

بررسی دوام در برابر سیکل‌های ذوب و یخ و مقاومت کششی بتن حاوی سیمان نانو لوله‌های کربنی

مسلم محمدی سلیمانی *

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

سینا نژاد محمدی

کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

چکیده

استفاده از نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا، با استفاده از روش رسوب بخار شیمیایی در فرایند تولید سیمان به منظور بهسازی دوام بتن مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. در این پژوهش محدوده مناسب استفاده از این نانو لوله‌ها در شرایط چرخه ذوب و یخ و مقاومت کششی بررسی شد. پس از افزودن سیمان حاوی نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا در درصد‌های مختلف (۰، ۴، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲) به نمونه‌های بتنی، افت وزنی نمونه‌ها در شرایط چرخه ذوب و یخ به عنوان عاملی برای تشخیص تأثیر این سیمان، اندازه‌گیری شد. میزان افت وزنی در نمونه شاهد (بدون نانو لوله) برابر ۵/۸۲ درصد و برای نمونه‌های سیمان حاوی نانو لوله ۴، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ درصد، به ترتیب میزان افت وزنی ۱/۷۴، ۱/۷۵، ۱/۳۸، ۱/۰۲ و ۱/۶۸ درصد بعد از ۳۰۰ چرخه ذوب و یخ می‌باشد. افزودن ۱۰ درصد از سیمان حاوی نانولوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا به نمونه‌های بتنی، باعث شده است تا کمترین افت وزنی به دست آید. مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌ها نیز به عنوان پارامتری مهم در طراحی سازه‌های بتنی، با استفاده از آزمایش کشش غیر مستقیم اندازه‌گیری شد. نمونه‌های حاوی ۸ درصد از این سیمان بیشترین مقاومت کششی را داشتند که تقریباً ۲۴ درصد بیشتر از نمونه شاهد است. به منظور شناخت بهتر سیمان مورد نظر و همچنین ریزساختار نمونه‌ها، مشاهدات FESEM نیز انجام شد. نتایج FESEM حاکی از تأمین پراکندگی مناسب نانولوله‌ها و عدم انباشتگی آن‌ها در ماتریس سیمانی بوده است.

واژه‌های کلیدی: نانو لوله کربنی، بتن، دوام، ریز ساختار، افت وزنی، مقاومت کششی

* نویسنده مسئول: mmsoleymani@pnu.ac.ir

۱- مقدمه

شدن بتن، بخش نزدیک به سطح، زودتر خشک شده و جمع می‌شود که این امر باعث افزایش تنش کششی و در نتیجه ایجاد ترک خواهد شد. جمع شدگی بتن مسلح، کمتر از بتن ساده است و اختلاف آن‌ها به میزان میله گرد مصرفی بستگی دارد. وجود میله گرد جمع شدگی خشک را محدود کرده اما آن را از بین نمی‌برد [۶].

در اقلیم‌های سرد، آسیب دیدگی سازه‌های بتنی مربوط به یخ زدگی (چرخه‌های ذوب و یخ) می‌باشد و نیاز به هزینه سنگین برای تعمیر و تعویض دارد. علل آسیب دیدگی بتن سخت شده بر اثر چرخه ذوب و یخ را می‌توان به ساختمان پیچیده مصالح مربوط دانست. خرابی بتن ناشی از چرخه ذوب و یخ بسیار وابسته به حضور آب در بتن است اما نمی‌توان به سادگی با انبساط آب در زمان یخ زدن آن را توضیح داد. به طور کلی، افت وزنی یا کاهش مدول دینامیکی، به عنوان شاخص‌های خرابی استفاده می‌شوند. خرابی‌های ناشی از چرخه‌های ذوب و یخ را می‌توان با استفاده از عامل‌های محبوس کننده هوا و استفاده از بهترین طرح اختلاط کنترل کرد [۷ و ۸]. سوای عامل‌های محبوس کننده مرسوم، از برخی از افزودنی‌ها با مقدار مناسب می‌توان برای ارتقای مقاومت در برابر چرخه ذوب و یخ استفاده کرد [۹ و ۱۰].

وقتی آب شروع به یخ زدن در یک حفره مویینه می‌کند، افزایش حجم همراه با یخ زدگی آب، نیاز به انبساط حفره به میزان ۹ درصد حجم آب یخ زده و یا نیاز به بیرون راندن مقدار آب اضافی از سطوح مرزی نمونه و یا به مقادیری از هر دو نیاز دارد. در ضمن، در اثر این فرایندها، فشار هیدرولیکی ایجاد می‌شود و مقدار این فشار بستگی به فاصله تا سطح مرزی فرار، نفوذپذیری مصالح موجود در میان حفره تا سطح و میزان تشکیل یخ دارد. فشار اسمزی ناشی از یخ زدگی جزئی محلول‌های حفره‌ها می‌تواند سرچشمه سایر انبساط‌های مخرب در خمیر سیمان باشد. آب داخل حفره‌ها خالص نیست و دارای چندین ماده قابل حل مانند قلیانی‌ها، کلریدها و هیدروکسید کلسیم می‌باشد. محلول‌ها در دماهای پایین‌تر از آب خالص یخ می‌زنند و وجود چنین گرادیانی باعث ایجاد فشار اسمزی می‌شود [۱۱]. البته، اثر مویینگی که شامل انتقال مقادیر زیادی آب از منافذ کوچک به حفره‌های بزرگ نیز می‌شود، علت اصلی انبساط در اجسام متخلخل شناخته شده است [۱۲].

بررسی مقاومت بتن در برابر چرخه‌های ذوب و یخ معیاری بسیار مناسب برای بررسی دوام بتن است. از طرفی استفاده از افزودنی‌های مختلف برای بهبود خواص گوناگون بتن همواره مورد توجه محققین بوده است. با پیشرفت علم نانومواد، از آن‌ها در بتن نیز استفاده شده و به بررسی خواص بتن حاوی این نانومواد پرداخته شده است. یکی از این نانومواد، نانولوله‌های کربنی (CNT) هستند. نانو موادها با توجه به خصوصیات‌شان در سطوح بسیار ریز می‌توانند دنیای بتن را کاملاً متحول کنند. نانولوله‌های کربنی به دلیل نسبت طول به قطر بسیار زیاد و مقاومت فوق‌العاده زیادی که دارند یکی از ایده‌آل‌ترین عوامل تقویت کننده کامپوزیت‌ها محسوب می‌شوند، به همین دلیل، احتمال بهبود خصوصیات مصالح سیمانی با استفاده از این مواد، قابل انتظار است. کامپوزیت‌هایی نظیر مصالح بتنی مقاومت فشاری و ضریب ارتجاعی بالایی دارند، اما چقرمگی، نرمی و مقاومت کششی آن‌ها بسیار کم است که این مسئله به دلیل پیوند کووالانسی میان اتم‌های آن‌ها می‌باشد. از آن‌جا که مسئله بحرانی در زمینه خواص مکانیکی بتن، ضعف آن در کشش می‌باشد، بررسی نقش این نانو ساختارها در مقاومت کششی بتن ضروری می‌نماید [۱-۴].

خرابی اکثر سازه‌های بتنی متأثر از شرایط محیطی است که در این بین قرار گرفتن بتن در معرض چرخه‌های ذوب و یخ یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب بتن می‌باشد. در همین راستا، بهبود دوام سازه‌های بتنی در برابر شرایط نامطلوب محیطی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ترک‌های مویی ایجاد شده به دلیل مقاومت کششی پایین بتن، در شرایط نامناسب محیطی رشد و گسترش پیدا می‌کنند. تغییرات دما باعث تغییرات حجم در بتن می‌شود. زمانی که دما بالا می‌رود، بتن به آهستگی منبسط و زمانی که دما پایین می‌آید، منقبض می‌شود [۵]. اگر بتن مقید نباشد، این تغییرات حجم پیامدهای اندکی دارند. از آنجایی که بتن معمولاً با پی، بستر، میله گرد یا اعضای اتصالی مقید است، تغییرات حجم می‌تواند تنش‌های قابل توجهی در بتن ایجاد کند. تنش‌های کششی باعث ترک خوردگی بتن می‌شوند [۶].

تغییرات در درصد رطوبت منجر به انبساط و انقباض می‌شوند. زمانی که بتن رطوبت جذب می‌کند، انبساط می‌یابد یا متورم می‌شود و زمانی که رطوبت از دست می‌دهد، جمع می‌شود. با خشک

[۱۵ و ۱۶].

در سال ۲۰۰۵، مطالعه ماکار نشان داد که افزودن SWNT باعث افزایش نرخ فرایند هیدراتاسیون در سنین اولیه می‌گردد [۱۷]. در این مطالعه به اثبات رسیده است که افزودن نانولوله‌ها باعث بهبود سختی و یکپارگی تا ۶ برابر مقادیر اندازه‌گیری شده در نمونه‌های خمیر سیمان ساده هیدراته شده به ازای زمان و نسبت آب به سیمان یکسان می‌گردد. به منظور پراکنده‌سازی نانولوله‌های کربنی در ماتریس سیمانی، از امواج ما فوق صوت استفاده شده است. در تصاویر SEM نیز پدیده پل‌زدگی در محل ترک و مکانیزم بیرون کشیدگی الیاف مشاهده شده است.

در سال ۲۰۱۳، فخیم و همکاران [۱۸] با افزودن ۰/۱ تا ۲ درصد نانولوله کربنی، ریزساختار نمونه‌های حاوی این نانولوله‌ها را مورد بررسی قرار دادند. مقاومت کششی نمونه‌های حاوی ۰/۳ درصد نانولوله کربنی، تا ۷۰ درصد بیشتر از نمونه‌های کنترلی گزارش شده است و با افزایش مقدار مصرف نانولوله‌های کربنی، مقاومت کششی کاهش یافته است. با انجام آنالیز توزین حرارتی مشخص شده است که هیدراتاسیون سیمان در حضور نانولوله‌های کربنی، بهبود یافته است و همچنین آزمایش نفوذ جیوه، مقاومت بیشتر نمونه‌های حاوی نانولوله‌های کربنی را نشان داده است.

تأثیر نانولوله‌های کربنی بر روی فرایند هیدراتاسیون در مطالعه‌ای دیگر توسط ماکار با جزئیات بیشتری بررسی شده است [۱۹]. در این مطالعه مشاهده شده که حضور نانولوله‌ها بر روی مورفولوژی (ریخت‌شناسی) محصولات هیدراتاسیون سیمان (C_3A و C_3S) تأثیرگذار می‌باشد. حضور CNT باعث افزایش نرخ تولید محصولات هیدراتاسیون و تولید هر چه بیشتر C-S-H و $Ca(OH)_2$ در حین واکنش هیدراتاسیون می‌گردد. در کامپوزیت‌های سیمانی مسلح به CNT، هسته‌سازی C-S-H به دور نانولوله‌ها نشان‌دهنده ساخت و گسترش پوشش C-S-H بر روی سطوح دانه‌های سیمان و در نهایت تسریع بخشیدن به عملیات انحلال و هسته‌سازی و رشد فرآورده‌های هیدراتاسیون نسبت به خمیر سیمان معمولی می‌باشد.

الروب و همکاران در سال ۲۰۱۲ بر روی تأثیر نسبت ظاهری نانولوله‌های کربنی چندجداره بر روی خصوصیات مکانیکی نانوکامپوزیت‌های سیمانی مطالعه کردند [۲۰]. نتیجه‌گیری کلی تحقیق این بوده است که عملکرد مکانیکی کامپوزیت‌های حاوی

در مقیاس جهانی، سازه‌های بتنی بی‌شماری به‌دلیل قرارگیری در معرض شرایط شدید زمستانی نیاز به تعمیر دارند. دوام یخ و ذوب (F-T) بتن یکی از اصلی‌ترین عواملی است که بر دوام این سازه‌های بتنی در نواحی سرد تأثیر می‌گذارد [۱۳]. بتن به طور ذاتی متخلخل است. مقاومت F-T بتن به ساختار ماده، یعنی تخلخل، اندازه حفرات و موینگی، توزیع آن‌ها در ماده و نوع حفرات (بسته یا باز) بستگی دارد. تعدادی از محققان، عوامل تأثیرگذار بر عملکرد بتن در معرض اقدامات F-T را مورد بررسی قرار داده‌اند. داده‌های آزمایشگاهی بدست آمده از آزمایشگاه و آزمایش‌های میدانی نشان داده است که اگر حفرات به خوبی توزیع شده باشند، مقاومت در برابر ذوب و یخ بهبود خواهد یافت. بنابراین، عمر سازه‌های بتنی در صورت تولید بتن با نفوذپذیری کمتر، افزایش می‌یابد [۱۳]. بهبود نفوذپذیری و مقاومت در برابر یخ و ذوب با افزودن موادی مانند خاکستر بادی، دوده سیلیسی، سرباره و الیاف‌های پلی‌پروپیلن به بتن گزارش شده است. در سال‌های اخیر، مطالعات نشان داده‌اند که افزودن نانومواد باعث کاهش نفوذپذیری شده و شستشوی کلسیم را کنترل می‌کنند [۱۴].

ساختار فیزیکی محصولات هیدراتاسیون سیمان به گونه‌ای است که خرابی‌های کامپوزیت سیمانی در مقیاس نانو اتفاق می‌افتد. بنابراین، مطالعات در مقیاس نانو در ترمیم این گونه خرابی‌ها بسیار می‌تواند راهگشا باشد. کاربرد الیاف در مقیاس نانو به طور قابل ملاحظه‌ای می‌تواند ترک‌های ماتریس سیمان را در مقیاس نانو کنترل نماید و در نهایت منجر به استحکام بیشتر و سخت‌تر شدن کامپوزیت‌ها گردد. ابعاد نانولوله‌ها در محدوده نانو می‌باشد و این بدان معناست که آن‌ها می‌توانند در مقیاس بسیار ریزتری نسبت به الیاف مسلح‌کننده متداول، در ماتریس سیمانی پخش شوند. بنابراین کاربرد نانولوله‌های کربنی در مسلح‌سازی کامپوزیت‌های سیمانی به قصد تقویت رفتار مسلح‌سازی کامپوزیت‌ها در مقیاس نانو می‌باشد. بنابراین ترک‌ها بسیار سریع‌تر متوقف خواهند شد و در نتیجه رشد ترک در مراحل ابتدایی کنترل می‌شود و مانع از رسیدن ترک به مقیاس میکرو می‌شوند. علاوه بر این، این احتمال وجود دارد که نانولوله‌ها به‌عنوان فیلر در دانه‌های سیمان عمل نمایند و کامپوزیت‌های متراکم‌تری را تولدی نمایند. CNT مسلح‌کننده این قابلیت را دارد که کامپوزیت‌های سخت‌تر و مستحکم‌تری در مقایسه با الیاف‌های مسلح‌کننده متداول ارائه دهد

در سال ۲۰۱۸، کاریکو و همکاران [۲۶]، دوام بتن تقویت شده با مقادیر مختلف نانولوله‌های کربنی چند جداره را مورد ارزیابی قرار دادند. نمونه‌های بتنی با نسبت‌های مختلف آب به سیمان ساخته شدند و آزمایش‌های جذب آب موئنه و مقاومت در برابر نفوذ کلرید و کرناسیون انجام شدند. نتایج آن‌ها حاکی از آن است که، صرف نظر از نوع نانولوله‌ها و همچنین نسبت آب به سیمان مورد استفاده، خواص مکانیکی و دوام بتن در حضور ۰/۰۵ تا ۰/۱ درصد وزنی از نانولوله‌ها ۲۱ تا ۲۵ درصد بهبود یافته‌اند. آن‌ها همچنین پل زدن نانولوله‌ها در محل ترک را گزارش کرده‌اند.

در پژوهش حاضر پس از قرار دادن نمونه‌های بتنی در معرض چرخه‌های ذوب و یخ، دو پارامتر روند افت وزنی بتن و مقاومت کششی مورد بررسی قرار می‌گیرند. در پژوهش مشابه در سال ۲۰۱۶ توسط قاضی و همکاران [۲۷]، محدوده ۰ تا ۲۵ درصد برای سیمان حاوی نانولوله کربنی جهت بررسی افت وزنی و مقاومت خمشی روسازی بتنی در شرایط چرخه ذوب و یخ انجام گرفت و نتایج بهینه در محدوده ۵ تا ۱۰ درصد بود. لذا در این پژوهش، در محدوده جواب‌های بهینه با درصدهای مختلف ۴، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ سیمان حاوی نانولوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا به عنوان جایگزین سیمان در طرح اختلاط تعیین و ساخته شدند. برای بررسی این پارامترها تهیه مصالح مورد نیاز از قبیل سنگ‌دانه، نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا و افزودنی‌های مورد نیاز در دستور کار قرار گرفت و سپس طرح اختلاط و ساخت نمونه‌ها جهت آزمایش چرخه ذوب و یخ، انجام شد.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مصالح مصرفی

برای تهیه نمونه‌های بتنی از مصالح ریزدانه و درشت‌دانه (مصالح سنگی)، آب، سیمان، سیمان حاوی نانولوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا و فوق روان‌کننده استفاده شده است. دانه‌های سنگی به دو دسته دانه‌های درشت و دانه‌های ریز تقسیم می‌شوند. مصالح سنگی روی هم رفته ۶۰ تا ۷۵ درصد از حجم بتن را اشغال می‌کنند. ۶۰ تا ۷۰ درصد کل دانه‌ها را شن (باقی‌مانده بر روی الک شماره ۴؛ ۴/۷۶ میلی‌متر) و ۳۰ تا ۴۰ درصد دانه‌ها را ماسه (عبوری از الک شماره ۴؛ ۴/۷۶ میلی‌متر) تشکیل می‌دهد. دانه‌بندی مورد استفاده برای ساخت نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM C33 و نشریه

نانولوله کربنی چندجداره بلند با غلظت کم، با عملکرد مکانیکی کامپوزیت‌های سیمانی حاوی نانولوله‌های کربنی چند جداره کوتاه با غلظت زیاد، برابری می‌کند.

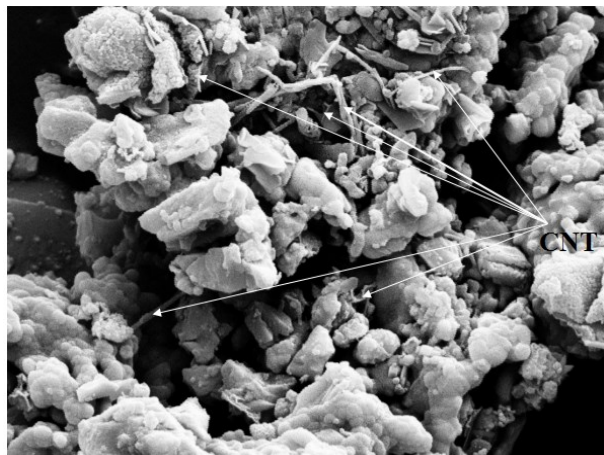
از طرف دیگر، شواهد به دست آمده از تصاویر SEM این مطالعه حاکی از پل زدگی CNT در میکرو ترک‌ها بوده است.

در سال ۲۰۱۳، بهرنیا و همکاران [۲۱]، مقاومت در برابر یخبندان بتن را با افزودن نانوسیلیس و نانوالومینا ارزیابی کردند. پس از قرارگیری در معرض ۳۰۰ چرخه ذوب و یخ، استفاده از ۵ درصد نانوسیلیس کمترین افت وزنی را داشت. شاه و همکاران در سال ۲۰۰۹ نانولوله‌های کربنی چندجداره به میزان ۰/۰۲ تا ۰/۳۳ درصد را در محلول آب و عامل سطحی به واسطه اعمال انرژی آلتراسونیک بهینه به خوبی پراکنده نموده و سپس سیمان را به نسبت‌های آب به سیمان ۰/۳ و ۰/۵ به آن اضافه کردند [۲۲]. در این مطالعه، بهبود خواص مکانیکی (۱۵ تا ۵۵ درصد افزایش مدول یانگ و ۸ الی ۴۰ درصد افزایش مقاومت خمشی) و بهبود دوام (۳۰ تا ۴۰ درصد کاهش جمع‌شدگی خودکار) گزارش شده است. سان و همکاران در سال ۲۰۰۷ برای اولین بار از روش CVD برای رشد دادن نانولوله‌های کربنی روی سطح سیمان استفاده کردند. آن‌ها همچنین در سال‌های بعد تحقیقاتی تکمیلی بر روی کار خود انجام دادند. نتایج آزمایشگاهی نشان دادند که در دمای پایین‌تر از ۴۵۰ درجه سانتیگراد، هیچ‌گونه کربنی بر روی ذرات رسوب نکرده است [۲۳].

در سال ۲۰۱۲، سبلکینا و همکاران، اثر توزیع نانو لوله‌های کربنی را بر روی خواص مکانیکی ماتریس سیمانی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها عنوان کردند که برای حصول اثر مثبت نانو لوله‌های کربنی روی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های سیمانی، توزیع مناسب آن‌ها در ماتریس ضروری می‌باشد. آن‌ها همچنین گزارش کردند که استفاده از نانو لوله‌های کربنی در مخلوط مقاومت فشاری مخلوط را تا حد زیادی بهبود بخشیده است [۲۴].

در سال ۲۰۱۶، گودوتوس و همکاران [۲۵] اثر نانولوله‌های کربنی چند جداره و همچنین نانو الیاف را بر روی خواص مکانیکی خمیر سیمان مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها گزارش کرده‌اند که مقاومت خمشی به میزان ۱۰۶ درصد، مدول یانگ به میزان ۹۵ درصد، سختی خمشی به میزان ۱۰۵ درصد، طول ترک موثر به میزان ۳۰ درصد و چقرمگی شکست به میزان ۱۲۰ درصد، بهبود یافته‌اند.

pH فوق روان‌کننده ۶/۵ است و میزان مصرف آن بین ۳/۰ تا ۸/۰ لیتر به ازای ۱۰۰ کیلوگرم سیمان توصیه شده است که برای ساخت نمونه‌ها، از ۵/۰ لیتر به ازای ۱۰۰ کیلوگرم سیمان استفاده شده است.



شکل ۱- تصویر FESEM از نحوه توزیع نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا در سیمان

۲-۲- طرح اختلاط بتن

برای تعیین طرح اختلاط در این تحقیق از استاندارد ACI211-89 استفاده شده است. عیار سیمان ۳۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است. با توجه به این که در این تحقیق هدف بررسی میزان تأثیر نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا بر نمونه‌های بتنی بوده است، نسبت آب به سیمان ثابت و ۴/۰ در نظر گرفته شده است. مطابق جدول ۱ مقدار شن و ماسه مصرفی به ترتیب ۸۷۱/۴ و 1048 kg/m^3 است.

برای آماده سازی نمونه‌ها، ابتدا موادی که به صورت خشک مورد استفاده قرار می‌گیرند (سیمان، ماسه و شن) به مدت ۱ دقیقه مخلوط شده و سپس آب و فوق روان‌کننده اضافه شده و به مدت ۴ دقیقه دیگر عمل مخلوط کردن ادامه خواهد یافت. سپس سیمان حاوی نانو ساختار به تدریج به مخلوط اضافه شده و عمل اختلاط تا ۵ دقیقه دیگر ادامه خواهد یافت.

در این پژوهش سیمان حاوی نانو لوله کربنی سنتز شده به صورت درجا جهت بررسی افت وزنی و مقاومت کششی با درصد‌های مختلف ۴، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ به صورت وزنی به عنوان جایگزین سیمان تیپ ۲ در طرح اختلاط تعیین و ساخته شدند. از هر نوع نمونه بتنی ۲ تکرار ساخته شد. با توجه به محدوده مشخص شده

۳۰۲ ملی ایران است.

سیمان استفاده شده در این تحقیق سیمان تیپ ۲ است. مشخصات این سیمان با استاندارد سیمان پرتلند با شماره استاندارد ایران ۳۸۹ نیز مطابقت دارد. چگالی سیمان مصرفی بر اساس آزمایش بالن لوشاتلیه ۳/۱۷ گرم بر سانتی متر مکعب بوده است. سطح ویژه این سیمان نیز با انجام آزمایش BET [۲۸] بر اساس استاندارد BS 4359-1:1996 برابر ۰/۹۸۸ متر مربع بر گرم بدست آمده است. سیمان حاوی نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا و مورد استفاده در این تحقیق از شرکت مینا تهیه شده است. نانو لوله‌های کربنی با استفاده از روش CVD و به صورت درجا بر روی سیمان پرتلند تیپ ۲ رشد داده شده‌اند. چگالی سیمان حاوی نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا با انجام آزمایش بالن لوشاتلیه ۳/۰۳ گرم بر سانتی متر مکعب بدست آمده است. همچنین سطح ویژه این سیمان نیز ۲/۷۰۵ متر مربع بر گرم بوده است. برای تعیین سطح ویژه سیمان از آزمایش BET استفاده شده است. سطح ویژه بیشتر در نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا می‌تواند به دلیل حضور نانو ساختارها در این سیمان باشد، که سطح ویژه به مراتب بالاتری نسبت به عناصر تشکیل دهنده سیمان دارند.

با مقایسه چگالی سیمان معمولی (۳/۱۷ گرم بر سانتی متر مکعب) با سیمان حاوی نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا (۳/۰۳ گرم بر سانتی متر مکعب) مشاهده می‌شود که چگالی سیمان حاوی نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا ۰/۱۴ گرم بر سانتی متر مکعب کمتر است، این کاهش را می‌توان ناشی از کمتر بودن چگالی عنصر اصلی سیمان حاوی نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا، یعنی کربن نسبت به چگالی عناصر تشکیل دهنده سیمان معمولی مانند آهن، آلومینیوم و غیره دانست. نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا دارای قطری بین ۲۰ تا ۱۳۰ نانومتر هستند و طول آن‌ها نیز به چندین میکرومتر می‌رسد. همچنین در شکل ۱ مشاهده می‌شود که نانو لوله‌های کربنی به طور مناسبی در سیمان حاوی آن‌ها توزیع شده‌اند.

در این تحقیق از فوق روان‌کننده SPC-N1 بر پایه کربوکسیلات استفاده شده است. هدف استفاده از فوق روان‌کننده، بهبود کارایی نمونه‌های بتنی می‌باشد. فوق روان‌کننده مورد استفاده از لحاظ رنگ، طیفی از زرد تا قرمز است. وزن مخصوص این ماده ۱/۱ گرم بر سانتی متر مکعب در ۲۵ درجه سانتی گراد بوده است، اسیدیته یا

تکمیل گردد. تمامی نمونه‌ها باید ۳۰۰ بار در معرض این چرخه قرار گیرند. نرخ تغییر دمایی نیز باید کنترل شود. زمان هر چرخه باید بین ۲ تا ۵ ساعت باشد. با توجه به این که در این تحقیق از روش A استاندارد ASTM C666 استفاده شده است، حداقل ۲۵ درصد از زمان هر چرخه باید برای ذوب شدن صرف شود.

ابعاد مقطع نمونه‌ها نباید کمتر از ۷۶ میلی‌متر (۳ اینچ) یا بیشتر از ۱۲۷ میلی‌متر (۵ اینچ) باشد. همچنین طول نمونه‌ها نباید کمتر از ۲۷۹ میلی‌متر (۱۱ اینچ) یا بیشتر از ۴۰۶ میلی‌متر (۱۶ اینچ) باشد. در این تحقیق، جهت بررسی تأثیر نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا بر دوام نمونه‌های بتنی، سیمان حاوی این نانوساختارها با ۶ درصد مختلف یعنی ۰، ۴، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ درصد ساخته شد. برای هر درصد سیمان حاوی نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا که به عنوان جایگزین سیمان به نمونه‌ها افزوده می‌شدند، دو نمونه ساخته شده است. با توجه به محدودیت‌های ابعادی استاندارد ASTM C666 نمونه‌ها با ابعاد $10 \times 10 \times 30$ سانتیمتر ساخته شدند. مخلوط بتنی در دو مرحله درون قالب ریخته و هر لایه با ۱۵ ضربه چکش متراکم می‌شد. پس از مسطح نمودن نمونه، عملیات ویریزنی انجام می‌شد.

نمونه‌های ساخته شده مطابق با استاندارد ASTM C666 به مدت ۱۴ روز در حمام آب عمل‌آوری شدند و پس از آن در دستگاه چرخه ذوب و یخ قرار گرفتند. از آنجایی که آزمایش باید با توجه به روش A در استاندارد ASTM C666 انجام می‌شد، نیاز بود که نمونه‌ها به طور کامل در آب قرار گیرند؛ به همین منظور قالب‌هایی با ابعاد $11 \times 13 \times 32$ از جنس ورقه‌های گالوانیزه ساخته شدند که نمونه‌ها با قرار گرفتن در این قالب‌های پر از آب در دستگاه قرار می‌گرفتند. با توجه به استاندارد ASTM C666، نمونه‌ها باید حداکثر پس از ۳۶ چرخه از دستگاه خارج شده، تمیز شوند و آب قالب‌ها تعویض گردد. در این تحقیق، پس از هر ۲۴ چرخه نمونه‌ها از دستگاه خارج شدند، وزن نمونه‌ها اندازه‌گیری شده و مجدداً در دستگاه قرار می‌گرفتند. این روند تا زمانی که نمونه‌ها ۳۰۰ چرخه ذوب و یخ را تجربه کنند، ادامه داشت (شکل ۲-الف).

۲-۴- آزمایش کشش غیر مستقیم

در این تحقیق به منظور بررسی مقاومت کششی بتن حاوی

برای ابعاد نمونه‌ها به منظور قرار گرفتن در معرض چرخه ذوب و یخ، نمونه‌هایی با ابعاد $10 \times 10 \times 30$ سانتی‌متر ساخته شدند. برای آزمون مقاومت کششی، نمونه‌های 300×150 میلیمتر طبق استاندارد ASTM C496 / C496M - 11 ساخته شد. از هر طرح اختلاط ۳ نمونه جهت آزمون مقاومت کششی غیر مستقیم ساخته شد.

جدول ۱- طرح اختلاط استفاده شده در تحقیق	
مشخصات بتن	مقدار
عیار سیمان (kg/m^3)	۳۰۰
نسبت آب به سیمان w/c	۰/۴
مقدار شن مصرفی (kg/m^3)	۸۷۱/۴
مقدار ماسه مصرفی (kg/m^3)	۱۰۴۸
فوق روان کننده	SPC-NI بر پایه کربوکسیلات
درصد وزنی سیمان حاوی نانو لوله‌های کربنی به عنوان جایگزین سیمان تیپ ۲	۰، ۴، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲

۲-۳- آزمایش افت وزنی

برای بررسی تأثیر نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا بر روی نمونه‌های بتنی و دوام آن در شرایط چرخه ذوب و یخ، از آزمایش افت وزنی مطابق با استاندارد ASTM C666 استفاده شده است. استاندارد ASTM C666 به منظور بررسی دوام بتن در شرایط چرخه ذوب و یخ دو روش A و B را تعریف کرده است: در روش A، فرایند چرخه ذوب و یخ سریع در آب صورت می‌گیرد در حالی که در روش B ذوب شدن در آب و یخ زدن در هوا انجام می‌گیرد. در این تحقیق از روش A استاندارد ASTM C666 استفاده شده است. برای انجام آزمایش‌های چرخه ذوب و یخ، دستگاه آزمایش ذوب و یخ مدل 4001-250 AT مورد استفاده قرار گرفت. توان سرمایش این دستگاه بین ۴۰- تا ۱۸۰+ درجه سانتی‌گراد بوده و نرخ کلی دستگاه به صورت میانگین برای سردکن برابر ۱/۶۹ درجه بر دقیقه و برای گرمکن برابر با ۴/۱۴ درجه بر دقیقه خواهد بود.

نمونه‌های بتنی مورد استفاده باید در معرض بازه دمایی ۴/۴+ تا ۱۷/۸- قرار گیرند. هر چرخه از دمای ۴/۴+ شروع می‌شود و دما تا ۱۷/۸- پایی می‌رود و دوباره به ۴/۴+ برمی‌گردد تا یک چرخه



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲- الف) دستگاه چرخه ذوب و یخ با ظرفیت ۱۰ تا ۱۲ نمونه، ب) چگونگی قرار گرفتن نمونه‌ها در دستگاه جهت انجام آزمایش تعیین مقاومت کششی پ) برش دادن نمونه‌ها با استفاده از اره تیغه الماس جهت انجام مشاهدات FESEM

درصدهای مختلف نانو ساختارهای کربنی سیمانی، آزمون مقاومت کششی غیر مستقیم بر اساس استاندارد ASTM C496 / C496M - 11 انجام شد. پس از ساخت مخلوط مطابق با طرح اختلاطی که در ادامه ارائه خواهد شد، ملات‌ها در سه مرحله در قالب‌های استوانه‌ای از قبل روغن کاری شده با قطر ۱۵ و طول ۳۰ سانتیمتر ریخته شدند و در هر مرحله با استفاده از یک میله ته گرد حدود ۱۵ ضربه به بتن وارد شد تا حباب‌های مازاد از نمونه‌ها خارج گردد. پس از پر شدن کامل قالب، سطح مخلوط هم تراز با لبه‌های قالب گردید. در نهایت قالب‌ها بر روی میز ویبره قرار داده شده و به مدت تقریبی ۵ ثانیه تحت عمل ویبره قرار گرفتند تا اینکه حباب‌های مازاد باقی مانده با اطمینان بیشتری از نمونه‌ها خارج شوند. نمونه‌ها پس از ۲۸ روز عمل آوری از حوضچه عمل آوری بیرون آورده شدند و در شرایطی که هنوز مرطوب بودند مورد آزمایش قرار گرفتند. قطر نمونه‌ها در بالا، وسط و پایین نمونه‌ها اندازه‌گیری شد و سپس از آن‌ها میانگین گرفته شد. آزمون‌های مقاومت کششی بر روی ۳ تکرار هر نمونه انجام شدند (شکل ۲-ب).

۲-۵- آزمایش ریز ساختار FESEM

به منظور بررسی نحوه توزیع نانو ذرات، تصاویر FESEM از سطح نمونه تهیه شده است. به منظور قراردادی نمونه‌ها در دستگاه FESEM، نمونه‌ها باید نشیمنگاه مسطحی داشته باشند [۲۹ و ۳۰]. برای بررسی عملکرد نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا، در نمونه‌های حاوی این نانو ساختارها و همچنین مقایسه آن-ها با نمونه‌های بدون نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا، بهتر بود سطح ترک نمونه‌ها برای بررسی ریز ساختار در نظر گرفته شود. به همین دلیل نمونه‌های استوانه‌ای با استفاده از اره تیغه الماسی و از محلی در دو طرف ترک به وجود آمده، برش داده شدند. برای اعمال برش، نمونه‌ها در دو طرف ترک و به فاصله ۰/۸ سانتی متر از ترک برش خوردند (شکل ۲-پ). سطح برش خورده نشیمنگاه مسطح مورد نیاز برای قرارگیری در دستگاه FESEM را فراهم می‌آورد. نمونه‌ها پس از برش از سطح ترک خورده باز شده و سطح ترک مورد بررسی قرار گرفت. برای رسانا کردن نمونه‌ها از لایه نازکی از طلا استفاده می‌شود.

۳- نتایج و بحث

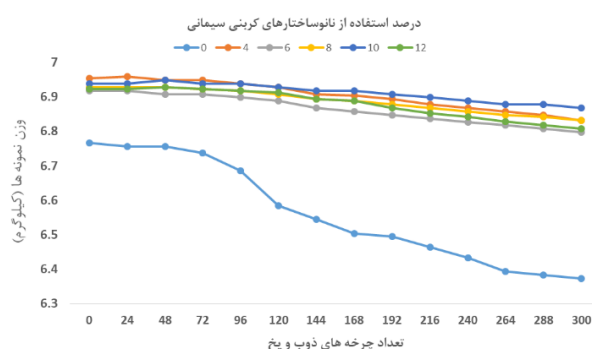
۳-۱- نتایج افت وزنی

اندازه‌گیری‌های اوزان نمونه‌های مختلف بتنی در چرخه‌های مختلف ذوب و یخ در شکل ۳ ارائه شده‌اند. با توجه به این که هر کدام از نمونه‌ها ۲ بار تکرار شده‌اند، اعداد ارائه شده در شکل میانگین اوزان بدست آمده از هر نمونه است. همچنین میزان افت وزنی نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا پس از قرارگیری در معرض ۳۰۰ چرخه ذوب و یخ اندازه‌گیری شده و در شکل ۴ ارائه شده است. در نمونه‌های شاهد که بدون نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا هستند، تا ۷۲ چرخه ذوب و یخ روند افت وزنی به میزان تقریباً ثابتی اتفاق افتاده است، در حالی که پس از ۷۲ چرخه و تا چرخه ۱۲۰ میزان افت وزنی به شدت افزایش یافته است. میزان افت وزنی از چرخه ۱۲۰ تا ۳۰۰ چرخه ذوب و یخ به میزان تقریباً ثابتی اتفاق افتاده است.

به دلیل حضور و توزیع مناسب نانوساختارها در سیمان حاوی نانو لوله‌های کربنی مورد استفاده در این تحقیق، ذرات نانو می‌توانند به عنوان هسته برای فازهای سیمانی، ارتقای آینده هیدراتاسیون سیمان به سبب واکنش‌پذیری بالای آن‌ها به عنوان مسلح‌کننده و به عنوان فیلر، برای متراکم کردن ساختار میکرو و ITZ عمل کنند و منجر به تخلخل کمتری در مخلوط شوند. همچنین به دلیل توزیع مناسب نانوساختارها در سیمان پایه، استفاده از نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا، مزایای عمده‌ای به عنوان یک ماده تقویت‌کننده در بتن دارد. نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا دارای مقاومت و سختی بسیار بالاتری نسبت به الیاف متداول هستند، نسبت ظاهری آن‌ها بالاتر بوده و بنابراین آن‌ها ترک‌ها را در مقیاس نانو کنترل می‌کنند و انرژی بیشتری برای انتشار ترک‌ها نیاز می‌باشد. روند افت وزنی نمونه‌ها با توجه به شکل ۳ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۴ می‌توان مشاهده کرد که با افزودن سیمان حاوی نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا به نمونه‌های بتنی، مقدار افت وزنی به طور چشمگیری کاهش یافته است. در زمانی که از سیمان حاوی نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا استفاده نشده است، نمونه‌های بتنی پس از قرارگیری در معرض ۳۰۰ چرخه ذوب و یخ، ۵/۸۲ درصد افت وزنی داشته‌اند. با افزودن

سیمان حاوی نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا مشاهده شد که میزان افت وزنی نمونه‌ها پس از قرارگیری در معرض ۳۰۰ چرخه ذوب و یخ به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است. با افزودن ۴ و ۶ درصد سیمان حاوی نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا، افت وزنی نمونه‌ها به ۱/۷۴ درصد رسیده است که نسبت به نمونه‌های شاهد میزان افت وزنی به اندازه ۴/۰۸ درصد کاهش یافته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان افت وزنی نمونه‌های تقویت شده با ۴ درصد سیمان حاوی نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا نسبت به ۶ درصد از این ماده تغییر چندانی نداشته است.



شکل ۳- اوزان نمونه‌های مختلف در چرخه ذوب و یخ (kg)



شکل ۴- میزان افت وزنی نمونه‌های بتنی پس از قرارگیری در معرض ۳۰۰ چرخه ذوب و یخ

با افزایش میزان استفاده از سیمان حاوی نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا به ۸ و ۱۰ درصد نیز کماکان میزان افت وزنی کاهش یافته است و افت وزنی نمونه‌ها پس از ۳۰۰ چرخه ذوب و یخ به ترتیب ۱/۳۸ و ۱/۰۲ درصد است. پس از این مرحله و با افزایش میزان استفاده از نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا، از میزان کاهش افت وزنی کاسته شده است، به گونه‌ای که با استفاده ۱۲ درصدی از سیمان حاوی نانو لوله‌های

۲-۳- نتایج مقاومت کششی

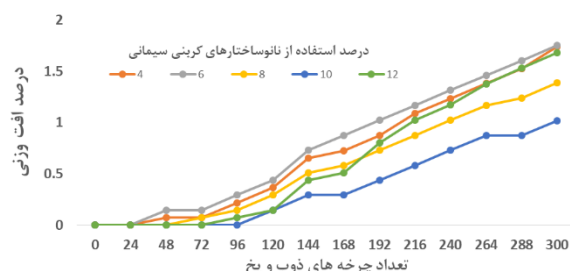
در جدول ۲ و شکل ۶ نتایج آزمون مقاومت کششی نشان داده شده‌اند. همانگونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، مقاومت کششی نمونه‌های حاوی سیمان تقویت شده با نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به‌صورت‌تدریجاً، تا درصد استفاده ۸ درصد در قیاس با مقاومت کششی نمونه‌های شاهد بیشتر می‌باشد. درصد بهینه مصرف نیز ۸ درصد تعیین شده است و در این درصد میزان مقاومت کششی نمونه‌ها تا ۲۴ درصد افزایش یافته است. با افزایش درصد استفاده از نانو سیمان، از ۱۰ درصد به بعد مقاومت کششی کاهش می‌یابد که علت آن می‌تواند انباشته شدن نانو لوله‌ها در مخلوط و در نتیجه کاهش چسبندگی آن‌ها با خمیر سیمان و بوجود آمدن نقاطی که در آن‌ها واکنش هیدراتاسیون رخ نداده است، باشد [۳۱ و ۳۲].

جدول ۲- نتایج آزمون مقاومت کششی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای

ردیف	نانو ساختار کربنی سیمانی (%)	مقاومت کششی (MPa)	متوسط مقاومت کششی (MPa)	انحراف معیار
۱	۰	۴/۲۷		
۲	۰	۳/۹۹	۴/۰۲	۰/۲۵
۳		۳/۸۱		
۴		۴/۳۵		
۵	۴	۴/۱۷	۴/۱۱	۰/۲۹
۶		۳/۸۲		
۷		۴/۳۵		
۸	۶	۴/۶۲	۴/۵۵	۰/۲
۹		۴/۶۸		
۱۰		۴/۶۵		
۱۱	۸	۴/۹۲	۴/۹۸	۰/۳۹
۱۲		۵/۳۷		
۱۳		۳/۷۶		
۱۴	۱۰	۴/۲۹	۳/۸۳	۰/۴۶
۱۵		۳/۴۳		
۱۶		۳/۸۲		
۱۷	۱۲	۳/۶۱	۳/۸۹	۰/۳۴
۱۸		۴/۲۳		

کربنی سنتز شده به‌صورت‌تدریجاً در نمونه، میزان افت وزنی ۱/۶۸ درصد شده است. به این ترتیب، استفاده ۱۰ درصدی از سیمان حاوی نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به‌صورت‌تدریجاً در نمونه‌های بتنی کمترین میزان افت وزنی را نتیجه داده است و بهترین پاسخ را در برابر چرخه‌های ذوب و یخ نشان داده است که با نتایج تحقیق مشابه [۲۷] همخوانی دارد.

در شکل ۵ روند افت وزنی تمامی نمونه‌های حاوی نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به‌صورت‌تدریجاً ارائه شده است که پس از هر ۲۴ چرخه، اندازه‌گیری اوزان صورت گرفته است. نمونه‌های حاوی ۴ و ۶ و ۸ درصد سیمان حاوی نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به‌صورت‌تدریجاً افت وزنی نسبتاً مشابهی را تجربه کرده‌اند و روند افت وزنی آن‌ها در تمام ۳۰۰ چرخه تقریباً ثابت بوده است. میزان افت وزنی نمونه ۱۰ درصد نیز روند تقریباً ثابتی داشته است و افت وزنی در طول مدت قرارگیری در معرض چرخه ذوب و یخ تقریباً خطی بوده است. نمونه‌های ۱۲ درصد، تا ۱۲۰ چرخه روندی تقریباً مشابه با نمونه‌های قبل داشته‌اند. از ۱۲۰ تا ۳۰۰ چرخه ذوب و یخ، روند افت وزنی به مقدار چشمگیری افزایش یافته است.



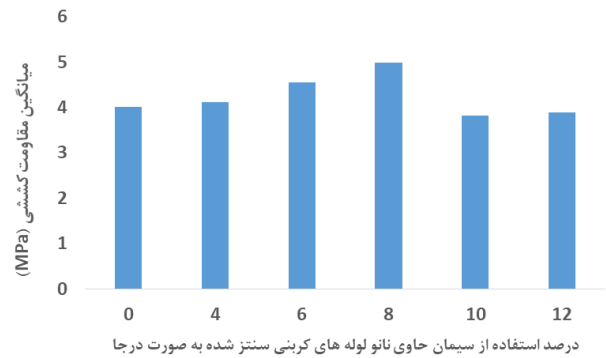
شکل ۵- روند افت وزنی نمونه‌های حاوی نانو لوله‌های کربنی

سنتز شده به‌صورت‌تدریجاً در چرخه‌های مختلف ذوب و یخ

موضوع دیگری از شکل ۵ قابل رویت است، شباهت تقریبی میزان افت وزنی نمونه‌های شاهد و نمونه‌های حاوی نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به‌صورت‌تدریجاً تا ۷۲ چرخه ذوب و یخ است. بیشتر تفاوت‌های موجود در میزان افت وزنی نمونه‌های مختلف را می‌توان به زمانی اختصاص داد که نمونه‌ها بین ۷۲ چرخه تا ۱۴۴ چرخه ذوب و یخ را تجربه کرده‌اند و پس از آن روند نسبتاً یکنواختی در افزایش افت وزنی به خود گرفته‌اند. مقایسه نتایج بدست آمده در این تحقیق، تأثیر مناسب سیمان حاوی نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به‌صورت‌تدریجاً بر بتن در شرایط چرخه ذوب و یخ را به خوبی نشان داده است.

سیلیکات کلسیم (C-S-H)، حفره‌ها و ترک‌ها هستند. اترینگیت که فراورده نامناسب هیدراتاسیون می‌باشد نیز در محصولات هیدراتاسیون مشاهده می‌شود. در شکل ۷ (ب و پ) نانوساختارها و همچنین نفوذ به خلل و فرج موجود در نمونه‌ها مشاهده شده است. این شکل همچنین نشان می‌دهد که نانوساختارها درون بلور CH قرار دارند که خود گواهی بر شکل‌گیری محصولات هیدراتاسیون در اطراف نانوساختارها است.

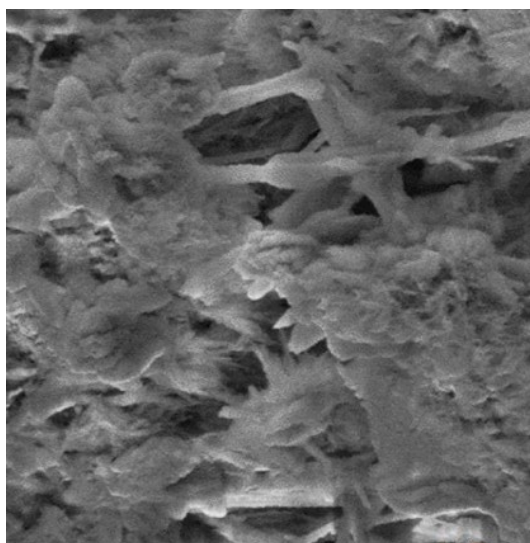
در شکل ۸ می‌توان مشاهده کرد که نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا به صورت تدریجاً به صورت تیک پل در محل ترک عمل کرده‌اند و سپس گسیخته شده‌اند.



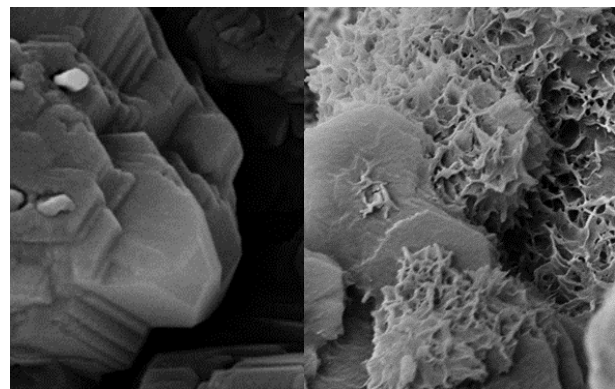
شکل ۶- نمودار مقاومت کششی میانگین بر حسب درصد مصرف سیمان حاوی نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا

۳-۳- مشاهدات میکروسکوپ الکترون روبشی

شکل ۷ (الف) تصویری از خمیر سیمان یکی از نمونه‌های شاهد را نشان داده است که عناصر تشکیل دهنده خمیر سیمان را دارا است.

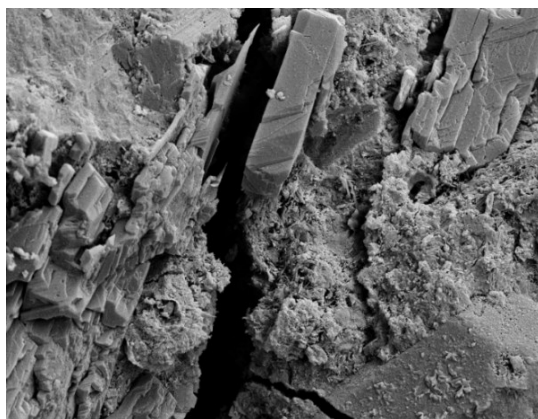


(الف)

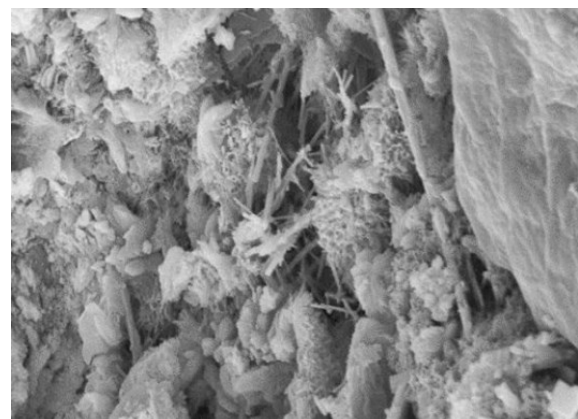


(ب)

(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۸- (الف) پل زدن نانو لوله‌ها و (ب) گسیختگی آن‌ها در محل ترک

در این شکل مشاهده می‌شود که نانوساختارها با خمیر سیمان پیوند مناسبی داشته و بر اثر نیروی خارجی، گسیخته شده‌اند. پل زدگی

شکل ۷- (الف) نمونه بدون نانو لوله‌های کربنی (ب) نمونه حاوی نانوساختارها و شکل‌گیری بلور هیدروکسید کلسیم در اطراف آنها (پ) نفوذ به خلل و فرج موجود در نمونه‌ها

این عناصر بلور کلسیم هیدروکسید $(Ca(OH)_2)$ ، ژل هیدرات

افت وزنی نمونه‌های مختلف را می‌توان به زمانی اختصاص داد که نمونه‌ها بین ۷۲ چرخه تا ۱۴۴ چرخه ذوب و یخ را تجربه کرده‌اند. - با افزایش درصد استفاده از نانو سیمان از ۰ تا ۸ درصد، مقاومت کششی ۲۴ درصد افزایش می‌یابد. با افزایش درصد استفاده از نانو سیمان، از ۱۰ درصد به بعد مقاومت کششی کاهش می‌یابد که علت آن می‌تواند انباشته شدن نانو لوله‌ها در مخلوط و در نتیجه کاهش چسبندگی آن‌ها با خمیر سیمان و کاهش واکنش هیدراتاسیون باشد.

- نتایج FESEM حاکی از تأمین پراکندگی مناسب نانو لوله‌ها و عدم انباشتگی آن‌ها در ماتریس سیمانی است. نتایج FESEM همچنین تشکیل فراورده‌های هیدراتاسیون در اطراف نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا را نشان داده است که می‌تواند نشانه‌ای از تأثیر نانو ساختارها در هسته‌سازی برای فرایند هیدراتاسیون باشد.

۵- مراجع

- [1] Nili M, Moradi A. Monitoring the Electrical Resistance of Concrete During One Slow Freeze Thaw Cycle, A Method for Assessing The Water-Cement Ratio. Concrete Research. 2014 May 22;7(1):129-40 (In Persian).
- [2] Siddique, R. and A. Mehta, Effect of carbon nanotubes on properties of cement mortars. Construction and Building Materials, 2014. 50: p. 116-129.
- [3] SadrMomtazi A, Nasersaeed H. Multiscale modeling of the mechanical properties of carbon nanotube reinforced cement composites. Concrete Research. 2023 Mar 21;16(1):19-31 (In Persian).
- [4] Mohammadi Janaki, A., G. Shafabakhsh, A. Hassani, Evaluation of Mechanical Properties and Durability of Concrete Pavement Containing Electric Arc Furnace Slag and Carbon Nanostructures. Journal of Rehabilitation in Civil Engineering, 2023. 11(1): p. 1-20.
- [5] Locati, F., D. Falcone, and S. Marfil, Dedolomitization and alkali-silica reactions in low-expansive marbles from the province of Córdoba, Argentina. A microstructural and chemical study. Construction and Building Materials, 2014. 58: p. 171-181.
- [6] Ouyang, W.-y., J.-k. Chen, and M.-q. Jiang, Evolution of surface hardness of concrete under sulfate attack. Construction and Building Materials, 2014. 53: p. 419-424.
- [7] Harnik, A., U. Meier, and A. Roesli, Combined

نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا از گسترش نانو ترک‌ها و یا میکرو ترک‌ها جلوگیری کرده و از این طریق باعث افزایش خواص مکانیکی از جمله مقاومت کششی شده‌اند. با افزایش نیروی اعمالی که باعث ایجاد کشش شده است، ترک ظاهر شده و نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا به دلیل مقاومت پیوند کم، از خمیر سیمان بیرون کشیده شده‌اند. این مسئله نشان می‌دهد که در اطراف نانو ساختارها هسته‌سازی می‌تواند صورت گیرد و در واقع استفاده از نانو ساختارها باعث بهبود فرایند هیدراتاسیون و تشکیل بیشتر محصولات مطلوب آن در خمیر سیمان و در نتیجه بهبود خواص مکانیکی و حتی دوام شده است. فراورده‌های هیدراته شده سیمان به دلیل انرژی سطحی بسیار زیاد نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا، بر روی آن‌ها رسوب کرده و نانو ساختارها به عنوان مکان هسته‌سازی ایفای نقش می‌کنند.

هسته‌سازی فراورده‌های هیدراتاسیون بر روی نانو ذرات باعث افزایش تسریع فرایند هیدراتاسیون می‌شود. قطر نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا مشاهده شده در این تحقیق در محدوده ۲۰ تا ۱۳۰ نانو متر بوده است.

۴- نتیجه‌گیری

استفاده از نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا در مجموع باعث بهبود دوام بتن در برابر شرایط چرخه ذوب و یخ شده است و نمونه‌های تقویت شده با سیمان حاوی نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا، پس از ۳۰۰ چرخه ذوب و یخ، افت وزنی کمتری نسبت به نمونه‌های شاهد داشته‌اند. برخی از مهم‌ترین نتایج بدست آمده در این تحقیق عبارتند از:

- استفاده از ۱۰ درصد سیمان حاوی نانو لوله‌های کربنی سنتز شده به صورت درجا بهترین عملکرد در برابر چرخه‌های ذوب و یخ را در زمینه افت وزنی به دلیل تخلخل کمتر و کنترل رشد ترک داشته است. میزان افت وزنی در نمونه شاهد (بدون نانو لوله) برابر ۵/۸۲ درصد و برای نمونه‌های سیمان حاوی نانو لوله ۴، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ درصد، به ترتیب میزان افت وزنی ۱/۷۴، ۱/۷۵، ۱/۳۸، ۱/۰۲ و ۱/۶۸ درصد بعد از ۳۰۰ چرخه ذوب و یخ می‌باشد.

- روند افت وزنی در نمونه‌های مختلف، از چرخه ابتدایی تا سیصدمین چرخه ذوب و یخ، ثابت نبوده است و برای نمونه‌های مختلف این روند متفاوت است. بیشتر تفاوت‌های موجود در میزان

647-655.

[21] Behfarnia, K. and N. Salemi, The effects of nano-silica and nano-alumina on frost resistance of normal concrete. *Construction and Building Materials*, 2013. 48: p. 580-584.

[22] Shah, S.P., M.S. Konsta-Gdoutos, and Z.S. Metaxa, Highly-dispersed carbon nanotube-reinforced cement-based materials. 2009, Google Patents.

[23] Sun, S., et al., In situ growth of carbon nanotubes/carbon nanofibers on cement/mineral admixture particles: A review. *Construction and Building Materials*, 2013. 49: p. 835-840.

[24] Sobolkina, A., et al., Dispersion of carbon nanotubes and its influence on the mechanical properties of the cement matrix. *Cement and Concrete Composites*, 2012. 34(10): p. 1104-1113.

[25] Gdoutos, E.E., et al., Advanced cement based nanocomposites reinforced with MWCNTs and CNFs. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2016. 10(2): p. 142-149.

[26] Carriço, A., et al., Durability of multi-walled carbon nanotube reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 2018. 164: p. 121-133.

[27] GHAEEDI B, HASSANI A, FAKHIM B, NEZHADMOHAMADI H. Effect of Durability of Concrete, Containing Nanocarbon Cement Structures, on Weight Loss and Flexural Strength of Concrete Pavement, under Freeze-Thaw Cycle, *Journal of Transportation Infrastructures Engineering*, 2016; 1(4): 1-15 (In Persian).

[28] Arvaniti, E.C., et al., Physical characterization methods for supplementary cementitious materials. *Materials and Structures*, 2015. 48(11): p. 3675-3686.

[29] Goodhew, P.J., J. Humphreys, and R. Beanland, *Electron microscopy and analysis*. 2000: CRC Press.

[30] Stutzman, P.E., *Scanning electron microscopy in concrete petrography*. National Institute of Standards and Technology, 2001. 2.

[31] Marchand, J., et al., Influence of calcium hydroxide dissolution on the transport properties of hydrated cement systems. *Reactions of calcium hydroxide in concrete*. Westerville, OH: American Ceramic Society, 2001: p. 113-129.

[32] Mansoori B, Yousefinezhad H, Avaznejad F, Bazaee A. Investigating the Freezing Strength and Durability of Lightweight Concrete With Different Weight Ratios of Nano Montmorillonite and Microsilica. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*. 2024 Jan 21;55(11):2263-84 (In Persian).

influence of freezing and deicing salt on concrete—Physical aspects, in *Durability of building materials and components*. 1980, ASTM International.

[8] Söylev, T. and T. Özturan, Durability, physical and mechanical properties of fiber-reinforced concretes at low-volume fraction. *Construction and Building Materials*, 2014. 73: p. 67-75.

[9] Nossoni, G. and R. Harichandran, Electrochemical-mechanistic model for concrete cover cracking due to corrosion initiated by chloride diffusion. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2011. 26(6): p. 04014001.

[10] Sun, Z. and G.W. Scherer, Effect of air voids on salt scaling and internal freezing. *Cement and Concrete Research*, 2010. 40(2): p. 260-270.

[11] Rahman, S. and Z. Grasley, A poromechanical model of freezing concrete to elucidate damage mechanisms associated with substandard aggregates. *Cement and Concrete Research*, 2014. 55: p. 88-101.

[12] Verbeck, G.J. and P. Klieger, Studies of salt scaling of concrete. *Highway Research Board Bulletin*, 1957(150).

[13] Richardson, A., K. Coventry, and S. Wilkinson, Freeze/thaw durability of concrete with synthetic fibre additions. *Cold Regions Science and Technology*, 2012. 83: p. 49-56.

[14] Sirisawat, I., et al., Durability and testing of mortar with interground fly ash and limestone cements in sulfate solutions. *Construction and Building Materials*, 2014. 64: p. 39-46.

[15] Fan, Y., et al., Effects of nano-kaolinite clay on the freeze-thaw resistance of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 2015. 62: p. 1-12.

[16] Kosmatka, S.H., B. Kerkhoff, and W.C. Panarese, *Design and control of concrete mixtures*. 2011: Portland Cement Assoc.

[17] Makar, J., J. Margeson, and J. Luh, Carbon nanotube/cement composites-early results and potential applications. 2005.

[18] Fakhim, B., et al., Predicting the impact of multiwalled carbon nanotubes on the cement hydration products and durability of cementitious matrix using artificial neural network modeling technique. *The Scientific World Journal*, 2013. 2013.

[19] Makar, J.M. and G.W. Chan, Growth of Cement Hydration Products on Single-Walled Carbon Nanotubes. *Journal of the American Ceramic Society*, 2009. 92(6): p. 1303-1310.

[20] Al-Rub, R.K.A., A.I. Ashour, and B.M. Tyson, On the aspect ratio effect of multi-walled carbon nanotube reinforcements on the mechanical properties of cementitious nanocomposites. *Construction and Building Materials*, 2012. 35: p.

Investigation on The Durability Against Freeze-Thaw And Splitting Tensile Strength of Concrete Containing Cement Incorporating CNTs

Moslem Mohamadi Soleymani *

Department of Mechanical Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran.

Sina Nezhad Mohammadi

Department of Civil Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Abstract

The use of in situ synthesized carbon nanotubes, using chemical vapor deposition in the cement production process, to improve the durability of concrete has attracted the attention of many researchers. In this study, the appropriate range of use of these nanotubes under freeze-thaw cycle conditions and tensile strength was investigated. After adding cement containing in-situ synthesized carbon nanotubes at different percentages (0, 4, 6, 8, 10, and 12) to concrete samples, the weight loss of the samples under freeze-thaw cycle conditions was measured as a factor to determine the effect of this cement. The weight loss in the control sample (without nanotubes) was 5.82%, and for the cement samples containing 4, 6, 8, 10, and 12% nanotubes, the weight loss was 1.74, 1.75, 1.38, 1.02, and 1.68%, respectively, after 300 freeze-thaw cycles. Adding 10% of cement containing in-situ synthesized carbon nanotubes to concrete samples resulted in the lowest weight loss. The indirect tensile strength of the samples, as an important parameter in the design of concrete structures, was also measured using indirect tensile testing. Samples containing 8% of this cement had the highest tensile strength, which is approximately 24% higher than the control sample. In order to better understand the desired cement and also the microstructure of the samples, Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM) observations were also performed. The FESEM results indicated that the nanotubes were properly dispersed and did not aggregate in the cement matrix.

Keywords: CNT, Concrete, Durability, Microstructure, Weight loss, Tensile strength.

* Corresponding Author: mmsoleymani@pnu.ac.ir

