

Responses of Polystyrene/MWCNT Nanocomposites to Electromagnetic Waves and the Effect of Nanotubes Dispersion

Ehsan Aghajari¹, Sadegh Morady^{1*}, Mohammad Hossein Navid Famili², S. Esmail Zakiyan³, and Atefeh Golbang²

1. Polymer Group, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, P.O. Box: 38156-8-8849, Arak, Iran
2. Polymer Engineering Group, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University, P.O. Box: 14115-114, Tehran, Iran
3. Department of Plastics, Faculty of Processing, Iran Polymer and Petrochemical Institute, P.O. Box: 14975-112, Tehran, Iran

Received 28 September 2013, accepted 26 May 2014

ABSTRACT

Electromagnetic compatibility (EMC) and electromagnetic interference (EMI) have emerged as key issues with respect to commercial and military purposes in association with electromagnetic waves. The importance of protection against electromagnetic interference in wireless communication and electronic toll collection (ETC) systems has undoubtedly increased over the years. Generally, the electromagnetic absorption properties of material depend on their intrinsic electromagnetic properties such as conductivity, magnetic permeability and dielectric constant and also factors such as thickness and frequency. The effect of each parameter on the absorption performance is yet difficult to comprehend due to the complexity of electromagnetic waves propagation in different media. Addition of pure dielectric or magnetic material to a polymer matrix is a possible way to change electromagnetic properties of the materials. In this study nanocomposites of polystyrene/multi-walled carbon nanotubes were prepared using a solution method with three different homogenizer speeds for the purpose of nanotube dispersion and evaluation of the effect of nanotube dispersion on the electromagnetic wave absorption properties. The morphology of the nanocomposites was investigated by scanning electron microscopy (SEM). The capability and properties of electromagnetic wave absorption of nanocomposites were studied in the frequency range of 5 to 8 GHz using a vector network analyzer and finally the results of their absorption were compared with each other. It was found that by improving the dispersion of nanoparticles, both the amount and bandwidth of absorption increase. Moreover, by increasing the homogenizer speed up to 10000 rpm the maximum reflection loss was reported to occur at 8 GHz.

Keywords:

electromagnetic wave
absorption,
reflection loss,
multi-walled carbon
nanotubes,
polystyrene,
nanocomposite

(*)To whom correspondence should be addressed.

E-mail: s-morady@araku.ac.ir

پاسخ نانوکامپوزیت‌های پلی‌استیرن - نانولوله کربنی چنددیواره به امواج الکترومغناطیسی و اثر پراکنش نانولوله‌ها

مجله علوم و تکنولوژی پلیمر،
سال بیست و هفتم، شماره ۳،
صفحه ۱۹۳-۱۹۳، ۱۳۹۳
ISSN: 1016-3255
Online ISSN: 2008-0883

احسان آقاجری^۱، صادق مرادی^{۱*}، محمدحسین نویدفامیلی^۲، سید اسماعیل زکیان^۲، عاطفه گلبنانگ^۲

- ۱- اراک، دانشگاه اراک، دانشکده فنی، بخش مهندسی شیمی، گروه پلیمر، صندوق پستی ۳۸۱۵۶-۸-۸۸۴۹
- ۲- تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی مهندسی، بخش مهندسی شیمی، گروه مهندسی پلیمر، صندوق پستی ۱۴۱۱۵-۱۱۴
- ۳- تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، پژوهشگاه فرایند، گروه پلاستیک، صندوق پستی ۱۴۹۷۵-۱۱۲

دریافت: ۹۲/۷/۶، پذیرش: ۹۳/۳/۵

چکیده

سازگاری و تداخل امواج الکترومغناطیس جزو ویژگی‌های کلیدی مواد در اهداف نظامی و تجاری مرتبط با امواج الکترومغناطیسی است. در حال حاضر، اهمیت حفاظت در برابر تداخل امواج الکترومغناطیسی در ارتباطات بدون سیم و سامانه‌های ETC افزایش یافته است. به‌طور کلی، قابلیت مواد در جذب امواج الکترومغناطیس به خواص ذاتی الکترومغناطیسی آنها (مثل رسانایی، نفوذپذیری مغناطیسی و گذردهی یا ثابت دی‌الکتریک) و نیز ویژگی‌هایی از قبیل ضخامت و بسامد موج به‌کار رفته وابسته است. اثر هر پارامتر روی نتایج عملکرد جذب به دلیل پیچیدگی انتشار امواج در محیط قابل درک نیست. اضافه‌کردن مواد خالص دی‌الکتریک یا مغناطیس در ماتریس پلیمری راه ممکن برای تغییر خواص عملکرد الکترومغناطیسی مواد است. در این پژوهش، نانوکامپوزیت‌های پلی‌استیرن-نانولوله کربنی چنددیواره با استفاده از روش محلولی و با سه سرعت متفاوت همگن‌ساز مکانیکی با سرعت زیاد برای پراکنش نانوذرات به منظور بررسی اثر پراکنش نانوذرات بر خواص جذب موج الکترومغناطیس تهیه شدند. شکل‌شناسی نانوکامپوزیت‌ها با میکروسکوپی الکترونی پویشی بررسی شد. خواص و قابلیت جذب موج الکترومغناطیس نانوکامپوزیت‌ها با تجزیه‌گر شبکه برداری در محدوده بسامد ۵ GHz تا ۸ GHz بررسی شد. در نهایت، نتایج جذب با یکدیگر مقایسه شد. نتایج نشان داد، با بهبود پراکنش نانوذرات به واسطه افزایش سرعت همگن‌ساز مقدار عبور و بازتاب کاهش و مقدار جذب و پهنای باند جذب افزایش می‌یابد. حداکثر اتلاف بازتاب در بسامد ۸ GHz، برابر با ۹/۹۵ dB- است و در نانوکامپوزیتی رخ داد که از ۱۰۰۰۰ rpm برای ساخت آن استفاده شد.

واژه‌های کلیدی

جذب موج الکترومغناطیس،
اتلاف بازتاب،
نانولوله‌های کربنی چنددیواره،
پلی‌استیرن،
نانوکامپوزیت

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:
s-morady@araku.ac.ir

مقدمه

به تازگی از امواج الکترومغناطیسی در محدوده بسامد گیگاهرتز به شکل فزاینده‌ای در سامانه‌های مخابراتی بی‌سیم و دستگاه‌های مدار بسامد زیاد از قبیل تلفن همراه، شبکه‌های محلی، سامانه‌های پخش ماهواره‌ای و از این نوع استفاده شده است. آلودگی ناشی از این امواج و پدیده تداخل امواج الکترومغناطیسی مشکلات متعددی را به همراه دارد. بنابراین، تقاضا برای مواد جاذب امواج الکترومغناطیسی و توسعه آنها به‌طور مداوم در حال افزایش است [۱-۵]. جاذب‌ها مطابق با پرکننده‌های اتلافی آنها و سازوکار جذب به دو گروه جاذب‌های دی‌الکتریک و مغناطیسی دسته‌بندی می‌شوند [۲،۶]. محصولات کربنی به‌عنوان مواد اتلاف دی‌الکتریک و فریت‌ها به‌عنوان مواد اتلاف مغناطیسی رفتار می‌کنند [۷].

مواد جاذب مرسوم از قبیل پودرهای فلزی و فریت‌ها بسیار سنگین هستند و همین موضوع سودمندی آنها را در کاربردهایی که سبکی مورد نیاز است، محدود می‌کند [۸]. افزودن مواد کربنی رسانا شامل دوده، الیاف کربن، رشته‌های کربنی و نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره و چنددیواره به درون ماتریس‌های پلیمری به‌عنوان روش مؤثر برای دستیابی به مواد حفاظتی سبک، کارا و مفید است [۹]. به تازگی نانوکامپوزیت‌های پلیمر- نانولوله کربنی با رسانایی زیاد به دلیل فراورش‌پذیری آسان و مقدار جذب مناسب به‌عنوان مواد استحضاطی در برابر تداخل امواج الکترومغناطیسی به‌کار گرفته می‌شوند [۱۰].

خواص و قابلیت جذب امواج به وسیله مواد با پارامترهای زیر بیان می‌شود:

گذردهی کمپلکس (complex permittivity):

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

عبورپذیری کمپلکس (complex permeability):

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

اتلاف دی‌الکتریک:

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

اتلاف مغناطیسی:

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

مقادیر بزرگ‌تر پارامتر ظاهری گذردهی کمپلکس (ϵ'') و عبورپذیری کمپلکس (μ'') به معنای بزرگ‌تر بودن پارامترهای اتلافی است که زیادبودن خواص جذب را در پی دارد [۶]. تاکنون، پژوهش‌های قابل

توجهی برای توسعه جاذب‌های امواج الکترومغناطیسی با پهنای باند گسترده، پایداری شیمیایی زیاد، سبک و ارزان انجام شده است [۳]. Yuen و همکاران نانوکامپوزیت‌های PMMA/MWCNT را به دو روش متفاوت پلیمرشدن درجا و غیردرجا (ex situ) تهیه و بررسی کردند. نتایج نشان داد، کامپوزیت‌های تهیه شده به روش پلیمرشدن درجا مقاومت الکتریکی و آستانه نفوذ کمتری در مقایسه با کامپوزیت‌های تهیه شده به روش پلیمرشدن غیردرجا دارند. همچنین آنها مشاهده کردند، اثر حفاظتی (SE) و تداخلی امواج الکترومغناطیسی (EMI) با افزایش مقدار نانولوله کربنی چنددیواره افزایش می‌یابد [۱۱].

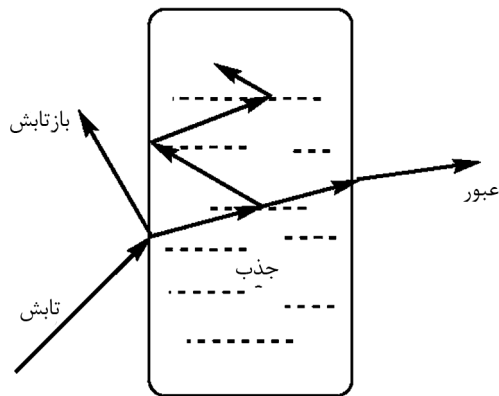
Fan و همکاران خواص الکترومغناطیسی پلیمرهای مختلف در مجاورت نانولوله کربنی چنددیواره را در محدوده بسامد ۲ GHz تا ۱۸ GHz بررسی کردند. نتایج نشان داد، حداقل بازتابش به بسامد کمتر منتقل می‌شود. همچنین، ضریب اتلاف با افزایش مقدار کربن نانولوله افزایش می‌یابد [۱۲]. Park و همکاران خواص جذب امواج الکترومغناطیسی نانوکامپوزیت‌های نانوالیاف کربن - اپوکسی را بررسی کردند. آنها نشان دادند، حداکثر اتلاف در بازتابش امواج در بسامد ۱۰ GHz رخ می‌دهد و برابر با ۴۰ dB است [۱۳]. به دلیل زیادبودن تانژانت اتلاف دی‌الکتریک نانوکامپوزیت‌های ساخته شده از نانولوله‌ها، از این مواد به‌طور گسترده به‌عنوان جاذب امواج الکترومغناطیسی و پوشش‌های ضدرادار استفاده می‌شود. سازوکار اتلاف نانولوله‌های کربنی، اتلاف دی‌الکتریک است، زیرا تانژانت اتلاف دی‌الکتریک در این نانوکامپوزیت‌ها نسبت به تانژانت اتلاف مغناطیسی بسیار بیشتر است. پس از جنگ جهانی دوم، مواد کربنی به‌عنوان نویدبخش‌ترین جاذب‌ها در نظر گرفته شدند [۱۴،۱۵].

در این پژوهش، از نانولوله کربنی چنددیواره در ماتریس پلی‌استیرن برای ساخت نانوکامپوزیت‌های جاذب امواج استفاده شده است. همچنین برای ایجاد پراکنش متفاوت نانولوله‌ها، از همگن‌ساز مکانیکی با سرعت زیاد و قابل تنظیم در بررسی اثر پراکنش نانوذرات بر خواص جذب موج الکترومغناطیسی استفاده شد. در نهایت مقدار جذب، عبور و بازتاب نمونه‌های نانوکامپوزیتی ساخته شده بررسی شد.

مبانی نظری خواص جذب موج الکترومغناطیسی

مطابق با نظریه خط عبوری، خواص جذب برای جاذب تک‌لایه که در پشت آن صفحه‌ای فلزی قرار دارد، از معادله‌های (۵) و (۶) به‌دست می‌آید:

$$RL(\text{db}) = 20 \log \left| \frac{Z_{in} - 1}{Z_{in} + 1} \right| \quad (5)$$



مواد جذب امواج الکترومغناطیسی

شکل ۲- نمایی از برخورد امواج الکترومغناطیسی به جذب [۲۶].

اتلاف بازتاب بر حسب دسی‌بل (dB) بیان می‌شود. در محاسبات راداری دسی‌بل به‌طور گسترده استفاده می‌شود. دسی‌بل ۰/۱ مقدار یک بل است و یک بل هم بخش اساسی از مقیاس لگاریتمی برای بیان نسبت دو مقدار نیروست. اگر P_1 و P_2 دو مقدار نیرو باشند، اعداد بل‌ها تشریح نسبت آنهاست:

$$N = \log \frac{P_1}{P_2} \quad (7)$$

از آنجا که عدد دسی‌بل به نسبت مقدار یا سطح دو نیرو یا ولتاژ دلالت دارد، بنابراین داریم:

$$dB = 10 \log \frac{P}{P_0} = 20 \log \frac{U}{U_0} \quad (8)$$

در این معادله، U ولتاژ و P نیروست [۲۸]. با استفاده از این معادله و نمودارهای عبور و بازتاب (برای حالتی که در پشت جذب فلز قرار ندارد) می‌توان مقادیر امواج عبوری و بازتابی از جذب را در بسامدهای مختلف به‌دست آورد و در نهایت مقدار جذب به‌وسیله جذب از درصد عبور و بازتاب امواج در آن بسامدها به‌دست می‌آید.

تجربی

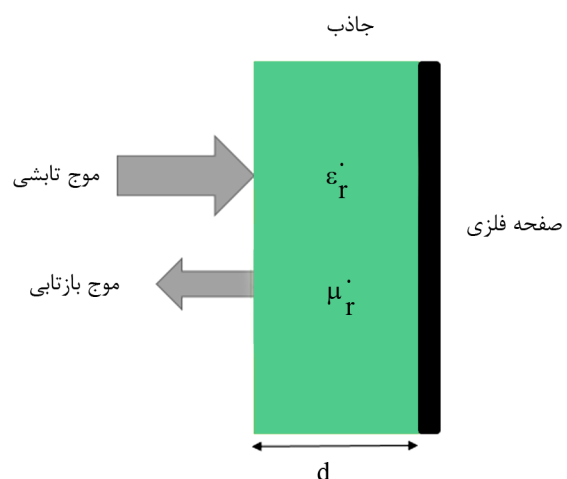
مواد

در این پژوهش، پلی‌استیرن با مصرف عمومی (1540GPPS) محصول پتروشیمی تبریز (چگالی $1/04 \text{ g/cm}^3$ و شاخص جریان مذاب 11 g/10min) به‌عنوان ماتریس پلیمری، نانولوله‌های کربنی چنددیواره

$$Z_{in} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tan h \left[j \left(\frac{2\pi f d}{c} \right) \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \right] \quad (6)$$

که Z_{in} امپدانس ورودی نرمال شده نسبت به امپدانس فضای آزاد، d ضخامت جذب، c سرعت نور و f بسامد موج الکترومغناطیسی در فضای آزاد است. شرط انطباق امپدانس $Z_{in}=1$ است و جذب عالی با این شرط حاصل می‌شود. انطباق امپدانس با ترکیب ۶ پارامتر d ، f ، ϵ_r ، μ_r و μ'' معین می‌شود. همچنین با دانستن ϵ_r و μ_r می‌توان مقدار RL (اتلاف بازتابش) در بسامدهای مختلف را در ضخامتی مشخص معین کرد [۲۴-۱۶]. شکل ۱ جذب تک‌لایه را که در پشت آن صفحه‌ای فلزی قرار دارد، نشان می‌دهد. مقدار RL برابر 10 dB بدین معناست که ۹۰٪ موج تابیده شده، به‌وسیله جذب جذب شده است. اگر این مقدار به 20 dB افزایش یابد، مقدار جذب موج ۹۹٪ می‌شود [۲۶، ۲۵].

در حالتی که صفحه فلزی در پشت نمونه‌ها قرار نداشته باشد، می‌توان از مقادیر عبور و بازتاب امواج، مقدار جذب امواج به‌وسیله نانوکامپوزیت را به‌دست آورد. زمانی که امواج رادار به سمت جذب ارسال می‌شوند، بخشی از آن پس از برخورد از سطح جذب منعکس و بخشی دیگر وارد جذب می‌شود. موج ورودی یا به‌وسیله جذب جذب و مستهلک می‌شود یا از آن عبور می‌کند. بنابراین، مقدار اتلاف در نمونه‌ها یا به عبارت بهتر مقدار جذب در حالتی که صفحه فلزی پشت آنها قرار ندارد، از اختلاف مجموع مقدار عبور و بازتاب با مقدار موج ارسالی به‌دست می‌آید. در شکل ۲ نمایی از برخورد امواج الکترومغناطیسی به جذب نشان داده شده است. هرچه مقدار RL (اتلاف در بازتابش امواج) بزرگ‌تر باشد، به معنای قابلیت جذب بیشتر است [۲۷].



شکل ۱- نمایی از یک جذب تک‌لایه [۲۴].

جدول ۱- مشخصات نانوذرات استفاده شده در این پژوهش.

نام	ابعاد ذرات (nm)	درصد خلوص	سطح ذرات (m ² /g)	کشور سازنده	رنگ	شکل نانوذرات
MWCNT	قطر داخلی، ۵-۱۰ قطر خارجی، ۱۰-۲۰ طول، ۱۰-۳۰	>۹۵	>۲۰۰	چین	سیاه	استوانه‌ای

حلال و بهبود پراکنش نانوذرات در ماتریس پلیمری از اکسترودر دوپیچی همسانگرد (دمای ۲۰۰°C و سرعت پیچ ۴۰ rpm) استفاده شد. مواد خروجی از اکسترودر زیر پرس گرم ۵ تنی دستی قرار گرفت و فیلم‌هایی با ابعاد ۳۰×۱۵×۲ mm تهیه شد. مشخصات نمونه‌های ساخته شده در جدول ۳ آمده است.

نتایج و بحث

شکل ۳ تصاویر SEM نانوکامپوزیت‌های پلی‌استیرن - نانولوله کربنی چنددیواره تهیه شده را نشان می‌دهد. به دلیل وجود برهم‌کنش‌های قوی ناشی از نیروهای واندروالسی بین نانولوله‌ها، ایجاد پراکنش مناسب از نانولوله‌های کربنی در ماتریس پلیمری به آسانی امکان‌پذیر نیست [۱۶]. از اهداف این پژوهش، ایجاد پراکنش متفاوت از نانولوله‌ها و اثر آن بر مقدار جذب امواج به وسیله نانوکامپوزیت‌هاست. تصاویر SEM از نمونه‌های ۱ و ۲ ساختار کلوخه‌ای نانولوله‌ها را در ماتریس پلیمری نشان می‌دهد، اما تصویر SEM برای نمونه ۳ نشان می‌دهد که کلوخه‌های ایجاد شده در این نمونه دارای ابعاد کوچک‌تری هستند و نیز پراکنش ذرات و پراکنش بهتری از نانولوله در ماتریس پلیمری ایجاد شده است. این موضوع حاکی از اثر مثبت سرعت زیاد همگن‌ساز مکانیکی در شکستن کلوخه‌هاست.

مقدار جذب در نمونه‌های ساخته شده با وجود صفحه فلزی در پشت نمونه نانولوله‌ها، نانوذراتی رسانا و دارای تانژانت اتلاف دی‌الکتریک ($\tan \delta$)

جدول ۳- نانوکامپوزیت‌های ساخته شده در این پژوهش.

نمونه	نانوکامپوزیت	سرعت همگن‌ساز (rpm)
۱	PS/MWCNT	۲۰۰۰
۲	PS/MWCNT	۶۰۰۰
۳	PS/MWCNT	۱۰۰۰۰

با مشخصات آمده در جدول ۱ و نیز تولوئن با کد ۴۲۳۰ محصول قطران شیمی و مشخصات جدول ۲ استفاده شد.

دستگاه‌ها

میکروسکوپ الکترونی پویشی مدل XL300 ساخت شرکت Philips هلند، تجزیه‌گر شبکه برداری مدل HP8410C برای اندازه‌گیری درصد جذب امواج، حمام خشک و پرس گرم ۵ تنی ساخت شرکت شهاب ماشین ایران، همگن‌ساز مکانیکی ۱۵۰۰۰ rpm با قابلیت تنظیم سرعت و اکسترودر دومارپیچی همسانگرد (با قطر ۱۶ mm و نسبت قطر به طول ۳۰) از جمله تجهیزاتی است که به کار گرفته شد.

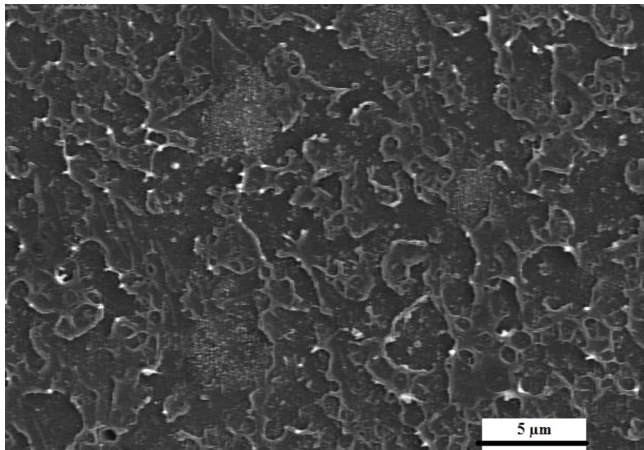
روش‌ها

ساخت نانوکامپوزیت‌های پلی‌استیرن - نانولوله کربنی چنددیواره

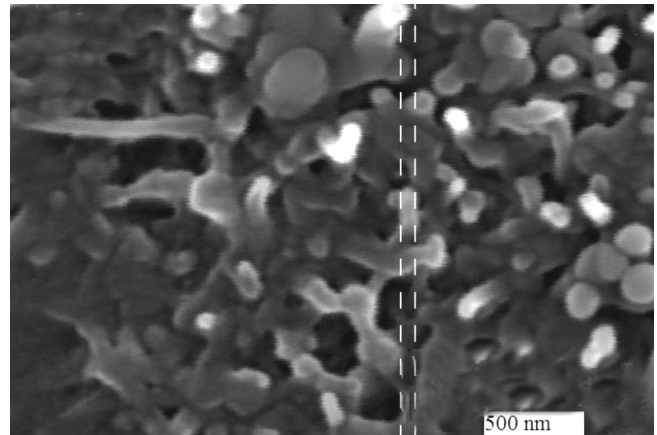
نانوکامپوزیت‌های پلی‌استیرن - نانولوله کربنی با ترکیبی از روش محلولی و مذاب تهیه شدند. ابتدا محلول ۲۰٪ وزنی پلی‌استیرن در حلال تولوئن با همگن‌ساز مغناطیسی تهیه شد. هم‌زمان با آن مقدار ۲/۵٪ وزنی نانولوله به وسیله همگن‌ساز مکانیکی با سه سرعت متفاوت ۲۰۰۰، ۶۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ rpm به مدت ۱ h در تولوئن مخلوط شد و محلولی کاملاً شفاف و یکنواخت از نانولوله در تولوئن به دست آمد. سپس محلول ۲۰٪ وزنی پلی‌استیرن حل شده در حلال تولوئن به محلول نانولوله و حلال افزوده و به مدت ۱ h دیگر در همگن‌ساز مکانیکی با سرعت‌های ۲۰۰۰، ۶۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ rpm قرار داده شد. در نهایت، محلول حاصل در ظرف مسطح شیشه‌ای ریخته و درون حمام خشک در دمای ۱۰۰°C به مدت ۴۰ min قرار گرفت تا فیلم‌های جامد پلی‌استیرن شکل گیرد. برای اطمینان از حذف کامل

جدول ۲- مشخصات تولوئن ۴۲۳۰.

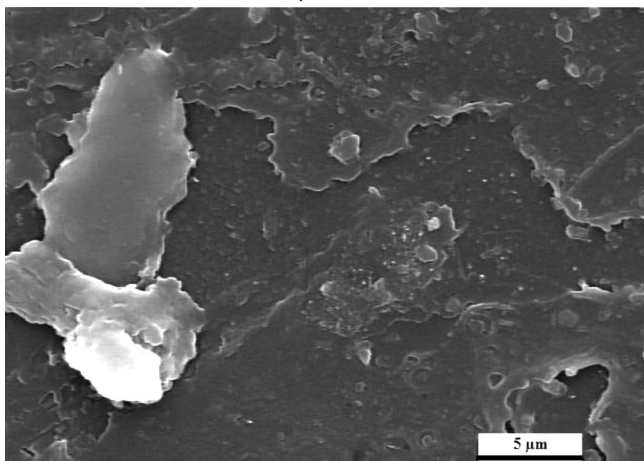
مقدار	خواص
۰/۸۷	چگالی (g/cm ³)
۹۲/۱	وزن مولکولی
بیش از ۹۹	خلوص (%)



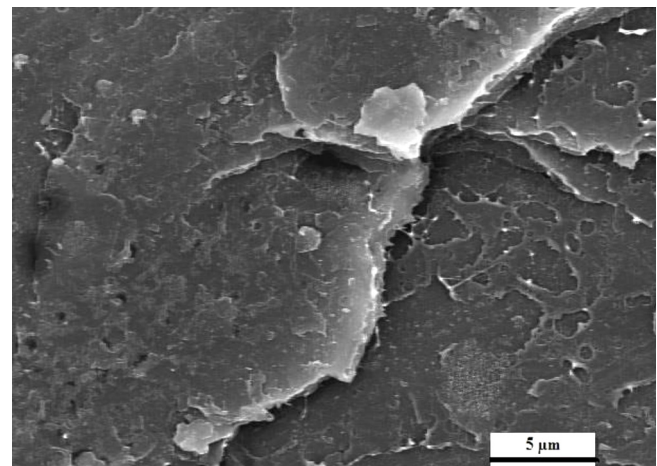
(ب)



(الف)



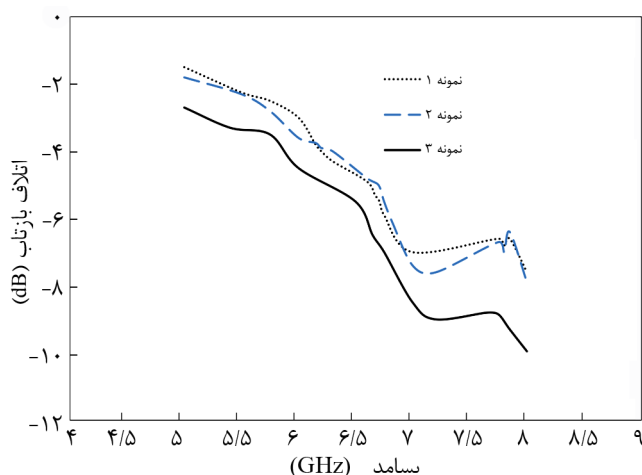
(د)



(ج)

شکل ۳- تصاویر SEM از نانوکامپوزیت‌های PS/MWCNT: (الف) نانولوله‌های کربنی، (ب) نمونه ۱، (ج) نمونه ۲ و (د) نمونه ۳.

افزایش مقدار جذب موج، که در واقع افزایش پارامتر $\tan \delta$ به وسیله

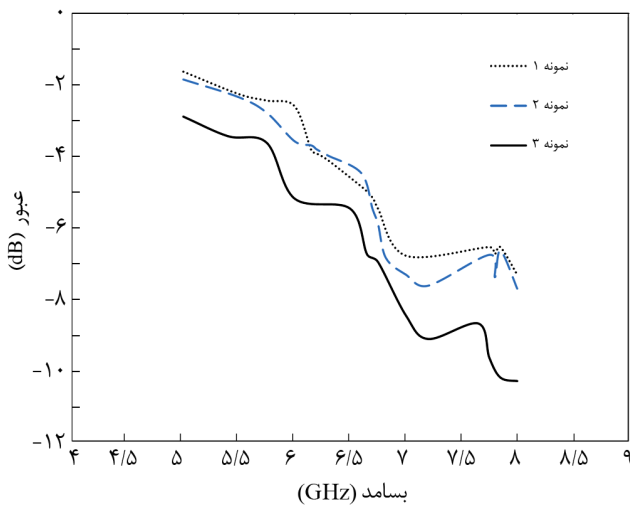


شکل ۴- اتلاف بازتاب بر حسب بسامد نمونه‌ها در محدوده بسامد ۵ GHz تا ۸ GHz

زیاد هستند و از قابلیت اتلاف انرژی موج الکترومغناطیسی زیاد برخوردارند. بنابراین انتظار می‌رود، نانوکامپوزیت‌های PS/MWCNT به واسطه داشتن رسانایی الکتریکی و خواص اتلافی زیاد نانولوله‌ها [۱۶]، مقدار جذب قابل توجهی نشان دهند.

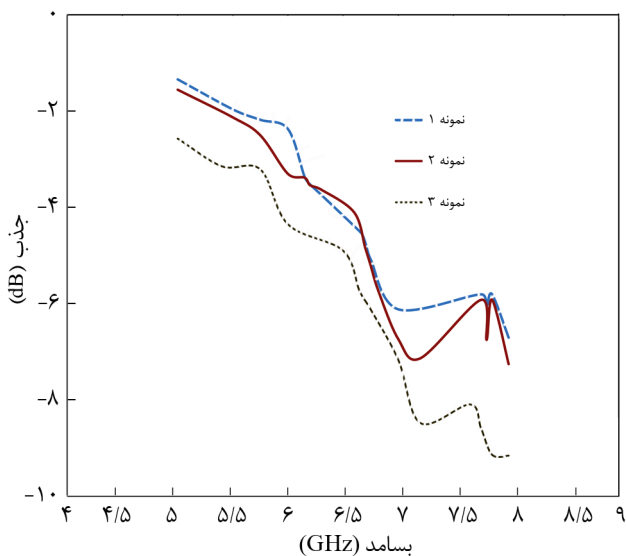
شکل ۴ اتلاف رخ داده در بازتابش امواج را برای نمونه‌های ۱، ۲ و ۳ در محدوده بسامد ۵ GHz تا ۸ GHz نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت همگن‌ساز مقدار جذب افزایش می‌یابد. افزایش سرعت همگن‌ساز منجر به اعمال تنش برشی بیشتر بر نانوذرات شده و شکسته شدن کلوخه‌ها را در پی دارد [۲۹]. در این پژوهش، اثر شکسته شدن کلوخه‌ها را به خوبی می‌توان بر مقدار جذب امواج به وسیله جاذب‌ها مشاهده کرد.

افزایش سرعت همگن‌ساز در ساخت نمونه‌های جاذب، شکستن کلوخه‌ها، پراکنش نسبی بهتر نانولوله‌ها و رسانایی بیشتر را که ناشی از کوچک‌تر شدن کلوخه‌ها و پراکنش بهتر نانولوله‌هاست، در پی دارد و به



شکل ۶- نمودار عبور نمونه‌ها در محدوده بسامد ۵ GHz تا ۸ GHz.

توانسته موج رادار را به‌خوبی جذب و مستهلک کند. نقاطی که حداکثر جذب در آنها رخ می‌دهد، در جدول ۴ آمده است. پهنای باند جذب با بیش از ۵۰٪ جذب موج رادار (سطح زیر ۳ dB - برای نمونه ۱ برابر ۲ GHz (از ۶ GHz تا ۸ GHz)، برای نمونه ۲ برابر ۲/۱۵ GHz (از ۵/۸۵ GHz تا ۸ GHz) و برای نمونه ۳ تقریباً ۳ GHz (تمام محدوده بسامدی ۵ GHz تا ۸ GHz) است. تغییر در پهنای باند جذب ناشی از تغییر در پراکنش و اندازه کلوخه نانولوله‌هاست و پهن‌تر شدن آن با افزایش سرعت همگن‌ساز ناشی از شکسته شدن کلوخه‌ها و بهبود پراکنش آنها در ماتریس پلی‌استیرن و افزایش رسانایی آنهاست.



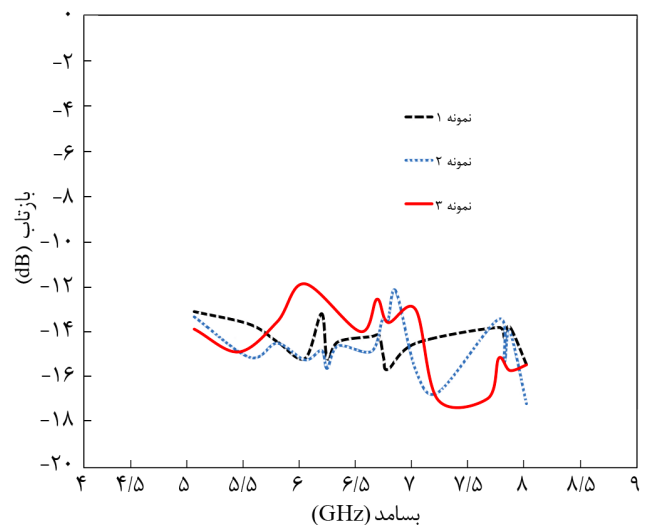
شکل ۷- نمودار جذب نمونه‌ها در محدوده بسامد ۵ GHz تا ۸ GHz.

جدول ۴- حداکثر جذب نمونه‌ها با وجود صفحه فلزی در پشت آنها.

نمونه	بسامد (GHz)	$-RL_{max}$ (dB)	جذب (%)
۱	۸	۷/۶	۸۲/۶۲۲
۲	۸	۷/۹	۸۳/۸
۳	۸	۹/۹۵	۸۹/۹

نانوکامپوزیت‌هاست، منجر می‌شود. به‌طور کلی، افزایش قدرت جذب به‌وسیله نانوکامپوزیت‌ها ناشی از افزایش پارامتر $\tan \delta$ و افزایش رسانایی نانوکامپوزیت‌ها به‌واسطه بهبود پراکنش نانولوله‌هاست.

شکل ۴ نشان می‌دهد، در نمونه‌های ۱ و ۲ تفاوت در مقدار جذب بسیار اندک است. دلیل این موضوع را می‌توان این‌طور تشریح کرد که با افزایش سرعت همگن‌ساز از ۲۰۰۰ rpm به ۶۰۰۰ rpm پراکنش و اندازه کلوخه نانولوله‌ها تغییرات بزرگی نداشته است. بهبود ناچیز مقدار جذب در نمونه ۲ نسبت به نمونه ۱ به دلیل بهبود اندک پراکنش و کوچک‌تر شدن اندازه کلوخه نانولوله‌هاست. نمونه ۳ مقدار جذب متفاوتی نسبت به دو نمونه دیگر نشان می‌دهد. در این نمونه مقدار اتلاف بازتاب (مقدار جذب) به ۹/۹۵ dB- در بسامد ۸ GHz رسیده که به معنای جذب ۸۹/۹٪ از موج راداری تأیید شده در این بسامد است، همچنین، این نانوکامپوزیت پهنای باند جذب گسترده‌تری نسبت به دو نمونه دیگر ایجاد کرده است. در ساخت نمونه ۳ نسبت به نمونه‌های ۱ و ۲ از همگن‌ساز با سرعت بیشتری استفاده شد. سرعت ۱۰۰۰۰ rpm انرژی لازم برای غلبه بر برهم‌کنش‌های قوی و اندروالسی را بین نانولوله‌ها فراهم کرده، کلوخه‌ها را شکسته و پراکنش مناسبی از نانولوله‌ها را در ماتریس پلی‌استیرن ایجاد کرده است. همین پراکنش خوب نانولوله‌ها و قابلیت اتلاف زیاد آنهاست که



شکل ۸- نمودار بازتاب نمونه‌ها در محدوده بسامد ۵ GHz تا ۸ GHz.

جدول ۵- حداکثر جذب نمونه‌ها بدون وجود صفحه فلزی در پشت آنها.

نمونه	بسامد (GHz)	عبور (-dB)	عبور (%)	بازتاب (-dB)	بازتاب (%)	جذب (-dB)	جذب (%)
۱	۸	۷/۳۲۸	۱۸/۵	۱۵/۴۳۶	۲/۸۶	۶/۷۰۴	۷۸/۶۴
۲	۸	۷/۷۲۱	۱۶/۹	۱۷/۱۶۷	۱/۹۲	۷/۲۵۳	۸۱/۱۸
۳	۸	۱۰/۳۱۵	۹/۳	۱۵/۴۵۱	۲/۸۵	۹/۱۵۴۲۴	۸۷/۸۵

اندازه و پراکنش کلوخه‌ها، زاویه تابش موج به نمونه، سطح نمونه و خواص ذاتی ماده نسبت به موج تابیده شده روی نوسانات ایجاد شده در نمودار مربوط به بازتاب اثرگذار است.

نتیجه‌گیری

به‌کارگیری سرعت‌هایی متفاوت از همگن‌ساز در ساخت نانوکامپوزیت‌ها برای پراکنش نانوذرات روی خواص جذب موج الکترومغناطیسی اثر قابل ملاحظه‌ای می‌گذارد. حداکثر جذب موج الکترومغناطیسی در سرعت ۱۰۰۰۰ rpm به‌دست آمد. هر چه سرعت همگن‌ساز افزایش یابد، مقدار اتلاف موج و پهنای باند جذب نیز افزایش می‌یابد. حداکثر اتلاف در بسامد ۸ GHz و برابر با ۹/۹۵ dB - است و در نمونه‌ای رخ داد که از همگن‌ساز با سرعت ۱۰۰۰۰ rpm برای پراکنش نانولوله‌ها استفاده شد.

مراجع

- Meng W., Yuping D., Shunhua L., Xiaogang L., and Zhijiang J., Absorption Properties of Carbonyl-Iron/Carbon Black Double-Layer Microwave Absorbers, *J. Magn. Mag. Mater.*, **321**, 3442-3446, 2009.
- Liu L., Duan Y., Ma L., Liu S., and Yu Z., Microwave Absorption Properties of a Wave-Absorbing Coating Employing Carbonyl-Iron Powder and Carbon Black, *Appl. Surface Sci.*, **257**, 842-846, 2010.
- Xiang C., Pan Y., and Guo J., Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of Multi-Walled Carbon Nanotube Reinforced Fused Silica Composites, *Ceram. Int.*, **33**, 1293-1297, 2007.
- Huang X., Chen J., Zhang J., Wang L., and Zhang Q., A New Microwave Absorber Based on Antimony-Doped Tin Oxide and Ferrite Composite with Excellent Electromagnetic Match, *J. Alloy. Compd.*, **506**, 347-350, 2010.
- Kim B.R., Lee H.K., Park S.H., and Kim H.K., Electromagnetic Interference Shielding Characteristics and Shielding Effectiveness of Polyaniline-Coated Films, *Thin Solid Film.*, **519**, 3492-3496, 2011.
- Yang Y., Qi S., and Wang J., Preparation and Microwave Absorbing Properties of Nickel-Coated Graphite Nanosheet with Pyrrole via In Situ Polymerization, *J. Alloy. Compd.*, **520**, 114-121, 2012.
- Truong V.T., Riddell S.Z., and Muscat R.F., Polypyrrole Based Microwave Absorbers, *J. Mater. Sci.*, **33**, 4971-4976, 1998.
- Fu W., Liu S., Fan W., Yang H., Pang X., Xu J., and Zou G., Hollow Glass Microspheres Coated with COFe₂O₄ and Its

- Microwave Absorption Property, *J. Magn. Magn. Mater.*, **316**, 54-58, 2007.
9. Wei C., Shen X., Song F., Zhu Y., and Wang Y., Double-layer Microwave Absorber based on Nanocrystalline Fe Microfibers, *Mater. Design*, **35**, 363-368, 2012.
 10. Xiang C., Pan Y., and Guo J., Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of Multi-Walled Carbon Nanotube Reinforced Fused Silica Composites, *Ceram. Int.*, **33**, 1293-1297, 2007.
 11. Yuen S.M., Ma C.C.M., Chuang C.Y., Yu K.C., Wu S.Y., Yang C.C., and Wei M.H., Effect of Processing Method on the Shielding Effectiveness of Electromagnetic Interference of MWCNT/PMMA Composites, *Compos. Sci. Technol.*, **68**, 963-968, 2008.
 12. Fan Z., Luo G., Zhang Z., Zhou L., and Wei F., Electromagnetic and Microwave Absorbing Properties of Multi-Walled Carbon Nanotubes/Polymer Composites, *Mater. Sci. Eng.*, **132**, 85-89, 2006.
 13. Park Ki.Y., Han J.H., Lee S.B., and Yi J.W., Microwave Absorbing Hybrid Composites Containing Ni-Fe Coated Carbon Nanofibers prepared by Electroless Plating, *Composites: Part A*, **42**, 573-578, 2011.
 14. Liu G., Wang L., Chen G., Hua S., Ge C., Zhang H., and Wu R., Enhanced Electromagnetic Absorption Properties of Carbon Nanotubes and Zinc Oxide Whisker Microwave Absorber, *J. Alloy. Compd.*, **514**, 183-188, 2012.
 15. Zou T., Zhao N., Shi C., and Li J., Microwave Absorbing Properties of Activated Carbon Fiber Polymer Composites, *Bull. Mater. Sci.*, **34**, 75-79, 2011.
 16. Xiang C., Pan Y., and Guo J., Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of Multi-Walled Carbon Nanotube Reinforced Fused Silica Composites, *Ceram. Int.*, **33**, 1293-1297, 2007.
 17. Gaman A.M., Rezende M.C., and Dantas C.C., Dependence of Microwave Absorption Properties on Ferrite Volume Fraction in MnZn Ferrite/Rubber Radar Absorbing Materials, *J. Magn. Mater.*, **323**, 2782-2785, 2011.
 18. Cao J., Fu W., Yang H., Yu Q., Zhang Y., Wang S., Zhao H., Sui Y., Zhou X., Zhao W., Leng Y., Zhao H., Chen H., and Qi X., Fabrication, Characterization and Application in Electromagnetic Wave Absorption of Flower-like ZnO/Fe₃O₄ Nanocomposites, *Mater. Sci. Eng.*, **175**, 56-59, 2010.
 19. Fan Y., Yang H., Li M., and Zou G., Evaluation of the Microwave Absorption Property of Flake Graphite, *Mater. Chem. Phys.*, **115**, 696-698, 2009.
 20. Liu G., Wang L., Chen G., Hua S., Ge C., Zhang H., and Wu R., Enhanced Electromagnetic Absorption Properties of Carbon Nanotubes and Zinc Oxide Whisker Microwave Absorber, *J. Alloy. Compd.*, **514**, 183-188, 2012.
 21. Gang Y.R., Electromagnetic Properties and Microwave Absorption Properties of BaTiO₃ Carbonyl Iron Composite in S and C Bands, *J. Magn. Magn. Mater.*, **323**, 1805-1810, 2011.
 22. Gama A.M., Rezende M.C., and Dantas C.C., Dependence of Microwave Absorption Properties on Ferrite Volume Fraction in MnZn Ferrite/Rubber Radar Absorbing Materials, *J. Magn. Mater.*, **323**, 2782-2785, 2011.
 23. Yang W., Fu Y., Xia A., Zhang K., and Wu Z., Microwave Absorption Property of Ni-Co-Fe-P-Coated Flake Graphite Prepared by Electro Less Plating, *J. Alloy. Compd.*, **518**, 6-10, 2012.
 24. Choi C.M., Kim D.I., Je S.H., and Choi Y.S., A Study on Electromagnetic Wave Absorber for the Collision-Avoidance Radar, *Current Appl. Phys.*, **7**, 586-589, 2007.
 25. Liu Y., Zhang Z., Xiao S., Qiang C., Tian L., and Xu J., Preparation and Properties of Cobalt Oxides Coated Carbon Fibers as Microwave-absorbing Materials, *Appl. Surface Sci.*, **257**, 7678-7683, 2011.
 26. Huo J., Wang L., and Yu H., Polymeric Nanocomposites for Electromagnetic Wave Absorption (Review), *J. Mater. Sci.*, **44**, 3917-3927, 2009.
 27. Fan Y., Yang H., Li M., and Zou G., Evaluation of the Microwave Absorption Property of Flake Graphite, *Mater. Chem. Phys.*, **115**, 696-698, 2009.
 28. Rycroft M.J., Barton D.K., and Leonov S.A., *Radar Technology Encyclopedia*, Boston, London, 1-536, 1988.
 29. Tadmor Z. and Gogos C.G., *Principles of Polymer Processing*, 2nd ed., John Wiley and Sons, 322-408, 2006.