Journal of
مجله تحقیقات مواد نانوکامپوزیتی
Nanocomposite Materials Research

Available online: www.jnmr.ir/papers
مجله تحقیقات مواد نانوکامپوزیتی: ۴:۱ (۱۳۸۸) ۲۳۶-۲۲۹

مطالعه رفتار مکانیکی و میکروساختار کامپوزیت بتن - نانولوله کربنی چند دیواره اصلاح شده با گروه عاملی کربوکسیلیک

روح‌اله کشاورز[۱]، ابوالفضل محبی[۲،*] و جلیل مرشدیان[۱]

۱- دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب-گروه مهندسی پلیمر
۲- دانشگاه ازاد اسلامی واحد داراب-گروه مهندسی پلیمر

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۸۸/۰۷/۱۷، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۸۸/۰۹/۰۸، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۸۹/۰۲/۲۶

چکیده

در این تحقیق، اثر حضور نانولوله‌های کربنی چند دیواره اصلاح شده با عامل کربوکسیلیک در ترکیب درصدهای وزنی ۰/۰۱ و ۰/۰۲ مطالعه شد. نمونه‌های نانوکامپوزیت بتنی از توزیع یکنواخت نانولوله‌ها در مخلوط سیمان و ماسه در آب تهیه شدند. تاثیر مکانیکی نانولوله‌های کربنی توسط آنالیزهای فشاری و خمشی و اثرات ریزساختاری و تغییرات مورفولوژیکی آنها توسط آنالیز میکروسکوپ الکترونی مطالعه شد. افزودن نانولوله‌های کربنی به بتن، سبب افزایش مقاومت فشاری و خمشی به ترتیب به میزان ٪۳۰ و ٪۱۳ می‌شود. همچنین سبب کاهش خلل و فرج نانوکامپوزیت بتنی و در نتیجه ایجاد نانوکامپوزیت بتنی فشرده‌تر و پیوسته‌تر می‌گردد. نانولوله اصلاح شده در ماتریس کامپوزیت بتنی، با ایجاد سطح تماس بیشتر و در نتیجه سطح انتقال نیروی بیشتر، سبب پیوند بهتر نانولوله با ماتریس بتنی پیرامون آن می‌گردد و از پیشرفت نقص‌های توده جلوگیری می‌کند.

***واژه‌های کلیدی*: سیمان، کامپوزیت بتنی، نانولوله‌های کربنی.**

۱- مقدمه

نانولوله‌های کربنی (Carbon Nanotubes, CNTs)، کانال‌های لوله‌ای توخالی هستند که به صورت یک دیواره (SWCNTs) و یا چند دیواره (MWCNTs) تولید می‌شوند. نوع تک دیواره، حاصل از رول شدن یک صفحه گرافیت و نوع چند دیواره، حاصل از رول شدن چند صفحه گرافیت می‌توان فرض کرد [۱]. کشف نانولوله‌ها توسط سامیو ایجیما (Iijima) در سال ۱۹۹۱ به علت خواص فیزیکی و شیمیایی فوق‌العاده آنها و کاربرد آنها در کامپوزیت‌های مختلف صورت گرفت [۲]. نانولوله‌ها دارای خواص مکانیکی ویژه از جمله مدول الاستیک در محدوده TPa هستند [۳]. همچنین آنها دارای استحکامی معادل ۱۰۰ برابر فولاد هستند و این در حالی است که چگالی

* **عهده‌دار مکاتبات:** ابوالفضل محبی
نشانی: شیراز، داراب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد داراب، گروه مهندس صنایع پلیمر
تلفن: ۴-۶۲۳۳۹۹۱-۰۷۲۳، **دورنگار:** ۰۷۲۳-۶۲۳۳۹۰۰، **پست‌الکترونیکی:** mohebbi@iaudarab.ac.ir

ویژه آنها تنها $\frac{1}{6}$ فولاد است [۴]. گرچه استحکام و دیگر خواص نانولوله‌ها به قطر، کایرالیتی (چگونگی رول شدن صفحات گرافیت و تبدیل به نانولوله شدن) و تک دیواره یا چند دیواره بودن نانولوله‌ها بستگی دارد، اما استحکام نهایی آنها بیش از ۶۰ GPa و کرنش نهایی شکست آنها ٪۶ گزارش شده است [۵،۶]. نانولوله‌های کربنی مستحکم‌ترین الیافی است که شناسایی شده است و ضریب هدایت حرارتی و رسانایی الکتریکی استثنایی دارد [۷]. آنها به شدت انعطاف‌پذیر هستند، بطوری که قابلیت خم شدن به شکل دایره و یا حتی گره خوردن را دارند [۸]. مزیت اصلی استفاده از نانولوله‌ها در کامپوزیت‌ها، افزایش سختی کامپوزیت در اثر جذب انرژی است که آن نیز به دلیل رفتار الاستیک و انعطاف‌پذیر نانولوله‌ها است. دانسیته کم و کارآیی بهتر در طول بارگذاری فشاری، از خواص دیگر نانولوله‌ها است [۹]. به علت ویژگی‌های منحصر بفرد فیزیکی و شیمیایی، دارای جذابیت‌های صنعتی و علمی زیادی هستند و دارای وسعت کاربرد بالایی از محدوده‌های محصولات روزمره زندگی تا کاربردهای در مقیاس نانو در تولید نانوکامپوزیت‌ها هستند.

نانولوله‌های کربنی به علت نسبت هندسی بسیار بالا (نسبت طول به قطر) از حدود ۳۰ تا چند هزار، خواص مکانیکی بالایی را نشان می‌دهند و سبب تولید یک سیمان تقویت شده و انعطاف‌پذیر می‌شوند. این امر در مقایسه با سیمان‌های تقویت شده با الیاف‌های متداول، مانند الیاف کربن و الیاف شیشه، بسیار قابل توجه است [۱۰]. افزودن پلیمر به صورت پراکنده به سیمان، خواص مکانیکی بتن مانند استحکام کششی، ضربه‌پذیری و کرنش بتن را به مقدار قابل توجهی در درازمدت افزایش می‌دهد [۱۱]. بکار بردن نانومواد در تولید سیمان و بتن می‌تواند منجر به بهبود زیرساخت بناها شود، زیرا مقاومت مکانیکی و عمر بتن وابسته به ساختار میکرو و انتقال جرم و پایداری وابسته به ساختار نانو است [۱۲].

گینبارا و همکارانش دریافتند که اندازه ذرات به شدت بر سینتیک تولید سیمان تاثیر می‌گذارد [۱۳]. یافته‌های آنها نشان می‌دهد که کاهش اندازه ذرات موجب قوام و سفت شوندگی سریع سیمان ناشی از نیروهای الکترواستاتیک قوی و سطح ویژه بالا می شود [۱۳]. سایر مطالعات نشان دادند که مقاومت فشاری و خمشی ملات سیمان با نانوذرات سیلیکا و اکسید آهن بهبود می‌یابد یا مونت موری لونیت اصلاح شده آلی محکم‌تر از ملات سیمان ساده است [۱۴].

در این پژوهش، به بررسی چگونگی ساخت نانوکامپوزیت بتن- الیاف کربن و شناسایی ریزساختار آن و همچنین تاثیر آنها بر خواص مکانیکی و مقاومت شکست بتن پرداخته می‌شود.

۲- فعالیت‌های تجربی

۲-۱- مواد

در این تحقیق از سیمان تیپ ۵۲۵-۱ شرکت سیمان فارس نو مطابق با مشخصات شیمیایی ارائه شده در جدول ۱، ماسه دانه‌بندی مطابق با استاندارد DEN196-1 آلمان، نانولوله کربنی چند دیواره دارای گروه‌های عاملی کربوکسیلیک جهت توزیع یکنواخت در آب، تهیه شده از پژوهشگاه صنعت نفت ایران با مشخصات جدول ۲ و آب استفاده شده است.

۲-۲- روش تهیه

در این تحقیق، از دستگاه مخلوط‌کن Toni Technik مدل 6210MSW ساخت کشور آلمان، قالب شامل سه خانه فولادی با ابعاد مقطع ۴۰×۴۰ میلیمتر و طول ۱۶۰ میلیمتر، دستگاه ضربه‌زن Toni Technik ساخت کشور آلمان، اتاقچه رطوبت ساخت کشور ژاپن مدل ESPEC جهت ثابت نگه داشتن دما و رطوبت، دستگاه آزمون مقاومت فشاری و خمشی Toni Technick مدل SC350 ساخت کشور آلمان جهت اندازه‌گیری مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌ها، حوضچه آب جهت نگهداری نمونه‌ها در آب و دمای ۲۰ درجه سانتیگراد (ISIRI 393، ISIRI391) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل VEGA\\TESCAN جهت بررسی میکروساختار نمونه‌ها استفاده شده است.

در صورتی که نانولوله‌ها در بستر بتن به صورت یکنواخت پراکنده شوند، ویژگی‌های مکانیکی بتن به طور قابل

ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. به این منظور نانولوله‌های کربنی، در ترکیب‌های ۰/۰۱ و ۰/۰۲ درصد وزنی مخلوط (۴۵۰ گرم سیمان بعلاوه ۱۳۵۰ گرم ماسه) به آب اضافه شدند و به مدت ۴۵ دقیقه در حمام التراسونیک با فرکانس ۶۰ هرتز به صورت یکنواخت توزیع گردیدند. جهت تهیه نمونه‌های نانوکامپوزیتی از محلول آب-نانولوله کربنی استفاد شد. نسبت آب به سیمان برای همه نمونه‌ها ۰/۵ درصد است.

جدول ۱: درصد وزنی اکسیدهای تشکیل‌دهنده سیمان.

اکسیدهای سیمان	درصد (٪)
LOI	۱/۳۸
Na_2O	۰/۱۶
K_2O	۰/۸۶
SO_3	۲/۷۶
MgO	۱/۵۶
CaO	۶۳/۷۵
Fe_2O_3	۳/۴۵
Al_2O_3	۵/۷۴
SiO_2	۲۰/۳۴

جدول۲: خواص نانولوله‌های کربنی (پژوهشگاه صنعت نفت).

مشخصه	مقدار
قطر خارجی	۱۰ - ۲۰ nm
طول	۱۰ µm
درصد خاکستر	۰/۲ %
خلوص	۹۵ %
سطح ویژه	۲۵۰ - ۲۸۰ m^2/g
کربن آمورف	3 %

در این تحقیق سه نمونه شاهد بدون نانولوله کربنی (PC)، سه نمونه نانوکامپوزیت بتنی حاوی ۰/۰۱ درصد وزنی مخلوط (سیمان- ماسه) نانولوله کربنی (PCNT-1) و سه نمونه کامپوزیت بتنی حاوی ۰/۰۲ درصد وزنی مخلوط نانولوله کربنی (PCNT-2) تهیه گردید.

برای تهیه نمونه‌ها، ۲۲۵ سی سی محلول آب-نانولوله کربنی (حاوی ۰/۱۸ گرم نانولوله) داخل مخلوط‌کن ریخته شد.

با اضافه کردن ۴۵۰ گرم سیمان تیپ ۵۲۵-۱، اختلاط مخلوط به مدت ۳۰ ثانیه با سرعت کم (حرکت چرخشی: ۱۴۰ ± ۵ rpm و حرکت مداری: ۶۲ ± ۵ rpm) شروع و سپس، ۱۳۵۰ گرم ماسه در حین اختلاط و به مدت ۳۰ ثانیه به مخلوط اضافه گردید. اختلاط به مدت ۳۰ ثانیه دیگر با سرعت زیاد (حرکت چرخشی: ۲۸۵ ±۱۰ rpm و حرکت مداری: ۱۲۵ ±۱۰ rpm) ادامه یافت. مخلوط‌کن پس از ۹۰ ثانیه متوقف شد. در مدت توقف، ذرات چسبیده به دیواره‌ها و ته ظرف در وسط ظرف جمع‌آوری شدند. در نهایت مخلوط‌کن مجدد، با سرعت زیاد به مدت ۶۰ ثانیه شروع به کار گردید تا نمونه‌ها به طور کامل مخلوط شده و آماده قالب‌گیری شوند.

با بستن قالب و قیف روی آن، به میز ضربه‌زن اولین لایه بتن (حدود $\frac{1}{2}$ وزنی بتن) به طور مستقیم از داخل مخلوط‌کن به درون هر سه خانه قالب ریخته می‌شود. لایه اول به صورت یکنواخت در کف قالب پهن می‌شود. سپس اولین لایه مخلوط با ۶۰ ضربه توسط دستگاه ضربه‌زن، متراکم می‌گردد.

پس از متراکم شدن لایه اولیه، دومین لایه نیز مانند لایه قبلی به قالب اضافه می‌شود تا قالب به طور کامل پر شود. مخلوط درون قالب با ۶۰ ضربه دیگر متراکم می‌گردد. در انتها قالب از روی میز دستگاه ضربه‌زن برداشته شده و قیف روی آن جدا می‌شود. پس از صاف نمودن سطح قالب، نمونه‌ها کد گذاری شده و قالب به مدت ۲۴ ساعت داخل اتاقچه رطوبت قرار داده می‌شود. پس از ۲۴ ساعت نمونه‌ها از اتاقچه رطوبت بیرون آورده و از قالب به آرامی جدا می‌شوند و بصورت افقی یا عمودی در آب با دمای ۲۰ درجه سانتیگراد غوطه‌ور می‌شوند.

از یک سیستم گردش آرام آب جهت ثابت نگه داشتن دمای آب روی نمونه‌ها در تمام مدت استفاده می‌شود (ISIRI 393).

۲-۳- دستگاه‌های شناسایی و ارزیابی

برای تعیین مقاومت خمشی، از دستگاه بارگذاری سه نقطه‌ای استفاده شد. نیرو به صورت عمودی با سرعت ۱۰±۵۰ نیوتن بر ثانیه، توسط غلتک بالایی دستگاه به نمونه وارد می‌شود تا زمانی که نمونه شکسته شود. به محض شکسته شدن نمونه، دستگاه بصورت خودکار متوقف می‌شود و مقاومت خمشی نمونه را محاسبه و نمایش می‌دهد. آزمون مقاومت فشاری روی نیمه‌های نمونه شکسته شده حاصل از آزمون مقاومت خمشی انجام می‌شود. در این آزمون، نیرو با سرعت ۲۰ ± ۲۴۰۰ نیوتن بر ثانیه به نمونه اعمال می‌شود تا نمونه بشکند. با شکست نمونه، دستگاه مقاومت فشاری نمونه را نشان می‌دهد (ISIRI 393).

با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، میکروساختار نمونه‌ها مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. این امر به منظور بررسی کلی چگونگی شکست نمونه‌ها پس از انجام آزمون فشاری و مقایسه آنها با نمونه بدون نانولوله کربنی در بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر انجام شد. همچنین به کمک این آنالیز در بزرگنمایی ۳۵۰۰۰، تاثیر حضور نانولوله کربنی نیز مشاهده و بررسی گردید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج مقاومت فشاری و خمشی

متوسط نتایج مقاومت فشاری و خمشی ۲، ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های کامپوزیت بتنی PC، PCNT-1 و PCNT-2 به منظور مقایسه در جدول ۳ ارائه شده است (تست هر نمونه سه بار تکرار شده است).

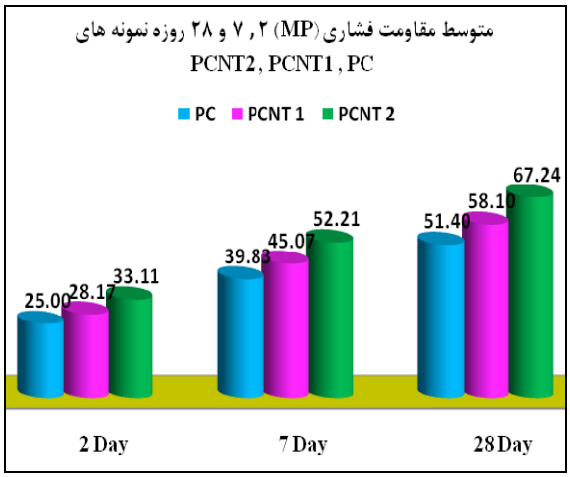
با توجه به داده‌های جدول ۳، مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری و خمشی نهایی (۲۸ روزه) نمونه PC به ترتیب ۵۱/۴۰ و ۷/۹۴ مگاپاسکال، مقاومت فشاری و خمشی نهایی نمونه PCNT-1 به ترتیب ۵۸/۱۰ و۸/۲۹ مگاپاسکال است. این مقادیر برای نمونه PCNT-2 به ترتیب ۶۷/۲۳ و ۹/۰۲ است. بررسی مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌ها بیانگر این مطلب است که مقاومت فشاری نهایی نمونه کامپوزیت بتنی نسبت به نمونه بدون نانولوله کربنی بیش از ۱۵ مگاپاسکال یا ٪۳۰ افزایش یافته است. همچنین با حضور تنها ٪۲ وزنی نانولوله کربنی مقاومت خمشی بیش از ۱ مگاپاسکال، حدود ٪۱۳، افزایش یافته است. این امر بیانگر تقویت میکروساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت بتنی با حضور درصد بسیار کمی نانولوله کربنی است.

مقاومت فشاری ۲، ۷ و ۲۸ روزه نمونه PCNT-1 نسبت به نمونه PC (نمونه شاهد) به ترتیب ۱۲/۲۳، ۱۲/۶۴ و ۱۲/۵۸درصد و مقاومت خمشی ۲، ۷ و ۲۸ روزه نمونه PCNT-1 نسبت به نمونه PC به ترتیب ۲/۵۰، ۵/۷۷ و ۸/۲۹ درصد افزایش یافته است.

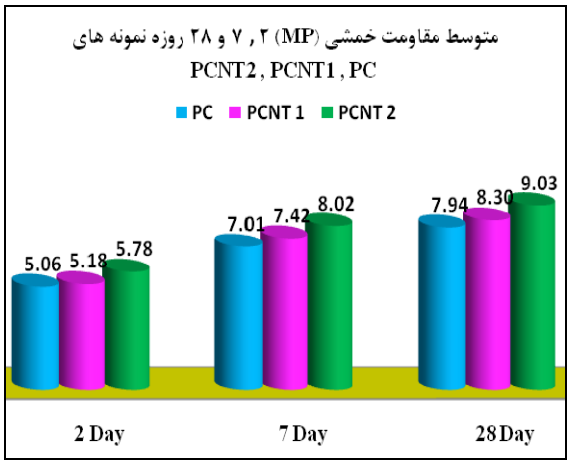
همچنین مقاومت فشاری ۲، ۷ و ۲۸ روزه نمونه PCNT-2 نسبت به نمونه PC (نمونه شاهد) به ترتیب ۳۲/۴۵، ۳۱/۱۰ و ۳۰/۸۱ درصد و مقاومت خمشی ۲، ۷ و ۲۸ روزه نمونه PCNT-2 نسبت به نمونه PC به ترتیب ۱۴/۳۰، ۱۴/۴۶ و ۱۳/۶۳ درصد افزایش یافته است.

جدول۳: متوسط مقاومت فشاری و خمشی ۲، ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌ها.

نام نمونه	استحکام ۲ روزه		استحکام ۷ روزه		استحکام ۲۸ روزه	
	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت خمشی (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت خمشی (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت خمشی (MPa)
PC	۲۵/۰۰	۵/۰۵	۳۹/۸۲	۷/۰۰	۵۱/۴۰	۷/۹۴
PCNT 1	۲۸/۱۶	۵/۱۸	۴۵/۰۶	۷/۴۱	۵۸/۱۰	۸/۲۹
PCNT 2	۳۳/۱۱	۵/۷۸	۵۲/۲۱	۸/۰۲	۶۷/۲۳	۹/۰۲



شکل ۱: متوسط مقاومت فشاری ۲، ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های کامپوزیت بتنی نسبت به نمونه شاهد.

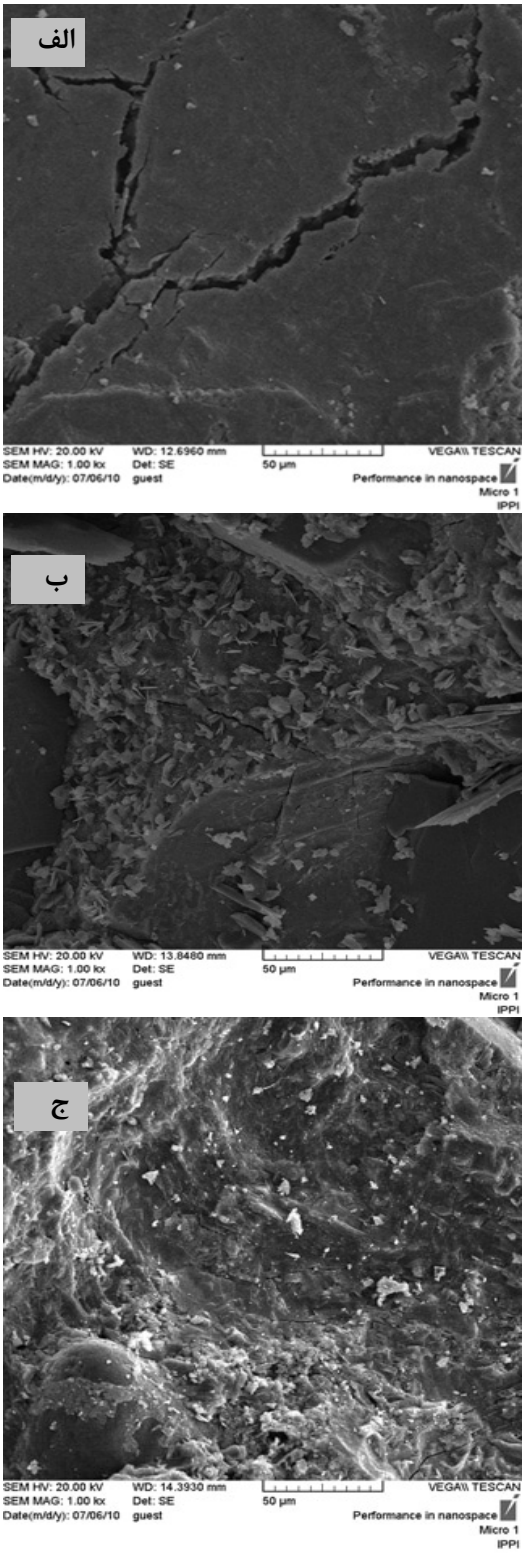


شکل ۲: متوسط مقاومت خمشی ۲، ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های کامپوزیت بتنی نسبت به نمونه شاهد.

شکل‌های ۱ و ۲ نشان دهنده اثر تقویت کنندگی نسبی نانولوله‌های کربنی بر مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌ها است. در واقع، وجود نانولوله‌های کربنی مانند پلهایی روی حفره‌ها و ترک‌های موجود در بستر کامپوزیت بتنی است که مانع رشد و گسترش آنها می‌شود. نتیجه اصلاح میکروساختار کامپوزیت بتنی بوسیله نانولوله‌ها، بهبود چشمگیر خواص مکانیکی آن است.

۳-۲- نتایج آنالیز ساختار و سطح شکست

تصویرهای میکروسکوپ الکترونی (SEM) نمونه‌های نانوکامپوزیت بتنی PC، PCNT-1 و PCNT-2 در شکل‌های ۳ و ۴ مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است.



شکل ۳: عکس SEM نمونه‌های بتنی با بزرگنمایی ۱۰۰۰ الف) نمونه PC، ب) نمونه PCNT-1 و ج) نمونه PCNT-2.

شکل ۳- الف، تصویر SEM نمونه بتنی فاقد نانولوله کربنی (PC) با بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر حاصل از آزمون فشاری

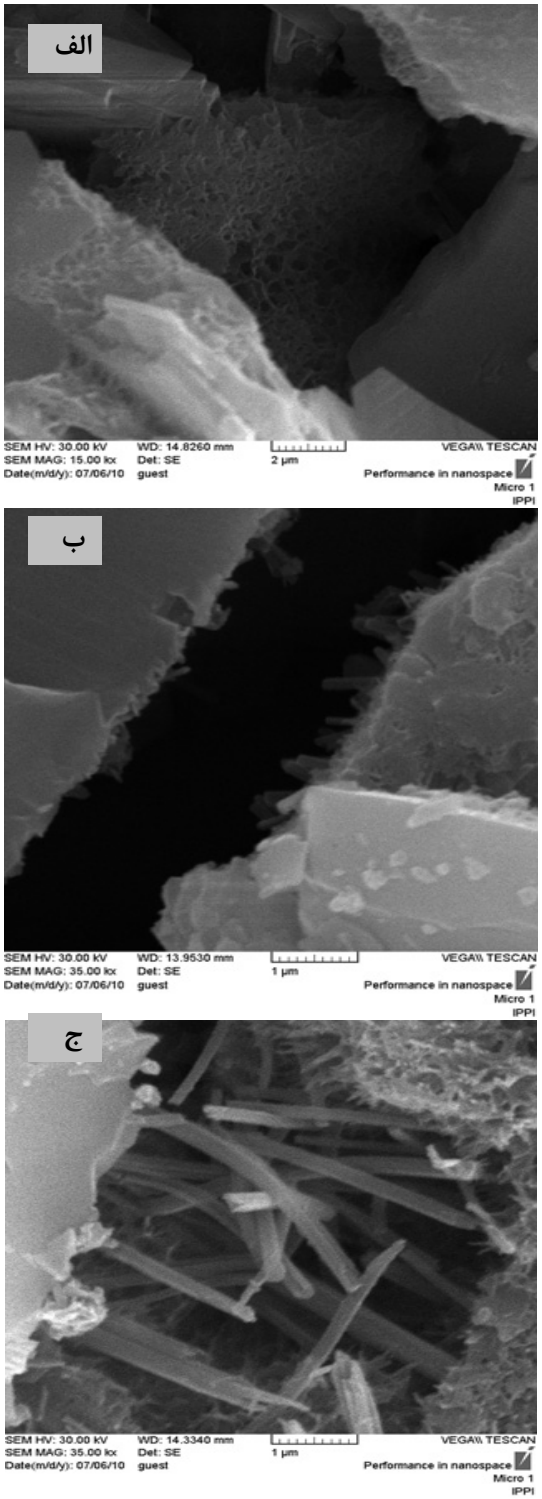
است. این عکس نشان می‌دهد که نمونه بتنی پس از تحمل تنش دچار ترک و از هم گسیختگی شده است. ترک ایجاد شده در نمونه به طور کامل توسعه یافته است و عرض ترک ایجاد شده بسیار زیاد مشاهده می‌شود. همچنین نمونه دارای سطح شکستی صاف می‌باشد.

شکل ۳- ب و ۳- ج، به ترتیب، تصویرهای SEM نمونه‌های نانوکامپوزیت بتنی دارای ۰/۰۱ و ۰/۰۲ درصد وزنی نانولوله کربنی (PCNT-1 و PCNT-2) با بزرگنمایی ۱۰۰۰ حاصل از آزمون فشاری را نشان می‌دهد. نمونه PCNT-1، پس از تحمل تنش نهایی خود دچار ترک شده است. ترک حاصل از تنش وارده در این نمونه دارای عرضی بسیار کم است و رشد چندانی نداشته است. نمونه PCNT-2 نیز پس از تحمل تنش نهایی خود دچار ترک شده است. ولی ترک ایجاد شده در این نمونه حتی نسبت به نمونه PCNT-1 نیز دارای عرضی بسیار کمتر است و رشد و توسعه آن نیز بسیار کم بوده است.

با دقت بیشتر در این تصویرها، مشاهده می‌شود که سطح شکست حاصل از نمونه‌های نانوکامپوزیتی (بخصوص نمونه PCNT-2) نسبت به نمونه فاقد نانولوله کربنی بسیار زبرتر و خشن‌تر است که این امر نشان از پیوند قوی‌تر میان اجزای کامپوزیت بتنی تهیه شده است. در نمونه‌های نانوکامپوزیتی پس از تشکیل ترک، ترک‌ها زیاد رشد نکرده و عرض آنها نسبت به نمونه PC بسیار کم است. این امر نتیجه وجود نانولوله کربنی در نمونه‌های نانوکامپوزیتی است، که پس از تشکیل ترک در اثر اعمال تنش همانند میلگردهای فلزی در بستر بتن ایفای نقش کرده است. در واقع پس از ایجاد ترک نانولوله‌ها همانند پلی روی ترک‌ها را پوشانده‌اند و از هم گسیختگی و رشد و توسعه ترک در نمونه‌های نانوکامپوزیتی محدود گردیده است.

شکل ۴- الف، تصویر SEM نمونه بتنی فاقد نانولوله کربنی (PC) با بزرگنمایی ۱۵۰۰۰ برابر حاصل از آزمون فشاری است. در این عکس عرض ترک آنقدر زیاد است که امکان بزرگنمایی بیشتر از ۱۵۰۰۰ وجود ندارد. یعنی با بزرگنمایی بیشتر، تصویر فقط محدوده داخل ترک را نمایش می‌دهد.

در این نمونه پس از ایجاد ترک، عاملی برای کنترل و جلوگیری از رشد ترک وجود نداشته است. به همین دلیل ترک در این نمونه به راحتی رشد یافته و عرض آن به سرعت افزایش یافته است.

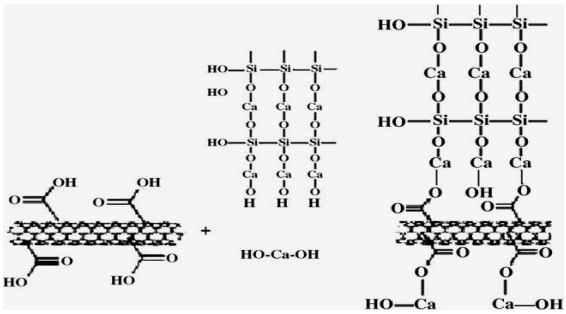


شکل ۴: عکس SEM نمونه‌های بتنی الف) نمونه PC با بزرگنمایی ۱۵۰۰۰، ب) نمونه PCNT-1 با بزرگنمایی ۳۵۰۰۰ و ج) نمونه PCNT-2 با بزرگنمایی ۳۵۰۰۰.

شـــکل ۴- ب و ۴- ج، بـــه ترتیـــب، تصـــویرهای SEM نمونه‌های نانوکامپوزیت بتنـی دارای ۰/۰۱ و ۰/۰۲ درصـد وزنی نانولوله کربنی (PCNT-1 و PCNT-2) با بزرگنمـایی ۳۵۰۰۰ حاصل از آزمون فشاری را نشان مـی‌دهـد. امکـان بررسی این نمونه در بزرگنمایی ۳۵۰۰۰ نسـبت بـه نمونـه PC و مشاهده تعدادی نانولوله در دیواره‌های تـرک، تاییـد کننده این امر است که نانولوله موجود در بستر بتن، اجازه رشد و گسترش ترک را نداده است و هماننـد میلگردهـای درهم تنیده در بستر بتن پراکنده شـده اسـت و از توسـعه بیشتر ترک، جلوگیری نموده است.

بهبود میکروساختار کامپوزیت بتنی و کاهش رشد و توسعه ترک در نمونه‌های کامپوزیتی نسبت به نمونه فاقد نانولولـه کربنی، ناشی از واکنش میان گـروه عـاملی کربوکسـیلیک نانولوله کربنی و اجزای سیمان است که در شکل ۵ نشـان داده شده است.

نانولوله کربنی با ایجاد پیوند بـا اجـزای خمیـر سـیمان در بستر بتن، سبب کاهش تعداد ترک و کاهش رشد ترک در نمونه‌هـای دارای نانولولـه کربنـی نسـبت بـه نمونـه فاقـد نانولوله کربنی می‌شـود. بـه دلیـل واکـنش میـان نانولولـه کربنی و اجزای سیمان، پس از تشـکیل تـرک، نانولولـه‌هـا همانند پلی روی ترک‌ها را پوشانده و در اثر اعمال تنش به صورت الاستیک عمل نموده و با اتلاف انرژی به کل سـطح درگیر، از گسترش عرض ترک جلوگیری می‌نمایند.



شکل ۵: روند واکنش گروه عاملی کربوکسیلیک نانولوله کربنی با اجزای تشکیل دهنده سیمان [۷].

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر حضور نانولوله کربنـی اصـلاح شـده بـا عامل کربوکسیلیک در بتن (به منظـور ایجـاد پیونـد بهتـر نانولوله با سـطح بـتن) و تـاثیر آن بـر خـواص مکـانیکی و میکروساختار نانوکامپوزیت بتنـی حاصـل مـورد مطالعـه و بررسی قرار گرفته است.

افزودن نانولوله‌های کربنی بـه بـتن، سـبب افـزایش قابـل ملاحظه مقاومت فشاری و خمشی آن می‌شود. بـه طـوری که مقاومـت فشـاری کامپوزیـت بتنـی در حضـور نانولولـه کربنی بیش از ۳۰ درصد و مقاومت خمشی آن بیش از ۱۳ درصد، نسبت به نمونه فاقد نانولوله کربنـی افـزایش یافتـه است. اضافه کردن نانولوله های کربنی بصورت پراکنده بـه کامپوزیت بتنی، خلل و فـرج کامپوزیـت بتنـی را کـاهش می‌دهد و باعث ایجاد کامپوزیت بتنی فشرده‌تر و پیوسته‌تر می‌گردد.

نانولوله کربنی اصلاح شده در ماتریس نانو کامپوزیت بتنی، با ایجاد سطح تماس بیشتر و در نتیجه سطح انتقال نیروی بیشتر، سبب پیوند بهتر نانولوله‌ها با ماتریس بتنی پیرامون آن می‌گـردد و از پیشـرفت نقـص‌هـا و شـکاف‌هـای تـوده جلوگیری می‌کند. این امر منجر به تقویـت قابـل ملاحظـه اسـتحکام فشـاری و خمشـی کامپوزیـت بتنـی مـی‌شـود. نانولوله‌ها درون ماتریس بتن، روی حفـره‌هـا و تـرک‌هـا را همانند پلهایی می‌پوشانند و با انتقال نیرو از یک سوی این حفره‌ها و ترک‌ها به سوی دیگر آن، از رشد آنها جلـوگیری می‌کنند. با این کار انتقال بار اطـراف تـرک‌هـا و حفـره‌هـا بهبود می‌یابد و بتن نانوکامپوزیتی حاصل، دارای اسـتحکام بسیار بالایی نسبت به نمونه بتن معمولی خواهد بود.

مراجع

[1] N. Grobert, *Materials Today*, **10**, 2007, 28.

[2] S. Iijima, *Nature*, **354**, 1991, 56.

[3] J.P. Salvetat, J.M. Bonard, N.H. Thomson, A.J. Kulik, L. Forro, *Applied Physics A*, **69**, 1999, 255.

[4] E.W. Wong, C.M. Lieber, *Science*, **22**, 1997, 161.

[5] M.F. Yu, O. Lourie, M.J. Dyer, K. Moloni, T.F. Kelly, R.S. Ruoff, *Science*, **287**, 2000, 637.

[6] D.A. Walters, L.M. Ericson, M.J. Casavant, J. Liu, D.T. Colbert, K.A. Smith, *Applied Physics Letters*, **74**, 1999, 3803.

[7] Y.L. Geng, Z. Xiaohua, *Carbon*, **43**, 2005, 1239.

[8] S. Musso, J.M. Tulliani, G. Ferro, A. Tagliaferro, *Composites Science and Technology*, **69**, 2009, 1985.

[9] S. Wanson, N.J. Kidner, L.Y. Woo, T.O. Mason, *Cement and Concrete Compositions*, **28**, 2006, 509.

[۱۰] مهدی حبیب‌نژاد کورایم، حامد شریعتی نیاسر، "نانولولـه هـای کربنـی (سـنتز، خواص و کاربرد ها)" ، انتشارات جهان نو- اتحاد، ۱۳۸۶، ص ۶۷- ۱۲.

[۱۱] اکبر گزمه، یوسف محمدی، مسعود سلیمانی، "تکنولوژی نانولولـه هـای کربنـی (تولید، تخلیص، عاملی سازی، کاربردهـا)"، انتشـارات اندیشـه ظهـور، ۱۳۸۵، ص ۱۶۶- ۱۶۵.

[12] A. Blaga, J.J. Beaudoin, "*Polymer Modified Concrete, Division of Building Research",* National Research Council Canada, Canadian Building Digest, 241, Ottawa, 1985.

[13] V. Gupta, N. Miura, *J. of Power Sources*, **157**, 2006, 616.

[14] Y.C. Ke, P. Stroeve, "*Polymer-layered silicate and silica nanocomposites",* Elsevier, Amsterdam, 2005.