

مطالعه تاثیر درصد وزنی پودر و اندازه ذرات در کامپوزیت هگرافریت باریم آلییده شده با منیزیم و تیتانیم/رزین اکریلیک بر منحنی‌های تلفات انعکاسی حاصل از روش پشت‌بند فلزی

محمد جزیره پور^{*۱}، محمد حسین شمس^۱

^۱دانشکده الکتروسرام و مهندسی برق، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۶/۱۲/۲۰، تاریخ دریافت نسخه اصلاح‌شده: ۱۳۹۷/۰۷/۰۱، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۷/۱۰/۱۰

چکیده ترکیبات هگرافریت باریم جانشانی شده با کاتیون‌های مختلف یکی از انواع مواد مورد توجه برای تولید کامپوزیت‌های جاذب امواج مایکروویو است. در پژوهش حاضر هگرافریت باریم جانشانی شده با منیزیم و تیتانیم با فرمول شیمیایی $BaFe_9(Mg_{1.5}Ti_{1.5})O_{19}$ جهت مطالعه مورد توجه قرار گرفته است. به منظور بررسی تاثیر اندازه ذرات بر خواص جذب مایکروویو ذرات فریت با ابعاد میکرونی (حدود سه میکرون) و نانو (کمتر از ۱۰۰ نانومتر) به روش سل ژل و از طریق کنترل نسبت اجزای واکنش و دمای کلسینه تولید شدند. سپس کیفیت تشکیل فاز و مشخصات ریزساختاری پودرها به ترتیب با استفاده از SEM و XRD مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور بررسی کیفیت جذب امواج مایکروویو در نمونه‌ها، کامپوزیت‌های هگرافریت/رزین اکریلیک با درصدهای مختلف وزنی پودر به رزین تولید شد. با استفاده از دستگاه تحلیلگر برداری شبکه (VNA) و با به‌کارگیری شیوه اندازه‌گیری پشت‌بند فلزی، منحنی‌های تلفات انعکاسی (RL) کامپوزیت‌ها به‌عنوان معیاری از قابلیت جذب مایکروویو در باندهای فرکانسی X و Ku اندازه‌گیری شد. با بررسی نتایج پژوهش حاضر مشخص شد بر اساس منحنی‌های RL کامپوزیت‌های هگرافریت/رزین اکریلیک حاوی ذرات نانومتری نسبت به نوع حاوی ذرات میکرونی در محدوده فرکانسی باندهای X و Ku خواص جذب مایکروویو بهتری دارند. نتایج این بررسی می‌تواند در ارتقای عملکرد و طراحی بهینه کامپوزیت‌های جاذب امواج مایکروویو مفید واقع شود.

کلمات کلیدی: هگرافریت باریم، سل ژل، جذب مایکروویو، جانشانی.

Effect of Weight Percent and Particle Size of (Mg,Ti) Substituted Barium Hexaferrite Powder on Reflection loss Plots of Metal Back Ferrite/Acrylic Resin Composite

Mohammad Jazirehpour^{*1}, Mohammad Hossein Shams¹

¹Department of electroceram and electrical engineering, Malek Ashtar University of technology, Tehran, Iran.

Abstract Barium hexaferrite compositions with different cation substitutions are known as one of the most studied materials to produce microwave absorbing composites. In the present research (Mg,Ti) substituted barium hexaferrite with chemical formula of $BaFe_9(Mg_{1.5}Ti_{1.5})O_{19}$ have been studied. In order to investigate the effect of particle size and powder percent, micron-size (about $3\mu m$) and nano-size (below 100nm) were synthesized via a modified sol-gel method by controlling the ingredients ratio and calcination temperature. Chemical phase formation and morphological studies were performed by XRD and SEM, respectively. In order to investigate the microwave absorption quality of the samples, ferrite/acrylic resin composites with different powder weight percents were produced. As a criterion of the microwave absorption capability, the reflection loss (RL) plots were measured at X and Ku band by the Vector Network Analyzer system and metal back method. It was found that nano-size particles have better microwave absorption efficiency and the results of the investigation may be used to enhance the design of microwave absorbing composites and their absorption performance.

Keywords: Barium hexaferrite, Sol-gel, Microwave absorption, Substitution.

*عهده دار مکاتبات

نشانی: شاهین شهر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تلفن: ۰۳۱۴۵۲۲۰۶۰۶، دورنگار: ۰۳۱۴۵۲۲۰۶۰۶، پیام نگار: Jazirehpour@nano-ac.ir

۱- مقدمه

سیستم‌های ارتباطی بی‌سیم نظیر تلفن‌های همراه، سیستم‌های وای-فای و بلوتوث که همگی در محدوده فرکانسی مایکروویو کار می‌کنند، امروزه گسترش زیادی یافته‌اند. گسترش روزافزون ادوات نشردهنده امواج مایکروویو بحران آلودگی مرتبط با امواج الکترومغناطیسی را تشدید می‌کند. لذا پوشش‌های سدکننده و جاذب‌های امواج الکترومغناطیسی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده‌اند [۱-۴]. پوشش‌های جاذب امواج با تبدیل انرژی امواج مایکروویو به حرارت مانع از انعکاس این امواج می‌شوند و لذا در اختفا ادوات نظامی از دید امواج رادار کاربرد دارند. یک جاذب موج مناسب باید در یک بازه فرکانسی مطلوب قابلیت کافی برای تلفات امواج را دارا باشد. این تلفات از یکسری پدیده‌های مغناطیسی و دی‌الکتریکی درون ماده جاذب نشأت می‌گیرند [۵-۸]. برای دستیابی به حداکثر تلفات در یک بازه فرکانسی گسترده انتخاب ماده مناسب و کنترل خواص دی‌الکتریکی و مغناطیسی آن از اهمیت بالایی برخوردار است. این کار با کنترل ترکیب شیمیایی، اندازه ذرات، شکل ذرات، ساختار ذرات و درصد ذرات جاذب در زمینه کامپوزیت‌های جاذب میسر است [۹-۱۲]. یکی از مهم‌ترین ترکیبات جاذب امواج مایکروویو ترکیبات فریتی هستند. هگرافریت‌های نوع M یکی از مشهورترین انواع فریت‌ها بوده و در ساخت آهنرباهای دائمی کاربرد دارند. هگرافریت‌های نوع M به‌ویژه در حالت جانمایی شده به سبب توان اتلاف بالا تا به امروز بسیار مورد توجه بوده‌اند [۹]. تلفات مغناطیسی در هگرافریت‌ها عمدتاً ناشی از پدیده تشدید مغناطیسی می‌باشد که در اثر واهلش ارتعاشات دیواره حوزه‌های مغناطیسی و واهلش چرخش اسپین ممان‌های مغناطیسی بروز می‌کند. با جانمایی عناصر مختلف در ساختار هگرافریت به‌جای یون‌های آهن سه ظرفیتی می‌توان فرکانس تشدید و سایر خواص مغناطیسی فریت پایه را به تناسب نیاز تغییر داد. در گذشته خواص جذب مایکروویو هگرافریت باریم دارای جانمایی منیزیم و تیتانیم تولید شده به روش حالت جامد بررسی شده بود [۱۰]. همچنین به‌تازگی خواص جذب مایکروویو نانوذرات هگرافریت باریم دارای جانمایی منیزیم و تیتانیم حاوی درصد‌های بالای عناصر

جانمایی شده با یک روش سل ژل اصلاح شده توسط مولفین مقاله کنونی گزارش شده [۹ و ۱۱] و تاثیر درصدهای مختلف عناصر جانمایی شده بر خواص جذب مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج بررسی مذکور نشان داد ترکیب $BaFe_9(Mg_{1.5}Ti_{1.5})O_{19}$ از لحاظ عملکرد جذب امواج خواص مناسبی را از خود بروز می‌دهد.

در این مقاله با تمرکز بر ترکیب $BaFe_9(Mg_{1.5}Ti_{1.5})O_{19}$ تاثیر عواملی نظیر درصد میزان پودر جاذب بر خواص جذب کامپوزیت‌های پلیمری حاوی این مواد و نیز تاثیر اندازه ذرات جاذب بر خواص جذب موج مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج این تحقیق به طراحی و ساخت جاذب‌های کاربردی امواج مایکروویو با قابلیت اتلاف مناسب کمک خواهد کرد.

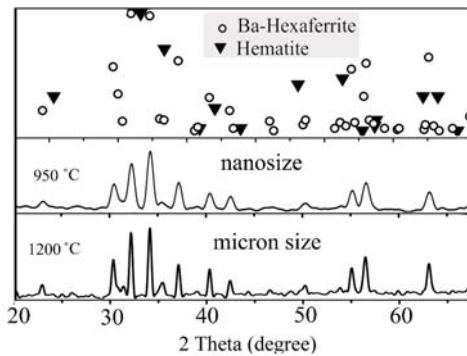
۲- روش تحقیق

همگی ترکیبات شیمیایی مورد استفاده دارای خلوص آزمایشگاهی بوده‌اند. این ترکیبات شامل کربنات باریم ($BaCO_3$)، نیترات آهن ($[Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O]$)، نیترات منیزیم ($[Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O]$)، تیتانیم تترا ایزوپروپوکساید (TTIP)، نیترات آمونیم (NH_4NO_3)، اسید سیتریک (CA) و اتیلن گلیکول (EG) بوده است. برای سنتز نانوذرات فریت باریم جانمایی شده با منیزیم و تیتانیم مواد اولیه شامل نیترات آهن، نیترات منیزیم، کربنات باریم و اسید سیتریک متناسب با نسبت $Ba:Fe:Mg:Ti:CA = 1:9:1.5:1.5:20$ در آب مقطر و در داخل حمام آبی در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد حل شد. سپس در یک بشر مجزا TTIP به میزان ۰/۱ برابر حجمی آب درون بشر به آن افزوده شد. رسوبات سفید رنگ حاصل، چند مرتبه با آب مقطر شستشو داده و رسوبات از مخلوط اولیه جدا شد. سپس در یک بشر دیگر رسوب بدست آمده با محلولی با ترکیب $CA:H_2O_2:H_2O:(TTIP)=1:2:2:(1)$ در حمام آبی ۸۰ درجه مخلوط و به هم زده شد تا اینکه یک محلول نارنجی رنگ ایجاد شد. محلول زرد رنگ حاصل با محلول اولیه حاوی نیترات‌ها مخلوط شد تا سل به دست آید. pH سل توسط آمونیاک تا مقدار هفت افزایش داده شد. در ادامه، نیترات آمونیم به سل افزوده شد تا سل به صورت هموزن و شفاف درآید. در نهایت اتیلن گلیکول متناسب با نسبت

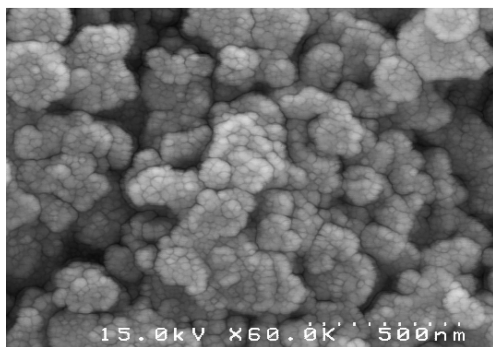
۱۲۰۰ °C است، ذرات به صورت ورقه‌هایی با اشکال تقریباً هگزاگونال با ضخامت حدود ۰/۵ میکرومتر و قطر حدود سه میکرومتر قابل مشاهده‌اند.

۲-۳- بررسی تاثیر درصد افزودن پودر جاذب به رزین پلیمری

به منظور بررسی تاثیر درصد افزودن پودر جاذب به رزین پلیمری در نمونه‌ها، نمونه‌های حاوی ۰،۷۰، ۵۰ و ۱۵ درصد پودر جاذب نانومتری با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفت. شکل ۴ بررسی تاثیر نسبت پودر جاذب به رزین را برحسب شدت و موقعیت پیک‌های تلفات انعکاسی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود با افزایش درصد پودر فریت در زمینه رزین اکریلیک پیک‌های جذب در باند X شدت بیشتری پیدا می‌کنند (حداکثر شدت جذب ۳۰ دسی‌بل برای نمونه حاوی ۷۰ درصد پودر فریت اندازه‌گیری شد). این در حالی است که در باند Ku (شکل ۵) در شرایط مشابه با بررسی انجام شده در باند X (از لحاظ درصد وزنی کامپوزیت فریت- رزین اکریلیک) شدت جذب مایکروویو در نمونه حاوی ۵۰ درصد پودر به حداکثر می‌رسد و دوباره در ۷۰ درصد کاهش می‌یابد.



شکل ۱. الگوی XRD نمونه‌های هگزا فریت باریم با اندازه نانو (۹۵۰ °C) و میکرون (۱۲۰۰ °C).



شکل ۲. تصویر SEM نمونه نانوذره کلسینه شده در دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد.

به سل اضافه شد. سل نهایی در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به هم زده شد تا آب آن حذف شده و سل غلیظ به دست آمد. در نهایت سل غلیظ به خشک‌کنی با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد منتقل شد تا با حذف کامل آب ژل خشک حاصل شد. ژل خشک در نهایت خرد شد و در کوره با نرخ ۴/۵ درجه بر سانتی‌گراد در دمای ۹۵۰ درجه به مدت پنج ساعت کلسینه شد.

برای تولید ذرات میکرونی فرآیند فوق با یکسری تغییرات انجام گرفت. نسبت EG:CA که برای تولید نمونه ریزدانه برابر یک بود، در اینجا برای تولید نمونه درشت دانه برابر مقدار دو لحاظ شد و نیترات آمونیوم به سل اضافه نشد. در نهایت ژل خشک در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت دو ساعت کلسینه شد.

پودرهای فریت باریم جانشانی شده با رزین اکریلیک با نسبت‌های مختلف مخلوط شد و تحت فشار حدود ۱۴ مگاپاسکال در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به شکل قرص با قطر شش سانتی‌متر در آورده شد. خواص جذب مایکروویو نمونه‌ها توسط دستگاه تحلیل گر برداری شبکه به روش پشت-بند فلزی اندازه‌گیری شد.

۳- نتایج و بحث

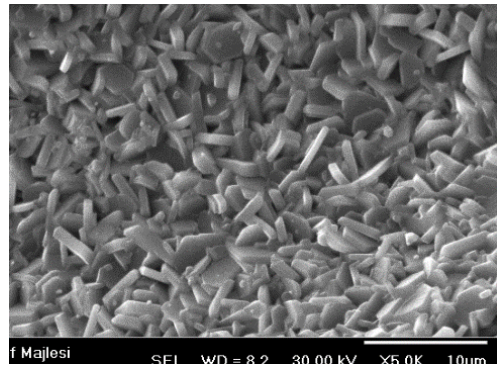
۳-۱- مشخصه‌یابی فازی و میکروسکوپی

شکل ۱ الگوهای XRD مربوط به ذرات با ابعاد نانومتری و میکرونی فریت باریم جانشانی شده با منیزیم و تیتانیم را نشان می‌دهد که به ترتیب در دو دمای ۹۵۰ °C و ۱۲۰۰ کلسینه شده‌اند. هر دو الگو تشکیل فاز هگزا فریت باریم را تایید می‌کنند. شکل ۲ تصویر SEM نانوذرات هگزا فریت باریم جانشانی شده با منیزیم و تیتانیم تولید شده به روش سل-ژل اصلاح شده و کلسینه شده در دمای ۹۵۰ °C را نشان می‌دهد که ابعادی در حدود ۳۵ نانومتر را دارا هستند. البته از آنجا که ذرات نانومتری تمایل زیادی در به هم چسبیدن و تشکیل کلوخه دارند ذرات در تصاویر SEM به صورت کلوخه‌هایی با اندازه ۱۰۰ تا ۲۵۰ نانومتر دیده می‌شوند. در شکل ۳ که نشان‌دهنده نمونه میکرون ذره کلسینه شده در دمای

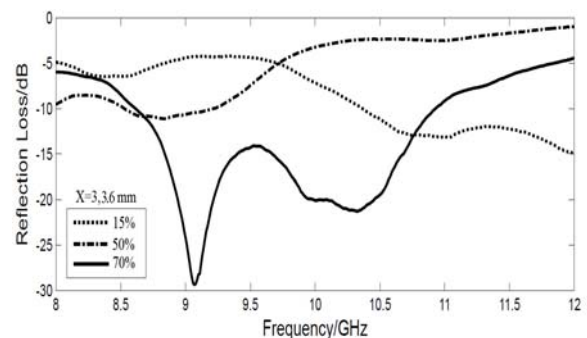
ارائه شده است. چنانچه مشاهده می‌شود در ضخامت‌های حدود چهار میلی‌متر پیک‌های دو نمونه از نظر شدت و موقعیت انطباق دارند ولی به تدریج با کاهش ضخامت از شدت جذب نمونه حاوی ذرات میکرونی کاسته می‌شود و پیک‌های آن از فرکانس‌های حدود هشت گیگاهرتز به سمت فرکانس‌های بالاتر در حدود ۱۱ گیگاهرتز منتقل می‌شود. در حالی که در نمونه حاوی ذرات نانومتری جابجایی چندانی در موقعیت پیک‌ها رخ نمی‌دهد، به طوری که از ضخامت ۴٫۰ تا ۳٫۶ میلی‌متر پیک‌ها به سمت فرکانس‌های پایین در بازه ۸ تا ۸٫۵ گیگاهرتز و پس از آن به سمت فرکانس‌های بازه ۹ تا ۹٫۵ گیگاهرتز منتقل می‌شوند. اگرچه دامنه جابجایی پیک‌های جذب مایکروویو نمونه نانومتری در محدوده اطراف فرکانس ۹ گیگاهرتز است ولی دامنه جابجایی پیک‌های نمونه حاوی ذرات میکرونی بسیار بازر (۸٫۵ تا ۱۱٫۵ گیگاهرتز) و جهت حرکت در جهت افزایش فرکانس است.

تاثیر اندازه پودر بر خواص جذب در باند Ku نیز مطالعه گردید. همان‌گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود در ضخامت‌های زیاد شدت جذب نمونه حاوی ذرات درشت بیشتر است. اما با کاهش ضخامت از ۱٫۸ به ۱٫۶ میلی‌متر شدت جذب در نمونه حاوی ذرات میکرونی کاسته می‌شود و شدت جذب نمونه حاوی ذرات نانویی نسبت به نمونه حاوی ذرات میکرونی بیشتر می‌شود.

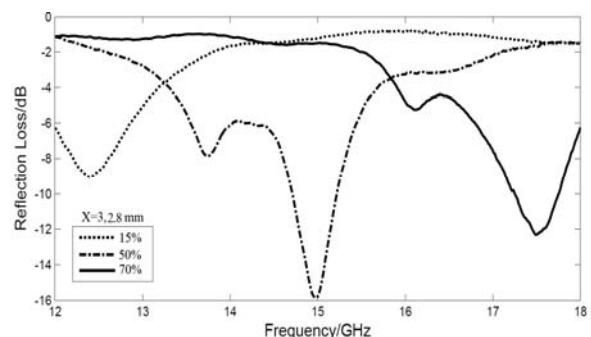
میان الگوی جذب نمونه حاوی ذرات نانومتری و وضعیت انتقال پیک‌ها در دو ضخامت ۱٫۸ به ۱٫۶ میلی‌متر مقایسه‌ای انجام گرفته است که در شکل ۸ ارائه شده است. با کاهش ضخامت پیک شماره ۱ تقریباً جابجایی مشهودی ندارد ولی پیک شماره ۲ به سمت فرکانس‌های بالاتر جابجا شده است. شکل ۹ مقایسه میان نمونه حاوی ذرات نانو و ذرات میکرونی را در یک ضخامت یکسان (۱٫۸ میلی‌متر) نشان می‌دهد. چنانچه مشاهده می‌شود اگر اندکی اغماض به خرج داده شود می‌توان جابجایی پیک شماره ۳ (در حد ۰٫۱۵ گیگاهرتز) را در مقایسه با جابجایی پیک‌های شماره ۱ و ۲ که هر یک بیش از حدود ۰٫۵ گیگاهرتز جابجا شده‌اند، ناچیز در نظر گرفت. در حقیقت در شکل ۸ که جنس، ترکیب و اندازه ذرات ماده جذب ثابت بوده و فقط ضخامت تغییر کرده است موقعیت پیک شماره ۱ جابجایی چندانی محسوس نداشت است ولی همان پیک در



شکل ۳. تصویر SEM نمونه میکرون‌ذره کلسینه شده در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد.



شکل ۴. تاثیر درصد پودر جذب برای نمونه‌هایی با ضخامت یکسان ۳٫۶ میلی‌متر در باند X.



شکل ۵. تاثیر درصد پودر جذب برای نمونه‌هایی با ضخامت یکسان ۲٫۸ میلی‌متر در باند Ku.

۳-۳- تاثیر اندازه پودر در شدت جذب

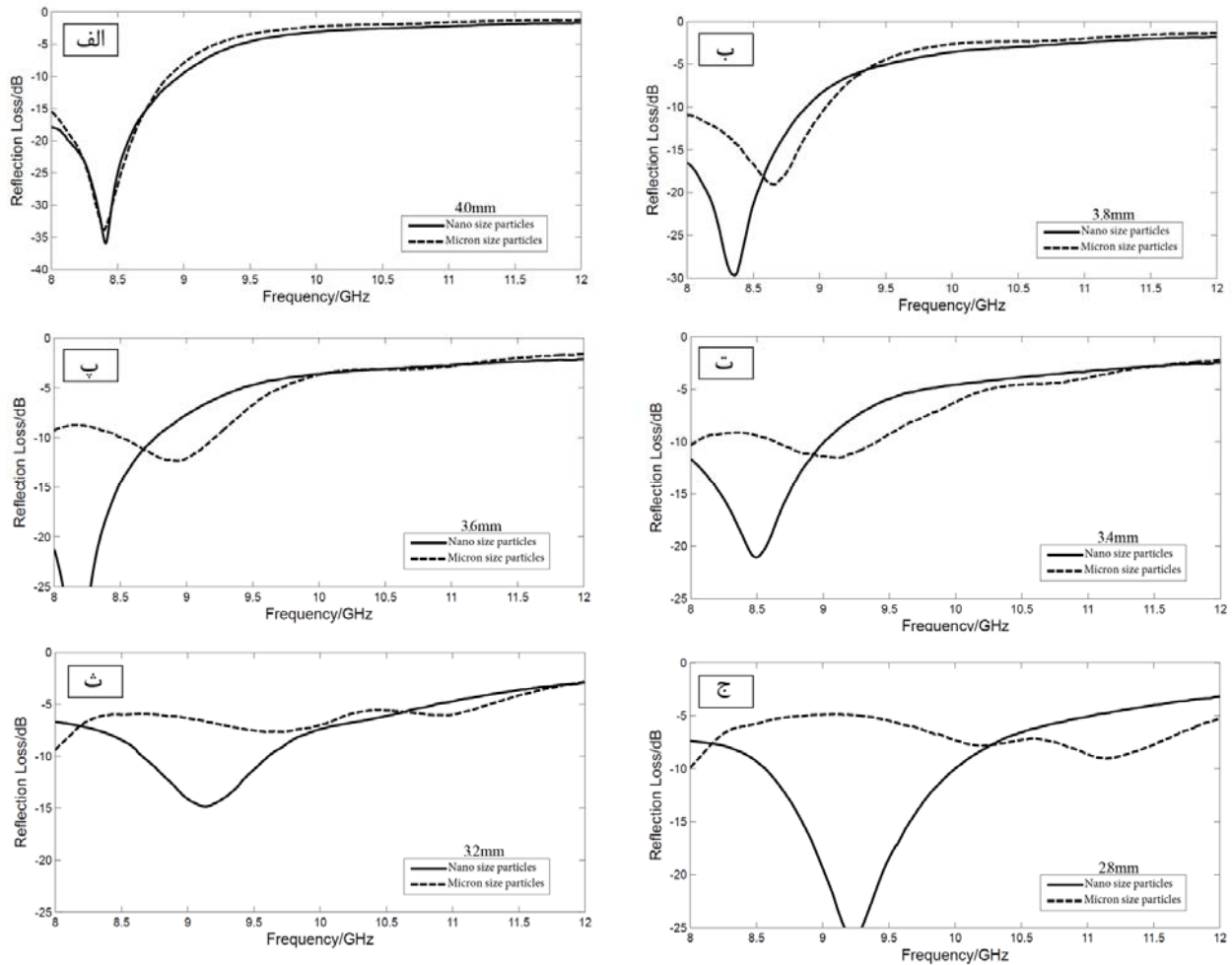
در بررسی دیگری، تاثیر اندازه پودر در شدت جذب مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور دو نمونه میکرونی و نانو که در دو دمای ۱۲۰۰ و ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد کلسینه شده بودند با یکدیگر مقایسه شدند. چنانچه پیشتر اشاره شد در نمونه کلسینه شده در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد اندازه پودرها در حد دو تا سه میکرومتر و در نمونه کلسینه شده در ۹۵۰ درجه ذرات پودر دارای اندازه کمتر از ۱۰۰ نانومتر بوده است. خواص جذب این دو نمونه در باند X در شکل ۶ جهت مقایسه

حالت ایده‌آل نزدیکتر بوده باشد. لذا محتمل است با نزدیکتر شدن به شرایط ایده‌آل جای‌گیری کاتیون‌ها در جایگاه‌ها، میزان انتقال فرکانس تشدید فرومغناطیسی اندکی افزایش یابد. با توجه به اینکه کیفیت جابجایی پیک شماره ۳ در نمونه میکرون‌ذره در جهت فرکانس‌های کمتر بوده است لذا این فرضیه محتمل است که پیک شماره ۳ با پدیده تشدید فرومغناطیسی ارتباط داشته باشد، چرا که فرکانس وقوع پدیده مذکور به سبب تغییرات ایجاد شده در اثر تغییرات میدان ناهمسانگردی بلور حساسیت زیادی به جانمایی در ترکیب فریت دارد [۱۲-۱۳]. این در حالی است که جابجایی پیک ۳ در اثر تغییر سایز (شکل ۹) در مقایسه با جابجایی پیک شماره ۱ چندان قابل توجه نیست. لذا این جمع‌بندی محتمل‌تر به نظر می‌رسد که پیک شماره ۱ به‌طور مستقیم به تغییرات اندازه وابسته باشد در حالی که وابستگی پیک شماره ۳ به تغییر اندازه ناچیز است.

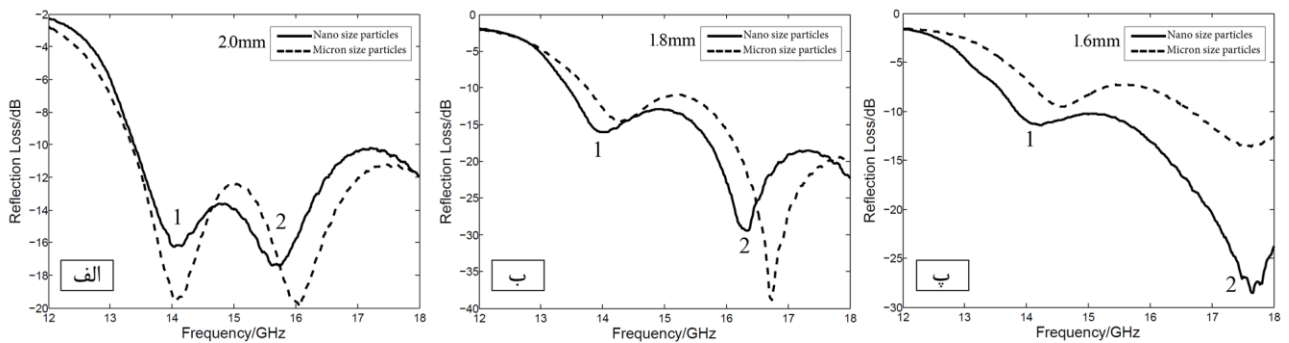
از آنجایی که توزیع اندازه ذرات مجزا با توجه به تصاویر میکروسکوپی به دلیل روش سنتز مورد استفاده تقریباً یکنواخت به‌نظر می‌رسد و از طرف دیگر سه پیک موجود در نمونه‌ها به حد کافی از هم فاصله دارند می‌توان انتظار داشت که منشا پیک‌های موجود در نمودارها به سه پدیده مستقل وابسته باشند. در بازه فرکانسی مورد بررسی حداقل سه پیک مرتبط با پدیده تشدید فرومغناطیسی [۱۳-۱۴]، تشدید دیواره حوزه‌ها [۱۵-۱۷] و تطبیق امپدانس مورد انتظار است [۱۸-۲۱].. لذا هریک از پیک‌ها به یکی از سه پدیده مورد اشاره به‌طور احتمال قابل استناد است. در این میان تشدید دیواره حوزه‌ها که به‌طور قطع به اندازه ذرات و ابعاد حوزه‌ها بستگی دارد [۱۳-۱۴]، با توجه به مباحثی که پیشتر مطرح شد مناسب‌ترین گزینه برای ارتباط دادن به پیک شماره ۱ به حساب می‌آید و پیک شماره ۳ که کمترین حساسیت را به تغییرات اندازه نشان داده است گزینه مناسب‌تری برای ارتباط داشتن با پدیده تشدید فرومغناطیسی است. از طرفی پیک شماره ۲، هم نسبت به تغییر ضخامت و هم نسبت به تغییر ابعاد ذرات نمونه‌ها حساسیت دارد و علاوه بر این با مرتبط دانستن دو پیک قبلی به دو پدیده ذکر شده، تنها گزینه باقی‌مانده از پدیده‌های محتمل برای ارتباط داده شدن با پیک شماره ۲ پدیده تطبیق امپدانس است.

شکل ۹ که جنس، ترکیب و ضخامت ماده جاذب ثابت بوده و فقط اندازه تغییر کرده است، جابجایی داشته است. این نکته می‌تواند این احتمال را مطرح کند که مشاهدات مذکور در رابطه با جابجایی پیک شماره ۱ با تغییر اندازه ذرات ارتباطی دارد.

با مقایسه روند جابجایی پیک‌ها در شکل‌های ۸ و ۹ این نکته قابل برداشت است که در دو اندازه‌گیری ارائه شده در شکل ۸ که فقط اختلاف مربوط به تغییر ضخامت در نمونه حاوی ذرات نانومتری است پیک ۳ تغییر موضع داشته است ولی در شکل ۹ که اندازه ذرات تغییر کرده است پیک مذکور تغییر موضع چشم‌گیری نداشته است. لذا بر خلاف پیک شماره ۱ که ارتباط محسوسی با تغییر اندازه داشت به‌نظر می‌رسد پیک شماره ۳ ارتباط زیادی با اندازه ذرات ندارد. البته پیک شماره ۲ در هر دو شکل ۸ و ۹ جابجایی محسوسی داشته است، لذا تا وضعیت انتساب احتمالی دو پیک ۳ و ۱ مشخص نشود، نمی‌توان راجع به آن فرضیه‌ای را مطرح کرد. حال چنانچه بر جابجایی ناچیز پیک شماره ۳ بیشتر تمرکز کنیم و جابجایی آن را نیز با اهمیت فرض کنیم، اتفاقی که رخ داده این است که در نمونه حاوی ذرات میکرونی پیک شماره ۳ به سمت فرکانس‌های کوچکتر جابجا شده است. شایان ذکر است که فرکانس تشدید هگزافریت باریم خالص بدون جانمایی بیش از ۴۰ گیگاهرتز است و جانمایی عناصر مختلف در این ترکیب اغلب به منظور کاهش فرکانس تشدید آن تا بازه کمتر از ۱۸ گیگاهرتز صورت می‌پذیرد [۱۰-۱۳]. به‌عبارت دیگر در صورت انجام جانمایی فرکانس تشدید فرومغناطیسی فریت مذکور کاهش می‌یابد و بدیهی است که هر چه فرآیند جانمایی ایده‌آل‌تر صورت پذیرد و شرایطی فراهم شود که کاتیون‌های مورد استفاده در جانمایی فرصت و انرژی فعال‌سازی کافی برای نفوذ و جای‌گیری دقیق‌تر در جایگاه‌های هدف را پیدا کنند، اثرات مورد انتظار از جانمایی آنها بهتر بروز خواهد کرد. با توجه به این نکته که نمونه میکرون‌ذره نسبت به نمونه نانوذره که در دمای ۹۵۰ فرآوری شده است، در فرآیند تولید خود دمای بالاتری (۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد) را برای تشکیل فاز دریافت کرده است تا جایی‌که حتی ذرات آن به شکل تعادلی ساختار هگزافریت یعنی حالت هگزگونال نزدیک شده است. لذا می‌توان انتظار داشت در دمای بالاتر فرآوری و تشکیل فاز مربوط به نمونه میکرون‌ذره شرایط برای نفوذ و جای‌گیری دقیق کاتیون‌های جانمایی شده به

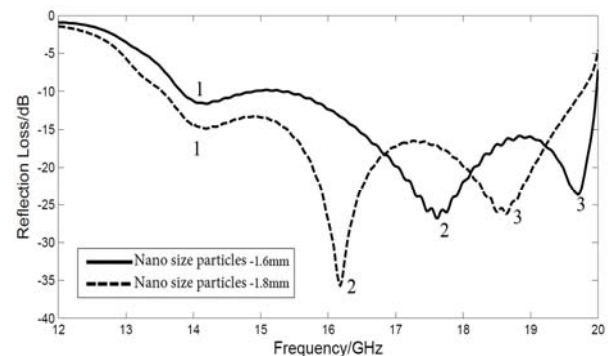


شکل ۶. بررسی تاثیر اندازه ذرات ماده جاذب در خواص جذب در ضخامت‌های مختلف نمونه و در باند X.



شکل ۷. بررسی تاثیر اندازه ذرات در الگوی جذب در ضخامت‌های ۱/۶، ۱/۸ و ۲/۱۰ میلی‌متر در بازه فرکانسی ۱۲-۱۸ گیگاهرتز، $BaFe_9Mg_{1.5}Ti_{1.5}O_{19}$.

شکل ۸. مقایسه تغییرات الگوی جذب در نمونه حاوی ذرات نانوذره در دو ضخامت ۱/۶ و ۱/۸ میلی‌متر در بازه فرکانسی ۱۲-۲۰ گیگاهرتز.



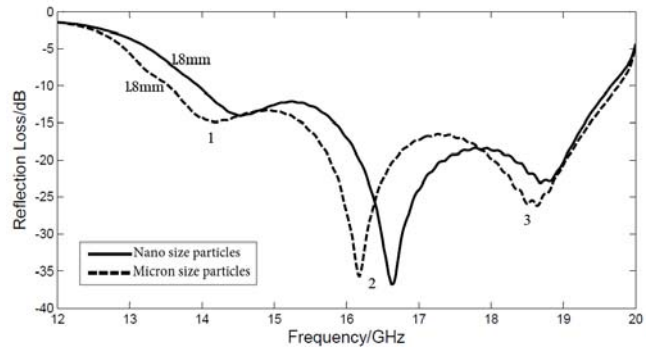
SEM نمونه‌ها نشان داد نمونه تولید شده با روش سل ژل اصلاح شده و کلسینه شده در دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد دارای ذراتی با ابعاد حدود ۳۵ نانومتر و نمونه کلسینه شده در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد دارای شکل ورقه‌ای با ضخامت حدود ۵۰۰ نانومتر و قطر حدود سه میکرون بوده است. بررسی XRD تشکیل فاز هگزا فیریت باریم را تایید کرد. نمونه‌های کامپوزیتی با زمینه رزین اکریلیک از پودر فیریت تهیه شد و خواص جذب میکروویو مورد بررسی قرار گرفت. در باند Ku نمونه حاوی ۷۰ درصد پودر ($RL_{min}=-30dB$) و در باند Ku نمونه حاوی ۵۰ درصد پودر ($RL_{min}=-16dB$) بهترین خواص جذب را دارا بودند. هم‌چنین مقایسه خواص جذب نمونه‌ها در اندازه میکرون و نانو نشان داد ذرات نانویی نسبت به ذرات میکرونی عملکرد جذب میکروویو بهتری از خود نشان داده‌اند.

سپاسگزاری

نگارندگان مراتب قدردانی خود را از پژوهشکده الکتروسرام دانشگاه صنعتی مالک اشتر بابت حمایت مادی از تحقیق حاضر اعلام می‌دارند.

مراجع

1. Jazirehpour M., Seyyed Ebrahimi S.A., 2015. "Carbothermally synthesized core-shell carbon-magnetite porous nanorods for high-performance electromagnetic wave absorption and the effect of the heterointerface", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 639, pp 280-288.
2. Jazirehpour M., Seyyed Ebrahimi S.A., 2015. "Effect of aspect ratio on dielectric, magnetic, percolative and microwave absorption properties of magnetite nanoparticles", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 638, pp 188-196.
3. Narang, S.B., Kaur, P., Bahel, S. and Singh, C., 2016. "Microwave characterization of Co-Ti substituted barium hexagonal ferrites in X-band", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 405, pp.17-21.
4. Baniasadi, A., Ghasemi, A., Nemati, A., Ghadikolaei, M.A. and Paimozd, E., 2014. "Effect of Ti-Zn substitution on structural, magnetic and microwave absorption characteristics of strontium hexaferrite", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 583, pp.325-328.
5. Jian, X., Chen, X., Zhou, Z., Li, G., Jiang, M., Xu, X., Lu, J., Li, Q., Wang, Y., Gou, J. and Hui, D., 2015. "Remarkable improvement in microwave absorption by cloaking a micro-scaled tetrapod hollow with helical carbon nanofibers", Physical Chemistry Chemical Physics, Vol. 17, pp.3024-3031.
6. Wang, L., Huang, Y., Li, C., Chen, J. and Sun, X., 2015. "A facile one-pot method to synthesize a three-



شکل ۹. بررسی تاثیر اندازه ذرات در الگوی جذب نمونه‌ای با ضخامت ۱٫۸ میلی‌متر در بازه فرکانسی ۱۲-۲۰ گیگاهرتز.

در نمونه حاوی ذرات نانو نسبت به نمونه دارای ذرات میکرونی به‌طور ویژه در ضخامت‌های کمتر، هم در باند X و هم Ku شدت جذب بیشتری دیده می‌شود که این را می‌توان با وقوع افزایش تعداد انعکاسات چندگانه موج در درون ماده جاذب در اثر ریزتر شدن ذرات پودر جاذب و لذا افزایش میزان تلفات با افزایش طول مسیر عبور موج از درون ماده توجیه کرد [۲۲-۲۴]. هم‌چنین زیادتر بودن سطح در مورد ذرات نانومتری در مقایسه با ذرات میکرونی و لذا افزایش تعداد پیوندهای معلق سطحی که بروز تلفات دی‌الکتریکی در فصل مشترک پلیمر و ذرات را تشدید می‌کنند [۲۲-۲۴] را می‌توان عامل دیگری در بیشتر بودن شدت جذب در نمونه‌های حاوی ذرات نانومتری دانست. با کاهش ضخامت تاثیر این سازوکارها برجسته‌تر می‌شود، چرا که با کاسته شدن از ضخامت نمونه تعداد نسبی ذرات میکرونی در راستای ضخامت نمونه به شدت کاهش می‌یابد و این به معنای کاهش احتمال اندرکنش موج با ذرات ماده جاذب است. این در حالی است که در نمونه حاوی ذرات نانو در یک ضخامت یکسان و درصد وزنی مشابه از پودر جاذب به دلیل اندازه بسیار کوچک ذرات تعداد آنها همچنان در راستای ضخامت نمونه زیاد است و لذا اندرکنش امواج با ذرات همچنان در سطح بالایی رخ می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

ذرات هگزا فیریت باریم جانشانی شده با منیزیم و تیتانیم با اندازه‌های نانویی و میکرونی با فرمول $BaFe_9(Mg_{1.5}Ti_{1.5})O_{19}$ با روش سل-ژل تولید شد. بررسی

- permittivity and microwave absorption of ferrite-rubber composite at X-band frequencies". *IEEE Transactions on Magnetics*, 27(6), pp.5462-5464.
21. Kim, D.Y., Chung, Y.C., Kang, T.W. and Kim, H.C., 1996. "Dependence of microwave absorbing property on ferrite volume fraction in MnZn ferrite-rubber composites". *IEEE Transactions on Magnetics*, 32(2), pp.555-558.
 22. Lin, H., Zhu, H., Guo, H. and Yu, L., 2007. "Investigation of the microwave-absorbing properties of Fe-filled carbon nanotubes". *Materials Letters*, 61(16), pp.3547-3550.
 23. Zhao, D.L., Li, X. and Shen, Z.M., 2009. "Preparation and electromagnetic and microwave absorbing properties of Fe-filled carbon nanotubes". *Journal of Alloys and Compounds*, 471(1-2), pp.457-460.
 24. Kolev, S., Yanev, A. and Nedkov, I., 2006. "Microwave absorption of ferrite powders in a polymer matrix". *physica status solidi c*, 3(5), pp.1308-1315.
 7. Chen, Y., Zhang, S., Liu, X., Pei, Q., Qian, J., Zhuang, Q. and Han, Z., 2015. "Preparation of solution-processable reduced graphene oxide/polybenzoxazole nanocomposites with improved dielectric properties". *Macromolecules*, Vol. 48, pp.365-372.
 8. Sharma, M., Singh, M.P., Srivastava, C., Madras, G. and Bose, S., 2014. "Poly (vinylidene fluoride)-based flexible and lightweight materials for attenuating microwave radiations". *ACS applied materials & interfaces*, Vol. 6, pp.21151-21160.
 9. Jazirehpour, M., Shams, M.H., Khani, O., 2012. "Modified sol-gel synthesis of nanosized magnesium titanium substituted barium hexaferrite and investigation of the effect of high substitution levels on the magnetic properties". *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 545, pp 32-40.
 10. Shams, M.H., Salehi, S.M.A. and Ghasemi, A., 2008. "Electromagnetic wave absorption characteristics of Mg-Ti substituted Ba-hexaferrite". *Materials Letters*, 62, pp.1731-1733.
 11. Jazirehpour, M. and Shams, M.H., 2017. "Microwave Absorption Properties of Ba-M Hexaferrite with High Substitution Levels of Mg-Ti in X Band". *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, Vol. 30, pp.171-177.
 12. Tabatabaie, F., Fathi, M.H., Saatchi, A. and Ghasemi, A., 2009. "Effect of Mn-Co and Co-Ti substituted ions on doped strontium ferrites microwave absorption". *Journal of Alloys and Compounds*, 474(1-2), pp.206-209.
 13. Ghasemi, A., Hossienpour, A., Morisako, A., Liu, X. and Ashrafizadeh, A., 2008. " Investigation of the microwave absorptive behavior of doped barium ferrites". *Materials & design*, 29(1), pp.112-117.
 14. Chang, S., Kangning, S. and Pengfei, C., 2012. " Microwave absorption properties of Ce-substituted M-type barium ferrite". *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 324(5), pp.802-805.
 15. Haijun, Z., Zhichao, L., Chenliang, M., Xi, Y., Liangying, Z. and Mingzhong, W., 2003. "Preparation and microwave properties of Co-and Ti-doped barium ferrite by citrate sol-gel process". *Materials chemistry and physics*, 80(1), pp.129-134.
 16. Shen, G., Xu, Z. and Li, Y., 2006. "Absorbing properties and structural design of microwave absorbers based on W-type La-doped ferrite and carbon fiber composites". *Journal of magnetism and magnetic materials*, 301(2), pp.325-330.
 17. Haijun, Z., Zhichao, L., Chengliang, M., Xi, Y., Liangying, Z. and Mingzhong, W., 2002. "Complex permittivity, permeability, and microwave absorption of Zn-and Ti-substituted barium ferrite by citrate sol-gel process". *Materials Science and Engineering: B*, 96(3), pp.289-295.
 18. Abbas, S.M., Dixit, A.K., Chatterjee, R. and Goel, T.C., 2007. "Complex permittivity, complex permeability and microwave absorption properties of ferrite-polymer composites". *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 309(1), pp.20-24.
 19. Singh, P., Babbar, V.K., Razdan, A., Puri, R.K. and Goel, T.C., 2000 "Complex permittivity, permeability, and X-band microwave absorption of CaCoTi ferrite composites". *Journal of applied physics*, 87(9), pp.4362-4366.
 20. Kim, S.S., Jo, S.B., Gueon, K.I., Choi, K.K., Kim, J.M. and Churn, K.S., 1991. "Complex permeability and dimensional graphene@ carbon nanotube composite as a high-efficiency microwave absorber". *Physical Chemistry Chemical Physics*, Vol. 17, pp.2228-2234.