Iranian Journal of Polymer Science and Technology Vol. 28, No. 3, 189-195 August-September 2015 ISSN: 1016-3255 Online ISSN: 2008-0883

# The Effect of Foaming Process on the Radar Absorbing Properties of PMMA/MWCNT Composites

Maziar Soltani Alkuh, Mohammad Hossein Navid Famili\*, and M. Hasan Moeini

Polymer Engineering Group, Faculty of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University, P.O. Box: 14115-143, Tehran, Iran

Received: 10 June 2014, accepted: 11 April 2015

## **ABSTRACT**

lightweight polymer composite with a broad bandwidth, tunable absorption frequency and multi-functionality is an ideal material for making a radar absorber. In general, composite microcellular foams have many potential applications due to their lightweight, high mechanical properties and monotonous cell structure. In this research, the effect of foaming method on the radar absorbing properties of composite radar absorbers was investigated. In the first step, a controllable, repeatable and high pressure/temperature operation foaming system by supercritical CO, gas as foaming agent was designed and built. The composites based on poly(methyl methacrylate) (PMMA) and multiwall carbon nanotube (MWCNT) at different weight percentages were prepared by solvent-anti solvent coagulation method. The sample sheets with 3 mm thickness were molded using hot compression molding method. Then, the foaming process was performed and the cell morphology of the prepared foams was studied using scanning electron microscopy. Monotonous cell structure of the composite foams revealed a good dispersion of nanoparticles in the polymer matrix. The data of the reflected radar waves (before and after foaming) showed that the foaming reduced the reflection of the radar waves to less than 10 percent in all the samples. It is important to note that the absorption of radar waves was increased with the foaming of neat PMMA. It was observed that the foaming of composites increased the threshold of absorption of radar waves from less than 1 wt% nanotube for the unfoamed samples to 1-3 wt% nanotube for the foamed samples.

(\*)To whom correspondence should be addressed. E-mail: nfamili@modares.ac.ir

#### Keywords: radar absorber.

polymer foam, supercritical CO<sub>2</sub>, composite, multi-wall carbon nanotube

قابل دسترس در نشانی: http://jips.ippi.ac.ir

مجله علوم و تکنولوژی پلیمر، سال بیست و هشتم، شماره ۳،

مىغمە ١٩٩ - ١٨٩ - ١٣٩٤ ISSN: 1016-3255 Online ISSN: 2008-0883

اثر فرایند اسفنج کردن بر خواص جذب رادار کامپوزیت های پلی متیل متاکریلات-نانولوله های کربن چنددیواره

مازيار سلطاني الكوه، محمدحسين نويد فاميلي\*، محمد حسن معيني

تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی شیمی، گروه مهندسی پلیمر، صندوق پستی ۱٤۳–۱٤۱۱

دریافت: ۹۲/۳/۲۰، پذیرش: ۹٤/۱/۲۲

چکيده

جاذب امواج رادار كامپوزيتي پايەپليمرى با وزن كم، پهناي باند، بسامد جذب قابلتنظيم و چندعاملیبودن، جاذبی ایدهآل بهشمار میآید. بهطور کلی، اسفنجهای میکروسلولی کامیوزیتی يايه پليمري، به دليل خواص مطلوب مكانيكي در عين سبك وزني و ساختار سلولي يكنواخت، يتانسيل استفاده را در کاربردهای مختلف دارند. در این پژوهش، اثر اسفنجکردن بر خواص جذب راداری جاذبهای کامپوزیتی پایه پلیمری ردیابی شد. در گام نخست، سامانه اسفنج سازی با قابلیت کنترل و تکرارپذیری، عملکرد در فشار و دمای زیاد و با عامل اسفنجساز گاز CO<sub>2</sub> ابربحرانی طراحی و ساخته شد. كامپوزیت هایی برپایه پلی متیل متاكریلات، حاوی درصدهای مختلف نانولوله های كربن چنددیواره به روش انعقاد ساخته شدند. نمونههای تهیه شده با روش قالبگیری فشاری گرم به شکل ورق هایی به ضخامت ۳ mm تبدیل شدند. سپس، در شرایط یکسان فرایند اسفنج سازی انجام و شكل شناسى سلولى اسفنجها با تصاوير ميكروسكوپي الكتروني ارزيابي شد. ساختار سلولي یکنواخت اسفنجهای کامیوزیتی حاکی از پراکنش مناسب نانو ذرات در ماتریس پلیمری بود. بررسی مقدار بازتاب موج تابشی به نمونه ها (پیش و پس از اسفنجسازی) نشان داد، اسفنجکردن باعث کاهش چشمگیر متوسط بازتاب به مقادیر زیر ٪۱۰ شد. افزایش درصد جذب موج تابشی به اسفنج پلیمتیل متاکریلات خالص نسبت به حالت اسفنج نشده از نتایج جالب این پژوهش بود. همچنین، در نمودار درصد جذب-بارگذاری نانوذرات مشاهده شد، اسفنجکردن کامپوزیت ها آستانه نفوذ را از کمتر از ٪۱ بارگذاری نانوذرات برای حالت اسفنج نشده به مقداری بین ٪۱ تا ٪۳ بارگذاری برای حالت اسفنج شده افزایش داد.

#### واژههای کلیدی

جاذب رادار، اسفن<del>ج</del> پلیمری، CO<sub>2</sub> ابربحرانی، کامپوزیت، نانولوله کربن چنددیواره

\* مسئول مكاتبات، پيامنگار: nfamili@modares.ac.ir

www.SID.ir

#### مقدمه

در سالهای اخیر، تنوع و گستردگی پیشرفت وسایل الکترونیکی از روند چشمگیری برخوردار بوده است، به گونهای که به کارگیری این تجهیزات که با بهره گیری از فناوریهای الکترومغناطیسی طراحی و ساخته شدهاند، مستلزم استفاده از امواج الکترومغناطیس از بسامدهای صنعتی تا بسامدهای امواج میکرو هستند. توسعه این نوع سامانهها با وجود مزایای فراوان، باعث ایجاد مشکلاتی برای سایر وسایل الکترونیکی و نیز سلامتی انسان در توانهای مصرفی زیاد شده است. برای غلبه بر این مشکلات، مواد جاذب امواج با قابلیت جذب انرژی امواج الکترومغناطیسی ناخواسته اکیداً مورد نیاز هستند [1].

بسبک بودن جاذب بسیار مهم و مطلوب است. بدین منظور، سبک بودن جاذب بسیار مهم و مطلوب است. بدین منظور، پژوهشگران برای کاهش بیشتر وزن جاذبهای پایه پلیمری، جاذبهای اسفنجی را پیشنهاد دادماند [۲]. از طرف دیگر، ساختار سلولی ویژه اسفنجها و استفاده های متعدد از آنها به عنوان جاذبهای صوت و عایق های گرمایی و ترکیب آنها با خواص مطلوب مکانیکی و رسانایی الکتریکی نانوذرات مختلف می تواند آنها را بهترین گزینه برای جاذب های امواج الکترومغناطیس کند.

اکثر پژوهشگران اثر اسفنج کردن بر ثابت دی الکتریک جاذب ها را بررسی کردند. Thomassin و همکاران [۳] خواص الکترومغناطیس نانوکامپوزیت های پلی کاپرولاکتون تقویت شده با نانولولههای کربن چنددیواره در دو حالت اسفنج شده و اسفنج نشده را با ضخامت های برابر بررسی کردند. طبق نتایج آنها، اسفنج شدن یک نمونه باعث کاهش ثابت دی الکتریک می شود. Fletcher و همکاران [٤] خواص الکترومغناطیس نانوکامپوزیت های فلوئوروکربن-نانولولههای کربن چنددیواره را اندازه گیری کردند. نتایج نشان داد، در درصدهای بارگذاری پرکننده کمتر از ٪۸ اسفنج سازی باعث کاهش ثابت دی الکتریک می شود و در درصدهای بیش از ٪۸ نتیجه معکوس به دست آمد. Fang و همکاران [٥] ثابت دی الکتریک اسفنج های ز فشرده سازی اسفنج های پودر شده هستند) مقایسه کردند. آنها ز فشرده سازی اسفنج های پودر شده هستند) مقایسه کردند. آنها مشاهده کردند، ثابت دی الکتریک در حالت اسفنج شده کاهش یافت و بخش موهومی ثابت گذردهی نسبت به حالت توده بیشتر شد.

در زمینه اثر اسفنج کردن بر مقدار جذب یا بازتاب موج تابشی به جاذب، Thomassin و همکاران [٦] نشان دادند، اسفنج کردن کامپوزیت پلیمتیل متاکریلات-نانولوله کربن درصد جذب را به مقدار زیادی افزایش داده است. البته مقایسه در ضخامت یکسان انجام نشد و با توجه به وابستگی خواص الکترومغناطیس به ضخامت جاذب [۷]، مقایسه صحیحی انجام نشد.

در این پژوهش، برای بررسی صحیح اثر اسفنج کردن بر خواص جذب رادار، مقدار جذب و بازتاب موج تابشی به جاذبهای اسفنج شده و نشده در ضخامتهای یکسان مقایسه شد. افزون بر این، اثر اسفنج کردن بر آستانه نفوذ در نمودار جذب موج-درصد بارگذاری نانوذرات بررسی شد. بدین منظور، از سامانه جدیدی با قابلیت زیاد کنترل ساختار اسفنج برای تولید اسفنجهای کامپوزیت پلی متیل متاکریلات-نانولوله کربن چنددیواره با ساختارهای مشابه ولی درصدهای مختلف بارگذاری نانوذرات استفاده شد و خواص جذب رادار نمونهها اندازه گیری شدند.

## تجربى

#### مواد

برای تهیه کامپوزیت ها از پلی متیل متاکریلات با مصرف عمومی نوع Mitsubishi Rayon محصول شرکت Mitsubishi Rayon به عنوان ماتریس پلیمری با چگالی ۱/۱۹ g/cm<sup>3</sup>، شاخص جریان مذاب ۲ g/10min و وزن مولکولی متوسط گرانروی ۱۲۳۰۰۰ بانولوله کربن چنددیواره (MWCNT) تهیه شده از پژوهشگاه صنعت نفت ایران با قطر داخلی ۸۳ ۸/۸ قطر خارجی ۱۰ ۹۳ و خلوص ٪۹۰ به عنوان ماده اتلافی، ۱-متیل ۲-پیرولیدون (NMP) محصول شرکت Merck با خلوص ٪۵/۹۹ به عنوان حلال و آب مقطر شرکت زلال به عنوان ضد حلال استفاده شد. برای ساخت اسفنج، گاز <sub>2</sub>O2 با خلوص ٪۹۰

#### دستگاهها

در این پژوهش، دستگاه فراصوت با قدرت W ۱۰۰۰ و بسامد رزونانس ۲۰ kHz، حمام خشک، پرس داغ ۵ تنی ساخت شرکت شهاب ماشین ایران، دستگاه VNA ساخت شرکت Hewlett-Packard آمریکا که شامل یک تجزیه گر HP8722D.06.10 و دو موجبر با استاندارد WR-90 است و میکروسکوپ الکترونی پویشی مدل XL30 ساخت شرکت Philips هلند به کار گرفته شد.

### روشها ساخت کامپوزیت

برای تهیه کامپوزیتها از روش انعقاد ارائه شده توسط Du و همکاران [۸] استفاده شد. در این روش، ابتدا نانولولهکربن به حلال NMP اضافه شد تا محلولی با غلظت MWCNT از MWCNT در

۱ mL حلال NMP تهیه شود. این محلول حین اینکه تحت همزن مغناطیسی قرار داشت، با فراصوت دهی به مدت min ۲۰ با وقفههای ۲ min ۲ به پراکنش مطلوب رسید. محلول مزبور طی این فرایند در حمام آب-یخ قرار داشت تا دمای آن کمتر از 2°٤٠ باشد و از نیروهای جاذبه بین نانولولههای کربن (CNT-CNT) که با افزایش دما به وسیله فراصوت افزایش می یابند، جلوگیری شود. سپس، مقدار معینی محلول که از پیش با همزن مغناطیسی آماده شده بود، مقدار معینی محلول که از پیش با همزن مغناطیسی آماده شده بود، نانولوله کربن پراکنش شده در NMP اضافه شد تا درصد مدنظر وقفههای min ۲ مثل شرایط قبلی در معرض فراصوت قرار داده شد تا تعلیقی یک دست حاصل شود. بدون اتلاف وقت، تعلیق حاصل از مرحله قبل در بشری حاوی آب مقطر به مقدار ۵ برابر حجم تعلیقی، که با همزن مغناطیسی اختلاط شدیدی در آن ایجاد شد، ریخته و که با همزن مغناطیسی اختلاط شدیدی در آن ایجاد شد، ریخته و

برای تولید اسفنج در فرایند اسفنجسازی، نمونه ها به شکل ورق هایی به ضخامت ۳ mm تهیه شدند. برای این کار از دستگاه پرس ۵ تنی استفاده شد. نمونه ها در دمای ۲۰۰° و فشار ۵۰ bar قالب گیری شدند.

#### ساخت اسفنج

فرایند ساخت اسفنج با سامانه طراحی شده در گروه پلیمر دانشگاه تربیت مدرس انجام شد که نمودار جریان فرایند آن در شکل ۱ آمده است. در هر فرایند ناپیوسته دو قطعه با ابعاد ۳ mm<sup>3</sup>×۱۰×۲۰ از قرص های پلیمر یا کامپوزیت با مقدار بارگذاری های ۱، ۳ و ٪۰ وزنی نانوذرات تهیه و همه نمونه ها در فشار bar او دمای ۲۰۲۰، که با کنترلکننده



الکترونیکی تنظیم شد، بهمدت ۱۰ ۱ در مخزن اشباع شدند. در زمانهای پایانی اشباع شدن نمونه ها و پس از چرخش سیال سرد بین سرماساز و مخزن سیال سرد زیر فشار، CO<sub>2</sub> به وسیله فشار افزا (بوستر) پشت سیال سرد جمع شد. بدین ترتیب، سیال سرد زیر فشار آماده ورود به مخزن فشار و دمازیاد شد. در پایان، فاصله زمانی بازشدن شیرهای بادی تعبیه شده روی مخزن فشار و دمازیاد که همان زمان تثبیت است، به مقدار ms برای همه نمونه ها در کنترل کننده الکترونیکی تنظیم شد و با سوئیچ شدن شیر اول، گاز از مخزن فشار و دمازیاد خارج و پس از ms میر دوم نیز باز شده و ساختار اسفنج تثبیت شد.

مازیار سلطانی الکوہ و همکاران

#### تعيين اندازه سلول

با نرمافزار Measurement اندازه سلولها اندازه گیری شد. بدین ترتیب که ابتدا تصاویر میکروسکوپ الکترونی در این نرمافزار باز شده و با کالیبرهکردن خطکش این نرمافزار با مقیاس داده شده در پایین هر تصویر، اندازه سلول مشخص شد.

### اندازه گیری خواص جذب رادار

اندازه گیری خواص الکترومغناطیسی نمونه ها در بازه بسامد ۱۲ GHz ۲۱–۸ با دستگاه VNA انجام شد. ابتدا نمونه ها به کمک فرزکاری با ابعاد ۲۲/۸۲×۲۰/۱۲ و ضخامت ۳ mm تهیه شده و در نگهدارنده نمونه طراحی شده قرار گرفتند. سپس، نگهدارنده نمونه بین دو موجبر بسته شده و داده ها جمع آوری شدند.

نتايج و بحث

#### شكلشناسي سلولي اسفنجها

شکل ۲ شکل شناسی سلولی نمونه های پلی متیل متاکریلات خالص و کامپوزیت های ۳،۱ و ٪۵ وزنی را نشان می دهد. ساختار سلول بسته در همه نمونه ها مشاهده شد. همه سلول ها، چندو جهی بوده که ناشی از گرانروی کم پلیمر در دمای ۲۰°۵ است. نکته قابل توجه در شکل ۲، عدم ایجاد ساختار دوقله ای (bimodal) در کامپوزیت ها با وجود نانوذرات است [۹]. دلیل این پدیده را می توان ناشی از پراکنش مناسب نانوذرات در زمینه پلیمری دانست. این پدیده نشان می دهد، روش انعقاد به کار رفته در این پژوهش روشی مناسب برای تهیه کامپوزیت ها با پراکنش مناسب است. اندازه سلول ها، چگالی سلول اسفنج ها و چگالی اسفنج ها اندازه گیری شده و نتایج در جدول ۱ آمده است. همان طور که پیش تر نیز گزارش شده است، وجود نانوذرات باعث



شکل ۲– تصاویر SEM نمونه ها: (الف) پلی متیل متاکریلات خالص با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر، (ب) کامپوزیت PMMA/MWCNT / وزنی با بزرگنمایی ۵۰۰ برابر، (ج) کامپوزیت PMMA/MWCNT / وزنی با بزرگنمایی ۵۰۰ برابر و (د) کامپوزیت PMMA/MWCNT / وزنی با بزرگنمایی ۵۰۰ برابر.

> کاهش اندازه سلول و افزایش چگال سلول شده است [۱۰،۱۱]. تغییر اندازه سلول بر خواص الکترومغناطیسی اسفنج ها اثر گذار است[٥]. مطابق جدول ۱ اندازه سلولها در کامپوزیتها تقریباً برابر است، بنابراین شرایط

> > جدول ۱- مشخصات ساختاری و چگالی اسفنجها.

چگالی اسفنج (g/cm³)	چگالی سلول (cell/cm <sup>3</sup> )	اندازه سلول (μm)	نمونه
•/1٨	۱/۲•×۱• <sup>۷</sup>	WA/W1±0/2Y	PMMA
•/٢٥	9/7E×1.*^	10/WW±W/1V	PMMA/MWCNT 1%wt
•/YV	۰/۹۸×۱۰۹	13/1/×V±7/27	PMMA/MWCNT 3%wt
•/٢٨	1/31×1•9	17/02±7/71	PMMA/MWCNT 5%wt

مناسبی برای مقایسه خواص جذب رادار اسفنجهای کامپوزیتی با مقادیر مختلف نانوذرات فراهم شد و می توان اثر افزایش نانوذرات را ردیابی کرد، بدون اینکه ساختار اسفنج به مقدار زیادی تغییر کند. سبکوزنی، عاملی مهم در جاذبهای امواج رادار است [۲] و مطابق جدول ۱ چگالی اسفنجهای تهیه شده از مقادیر بسیار مطلوبی برخوردارند.

## خواص جذب رادار اسفنج ها متوسط درصد بازتاب موج تابشی

درصد بازتاب موج تابشی به نمونه ها در نوار X در شکل ۳ آمده است. مطابق انتظار با افزایش مقدار نانوذرات و در پی آن افزایش رسانایی الکتریکی [۱۲،۱۳]، درصد بازتاب کامپوزیت ها نیز افزایش یافت. در این شکل شیب تغییرات در مقدار کمتر از ٪۱ نانوذرات افزایش یافته که ناشی از پدیده آستانه نفوذ در کامپوزیت است. این



شکل ۳- متوسط مقدار بازتاب موج تابشی به نمونه ها در بازه بسامد ۸-۱۲ GHz.

آستانه نفوذ نسبت به مقادیر گزارش شده در شرایط یکسان برای نانوکامپوزیتهای پلیمتیلمتاکریلات-نانولولههای کربن مقدار مناسبی بوده [۱۵،۱۵] و نشاندهنده پراکنش مناسب نانوذرات است.

در اثر اسفنج شدن کامپوزیت ها، درصد بازتاب موج به مقدار قابل توجهی کاهش یافته و برای اکثر نمونه ها به کمتر از ۱۰٪ رسیده که این موضوع برای جاذب های امواج رادار بسیار مناسب است. کاهش درصد بازتاب موج را می توان به دلیل وجود هوا در جاذب در اثر اسفنج شدن دانست. وجود هوا در جاذب باعث نزدیکی امپدانس جاذب محیط می شود [۱۲،۱۷] و در نتیجه مقدار بازتاب موج در فصل مشترک کاهش می یابد.

#### متوسط درصد جذب موج تابشي

شکل ٤ متوسط درصد جذب موج تابشی به نمونه ها را نشان می دهد. مشابه شکل ۳ در شکل ٤ نیز برای نمونه های اسفنج نشده بیشترین شیب تغییرات، در مقدار کمتر از ٪۱ نانوذرات مشاهده شد که







شکل ۵- طرحواره اثر اسفنجکردن بر آرایش نانولولههای کربن در ماتریس پلیمری.

نشان دهنده پدیده آستانه نفوذ در این ناحیه است. در اثر اسفنج شدن کامپوزیت ها، خواص تغییر کرد. مشاهده شد، افزایش شیب تغییرات بین مقادیر ۱ و ٪۳ بارگذاری رخ داد. دلیل این پدیده را می توان مطابق شکل ٥ ناشی از افزایش فاصله بین نانولوله های کربن در اثر اسفنج شدن دانست. افزایش فاصله نانوذرات باعث کاهش سازوکارهای اتلافی آنها [۱] در نانوکامپوزیت شده، بنابراین در اثر اسفنج شدن آستانه نفوذ افزایش یافت.

نکته جالب توجه در شکل ٤ افزایش درصد جذب نمونه اسفنج پلی متیل متاکریلات خالص نسبت به نمونه اسفنج نشده است. بدین معنا که اسفنج شدن به تنهایی سازوکاری برای جذب موج فراهم کرد. درصد جذب نمونه اسفنج ٪۱ نیز مقداری تقریباً برابر نمونه اسفنج پلیمر خالص دارد، یعنی بهقدری نانوذرات از هم فاصله گرفتهاند که هیچ اثر مثبتی بر جذب ندارند و مقدار جذب اسفنج ٪۱ بهدلیل ساختار متخلخل اسفنج است. اما به تدریج و با افزایش مقدار نانوذرات در اسفنج ها، مشاهده شد، درصد جذب نمونه اسفنج شده و نشده در مقدار ۸.۵ بارگذاری نانوذرات تقریباً دارای مقدار برابر است.

شکل ۱ نمودار درصد جذب برحسب بسامد در بازه GHz ۱۲-۸ را برای نمونههای اسفنج شده نشان می دهد. مطابق این شکل، تغییرات درصد جذب نمونهها برحسب بسامد چندان زیاد نبوده و تقریباً در تمام بازه بسامد با افزایش درصد نانوذرات، درصد جذب نیز افزایش یافته است.



....

مازیار سلطانی الکوہ و همکاران

مازیار سلطانی الکوہ و همکاران

اتلافی می شود و اسفنج کردن افزون بر اینکه خود سازوکاری اتلافی است، باعث کاهش شدید بازتاب ناشی از وجود نانوذرات در جاذب نیز می شود. البته اسفنج کردن باعث افزایش آستانه نفوذ نانوذرات شده و خواص اتلافی ناشی از وجود نانوذرات در درصدهای بیشتر نانوذرات نسبت به حالت اسفنج نشده به دست می آید.

### مراجع

- Huo J., Wang L., and Yu H., Polymeric Nanocomposites for Electromagnetic Wave Absorption, *J. Mater. Sci.*, 44, 3917-3927, 2009.
- Zhang H.B., Yan Q., Zheng W., Zhixian H., and Yu Z., Tough Graphene-Polymer Microcellular Foams for Electromagnetic Interference Shielding, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 3, 918-924, 2011.
- Thomassin J.M., Pagnoulle C., Bednarz L., Huynen I., Jerome R., and Detrembleur C., Foams of Polycaprolactone/MWNT Nanocomposites for Efficient EMI Reduction, *J. Mater. Chem.*, 18, 792-796, 2008.
- Fletcher A., Gupta M., Dudley K., and Vedeler E., Elastomer Foam Nanocomposites for Electromagnetic Dissipation and Shielding Applications, *Compos. Sci. Technol.*, **70**, 953-958, 2010.
- Fang Z., Li C., Sun J., and Zhang H., The Electromagnetic Characteristics of Carbon Foams, *Carbon*, 45, 2873-2879, 2007.
- Thomassin J.M., Vuluga D., Alexandre M., Jerome C., Molenberg I., Huynen I., and Detrembleur C., A Convenient Route for the Dispersion of Carbon Nanotubes in Polymers: Application to the Preparation of Electromagnetic Interference (EMI) Absorbers, *Polymer*, 53, 169-174, 2012.
- Ott H.W., *Electromagnetic Compatibility Engineering*, John Wiley and Sons, New Jersey, Chapt. 18, 688-731, 2009.
- Du F., Fischer J.E., and Winey K.I., Coagulation Method for Preparing Single-walled Carbon Nanotube/Poly(methyl methacrylate) Composites and Their Modulus, Electrical Conductivity, and Thermal Stability, *J. Polym. Sci., Part B: Polym. Phys.*, 41, 333-3338, 2003.
- 9. Zeng C., Hosseiny N., Zhang C., and Wang B., Synthesis and Processing of PMMA Carbon Nanotube Nanocomposite Foams,

## نتيجه گيري

بهعنوان نتیجهگیری کلی می توان بیان کرد، افزودن نانوذرات و اسفنج کردن خط مشی مناسبی برای ساخت جاذبهای سبکوزن است. بدین ترتیب که افزودن نانوذرات باعث افزایش سازوکارهای

Polymer, 51, 655-664, 2010..

- Famili M., Janani H., and Enayati M., Foaming of a Polymer-Nanoparticle System: Effect of the Particle Properties, J. Appl. Polym. Sci., 119, 2847-2856, 2011.
- Zakiyan S.E., Famili M., and Ako M., Heterogeneous Nucleation in Batch Foaming of Polystyrene in Presence of Nanosilica as a Nucleating Agent, *Sci. Technol.*, 25, 231-240, 2012.
- Zhang H.B., Yan Q., Zheng W.G., He Z., and Yu Z., Tough Graphene-Polymer Microcellular Foams for Electromagnetic Interference Shielding, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 3, 918-924, 2011.
- Eswaraiah V., Sankaranarayanan V., and Ramaprabhu S., Functionalized Graphene-PVDF Foam Composites for EMI Shielding, *Macromol. Mater. Eng.*, 296, 894-898, 2011.
- Du F., Scogna R., Zhou W., Brand S., and Fischer J., Nanotube Networks in Polymer Nanocomposites: Rheology and Electrical Conductivity, *Macromolecules*, 37, 9048-9055, 2004.
- Mazov I., Kuznetsov V., Moseenkov C., Usoltseva A., Romanenko A., and Anikeeva O., Electromagnetic Shielding Properties of MWCNT/PMMA Composites in Ka-Band, *Physica Status Solidi (b)*, 246, 2662-2666, 2009.
- Huynen I., Quiévy N., Bailly C., Bollen P., Detrembleur C., Eggermont S., and Molenberg I., Multifunctional Hybrids for Electromagnetic Absorption, *Acta Materialia*, **59**, 3255-3266, 2011.
- Eggermont S., Bollen P., Quiévy N., Detrembler C., Molenberg I., and Thomassin J., Novel Frequency Selective Electromagnetic Absorber Combining Honeycomb Waveguide and Carbon Nanotube Composites, Antennas and Propagation (EUCAP), Proceedings of the 5th European Conference on, 2201-2204, Rome, 11-15 April, 2011.