



نشریه علمی پژوهشی
علوم و فناوری کامپوزیت
http://jstc.iust.ac.ir



مطالعه ضخامت دیواره سلولی و استحکام به ضربه در فوم‌های میکروسلولی نانوکامپوزیتی پلی پروپیلن تولیدی به روش توده‌ای

مهسا دریادل¹، طاهر ازدست^{2*}، رزگار حسن‌زاده³، سیامک مولانی¹

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه
2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه
3- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه
*ارومیه، صندوق پستی 15311-57561، t.azdast@urmia.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
فوم‌های پلیمری نانوکامپوزیتی به دلیل خواص ویژه‌ای که دارند امروزه به صورت گسترده‌ای مورد توجه مجامع علمی و صنعتی قرار گرفته‌اند. فوم‌های با ساختار سلول باز قابلیت بالایی در جذب صدا، آب، ضربه و رطوبت دارند. از ضخامت دیواره سلولی می‌توان به عنوان پارامتری برای بررسی راهکارهای دست‌یابی به ساختار سلول باز استفاده کرد. در تحقیق حاضر به بررسی خواص ساختاری و مکانیکی فوم‌های نانوکامپوزیتی پلی پروپیلن/نانوآکسید آهن در فرآیند فوم توده‌ای به وسیله‌ی گاز کربن دی‌اکسید پرداخته شده است. پارامترهای درصد وزنی نانوآکسید آهن، دما و زمان فوم کردن به عنوان پارامترهای متغیر و ضخامت دیواره سلولی و استحکام به ضربه ویژه به عنوان پارامترهای خروجی در نظر گرفته شدند. طراحی آزمایش‌ها مطابق آرایه متعامد L_9 تاگوچی صورت پذیرفت و از تحلیل‌های سیگنال به نویز و آنالیز واریانس بهره گرفته شد. تصاویر مربوط به میکروسکوپ الکترونی روشی نشان داد که ساختار میکروسلولی مناسبی با چگالی سلولی از مرتبه 10^9 و 10^{10} سلول در سانتی متر مکعب حاصل شد. نتایج نشان داد که دما موثرترین پارامتر بر روی خواص فوم‌های نانوکامپوزیتی بود صورتیکه با کاهش دما، ضخامت دیواره سلولی کاهش و استحکام به ضربه ویژه افزایش می‌یابد. همچنین نتایج مشخص ساخت که افزودن 4 درصد وزنی نانوآکسید آهن باعث افزایش استحکام به ضربه ویژه به میزان 20% خواهد شد.	دریافت: 96/5/10 پذیرش: 96/6/9 کلیدواژگان: نانوکامپوزیت میکروسلولی ساختار سلول باز ضخامت دیواره سلولی فوم توده‌ای نانوآکسید آهن

Investigation of cell wall thickness and impact strength of polypropylene microcellular nanocomposite foams produced by batch process

Mahsa Daryadel, Taher Azdast*, Rezgar Hasanzadeh, Siamak Molani

1- Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran
* P.O.B. 15311-57561, Urmia, Iran, t.azdast@urmia.ac.ir

Keywords
Microcellular nanocomposite
Open-cell structure
Cell wall thickness
Batch foam
Nano Fe₂O₃

Abstract
Nowadays polymeric nanocomposite foams have attracted the attentions in both academic and industrial communities due to their advantages. Foams with open-cell structures have high ability to absorb sound, water, impact and moisture. The cell wall thickness can be used as a parameter to evaluate the approaches for achieving open-cell structures. In this study the structural and mechanical properties of polypropylene/nano Fe₂O₃ nanocomposite foams were investigated in batch foaming process using CO₂ gas as blowing agent. Nano Fe₂O₃ content, foaming temperature and foaming time were considered as variable parameters. Design of experiments using L₉ orthogonal array of Taguchi approach was used for studying cell wall thickness and specific impact strength. The signal to noise ratio and analysis of variance were carried out. The scanning electron microscope results showed that appropriate microcellular structures with cell density of 10⁹ and 10¹⁰ cell/cm³ were achieved. The results indicated that foaming temperature was the most effective parameter on the properties of nanocomposite foams. Decreasing foaming temperature leads to decreasing cell wall thickness and increasing specific impact strength. Also, the results illuminated that specific impact strength was enhanced almost 20% by increasing 4 wt% of nano Fe₂O₃.

شامل فاز زمینه که بیشترین حجم کامپوزیت را تشکیل داده و فاز تقویت کننده که به منظور تقویت خواص فاز زمینه بدان افزوده می‌شود، تشکیل می‌گردد [1].

با پیشرفت علم و تکنولوژی، زمینه جدیدی تحت عنوان نانوکامپوزیت‌ها وارد عرصه علم و فناوری کامپوزیت‌ها شد. نانوکامپوزیت‌ها مواد مرکبی هستند که حداقل یکی از ابعاد یکی از اجزاء آن‌ها در محدوده نانومتری (بین

1- مقدمه
پلیمرها موادی هستند که به دلیل داشتن خواص منحصر به فرد از جمله وزن پایین و شکل پذیری بالا به طور گسترده مورد توجه صنایع تولیدی قرار گرفته‌اند. با توجه به نیازهای مهندسی و صنایع تولیدی، محققان به اندیشه تلفیق خواص و ساخت مواد کامپوزیتی افتادند. مواد کامپوزیتی از دو جزء

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Daryadel, M. Azdast, T. Hasanzadeh, R. and Molani, S., "Investigation of cell wall thickness and impact strength of polypropylene microcellular nanocomposite foams produced by batch process", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 1, pp. 135-142, 2018

تالک⁵ پرداختند. نتایج حاکی از آن است که با افزایش فشار تزریق، چگالی سلولی افزایش یافته، در حالی که قطر سلول، چگالی فوم و استحکام به ضربه کاهش یافته و با افزایش دمای ذوب، چگالی سلولی، چگالی فوم و استحکام به ضربه کاهش یافته است. یتگین و همکاران [8]، به بررسی تاثیر مقدار عامل فوم‌زای شیمیایی بر روی خواص میکروسلولی و مکانیکی فوم پلی‌پروپیلن خالص و پلی‌پروپیلن پرشده با 20 درصد وزنی تالک تولید شده به روش تزریقی پرداختند. نتایج نشان داد که مقادیر قطر سلولی، استحکام به ضربه و افزایش طول تا نقطه شکست پلی‌پروپیلن پرشده با ذرات تالک کمتر از فوم میکروسلولی پلی‌پروپیلن خالص می‌باشد. تاثیر پارامترهای مختلف از قبیل زمان و دمای فوم شدن بر روی خواص آمیخته‌ی پلی‌اتیلن سبک/ پلی‌اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا تولید شده با استفاده از فرآیند قالب‌گیری فشاری و عامل فوم‌زای آزودی کربن‌امید توسط محمدیان و همکارانش [9] بررسی گردید. در دماهای پایین با افزایش درصد پلی‌اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا، چگالی نسبی و اندازه سلولی افزایش می‌یابد، در حالی که در دماهای بالا نتیجه عکس مشاهده گردید.

در سال‌های اخیر محققین مشاهده نمودند که با وجود خواص ویژه و بسیار مطلوب فوم‌های پلیمری، معمولاً خواص مکانیکی این مواد پایین‌تر از مواد پلیمری خالص اولیه می‌باشد. از طرفی با مشاهده بهبود فوق‌العاده خواص مکانیکی مواد پلیمری در اثر افزودن نانو ذره، به اندیشه فوم نمودن نانوکامپوزیت‌ها به روش‌های مختلف و بررسی خواص آن‌ها افتادند.

وی و همکاران [10] به بررسی فوم‌های میکروسلولی پلی استایرن توسط سیال فوق بحرانی پرداختند. ایشان مشاهده نمودند که با افزودن نانورس، چگالی سلولی فوم‌های ذکر شده، افزایش و اندازه سلولی کاهش می‌یابد. دولماناوا و همکاران [11] با اضافه کردن نانورس به فوم‌های میکروسلولی پلی پروپیلن مشاهده نمودند که این مواد به صورت پرپر شده داخل ماتریس زمینه قرار گرفته و تاثیری بر روی فرآیند فوم کردن نداشتند. چن و همکارانش [12] نانولوله‌های کربنی چند دیواره را به پلی‌متیل متاکریلات افزوده و با استفاده از عامل فوم‌زای کربن‌دی‌اکسید آن‌ها را فوم نمودند. با بررسی خواص ساختاری و مکانیکی نمونه‌ها متوجه شدند که با افزودن 1 درصد وزنی نانو لوله کربنی، مدول یانگ تا حدود 82% بهبود یافته است. لی و همکارانش [13] به بررسی اثر افزودن نانو لوله‌های کربنی روی خواص مکانیکی فوم نانوکامپوزیت فنولیک⁶ پرداخته‌اند. افزودن نانو لوله‌های کربنی موجب گردیده که فوم نانوکامپوزیت، دارای اندازه سلولی کوچکتر، ضخامت دیواره سلولی بیشتر و چگالی سلولی بالاتری نسبت به فوم پلیمر خالص باشد. طی تحقیقی تاثیر افزودن ذرات نانورس و شرایط فرآیندی فوم توده‌ای بر روی خواص ساختاری فوم اکریلونیتریل بوتادین استایرن توسط آدرگ و همکاران [14] بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش دما و زمان فوم، چگالی نسبی و چگالی فوم کاهش می‌یابد. همچنین دمای فوم به عنوان مؤثرترین پارامتر روی چگالی سلولی و چگالی فوم گزارش شده است. حسن‌زاده و همکاران [15] نیز به بررسی خواص مکانیکی و ساختاری فوم نانوکامپوزیت پلی‌آمید6 با مقادیر مختلف نانولوله‌های کربنی چند دیواره پرداختند. نتایج حاکی از این بود که افزودن 1 درصد وزنی نانو لوله کربنی موجب ایجاد سلول‌های ریزتر و تعداد بیشتر سلول‌ها شده و استحکام کششی را افزایش می‌دهد.

1 تا 100 نانومتر) باشد. کوچک بودن این ذرات افزودنی و پخش یکنواخت این مواد در زمینه پلیمری و تغییر در ترکیب و ساختار مواد در مقیاس نانومتری، باعث گردیده که این مواد خواص ویژه و مطلوب‌تری را نسبت به مواد کامپوزیتی در مقیاس‌های متداول داشته باشند [2]. مزقانی و همکاران [3]، بهبود خواص مکانیکی الیاف کامپوزیت پلی‌اتیلن سبک خطی را با افزودن نانولوله‌های کربنی گزارش دادند. شیشوان و همکاران [4] به بررسی اثر پارامترهای فرآیند تزریق و افزودن نانورس بر روی استحکام کششی و سختی نمونه‌های نانوکامپوزیتی اکریلونیتریل بوتادین استایرن تولید شده به روش قالب‌گیری تزریقی پرداختند. تاثیر پارامترهای درصد وزنی نانو لوله کربنی و شرایط فرآیندی تزریق بر روی استحکام کششی و سختی نانوکامپوزیت‌های پلی‌آمید6/ نانولوله کربنی چند دیواره توسط اسماعیلی و همکاران [5] بررسی شد. مشخص شد که با افزودن مقدار مناسب از نانولوله کربنی، استحکام کششی و سختی به ترتیب به میزان 31% و 15% بهبود یافتند.

فوم‌های پلیمری از دو فاز، شامل یک ماتریس پلیمری جامد و یک فاز گازی که از عوامل فوم‌ساز مشتق شده است، تشکیل می‌گردد که خواص ویژه‌ای نظیر نسبت استحکام به وزن بالا، سبکی وزن، قابلیت عایق کاری بالا در برابر حرارت و صدا و قدرت جذب انرژی خوبی دارند. روش‌های مختلفی جهت فوم نمودن مواد پلیمری وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش اکستروژن¹، قالب‌گیری تزریقی²، قالب‌گیری فشاری³ و روش فوم توده‌ای⁴ اشاره نمود. در تمام این روش‌ها اساس روش فوم کردن مشابه است. همان طور که در شکل 1 نشان داده شده است، ابتدا اختلاط مناسبی از فاز پلیمری پایه و گاز ایجاد می‌گردد. سپس با اعمال یک ناپایداری ترمودینامیکی (اغلب کاهش فشار)، هسته‌زایی سلول‌های گازی صورت گرفته و در ادامه سلول‌ها رشد می‌کنند و نمونه فوم می‌شود.

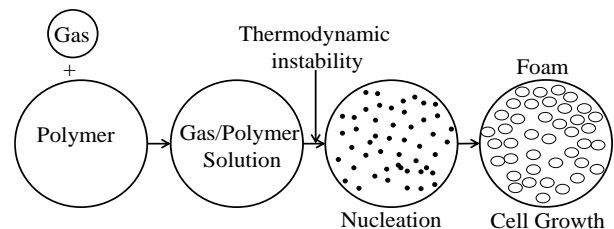


Fig. 1 Foaming process schematic

شکل 1 شماتیکی از فرآیند فوم

گاز موردنیاز برای فرآیند فوم از دو طریق فیزیکی و شیمیایی می‌تواند تامین شود. برای عامل فوم‌ساز فیزیکی معمولاً از گاز نیتروژن یا دی اکسید کربن استفاده می‌گردد به طوری که این گازها مستقیماً تحت فشار به داخل پلیمر وارد می‌شوند. در مورد عامل فوم‌ساز شیمیایی نیز یک عامل جامد وارد زمینه پلیمری شده و با انجام یک واکنش شیمیایی یا تحت گرما گاز لازم را جهت فوم نمودن ماده پلیمری آزاد می‌کند. فوم‌های پلیمری با اندازه سلولی بین 1 تا 10 میکرومتر و چگالی سلولی بین 10^9 تا 10^{12} سلول در هر سانتی متر مکعب در زمره فوم‌های میکروسلولی قرار می‌گیرند [6]. یتگین و همکاران [7]، به بررسی تاثیر پارامترهای فرآیند قالب‌گیری تزریقی بر روی خواص مکانیکی و مورفولوژی فوم کامپوزیتی پلی‌پروپیلن/

¹ Extrusion

² Injection Molding

³ Compression Molding

⁴ Batch Foam

⁵ Polypropylene/ Talc

⁶ Phenolic

به عنوان عامل تقویت‌کننده استفاده شد که از جمله خواص این نانوذرات می‌توان به زیست‌سازگاری، خواص مناسب مغناطیسی و در دسترس بودن آن اشاره کرد. همچنین جهت سازگاری بیشتر پلیمر زمینه با نانو اکسید آهن از پلی‌پروپیلن گرافت شده با مالئیک انیدرید⁹ با نام تجاری پی‌جی¹⁰ 5050 و شاخص جریان مذاب 6gr/10min (300°C, 2.16kg) ساخت شرکت سیگما آلد ریچ، آمریکا، استفاده شده است. مواد قبل از اکستروژن به مدت 2 ساعت و در دمای 80 درجه سانتی‌گراد در دستگاه خشک کن به منظور حذف رطوبت، خشک گردیدند. برای اختلاط ذوبی مواد و تهیه نانوکامپوزیت با درصدهای وزنی مختلف از دستگاه اکستروژن دو مارادونه با نام تجاری کوپریون ورنر فلایدر مدل زد اس کا¹¹ 25 ساخت آلمان استفاده شد. دمای نواحی اکستروژن به ترتیب 175، 180، 185، 190 و 195 درجه سانتی‌گراد و سرعت ماردون 250 دور در دقیقه تنظیم شد. بعد از اکستروژن، نمونه‌ها با درصدهای وزنی مختلف نانو اکسید آهن و تحت یک شرایط فرآیندی ثابت مطابق جدول 1 با استفاده از دستگاه تزریق پلاستیک اچ ایکس اف¹² 128 محصول شرکت نکو بهینه ماشین ایران با ابعاد طول، عرض و ضخامت به ترتیب 12.7، 3.2 میلی‌متر تولید شدند. بعد از تزریق نمونه‌ها، به منظور فوم نمودن آن‌ها از سیستم فرآیند فوم توده‌ای استفاده گردید. ابتدا نمونه‌ها داخل یک مخزن تحت فشار 5 مگاپاسکال جهت جذب گاز قرار داده شدند. در این تحقیق از گاز کربن دی‌اکسید به دلیل حلالیت¹³ بالا نسبت به گاز نیتروژن به عنوان عامل فوم‌ساز فیزیکی استفاده شده است. پس از اتمام جذب گاز توسط نمونه‌ها تا حد اشباع، نمونه‌ها به سرعت از مخزن خارج شده و در داخل حمام روغن گلیسرول¹⁴ داغ در دماهای تعیین شده و به مدت زمان‌های معین فوم گردیدند. با خروج نمونه‌ها از مخزن تحت فشار و در نتیجه آن افت فشار سریع و همچنین قرار گرفتن در روغن داغ، ناپایداری ترمودینامیکی مدنظر صورت می‌گیرد و در پی آن هسته‌زایی و رشد سلولی شروع می‌شود. دمای روغن و مدت زمان قرارگیری در داخل روغن به ترتیب به عنوان دما و زمان فوم شدن لحاظ گردیدند. شکل 2 شماتیکی از فرآیند فوم به روش توده‌ای صورت گرفته در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. پارامترهای متغیر فرآیند شامل درصد وزنی نانو اکسید آهن، دمای فوم و زمان فوم هر کدام در سه سطح انتخاب شدند. جدول 2 پارامترهای مورد بررسی و سطوح آن‌ها را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که سطوح پارامترها در حین مراحل تجربی و با توجه به تجربه نویسندگان انتخاب شدند. همچنین شرایط تولید نمونه‌ها با استفاده از آرایه متعامد L₉ تاگوچی مطابق جدول 3 تعیین و نمونه‌ها تولید گردیدند.

جدول 1 شرایط فرآیند تزریق نمونه‌ها

مقادیر	پارامترها
200	دمای تزریق (°C)
65	فشار تزریق (MPa)
25	فشار نگهداری (MPa)
0.5	مدت زمان فشار نگهداری (S)
25	زمان خنک‌کاری (S)
50	دمای قالب (°C)

⁹ Maleic Anhydride¹⁰ PG5050¹¹ ZSK-25¹² HXF 128¹³ Solubility¹⁴ Glycerol

یکی از روش‌های پرکاربرد طراحی آزمایش‌ها که امروزه در مباحث مهندسی مطرح می‌شود، روش تاگوچی است که با کاهش تعداد آزمایش‌ها و در نتیجه آن، کاهش هزینه و زمان انجام آزمایش‌ها، به بررسی میزان و نحوه تاثیر پارامترهای موثر بر روی یک خروجی می‌پردازد [16-18]. در این روش از نسبت‌های سیگنال به نویز¹ طبق رابطه‌های (1)، (2) و (3) به ترتیب برای حالت‌های اسمی بهتر (کاهش تغییرپذیری در اطراف مقدار هدف)، بزرگ‌تر بهتر (رسیدن به حالت بهینه با بزرگ شدن میزان پاسخ) و کوچک‌تر بهتر (رسیدن به حالت بهینه با کوچک نمودن میزان پاسخ) استفاده می‌شود.

$$S/N = 10 \log \left[\frac{\bar{y}^2}{S^2} \right] \quad (1)$$

$$S/N = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (2)$$

$$S/N = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (3)$$

که در این روابط y متغیر پاسخ، s انحراف معیار و n تعداد تکرار آزمایش‌ها می‌باشد. برای هر پارامتر، فارغ از نوع مسئله، سطحی که بیشترین مقدار سیگنال به نویز را داشته باشد، سطح بهینه است.

فوم‌ها در یک تقسیم بندی به دو دسته فوم‌های سلول باز² و فوم‌های سلول بسته³ تقسیم می‌شوند. در فوم‌های سلول بسته، هر سلول مجزا از سلول‌های اطراف خود می‌باشد. اما در حالت فوم سلول باز، سلول‌ها به دلیل ادغام، توانایی ارتباط با یکدیگر را داشته و قابلیت فوق‌العاده‌ای در جذب صدا، آب، رطوبت و ضربه دارند [19-21]. بنابراین در بیشتر مواقع نیاز به تبدیل ساختار سلول بسته به ساختار سلول باز وجود دارد.

پلی‌پروپیلن از جمله پلیمرهای کاربردی و بسیار پر مصرف بوده که به دلیل خواص منحصر به فرد آن از جمله استحکام خوب و قیمت مناسب، مورد توجه مجامع علمی و صنعتی قرار دارد. مرور تحقیقات نشان داد که افزودن نانوذرات باعث بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی پلیمرها می‌شود؛ به ویژه در مواد فوم پلیمری، خواص ساختاری را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد. طی مطالعات صورت گرفته، تحقیقی که به بررسی اثر افزودن نانوذرات فلزی اکسید آهن⁴ و شرایط فوم توده‌ای بر روی خواص مختلف فوم‌های پایه پلی-پروپیلن پرداخته باشد، مشاهده نگردید. در تحقیق حاضر تاثیر درصد وزنی نانو اکسید آهن، دما و زمان فوم کردن بر روی خواص ساختاری و مکانیکی فوم‌های نانوکامپوزیت پلی‌پروپیلن در روش فوم توده‌ای و بر مبنای طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی بررسی شد. از آنجایی که هرچه ضخامت دیواره سلولی کمتر شود، احتمال برداشته شدن دیواره‌های بین سلولی و بوجود آمدن ساختار سلول باز بالا می‌رود بنابراین راهکارهای مختلف جهت نیل به ساختار سلول باز، توسط بررسی پارامتر ضخامت دیواره سلولی بیان گردید.

2- روش انجام تحقیق

در مطالعه حاضر از پلیمر پلی‌پروپیلن با نام تجاری ای پی 440 ال⁵، ساخت شرکت جم⁶؛ ایران؛ با شاخص جریان مذاب 6gr/10min⁷ (230°C, 2.16kg) به عنوان فاز زمینه استفاده گردید. نانو اکسید آهن نوع آلفا ساخت شرکت یو اس نانو⁸ آمریکا با متوسط اندازه ذرات 20-40 نانومتر و درصد خلوص 98%

¹ Signal to Noise Ratio (S/N)² Open cell³ Closed cell⁴ Ferrous oxide nanoparticles⁵ Polypropylene (PP) EP440L⁶ JAM⁷ Melt Flow Index (MFI)⁸ US Nano

3- نتایج و بحث

در این قسمت پس از تولید نمونه‌های فوم نانوکامپوزیتی مطابق آرایه متعامد L9 تاگوچی، نمونه‌ها تحت تست‌های ساختاری و مکانیکی مدنظر قرار گرفتند. شکل 3 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به سطح مقطع نمونه‌های فوم نانوکامپوزیت در درصد‌های وزنی مختلف را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که برای انجام تست‌های مختلف، در هر سطح سه بار آزمایش‌ها تکرار شد و میانگین این سه بار تکرار به عنوان داده نهایی گزارش شده است.

3-1 ضخامت دیواره سلولی

در فرآیند فوم پلیمرها، نسبت انبساط (ϕ) به صورت نسبت حجم نمونه فوم شده (V_{foam}) به حجم نمونه فوم نشده (V_{unfoam}) مطابق رابطه (4) تعریف می‌شود که با صرف نظر کردن از جرم گاز می‌توان آن را بصورت نسبت چگالی نمونه فوم نشده (ρ_p) به چگالی نمونه فوم شده (ρ_f) تعریف کرد [22].

$$\phi = \frac{V_{foam}}{V_{unfoam}} = \frac{\rho_p}{\rho_f} \quad (4)$$

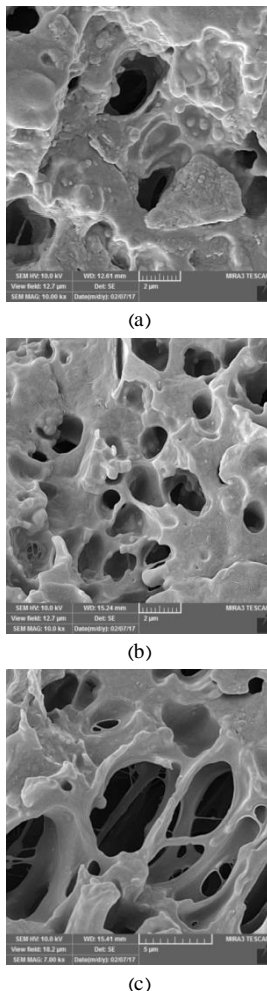


Fig. 3 The SEM results of polymeric nanocomposite samples of a) Trial 3, b) Trial 4 and c) Trial 7

شکل 3 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌های فوم نانوکامپوزیتی الف) آزمایش شماره 3، ب) آزمایش شماره 4 و ج) آزمایش شماره 7

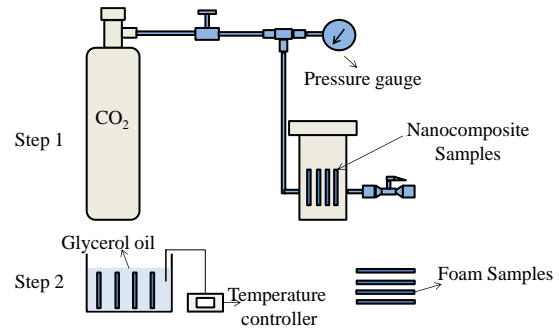


Fig. 2 The procedure of batch foaming process

شکل 2 شماتیکی از فرآیند فوم به روش توده‌ای

جدول 2 پارامترهای متغیر ورودی و سطوح آن‌ها

Table 2 The input parameters and their levels

سطوح	پارامترها
3 4	1 0
140 120	درصد وزنی نانواکسید آهن (wt%)
120 90	دمای فوم (°C)
	زمان فوم (S)

جدول 3 طراحی آزمایش‌ها بر پایه آرایه متعامد L9 تاگوچی

Table 3 The L9 orthogonal array of Taguchi approach

زمان فوم (S)	دمای فوم (°C)	درصد وزنی نانواکسید آهن (wt%)	نمونه‌ها
60	100	0	1
90	120	0	2
120	140	0	3
90	100	2	4
120	120	2	5
60	140	2	6
120	100	4	7
60	120	4	8
90	140	4	9

برای بررسی ساختار سلولی نمونه‌های فوم نانوکامپوزیتی تولید شده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی¹ میرا² ساخت کشور چک استفاده شد. بدین منظور نمونه‌ها در داخل نیتروژن مایع شکسته شدند. استفاده از نیتروژن مایع باعث می‌شود که نمونه‌ها بسیار ترد شده و با اعمال نیروی کمی شکسته شوند که این اعمال نیروی کم باعث می‌شود که به ساختار سلولی سطح مقطع نمونه‌ها آسیبی وارد نشود. سپس به منظور بررسی بهتر ساختار سلولی نمونه‌ها، از آنجا که پلیمرها موادی غیر هادی هستند و برای انجام تست مدنظر باید بین نمونه و پایه، اتصال الکتریکی برقرار باشد، سطح مقطع نمونه‌ها پوشش‌دهی طلا شد و سپس تحت آزمایش قرار گرفتند. برای اندازه‌گیری وزن و محاسبه چگالی نمونه‌ها نیز از ترازوی دیجیتالی اف ایکس 300 جی‌دی³ ساخت کشور ژاپن با حداکثر ظرفیت 320 گرم و دقت 0.1 میلی‌گرم استفاده شده است. در نهایت از دستگاه تست ضربه چارپی اس‌آی تی⁴ 200 ساخت شرکت سنتام⁵؛ ایران؛ برای اندازه‌گیری مقاومت به ضربه نمونه‌ها استفاده گردید. به این منظور نمونه‌های فوم شده با زاویه 45 درجه و عمق 2 میلی‌متر ناچ زده شدند.

1 Scanning Electron Microscope (SEM)

2 MIRA 3

3 FX 300 GD

4 SIT 200

5 Santam

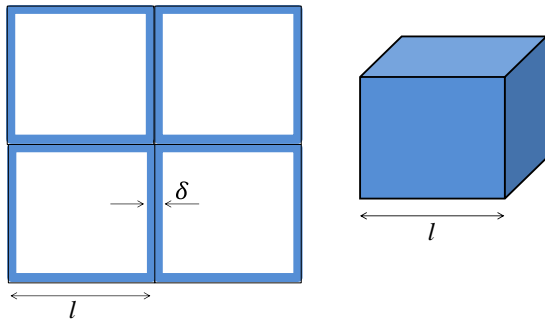


Fig. 4 Cellular structure

شکل 4 ساختار سلولی

جدول 4 نتایج آزمایش‌ها

Table 4 The results of experiments

شماره نمونه‌ها	نسبت انبساط	چگالی سلولی (cell/cm ³)	ضخامت دیواره سلولی (μm)
1	1.34 ± 0.03	2.71 × 10 ¹⁰	1.35
2	1.36 ± 0.02	7.44 × 10 ⁹	2.02
3	1.22 ± 0.04	7.17 × 10 ⁹	2.41
4	1.36 ± 0.04	5.50 × 10 ¹⁰	1.04
5	1.26 ± 0.02	1.73 × 10 ¹⁰	1.72
6	1.12 ± 0.01	3.45 × 10 ⁹	3.60
7	1.34 ± 0.03	5.84 × 10 ¹⁰	1.05
8	1.36 ± 0.03	4.16 × 10 ⁹	2.48
9	1.13 ± 0.01	1.03 × 10 ¹⁰	2.44

شکل 5 نشان می‌دهد که با افزودن نانو اکسید آهن تا 2 و 4 درصد وزنی، ضخامت دیواره سلولی به ترتیب به میزان بسیار اندکی افزایش و سپس کاهش می‌یابد. افزودن نانو اکسید آهن تا 2 درصد وزنی، هسته‌زایی و متعاقباً چگالی سلولی را افزایش می‌دهد [25]. با افزایش هسته‌زایی، گاز جذب شده توسط نمونه‌ها بیشتر صرف هسته‌زایی می‌شود و گاز کمی برای رشد سلولی باقی می‌ماند. بنابراین سلول‌ها زیاد رشد نمی‌کنند و در نتیجه نسبت انبساط کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که اثر کاهش نسبت انبساط به اثر افزایش چگالی سلولی در 2 درصد وزنی غالب شده و ضخامت دیواره سلولی افزایش اندکی داشته است. با افزایش بیشتر نانو اکسید آهن تا 4 درصد وزنی احتمالاً به دلیل تجمع بالای ذرات نانو در کنار یکدیگر و کاهش امکان هسته‌زایی به دلیل پدیده‌ی کلوخه‌ای شدن [15]، امکان رشد سلول‌ها نیز ایجاد می‌گردد. بنابراین نسبت انبساط نیز افزایش پیدا کرده و در نتیجه ضخامت دیواره سلولی به میزان اندکی کاهش می‌یابد. نمودار شکل 5 نشان می‌دهد که با افزایش دمای فوم ضخامت دیواره سلولی به میزان چشمگیری افزایش یافته است. زیرا با افزایش دما، استحکام مذاب پایین آمده و باعث می‌گردد که گاز از داخل پلیمر خارج شود (پدیده‌ی فرار گاز) [26] که این امر موجب کاهش نسبت انبساط خواهد شد. از طرفی دیگر با کاهش استحکام مذاب، پایداری سلولی کاهش یافته، سلول‌ها با هم ادغام شده و در نتیجه چگالی سلولی کاهش می‌یابد [27]. کاهش نسبت انبساط و چگالی سلولی اثری مضاعف بر روی افزایش ضخامت دیواره سلولی خواهد داشت و مشاهده می‌شود که با افزایش دما، فاصله‌ی بین سلول‌ها بصورت چشمگیری افزایش یافته است. همان‌طور که در شکل 5 نشان داده شده است، افزایش زمان فوم موجب کاهش ضخامت دیواره سلولی گشته است. دلیل این امر را می‌توان این‌گونه بیان نمود که با افزایش زمان فوم، فرصت زیادی برای هسته‌زایی وجود داشته که در نتیجه آن چگالی سلولی افزایش می‌یابد. بررسی‌های صورت گرفته بر روی نتایج مربوط به نسبت انبساط نشان داد که میزان نسبت انبساط تقریباً

با در نظر گرفتن یک واحد از حجم پلیمر، رابطه نسبت انبساط را می‌توان به صورت رابطه (5) بیان نمود.

$$\varphi = \frac{V_P + V_G}{V_P} = 1 + V_G \quad (5)$$

در این رابطه V_P حجم پلیمر زمینه و V_G حجم گاز می‌باشد. چگالی سلولی نیز به صورت تعداد سلول‌های موجود در واحد حجم نمونه تعریف شده و به صورت رابطه (6) بیان می‌شود [23].

$$N = \left(\frac{n}{A}\right)^{3/2} \times \varphi \quad (6)$$

که در این رابطه N چگالی سلولی بر حسب cell/cm³ و n تعداد سلول‌های موجود در مساحت مشخص A از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح مقطع نمونه نانوکامپوزیتی فوم شده می‌باشد.

با در نظر گرفتن ساختار سلولی مطابق شکل 4، رابطه نسبت انبساط را می‌توان به صورت رابطه (7) نیز بدست آورد.

$$\varphi = \frac{(l + \delta)^3}{(l + \delta)^3 - l^3} \quad (7)$$

در این رابطه δ معرف ضخامت دیواره سلولی بوده و l اندازه سلولی است. با در نظر گرفتن حجم فاز گاز به صورت رابطه (8) و با لحاظ کردن رابطه (5)، اندازه سلولی مطابق رابطه (9) محاسبه می‌گردد.

$$V_G = N \times l^3 \quad (8)$$

$$l = \sqrt[3]{\frac{\varphi - 1}{N}} \quad (9)$$

بنابراین با توجه به روابط (6)، (7) و (9)، ضخامت دیواره سلولی بر اساس رابطه (10) محاسبه می‌شود.

$$\delta = \sqrt[3]{\left(\frac{\varphi}{\varphi - 1} - 1\right)^3 \frac{\varphi - 1}{N}} \quad (10)$$

طبق این رابطه ضخامت دیواره سلولی با چگالی سلولی و نسبت انبساط رابطه‌ی عکس دارد؛ بصورتیکه هرچه چگالی سلولی و نسبت انبساط افزایش یابد، ضخامت دیواره سلولی کاهش می‌یابد [24]. با افزایش تعداد سلول‌ها، طبیعتاً سلول‌ها با تراکم بالاتری در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند و فاصله‌ی بین آن‌ها کاهش می‌یابد. همچنین زمانی که نسبت انبساط افزایش می‌یابد، میزان گاز موجود در داخل نمونه‌ی فوم شده نسبت به پلیمر افزایش می‌یابد و بنابراین پلیمر خالص کمتر بوده و فضای کمتری از نمونه را اشغال می‌کند. بر اساس روابط ارائه شده، نتایج مربوط به نسبت انبساط، چگالی سلولی و ضخامت دیواره سلولی مطابق جدول 4 برای نمونه‌های فوم نانوکامپوزیتی تولید شده بدست آمده است.

با وارد نمودن نتایج مربوط به ضخامت دیواره سلولی در نرم افزار مینی تب و استفاده از آنالیز سیگنال به نویز نمونه‌های فوم نانوکامپوزیتی بر اساس مدل کوچکتر-بهرتر (هدف دست‌یابی به کمینه ضخامت دیواره سلولی است)، اثرات اصلی پارامترها مطابق نمودار شکل 5 بدست آمد.

جدول 6 نتایج استحکام به ضربه ویژه

Table 6 The results of specific impact strength

استحکام به ضربه ویژه (j.m/kg)	شماره نمونه
454.05 ± 11.52	1
655.99 ± 26.74	2
389.89 ± 13.35	3
674.50 ± 22.56	4
505.72 ± 20.03	5
277.57 ± 8.45	6
695.84 ± 26.14	7
608.52 ± 23.07	8
497.00 ± 18.69	9

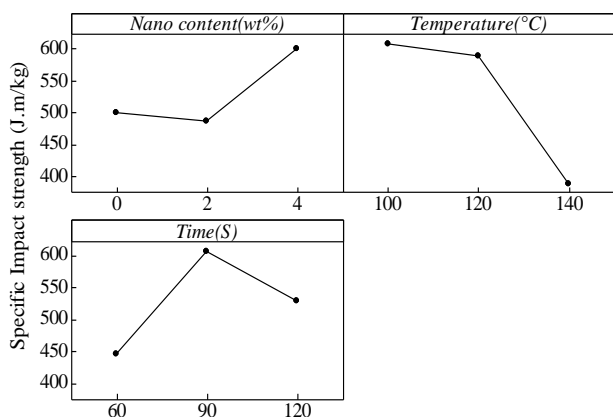


Fig.6 The main effect of parameters on specific impact strength

شکل 6 اثرات اصلی پارامترها بر روی استحکام به ضربه ویژه

مطابق نمودار شکل 6 مشاهده می‌گردد استحکام به ضربه ویژه نمونه‌های فوم شده حاوی 2 درصد وزنی نانو اکسید آهن تقریباً برابر استحکام به ضربه ویژه نمونه‌های فوم شده خالص می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان این‌گونه بیان نمود که اگرچه افزایش نانو اکسید آهن موجب افزایش استحکام به ضربه می‌گردد اما چگالی نمونه‌های فوم نانوکامپوزیتی نیز با توجه به کاهش مقدار نسبت انبساط، افزایش می‌یابد. بنابراین با توجه به تعریف استحکام به ضربه ویژه نتیجه می‌شود این دو پدیده تقریباً اثر هم را خنثی نموده و در نهایت تغییر محسوسی با افزودن 2 درصد وزنی نانو اکسید آهن در استحکام به ضربه ویژه نمونه‌های فوم نانوکامپوزیتی در مقایسه با نمونه‌های فوم شده خالص مشاهده نگردید. با افزودن نانو اکسید آهن تا 4 درصد وزنی به دلیل انتقال خواص مکانیکی بالای نانوذرات به ماتریس پلیمری، استحکام به ضربه افزایش یافته و چگالی نمونه‌های فوم نانوکامپوزیتی نیز طبق بررسی‌های صورت گرفته بر روی نتایج نسبت انبساط، کاهش یافته است که در نتیجه آن استحکام به ضربه ویژه به طور چشمگیری افزایش خواهد یافت. با افزایش دما به دلیل کاهش استحکام مذاب و خروج گاز، چگالی نمونه‌های فوم نانوکامپوزیتی به شدت افزایش می‌یابد که به طبع آن استحکام به ضربه ویژه نمونه‌های فوم نانوکامپوزیتی به صورت چشمگیری کاهش یافته است. کاهش استحکام به ضربه ویژه در اثر افزایش دما به صورت مشهود در شکل 6 ملاحظه می‌شود. طبق بررسی‌های صورت گرفته، با افزایش زمان فوم کردن تا 90 ثانیه، اندازه سلولی کاهش پیدا می‌کند. استحکام به ضربه ویژه با افزایش زمان فوم تا 90 ثانیه به دلیل کوچک شدن سلول‌ها در این بازه زمانی افزایش می‌یابد. با افزایش زمان تا 120 ثانیه نیز به دلیل افزایش چگالی نمونه‌های فوم نانوکامپوزیتی، استحکام به ضربه ویژه کاهش یافته است.

با انجام آنالیز سیگنال به نویز و آنالیز واریانس، ترتیب و میزان اثر گذاری پارامترها بر روی استحکام به ضربه ویژه مطابق جدول 7 بدست آمد.

فارغ از تغییرات زمان فوم کردن است. بنابراین با افزایش زمان فوم کردن و با توجه به ثابت ماندن تقریبی نسبت انبساط، با افزایش چگالی سلولی، میزان ضخامت دیواره سلولی کاهش می‌یابد.

با انجام آنالیز سیگنال به نویز و آنالیز واریانس، ترتیب و میزان اثر گذاری پارامترها بر روی ضخامت دیواره سلولی مطابق جدول 5 بدست آمد. نتایج نشان می‌دهد که دمای فوم کردن با میزان اثرگذاری 80.1% موثرترین پارامتر روی ضخامت دیواره سلولی بوده و کنترل کردن آن در فرآیند فوم کردن برای دستیابی به میزان مدنظر ضخامت دیواره سلولی در اولویت قرار می‌گیرد. پس از دمای فوم کردن، زمان فوم کردن با میزان مشارکت 18.8% در رتبه دوم قرار می‌گیرد. همچنین نتایج مشخص می‌سازد که درصد وزنی نانو اکسید آهن با میزان مشارکت 1.1% تاثیر زیادی بر روی ضخامت دیواره سلولی نمی‌گذارد و با تغییرات آن میزان ضخامت دیواره سلولی حدود 2 میکرومتر باقی می‌ماند. بررسی‌های مربوط به چگالی سلولی و نسبت انبساط نشان می‌دهد که افزایش درصد وزنی نانو باعث افزایش چگالی سلولی و کاهش نسبت انبساط می‌شود و این دو اثر عکس هم، یکدیگر را خنثی کرده و ضخامت دیواره سلولی ثابت مانده است.

3-2 استحکام به ضربه ویژه

استحکام به ضربه ویژه از تقسیم استحکام به ضربه هر نمونه فوم نانوکامپوزیتی که از تست ضربه چارپی بدست آمده بر چگالی آن نمونه بدست می‌آید. نتایج مربوط به استحکام به ضربه ویژه در جدول 6 آورده شده است. نتایج استحکام به ضربه ویژه در نرم افزار مینی تب وارد شده و با استفاده از آنالیز سیگنال به نویز بر اساس مدل بزرگتر-بهتر (هدف دستیابی به بیشینه استحکام به ضربه ویژه است)، اثرات اصلی پارامترها مطابق نمودار شکل 6 حاصل گردید.

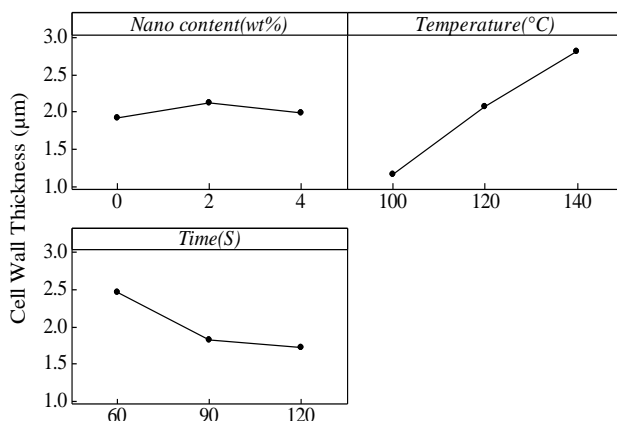


Fig. 5 The main effect of parameters on cell wall thickness

شکل 5 اثرات اصلی پارامترها بر روی ضخامت دیواره سلولی

جدول 5 ترتیب و میزان اثر گذاری پارامترها بر روی ضخامت دیواره سلولی بدست آمده از آنالیز سیگنال به نویز و آنالیز واریانس

Table 5 The rank and contribution of parameters on cell wall thickness by S/N and ANOVA analyzes

پارامترها	درصد وزنی نانو اکسید آهن (wt%)	دمای فوم (°C)	زمان فوم (S)
ترتیب اثر گذاری	3	1	2
میزان اثرگذاری (/)	1.1	80.1	18.8

- Homogenization Approach”, *European Journal of Mechanics-A/Solids*, Vol. 61, pp. 330-344, 2017.
- [7] Yetkin, S. Unal, H. Mimaroglu, A. Findik, F., “Influence of Process Parameters on the Mechanical and Foaming Properties of PP Polymer and PP/TALC/EPDM Composites”, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Vol. 52, No. 5, pp. 433-439, 2013.
- [8] Yetgin, S. Unal, H. Mimaroglu, A., “Influence of Foam Agent Content and Talc Filled Polypropylene Composite Foams”, *Journal of Cellular Plastics*, Vol. 50, No. 6, pp. 563-576, 2014.
- [9] Mohammadian, Z. Rezaei, M. Azdast, T., “Microstructure, Physical, and Mechanical Properties of LDPE/UHMWPE Blend Foams: an Experimental Design Methodology”, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 29, No. 9, pp. 1229-1260, 2016.
- [10] Wee, D. Seong, DG. Youn, JR., “Processing of Microcellular Nanocomposite Foams by Using a Supercritical Fluid”, *Fibers and Polymers*, Vol. 5, No. 2, pp. 160-169, 2004.
- [11] Dolomanova, V. Kumar, V. Pyrz, R. Madaleno, LAO. Jensen, AR. Rauhe, JCM., “Fabrication of Microcellular PP-MMT Nanocomposite Foams in a Sub-Critical CO₂ Process”, *Cellular Polymers*, Vol. 31, No. 3, pp. 125-143, 2012.
- [12] Chen, L. Goren, B. Ozisik, R. Schadler, L., “Controlling Bubble Density in MWNT/Polymer Nanocomposite Foams by MWNT Surface Modification”, *Composites Science and Technology*, Vol. 72, No. 2, pp. 190-196, 2012.
- [13] Li, Q. Chen, L. Li, X. Zhang, J. Zhang, X. Zheng, K. Fang, F. Zhou, H. Tian, X., “Effect of Multi-Walled Carbon Nanotubes on Mechanical, Thermal and Electrical Properties of Phenolic Foam Via Insitu Polymerization”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 82, pp. 214-225, 2016.
- [14] Azerag, B. Azdast, T. Doniavi, A. Shishavan, S. Lee, R., “Structural Properties of Batch Foamed Acrylonitrile Butadiene Styrene/Nanoclay Nanocomposites”, *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, Vol. 10, No. 1, p. 19, 2015.
- [15] Hasanzadeh, R. Azdast, T. Doniavi, A. Esmaili, P. Mamaghani, S. Eungkee, L., “Experimental Investigation of Properties of Polymeric Nanocomposite Foams Containing Multi-Walled Carbon Nanotubes Using Taguchi Method”, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 2, No. 4, pp. 37-44, 2016. (In Persian)
- [16] Doniavi, A. Babazadeh, S. Azdast, T. Hasanzadeh, R., “An Investigation on the Mechanical Properties of Friction Stir Welded Polycarbonate/Aluminium Oxide Nanocomposite Sheets”, *Journal of Elastomers & Plastics*, DOI: 0095244316674352, 2016.
- [17] Modanloo, V. Hasanzadeh, R. Esmaili, R., “The Study of Deep Drawing of Brass-Steel Laminated Sheet Composite Using Taguchi Method”, *International Journal of Engineering (IJE) TRANSACTIONS A: Basics*, Vol. 29, No.1, pp. 103-108, 2016.
- [18] Aghaie, A. Z. Rahimi, A. B. Akbarzadeh, A., “A General Optimized Geometry of Angled Ribs For Enhancing The Thermo-Hydraulic Behavior of a Solar Air Heater Channel—A Taguchi Approach”, *Renewable Energy*, Vol. 83, pp. 47-54, 2015.
- [19] Lee, L. Zeng, C. Cao, X. Han, X. Shen, J. Xu, G., “Polymer Nanocomposite Foams”, *Composites Science and Technology*, Vol. 65, No. 15, pp. 2344-2363, 2005.
- [20] Kong, W. Bao, J. Wang, J. Hu, G. Xu, Y. Zhao, L., “Preparation of Open-Cell Polymer Foams by CO₂ Assisted Foaming of Polymer Blends”, *Polymer*, Vol. 90, pp. 331-341, 2016.
- [21] Huang, H. Wang, J. Sun, X., “Improving of Cell Structure of Microcellular Foams Based on Polypropylene/High-Density Polyethylene Blends”, *Journal of Cellular Plastics*, Vol. 44, No. 1, pp. 69-85, 2008.
- [22] Naguib, H. E. Park, C. B. Reichelt, N., “Fundamental Foaming Mechanisms Governing the Volume Expansion of Extruded Polypropylene Foams”, *Journal of applied polymer science*, Vol. 91, No. 4, pp. 2661-2668, 2004.
- [23] Grignard, B. Thomassin, J. M. Gennen, S. Poussard, L. Bonnaud, L. Raquez, J. M. Dubois, P. Tran, M. P. Park, C. B. Jerome, C. Detrembleur, C., “CO₂-Blown Microcellular Non-Isocyanate Polyurethane (NIPU) Foams: From Bio-And CO₂-Sourced Monomers to Potentially Thermal Insulating Materials”, *Green Chemistry*, Vol. 18, No. 7, pp. 2206-2215, 2016.
- [24] Xu, X., Park, C.B., Xu, D. and Pop-Iliev, R., “Effects of Die Geometry on Cell Nucleation of PS Foams Blown with CO₂”, *Polymer Engineering & Science*, Vol. 43, No. 7, pp.1378-1390, 2003.

جدول 7 ترتیب و میزان اثر گذاری پارامترها بر روی استحکام به ضربه ویژه بدست

آمده از آنالیز سیگنال به نویز و آنالیز واریانس

Table 7 The rank and contribution of parameters on specific impact strength by S/N and ANOVA analyzes

پارامترها	درصد وزنی نانو اکسید آهن (wt%)	دمای فوم (°C)	زمان فوم (S)
ترتیب اثر گذاری	3	1	2
میزان اثر گذاری (%)	15.3	58.7	26

نتایج حاکی از این است که دمای فوم کردن با میزان اثر گذاری 58.7% موثرترین پارامتر بر روی استحکام به ضربه ویژه می‌باشد. پس از دمای فوم کردن، زمان فوم و درصد وزنی نانو اکسید آهن به ترتیب با میزان اثر گذاری 26% و 15.3% پارامترهای موثر بعدی هستند.

4- نتیجه گیری

در این تحقیق ابتدا نمونه‌های نانوکامپوزیتی پلی پروپیلن در درصدهای وزنی مختلف نانو اکسید آهن با استفاده از دستگاه تزریق تولید شده و سپس با استفاده از روش فوم توده‌ای تحت شرایط فرآیندی مختلف و مطابق آرایه متعامد L9 تاگوچی، فوم گردیدند. تاثیر سه پارامتر درصد وزنی نانو اکسید آهن، دمای فوم و زمان فوم بر روی ضخامت دیواره سلولی و استحکام به ضربه ویژه بررسی شده است. نتایج مربوط به میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که ساختار میکروسلولی مناسبی حاصل شده است. تحلیل‌های سیگنال به نویز روش تاگوچی مشخص ساخت که دمای فوم کردن موثرترین پارامتر بر روی خواص فوم‌های نانوکامپوزیتی تولیدی می‌باشد و کنترل کردن آن در خلال فرآیند، بسیار مهم می‌باشد. افزایش دمای فوم کردن به دلیل کاهش استحکام مذاب تاثیر نامطلوب بر روی خواص فوم‌های نانوکامپوزیتی داشت؛ بصورتیکه باعث افزایش ضخامت دیواره سلولی و کاهش استحکام به ضربه ویژه شد. با افزودن نانوذرات اکسید آهن، چگالی سلولی و نسبت انبساط به ترتیب به اندازه‌ای افزایش و کاهش یافتند که در مجموع ضخامت دیواره سلولی ثابت ماند. با افزودن 4 درصد وزنی نانو اکسید آهن، استحکام به ضربه ویژه بصورت چشمگیری افزایش یافت.

5- مراجع

- [1] Daniel, G., “Composite Materials: Design and Applications”, CRC press, 2014.
- [2] Eungkee Lee, R. Hasanzadeh, R. Azdast, T., “A Multi-Criteria Decision Analysis on Injection Moulding of Polymeric Microcellular Nanocomposite Foams Containing Multi-Walled Carbon Nanotubes”, *Plastics, Rubber and Composites*, Vol. 46, No. 4, pp. 155-162, 2017.
- [3] Mezghani, K. Farooqui, M. Furquan, S. Atieh, M., “Influence of Carbon Nanotube (CNT) on the Mechanical Properties of LLDPE/CNT Nanocomposite Fibers”, *Materials Letters*, Vol. 65, No. 23, pp. 3633-3635, 2011.
- [4] Shishavan, S. Azdast, T. Ahmadi, S., “Investigation of the Effect of Nanoclay and Processing Parameters on the Tensile Strength and Hardness of Injection Molded Acrylonitrile Butadiene Styrene-Organoclay Nanocomposites”, *Materials & Design*, Vol. 58, pp. 527-534, 2014.
- [5] Esmaili, P. Azdast, T. Doniavi, A. Hasanzadeh, R. Mamaghani, S. Lee, R., “Experimental Investigation of Mechanical Properties of Injection Polymeric Nanocomposites Containing Multi-Walled Carbon Nanotubes According to Design of Experiments”, *Journal of Science and Technology of Composite*, Vol. 2, No. 3, pp. 67-74, 2015. (In Persian)
- [6] Gao, K. Dommelen, J. A. W. Geers, M. G. D., “Investigation of the Effects of the Microstructure on the Sound Absorption Performance of Polymer Foams Using a Computational

- [25] Zheng, W. G. Lee, Y. H. Park, C. B., "Use of Nanoparticles For Improving the Foaming Behaviors of Linear PP", Journal of applied polymer science, Vol. 117, No. 5, pp. 2972-2979, 2010.
- [26] Park, C. B. Behraves, A. H. Venter, R. D., "Low Density Microcellular Foam Processing in Extrusion using CO₂", Polymer Engineering & Science, Vol. 38, No. 11, pp. 1812-1823, 1998.
- [27] Naguib, H. E. Park, C. B. Panzer, U. Reichelt, N., "Strategies For Achieving Ultra Low - Density Polypropylene Foams", Polymer Engineering & Science, Vol. 42, No. 7, pp. 1481-1492, 2002.