

Polymer Composites as Electromagnetic Wave Absorbers

Naeimeh Bahri-Laleh¹, Khadijeh Didehban², Elham Yarahmadi^{2*}

1. Polymerization Engineering Department, Iran Polymer and Petrochemical Institute,
P.O. Box: 14975-112, Tehran, Iran
2. Department of Chemistry, Payame Noor University, P.O. Box: 19395-3697,
Tehran, Iran

Received: 17 December 2014, Accepted: 19 February 2015

Abstract

Absorption of electromagnetic radiation in the microwave region is one of the most important cases which, today, is used in commercial purposes and many application fields including communications equipment, civil, military and various electronic systems and technologies. Therefore, with development of wireless electronic devices, we need to have knowledge on some devices that should absorb harmful radiation. According to the nature and position of the wave absorbing materials, the synthesis of these materials and study of their properties are considered important. Since waves constitute both electric field and magnetic field, an ideal wave absorption material should be able to absorb electrical and magnetic waves simultaneously. The nanocomposites containing an electrically conductive material are best candidates as waves absorbers. In using these nanocomposites the wave electric part can be absorbed and converted into heat, in order to dampen the waves. The magnetic property of waves is also another aspect which constitutes waves. Magnetic nanoparticles can absorb the waves by creating small magnetic fields. Therefore, those nanocomposites containing inorganic magnetic nanoparticles as well as conjugated polymers with semi-conductive properties are recently considered as new wave absorbing materials. These light-weight composites can be synthesized easily. Because of the special position of wave absorbent composites in today's life, study on their varieties, method of preparation and specific features is considered as the topic of this article.

Key Words

waves absorption,
nanocomposite,
polyaniline,
ferrite,
reflection loss

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: el.yarahmadi90@yahoo.com

کامپوزیت‌های پلیمری به عنوان جاذب‌های امواج الکترومغناطیسی

بسپارش

فصلنامه علمی-ترویجی

سال ششم، شماره ۳،

صفحه ۲۲-۱۳، ۱۳۹۵

ISSN: 2252-0449

نعیمه بحری لاله^۱، خدیجه دیده‌بان^۲، الهام یاراحمدی^{*۲}

۱- تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، پژوهشکده مهندسی پلیمریزاسیون، صندوق پستی ۱۴۹۷۵-۱۱۲

۲- تهران، دانشگاه پیام نور، گروه شیمی، صندوق پستی ۱۹۳۹۵-۳۶۹۷

دریافت: ۱۳۹۴/۹/۲۶، پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۳۰

فناوری جذب امواج الکترومغناطیس در ناحیه ریزموج، موضوع ارزشمندی برای مقاصد تجاری، وسایل ارتباطی، مدنی، نظامی و بسیاری از سامانه‌های الکترونی و فناوری در عصر حاضر است. با رشد سریع وسایل الکترونیکی بی‌سیم به دانش و موادی نیاز است که امواج مضر را جذب کند و ارزان و مناسب نیز باشد. با توجه به ماهیت و جایگاه مواد جاذب امواج، سنتز این مواد و بررسی خواص آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از آنجا که امواج دارای میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی هستند، ماده جاذب امواج ایده‌آل باید قابلیت جذب هر دو نوع امواج الکتریکی و مغناطیسی را دارا باشد. نانوکامپوزیت‌های حاوی مواد رسانای الکتریسته، مناسب‌ترین نامزد برای کاربرد در مواد جاذب امواج‌اند. با استفاده از این نانوکامپوزیت‌ها، می‌توان بخش الکتریکی موج را جذب و انرژی آن را به گرما مبدل کرد و بدین‌ترتیب باعث میرایی این امواج شد. بحث دوم، خاصیت مغناطیسی امواج بوده که مربوط به میدان ایجاد شده به وسیله امواج است. نانوذرات مغناطیسی قابلیت آن را دارند تا با ایجاد میدان‌های مغناطیسی بسیار کوچک باعث جذب امواج شوند. بنابراین، نانوکامپوزیت‌های حاوی ترکیب پلیمرهای مزدوج، که خاصیت نیمه‌رسانایی دارند و نانوذرات مغناطیسی معدنی چشم‌اندازهای جدیدی برای کاربرد در مواد جاذب امواج ایجاد کرده‌اند. کامپوزیت‌های مزبور، سبک بوده و به راحتی سنتز می‌شوند. در این مقاله، به دلیل جایگاه ویژه کامپوزیت‌های جاذب امواج در زندگی امروزی، انواع این مواد، نحوه تهیه آن‌ها و پارامترهای اثرگذار بر خواص آن‌ها بحث می‌شود.

چکیده



نعیمه بحری لاله



خدیجه دیده‌بان



الهام یاراحمدی

واژگان کلیدی

جذب امواج،
نانوکامپوزیت،
پلی‌آنیلین،
فریت،
کاهش بازتاب

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

el.yarahmadi90@yahoo.com

مقدمه

جهان امروز به شدت بر فناوری‌های مبتنی بر تابش الکترومغناطیس متکی است که از اساسی‌ترین پدیده‌های طبیعت به شمار می‌رود. با پیشرفت فناوری مشکلات غیرمنتظره ایجاد می‌شوند. به عنوان مثال، هرچه وسایل الکتریکی بیشتر می‌شوند، امواج الکترومغناطیس بیشتر سلامت انسان‌ها را به خطر می‌اندازند.

از آنجا که امواج الکترومغناطیس کاربردهای زیادی در ناحیه بسامد گیگاهرتز برای تلفن همراه، شبکه ارتباطات، سامانه‌های رادار و غیره دارد، بنابراین محافظت در برابر امواج در این محدوده، برای بشر اهمیت بیشتری پیدا می‌کند [۱].

مواد جاذب امواج الکترومغناطیس، از اساسی‌ترین قسمت‌های سامانه‌های دفاعی، ارتباطات، بی‌سیم و غیره هستند که در دهه اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند [۲]. این مواد مقدار انرژی موج برگشتی را کاهش می‌دهند و بدین ترتیب باعث تضعیف امواج الکترومغناطیس می‌شوند. جاذب امواج الکترومغناطیس، نه تنها در موارد نظامی، بلکه در خدمات انسانی هم استفاده می‌شود. مواد جاذب باید دارای ویژگی‌هایی باشند که باعث افزایش بهبود عملکرد آن‌ها شود. این ویژگی‌ها به شرح زیر است:

۱- مقدار جذب زیاد امواج الکترومغناطیس،

۲- ضخامت کم،

۳- محدوده جذب گسترده،

۴- استحکام مکانیکی و وزن کم،

۵- پایداری گرمایی و شیمیایی زیاد و

۶- هزینه کم [۳].

به طور معمول، جاذب‌های امواج از میان فلزات واسطه، اکسیدها، هیدروکسیدها و نانوذرات آن‌ها، پلیمرهای رسانا و کامپوزیت‌های آن‌ها انتخاب می‌شوند. در این میان، نانوکامپوزیت‌های سنتز شده به روش‌های مختلف، نقش مهمی را در پژوهش‌های این زمینه ایفا می‌کنند. این نانوکامپوزیت‌ها شامل پلیمرهای رسانا (جاذب بخش الکتریکی طول موج) و ذرات مغناطیسی (جاذب بخش مغناطیسی طول موج) هستند که در ماتریس پلیمر پخش می‌شوند. هنگامی که ابعاد ساختارهای ترکیبات معدنی به مقیاس نانو کاهش می‌یابد، آثار قابل توجهی را روی خواص مکانیکی، نوری، الکتروشیمیایی، گرمایی و همچنین جذب امواج الکترومغناطیس آن‌ها می‌گذارند [۴]. به دلیل اهمیت زیاد جاذب‌های الکترومغناطیس و نقش مهم پلیمرها در این زمینه، در این مقاله امواج الکترومغناطیسی و نقش جاذب‌ها با تکیه بر کاربرد پلیمرها در این زمینه بررسی می‌شود.

اهمیت پوشش‌های جاذب

با پیشرفت فناوری و در پی آن صنایع مختلف از جمله صنایع نظامی و مخابراتی و کاربردهای روزافزون میدان‌های الکترومغناطیسی با شدت‌ها و اشکال متفاوت در مخابرات، تحقیقات نظامی و پزشکی، سلامت محیط زیست انسان مورد تهدید قرار گرفته است. آثار زیستی ناشی از این میدان‌ها به شدت میدان، بسامد و تغییرات آن و ویژگی‌های فیزیکی فرد یا بافت قرار گرفته در تابش، بستگی دارد. قسمت اعظم کاربرد انرژی ریزموج و بسامد رادیویی در مخابرات و مراکز پخش کننده امواج است. انتقال دهنده‌های پخش امواج، که در اماکن بلند و برج‌ها مستقرند، می‌توانند برای سلامتی کارکنان خود خطر ایجاد کنند.

فرستنده‌های مخابراتی، رادیو، تلویزیون و رادارها میدان مغناطیسی شدیدی تولید می‌کنند. آثار این میدان‌ها بر انسان در بسامدهای زیر ۱۰۰ kHz به شکل تیک عصبی ظاهر می‌شود و در بسامد ۱۰ MHz، گرم شدن بدن را در حدود ۱ تا ۲ درجه به همراه دارد. اگر بدن در معرض میدان‌های شدید قرار گیرد، سطح زیان‌باری از گرما در بافت ایجاد می‌شود. در کل، روش متداول برای حفاظت انسان‌ها از تابش الکترومغناطیس، حفاظت با ورقه‌ها و شبکه‌های فلزی است.

استفاده از مقدار زیادی فلز، فناوری ضعیف و ویژگی‌های ساختاری اجازه نمی‌دهد که از آن‌ها برای رفع الکتریسته ساکن در اتاق‌ها، به‌ویژه به عنوان ابزار شخصی برای حفاظت در مقیاس وسیع، استفاده کرد. امروزه با توجه به موارد یاد شده می‌توان دریافت، استفاده از پوشش‌های جاذب امواج الکترومغناطیسی از اهمیت زیادی برخوردار است.

کاربردهای پوشش‌های جاذب

مواد جاذب و نیز مواد محافظ تداخل امواج الکترومغناطیس، برای ساخت اتاق‌های بدون بازتاب مورد توجه‌اند. اتاق‌های بدون بازتاب از دو جهت مهم هستند. اول، برای آزمایش پارازیت امواج الکترومغناطیس روی تجهیزات الکترونیکی، به‌ویژه در کاربردهای نظامی که لازم است، کارایی وسیله در اثر هجوم امواج الکترومغناطیس به آن دچار اختلال نشود. تمام تجهیزات الکترونیکی اگر بخواهند استانداردهای بین‌المللی را کسب کنند، لازم است تا آزمایش تداخل الکترومغناطیسی (electromagnetic interference, EMI) را با موفقیت بگذرانند. انجام این آزمایش خارج از اتاق EMI در اثر وجود سایر امواج متنوع مؤثر بر عملکرد دستگاه، انجام نمی‌شود. ثانیاً برای آزمایش‌های قابلیت الکترومغناطیسی

(electromagnetic capability, EMC) تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی، از این اتاق‌ها استفاده می‌شود تا امواج تابیده از محصول بررسی شود. بنابر استانداردهای بین‌المللی، یک وسیله الکترونیکی نباید بیش از حد مجاز تابش الکترومغناطیسی داشته باشد. مواد جاذب، افزون بر اتاق‌های بدون بازتاب در تجهیزات رادارگریز برای مخفی کردن وسایل و نیروهای نظامی از دید رادار دشمن نیز به کار می‌روند. پوشش‌های الکترومغناطیس که با بازتاب یا جذب امواج الکترومغناطیس، مقدار عبور آن‌ها را از پوشش کاهش می‌دهند، بسیار مورد توجه‌اند. چنان که گذشت، یک وسیله الکترونیکی را باید از هجوم امواج متداخل با عملکرد آن حفظ کرد. این کار را با پوشش‌های محافظ در برابر تداخل انجام می‌دهند. همچنین، اثر منفی امواج تابیده از وسایل الکترونیکی بر بافت‌های زنده نیز لزوم پوشش‌دهی آن‌ها را بیشتر می‌کند.

سازوکار پوشش‌های محافظ

۱- بازتاب: اولین سازوکار پوشش‌های محافظ، بازتاب است. برای بازتاب، پوشش باید بار متحرک (الکترون یا حفره) داشته باشد که با میدان الکترومغناطیسی در هنگام تابش تداخل کند و در نتیجه دارای رسانایی الکتریکی شود.

۲- جذب: دومین سازوکار پوشش‌های محافظ، جذب است. مواد جاذب امواج الکترومغناطیس، انرژی امواج را به هنگام عبور از آن‌ها کاهش می‌دهند. همانند یک مقاومت که انرژی جریان الکتریکی را مصرف می‌کند، مواد جاذب امواج نیز انرژی امواج جذب شده را به گرما تبدیل می‌کنند.

۳- بازتاب مضاعف: سومین سازوکار، بازتاب مضاعف است. به بازتاب از سطوح چندتایی یا اتصالات موجود در پوشش، بازتاب مضاعف می‌گویند. این اتفاق در سطوح بزرگ یا اتصالات سطحی در پوشش رخ می‌دهد.

پس به‌طور کلی، اتلاف امواج به علت بازتاب، جذب یا بازتاب مضاعف می‌تواند اتفاق بیفتد که با علامت dB نشان داده می‌شود [۵].

انواع مواد به کار رفته در پوشش‌های جاذب امواج الکترومغناطیس

امواج دارای میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی هستند. برای اینکه جاذب امواج بیشینه کارایی را داشته باشد، باید بخش‌هایی داشته باشد که بتواند هم بخش الکتریکی و هم مغناطیسی امواج را جذب کند. جاذب‌های امواج، شامل فلزات واسطه، اکسیدها، هیدروکسیدها و نانوذرات آن‌ها، پلیمرهای رسانا و نانوکامپوزیت‌های شامل

پلیمرهای رسانا و ذرات مغناطیسی است. از آنجا که هر ماده دارای مزایا و معایبی است، انتخاب مواد جاذب مشکل بوده و می‌تواند به نوع کاربرد آن‌ها وابسته باشد. از مهم‌ترین اصول تعیین ماده جاذب، کشف ناحیه رزونانس طبیعی آن است. بنابراین، مطالعه μ ، نفوذپذیری مغناطیسی و ϵ ، گذردهی الکتریکی مواد می‌تواند مفید واقع شود.

لایه جاذب می‌تواند از مواد دی‌الکتریک و مغناطیسی با نسبت‌های مختلف ایجاد شود. معمولاً جاذب‌ها از کامپوزیت‌های حاوی مخلوط‌های دی‌الکتریک، مانند کربن سیاه، نانولوله کربن، گرافیت، سرامیکی از مشتقات باریم، تیتانیم اکسید، ورقه‌های آلومینیم یا ذرات مغناطیسی مانند فریت‌ها، کربونیل آهن، لاتتانیم آهن و نانوسیم مس اکسید ساخته می‌شود.

به دلیل کاربرد ویژه پلیمرهای رسانا و فریت‌ها در ساخت مواد جاذب امواج در ادامه به بررسی خاصیت و ویژگی‌های پلیمرهای رسانا و فریت پرداخته می‌شود.

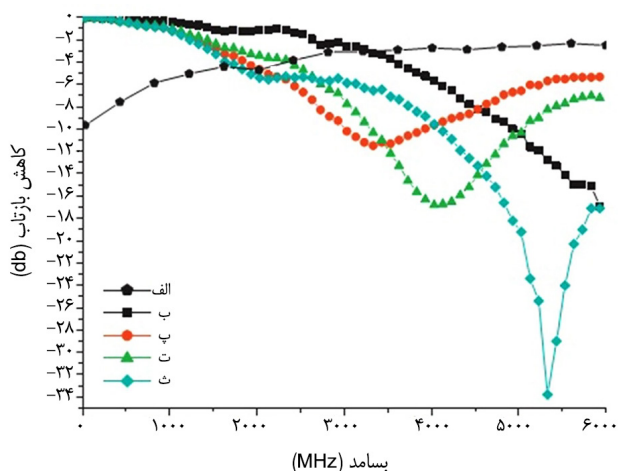
پلیمرهای رسانا

پلیمرهای رسانای الکتریکی توجه زیادی را در میان تمام مواد پلیمری به خود جلب کرده‌اند. این پلیمرها به طور چشمگیری در زمینه‌های گوناگون مورد توجه قرار گرفته‌اند، چرا که کارایی آن‌ها در زمینه‌های مختلف، از قبیل ابزارهای ذخیره انرژی، حسگرها، جعبه ابزار الکتریکی و الکترونیکی و مواد جاذب انرژی الکترومغناطیس به اثبات رسیده است.

وزن کم، شکل‌پذیری آسان، مقاومت به خوردگی، پایداری محیطی بسیار مناسب، قابلیت تنوع تولید در کنار قیمت مناسب باعث روی آوردن پژوهشگران در سراسر جهان به کامپوزیت‌های پلیمری رسانا و ایجاد تنوع شگفت‌انگیز در آن‌ها شده است. در یک تقسیم‌بندی کلی پلیمرهای رسانا به رسانای ذاتی و رسانا شده با استفاده از افزودنی‌ها (کامپوزیت‌ها و نانوکامپوزیت‌های پلیمری رسانا) تقسیم می‌شوند.

فریت‌ها

فریت‌ها با فرمول کلی MOFe_2O_3 بوده که M فلز دوظرفیتی است. فریت‌ها گروهی از مواد مغناطیسی هستند که تأثیر مکانیک کوانتوم باعث می‌شود، جهت‌های گشتاورهای مغناطیسی در ساختار منظم چرخش الکترون‌ها، به طور متناوب تغییر کند و اندازه‌های گشتاورها نامساوی باشد. در نتیجه، گشتاور مغناطیسی خالص مخالف صفر در حوزه‌ها ایجاد شود. به دلیل حذف نسبی، حداکثر چگالی شار



شکل ۱- نمودار کاهش بازتاب برحسب بسامد نسبت‌های مختلف کربونیل آهن-پلی‌پیرول: (الف) ۰، (ب) ۶:۱، (پ) ۱۵:۱، (ت) ۲۰:۱ و (ث) ∞ [۱۳].

تنها یک ماده دی‌الکتریک هستند. چنانچه در بستر آن‌ها نانوذرات مغناطیسی به کار رود، خاصیت منحصر به فرد قابلیت جذب امواج را پیدا می‌کنند. کارهای تجربی زیادی در زمینه استفاده از پلیمرهای رسانا با مواد مغناطیسی انجام شده است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

از مواد جاذب، مخلوط پلی‌پیرول و کربونیل آهن است. پلی‌پیرول ماده دی‌الکتریک و کربونیل آهن ماده مغناطیسی است. این مخلوط در نسبت‌های مختلف تهیه شده است که با توجه به شکل ۱، بهترین نسبت آن با کمترین مقدار بازتاب ۲۰:۱ است. کاربرد این ترکیب در سرکوب تداخل امواج الکترومغناطیس و کاهش رادار است [۱۳].

نانوذرات نقره با پوشش فریت نیکل دارای ساختار هسته-پوسته‌اند و به روش هیدروترمال تشکیل می‌شوند. آن‌ها به عنوان پرکننده وارد ماتریس پلی‌یورتان می‌شوند و تشکیل جاذب ریزموج می‌دهند. در این کامپوزیت‌ها، نسبت فریت به نقره، ۱:۶، ۱:۴، ۱:۲ و ۱:۱ (شکل ۲) کاهش بازتاب اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، کاهش بازتاب بیشتر از ۹ GHz انجام می‌گیرد و مقدار آن بیش از ۲۵ dB است. هر قدر نسبت فریت به نقره کاهش پیدا کند، پیک به سمت بسامد زیادتر جابه‌جا می‌شود. بنابراین، با تغییر این نسبت، می‌توان از آن برای کاربردهای خاص در بسامدهای زیاد ۹ GHz کنترل کرد [۱۴].

نانوساختار فراکتال شاخه‌ای کربنات باریم با روش شیمیایی مایع یونی ساده سنتز شد. شکل نانوساختار کربنات باریم با تغییر شرایط شیمیایی و مقدار مایع یونی کایرال دی‌تترابوتیل آمونیم تارتارات به

مغناطیسی حاصل در حوزه‌های مواد فری مغناطیسی اساساً کمتر از نمونه فرومغناطیس است. تغییر جهت گشتاورهای مغناطیسی در اثر برهم‌کنش با موج به جذب انرژی منجر می‌شود [۶]. فریت‌ها طبقه‌ای از سرامیک‌های جامدند که ساختار بلوری آن‌ها با فرایند تفجوشی در دماهای زیاد مخلوط‌های استوکیومتری از اکسیدهای فلزی مشخص، مثل آهن اکسید، کبالت، نیکل، روی، کادمیم، منیزیم، منگنز یا ترکیبی از این فلزات به دست می‌آید. این مواد نارسا هستند، ولی تراوایی زیادی دارند. بنابراین، بدون بازتاب موج تابیده، می‌توانند انرژی را جذب کنند. این مواد در بسامدهای خاصی که وابسته به ساختار بلوری و جنس آن‌هاست در فرایند تشدید قابلیت نشان دادن برهم‌کنش زیادی با میدان موج الکترومغناطیسی دارند که منجر به اتلاف انرژی در این بسامدهای خاص می‌شود.

فریت‌ها در ساخت رنگ‌هایی به کار می‌روند که روی تجهیزات نظامی زده می‌شود تا از دید رادار دشمن محفوظ بمانند.

عوامل مؤثر بر خاصیت جذب امواج الکترومغناطیس

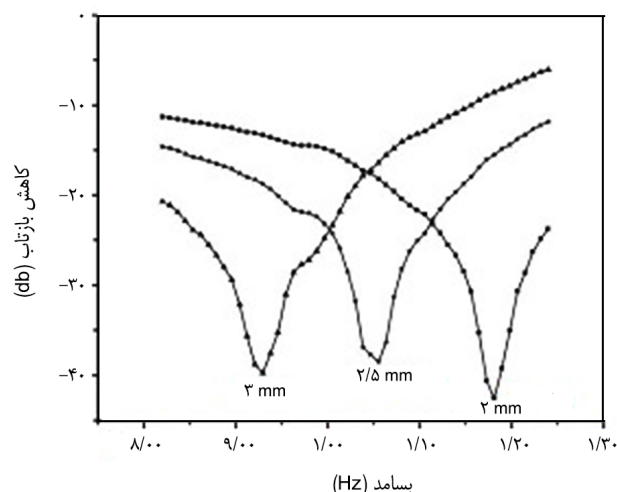
همان‌طور که گفته شد، به دلیل ویژگی‌های خاص پلیمرهای رسانا و ذرات مغناطیسی، از ترکیب آن‌ها به عنوان مواد جاذب امواج استفاده می‌شود. خاصیت جذب امواج الکترومغناطیس این مواد می‌تواند به عوامل زیادی وابسته باشد. قاعدتاً مهم‌ترین پارامتر ماهیت خود ماده است، زیرا با کشف ناحیه رزونانسی طبیعی ماده می‌توان تشخیص داد که هر ماده برای کدام ناحیه بسامد مناسب است [۷]. عوامل متعددی روی خاصیت جذب اثر می‌گذارند که در زیر به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود:

- پارامترهای ساختاری پلیمر، بدین معنی که چه نوع پلیمری برای ساخت کامپوزیت استفاده می‌شود [۸]،
- وجود گروه‌های عاملی قطبی مانند $C=O$ ، H_2O ، $C-O-C$ و $C-O-C$ روی مواد استفاده شده در جاذب، به‌ویژه در محلول‌های آبی [۹]،
- روش سنتز مواد به کار رفته در ساخت جاذب [۱۰]،
- ساختار صفحه استفاده شده در اندازه‌گیری جذب نمونه [۱۱] و
- ضخامت صفحه استفاده شده برای بررسی خاصیت جذبی [۱۲].

استفاده از کامپوزیت‌های پلیمرهای رسانا با ذرات مغناطیسی در

مواد جاذب امواج

پلیمرهای رسانا نقش مهمی در پراکندگی بار الکتریکی و پوشش تداخل مغناطیسی دارند. اما این مواد فاقد خصلت مغناطیسی بوده و



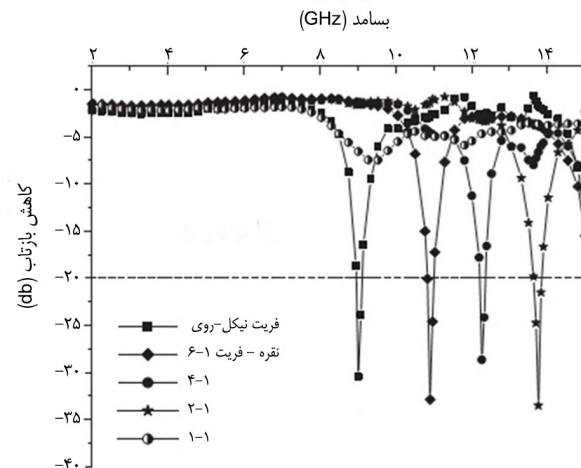
شکل ۴- نمودار کاهش بازتاب برحسب بسامد در ضخامت‌های مختلف [۱۶].

از کارهای مهم، دست‌کاری پارامترهای سنتز یا وارد کردن مواد افزودنی به منظور تولید پلیمرهای رسانا، مانند پلی‌آنیلین با رسانایی مناسب، خواص مغناطیسی و دی‌الکتریک است که این امر می‌تواند خواص محافظتی و جذب امواج را به‌سازی کند. نانوکامپوزیت $\text{PANI}/\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ بررسی شد.

TiO_2 پرکننده دی‌الکتریک و Fe_3O_4 پرکننده مغناطیسی است. پیش از اینکه آمونیم پرسولفات به عنوان آغازگر اضافه شود، Fe_3O_4 با $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ تیترو می‌شود تا Fe_3O_4 به خوبی در مخلوط پراکنده شود. پراکندگی موجب بهبود رسانایی نانوکامپوزیت و افزایش خواص جذبی امواج در محدوده بسامدی ۱۰-۱۳ GHz می‌شود. همان‌طور که در شکل ۵-الف مشاهده می‌شود، نانوکامپوزیت $\text{PANI}/\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ با محتوای ۴۰٪ از Fe_3O_4 که با $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

نمونه	NaOH ۰/۰۴ مولار (mL)	مایع یونی کایرال (g/L)	$\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ (g/L)	زمان (h)
الف	۲/۵	۱/۲۵	۱۳/۲۵	۲۴
ب	۵	۱/۲۵	۱۳/۲۵	۲۴
پ	۲	۲/۵	۱۳/۲۵	۲۴
ت	۲	۱/۲۵	۶/۵۲	۲۴
ث	۲	۱/۲۵	۱۳/۲۵	۲۴
ج	۲	۱/۲۵	۱۳/۲۵	۴۸

شکل ۳- نمودار کاهش بازتاب برحسب بسامد [۱۵].

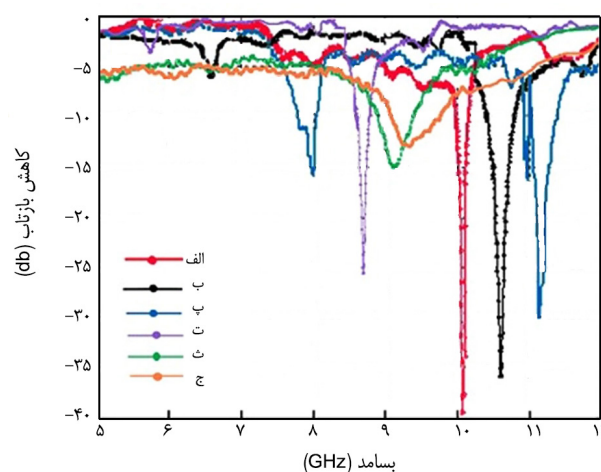


شکل ۲- نمودار کاهش بازتاب برحسب بسامد با نسبت‌های جرمی مختلف فریت-نقره [۱۴].

آسانی قابل کنترل است. اثر شکل‌شناسی‌های مختلف نانوپرکننده روی خواص الکترومغناطیس در محدوده ۵-۱۲ GHz بررسی شد. نتایج در شکل ۳ قابل مشاهده است. نانوالیاف کربنات باریم به علت خواص الکترومغناطیس عجیب خود به عنوان یک رسانه پراتلاف می‌تواند استفاده شود [۱۵].

فریت نیکل روی دوپه شده با کبالت و نانوذرات تیتانات باریم به روش هم‌رسوبی و هیدروترمال سنتز شد. سپس، خواص جذب امواج آن‌ها در ساختار تک‌لایه‌ای در گستره بسامدی ۸/۲-۱۲/۴ GHz بررسی شد.

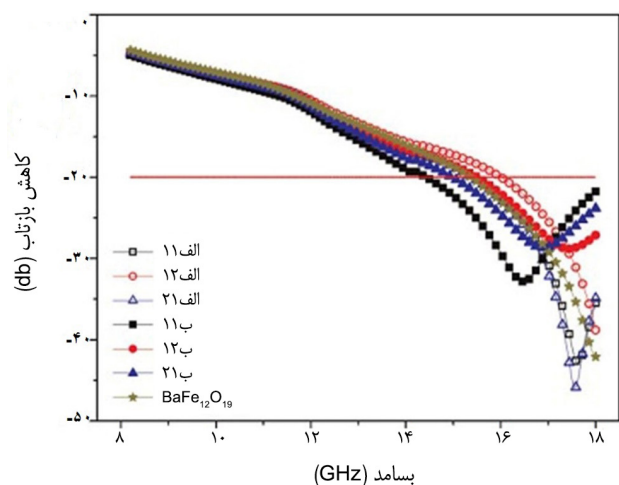
با توجه به شکل ۴، زمانی که ضخامت نمونه ۲ mm است، کمترین کاهش بازتاب در ۴۲/۵۳ dB- و در بسامد ۱۱/۸۱ GHz رخ می‌دهد. خواص جذب امواج را با کنترل مقدار تیتانات باریم و تغییر ضخامت نمونه می‌توان تنظیم کرد [۱۶].



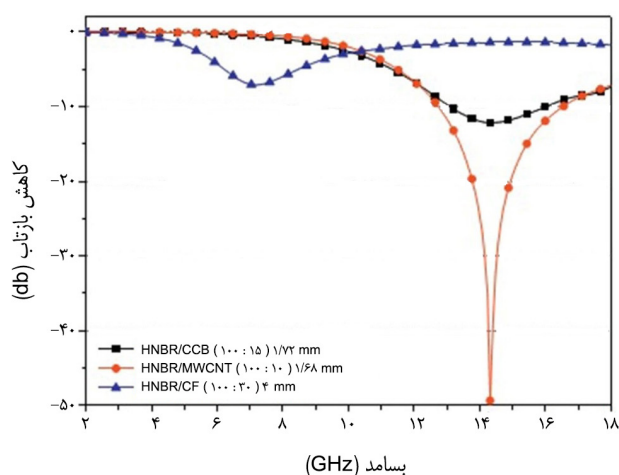
جدول ۱- کد نمونه ها و نسبت وزنی $BaFe_{12}O_{19}/TiO_2$ [۱۹].

کد نمونه	پوشش پلی پیرول	$BaFe_{12}O_{19}$	TiO_2
الف ۱۱	ندارد	۱/۲	۱/۲
الف ۱۲	ندارد	۱/۳	۲/۳
الف ۲۱	ندارد	۲/۳	۱/۳
ب ۱۱	دارد	۱/۲	۱/۲
ب ۱۲	دارد	۱/۳	۲/۳
ب ۲۱	دارد	۲/۳	۱/۳

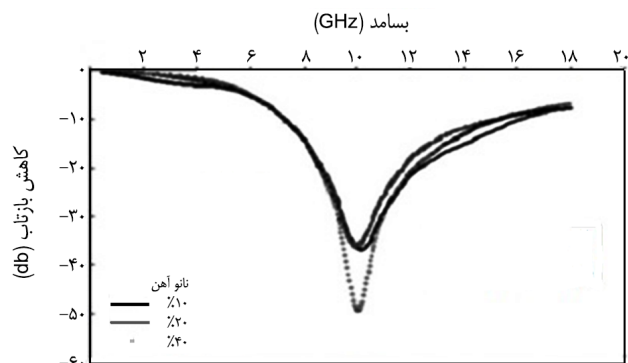
شکل BTONT/PANI نشان داده می‌شود با پلیمرشدن درجا تهیه شد. خواص جذب امواج مواد ترکیبی بررسی شد. در مقایسه با پلی‌آنیلین خالص، در نانومواد ترکیبی کاهش بازتاب به مقدار قابل توجهی بهبود یافته است (شکل ۶) و از همه مهم‌تر با کنترل مقدار



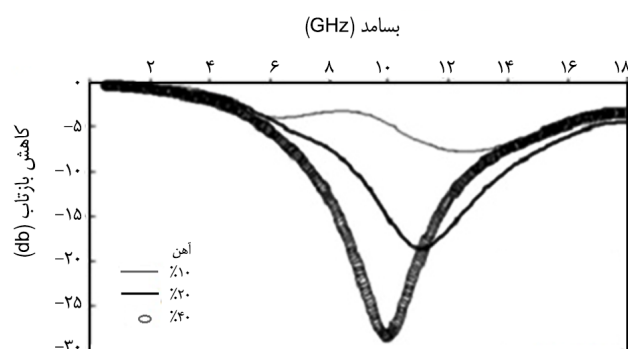
شکل ۷- نمودار کاهش بازتاب برحسب بسامد نمونه‌های بی‌پوشش و پوشش دار [۱۹].



شکل ۸- نمودار کاهش بازتاب برحسب بسامد نمونه‌ها با نسبت‌های وزنی مختلف از HNR/CCB [۲۰].



(الف)

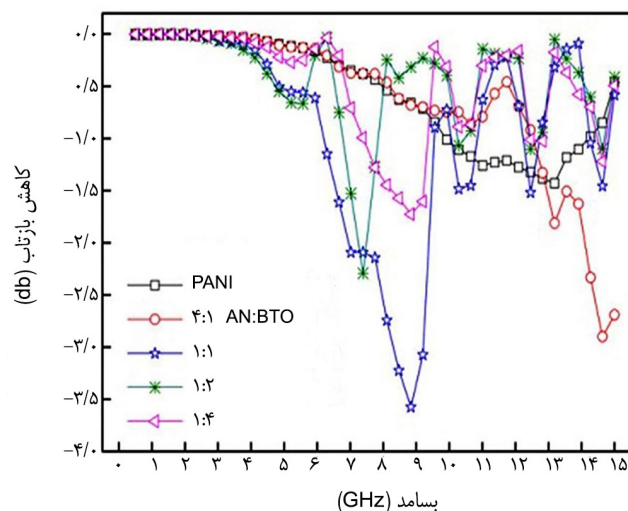


(ب)

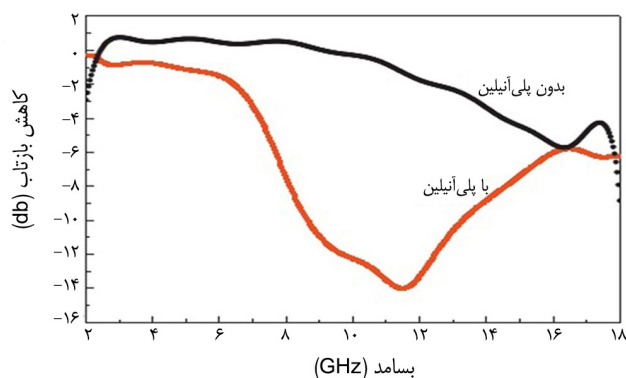
شکل ۹- نمودار کاهش بازتاب برحسب بسامد نانوکامپوزیت: (الف) با تیتیر کردن و (ب) بدون تیتیرکردن [۱۷].

تیتیر شده است، به دلیل رسانایی و عدم تجانس زیاد و مغناطیس مناسب، جذب بهتری را در ۱۰ GHz نسبت به شکل ۵-ب نشان می‌دهد که بدون تیتیرکردن است [۱۷].

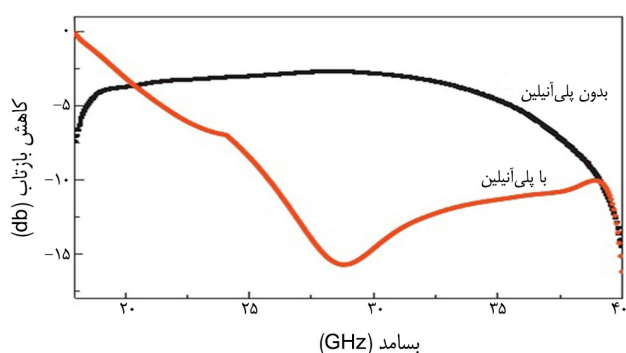
نانومواد ترکیبی متشکل از نانولوله $BaTiO_3$ و پلی‌آنیلین که به



شکل ۱۰- نمودار کاهش بازتاب BTONT/PANI با ضخامت ۲ mm [۱۸].



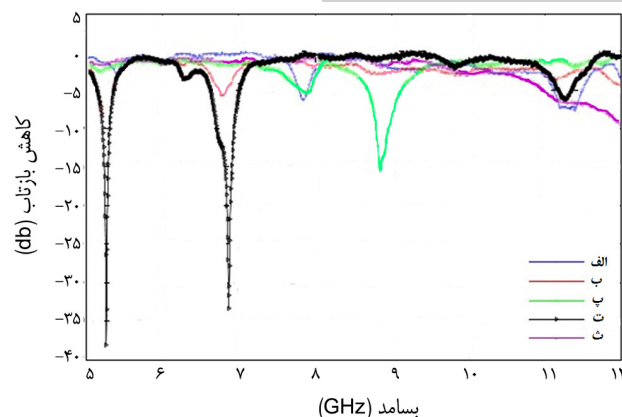
شکل ۱۰- نمودار کاهش بازتاب برحسب بسامد از ۲-۱۸ GHz با ضخامت ۲ mm [۲۲].



شکل ۱۱- نمودار کاهش بازتاب برحسب بسامد از ۲۰-۴۰ GHz با ضخامت ۲ mm [۲۲].

نانولوله کربن چنددیواره (MWCNT) با نسبت‌های مختلف مخلوط شده و کامپوزیت جاذب امواج را تشکیل می‌دهد. ثابت دی‌الکتریک آن‌ها در گستره بسامدی ریزموج اندازه‌گیری و ویژگی‌های الکترومغناطیسی و عملکرد جذب امواج آن‌ها مطالعه شد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد، سرعت افزایش رسانایی الکتریکی و ثابت دی‌الکتریک کامپوزیت‌ها با توجه به نوع پرکننده بدین شکل افزایش می‌یابد:

شکل ۸ نشان می‌دهد، کمینه کاهش بازتاب، مربوط به HNBR/MWCNT بوده که مقدار آن -۴۹ dB است. برای کامپوزیت



شکل ۹- نمودار کاهش بازتاب برحسب بسامد: (الف) بدون مایع یونی و با مایع یونی به مقدار (ب) ۰/۰۲ g، (پ) ۰/۰۸ g، (ت) ۰/۱۶ g و (ث) نانوالیاف تکلیس شده [۲۱].

نانولوله $BaTiO_3$ می‌توان به سادگی جذب را در نوار بسامدی موردنظر تنظیم کرد [۱۸].

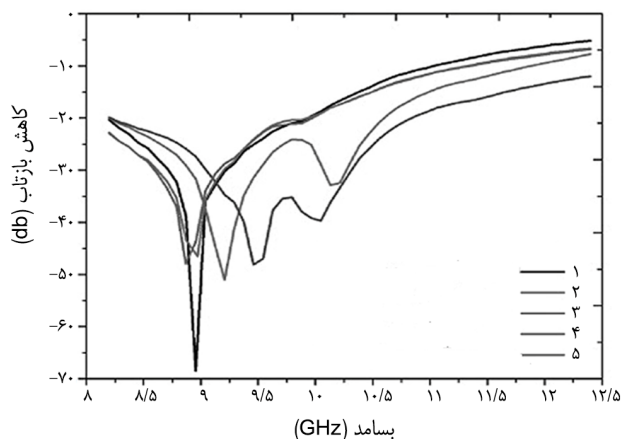
هگزا فریت باریم (BaM) به روش سل-ژل سنتز شد و با پودر TiO_2 با نسبت‌های جرمی مختلف مخلوط شد. آنگاه کامپوزیت‌های $BaM-TiO_2$ با لایه‌ای از پلیمر رسانا، مانند پلی‌پیرول، پوشش یافتند. ویژگی‌های مغناطیسی و جذب ریزموج کامپوزیت‌های پوشش‌دار و بدون پوشش در محدوده بسامدی ۱۸-۸ GHz بررسی شد. با توجه به جدول ۱ و شکل ۷، کامپوزیت‌های پوشش‌دار و بدون پوشش دارای کاهش بازتاب در محدوده ۱۸-۱۶ GHz هستند. نمونه ب ۱۱ با پوشش پلی‌پیرول، پهن‌ترین پیک را در -۲۰ dB نشان می‌دهد که پهنای آن ۴ GHz بوده و دارای کاهش بازتاب -۳۵ dB است [۱۹].

استفاده از سایر پلیمرها در ساخت مواد جاذب امواج الکترومغناطیسی

آکریلونیتریل-بوتادیان هیدروژن‌دار شده (HNBR) با سه نوع پرکننده کربنی، الیاف کربن (CF)، کربن سیاه رسانا (CCB) و

جدول ۲- نتایج رسانایی نمونه‌های پلی‌آنیلین دوپه شده (ضخامت نمونه ۰/۲۶ cm است) [۲۳].

نمونه در TPU	کد نمونه	مقاومت (Ω)	ضریب مقاومت ($\Omega.cm$)	رسانایی (S/cm)
PANL-HCL	۱	$9/8 \times 10^4$	$1/02 \times 10^5$	$8/33 \times 10^{-6}$
PANL-HCL-Cu1	۲	$2/0 \times 10^5$	$2/4 \times 10^5$	$4/16 \times 10^{-6}$
PANL-HCL-Cu2	۳	$3/75 \times 10^5$	$4/4 \times 10^5$	$2/26 \times 10^{-6}$
PANL-HCL-Cu3	۴	$3/1 \times 10^6$	$3/6 \times 10^6$	$2/77 \times 10^{-7}$
PANL-HCL-Cu4	۵	$3/15 \times 10^6$	$3/8 \times 10^6$	$2/63 \times 10^{-7}$



شکل ۱۲- نمودار کاهش بازتاب بر حسب بسامد [۲۳].

بیشترین مقدار رسانایی را در میان کامپوزیت‌ها نشان می‌دهد. کامپوزیت‌های دارای جاذب در محدوده بسامدی ۸/۲-۱۲/۴ GHz هستند. با توجه به جدول ۳ و شکل ۱۲ کمترین کاهش بازتاب در کامپوزیت فاقد مس دیده می‌شود [۲۳].

نتیجه‌گیری

امروزه جاذب امواج الکترومغناطیس در ناحیه ریزموج در حوزه‌های فناوری نظامی و مدنی از اهمیت بسزایی برخوردار است. با رشد سریع وسایل الکترونیکی بی‌سیم به دانش و موادی نیاز است که امواج مضر را جذب کند و در عین حال ارزان و مناسب نیز باشد. مواد نانو به دلیل خواص بی‌نظیر الکتریکی و مکانیکی گزینه‌های مناسبی برای جاذب‌های امواج الکترومغناطیسی هستند. کامپوزیت‌های بر پایه مواد نانو می‌توانند سبک و ارزان بوده و به راحتی سنتز شوند. پلیمر رسانا به دلیل رسانایی الکتریکی زیاد و قابل کنترل در محدوده بسامد ریزموج به عنوان زمینه کامپوزیت انتخاب شده است، اما این پلیمر تنها ماده دی‌الکتریک بوده و فاقد خصلت مغناطیسی است. با اضافه کردن درصد‌های مختلف از نانوذرات مغناطیسی به پلیمر رسانا، نانوکامپوزیت‌های جاذب امواج تهیه می‌شوند که کارایی زیادی در جذب امواج در محدوده ریزموج نشان داده‌اند.

مراجع

1. Cao J., Fu W., Yang H., Yu Q., Zhang Y., Liu S., Sun P., Zhou X., Leng Y., Wang S., Liu B., and Zou G., Large-Scale Syn-

جدول ۳- نتایج جذب ریزموج نمونه‌های پلی‌آنیلین دوپه شده [۲۳].

کد نمونه	کاهش بازتاب (dB)	بسامد تطبیقی (GHz)	محدوده بسامدی در $-10 \text{ dB} \leq (\text{GHz})$
۱	۶۸-۸۸	۸/۹۵	۸/۲-۱۰/۹۱
۲	۵۱-۳۹	۹/۲۱	۸/۲-۱۱/۸
۳	۴۸-۵۷	۹/۴۵	۸/۲-۱۲/۴
۴	۴۷-۸۹	۸/۸۷	۸/۲-۱۱/۸
۵	۴۶-۵۴	۸/۹۷	۸/۲-۱۱/۸

مقدار HNBR/CCB -13 dB و برای کامپوزیت HNBR/CF -7 dB است [۲۰].

الیاف پلی‌آکریلونیتریل شامل نیترات کروم، استات روی و مواد افزودنی مایع یونی (ILA) به شکل مواد محافظ تداخل الکترومغناطیس به وسیله الکتروریسی تهیه شد. افزایش مایع یونی به شکل الکترولیت به محلول پلی‌آکریلونیتریل موجب فرایند آسان الکتروریسی و کاهش قابل توجه اندازه الیاف الکتروریسی شده است. اثر دو مایع یونی برم و بی‌سولفات روی اندازه ذرات الیاف الکتروریسی بررسی و مشاهده شد که اندازه ذرات به شدت تحت تاثیر نوع آنیون است. الیاف الکتروریسی شده به عنوان جاذب درون رزین اپوکسی با ضخامت 4 mm جای گرفتند و ویژگی‌های جاذب امواج آن‌ها در محدوده $5-12 \text{ GHz}$ اندازه‌گیری شد. نمودار کاهش بازتاب براساس مقادیر مختلف مایع یونی در شکل ۹ نشان داده شده است [۲۱].

کامپوزیت پلی‌آنیلین-نانولوله کربن چندلایه (PANI/MWNT) به روش پلیمرشدن درجا سنتز و رزین اپوکسی به عنوان جاذب امواج به آن افزوده شد. ویژگی‌های جاذب امواج در محدوده بسامد $2-18 \text{ GHz}$ و $18-40 \text{ GHz}$ بررسی شد. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان می‌دهند، افزودن پلی‌آنیلین موجب دستیابی به جذب بهتر و کاهش بازتاب کمتر به ویژه در محدوده بسامد بیشتر می‌شود [۲۲].

پلی‌آنیلین دوپه شده با CuCl_2 با درصد‌های مختلف وزنی به روش پلیمرشدن اکسایشی درجا تهیه شده و آنگاه در ماتریس پلیمری پراکنده شدند. با توجه به نتایج موجود در جدول ۲، دوپه شدن، خصلت رسانایی پلیمر مادر را کاهش می‌دهد. PANI-HCl

thesis and Microwave Absorption Enhancement of Actinomorphic Tubular $\text{ZnO/CoFe}_2\text{O}_4$, *J. Phys. Chem. B*, **113**, 4642-

- 4647, 2009.
2. Namai A., Sakurai S., Nakajima M., Suemoto T., Matsumoto K., Goto M., Sasaki S., and Ohkoshi S., Synthesis of an Electromagnetic Wave Absorber for High-Speed Wireless Communication, *J. Am. Chem. Soc.*, **131**, 1170-1173, 2008.
3. Zhu C., Zhang M., Qiao Y., Xiao G., Zhang F., and Chen Y., Fe₃O₄/TiO₂ Core/Shell Nanotubes: Synthesis and Magnetic and Electromagnetic Wave Absorption Characteristics, *J. Phys. Chem. C*, **114**, 16229-16235, 2010.
4. Qi X., Deng Y., Zhong W., Yang Y., Qin C., Au C., and Du Y., Controllable and Large-Scale Synthesis of Carbon Nanofibers, Bamboo-Like Nanotubes, and Chains of Nanospheres over Fe/SnO₂ and Their Microwave-Absorption Properties, *J. Phys. Chem. C*, **114**, 808-814, 2009.
5. Zhou M., Zhang X., Wei J., Zhao S., Wang L., and Feng B., Morphology-Controlled Synthesis and Novel Microwave Absorption Properties of Hollow Urchinlike α -MnO₂ Nanostructures, *J. Phys. Chem. C*, **115**, 1398-1402, 2010.
6. Zhang D., Zhang W., and Cai J., Fabrication and Electromagnetic Properties of Flake Ferrite Particles Based on Diatomite, *J. Magn. Magn. Mater.*, **323**, 2305-2309, 2011.
7. Wan J., Tsai J., Chen S., Peng C., and Hwang C., Microwave-absorbing Characteristics for the Composites of Thermal-plastic Polyurethane (TPU)-bonded NiZn-Ferrites Prepared by Combustion Synthesis Method, *Mater. Sci. Eng. B-Solid*, **117**, 27-36, 2005.
8. Hourquebie P. and Olmedo L., Influence of Structural Parameters of Conducting Polymers on Their Microwave Properties, *Synth. Met.*, **65**, 19-26, 1994.
9. Zou Y., Liu H., Yang L., and Chen Z., The Influence of Temperature on Magnetic and Microwave Absorption Properties of Fe/Graphite Oxide Nanocomposites, *J. Magn. Magn. Mater.*, **302**, 343-347, 2006.
10. Zhao H., Zhang B., Zhang J., Zhang L., Han X., Xu P., and Zhou Y., Field-Assisted Synthesis and Electromagnetic Properties of Aligned Magnetic Nanostructures by γ -Irradiation Induced Reduction, *J. Phys. Chem. C*, **114**, 21214-21218, 2010.
11. Folgueras L.C. and Rezende M.C., Multilayer Radar Absorbing Material Processing by Using Polymeric Nonwoven and Conducting Polymer, *Mater. Res.*, **11**, 245-249, 2008.
12. Li H., Huang Y., Sun G., Yan X., Yang Y., Wang J., and Zhang Y., Directed Growth and Microwave Absorption Property of Crossed ZnO Netlike Micro-/Nanostructures, *J. Phys. Chem. C*, **114**, 10088-10091, 2010.
13. Li D., Wang H., Zhao J., and Yang X., Fabrication and Electromagnetic Characteristics of Microwave Absorbers Containing PPY and Carbonyl Iron Composite, *Mater. Chem. Phys.*, **130**, 437-441, 2011.
14. Peng, C., Wang H., Kan S., Shen M., Wei Y., and Chen S., Microwave Absorbing Materials Using Ag-NiZn Ferrite Core-Shell Nanopowders as Fillers, *J. Magn. Magn. Mater.*, **284**, 113-119, 2004.
15. Kowsari E. and Karimzadeh A.H., Using a Chiral Ionic Liquid for Morphological Evolution of BaCO₃ and its Radar Absorbing Properties as a Dendritic Nanofiller, *Mater. Lett. (Persian)*, **78**, 150-153, 2012.
16. Mandal A. and Das C.K., Effect of BaTiO₃ on the Microwave Absorbing Properties of Co-Doped Ni-Zn Ferrite Nanocomposites, *J. Appl. Polym. Sci.*, **131**, 39926-39934, 2014.
17. Phang S.W. and Kuramoto N., Microwave Absorption Property of Polyaniline Nanocomposites Containing TiO₂ and Fe₃O₄ Nanoparticles after FeCl₃.6H₂O Treatment, *Polym. Compos.*, **31**, 516-523, 2010.
18. Zhu Y.F., Fu Y.Q., Natsuki T., and Ni Q.Q., Fabrication and Microwave Absorption Properties of BaTiO₃ Nanotube/Polyaniline Hybrid Nanomaterials, *Polym. Compos.*, **34**, 265-273, 2013.
19. Akman O., Durmus Z., Kavas H., Aktas B., Kurtan U., Baykal A., and Sözeri H., Effect of Conducting Polymer Layer on Microwave Absorption Properties of BaFe₁₂O₁₉-TiO₂ Composite, *Phys. Status. Solid A*, **210**, 395-402, 2013.
20. Zhai Y., Zhang Y., and Ren W., Electromagnetic Characteristic and Microwave Absorbing Performance of Different Carbon-based Hydrogenated Acrylonitrile-Butadiene Rubber Composites, *Mater. Chem. Phys.*, **133**, 176-181, 2012.
21. Kowsari E. and Mallakmohamadi M., Electrospun PAN Nanofiber Process Control by Ionic Liquids and Electromagnetic Wave Absorbing Properties, *Mater. Lett.*, **79**, 7-10, 2012.
22. Ting T.H., Jau Y.N., and Yu R.P., Microwave Absorbing Properties of Polyaniline/Multi-walled Carbon Nanotube Composites with Various Polyaniline Contents, *Appl. Surf. Sci.*, **258**, 3184-3190, 2012.
23. Bhattacharya P., Dhibar S., and Das C.K., Polyaniline/HCl/CuCl₂/TPU Nanocomposites: Synthesis, Characterization and its Microwave Absorption Behaviour in X-Band, *Polym. Plast. Technol. Eng.*, **52**, 892-899, 2013.