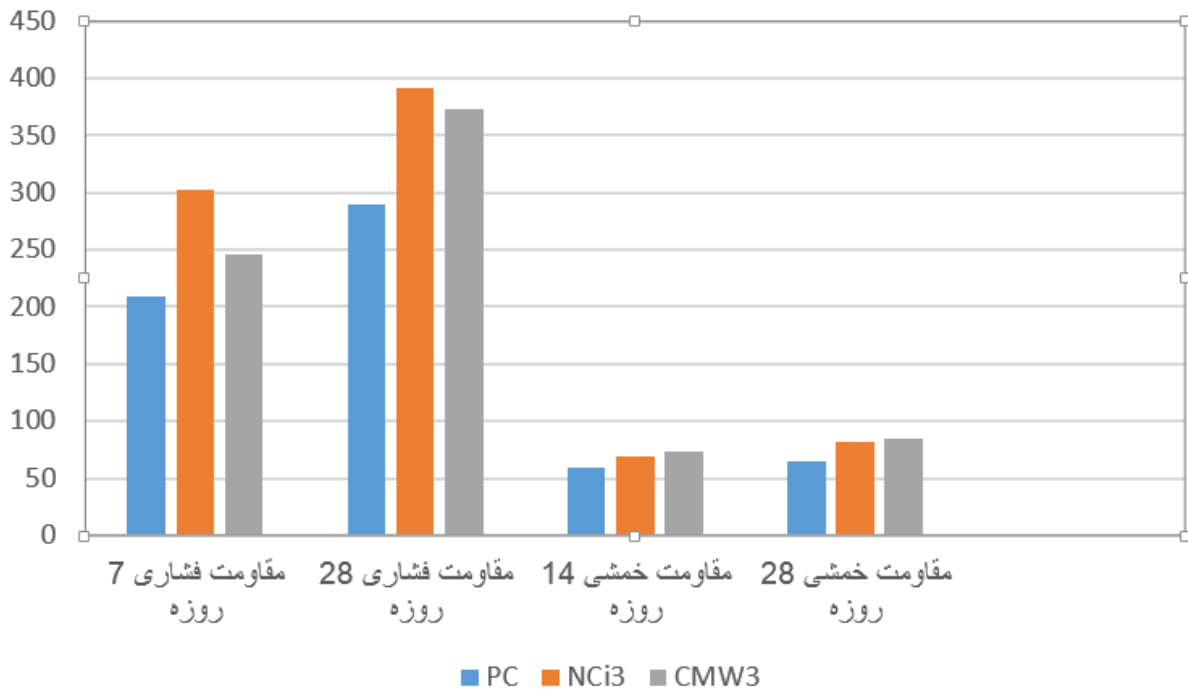
۷. مقاومت فشاری و خمشی نمونه CMW3

مقاومت فشاری و خمشی نمونه های حاوی ۳ درصد نانو لوله ی کربنی (CMW3) در جدول ۲ نشان داده شده است. در این طرح طبق استاندارد ملی شماره ISIRI581 نمونه های فشاری و خمشی را در روزهای ۷ و ۱۴ و ۲۸ مورد آزمایش قرار گرفته شد.

جدول ۴- مقاومت فشاری و مقاومت خمشی نمونه های CMW3

نام نمونه	مقاومت فشاری ۷ روزه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه	مقاومت خمشی ۱۴ روزه	مقاومت خمشی ۲۸ روزه
CMW 31	۲۳۶/۳	۳۷۴	۷۲/۴	۸۵/۷
CMW 32	۲۵۱/۳	۳۷۰/۳	۷۶/۲	۸۴/۸
CMW 33	۲۵۰/۴	۳۷۳/۵	۷۰/۴	۸۴/۲
میانگین	۲۴۶	۳۷۲/۶	۷۳	۸۴/۹

در شکل ۲ سه نمونه ی فوق بر نمودار نمایش داده شده اند.



شکل ۲- مقاومتهای فشاری و مقاومتهای خمشی نمونه‌ها

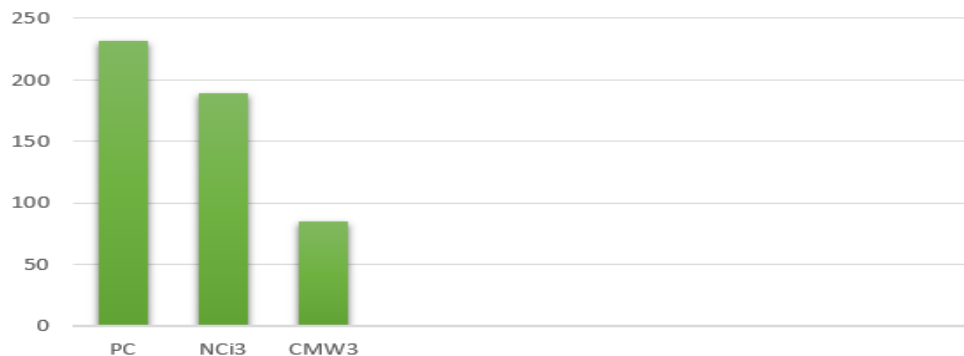
۸. مقاومت سایشی نمونه‌ها

ASTM استاندارد بر مبنای مقدار حجم کاسته شده از ماده را برای مقاوم‌سنجی ماده به سایش پیشنهاد داده است. در نظر گرفتن حجم کاسته شده بجای جرم، معیار دقیق‌تریست بویژه هنگامیکه مقایسه مقاومت به سایش چند ماده با چگالی‌های متفاوت مد نظر باشد. سایش همانند خزش و خستگی از فرایندهاییست که باعث تخریب و ناکارآمدی ماده پس از مدت زمانی است.

جدول ۵- مقاومت سایشی نمونه‌ها

مقاومت سایشی ۲۸ روزه	نام نمونه
۲۳۲	PC
۱۸۹/۲	NCi3
۸۴/۹	CMW3

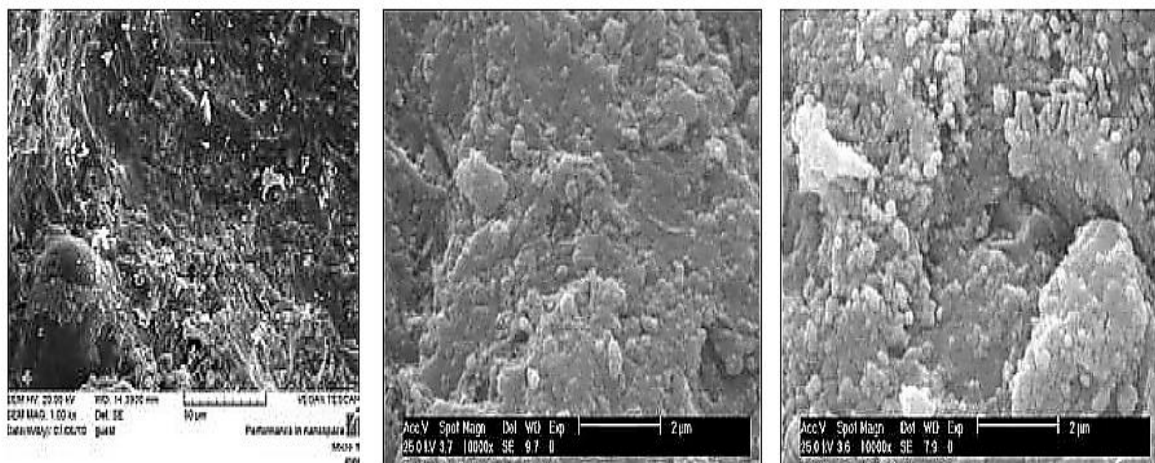
مقاومت سایشی نمونه‌ها در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳- مقاومت سایشی ۲۸ روزه ی نمونه ها

۹. آنالیز ساختار

تصاویر میکروسکوپ SEM (الکترونی) در شکل ۴ به مقایسه نمونه های حاوی نانو سیلیس و نانو لوله ی کربنی و نمونه شاهد پرداخته است با توجه به شکل ۴ بتن حاوی نانو سیلیس تاثیر به مراتب بیشتری نسبت به بتن حاوی نانو لوله ی کربنی و بتن شاهد در متراکم نمودن خمیر ساختار و حذف حفرات دارد که به دلیل خواص پزولانی نانو سیلیس است.



شکل ۴- مقایسه تراکم یک نواحی ساختار نمونه ها

۱۰. نتیجه گیری

نانو سیلیس و نانو لوله های کربنی به عنوان دو نوع از مهم ترین محصولات نانو تکنولوژی به شمار می روند که در بتن قابلیت استفاده را دارند. استفاده از نانو سیلیس بر روی مقاومت فشاری در سنین اولیه سیر صعودی دارد اما بعد از ۲۸ روز روند افزایش مقاومت سیر نزولی پیدا می کند. با توجه به نتایج نمونه ها ملاحظه می شود که نمونه های حاوی نانو سیلیس عملکردی بهتر نسبت به نمونه های حاوی نانو لوله های کربنی و بتن معمولی دارند. این امر به دلیل فعالیت

پزولانی نانو سیلیس می باشد که باعث متراکم نمودن ساختار سیمان و حذف حفرات می شود. استفاده ی بیش از حد از مواد نانو در بتن باعث تاثیر مکانیسم هسته زایی و کلوخه شدگی می شود و تاثیر منفی بر خواص میکانیکی بتن از جمله مقاومت فشاری دارد. نانو لوله های کربنی ذره نیستند و به شکل به شکل لوله های استوانه ای می باشند و نسبت به نانو سیلیس مقاومت بیشتری نسبت به خوردگی، ترک و مقاومت کششی بیشتری دارا می باشند.

۱۱. مراجع

- [1] Feynman R. There's Plenty of Room at the Bottom (Reprint from speech given at annual meeting of the American Physical Society). Eng Sci 1960; 23:22–36.
- [2] ASTM 2456-06 Standard Terminology Relating to Nanotechnology .
- [3] Drexler KE, Peterson C, Pergamit G. "Unbounding the Future: The Nanotechnology Revolution". New York: William Morrow; 1991.
- [۴] کتاب نانوتکنولوژی ، آیینه تکنولوژی آفرینش ، دفتر همکاریهای فن آوری ریاست جمهوری در شرکت نفت کمیته مطالعات سیاست نانوتکنولوژی
- [5] ASTM-C1240, Standard Specification for Silica Fume for Use as a Mineral Admixture in Hydraulic Cement Concrete, American Society of Testing Material; (1997).
- [۶] خسته بند، حامد، سهرابی، محمدرضا، صمیمی عبدالرضا، ۱۳۸۸ بررسی اثر نانو سیلیس بر خواص میکانیکی بتن سبک هشتمین کنگره ی بین المللی مهندسی عمران دانشگاه شیراز
- [7] Ye Qing, Zhang Zenan, Kong Deyu, Chen Rongshen, "Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume" College of Architecture and Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, 310014 Hangzhou, PR China , accepted 7 September 2005.
- [۸] جوادین، سید ادریس فضلی عبدالحسین موسوی سید مهدی روزمهر فوزیه ۱۳۹۱ بهبود خواص بتن حاوی تراس جاجرود با نانو سیلیس نهمین کنگره ی بین المللی مهندسی عمران دانشگاه صنعتی اصفهان
- [9] Mildred, D. Gene, D. Peter, E. Richiro, S. (1998), "Carbon nanotubes. Physics World."
- [10] Sigma Aldrich. Fullerenes and Carbon Nanotubes - Structure, Properties and Potential Applications.2006.
- [11] Wang, G., Zhao, Y. and Yang, G. , (2006) , " Mechanical Properties of Carbon Nanotubes " , Appl. Phys , 69, pp 255–260.
- [12] Mateiu, R., Davis,Z., Madsen, D., Molhave, K., Boggild, P., Rassmusen, A., Brorson, M. , Jacobsen, C. and Boisen, A. (2004) , "An approach to a multi-walled carbon nanotube based Mass sensor" , Microelectronic Engineering , 73 , pp 670-674 .
- [13] "Carbon nanotubes cement composites",Giuseppe Ferro, Jean-Marc Tulliani, , Simone Musso,



مرکز تحقیقات
راه، مسکن و شهرسازی

دهمین کنفرانس ملی بتن
۱۵ و ۱۶ مهر ماه ۱۳۹۷
مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی



انجمن علمی بتن ایران
انجمن بتن ایران
انجمن علمی بتن ایران

Italia, 13-15 Giugno 2011; ISBN 978-88-95940-36-6

[۱۴] فروغی، م. "آشنایی با مفاهیم کلی فناوری نانو"، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد 6.

[۱۵] کشاورز روح الله محبی ابوالفضل مرشدیان جلیل ۱۳۸۸ مطالعه رفتار میکانیکی و میکرو ساختار بتن - نانو لوه های کربنی چند دیواره اصلاح شده با گروه عاملی کربوکسیلیک مجله تحقیقات مواد نانو کامپوزیتی

[۱۶] قادری دهکری، مهرداد، بررسی ساختار و روش های سنتز نانو لوله های کربنی