



## بررسی تئوری های موجود در مکانیزم مسلح شدن ماتریس های سیمانی بوسیله نانولوله های کربنی

محمدرضا احمدیه<sup>\*۱</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- زلزله، دانشگاه علم و صنعت ایران

\* M\_ahmadih@cmeps2.iust.ac.ir

ارسال: فروردین ماه ۹۶ پذیرش: تیر ماه ۹۶

### خلاصه

در این پژوهش بکارگیری نانولوله های کربنی MWCNT (نانولوله های کربنی چند جداره) و SWCNT (نانولوله کربنی تک جداره) در ماتریس سیمانی جهت افزایش مقاومت فشاری و مقاومت خمشی و همچنین قابلیت جذب انرژی ملات سیمان استاندارد با توجه به درصد وزنی مختلف الیاف و روش های مختلف پراکنده کردن الیاف داخل ماتریس مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین به مطالعه تاثیر طول نانولوله ها در ماتریس های مختلف سیمانی با توجه به تغییرات نسبت آب به سیمان پرداخته شده است. در این تحقیق با توجه به نتایج آزمایش های خمشی و تصاویر اسکن میکروسکوپ الکترونی TEM، روش استفاده از MWCNT عامل دار در محلول تحت اولتراسونیک، روش پخش مناسبی معرفی می شود. بدلیل استفاده از نانولوله ها در ملات سیمانی، قابلیت جذب انرژی ملات سیمانی به میزان قابل ملاحظه ای افزایش یافته که نشانگر قابلیت نانولوله ها در پل زدن و بستن ریزترک ها در صورت پخش مناسب است.

کلمات کلیدی: نانولوله، مسلح شدن، ماتریس سیمانی، مقاومت خمشی، مقاومت فشاری

### ۱. مقدمه

با توجه به این که چندین فاکتور در مقاوم سازی بتن سیمانی از جمله؛ نسبت آب به سیمان و تخلخل و پیوستگی بین سیمان و سنگ دانه و فاکتور های دیگر وجود دارد، اما مهمترین پارامتر در مقاوم کردن سیمان، CSH یا کلسیم سیلیکات هیدرات می باشد. حال اگر الیاف دیگری نظیر CNT وارد CSH شوند و بتوانند درون ماتریس سیمانی قرار بگیرند، مقاومت بسیار بیشتری از CSH تنها به دست می آید [۱].

افزودن CNT های مختلف به بتن باعث بهبود خواص بتن نظیر مقاومت های کششی، خمشی و ضربه ای، قابلیت جذب انرژی و مقاومت در برابر آتش سوزی و افزایش عمر مفید سازه های بتنی در مقایسه با بتن های معمولی شده است. در سالهای اخیر تحقیقات گسترده ای برای پیشرفت و نوآوری در استفاده از الیاف میکرونی برای بهبود رفتار مکانیکی ترکیبات سیمانی و بتن انجام شده است. با توجه به این پژوهش ها در مقیاس میکرونی، توجه به نانولوله های کربنی به کمک دانش و فناوری نانو و مطالعه اثرات آنها بر خواص بتن بسیار اهمیت دارد.

نانو لوله های کربنی نسبت طول به قطر بالایی دارند بنابراین انرژی بیشتری را برای انتشار ترک در اطراف خود در مقایسه با سایر الیاف، نیاز خواهند داشت. همچنین قطر کمتر آنها به معنی امکان توزیع هرچه بیشتر و با فاصله کمتر در خمیر سیمان است. در نتیجه انتظار می رود عمل متقابل آن ها با خمیر سیمان متفاوت تر از دیگر انواع الیاف باشد. نانو لوله های کربنی قابلیت افزایش مقاومت، ممانعت از انتشار ترک بصورت مؤثر در کامپوزیت های سیمانی و عملکرد یکپارچه را دارند. مسلح کردن بتن با نانو لوله ها، در صورتیکه سبب جلوگیری از تشکیل ترک های بزرگتر شود، میتواند به تولید بتن های چقرمه تری منجر شود [۲]. هنگام بارگذاری بتن، ریزش ترک های اولیه و کوتاه در آن توزیع می شوند. با یکی شدن این ریزش ترک ها، ترک های بزرگ قابل رویت شکل میگیرند. الیاف بکار رفته در کامپوزیت های سیمانی میتوانند با پل زدن و بستن ترک ها در خلال بارگذاری و باربرداری، رشد ترک را کنترل نمایند، بنابراین استفاده از نانو لوله های کربنی میتواند منجر به کنترل ترک ها در مقیاس نانو شود. برخی نتایج نشان می دهند که نانو لوله های کربنی دارای پراکندگی مؤثر، با کنترل ترک های خمیر سیمان در مقیاس نانو، میتواند باعث بهبود برخی مشخصات بتن و همچنین افزایش ظرفیت کرنشی در سنین اولیه شود [۳]. مشخصه های مکانیکی، نسبت طول به قطر بالا، وزن مخصوص کم و مقاومت در برابر خوردگی، نانو لوله های کربنی را به مصالح مسلح کننده مفیدی برای پیشرفت مصالح ساختمانی بدل کرده است. تا کنون نانو لوله های کربنی بکار رفته در بتن های معمولی یا بتن های با عملکرد بالا منجر به بهبود برخی مشخصه های مکانیکی شده اند.

## ۲. ساختار نانو لوله های کربنی

از نظر ساختار، CNT ها ساختار لوله ای دارند و از یک یا چند ورقه گرافیتی تشکیل شده اند. انواع مختلف CNT ها عبارتند از SWCNT's و MWCNT's که به ترتیب نانو لوله های کربنی تک جداره و نانو لوله های کربنی چند جداره می باشند. در انواع تک جداره، نانو لوله فقط از یک جداره تشکیل میشود درحالیکه در انواع چند دیواره، چندین جداره تو در تو، نانو لوله را تشکیل می دهند. قطر نانو لوله های کربنی از چند نانومتر در مورد تک دیواره ها (۱-۳ نانومتر) و در مورد چند دیواره ها متغیر (۱۰-۱۰۰ نانومتر) است. طول آنها معمولاً در حدود میکرومتر است. (۰.۵-۵۰ میکرومتر).

## ۳. بحث و بررسی

### ۱.۳. تاثیر نانو لوله کربنی و پخش بهینه آن در مقاومت ماتریس

آزمایش سالتوات و همکارانش [۴] نشان داد که مدول یانگ CNT ها حدود 1 Tpa یعنی حدوداً ۱۰۰ برابر مقاوم تر از فولاد هستند. کونستانتوس و همکارانش [۵] به بررسی تغییرات نانو ساختار، مقاومت خمشی و مدول یانگ و جمع شدگی خمیر سیمان مسلح شده با نانو الیاف، مانند نانو لوله های کربنی و نانو الیاف کربنی که بخوبی پراکنده شده اند پرداخته اند. طبق نتایج این تحقیق، نانو الیاف نه تنها مقاومت خمشی ماتریس سیمانی را با کنترل ترک های ماتریس در مقیاس نانو بهبود می بخشد؛ بلکه ظرفیت کرنشی در سنین اولیه کامپوزیت سیمانی را نیز بهبود بخشیده و در نتیجه نانو کامپوزیت با عملکرد بالا حاصل میشود. این مؤلفین در مقاله دیگری [۶] با اشاره به مشخصه های مکانیکی نانو لوله های کربنی، استفاده از آنها را در کامپوزیت های سیمانی با عملکرد بالا پیشنهاد کرده اند. در این راستا به مسئله مهم نحوه پخش نانو لوله ها در مصالح سیمانی پرداخته و نانو لوله های با طول های مختلف به مقدار ۰.۰۸٪ وزن سیمان را با استفاده از انرژی اولتراسونیک و فعال کننده سطحی بصورت مؤثر در آب پخش نموده اند. به گفته نویسندگان این مقاله، استفاده از شرایط اولتراسونیک برای پخش مناسب کاملاً ضروری بوده و مقدار بهینه ای برای نسبت وزنی فعال کننده سطحی مورد استفاده به نانو لوله وجود دارد. نتایج بیانگر بهبود مشخصه های نانو و میکرو مکانیکی خمیر سیمان توسط نانو لوله های کربنی است.

## ۲.۳. تاثیر نانو لوله های کربنی در کاهش تخلخل ماتریس

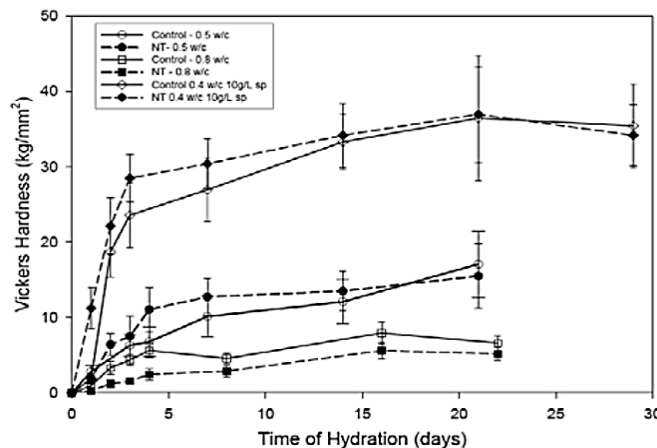
تخلخل و میکرو ساختار کامپوزیت متشکل از سیمان پرتلند و نانو لوله کربنی چند دیواره توسط نوچایا و چایانیچ [۷] بررسی شده است. در این پژوهش خمیر سیمان حاوی سیمان پرتلند نوع ۱ و نانو لوله کربنی چند دیواره تا ۱٪ وزن سیمان و نسبت آب به سیمان ۰/۵ تهیه شد. طبق بیان مؤلفین، تخلخل کلی مخلوط با افزایش محتوی نانو لوله کربنی کاهش میابد. تصاویر اسکن میکروسکوپ الکترونی نیز اثر متقابل نانو لوله های کربنی و محصولات هیدراسیون را نشان میدهد که MWCNT ها بصورت پرکننده عمل میکنند و باعث میکرو ساختار چگال تر خمیر سیمان در مقایسه با مخلوط کنترل عادی میشوند.

## ۳.۳. تاثیر نانو لوله های سیمانی در کاهش زمان هیدراسیون و مسلح شدن ماتریس

ورا آگولو و همکاران [۸] نانو لوله ها و نانو سیلیس و نانو رس را در کامپوزیت های سیمانی بکار برده اند. رفتار فیزیکی شیمیایی این نانو مصالح در سه تراز خمیر سیمان، ملات و بتن بررسی شده است. تقریباً تمامی نانو مصالح بکار رفته در بتن در صورتیکه از پراکندگی مناسبی در مخلوط برخوردار باشند، فرایند هیدراسیون را تسریع نموده و مقاومت های فشاری و خمشی را بهبود میبخشند. متاکسا و همکاران [۹] اثر مسلح کنندگی نانو لوله های چند دیواره کربنی (MWCNT) در خمیر سیمان که بخوبی در مخلوط پراکنده شده اند را بررسی نمودند. مشخصه های مقاومت شکست افزایش یافته بیانگر قابلیت مسلح کنندگی عالی MWCNT است. نتایج این تحقیق نشان میدهند که مصرف درصد های وزنی کم MWCNT ها (۰/۲۵-۰/۴۸ درصد وزنی سیمان) که بخوبی در مخلوط پراکنده شده اند میتواند مقاومت و سختی ماتریس سیمانی را به نحو مؤثری افزایش دهند. همچنین با توجه به نتایج این تحقیق نانو کامپوزیت ها، در مقایسه با خمیر سیمان ساده، مقادیر بیشتری از هیدرات های سیلیکات کلسیم با مقاومت بالا و تخلخل کمتری دارند MWCNT ها بدلیل قطر کوچک، مقدار حفره های ریز را بصورت قابل ملاحظه های کاهش می دهند که منجر به کاهش تنش های ناشی از موئینگی و در نتیجه اثر مفید بر روی ظرفیت کرنشی اولیه نانو کامپوزیت ها میشود.

## ۴.۳. رابطه نسبت آب به سیمان در ماتریس های سیمانی مسلح شده با نانو لوله های کربنی

ماکار و همکارانش [۱۰] در سال ۲۰۰۵ متوجه شدند که تقویت کامپوزیت با CNT تا حدی به ماتریس و زمان هیدراسیون سیمان بستگی دارد. به عنوان مثال نسبت آب به سیمان ۰/۸ در کامپوزیت ها نشان داد که در همه زمان های هیدراسیون شاهد کاهش مقاومت بودیم. در مقابل آن با نسبت آب به سیمان کم نمونه با ۰/۲ SWCNT مقاومت ۶۰٪ را بعد از ۱۴ روز نشان داد. (شکل ۱). همچنین ایبارا و همکارانش [۱۱] در سال ۲۰۰۶ روی تاثیر ۰/۰۵ SWCNT ها و ۰/۱ و ۰/۲ MWCNT در ماتریس سیمانی مطالعه کردند و گزارش ها حاکی از آن بود که بهبود مناسبی در سختی و مدول یانگ رخ داده است. مطالعات یاکوولو و همکارانش [۱۲] در سال ۲۰۰۶ نشان داد که بهترین نسبت CNT به میزان ۰/۰۵ می باشد که مقاومت نمونه ها تا ۷۰٪ افزایش پیدا می کند.



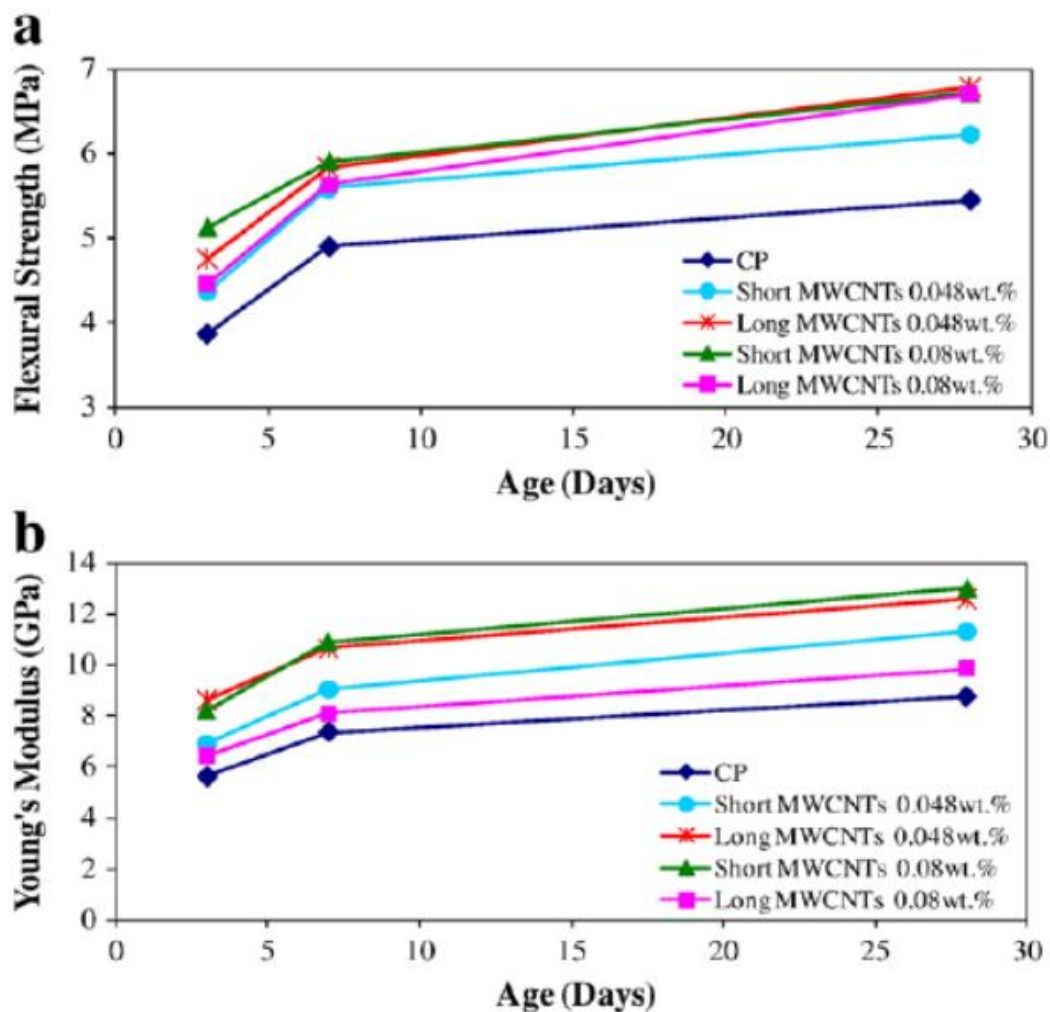
شکل ۱- اندازه گیری سختی خمیر سیمان با نانو لوله کربنی و بدون نانو لوله کربنی با نسبت های آب به سیمان مختلف

**۵.۳. تاثیر طول نانو لوله ها روی مقاومت ماتریس**

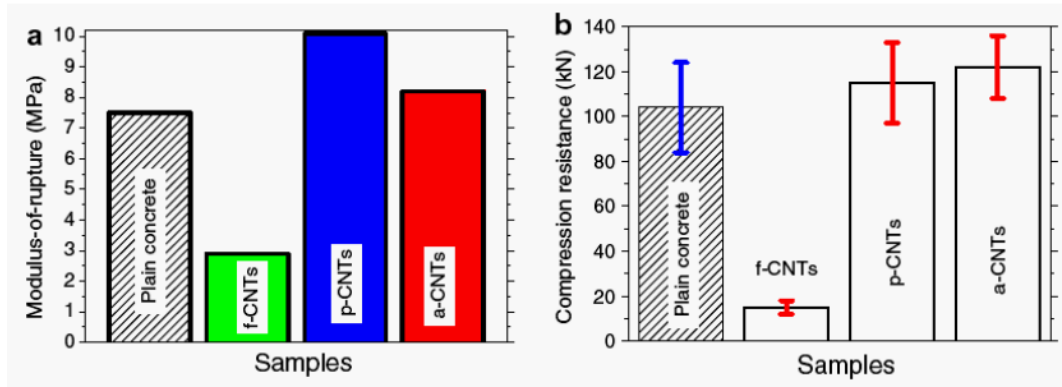
همچنین مطالعات صورت گرفته در سال های ۲۰۰۹-۲۰۱۰ روی تاثیر طول MWCNT ها و تمرکز روی خصوصیات شکست نانو کامپوزیت ها تحت نسبت ثابت وزنی سورفکتانت ها طبق (شکل ۲) نشان می دهد که مقاومت خمشی و مدول یانگ در مقدار ۰/۰۸٪ MWCNT کوتاه بیشتر از ۰/۰۸٪ MWCNT بلند می باشد. اما ۰/۰۴۸٪ MWCNT بلند مقاومت خمشی و مدول یانگ بیشتری در مقایسه با ۰/۰۴۸٪ MWCNT کوتاه دارا می باشد. لو و همکارانش [۱۳] در سال ۲۰۰۹ خمیر ساده سیمان با ۰/۲٪ MWCNT را با سورفکتانت های مختلف ساختند و نتیجه گرفتند که مقاومت خمشی ۳۵/۴۵٪ و مقاومت فشاری ۲۹/۵٪ افزایش یافت. موسو و همکارانش در سال ۲۰۰۹ با افزودن ۰/۵٪ وزنی سیمان MWCNT ها به صورت عادی و گرم کرده دریافتند که انعطاف پذیری و مقاومت فشاری افزایش یافته است (شکل ۳).

**۶.۳. تاثیر گروه عاملی روی افزایش مقاومت کامپوزیت ها**

دوو و همکارانش [۱۴] در سال ۲۰۱۰ کارایی مکانیکی نانو کامپوزیت های عاملدار شده با کربوکسیل را بررسی کردند و مشاهده کردند که انعطاف پذیری ۳۰٪ و مقاومت فشاری ۱۰۰٪ افزایش داشته است (جدول ۱).



شکل ۲- تغییرات مقاومت خمشی و مدول یانگ تحت تاثیر طول MWCNT ها و نسبت آب به سیمان (w/t)



شکل ۳- مدول گسیختگی و مقاومت فشاری خمیر سیمان با نانو لوله کربنی و بدون نانو لوله کربنی - p نانو لوله تازه -  
a نانو لوله گرم شده - f نانو لوله عاملدار شده با کریوکسیل

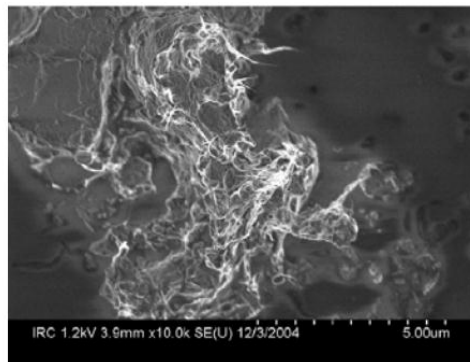
جدول ۱- مقایسه مقاومت خمشی و فشاری بتن مسلح با CF و بتن مسلح با CNT

Type of materials	Flexural strength (Mpa)	Compressive strength (Mpa)
CFs reinforced cement-base materials	۲.۴۲	۱۴
CNTs reinforced cement-based materials	۳.۲	۲۶.۸

سوورزن و همکارانش [۱۵] در سال ۲۰۰۸ آزمایشی را بر روی نانو کامپوزیت ها با عاملداری هیدروکسیل با مقدار کم MWCNT (حدود ۰/۰۴۵٪ تا ۰/۱۵٪ درصد وزنی سیمان) انجام دادند و متوجه شدند با این روش میتوانند مقاومت را تا ۵۰٪ افزایش دهند.

### ۷.۳. تاثیرات دیسپرسیون روی مقاومت کامپوزیت

چالش اصلی استفاده از مواد در مقیاس نانو دیسپرس کردن آن ها در ماتریس یا تهیه مخلوط همگن و یکنواخت می باشد. چرا که به دلیل افزایش سطح آن ها در مقیاس نانو نیروی جاذب و اندروالسی بین آن ها افزایش یافته و باعث کلوخه شدن نانو لوله ها می شود (شکل ۴). به طور مثال میتوان به تحقیقاتی که موسو و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۰۹ با عنوان تأثیرات نانو لوله های کربنی بر روی خواص مکانیکی ترکیبات سیمان انجام دادند اشاره کرد که برای کوچکتر کردن دسته های نانو لوله کربنی، آنها را با استفاده از دستگاه اولتراسونیک به همراه استون به مدت ۴ ساعت مخلوط کردند و بعد از بخار شدن استون در ملات ها مورد استفاده قرار دادند. همینطور در آزمایش های دیگری که توسط ماکار و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۰۷ انجام شد گسترش زمینه های استفاده از سیمان و ترکیب آن با نانو لوله های کربنی مورد بررسی قرار گرفت. در این آزمایش ها از نانو لوله کربنی تک جداره استفاده شده است. این محققین برای پخش یکنواخت CNTها در داخل خمیر سیمان، نانو لوله های کربنی را قبل از مصرف همراه با ایزوپروپانال به مدت ۴ ساعت با استفاده از دستگاه اولتراسونیک مخلوط کرده و بعد از تبخیر شدن ایزوپروپانال در مخلوط مورد استفاده قرار دادند.



## شکل ۴- تصویر میکروسکوپ الکترونی TEM از نانولوله های کربنی کلوخه شده

لی و همکاران [۱۸] برای پیوستگی بیشتر بین MWCNT و خمیر سیمان از شیوه کربوکسیالسیون استفاده کرده اند. آن ها با عامل دار کردن MWCNT ها با کربوکسیل مشاهده کردند که انعطاف پذیری تا ۱۹٪ و مقاومت فشاری ۲۵٪ افزایش یافته است. ونسوم و همکاران [۱۹] نیز از فوق روان کننده پلیکربوکسیالتی به همراه MWCNT استفاده کرده و در آزمایشهای خود خواص الکتریکی کامپوزیت سیمان - نانولوله را مورد تحقیق و بررسی قرار دادند. سویرزن و همکاران [۲۰] برای دسترسی به مخلوط همگن MWCNT و آب از پلیمر اسید پلیاکریلیک و دستگاه اولتراسونیک استفاده کردند که نتایج آزمایش های آن ها افزایش در مقاومت فشاری ملات سیمان را نشان داد. همانطور که دیده میشود پراکنده کردن یکنواخت CNT ها در کلیه نقاط ملات از مشکلات اساسی بوده و میتواند نقش مهمی در بهبود خواص ملات های حاوی نانولوله های کربنی ایفا نماید. این موضوع در هنگام استفاده از CNT ها با طول زیاد میتواند اساسی تر باشد. در این تحقیق سعی شده است ضمن بررسی مقاومتهای خمشی و فشاری و میزان جذب انرژی ملات های سیمانی حاوی درصد های متفاوت نانولوله های کربنی، روشهای متفاوت پخش نانولوله های کربنی داخل ملات سیمان نیز ارزیابی شده و بر روی نتایج و تصاویر میکروسکوپ الکترونی بحث شود.

## ۴. مطالعات آزمایشگاهی

در این آزمایش [۲۱] از سیمان پرتلند نوع I استفاده شده است که بعد از آوردن این سیمان به آزمایشگاه، به جهت نفوذ رطوبت به آن، درون یک ظرف پلاستیکی مهر و موم شده قرار داده شده است. همچنین به منظور مسلح کردن این سیمان از MWCNT ها استفاده شده است که در ادامه توضیحات کامل ارائه خواهد شد.

## ۴.۱. نانویوب های کربنی چند جداره آزمایش

خصوصیات CNT های استفاده شده در این آزمایش در جدول ۲ می باشد. طبق اطلاعات داده شده از کارخانه سازنده، این نانولوله ها به وسیله رسوب بخار شیمیایی ساخته شده اند.

جدول ۲- خصوصیات CNT های استفاده شده در این مقاله

ویژگی	مقدار
محتوای کربن (%)	>۹۵
قطر خارجی (nm)	۶۰ - ۱۰۰
قطر داخلی (nm)	۵ - ۱۰
طول ( $\mu\text{m}$ )	۰.۵ - ۵۰
سطح موثر ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	۴۰ - ۳۰۰
نقطه ذوب ( $^{\circ}\text{C}$ )	۳۶۵۲ - ۳۶۹۷
چگالی ( $\frac{\text{gm}}{\text{ml}}$ در $25^{\circ}\text{C}$ )	$\approx 2.1$

## ۴.۲. ترکیبات مخلوط

جدول شماره ۳، دو نوع مختلف از مخلوط ها را نشان می دهد (سیمان پرتلند نوع I کنترل ترکیب شده (CM) و سیمان حاوی CNT). سیمان CM هیچگونه نانولوله کربنی را دارا نیست. CNT در جدول ۳ اشاره به ترکیب خمیر سیمان با CNT به نسبت درصد وزنی مختلفی که در پراکنش نوشته شده است دارد و عدد چهار خارج از پرانتز بیانگر مدت زمان ۴ ساعت اعمال اولتراسونیک (شکل ۵) جهت همگن کردن محلول حاوی نانولوله ها می باشد. لازم به ذکر است سطر هایی که در خارج از

پرانتر عددی ندارند بیانگر مدت ۳۰ دقیقه اولتراسونیک می باشند. همگن سازی تمام نانو لوله ها درون آب صورت گرفته است و نسبت آب به سیمان ( $W/C$ ) برای تمامی کامپوزیت ها و خالت خمیر سیمان بدون نانو لوله کرنی ۰/۴ می باشد.

جدول ۳- جدول تفاوت درصد سیمان و CNT های آزمایش

نوع مخلوط	سیمان پرتلند تیپ ۱ (%)	نسبت آب به سیمان	درصد وزنی CNT (%)	مدت زمان همگن کردن CNT در اولتراسونیک
CM	۱۰۰.۰۰	۰.۴	۰.۵	۰
CNT(۰.۵)	۹۹.۵۰	۰.۴	۰.۷۵	۳۰
CNT(۰.۷۵)	۹۹.۲۵	۰.۴	۱	۳۰
CNT(۱.۰)	۹۹	۰.۴	۰	۳۰
CNT(۰.۵)۴	۹۹.۵۰	۰.۴	۰.۵	۲۴۰
CNT(۱.۰)۴	۹۹	۰.۴	۱	۲۴۰



شکل ۵- حمام التراسونیک جهت دیسپرس کردن نانو لوله ها در آب

#### ۳.۴. روش مخلوط کردن

ابتدا CNT ها به نسبت مشخص داخل ظروف حاوی آب ریخته شده و به اندازه زمان مورد نظر (۳۰ دقیقه یا ۴ ساعت) درون حمام اولتراسونیک قرار میدهیم تا به خوبی همگن شوند. پس از همگن شدن نانو لوله ها داخل آب آن ها را داخل خمیر سیمان ریخته و به صورت دستی یا به وسیله همزن های کوچک آزمایشگاهی به مدت یک دقیقه و با سرعت کم مخلوط کرده تا نانو لوله ها در داخل خمیر سیمان کاملاً پخش شوند. تمامی ترکیبات و آزمایشات انجام شده تحت استاندارد ASTM می باشند.

#### ۴.۴. خصوصیات نمونه ها

همانطور که میدانیم ۵ نمونه مختلف از کامپوزیت به همراه یک مدل خمیر سیمان عادی پرتلند مطابق (جدول ۳) ساخته شده است. این نمونه های استفاده شده دارای قطر ۱۵/۸ میلیمتر و ارتفاع ۳۱/۶ میلیمتر می باشند (شکل ۶). اندازه نمونه ها به دلیل پیروی از استاندارد های ASTM کوچک می باشد.

#### ۵.۴. عمل آوری نمونه ها

تمامی نمونه ها درون قالب در دمای اتاق یعنی بین ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتی گراد در ۲۴ ساعت نگهداری می شوند. بعد از خروج از قالب نمونه ها جهت عمل آوری به مدت ۲۸،۶۰،۹۰ و ۱۸۰ روز درون آب قرار می گیرند. رویه عمل آوری نمونه ها نیز بر طبق ASTM ۲۰۰۵ صورت گرفته است.



شکل ۶- نمونه های استوانه ای حاوی خمیر سیمان

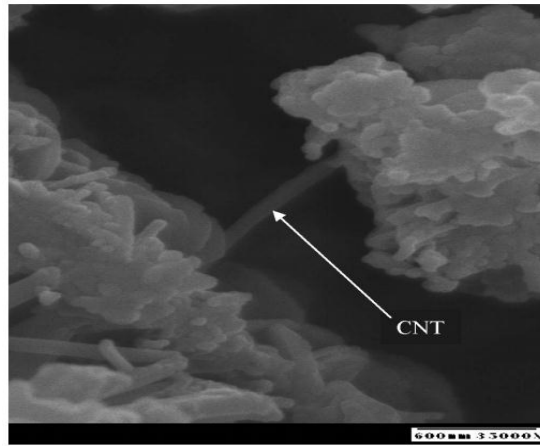
#### ۶.۴. رویه تست مقاومت فشاری و مقاومت کششی

نمونه های استوانه ای آماده شده بعد از مدت زمان مورد نیاز خود جهت عمل آوری وارد فاز اندازه گیری مقاومت فشاری و کششی خود شده اند. نمونه ها تحت بار نامحدود تا شکست با سرعت بارگذاری ۰/۱۲۷ میلیمتر بر دقیقه (حدود ۰/۵٪ ارتفاع نمونه) قرار می گیرند. میانگین مقاومت فشاری محصور نشده نمونه تحت عمل آوری های مختلف در جدول ۴ نشان داده شده است. در واقع CNT ها با ایجاد پل بر روی ریزترک ها جلوی باز شدن آن ها و ایجاد ترک های بزرگ را می گیرد. در (شکل ۷) میتوان این پل زدگی را که از اسکن میکروسکوپ SEM به دست آمده و دارای طول ۶۰۰ نانو متر است را مشاهده کرد. از آن جهت که مدوال الاستیسیته CNT ها ۱ Tpa است یعنی ۱۰۰ برابر مقاوم تر از فولاد این پل بسیار مقاوم خواهد بود (شکل ۸). نمابانگر نانولوله هایی است که به خوبی همگن نشده اند و به وسیله نیروی واندروالس به صورت کلوخه شده در آمده اند و این امر باعث افزایش مقاومت کمتری نسبت به حالت کاملاً همگن شده می شود. همچنین میتوان تأثیرات مدت عمل آوری و درصد وزنی نانولوله های کربنی روی مقاومت کششی نمونه ها را در جدول ۵ مشاهده کرد.

جدول ۴- مقاومت فشاری نمونه ها

مقاومت فشاری (Mpa)						
مدت عمل آوری	CM	CNT(۰.۵)	CNT(۰.۷۵)	CNT(۱)	CNT(۰.۵)۴	CNT(۱)۴
۷	۲۸.۹۶	۳۵.۱۶	۳۳.۷۹	۲۴.۱۳	۳۷.۵۸	۲۸.۲۷
۲۸	۳۹.۰۷	۴۴.۸۲	۳۷.۹۲	۲۷.۵۸	۴۸.۴۹	۲۳.۹۰
۶۰	۴۳.۴۴	۴۶.۸۹	۴۲.۴۰	۳۱.۷۲	۴۹.۶۴	۲۹.۳۰
۹۰	۴۳.۴۴	۴۸.۴۹	۴۲.۵۲	۳۱.۰۳	۴۹.۸۷	۳۳.۳۳
۱۸۰	۴۳.۴۴	۴۸.۹۵	۴۲.۷۵	۳۱.۷۲	۴۹.۹۹	۳۳.۴۴





شکل ۷- پل زدگی نانو لوله روی ریزترک موجود در ماتریس



شکل ۸- کلوخه شدن CNT ها به دلیل همگن شدن نامناسب و به سبب نیروی واندرالس

جدول ۵- مقاومت کششی نمونه ها

مقاومت کششی (Mpa)						
مدت عمل آوری	CM	CNT(۰.۵)	CNT(۰.۷۵)	CNT(۱)	CNT(۰.۵)۴	CNT(۱)۴
۷	۵.۲۷	۶.۲۱	۵.۱۷	۳.۱۰	۵.۵۲	۳.۱۰
۲۸	۵.۵۶	۷.۵۸	۶.۹	۵.۸۶	۶.۶۷	۴.۳۷
۶۰	۶.۹	۷.۵۸	۶.۹	۶.۲۱	۷.۵۸	۴.۱۴
۹۰	۶.۹	۷.۵۸	۶.۰	۳.۹۱	۷.۵۸	۴.۸۳
۱۸۰	۶.۹	۷.۵۸	۶.۹	۵.۵۲	۷.۹۳	۶.۲۱

## ۵. نتیجه گیری

- استفاده از روش های مختلف پخش به نتایج مختلفی منجر می شود.
- افزایش مقاومت فشاری و کششی کامپوزیت سیمان و نانو لوله های کربنی دارای ۰/۵ درصد وزنی به ترتیب به میزان ۱۵ و ۳۶ درصد در ۲۸ روز.
- تمام نمونه های آزمایشگاهی ( CM و CNT ) در مدت ۲۸ روز عمل آوری مقاومت بیشتری نسبت به ۷ روز عمل آوری به دست می آورند.

- تصاویر اسکن شده از میکروسکوپ الکترونی SEM دلیل مقاومت کمتر نمونه ها با محلول خوب همگن نشده و کلوخه شدن CNT ها را نشان می دهد. همینطور مکانیزم پل زدن روی میکرو ترک ها را نمایان می کند.
- در عمل آوری ۹۰ روزه همگن کردن ۴ ساعته توسط اولتراسونیک مقاومت بیشتری را نسبت به همگن کردن ۳۰ دقیقه ای فراهم می کند.

## ۶. قدردانی

بدینوسیله از جناب آقای دکتر حبیب نژاد کورایم عضو محترم هیئت علمی دانشکده عمران دانشگاه علم و صنعت ایران که بنده را با راهنمایی های خود یاری نمودند صمیمانه تشکر می نمایم.

## ۷. منابع

1. Sanjeev Kumar, F.ASCE; Prabir Kolay, M.ASCE; Sunil Malla; and Sanjay Mishra “Effect of Multiwalled Carbon Nanotubes on Mechanical Strength of Cement Paste” JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING © ASCE / JANUARY 2012
2. A. Keyvani, “Huge opportunities for industry of nanofbrous concrete technology”, International Journal of Nanoscience and Nanotechnology, vol. 3 no. 1, pp. 3–11, 2007.
3. M. S. Konsta-Gdoutos, Z. S. Metaxa, and S. P. Shah, “Multi-scale mechanical and fracture characteristics and early-age strain capacity of high performance carbon nanotube/cement nanocomposites,” Cement and Concrete Composites, vol. 32, no. 2, pp. 110–115, Feb. 2010
4. Salvetat, J. P., et al. (1999). Mechanical properties of carbon nanotubes Appl. Phys. A, 69(3), 255–260.
5. M. S. Konsta-Gdoutos, Z. S. Metaxa, and S. P. Shah, “Multi-scale mechanical and fracture characteristics and early-age strain capacity of high performance carbon nanotube/cement nanocomposites,” Cement and Concrete Composites, vol. 32, no. 2, pp. 110–115, Feb. 2010.
6. M. S. Konsta-Gdoutos, Z. S. Metaxa, and S. P. Shah, “Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement based materials,” Cement and Concrete Research, vol. 40, no. 7, pp. 1052–1059, 2010.
7. T. Nochaiya and A. Chaipanich, “Behavior of multi-walled carbon nanotubes on the porosity and microstructure of cement-based materials”, Applied Surface Science, vol. 257, no. 6, pp. 1941–1945, 2011.
8. J. Vera-Agullo, V. Chozas-Ligero, D. Portillo-Rico, M. J. García-Casas, A. Gutiérrez-Martínez, J. M. Mieres-Royo, and J. Grávalos-Moreno, “Mortar and Concrete Reinforced with Nanomaterials,” in Nanotechnology in Construction 3, 2009, pp. 383–388
9. Z. S. Metaxa, M. S. Konsta-Gdoutos, and S. P. Shah, “Carbon nanotubes reinforced concrete,” ACI Special Publication, vol. 267, no. 2, pp. 11–20, 2009
10. Makar, J., Margeson, J., Luh, J.: Carbon nanotube/cement composites-early results and potential applications. In: Third International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications, Vancouver, pp. 1–10 (2005)
11. De Ibarra, Y.S., Gaitero, J.J., Campillo, I.: Atomic force microscopy and nanoindentation of cement pastes with nanotube dispersions. Physica Status Solidi A 203, 1076–1081 (2006)
12. Yakovlev, G., Kerienè, J., Gailius, A., Girmienè, I.: Cement based foam concrete reinforced by carbon nanotubes. Materials Science 12(2), 147–151 (2006)
13. Luo, J.L.: Fabrication and functional properties of multi-walled carbon nanotube/cement composites. Dissertation for the Doctoral Degree in Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China (2009)
14. Veedu, V.P.: Multifunctional cementitious nanocomposite material and methods of making the same. Patent: US 7666327 B1 (2010)
15. Cwirzen, A., Habermehl-Cwirzen, K., Penttala, V.: Surface decoration of carbon nanotubes and mechanical properties of cement/carbon nanotube composites. Advances in Cement Research 20, 65–73 (2008)

16. S. Musso, J. Tulliani, G. Ferro, and A. Tagliaferro, "Influence of carbon nanotubes structure on the mechanical behavior of cement composites," *Composites Science and Technology*, vol. 69, no. 11–12, pp. 1985–1990, 2009
17. J. Makar, J. Margeson, and J. Luh, "Carbon Nanotube/ Cement Composites – Early Results and Potential Applications," in *3rd International Conference on Construction Materials*, 2005, pp. 1–10.
18. G. Y. Li, P. Ming, and X. Zhao, "Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes," *Carbon*, vol. 43, pp. 1239–1245, 2005.
19. S. Wansom, N. J. Kidner, L. Y. Woo, and T. O. Mason, "AC-impedance response of multi-walled carbon nanotube / cement composites," *Cement & Concrete Composites*, vol. 28, no. 6, pp. 509–519, 2006
20. A. Cwirzen, K. Habermehl-Cwirzen, and V. Penttala, "Surface decoration of carbon nanotubes and mechanical properties of cement / carbon nanotube composites," *Advances in Cement Research*, vol. 20, no. 2, pp. 65–73, 2008.
21. Effect of Multiwalled Carbon Nanotubes on Mechanical Strength of Cement Paste Sanjeev Kumar, F.ASCE; Prabir Kolay, M.ASCE; Sunil Malla; and Sanjay Mishra. American Society of Civil Engineering, 2012.