

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 آزاد 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.

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

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

* عهده‌دار مکاتبات: ابوالفضل محبی

نشانی: شیراز، داراب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد داراب، گروه مهندس صنایع پلیمر

تلفن: ۰۷۲۳-۶۲۳۳۹۹۱-۴، دورنگار: ۰۷۲۳-۶۲۳۳۹۰۰، پست الکترونیکی: mohebbi@iaudarab.ac.ir

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 می یابد یا مونت موری لونیت اصلاح شده آلی محکم تر 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 می شود.

۲- فعالیت های تجربی

۲-۱- مواد

در این تحقیق از سیمان تیپ ۱-۵۲۵ شرکت سیمان فارس نو مطابق با مشخصات شیمیایی ارائه شده در جدول ۱، ماسه دانه بندی مطابق با استاندارد DEN196-1 آلمان، نانولوله کربنی چند دیواره دارای گروه های 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 مخلوط کن Toni Technik مدل 6210MSW ساخت کشور آلمان، قالب شامل سه خانه فولادی با ابعاد مقطع ۴۰×۴۰ میلی متر و طول ۱۶۰ میلی متر، دستگاه ضربه زن 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 اندازه گیری مقاومت فشاری و خمشی نمونه ها، حوضچه آب جهت نگهداری نمونه ها در آب و دمای ۲۰ درجه سانتیگراد (ISIRI 393، ISIRI 391) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل VEGA\TESCAN جهت بررسی میکروساختار نمونه ها استفاده شده است.

در صورتی که نانولوله ها در بستر بتن به صورت یکنواخت پراکنده شوند، ویژگی های مکانیکی بتن به طور قابل

ویژه آنها تنها ۱/۶ فولاد است [۴]. گرچه استحکام و دیگر خواص نانولوله ها به قطر، کیرالیتی (چگونگی رول شدن صفحات گرافیت و تبدیل به نانولوله شدن) و تک دیواره یا چند دیواره بودن نانولوله ها بستگی دارد، اما استحکام نهایی آنها بیش از ۶۰ GPa و کرنش نهایی شکست آنها ۶٪ گزارش شده است [۵،۶]. نانولوله های کربنی مستحکم ترین الیافی است که شناسایی شده است و ضریب هدایت حرارتی و رسانایی الکتریکی استثنایی دارد [۷]. آنها به شدت انعطاف پذیر هستند، بطوری که قابلیت خم شدن به شکل دایره و یا حتی گره خوردن را دارند [۸]. مزیت اصلی استفاده از نانولوله ها در کامپوزیت ها، افزایش سختی کامپوزیت در اثر جذب انرژی است که آن نیز به دلیل رفتار الاستیک و انعطاف پذیر نانولوله ها است. دانسیته کم و کارایی بهتر در طول بارگذاری فشاری، از خواص دیگر نانولوله ها است [۹]. به علت ویژگی های منحصر بفرد فیزیکی و شیمیایی، دارای جذابیت های صنعتی و علمی زیادی هستند و دارای وسعت کاربرد بالایی از محدوده های محصولات روزمره زندگی تا کاربردهای در مقیاس نانو در تولید نانوکامپوزیت ها هستند.

نانولوله های کربنی به علت نسبت هندسی بسیار بالا (نسبت طول به قطر) از حدود ۳۰ تا چند هزار، خواص مکانیکی بالایی را نشان می دهند و سبب تولید یک سیمان تقویت شده و انعطاف پذیر می شوند. این امر در مقایسه با سیمان های تقویت شده با الیاف های 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، ضربه پذیری و کرنش بتن را به مقدار قابل توجهی در درازمدت افزایش می دهد [۱۱]. بکار بردن نانومواد در تولید سیمان و بتن می تواند 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 می گذارد [۱۳]. یافته های آنها نشان می دهد که کاهش اندازه ذرات موجب قوام و سفت شوندگی سریع سیمان ناشی از نیروهای الکترواستاتیک

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 ۱-۵۲۵، اختلاط مخلوط به مدت ۳۰ ثانیه با سرعت کم (حرکت چرخشی: 140 ± 5 rpm و حرکت مداری: 62 ± 5 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: 285 ± 10 rpm و حرکت مداری: 125 ± 10 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 $1/2$ 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).

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 استفاده 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 ₂ O	۰/۱۶
K ₂ O	۰/۱۸۶
SO ₃	۲/۷۶
MgO	۱/۵۶
CaO	۶۳/۷۵
Fe ₂ O ₃	۲/۴۵
Al ₂ O ₃	۵/۷۴
SiO ₂	۲۰/۳۴

جدول ۲: خواص نانولوله‌های کربنی (پژوهشگاه صنعت نفت).

مشخصه	مقدار
قطر خارجی	۱۰ - ۲۰ nm
طول	۱۰ μ m
درصد خاکستر	۰/۲ %
خلوص	۹۵ %
سطح ویژه	۲۵۰ - ۲۸۰ m ² /g
کربن آمورف	۳ %

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

۲-۳- دستگاه‌های شناسایی و ارزیابی

برای تعیین مقاومت خمشی، از دستگاه بارگذاری سه نقطه‌ای استفاده شد. نیرو به صورت عمودی با سرعت 10 ± 5 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 فشاری روی نیمه‌های نمونه شکسته شده حاصل از آزمون مقاومت خمشی انجام می‌شود. در این آزمون، نیرو با سرعت 20 ± 240 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).

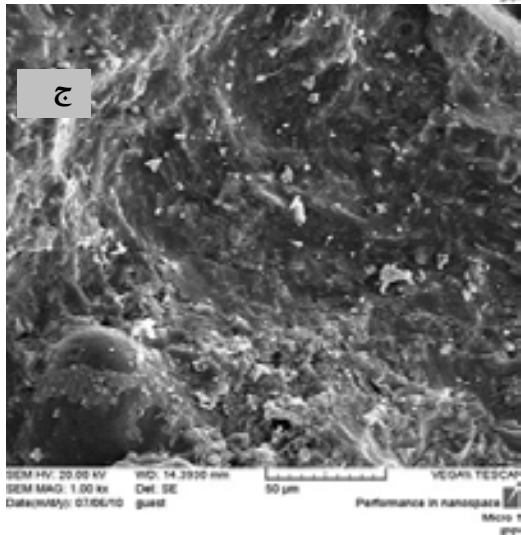
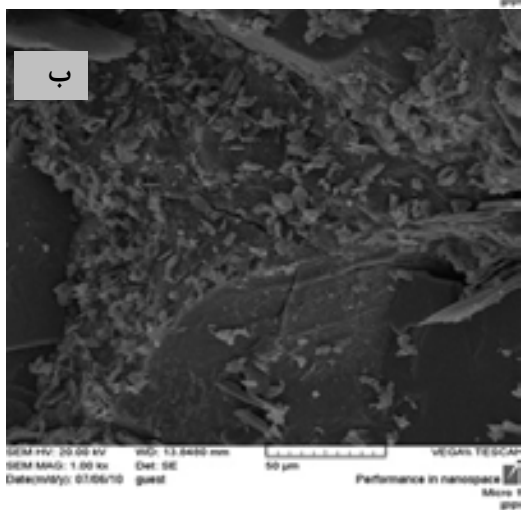
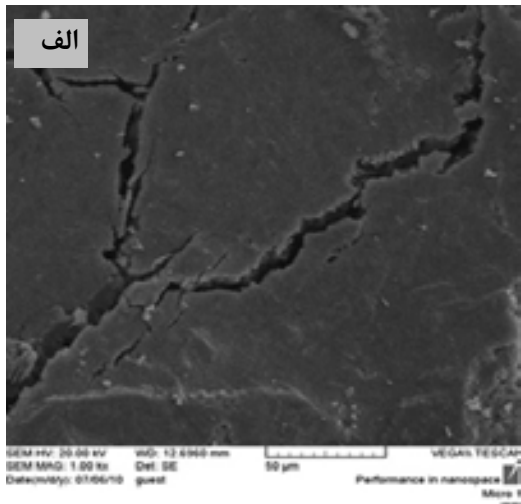
با توجه به داده‌های جدول ۳، مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری و خمشی نهایی (۲۸ روزه) نمونه PC به ترتیب $51/40$ و $7/94$ مگاپاسکال، مقاومت فشاری و خمشی نهایی نمونه PCNT-1 به ترتیب $58/10$ و $8/29$ مگاپاسکال است. این مقادیر برای نمونه PCNT-2 به ترتیب $67/23$ و $9/02$ است. بررسی مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌ها 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 $12/58$ درصد و مقاومت خمشی ۲، ۷ و ۲۸ روزه نمونه PCNT-1 نسبت به نمونه PC به ترتیب $2/50$ ، $5/77$ و $8/29$ درصد افزایش یافته است.

همچنین مقاومت فشاری ۲، ۷ و ۲۸ روزه نمونه PCNT-2 نسبت به نمونه PC (نمونه شاهد) به ترتیب $32/45$ ، $31/10$ و $30/81$ درصد و مقاومت خمشی ۲، ۷ و ۲۸ روزه نمونه PCNT-2 نسبت به نمونه PC به ترتیب $14/30$ ، $14/46$ و $13/63$ درصد افزایش یافته است.

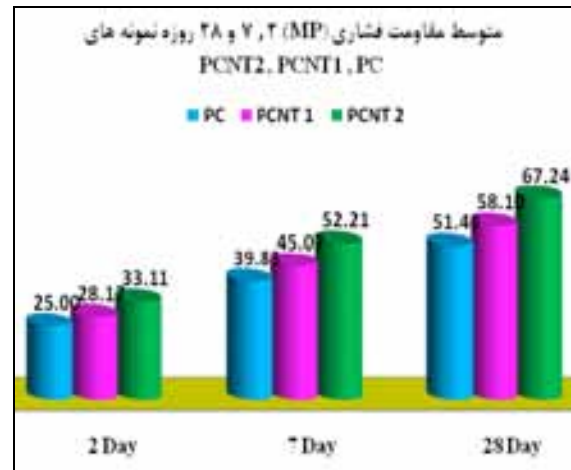
جدول ۳: متوسط مقاومت فشاری و خمشی ۲، ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌ها.

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 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



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



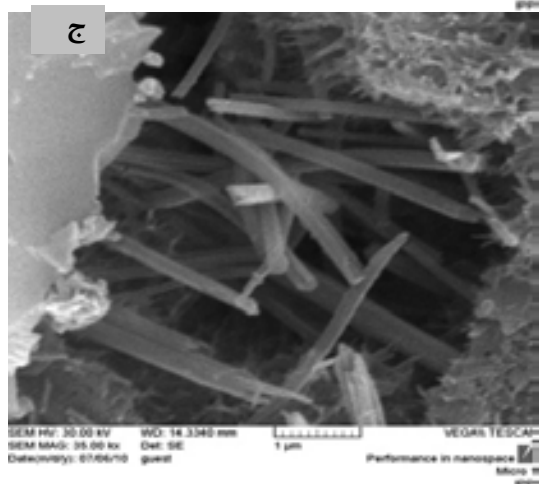
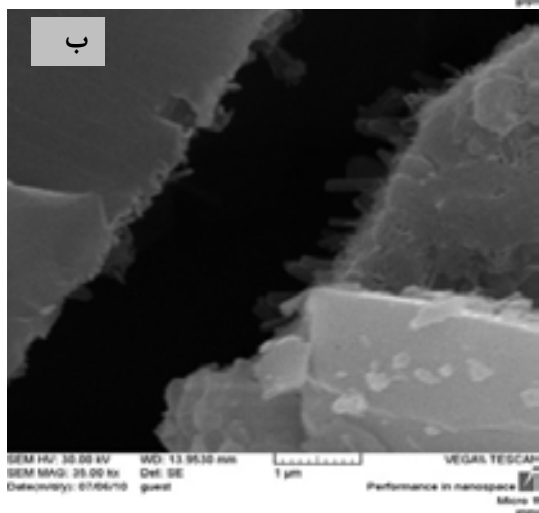
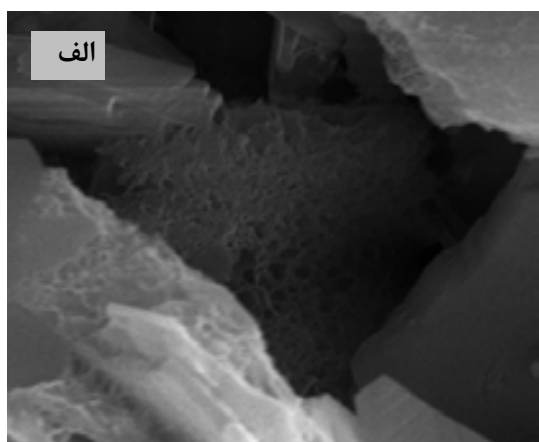
شکل ۲: متوسط مقاومت خمشی ۲، ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های کامپوزیت بتنی نسبت به نمونه شاهد.

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.

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.

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، تصاویرهای 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 چندان نا داشته 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

میکروساختار نانوکامپوزیت بتنی حاصل مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.

افزودن نانولوله‌های کربنی به بتن، سبب افزایش قابل ملاحظه مقاومت فشاری و خمشی آن می‌شود. به طوری که مقاومت فشاری کامپوزیت بتنی در حضور نانولوله کربنی بیش از ۳۰ درصد و مقاومت خمشی آن بیش از ۱۳ درصد، نسبت به نمونه فاقد نانولوله کربنی افزایش یافته است. اضافه کردن نانولوله‌های کربنی بصورت پراکنده به کامپوزیت بتنی، خلل و فرج کامپوزیت بتنی را کاهش 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 می‌گردد و از پیشرفت نقص‌ها و شکاف‌های توده جلوگیری می‌کند. این امر منجر به تقویت قابل ملاحظه استحکام فشاری و خمشی کامپوزیت بتنی می‌شود. نانولوله‌ها درون ماتریس بتن، روی حفره‌ها و ترک‌ها را همانند پلهایی می‌پوشانند و با انتقال نیرو از یک سوی این حفره‌ها و ترک‌ها به سوی دیگر آن، از رشد آنها جلوگیری می‌کنند. با این کار انتقال بار اطراف ترک‌ها و حفره‌ها بهبود می‌یابد و بتن نانوکامپوزیتی حاصل، دارای استحکام بسیار بالایی نسبت به نمونه بتن معمولی خواهد بود.

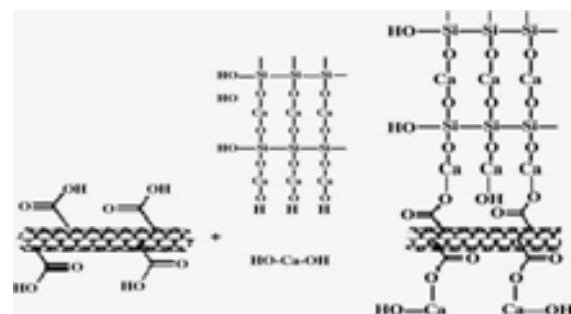
مراجع

- [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، "نانولوله‌های کربنی (سنتر)، خواص و کاربرد ها"، انتشارات جهان نو- اتحاد، ۱۳۸۶، ص ۶۷-۱۲.
- [۱۱] اکبر گزمه، یوسف محمدی، مسعود سلیمانی، "تکنولوژی نانولوله‌های کربنی (تولید، تخلیص، عملی سازی، کاربردها)", انتشارات اندیشه ظهور، ۱۳۸۵، ص ۱۶۶-۱۶۵.

شکل ۴- ب و ۴- 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 ۳۵۰۰۰ حاصل از آزمون فشاری را نشان می‌دهد. امکان بررسی این نمونه در بزرگنمایی ۳۵۰۰۰ نسبت به نمونه PC و مشاهده تعدادی نانولوله در دیواره‌های ترک، تایید کننده این امر است که نانولوله موجود در بستر بتن، اجازه رشد و گسترش ترک را نداده است و همانند میلگردهای درهم تنیده در بستر بتن پراکنده شده است و از توسعه بیشتر ترک، جلوگیری نموده است.

بهبود میکروساختار کامپوزیت بتنی و کاهش رشد و توسعه ترک در نمونه‌های کامپوزیتی نسبت به نمونه فاقد نانولوله کربنی، ناشی از واکنش میان گروه عاملی کربوکسیلیک نانولوله کربنی و اجزای سیمان است که در شکل ۵ نشان داده شده است.

نانولوله کربنی با ایجاد پیوند با اجزای خمیر سیمان در بستر بتن، سبب کاهش تعداد ترک و کاهش رشد ترک در نمونه‌های دارای نانولوله کربنی نسبت به نمونه فاقد نانولوله کربنی می‌شود. به دلیل واکنش میان نانولوله کربنی و اجزای سیمان، پس از تشکیل ترک، نانولوله‌ها همانند پلی روی ترک‌ها را پوشانده و در اثر اعمال تنش به صورت الاستیک عمل نموده و با اتلاف انرژی به کل سطح 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 کربنی اصلاح شده با عامل کربوکسیلیک در بتن (به منظور ایجاد پیوند بهتر نانولوله با سطح بتن) و تاثیر آن بر خواص مکانیکی و

[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.

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