

بررسی تأثیر افزایش دما در خصوصیات مکانیکی و ریزساختار بتن حاوی نانولوله‌ی کربنی چندجداره

مجید قلهکی* (دانشیار)

قاسم باجیده (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

امین مشتاق (هم‌بپی)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه گرسار

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۳۹۹)
دوری ۲ - ۳۶، شماره ۱/۱، ص. ۱۰۷-۱۱۶

در نوشتار حاضر، به بررسی رفتار پس از حرارت بتن‌های حاوی نانولوله‌ی کربنی چندجداره پرداخته شده است. بدین منظور، تعدادی نمونه در قالب‌های استوانه‌یی به ابعاد 10×20 سانتی‌متر حاوی مقادیر 0% ، 1% ، 5% ، 10% و 15% وزنی سیمان نانولوله‌ی کربنی چندجداره ساخته شدند. سپس نمونه‌ها در کوره‌ی الکتریکی تحت دماهای 25° ، 100° ، 250° و 500° درجه‌ی سانتی‌گراد قرار گرفتند. پس از انجام عملیات حرارتی، آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی بر روی آن‌ها انجام شده است. نتایج حاکی از آن است که با افزایش درصد استفاده از نانولوله‌ی کربنی چندجداره در بتن، مقاومت فشاری و کششی تا میزان 138% و 88% افزایش می‌یابد. همچنین ظرفیت جذب انرژی و مدول کشسانی تا دو برابر حالتی خواهد بود که از مواد نانو در بتن استفاده نشده است. همچنین بر روی نمونه‌ها، آزمایش SEM نیز صورت گرفت که نتایج آن گویای پیوند قوی بین ذرات بتن حاوی مواد نانو در دمای اتاق (25° درجه‌ی سانتی‌گراد) و دماهای بالاتر است.

واژگان کلیدی: بتن، خصوصیات مکانیکی، نانولوله‌ی کربنی چندجداره، دما، SEM.

۱. مقدمه

طی سال‌های اخیر، تحقیقاتی درباره‌ی استفاده از نانولوله‌های کربنی در کامپوزیت‌های سیمانی در بسیاری از کشورها توسط پژوهشگران مختلف انجام شده است. [۱-۵] نانولوله‌های کربنی، شکل ظاهری واحدی دارند. همچنین مواد مذکور، خصوصیات از قبیل: سطح مخصوص بالا، خصوصیات جدید و متنوع الکتریکی، مدول یانگ خیلی زیاد (حدود ۲ تریلیون پاسکال)، پیوند بسیار قوی بین اتم‌های کربن، مقاومت کششی بالا (حدود 50 گیگاپاسکال)، مقاومت خمشی زیاد و هدایت گرمایی و الکتریکی زیاد دارند. [۶-۸] همچنین در سال‌های گذشته، مطالعاتی درباره‌ی نانولوله‌های کربنی در علم پزشکی و الکترونیک انجام شده است که در حال حاضر این علم در رشته‌ی مهندسی عمران وارد شاخه‌ی مواد کامپوزیتی سیمانی شده و نشان داده است که استفاده از نانولوله‌های کربنی در مواد سیمانی، سبب بهبود خصوصیات مکانیکی و ریزساختار آن می‌شود. [۹]

تلاش‌های اولیه در خصوص استفاده از نانولوله‌ها در مواد سیمانی با مقادیر

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۱۲/۱۳، اصلاحیه ۱۳۹۷/۳/۲، پذیرش ۱۳۹۷/۳/۹

DOI:10.24200/J30.2018.50388.2314

مشخصات مکانیکی، نسبت طول به قطر بالا، وزن مخصوص کم و مقاومت در

جدول ۱. خلاصه‌ی طرح‌ها.

نام نمونه	N-۰	N-۰٫۵	N-۱	N-۱٫۵
	بتن بدون نانو (نمونه‌ی شاهد)	بتن با ۰٫۵٪ نانو	بتن با ۱٪ نانو	بتن با ۱٫۵٪ نانو

جدول ۲. مشخصات نانولوله‌ی کربنی چندجداره (MWCNT).

خصوصیات	
درصد خلوص	$> 98 (wt\%)$
قطر خارجی	$5 - 15 (nm)$
قطر داخلی	$3 - 5 (nm)$
طول	$50 (\mu m) (TEM)$
سطح مخصوص	$> 233 (m^2/g) (BET)$
رنگ	سیاه
خاکستر	$1.5 (wt\%) (TGA)$
ضریب هدایت الکتریکی	$> 100 (s/cm)$
تراکم واقعی	$2.1 (g/cm^3)$
روش تولید	CVD

بررسی خصوصیات مکانیکی و ریزساختار آن‌ها پرداخته شده است. بدین منظور، آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی بر روی نمونه‌های استوانه‌یی مطابق با استاندارد انجام و مقادیر به‌دست آمده با یکدیگر مقایسه شده است. همچنین خصوصیات از قبیل مدول کشسانی و ظرفیت جذب انرژی نمونه‌ها طبق منحنی تنش - کرنش به‌دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها بررسی شده است. جهت بررسی خصوصیات ریزساختار بتن‌های حاوی نانولوله‌ی کربنی چندجداره، آزمایش SEM برای برخی نمونه‌ها انجام شده است.

۲. برنامه‌ی آزمایشگاهی

در مطالعه‌ی حاضر، تعداد ۱۲۰ عدد نمونه‌ی استوانه‌یی بتن حاوی نانولوله‌های کربنی چندجداره با مقادیر ۰٫۵٪، ۱٪، ۱٫۵٪ وزنی سیمان ساخته شدند. نمونه‌ها در قالب‌های استوانه‌یی به ابعاد 20×10 سانتی‌متر جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری و کششی و بررسی خواص ریزساختار آن پس از قرار گرفتن در دماهای ۲۵، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و پس از سرد شدن نمونه‌ها ارزیابی شدند. در جدول ۱، خلاصه‌یی از طرح‌های مورد استفاده در نوشتار حاضر ارائه شده است. طبق جدول ۱، حرف N نماد کلمه‌ی نانو و اعداد مقابل آن، درصد نانولوله‌ی کربنی به‌کار رفته در بتن است. لازم به ذکر است، نمونه‌ی N-۰ به عنوان نمونه‌ی شاهد (نمونه‌ی بدون الیاف) است.

۱.۲. مشخصات مصالح طرح اختلاط

سیمان استفاده شده در نوشتار حاضر، سیمان تیپ II کارخانه‌ی تولید سیمان شاهرود؛ آب مصرفی، آب شرب شهر تهران؛ شن و ماسه‌ی مصرفی، نیز از معدن تیغاب ورامین تهیه شده‌اند. همچنین به جهت افزایش روانی و کارایی بتن، از ابروان ساز کربوکسیلاتی استفاده شد. مشخصات نانولوله‌ی کربنی به‌کار رفته در ساخت بتن در جدول ۲ ارائه شده است.

با توجه به محدودیت بیشینه‌ی قطر سنگ دانه‌ها در نمونه‌های استوانه‌یی 20×10

برابر خوردگی بالا، نانولوله‌های کربنی را به مصالح مسلح‌کننده مفیدی برای پیشرفت مصالح ساختمانی بدل کرده است. تاکنون نانولوله‌های کربنی به‌کار رفته در بتن‌های معمولی یا بتن‌های با عملکرد بالا منجر به بهبود برخی مشخصه‌های مکانیکی شده‌اند.^[۲۲] از نظر ساختاری، نانولوله‌های کربنی را می‌توان مشابه ورقه‌های گرافیت پیچیده شده به صورت لوله‌یی تصور کرد. نانولوله‌های کربنی، شامل انواع تک‌دیواره^۱ و چنددیواره^۲ هستند. در نوع تک‌دیواره، نانولوله‌ها فقط از یک جداره تشکیل شده‌اند، در حالی که در نوع چنددیواره، چند جداره در داخل یکدیگر، نانولوله را تشکیل می‌دهند. همچنین قطر نانولوله‌های کربنی از چند نانومتر (تک‌دیواره) تا چند ده نانومتر (چنددیواره) متغیر هستند. طول آن‌ها نیز معمولاً در حدود میکرومتر است.^[۲۳، ۲۴] کنستا و همکاران (۲۰۱۰،^[۲۵] با اشاره به مشخصه‌های مکانیکی نانولوله‌های کربنی، استفاده از آن‌ها را در کامپوزیت‌های سیمانی با عملکرد بالا پیشنهاد کرده‌اند. در این راستا، به مسئله‌ی مهم نحوه‌ی پخش نانولوله‌ها در مصالح سیمانی پرداخته و نانولوله‌های با طول‌های متفاوت به مقدار ۰٫۸٪ وزنی سیمان را با استفاده از انرژی اولتراسونیک و فعال‌کننده‌ی سطحی به صورت موثر در آب پخش کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از شرایط اولتراسونیک برای پخش مناسب کاملاً ضروری است و مقدار بهینه‌یی برای نسبت وزنی فعال‌کننده‌ی سطحی مورد استفاده به نانولوله وجود دارد. ورا - آگولو و همکاران (۲۰۰۹،^[۲۶] نیز به بررسی رفتار فیزیکی کامپوزیت‌های سیمانی حاوی نانولوله‌ها، نانورس و نانوسیلیس پرداختند. تقریباً همه‌ی مواد نانویی به‌کار رفته، پراکنندگی مناسبی داشتند و مقاومت فشاری و خمشی را بهبود بخشیدند. استفاده از نانولوله‌های کربنی به عنوان موادی با ساختار کوچک، جزء یکی از پیشنهاد‌های پژوهشگران در به‌دست آوردن خصوصیات مکانیکی بتن مدنظر است. با افزودن نانولوله‌های کربنی به بتن در دماهای بالا، پوسته شدن و ترک‌خوردگی در آن کاهش و دوام بتن نیز افزایش می‌یابد.^[۲۷] طبق نتایج مطالعات کنستا و همکاران (۲۰۱۰،^[۹] مد شکست بتن‌های حاوی نانولوله‌های کربنی مشابه بتن معمولی (بتن فاقد نانولوله‌ی کربنی) است، چرا که افزودن نانولوله‌های کربنی به بتن نمی‌تواند تأثیر بسزایی در افزایش مقاومت فشاری بتن بگذارد. هر چند که در دماهای بالا نسبت به بتن معمولی، پوسته‌شدگی و ترک در بتن حاوی نانولوله‌های کربنی کمتر است که علت آن حضور همان نانولوله‌ی کربنی در بتن است که از وقوع ترک‌های ریز جلوگیری می‌کند، به طوری که نیاز به انرژی بیشتری است تا ترک‌های ریز در بتن رخ دهد. اولیویا و همکاران (۲۰۱۶،^[۲۸] نیز در بررسی روش آزمایشگاهی و عددی جدیدی از تیرهای کامپوزیتی بتنی - فولادی متشکل از نانولوله‌های کربنی، نمونه‌های مختلفی شامل نمونه‌های بدون حضور نانولوله‌ی کربنی و با حضور نانولوله‌ی کربنی را در دماهای بالا (۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد) آزمایش کردند و نتیجه گرفتند که با افزایش دما، مقاومت نهایی و سختی آن‌ها کاهش می‌یابد. همچنین نتایج عددی نیز مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان دادند. هر چند که نانولوله‌های کربنی تأثیر بسزایی در مقاومت نهایی نداشته‌اند، اما پوسته شدن و ترک در آن‌ها نسبت به بتن معمولی کاهش یافته است. همچنین حضور نانولوله‌های کربنی در بتن در دماهای بیش از ۴۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد چشمگیرتر شد. در نوشتار حاضر، با توجه به مطالعات انجام شده و همچنین عدم وجود مطالعات جدی بر روی رفتار پس از حرارت بتن‌های حاوی نانولوله‌های کربنی چندجداره، به

ابتدا به میزان موردنظر (طبق طرح اختلاط)، مخلوط بتن به همراه نانولوله‌ی کربنی چندجداره و ابر روان‌کننده ساخته شد، سپس فرایند نمونه‌گیری بتن در نمونه‌های استوانه‌ی 10×20 سانتی‌متر به تعداد مجموعاً ۱۲۰ عدد (برای هر دما و هر آزمون، ۳ عدد نمونه ساخته شد) انجام شد. هر قالب، در ۳ مرحله، بتن‌ریزی و در هر بار ویریه شد. پس از مدت ۲۴ ساعت، قالب‌ها باز و داخل حوضچه‌ی آب (دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد) قرار گرفتند و نمونه‌ها پس از مدت ۲۸ روز از داخل حوضچه‌ی آب خارج و سپس در کوره‌ی الکتریکی قرار داده شدند. پس از اتمام فرایند عمل‌آوری نمونه‌ها، دماهای انتخابی برای انجام آزمایش در کوره‌ی الکتریکی به ترتیب ۲۵، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد بررسی شدند. نرخ افزایش درجه حرارت تا رسیدن به دمای موردنظر برابر ۵ درجه‌ی سانتی‌گراد بر هر دقیقه انتخاب شد.

به منظور حصول اطمینان از رسیدن تمامی قسمت‌های بیرونی و داخلی نمونه‌ها به دمای موردنظر، برای هر دما به تعداد ۲ عدد نمونه‌ی آزمایشی ساخته و در مرکز آن ترموکوپل سری K با قابلیت رسیدن به دمای بیشینه‌ی ۱۰۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، قرار داده شد. طبق نتایج به دست آمده، به‌طور میانگین بسته به شدت دمای اعمالی به نمونه، حدود ۲ ساعت پس از رسیدن دمای داخلی کوره به دمای موردنظر، زمان صرف شد تا تمام قسمت‌های بتن به دمای موردنظر برسد. بنابراین نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت، پس از رسیدن دمای داخلی کوره به دمای موردنظر، به منظور اینکه قسمت درونی بتن نیز به دمای موردنظر برسد و تمام قسمت‌های نمونه هم‌دما شوند، در همان دما باقی ماندند. به علت اینکه کاهش دمای نمونه‌ها به آرامی صورت پذیرد، کوره به مدت ۱ ساعت نیز در حالت خاموش قرار گرفت و سپس درب کوره به آرامی و به تدریج باز شد و پس از چند دقیقه نمونه‌ها خارج شدند. فرایند مذکور، مانع از ایجاد شوک دمایی به نمونه‌ها هنگام سرد شدن می‌شود. شکل ۲، تصاویر جهت‌های مختلف کوره‌ی الکتریکی به همراه نمونه‌های بتنی درون آن با مشخصات مدل A1۶۰ شرکت ATBIN که به صورت برق سه‌فاز کار می‌کند، را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که دهانه‌ی ورودی کوره‌ی الکتریکی به ابعاد 45×45 و به عمق ۶۵ سانتی‌متر با ظرفیت حدود ۴۰ عدد نمونه‌ی استوانه‌ی 10×20 سانتی‌متر

سانتی‌متر، بیشینه‌ی اندازه‌ی شن به‌کار رفته در نوشتار حاضر، برابر با ۱۹ میلی‌متر بوده است. همچنین ماسه‌ی به‌کار رفته از نوع طبیعی ۲ بار شور با قطر بیشینه‌ی $4/75$ میلی‌متر بوده است. منحنی دانه‌بندی شن و ماسه‌ی استفاده شده در شکل ۱ مشاهده می‌شود که مطابق آن، سنگ‌دانه‌ها پیوستگی مناسبی دارند.

۲.۲. طرح اختلاط بتن مصرفی

در نوشتار حاضر، نسبت آب به سیمان برابر با $0/45$ در نظر گرفته شده است. همچنین از مجموع کل سنگ‌دانه‌ها (شن و ماسه)، 46% شن (ریزانه) و 54% ماسه و به مقدار 4% ، از ابر روان‌ساز بر پایه‌ی پرکربوکسیلاتی به عنوان کاهنده‌ی آب و با هدف افزایش کارپذیری بتن استفاده و نحوه‌ی اختلاط نانولوله به صورت درصد وزنی سیمان صورت گرفته است. کلیه‌ی مراحل اختلاط، ساخت و عمل‌آوری نمونه‌های استوانه‌ی، در آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشگاه سمنان انجام شده است. نحوه‌ی اختلاط مصالح برای ساخت بتن، طبق آیین‌نامه‌ی ASTM C1۹۲^[۲۹] انجام شده است.

برای پخش مناسب نانولوله در داخل ملات سیمان و مطالعه‌ی اثر روش اختلاط، می‌توان از دو روش به‌کارگیری فعال‌کننده‌ی سطحی و نانولوله‌ی کربنی عامل‌دار استفاده کرد. در نوشتار حاضر، از روش اولتراسونیک (فعال‌کننده) استفاده شده است. پس از پخش نانولوله در ملات سیمان، نانولوله به مخلوط شن و ماسه افزوده و به مدت حدود ۳ دقیقه به خوبی با هم مخلوط شدند. فعال‌کننده‌ی سطحی مورد استفاده از نوع SDS و به میزان $0/45\%$ وزن آب سوسپانسیون بوده است. یو و همکاران (۲۰۰۹)^[۳۰] نیز از فعال‌کننده‌ی سطحی SDS و شرایط اولتراسونیک برای پخش مناسب استفاده کرده‌اند. همچنین کاربرد SDS در مطالعات دیگری نیز استفاده شده است.^[۳۱،۳۲]

۳.۲. روش آزمایش

عمل‌آوری نمونه‌ها مطابق استاندارد ISIRI ۱۵۸۱^[۳۳] پس از ۲۸ روز انجام شد.



الف) نمای رو به روی کوره الکتریکی؛



ب) فضای داخلی کوره الکتریکی؛

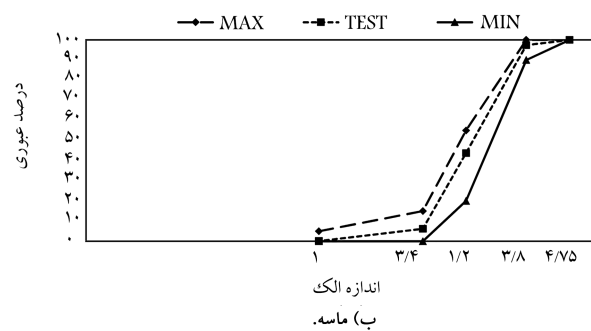
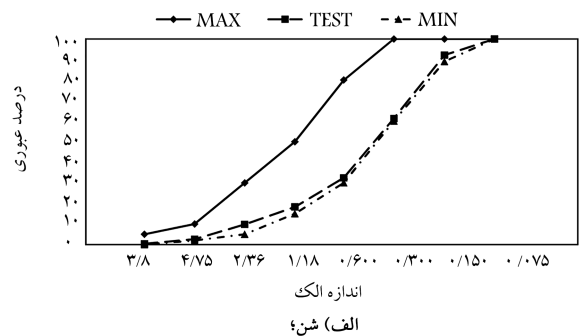


پ) نمای جانبی کوره الکتریکی؛

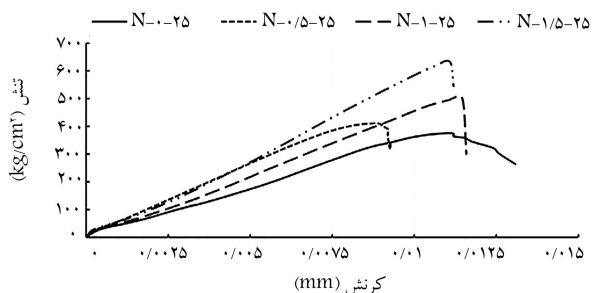


ت) طرز قرارگیری نمونه‌ها در داخل کوره.

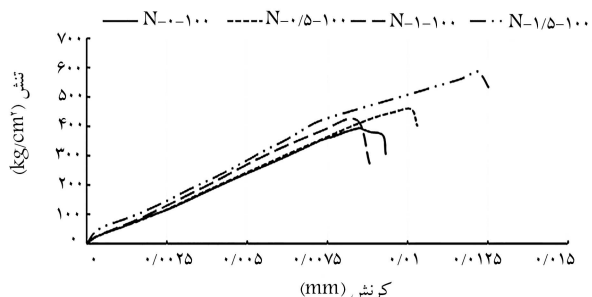
شکل ۲. تصاویر کوره‌ی الکتریکی مورد استفاده.



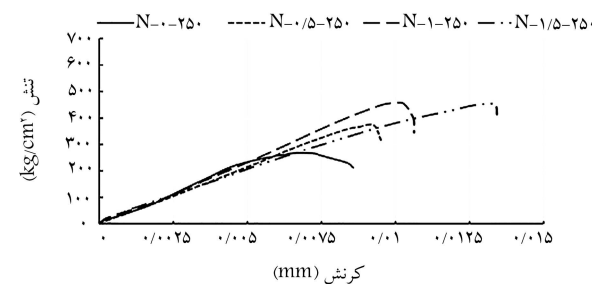
شکل ۱. منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها.



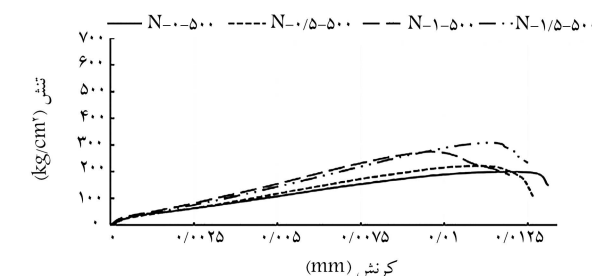
الف) نمودار تنش کرنش در دمای ۲۵°C



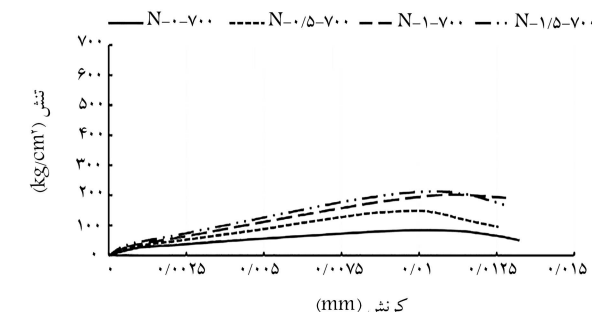
ب) نمودار تنش کرنش در دمای ۱۰۰°C



پ) نمودار تنش کرنش در دمای ۲۵۰°C



ت) نمودار تنش کرنش در دمای ۵۰۰°C



ث) نمودار تنش کرنش در دمای ۷۰۰°C

شکل ۴. نمودار تنش - کرنش نمونه‌ها در دماهای مختلف.

است که به صورت یکنواخت دما را توزیع می‌کند. پس از اتمام عملیات حرارتی و سرد شدن کامل نمونه‌ها، کلیه نمونه‌ها در زیر جک، تحت آزمایش مقاومت فشاری و کششی قرار گرفتند. سرعت بارگذاری دستگاه ۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه بر طبق استاندارد EN-۱۲۳۹۰-۱۳ [۳۳] انتخاب شد.

۳. انجام آزمایش و بررسی نمونه‌ها

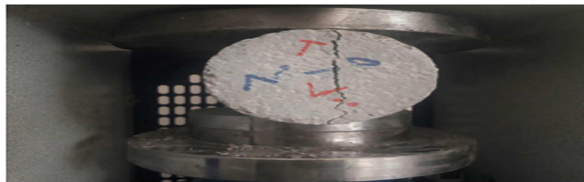
از آنجایی که رفتار پس از حرارت (سرد شدن) نمونه‌ها مدنظر بوده است، لذا پس از اینکه نمونه‌ها از داخل کوره‌ی الکتریکی خارج شدند، حدود ۴۸ ساعت صبر کردند تا تمام قسمت‌های بیرونی و درونی بتن به دمای محیط (۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد) رسیدند و سپس آزمایش‌های لازم بر روی آن‌ها انجام شد.

۱.۳. مقاومت فشاری

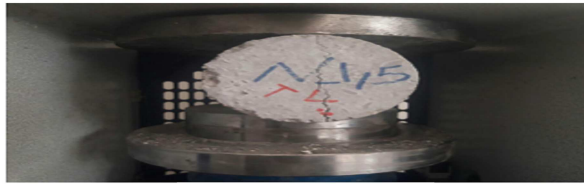
آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها (پس از سرد شدن) طبق آیین‌نامه‌ی ASTM C۳۹ انجام شد. آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های استوانه‌یی به ابعاد 20×20 سانتی‌متر توسط جک هیدرولیک با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلو نیوتن و سرعت بارگذاری ۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه انجام شد. بدین منظور برای انجام آزمون مقاومت فشاری، نمونه‌ها بین دو فک که به فاصله‌ی ۲۰ سانتی‌متر از یکدیگر قرار داشتند، قرار داده شدند و با سرعت مناسب تحت فشار قرار گرفتند. در شکل ۳، نحوه‌ی انجام آزمایش مقاومت فشاری و شکست نمونه که از مرکز آن منهدم شده است، مشاهده می‌شود. در شکل ۴، نمودار تنش - کرنش نمونه‌ها با توجه به تغییرات دمایی پس از سرد شدن مشاهده می‌شود که مطابق آن به‌طور کلی با افزایش دما از مقدار مقاومت نهایی نمونه‌ها کاسته شده است. هر چه بر میزان استفاده از نانولوله‌ی کربنی در بتن افزوده شد، مقاومت نهایی آن نسبت به نمونه‌های با مقادیر کمتر نانولوله افزایش یافت. افزودن نانولوله در دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد به بتن با مقادیر ۰/۵٪، ۱٪، ۱/۵٪ و ۲٪، مقاومت فشاری به ترتیب ۱٪، ۳۴٪، ۶۹٪ افزایش یافت. بنابراین در دمای معمولی (دمای حدود ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد)، هر چه بر میزان استفاده از نانولوله در بتن افزوده شود، مقاومت فشاری آن نیز با سیر صعودی افزایش می‌یابد. با اعمال حرارت ۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد بر روی نمونه‌ها با درصد‌های مختلف استفاده از نانولوله در بتن، مقاومت فشاری نهایی به ترتیب ۱۶٪، ۷٪، ۴۹٪ افزایش یافته است. همانطور که ملاحظه می‌شود، در دمای ۱۰۰ درجه نیز وجود نانولوله در بتن سبب بهبود مقاومت فشاری شده است. همچنین در دمای ۲۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، افزودن نانولوله‌ی کربنی سبب افزایش مقاومت فشاری به ترتیب تا ۳۹٪،



شکل ۳. آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها.

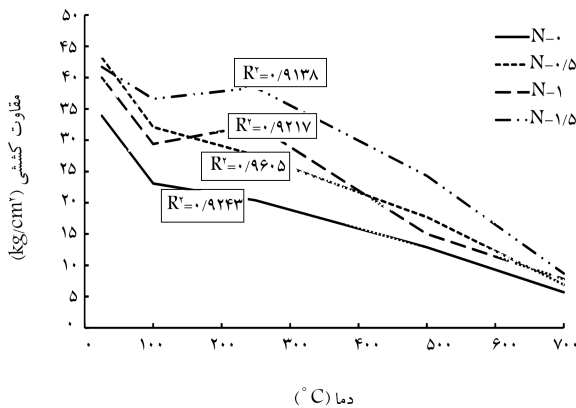


الف) نمونه N-0 در دمای 700°C؛



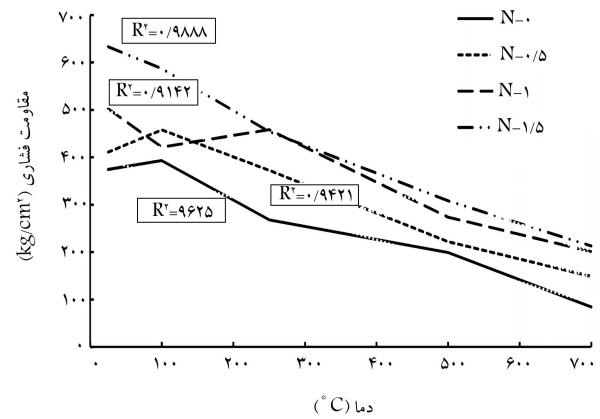
ب) نمونه N-1/5 در دمای 700°C.

شکل ۶. رشد ترک در نمونه‌ها.



شکل ۷. مقاومت کششی بر حسب افزایش دما.

شکل ۷، روند تغییرات مقاومت کششی نمونه‌ها با توجه به تغییرات دما پس از سرد شدن را نشان می‌دهد. ضعف اصلی بتن در کشش است، بنابراین باید به دنبال راهی برای بهبود مقاومت کششی بتن بود. نانولوله‌های کربنی به عنوان عاملی با ساختار ریز، بین خمیر سیمان و سنگ‌دانه‌ها پیوند خوبی برقرار می‌کنند و سبب یکپارچه‌تر شدن بافت کلی بتن می‌شود. در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، که هیچ‌گونه حرارتی به بتن اعمال نشده بود، افزایش نانولوله‌ی کربنی به بتن با مقادیر ۰/۵٪، ۱٪، ۱/۵٪ و ۵٪ وزنی سیمان، مقاومت کششی به ترتیب به میزان ۲۷٪، ۱۸٪ و ۲۳٪ بوده است. بنابراین می‌توان گفت که نانولوله در بتن در حدود ۱۸٪ تا ۲۸٪ بر مقدار مقاومت کششی در دمای اتاق می‌افزاید. با افزایش دمای نمونه‌ها تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت کششی به ترتیب تا ۳۹٪، ۲۷٪ و ۵۸٪ افزایش یافته است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش دما از ۲۵ به ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، تأثیر افزودن نانولوله در بتن نیز نمود بیشتری پیدا کرده است. در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت کششی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌ی شاهد به ترتیب تا ۳۵٪، ۵۹٪ و ۸۸٪ افزایش یافته است. در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، مقدار مذکور به ترتیب ۳۷٪، ۱۶٪ و ۸۸٪ و در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برابر ۲۱٪، ۳۷٪ و ۵۳٪ بوده است. بنابراین استفاده از نانولوله‌ی کربنی در بتن، ۱۵٪ تا ۹۰٪ می‌تواند مقاومت کششی را افزایش دهد. افزایش مقاومت اخیر به عواملی، همچون: طرح اختلاط، نحوه‌ی اختلاط نانو در بتن، عامل‌دار یا بدون عامل بودن نانولوله بستگی دارد. به دلیل واکنش‌های رخ داده بین بتن و نانولوله، در دمای حدود ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد، افزایش مقاومتی در نمونه‌ها مشاهده شد، اما در



شکل ۵. نمودار تغییرات مقاومت فشاری بر حسب افزایش دما.

جدول ۳. درصد کاهش (-) یا افزایش (+) مقاومت فشاری نسبت به دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد.

نام نمونه	دما (درجه سانتی‌گراد)			
	۷۰۰	۵۰۰	۲۵۰	۱۰۰
N-0	-۸۴	+۱۹	+۳۱	+۶۶
N-0/5	-۷۶	-۴	۰	+۱۲
N-1	-۸۰	-۱۲	-۲	+۹
N-1/5	-۸۳	-۴۷	-۲۱	-۱۲

۷۰٪ و ۶۹٪ شده است. این افزایش مقاومت در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برابر با ۱۱٪، ۳۷٪ و ۵۵٪ و در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برابر با ۷۶٪، ۱۳۸٪ و ۱۵۲٪ بوده است. بنابراین می‌توان با تقریب مناسبی بیان کرد که اثر افزایش مقاومت نمونه‌های حاوی نانولوله کربنی در همه‌ی دماها محسوس بوده و با افزایش دما تا میزان ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، تأثیر نانو در عملکرد بتن بیشتر شده است. همچنین در شکل ۵، روند تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها در دماهای مختلف مشاهده می‌شود، که مطابق آن، به‌طور کلی با افزایش میزان استفاده از مواد نانو در بتن، در دماهای مختلف مقاومت فشاری آن افزایش می‌یابد. در جدول ۳، درصد کاهش یا افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد ارائه شده است.

۲.۳. مقاومت کششی

برای انجام آزمایش مقاومت کششی نمونه‌ها، از روش کشش غیرمستقیم یا روش برزیلی بر طبق استاندارد ASTM C496 [۲۵] استفاده شده است. روش انجام آزمایش به این صورت بود که نمونه به صورت افقی یا خوابیده در زیر جک قرار گرفت، به طوری که هیچ‌گونه انحرافی در راستای خود نداشت. سپس جک هیدرولیک مورد نظر با اعمال نیروی قائم، منجر به شکست نمونه شد. جک هیدرولیک با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلو نیوتن بود و با سرعت ۲/۰ کیلو نیوتن بر ثانیه بار را اعمال می‌کرد.

در شکل ۶، به عنوان نمونه نحوه‌ی ایجاد ترک در نمونه‌ها پس از آزمایش مقاومت کششی (دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد) مشاهده می‌شود که مطابق آن استفاده از نانولوله‌ی کربنی در بتن، سبب کاهش عرض ترک هنگام گسیخته شدن بتن پس از آزمون مقاومت کششی شده است. همچنین کلیه‌ی ترک‌ها در ناحیه‌ی مرکزی نمونه و دقیقاً در زیر اثر محل بار به وجود آمده است که نشانگر همگن بودن مناسب اختلاط بتن است.

جدول ۴. مقاومت بیشینه در دماهای مختلف.

نام نمونه	N-۰	N-۰/۵	N-۱	N-۱/۵
بیشترین مقاومت فشاری در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد	*			
بیشترین مقاومت فشاری در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد				*
بیشترین مقاومت فشاری در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد		*		
بیشترین مقاومت فشاری در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد				*
بیشترین مقاومت فشاری در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد				*
بیشترین مقاومت کششی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد		*		
بیشترین مقاومت کششی در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد				*
بیشترین مقاومت کششی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد				*
بیشترین مقاومت کششی در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد				*
بیشترین مقاومت کششی در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد				*

نمونه‌ی شاهد با افزایش دما، به‌طور پیوسته از مقدار مقاومت کششی آن کاسته شد.

۴. بررسی و تفسیر نتایج آزمایش‌ها

با توجه به انجام آزمایش‌های حرارتی، مقاومت فشاری و کششی بر روی نمونه‌ها، نتایج به‌دست آمده به این صورت مقایسه شده است:

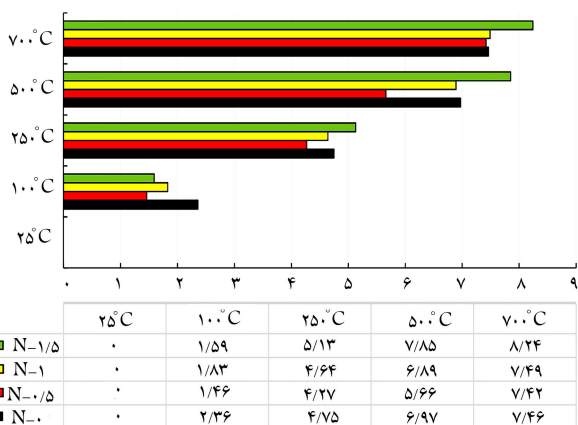
۴.۱. مقایسه‌ی مقاومت‌ها در برابر دماهای مختلف

با توجه به نتایج به‌دست آمده از آزمایش حرارت، مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها، خلاصه‌یی از نتایج مهم در جدول ۴ ارائه شده است. لازم به ذکر است که از آنجایی که در برخی دماها، مقادیر مقاومت‌ها نزدیک به هم بوده است، لذا هر دو مقدار در جدول ۴ لحاظ شده است.

با توجه به نتایج جدول ۴ می‌توان با تقریب مناسبی بهترین نمونه در آزمایش مقاومت فشاری و کششی را نمونه‌های حاوی ۱/۵٪ نانولوله‌ی کربنی دانست. چرا که با افزایش استفاده از آن، یکپارچگی و ارتباط بین خمیر سیمان و سنگ‌دانه‌ها افزایش یافته و هنگام افزایش حرارت، توان بیشتری داشته است. در آزمون مقاومت فشاری در دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد و در آزمون مقاومت کششی در دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد، به‌علت اینکه مقدار مقاومت آن‌ها نزدیک به نمونه‌های با ۱/۵٪ نانولوله بوده است، لذا در رده‌ی بیشترین مقاومت‌ها قرار گرفته‌اند، که مسئله‌ی مذکور نیاز به مطالعه‌ی بیشتری دارد.

۴.۲. تغییرات وزنی پس از حرارت

با توجه به اعمال حرارت بر روی نمونه‌ها و نتیجتاً تبخیر بخشی از سیمان و آب موجود در بتن، از وزن نمونه‌ها کاسته می‌شود. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، استفاده از مقدار ۵٪ و ۱٪ نانولوله‌ی کربنی در بتن، وزن آن نسبت به نمونه‌ی بدون نانو (نمونه‌ی شاهد) کاهش کمتری داشته است، اما استفاده از ۱/۵٪ نانولوله‌ی کربنی در بتن این مقدار افزایش یافته است. لازم به ذکر است که کاهش یا افزایش نمونه‌های حاوی نانولوله‌ی کربنی نسبت به نمونه‌ی شاهد چندان محسوس نیست، بنابراین نمی‌توان انتظار حفظ وزن بتن حاوی نانولوله در شرایط پس از دماهای بالا را داشت. همچنین با توجه به اینکه عمده‌ی کاهش وزن اخیر ناشی از تبخیر آب موجود در بتن است، لذا نمی‌توان قطعاً بیان کرد که علت اصلی کاهش وزن نمونه‌ها



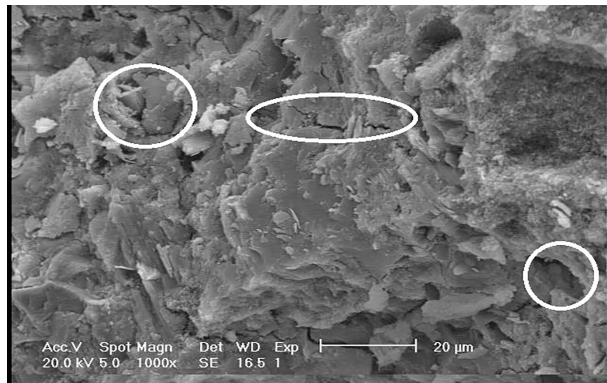
درصد کاهش وزن نسبت به دمای ۲۵°C

شکل ۸. تغییرات وزنی پس از حرارت.

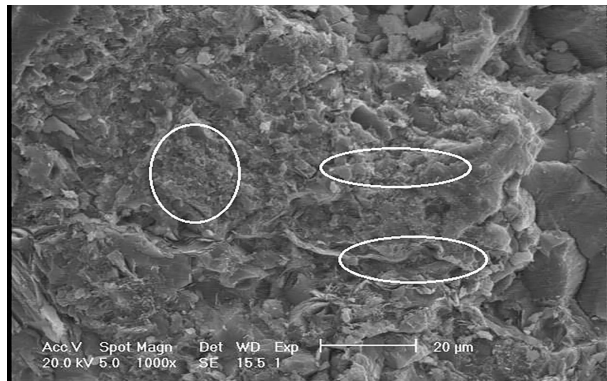
ناشی از نانولوله‌ی کربنی است. اما این مطلب جهت اطلاع بیشتر خوانندگان ارائه شده است.

۴.۳. تغییرات مدول کشسانی

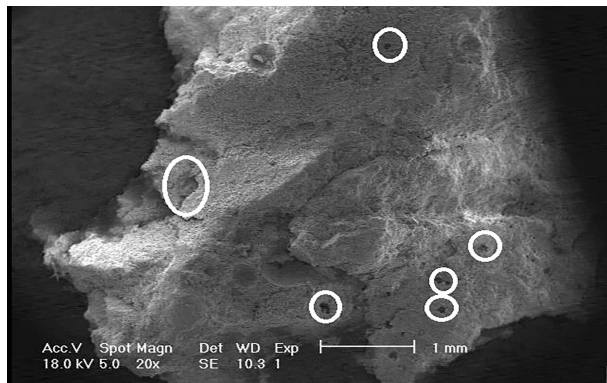
مدول کشسانی بتن برابر با شیب ناحیه‌ی خطی منحنی تنش - کرنش بتن در آزمایش مقاومت فشاری است. به بیان دیگر، برابر مدول تانژانتی (ماسی) براساس شیب مماس در هر نقطه بر منحنی است که معمولاً به مماس بخش اول منحنی، مدول تانژانتی اولیه گفته می‌شود. جدول ۵، مقدار مدول کشسانی هر نمونه را بر حسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد، حضور نانولوله‌ی کربنی چندجداره در بتن تا ۱/۳۳ برابر باعث افزایش مدول کشسانی شده است. همچنین این مقدار در دماهای ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به ترتیب ۱/۱، ۱/۱۲، ۱/۴۵ و ۱/۸۴ برابر، مدول کشسانی را افزایش داده است. بنابراین در حالت کلی با افزایش درصد نانولوله‌های کربنی، میزان کاهش مدول کشسانی در نتیجه‌ی افزایش حرارت به میزان کمینه می‌رسد. به‌عبارتی در نمونه‌های شاهد (N-۰) با افزایش دما به‌طور پیوسته از مقدار مدول کشسانی کاسته شده است، به‌طوری که در دمای ۷۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به میزان کمینه‌ی خود رسیده است. این تذکر لازم است که پس از دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد، مقدار مدول کشسانی، دچار افت شدید شده است. در نمونه‌های N-۰/۵ نیز به دلیل درصد نسبتاً کم نانولوله در بتن، رفتار کلی



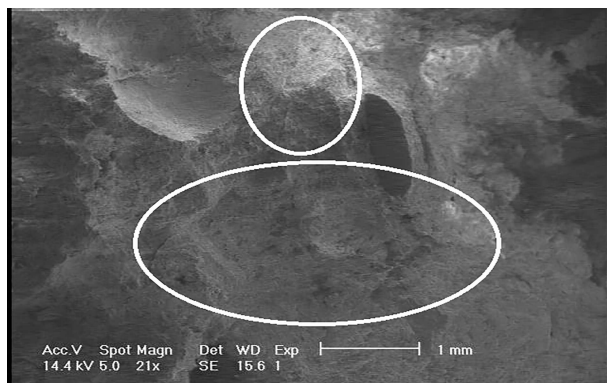
شکل ۹. تصویر میکروسکوپ الکترونیکی از نمونه‌ی N-۰-۲۵.



شکل ۱۰. تصویر میکروسکوپ الکترونیکی از نمونه‌ی N-۱/۵-۲۵.



شکل ۱۱. تصویر میکروسکوپ الکترونیکی از نمونه‌ی N-۰-۷۰۰.



شکل ۱۲. تصویر میکروسکوپ الکترونیکی از نمونه‌ی N-۱/۵-۷۰۰.

جدول ۵. مقدار مدول کشسانی هر نمونه (کیلوگرم بر سانتی متر مربع).

نام نمونه	دما (درجه سانتی‌گراد)				
	۷۰۰	۵۰۰	۲۵۰	۱۰۰	۲۵
N-۰	۸۲	۱۶۵	۳۶۷	۴۰۸	۲۸۰
N-۰/۵	۱۳۵	۱۹۹	۴۰۳	۴۰۵	۴۵۰
N-۱	۱۷۹	۲۴۳	۳۶۰	۴۵۴	۳۲۸
N-۱/۵	۱۵۱	۲۴۰	۴۱۱	۴۷۵	۳۷۵

جدول ۶. میزان جذب انرژی نمونه‌ها ($\frac{kg}{cm^2} \times mm$)

نام نمونه	دما (درجه سانتی‌گراد)				
	۷۰۰	۵۰۰	۲۵۰	۱۰۰	۲۵
N-۰	۳/۱	۶/۷	۶	۸/۷	۱۰/۲
N-۰/۵	۴/۵	۶/۹	۸/۲	۱۰/۲	۸/۵
N-۱	۵/۸	۸	۱۰/۱	۷/۵	۱۱/۲
N-۱/۵	۶	۹	۱۴	۱۶/۸	۱۴

مشابه نمونه‌های شاهد مشاهده و مدول کشسانی به‌طور پیوسته کاهش یافته است. اما در حالت کلی، مقادیر مدول کشسانی به مراتب بیشتر از نمونه‌های شاهد بوده است. در این حالت نیز پس از دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد، مقدار مدول کشسانی دچار کاهش شدید شده است. در نمونه‌های N-۱، پس از دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد تا دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، مقدار مدول کشسانی در حدود ۴۰٪ افزایش و سپس به تدریج کاهش یافته است. در این حالت به علت مقدار نسبتاً بالای نانولوله کربنی در بتن و ایجاد بافتی مستحکم بین خمیر سیمان و سنگ‌دانه‌ها، افت شدیدی در کاهش مقدار مدول کشسانی مشاهده نشده است. همچنین در نمونه‌های N-۱/۵ نیز روند تقریباً مشابه حالت استفاده از یک درصد نانولوله بوده است، با این تفاوت که اندکی در مقادیر تفاوت وجود دارد.

۴.۴. درصد جذب انرژی

سطح زیر نمودار تنش - کرنش در آزمایش مقاومت فشاری بتن، نشان‌دهنده‌ی توانایی بتن در استهلاک انرژی است. بنابراین طبق شکل ۴ که مربوط به نمودارهای تنش - کرنش نمونه‌ها در دماهای مختلف است، مقدار جذب انرژی هر یک در جدول ۶ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش دما میزان جذب انرژی کاهش یافته است. همچنین با افزایش درصد نانولوله‌های کربنی در دماهای مختلف، میزان جذب انرژی افزایش یافته است. لازم به ذکر است سرعت بارگذاری یکی از عواملی است که می‌تواند در میزان جذب انرژی نمونه‌ها مؤثر باشد.

۵. آزمایش میکروسکوپ الکترونیکی (SEM)

به‌منظور شناخت خواص ریزساختار نمونه‌ها، دو سری نمونه، شامل نمونه‌های بدون نانولوله‌ی کربنی (N-۰) و نمونه‌های با ۱/۵٪ نانولوله‌ی کربنی (N-۱/۵) که در دماهای ۲۵ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد آزمون شدند، تحت آزمایش SEM قرار گرفتند. در واقع به کمک انجام آزمایش SEM می‌توان به ساختار درونی بتن حاوی مواد نانولوله‌ی کربنی پی برد و اثر حرارت را در بافت آن‌ها مشاهده کرد. در شکل‌های ۹ الی ۱۲، تصاویر به‌دست آمده از آزمایش SEM بر روی نمونه‌ها نشان داده شده است. در شکل ۹، خطوط شکست نمونه و همچنین حفره‌ها و فضاهای

خالی به خوبی قابل مشاهده است. همان‌طور که در شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود، در دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد نمونه‌ی حاوی نانولوله‌ی کربنی، بافت یکپارچه‌تری دارد و آثار تخریبی کمتری را نشان می‌دهد که این پیوستگی به‌صورت حلقه‌هایی در شکل مذکور مشاهده می‌شود. همچنین در شکل ۱۱، ترک‌ها و حفره‌های ایجادشده تحت دمای ۷۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد مشاهده می‌شود. در شکل ۱۲، در دمای ۷۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، حفره‌ها، پوسته‌شدن، و پیوستگی در نمونه‌ی حاوی نانولوله‌ی کربنی به مراتب کمتر از نمونه بدون نانولوله‌ی کربنی بوده و بافت بتن، پیوستگی مناسبی داشته است. بنابراین وجود مواد نانو از جمله نانولوله‌ی کربنی چندجداره در بتن، با ایجاد پیوندی مناسب با خمیر سیمان، بافتی مستحکم ایجاد کرده است که در برابر حرارت، استقامت زیادی از خود نشان می‌دهد.

۶. مقایسه‌ی نتایج با مطالعات پیشین

به دلیل اهمیت نتایج به‌دست آمده از نوشتار حاضر با درصد‌های مختلف استفاده از نانولوله‌ی کربنی در بتن، می‌توان برخی از آن‌ها را با نتایج به‌دست آمده از مطالعات پیشین مقایسه کرد. اسماعیلی و محمدجعفری صادقی (۲۰۱۶)،^[۳۶] در بررسی تأثیر افزودن نانولوله‌ی کربنی در مشخصات فیزیکی ملات‌های سیمانی نتیجه گرفتند که مقاومت فشاری ملات در سن ۹۰ روزه با مقدار ۰/۵٪ نانولوله برابر ۱۰/۳۲ مگاپاسکال است که نسبت به نمونه‌ی شاهد تقریباً بیش از ۱۰٪ کاهش یافته است؛ اما در نمونه‌های بتنی ساخته شده در نوشتار حاضر با شرایط تقریباً مشابه، مقاومت فشاری برابر ۵۰ مگاپاسکال حاصل شد که نسبت به نمونه‌ی شاهد، افزایش مقاومتی در حدود ۶۰٪ به‌دست آمد. بنابراین تأثیر استفاده از نانولوله‌ی کربنی در بتن به مراتب بهتر و بیشتر از افزودن آن به ملات سیمانی است. همچنین شریف (۲۰۱۷)،^[۳۷] در بررسی تأثیر افزودن مواد نانو، از جمله نانولوله‌ی کربنی به بتن الیافی (الیاف فولادی) پس از دماهای بالا نتیجه گرفت که در دمای ۲۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد حاوی ۰/۵٪ نانولوله‌ی کربنی، مقاومت فشاری حدود ۵٪ نسبت به دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد افزایش یافته است. اما در نوشتار حاضر، در شرایطی تقریباً مشابه (۰/۵٪ نانولوله‌ی کربنی، دمای ۲۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد)، افزایش مقاومتی در حدود ۵٪ مشاهده شده است. باید توجه شود که در پژوهش اخیر، افزایش ۵ درصدی حاصل شده‌ی مقاومت در حالی است که بتن حاوی الیاف فولادی است و اگر الیاف از بتن حذف شود، طبیعتاً انتظار مقاومت پایین‌تری را باید داشت.

۷. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، تعدادی نمونه‌ی بتنی در قالب‌های استوانه‌یی به ابعاد ۱۰ × ۲۰ سانتی‌متر حاوی ۰/۵٪، ۱/۵٪، ۱٪، و ۱/۵٪ وزنی سیمان از نانولوله‌ی کربنی ساخته شدند و در دماهای ۲۵، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد قرار گرفتند. در نهایت، آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی و SEM (میکروسکوپ الکترونیکی) بر روی آن‌ها انجام شد. همچنین، ظرفیت جذب انرژی و مدول کشسانی نمونه‌ها با یکدیگر مقایسه شده و این نتایج به‌دست آمده است:

— با انجام آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌ها، نتایج نشان داد که با به‌کار بردن نانولوله‌ی کربنی چندجداره در مقادیر ۰/۵٪، ۱٪، و ۱/۵٪ وزنی سیمان، مقاومت فشاری در دمای ۲۵، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد تقریباً پیوسته افزایش یافته است، به‌طوری که به ترتیب حدود ۰/۶۹٪، ۰/۴۹٪، ۰/۷۰٪، و ۰/۵۵٪ مقاومت فشاری افزایش یافته است. بنابراین در دمای بالا، به‌خصوص دمای ۷۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، حضور نانولوله‌ی کربنی در بتن نقش بسزایی در بهبود مقاومت فشاری بتن دارد.

— از نتایج به‌دست آمده از آزمایش مقاومت کششی بر روی نمونه‌ها می‌توان بیان کرد که با افزایش دما از ۲۵ تا ۷۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، مقاومت کششی نمونه‌ها به ترتیب تا حدود ۰/۲۷٪، ۰/۵۸٪، ۰/۸۸٪، و ۰/۵۳٪ افزایش یافته است. همچنین با افزایش مقدار نانولوله‌ی کربنی در بتن، گسترش ترک در آزمایش مقاومت کششی پس از گسیخته شدن نمونه، تا چند برابر کاهش یافته است.

— به‌طورکلی میزان مدول کشسانی نمونه‌های حاوی نانولوله‌ی کربنی چندجداره پس از دماهای ۲۵، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به ترتیب تا ۱/۱۶، ۱/۱۲، ۱/۴۷، و ۲/۱۸ برابر نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش یافته است.

— به‌طورکلی میزان جذب انرژی نمونه‌های حاوی نانولوله‌ی کربنی چندجداره پس از دماهای ۲۵، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به ترتیب تا ۱/۹۳، ۲/۳۳، ۱/۳۴، و ۱/۹۴ برابر نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش یافته است.

— نتایج حاصل از آزمایش میکروسکوپ الکترونیکی (SEM) بر پیوستگی و بافت متراکم‌تر نمونه‌های حاوی نانولوله‌ی کربنی نسبت به نمونه‌ی شاهد در دماهای مختلف دلالت دارد.

پانوشتها

1. SWCNT(
2. MWCNT(

منابع (References)

1. Cwirzen, A., Habermehl-Cwirzen, K. and Penttala, V. "Surface decoration of carbon nanotubes and mechani-

cal properties of cement/carbon nanotube composites", *Adv. Cem. Res.*, **20**(2), pp. 65-73 (2008).

2. Wang, B., Liu, S., Han, Y. and et al. "Preparation and durability of cement-based composites doped with multi-walled carbon nanotubes", *Nanosci. and Nanotechnol. Lett.*, **7**(5), pp. 411-416 (2015).
3. Ibragimov, R. and Izotov, V. "Effect of carbon nanotubes on the structure and properties of cement composites", *Inorg. Mater.*, **51**, pp. 834-839 (2015).
4. Luo, J., Duan, Z., Zhao, T. and et al. "Effect of multi-

- wall carbon nanotube on fracture mechanical property of cement-based composite”, *Adv. Superalloys.*, **581**, pp. 146-147 (2011).
5. Manzur, T., Yazdani, N. and Emon, M.A.B. “Potential of carbon nanotube reinforced cement composites as concrete repair material”, *J. Nanomater*, **2016**, pp.1-10 (2016).
 6. Czarnecki, L. “Nanotechnologia w budownictwie (Nanotechnology in construction)”, *Prz. Bud.*, **82**(1), pp. 40-53 (2011).
 7. Huczko, A. and Nanorurki, W,e. CZARNE Diamenty XXI Wieku (Carbon Nanotubes, Black Diamonds of the 21st Century), BEL Studio: Warszawa, Poland (2004).
 8. Huczko, A. “Fulereny i nanorurki (Fulereens and nanotubes)”, *Academia.*, **2**(16) (2006).
 9. Konsta-Gdoutos, M.S., Metaxa, Z.S. and Shah, S.P. “Multi-scale mechanical and fracture characteristics and early-age strain capacity of high performance carbon nanotube/cement nanocomposites”, *Cem. Concr. Compos.*, **32**(2), pp. 110-115 (2010).
 10. Mussoa, S., Tulliani, J.M., Ferroc, G. and et al. “Influence of carbon nanotubes structure on the mechanical behavior of cement composites”, *Compos. Sci. Technol.*, **69**(11-12), pp. 1985-1990 (2009).
 11. Konsta-Gdoutosa, M.S., Metaxa, Z.S. and Shah, S.P. “Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement based materials”, *Cem. Concr. Res.*, **40**(7), pp. 1052-1059 (2010).
 12. Rhee, I. and Roh, Y.S. “Properties of normal-strength concrete and mortar with multi-walled carbon nanotubes”, *Mag. Concr. Res.*, **65**(16), pp.951-961. (2013).
 13. Li, G. and Wang, P. “Macrostructure and mechanical properties of carbon nanotubes cement matrix composites”, *J. Chin. Ceram. Soc.*, **33**, pp. 105-108 (2005).
 14. Li, G.Y., Ming, P. and Zhao, X. “Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes”, *Carbon N.Y.*, **43**(6), pp. 1239-1245 (2005).
 15. Tamimi, A., Hassan, N.M., Fattah, K. and et al. “Performance of cementitious materials produced by incorporating surface treated multiwall carbon nanotubes and silica fume”, *Constr. Build. Mater.*, **114**, pp. 934-945 (2016).
 16. Nasibulina, L.I., Anoshkin, I.V., Nasibulin, A.G. and et al. “Effect of carbon nanotube aqueous dispersion quality on mechanical properties of cement composite”, *J. Nanomater*, **2012**, pp.1-6 (2012).
 17. Morsy, M.S., Alsayed, S.H. and Aqel, M. “Hybrid effect of carbon nanotube and nanoclay on physicomechanical properties of cement mortar”, *Constr. Build. Mater.*, **25**(1), pp. 145-149 (2011).
 18. Gao, X., Liu, L., Guo, Q. and et al. “Fabrication and mechanical/conductive properties of multi-walled carbon nanotube reinforced carbon matrix composites”, *Mater. Lett.*, **59**(24-25), pp. 3062-3065 (2005).
 19. Xu, S., Liu, J. and Li, Q. “Mechanical properties and microstructure of multi-walled carbon nanotube-reinforced cement paste”, *Constr. Build. Mater.*, **76**, pp. 16-23 (2015).
 20. Ning, J., Zhang, J., Pan, Y. and et al. “Fabrication and mechanical properties of SiO₂ matrix composites reinforced by carbon nanotube”, *Mater. Sci. Eng.*, **A 357**(1-2), pp. 392-396 (2003).
 21. Saffar, K.P., Najafi, A.R., Moeinzadeh, M.H. and et al. “A Finite element study of crack behavior for carbon nanotube reinforced bone cement”, *World J. Mech.*, **3**, pp. 13-21 (2013).
 22. Kowald, T., Dorbaum, N. and Trettin, R. “Influence of Carbon Nanotubes on the micromechanical properties of a model system for ultra-high performance concrete”, in *Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, **2**, pp. 129-134 (2008).
 23. Keyvani, A. “Huge opportunities for industry of nanofibrous concrete technology”, *International Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, **3**(1), pp. 3-11 (2007).
 24. Grobert, N. “Carbon nanotubes-becoming clean”, *Materials Today*, **10**(1), pp. 28-35 (2007).
 25. Konsta-Gdoutos, M.S., Metaxa, Z.S. and shah, S.P. “Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement based materials”, *Cement and Concrete Research*, **40**(7), pp. 1052-1059 (2010).
 26. Vera-Agullo, J., Chozas-Ligero, V., Portillo-Rico, D. and et al. “Mortar and concrete reinforced with nanomaterials”, *Nanotechnology in Construction*, **3**, pp. 383-388 (2009).
 27. Potapov, V., Shitikov, E., Trutnev, N. and et al. “Influence of silica nanoparticles on the strength characteristics of cement samples”, *Glass Physics and Chemistry*, **37**(1), pp. 98-105 (2011).
 28. Mirza, O., Wilkins, K., Tao, Zh. and Uy, B. “The Effect of carbon nanotubes on the headed stud shear connectors for composite steel-concrete beams under elevated temperatures”, *Composite Construction in Steel and Concrete*, **VII**, pp. 648-660 (2016).
 29. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, *ASTMC192/ C192M-16a* (2016).
 30. Yu, X. and Kwon, E. “A carbon nanotube/cement composite with piezoresistive properties”, *Smart Materials and Structures*, **18**(5), pp. 1-5 (2009).
 31. De Ibarra, Y.S., Gaitero, J.J., Erkizia, E. and et al. “Atomic force microscopy and nanoindentation of cement pastes with nanotube dispersions”, *Physica Status Solidi*, **203**(6), pp. 1076-1081 (2006).
 32. Han, B., Yu, X. and Ou, J. “Dispersion of carbon nanotubes in cement-based composites and its influence on the piezoresistivities of composites”, *ASME 2009 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems* (2009).

33. INSO581, "concrete-making curing concrete test specimens in the laboratory code of practice", 2nd Revision (2015).
34. NF EN 12390-13 AFNOR, "Testing hardened concrete", in: Determination of Secant Modulus of Elasticity in Compression, pp. 18-455 (2013).
35. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM C469/C496. M (2011).
36. Esmaili, J. and Mohammadjafari, A. "Investigating the effect of using multi-walled carbon nanotubes on increasing the flexural strength and energy absorption capability of cement mortar", **48**(1), pp. 13-22 (2016).
37. Mohamed Amin Sherif, M.A. "Effect of elevated temperature on mechanical properties of nano materials concrete", *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, **7**(1), pp. 1-9 (2017).