

تهیه نانوکامپوزیت های آهن کربونیل / نانولوله کربن و بررسی خواص جذب امواج الکترومغناطیسی آنها در فرکانس های راداری

علیرضا زارعی^۱، مهدی مظفری زاده^{۲*}

۱- استاد، ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۶، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۰)

چکیده

یکی از نیازهای روبه رشد برای صنایع نظامی و غیرنظامی، توسعه جاذب های امواج ریزموج و راداری است. کاهش وزن جاذب ها، بهبود خواص، جذب قوی و پهنای باند جذبی از ویژگی های مهم در استفاده از این ترکیبات هستند. یکی از مناسب ترین این ترکیبات، جاذب نانوکامپوزیت نانولوله کربنی / فلزات مغناطیسی هستند که در این پژوهش نانوکامپوزیت هایی با درصد وزنی مختلف کربونیل آهن و نانولوله کربنی از طریق روش اختلاط همگن تهیه شدند و خاصیت جذب امواج ریزموج آنها در محدوده فرکانس راداری (۸ تا ۱۸ گیگاهرتز) مورد مطالعه قرار گرفت. تصاویر پراش اشعه ایکس و میکروسکوپ الکترونی روبشی نانوکامپوزیت ها یک اختلاط همگن و یکنواخت از ذرات نانولوله کربنی و کربونیل آهن در ماتریس را نشان داد. همچنین، نتایج جذب امواج نشان داد که با افزایش کربونیل آهن به نانولوله کربن و تشکیل جاذب نانوکامپوزیت بر پایه نانولوله کربنی، میزان جذب و پهنای باند جذبی افزایش می یابد. برای نانوکامپوزیت حاوی ۷۰٪ وزنی کربونیل آهن، بیشترین میزان اتلاف بازتاب به مقدار ۱۱/۳۳ دسی بل در فرکانس ۱۸ گیگاهرتز و در پهنای باند ۱۰/۱ تا ۱۸ گیگاهرتز، میزان اتلاف بیشتر از ۴ دسی بل به دست آمد.

کلیدواژه ها: جاذب های امواج ریزموج و راداری، نانوکامپوزیت نانولوله کربنی / فلزات مغناطیسی، کربونیل آهن.

Preparation of Carbon Nanotube/Carbonyl Iron Nanocomposites and Investigation of Their Electromagnetic Waves Absorbing Properties at Radar Frequencies

A. R. Zarei*, M. Mozafarzadeh

Malek Ashtar University of Technology

(Received: 2022/04/26; Accepted: 2023/01/10)

Abstract

Use of microwave absorbers and radar-absorbing materials is one of the growing needs in military and civilian applications. Weight reduction, improvement of absorbing characteristics, high microwave absorption and wide operating bandwidths are important issues in absorbing materials. One of the most suitable compounds is nanocomposite of carbon nanotubes/magnetic metals. In this work, nanocomposites of carbonyl iron (CI) and multi-walls carbon nanotubes (MWCNT) with different %Wt via homogeneously mixing with paraffin were prepared and their microwave absorbing properties were investigated in the frequency range of 8-18 GHz. SEM and XRD images of nanocomposites showed uniform dispersion of MWCNT and CI particles in the matrix. Also, the results of wave absorption showed that by increasing of iron carbonyl respect to carbon nanotubes and the formation of carbon nanotube-based nanocomposite absorbers, the absorption and absorption bandwidth increase. For the nanocomposite containing 70% by weight of carbonyl iron, the highest amount of reflection loss was 11.33 dB at the frequency of 18 GHz. Also, in the bandwidth of 10.1 GHz to 18 GHz, the amount of reflection loss was obtained more than 4 dB.

Keywords: Nanocomposite; Carbon nanotube; Multi-Walled Carbon Nanotubes; Carbonyl Iron; Microwave Absorbers.

*Corresponding Author E-mail: zareil349@gmail.com

۱. مقدمه

جاذب‌ها، دانسیته و چگالی کمتر آن‌ها نسبت به جاذبه‌های مغناطیسی است [۷]. نوع دیگر جاذب‌های امواج الکترومغناطیسی، جاذب‌های مغناطیسی هستند. در جاذبه‌های مغناطیسی کربونیل آهن، آلیاژهای فلزی مغناطیسی و فریت‌ها نقش پرکننده جاذب را ایفا می‌کنند. در این جاذب‌ها به دلیل تطابق خوب امپدانس هوا با روکش جاذب، امواج الکترومغناطیسی به خوبی درون جاذب نفوذ می‌کنند [۸ و ۹].

در سال‌های اخیر، مواد پلیمری و افزودنی‌های مختلفی برای تهیه مواد کامپوزیتی جاذب میکروویو استفاده شده‌اند [۱۰ و ۱۱]. مواد پرکننده‌ای که بتواند برهم‌کنش مناسبی با تشعشع میکروویو داشته باشند و تشعشع میکروویو را به گرما تبدیل نمایند، لزوماً باید با پلیمر مربوطه سازگار باشند. مواد پرکننده در اندازه نانو که خواص کوانتومی نشان می‌دهند، برای جذب امواج میکروویو مناسب هستند، از این رو، نانولوله کربن^۳ به دلیل خواص کوانتومی و خواص مکانیکی مطلوب یک انتخاب مناسب به‌عنوان پرکننده خواهد بود [۱۲ و ۱۳]. از سوی دیگر، اصلاح سطح نانولوله‌های کربنی با فلزات مغناطیسی برای به دست آوردن خواص مغناطیسی و ترکیب مناسب در ماتریس پلیمر بسیار مورد توجه است [۱۴ و ۱۵]. کربونیل آهن^۴ به‌عنوان پرکننده معمولی با مغناطیس‌پذیری بالا با ویژگی‌های برجسته‌ای چون مغناطیس‌پذیری بالا، دمای کوری بالا و اتلاف جریان گردابی کم، به دلیل تأثیر شکل ذرات، نفوذپذیری مغناطیسی بالا و خواص مغناطیسی نرم؛ مانند رفتار هیستریزس پایین، توسط دانشمندان زیادی مورد توجه قرار گرفته است. به طوری که مغناطیس‌پذیری اشباع ذرات خالص کربونیل آهن حدود چهار برابر بیشتر از اکسیدهای آهن است. مواد معمول کربنی مبتنی بر گرافیت نیز به دلیل اتلاف دی‌الکتریک، چگالی پایین و خاصیت انتقال الکتریکی بالا، خاصیت جذب امواج الکترومغناطیس را دارند، اما خاصیت مغناطیسی آنها ضعیف هستند [۱۶].

ساخت نانو کامپوزیت‌های دارای دو ماده پرکننده با خاصیت دی‌الکتریک و مغناطیسی بسیار مطلوب و قابل توجه است. زیرا مواد جاذب کامپوزیتی دی‌الکتریک - مغناطیسی، راهی برای بهبود خواص جذب امواج الکترومغناطیسی در مقایسه با مواد دی‌الکتریک و مواد مغناطیسی هستند؛ بنابراین، تلاش زیادی برای دستیابی به جاذب‌های جدیدی که ساختار ترکیبی دی‌الکتریک - مغناطیسی برای تنظیم پارامترهای الکترومغناطیسی برای فراهم کردن مقدار بیشینه اتلاف بازتاب^۵ انجام شده است. چون جاذبه‌های مغناطیسی دارای وزن سنگین و جاذبه‌های دی‌الکتریکی دارای پهنای جذبی باریک هستند، برای فائق آمدن بر این دو

اخیراً، به دلیل کاربردهای فراوان و با پیشرفت سریع سیستم‌های الکترونیکی و ارتباط از راه دور و استفاده روزافزون از امواج الکترومغناطیسی، به ویژه در ناحیه ریزموج^۱ در امور نظامی و ارتباطاتی، توجه به فناوری موج الکترومغناطیسی^۲ افزایش یافته است. اگرچه تجهیزات الکتریکی زندگی ما را راحت‌تر کرده است، اما تابش مداوم امواج الکترومغناطیسی باعث فشار روانی در جامعه بشری می‌شود، زیرا آلودگی الکترومغناطیسی محیط آسیب‌های زیادی به انسان وارد می‌کند. از این رو، تحقیقات در زمینه مواد جاذب امواج الکترومغناطیس و نوآوری‌های ضد امواج الکترومغناطیس، امری ضروری و اساسی در علوم مهندسی است.

جاذب‌های امواج الکترومغناطیس برای حفاظت از سیستم‌های الکترونیکی نظیر سیستم‌های تلفن‌های همراه در برابر اغتشاشات امواج الکترومغناطیسی، همچنین در زمینه زیست‌محیطی برای حفاظت از خطرات احتمالی جذب این امواج توسط بدن، کاربرد فراوانی دارند [۱ و ۲]. علاوه بر این، جاذب‌های رادار به طور گسترده برای استتار در کاربردهای مختلف نظیر تجهیزات و ادوات نظامی (هواپیما، کشتی‌ها، و غیره) استفاده می‌شود [۳]. از این رو، یافتن جاذب‌هایی با قابلیت جذب امواج میکروویو اهمیت فوق‌العاده‌ای یافته است. در واقع نقش اصلی مواد جاذب رادار این است که امواج و سیگنال‌های رسیده از طرف رادار را همانند یک مقاومت الکتریکی کوچک، جذب و از بازتاب آنها جلوگیری می‌کند. مواد جاذب دارای مراکز جذب با خصوصیتی هستند که می‌توانند امواج الکترومغناطیسی را کاهش دهند. آنها می‌توانند امواج الکترومغناطیس را از طریق سه مکانیزم جذب شامل اتلاف دی‌الکتریک، اتلاف مغناطیسی و اتلاف رسانایی جذب نموده، سپس انرژی الکترومغناطیس را به انرژی گرمایی تبدیل کنند. با این وجود، در اکثر موارد از دو نوع ماده جاذب با توجه به مکانیسم‌های جذب شامل جاذبه‌ای بر پایه اتلاف دی‌الکتریک و جاذبه‌ای بر پایه اتلاف مغناطیسی استفاده می‌شود. این جاذب‌ها باید دارای شرایط عملیاتی مطلوب، مانند خواص مکانیکی بالا، وزن کم، چگالی کم، ضخامت کم، عملکرد خوب در دماها و فرکانس‌های بالا باشند [۴ و ۵].

بر اساس اتلاف مغناطیسی یا دی‌الکتریک، انواع مواد جاذب امواج الکترومغناطیس مانند پودرهای فلزی مغناطیسی، فریت، سرامیک، پلیمرهای رسانا، مواد مبتنی بر کربن و غیره طراحی و توسعه یافته‌اند [۶]. کامپوزیت‌های حاوی پرکننده‌های رسانا همچون گرافیت، کربن سیاه، نیمه‌رساناها و پلیمرهای رسانا همانند اپوکسی و پلی‌پورتان عموماً در ساخت جاذبه‌های دی‌الکتریک مورد استفاده قرار می‌گیرند. مزیت اصلی این نوع

³ Multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs)

⁴ Carbonyl Iron (CI)

⁵ Reflection loss (RL)

¹ Microwave

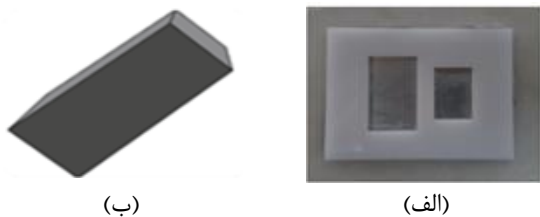
² Electromagnetic wave

مشکل در ساخت جاذب‌ها، از حضور هر دو نوع جاذب در کنار هم کمک گرفته می‌شود [۱۷ و ۱۸]

روش‌های مختلفی برای تهیه ذرات مغناطیسی پوشش داده شده با کربن به کار رفته است و تهیه این نانوکامپوزیت‌ها می‌تواند با استفاده از تکنیک‌های دما بالا شامل تخلیه قوس کربنی [۱۹]، جریان جت پلاسمای حرارتی [۲۰]، توزیع هم‌زمان پرتو یونی و مگنت رون [۲۱]، پیرولیز لیزری ترکیبات آلی - فلزی [۲۲]، روش‌های اسپری شدن [۲۳]، و تابش الکترون [۲۴] انجام شود. با این وجود، این تکنیک‌ها به تجهیزات پیچیده‌ای نیاز دارند و معمولاً هزینه بر هستند. در سال‌های اخیر، تلاش‌های متعددی برای ایجاد راه‌بردهایی که از واکنش دمای بالا برای پوشش کربن روی ذرات مغناطیسی استفاده می‌شود صورت گرفته است که در آنها از انواع متعددی از مواد مغناطیسی استفاده شده است [۲۵]. علاوه بر این، استفاده از کربونیل آهن اغلب به دلیل اکسیداسیون قابل توجه ذرات آهن در حین کار که باعث کاهش خواص مغناطیسی ذرات کربونیل آهن می‌شود، محدود گردید؛ بنابراین، استفاده از تکنولوژی پوشش سطح می‌تواند به عنوان یک روش ارزشمند منجر به افزایش عملکرد جاذب الکترومغناطیسی شود [۲۶]. هدف از مطالعه حاضر، تهیه جاذب امواج الکترومغناطیسی بر پایه نانوکامپوزیت‌های آهن کربونیل/نانولوله کربن و بررسی خواص جذب آن در فرکانس‌های راداری مختلف است. تهیه جاذب بر اساس اختلاط فیزیکی اجزاء صورت گرفته و مطالعه خاصیت آن در محدوده فرکانسی راداری (۸ GHz تا ۱۸ GHz) انجام شد. در این تحقیق، جهت بررسی خواص جذب امواج الکترومغناطیس کامپوزیت‌هایی با ماتریس پارافین حاوی نانولوله کربن و کربونیل آهن با درصد‌های وزنی مختلف تهیه شد. ابتدا اثر درصد حضور نانولوله کربنی با درصد‌های مختلف مورد بررسی قرار خواهد گرفت و سپس به بررسی اثر هم‌افزایی نانولوله کربنی و کربونیل آهن پرداخته شد.

۲-۲. تهیه نانوکامپوزیت نانولوله‌های کربنی/کربونیل آهن

در این تحقیق، به منظور تهیه نانوکامپوزیت نانولوله‌های کربنی/کربونیل آهن به وسیله یک روش اختلاط فیزیکی ساده، مقدار مشخصی از فلز با درصد نانولوله متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. کربونیل آهن با درصد وزنی ۷۰٪ به عنوان بهینه انتخاب گردید و درصد‌های ۳، ۵ و ۷ درصد از نانولوله‌های کربنی برای تهیه نانوکامپوزیت مربوطه با آن مخلوط شد. درصد‌های مختلفی از نانولوله کربنی مطابق با جدول (۱) انتخاب شده و فرایند تشکیل نانوکامپوزیت نانولوله کربنی/کربونیل آهن در حضور کربونیل آهن انجام شد. به منظور پراکنش بهتر نانولوله‌های کربنی، ابتدا، ۲ gr نانولوله کربنی با استفاده از ۱۵۰ ml اتانول به وسیله دستگاه اولتراسونیک به مدت ۶۰ دقیقه پخش شد. پس از پخش نانولوله‌های کربنی، بخش عمده‌ای از اتانول تبخیر شده مقدار ۵ gr /۵ از نانولوله کربنی باز شده با ۵۰٪ کربونیل آهن در آب مخلوط گردید و به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط هم زده شد. محلول به دست آمده صاف شده و نانوکامپوزیت نانولوله‌های کربنی - آهن کربونیل به منظور تبخیر آب در داخل آن به مدت ۱۰ ساعت در دمای ۶۰ درجه قرار داد شد. بعد از کامل شدن فرایند تهیه، نانوکامپوزیت در داخل ظرف نمونه شیشه‌ای کاملاً بسته، جمع‌آوری و نگهداری شد. برای مشخصه‌یابی نانوکامپوزیت‌های تهیه شده، به منظور حذف هرگونه آلودگی، ابتدا نمونه سه مرتبه با آب مقطر دو بار تقطیر و دومرتبه با اتانول ۹۸٪ شستشو داده شد و سپس در آن خلأ خشک گردید. به منظور آماده‌سازی نمونه جهت انجام آزمون اتلاف بازتاب و بررسی خواص الکترومغناطیسی، ابتدا پودرهای نمونه با پارافین به نسبت وزنی ۸۰ به ۲۰ تهیه و در قالب‌های ساخته شده مطابق شکل (۱) با ابعاد دهانه موج‌برها در محدوده Ku (۱۶/۲×۸/۳mm) و در محدوده X (۲۳×۱۰/۷mm) قالب‌گیری شدند.



شکل ۱. الف) قالب طراحی شده برای ساخت کامپوزیت‌ها، ب) نانوکامپوزیت‌های قالب‌گیری شده

تجهیزات مورد استفاده شامل دستگاه اولتراسونیک، دستگاه تحلیلگر شبکه^۱ مدل HP 8510C، آنالیزهای مشخصه‌یابی با استفاده از نمودارهای پراش اشعه ایکس^۲ به وسیله دستگاه Philips

۲. بخش تجربی

۱-۲. مواد مصرفی و تجهیزات

نانولوله کربنی از پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی تهیه و پس از تماس با اسید نیتریک خالص‌سازی گردید. پودر کربونیل آهن حاوی درصد ذرات آهن >۹۷٪ از شرکت BASF آلمان، اتانول با خلوص تجزیه‌ای و اسید نیتریک ۶۸٪ وزنی از شرکت Merck و پارافین به صورت تجاری تهیه گردیدند.

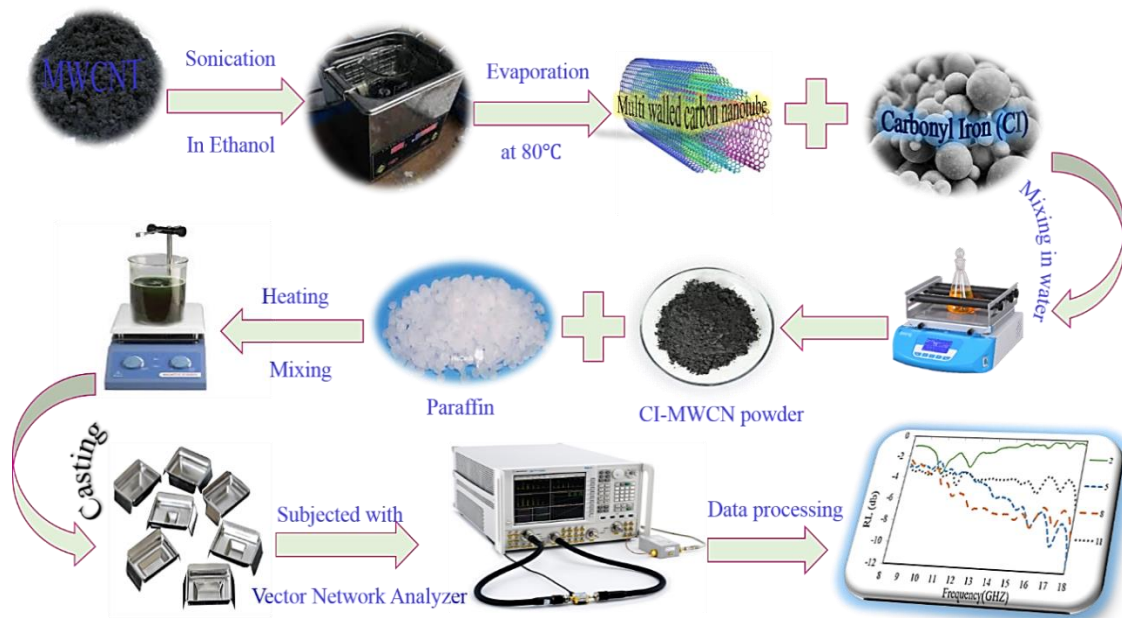
تجهیزات مورد استفاده شامل دستگاه اولتراسونیک، دستگاه تحلیلگر شبکه^۱ مدل HP 8510C، آنالیزهای مشخصه‌یابی با استفاده از نمودارهای پراش اشعه ایکس^۲ به وسیله دستگاه Philips

^۱ Field-Emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM)

^۱ Vector Network Analyzer (VNA)

^۲ X-Ray Diffraction (XRD)

استفاده گردید. همچنین، به منظور بررسی اثر هم‌افزایی حضور کربونیل آهن در جذب امواج الکترومغناطیس، کامپوزیت‌هایی با میزان کربونیل آهن در مقادیر مختلف ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درصد وزنی با ۳، ۵، ۷ و ۹ درصد وزنی نانولوله کربنی با ضخامت ۳/۹ mm مطابق جدول (۱) تهیه شدند.



شکل ۲. شماتیک تهیه کامپوزیت مواد جاذب رادار

جدول ۱. نمونه‌ها و درصد ترکیب نانولوله کربن آهن کربونیل

شماره نمونه	درصد وزنی نانولوله کربنی	درصد وزنی کربونیل آهن	درصد وزنی پارافین
۱	۳	۰	۹۷
۲	۵	۰	۹۵
۳	۷	۰	۹۳
۴	۳	۶۰	۳۷
۵	۵	۶۰	۳۵
۶	۷	۶۰	۳۳
۷	۳	۷۰	۲۷
۸	۵	۷۰	۲۵
۹	۷	۷۰	۲۳
۱۰	۳	۸۰	۱۷
۱۱	۵	۸۰	۱۵
۱۲	۷	۸۰	۱۳

الگوی پراش اشعه ایکس سه قله مهم با الگوهای (۱۱۰)، (۲۰۰) و (۲۱۱) مربوط به ساختار کریستالی آهن در 44.6° ، 64.9° ، 82.3° به دست آمده است. همچنین، هیچ قله‌ای برای پراش کربن در 26.4° یافت نشد که به دلیل مقدار کم بکار رفته در فرمولاسیون نانوکامپوزیت است. فاز بلوری ذرات کربونیل آهن در طی فرایند پوشش تغییر نمی‌کند. پهن شدگی قله‌ها را می‌توان به کربن آمورف نسبت داد. علاوه بر این، هیچ قله ناخالصی یا اکسید دیگری شناسایی نشد. ذرات کربونیل آهن به دلیل محافظت

۳. نتایج و بحث

۳-۱. مشخصه‌یابی ساختار نانوکامپوزیت

الگوی سنجش پراش اشعه ایکس به دست آمده برای نانوکامپوزیت تهیه شده مطابق با نمونه ۱۱ (حاوی ۸۰ درصد کربونیل آهن و ۵ درصد نانولوله کربن با ۱۵ درصد پارافین) در شکل (۳) نشان داده شده است. همان‌طور که در الگوی پراش اشعه ایکس نانوکامپوزیت نانولوله کربنی/کربونیل آهن مشاهده می‌شود قله‌های ظاهر شده در

۳-۳. بررسی میزان اتلاف بازتاب امواج الکترومغناطیسی

به منظور مقایسه پارامترهای الکترومغناطیسی نمونه‌ها، پارامترهای پراکندگی مخلوط نمونه‌های تهیه شده از نانولوله‌های کربنی و کربونیل آهن در محدوده ۸-۱۸ GHz با استفاده از تحلیلگر برداری شبکه اندازه‌گیری شد. سپس گذردهی الکتریکی مختلط و نفوذپذیری مغناطیسی مختلط و افت بازتاب (RI) نمونه‌ها با استفاده از نرم‌افزار اندازه‌گیری مواد Agilent 8510C محاسبه شد. خاطرنشان می‌شود که با استفاده از دستگاه تحلیلگر شبکه می‌توان رفتار مواد را در برخورد با امواج الکترومغناطیس در محدوده فرکانسی مشخص بررسی نمود. به عبارتی، در این آزمون با ارسال موج الکترومغناطیس به سمت نمونه‌ها و تحلیل امواج انعکاسی و عبوری، مشخصات الکترومغناطیس مواد مورد بررسی قرار خواهد گرفت. مهم‌ترین مشخصه‌های رفتار مواد در برابر امواج الکترومغناطیس که توسط دستگاه تحلیلگر برداری شبکه قابل اندازه‌گیری است، شامل موارد زیر است:

الف - گذردهی الکتریکی مختلط^۲

ب - نفوذپذیری مغناطیسی مختلط^۳

تمام اندازه‌گیری‌ها با این فرض انجام می‌گیرد که به هنگام اعمال میدان الکترومغناطیس به یک ماده، مقداری از مولفه‌های الکتریکی و مغناطیسی توسط ماده اتلاف می‌گردد و سپس با یک تأخیر به میدان پاسخ می‌دهد. این بدان معناست که گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی می‌بایست به شکل پارامتر مختلط در نظر گرفته شوند که روابط آن‌ها رأی مؤلفه الکتریکی و مغناطیسی به ترتیب، به صورت معادلات (۱) و (۲) است. [۱۳].

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (1)$$

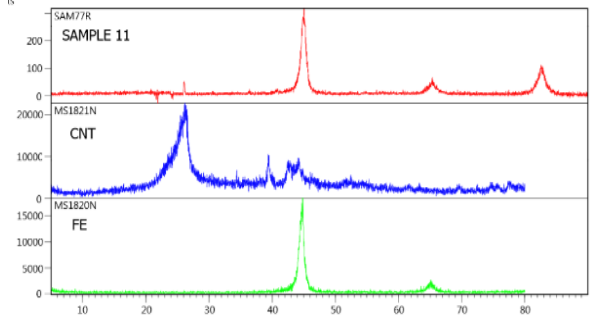
$$\mu = \mu' - j\mu'' \quad (2)$$

ϵ' و μ' به ترتیب بخش حقیقی گذردهی الکتریکی مختلط و بخش حقیقی نفوذپذیری مغناطیسی مختلط هستند که نشان دهنده میزان کمی انرژی ذخیره شده از یک میدان متناوب در یک ماده هستند. بخش موهومی این روابط یعنی ϵ'' و μ'' بیانگر میزان اتلاف الکتریکی و مغناطیسی این میدان است. همچنین تانژانت اتلاف برای هر دو مولفه، نسبت بخش موهومی به بخش حقیقی این پارامترها است که روابط (۳) و (۴) به ترتیب برای تانژانت^۴ اتلاف الکتریکی و تانژانت اتلاف مغناطیسی بیان می‌شوند [۱۳].

$$\tan \delta_\epsilon = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (3)$$

$$\tan \delta_\mu = \frac{\mu''}{\mu'} \quad (4)$$

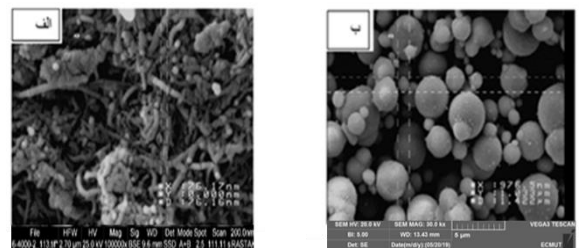
لایه‌های کربنی تقریباً بدون اکسیداسیون باقی خواهد ماند. به عبارت دیگر، اختلاط کاملاً فیزیکی بوده و هیچ‌گونه واکنش و تغییر فازی اتفاق نیفتاده است.



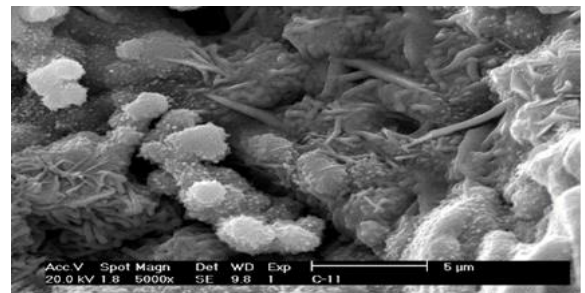
شکل ۳. الگوی پراش اشعه ایکس نانوکامپوزیت نانولوله کربنی/ کربونیل آهن

۳-۲. بررسی مورفولوژی با میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱

به منظور بررسی مورفولوژی و ابعاد نانوکامپوزیت نانولوله کربن/کربونیل آهن، از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد و تصاویر حاصل با استفاده از نرم‌افزار (Digimizer version 4.1.1.0) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از سنجش نانوذرات کربنی و کربونیل آهن با میکروسکوپ الکترونی روبشی در شکل (۴) و شکل (۵) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع نانوکامپوزیت نانولوله کربن/کربونیل آهن/پارافین تهیه شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که از تصاویر مشخص است میانگین قطر ذرات نانولوله کربن ۱۰۰ nm و قطر ذرات کربونیل آهن ۱ تا ۴ μm است و نتایج حاصل از بررسی میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان‌دهنده پخش مناسب نانولوله کربن و کربونیل آهن در ماتریس پارافین است.



شکل ۴. تصاویر SEM الف-ذرات نانولوله کربن ب- ذرات کربونیل آهن



شکل ۵. تصاویر SEM نانوکامپوزیت نانولوله کربن/کربونیل آهن

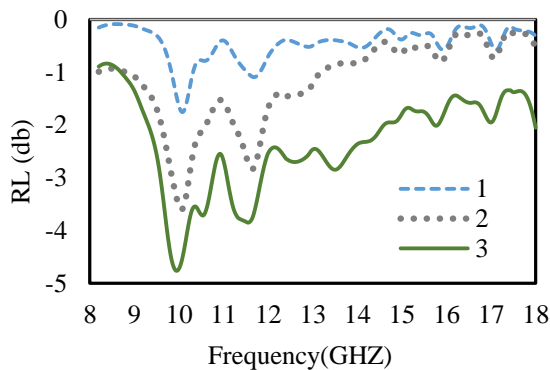
^۲ Complex Permittivity

^۳ Complex Permeability

^۴ Tangent

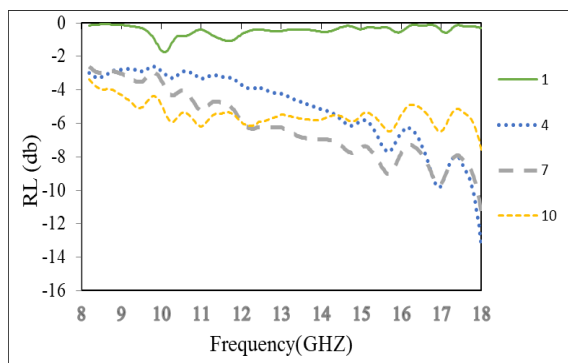
^۱ Scanning Electron Microscopy (SEM)

محدوده ۸-۱۸ GHz مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۶) نتایج حاصل از این بررسی نشان می‌دهد با افزایش درصد نانولوله کربنی میزان جذب و پهنای باندی افزایش می‌یابد همچنین بیشینه اتلاف بازتابی به سمت فرکانس‌های کمتر انتقال می‌یابد؛ بنابراین نمونه (۳) حاوی ۷٪ وزنی با بالاترین کارایی به‌عنوان مقدار بهینه انتخاب گردید.



شکل ۶. میزان جذب امواج به‌وسیله نانوکامپوزیت‌های حاوی نانولوله کربن با درصد وزنی (۱) ۳٪، (۲) ۵٪، (۳) ۷٪

به‌منظور بررسی اثر هم‌افزایی کربونیل آهن بر روی میزان جذب و اتلاف بازتابش، میزان جذب با استفاده از نانوکامپوزیت‌های حاوی ۳٪ نانولوله کربنی به همراه ۶۰، ۷۰، ۸۰ درصد وزنی کربونیل آهن که مطابق با نمونه‌های (۱)، (۴)، (۷)، (۱۰) در جدول (۱) تهیه شده‌اند، در محدوده فرکانس‌های ۸-۱۸ GHz مورد بررسی قرار گرفت. مطابق با شکل (۷) به‌خوبی قابل مشاهده می‌شود که با افزایش درصد وزنی کربونیل آهن تا ۷۰٪ وزنی بیشینه اتلاف بازتابی به فرکانس‌های بالا جابه‌جا شده و از این درصد وزنی به بالا، بیشینه اتلاف بازتابی به سمت فرکانس‌های پایین انتقال می‌یابد؛ لذا، توجه به میزان متوسط جذب نمونه‌ها، نمونه ۷ که تقریباً از فرکانس ۱۰/۱۳ GHz تا ۱۸ GHz دارای جذب بالای ۴ dB است به‌عنوان نمونه بهینه انتخاب گردید.



شکل ۷. نمودار تغییرات اتلاف بازتابش به فرکانس نانوکامپوزیت‌های حاوی (۱) ۳٪، (۴) درصد نانولوله کربنی، (۷) حاوی ۳٪ نانولوله کربنی و ۶۰٪ وزنی کربونیل آهن، (۱۰) حاوی ۳٪ نانولوله کربنی و ۷۰٪ وزنی کربونیل آهن، (۱۰) حاوی ۳٪ نانولوله کربنی و ۸۰٪ وزنی کربونیل آهن

از سوی دیگر، از تانژانت اتلاف این پارامترها می‌توان نتیجه گرفت که هرچه بخش موهومی گذردهی الکتریکی و مغناطیسی بزرگ‌تر باشد، جذب امواج بهتر خواهد بود. در نتیجه، برای جذب امواج الکترومغناطیس، موادی با گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی بالا انتخاب می‌شوند. از سوی دیگر، بخش انعکاسی و عبوری موج برای یک ماده با گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی خیلی بالا، نسبتاً بزرگ خواهد بود که بر این اساس، می‌بایست یک گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی مناسب با نیاز عملیاتی انتخاب شود [۱۴ و ۱۵].

در نقطه‌ای از یک موج الکترومغناطیس، نسبت قدرت میدان الکتریکی به میدان مغناطیسی را امپدانس موج^۱ گویند که با رابطه (۵) بیان می‌شود [۱۴].

$$Z = \frac{E}{H} \quad (5)$$

مهم‌ترین مشخصه مورد بررسی که متأثر از سایر موارد ذکر شده است، پارامتر اتلاف بازتاب است که غالباً خاصیت جذب امواج الکترومغناطیس با اتلاف بازتابی تعیین می‌گردد. معادله اتلاف بازتابی به‌صورت رابطه (۶) بیان می‌شود [۱۰]:

$$RL(dB) = -20 \log \left| \frac{Z_{in} - 1}{Z_{in} + 1} \right| \quad (6)$$

که Z_{in} امپدانس موج ورودی است و به‌صورت رابطه (۷) بیان می‌شود [۱۰]:

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh \left[j \frac{2\pi}{c} \sqrt{\mu_r \epsilon_r} f d \right] \quad (7)$$

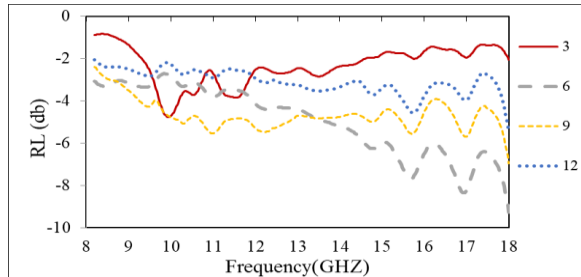
که μ_r ، ϵ_r ، c ، f و d در این رابطه به‌ترتیب نمایانگر نفوذپذیری مغناطیسی، گذردهی الکتریکی، سرعت امواج الکترومغناطیس در خلا، بسامد، ضخامت جاذب و امپدانس موج در هوا هستند.

به‌منظور بررسی تأثیر درصد حضور مواد در جاذب‌ها بر روی جذب امواج، جاذب‌های نانوکامپوزیتی مطابق با جدول (۱) تهیه گردید و از نظر جذب امواج مورد بررسی قرار گرفته شد. در این قسمت به‌منظور انتخاب بهترین جاذب چهار نوع آزمایش انجام شد. ابتدا نانوکامپوزیت‌های حاوی ۳، ۵ و ۷ درصد وزنی نانولوله کربنی به‌تنهایی مورد بررسی قرار گرفت سپس به‌منظور بررسی تأثیر رفتار هم‌افزایی کربونیل آهن بر میزان جذب و بهبود رفتار جذب کامپوزیت‌های حاوی ۳، ۵ و ۷ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی با درصد‌های وزنی ۸۰، ۷۰، ۶۰ درصد از کربونیل آهن مورد بررسی و بهترین نمونه از هر گروه انتخاب گردید.

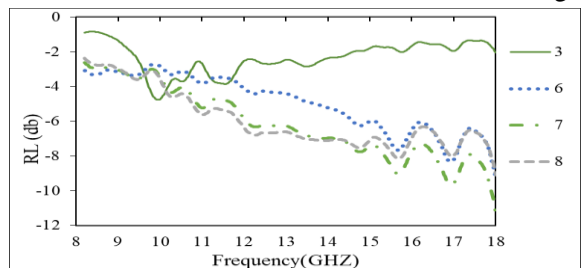
به‌منظور بررسی تأثیر نانوکامپوزیت‌های نانولوله‌های کربنی بر میزان اتلاف بازتابی، میزان جذب کامپوزیت (۱)، (۲)، (۳) در

^۱ Wave Impedance

۱۰/۱ تا ۱۸ GHz با جذب بالای ۴ dB دارای پهنای باند و افت انعکاس بیشتری است. به همین منظور، این جاذب به جهت داشتن پهنای باند و اتلاف بازتابی مناسب می‌تواند به‌عنوان جاذب الکترومغناطیسی مناسب پیشنهاد گردد.



شکل ۹. نمودار تغییرات اتلاف بازتابی به فرکانس نانوکامپوزیت‌های حاوی ۵٪ (۳)، ۵٪ درصد نانولوله کربنی، (۶) حاوی ۵٪ وزنی نانولوله کربنی و ۶۰٪ وزنی کربونیل آهن، (۹) حاوی ۵٪ وزنی نانولوله کربنی و ۷۰٪ وزنی کربونیل آهن، (۱۲) حاوی ۵٪ وزنی نانولوله کربنی و ۸۰٪ وزنی کربونیل آهن



شکل ۱۰. مقایسه نمونه‌های بهینه در هر بخش برحسب اتلاف انعکاس (۳) نانوکامپوزیت‌های حاوی ۷٪ درصد نانولوله کربنی، (۶) حاوی ۷٪ نانولوله کربنی و ۶۰٪ وزنی کربونیل آهن، (۷) حاوی ۳٪ نانولوله کربنی و ۷۰٪ وزنی کربونیل آهن، (۸) حاوی ۵٪ نانولوله کربنی و ۷۰٪ وزنی کربونیل آهن

جدول ۲. نتایج جذب امواج نانوکامپوزیت‌های حاوی نانولوله کربن چند دیواره و کربونیل آهن

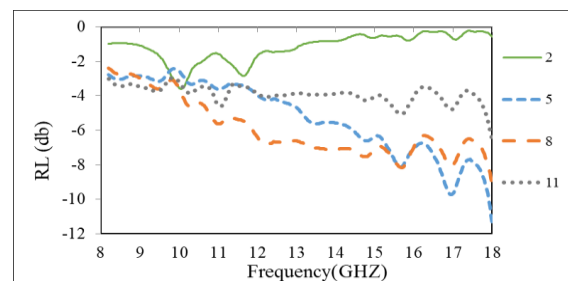
شماره نمونه	متوسط جذب در ۱۲-۸ GHz	متوسط جذب در ۱۸-۱۲ GHz	متوسط جذب در ۸-۱۸ GHz	بیشترین میزان جذب (dB)	فرکانس (GHz)
۱	۰/۶	۰/۳۴	۰/۴۷	۱/۷۵	۱۰/۰۷
۲	۱/۸۷	۰/۶۵	۱/۲۷	۳/۶	۱۰/۰۷
۳	۲/۷۶	۲	۲/۴۹	۴/۷۶	۹/۹۴
۴	۳/۱۲	۶/۵۵	۴/۸۳	۱۳/۴	۱۸
۵	۳/۲	۶/۷	۵	۱۱/۴	۱۸
۶	۳/۴	۶/۱	۴/۷	۹/۲۵	۱۸
۷	۴/۱۴	۷/۶۹	۵/۹۱	۱۱/۳۳	۱۸
۸	۴/۳۷	۷/۱	۵/۷۳	۹/۰۸	۱۸
۹	۴/۴۵	۴/۸۲	۴/۶۳	۶/۹۵	۱۸
۱۰	۵/۱۱	۵/۷	۵/۴	۷/۶	۱۸
۱۱	۳/۶	۴/۱۳	۳/۸۶	۶/۵۶	۱۸
۱۲	۲/۶۱	۳/۴۶	۳/۰۳	۵/۵۴	۱۸

۳-۴. بررسی میزان جذب یا اتلاف بازتابی با استفاده از نانوکامپوزیت حاوی ۵٪ وزنی نانولوله کربنی با استفاده از درصد‌های وزنی مختلف از کربونیل آهن

در این تحقیق، تأثیر هم‌افزایی کربونیل آهن با افزایش درصد وزنی نانولوله کربنی در جاذب نانوکامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از شکل (۸) نمایان می‌کند که با افزایش درصد وزنی نانولوله کربنی متوسط جذب نمونه‌ها افزایش می‌یابد، با افزایش درصد وزنی کربونیل آهن تا ۷۰٪ وزنی بیشینه اتلاف بازتابی به فرکانس‌های بالا جابه‌جا شده و از این درصد وزنی به بالا بیشینه اتلاف بازتابی به سمت فرکانس‌های پایین انتقال می‌یابد. نمونه ۸ در این بخش به‌عنوان نمونه بهینه انتخاب گردید. این نمونه از فرکانس ۱۰/۰۹ GHz تا ۱۸ GHz دارای جذب بالای ۴ dB است.

۳-۵. بررسی میزان جذب یا اتلاف بازتابی با استفاده از نانوکامپوزیت حاوی ۷٪ وزنی نانولوله کربنی با استفاده از درصد‌های وزنی مختلف از کربونیل آهن

در این بررسی نیز تأثیر هم‌افزایی کربونیل آهن با افزایش درصد وزنی نانولوله کربنی در جاذب نانوکامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های (۳)، (۶)، (۹) و (۱۲) مطابق جدول (۱) تهیه گردید. همان‌طوری که در شکل (۹) قابل مشاهده است با توجه به متوسط جذب نمونه‌ها، نمونه ۶ به‌عنوان نمونه بهینه، از فرکانس ۱۱/۹۵ GHz تا ۱۸ GHz دارای جذب بالای ۴ dB خواهد بود.



شکل ۸. نمودار تغییرات اتلاف بازتابی به فرکانس نانوکامپوزیت‌های حاوی ۵٪ (۲)، ۵٪ درصد نانولوله کربنی، (۵) حاوی ۵٪ وزنی نانولوله کربنی و ۶۰٪ وزنی کربونیل آهن، (۸) حاوی ۵٪ وزنی نانولوله کربنی و ۷۰٪ وزنی کربونیل آهن، (۱۱) حاوی ۵٪ وزنی نانولوله کربنی و ۸۰٪ وزنی کربونیل آهن

۳-۶. انتخاب جاذب‌های بهینه و انتخاب جاذب مناسب

نتایج حاصل از بررسی میزان جذب امواج توسط نانوکامپوزیت‌های تهیه شده به‌صورت خلاصه در جدول (۲) ارائه شده است. با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از بررسی‌های به‌دست‌آمده در هر مرحله، مشاهده می‌شود که با اضافه کردن کربونیل آهن به کامپوزیت خواص جذب در فرکانس‌های ۸-۱۸ GHz بهبود می‌یابد با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده (جدول ۲) و با مقایسه نتایج بهینه در هر بخش (شکل ۱۰) نانوکامپوزیت شماره (۷) که حاوی ۳٪ وزنی نانولوله کربنی و ۷۰٪ وزنی کربونیل آهن که از فرکانس GHz

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر هم‌افزایی کربونیل آهن با نانوکامپوزیت نانولوله‌های به‌منظور بهبود در جذب امواج الکترومغناطیسی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که اثر حضور هم‌زمان نانولوله کربن و کربونیل آهن با افزایش کربونیل آهن به کامپوزیت، میزان جذب و پهنای باند جذبی افزایش می‌یابد. این پدیده می‌تواند به این دلیل باشد که با اختلاط این دو ماده، کربونیل آهن به‌خاطر خواص مغناطیسی، باعث جذب بخش مغناطیسی گردیده و نانولوله کربنی به‌خاطر ساختار کربنی، منجر به جذب بخش الکترومغناطیسی موج الکترومغناطیس خواهد شد؛ لذا، با بررسی درصدهای مختلف کربونیل آهن مشخص شد که نمونه نانوکامپوزیت (۷) حاوی ۳٪ وزنی نانولوله کربنی و ۷۰٪ وزنی کربونیل آهن به بیشترین میزان اتلاف بازتاب را نشان داده و در گستره فرکانسی ۱۰/۱۳ GHz تا ۱۸ GHz، جذب بالای ۴ dB را نشان داده است که دلیل آن بیشترین تطابق امپدانس خواهد بود. همچنین، مشاهده شد که با افزایش بیشتر مقدار کربونیل آهن و نانولوله کربن، میزان اتلاف بازتاب کمتر خواهد شد. این کاهش به این دلیل خواهد بود که با افزایش بیشتر مواد، میزان نفوذپذیری موج راداری کمتر شده و میزان بازتاب امواج افزایش خواهد یافت؛ بنابراین، برای جذب مطلوب یک نسبت بهینه از مواد جاذب مورد نیاز است. نتایج نشان می‌دهد که جاذب مورد نظر می‌تواند به‌عنوان یک جاذب راداری مناسب در ناحیه ریزموج پیشنهاد گردد. همچنین به‌عنوان کار آینده می‌توان بر روی شکل و انواع مورفولوژی آهن کربونیل و نانولوله کربن، پژوهش را ادامه داده و نقش آن را در میزان اتلاف مطالعه نمود که در برنامه تیم تحقیقاتی بوده و بعد از کسب نتایج مطلوب، در مقاله بعدی ارائه خواهد شد.

۵. مراجع

- [7] Das, S.; Nayak, G. C.; Sahu, S. K.; Routray, P. C.; Roy, A. K.; Baskey, H. "Microwave Absorption Properties of Double-Layer RADAR Absorbing Materials Based on Doped Barium Hexaferrite/TiO₂/Conducting Carbon Black"; J. Eng. 2014, 1-6.
- [8] Feng, Y.; Li, D.; Jiang, L.; Dai, Z.; Wang, Y.; An, J.; Ren, W.; He, J.; Wang, Z.; Liu, W.; Zhang, Z. "Interface Transformation for Enhanced Microwave-Absorption Properties of Core Double-Shell Nanocomposites"; J. Alloys. Compd. 2017, 694, 1224-1231.
- [9] Yanmin, T. L.; Wang, L.; Zhao, Z.; Gu, Y. "Research Progress on Nanostructured Radar Absorbing Materials"; Energy power Eng. 2011, 3, 580-584.
- [10] Hua, J.; Li, Y.; Liu, X.; Li, X.; Lin, S.; Gu, J.; Cui, Z. K. "Graphene/MWNT/Poly(phenylenebenzobisoxazole) Multiphase Nanocomposite via Solution Prepolymerization with Superior Microwave Absorption Properties and Thermal Stability"; J. Phys. Chem. C. 2017, 121, 1072-1080.
- [11] Ma C. C. M.; Huang, Y. L.; Kuan, H. C. "Preparation and Electromagnetic Interference Shielding Characteristics of Novel Carbon-Nanotube/Siloxane/Poly(Urea Urethane) Nanocomposites"; J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys. 2005, 43, 345-358.
- [12] Liu, L.; Kong, L.B.; Yin, W.Y.; Matitsine, S. "Characterization of Single-and Multiwalled Carbon Nanotube Composites for Electromagnetic Shielding and Tunable Applications"; IEEE Trans. Electromagn. Compat. 2011, 53, 943-949.
- [13] Park, K. Y.; Han, J. H.; Lee, S. B.; Yi, J. W. "Microwave Absorbing Hybrid Composites Containing Ni-Fe Coated Carbon Nanofibers Prepared by Electroless Plating"; Compos. Pt. A. Appl. Sci. Manuf. 2011, 42, 573-578.
- [14] Sahu, R. P.; Abdallah, A. M.; Fattah, A. R.; Ghosh, S.; Puri, I. K. "Synthesis, Characterization, and Applications of Carbon Nanotubes Functionalized with Magnetic Nanoparticles"; Advances in Nanomaterials 2018, 37-57.
- [15] Wu, Q.; Wu, G.; Wang, L.; Hu, W.; Wu, H. "Facile Synthesis and Optical Properties of Prussian Blue Microcubes and Hollow Fe₂O₃ Microboxes"; Mater. Sci. Semicond. Process 2015, 30, 476-481.
- [16] Liu, Y.; Liu, X.; Wang, X. "Double-layer Microwave Absorber Based on CoFe₂O₄ Ferrite and Carbonyl Iron Composites"; Alloys Compd. 2014, 584, 249-253.
- [17] Micheli, D.; Vricella A.; Pastore, R.; Marchetti, M. "Synthesis and Electromagnetic Characterization of Frequency Selective Radar Absorbing Materials Using Carbon Nanopowders"; Carbon 2014, 77, 756-774.
- [18] Wu, G.; Cheng, Y.; Xie, Q.; Jia, Z.; Xiang, F.; Wu, H. "Facile Synthesis of Urchin-Like ZnO Hollow Spheres with Enhanced Electromagnetic Wave Absorption Properties"; Mater. Lett. 2015, 144, 157-160.
- [19] Xie, Z.; Geng, D.; Liu, X.; Ma, S.; Zhang, Z. J. "Magnetic and Microwave-Absorption Properties of Graphite-Coated (Fe, Ni) Nanocapsules"; Mater. Sci. Technol. 2011, 27, 607-614.
- [20] Bystrzejewski, M.; Karoly, Z.; Szepvolgyi, J.; Kaszuwara, W.; Huczko, A.; Lange, H. "Continuous Synthesis of Carbon-Encapsulated Magnetic Nanoparticles with a Minimum Production of Amorphous Carbon"; Carbon 2009, 47, 2040-2048.
- [21] Singh, A.; Lavigne, P. "Deposition of Diamond-Like Carbon Films by Low Energy Ion Beam and Dc Magnetron Sputtering"; Surf. Coat Technol. 1991, 47, 188-200.
- [22] Dumitrache, F.; Morjan, I.; Fleaca, C.; Birjega, R.; Vasile, E.; Kuncser, V.; Alexandrescu, R. "Parametric Studies on Iron-Carbon Composite Nanoparticles Synthesized by Laser Pyrolysis for Increased Passivation and High Iron Content"; Appl. Surf. Sci. 2011, 257, 5265-5269.
- [1] Egami, Y.; Yamamoto, T.; Suzuki, K.; Yasuhara, T.; Higuchi, E.; Inoue, H. "Stacked Polypyrrole-Coated Non-woven Fabric Sheets for Absorbing Electromagnetic Waves with Extremely High Frequencies"; Mater. Sci. 2012, 47, 382-390.
- [2] Tan, E.; Kagawa, Y.; Dericioglu, A. "Electromagnetic Wave Absorption Potential of SiC-Based Ceramic Woven Fabrics in the GHz Range"; J. Mater. Sci. 2009, 44, 1172-1179.
- [3] Touzopoulos, P.; Boviatsis, D.; Zikidi, K. C. "Constructing a 3D Model of a Complex Object from 2D Images, for the Purpose of Estimating its Radar Cross Section (RCS)"; J. Comput. Math. Model. 2017, 7, 15-28.
- [4] Wu, H.; Wu, G.; Wang, L. "Peculiar Porous α -Fe₂O₃, γ -Fe₂O₃ and Fe₃O₄ Nanospheres: Facile Synthesis and Electromagnetic Properties"; Powder Technol. 2015, 269, 443-451.
- [5] Ren, Y.; Yang, L.; Wang, L.; Xu, T.; Wu, G.; Wu, H. "Facile Synthesis, Photoluminescence Properties and Microwave Absorption Enhancement of Porous and Hollow ZnO Spheres"; Powder Technol. 2015, 281, 20-27.
- [6] Council, N. "Opportunities in Biotechnology for Future Army Applications"; National Academies Press, 2001

- [25] Wang, Z.; Guo, H.; Yu, Y.; He, N. "Synthesis and Characterization of a Novel Magnetic Carrier with its Composition of Fe₃O₄/Carbon using Hydrothermal Reaction"; J. Magn. Mater. 2006, 302, 397-404.
- [26] Liu, J. R.; Itoh, M.; Horikawa, T.; Machida, K. I.; Sugimoto, S.; Maeda, T. "Gigahertz Range Electromagnetic Wave Absorbers Made of Amorphous-Carbon-Based Magnetic Nanocomposite"; J. Appl. Phys. 2005, 98, 054305.
- [23] Yu, F.; Wang, J. N.; Sheng, Z. M.; Su, L. F. "Synthesis of Carbon-Encapsulated Magnetic Nanoparticles by Spray Pyrolysis of Iron Carbonyl and Ethanol"; Carbon 2005, 43, 3018-3021.
- [24] Ugarte, D. "How to Fill or Empty a Graphitic Onion"; Chem. Phys. Lett. 1993, 209, 99-103.

