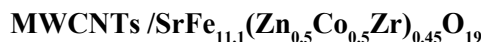


## تهیه، شناسایی و بررسی ویژگی‌های مغناطیسی و جذب مایکروویو نانوجندسازه پلی‌آنیلین /



سعید مرتضوی نیک<sup>۱</sup>، محمد یوسفی<sup>۲\*</sup>، مریم رنجبر<sup>۳</sup>، پرویز آبرومندآذر<sup>۴</sup> و موید حسینی صدر<sup>۵</sup>

۱- دانشجوی دکتری شیمی معدنی، گروه شیمی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- دانشیار شیمی معدنی گروه شیمی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳- دانشیار شیمی معدنی پژوهشکده فناوری‌های شیمیایی، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران

۴- دانشیار شیمی تجزیه گروه شیمی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۵- استاد شیمی معدنی گروه شیمی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

دریافت: مهر ۱۳۹۶، بازنگری: دی ۱۳۹۶، پذیرش: دی ۱۳۹۶

**چکیده:** در این پژوهش، ابتدا نانوذره‌های استرانسیم هگزافریت دوپه شده با کاتیون‌های  $\text{Zn}^{2+}$ ،  $\text{Zr}^{4+}$ ،  $\text{Co}^{2+}$  و فرمول  $\text{SrFe}_{11.1}(\text{Zn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Zr})_{0.45}\text{O}_{19}$  به روش سل ژل خوداحتراقی تهیه، سپس نانوجندسازه سه جزئی پلی‌آنیلین /  $\text{MWCNTs/SrFe}_{11.1}(\text{Zn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Zr})_{0.45}\text{O}_{19}$  به روش اسپارش درجا تهیه شد. بررسی الگوهای پراش پرتو ایکس (XRD) و طیف‌های فروسرخ تبدیل فوریه (FTIR) نمونه‌ها وجود فاز استرانسیم هگزافریت نوع M و همچنین، نانولوله‌های کربنی و پلی‌آنیلین در نمونه‌ها را تأیید کرد. تصویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی میدانی (FESEM) نشان‌دهنده پوشش مناسب ذره‌های هگزافریت و نانولوله‌های کربنی با رشته‌های بسیاری است. ویژگی مغناطیسی نمونه‌ها با استفاده از مغناطیس‌سنج نمونه مرتعش (VSM) اندازه‌گیری شد. به طوری که کمیت‌های مغناطیسی از مغناطیس اشباع (Ms) برابر با  $60 \text{ emu/g}$  و مغناطیس باقیمانده (Mr) برابر با  $30 \text{ emu/g}$  در ذره‌های هگزافریت به ترتیب به مقادیر  $11.5 \text{ emu/g}$  و  $6 \text{ emu/g}$  در نانوجندسازه کاهش یافت. ویژگی جذب مایکروویو نمونه‌ها نیز با آزمون تلفات انعکاس با استفاده از دستگاه تحلیل گر شبکه برداری (VNA) در دمای اتاق اندازه‌گیری شد. این نتایج نشان می‌دهد که نانوجندسازه تهیه شده دارای تلفات انعکاس  $30 \text{ dB}$ - در بسامد  $10.1 \text{ GHz}$  و پهنای باند مناسب در گستره باند X مایکروویو است که توانایی استفاده از این ماده به عنوان جاذب مایکروویو را نشان می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** استرانسیم هگزافریت، پلی‌آنیلین، نانولوله‌های کربنی چنددیواره، جاذب مایکروویو

### مقدمه

هگزافریت در میان این مواد جاذب، به دلیل بالا بودن مغناطیس اشباع، آنیزوتروپی زیاد، مقاومت گرمایی و شیمیایی عالی، توانایی زیادی برای این منظور دارد [۳ تا ۵]. در صورتی که، در شبکه

امروزه مواد جاذب امواج الکترومغناطیس به طور گسترده‌ای توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است [۱ و ۲]. استرانسیم

و به این محلول سید با نسبت مولی یون فلزی به سیتریک اسید ۱ به ۱/۲ افزوده شد. سپس، با استفاده از آمونیاک ۰.۴M pH این محلول به ۷ رسید و سل به دست آمده در دمای ۸۰ °C تبخیر شد تا یک ژل گرانرو به دست آید. با ادامه گرمادهی، عمل سوختن انجام شد و پودر به دست آمده به کوره منتقل شد. دمای کوره با سرعت افزایش دما معادل ۵ °C/min به ۹۰۰ °C رسانده شد. نمونه سه ساعت در این دما قرار داشت تا فاز استرانسیم هگزافریت نوع M با فرمول  $\text{SrFe}_{11.1}(\text{Zn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Zr})_{0.45}\text{O}_{19}$  تشکیل شد. در مرحله دوم، مخلوطی از ۰.۴۵ گرم پودر  $\text{SrFe}_{11.1}(\text{Zn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Zr})_{0.45}\text{O}_{19}$ ، ۰.۰۵ گرم MWCNTs، ۲/۷ میلی لیتر آنیلین در محلول HCl (۱ M) و ۵ میلی لیتر استن تهیه شد. ذره‌های این مخلوط به مدت ۴۰ دقیقه تحت موج فراصوت به طور یکنواخت در محلول اسیدی پخش شد. سپس، محلول ۶/۶۷ گرم آمونیم پرسولفات در HCl (۰.۱ M) به عنوان اکسیدکننده تهیه و به آرامی به مخلوط بالا افزوده شد. واکنش بسیارش از این لحظه آغاز شد و به مدت ۱۸ ساعت در دمای صفر تا ۴ °C ادامه یافت. به این ترتیب، با تشکیل پلی آنیلین در ظرف واکنش، پوشش این ماده بر ذره‌های هگزافریت و MWCNTs انجام شد. مخلوط به دست آمده از این فرایند با آب مقطر، اتانول و ۰.۱ M HCl شسته و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ °C خشک شد.

الگوی پراش پرتو ایکس هگزافریت و نانوجندسازه پلی آنیلین /  $\text{SrFe}_{11.1}(\text{Zn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Zr})_{0.45}\text{O}_{19}$  / MWCNTs با دستگاه (STOE-STADI P) با تابش پرتو Cu-Ka در گستره ۲θ از ۱۰ تا ۸۰° و طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه با استفاده از طیف‌سنج (Thermo-Ni Colet) ۸۷۰۰ در گستره ۴۰۰ تا ۴۰۰۰  $\text{cm}^{-1}$  انجام گرفت. به کمک میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی (Zeiss-sigma VP-۵۰۰) ریخت‌شناسی سطحی نمونه‌ها بررسی و ویژگی‌های مغناطیسی نیز با مغناطیس‌سنج نمونه مرتعش (Kavir magnet) با اعمال میدان مغناطیسی ۱۵- تا ۱۵ kOe در دمای اتاق، اندازه‌گیری شد. در نهایت، برای اندازه‌گیری تلفات انعکاس و جذب مایکروویو این نمونه‌ها، دستگاه

استرانسیم هگزافریت یون‌های  $\text{Fe}^{3+}$  با کاتیون‌های دیگر جانشین شود، این تغییرات بر ویژگی مغناطیسی و الکتریکی این ماده اثر می‌گذارد [۶ تا ۸]. همچنین، نانولوله‌های کربنی چنددیواره (MWCNTS) نیز به دلیل تلفات دی‌الکتریک زیادی که دارند همراه با مواد نانوساختار مغناطیسی، و ویژگی مغناطیسی و الکتریکی جالبی پیدا می‌کنند که برای کاربردهای جذب مایکروویو مناسب هستند [۹ تا ۱۱]. از طرف دیگر، پلی آنیلین نیز به عنوان یک بسیار رسانا با پایداری گرمایی و شیمیایی زیاد، قابلیت جذب امواج الکترومغناطیس را دارد [۱۲ و ۱۳]. بنابراین، ترکیبی از ویژگی‌های استرانسیم هگزافریت با ویژگی مغناطیسی عالی، MWCNTS و پلی آنیلین با ویژگی الکتریکی خوب منجر به تولید نانوجندسازه سه‌جزئی می‌شود که تلفات مغناطیسی و الکتریکی بالایی پیدا می‌کند و توانایی مناسبی برای جذب مایکروویو دارد [۱۴ و ۱۵]. در زمینه نانوجندسازه‌های جاذب مایکروویو پژوهش‌های زیادی انجام شده است که می‌توان به مواردی از قبیل نانولوله کربنی / پلی پیرول /  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  [۱۶]، نانوجندسازه گرافن اکسید کاهش یافته / استرانسیم فریت / پلی آنیلین [۱۷] و نانوجندسازه پلی پیرول / صفحه‌های گرافن /  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{Ni}0.8 \text{Zn}0.2 \text{Fe}_2\text{O}_4$  [۱۸] اشاره کرد. تاکنون، گزارشی بر نانوجندسازه‌های سه‌جزئی شامل پلی آنیلین، MWCNTs و استرانسیم هگزافریت دوپه شده با Zn، Co و Zr ارایه نشده است. در این پژوهش، نانوجندسازه سه‌جزئی پلی آنیلین /  $\text{SrFe}_{11.1}(\text{Zn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Zr})_{0.45}\text{O}_{19}$  / MWCNTs تهیه شد و ویژگی ساختاری، ریخت‌شناسی، مغناطیسی و جذب مایکروویو این ماده مورد بررسی قرار گرفت.

## بخش تجربی

### روش کار

تهیه نانوجندسازه در دو مرحله انجام شد. در مرحله نخست، به منظور تهیه استرانسیم هگزافریت دوپه شده با فرمول  $\text{SrFe}_{11.1}(\text{Zn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Zr})_{0.45}\text{O}_{19}$  مقادارهای استوکیومتری از  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ ،  $\text{ZrO}(\text{NO}_3)_2$ ،  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  و  $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  در آب مقطر حل شدند

که در آن  $d_{hkl}$  فاصله بین صفحه‌های بلوری و  $(h, k, l)$  اندیس‌های میلر هستند. اندازه بلوری ذره‌ها نیز با استفاده از معادله شرر قابل محاسبه است. عامل‌های شبکه برای فرآورده  $\text{SrFe}_{11.1}(\text{Zn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Zr})_{0.45}\text{O}_{19}$  به ترتیب  $a=5.91 \text{ \AA}$  و  $b=23.05 \text{ \AA}$  و متوسط اندازه بلوری ذره‌ها  $70 \text{ nm}$  به دست آمد.

شکل ۱-ب الگوی XRD نانوجندسازه پلی‌آنیلین/MWCNTs/SrFe<sub>11.1</sub>(Zn<sub>0.5</sub>Co<sub>0.5</sub>Zr)<sub>0.45</sub>O<sub>19</sub> را نشان می‌دهد که در آن افزون بر پیک‌های مربوط به استرانسیم هگزافریت، دو پیک پهن در گستره ۲θ بین ۲۰ تا ۳۰° مشاهده می‌شود که پیک‌های مشخصه پلی‌آنیلین و مربوط به زنجیرهای بسیاری متناوب است [۲۰]. همچنین، پیک‌های مربوط به صفحه‌های (۰۰۲) در MWCNTs در گستره ۲θ برابر با ۲۶° ظاهر می‌شود [۹] که البته زیر پیک‌های پلی‌آنیلین پوشیده شده است. الگوی XRD حضور فاز دیگری را نشان نمی‌دهد و تأیید می‌کند که تهیه نانوجندسازه به خوبی انجام شده است.

تحلیل گر شبکه‌برداری (hp-۸۵۱۰) در گستره نوار X بسامد ۸ تا ۱۲.۵ GHz مورد استفاده قرار گرفت.

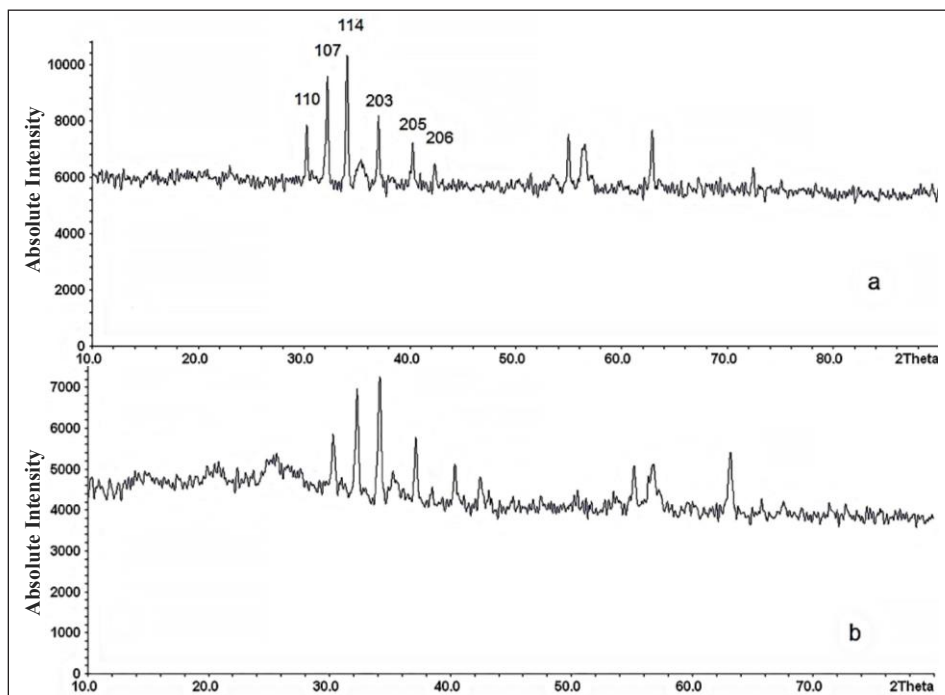
## نتیجه‌ها و بحث

### الگوی XRD

شکل ۱ الگوهای XRD نمونه‌های SrFe<sub>11.1</sub>(Zn<sub>0.5</sub>Co<sub>0.5</sub>Zr)<sub>0.45</sub>O<sub>19</sub> و نانوجندسازه پلی‌آنیلین/MWCNTs/SrFe<sub>11.1</sub>(Zn<sub>0.5</sub>Co<sub>0.5</sub>Zr)<sub>0.45</sub>O<sub>19</sub> را نشان می‌دهد.

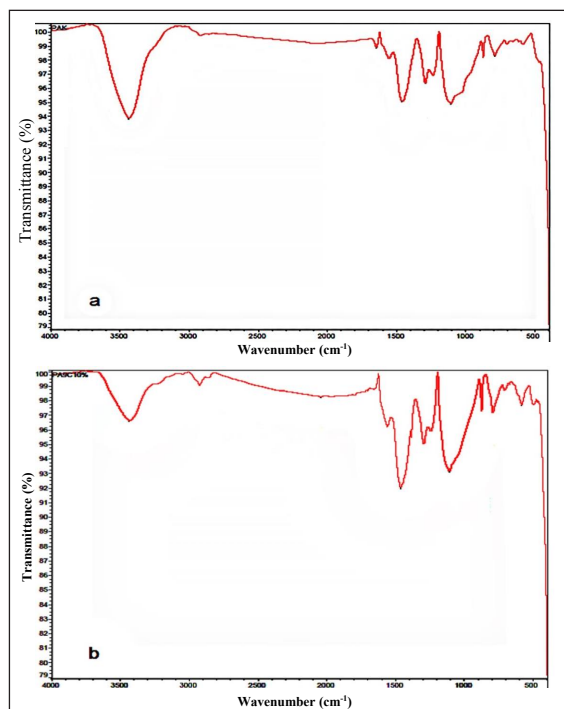
در شکل ۱-ا مکان پیک‌های SrFe<sub>11.1</sub>(Zn<sub>0.5</sub>Co<sub>0.5</sub>Zr)<sub>0.45</sub>O<sub>19</sub> با صفحه‌های (۱۱۰)، (۱۰۷)، (۱۱۴)، (۲۰۳)، (۲۰۵) و (۲۰۶) با فاز استرانسیم هگزافریت نوع M (کارت استاندارد ۱۵۴۳-۰۱-۰۸۴-ICCD) همخوانی دارد. در شبکه هگزائگونال عامل‌های شبکه  $a$  و  $c$  را می‌توان از معادله ۱ محاسبه کرد [۱۹].

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{4(h^2 + hk + k^2)}{3a^2} + \frac{1}{c^2} \quad (1)$$



شکل ۱ الگوی XRD نمونه‌های (a) SrFe<sub>11.1</sub>(Zn<sub>0.5</sub>Co<sub>0.5</sub>Zr)<sub>0.45</sub>O<sub>19</sub> و نانوجندسازه پلی‌آنیلین / MWCNTs/SrFe<sub>11.1</sub>(Zn<sub>0.5</sub>Co<sub>0.5</sub>Zr)<sub>0.45</sub>O<sub>19</sub> (b)

### طیف FTIR

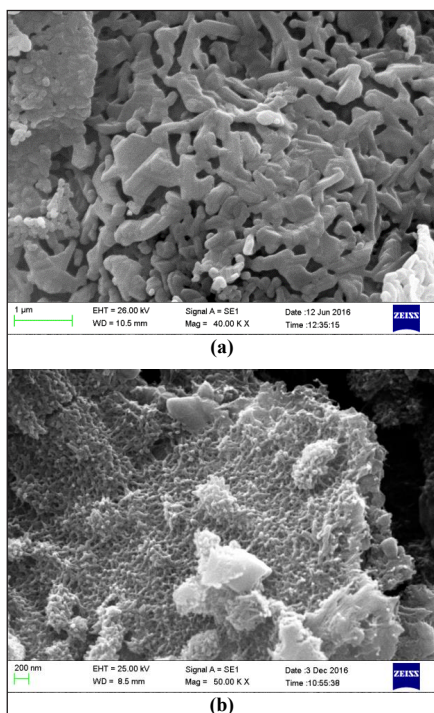


شکل ۲ طیف FTIR نمونه‌های (a) پلی‌انیلین و (b) نانوجندسازه پلی‌انیلین /  $\text{MWCNTs/SrFe}_{11.1}(\text{Zn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Zr})_{0.45}\text{O}_{19}$

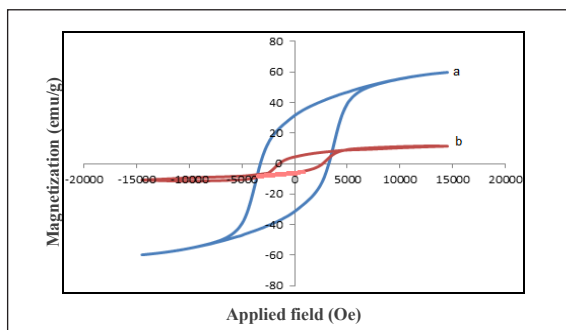
شکل ۲ نشان‌دهنده طیف FTIR پلی‌انیلین و نانوجندسازه پلی‌انیلین /  $\text{MWCNTs/SrFe}_{11.1}(\text{Zn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Zr})_{0.45}\text{O}_{19}$  است. مطابق شکل ۲-a نوارهای جذبی مشخصه پلی‌انیلین در  $1644 \text{ cm}^{-1}$  (ارتعاش کششی پیوند C=C در حلقه بنزنوئیدی)،  $1291 \text{ cm}^{-1}$  (ارتعاش کششی نامتقارن پیوند C-H در حلقه بنزنوئیدی)،  $1108 \text{ cm}^{-1}$  (ارتعاش کششی N= حلقه کوئینوئیدی) و  $791 \text{ cm}^{-1}$  (=N) (ارتعاش خمشی C-H حلقه بنزنوئیدی) مشاهده می‌شود [۲۱]. شکل ۲-b طیف FTIR نانوجندسازه پلی‌انیلین /  $\text{MWCNTs/SrFe}_{11.1}(\text{Zn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Zr})_{0.45}\text{O}_{19}$  را نشان می‌دهد. در این شکل افزون بر نوارهای مشخصه پلی‌انیلین دو نوار جذبی دیگر در  $440 \text{ cm}^{-1}$  و  $584 \text{ cm}^{-1}$  مشاهده می‌شود که مربوط به هگزافریت است. این دو نوار جذبی به ترتیب مربوط به ارتعاش‌های کششی پیوند Fe-O است. یون آهن در حفره‌های چهاروجهی و هشت‌وجهی بین یون‌های اکسید قرار گرفته است [۲۲]. تفاوت این دو نوار جذبی به علت تفاوت طول پیوند Fe-O در حفره‌های چهاروجهی و هشت‌وجهی است. افزون بر این‌ها، نوار جذبی  $1558 \text{ cm}^{-1}$  نیز به ارتعاش کششی پیوند C=C در MWCNTs نسبت داده می‌شود. هنگامی که نانوذره‌های هگزافریت و MWCNTs با پلی‌انیلین پوشش داده می‌شود، محل نوارهای جذبی مربوط به پلی‌انیلین در نانوجندسازه نیز مشابه پلی‌انیلین خالص است، ولی اندکی جابه‌جایی در آن‌ها رخ می‌دهد. این جابه‌جایی به دلیل برقراری پیوند بین پلی‌انیلین و نانوذره‌ها است که در آن همپوشانی بین اوربیتال‌های مولکولی  $\pi$  در پلی‌انیلین و اوربیتال‌های خالی Fe(III) اتفاق می‌افتد. همچنین، امکان پیوند هیدروژنی نیز بین پلی‌انیلین و ذره‌های هگزافریت وجود دارد [۲۳].

### ریخت‌شناسی

شکل ۳ تصاویر FESEM نمونه‌های  $\text{SrFe}_{11.1}(\text{Zn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Zr})_{0.45}\text{O}_{19}$  و نانوجندسازه پلی‌انیلین /  $\text{MWCNTs/SrFe}_{11.1}(\text{Zn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Zr})_{0.45}\text{O}_{19}$  را نشان می‌دهد.



شکل ۳ تصویرهای FESEM نمونه‌های (a)  $\text{SrFe}_{11.1}(\text{Zn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Zr})_{0.45}\text{O}_{19}$  و نانوجندسازه پلی‌انیلین /  $\text{MWCNTs/SrFe}_{11.1}(\text{Zn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Zr})_{0.45}\text{O}_{19}$



شکل ۴ حلقه‌های پسماند نمونه‌های (a)  $\text{SrFe}_{11.1}(\text{Zn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Zr})_{0.45}\text{O}_{19}$  و (b) نانوجندسازه پلی‌آنیلین /  $\text{MWCNTs}/\text{SrFe}_{11.1}(\text{Zn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Zr})_{0.45}\text{O}_{19}$

#### جذب مایکروویو

برپایه نظریه خطوط انتقال، مقدار تلفات انعکاس (RL) یک ماده جاذب از معادله ۳ محاسبه می‌شود.

$$RL = 20 \log \left| \frac{Z_{in} - 1}{Z_{in} + 1} \right| \quad (3)$$

که در آن  $Z_{in}$  امپدانس ورودی است و بر پایه معادله ۴ تعیین می‌شود.

$$Z_{in} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh \left[ j \left( \frac{2\pi f d}{c} \right) \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \right] \quad (4)$$

که در آن  $\mu_r$  نفوذپذیری مغناطیسی،  $\epsilon_r$  عبوردهی الکتریکی، C سرعت نفوذ، d ضخامت لایه جاذب و f بسامد موج الکترومغناطیس است.

در استرانسیم هگزافریت نوع M خالص مقدار بسامد رزونانس مغناطیس  $f_r$  حدود ۴۸ GHz است که مقدار  $f_r$  برپایه معادله ۵ به مقدار آنیزوتروپی این ماده بستگی دارد [۲۸ و ۲۹].

$$f_r = \frac{\gamma}{2\pi} H_a \quad (5)$$

که در آن  $H_a$  میدان آنیزوتروپی و  $\gamma$  ضریب ژیرومغناطیس است.

وقتی که پلی‌آنیلین و MWCNTs به ذره‌های هگزافریت دوپه شده متصل می‌شوند، در نتیجه مقدار آنیزوتروپی و  $f_r$  کاهش می‌یابد و در گستره باند X مایکروویو ۸-۱۲/۵ GHz

شکل ۳-a مربوط به ذره‌های هگزافریت است که البته به دلیل ویژگی‌های مغناطیسی آن‌ها، این ذره‌ها تا حدودی به هم چسبیده‌اند. شکل ۳-b مربوط به نانوجندسازه پلی‌آنیلین /  $\text{MWCNTs}/\text{SrFe}_{11.1}(\text{Zn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Zr})_{0.45}\text{O}_{19}$  است. در این شکل، توزیع ذره‌های هگزافریت و MWCNTs درون بستر بسیاری به روشنی دیده می‌شود و نشان می‌دهد که این نانوذره‌ها به‌طور مؤثری با پلی‌آنیلین پوشیده شده‌اند.

#### ویژگی مغناطیسی

شکل ۴ حلقه‌های پسماند نمونه‌های  $\text{SrFe}_{11.1}(\text{Zn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Zr})_{0.45}\text{O}_{19}$  و نانوجندسازه پلی‌آنیلین /  $\text{MWCNTs}/\text{SrFe}_{11.1}(\text{Zn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Zr})_{0.45}\text{O}_{19}$  را نشان می‌دهد. در نمونه استرانسیم هگزافریت دوپه شده مقادیر مغناطیس اشباع (Ms) برابر با ۶۰ emu/g و مغناطیس باقی‌مانده (Mr) برابر با ۳۰ emu/g است، درحالی‌که مقادیر Ms و Mr برای نانوجندسازه به ترتیب به مقادیر ۱۱،۵ emu/g و ۶ emu/g کاهش یافته است. دلیل این موضوع مربوط به ویژگی‌های غیرمغناطیسی پلی‌آنیلین و MWCNTs موجود در نانوجندسازه است. براین‌پایه، ویژگی مغناطیسی نانوجندسازه را باید به ذره‌های هگزافریت موجود در آن نسبت داد. ویژگی مغناطیس ماده تابع تعداد اسپین‌های هم‌جهت شده در واحد حجم است و مغناطیس اشباع را می‌توان از معادله ۲ محاسبه کرد.

$$Ms = \phi \cdot m_s \quad (2)$$

که در آن  $\phi$  کسر حجمی ذره‌ها و  $m_s$  گشتاور مغناطیسی اشباع یک‌ذره است. بنابراین، وقتی ذره‌های مغناطیسی هگزافریت با پلی‌آنیلین و MWCNTs پیوند برقرار می‌کنند، بر آنیزوتروپی مغناطیسی و همچنین، بر مقدار  $\phi$  اثر می‌گذارد و در نتیجه کاهش مغناطیس اشباع و مغناطیس باقی‌مانده را به دنبال دارد [۲۳ تا ۲۶].

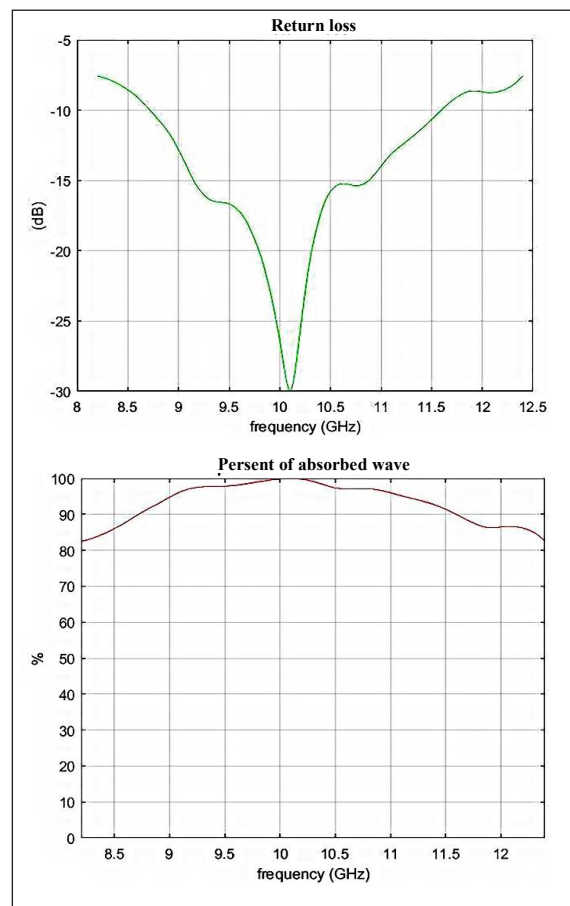
### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، نانوذره‌های  $\text{SrFe}_{11.1}(\text{Zn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Zr})_{0.45}\text{O}_{19}$  و نانوجندسازه سه‌جزئی پلی‌آنیلین /  $\text{MWCNTs}/\text{SrFe}_{11.1}(\text{Zn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Zr})_{0.45}\text{O}_{19}$  تهیه شد و رفتار الکترومغناطیسی این ماده با VNA مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه‌های به‌دست آمده از XRD، FTIR و FESEM نشان می‌دهد که استرانسیم هگزافریت دوپه شده و  $\text{MWCNTs}$  در بستر بسپاری پخش شده و با آن پیوند برقرار کرده است و در اثر این فرایند ویژگی مغناطیسی آن کاهش می‌یابد. اندازه‌گیری تلفات انعکاس نانوجندسازه در گستره بسامد ۸ تا ۱۲٫۵ GHz نشان می‌دهد که RL این ماده در بسامد ۱۰٫۱ GHz معادل -۳۰dB است و پهنای باند آن به‌نسبت جاذب میکروویو به‌کار گرفته شود.

### مراجع

- [1] Luo, J.; Xu, Y.; Mao, H.; J. Magn. Magn. Mater. 381, 365-371, 2015.
- [2] El-Shishtawy, R.M.; Abdel Salam, M.; Gabal, M.A.; Asiri, A.M.; Polym. Compd. 33, 532-639, 2012.
- [3] Meng, P.; Xiong, K.; Ju, K.; Li, Sh.; Xu, G.; J. Magn. Magn. Mater. 385, 407-411, 2015.
- [4] Gordania, Gh. R.; Ghasemi, A.; Saidi, A.; Ceram. Int. 40, 4945-4962, 2014.
- [5] Wang, L.; Yu, H.; Ren, X.; Xu, G.; J. Alloy. compd. 588, 212-216, 2014.
- [6] Baniyadi, A.; Ghasemi A.; Nemati, A.; Azami Ghadikolaei, M.; Paimozd, E.; J. Alloy. compd. 583, 325-328, 2014.
- [7] Meng, P.; Xiong, K.; Wang, L.; Li, Sh.; Cheng, Y.; Xu, G.; J. Alloy. compd. 628, 75-80, 2015.

قرار می‌گیرد. شکل ۵ نمودار تلفات انعکاس RL و درصد جذب میکروویو برحسب بسامد در گستره باند X برای نانوجندسازه پلی‌آنیلین /  $\text{MWCNTs}/\text{SrFe}_{11.1}(\text{Zn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Zr})_{0.45}\text{O}_{19}$  را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار مقدار RL در نانوجندسازه در بسامد ۱۰٫۱ GHz به ۳۰dB رسیده و پهنای باند جذبی نیز در مقادیر جذب بیش از ۹۰٪ در گستره بسامد ۸٫۷ تا ۱۱٫۲ GHz است که به‌نسبت، سراسر باند X را می‌پوشاند. این نتایج نشان می‌دهد که با ترکیبی از استرانسیم هگزافریت دوپه شده با تلفات مغناطیسی بالا و پلی‌آنیلین و  $\text{MWCNTs}$  با تلفات الکتریکی زیاد می‌توان چندانسازه سه‌جزئی با توانایی عالی در جذب امواج الکترومغناطیسی در گستره میکروویو را فراهم کرد.



شکل ۵ نمودار تلفات انعکاس RL و درصد جذب میکروویو برحسب بسامد برای نمونه نانوجندسازه پلی‌آنیلین /  $\text{MWCNTs}/\text{SrFe}_{11.1}(\text{Zn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Zr})_{0.45}\text{O}_{19}$

- [8] Kiani, E.; Rozatian, A.S.H.; Yousefi, M.H.; J. Magn. Magn. Mater. 361, 25-29, 2014.
- [9] Wang, W.; Li, Q.; Chang, Ch.; Synth. Metal. 161, 44-50, 2011.
- [10] Ghasemi, A.; J. Magn. Magn. Mater. 323, 3133-3137, 2011.
- [11] Ghasemi, A.; J. Magn. Magn. Mater. 324, 1080-1083, 2012.
- [12] Ting, T.H.; Wu, K.H.; J. Magn. Magn. Mater. 322, 2160-2166, 2010.
- [13] Ben Ghzaïel, T.; Dhaoui, W.; Schoenstein, F.; Talbot, Ph.; Mazaleyrat, F.; J. Alloy. compd. 692, 774-786, 2017.
- [14] Afghahi, S.S.S.; Peymanfar, R.; Javan-shir, Sh.; Atassic, Y.; Jafarian, M.; J. Magn. Magn. Mater. 423, 152-157, 2017.
- [15] Li, Y.; Huang, Y.; Qi, Sh.; Niu, L.; Zhang, Y.; Wu, Y.; App. Sur. Sci. 258, 3659-3666, 2012.
- [16] Yang, R.B.; Reddy, P.M.; Chang, C.J.; Chen, P.A.; Chen, J.K.; Chang, C.C.; Chem. Eng. J., 285, 497-507, 2016.
- [17] Luo, J.; Shen, P.; Yao, W.; Jiang, C.; Xu, J.; Nanoscale Res. Lett. 11, 141-154, 2016.
- [18] Wang, Y.; Huang, Y.; Ding, J.; Synt. Metal. 196, 125-130, 2014.
- [19] Alam, R.S.; Moradi, M.; Nikmanesh, H.; Ventura, J.; Rostami, M.; J. Magn. Magn. Mater., 402, 20-27, 2016.
- [20] Xu, F.; Maa, L.; Gan, M.; Tang, J.; Li, Z.; Zheng, J.; Zhang, J.; Xie, S.; Yin, H.; Shen, X.; Hua, J.; Zhang, F.; J. Alloy. compd. 593, 24-29, 2014.
- [21] Ezzati, S. N.; Rabbani, M.; Leblanc, R.M.; Asadi, E.; Ezzati, S. M. H.; Rahimi, R.; Deilami, S. A.; J. Alloy. compd. 646, 1157-1164, 2015.
- [22] Mosleh, Z.; Kameli, P.; Poorbaferani, A.; Ranjbar, M.; Salamati, H.; J. Magn. Magn. Mater. 397, 101-107, 2016.
- [23] Yuan, C.L.; Hong, Y.S.; J. Mater. Sci. 45, 3470-3476, 2010.
- [24] Sozeri, H.; Kurtan, U.; Topkaya, R.; Baykal, A.; Toprak, M.S.; Ceram. Int. 39, 5137-5143, 2013.
- [25] Jiang, W.; Liu, Y.; Li, F.; Chu, J.; Chen, K.; Mater. Sci. Eng. B 166, 132-134, 2010.
- [26] Wang, H.; Cao, L.; Yan, S.; Huang, N.; Xiao, Z.; Mater. Sci. Eng. B 164, 191-194, 2009.
- [27] Afghahi, S.S.S.; Jafarian, M.; Atassi, Y.; J. Magn. Magn. Mater. 406, 184-191, 2016.
- [28] Alam, R.S.; Moradi, M.; Rostami, M.; Nikmanesh, H.; Moayedi, R.; Bai, Y.; J. Magn. Magn. Mater. 381, 1-9, 2015.
- [29] Mortazavinik, S.; Yousefi, M.; Rus. J. App. Chem. 90(2), 298-303, 2017.

## Synthesis, characterization and investigation of magnetic and microwave absorbing properties of polyaniline / $\text{SrFe}_{11.1}(\text{ZrZn}_{0.5}\text{Co}_{0.5})_{0.45}\text{O}_{19}$ /MWCNTs nanocomposite

Saeid Mortazavinik<sup>1</sup>, Mohammad Yousefi<sup>2\*</sup>, Maryam Ranjbar<sup>3</sup>, Parviz Aberoomand Azar<sup>4</sup>, Moayed Hossaini Sadr<sup>5</sup>

1. Ph.D student in inorganic chemistry Department of chemistry, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2. Associate professor in inorganic chemistry Department of chemistry, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
3. Associate professor in inorganic chemistry Department of Chemical Technologies, Iranian Research Organization for Science and Technology (IROST) Tehran, Iran
4. Associate professor in analytical chemistry Department of chemistry, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
5. Professor in inorganic chemistry Department of chemistry, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: September 2017, Revised: December 2017, Accepted: December 2017

**Abstract:** In this study the substituted strontium hexaferrite with formula  $\text{SrFe}_{11.1}(\text{ZrZn}_{0.5}\text{Co}_{0.5})_{0.45}\text{O}_{19}$  was firstly synthesized by a sol-gel auto combustion method. Then the ternary nanocomposite of polyaniline/ $\text{SrFe}_{11.1}(\text{ZrZn}_{0.5}\text{Co}_{0.5})_{0.45}\text{O}_{19}$ /multiwalled carbon nanotubes (MWCNTs) was prepared by insitu polymerization method. The structure and surface morphology of substituted hexaferrite, and nanocomposite were investigated by using X-ray diffractometer (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), and field emission scanning electron microscope (FESEM). The results showed that the substituted hexaferrite and multiwalled carbon nanotubes were effectively coated by polyaniline chains. The magnetic properties of samples were measured by the vibrating sample magnetometer (VSM). The measured magnetic values decreased from ( $M_s=60$  emu/g,  $M_r=30$  emu/g) for substituted hexaferrite, to ( $M_s=11.5$  emu/g,  $M_r=6$  emu/g) for nanocomposite. The microwave absorption properties of samples were determined by vector network analyzer (VNA). The results indicated that the minimum reflection loss value of the nanocomposite is -30 dB at 10.1 GHz with appropriate bandwidth in the range of X-band. The reflection loss measurements demonstrated that the nanocomposite has good potential as a microwave absorbent.

**Keywords:** Strontium hexaferrite, Polyaniline, Multiwalled carbon nanotubes, Microwave absorbent