

## تأثیر دوام بتن حاوی مقادیر مختلف نانوساختارهای کربنی سیمانی بر افت وزنی و مقاومت خمشی روسازی بتنی در شرایط چرخه ذوب و یخ

بابک قائدی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

ابوالفضل حسینی\*، استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

بابک فخیم، استادیار، دانشگاه آزاد تهران واحد جنوب

حفظه نژادمحمدی، کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

E-mail: hassani@modares.ac.ir

دریافت: ۹۴/۰۹/۱۷ - پذیرش: ۹۴/۱۲/۱۰

### چکیده

مطالعات انجام شده حاکی از آن است که تولید سیمان پرتلند باعث از بین رفتن منابع طبیعی مانند سنگ آهک و سوخت‌های فسیلی می‌شود و با تولید گازهای گلخانه‌ای، نظیر گاز دی‌اکسید کربن، بر آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌افزاید. از این رو، دوام سازه‌های بتنی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. استفاده از افزودنی‌ها و همچنین جایگزین کردن مصالح متداول مورد استفاده در بتن با مصالح جدید، همیشه مورد توجه بوده است. یک‌سری از مواد جدیدی که توانسته‌اند خواص مکانیکی و دوام بتن را ارتقا دهند، نانوموادها هستند. در این تحقیق، از درصد‌های مختلف نانوساختارهای کربنی سیمانی به منظور بررسی تأثیر دوام بتن بر مقاومت خمشی روسازی بتنی در شرایط چرخه ذوب و یخ، با آزمایش‌های افت وزنی و مقاومت خمشی سه نقطه‌ای، استفاده شده است. این نانوساختارها به روش رسوب بخار شیمیایی در فرایند تولید سیمان روی سیمان تیپ ۲ رشد داده شده‌اند. نتایج به دست آمده نشان داده‌اند که استفاده از ۱۰٪ نانوساختار کربنی سیمانی بهترین عملکرد روسازی بتنی را در برابر شرایط چرخه ذوب و یخ نشان داده است. استفاده از نانوساختارهای کربنی سیمانی، افت وزنی و افت مقاومت خمشی روسازی را کاهش داده و دوام روسازی بتنی در برابر چرخه ذوب و یخ را بهبود بخشیده‌اند.

واژه‌های کلیدی: نانوساختارهای کربنی سیمانی، بتن، افت وزنی، مقاومت خمشی، چرخه ذوب و یخ.

### ۱. مقدمه و مروری بر منابع

اهمیت راه‌ها و طرق ارتباطی در زندگی جمعی بشر امری بدیهی است و رشد و تعالی تمدن بشری با جاده‌ها ارتباط مستقیم داشته است. اهمیت راه‌ها تا بدان حد است که سطح فرهنگی هر منطقه و میزان توسعه‌ی آن را می‌توان با توجه به دوری یا نزدیکی آن به جاده‌ها

تعیین کرد. جاده‌ها تنها مسیر آمدو شد مردم عادی، قوای نظامی و یا بستری که فعالیت‌های تجاری روی آن‌ها انجام گیرد، نبوده‌اند؛ بلکه به‌عنوان مهم‌ترین وسیله‌ی ارتباط جمعی، زمینه‌های انتقال دستاوردهای فکری و فرهنگی انسان‌ها به یکدیگر را فراهم می‌کرده‌اند. از این رو، راه‌ها و مسیرهای ارتباطی از زیربخش‌های مهم و حیاتی شبکه‌های حمل و نقل محسوب می‌شوند.

(۱۰۰ برابر فولاد) از یک طرف و طبیعت کربنی بودن نانولوله‌ها (به خاطر این که کربن ماده‌ای است کم وزن، بسیار پایدار و ساده جهت انجام فرایندها که نسبت به فلزات برای تولید ارزان‌تر می‌باشد) از طرف دیگر، باعث شده که در دهه گذشته شاهد تحقیقات مهمی در زمینه نانولوله‌ها باشیم.

ساختار فیزیکی محصولات هیدراتاسیون سیمان به گونه‌ای است که خرابی‌های کامپوزیت سیمان در مقیاس نانو اتفاق می‌افتند. بنابراین، مطالعات در مقیاس نانو در ترمیم این گونه خرابی‌ها می‌تواند بسیار راهگشا باشد. کاربرد الیاف در مقیاس نانو به طور قابل ملاحظه- ای می‌تواند ترک‌های ماتریس سیمان را در مقیاس نانو کنترل نماید و در نهایت منجر به استحکام بیشتر و سفت‌تر شدن کامپوزیت‌ها گردد. نانولوله‌های کربنی را می‌توان به دلیل نسبت ظاهری فوق‌العاده زیاد، مقاومت بسیار بالا و مدول الاستیسیته زیاد، یک ماده مسلح‌کننده استثنایی دانست. ابعاد نانولوله‌ها در مقیاس نانو می‌باشد و این بدان معناست که آن‌ها می‌توانند در ماتریس سیمان در مقیاس بسیار ریزتری نسبت به الیاف مسلح-کننده متداول، پخش شوند. بنابراین، کاربرد نانولوله‌های کربنی در مسلح‌سازی کامپوزیت‌های سیمانی به قصد تقویت رفتار مسلح‌سازی کامپوزیت‌ها در مقیاس نانو می‌باشد (تاستنسون و چو، ۲۰۰۲). یکی از مهم‌ترین مسائل در زمینه استفاده از نانولوله‌های کربنی در خمیر سیمان، پخش مناسب این مواد است، که بخشی به دلیل خاصیت آب‌گریزی زیاد نانولوله‌های کربنی و بخشی به دلیل خودجذبی قوی آنها، می‌باشد (سان و همکاران، ۲۰۱۳) (آب‌گریزی که در شیمی و زیست‌شناسی سلول کاربرد دارد، یک پدیده‌ی فیزیکی در مولکول‌ها است که از آب دوری می‌کنند. مولکول‌های آب‌گریز غیرقطبی هستند و به همین خاطر تمایل به دیگر مولکول‌ها و حلال‌های غیرقطبی دارند).

ریچاردسون و همکاران (۲۰۱۲) اثر افزودن الیاف مصنوعی بر دوام بتن را مورد بررسی قرار دادند. در این

به تازگی ساخت روسازی‌های بتنی در کنار روسازی-های آسفالتی به دلیل مسائل زیست‌محیطی و کاهش وابستگی به نفت در کشور اهمیت یافته است و به همین دلیل بهبود مشخصات مشخصات بتن در اجرای هرچه بهتر این نوع روسازی کمک خواهد کرد. مطالعات انجام شده حاکی از آن است که تولید سیمان پرتلند باعث از بین رفتن منابع طبیعی مانند سنگ آهک و سوخت‌های فسیلی می‌شود و با تولید گازهای گلخانه‌ای نظیر گاز دی‌اکسید کربن، بر آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌افزاید. از این رو، دوام سازه‌های بتنی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (ونگ و همکاران، ۲۰۰۸). دوام بتن عبارت است از توانایی مصالح برای حفظ یکپارچگی به لحاظ سازه‌ای، ظرفیت حفاظتی و به لحاظ زیبایی ظاهری طی یک دوره طولانی زمانی. افزایش فزاینده هزینه‌های تعمیر و بازسازی سازه‌های آسیب‌دیده ناشی از تخریب مصالح مصرفی، بخش قابل‌توجهی از هزینه ساخت سازه‌ها را به خود اختصاص می‌دهد.

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 (صدیق و مهتا، ۲۰۱۴). یکی از این نانومواد، نانولوله‌های کربنی<sup>۱</sup> (CNT) هستند. نانولوله‌های کربنی به دلیل نسبت ظاهری (طول به قطر) بسیار زیاد و مقاومت فوق‌العاده زیادی که دارند یکی از ایده‌آل‌ترین عوامل تقویت‌کننده کامپوزیت‌ها محسوب می‌شوند. به همین دلیل، احتمال بهبود خصوصیات مصالح سیمانی با استفاده از این مواد، قابل انتظار است. خواص ویژه و منحصر به فرد نانولوله‌های کربنی، از جمله مدول الاستیسیته زیاد و استحکام کششی خوب

## 1- Carbon nanotubes

افزایش مدول یانگ و ۸ الی ۴۰ درصد افزایش مقاومت خمشی) و بهبود دوام (۳۰ تا ۴۰ درصد کاهش جمع-شدگی) گزارش شده است. آنها نتیجه‌گیری کرده‌اند که میزان کم نانولوله کربنی چندجداره (بین ۰/۰۳ الی ۰/۱ درصد وزنی)، بهترین خصوصیات مکانیکی نانوکامپوزیت سیمانی را نتیجه می‌دهد.

در سال ۲۰۱۳، فخیم و همکاران (۲۰۱۳a) با افزودن ۰/۱ تا ۲ درصد نانولوله کربنی، ریزساختار نمونه‌های حاوی این نانولوله‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند. مقاومت کششی نمونه‌های حاوی ۰/۳ درصد نانولوله کربنی، مقاومت کششی تا ۷۰ درصد بیشتر از نمونه‌های کنترلی را نشان دادند و با افزایش مقدار مصرف نانولوله کربنی، مقاومت کششی کاهش یافت. با انجام آنالیز توزین حرارتی مشخص شد که هیدراتاسیون سیمان در حضور نانولوله‌های کربنی بهبود یافته و همچنین آزمایش نفوذ جیوه مقاومت بیشتر نمونه‌های حاوی نانولوله‌های کربنی را نشان داده است. بهفرنیا و سالمی (۲۰۱۳) مقاومت در برابر یخبندان بتن را با افزودن نانوسیلیس و نانوالومینا ارزیابی کردند. نمونه‌های آماده شده با توجه به استاندارد ASTM C666 A در معرض چرخه‌های ذوب و یخ قرار گرفتند و میزان افت وزنی و کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از چرخه‌های معین ذوب و یخ اندازه‌گیری شد. میزان مقاومت فشاری پس از ۵۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ چرخه اندازه‌گیری شد. با توجه به نتایج به‌دست آمده، میزان افت مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی نانوذرات بسیار کمتر از بتن معمولی بوده است. برای مثال، بتن حاوی ۳٪ نانوسیلیس پس از ۳۰۰ چرخه ذوب و یخ تنها ۲۸٪ افت مقاومت داشته است. در حالی که نمونه بتن معمولی پس از ۳۰۰ چرخه، ۱۰۰٪ کاهش مقاومت فشاری داشته است. نمونه‌های حاوی ۵ و ۷ درصد نانوسیلیس نیز به ترتیب ۱۶/۲۸ و ۲۳/۲ کاهش مقاومت داشته‌اند. برای نمونه‌های حاوی نانوالومینا نیز این روند صادق بود و نسبت به بتن معمولی افت مقاومت کمتری داشته‌اند و بتن حاوی ۳٪

تحقیق، نمونه‌های بتنی پس از ۵ روز عمل‌آوری، که بتن نیمی از مقاومت طراحی خود را به‌دست آورده است، در معرض چرخه‌های ذوب و یخ قرار گرفتند و دوام بتن با بررسی افت وزنی و مقاومت فشاری مورد ارزیابی قرار گرفت. از الیاف پلی‌پروپیلن با دو وزن متفاوت (۰/۹ و ۱/۸ کیلوگرم بر متر مکعب) استفاده شد. پس از انجام آزمایش‌ها مشخص شد که استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن در هر دو وزن باعث بهبود دوام بتن می‌شود و استفاده از ۰/۹ کیلوگرم بر متر مکعب بهبود بهتری نسبت به ۱/۸ کیلوگرم بر متر مکعب دارد. به طوری که با استفاده از ۰/۹ و ۱/۸ کیلوگرم بر متر مکعب الیاف پلی‌پروپیلن پس از ۳۰۰ چرخه ذوب و یخ به ترتیب حدود ۴ و ۵ درصد افت وزنی مشاهده شد. در تحقیق فن و همکاران (۲۰۱۵)، اثر نانوکائولینیت در بتن در معرض چرخه‌های ذوب و یخ مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌ها برای تعیین دوام بتن در برابر چرخه ذوب و یخ بتن، برای نمونه‌های حاوی ۱، ۳ و ۵ درصد نانوکائولینیت انجام شد. افت وزنی برای نمونه‌های بدون نانوکائولینیت و نمونه‌های حاوی ۱ و ۵ درصد نانوکائولینیت با افزایش چرخه‌های ذوب و یخ به تدریج افزایش می‌یابد. اما در نمونه‌های بتنی حاوی ۳ درصد نانوکائولینیت، در کل فرایند ذوب و یخ، افزایش وزن مشاهده شد. پس از اتمام ۱۲۵ چرخه ذوب و یخ، بیشترین افت وزنی ۵/۱۳ درصد مربوط به نمونه بدون نانوکائولینیت بود. مقدار افت وزنی نمونه‌های حاوی ۱ و ۵ درصد نانوکائولینیت به ترتیب ۲/۸۳ و ۰/۸۵ درصد است. نمونه حاوی ۳٪ نانوکائولینیت پس از ۱۲۵ چرخه ذوب و یخ، ۵۱٪ درصد افزایش وزن داشته است. شاه و همکاران (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 به نسبت-های آب به سیمان ۰/۳ و ۰/۵ به آن اضافه کرده‌اند. در این مطالعه، بهبود خواص مکانیکی (۱۵ تا ۵۵ درصد

## ۲. روش تحقیق

در این تحقیق از ۷ درصد مختلف نانوساختارهای کربنی سیمانی شامل صفر، ۲، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد به صورت وزنی به عنوان جایگزین سیمان پرتلند تیپ ۲ تهران استفاده شده است. به منظور بررسی تأثیر این نانوساختارهای کربنی سیمانی بر دوام و مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی، نمونه‌های حاوی این نانوساختارها ابتدا در معرض ۳۰۰ چرخه ذوب و یخ و پس از آن آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه‌ای مطابق با استاندارد ASTM C78 قرار گرفته‌اند. نسبت آب به سیمان در طرح اختلاط ۰/۴۵ و عیار سیمان مصرفی ۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب بوده است. نمونه‌ها پس از عمل‌آوری و با توجه به استاندارد ASTM C666 در معرض چرخه‌های ذوب و یخ قرار گرفته‌اند. با توجه به استاندارد مذکور، پس از هر ۲۴ چرخه، نمونه‌ها از دستگاه خارج شده، افت وزنی آن‌ها محاسبه و آب آن‌ها تعویض می‌شود. باید توجه داشت که نمونه‌ها مطابق با روش A در استاندارد ASTM C666 در دستگاه ذوب و یخ قرار گرفتن و به طور کامل در آب غرق شده بودند. هر چرخه ذوب و یخ از ۴/۴+ درجه سلسیوس شروع می‌شود، تا دمای ۱۷/۸- درجه سلسیوس با نرخی ثابت کاهش می‌یافت و پس از آن دوباره به ۴/۴+ درجه سلسیوس بازمی‌گشت تا یک چرخه تکمیل شود. نمونه‌ها در چرخه‌های معین که در بخش نتایج ارائه شده، تحت آزمایش خمشی سه نقطه‌ای قرار گرفته‌اند تا بتوان روند افت مقاومت خمشی را مشاهده نمود.

## ۲-۱. مصالح مصرفی

مصالح استفاده شده در این تحقیق شامل: آب، سیمان، نانوساختارهای کربنی سیمانی، مصالح ریز دانه، مصالح درشت دانه و همچنین فوق روان‌کننده می‌شود که در ادامه معرفی شده‌اند و مشخصات هرکدام به صورت مجزا آورده شده است.

نانوآلومینا تنها ۱۸/۱۹ درصد افت مقاومت داشته است. بنابراین، می‌توان عنوان کرد که استفاده از ۰/۵ نانوسیلیس و ۳/۳ نانوآلومینا مقاوم‌ترین بتن در برابر چرخه ذوب و یخ را در زمینه مقاومت فشاری ارائه می‌دهد. افت وزنی نمونه‌ها نیز پس از چرخه‌های ۵۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ برای تعیین مقاومت بتن در برابر چرخه ذوب و یخ اندازه‌گیری شدند. استفاده از ۰/۵ نانوسیلیس پس از قرارگیری در معرض ۳۰۰ چرخه ذوب و یخ کمترین افت وزنی را داشت و مقدار آن ۴/۳۲ درصد بود. در حالی که نمونه بتن معمولی پس از ۳۰۰ چرخه کاملاً خراب شده بود.

در تحقیقی در سال ۲۰۱۳، فخیم و همکاران (۲۰۱۳b) به منظور بررسی تأثیر نانولوله‌های کربنی چندجداره بر محصولات هیدراتاسیون سیمان و بهبود کیفیت این محصولات، از درصدهای مختلف نانولوله کربنی چندجداره، یعنی ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵ و ۱ درصد وزنی سیمان، استفاده کرده‌اند. نسبت آب به سیمان ثابت (۰/۴) بوده است. با انجام آزمایش تحلیل توزین حرارتی مشخص شد که استفاده از ۰/۳ درصد نانولوله‌های کربنی چندجداره بیشترین محصولات هیدراتاسیون مرغوب را ارائه داده است.

در تحقیق حاضر، از نانوساختارهای کربنی که با استفاده از روش رسوب بخار شیمیایی<sup>۱</sup> روی سیمان رشد کرده‌اند، برای بهبود دوام بتن در برابر شرایط چرخه ذوب و یخ استفاده شده است. در روش رسوب بخار شیمیایی، هیدروکربن گازی، درون نمونه‌ی متصل به قطعات کاتالیست، منتشر شده و در شرایط با دمای زیاد، جهت تولید نانوساختارهای کربنی تجزیه می‌شود. به‌منظور بررسی تأثیر دوام بتن بر مقاومت خمشی روسازی بتنی که حاوی نانوساختارهای کربنی هستند، ابتدا نمونه‌های بتنی حاوی نانوساختارهای کربنی در معرض چرخه‌های ذوب و یخ و پس از آن تحت آزمایش خمشی سه نقطه‌ای قرار گرفته‌اند.

## 1- Chemical vapor deposition

## ۲-۲. آب

آب استفاده شده در این تحقیق، آب شرب شهر تهران بوده است.

## ۲-۳. سیمان

برای سیمان مصرفی، از سیمان تیپ II کارخانه تهران استفاده شده که مشخصات شیمیایی این نوع سیمان که در محدوده‌های مجاز استاندارد ملی شماره ۱۶۹۲ است، در جدول ۱ نشان داده شده است. به منظور مقایسه این سیمان با نانوساختارهای کربنی سیمانی مورد استفاده، آزمایش BET<sup>۱</sup> و بالن لوشاتلیه برای تعیین سطح ویژه و چگالی انجام شده است. چگالی سیمان مصرفی بر اساس آزمایش بالن لوشاتلیه ۳/۱۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود. سطح ویژه این سیمان نیز با انجام آزمایش BET ۰/۹۸۸ متر مربع بر گرم به دست آمد. توجه شود که نتایج به دست آمده از آزمایش BET نسبت به بلین برای سیمان تقریباً ۳ برابر است (اولک و همکاران، ۱۹۹۰).

جدول ۱. ترکیبات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ ۲

SO <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>
۳/۲۱۶	۲/۷۴۸	۲/۹۳۷	۲/۹۰۵	۶۲/۳۲۷	۲۰/۸۵۴

## ۲-۴. نانوساختارهای کربنی سیمانی

نانوساختارهای کربنی سیمانی مورد استفاده در این تحقیق توسط شرکت مینا تولید شده بودند که این نانوساختارها با استفاده از روش رسوب بخار شیمیایی و در مراحل تولید سیمان روی ذرات سیمان رشد یافته‌اند. چگالی سیمان حاوی نانوساختارهای کربنی با انجام آزمایش بالن لوشاتلیه ۳/۰۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب به دست 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.

به نحوی که نانولوله‌های کربنی از ابتدا به صورت توزیع شده در ذات سیمان پایه حضور داشتند. میزان نانولوله‌های کربنی موجود در این سیمان با استفاده از آنالیز توزین حرارتی تعیین و در بخش نتایج و بحث ارائه شده است. با مقایسه چگالی سیمان معمولی (۳/۱۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب) با سیمان حاوی نانوساختارهای کربنی سیمانی (۳/۰۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب) مشاهده می‌شود که چگالی سیمان حاوی نانوساختارهای کربنی سیمانی ۰/۱۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب کمتر است. این کاهش را می‌توان ناشی از کمتر بودن چگالی عنصر اصلی نانوساختارهای کربنی، یعنی کربن نسبت به چگالی عناصر تشکیل دهنده سیمان مانند آهن، آلومینیوم، دانست. سطح ویژه بیشتر در نانوساختارهای کربنی سیمانی نیز می‌تواند به دلیل حضور نانوساختارها در این سیمان باشد. با توجه به این که نانوساختارهای مورد استفاده در این تحقیق از روش رسوب بخار شیمیایی روی سیمان رشد داده شده‌اند، نانولوله و نانوالیاف هستند و قطری در بازه ۲۰ تا ۱۲۰ نانومتر دارند. طول این نانوساختارها نیز متغیر بوده و تا چندین میکرومتر است.

## ۲-۵. سنگدانه‌های طبیعی

بخش درشت‌دانه و ریزدانه‌ی سنگدانه‌ی طبیعی از معادن تولید سنگدانه اطراف شهر تهران تهیه شده‌اند. مشخصات فیزیکی سنگدانه‌های طبیعی در جدول ۲ ارائه شده است.

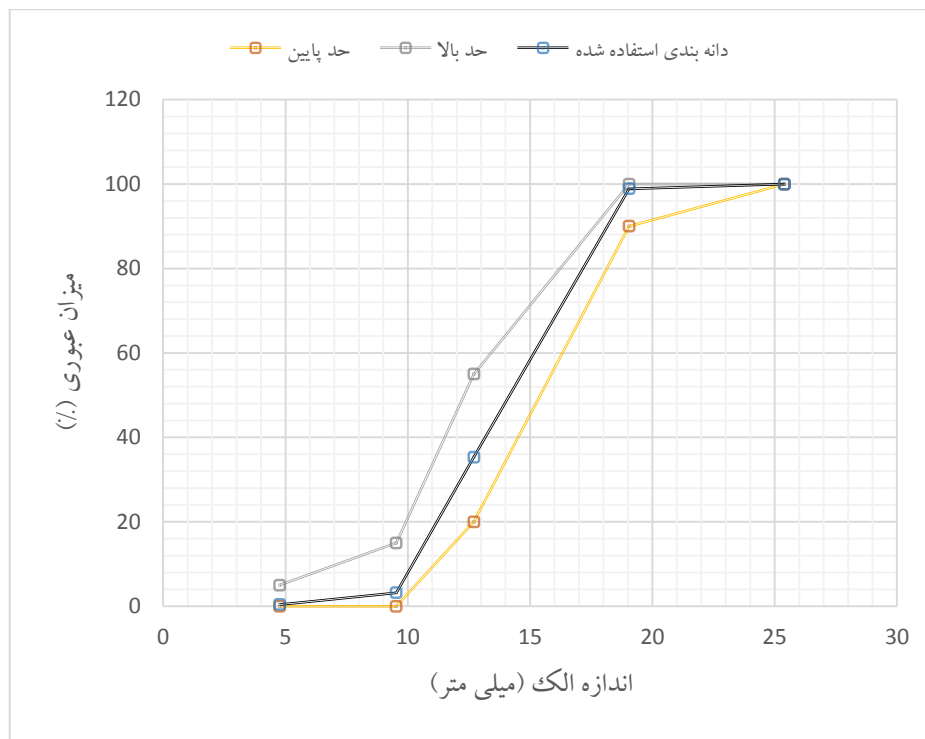
تأثیر دوام بتن حاوی مقادیر مختلف نانو ساختارهای کربنی سیمانی بر افت وزنی و مقاومت خمشی روسازی بتنی در ...

جدول ۲. مشخصات فیزیکی سنگدانه‌های طبیعی

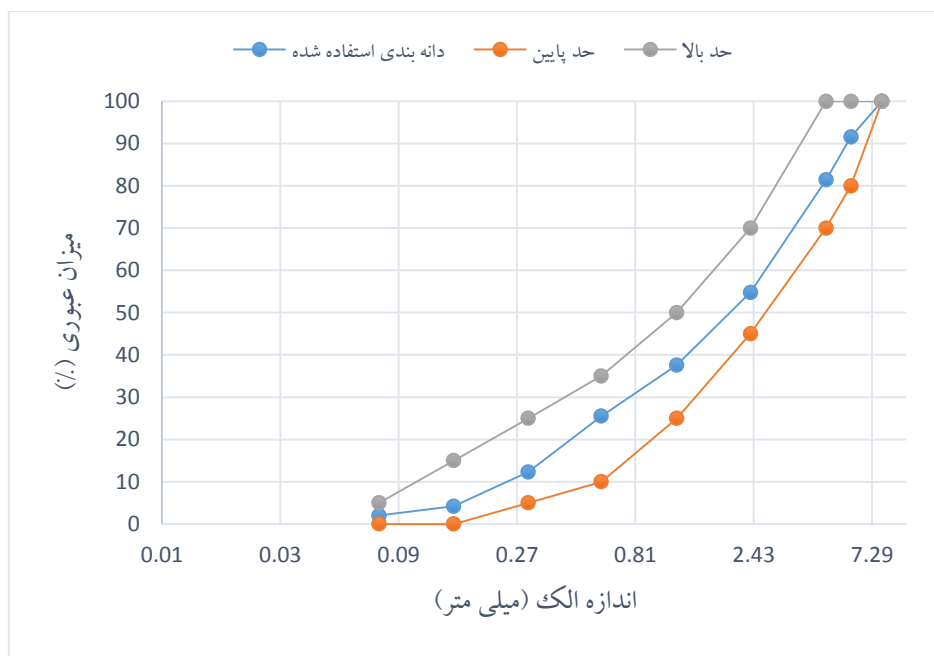
نوع سنگدانه‌ها		استاندارد مربوطه	مشخصات سنگدانه‌ها
ریزدانه طبیعی	درشت دانه طبیعی		
۸	۱۹	ASTM C136	حداکثر اندازه‌ی اسمی (mm)
۲۵۱۰	۲۵۷۰	ASTM C127	وزن مخصوص ( $\text{kg/m}^3$ )
۱/۲	۱/۲۵	ASTM C127	درصد جذب آب در حالت اشباع با سطح خشک
۳/۶	-	ASTM C136	مدول نرمی
۷۵	-	ASTM D2419	درصد ارزش ماسه‌ای
	۱۲/۳	ASTM C121, C535	سایش لس‌آنجلس

برای سنگدانه‌های درشت و ریز نشان داده شده است. همانطور که از نمودارها مشاهده می‌شود، دانه‌بندی مصالح طبیعی مذکور در محدوده‌ی استاندارد قرار دارد.

دانه‌بندی مورد استفاده مطابق با استاندارد ASTM C33 و همچنین نشریه ۳۰۲ ملی ایران می‌باشد. در شکل‌های ۱ و ۲ دانه‌بندی و محدوده مربوط به دانه‌بندی استاندارد ASTM C33 و همچنین نشریه ۳۰۲ ملی ایران به ترتیب



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی درشت‌دانه‌های طبیعی مصرفی



شکل ۲: منحنی دانه بندی ریزدانه‌های طبیعی مصرفی

## جدول ۳. طرح اختلاط استفاده شده

مقدار	مشخصات بتن
۳۰۰	عیار سیمان ( $\text{kg/m}^3$ )
۰/۴۵	نسبت آب به سیمان (w/c)
۸۶۴	مقدار شن مصرفی ( $\text{kg/m}^3$ )
۱۰۴۰/۴	مقدار ماسه مصرفی ( $\text{kg/m}^3$ )

برای ساخت نمونه‌های مربوط به افت وزنی، با توجه به استاندارد ASTM C666، ابعاد نمونه‌ها  $30 \times 10 \times 10$  سانتی‌متر انتخاب شد. پس از ساخت بتن، نمونه‌ها در دو لایه در قالب ریخته و کوبیده شدند و پس از ۱۴ روز عمل‌آوری در دستگاه چرخه ذوب و یخ قرار گرفتند. این روند برای نمونه‌های تیر خمشی نیز طی شده است، با این تفاوت که ابعاد نمونه‌های خمشی  $50 \times 10 \times 10$  سانتی‌متر بوده است. به این ترتیب، برای نمونه‌های افت وزنی با توجه به درصد‌های نانو ساختارهای کربنی سیمانی استفاده شده (۲، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵) نمونه‌ها ساخته شده‌اند، برای هر درصد ذکر شده دو نمونه ساخته شده و مقدار میانگین آن‌ها در

## ۲-۶. افزودنی فوق روان‌کننده

در این تحقیق، از فوق روان‌کننده SPC-N1 بر پایه کربوکسیلات<sup>۱</sup> استفاده شده است. استفاده از فوق روان‌کننده برای بهبود کارایی نمونه‌های بتنی است. 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 سلسیوس بوده است، اسیدیته یا pH فوق روان‌کننده ۶/۵ است و میزان مصرف آن بین ۰/۳ تا ۰/۸ لیتر به ازای ۱۰۰ کیلوگرم سیمان توصیه شده است که برای ساخت نمونه‌ها از ۰/۵ لیتر به ازای ۱۰۰ کیلوگرم سیمان استفاده شده است.

## ۲-۷. ساخت نمونه‌ها

به منظور ساخت نمونه‌ها از طرح اختلاط ارائه شده در جدول ۳ استفاده شده است.

## 1- Polycarboxylate ether-based superplasticizer

نمونه‌های حاوی نانوساختارهای کربنی سیمانی در شروع چرخه‌های ذوب و یخ نه تنها دچار افت وزنی نشده‌اند، بلکه باعث افزایش وزن نمونه‌ها نیز شده‌اند. این فرایند در نمونه‌های حاوی ۲، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد نانوساختار کربنی سیمانی مشاهده شده است و تنها در نمونه‌های شاهد و ۲۵ درصدی رخ نداده است. در نمونه‌های ۱۰ و ۱۵ درصدی، تا پس از ۴۸ چرخه ذوب و یخ نیز کم‌اکان افزایش وزن نمونه‌ها مشاهده شده است. این افزایش وزن می‌تواند به این دلیل باشد که نمونه‌ها در چرخه‌های ذوب و یخ در آب قرار دارند و حفرات موجود در نمونه‌ها در ابتدای فرایند با آب موجود در دستگاه پر شده‌اند. در شروع فرایند چرخه ذوب و یخ، با توجه به این‌که دمای درون دستگاه کاهش می‌یابد، آب موجود در حفرات یخ می‌زند. وقتی آب شروع به یخ زدن در یک حفره مویینه می‌کند، افزایش حجم همراه با یخ‌زدگی آب، نیاز به انبساط حفره به میزان ۹٪ حجم آب یخ‌زده و یا نیاز به بیرون راندن مقدار آب اضافی از سطوح مرزی نمونه و یا نیاز به مقادیری از هر دو اثر دارد (پاورز، ۱۹۵۸).

در جدول ۴، روند افت وزنی نمونه‌ها در بازه‌های ۲۴ چرخه‌ای نشان داده شده است که در شکل ۴ نیز به صورت نمودار این روند ارائه شده است. موضوعی که از شکل ۴ قابل رؤیت است، شباهت تقریبی میزان افت وزنی نمونه‌های شاهد و حاوی نانوساختار کربنی سیمانی تا پس از 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 تا ۱۴۴ چرخه ذوب و یخ را تجربه کرده‌اند و پس از آن روند نسبتاً یکنواختی در افزایش افت وزنی به خود گرفته‌اند.

جدول ۴ ارائه شده است. بنابراین، برای نمونه‌های افت وزنی ۱۴ نمونه ساخته شد. نمونه‌های تیر خمشی نیز به دلیل انجام آزمایش خمش سه نقطه‌ای در چهار چرخه ذوب و یخ (صفر، ۹۶، ۱۹۲ و ۳۰۰) و ۲ بار تکرار برای هر آزمایش، تعداد ۵۶ نمونه (۱۴×۴) ساخته شد.

### ۳. نتایج و بحث

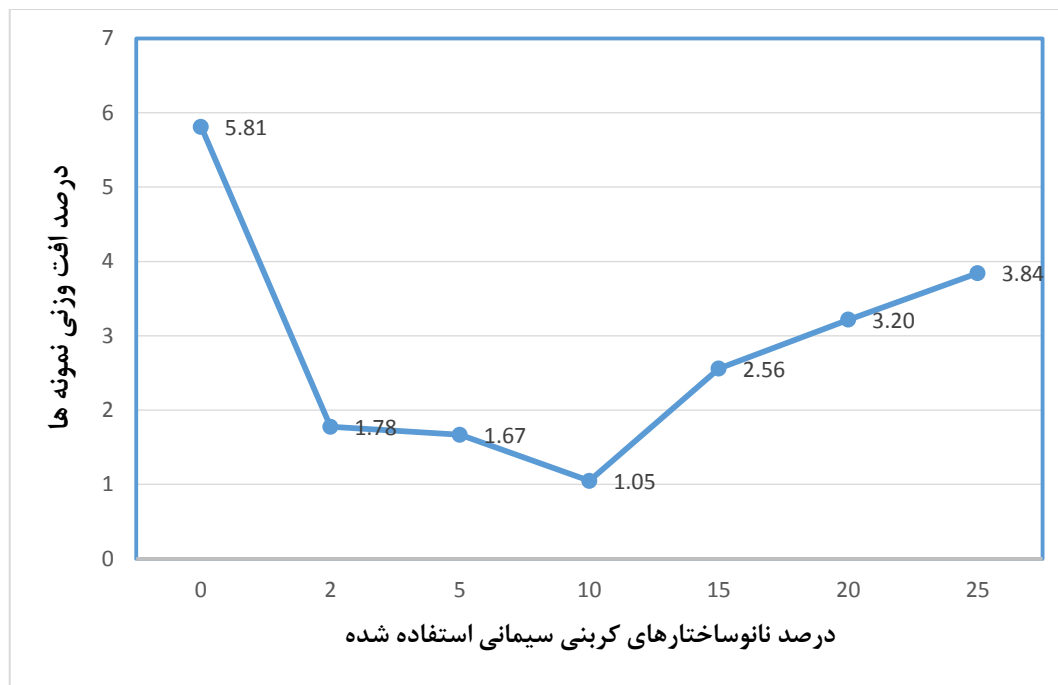
تأثیر دوام بتن در شرایط چرخه ذوب و یخ بر مقاومت خمشی روسازی بتنی حاوی نانوساختارهای کربنی سیمانی بررسی شده است. به همین جهت، آزمایش‌های افت وزنی برای بررسی دوام و مقاومت خمشی در چرخه‌های مختلف ذوب و یخ انجام شده است. از درصد‌های مختلف نانوساختارهای کربنی جهت تعیین درصد بهینه استفاده شده است.

#### ۳-۱. افت وزنی

به منظور بررسی تأثیر نانوساختارهای کربنی سیمانی بر بتن روسازی، ۷ نوع نمونه بتنی با درصد‌های مختلف نانوساختار کربنی سیمانی صفر، ۲، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد به عنوان جایگزین سیمان در طرح اختلاط تعیین شده، ساخته شد. با توجه به محدوده مشخص شده برای ابعاد نمونه‌ها به منظور قرار گرفتن در معرض چرخه ذوب و یخ، نمونه‌ها با ابعاد  $30 \times 10 \times 10$  سانتی‌متر ساخته شدند.

میزان افت نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف نانوساختارهای کربنی سیمانی، پس از قرارگیری در معرض ۳۰۰ چرخه ذوب و یخ، اندازه‌گیری شده و در شکل ۳ ارائه شده است. روند افت وزنی نمونه‌ها با درصد‌های مختلف نانوساختار کربنی سیمانی نیز در شکل ۴ نشان داده شده است.





شکل ۳. میزان افت وزنی نمونه‌های بتنی پس از قرارگیری در معرض ۳۰۰ چرخه ذوب و یخ

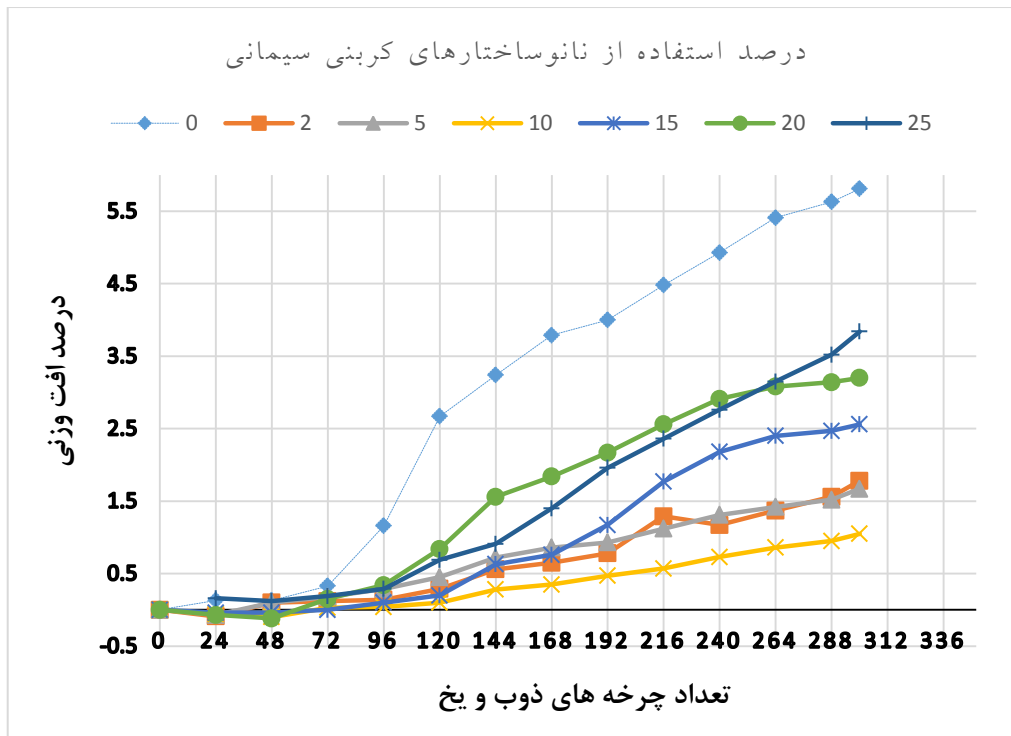
جدول ۴. روند افت وزنی نمونه‌ها

درصد استفاده از نانوساختارهای کربنی سیمانی							تعداد چرخه‌های ذوب و یخ
۲۵	۲۰	۱۵	۱۰	۵	۲	۰	و یخ
۶/۹۵۱	۶/۸۱	۶/۸۳۹	۶/۸۷۱	۶/۸۴۸	۶/۹۲۴	۶/۶۹۶*	۰
۶/۹۴	۶/۸۱۵	۶/۸۴۲	۶/۸۷۵	۶/۸۵۳	۶/۹۳	۶/۶۸۷	۲۴
۶/۹۴۳	۶/۸۱۸	۶/۸۴۲	۶/۸۷۸	۶/۸۴۱	۶/۹۱۷	۶/۶۸۷	۴۸
۶/۹۳۸	۶/۸	۶/۸۳۹	۶/۸۶۹	۶/۸۳۶	۶/۹۱۶	۶/۶۷۴	۷۲
۶/۹۳۱	۶/۷۸۷	۶/۸۳۲	۶/۸۶۸	۶/۸۲۸	۶/۹۱۴	۶/۶۱۸	۹۶
۶/۹۰۳	۶/۷۵۳	۶/۸۲۵	۶/۸۶۴	۶/۸۱۷	۶/۹۰۴	۶/۵۱۷	۱۲۰
۶/۸۸۸	۶/۷۰۴	۶/۷۹۶	۶/۸۵۲	۶/۷۹۹	۶/۸۸۵	۶/۴۷۹	۱۴۴
۶/۸۵۴	۶/۶۸۵	۶/۷۸۷	۶/۸۴۷	۶/۷۸۹	۶/۸۷۹	۶/۴۴۳	۱۶۸
۶/۸۱۵	۶/۶۶۲	۶/۷۵۹	۶/۸۳۹	۶/۷۸۴	۶/۸۷	۶/۴۲۸	۱۹۲
۶/۷۸۷	۶/۶۳۶	۶/۷۱۸	۶/۸۳۲	۶/۷۷۱	۶/۸۳۵	۶/۳۹۶	۲۱۶
۶/۷۵۹	۶/۶۱۲	۶/۶۹	۶/۸۲۱	۶/۷۵۸	۶/۸۴۳	۶/۳۶۶	۲۴۰
۶/۷۳۲	۶/۶	۶/۶۷۵	۶/۸۱۲	۷/۷۵۱	۶/۸۲۸	۶/۳۳۴	۲۶۴
۶/۷۰۶	۶/۵۹۶	۶/۶۷	۶/۸۰۶	۶/۷۴۴	۶/۸۱۶	۶/۳۱۹	۲۸۸
۶/۶۸۴	۶/۵۹۲	۶/۶۶۴	۶/۷۹۹	۶/۷۳۴	۶/۸۰۱	۶/۳۰۷	۳۰۰

\*اعداد بر حسب کیلوگرم می‌باشند.

که نسبت به نمونه شاهد میزان افت وزنی به اندازه ۴/۰۳ درصد کاهش یافته است. با افزودن ۵ درصد نانوساختار کربنی سیمانی به نمونه نیز افت وزنی باز هم کاهش می‌یابد و به ۱/۶۷ درصد رسیده است.

با افزودن نانوساختارهای کربنی سیمانی 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 ۲ درصد نانوساختار کربنی سیمانی افت وزنی نمونه به ۱/۷۸ درصد رسیده است



شکل ۴. روند افت وزنی نمونه‌های حاوی نانوساختارهای کربنی سیمانی در چرخه‌های مختلف ذوب و یخ

نانوساختار کربنی نیز به ترتیب ۳/۲۰ و ۳/۸۴ درصد افت وزنی داشته‌اند. البته مشاهده شد که حتی استفاده از ۲۵٪ نانوساختار کربنی سیمانی با ۳/۸۴ درصد افت وزنی، پاسخ بهتری نسبت به نمونه شاهد با ۵/۸۱ درصد افت وزنی داشته است. به این ترتیب، استفاده از ۱۰٪ نانوساختار کربنی سیمانی در نمونه‌های بتنی کمترین میزان افت وزنی را داشته و بهترین پاسخ را در برابر چرخه‌های ذوب و یخ نشان داده‌اند. در شکل ۵ نیز یکی از نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش افت وزنی نشان داده شده است.

### ۲-۳. مقاومت خمشی

مقاومت خمشی یکی از مهم‌ترین پارامترها در طراحی روسازی‌های بتنی است. به همین منظور، جهت بررسی تأثیر مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف نانوساختارهای کربنی سیمانی، آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه‌ای انجام شد.

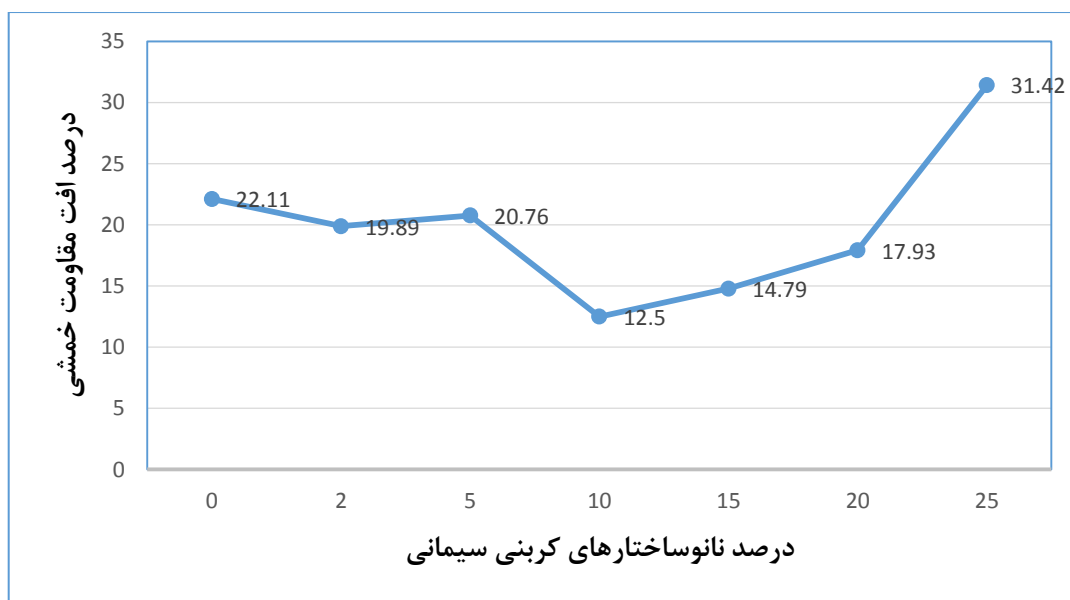
همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان افت وزنی نمونه حاوی ۵٪ نانوساختار کربنی سیمانی نسبت به ۲٪ از این ماده تغییر چندانی نداشته و افت وزنی تنها ۰/۱۱ درصد کاهش یافته است. با افزایش میزان استفاده از نانوساختار کربنی سیمانی به ۱۰٪ نیز کم‌کم میزان افت وزنی کاهش یافته و افت وزنی نمونه پس از ۳۰۰ چرخه ذوب و یخ تنها ۱/۰۵ درصد است. استفاده از ۱۰٪ نانوساختار کربنی سیمانی نسبت به نمونه شاهد میزان افت وزنی را به اندازه ۴/۷۶ درصد کاهش داده و نسبت به نمونه‌های حاوی ۲ و ۵ درصد نانوساختار کربنی سیمانی نیز میزان افت وزنی به ترتیب ۰/۷۳ و ۰/۶۲ درصد کاهش افت وزنی مشاهده شده است. پس از این مرحله، و با افزایش میزان استفاده از نانوساختارهای کربنی، از میزان کاهش افت وزنی کاسته شده است؛ به گونه‌ای که با استفاده از ۱۵٪ نانوساختار کربنی سیمانی در نمونه، میزان افت وزنی ۲/۵۶ درصد شده که نسبت به نمونه‌های حاوی ۲، ۵ و ۱۰ درصد، افت وزنی بیشتری داشته است. نمونه‌های حاوی ۲۰ و ۲۵ درصد



شکل ۵. یکی از نمونه‌های افت وزنی پس از خارج کردن از دستگاه چرخه ذوب و یخ

بررسی مقاومت خمشی انتخاب شد و در انتهای چرخه‌های ذوب و یخ، یعنی ۳۰۰ چرخه، نیز مقاومت خمشی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. برای این که بتوان روند افت مقاومت خمشی را بررسی کرد، آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه‌ای روی نمونه‌های مختلف، بدون قرارگیری در معرض چرخه ذوب و یخ و پس از ۹۶، ۱۹۲ و ۳۰۰ چرخه ذوب و یخ انجام شد. در شکل ۶، افت مقاومت خمشی نمونه‌ها با درصدهای مختلف نانوساختارهای کربنی سیمانی پس از اتمام چرخه‌های ذوب و یخ نشان داده شده است.

نمونه‌ها با درصدهای مختلف نانوساختار کربنی سیمانی در معرض چرخه‌های مختلف ذوب و یخ قرار گرفتند تا میزان افت مقاومت خمشی آن‌ها تعیین شود. با توجه به این که روند افت وزنی نمونه‌ها مشاهده و بررسی شده بود و افت وزنی نمونه‌ها غالباً از چرخه ۷۲ به بعد شروع می‌شد، اولین چرخه انتخابی برای بررسی افت مقاومت خمشی، ۹۶ چرخه انتخاب شد. اکثر خرابی‌های نمونه‌ها در چرخه ذوب و یخ در بازه ۱۲۰ تا ۱۶۸ چرخه رخ داده است. به همین دلیل، چرخه ۱۹۲ (یعنی ۲۴ چرخه پس از ۱۶۸) به عنوان چرخه دوم برای



شکل ۶. میزان افت مقاومت خمشی نمونه‌های مختلف پس از ۳۰۰ چرخه ذوب و یخ

نمونه‌های شاهد مقاومت کمتری داشته‌اند. باید توجه داشت که بیشترین مقاومت خمشی الزاماً بیشترین دوام در برابر چرخه‌های ذوب و یخ را به همراه ندارد. این مسئله در مورد نمونه‌های حاوی ۲، ۵ و ۱۰ درصد نانوساختارهای کربنی سیمانی قابل مشاهده است. با این که در ابتدا و قبل از آغاز چرخه‌های ذوب و یخ، مقاومت خمشی نمونه‌های ۲ و ۵ درصدی بیشتر از نمونه‌های ۱۰ درصدی بوده است، در انتهای چرخه‌های ذوب و یخ (۳۰۰ چرخه) مقاومت خمشی نمونه‌های ۱۰ درصدی بیشتر از نمونه‌های ۲ و ۵ درصدی بوده، مقاومت بهتری در برابر چرخه‌های ذوب و یخ از خود نشان داده و افت مقاومت خمشی کمتری داشته‌اند. چنین موردی بین نمونه‌های شاهد و نمونه‌های حاوی ۲۰ و ۲۵ درصد نانوساختار کربنی سیمانی نیز مشاهده شده است.

مقادیر مقاومت خمشی نمونه‌ها در چرخه‌های مختلف ذوب و یخ در جدول ۵ ارائه شده و برای درک بهتر روند افت مقاومت خمشی، شکل ۷ ارائه شده است. بیشترین مقاومت خمشی قبل از قرارگیری در معرض چرخه‌های ذوب و یخ مربوطه به نمونه‌های حاوی ۵٪ نانوساختار کربنی سیمانی بوده که مقاومت خمشی این نمونه‌ها ۵/۷۸ نیوتن بر میلی‌متر مربع به دست آمده است. پس از آن، نمونه‌های حاوی ۲ و ۱۰ درصد نانوساختار کربنی سیمانی به ترتیب با مقاومت خمشی ۵/۵۳ و ۵/۳۶ نیوتن بر میلی‌متر مربع عملکرد بهتری داشته‌اند. مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی ۱۵٪ نانوساختار کربنی سیمانی نزدیک به نمونه‌های شاهد بوده است و تنها به اندازه ۰/۰۳ نیوتن بر میلی‌متر مربع مقاومت خمشی را بهبود داده‌اند. در حالی که نمونه‌های حاوی ۲۰ و ۲۵ درصد نانوساختارهای کربنی سیمانی به ترتیب با مقاومت خمشی ۵/۰۲ و ۵/۰۶، نسبت به

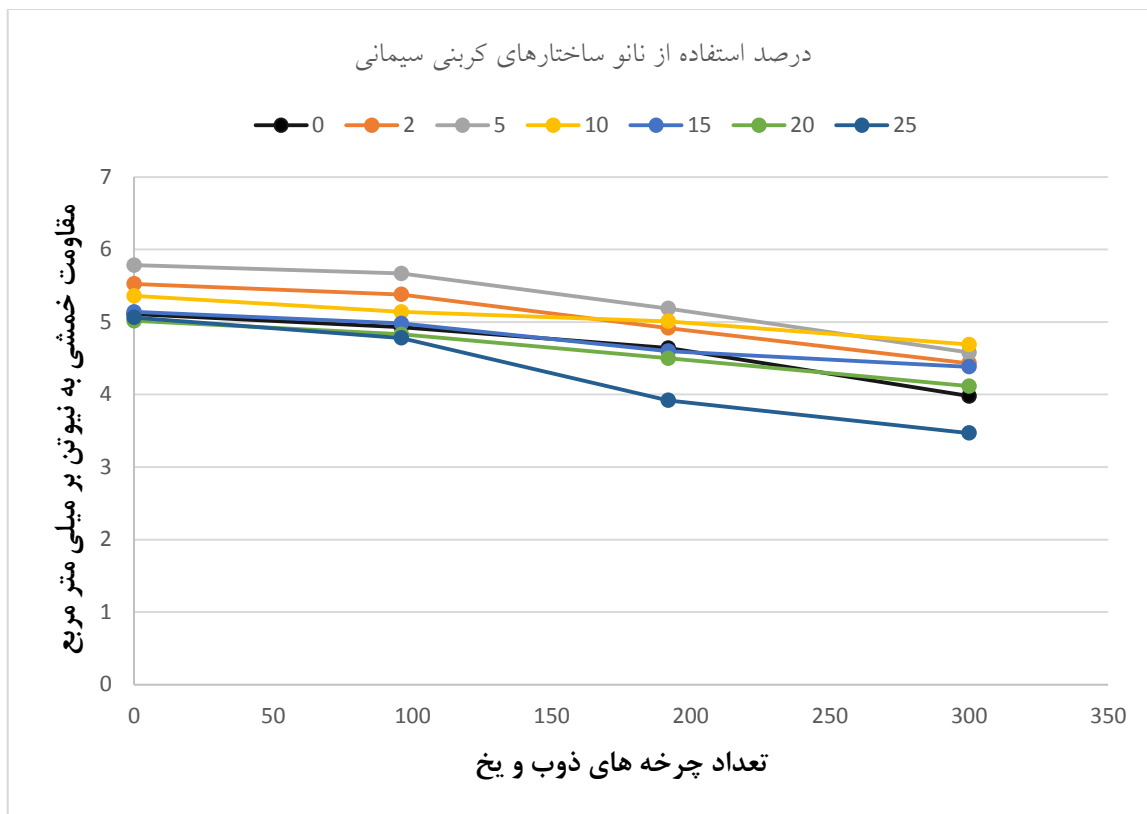
جدول ۵. مقاومت خمشی نمونه‌ها در چرخه‌های مختلف ذوب و یخ

تعداد چرخه‌های ذوب و یخ				درصد استفاده از نانوساختارهای کربنی سیمانی
۳۰۰	۱۹۲	۹۶	۰	سیمانی
۳/۹۸	۴/۶۴	۴/۹۳	۵/۱۱	۰
۴/۴۳	۴/۹۲	۵/۳۸	۵/۵۳	۲
۴/۵۸	۵/۱۹	۵/۶۷	۵/۷۸	۵
۴/۶۹	۵/۰۱	۵/۱۴	۵/۳۶	۱۰
۴/۳۸	۴/۶۰	۴/۹۸	۵/۱۴	۱۵
۴/۱۲	۴/۵۰	۴/۸۳	۵/۰۲	۲۰
۳/۴۷	۳/۹۲	۴/۷۸	۵/۰۶	۲۵

واحد اعداد درون جدول، نیوتن بر میلی‌متر مربع یا همان مگاپاسکال است.

نشان داده، افت مقاومت خمشی کمتری داشته و مقاومت خمشی آن‌ها در انتهای ۳۰۰ چرخه بیشتر از مقاومت خمشی نمونه‌های شاهد و ۲۰ درصدی بوده است.

نمونه‌های حاوی ۲۰٪ نانوساختار کربنی سیمانی، قبل از آغاز چرخه‌های ذوب و یخ، مقاومت خمشی کمتری نسبت به نمونه‌های شاهد و ۲۵ درصدی داشته‌اند. در حالی که در انتهای چرخه‌های ذوب و یخ (۳۰۰ چرخه) مقاومت بهتری در برابر چرخه‌های ذوب و یخ از خود



شکل ۷. روند افت مقاومت خمشی نمونه‌ها در چرخه‌های مختلف ذوب و یخ

آزمایش خمش سه نقطه‌ای نشان داده شده است.

#### ۴. نتیجه‌گیری

پس از انجام آزمایش‌ها و تحلیل آن‌ها، نتایج زیر به عنوان یافته‌های این تحقیق ارائه می‌شوند:

- استفاده از نانوساختارهای کربنی سیمانی در مجموع باعث بهبود دوام بتن در برابر شرایط چرخه ذوب و یخ شده و نمونه‌های حاوی نانوساختارهای کربنی سیمانی پس از ۳۰۰ چرخه ذوب و یخ افت وزنی کمتری نسبت به نمونه‌های شاهد داشته‌اند.

- استفاده از ۱۰٪ نانوساختار کربنی سیمانی بهترین عملکرد در برابر چرخه‌های ذوب و یخ را در زمینه افت وزنی داشته و کمترین افت وزنی را دارا بوده است.

به دلیل حضور و توزیع مناسب نانوساختارها در نانوساختارهای کربنی سیمانی، 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 نانوساختارهای کربنی مزایای عمده‌ای به عنوان یک ماده تقویت‌کننده در بتن دارد. نانوساختارهای کربنی 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. در شکل ۸، شکستن یکی از نمونه‌های تیر خمشی در



شکل ۸. یکی از نمونه‌های خمشی شکسته شده در آزمایش خمش سه نقطه‌ای

برابر چرخه ذوب و یخ را تضمین نمی‌کند. نمونه‌های حاوی ۰.۵٪ نانوساختار کربنی سیمانی، قبل از قرارگیری در معرض چرخه‌های ذوب و یخ، بیشترین مقاومت خمشی را داشتند. در صورتی که در انتهای چرخه‌های ذوب و یخ، مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی ۱۰٪ نانوساختار کربنی سیمانی دارای بیشترین مقاومت بوده‌اند.

- نمونه‌های حاوی ۰.۵٪ نانوساختار کربنی سیمانی در شرایط عادی و بدون قرارگیری در چرخه ذوب و یخ بیشترین مقاومت خمشی را داشته‌اند.  
- در انتهای چرخه‌های ذوب و یخ (پس از ۳۰۰ چرخه ذوب و یخ)، بیشترین مقاومت خمشی مربوط به نمونه حاوی ۱۰٪ نانوساختار کربنی بوده است.  
- بیشتر بودن مقاومت خمشی الزاماً بهتر بودن دوام در

## ۷. مراجع

- Behfarnia, K. and Salemi, N. 2013. The effects of nano-silica and nano-alumina on frost resistance of normal concrete. *Constr. Build. Mater.*, 48: 580-584.
- Fakhim, B., Hassani, A., Rashidi, A. and Ghodousi, P. 2013a. Predicting the impact of multiwalled carbon nanotubes on the cement hydration products and durability of cementitious matrix using artificial neural network modeling technique. *The Sci. World J.* Doi: 10.1155/2013/103713, 8 p.
- Fakhim, B., Hassani, A., Rashidi, A. and Ghodousi, P. 2013b. Preparation and microstructural properties study on cement composites reinforced with multi-walled carbon nanotubes, *J. Compos. Mater.*, 49(1): 85-98.
- Fan, Y. F., Zhang, S. Y., Wang, Q. and Shah, S. P. 2015. Effects of nano-kaolinite clay on the freeze-thaw resistance of concrete. *Cement Concrete Comp.*, 62: 1-12.
- Olek, J, Cohen, M. D. and Lobo, C. 1990. Determination of surface area of Portland cement and silica fume by mercury intrusion porosimetry. *ACI Mater. J.* 87(5): 473-478.
- Powers, T. C. 1958. *The Physical Structure and Engineering Properties of Concrete*. Bulletin 90, Portland Cement Association, Stokie.
- Richardson, A. E., Coventry, K. A. and Wilkinson, S. 2012. Freeze/thaw durability of concrete with synthetic fibre additions. *Cold Regions Sci. Technol.*, 83-84: 49-56.
- Shah, S. P., Konsta-Gdoutos, M. S. and Metaxa, Z. S. 2009. Highly-Dispersed Carbon Nanotubes Reinforced Cement-Based Material. United States Patent Application Publication, 0229494A1.
- Siddique, R. and Mehta, A. 2014. Effect of carbon nanotubes on properties of cement mortars. *Constr. Build. Mater.*, 50: 116-129.

- Sun, S. W., Yu, X., Han, B. G. and Ou, J. P. 2013. In situ growth of carbon nanotubes/carbon nanofibers on cement/mineral admixture particles: A review. *Constr. Build. Mater.*, 49: 835-840.
- Thostenson, E. T. and Chou, T. W. 2002. Aligned multi-walled carbon nanotube-reinforced composites, processing and mechanical characterization. *J. Physics D: Appl. Phys.*, 35(16): 77-80.
- Wang, C., Li, K. Z., Li, H. J., Jiao, G. S., Lu, J. and Hou, D. S. 2008. Effect of carbon fiber dispersion on the material properties of carbon-fiber cement-based composites. *Mater. Sci. Eng.*, 478(1-2): 52-57.