Research article

Available in: http://jips.ippi.ac.ir

Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian),
Vol. 34, No. 4, 373-385
October-November 2021
ISSN: 1016-3255
Online ISSN: 2008-0883
DOI: 10.22063/JIPST.2021.2879.2061

Mechanical Properties and Electromagnetic Interference (EMI) Shielding Performance of PP/CNT/Glass Fiber Microcellular Foam

Mahdi Gholampour[1,2*], Mohammad Hassan Aghvami Panah[3], and Seyed Reza Ghaffarian Anbaran[3*]

1. Physics and Chemistry Group, Faculty of Basic Sciences, Imam Ali University, P.O. Box 1317893471, Tehran, Iran.
2. Nanomaterials Group, Department of Engineering, Tarbiat Modares University, P.O. Box 14115-111, Tehran, Iran
3. Department of Polymer Engineering and Color Technology, Amir Kabir University of Technology, P.O. Box 15875-4413, Tehran, Iran

Received: 10 April 2021, Accepted: 1 November 2021

ABSTRACT

Hypothesis: Nowadays, lightening of polymer composites for specific applications and engineering purposes, especially electromagnetic wave absorber materials, has attracted research studies. In this work, polypropylene nanocomposite and hybrid foams incorporated with carbon nanotubes and glass fibers were produced through solid-state microcellular foaming using supercritical carbon dioxide.

Methods: First, the microstructure of nanocomposites, hybrids, and produced foams were examined by scanning electron microscopy. The electrical properties and electromagnetic interference shielding performance of the solid and foamed nanocomposites were investigated using a four-point probe method and a vector analyzer, respectively. The effect of glass fiber and CNT incorporation on tensile, compressive, and impact mechanical properties was also investigated.

Findings: Nanotubes were finely dispersed in the polypropylene matrix through melt compounding. By incorporation of CNTs, the average cell size reduced (from 49 to 22.5 μm), and cell density increased. Also, the SEM micrographs of the hybrid foams revealed that, in general, cell size increased by incorporating fiber due to nearby heterogeneous nucleation, and the size of cells that were not adjacent to the fiber decreased. As a result, a bimodal microstructure with two different cell sizes was obtained. With the incorporation of 3 wt% CNTs, electrical conductivity increased from 1.7×10^{-16} S/cm to 4.7×10^{-4} S/cm for unfoamed PS/CNT3 and from 1.6×10^{-18} S/cm to 3.36×10^{-5} S/cm for foamed PP/CNT3-F. Also, EMI shielding effectiveness increased to 11 dB and 9.5 dB for unfoamed and foamed PP/CNT3 samples, respectively. The mechanical test results showed that the addition of nanoparticles help to improve mechanical properties, including tensile, compression and impact. In solid samples, the addition of glass fiber improves the modulus and tensile strength, but due to poor interaction with polypropylene, it reduces the tensile properties of the foams. The results of both compression and impact resistance tests of foams showed that these properties are enhanced with the addition of fibers and nanoparticles.

Keywords:
microcellular foam,
nanocomposite,
hybrid,
electromagnetic interference shielding,
mechanical properties

(*)To whom correspondence should be addressed.
E-mail: Mahdi.gholampour@modares.ac.ir
Sr_ghaffarian@aut.ac.ir

Please cite this article using:
Gholampour M., Aghvami Panah M.H., and Ghaffarian Anbaran S.R., Mechanical Properties and Electromagnetic Interference (EMI) Shielding Performance of PP/CNT/Glass Fiber Microcellular Foam, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **34**, 373-385, 2021.

مقاله پژوهشی

خواص مکانیکی و عملکرد حفاظت از تداخل الکترومغناطیسی در اسفنج میکروسلولی پلی‌پروپیلن-نانولوله کربن-الیاف شیشه

دسترس‌پذیر در نشانی: http://jips.ippi.ac.ir

مجله علوم و تکنولوژی پلیمر،
سال سی‌وچهارم، شماره ۴،
صفحه ۳۸۵-۳۷۳، ۱۴۰۰
ISSN: 1016-3255
Online ISSN: 2008-0883
DOI: 10.22063/JIPST.2021.2879.2061

مهدی غلام‌پور[۲،۱]*، محمدحسن اقوامی‌پناه[۳]، سید رضا غفاریان عنبران[۳]*

۱- تهران، دانشگاه افسری امام علی (ع)، دانشکده علوم پایه، گروه شیمی و فیزیک، صندوق پستی ۱۳۱۷۸۹۳۴۷۱
۲- تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، گروه نانومواد، صندوق پستی ۱۱۱-۱۴۱۱۵
۳- تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، صندوق پستی ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵

دریافت: ۱۴۰۰/۱/۲۱، پذیرش: ۱۴۰۰/۸/۱۰

چکیده

فرضیه: در این پژوهش، با استفاده از اسفنج‌سازی میکروسلولی فرایند حالت جامد و گاز کربن دی‌اکسید در حالت ابربحرانی، اسفنج‌های نانوکامپوزیتی و هیبریدی بر پایه پلی‌پروپیلن تقویت‌شده با نانولوله‌های کربن و الیاف شیشه تولید شدند. فرضیه اصلی در این پژوهش، بررسی اثر ریزساختار و مقدار هر یک از اجزای کامپوزیت بر خواص الکتریکی، جذب امواج الکترومغناطیسی و خواص مکانیکی است.

روش‌ها: ابتدا، ریزساختار نانوکامپوزیت‌ها، هیبریدها و نیز اسفنج‌های تولیدشده، با میکروسکوپی الکترونی پویشی بررسی شد. در ادامه، خواص الکتریکی و حفاظت از تداخل امواج الکترومغناطیسی نمونه‌های نانوکامپوزیتی به‌ترتیب با روش چهارنقطه‌ای و دستگاه تحلیل‌گر برداری ارزیابی شد. در نهایت، اثر افزودن الیاف شیشه و نانولوله کربن بر خواص مکانیکی کششی، فشاری و ضربه نیز بررسی شد.

یافته‌ها: نانولوله‌ها در ماتریس پلی‌پروپیلن به روش آمیزه‌سازی مذاب پراکنده شدند. با افزودن نانولوله‌های کربن اندازه متوسط سلول اسفنج از ۴۹ μm به ۲۲/۵ μm کاهش و چگالی سلولی نیز افزایش یافت. ریزنگارهای SEM اسفنج‌های هیبریدی نشان داد، به‌طور کلی اندازه سلول با افزودن الیاف به‌دلیل هسته‌گذاری ناهمگن به دور الیاف افزایش یافت، اما اندازه سلول‌هایی که در مجاورت الیاف نبودند، کاهش یافت. با افزودن ٪۳ وزنی نانولوله‌های کربن رسانندگی الکتریکی در نمونه‌های جامد از $۱/۷\times۱۰^{-۱۶}$ S/cm به $۴/۷\times۱۰^{-۴}$ S/cm و در نمونه‌های اسفنجی از $۱/۶\times۱۰^{-۱۸}$ S/cm به $۳/۳۶\times۱۰^{-۵}$ S/cm افزایش یافت. همچنین، بازده حفاظت از تداخل الکترومغناطیسی در نمونه جامد به ۱۱ dB و در نمونه اسفنجی به ۹/۵ dB رسید. نتایج آزمون مکانیکی نشان داد، با افزودن نانوذرات کربن خواص مکانیکی کششی فشاری و ضربه بهبود می‌یابد. همچنین، افزودن الیاف شیشه به نمونه‌های جامد باعث بهبود مدول و استحکام کششی می‌شود. اما، به‌دلیل برهم‌کنش ضعیف با پلی‌پروپیلن خواص کششی در نمونه‌های اسفنجی کاهش می‌یابد. نتایج استحکام فشاری و استحکام ضربه‌ای اسفنج‌ها نشان داد، با افزودن الیاف و نانوذرات این خواص نیز بهبود می‌یابند.

واژه‌های کلیدی

اسفنج میکروسلولی،
نانوکامپوزیت،
هیبرید،
حفاظت از تداخل الکترومغناطیسی،
خواص مکانیکی

* مسئولان مکاتبات، پیام‌نگار:
Mahdi.gholampour@modares.ac.ir
Sr_ghaffarian@aut.ac.ir

مقدمه

اسفنج‌ها به‌طور گسترده در طبیعت در ساختارهای استخوان، چوب و مرجان‌ها دیده می‌شوند. در صنعت نیز، اسفنج‌ها توجه شایانی را جلب کرده‌اند [۱،۲]. یکی از برتری‌های اصلی این مواد کاهش هزینه مواد اولیه است. در کنار این مزیت اقتصادی، ساختار متخلخل و سبک، اسفنج‌ها را به موادی اساسی تبدیل کرده است که دارای کاربردی‌های متنوع از جمله عایق‌ها (انواع عایق‌های صوتی، گرمایی و الکتریکی)، ضربه‌گیرها و جاذب‌ها هستند [۳،۴]. با وجود این، برخی از محدودیت‌ها مانند استحکام کششی ضعیف، کیفیت سطح نامناسب و پایداری گرمایی و ابعادی کم، کاربرد اسفنج‌های پلیمری را محدود ساخته است [۵،۶]. این خواص از اسفنج‌ها نه‌تنها به خواص ذاتی پلیمر بستگی دارد، بلکه بر ریزساختار اسفنج‌ها از جمله چگالی سلولی، اندازه سلول و پراکنش اندازه سلول‌ها بسیار اثرگذارند. روش‌های تولید اسفنج در کل به دو دسته عمده فیزیکی و شیمیایی تقسیم‌بندی می‌شوند. در روش فیزیکی از حل‌پذیری گاز خنثی در دما و فشار مشخص و در روش شیمیایی از عوامل پف‌زا شیمیایی استفاده می‌کنند [۷]. در روش شیمیایی از ترکیبی معدنی یا آلی ناپایدار گرمایی استفاده می‌شود که به‌طور کلی در دمای محیط به‌حالت مایع یا جامد هستند و در بیش از دمای ویژه گاز تولید می‌کنند. کیفیت اسفنج تولیدی به مقدار پراکنش این عوامل بستگی دارد [۸]. در روش فیزیکی، اسفنج‌سازی به‌کمک گازهای بی‌اثری مانند کربن دی‌اکسید، نیتروژن و آرگون در فشارهای زیاد و دماهای معین انجام می‌شود. اسفنج‌سازی فیزیکی به روش‌های پیوسته و ناپیوسته انجام می‌شود. در روش‌های پیوسته مانند فرایند اسفنج‌سازی با اکستروژن، فقط از حالت مذاب ماده استفاده می‌شود. اما، در روش‌های ناپیوسته مانند فرایندهای اسفنج‌سازی با قالب‌گیری تزریقی و فشاری می‌توان از حالت مذاب و نیز حالت جامد ماده استفاده کرد. معمولاً روش حالت جامد با استفاده از اتوکلاوهای فشار زیاد انجام می‌شود و برتری‌های ویژه‌ای از جمله امکان اسفنج‌سازی قطعات و سازه‌های از پیش‌ساخته‌شده مثل فیلم‌ها، کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف، قطعات دارای اشکال پیچیده و سایر ساختارها و موادی را فراهم می‌کند که امکان ذوب آن‌ها وجود ندارد [۹،۱۰]. در این روش معمولاً از گاز به‌شکل ابربحرانی برای اشباع‌سازی استفاده می‌شود. سیال‌های ابربحرانی چگالی مایع‌گونه خود را حفظ می‌کنند، در حالی‌که ضریب نفوذ گازمانند دارند. بنابراین در حالی‌که دارای حل‌پذیری بیشتری نسبت به گاز هستند، ضریب انتقال زیاد دارند و سرعت اشباع‌سازی را به‌شدت افزایش می‌دهند. همین مشخصه فرایند تولید اسفنج‌های میکروسلولی را به سمت استفاده از سیال‌های ابربحرانی برده است [۱۱].

با افزایش استفاده از دستگاه‌های الکترونیکی، آلودگی الکترومغناطیسی ناشی از تداخل الکترومغناطیسی یکی از نگرانی‌های مهم امروزه شده است. این امواج نه تنها بر عملکرد دستگاه‌های الکترونیکی اثر می‌گذارند، بلکه بر سلامت انسان نیز اثرگذارند [۱۲،۱۳]. از این‌رو، تلاش‌های بسیاری برای تولید مواد با کاربرد جذب این امواج انجام شده است. در دهه اخیر استفاده از نانوکامپوزیت‌ها و اسفنج‌های نانوکامپوزیتی پلیمری دارای ذرات کربنی توجه زیادی را در کاربرد جاذب‌ها جلب کرده‌اند [۱۶-۱۴]. Zhang و همکاران [۱۷] اسفنج نانوکامپوزیتی پلی(متیل متاکریلات)-گرافن را با استفاده از گاز کربن دی‌اکسید برای کاربرد در جذب امواج الکترومغناطیسی تولید کردند. آن‌ها با افزودن ٪۵ وزنی نانوصفحه‌های گرافن به بازده حفاظت از تداخل الکترومغناطیسی dB ۱۹-۱۳ دست یافتند. آملی و همکاران [۱۸] اثر اسفنج‌سازی بر خواص جذب امواج درشت‌موج (macrowave) کامپوزیت پلی‌پروپیلن-الیاف کربن را بررسی کردند و دریافتند، پس از ایجاد ساختار سلولی به‌دلیل افزایش رسانندگی الکتریکی، بازده حفاظت از تداخل الکترومغناطیسی افزایش می‌یابد. بازده حفاظت (shielding effectiveness, SE) از تداخل الکترومغناطیسی از جمع سه جزء حفاظت ناشی از جذب (SE_A)، حفاظت ناشی از بازتاب (SE_R) و حفاظت ناشی از بازتاب چندگانه داخلی (SE_M) تشکیل می‌شود. با ایجاد ساختار سلولی، نقش پارامتر ناشی از جذب بیشتر می‌شود. Ling و همکاران [۱۹] اسفنج میکروسلولی پلی‌اتر ایمید-گرافن را برای بررسی جذب امواج الکترومغناطیسی تولید کردند. آن‌ها دریافتند، با ایجاد ساختار سلولی نقش جزء جذب از ٪۹۰/۸ در نمونه جامد به ٪۹۸/۹ در نمونه اسفنجی دارای ٪۱۰ وزنی صفحه‌های گرافن افزایش یافته است. این تغییر در رفتار جذب به بازتاب و در نهایت جذب امواج میان سلول‌های درون اسفنج نسبت داده شد. وجود نانوذرات کربن در اسفنج‌های میکروسلولی افزون بر بهبود خواص الکتریکی می‌تواند باعث بهبود هسته‌گذاری شود و ساختار سلولی یکنواخت‌تر، اندازه سلول ریزتر و چگالی سلولی بیشتر را ایجاد کند. همچنین، وجود ذرات نانومتری می‌تواند موجب تقویت خواص مکانیکی نهایی اسفنج حاصل شود [۲۰].

در دهه اخیر، بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی پلیمرها توجه پژوهشگران را جلب کرده است [۲۱،۲۲]. اگرچه توجه کمی به بهبود خواص مکانیکی اسفنج‌های پلیمری و ارتباط بین ریزساختار و خواص نهایی این مواد شده است. از میان روش‌های مختلف، افزودن الیاف به ماتریس‌های پلیمری یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای افزایش استحکام و مدول نهایی اسفنج است [۲۳]. وجود الیاف

در اسفنج‌های پلیمری می‌تواند افزون بر افزایش مدول و استحکام کششی و فشاری، هسته‌زایی و سرعت رشد سلول‌ها را بهبود بخشد. فصل مشترک میان پلیمر و الیاف مکان‌های مناسبی برای هسته‌سازی هستند. بنابراین، تعداد هسته‌ها در نزدیکی الیاف افزایش می‌یابد. افزون بر این، افزایش استحکام مذاب پلیمر در مجاورت الیاف و قرارگیری آن‌ها در اطراف دیواره‌های سلول از به‌هم‌پیوستگی سلول‌ها جلوگیری می‌کند [۲۴]. الیاف شیشه به‌دلیل تراکم و قیمت کم و استحکام کششی و مقاومت شیمیایی زیاد یکی از الیاف متداول برای افزایش خواص مکانیکی پلیمرهاست [۲۵]. Wang و همکاران [۲۶] نشان دادند، اسفنج کامپوزیتی الیاف شیشه-پلی(لاکتیک اسید) (PLA/GF) با چگالی کم، در مقایسه با PLA خالص پنجره فرایندی گسترده‌تر، انبساط بیشتر، اندازه سلول کوچک‌تر و ساختار سلولی یکنواخت‌تری دارد. افزون بر این، خواص فیزیکی و مکانیکی اسفنج کامپوزیتی، مانند استحکام فشاری و ضربه‌ای با وجود GF به‌طور چشمگیری بهبود یافته است [۲۶،۲۷]. در این پژوهش، ابتدا ریزساختار و خواص الکتریکی و جذب امواج الکترومغناطیسی نانوکامپوزیت و اسفنج PP/CNT در ناحیه بسامد ۱۲/۵ GHz–۸ بررسی شد. در ادامه، خواص مکانیکی هیبریدها و اسفنج متناظر آن‌ها با استفاده از آزمون‌های کششی، فشاری و ضربه ارزیابی شد.

تجربی

مواد

پلی‌پروپیلن (RPX-120L) خریداری‌شده از پتروشیمی جم با چگالی ۰/۹ g/cm^3 و شاخص جریان مذاب ۶ g/10min (ASTMD1238) به‌عنوان ماتریس پلیمری انتخاب شد. نانولوله‌های کربن به‌کار گرفته‌شده با نام اختصاری NC7000، قطر ۹/۵ nm، طول ۱/۵ µm و مساحت سطح ویژه ۲۵۰–۳۰۰ m^2/g از شرکت Nanocyl تهیه شد. الیاف شیشه استفاده‌شده در این پژوهش، نوع Taiwan glass 203P به‌صورت خردشده با طول متوسط ۳ mm و قطر ۱۳ µm بود.

دستگاه‌ها و روش‌ها

ساخت اسفنج

برای تولید نانوکامپوزیت‌ها و هیبریدها از مخلوط‌کن داخلی Brabender مدل Plasticorder W50 با حجم ۶۰ mL استفاده شد. شرایط فرایندی شامل دما ۲۰۰°C، سرعت ۸۰ rpm و مدت اختلاط ۱۰ min بود. در مجموع، شش سامانه کامپوزیتی مختلف بر اساس ترکیب درصد الیاف و نانولوله کربن تولید شد. ابتدا نانوکامپوزیت‌های PP/CNT در دو ترکیب درصد متفاوت شامل ۱ و ۳٪ وزنی نانولوله تهیه شدند و پس از بررسی خواص الکتریکی و جذب امواج الکترومغناطیسی، برای بررسی بهبود خواص مکانیکی، نانوکامپوزیت بهینه با درصدهای مختلف الیاف ترکیب شدند. سامانه‌های هیبریدی با اختصار PP/CNTx/GFy معرفی شدند که در آن x و y به‌ترتیب نشان‌دهنده ترکیب درصد نانولوله‌ها و درصد الیاف شیشه است. در نهایت، کامپوزیت‌های تهیه‌شده، برای اسفنج‌سازی، در دمای ۲۰۰°C به‌مدت ۵ min قالب‌گیری فشاری شدند. با قرارگیری نمونه‌های قالب‌گیری‌شده درون محفظه اتوکلاو با فشار زیاد و اشباع‌سازی با گاز کربن دی‌اکسید در فشار ۱۷۰ bar به‌مدت ۱ h و سپس کاهش فشار آنی در دمای ۱۳۴°C اسفنج‌های کامپوزیتی تهیه شدند.

آزمون‌های شناسایی

از میکروسکوپ الکترونی پویشی نشر میدانی (FE-SEM) مدل Mira II ساخت شرکت Tescan جمهوری چک در ولتاژ ثابت الکترون ۳۰ kV برای بررسی چشمی نانوکامپوزیت‌ها و نمونه هیبریدی استفاده شد. برای بررسی ریزساختار سلولی اسفنج‌ها میکروسکوپ الکترونی پویشی SERON AIS-2100 ساخت کره جنوبی به‌کار گرفته شد. تمام عکس‌ها در ولتاژ الکترون تابشی ۱۵ kV تهیه شدند. بدین منظور، ابتدا نمونه‌های اسفنجی درون نیتروژن مایع شکسته شدند و مقطع شکست آن‌ها پس از پوشش‌دهی با طلا، مطالعه و عکس‌برداری شد. تحلیل عکس‌های SEM با نرم‌افزار Image J به‌دقت انجام شد و داده‌هایی از جمله متوسط اندازه سلول‌ها و چگالی تجمعی سلول‌ها از آن استخراج شد. چگالی سلول‌ها از معادله (۱) به‌دست آمد:

$$N = \left(\frac{n}{A}\right)^{3/2} \times \frac{\rho_P}{\rho_F} \qquad (۱)$$

در این معادله، n تعداد سلول‌ها در سطح تعریف‌شده A بوده و ρ_p و ρ_f نیز به‌ترتیب چگالی نمونه اسفنج‌نشده و نمونه اسفنج‌شده است. برای اندازه‌گیری چگالی اسفنج‌های میکروسلولی تولیدشده از روش غوطه‌وری ارشمیدس و ترازوی با دقت چهار رقم اعشار استفاده شد. تمام آزمون‌ها در دمای محیط انجام شد. چگالی نمونه به‌کمک معادله (۲) به‌دست آمد:

$$\rho = \frac{m_o}{m_o - m_b} \qquad (۲)$$

در این معادله، m_o وزن اولیه نمونه و m_b وزن حاصل از غوطه‌وری

نمونه است. برای هر نمونه سه‌مرتبه آزمون مزبور انجام و میانگین نتایج به‌عنوان چگالی نمونه گزارش شد. با اندازه‌گیری چگالی اسفنج می‌توان ضریب انبساط حجمی (expansion ratio, ER) اسفنج مدنظر را به‌دست آورد:

$$ER = \frac{\rho_P}{\rho_F} \quad (۳)$$

در این معادله، ρ_P و ρ_F به‌ترتیب چگالی نمونه اسفنج‌نشده و اسفنج‌شده است. به‌منظور محاسبه رسانندگی الکتریکی نمونه‌های نانوکامپوزیتی از روش چهارنقطه‌ای استفاده شد. بدین صورت که پس از قراردادن نمونه میان دو الکترود مسی و اعمال جریان به آن‌ها، اختلاف پتانسیل به‌وجود آمده با ولت‌سنج مدل Solid State ساخت شرکت آمریکایی KELYHLEY Instrument اندازه‌گیری شد.

برای اندازه‌گیری مقدار حفاظت از تداخل امواج الکترومغناطیسی، دستگاه تحلیل‌گر برداری (vector network analyzer) مدل C 8410 ساخت شرکت Keysight در محدوده بسامد ۸–۱۲/۴ GHz برای نمونه مستطیلی با ابعاد استاندارد ۲/۵×۲۲×۱۱ mm^3 به‌کارگرفته شد. خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها و اسفنج متناظر آن‌ها با دستگاه Sun2500 ساخت شرکت Galdabini ایتالیا تحت آزمون کشش و فشار در دمای محیط بررسی شد. برای بررسی خواص کششی، نمونه‌های هیبریدی دارای ضخامت ۱ mm و اسفنج‌ها بسته به مقدار انبساط دارای ضخامت ۵ mm–۳ بودند. از هر نمونه سه‌مرتبه آزمون گرفته شد و میانگین نتایج گزارش شد. همچنین، سرعت کشش برای همه نمونه‌ها ۵۰ mm/min درنظر گرفته شد. برای بررسی خواص فشاری نیز سرعت آزمون ۱ mm/min درنظر گرفته شد. مقاومت در برابر شکست نمونه‌های تولیدشده با آزمون ضربه پاندولی آیزود، طبق استاندارد D256 ASTM انجام شد. برای همه نمونه‌های تولیدی چهارمرتبه آزمون ضربه انجام و میانگین نتایج گزارش شد.

نتایج و بحث

عکس‌های FE-SEM گرفته‌شده از سطح شکست نمونه‌های PP/CNT3 و PP/CNT3/GF10 در شکل ۱ آمده است. همان‌طور که در عکس‌ها دیده می‌شود، نانوذرات توزیع یکنواخت و پراکنش مناسبی درون ماتریس پلی‌پروپیلنی دارند. عکس گرفته‌شده از سطح شکست نمونه هیبریدی PP/CNT3/GF10 وجود و پخش الیاف را به‌خوبی نشان می‌دهد. شکل ۲ عکس‌های SEM گرفته‌شده از سطح شکست اسفنج‌های نانوکامپوزیتی PS/CNT و اسفنج‌های هیبریدی دارای مقادیر مختلف الیاف شیشه را نشان می‌دهد که در دمای ۱۳۴°C و فشار ۱۷۰ bar تهیه شدند. همان‌طور که مشخص است، با افزودن نانوذرات، اندازه سلول‌ها کوچک‌تر و یکنواخت‌تر و چگالی سلولی بیشتر شده و چگالی اسفنج افزایش جزئی یافته است (جدول ۱). این تغییرات در ریزساختار سلولی اسفنج را می‌توان به‌دلایل مختلفی نسبت داد: (۱) افزایش استحکام مذاب در اثر بلورش القایی ناهمگن و پراکندگی بیشتر ساختار بلوری در اثر افزودن نانوذرات، (۲) هسته‌گذاری ناهمگن سلول‌ها روی سطح نانوذرات یا ناحیه بین فاز بی‌شکل و بلوری با سد انرژی کمتر [۲۸] و (۳) افزایش استحکام

(a)

(b)

شکل ۱- عکس‌های FE-SEM از سطح شکست سرمایشی: (a) PP/CNT3 و (b) PP/CNT3/GF10.

Fig. 1. FE-SEM images of cryo-fractured surfaces of: (a) PP/CNT3 and (b) PP/CNT3/GF10.

شکل ۲- ریزنگارهای SEM و توزیع اندازه سلول اسفنج‌های تولیدشده.

Fig. 2. SEM micrographs and cell size distribution of the produced foams.

مذاب در دمای اسفنج‌سازی به‌دلیل وجود نانوذرات. هر یک از این دلایل می‌تواند علت تغییر ساختار سلولی باشد و از آنجا که سازوکار هسته‌گذاری به‌طور کامل شناخته‌شده نیست، مجموعه‌ای از این دلایل برای تغییر ساختار سلولی (کوچک‌ترشدن اندازه سلول‌ها، افزایش چگالی سلولی و یکنواختی اندازه سلول) در مجاورت نانوذرات مطرح می‌شود. نکته شایان توجه این است که با افزودن الیاف، دور الیاف سلول‌های بزرگ‌تری تشکیل شده‌اند که با افزایش بیشتر مقدار الیاف تعداد این سلول‌های بزرگ افزایش می‌یابد. همچنین، اندازه

جدول ۱- ویژگی‌های ریزساختاری اسفنج‌های تولیدی.

Table 1. Microstructureal characteristics of the prepored foams.

Sample	Average cell size (μm)	Foam density (g/cm^3)	Cell density ($cell/cm^3 \times 10^9$)	Expansion ratio
PPneat	49	0.068	7.94×10^7	13.5
PP/CNT1	32.2	0.077	1.78×10^8	11.9
PP/CNT3	22.5	0.094	4.86×10^8	9.8
PP/CNT3/GF5	39.9	0.081	2.27×10^8	11.5
PP/CNT3/GF10	25.4	0.088	1.78×10^9	10.5
PP/CNT3/GF20	31.4	0.106	5.83×10^8	8.9

سلول‌های کوچک که در مجاورت سلول‌های بزرگ قرار دارند (PP/CNT3/GF20)، کاهش چشمگیری یافته است. این تغییر در ریزساختار سلولی پس از افزودن الیاف را می‌توان به چسبندگی بین‌سطحی ضعیف میان زنجیرهای پلی‌پروپیلن و الیاف شیشه نسبت داد. بدین صورت که مقدار گاز بیشتری جذب ناحیه بین‌سطحی الیاف و ماتریس می‌شود که سبب افزایش رشد و قطر سلول دور الیاف و کاهش اندازه سلول‌های اطراف می‌شود. توزیع اندازه سلول برای اسفنج‌های تهیه‌شده در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به نتایج در جدول، افزودن نانوذرات موجب کاهش نسبت انبساط حجمی می‌شود. این کاهش به‌دلیل افزایش چگالی در نتیجه کاهش اندازه سلول است. با افزودن الیاف، نسبت انبساط حجمی در ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. افزایش در نسبت انبساط با افزودن الیاف را می‌توان به بیشترشدن متوسط اندازه سلول و کاهش در انبساط را به افزودن چگالی با افزودن الیاف نسبت داد.

رسانندگی الکتریکی نقشی اساسی در مقدار جذب امواج الکترومغناطیسی ایفا می‌کند [۲۹]. شکل ۳ (a) رسانندگی الکتریکی نانوکامپوزیت‌ها، هیبریدها و اسفنج متناظر آن‌ها را نشان می‌دهد. دیده می‌شود، با افزایش ترکیب درصد نانوذرات نیز در نمونه‌های اسفنج‌شده و اسفنج‌نشده رسانندگی الکتریکی افزایش داشته است. بدین صورت که برای نمونه اسفنج‌نشده رسانندگی از $۱/۷ \times ۱۰^{-۱۶}$ S/cm در نمونه خالص به $۳/۳ \times ۱۰^{-۸}$ و $۴/۷ \times ۱۰^{-۴}$ S/cm به‌ترتیب در نمونه‌های PP/CNT1 و PP/CNT3 افزایش یافته است. البته مقدار رسانندگی پس از ایجاد ساختار سلولی در نمونه‌های نانوکامپوزیتی کاهش یافته است. به‌عنوان مثال، رسانندگی نمونه دارای ۳٪ وزنی پس از ایجاد ساختار سلولی به حدود $۳/۳۶ \times ۱۰^{-۵}$ S/cm رسیده است. افزایش رسانندگی الکتریکی با افزایش مقدار نانولوله‌ها را می‌توان به افزایش سطح تماس نانوذرات کربن و در نتیجه برقراری مسیر حرکت و آسانی حرکت الکترون‌ها از مکانی به مکان دیگر نسبت داد. همچنین کاهش جزئی رسانندگی الکتریکی پس از اسفنج‌سازی را می‌توان به قرارگیری سلول‌ها و هوا با مقاومت زیاد در مسیر حرکت الکترون‌ها و نیز تغییر در جهت قرارگیری نانوذرات و کاهش سطح تماس آن‌ها نسبت داد. دیده می‌شود، با افزودن الیاف در نمونه‌های جامد و نیز اسفنجی، رسانندگی به‌مقدار جزئی افزایش یافته است. افزایش رسانندگی با افزودن الیاف را می‌توان به کاهش مقدار ماتریس پلی‌پروپیلن نسبت داد. به‌عبارت دیگر، با افزودن الیاف، نانولوله‌ها در مقدار ماتریس پلیمری کمتری پخش می‌شوند و در نتیجه امکان برقراری سطح تماس ذرات و حرکت الکترون‌ها افزایش می‌یابد. همین فرضیه می‌تواند برای نمونه‌های اسفنجی هیبریدی صادق باشد. بدین صورت که با ایجاد ساختار سلولی حجم بیشتری از ماتریس کاسته شده و رشد سلول‌ها باعث ایجاد تنش القایی به نانولوله‌ها می‌شوند که موجب جهت‌گیری و افزایش سطح تماس نانوذرات رسانا می‌شود. بازده حفاظت از تداخل الکترومغناطیسی از جمع سه پارامتر حفاظت ناشی از جذب (SE_A)، حفاظت ناشی از بازتاب (SE_R) و حفاظت ناشی از بازتاب چندگانه داخلی (SE_M) به‌دست می‌آید و به‌شکل کلی معادله (۴) تعریف می‌شود [۱۴]:

$$SE_{total} = SE_A + SE_R + SE_M = 10\log\left(\frac{P_I}{P_T}\right) \quad (۴)$$

در این معادله، P_I توان امواج الکترومغناطیسی ورودی و P_T توان امواج الکترومغناطیسی عبوری است. معمولاً در نانوکامپوزیت‌های پلیمری از پارامتر حفاظت ناشی از بازتاب چندگانه داخلی (SE_M) به‌دلیل جذب آن، صرف‌نظر می‌شود. در این کار نیز برای مقایسه بهتر از پارامتر SE_M صرف‌نظر شده است. شکل ۳ (b) بازده حفاظت از تداخل الکترومغناطیسی

شکل ۳- (a) رسانندگی الکتریکی، (b) بازده حفاظت از تداخل الکترومغناطیسی، (c) پارامترهای حفاظت ناشی از جذب و بازتاب نانوکامپوزیت‌ها و اسفنج‌ها و (d) بازده حفاظت از تداخل الکترومغناطیسی ویژه.

Fig. 3. (a) Electrical conductivity, (b) electromagnetic interference (EMI) shielding efficiency, (c) SE_{Total}, SE_R, and SE_A of nano-composites and foams, and (d) specific EMI shielding efficiency.

نمونه‌های نانوکامپوزیتی را نشان می‌دهد. با افزودن نانولوله‌های کربن به پلیمر بازده حفاظت افزایش یافته است. بدین ترتیب که با افزودن ۱ و ۳٪ وزنی بازده حفاظت به‌ترتیب به حدود ۵/۴ و ۱۱ dB رسیده است. با اینکه روند بازده حفاظت نمونه‌های اسفنج‌شده با افزودن نانوذرات افزایشی بوده اما بازده حفاظت نمونه‌های اسفنج‌شده نسبت به نمونه اسفنج‌نشده متناظر با ترکیب درصد یکسان کمتر است. این کاهش در بازده نهایی را می‌توان به رسانندگی الکتریکی کمتر و کاهش ضخامت واقعی انتقال تابشی درشت‌موج (ضخامت فشرده‌شده نمونه‌های اسفنج‌شده) پس از اسفنج‌سازی مربوط دانست [۱۹]. همچنین، بازده حفاظت از تداخل الکترومغناطیسی نمونه دارای الیاف (PP/CNT3/GF20) نیز در شکل ۳ (b) نشان داده شده است. با افزودن الیاف، بازده حفاظت از تداخل الکترومغناطیسی برای نمونه جامد و اسفنجی افزایش یافته است. این نتایج با نتایج رسانندگی الکتریکی در یک راستاست. بنابراین، می‌توان افزایش در بازده حفاظت از تداخل الکترومغناطیسی پس از افزودن الیاف را به افزایش رسانندگی الکتریکی نسبت داد. نقش و مقدار هر یک

از پارامترهای حفاظت ناشی از جذب و بازتاب در شکل ۳ (c) آمده است. دیده می‌شود، با ایجاد ساختار سلولی در نانوکامپوزیت، نقش بازده حفاظت ناشی از جذب افزایش یافته است. به‌عنوان مثال، در نمونه اسفنج‌نشده PP/CNT3، ۸۶/۶٪ از کل امواج حفاظت‌شده جذب شده و باقی‌مانده آن بازتاب شده است، اما در نمونه اسفنج‌شده دارای ۳٪ وزنی نانوذرات (PP/CNT3-F) ۹۲/۲٪ از امواج جذب شده و مقدار کمتری به‌وسیله بازتاب حفاظت شده است. با تقسیم بازده حفاظت به چگالی محافظ تولیدشده، بازده حفاظت ویژه به‌دست می‌آید که در شکل ۳ (d) نشان داده شده است. دیده می‌شود، بازده حفاظت ویژه نمونه‌های اسفنج نانوکامپوزیتی بیشتر از نمونه‌های اسفنج نشده است که نشان‌دهنده نقش اساسی اسفنج‌سازی روی کاهش مواد اولیه به‌کاررفته، سبک‌سازی و در نتیجه مؤثربودن برای استفاده در کاربردهای ویژه و پیشرفته مانند کاربردهای هوافضاست.

پس از بررسی خواص الکتریکی و حفاظت از تداخل الکترومغناطیسی، خواص مکانیکی تقویت‌شده با الیاف شیشه ارزیابی شد. برای آسانی بررسی نقش الیاف، در همه نمونه‌های هیبریدی، مقدار نانوذرات ثابت و ۳٪ وزنی درنظر گرفته شد. آزمون کشش نمونه پلی‌پروپیلن خالص، سامانه‌های هیبریدی و اسفنج متناظر آن‌ها در شکل ۴ آمده است. از مقایسه دو نمونه PPneat و PP/CNT3 دیده می‌شود، با افزودن نانولوله‌ها مدول و تنش تسلیم نمونه‌ها افزایش و کرنش شکست و انرژی شکست نمونه‌ها کاهش می‌یابد. این تغییرات را می‌توان به هسته‌گذاری بلوری ناهمگن، افزایش موقعیت‌های بلوری و پراکندگی بیشتر در ماتریس ناحیه بی‌شکل و نیز برهم‌کنش فیزیکی نانوذرات با ماتریس پلیمری و در نتیجه کاهش حرکت آزادانه زنجیرها نسبت داد. همچنین دیده می‌شود، با افزودن الیاف به سامانه نیز مدول و تنش تسلیم نمونه‌ها افزایش و کرنش شکست و انرژی شکست نمونه‌ها کاهش می‌یابد. این تغییر در خواص را می‌توان به تقسیم بار مکانیکی میان ماتریس و الیاف نسبت داد. بدین صورت که مقدار نیروی بیشتری به‌وسیله الیاف تحمل شده که موجب افزایش مدول و تنش تسلیم می‌شود. اما، برهم‌کنش ضعیف میان ماتریس و الیاف باعث کاهش بیشتر کرنش شکست و کاهش چقرمگی می‌شود.

از سوی دیگر در نمونه‌های اسفنج‌شده دیده می‌شود، با ایجاد ساختار سلولی تمام خواص مکانیکی کششی کاهش یافته است. همچنین، با افزودن CNT مدول و تنش شکست اسفنج افزایش و کرنش شکست آن کاهش یافته است. این تغییر در خواص را می‌توان به افزایش مقدار نانوذرات با مدول بیشتر از پلیمر در ناحیه دیواره سلولی و نیز ریزترشدن اندازه سلول‌ها نسبت داد. بر اساس نظریه Griffith با کوچک‌ترشدن قطر سلول‌ها به‌عنوان مراکز رشد ترک، تمرکز تنش در اطراف آن‌ها کاهش می‌یابد. هر دو این عوامل می‌توانند باعث این تغییر در خواص مکانیکی اسفنج‌های تهیه‌شده شوند. برخلاف نمونه‌های اسفنج‌نشده با افزایش الیاف خواص مکانیکی در حالت کششی کاهش یافته است. با توجه به عکس‌های SEM اسفنج‌ها، با افزایش مقدار الیاف مقدار سلول‌های با اندازه بزرگ‌تر افزایش می‌یابد که به‌دلیل هسته‌گذاری ناهمگن دور الیاف با سد انرژی کمتر تشکیل

(a)

(b)

شکل ۴- نمودارهای تنش-کرنش در شیوه (a) کششی و (b) فشاری.

Fig. 4. Stress-strain curves of the samples in (a) tensile and (b) compression mode.

جدول ۲- خواص مکانیکی نمونه‌های تهیه‌شده.

Table 2. Mechanical properties of prepared samples.

Sample	Young modulus (MPa)	Yield stress (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile strength (MPa)	Toughness (MPa)
PPneat	360.7	24.4	547	40.5	14181
PP/CNT3	378.1	24.6	516	36.9	12591
PP/CNT3/GF5	395.2	24.9	458	32.2	9788
PP/CNT3/GF10	490.4	27.8	385	31	8494
PP/CNT3/GF20	522.3	27.1	256	20.6	4797
PPneat-F	63.3	*	354	13.1	3492
PP/CNT3-F	84.5	*	341	13.7	3400
PP/CNT3/GF5-F	52.3	*	288	10.1	2164
PP/CNT3/GF10-F	48	*	235	8/7	1463
PP/CNT3/GF20-F	41.1	*	157	3/2	821

شده‌اند. همان‌طور که گفته شد، اندازه سلول‌ها با خواص مکانیکی نسبت عکس دارد و از آنجا که الیاف در مرکز سلول‌ها با حداقل تماس با ماتریس پلیمری قرار گرفته‌اند، هیچ نقشی در باربرداری مکانیکی ندارند. بنابراین، می‌توان کاهش خواص مکانیکی در اسفنج‌ها را به افزایش مقدار سلول‌های بزرگ و کاهش سطح مشترک الیاف با ماتریس نسبت داد. جدول ۲ میانگین مدول، تنش تسلیم و کرنش شکست هر یک از نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

شکل ۴ (b) نمودار تنش-کرنش در حالت فشاری اسفنج پلی‌پروپیلن خالص، نانوکامپوزیت دارای ٪۳ وزنی CNT و درصدهای متفاوت الیاف را نشان می‌دهد. به‌طور کلی نمودارهای مقاومت فشاری اسفنج‌ها دارای سه ناحیه هستند. (۱) ناحیه کشسان خطی که در آن معادله میان تنش و کرنش را در مقادیر ابتدایی تنش نشان می‌دهد. شیب این ناحیه نشان‌دهنده مدول کشسانی اسفنج است. این ناحیه به مقدار تغییر شکل بازگشت‌پذیر اسفنج یا به‌عبارتی مقدار خم‌شدن سلول‌ها مربوط است. (۲) ناحیه مسطح که در آن کرنش فشاری در مقدار ثابت تنش به‌شدت افزایش می‌یابد. این ناحیه به تغییر شکل بازگشت‌ناپذیر یا به‌هم‌پیوستگی سلول‌ها و شکست دیواره‌های سلولی مربوط است. تنش در این ناحیه تنش تسلیم اسفنج است و با چگالی اسفنج رابطه مستقیم دارد. (۳) ناحیه فشردگی که دیگر تمام سلول‌ها از بین رفته و فقط جامدی فشرده‌شده باقی مانده است. با توجه به شکل ۴ (b) با افزایش درصد الیاف مدول کشسانی افزایش و طول ناحیه مسطح کاهش یافته است. این تغییرات در خواص فشاری را می‌توان به افزایش چگالی، افزایش تعداد سلول‌های کوچک‌تر و نیز افزایش استحکام دیواره‌های سلولی با افزودن مقدار الیاف نسبت داد. نکته شایان توجه افزایش نسبی شیب ناحیه مسطح با افزایش درصد الیاف است. با افزایش فشار، گاز درون سلول‌ها فشرده می‌شود و به دیواره‌ها فشار دوبرابر وارد می‌کند و در نتیجه تنش ظاهرشده نیز در این ناحیه افزایش می‌یابد. از طرفی، وجود الیاف نیز در مرکز سلول‌ها با ایجاد مقاومت بیشتر در برابر فشردگی می‌تواند باعث افزایش بیشتر تنش در این ناحیه شود [۳۰]. نکته دیگری که از نمودار تنش-کرنش فشاری می‌توان دریافت اینکه با افزایش درصد الیاف مدول ناحیه

شکل ۵- استحکام ضربه‌ای آیزود.

Fig. 5. Izod impact strength.

فشردگی تغییر زیادی داشته است. این موضوع نشان می‌دهد، بیشتر الیاف درون سلول‌ها بوده است.

شکل ۵ نتایج آزمون ضربه با استفاده از دستگاه پاندولی را در حالت آیزود نشان می‌دهد. در نمونه‌های اسفنج‌نشده استحکام ضربه‌ای با افزودن نانوذرات CNT افزایش و با الیاف کاهش یافته است. همچنین، با ایجاد ساختار سلولی در هیبریدها استحکام شکست افزایش یافته است. نکته شایان توجه اینکه برخلاف نمونه‌های اسفنج‌نشده، در اسفنج‌های هیبریدی با افزایش مقدار الیاف استحکام ضربه‌ای افزایش یافت. افزایش استحکام ضربه‌ای با افزودن نانولوله‌ها را می‌توان به برهم‌کنش فیزیکی میان ماتریس و نانوذرات نسبت داد، بدین صورت که نانولوله‌ها با استحکام بیشتر در برابر رشد ترک و انتقال انرژی واردشده مقاومت بیشتری می‌کنند. در نمونه‌های بدون ساختار سلولی، کاهش استحکام ضربه‌ای با افزایش مقدار الیاف را می‌توان به کاهش چقرمگی و افزایش سفتی و شکنندگی هیبرید مربوط دانست. از طرفی افزایش کلی استحکام ضربه‌ای پس از اعمال ساختار سلولی را می‌توان به جلوگیری از رشد ترک و اتلاف انرژی واردشده به‌وسیله سلول‌ها و ریزشدن کلی اندازه سلول با افزودن مقدار الیاف نسبت داد. همچنین، قرارگیری الیاف‌ها در وسط سلول‌ها می‌تواند دلیل دیگری بر افزایش استحکام ضربه‌ای باشد، بدین صورت که در لحظه اعمال نیرو پس از فشرده‌سازی هوای داخل سلول الیاف در برابر شکست مقاومت می‌کنند.

نتیجه‌گیری

نانوکامپوزیت‌های PP/CNT و هیبریدهای PP/CNT/GF با اختلاط مذاب در ترکیب درصدهای مختلف تهیه شدند. پس از بررسی پراکنش و توزیع نانولوله‌ها و الیاف در ماتریس، نمونه‌های تولیدی با استفاده از اسفنج‌سازی فرایند حالت جامد تک‌مرحله‌ای ساختار سلولی ایجاد شدند. رسانندگی الکتریکی نمونه‌های نانوکامپوزیتی و اسفنج‌ها نشان داد، رسانندگی با افزودن نانولوله‌ها افزایش و با ایجاد ساختار اسفنجی کاهش می‌یابد. بازده حفاظت از تداخل الکترومغناطیسی اندازه‌گیری‌شده نشان داد، نمونه PP/CNT3 جامد و اسفجی به‌ترتیب دارای بازده حفاظت از تداخل الکترومغناطیسی ویژه ۱۱ و ۹/۵ بودند که نشان‌دهنده اثر بسزای اسفنج‌سازی روی سبک‌سازی و جذب امواج الکترومغناطیس است. آزمون کشش نشان داد، با افزودن الیاف و نانوذرات مدول و استحکام در نمونه‌های بدون ساختار سلولی افزایش و در نمونه‌های اسفنجی کاهش یافت. خواص فشاری و استحکام ضربه‌ای اسفنج‌ها با افزودن الیاف افزایش یافت.

مراجع

1. Zangiabadi Z. and Hadianfard M.J., The Role of Hollow Silica Nanospheres and Rigid Silica Nanoparticles on Acoustic Wave Absorption of Flexible Polyurethane Foam Nanocomposites, *J. Cell. Plast*., **56**, 395-410, 2020.
2. Banerjee R. and Ray S.S., Foamability and Special Applications of Microcellular Thermoplastic Polymers: A Review on Recent Advances and Future Direction, *Macromol. Mater. Eng.*, **305**, 2000366, 2020.
3. Aghvami-Panah M., Jamalpour S., and Ghaffarian S.R., Microwave-Assisted Foaming of Polystyrene Filled with Carbon Black; Effect of Filler Content on Foamability, *SPE Polym*, **2**, 86-94, 2021.
4. Xiao W., Liao X., Jiang Q., Zhang Y., Chen J., Yang Q., and Li G., Strategy to Enhance Conductivity of Polystyrene/Graphene Composite Foams via Supercritical Carbon Dioxide Foaming Process, *J. Supercrit. Fluid*., **142**, 52-63. 2018.
5. Miller D. and Kumar V., Microcellular and Nanocellular Solid-State Polyetherimide (PEI) Foams Using Sub-critical Carbon Dioxide II. Tensile and Impact Properties, *Polymer (Guildf)*, **52**, 2910-2919. 2011.
6. Sun X., Zhao X., and Ye L., Construction of Gradient Structure in Polyetherimide/Carbon Nanotube Nanocomposite Foam and Its Thermal/Mechanical Property, *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf*., **126**, 105579. 2019.
7. Lee S.-T. and Park C.B., *Foam Extrusion: Principles and Practice*, CRC, 2014.
8. Taki K., Nakayama T., Yatsuzuka T., and Ohshima M., Visual Observations of Batch and Continuous Foaming Processes, *J. Cell. Plast*., **39**, 155-169, 2003.
9. Xing Z., Wu G., Huang S., Chen S., and Zeng H., Preparation of Microcellular Cross-linked Polyethylene Foams by a Radiation and Supercritical Carbon Dioxide Approach, *J. Supercrit. Fluid*, **47**, 281289, 2008.
10. Khorasani M.M., Ghaffarian S.R., Goldansaz S.H., Mohammadi

N., and Babaie A., Solid-State Microcellular Foaming of PE/PE Composite Systems, Investigation on Cellular Structure and Crystalline Morphology, *Compos. Sci. Technol.*, **70**, 1942-1949, 2010.

11. Nalawade S.P., Picchioni F., and Janssen L., Supercritical Carbon Dioxide as a Green Solvent for Processing Polymer Melts: Processing Aspects and Applications, *Prog. Polym. Sci.*, **31**, 19-43, 2006.
12. Wang G., Wang L., Mark L.H., Shaayegan V., Wang G., Li H., Zhao G., Park C.B., Ultralow-Threshold and Lightweight Biodegradable Porous PLA/MWCNT with Segregated Conductive Networks for High-Performance Thermal Insulation and Electromagnetic Interference Shielding Applications, *ACS Appl. Mater. Interfaces,* **10**, 1195-1203, 2018.
13. Al-saleh M.H., EMI Shielding Effectiveness of Carbon Based Nanostructured Polymeric Materials : A Comparative Study, *Carbon N.Y.,* **60**, 146-156, 2013.
14. Panahi-Sarmad M., Noroozi M., Abrisham M., Eghbalinia S., Teimoury F., Bahramian A.R., Dehghan P., Sadri M., and Goodarzi V., A Comprehensive Review on Carbon-Based Polymer Nanocomposite Foams as Electromagnetic Interference Shields and Piezoresistive Sensors, *ACS Appl. Electron. Mater.*, **2**, 2318-2350, 2020.
15. Kumar R., Sahoo S., Joanni E., Singh R.K., Tan W.K., Kar K.K., and Matsuda A., Recent Progress on Carbon-Based Composite Materials for Microwave Electromagnetic Interference Shielding, *Carbon N.Y.,* **177**, 304-331, 2021.
16. Pawar S.P., Stephen S., Bose S., and Mittal V., Tailored Electrical Conductivity, Electromagnetic Shielding and Thermal Transport in Polymeric Blends with Graphene Sheets Decorated with Nickel Nanoparticles, *Phys. Chem. Chem. Phys*. **17**, 14922-14930, 2015.
17. Zhang H.-B., Yan Q., Zheng W.-G., He Z., and Yu Z.-Z., Tough Graphene-Polymer Microcellular Foams for Electromagnetic Interference Shielding, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **3**, 918-924., 2011.
18. Ameli A., Jung P.U., nad Park C.B., Electrical Properties and Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of Polypropylene/Carbon Fiber Composite Foams, *Carbon N.Y.,* **60**, 379-391, 2013.
19. Ling J., Zhai W., Feng W., Shen B., Zhang J., and Zheng W.G., Facile Preparation of Lightweight Microcellular Polyetherimide/ Graphene Composite Foams for Electromagnetic Interference Shielding, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **5**, 2677-2684, 2013.
20. Zhang H., Yan Q., Zheng W., He Z., and Yu Z., Tough Graphene-Polymer Microcellular Foams for Electromagnetic Interference Shielding, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **3**, 918-924, 2011.
21. Salehi H.R. and Salehi M., Synthesis and Mechanical Properties Investigation of Nano TiO_2/Glass/Epoxy Hybrid Nanocomposite, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **28**, 263-276, 2015.
22. Wang C. and Ying S., Preparation of Short Carbon Fiber/ Polypropylene Fine-Celled Foams in Supercritical CO_2, 2012. DOI.org/10.1177/0021955X1 245 9642
23. Cho B.-G., Joshi S.R., Lee J., Park Y.-B., and Kim G.-H., Direct Growth of Thermally Reduced Graphene Oxide on Carbon Fiber for Enhanced Mechanical Strength, *Compos. Part B: Eng.*, 108010, 2020.
24. Yang J. and Li P., Characterization of Short Glass Fiber Reinforced Polypropylene Foam Composites with the Effect of Compatibilizers: A Comparison, *Reinf. Plast. Compos.*, **34**, 534-546, 2015.
25. Albooyeh A.R., The Effect of Addition of Multi-wall Carbon Nanotubes on the Vibration Properties of Short Glass Fiber Reinforced Polypropylene and Polypropylene Foam Composites, *Polym. Test.*, 2019. DOI.org/10.1016/j. polymertesting.2018.12.014
26. Wang G., Zhang D., Wan G., Li B., and Zhao G., Glass Fiber Reinforced PLA Composite with Enhanced Mechanical Properties, Thermal Behavior, and Foaming Ability, *Polymer (Guildf)*, **181**, 121803, 2019.
27. Wang J., Chai J., Wang G., Zhao J., Zhang D., Li B., Zhao H., and Zhao G., Strong and Thermally Insulating Polylactic Acid/ Glass Fiber Composite Foam Fabricated by Supercritical Carbon Dioxide Foaming, *Int. J. Biol. Macromol.*, **138**, 144-155, 2019.
28. Baldwin D.F., Park C.B., and Suh N.P., A Microcellular Processing Study of Poly(ethylene terephthalate) in the Amorphous and Semicrystalline States. Part I: Microcell Nucleation, *Polym. Eng. Sci.*, **36**, 1437-1445, 1996.
29. Zhan Y., Oliviero M., Wang J., Sorrentino A., Buonocore G.G., Sorrentino L., Lavorgna M., Xia H., and Iannace S., Enhancing the EMI Shielding of Natural Rubber-Based Supercritical CO_2 Foams by Exploiting Their Porous Morphology and CNT Segregated Networks, *Nanoscale*, 2019. DOI.org/10.1039/ c8nr07351a
30. Wan F., Tran M.P., Leblanc C., Béchet E., Plougonven E., Léonard A., Detrembleur C., Noels L., Thomassin J.M.,

and Nguyen V.D., Experimental and Computational Micro-Mechanical Investigations of Compressive Properties of Polypropylene/Multi-walled Carbon Nanotubes Nanocomposite Foams, *Mech. Mater.*, **91**, 95-118, 2015.