

## سنتز نانو کامپوزیت نانولوله کربنی / آهن- نیکل به روش احیای در محلول به عنوان نانوساختار جاذب رادار

علیرضا زارعی<sup>۱\*</sup>، حکیمه پورعبداللهی<sup>۲</sup>

۱- دانشیار، ۲- دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

(دریافت: ۹۶/۰۴/۲۴، پذیرش: ۹۶/۰۷/۱۶)

### چکیده

در این پژوهش نانو کامپوزیت نانولوله کربنی / آهن- نیکل به روش همرسوبی سنتز شد. برای بررسی های فازی و مورفولوژی محصول نهایی به ترتیب از آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. همچنین پارامترهای الکترومغناطیسی نمونه های سنتز شده، با استفاده از دستگاه تجزیه و تحلیل شبکه بردار (VNA) در محدوده راداری باند X مورد ارزیابی قرار گرفت. در مورد نانوالیاز آهن-نیکل دارای عرض پیک زیر ۱۰ dB - تقریباً برابر ۲/۵ GHz و عرض پیک آن برای زیر ۲۰ dB - در محدوده ۱۱/۳-۱۱/۹ GHz است. اما برای نانو کامپوزیت نانولوله کربنی / آهن- نیکل عرض پیک در اتلاف انعکاسی زیر ۱۰ dB - (۹۰٪ جذب امواج فرودی) شامل تمام محدوده فرکانس است و عرض پیک در اتلاف انعکاسی زیر ۲۰ dB - (۹۹٪ جذب امواج فرودی) تقریباً برابر ۳ GHz است. کمترین مقدار اتلاف انعکاسی از ۳۸/۱۴ dB - در ضخامت ۲/۸ mm در فرکانس ۱۱/۶ GHz برای نانوالیاز آهن-نیکل به ۴۳/۳۶ dB - در نانو کامپوزیت نانولوله کربنی / آهن - نیکل در ضخامت ۲/۲ mm در فرکانس ۱۱/۹ GHz افزایش یافته است. بنابراین، این نانوساختار به دلیل دارا بودن هیبریدی از دو ترکیب دی الکتریکی (نانولوله کربنی) و مغناطیسی (الیاز آهن-نیکل)، گزینه مطلوبی برای جاذب رادار تلقی می گردد.

**کلید واژه ها:** نانو کامپوزیت نانولوله کربنی / آهن - نیکل، پارامترهای الکترومغناطیسی، مقدار اتلاف انعکاسی، جاذب رادار

## Synthesis of Carbon Nanotube/Iron-Nickel Nanocomposite by Reduction in Solution Method as Radar Absorbing Nanostructure

A. R. Zarei\*, H. Pourabdollahi

Malek Ashtar University of Technology, Tehran.

(Received: 15/07/2017; Accepted: 08/10/2017)

### Abstract

In this study, the nanocomposite of carbon nanotube/iron-nickel was synthesized. Phase studies and morphology of the synthesized sample were analyzed using X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM), respectively. Also, the electromagnetic parameters of the synthesized samples were evaluated using analytical network vector (VNA) in the X-band radar range. In iron-nickel nanoalloy the bandwidth of  $RL < -10$  dB, is approximately 2.5 GHz and the bandwidth of  $RL < -20$  dB is 11.3-11.9 GHz. However, for carbon nanotube/iron-nickel nanocomposite, the bandwidth of  $RL < -10$  dB (90% absorption of incident waves) comprises the entire frequency range, and maximum effective absorption bandwidth ( $RL < -20$  dB) (99% absorption of incident waves) is approximately equal to 3GHz. The minimum reflection loss was increased from -38.14 dB in the thickness of 2.8 mm at a frequency of 11.6 GHz for nickel-nickel nano-alloy to -43.36 dB in carbon nanotube / iron-nickel nanocomposite in a thickness of 2.2 mm at a frequency of 9.9 GHz. Therefore, this nanostructure due to the hybrid of two compounds of dielectric component (carbon nanotube) and magnetic component (iron-nickel nanoalloy) is considered to be the preferred option for radar absorption.

**Keywords:** Carbon Nanotube/ Iron-Nickel Nanocomposite, Electromagnetic Parameters, Reflection Loss, Radar Absorbing.

## ۱. مقدمه

طراحی یک شبکه توزیع شده اتلافی که امپدانس فضای آزاد را به امپدانس بدنه رسانایی که قرار است حفاظت شود، تطبیق می‌دهد. معمولاً اثرات ناشی از همه مکانیزم‌های اتلاف مختلف را توسط دو عامل گذردهی الکتریکی ( $\epsilon$ ) و نفوذ پذیری مغناطیسی ( $\mu$ ) طبقه بندی می‌نمایند.

مواد جاذب امواج الکترومغناطیسی بر پایه این واقعیت استوار هستند که موج الکترومغناطیسی که از درون آنها عبور می‌کند را جذب می‌نمایند. چنین موادی دارای اندیس شکست مختلط می‌باشند. در اندیس شکست که شامل اثرات مغناطیسی و الکتریکی است، جزء موهومی مقدار اتلاف در ماده را بیان می‌نماید. گذردهی الکتریکی مختلط و نفوذپذیری مغناطیسی مختلط با معادلات زیر بیان می‌شود:

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

$$\mu = \mu' - j\mu''$$

که جزء حقیقی (انرژی ذخیره شده) هر پارامتر با پرایم و جزء مجازی (انرژی از دست رفته) با دو پرایم مشخص شده است. از آنجایی که ضریب هدایت الکتریکی جاذبهای الکتریکی یا همان  $\sigma$  اغلب مکانیزم اصلی از دست رفتن انرژی است متداول است که اثر ضریب هدایت را بر مبنای  $\epsilon''$  بیان می‌نمایند:

$$\epsilon'' = \sigma / \omega \epsilon_0 \quad (2)$$

که در آن  $\omega$  فرکانس زاویه ای است. به طور معادل در دستگاه مختصات قطبی خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \epsilon_r &= |\epsilon_r| e^{i\delta} \\ \mu_r &= |\mu_r| e^{i\delta_m} \end{aligned} \quad (3)$$

که مقادیر  $\delta_m$  و  $\delta$  تانژانتهای اتلاف مغناطیسی و الکتریکی می‌باشند. اندیس شکست  $n$  نیز عبارتست از نسبت عدد موج مربوط به انتشار موج در داخل یک ماده به عدد موج فضای آزاد و از طرف دیگر میانگین هندسی گذردهی الکتریکی نسبی و نفوذپذیری مغناطیسی نسبی می‌باشد:

$$n = k / k_0 = \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \quad (4)$$

که در آن  $k$  عدد موج در ماده بوده و  $k_0$  عدد موج فضای آزاد است. گذردهی الکتریکی نسبی و نفوذ پذیری مغناطیسی نسبی از طرف امپدانس ذاتی ماده  $Z$  را نیز تعریف می‌نماید:

$$Z = Z_0 \sqrt{\mu_r / \epsilon_r} \quad (5)$$

در سال‌های اخیر، به علت استفاده بسیار از امواج الکترومغناطیس، توجه به این تکنولوژی به طور چشمگیری افزایش یافته است [۱-۲]. امواج رادار امواج الکترومغناطیس در ناحیه ایکس و در رنج ۸/۲-۱۲/۴ GHz است.

رایج ترین روش برای استتار و حرکت پنهان در برابر رادارها، کاهش سطح مقطع راداری<sup>۱</sup> (RCS) اهداف تحت نظارت آنهاست. مهمترین و ساده‌ترین روش برای کاهش سطح مقطع راداری، استفاده از مواد جاذب امواج رادار است. تحقیقات بر روی جاذب های امواج الکترومغناطیس در سال ۱۹۳۰ شروع شد و همچنان ادامه دارد [۳]. در واقع نقش اصلی مواد جاذب رادار اینست که امواج و سیگنال‌های رسیده از طرف رادار را همانند یک مقاومت الکتریکی کوچک، جذب و از بازتاب آنها جلوگیری می‌کند. به طور کلی مواد جاذب رادار، از دیدگاه اجزا سازنده در ۲ دسته مواد جاذب دی الکتریک و مواد جاذب مغناطیسی طبقه بندی می‌شوند.

مواد جاذب به طور عمده با سه مکانیسم ۱- اتلاف دی الکتریکی، ۲- اتلاف مغناطیسی و ۳- ساختار فراکتال مواد<sup>۲</sup> امواج الکترومغناطیس را جذب کرده و سپس امواج را به گرما تبدیل می‌نمایند. بنابراین مواد جاذب راداری باعث ایجاد تطابق امپدانس بین محیط جاذب و هوا با هماهنگی مناسب بین گذردهی الکتریکی و نفوذ پذیری مغناطیسی می‌شوند [۴-۵].

برپایه خصوصیات دی الکتریکی و مغناطیسی جاذبها می‌توانند شامل مواد فرومغناطیس، مواد برپایه کربن و پلیمرهای رسانا باشند. از خصوصیات کلی جاذب ها اینست که باید دارای وزن سبک، قابلیت جذب بسیار خوب، پهنای باند فرکانسی بالا و نیز ضخامت کم باشند. برخی مکانیسم‌ها که نفوذپذیری مغناطیسی را افزایش می‌دهند و باعث اتلاف مغناطیسی می‌گردند، شامل جریان‌های گردابی، آنیزوتروپی مغناطیسی، پسماند مغناطیس و رزونانس طبیعی است. مکانیسم‌هایی که باعث اتلاف دی الکتریکی شده و گذردهی الکتریکی را ارتقاء می‌دهند، فرآیندهای قطبش، آسایش الکترونی طبیعی و اتلاف رسانایی است [۷-۸].

پارامترهای الکترومغناطیسی در طراحی ماده جاذب امواج میکروویو به طور عمده بر تولید و چیدمان مواد دی الکتریک و مواد مغناطیسی تمرکز می‌نمایند که باعث ایجاد یک پروفیل امپدانس مشخص نسبت به موج فرودی می‌شود. در واقع طراحی ماده جاذب امواج الکترومغناطیسی به طور ساده عبارت است از

<sup>1</sup> Radar Cross-Section (RCS)

<sup>2</sup> Fractal Structure Materials

جاذب‌های راداری شده است. ککیانگ<sup>۱</sup> حه<sup>۱</sup> و همکارانش [۱۳] کامپوزیت CNT/BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> را تهیه کردند. این کامپوزیت در ضخامت ۳ mm دارای اتلاف انعکاسی ۳۰/۷۹dB- در فرکانس ۱۰/۵GHz بود. هاییان<sup>۲</sup> [۱۴] اقدام به تهیه نانوکامپوزیتی از نانولوله‌های کربنی که با آهن پر شده بود، کرد که دارای اتلاف انعکاسی ۲۲/۷۳dB- در ضخامت ۳/۵mm و فرکانس ۱۵/۶۰GHz است. علی قاسمی [۱۵] کامپوزیت Strontium/CNT را با اتلاف انعکاسی ۲۹dB- در ضخامت ۱/۵mm و فرکانس ۹/۷GHz تهیه نمود. حکمت آرا [۱۶] نیز اقدام به تهیه ترکیب هیبریدی MWCNT/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> نمود که در فرکانس ۱۰/۶GHz دارای اتلاف انعکاسی ۲۷ dB- بود.

از روش‌های تهیه نانوذرات میکرومولسیون، سل-ژل را می‌توان نام برد. همچنین از روش‌های تهیه نانوکامپوزیت‌های حاوی نانولوله‌های کربنی به همراه ترکیبات مغناطیسی می‌توان به روش‌های ترسیب شیمیایی بخار و نیز کاهش شیمیایی اشاره کرد. روش احیای شیمیایی نمک‌های فلزی در یک محلول با استفاده از یک عامل کاهنده مناسب نظیر H<sub>2</sub> و NaBH<sub>4</sub> یکی از پرکاربردترین روش‌های سنتز نانو ذرات فلزی است. این روش برای سنتز نانو ذرات دوفلزی نیز می‌تواند استفاده شود، که جهت تولید آن‌ها از دو نمک فلزی استفاده و کاهیده می‌شود. در طول پروسه کاهش، انواع فلزات با پتانسیل کاهش بالاتر اول کاهش می‌یابند و تشکیل یک هسته را می‌دهند و در ادامه فلز دیگر به صورت یک لایه روی هسته را می‌پوشاند. در مقایسه با سنتز نانو ذرات یک فلزی، کنترل همزمان هسته‌زایی و پروسه کاهش دو نوع فلز با پتانسیل کاهش مختلف و مشخصات شیمیایی مختلف بسیار مشکل است. وانگ و لی<sup>۳</sup> برای حل این مشکل انتخاب یک عامل کاهنده مناسب را پیشنهاد کردند [۱۸-۱۷].

در این پژوهش، از روش احیای در محلول به دلیل سادگی و مقرون به صرفه بودن برای تهیه نانوکامپوزیت نانولوله کربنی اصلاح شده با نانوالیاز آهن-نیکل استفاده شده است. همچنین مورفولوژی و ساختار و نیز همچنین خواص الکترومغناطیسی آن به عنوان جاذب برای امواج الکترومغناطیسی در ناحیه راداری استفاده گردیده است.

## ۱. روش تحقیق

### ۱-۲. مواد اولیه

Fe(Cl)<sub>2</sub> · 6H<sub>2</sub>O، Ni(acetate)<sub>2</sub> · 4H<sub>2</sub>O و NaBH<sub>4</sub> از شرکت مرک آلمان تهیه شد. نانو لوله کربن چند دیواره نیز با قطر بیرونی

که Z<sub>0</sub> امپدانس فضای آزاد می‌باشد که برابر ۳۳۷Ω یا ۱۲۰π می‌باشد. امپدانس نرمالایز شده می‌تواند برای محاسبه ضریب انعکاس مواد جاذب مورد استفاده قرار گیرد. هدف در طراحی یک ماده جاذب امواج الکترومغناطیسی تولید ماده‌ای است که در آن ضریب انعکاس تا جایی که ممکن است در بیشترین پهنای فرکانس ممکن کوچک باقی بماند.

جهت دستیابی به جاذب‌های جدید، تلاش‌های زیادی صورت گرفته که جاذب‌هایی با ساختار ترکیبی دی الکترونیک-مغناطیسی برای توازن بین پارامترهای الکترومغناطیسی برای رسیدن به مقادیر مطلوب در اتلاف انعکاسی تهیه گردد [۹]. بنابراین، برای بهبودی جذب، نانو ساختارهای جاذب راداری به صورت هیبریدی از ترکیبات مغناطیسی و دی الکترونیک تهیه می‌شوند زیرا جاذب‌های مغناطیسی دارای وزن سنگین و جاذب‌های دی الکترونیک دارای پهنای جذبی باریک هستند برای فائق آمدن بر این دو مشکل در ساخت جاذب‌ها از حضور هر دو نوع جاذب در کنار هم استفاده می‌شوند [۱۰].

نانوکامپوزیت‌هایی که شامل ترکیبی از نانولوله‌های کربنی و مواد معدنی (ترکیبات عناصر مغناطیسی) هستند تطابق امپدانس بالاتری داشته و در نتیجه باعث بهبودی در اتلاف انعکاسی می‌گردند [۱۱]. خواص جذبی نانوالیازهای فلزی جاذب الکترومغناطیسی بهتر از فلزهای خالص یا اکسیدهای فلزی است. در میان نانوالیازهای متنوع، نانوالیاز آهن- نیکل کاربرد گسترده‌ای به عنوان جاذب‌های امواج الکترومغناطیسی، سنسورهای مغناطیسی، آنتن‌ها، کاتالیست‌ها و سیستم‌های ثبات مغناطیسی به دلیل ساختار پایدار و خواص الکترومغناطیسی فوق العاده و نیز نفوذ پذیری مغناطیسی بالا، داراست.

نانولوله‌های کربنی دارای وزن کم و نیز اتلاف دی الکترونیک بسیار خوب هستند ولی به دلیل خواص مغناطیسی پایین، کاربرد محدودی در زمینه استفاده به عنوان جاذب راداری دارند. نانولوله‌های اغلب با مواد مغناطیسی پوشش داده می‌شوند. بدین صورت که با ترکیبات فرامغناطیسی یا سوپرپارامغناطیسی پوشش داده می‌شوند تا این ترکیبات به عنوان فیلر به نانولوله‌های کربنی اضافه می‌شوند تا خواص مغناطیسی آن‌ها اصلاح گردد [۱۲].

بنابراین نانو ساختارهای حاوی نانولوله‌های کربنی اصلاح شده با نانوالیاز آهن- نیکل دارای مواد جاذب امواج الکترومغناطیسی با پتانسیل جذبی بالا و نیز پهنای باند جذبی خوب به سبب داشتن اتلاف دی الکترونیک بسیار و اتلاف مغناطیسی بالا هستند. تحقیقات گسترده‌ای در زمینه ساخت و بررسی خواص جذبی

<sup>1</sup> Keqiang He

<sup>2</sup> Haiyan

<sup>3</sup> Wang and Li

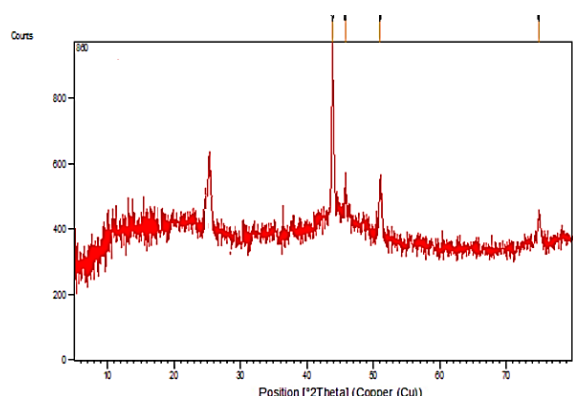
۸-۱۵ nm آماده گردید.

(۸/۲-۱۲/۴ GHz)، پس از آماده سازی نمونه ها در ابعاد  $2\text{mm} \times 1.6\text{mm} \times 1.0\text{mm}$  به گونه ای که به میزان ۴۰٪ پودر در زمینه پارافین به طور کامل پخش شده بود، از دستگاه 8510C Vector Network Analyzer (VNA) Agilent استفاده شد.

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳-۱. بررسی فازی (XRD)

شکل (۱) الگوی بدست آمده از سنجش XRD را نشان می دهد. همانطور که در شکل ۱ که الگوی پراش اشعه ایکس نانو کامپوزیت نانولوله کربنی/ آهن- نیکل است، مشاهده می شود، الگوی پراش اشعه ایکس سه پیک مهم با الگوهای (۱۱۱)، (۲۰۰) و (۲۲۰) مربوط به ساختار کریستالی مکعبی نانوالیاز آهن- نیکل هستند که در  $44/6^\circ$  و  $64/9^\circ$  و  $82/3^\circ = 2\theta$  به دست آمده است. همچنین حضور فاز ثانویه آهن نیز در شکل مشاهده می شود. در شکل (۱) علاوه بر پیک های ساختار کریستالی مکعبی نانوالیاز آهن- نیکل، پیک کربن در  $26/4^\circ = 2\theta$  قابل مشاهده است. این امر در توافق خوبی با سایر پژوهش های صورت گرفته است [۱۵].



شکل ۱. الگوی پراش اشعه ایکس نانو کامپوزیت نانولوله کربنی/ آهن - نیکل

#### ۳-۲. بررسی مورفولوژی با SEM

برای بررسی ابعاد نانو ذرات در نانوله های کربنی اصلاح شده، سنجش SEM انجام شد و تصاویر حاصله با استفاده از نرم افزار (Digimizer version 4.1.1.0) سنجش شد. شکل (۲) تصویر نانو ذرات تهیه شده، نمودار فراوانی توزیع ذرات بر حسب قطر آن ها هیستوگرام و آنالیز EDS این ذرات را نشان می دهد. همان گونه که در شکل (۲) مشاهده می شود، مورفولوژی نانو ذرات تثبیت شده به صورت کروی و زنجیر مانند می باشد که حالت زنجیری و به هم پیوسته نشان دهنده تاثیر مغناطیسی نانو ذرات به روی یکدیگر می باشد و نتایج حاصل از آنالیز EDS (شکل ۲-ج) نشان

#### ۳-۲. سنتز نانو کامپوزیت نانولوله کربنی/ آهن - نیکل

به منظور سنتز نانو کامپوزیت نانولوله کربنی/ آهن - نیکل با درصد فلز نانولوله کربنی متفاوت، نانوذرات نانوالیاز آهن - نیکل ۱۰٪ را به عنوان نانوالیاز به درصد بهینه نیکل را انتخاب و درصدهای متفاوت نانولوله کربنی با آن وارد تهیه نانوکامپوزیت مربوطه می شود. درصدهای ۵/۱، ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد از نانولوله کربنی را انتخاب کرده و در حضور نانوالیاز آهن- نیکل ۱۰٪ فرآیند تشکیل نانوکامپوزیت را تهیه می گردد. به عنوان مثال برای تهیه نانوکامپوزیت با ۲۰٪ نانولوله کربنی ابتدا مقدار ۰/۱۲ گرم از نانولوله های کربنی را به ۱۰۰ میلی لیتر آب دیونیزه اضافه و تحت امواج اولتراسونیک قرار می گیرد، سپس آن را در یک بالون سه دهانه قرار داده سپس از آن به مدت نیم ساعت گاز نیتروژن عبور داده و سپس ۱ گرم آهن (II) کلراید چهار آبه و مقدار ۰/۲۴۶ گرم از نمک نیکل (II) استات شش آبه را به آن افزوده و بعد از نیم ساعت عبور گاز نیتروژن، به طور آهسته و طی مدت زمان ۲ ساعت، ۵۰ میلی لیتر محلول یک مولار سدیم بورهیدرید تازه تهیه شده قطره قطره به محلول قبلی افزوده گردید. بعد از کامل شدن فرآیند سنتز، نانوکامپوزیت در داخل ظرف نمونه شیشه ای کاملاً بسته، جمع آوری و نگهداری شدند.

به منظور انجام آنالیز های مشخصه یابی، نانوکامپوزیت با استفاده از مگنت جدا شده و سه مرتبه با آب دوبار تقطیر و دو مرتبه با استفاده از الکل ۹۸٪ شستشو داده شد و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه در آن خلاء خشک گردید. مشخصه یابی نانو ذرات خشک شده با استفاده از آنالیز های میکروسکوپ الکترونی و پراش پرتوی ایکس استفاده شد. به منظور اندازه گیری ویژگی های الکترومغناطیسی نمونه تهیه شده، پودرهای نمونه با پارافین به نسبت وزنی ۷۰ به ۳۰ تهیه شد. پس از قالب گیری در موجر باند X به منظور ارزیابی خواص الکترومغناطیسی توسط دستگاه پردازش گر شبکه مورد آنالیز قرار گرفت.

#### ۳-۲. بررسی خواص نانو کامپوزیت نانولوله کربنی/ آهن - نیکل

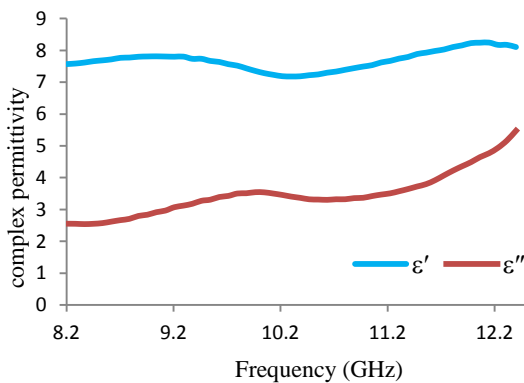
نمودارهای XRD با استفاده از دستگاه Philips 1800 PW باتابش  $0.15418\text{nm}$  (Cu K $\alpha$ ) و عملکرد در 40kV و 30mA در محدوده  $70^\circ\text{C}$  -  $10^\circ\text{C}$  بررسی شد. جهت بررسی مورفولوژی پودر از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM) مدل Hitachi S4160 (Cold Field Emission) استفاده شد.

میزان جذب امواج مایکروویو در محدوده باندهای X

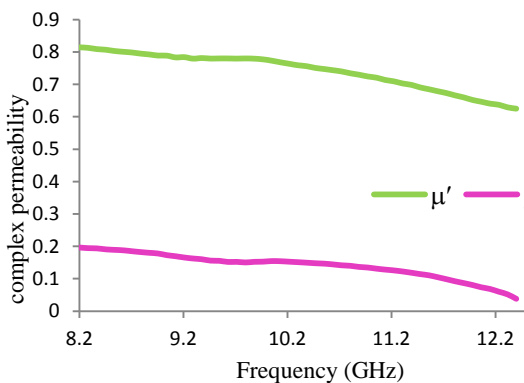
بالا، فرکانس تشدید مغناطیسی و مغناطش بالا و نانولوله‌های کربنی به سبب خواص دی‌الکتریکی مناسب به عنوان جاذب‌های امواج مایکروویو در محدوده ۸/۲-۱۲/۴ GHz مورد توجه قرار گرفته‌اند. در نتیجه نانوکامپوزیت حاصل به دلیل داشتن دو ترکیب با اتلاف دی‌الکتریک و اتلاف مغناطیسی می‌تواند دارای امتیاز ویژه برای انتخاب به عنوان جاذب امواج مایکروویو باشد.

نفوذپذیری مغناطیسی مختلط ( $\mu = \mu' - j\mu''$ ) و گذردهی الکتریکی مختلط ( $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$ ) عوامل اصلی در تعیین خواص الکترومغناطیسی به شمار می‌روند. برای بررسی خواص الکترومغناطیسی تغییرات این دو پارامتر با فرکانس مورد ارزیابی قرار گرفت.

شکل‌های (۳) تا (۶)، تغییرات نفوذپذیری مغناطیسی مختلط و گذردهی الکتریکی مختلط را برای نانوالیاز آهن- نیکل و نیز نانو کامپوزیت نانولوله کربنی / آهن - نیکل با زمینه پارافین با نسبت ۳ به ۱ در محدوده فرکانسی ۸/۲-۱۲/۴ GHz نشان می‌دهد.

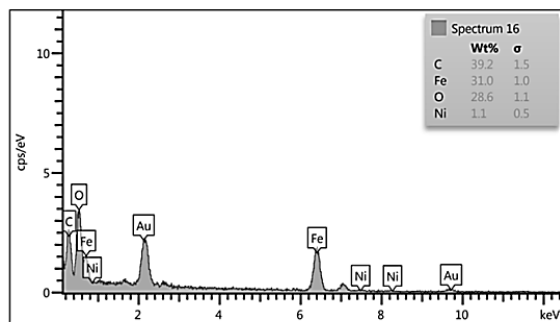
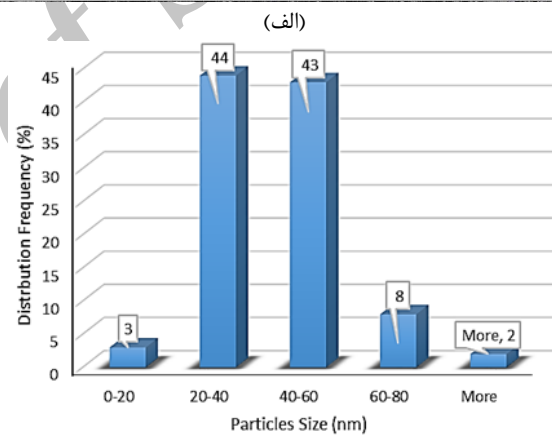
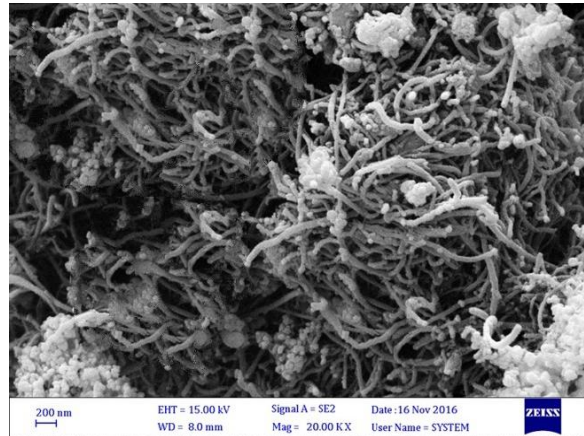


شکل ۳. منحنی‌های تغییرات مقادیر گذردهی الکتریکی مختلط برحسب فرکانس نانوالیاز آهن- نیکل



شکل ۴. منحنی‌های تغییرات مقادیر نفوذپذیری مغناطیسی مختلط برحسب فرکانس نانوالیاز آهن- نیکل

دهنده حضور ذرات نانو آهن - نیکل به روی سطح و داخل لوله‌های نانولوله‌های کربنی باشد. با توجه به این نتایج حاصل شده از شکل (۲) و رسم هیستوگرام مربوطه، مشاهده می‌شود که حدود ۸۷ درصد از نانو ذرات سنتز شده در بازه ۶۰-۲۰ nm هستند.



شکل ۲. الف) تصاویر SEM ب) نمودار فراوانی توزیع ذرات بر حسب قطر (هیستوگرام) ج) آنالیز EDS نانو کامپوزیت نانولوله کربنی / آهن - نیکل

۳-۴. بررسی خواص جذب امواج مایکروویو نانوالیاز آهن- نیکل به دلیل داشتن ضریب تراوایی مغناطیسی

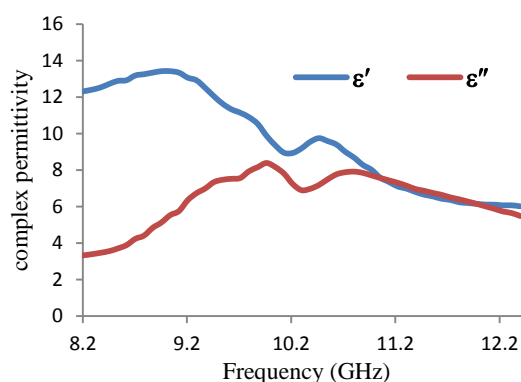
و ۰/۸۲ است (شکل ۶).

مکانیسم اتلاف دی‌الکتریک، قطبش بار می‌باشد که بین نانوذرات رخ می‌دهد و باعث فرآیندهای آسایشی می‌گردد، که برای نانوکامپوزیت چندین بار بزرگتر از نانوالیاز آهن - نیکل است. در نانو کامپوزیت نانولوله کربنی/ آهن - نیکل به علت حضور کربن که یک ماده دی‌الکتریک است، مقادیر گذردهی الکتریکی دارای اعداد بالاتری به نانوالیاز آهن - نیکل است. در هسته‌های نانوالیاز آهن - نیکل یک فرآیند آسایشی اتفاق می‌افتد که باعث افزایش مقاومت الکتریکی می‌شود. در نانو کامپوزیت نانولوله کربنی/ آهن - نیکل دارای آسایش دی‌الکتریک کربن است که در این نانوکامپوزیت به دلیل ساختاری که در فصل مشترک بین آلیاز آهن - نیکل و نانولوله کربنی اتفاق می‌افتد، آسایش بین سطحی اضافی وجود دارد. افزایش قسمت حقیقی گذردهی الکتریکی نسبت داده می‌شود به قطبش در سطح مشترک در فضای بارهای الکتریکی که در سطح مشترک کربن و فلز و نیز ماده عایق مورد استفاده در زمینه یعنی پارافین استفاده می‌شود. این قطبش بین اجزاء در مساحت سطح بزرگی اتفاق می‌افتد که باعث افزایش فرآیند قطبش می‌گردد. همچنین افزایش قسمت موهومی گذردهی الکتریکی مختلط ( $\epsilon''$ ) در نانوکامپوزیت آهن کربونیل - کربن نسبت به ذرات آهن کربونیل به سبب اتلاف قطبش آسایشی و نیز اتلاف هدایت الکتریکی می‌باشد. اتلاف مغناطیسی به طور عمده شامل رزونانس مغناطیسی، اتلاف جریان گردابی و پسماند مغناطیسی است. مکانیسم اتلاف مغناطیسی در این نانوکامپوزیت و نانوالیاز رزونانس مغناطیسی طبیعی ماده است. افزایش آنیزوتروپی سطحی در نانوذرات باعث تولید سهم اصلی در فرکانس رزونانس طبیعی است. به علت اختلاف در اندازه ذرات، آنیزوتروپی سطحی در نانوکامپوزیت کمی بیشتر از نانو آلیاز آهن - نیکل است. میزان اتلاف انعکاس یک ماده جاذب امواج الکترومغناطیس تحت برخورد عمودی و با پشتی فلزی با توجه به مقدار امیدانس ورودی آن طبق نظریه خطوط انتقال با فرمول زیر مشخص می‌شود که  $Z_{in}$  توسط معادله زیر به پارامترهای مغناطیسی ماده جاذب ارتباط پیدا می‌کند [۱۹].

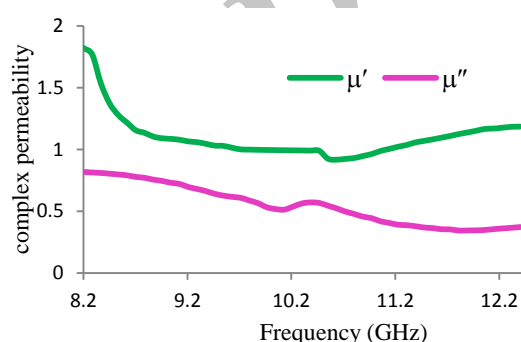
$$R(\text{dB}) = 20 \log \left| \frac{Z_{in} - 1}{Z_{in} + 1} \right| \quad (۶)$$

$$Z_{in} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh \left[ j \left( \frac{2\pi}{c} \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \right) f \cdot d \right] \quad (۷)$$

که در آن،  $\mu_r$  و  $\epsilon_r$  به ترتیب نفوذپذیری مغناطیسی و گذردهی الکتریکی محیط جاذب، C سرعت نور در هوای آزاد، f فرکانس و d ضخامت لایه جاذب است. شکل (۷) نشان‌دهنده



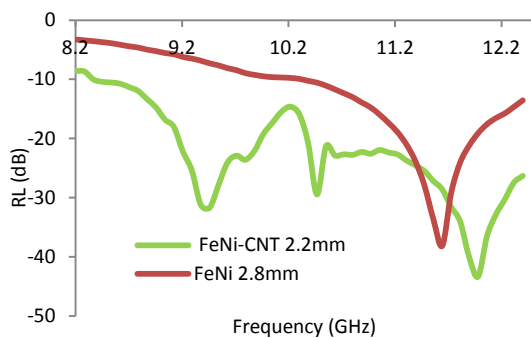
شکل ۵. منحنی‌های تغییرات مقادیر گذردهی الکتریکی مختلط برحسب فرکانس نانو کامپوزیت نانولوله کربنی/ آهن - نیکل



شکل ۶. منحنی‌های تغییرات مقادیر نفوذپذیری مغناطیسی مختلط برحسب فرکانس نانو کامپوزیت نانولوله کربنی/ آهن - نیکل

همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود در نانوالیاز آهن - نیکل قسمت حقیقی گذردهی الکتریکی ( $\epsilon'$ ) دارای عدد بیشینه ۸/۲۴ در فرکانس ۱۲/۱ GHz است و قسمت موهومی آن ( $\epsilon''$ ) از در این محدوده فرکانسی دارای روند صعودی از ۲/۵۵ تا ۵/۴۷ است. قسمت حقیقی ( $\mu'$ ) و موهومی ( $\mu''$ ) در نفوذپذیری مغناطیسی مختلط، دارای روند ثابت در محدوده فرکانس باند X بوده که عدد بیشینه برای قسمت حقیقی و قسمت موهومی به ترتیب ۰/۸۱ و ۰/۱۹ است (شکل ۴).

در مورد نانو کامپوزیت نانولوله کربنی/ آهن - نیکل قسمت حقیقی گذردهی الکتریکی ( $\epsilon'$ ) دارای دو پیک بیشینه با مقدار ۱۳/۴۱ در فرکانس ۹/۰ GHz و مقدار ۹/۵۵ در فرکانس ۱۰/۴ و به طور کل در این محدوده فرکانس روند نزولی دارد (شکل ۵). همان‌طور که از شکل (۵) پیداست، قسمت موهومی گذردهی الکتریکی ( $\epsilon''$ ) نیز دارای دو پیک بیشینه با مقدار ۸/۱۶ در فرکانس ۹/۸ GHz و مقدار ۷/۸ در فرکانس ۱۰/۷ GHz است. همچنین تغییرات قسمت حقیقی ( $\mu'$ ) و موهومی ( $\mu''$ ) در نفوذپذیری مغناطیسی مختلط، در این محدوده فرکانسی ثابت بوده ولی نسبت به نانوالیاز آهن - نیکل دارای مقادیر بالاتری است. نانو کامپوزیت نانولوله کربنی/ آهن - نیکل عدد بیشینه برای قسمت حقیقی ( $\mu'$ ) و قسمت موهومی ( $\mu''$ ) به ترتیب ۱/۸۱



شکل ۷. منحنی‌های تغییرات مقادیر اتلاف انعکاسی برحسب فرکانس نانوالیاز آهن- نیکل و نانوکامپوزیت نانولوله کربنی / آهن- نیکل

در نانوکامپوزیت نانولوله کربنی / آهن- نیکل دارای پهنای باند و افت انعکاس بیشتری در ضخامت کمتر است. به همین منظور این مواد به جهت داشتن میدان‌های مغناطیسی بسیار کوچک پهنای باند و افت انعکاسی مناسب به عنوان جاذب الکترومغناطیسی مناسب می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، نانوالیاز آهن - نیکل و نانوکامپوزیت نانولوله کربنی / آهن- نیکل سنتز شد. در جدول (۱) مقادیر خواص الکترومغناطیسی ترکیب سنتز شده با دیگر ترکیبات جاذب رادار در مقالات مورد مقایسه قرار می‌گیرد. نتایج نشان داد که در سطح نانوذرات در نانوکامپوزیت قطبش بین سطحی و پراکندگی چندگانه بود. همچنین در نانوکامپوزیت هر دو عامل اتلاف دی‌الکتریک و اتلاف مغناطیسی هر دو افزایش یافته و در نتیجه این نانساختار پارامترهای الکترومغناطیسی به ویژه مقدار اتلاف انعکاسی بهبود یافته است. نانوکامپوزیت نانولوله کربنی / آهن - نیکل به عنوان جاذب مایکروویو از امتیاز بالایی برخوردار است و گزینه مناسبی می‌باشد.

میزان اتلاف امواج مایکروویو در محدوده فرکانسی باندهای X (۸/۲-۱۲/۴ GHz) مربوط به دو نمونه است. پهنای پیک برای اتلاف انعکاسی زیر ۱۰ dB و زیر ۲۰ dB و نیز ضخامت ترکیب جاذب پارامترهای مؤثر و با اهمیت برای ارزیابی کارایی جاذب امواج الکترومغناطیسی می‌باشد. بنابراین برای خواص جذبی الکترومغناطیسی مطلوب، نانوکامپوزیت نانولوله کربنی / آهن - نیکل با پهنای وسیع عرض پیک جذبی در اتلاف انعکاسی زیر ۱۰ dB و زیر ۲۰ dB در کمترین مقدار ضخامت جاذب مورد طراحی و نیز ساخت قرار گرفت. در مورد نانوالیاز آهن- نیکل دارای عرض پیک زیر ۱۰ dB تقریباً برابر ۲/۵ GHz و عرض پیک آن برای زیر ۲۰ dB در محدوده ۱۱/۳-۱۱/۹ GHz است. اما برای نانوکامپوزیت نانولوله کربنی / آهن - نیکل عرض پیک در اتلاف انعکاسی زیر ۱۰ dB (۹۰٪ جذب امواج فرودی) شامل تمام محدوده فرکانس می‌باشد و عرض پیک در اتلاف انعکاسی زیر ۲۰ dB (۹۹٪ جذب امواج فرودی) تقریباً برابر ۳ GHz است. کمترین مقدار اتلاف انعکاسی از ۳۸/۱۴ dB در ضخامت ۲/۸ mm برای نانوالیاز آهن- نیکل به ۴۳/۳۶ dB در نانوکامپوزیت نانولوله کربنی / آهن- نیکل در ضخامت ۲/۲ mm در ارتقاء یافته است. همانطور که از این مطالب استنباط می‌گردد و تمامی پارامترهای الکترومغناطیسی در نانوکامپوزیت نانولوله کربنی / آهن - نیکل افزایش یافته است. نتایج نشان می‌دهد که اختلاط نانولوله های کربنی در نانوالیاز آهن- نیکل باعث بهبود گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی شده و خواص جذبی مایکروویو را در محدوده فرکانسی ۸/۲-۱۲/۴ GHz که مربوط به تطابق امپدانس است را بهبود بخشیده و بنابراین خواص جاذب الکترومغناطیسی ممتازی را در باند X ارائه می‌دهد. بنابراین، خواص جذبی در این نانوکامپوزیت به علت حضور دو ماده دی الکتریک و مغناطیسی بهبود یافته و این نانساختار جاذب رادار بهتری از نانوالیاز آهن- نیکل است.

جدول ۱. مقایسه خواص الکترومغناطیسی ترکیب سنتز شده در این مقاله با دیگر ترکیبات در مقالات دیگر

مرجع	عرض پیک (RL<-10dB)	اتلاف انعکاسی بهینه (dB)	فرکانس (GHz)	ضخامت (mm)	ترکیبات
[۲۰]	۱	-۱۶/۴۳	۱۰/۳	۱۰	Ce-doped barium hexaferrite
[۲۱]	۲/۵	-۲۶/۵۲	۱۰/۰	۸	Carbonyl iron-graphite
[۲۲]	۲/۹	-۳۱/۵۲	۱۱/۳	۵	BaCe <sub>0.05</sub> Fe <sub>11.95</sub> O <sub>19</sub>
[۱۳]	۴	-۳۰/۷۹	۱۰/۵	۳	barium ferrite/CNT
[۲۳]	۲	-۳۳/۱	۱۰/۸	۲/۵	Graphite-coated Fe
[۲۴]	۲	-۳۳	۹/۱	۲/۱	SiO <sub>2</sub> -coated carbonyl iron/polyimide
	۴	-۴۳/۳۶	۱۱/۹	۲/۲	این تحقیق

## ۵. مراجع

- [13] He, K.; Yu, L.; Sheng, L.; An, K.; Ando, Y.; Zhao, X. "Doping Effect of Single-Wall Carbon Nanotubes on the Microwave Absorption Properties of Nanocrystalline Barium Ferrite"; *J. Appl. Phys.* 2010, 49, 125101.
- [14] Haiyan, L.; Hong Z.; Hongfan G.; Liufang Y.; "Investigation of the Microwave-Absorbing Properties of Fe-Filled Carbon Nanotubes"; *Mater. Lett.* 2007, 61, 3547-3550.
- [15] Ghasemi, A. "Remarkable Influence of Carbon Nanotubes on Microwave Absorption Characteristics of Strontium Ferrite/CNT Nanocomposites"; *J. Magn. Magn. Mater.* 2011, 323, 3133-3137.
- [16] Hekmatara, H.; Seifi, M.; Forooghi, K. "Microwave Absorption Property of Aligned MWCNT/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>"; *J. Magn. Magn. Mater.* 2013, 346, 186-191
- [17] Ferrando, R.; Jellinek, J.; Johnston, R. L. "Nanoalloys: From Theory to Applications of Alloy Clusters and Nanoparticles"; *Chem. Rev.* 2008, 108, 845-910.
- [18] Wang, D.; Li, Y. "Bimetallic Nanocrystals: Liquid-Phase Synthesis and Catalytic Applications"; *Adv. Mater.* 2011, 23, 1044-1060.
- [19] Naito, Y.; Suetake, K. "Application of Ferrite to Electromagnetic Wave Absorber and its Characteristics"; *IEEE Trans. Microwave Theory Technol.* 1971, 19, 65-72.
- [20] Mosleh, Z.; Kameli, P.; Poorbaferani, A.; Ranjbar, M.; Salamati, H. "Structural, Magnetic and Microwave Absorption Properties of Ce-Doped Barium Hexaferrite"; *J. Magn. Magn. Mater.* 2016, 397, 101.
- [21] Xu, Y.; Yan, Z.; Zhang, D. "Microwave Absorbing Property of a Hybrid Absorbent with Carbonyl Irons Coating on the Graphite"; *Appl. Surf. Sci.* 2015, 356, 1032-1038.
- [22] Chang, S.; Kangning, S.; Pengfei, C. J. "Microwave Absorption Properties of Ce-Substituted M-Type Barium Ferrite"; *Magn. Magn. Mater.* 2012, 324, 802-805.
- [23] He, K.; Yu, L.; Sheng, L.; An, K.; Ando, Y.; Zhao, X. "Doping Effect of Single-Wall Carbon Nanotubes on the Microwave Absorption Properties of Nanocrystalline Barium Ferrite"; *J. Appl. Phys.* 2010, 49, 125101.
- [24] Liu, X.; Wing, S.; Sun, Y.; Li, W.; He, Y.; Zhu, G.; Jin, C.; Yan, Q.; Lv, Y.; Lau, S.; Zhao, S. "Influence of a Graphite Shell on the Thermal, Magnetic and Electromagnetic Characteristics of Fe Nanoparticles"; *J. Alloys. Compd.* 2013, 548, 239-244.
- [25] Wang, H.; Zhu, D.; Zhou, W.; Luo, F. "Electromagnetic Property of SiO<sub>2</sub>-Coated Carbonyl Iron/Polyimide Composites as Heat Resistant Microwave Absorbing Materials"; *J. Magn. Magn. Mater.* 2015, 375, 111-116.
- [1] Wu, G.; Cheng, Y.; Ren, Y.; Wang, Y.; Wang, Z.; Wu, H. "Synthesis and Characterization of  $\Gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>@C Nanorod-Carbon Sphere Composite and its Application as Microwave Absorbing Material"; *J. Alloys. Compd.* 2015, 652, 346-350.
- [2] Folgueras, L. D. C.; Alves, M. A.; Rezende, M. C. "Microwave Absorbing Paints and Sheets Based on Carbonyl Iron and Polyaniline Measurement and Simulation of their Properties"; *J. Aerosp. Technol. Manag.* 2010, 2, 63-70.
- [3] Folgueras, L. D. C.; Nohar, E. L.; Faez, R.; Rezende, M. C. "Dielectric Microwave Absorbing Material Processed by Impregnation of Carbon Fiber Fabric with Polyaniline"; *Mater. Res.* 2007, 10, 95-99.
- [4] 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.
- [5] Liu, Y.; Liu, X.; Wang, X. "Double-Layer Microwave Absorber Based on CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Ferrite and Carbonyl Iron Composites"; *J. Alloys. Compd.* 2014, 584, 249-253.
- [6] Yang, Y.; Li, Z. W.; Neo, C. P.; Ding, J. "Model Design on Calculations of Microwave Permeability and Permittivity of Fe/SiO<sub>2</sub> Particles With Core/Shell Structure"; *J. Phys. Chem. Solids* 2014, 75, 230-235.
- [7] 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.
- [8] Yang, H. J.; Cao, W. Q.; Zhang, D. Q.; Su, T. J.; Shi, H. L.; Wang, W. Z.; Yuan, J.; Cao, M. S. "NiO Hierarchical Nanorings on SiC: Enhancing Relaxation to Tune Microwave Absorption at Elevated Temperature"; *Appl. Mater. Interf.* 2015, 7, 7073-7077.
- [9] Widanarto, W.; Rahayu, F. M.; Ghoshal, S. K.; Effendi, M.; Cahyanto W. T. "Impact of ZnO Substitution on Magnetic Response and Microwave Absorption Capability of Strontium-Natural Nanoferrites"; *Results in Physics* 2015, 5, 253-256.
- [10] Liang, C. Y.; Liu, C. Y.; Wang, H.; Wu, L.; Jiang, Z. H.; Xu, Y. J.; Shen, B. Z.; Wang, Z. J. "SiCF<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Dielectric-Magnetic Hybrid Nanowires: Controllable Fabrication, Characterization and Electromagnetic Wave Absorption"; *J. Mater. Chem. A* 2014, 2, 16397-16402.
- [11] 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.
- [12] Bystrzejewsk, M. I.; Karoly, Z.; Szepvolgyi, J.; Kaszuwara, W.; Huczko, A.; Lange, H. "Continuous Synthesis of Carbonencapsulated Magnetic Nanoparticles with a Minimum Production of Amorphous Carbon"; *Carbon* 2009, 47, 2040-2048.