

بهینه‌سازی خواص جذب امواج الکترومغناطیسی کامپوزیت سیمان و نانولوله‌های کربنی چندجداره کربوکسیل با اتصال کوتاه و بار تطبیق شده موجبر

مهسا فخرپور^{۱*}، رضا کریمی^۲

۱- استادیار، گروه فیزیک، واحد میبد، دانشگاه آزاد اسلامی، میبد، ایران

۲ - کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، واحد میبد، دانشگاه آزاد اسلامی، میبد، ایران

* mahsa.fakharpour@maybodiau.ac.ir

تاریخ پذیرش ۹۹/۰۶/۲۶

تاریخ دریافت ۹۹/۰۱/۲۷

چکیده

پژوهش‌های فراوانی در جذب و محافظت در برابر امواج الکترومغناطیسی، به منظور کاهش آثار مضر تابش الکترومغناطیسی بر محیط زیست انجام شده است. برای جلوگیری از نفوذ امواج الکترومغناطیسی محافظه‌هایی با رسانندگی بالا استفاده می‌شود. یک روش مناسب و مفید برای دستیابی به مواد محافظتی در برابر امواج الکترومغناطیسی، افزودن مواد کربنی رسانا شامل الیاف کربن، رشته‌های کربنی و نانولوله‌های کربنی است. نانولوله‌های کربنی به دلیل داشتن ساختارهای لوله‌ای شکل دو بعدی و رسانایی بالا می‌توانند به آسانی شبکه رسانایی را درون زمینه یک ماده تشکیل دهند و همین امر باعث می‌شود که محیط، تراوایی الکتریکی بالایی داشته باشد. بنابراین، افزایش تلفات دی‌الکتریک منجر به تلفات بازتاب امواج الکترومغناطیسی می‌شود. پس حضور نانولوله‌های کربنی در ماده جاذب باعث بهبود خواص جذب امواج الکترومغناطیسی می‌شود.

در این پژوهش خواص جذب امواج الکترومغناطیسی کامپوزیت سیمان و نانولوله‌های چندجداره عاملدار کربوکسیل با اشکال مختلف کایرال، زیگزاگ و آرمچیر با دو روش اتصال کوتاه موجبر و بار موجبری مقایسه شده مطالعه می‌شود. تأثیر شکل MWCNT و ضخامت نمونه روی خواص جذب موج الکترومغناطیسی در رنج فرکانسی ۸-۱۲ GHz با روش اتصال کوتاه موجبر و بار موجبری مقایسه شده مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. نمونه‌ها در دو ضخامت ۶ mm و ۳ mm تهیه و مقدار نانولوله اضافه شده ۰/۱ wt% است. اضافه کردن ۰/۱ wt% نانولوله، عملکرد جذب ملات سیمان را در رنج فرکانسی ۸-۱۰ GHz افزایش می‌دهد. با افزایش ضخامت از ۳ mm به ۶ mm، پهنای باند فرکانس اتلاف بازتاب برای کامپوزیت‌های MWCNT / سیمان افزایش می‌یابد، اما تعداد قله‌ها کاهش می‌یابد. با مقایسه جذب امواج نمونه‌ها با دو روش مختلف فهمیده می‌شود که جذب امواج نمونه‌های با ضخامت ۳ mm با روش بار تطبیقی بهتر از روش اتصال کوتاه بدون استفاده از بار تطبیقی است. در حالی که در نمونه‌های با ضخامت ۶ mm چندان تفاوتی حاصل نمی‌شود. همچنین در روش اتصال کوتاه جذب امواج توسط نمونه‌های کامپوزیت با ضخامت ۳ mm در فرکانس‌های کمتر از ۱۰/۵ GHz بهتر عمل کرده است، در حالی که در روش بار تطبیقی در فرکانس‌های بیشتر از ۱۰/۵ GHz، نمونه‌های کامپوزیت جذب بهتری داشته‌اند. علاوه بر آن، جذب امواج نمونه‌های کامپوزیت با ضخامت ۶ mm با روش اتصال کوتاه در فرکانس‌های کمتر و با روش بار تطبیقی در فرکانس‌های بیشتر نتایج بهتری را نشان می‌دهد. علاوه بر این، رفتار جذب نمونه کایرال با ضخامت ۶ mm با دو نمونه دیگر متفاوت است، زیرا نانولوله‌های کایرال نامتقارن و نانولوله‌های زیگزاگ و آرمچیر متقارن هستند. تجزیه و تحلیل ساختاری و مورفولوژی سطح کامپوزیت‌های سیمان / MWCNT با اشکال مختلف با استفاده از روش میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بررسی شده است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی کامپوزیت سیمان/ نانولوله چندجداره عاملدار کربوکسیل پراکندگی نانولوله‌ها در کامپوزیت را نشان می‌دهد. اتصال نانولوله‌ها به یکدیگر و سیمان منجر به کاهش حفره‌ها و تشکیل شبکه رسانای منطقه‌ای می‌شود. در نتیجه هدایت الکتریکی افزایش یافته و میدان الکترومغناطیسی در این شبکه تضعیف می‌شود.

واژگان کلیدی: نانولوله کربنی چند جداره عاملدار کربوکسیل، کامپوزیت سیمان، اتصال کوتاه، بار تطبیقی.

۱- مقدمه

در حال حاضر، وسایل الکتریکی مانند سیستم‌های مخابراتی، رایانه، تلفن‌های همراه و دیگر محصولات الکترونیکی به طور گسترده در تمام دنیا استفاده می‌شود. این ابزار می‌توانند امواج الکترومغناطیسی ایجاد کنند که بر طول عمر و همچنین سلامتی انسان، تأثیر منفی بگذارد و موجب افزایش بیماری‌ها [1] و حتی انتشار اطلاعات محرمانه و مختصات مکانی [2, 3] و سایر مشکلات دیگر شود. بنابراین، پژوهش‌های فراوانی به ویژه در جذب و محافظت در برابر امواج الکترومغناطیسی [4, 5]، به منظور کاهش آثار مضر تابش الکترومغناطیسی بر محیط زیست [6] انجام شده است. برای جلوگیری از نفوذ امواج الکترومغناطیس باید محافظ‌هایی تهیه شود. برای ساخت محافظ‌ها از موادی با رسانندگی بالا استفاده می‌شود. میدان الکتریکی اعمال‌شده بر سطح یک جاذب یا رسانای ایده‌آل، منجر به ایجاد یک جریان می‌شود، که این جریان باعث جابه‌جایی بار در داخل رسانا و خنثی شدن میدان الکتریکی اعمالی در داخل جاذب می‌شود. به همین ترتیب، میدان مغناطیسی نوسانی منجر به تولید جریان گردابی می‌شود، این جریان اقدام به خنثی نمودن میدان الکتریکی اعمال شده می‌نماید [7]. با این حال، این روش در عمل امواج الکترومغناطیسی را تضعیف یا حذف نمی‌کند [8]. یک روش مناسب و مفید برای دستیابی به مواد محافظتی در برابر امواج، افزودن مواد کربنی رسانا شامل دوده، الیاف کربن، رشته‌های کربنی و نانولوله‌های کربنی است. نانولوله‌های کربنی به دلیل داشتن ساختارهای لوله‌ای شکل دو بعدی و رسانایی بالا می‌توانند به آسانی شبکه رسانایی را درون زمینه یک ماده تشکیل دهند و همین امر باعث می‌شود که محیط، تراوایی الکتریکی بالایی داشته باشد. بنابراین، افزایش تلفات دی‌الکتریک منجر به تلفات بازتاب موج الکترومغناطیس می‌شود. بنابراین حضور نانولوله‌های کربنی در ماده جاذب باعث بهبود خواص جذب امواج مایکروویو می‌شود.

از آنجا که سیمان در سرتاسر دنیا در ساخت و ساز مهندسی استفاده می‌شود، اما خواص محافظتی امواج الکترومغناطیس سیمان ضعیف است و برخی از امواج الکترومغناطیسی را می‌تواند از طریق افزودنی‌های رسانا، جذب کند [8]. بنابراین، مواد

کربنی مانند گرافیت [9] نانولوله‌های کربنی [10-14]، فیبرهای کربنی [15] نقش کلیدی در مقدار محافظت امواج بازی می‌کنند. به همین منظور در سال‌های اخیر پژوهش‌های قابل توجهی در مورد جذب امواج الکترومغناطیسی توسط مواد جاذب انجام شده است.

نام و همکارانش [14] تأثیر حفاظتی در برابر انتشار امواج الکترومغناطیس برای کامپوزیت سیمان و نانولوله چندجداره (MWCNT) بررسی کردند. مؤثرترین عملکرد محافظتی در برابر امواج، در محدوده فرکانس ۰/۱ تا ۱۸ گیگاهرتز با ۱/۵ درصد وزنی نانولوله‌های چندجداره به دست آمد. علاوه بر این، آنها از سیلیکا ژل استفاده کردند تا نانولوله‌های چندجداره را پراکنده کنند. در نتیجه ماتریس سیمان با ۶۰ درصد وزنی نانولوله‌های چندجداره و ۲۰ درصد وزنی سیلیکا ژل بهترین اثر محافظتی در برابر امواج الکترومغناطیس در کل محدوده فرکانسی را نشان داد [14]. آنها در پژوهش اخیر [16]، جاذب‌های امواج الکترومغناطیسی متشکل از کامپوزیت سیمان و نانولوله‌های کربنی چندجداره با درصدهای مختلف فوم سیلیکا تهیه کردند و نشان دادند که با افزودن ۱۰ درصد وزنی فوم سیلیکا به مواد، بیشترین جذب امواج الکترومغناطیسی حاصل می‌شود.

سینگ و همکارانش [17] نانولوله‌های چندجداره را به عنوان پرکننده در ماتریس سیمان پورتلند استفاده کردند و خواص کامپوزیت و کاربردهای محافظتی در برابر امواج الکترومغناطیس را تحقیق کردند. افزودن نانولوله چندجداره در ماتریس سیمان، کامپوزیت جدیدی را ایجاد کرد که خواص جذب امواج مایکروویو خوبی را نشان داد. این مقدار به شدت به کسر حجمی نانولوله چندجداره در ماتریس سیمان بستگی دارد.

به تازگی زانگ و همکارانش [18] اثر مقدار و نوع نانولوله‌های کربنی چندجداره روی جذب امواج الکترومغناطیس کامپوزیت‌های سیمانی بررسی کردند. با افزایش مقدار نانولوله‌های چندجداره و اندازه آنها خواص جذب بهبود می‌یابد. به علاوه، آنها نشان دادند که کامپوزیت سیمانی شامل ۰/۸ درصد وزنی نانولوله‌های عامل‌دار کربوکسیل با قطر بزرگتر، خاصیت جذب بهتری دارند و کمترین بازتاب آنها ۴/۳ برابر کامپوزیت

مختلف؛ کایرال، آرمچیر و زیگزاگ به سیمان ۰/۱ انتخاب شده است. همچنین برای مقایسه، نمونه شاهد تهیه شده است. نانولوله‌ها در آب و داخل دستگاه اولتراسوند (DS-3510DT) با فرکانس ۶۰ HZ در دمای اتاق به مدت یک ساعت پراکنده شده‌اند. پس از آن دوباره ترکیب وزن شده و ترکیب حاصل را درون یک میکسر ریخته، سیمان و مقدار آب کاهش یافته، افزوده می‌شود. ترکیب به آرامی به مدت ۵ دقیقه بهم زده می‌شود تا ترکیب یکنواختی حاصل شود. ترکیب نهایی داخل قالب‌های شیشه‌ای چرب شده که مطابق ابعاد موجر $23 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ و ضخامت‌های مختلف ۳ mm و ۶ mm تهیه شده‌اند ریخته می‌شود. پس از ۱۲ ساعت نگهداری نمونه‌ها در اتاق مرطوب، آنها را از قالب‌ها جدا کرده و به مدت ۷ روز قبل از انجام تست اندازه‌گیری‌های جذب، در ظرف محتوی آب با دمای ۲۵ درجه سانتیگراد نگهداری شده است. شکل (۱) قالب‌های ساخته شده با شیشه، نمونه‌های شاهد و کامپوزیت سیمان / نانولوله‌های عاملدار کربوکسیل با اشکال مختلف کایرال، آرمچیر و زیگزاگ را نشان می‌دهد. طبق داده‌های به دست آمده از پیمتا و همکارانش [19]، ۷۰٪ مقاومت فشاری مواد با ماتریس سیمانی در ده روز اول نگهداری افزایش می‌یابد. اما خواص الکتریکی و الکترومغناطیسی مواد با پایه سیمانی چندان تغییری نمی‌کند.

۳- بحث و نتایج

۳-۱- میزان بازتاب امواج با مدار اتصال کوتاه موجر و با بار موجبری مقایسه شده

به منظور اندازه‌گیری تأثیر نانولوله‌های کربنی چندجداره کربنی عاملدار کربوکسیل بر جذب امواج الکترومغناطیسی در بتن از دستگاه تحلیل‌گر شبکه برداری استفاده می‌شود. میزان اتلاف بازتاب امواج الکترومغناطیسی نمونه‌های تهیه شده با استفاده از دو نوع اتصال انتهایی موجبری در مدار به دست آمده است.

سیمانی بدون نانولوله است. همچنین بیشترین ضریب حفاظتی امواج الکترومغناطیسی کامپوزیت‌های سیمانی با ۰/۸ درصد وزنی نانولوله چندجداره با قطر و طول بزرگتر، ۲۷٪ بیشتر از نمونه شاهد است.

بسته به پیچش نانولوله‌ها، اشکال هندسی مختلف نانولوله‌ها شامل کایرال، زیگزاگ و آرمچیر تشکیل می‌شود. اما تاکنون پژوهشی روی تأثیر شکل هندسی نانو ساختارها در خواص جذب امواج آنها صورت نگرفته است. در این پژوهش، از نانولوله‌های چندجداره عاملدار کربوکسیل با ۰/۱ درصد وزنی استفاده شده است و تأثیر شکل هندسی نانولوله‌های چندجداره روی خواص جذب امواج الکترومغناطیسی با استفاده از اتصال کوتاه موجر و بار موجبری تطبیقی بررسی شده است.

۲- مطالعات آزمایشگاهی

۲-۱- مواد استفاده شده

سیمان استفاده شده در این پژوهش از نوع سیمان پرتلند نوع ۲ است و مشخصات ترکیبات شیمیایی آن در جدول (۱) آورده شده است. نانولوله‌های چندجداره عاملدار کربوکسیل با اشکال مختلف توسط شرکت پیشگامان نانومواد ایران (شرکت پیشگامان نانومواد ایرانیان، مشهد) تهیه شده است. پارامترهای فیزیکی و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) آنها در جدول (۲) نشان داده شده است. آب استفاده شده برای ترکیب و نگهداری کامپوزیت سیمان/ نانولوله چندجداره عاملدار کربوکسیل از نوع آب دی‌یونیزه است.

جدول ۱. ترکیبات شیمیایی سیمان پرتلند

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	LOI
20.7	5.0	3.3	63.5	2.0	2.9	0.1	0.7	1.6

Table 1. Chemical composition of Portland cement

۲-۲- تهیه نمونه

نسبت وزنی آب به سیمان برای همه نمونه‌ها ۰/۴:۱ و نسبت وزنی نانولوله‌های چندجداره عاملدار کربوکسیل با اشکال

جدول ۲. پارامترهای فیزیکی نانولوله‌های چندجداره عاملدار کربوکسیل

Products	Purity (%)	Outside diameter (nm)	Inside diameter (nm)	Length (μm)	Special surface area (m^2/g)	Density (g/cm^3)	- COOH (wt %)
MWNTs -COOH	> 97	20-30	5-10	10-30	> 110	~ 2.1	1.23

Table 2. The physical parameters of carboxyl functionalized multi-walled carbon nanotubes

شکل ۱. الف) نمونه‌های شاهد و کامپوزیت سیمان/ نانولوله‌های مختلف با ضخامت‌های ۳ mm و ۶ mm (ب) قالب‌های شیشه‌ای استفاده شده (الف)



(ب)

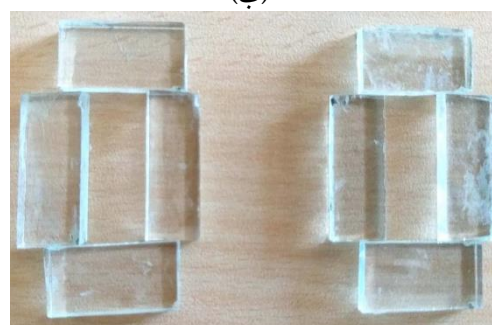
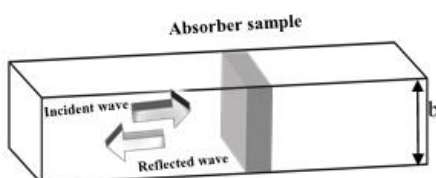


Fig. 1. a) The samples of control and different cement / nanotubes composite with thicknesses of 3 and 6 mm b) used glass molds.

در شکل (۳- الف) برای نمونه‌های با ضخامت ۳ mm، نمودار به دو بخش کمتر و بیشتر از فرکانس ۱۰/۵ GHz تقسیم بندی می‌شود. قبل از فرکانس ۱۰/۵ GHz نمونه‌های کامپوزیت

شکل ۲. الف) نمونه قرار گرفته در موجبر اتصال کوتاه شده (ب) بار موجبر تطبیقی و نمونه قرار گرفته در موجبر

(الف)



(ب)

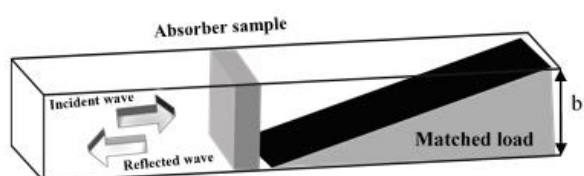


Fig. 2. a) Specimen located in short circuit waveguide b) Matched load of waveguide and sample set in waveguide.

سیمان و نانولوله اتلاف بازتاب بیشتر و در نتیجه جذب بیشتری نسبت به نمونه شاهد دارند، در حالی که پس از فرکانس ۱۰/۵ GHz این نسبت عکس می‌شود، طوری که در فرکانس حوالی ۱۱/۹ GHz اتلاف بازتاب نمونه شاهد از بقیه نمونه‌ها بیشتر است.

در فرکانس‌های ۱۱/۹ GHz، ۹/۳، ۹/۳ و ۸/۵ بیشترین اتلاف بازتاب در حدود ۲/۷، -۲/۷، -۲/۸ و -۳ به ترتیب برای نمونه‌های شاهد، زیگزاگ، کایرال و آرمچیر ایجاد شده است. از آنجا که پهنای باند نمونه‌ها زیاد است، بنابراین نمونه جاذب در بیشتر فرکانس‌ها، امواج را جذب می‌کند. وانگ و همکارانش [20] نیز با افزودن ۰/۱ درصد وزنی نانولوله‌های چندجداره به سیمان، قله‌هایی در حوالی ۱۱، ۹ و ۸/۵ GHz مشاهده کردند که نزدیک به قله‌های به دست آمده در پژوهش حاضر است. آنها همچنین نشان دادند که با افزایش فرکانس، اتلاف بازتاب کاهش می‌یابد.

با مقایسه نمونه‌های کامپوزیتی با نمونه شاهد مشاهده می‌شود که با افزودن نانولوله‌ها به سیمان مکان قله‌های جذب و

در اتصال اول، که قطعه جاذب بدون استفاده از بار موجبر تطبیقی اتصال کوتاه شده است و می‌تواند تمام قدرت تابشی رسیده به آن را بازتاب کند. تغییر فاز موج منعکس شده، به علت تغییر محل اتصال کوتاه باعث می‌شود که مقدار راکتانس این اتصال، تغییر نماید (شکل ۲-الف).

در اتصال دوم، بار موجبر تطبیقی که تشکیل شده از یک تیغه جاذب با ضخامت حدود ۲ میلی‌متر و ارتفاع b به اندازه دهانه موجبر که برای جلوگیری از بازتاب، به صورت شیبدار، بریده شده، در موجبر اتصال کوتاه شده است (شکل ۲-ب). این تیغه زمانی به صورت جاذب عمل می‌کند که صفحه آنها موازی با شدت میدان الکتریکی موج قرار گیرد.

نمونه‌های بتنی شاهد (بدون نانولوله) و کامپوزیت با اشکال مختلف (کایرال، آرمچیر و زیگزاگ) در ضخامت‌های ۳ mm و ۶ mm تهیه شده و سپس جذب امواج آنها با یکدیگر مقایسه می‌شود. شکل (۳- الف و ب) به ترتیب اتلاف بازتاب امواج الکترومغناطیس نمونه‌ها با ضخامت ۳ mm و ۶ mm با روش اتصال کوتاه موجبر با درصد وزنی ۰/۱٪ نانولوله و همچنین نمونه‌های شاهد را نشان می‌دهد.

تعداد آنها تغییر چندانی نخواهند داشت ولی نمونه کامپوزیت آرمچیر با ضخامت ۳ mm، نسبت به بقیه نمونه‌ها، اتلاف بازتاب بهتر و در نتیجه جذب بیشتری داشته است. بنابراین، جذب امواج الکترومغناطیس در کامپوزیت سیمان و نانولوله‌ها در محدوده فرکانسی ۱۰/۵-۸ GHz بیشتر از نمونه شاهد است. در نتیجه، قدرت جذب امواج در کامپوزیت سیمان و نانولوله‌ها در حدود ۷۵٪ از کل محدوده فرکانسی ۱۲-۸ GHz است.

در نمونه‌های با ضخامت ۶ mm (شکل ۳-ب) در حوالی فرکانس ۹/۱ GHz اتلاف بازتاب نمونه‌های کامپوزیت و شاهد عکس یکدیگر می‌شوند. به طوری که در فرکانس ۱۱/۳ GHz نمونه شاهد با اتلاف بازتاب ۳۱/۷ dB اما با پهنای کم، در فرکانس ۹/۳ GHz، نمونه زیگزاگ و آرمچیر با ۱۲/۴ dB و در فرکانس ۸/۴ GHz نمونه کایرال با ۱۰/۴ dB بیشترین اتلاف بازتاب را داشته‌اند. بنابراین، نانولوله‌ها تقریباً ۸۷٪ از فرکانس‌های محدوده ۱۲-۸ GHz را جذب می‌کنند.

با مقایسه دو نمودار ۳-الف و ب با ضخامت‌های ۳ mm و ۶ mm مشاهده می‌شود که نمودار اتلاف بازتاب برای ضخامت ۶ mm نوسانات کمتری داشته و با افزایش ضخامت، پهنای باند فرکانسی به ویژه برای کامپوزیت‌های نانولوله افزایش، اما تعداد قله‌های اتلاف کاهش یافته است. از طرف دیگر مکان بزرگترین قله اتلاف بازتاب برای نمونه آرمچیر با افزایش ضخامت، به سمت فرکانس‌های بالاتر و نمونه کایرال به سمت فرکانس‌های کمتر جابه‌جا شده است؛ اما نمونه زیگزاگ بدون تغییر باقی مانده است. همچنین با افزایش ضخامت از ۳ mm به ۶ mm، بیشینه تلفات بازتاب به شدت افزایش یافته است. همچنین زانگ و همکارانش [18] نشان دادند که افزایش ضخامت منجر به عملکرد بهتر جذب امواج الکترومغناطیسی می‌شود.

به نظر می‌رسد که کامپوزیت سیمان / نانولوله‌ها در فرکانس‌های کمتر از ۱۰ GHz توانایی جذب امواج الکترومغناطیس بهتری دارند که با تحقیقات انجام شده توسط وانگ و همکارانش مطابقت دارد [20].

شکل ۴ - الف و ب به ترتیب اتلاف بازتاب امواج الکترومغناطیس نمونه‌ها با ضخامت‌های ۳ و ۶ mm با روش بار موجبری تطبیق شده با درصد وزنی ۰/۱٪ نانولوله را نشان می‌دهد. همانند حالت قبل (اتصال کوتاه) در فرکانس GHz

۱۰/۵ برای نمونه‌های با ضخامت ۳ mm، اتلاف بازتاب نمونه‌های شاهد و کامپوزیت تقریباً معکوس می‌شود. قبل از ۱۰/۵ GHz نمونه‌های کامپوزیت سیمان و نانولوله اتلاف بازتاب کمتری نسبت به نمونه شاهد دارند، در حالی که پس از فرکانس ۱۰/۵ GHz با افزایش فرکانس اتلاف بازتاب نمونه‌های کامپوزیت نسبت به نمونه شاهد افزایش می‌یابد.

در فرکانس ۹/۱ GHz به ترتیب نمونه‌های شاهد، کامپوزیت زیگزاگ، کایرال و آرمچیر با اتلاف بازتاب ۵-، ۳/۹-، ۳/۳- و به همان ترتیب در فرکانس تقریبی ۱۰/۴ GHz اتلاف بازتاب ۱۱/۸ dB، ۱۰/۵-، ۶/۶- و ۶/۱- بیشترین اتلاف‌ها را داشته‌اند. در فرکانس ۱۱/۶ GHz نمونه‌های زیگزاگ، کایرال، آرمچیر و نمونه شاهد به ترتیب دارای اتلاف بازتاب ۱۲-، ۱۱/۳-، ۱۰/۳- و ۶/۵- است. با مقایسه نمونه‌های کامپوزیت با نمونه شاهد مشاهده می‌شود که با افزودن نانولوله‌ها به سیمان تعداد قله‌های بازتاب تغییری نداشته است، اما مکان قله‌های نمونه‌های کامپوزیت نسبت به نمونه شاهد به سمت فرکانس‌های بالاتر جابه‌جا شده است.

در ضخامت ۶ mm در محدوده فرکانسی ۹/۷ GHz نمودار اتلاف بازتاب به دو بخش تقسیم می‌شود. قبل از این فرکانس نمونه‌های کامپوزیت سیمان و نانولوله اتلاف بازتاب کمتری نسبت به نمونه شاهد دارند، در حالی که پس از آن نمودار اتلاف بازتاب نمونه شاهد نسبت به نمونه‌های کامپوزیت سیمان و نانولوله معکوس می‌شود و در فرکانس‌های بالاتر از ۹/۷ GHz مقدار اتلاف بازتاب برای نمونه‌های کامپوزیت افزایش می‌یابد. در فرکانس حوالی ۸/۵ GHz به ترتیب نمونه شاهد و کامپوزیت با اتلاف بازتاب ۹/۴ dB- و ۴/۴- و در فرکانس ۹/۴ GHz نمونه شاهد دارای اتلاف بازتاب ۷/۵ dB- و کایرال، زیگزاگ و آرمچیر به ترتیب ۶/۴ dB-، ۵/۲- و ۴/۵- می‌باشند. در فرکانس ۱۰/۷-۱۱ GHz نمونه کایرال بیشترین اتلاف بازتاب و بیشترین پهنای باند را دارد و ترتیب اتلاف بازتاب به صورت کایرال، زیگزاگ، آرمچیر و نمونه شاهد هستند. اما در فرکانس ۱۱/۸ GHz نمونه زیگزاگ بیشترین اتلاف بازتاب را دارد و به ترتیب زیگزاگ، آرمچیر، کایرال و نمونه شاهد دارای اتلاف بازتاب ۱۲/۱-، ۸/۹-، ۷/۴-، ۴/۸- است. اما تعداد قله‌ها تغییر چندانی نداشته است.

مطالعات گذشته نشان دادند که نانولوله‌های عاملدار خواص جذب بهتری نسبت به نانولوله‌های بدون عامل دارند [18].

۳-۲- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی کامپوزیت

سیمان/نانولوله‌های چند جداره کربنی عامل‌دار کربوکسیل

به دلیل خواص الکتریکی، ابعاد کوچک و مساحت ویژه سطحی بالای نانولوله‌های چندجداره، آنها می‌توانند پلاریزه شده و عملکرد جذب بهتری را داشته باشند.

نانولوله‌های چندجداره می‌توانند به عنوان دوقطبی‌های الکتریکی عمل کنند و هنگام تابش امواج الکترومغناطیسی پلاریزه شوند. در نتیجه جریانی را تولید کرده و انرژی الکترومغناطیسی را به گرما یا انرژی‌های دیگر تبدیل کنند [21]. شکل (۵) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه شاهد و سه نوع کامپوزیت سیمان/نانولوله چندجداره عامل‌دار کربوکسیل با اشکال مختلف کایرال، زیگزاگ و آرمچیر را نشان می‌دهد. در نمونه‌های کامپوزیت می‌توان مشاهده کرد که نانولوله‌ها به طور یکنواخت در ماتریس سیمان پراکنده شده‌اند. وقتی نانولوله‌ها نتوانند در هنگام ترکیب به طور یکنواخت در ماتریس پراکنده شوند و آگلومره شوند، خواص جذب توسط کامپوزیت کاهش می‌یابد. علاوه بر آن در تصاویر، نانولوله‌هایی با طول‌های بلند مشاهده می‌کنیم که حفره‌ها را پر کرده‌اند و در نتیجه شبکه رسانایی برای انتقال انرژی الکترومغناطیس به گرما را ایجاد می‌کنند، زیرا حفره‌ها باعث کاهش هدایت الکتریکی می‌شوند. این رفتار در تمام نمونه‌های کامپوزیت رؤیت می‌شود.

با مقایسه دو نمودار ۴-الف و ب در ضخامت‌های ۳ و ۶ mm مشاهده می‌کنیم که مقدار بیشینه اتلاف بازتاب با استفاده از بار موجبری تطبیقی، مکان قله و فرکانس آنها برای هر دو ضخامت و در فرکانس بیشتر از ۹/۷ GHz تغییر چندانی نداشته است و در هر دو ضخامت، نمونه زیگزاگ بیشترین اتلاف بازتاب را داشته است. همچنین مشاهده می‌شود که در این روش برخلاف حالت قبل، کامپوزیت سیمان / نانولوله‌ها در فرکانس‌های بیشتر از ۱۰ GHz توانایی جذب امواج الکترومغناطیس بهتری دارند. با مقایسه جذب امواج الکترومغناطیسی توسط نمونه‌ها با دو حالت مختلف فهمیده می‌شود که جذب امواج توسط نمونه‌های با ضخامت ۳ mm با روش بار موجبری مقایسه‌ای بهتر از روش اتصال کوتاه بدون استفاده از بار تطبیقی است. در حالی که در نمونه‌های کامپوزیت با ضخامت ۶ mm چندان تفاوتی حاصل نمی‌شود. همچنین در روش اتصال کوتاه، جذب امواج توسط نمونه‌های کامپوزیت با ضخامت ۳ mm در فرکانس‌های کمتر از ۱۰/۵ GHz بهتر عمل کرده است، در حالی که در روش بار موجبری تطبیقی در فرکانس‌های بیشتر از ۱۰/۵ GHz، نمونه‌های کامپوزیت جذب بهتری داشته‌اند. علاوه بر آن، جذب امواج توسط نمونه‌های کامپوزیت با ضخامت ۶ mm در روش اتصال کوتاه در فرکانس‌های کمتر و در روش بار موجبری تطبیقی در فرکانس‌های بیشتر نتایج بهتری را نشان می‌دهد. بنابراین، افزودن نانولوله‌ها به سیمان موجب بهبود عملکرد جذب امواج الکترومغناطیسی می‌شود [17, 18].

شکل ۳. اتلاف بازتاب نمونه شاهد و کامپوزیت سیمان/نانولوله‌های چندجداره عامل‌دار کربوکسیل با اشکال مختلف کایرال، زیگزاگ و آرمچیر با روش

اتصال کوتاه موجبر (الف) ضخامت ۳ mm (ب) ضخامت ۶ mm

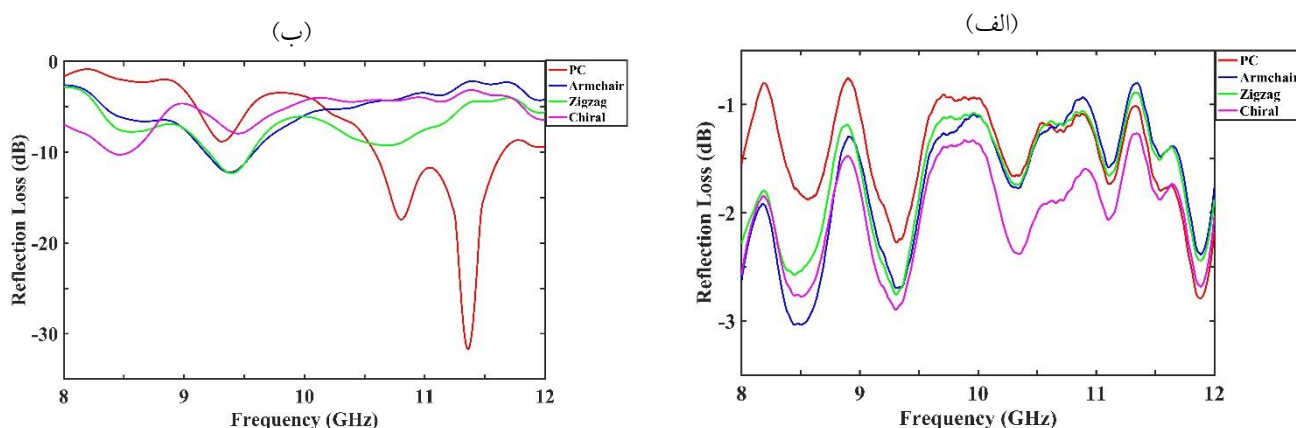


Fig. 3. The reflection loss of control sample and cement/MWCNTs-COOH composite with different geometries; chiral, zigzag and armchair by short circuit of the waveguide method. Thickness of 3 mm. b) Thickness of 6 mm.

شکل ۴. اتلاف بازتاب نمونه شاهد و کامپوزیت سیمان/نانولوله‌های چندجداره عاملدار کربوکسیل با اشکال مختلف کایرال، زیگزاگ و آرمچیر با روش بار موجبر تطبیقی الف) ضخامت ۳ mm ب) ضخامت ۶ mm

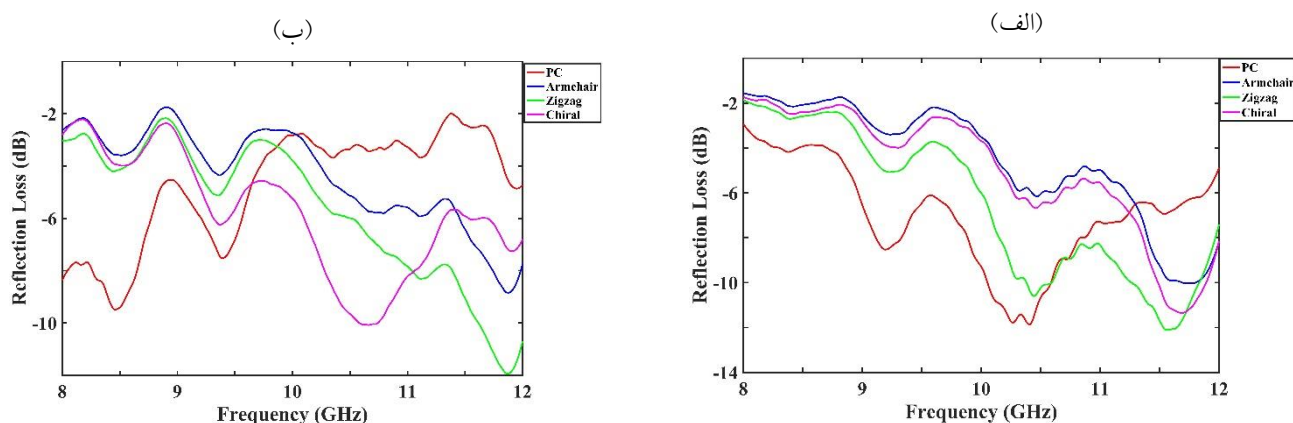


Fig. 4. The reflection loss of control sample and cement/MWCNTs-COOH composite with different geometries; chiral, zigzag and armchair by matched load of waveguide method. Thickness of 3 mm. b) Thickness of 6 mm.

شکل ۵. تصاویر SEM نمونه‌ها الف) نمونه شاهد ب) کامپوزیت سیمان/نانولوله چندجداره عاملدار کربوکسیل آرمچیر پ) کامپوزیت سیمان/نانولوله چندجداره عاملدار کربوکسیل آرمچیر ت) کامپوزیت سیمان/نانولوله چندجداره عاملدار کربوکسیل زیگزاگ

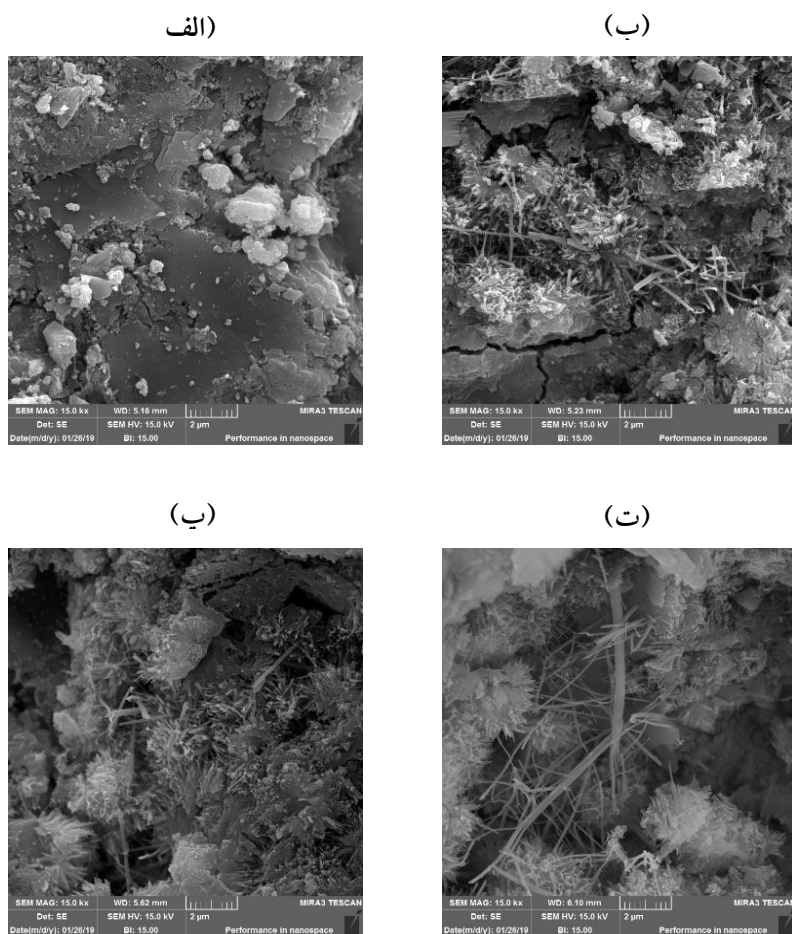


Fig. 5. SEM images of samples a) control sample b) cement/armchair MWCNTs-COOH composite c) cement/chiral MWCNTs-COOH composite d) cement/zigzag MWCNTs-COOH composite

References

۵- مراجع

- [1] Xie W. H., & Shen H. F. 2012 Experiment on the radar stealth effect of blended materials for cement based materials. *Journal of Functional Materials*, 43(1), 17-20.
- [2] Liang X. Y. & Wang J. L. 2004 Electromagnetic radiation of information device and elimination. *GuangXi Water Resources & Hydropower Engineering*, 2, 108-9.
- [3] Peng H. L. & Gao P. W. 2013 Effect of Graphite and Carbon Black on the Mechanical and Conductive Properties of Mortar with Carbon Fibre. *Journal of Materials Science and Engineering*, 31(6), 907-9.
- [4] Sun Y. F., Huang X., Gao X., Gao P.W., Liu H. W. & Peng H. L. 2014 Optimal Dosage of different Carbon-based Conductive Materials in Paste. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 33(2), 261-5.
- [5] Li K., Wang C. & Li H. 2008 Effect of chemical vapour deposition treatment of carbon fibres on the reflectivity of carbon fibre-reinforced cement-based composites. *Composites Science and Technology*, 68(5), 1105-14.
- [6] Poljak D. 2019 Encyclopedia of Environmental Health. Electromagnetic Fields: Environmental Exposure, J.O. Nriagu. Ed., Second Edn. 287-299, Elsevier, Oxford, UK.
- [7] Schulz M. J., Shanov V. N. & Yin Z. 2014 Nanotube Superfiber Materials. 373-377, Elsevier, UK.
- [8] Guan H., Liu S., Duan Y. & Cheng J. 2006 Cement based electromagnetic shielding and absorbing building materials. *Cem Concr Compos*, 28(5), 468-74.
- [9] Yao W. L., Xiong G., Yang Y., Huang H. Q. & Zhou Y. F. 2017 Effect of silica fume and colloidal graphite additions on the EMI shielding effectiveness of nickel fiber cement based composites. *Construction and Building Materials*, 150, 825-832.
- [10] Zhang C. S., Ni Q. Q., Fu S. Y. & Kurashiki K. 2007 Electromagnetic interference shielding effect of nanocomposites with carbon nanotube and shape memory polymer. *Composites Science and Technology*, 67(14), 2973-80.
- [11] Mo J. H., Kim K. C. & Jang K. S. 2019 Well-dispersed carbon nanotube/polymer composite films and application to electromagnetic interference shielding. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 80, 190-196.
- [12] Shi S.L. & Liang J. 2008 The effect of multi-wall carbon nanotubes on electromagnetic interference shielding of ceramic composites. *Nanotechnology*, 19, 255707.
- [13] Huang Y., Lia N., Maa Y., Dua F., Lia F. & Heb X. 2007 The influence of singlewalled carbon nanotube structure on the electromagnetic interference shielding efficiency of its epoxy composites. *Carbon*, 45(8), 1614-21.
- [14] Nam I. W., Kim H. K. & Lee H. K. 2012 Influence of silica fume additions on electromagnetic interference shielding effectiveness of multi-walled carbon nanotube/cement composites. *Constr Build Mater*, 30, 480-7.
- [15] Gupta S. & Tai N. H. 2019 Carbon materials and their composites for electromagnetic interference shielding effectiveness in X-band. *Carbon*, 152, 159-187.

وانگ و همکارانش [20] نیز نشان دادند که با افزودن نانولوله به سیمان به دلیل پرشدن حفره‌ها و تشکیل یک شبکه رسانا و پیوسته در کامپوزیت، خواص جذب در محدوده ۸-۱۲ GHz افزایش می‌یابد.

۴- نتیجه‌گیری

کامپوزیت‌های پایه سیمانی با اضافه کردن ۰/۱ درصد وزنی نانولوله کربنی چندجداره کربوکسیل با اشکال هندسی مختلف کایرال، زیگزاگ و آرمچر ساخته شدند. خواص جذب امواج الکترومغناطیس نمونه‌های کامپوزیت با دو ضخامت ۳ و ۶ mm با استفاده از اتصال کوتاه موجبر و بار موجبری تطبیقی در محدوده فرکانسی ۸-۱۲ GHz به دست آمدند و سپس با نمونه شاهد مقایسه شدند. در روش اتصال کوتاه موجبر، با افزایش ضخامت، پهنای باند فرکانسی و بیشینه اتلاف بازتاب به ویژه برای کامپوزیت‌های نانولوله افزایش، اما تعداد قله‌های اتلاف کاهش یافته است. علاوه بر آن به نظر می‌رسد که کامپوزیت سیمان / نانولوله‌ها در طول موج‌های کمتر از ۱۰ GHz توانایی جذب امواج الکترومغناطیس بهتری دارند. در روش بار موجبری تطبیقی مکان قله و فرکانس آنها برای هر دو ضخامت و در فرکانس بیشتر از ۹/۷ GHz تغییر چندانی نداشته است و در هر دو ضخامت، نمونه زیگزاگ بیشترین اتلاف بازتاب را داشته است. با مقایسه جذب امواج الکترومغناطیسی توسط نمونه‌ها با دو حالت مختلف استنباط می‌شود که جذب امواج توسط نمونه‌های با ضخامت ۳ mm با روش بار موجبری تطبیقی بهتر از روش اتصال کوتاه بدون استفاده از بار تطبیقی است. در حالی که در نمونه‌های با ضخامت ۶ mm چندان تفاوتی حاصل نمی‌شود. همچنین در روش اتصال کوتاه جذب امواج توسط نمونه‌های کامپوزیت با ضخامت ۳ mm در فرکانس‌های کمتر از ۱۰/۵ GHz بهتر عمل کرده است، در حالی که در روش بار موجبری تطبیقی در فرکانس‌های بیشتر از ۱۰/۵ GHz، نمونه‌های کامپوزیت جذب بهتری داشته‌اند. علاوه بر آن، جذب امواج توسط نمونه‌های کامپوزیت با ضخامت ۶ mm در روش اتصال کوتاه در فرکانس‌های کمتر و در روش بار موجبری تطبیقی در فرکانس‌های بیشتر نتایج بهتری را نشان می‌دهد.

- [19] Pimenta Teixeira K., Perdigão Rocha I., De Sá Carneiro L., Flores J., Dauer E. & Ghahremaninezhad A. 2016 The Effect of Curing Temperature on the Properties of Cement Pastes Modified with TiO₂ Nanoparticles. *Materials (Basel)*, 9, 952.
- [20] Wang B., Guo Z., Han Y. & Zhang T. 2013 Electromagnetic wave absorbing properties of multi-walled carbon nanotube/cement composites. *Construction and building materials*, 46, 98-103.
- [21] Chung D. D. L. 2001 Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials. *Carbon*, 39(2), 279-85.
- [16] Nam I. W., Choi J. H., Kim C. G. & Lee H. K. 2018 Fabrication and design of electromagnetic wave absorber composed of carbon nanotube-incorporated cement composites. *Composite Structures*, 206, 439-447.
- [17] Singh A. P., Gupta B. K., Mishra M., Chandra A., Mathur R. B. & Dhawan S. K. 2013 Multiwalled carbon nanotube/cement composites with exceptional electromagnetic interference shielding properties. *Carbon*, 56, 86-96.
- [18] Zhang W., Zheng Q., Wang D., Yu X. & Han B. 2019 Electromagnetic properties and mechanisms of multiwalled carbon nanotubes modified cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 208, 427-443.

Optimization of electromagnetic waves absorption properties of MWCNTs-COOH /cement composite by short circuit of waveguide and matched load methods

Mahsa Fakharpour ^{1*}, Reza Karimi ²

1- Associate Prof., Department of Physics, Maybod Branch, Islamic Azad University, Maybod, Iran.

2- M.SC Student. Faculty of Civil Engineering, Maybod Branch, Islamic Azad University, Maybod, Iran.

* mahsa.fakharpour@maybodiau.ac.ir

Abstract:

Many studies have been conducted on the absorption and protection of electromagnetic waves to reduce the harmful effects of electromagnetic radiation on the environment. High conductivity shields are used to prevent the penetration of electromagnetic waves. A convenient and useful method of obtaining electromagnetic shielding materials is the addition of conductive carbon materials including carbon fibers, carbon filaments, and carbon nanotubes. Carbon nanotubes can easily form a conductive network within a material field due to their two-dimensional tubular structures and high conductivity, which results in a high electrical permeability ambience. Therefore, the increase in dielectric losses results in reflection losses of electromagnetic waves. Thus, the presence of carbon nanotubes in the adsorbent improves the absorption properties of electromagnetic waves.

In this study, the electromagnetic wave absorbing properties of multi-walled carbon nanotubes (MWCNT) functionalization with carboxyl (-COOH) group /cement composites with different shapes; chiral, zigzag and armchair were studied by short circuit of the waveguide and matched load methods. The influence of the MWCNT shape and sample thickness on the electromagnetic wave absorbing properties were discussed and analyzed in the frequency range of 8–12 GHz by a short circuit of the waveguide and matched load methods. The samples were prepared in two thicknesses of 3 and 6 mm, and the amount of nanotubes added was 0.1%wt. The addition of 0.1 wt.% MWCNT greatly enhances the absorption performance of the cement mortar in the frequency range 8–10 GHz. With the increase of thickness from 3 mm to 6 mm, the frequency bandwidths of the reflection loss for MWCNT/cement composites increases but the number of peaks decreases. By comparing the results of electromagnetic wave absorbing of the samples with two different methods are deduced that in the samples with a thickness of 3 mm, the absorbing of waves by matched load method is better than short circuit method without matched load. However, in samples with a thickness of 6 mm, there is not much different. Also, the electromagnetic wave absorbing of the composite samples with a thickness of 3 mm performed better by short circuit method at frequencies below 10.5 GHz, while the composite samples had better absorbing in the matched load method at frequencies greater than 10.5 GHz. In addition, the electromagnetic wave absorbing of the composite samples with a thickness of 6 mm show better results by short circuit method at lower frequencies and by matched load method at higher frequencies. Moreover, the absorption behavior of the chiral sample with thickness 6 mm differs from the other two samples because the chiral nanotubes are asymmetric and zigzag and armchair nanotubes are symmetric. Furthermore, the structural analysis and surface morphology of MWCNT/cement composites with different shapes have been explored using the scanning electron microscope (SEM) technique. Scanning electron microscope images of MWCNT/cement composites show dispersion of nanotubes in composite. Connecting of nanotubes and cement leads to reduction of porosity and formation of regional conductive network. As a result, the electrical conductivity is increased and the electromagnetic field in the network is attenuated.

Keywords: Carboxyl functionalized multi-walled carbon nanotubes, Cement composite, Short circuit, Matched load.