

Ministry of Science,  
Research & Technology  
License Number  
3/3/3/270961

Tehran - Iran



تهران - ایران

Conference code: 97180-21302

کد اختصاصی کنفرانس: ۹۷۱۸۰-۲۱۳۰۲

جمهوری اسلامی ایران  
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری  
شماره مجوز  
۳/۳/۳/۲۷۰۹۶۱

## مروری بر کاربرد های نانوتکنولوژی و نانومواد در مهندسی عمران

محمد قزل عاشقی<sup>۱</sup>، محمد امیری<sup>۲\*</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی (واحد اراک)، راک، ایران
۲. دانشجوی دکترا نانومواد. پژوهشکده علوم و فناوری نانو، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

## چکیده

نانوتکنولوژی یک شاخه نوظهور از علوم است که مرتبط با سنتز، ادوات و مشخصه یابی مواد در مقیاس نانومتر است. نانوتکنولوژی یکی از فعال ترین حوزه های پژوهش است که بسیاری از رشته ها از پزشکی و کشاورزی تا حوزه های علوم پایه مانند فیزیک و شیمی و رشته های مهندسی مانند مهندسی مواد، الکترونیک و عمران را دربرمی گیرد. در زندگی امروز، اگرچه استفاده از مواد پایه سیمان نقش حیاتی در توسعه زیرساخت بازی می کند با این حال از لحاظ زیست محیطی با انتشار گاز دی اکسید کربن نگرانی هایی نیز به وجود آورده است. با این دیدگاه، محققین همیشه به دنبال تکامل مواد جدید و جایگزین به سمت راه حل پایدار و سبز بوده اند. مشاهده می گردد که درک بهتر مهندسی پیچیده ساختار مواد پایه سیمان در سطح نانو، قطعاً منتج به نسل جدید مواد ساختمانی با خواص، مقاومت و دوام بهبود یافته خواهد شد. در حال حاضر فعال ترین زمینه های پژوهش درگیر با سیمان و بتن، درک هیدراتاسیون ذرات سیمان و استفاده از اجزای با اندازه نانومتر هست. علم بتن یک حوزه پژوهش چند رشته ای است که نانوتکنولوژی به صورت بالقوه پیشنهاد فرصت بهبود درک رفتار بتن را می دهد، تا خواص آن مهندسی شود و هزینه های زیست محیطی و تولید مواد ساختمانی کاهش یابد. سنتز اجزای سیمان پرتلند، مکانیزم هیدراتاسیون و نقش انواع مختلف نانوذرات در سیمان و بتن در این مقاله بحث و بررسی شده است.

## ۱- مقدمه

نانوتکنولوژی زمینه ای نوظهور از پژوهش است که اثر بالقوه ای در حوزه های علوم و تکنولوژی دارد. علم نانو ساختارها یک زمینه وسیع تحقیقات بین رشته ای است که در طی چندین سال گذشته به طور گسترده ای در سراسر جهان در حال رشد بوده است. در همین راستا و در صنعت ساخت و ساز استفاده از نانومواد استحکام بخش می تواند یک کاندید اصلی از

\*نویسنده مسئول: محمد امیری

TEL:021-66164124

E-mail address: Mohammad.Amiri@mehr.sharif.ir

Islamic Republic of Iran  
Ministry of Science,  
Research & TechnologyLicense Number  
3/3/3/270961

Tehran - Iran



تهران - ایران

Conference code: 97180-21302  
کد اختصاصی کنفرانس: ۹۷۱۸۰-۲۱۳۰۲جمهوری اسلامی ایران  
وزارت علوم، تحقیقات و فناوریشماره مجوز  
۳/۳/۳/۲۷۰۹۶۱

بکارگیری نانو تکنولوژی در مهندسی عمران باشد. استفاده از سیمان پرتلند به عنوان چسب اصلی بتن تاثیرات قابل توجهی بر محیط زیست می گذارد. زیرا تولید هر تن سیمان پرتلند نیازمند تقریباً ۱/۶ تن مواد خام، عمدتاً کوارتز و سنگ آهک است و تقریباً ۰/۸ تن دی اکسید کربن (CO<sub>2</sub>) در جو آزاد می کند که در نتیجه مسئول احتمالی ۵ تا ۷ درصد از انتشار گازهای گلخانه ای جهان است. انتشار گازهای گلخانه ای، مصرف انرژی و منابع طبیعی مرتبط با تولید سیمان از چالش های کلیدی صنعت سیمان هستند که از با سنتز خلاقانه و پایدار مواد جدید پایه سیمان زمینه حل این چالشها فراهم می شود. محتمل ترین روش ها برای موفقیت در این چالش می تواند شامل موارد زیر باشد:

۱- آماده کردن نانسیمان و درک هیدراتاسیون مواد دارای خواص سیمانی از نظر علم نانو.  
۲- جایگزین کردن سیمان پرتلند به صورت جزئی با مواد دارای خواص سیمانی مکمل یا سایر مواد ترجیحاً نانوبعدی. استفاده از نانوذرات سیمان که به دو روش بالا به پایین<sup>۱</sup> و پایین به بالا<sup>۲</sup> ساخته می شوند علاوه بر کاهش زمان گیرش ملات و کاهش انتشار کربن، خواص مکانیکی بتن را افزایش می دهد. در روش بالا به پایین از آسیاب های سیاره ای به صورت فیزیکی برای نانو اندازه کردن ذرات سیمان استفاده می شود، این در حالی است که روش های پایین به بالا غالباً شامل روش های شیمیایی است [۱].

بتن به عنوان یک ساختار پیچیده از هیدرات های فازهای سیمان، افزودنی ها و سنگدانه ها در ابعاد نانومتر، کاندیدی عالی برای دستکاری نانو تکنولوژی و کنترل خواص است، علاوه بر این به عنوان یک ماده چند مقیاسی می تواند در مقیاس نانو تا ماکرو در نظر گرفته شود (شکل ۱) [۲]. اهمیت قابل توجه نانو تکنولوژی در آینده صنعت ساخت و ساز به دلیل درک پدیده های اساسی در سیمان و بتن در مقیاس نانومتر می باشد. (مثلاً خواص مکانیکی و ساختاری عمده فازهای هیدرات، منشاء پیوستگی سیمان، هیدراتاسیون سیمان، سطوح مشترک در بتن و مکانیزم های فرسایش) [۲-۵]. البته روند تطبیق این بخش با انقلاب های صورت گرفته در نانو تکنولوژی نسبتاً کند است و بهره برداری از نانو تکنولوژی در بتن در مقیاس تجاری صرفاً محدود به چند نتیجه موفقیت آمیز و تبدیل به محصولات قابل فروش است. چندین دلیل احتمالی برای این تأخیر وجود دارد که می تواند ناشی از فقدان درک مکانیزم های فیزیکی و شیمیایی و ساختار در مقیاس نانومتر، فقدان تجهیزات مناسب و همچنین قیمت نسبتاً کم بتن باشد. در حال حاضر، کاربرد نانومواد و بررسی بتن در مقیاس نانومتر به عنوان زمینه ای نوظهور تمرکز بسیاری از محققین را به خود جلب کرده است. در این مقاله سعی شده تا اهمیت نانو تکنولوژی و علم نانو در سیمان و بتن به خصوص سنتز چند نانسیمان، درک مکانیزم هیدراتاسیون، نقش نانومواد افزودنی چندبعدی در سیمان و بتن و غیره مورد بحث قرار گیرد.

<sup>1</sup> Top Down<sup>2</sup> Bottom Up



Ministry of Science,  
Research & Technology  
License Number  
3/3/3/270961

Tehran - Iran



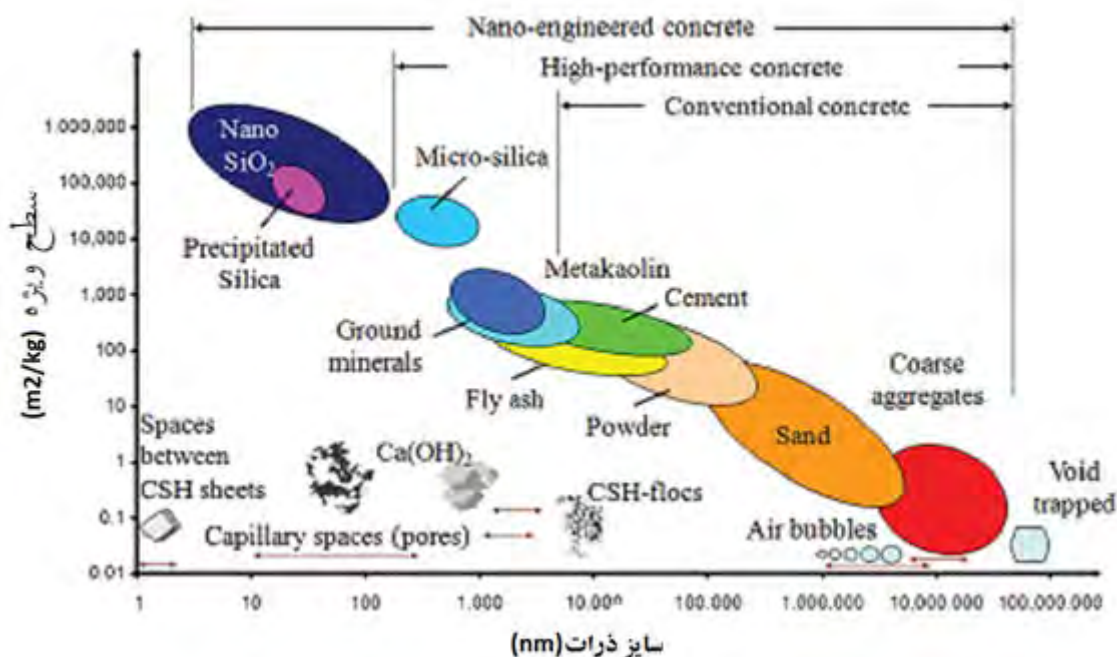
تهران - ایران

Conference code: 97180-21302

کد اختصاصی کنفرانس: ۹۷۱۸۰-۲۱۳۰۲



جمهوری اسلامی ایران  
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری  
شماره مجوز  
۳/۳/۳/۲۷۰۹۶۱



شکل ۱- محدوده سایز ذرات و ناحیه سطح مشخصه اجزای بتن [۲].

## ۲- مهندسی افزودن نانوذرات به بتن

با کوچک شدن سایز ذرات، نسبت سطح به حجم یا همان سطح ویژه افزایش می‌یابد. نانوذرات با توجه به سطح ویژه فوق العاده، پتانسیل و واکنش پذیری بسیار بالایی دارند و این موضوع کلید اصلی جذابیت نانوذرات در علوم مختلف است [۶،۷]. از طرفی مهمترین عامل به منظور کارایی نانوذرات، توزیع<sup>۱</sup> مناسب آنها در ماتریکس‌های مختلف است. در حقیقت سطح ویژه بالای نانوذرات و نانو ساختارها معمولاً منجر به چسبیدن خود آنها به یکدیگر می‌شود که اصطلاحاً به این حالت کلوخه‌ای شدن<sup>۲</sup> گفته می‌شود. کلوخه‌ای شدن مهمترین چالش در سیستم‌های حاوی نانو ساختارها است که نه تنها مؤثر واقع نمی‌شود، بلکه می‌تواند با تجمع ذرات در یک ناحیه و کاهش همگنی سیستم، خواص فیزیکی و مکانیکی را به شدت کاهش دهد. پس اولین گام در استفاده از افزودنی‌های نانومتری جلوگیری از کلوخه‌ای شدن نانوذرات به منظور اتصال آنها به زمینه است. محققان سه روش کلی عملیات مکانیکی مانند استفاده از همزن‌های دور بالا یا پراب ماورای صوت (اولتراسونیک)<sup>۳</sup>، اصلاح فیزیکی سطح و اصلاح شیمیایی سطح یا عامل دار کردن سطح نانوذره را به منظور بهبود توزیع نانوذرات در زمینه پیشنهاد کرده‌اند، که در ذیل به آنها اشاره شده است [۸،۹].

<sup>1</sup> Dispersion

<sup>2</sup> Agglomeration

<sup>3</sup> Ultrasonic



Ministry of Science,  
Research & Technology  
License Number  
3/3/3/270961

Tehran - Iran



تهران - ایران

Conference code: 97180-21302  
کد اختصاصی کنفرانس: ۹۷۱۸۰-۲۱۳۰۲



جمهوری اسلامی ایران  
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری  
شماره مجوز  
۳/۳/۳/۲۷۰۹۶۱

## ۲-۱ روش های مکانیکی افزایش توزیع

توزیع مناسب می تواند با استفاده از یکی از روش های مکانیکی همچون، اولتراسونیک، بال میل، استفاده از تنش های برشی در همزن، اکستروژن و همزن دور بالا بدست آید. در میان همه موارد فوق استفاده از اولتراسونیک به طور گسترده ای برای توزیع همگن نانوساختارها در محیط مایع به کار برده می شود. به عنوان مثال پراب اولتراسونیک با تأمین انرژی زیاد، تنش برشی موضعی بزرگی برای شکستن خوشه های نانولوله های کربنی<sup>۱</sup> (CNT) فراهم می کند. در صورتی که انرژی اولتراسونیک کم باشد، نمی توان به توزیع مطلوب رسید و از طرفی چنانچه انرژی اولتراسونیک در مقادیر بالا تنظیم شود منجر به شکستن خود نانولوله و کاهش طول آن و بالتبع کاهش سطح ویژه می گردد که این امر نیز نامطلوب است. فلذا می بایست از مقدار انرژی بهینه در فرآیند اولتراسونیک استفاده کرد [۱۰]. از طرفی برخی پژوهشگران مانند الیفر و همکاران [۱۱] مدعی شده اند که فرآیند اولتراسونیک برای CNT ها اغلب منجر به ورقه ای شدن و توزیع موقت آنها گشته و پدیده کلوخه ای شدن مجدد برای این ساختارها اتفاق می افتد. برای بهبود توزیع نانوذرات سلیکا<sup>۲</sup> (NS) در بتن، پژوهشگران اغلب از همزدن این نانوذرات در محیط آبی توسط همزن با دور ۱۲۰ rpm و سپس اضافه کردن پلی کربوکسیلات<sup>۳</sup> استفاده کرده اند. با این روش علاوه بر افزایش توزیع نانوذرات، کارایی بتن نیز ارتقاء می یابد [۱۲].

## ۲-۲ اصلاح فیزیکی سطح

در این روش اغلب از سورفکتانت<sup>۴</sup> ها به منظور بهبود توزیع نانوساختارها در آب استفاده می گردد. مکانیسم اصلی بدین صورت است که سورفکتانت از یک سمت به CNT می چسبد و با کاهش انرژی سطحی آن، سبب افزایش پراکندگی آن در محیط آبی می شود. اگرچه استفاده از سورفکتانت از کلوخه ای شدن نانومواد جلوگیری می کند، اما استفاده از نوع نامناسب آن می تواند ناسازگاری هایی با ملات سیمان به وجود آورد. برای مثال این امکان وجود دارد که فرآیند هیدراتاسیون سیمان را به تعویق بیندازد و یا کلاً از هیدراتاسیون ملات جلوگیری کند یا هوای اضافی را داخل ملات حبس کند که منجر به افزایش تخلخل بتن گردد و یا با سایر افزودنی ها وارد واکنش های نامطلوب گردد [۱۳].

## ۲-۳ اصلاح شیمیایی سطح

کلیات این روش بدین صورت است که گروه های عاملی به سطح نانوساختار چسبانده می شود. مثلاً در هنگام استفاده از نانوساختارهای کربنی مانند CNT، آبریز بودن این نانوساختار استفاده آن در بتن را محدود می کند. لی و همکاران [۱۴]

<sup>1</sup> Carbon nanotube

<sup>2</sup> Nano SiO<sub>2</sub>

<sup>3</sup> Polycarboxylate

<sup>4</sup> Surfactant



Islamic Republic of Iran  
Ministry of Science,  
Research & Technology  
License Number  
3/3/3/270961

Tehran - Iran



تهران - ایران

Conference code: 97180-21302  
کد اختصاصی کنفرانس: ۹۷۱۸۰-۲۱۳۰۲

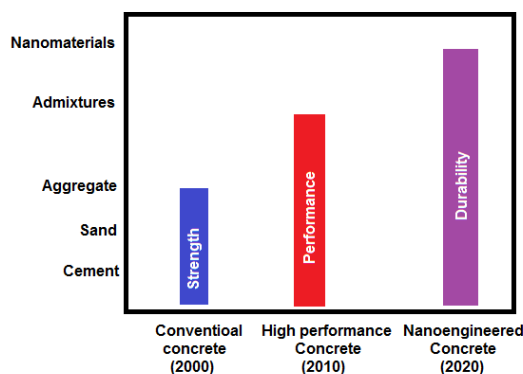


جمهوری اسلامی ایران  
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری  
شماره مجوز  
۳/۳/۳/۲۷۰۹۶۱

به منظور کاهش آبریزی و کلوخه‌ای شدن CNT، چسباندن کووالانته گروه عاملی کربوکسیلیک اسید<sup>۱</sup> (-COOH) به سطح نانولوله را پیشنهاد کردند. آن‌ها از مخلوط کردن نانولوله با نسبت سه به یک حجمی از اسید سولفوریک و اسید نیتریک استفاده کردند و موفق شدند تا CNT را با یک توزیع مناسب و بدون کلوخه‌ای شدن اصلاح کنند. در پژوهش دیگری برای بهبود سطح نانوالیاف کربنی<sup>۲</sup> (CNF) از ۷۰ درصد اسید نیتریک استفاده گردید که علاوه بر توزیع مناسب لیف‌های کربنی، بر هم کنش لیف و ماتریکس بتنی افزایش یافت [۱۵].

### ۳- نقش افزودنی‌های نانوساختار در سیمان و بتن

استفاده از نانوذرات از طریق مکانیزم‌های گوناگون دربرگیرنده تراکم میکروساختارها، اثر سودمندی بر خواص و عملکرد سیمان دارد. ذرات نانومواد پوزولانیک مانند نانوسیلیکا، با هیدروکسید کلسیم در مراحل نخستین واکنش می‌دهند و منجر به تشکیل هیدرات کلسیم سیلیکات از طریق واکنش پوزولانی می‌شوند. CNTها به عنوان نانوساختارهای معروف تک بعدی به عنوان تقویت کننده برای ماتریس‌های سیمانی عمل کرده و می‌توانند خواص مکانیکی مانند استحکام خمشی، چقرمگی شکست و سایر خواص مهندسی را بهبود دهند. این چنین بهبودهایی در عملکرد سیمان از طریق استفاده از نانوذرات می‌تواند منجر به کاهش استفاده از کلینکر (سرباره) در سیمان بدون کاهش استحکام و سایر خواص شود و بدین ترتیب نگرانی‌های زیست محیطی را کمرنگ کند. در مقابل انتظار می‌رود این موضوع منجر به حفظ و پایداری بیشتر منابع شود. در شکل (۲) چشم انداز و انتظارات از نانو تکنولوژی در بتن دیده می‌شود.



شکل ۲. پیشرفت بتن سبز با استفاده از نانو تکنولوژی [۱۶].

### ۴- نانوسیلیکا

نانوسیلیکا در سیستم‌های دارای خواص سیمانی خواص گوناگونی از قبیل استحکام مکانیکی، هیدراتاسیون، کارایی و ماندگاری را بهبود می‌بخشد [16]. ذرات سیلیکا در مقیاس میکرو و نانو از طریق پر کردن فضاهای خالی بین دانه‌های

<sup>1</sup> Carboxylic acid

<sup>2</sup> Carbon nanofiber

Islamic Republic of Iran  
Ministry of Science,  
Research & TechnologyLicense Number  
3/3/3/270961

Tehran - Iran



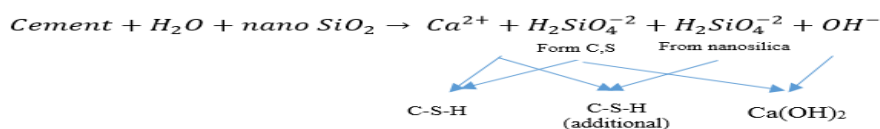
تهران - ایران

Conference code: 97180-21302

کد اختصاصی کنفرانس: ۹۷۱۸۰-۲۱۳۰۲

جمهوری اسلامی ایران  
وزارت علوم، تحقیقات و فناوریشماره مجوز  
۳/۳/۳/۲۷۰۹۶۱

سیمان اثر پرکنندگی دارند. همچنین استفاده از این نانوذره علاوه بر افزایش کارایی و استحکام بتن، منجر به افزایش مقاومت بتن به نفوذپذیری در مقابل آب می شود [۱۷]. علاوه بر اثر فیزیکی به دست آمده از افزودنی، نانوسیلیکا در مقایسه با فوم سیلیکا<sup>۱</sup> (SF)، این ماده سبب واکنش پذیری پوزولانی بیشتری می شود که هر دو اثر، در ارتقاء عملکرد عالی بتن بسیار مهم هستند [۱۶]. نانوسیلیکا به واسطه داشتن نسبت سطح به حجم بالا و سایت های فعال سطحی زیاد، واکنش هیدراتاسیون در  $C_3S$  و ملات خاکستر سیمان را افزایش می دهد. افزایش هیدراتاسیون سیمان به واسطه افزودن نانوسیلیکا در شکل (۳) دیده می شود. مطابق این شکل با افزودن تنها ۲/۶ درصد وزنی NS مدت زمان هیدراتاسیون از ۲۰ ساعت به حدود ۱۰ ساعت کاهش پیدا کرده. به عبارتی دیگر نه تنها مدت زمان هیدراتاسیون به نصف کاهش پیدا کرده، بلکه دمای حاصل از هیدراتاسیون نیز بیشتر شده است، که این امر خود حاکی از قویتر شدن پیوند هیدراتاسیون می باشد [۱۶] زمانی که نانوسیلیکا به دانه های سیمان اضافه می شود،  $H_2SiO_4^{2-}$  تشکیل می شود و با  $Ca^{2+}$  موجود واکنش می دهد تا یک هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) اضافه تشکیل می گردد. این ذرات در آب بین ذرات سیمان پخش می شوند و به عنوان دانه ها و به عبارت بهتر جوانه زاهایی برای تشکیل بیشتر فاز هیدرات سیلیکات کلسیم فشرده به کار می روند. واکنش کلی در زیر آورده شده است.



### رابطه ۱. رابطه کلی فرآیند هیدراتاسیون سیمان در حضور نانوسیلیکا [۱].

تشکیل فاز C-S-H دیگر تنها محدود به سطح دانه نمی شود، بلکه در فضاهای ریز (منافذ) نیز رخ می دهد. تشکیل حجم زیادی دانه باعث شتاب گرفتن هیدراتاسیون اولیه سیمان می شود (شکل ۳).

<sup>1</sup> Silica Fume



Islamic Republic of Iran  
Ministry of Science,  
Research & Technology  
License Number  
3/3/3/270961

Tehran - Iran



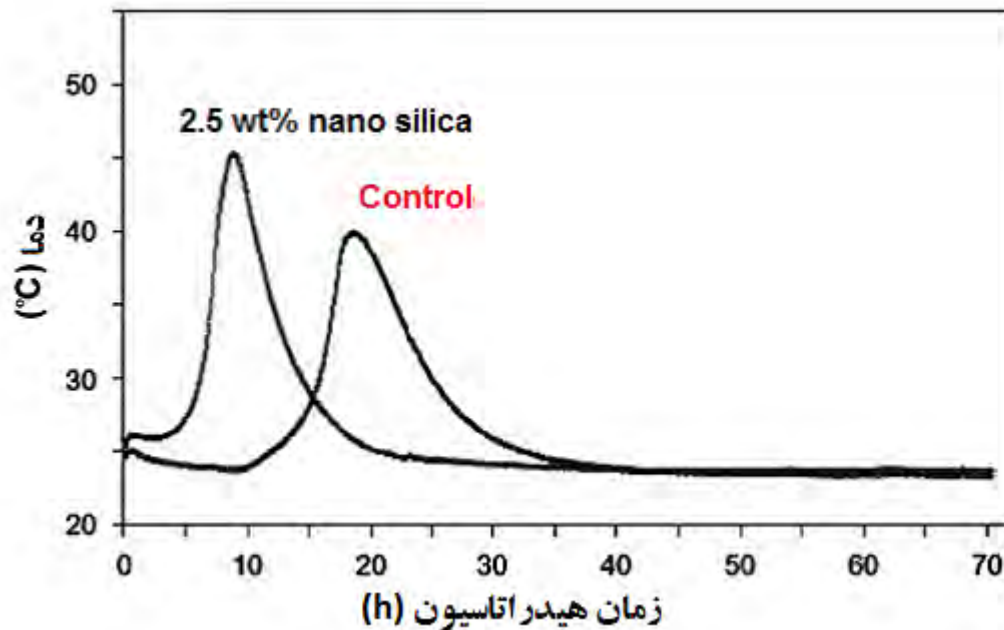
تهران - ایران

Conference code: 97180-21302

کد اختصاصی کنفرانس: ۹۷۱۸۰-۲۱۳۰۲

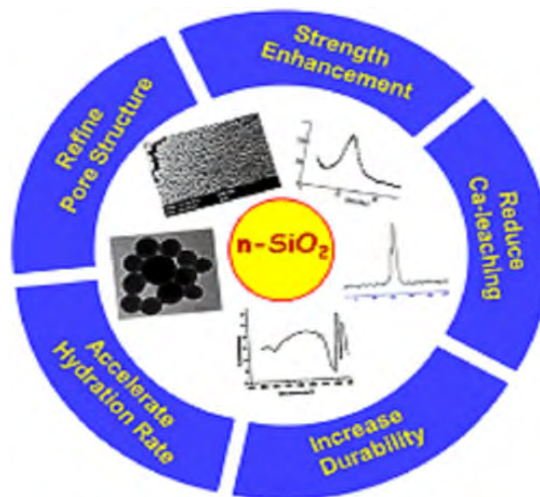


جمهوری اسلامی ایران  
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری  
شماره مجوز  
۳/۳/۳/۲۷۰۹۶۱



شکل ۳. تاثیر نانوسیلیکا بر حرارت هیدراتاسیون چسب سیمان [۱۶].

شکل ۴ به صورت شماتیک کاربرد های استفاده از نانوسیلیکا در بتن را نشان می دهد.



شکل ۴. نقش نانوسیلیکا در سیستم سیمانی [۱].

در یکی از پژوهش‌های اولیه و بنیادی در کاربرد نانوذرات، لی و همکاران [۱۸] به منظور مقایسه خواص مکانیکی فوم سیلیکا و نانوذرات، از مقادیر ۳، ۵ و ۱۰ درصد وزنی نانوسیلیکا و نانوذرات اکسید آهن (NF) در برابر ۱۵ درصد وزنی فوم سیلیکا استفاده کردند. نتایج استحکام فشاری بعد از ۲۸ روز برای نمونه‌ها که در شکل (۵) دیده می‌شود. همان‌طور که



Ministry of Science,  
Research & Technology  
License Number  
3/3/3/270961

Tehran - Iran



تهران - ایران

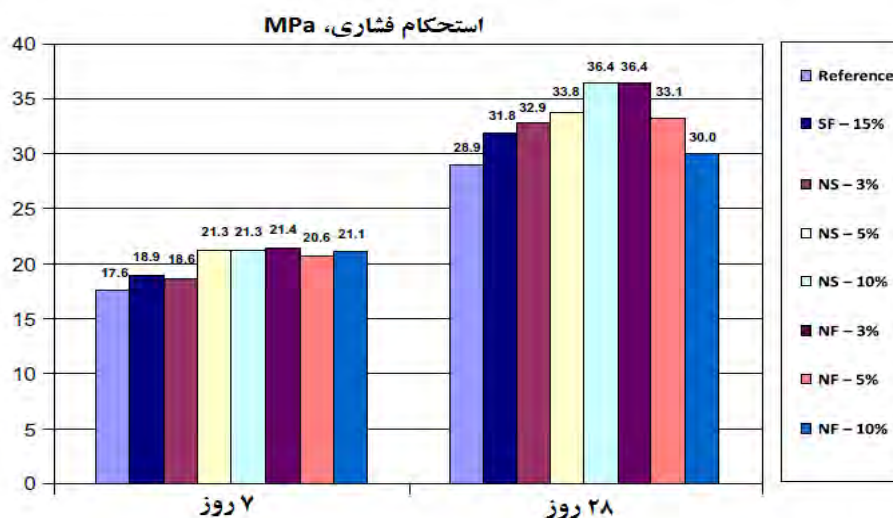
Conference code: 97180-21302

کد اختصاصی کنفرانس: ۹۷۱۸۰-۲۱۳۰۲



جمهوری اسلامی ایران  
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری  
شماره مجوز  
۳/۳/۳/۲۷۰۹۶۱

مشاهده می‌گردد، افزودن ۱۰ درصد وزنی نانوسلیکا در حضور عامل توزیع کننده ذرات، موجب افزایش ۲۶ درصدی مقاومت فشاری بتن می‌گردد. این در حالی است که با استفاده از ۱۵ درصد وزنی فوم سیلیکا، فقط ۱۰ درصد در مقاومت فشاری بتن افزایش مشاهده گردید. همچنین نتایج مشابهی در استفاده از نانوفیریت نیز دیده شد. اگرچه در مقادیر ۱۰ درصد وزنی از NF شاهد افت کوچکی نسبت به مقادیر ۳ و ۵ درصد وزنی از NF هستیم که این افت را می‌توان به پدیده کلوخه‌ای شدن این نانوذرات در مقادیر بالا نسبت داد.



شکل ۵. مقاومت فشاری ملات‌های سیمان شامل مقادیر مختلف نانوسیلیکا (NS) و نانوذرات اکسید آهن (NF) در مقایسه با ملات حاوی فوم سیلیکا و نمونه شاهد (سیمان پرتلند) [۱۸].

خاکستر بادی برای سال‌ها در بتن به عنوان هم آمیزه معدنی استفاده شده است تا جایگزین سیمان پرتلند به صورت جزئی در کارخانه‌های بچینگ یا در تولید سیمان‌های مخلوط شود. گرچه استحکام اولیه چنین بتن‌هایی اغلب کمتر از بتن‌های مشابه بدون خاکستر بادی یا سرباره است. هیدراتاسیون ملات‌های سیمانی حاوی مقادیر بالای خاکستر بادی یا سرباره با حضور ۱ درصدی نانوسیلیکا تسریع می‌گردد. ژانگ و همکاران [۱۹] ادعا کردند که افزودن ۲ درصد وزنی نانوسیلیکا به سیمان حاوی ۵۰ درصد وزنی خاکستر بادی، زمان گیرش اولیه و نهایی را تا حدود ۳۰ درصد کاهش می‌دهد و استحکام فشاری ۳ روزه و ۷ روزه نمونه مذکور را تا ۲۵ درصد ارتقاء می‌بخشد.

## ۵- نانوساختارهای کربنی

در دو دهه اخیر نانوساختارهای کربنی توجه زیادی از پژوهشگران در حوزه‌های مختلف را به خود جلب کرده اند. برای اولین بار در سال ۱۹۹۱ ایجیما<sup>۱</sup> [۲۰] در مقاله معروف خود ساختار نانولوله‌های کربنی را که شامل ورقه‌های گرافیتی که در خودشان لوله شده‌اند را به جهانیان معرفی کرد. این نانوساختار تک بعدی با سطح ویژه بالا، خواص الکترونیکی و مکانیکی چشمگیر، پایداری حرارتی بسیار زیاد و خواص الکتریکی ابر رسانایی تا نیمه هادی نظر کمتر پژوهشگری را به

<sup>1</sup> Iijima



Ministry of Science,  
Research & Technology  
License Number  
3/3/3/270961

Tehran - Iran



تهران - ایران

Conference code: 97180-21302  
کد اختصاصی کنفرانس: ۹۷۱۸۰- ۲۱۳۰۲جمهوری اسلامی ایران  
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری  
شماره مجوز  
۳/۳/۳/۲۷۰۹۶۱

خود معطوف نکرده است. کشف گرافن<sup>۱</sup> (G) نیز به عنوان یک نانوساختار دو بعدی در سال ۲۰۱۰ جایزه نوبل فیزیک را برای آندره گایم<sup>۲</sup> [۲۱] به ارمغان آورد و در حال حاضر از نانوساختارهای بسیار پر رونق در امور پژوهشی دنیا قلمداد می گردد. در ادامه به بررسی بتن های تقویت شده با نانولوله های کربنی و گرافن پرداخته می شود.

## ۵-۱- خواص مکانیکی در حضور نانولوله های کربنی

بتن به عنوان یک ماده سرامیکی دارای خواص شبه ترد و مستعد ترک خوردگی است. نانومواد، به خصوص نانوساختارهای کربنی با سطح ویژه بسیار بالا قادر به بهبود و اصلاح خواص مکانیکی، دوام و خواص اساسی مواد دارای خاصیت سیمانی به واسطه خواص ذاتی و اثرات کامپوزیتی ممتاز آنها می باشند [۲۲]. با توجه به خواص مکانیکی و الکتریکی مناسب نانولوله های کربنی این مواد برای تولید بتن تقویت شده جذاب هستند. به کارگیری الیاف در مقیاس نانو امکان کنترل ترک های ماتریس در سطح مقیاس نانومتر را مهیا می کند [۲۳]. از لحاظ مکانیکی، نانولوله های کربنی مدول الاستیک در محدوده تراپاسگال و استحکام کششی در رنج مگاپاسکال را دارا می باشند. هم چنین این نانوساختارها چگالی تقریبی ۱/۳۳ گرم بر سانتی مترمکعب را از خود نشان می دهند. نانولوله های تک جداره<sup>۳</sup> (SWCNT)، تنش تسلیمی بین ۲۰ تا ۶۰ گیگا پاسگال و کرنش های تسلیم اندازه گیری شده نزدیک به ۱۰ درصد دارند. به علاوه نانولوله های کربن بدون شکست می توانند پیچش و خمش را تحمل کنند. از آنجا که نانولوله های کربن خواص مکانیکی فوق العاده ای همراه با نسبت ابعادی بسیار بالا (نسبت طول به قطر) نشان می دهند، انتظار می رود کامپوزیت های سیمانی با چقرمگی و استحکام بیشتری نسبت به مواد تقویت کننده سنتی تولید شوند (مانند الیاف شیشه و الیاف کربن). در عین حال با بهره بردن از خواص الکتریکی مطلوب این مواد می توان از آنها برای تولید بتن هایی به عنوان سپر الکترومغناطیسی استفاده کرد [۲۴]. در حقیقت، به خاطر اندازه و نسبت های ابعادی آنها (محدوده از یک نانومتر تا ده ها نانومتر)، نانولوله های کربن در مقیاس بسیار ظریف-تری نسبت به الیاف رایج می توانند توزیع شوند که نتیجه ای به مراتب موثرتری برای اتصال ترک ها در مرحله مقدماتی گسترش ترک در کامپوزیت فراهم می آورند. هر چند همان گونه که پیشتر ذکر شد، اصلی ترین چالش در ارتباط با نانولوله های کربن در مواد پایه سیمانی خاصیت آبگریزی و کلوخه ای شدن این مواد و نهایتاً توزیع ضعیف این مواد در بستر سیمان است [۲۵]. پراکنش ضعیف نانولوله های کربن منجر به تشکیل نواحی زیادی دارای عیب در نانوکامپوزیت ها می شود و بازدهی نانولوله های کربن را در ماتریس محدود می کند که می بایست قبل از هر اقدامی، عملیات اصلاح سطحی متناسب با فرمول مورد نیاز صورت گیرد [۲۶]. ماکار و همکاران [۲۴] برای توزیع مناسب نانولوله ها در ملات، ابتدا این مواد را در محیط ایزوپروپانول تحت فرآیند اولتراسونیک قرار دادند و سپس سیمان و مواد ملات را افزودند و در نهایت با تبخیر الکل توانستند به یک همگنی مناسب از نانولوله ها در بتن دست پیدا کنند. نتایج نشان می داد که در حضور نانولوله ها زمان هیدراتاسیون تا سه روز کاهش می یابد. از طرفی برای چگونگی افزایش خواص مکانیکی، تصاویر SEM از سطح مقطع شکست بتن مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۶). تصاویر حاکی از دو مکانیزم اصلی برای جلوگیری از اشاعه ترک بود. (۱) پدیده پل زنی ترک<sup>۴</sup> که در این حالت نانولوله ها با چسبیدن مناسب به سوی ترک و با توجه به خواص مکانیکی بسیار بالای

<sup>1</sup> Graphene

<sup>2</sup> Andre Geim

<sup>3</sup> Single Wall Carbon Nanotube

<sup>4</sup> Crack Bridging



Ministry of Science,  
Research & Technology  
License Number  
3/3/3/270961

Tehran - Iran



تهران - ایران

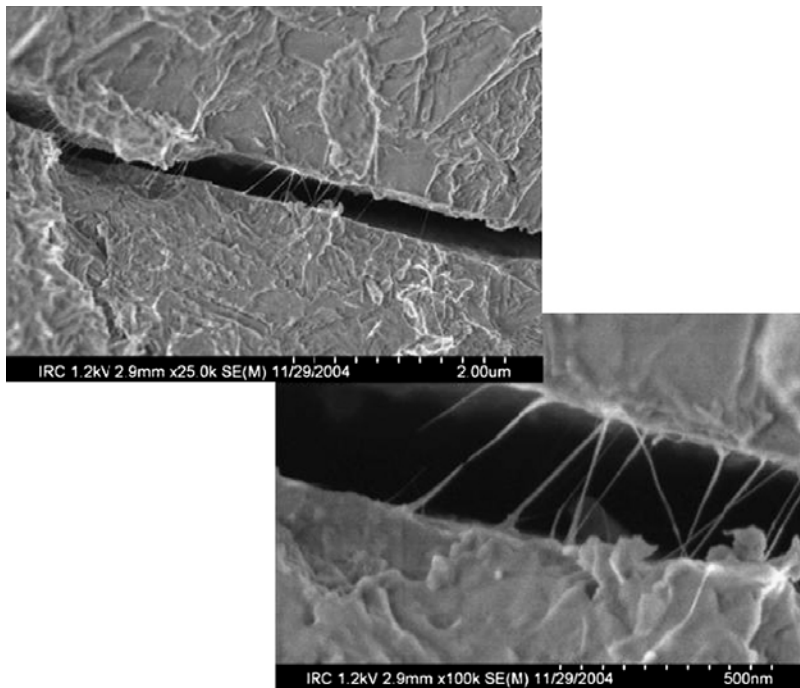
Conference code: 97180-21302

کد اختصاصی کنفرانس: ۹۷۱۸۰-۲۱۳۰۲



جمهوری اسلامی ایران  
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری  
شماره مجوز  
۳/۳/۳/۲۷۰۹۶۱

خود، تنش اعمال شده را کاهش می دهند و بدین ترتیب باعث افزایش خواص مکانیکی کل مجموعه می گردند. ۲) مکانیزم بیرون کشیدگی الیاف<sup>۱</sup> که در این مکانیزم، تنش وارده جهت بیرون کشیدن نانولوله های کربنی از بستر بتنی مصرف می شود و بدین ترتیب خواص مکانیکی افزایش می یابد.



شکل ۶. تصاویر SEM از سطح مقطع شکست بتن حاوی CNT در بزرگنمایی ۲۵۰۰۰ (بالا) و ۱۰۰۰۰۰ (پایین) [۲۴].

آمیختن نانولوله های کربنی چند جداره<sup>۲</sup> (MWCNT) در بتن استحکام فشاری و کششی ترک خوردگی را افزایش می دهد. گزارش شده است که در حضور ۰/۰۴۵ درصد MWCNT اصلاح سطحی شده، استحکام فشاری تا ۲۶/۶۹ درصد افزایش می یابد و استحکام ترک خوردگی نیز تا ۶۶/۳ درصد ارتقاء پیدا می کند (شکل ۷) [۲۷]. با افزایش در مقدار MWCNT نرخ افزایش استحکام کششی بیشتر از نرخ افزایش استحکام فشاری است. البته انتظار می رود که با استفاده بیش از حد از MWCNT به دلیل به وجود آمدن پدیده کلوخه های شدن خواص مکانیکی دچار افت شود.

<sup>1</sup> Crack Pull Out

<sup>2</sup> Multi Wall Carbon Nanotube

Islamic Republic of Iran  
Ministry of Science,  
Research & TechnologyLicense Number  
3/3/3/270961

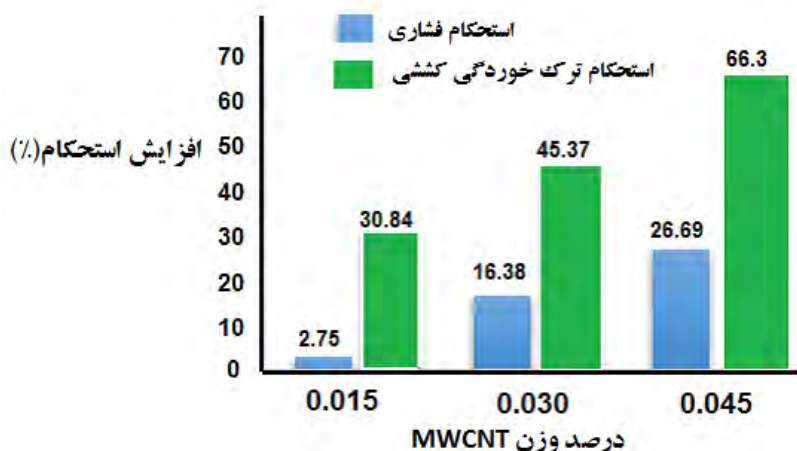
Tehran - Iran



تهران - ایران

Conference code: 97180-21302

کد اختصاصی کنفرانس: ۹۷۱۸۰-۲۱۳۰۲

جمهوری اسلامی ایران  
وزارت علوم، تحقیقات و فناوریشماره مجوز  
۳/۳/۳/۲۷۰۹۶۱

شکل ۷- اثر مقادیر مختلف MWCNT بر استحکام فشاری و ترک خوردگی کششی [۲۷].

## ۵-۲ خواص مکانیکی در حضور گرافن

یکی دیگر از نانوساختارهای جذاب کربنی، گرافن (G) و گرافن اکساید<sup>۱</sup> (GO) می‌باشند. G و GO علاوه بر خواص مکانیکی ویژه خود می‌توانند موجب تغییرات مطلوبی در خواص الکتریکی و گرمایی بتن شوند. ضریب رسانایی حرارتی و رسانایی الکتریکی بالای این نانوساختار موجب می‌شود با افزایش میزان G در زمینه، این پارامترها برای بتن کامپوزیتی افزایش یابد [۲۸]. این نانوساختارهای دو بعدی با صفحات لایه‌ای خود، در مطالعات زیادی مورد بررسی قرار گرفته‌اند، به طوری که نرخ پژوهش‌های صورت گرفته بر روی این ماده در مقایسه با CNT در سال‌های اخیر روند صعودی پیدا کرده است. در حوزه مهندسی عمران هم غالباً استفاده از GO خواص مکانیکی بهتری را نسبت به CNT به ارمغان می‌آورد. GO بر خلاف CNT نیاز به آماده سازی و استفاده زیاد از سورفکتانت ندارد [۲۹]. دلیل این امر هم به مکانیزم تشکیل ورقه‌های GO از اکسیداسیون<sup>۲</sup> G بر می‌گردد که در ادامه توضیح داده می‌شود. فرآیند تولید GO شامل سه مرحله اکسیداسیون، خالص سازی<sup>۳</sup> و تورق<sup>۴</sup> است. در مرحله اکسیداسیون گروه‌های عاملی اکسیژن در بین صفحات گرافیت قرار می‌گیرند و فاصله بین لایه‌های<sup>۵</sup> را افزایش می‌دهند، که نه تنها G آبریز را به GO آبدوست تبدیل می‌کند، بلکه منجر به نفوذ بهتر ملات به داخل این صفحات می‌شود. لازم به ذکر است که با افزایش درصد اکسیژن، فواصل بین لایه‌ای و درجه اکسیداسیون G افزایش می‌یابد که این موارد را می‌توان به راحتی از روی طیف XRD<sup>۶</sup> نمونه بدست آورد. همچنین این گروه‌های عاملی به عنوان سایت‌های فعالی محسوب می‌شوند که پیوندهای قوی C-S-H را در طول فرآیند جوانه زنی بهبود می‌دهند. پس با حضور این گروه‌های عاملی، افزایش آبدوستی و کاهش دافعه الکترواستاتیک در GO رخ می‌دهد که توزیع مناسب آن را بدون استفاده از سورفکتانت اضافی به ارمغان می‌آورد [۳۰]. مرحله خالص سازی نیز شامل

<sup>1</sup> Graphene oxide

<sup>2</sup> Oxidation

<sup>3</sup> Purification

<sup>4</sup> Exfoliation

<sup>5</sup> Gallery layer

<sup>6</sup> X-Ray diffraction



Ministry of Science,  
Research & Technology  
License Number  
3/3/3/270961

Tehran - Iran



تهران - ایران

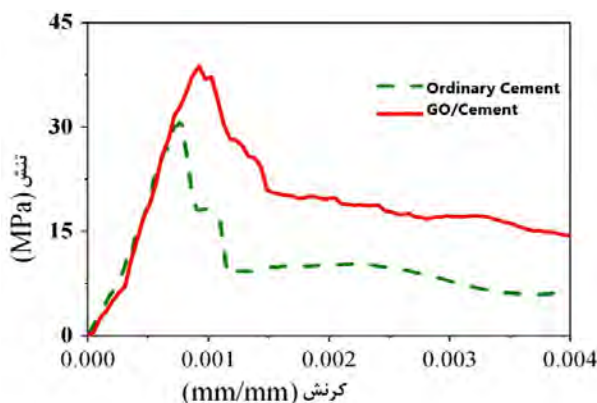
Conference code: 97180-21302

کد اختصاصی کنفرانس: ۹۷۱۸۰-۲۱۳۰۲



جمهوری اسلامی ایران  
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری  
شماره مجوز  
۳/۳/۳/۲۷۰۹۶۱

فیلتراسیون، سانتریفیوژ و دیالیز می باشد. فیلتراسیون منجر به حذف یون های باقیمانده از اسید و مرحله اکسیداسیون می باشد. با حذف این یون های نامطلوب برهم کنش بین اجزای بتن افزایش می یابد. سانتریفیوژ نیز GO تورق نیافته را از سیستم جدا می کند. دیالیز کردن هم نمک ها و اسیدهای باقی مانده را از GO جدا می کند. در آخرین مرحله که همان تورق سازی می باشد، معمولاً با استفاده از اولتراسونیک، فواصل بین لایه های GO افزایش داده می شود. هم چنین در این مرحله با تنظیم بهینه انرژی اولتراسونیک می توان به سایز مطلوبی از صفحات GO با فواصل بین لایه های دلخواه رسید. نهایتاً GO باقیمانده شامل ورقه هایی مناسب برای تولید نانوسیمان است [۳۰ و ۳۱]. پان و همکاران [۳۲] مشاهده کردند که استفاده از ۰/۰۵ درصد وزنی GO موجب افزایش ۱۵ تا ۳۳ درصدی مقاومت فشاری و ارتقاء ۴۱ تا ۵۹ درصدی استحکام خمشی در سیمان می شود و بدین ترتیب داکتیلیته سیمان را افزایش دادند<sup>۱</sup>. این افزایش چشمگیر مقادیر، با افزودن درصد کمی از GO به مساحت سطح بسیار زیاد صفحات GO نسبت داده شده است. یعنی چسبندگی های سطحی بین گروه های عاملی GO و سیمان که اغلب شامل پیوندهای قوی کووالانت هستند در این سطح بزرگ مانع از اشاعه ترک می شوند. هم چنین این گروه ادعا کردند که حضور GO در نقش عوامل جوانه زا عمل می کند و بدین ترتیب کینتیک فرآیند هیدراتاسیون را افزایش می دهد. منحنی تنش-کرنش نمونه حاوی GO و سیمان معمولی در شکل (۸) دیده می شود. طبق این دیاگرام با افزودن ۰/۰۵ درصد وزنی GO به زمینه سیمانی، مدول الاستیک از ۳/۴۸ MPa به ۳/۷ MPa افزایش یافته و از طرفی استحکام نهایی و شکست در تنش و کرنش های بالاتر اتفاق افتاده که حاکی از به تعویق افتادن جوانه زنی ترک می باشد.



شکل ۸. دیاگرام تنش-کرنش برای افزودن ۰/۰۵ درصد وزنی GO در تست فشار [۳۲].

## ۶- نانوذرات اکسید تیتانیوم در سطح بتن

افزودن نانوذرات اکسید تیتانیوم به سیمان نرخ هیدراتاسیون را به میزان قابل توجهی سرعت می بخشد و هم زمانبا کاهش تخلخل کلی ملات سیمان، توزیع اندازه حفرات باریکتر می شود. هم چنین با کاهش زمان گیرش اولیه و نهایی استحکام فشاری ملات به خصوص در دوره های اولیه افزایش می یابد [۳۳]. استفاده از نانوپوشش های آبریز خود تمیز شونده در نمای ساختمان از دیگر کاربرد نانوذرات  $TiO_2$  در مهندسی عمران است. نانوپوششی از نانوذرات  $TiO_2$  در ساختمان ها در مقابل نور خورشید به صورت خنثی کننده آلودگی عمل می کند. اشعه فرابنفش<sup>۲</sup> (UV) با برخورد به نانوذرات  $TiO_2$  باعث شروع واکنش کاتالیستی می شود که انتشار مولکول های آلاینده مثل اکسیدهای نیتروژن ( $NO_x$ )، ناشی از سوختن

<sup>1</sup> Ductile

<sup>2</sup> Ultraviolet



Islamic Republic of Iran  
Ministry of Science,  
Research & Technology  
License Number  
3/3/3/270961

Tehran - Iran



تهران - ایران

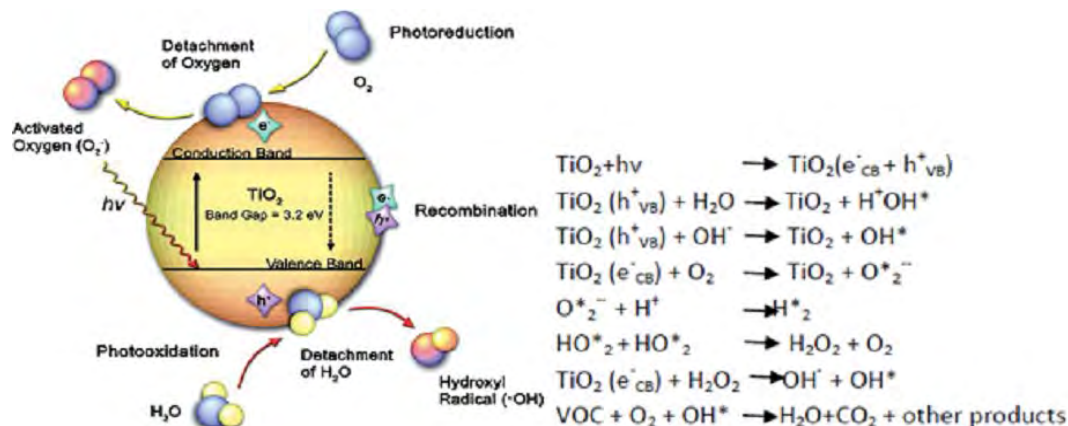
Conference code: 97180-21302

کد اختصاصی کنفرانس: ۹۷۱۸۰-۲۱۳۰۲



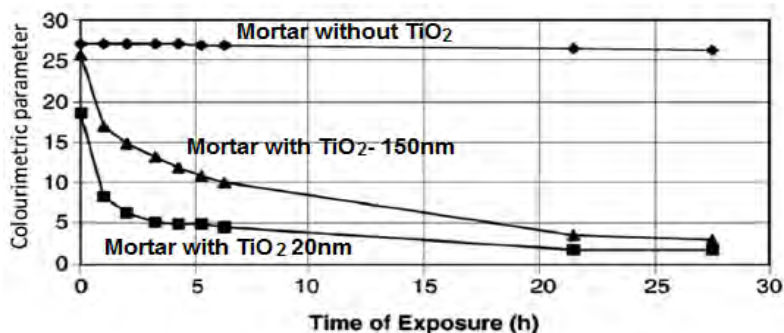
جمهوری اسلامی ایران  
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری  
شماره مجوز  
۳/۳/۳/۲۷۰۹۶۱

سوخت‌های فسیلی و هوای آلوده مخلوط با ترکیبات آلی فرار را از بین می‌برد. مکانیزم این فرآیند در شکل ۹ دیده می‌شود.



شکل ۹. اکسیداسیون فوتوکاتالیست ماده آلی بوسیله نانو-تیتانیوم اکسید در سطح بتن [۱].

از طرفی فیلم اکسید تیتانیوم که در سطح بیرونی ساختمان به کار می‌رود باعث می‌شود سطح ساختمان هنگام تابش نور خورشید حالت آب دوستی شدید پیدا کند [۲۳]. این فرآیند دمای ساختمان‌ها را پایین می‌آورد. به علاوه از رشد کپک به خصوص در سطوح مرطوب به واسطه اثر ضد میکروبی فوتوکاتالیست جلوگیری می‌کند. استفاده از چنین سطوحی می‌تواند استفاده از تجهیزات تهویه مطبوع و بالتبع مصرف انرژی را کاهش دهد و همچنین باعث کاهش پدیده رایج جزیره گرمایی در شهرها و نواحی شهری شود. در پژوهشی بتن و سیمان با اکسید تیتانیوم به قطر ۲۰ نانومتر پوشش داده شد و مشخص شد زمانی که سطح در معرض نور فرابنفش خورشید قرار گرفت، سرعت تجزیه مواد آلی چسبیده به سطح ساختمان که همان آلودگی‌ها هستند افزایش یافت. چنین نانوپوشش‌هایی علاوه بر اینکه آلودگی کمتری جذب می‌کنند، در اثر خواص فوتوکاتالیستی خود با جذب نور خورشید آب تولید کرده و سطح خود را تمیز می‌کنند. همچنین این نانوپوشش‌ها از رشد مواد زیستی و آلودگی جلوگیری کرده و باعث حفظ ظاهر تمیز بتن در طولانی مدت می‌شود. میزان تمیزی با کاهش اندازه نانوذره افزایش می‌یابد. شکل ۱۰ نتایج حاصل از استفاده از رنگ رودامین در بتن معمولی و بتن حاوی نانوذره اکسید تیتانیوم با دو اندازه را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است، با افزودن TiO<sub>2</sub> کمرنگ شدن رنگ رودامین در سطح بتن در مدت زمان کوتاه‌تر و با شیب بیشتری اتفاق افتاده است. این روند در نانوذره با اندازه کوچکتر شدت می‌یابد که ناشی از افزایش سطح ویژه و فعالیت شیمیایی نانوذره کوچکتر است [۲۳].



شکل ۱۰- اثر اکسید تیتانیوم و اندازه ذرات در کمرنگ شدن سطوح ملاتی با استفاده از رنگ رودامین به عنوان عامل رنگ‌کنندگی [۲۳].



Ministry of Science,  
Research & Technology  
License Number  
3/3/3/270961

Tehran - Iran



تهران - ایران

Conference code: 97180-21302  
کد اختصاصی کنفرانس: ۹۷۱۸۰-۲۱۳۰۲



جمهوری اسلامی ایران  
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری  
شماره مجوز  
۳/۳/۳/۲۷۰۹۶۱

## ۷- نانوذرات اکسید آلومینیوم

افزودن نانوذرات اکسید آلومینیوم، دی اکسید زیرکسیم و اکسید آهن و اکسید فلز شامل نانورس<sup>۱</sup> سبب بهبود خواص ملات بتن و سیمان می شوند [۲۳]. افزودن نانوذرات اکسید فلز واکنش های شیمیایی در هنگام هیدراتاسیون آغازین را تسریع می کنند و در نتیجه باعث تقویت ترکیبات سیمان می شود. نانوذرات اکسید فلز با هیدروکسید کلسیم واکنش می دهند و باعث افزایش هیدرات سیلیکات کلسیم تولید شده می شوند، که منجر به میکروساختاری فشرده تر می گردد و بدین طریق نه تنها نفوذپذیری را کاهش می دهند، بلکه باعث بهبود خواص مکانیکی از قبیل استحکام فشاری، استحکام خمشی و مقاومت در برابر سایش می شوند.

گزارش های کمی در خصوص استفاده از نانو اکسید آلومینیوم از اکسید آلومینیوم به دست می آید. در سیمان وجود دارد. افزودن نانو اکسید آلومینیوم در سیمان به ویژه در سیمان با عملکرد بسیار بالا<sup>۲</sup> (UHPC) با کنترل زمان گیرش، می تواند خواص سیمان را به طرز شگرفی تحت تأثیر قرار دهد. کارکرد نانو اکسید آلومینیوم در سیمان سرعت بخشیدن به زمان اولیه گیرش برای UHPC است. این امر جدایش و لخته سازی را کاهش می دهد. اختلال در سیمان، غیرهمگنی در مخلوط های UHPC ایجاد می کند و از این رو عملکرد UHPC کاهش می یابد. نانو اکسید آلومینیوم در UHPC به عنوان عامل توزیع کننده در ذرات سیمان عمل می کند [۳۴]. از سوی دیگر زمانی که اندازه ها در حد نانومتر است، نانو اکسید آلومینیوم فضاهای خالی در ژل هیدراتاسیون را به عنوان یک نانو پرکننده بهبود می بخشد. زمانی که مقدار سیمان در نسبت UHPC موجود بالا باشد، توزیع دانه های سیمان در UHPC باید به صورت همزمان و یکجا با فعالیت دی اکسید سیلیسیم در فرآیند هیدراتاسیون رخ دهد. بدون نانو اکسید آلومینیوم فرآیند هیدراتاسیون آهسته تر خواهد بود چراکه جزء دی اکسید سیلیسیم نمی تواند به ساختار درونی ژل هیدراتاسیون نفوذ کند. با افزودن نانو اکسید آلومینیوم، مسیر باز می شود و دی اکسید سیلیسیم و مواد اتصال دهنده به سادگی به میکرو ساختار ژل هیدراتاسیون وارد شده و فرآیند خالص سازی آغاز می شود [۳۵ و ۳۶].

## ۸- نانورس

نانورس، نانوذرات لایه لایه کانی دی اکسید سیلیسیم است. بسته به ترکیب شیمیایی و ساختار ذرات، نانوذرات به چندین طبقه از جمله مونت موریلونیت<sup>۳</sup>، بنتونیت<sup>۴</sup>، کائولینیت<sup>۵</sup>، هکتوریت<sup>۶</sup> دسته بندی می شوند. نانورس یکی از مقرون به صرفه ترین موادی است که نتایج نویدبخشی به خصوص در نانوکامپوزیت های پلیمری نشان داده است. نانورس از رسوبات کانی مونت موریلونیت ساخته شده است که دارای صفحات با متوسط ابعاد یک نانومتر ضخامت و عرض ۱۵۰-۷۰ نانومتر است.

<sup>1</sup> Nanoclay

<sup>2</sup> Ultra High Performance Concrete

<sup>3</sup> Montmorillonite

<sup>4</sup> Bentonite

<sup>5</sup> Kaolinite

<sup>6</sup> Hectorite



Islamic Republic of Iran  
Ministry of Science,  
Research & Technology

License Number  
3/3/3/270961

Tehran - Iran



تهران - ایران

Conference code: 97180-21302  
کد اختصاصی کنفرانس: ۹۷۱۸۰-۲۱۳۰۲



جمهوری اسلامی ایران  
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

شماره مجوز  
۳/۳/۳/۲۷۰۹۶۱

ساختار منحصربه‌فرد رس مونتموریلونیت دارای چندین ویژگی است که آن را مبنا و بستری عالی برای دست‌کاری از طریق نانوتکنولوژی می‌کند. این ویژگی‌ها شامل پایداری، فضای بین لایه‌ای، هیدراتاسیون بالا، قابلیت تورم و واکنش‌پذیری شیمیایی بالا است [۳۴]. ویژگی و مشخصه یابی نانورس‌ها و مشتقات آلی بهینه‌شده آن‌ها را می‌توان با استفاده از ابزارهای ساده و درعین‌حال پیشرفته همچون، آنالیز وزن سنجی مانند DSC<sup>۱</sup>، طیف‌سنجی پلاسمای جفت شده القایی<sup>۲</sup> (ICP) یا XRF<sup>۳</sup>، ظرفیت تبادل یونی<sup>۴</sup> (CEC) با استفاده از روش آمونیم استات، اندازه‌گیری ناحیه سطح، طیف سنجی فرسوخ فوریه<sup>۵</sup> (FT-IR)، پراش اشعه ایکس پودری<sup>۶</sup> (PXRD) تعیین کرد. پارامتر CEC، یک خصوصیت بسیار مهم برای نانورس‌ها محسوب می‌شود که می‌توان به‌صورت وسیعی بسته به منبع و نوع نانورس یا با وارد کردن سورفکتانت و اصلاح سطحی نانورس این پارامتر و در نتیجه خواص آن را تغییر داد. خلوص نانورس می‌تواند بر خواص نهایی نانوکامپوزیت تأثیرگذار باشد. به این دلیل، بسیار مهم است که مونتموریلونیت کمترین میزان ناخالصی دی‌اکسید سیلیسیم متبلور (کوارتز)، دی‌اکسید سیلیسیم نامتبلور، کلسیت و کائولین را دارا باشد. این شیوه که عمدتاً برای خالص‌سازی رس‌ها استفاده می‌شود، شامل روش هیدروسیکلون، سانتریفیوژ، ته‌نشین سازی و عملیات شیمیایی است [۳۷،۳۸]. همانطور که ذکر شد نانورس‌ها را می‌توان به‌عنوان مواد ارزان‌قیمت در نظر گرفت فلذا به دست آوردن نانومواد بر پایه رس می‌تواند از لحاظ هزینه سازگار و مناسب باشد. به همین دلیل پیشنهاد می‌شود که در خصوص مزایا و معایب نانورس به‌عنوان مواد ساختمانی پژوهش‌های بیشتری صورت گیرد. به‌صورت طبیعی در ساخت‌وساز، نانورس به‌عنوان یک افزودنی جهت افزایش خواص بتن بکار می‌رود. مرسی و همکاران [۳۹] گزارش داده‌اند که افزایش در استحکام فشاری و کششی برای ملات سیمان دارای نانورس به‌عنوان افزودنی ثبت شده است. همچنین گزارش شده اسن که رفتار حرارتی بتن بعد از افزودن نانورس به‌عنوان افزودنی در ملات سیمان بهبود یافته است [۴۰].

## ۸-۱ نانوکائولینیت

نانوکائولین یک فرآورده فرعی کائولین است. کائولین یا نام شیمیایی آن کائولینیت، یک کانی رسی با ترکیب شیمیایی  $Al_2Si_2O_5(OH)_4$  است. این ماده رسی، از هوازگی مواد معدنی آلومینیوم سیلیکات مانند فلدسپات تولید می‌شود [۳۸]. در مبحث کانی‌شناسی فرمول شیمیایی کائولینیت به صورت  $Al_2Si_2O_5(OH)_4$  است، این در حالی است که کاربردهای سرامیکی، فرمول شیمیایی عموماً از دیدگاه اکسیدها نوشته می‌شود، که بعد از پالایش به‌وسیله عملیات حرارتی به  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$  تغییر می‌کند. از سوی دیگر کائولین پس از عملیات (تصفیه) یا دهیدراتاسیون گرماگیر از ساختار کریستالی به حالت بی‌شکل یا نامتبلور تغییر می‌کند [۴۱]. این دگرگونی آن را به ساختار جدیدی از رس به نام متاکائولین تبدیل می‌کند. متاکائولین دربرگیرنده سیلیکا و آلومینا نامتبلور با ساختار لایه‌ای هگزگونال است. متاکائولین به‌عنوان پوزولان بسیار واکنش‌پذیر شناخته می‌شود و واکنشی مشابه با فوم سیلیکا دارد. افزایش استحکام و بهبود دوام

<sup>1</sup> Differential Scanning Calorimetry

<sup>2</sup> Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry

<sup>3</sup> X-ray Fluorescence

<sup>4</sup> Cation Exchange Capacity

<sup>5</sup> Fourier-transform Infrared Spectroscopy

<sup>6</sup> Powder X-Ray Diffraction



Islamic Republic of Iran  
Ministry of Science,  
Research & Technology  
License Number  
3/3/3/270961

Tehran - Iran



تهران - ایران

Conference code: 97180-21302  
کد اختصاصی کنفرانس: ۹۷۱۸۰-۲۱۳۰۲



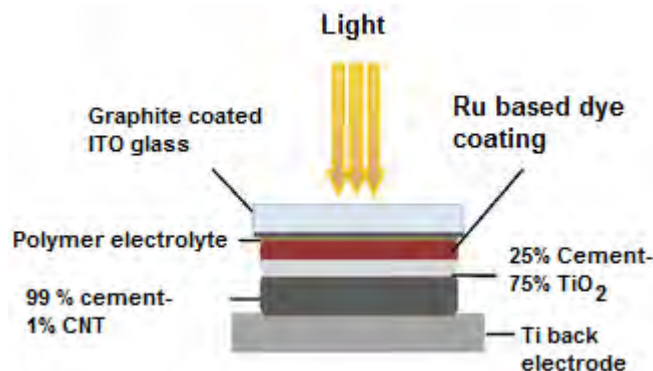
جمهوری اسلامی ایران  
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری  
شماره مجوز  
۳/۳/۳/۲۷۰۹۶۱

به وسیله اصلاح میکرو ساختار، اجازه نفوذ قابل اطمینان آب و بهینه سازی هزینه مهم ترین مزایای متاکاتولین در مقایسه با فوم سلیکا است [۴۲،۴۳،۳۷].

نانوکاتولین با استفاده از روش بالا به پایین یا پایین به بالا سنتز می شود. این فرآیندها شکل نهایی نانوکاتولین را تحت تأثیر قرار خواهد داد. به صورت کلی، تشکیل نانوکاتولین شامل انباشتی از ورقه های کاتولین می باشد در یک نگاه اجمالی می توان ذره کاتولین را شبیه به نانوکاتولین در نظر گرفت. ساختار کاتولین پس از استحاله از میکرو اندازه به نانومتر، سطح ویژه بیشتری را فراهم می کند که از نظر واکنش پذیری مطلوب است. در بتن، نانوکاتولین باید ابتدا جهت عمل آوری به منظور تشکیل یک جزء واکنش پذیرتر یا پایدارتر به نام نانومتاکاتولین تبدیل شود. نانومتاکاتولین صرفاً به صورت مکمل در بتن استفاده می شود اما افزایش در خواص بتن به دلیل تأثیر مثبت متاکاتولین در UHPC و سایر انواع بتن قابل انتظار است. مرسی و همکاران [۳۹] ادعا کردند که افزودن نانومتاکاتولین به بتن، استحکام فشاری ملات را ۸ تا ۱۰ درصد افزایش می دهد. همچنین افزایش استحکام کششی و خمشی ملات شامل نانومتاکاتولین در حدود ۱۰ الی ۱۵ درصد در مقایسه با سیمان پرتلند معمولی گزارش شده است [44]. گرچه مباحث اولیه مزیت وجود نانومتاکاتولین را در بهبود عملکرد ملات نشان می دهد، همچنان محدودیت منابع در کاربرد نانومتاکاتولین در UHPC وجود دارد. کمبود کاتولین خام در برخی کشورها باعث عدم محبوبیت آن در مقایسه با فوم سلیکا می شود. در نتیجه راهبردها و شیوه های تجاری تولید نانوکاتولین و نانومتاکاتولین باید در معرض دید قرار داده شوند و پژوهش های متمرکز به منظور به حداکثر رساندن ظرفیت آن ها به عنوان نانومواد جایگزین در بتن ادامه پیدا کند.

## ۹- بتن سبز برای انرژی از نوع سلول خورشیدی

در حال حاضر تلاش هایی توسط پژوهشگران صورت گرفته تا با افزودن نانوساختارها به بتن علاوه بر بهبود خواص مکانیکی، بتن را به نوعی سلول خورشیدی تبدیل کنند تا بتوانند انرژی خورشیدی را به انرژی الکتریکی تبدیل کنند. اگرچه این ایده در حال حاضر کمی رویایی به نظر می رسد، اما با توجه به پیشرفت های چشمگیر در حوزه سلول های خورشیدی و استفاده تجاری انرژی خورشیدی در تولید برق، چنین هدفی دور از دسترس نیست. اگرچه لازم به ذکر است که بازده سلول های خورشیدی در حال حاضر هنوز در حد مطلوب نیست. عموماً انتظار می رود که روش کلی ساخت این بتن ها آمیختن مواد نیمه رسانا مانند نانو اکسید تیتانیوم، نانولوله های کربنی و اخیراً گرافن با ملات سیمان باشد. شکل 11 به صورت شماتیک تصویری از بتن با قابلیت سلول خورشیدی را نمایش می دهد [۴۵].





شکل ۱-۱- بتن از نوع سلول خورشیدی [۴۵].

## ۱- نتیجه گیری

ظهور کاربردهای نانوتکنولوژی در زمینه ساخت بتن نسبتاً جدید است و بسیاری از پیشرفت‌ها هنوز در مرحله پژوهشی و یا مراحل اولیه تجاری‌سازی هستند. این مقاله، مطالعه ای مروری بر تأثیر افزودن نانوذرات و نانوساختارها به بتن و سیمان بود. نتایج تحقیقات مودر بررسی نشان داد که با افزودن این مواد، علاوه بر اینکه واکنش هیدراتاسیون تسریع می‌شود و نرخ هیدراتاسیون افزایش می‌یابد، خواص مکانیکی مانند استحکام فشاری، کششی و خمشی ارتقاء می‌یابند. علاوه بر این نانوذرات کاربردی مانند نانوسیلیکا، نانوساختارهای کربنی معروف CNT و گرافن، نانواکسیدهای فلزی مانند نانوذرات آلومینا و نانورس‌ها به صورت موردی، مورد مطالعه قرار گرفتند. سطح ویژه بسیار بالای نانوذرات به شرط توزیع و آماده سازی مناسب و عدم کلوخه‌ای شدن، به عنوان عامل کلیدی در خواص اعجاب انگیز این ساختارها معرفی شد. در پایان اگرچه چالش‌های تکنیکی در این حوزه وجود دارد، اما افزایش خواص مکانیکی، بهبودهای زیست محیطی و ذخیره انرژی، نیروی محرکه پژوهشگران برای کاربرد بیشتر نانوتکنولوژی در مهندسی عمران محسوب می‌شوند که آینده را نویدبخش و امیدوار کننده معرفی می‌کنند.

## منابع

1. N.B.Singh, Meenu Kalra and S.K.Saxena. (2017), "Nanoscience of Cement and Concrete", Materials Today: Proceedings, 4, PP 5478–5487.
2. Florence Sanchez, Konstantin Sobolev. (2010), " Nanotechnology in Concrete - A Review", Construction and Building Materials, 24, PP 2060–2071.
3. N.B.Singh, S.S.Das. (2012), " Nanoscience of cementitious materials ", Emerging Materials Research, 1, PP 221–234.
4. Hitesh R. Ashani, Sachin P. Parikh, J. H. Markna. (2015), " Role of Nanotechnology in Concrete a Cement Based Material: A Critical Review on Mechanical Properties and Environmental Impact", International Journal of Nanoscience and Nanoengineering, 2(5), PP 32–35.
5. Ahmed Sharif. (2016), " Review on advances in nanoscale microscopy in cement research", Micron, 80, PP 45–58.
6. Bjornstrom J, Martinelli A, Matic A, Borjesson L, Panas I. (2004), " Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium-silicate-hydrate formation in cement ", Chem Phys Lett, 392(1-3), PP 242–248.
7. Lin KL, Chang WC, Lin DF, Luo HL, Tsai MC. (2008), " Effects of nano-SiO<sub>2</sub> and different ash particle sizes on sludge ash-cement mortar ", Journal of Environment Management, 88(4), PP 708–14.
8. Konstantin Sobolev Miguel Ferrada Gutiérrez. (2014), " How Nanotechnology Can Change the Concrete World", John Wiley & Sons, Inc, USA.

Islamic Republic of Iran  
Ministry of Science,  
Research & TechnologyLicense Number  
3/3/3/270961

Tehran - Iran



تهران - ایران

Conference code: 97180-21302

کد اختصاصی کنفرانس: ۹۷۱۸۰-۲۱۳۰۲

جمهوری اسلامی ایران  
وزارت علوم، تحقیقات و فناوریشماره مجوز  
۳/۳/۳/۲۷۰۹۶۱

9. Lee SJ, Kriven WM. (2005), " Synthesis and hydration study of Portland cement components prepared by the organic steric entrapment method", Material Structure, 38(1), PP 87–92.
10. Ma, Peng-Cheng, Siddiqui, Naveed A, Marom, Gad, Kim, Jang-Kyo, (2010), " Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: A review", Composites PART a-applied science and Manufacturing , 41 (10), pp 1345-1367.
11. Szleifer I, Yerushalmi-Rozen R. (2005), "Polymers and carbon nanotubes – dimensionality, interactions and nanotechnology". Polymer, 46 (19), pp 7803-7818.
12. Mao-hua Z, Hui L. (2011), " Pore structure and chloride permeability of concrete containing nano-particles for pavement", Constr Build Mater, 25 (2), pp 608-616.
13. Collins F, Lambert J, Duan WH. (2012), " The influences of admixtures on the dispersion, workability, and strength of carbon nanotube-OPC paste mixtures", Cem Concr Compos, 34 (2), pp 201-207.
14. Li GY, Wang PM, Zhao X. (2005), " Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes", Carbon, 43 (6), 1239-1245.
15. Sanchez F, Zhang L, Ince C. (2009), " Multi-scale performance and durability of carbon nanofiber/cement composites, in nanotechnology in construction", Springer, 3, pp 345-350.
16. L.P. Singh , S.R. Karade, S.K. Bhattacharyy, M.M. Yousuf, S. Ahalawat. (2013), "Beneficial role of nanosilica in cement based materials – A review", Construction and Building Materials, 47, pp 1069-1077.
17. Samuel Chuah, Zhu Pan, Jay G. Sanjayan, Chien Ming Wang, Wen Hui Duan. (2014), "Nano reinforced cement and concrete composites and new perspective from graphene oxide", 73, pp 113-124.
18. Li H, Xiao H-g, Yuan J, Ou J. (2004), "Microstructure of cement mortar with nanoparticles", Compos B Eng, 35 (2), pp 185-189.
19. Min-Hong Zhang and Jahidul Islam. (2012), "Use of nano-silica to reduce setting time and increase early strength of concretes with high volumes of fly ash or slag", Construction and Building Materials, 29, pp 573-580.
20. Sumio Iijima. (1991), "Helical microtubules of graphitic carbon", Nature 354, 56–58.
21. ANDRE K. GEIM. (2010), "RANDOM WALK TO GRAPHENE", Nobel Lecture.
22. Baoguo Han , Shengwei Sun, Siqi Ding, Liqing Zhang , Xun Yu , Jinping Ou. (2015), "Review of nanocarbon-engineered multifunctional cementitious composites", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 70, pp 69-81.
23. Monica J. Hanus , Andrew T. Harris. (2013), "Nanotechnology innovations for the construction industry", Progress in Materials Science, 58, pp1056-1102.

**3rd**International Conference on New Findings  
of Civil, Architectural and Iran Building Industryسومین کنفرانس بین المللی یافته های نوین  
عمران، معماری و صنعت ساختمان ایران

July 5,6 2018

۱۴۱۵ خرداد ماه ۱۳۹۷

Ministry of Science,  
Research & Technology  
License Number  
3/3/3/270961

Tehran - Iran

Conference code: 97180-21302  
کد اختصاصی کنفرانس: ۹۷۱۸۰-۲۱۳۰۲

تهران - ایران

جمهوری اسلامی ایران  
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری  
شماره مجوز  
۳/۳/۳/۲۷۰۹۶۱

24. J. Makar, J. Margeson, J. Luh, In. (2005), "Carbon nanotube/cement composites - early results and potential applications", 3rd International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications, Vancouver.
25. Maria S. Konsta-Gdoutos, Zoi S. Metaxa, Surendra P. Shah. (2010), "Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement based materials", Cement and Concrete Research, 40, pp 1052-1059.
26. X.L. Xie, Y.W. Mai, X.P. Zhou. (2005), "Dispersion and alignment of carbon nanotubes in polymer matrix: A review", Mater. Sci. Eng, 49 (4), pp 89-112.
27. U.Abinayaa, D.Chetha, S.Chathuska, N.Praneeth, R.Vimantha, K.K. Wijesundara. (2014), "Improving the properties of concrete using carbon nanotubes", SAITM Research Symposium on Engineering Advancements, pp 201-204.
28. Teng Tong, Zhou Fan, Qiong Liu, Sen Wang, Susheng Tan, Qiang Yu. (2016), "Investigation of the effects of graphene and graphene oxide nanoplatelets on the micro- and macro-properties of cementitious materials", Construction and Building Materials, 106, pp 102-114.
29. Li D, Müller MB, Gilje S, Kaner RB, Wallace GG. (2008), "Processable aqueous dispersions of graphene nanosheets", Nat Nanotechno, 3 (2), pp 101-105.
30. Shenghua Lv, Yujuan Ma, Chaochao Qiu, Qingfang Zhou. (2013), "Regulation of GO on cement hydration crystals and its toughening effect", Magazine of Concrete Research, 65 (20), pp 1246-1254.
31. Geng Y, Wang SJ, Kim JK. (2009), "Preparation of graphite nanoplatelets and graphene sheets", J Colloid Interf Sci, 336 (2), pp 592-598.
32. Zhu PanWenhui DUANDan LiFrank Collins. (2012), "Graphene oxide reinforced cement and concret", WO Patent App. PCT/AU2012/001,582.
33. Jun Chen , Shi-cong Kou , Chi-sun Poon, (2012), "Hydration and properties of nano-TiO<sub>2</sub> blended cement composites", Cement & Concrete Composites, 34, pp 642-649.
34. M.S. Muhd Norhasri, M.S. Hamidah, A. Mohd Fadzil. (2017), "Applications of using nano material in concrete: A review", Construction and Building Materials, 133, pp 91-97.
35. J. Rosenqvist. (2002), "Surface Chemistry of Al and Si (Hydr)Oxides, With Emphasis on Nano-Sized Gibbsite (A-Al(OH)<sub>3</sub>)", Department of Chemistry, Inorganic Chemistry, Umeå University, Umeå, Sweden,
36. Hui Li, Hui-gang Xiao, Jie Yuan, Jinping Ou. (2004), "Microstructure of cement mortar with nano-particles", Composites: Part B, 35, pp 185-189.
37. DiZhang, Chun-HuiZhou, Chun-XiangLin, Dong-ShenTong, Wei-HuaYu. (2010), "Synthesis of clay minerals", 50 (1), pp 1-11.
38. Z Adamis. (2005), "Bentonite, kaolin and selected clay minerals. Geneva : World Health Organization. ", Environmental health criteria, editor.

**3rd**International Conference on New Findings  
of Civil, Architectural and Iran Building Industryسومین کنفرانس بین المللی یافته های نوین  
عمران، معماری و صنعت ساختمان ایران

July 5,6 2018

۱۴۱۵ قیروماه ۱۳۹۷

Islamic Republic of Iran  
Ministry of Science,  
Research & TechnologyLicense Number  
3/3/3/270961

Tehran - Iran



تهران - ایران

Conference code: 97180-21302

کد اختصاصی کنفرانس: ۹۷۱۸۰-۲۱۳۰۲

جمهوری اسلامی ایران  
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری  
شماره مجوز  
۳/۳/۳/۲۷۰۹۶۱

39. M.S. Morsy, S.A. Alsayed, M. Aqel. (2010), "Effect of nano-clay on mechanical properties and microstructures of ordinary Portland cement mortar", International Journal of Civil & Environmental Engineering, 10 (1), pp 23-27.
40. Mohamed Heikal, A.I. Ali , M.N. Ismail , S. Awad N.S. Ibrahim. (2014), "Behavior of composite cement pastes containing silica nano-particles at elevated temperature", Construction and Building Materials, 70, pp 339-350.
41. P. Blanchart, S. Deniel, N. Tessier-Doyen. (2010), "Clay structural transformations during firing", Advances in Science and Technology, 68, pp 31-37.
42. S. Aiswarya, G. Prince Arulraj, A. Narendran. (2015), "Experimental investigation on concrete containing Metakaolin", IRACST – Engineering Science and Technology, 3 (1), 180-187.
43. E. Ghafari, H. Costa, E. Júlio. (2015), "Critical review on eco-efficient ultra high performance concrete enhanced with nano-materials", construction building material, 101, pp 201-208.
44. M.S. Morsy Y.A. Al-Salloum H. Abbas S.H. Alsayed. (2012), "Behavior of blended cement mortars containing nano-metakaolin at elevated temperatures", Construction and Building Materials, 35, pp 900-905.
45. Flores-Vivian, I., Sobolev, K., Torres-Martinez, L. M., Cuellar, E. L., Valdez, P. L. & Zarazua, E. (2010), "Performance of Cement Systems with Nano-SiO<sub>2</sub> Particles Produced by Using the Sol-Gel Method", Journal of the Transportation Research Board, 2141 (1), pp 10-14.