



بررسی اثر قطر قالب بر روی خواص ساختاری فوم‌های پلی‌اتیلن تولید شده به روش اکستروژن

نیما فیض‌لو^۱، طاهر ازدست^{۲*}، رزگار حسن‌زاده^۳، میلاد رستمی^۴، نیما اشرفی^۱

۱- فارغ‌التحصیل کارشناسی‌ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲- استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۳- پژوهشگر پسادکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۴- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: t.azdast@urmia.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۷ دی ۱۴۰۲

پذیرش: ۲۸ دی ۱۴۰۲

چکیده

فوم‌های پلیمری به دلیل ویژگی‌های خاص خود مانند وزن سبک، خاصیت عایق حرارتی و عایق صوتی از اهمیت بالایی برخوردار هستند. همچنین در تولید فوم‌های پلیمری به دلیل استفاده از مواد کمتر، باعث صرفه‌جویی در مصرف مواد اولیه گردیده، در نتیجه کاهش آلودگی در محیط‌زیست را به همراه دارد. محققان نشان داده‌اند که با افزایش چگالی سلولی و کاهش اندازه سلولی از طریق افزایش نرخ افت فشار سیستم با تغییرات در هندسه قالب خروجی اکستروژن می‌توان به خواص ساختاری بهتر فوم‌های پلیمری دست یافت. در این تحقیق، اثر هندسه قالب شامل قطر قالب بر خواص ساختاری فوم‌های پلی‌اتیلن تولید شده به روش فوم فیزیکی اکستروژن با عامل فوم‌زای گاز دی‌اکسیدکربن و در دمای فرآیندی ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد و عامل هسته‌زا تالک در ۲ درصد وزنی با قالب‌هایی به قطرهای ۱، ۲ و ۳ میلی‌متر برای ایجاد نرخ افت فشارهای متفاوت بررسی شده است. بررسی نتایج چگالی و تصاویر ساختاری نمونه‌ها نشان داد که کاهش قطر نازل خروجی باعث افزایش فشار سیستم شده که این افزایش در قالب ۱ میلی‌متری، غلبه فشار سیستم به فشار تزریق گاز را در پی داشته و باعث عدم ورود گاز به میزان کافی به داخل سیستم شده است. در نمونه با قالب ۲ میلی‌متری فشار گاز ورودی به سیستم فراتر بوده و انبساط حدود ۲/۲۵ برابر حاصل شده است که این مقدار نسبت به قالب ۱ و ۳ میلی‌متری بیشتر است.

کلیدواژگان:

فوم اکستروژن

هندسه قالب

فوم‌های پلیمری

خواص ساختاری

Investigation of the effect of die diameter on the structural properties of extruded polyethylene foams

Nima Feizlou¹, Taher Azdast^{2*}, Rezgar Hasanzadeh³, Milad Rostami⁴, Nima Ashrafi¹

1- MSc Graduate, Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

2- Professor, Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

3- Postdoctoral Researcher, Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

4- PhD Student, Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

* Corresponding Author's Email: t.azdast@urmia.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 7 January 2023

Accepted: 18 January 2024

Keywords:

Extrusion Foam

Mold Geometry

Polymeric Foams

Structural Properties

Abstract

Polymeric foams are of great importance due to their special features such as lightweight, heat, and sound insulation properties. Also, production of polymeric foams saves the consumption of materials due to the use of less raw materials. As a result, it reduces the pollution in the environment. Researchers have shown that by increasing the cell density and decreasing the cell size, better properties of polymeric foams can be achieved. It is accessible by increasing the pressure drop rate of the system with changes in the geometry of the extrusion mold. In this research, the effect of mold geometry, including mold diameter, was assessed on the structural properties of polyethylene foams produced by the physical foam extrusion method with carbon dioxide foaming agent at a process temperature of 130 °C and 2 wt% of nucleating agent. The diameter of the mold was set at 1, 2, and 3 mm to create different pressure drop rates. The results showed that the decrease in the diameter of the nozzle caused an increase in the system pressure. This increase of 1 mm resulted in the system pressure prevailing over the gas injection pressure and caused insufficient gas to enter the system. In the sample with a 2 mm, the pressure of the gas entering the system was higher and the expansion was about 2.25 times, which is more than the 1 and 3 mm molds.

Please cite this article using:

Feizloun N, Azdast T, Hasanzadeh R, Rostami M, Ashrafi N. Investigation of the effect of die diameter on the structural properties of extruded polyethylene foams. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 September 23;10(7):10-16. doi: 10.22034/IJME.2024.433989.1907 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

امروزه پلاستیک‌ها و کامپوزیت‌های پلیمری جایگزینی مناسب برای اکثر مواد به خصوص فلزات به حساب می‌آیند. برای شکل‌دهی پلاستیک‌ها فرآیندهای زیادی وجود دارد که می‌توان به فرآیند اکستروژن، قالب‌گیری چرخشی، قالب‌گیری تزریقی و چاپگرهای سه‌بعدی اشاره کرد. کامپوزیت‌ها در بسیاری از صنایع از جمله صنایع مکانیکی، الکترونیکی و شیمیایی کاربرد دارند [۱]. دلیل عمده توسعه کامپوزیت‌ها این است که نمی‌توان هیچ ماده‌ای با ساختار یکنواخت پیدا نمود که تمام خواص مطلوب را دارا باشند. مزایای عمده کامپوزیت‌ها نسبت به سایر مواد مهندسی مرسوم، سبکی، استحکام بالا، توانایی شکل‌دهی، مقاومت به خوردگی است. در این میان، کامپوزیت‌های پلیمری بیشترین حجم استفاده را در بین کامپوزیت‌ها دارند [۲]. یکی از راه‌های مؤثر در صرفه‌جویی مواد مصرفی قطعات پلیمری، فوم کردن یا ایجاد ساختار سلولی است که ضمن کاهش مقدار ماده مصرفی، می‌تواند باعث بهبود خواص مانند خواص صوتی، فیزیکی و شیمیایی شود. تکنولوژی تولید فوم‌های پلیمری را می‌توان به صورت محلولی، فیزیکی و شیمیایی طبقه‌بندی کرد [۳]. تحقیقات متعددی روی فوم‌های پلیمری صورت گرفته، به‌طور مثال، لی و همکاران با استفاده از فوم کردن پلی‌آمید، ضمن کاهش مقدار ماده مصرفی، بهبود خواص مکانیکی از جمله استحکام کششی و سختی را گزارش نمودند [۴]. چن و همکاران به بررسی اثرات تنش برشی و نرخ افت فشار بر چگالی فوم‌های میکروسلولی با افزودن تالک^۱ به پلی‌اتیلن و پلی‌استایرن پرداختند. نتایج نشان داد که تنش برشی و نرخ افت فشار تأثیر بسیاری بر روی هسته‌زایی سلول‌ها دارد [۵]. در تمامی این روش‌ها اساس روش فوم کردن مشابه است، به صورتی که ابتدا اختلاط مناسبی از فاز پلیمری پایه و گاز ایجاد می‌گردد. سپس با اعمال یک ناپایداری ترمودینامیکی که اغلب با کاهش فشار انجام می‌گیرد، هسته‌زایی سلول‌های گازی صورت گرفته و در ادامه سلول‌ها رشد می‌کنند و نمونه فوم می‌شود. روش تولید فوم یکی از روش‌های کاهش مواد مصرفی است، به شرطی که بر عملکرد قطعه تأثیر منفی نگذارد [۶].

در بیان فرآیند فوم اکستروژن، به این صورت تعریف می‌شود که یک خط اکستروژن مجهز به سیستم تأمین گاز، گرانول‌هایی از طریق قیف به سیلندر وارد شده‌اند، گاز دی‌اکسیدکربن در حالت فوق بحرانی به داخل پلیمر تزریق می‌شود. به دلیل فشار بالای داخل سیلندر، از هسته‌زایی سلولی فوم جلوگیری می‌شود. هنگام خروج پلیمر از قالب، سلول‌ها به دلیل افت فشار ناگهانی تشکیل می‌شوند (مرحله هسته‌زایی)، رشد می‌یابند و در مرحله آخر با خنک‌کاری، پایداری سلولی حاصل می‌شود. دمای مذاب، پارامتری کلیدی در تجزیه عامل فوم‌زا است [۶]. اغلب خطوط تولید فوم در صنعت به صورت دو مرحله‌ای است. به این صورت که ابتدا مواد به صورت گرانول وارد سیلندر اول شده و تحت فشار و دمای بالا ذوب می‌شود [۷]. در نواحی انتهایی سیلندر اول یک ناحیه برای تزریق عامل فوم‌زا به داخل سیلندر در نظر گرفته شده است و فاز همگن تشکیل شده از دو فاز گاز نیتروژن یا دی‌اکسیدکربن و پلیمر تحت فشار بالا به وسیله حرکت ماردون وارد سیلندر دوم می‌شود و در این مرحله دمای پلیمر مذاب تا دمای زیر نقطه ذوب در اکستروژن کاهش پیدا می‌کند و درعین حال عملیات اختلاط در این مرحله انجام می‌شود. سپس مواد داخل قالب با ابعاد مشخص عبور کرده و سلول‌های فوم با افت شدید فشار در قسمت خروجی اکستروژر تا زمان رسیدن به انباشتگی رشد کرده و مرحله فوم شدن کامل می‌شود [۸].

۲- روش تحقیق

در تحقیق حاضر از گرانول پلی‌اتیلن سنگین^۲ با چگالی بالا گرید ۵۲۵۱۸ محصول شرکت پتروشیمی جم با چگالی 0.952 gr/cm^3 و شاخص جریان مذاب 18 g/10 min (190°C / $2/16 \text{ kg}$) و به‌عنوان ماده فاز زمینه استفاده شده و به منظور بهبود شرایط هسته‌زایی از پودر تالک ساخت شرکت مرک^۳ آلمان با چگالی متوسط $2/7 \text{ g/cm}^3$ و اندازه ذرات ۵ میکرومتر استفاده شده است. گازهای فیزیکی مورد استفاده در این تحقیق، گاز دی‌اکسیدکربن با فشار ۸۰ بار مورد استفاده قرار گرفته است و همچنین برای تولید نمونه‌ها از دستگاه اکستروژن تک ماردون ساخت شرکت ایران تکنیک موجود در کارگاه تکنوفوم پلاست دانشگاه ارومیه با نسبت طول به قطر ۲۵ با حداکثر دور ماردون ۵۰ دور در دقیقه استفاده شده است، برای بهبود چگالی فوم و اندازه سلولی که جزء مهم‌ترین خواص فوم‌های پلیمری است می‌توان با اعمال تغییراتی و ایجاد شرایطی همچون افزایش نرخ افت فشار در قالب خروجی، ایجاد شرایط دمای فرآیندی مناسب و همچنین استفاده از عامل هسته‌زا خواص فوم پلیمری را بهبود داد [۹]، که در ادامه به بیان برخی روابط تجربی می‌پردازیم.

¹ Talc

² HDPE

³ Merck

چگالی نسبی معادل چگالی نمونه‌ی پلیمر فوم شده نسبت به چگالی نمونه‌ی پلیمر فوم نشده که به صورت رابطه‌ی ۱ [۹]، ارائه می‌شود:

$$RD = \frac{\rho_{foam}}{\rho_{unfoamed}} \quad (1)$$

که RD، چگالی نسبی، ρ_{foam} چگالی نمونه نانوکامپوزیتی فوم‌شده و $\rho_{unfoamed}$ چگالی نمونه‌ی نانوکامپوزیتی فوم نشده می‌باشد. نسبت انبساط به صورت نسبت حجم کل نمونه فوم شده به حجم کل نمونه پلیمری فوم نشده تعریف می‌شود که به صورت رابطه ۲ بیان می‌گردد. بدیهی است که هر چه نسبت انبساط بیشتر باشد، حجم نمونه فوم شده نسبت به نمونه پلیمری فوم نشده بیشتر بوده، یعنی درصد بیشتری از حجم کل نمونه فوم شده را گاز تشکیل داده و نمونه فوم تولیدی مطلوب‌تر خواهد بود [۱۰]:

$$\phi = \frac{V_T}{V_p} = \frac{V_{p+Vg}}{V_p} \quad (2)$$

که V_T حجم کل نمونه فوم‌شده بوده و شامل حجم پلیمر (V_p) و حجم گاز (V_g) است، برای محاسبه چگالی ماده پایه که با توجه به مشخصات پلیمر مورد استفاده و با توجه به مشخصات پلیمر از رابطه ۳ محاسبه می‌گردد:

$$\frac{1}{\rho} = \alpha \frac{1}{\rho_1} + \beta \frac{1}{\rho_2} \quad (3)$$

چگالی فوم نیز با اندازه‌گیری جرم و حجم اندازه گرفته‌شده و از رابطه ۴ محاسبه می‌گردد [۱۱]:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (4)$$

برای محاسبه چگالی سلولی از رابطه‌ای که در آن n تعداد سلول‌های شمارش شده در قسمت مشخصی از مقطع نمونه و A مساحت قسمت مشخصی از مقطع نمونه برحسب مکعب سانتی‌متر و \emptyset نیز چگالی نسبی نمونه است که از رابطه ۵ محاسبه می‌شود:

$$N = \emptyset \times \left(\frac{n}{A}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (5)$$

با توجه به روابط و با فرض اینکه ویسکوزیته‌ی مخلوط گاز/ پلیمر وابسته به نرخ برش بوده و بتوان از قانون توانی برای تعریف آن در طول یک نازل اکستروژن برای یک سیال غیر نیوتونی استفاده نمود، افت فشار به صورت رابطه ۶ بیان می‌شود:

$$\Delta p = 2m \frac{L}{R^{3n+1}} \left[\left(3 + \frac{1}{n}\right) \frac{Q}{\pi} \right]^n \quad (6)$$

به منظور محاسبه‌ی نرخ افت فشار، از رابطه ۷ استفاده می‌شود:

$$\Delta t \approx \frac{L}{v_{avg}} \frac{L}{Q/\pi R^2} = \frac{\pi R^2 L}{Q} \quad (7)$$

بنابراین نرخ افت فشار از رابطه‌ی ۸ محاسبه می‌شود و می‌توان تأثیر تغییرات در قطر نازل خروجی در نرخ افت فشار را نتیجه گرفت:

$$\frac{dp}{dt} \approx \frac{\Delta p}{\Delta t} = -2m \left(3 + \frac{1}{n}\right)^n \left(\frac{Q}{\pi R^3}\right)^{n+1} \quad (8)$$

با بیان روابط و با نتیجه از رابطه ۸ به تأثیر هندسه قالب خروجی برای تولید فوم‌های پلیمری با هندسه قالب متفاوت و نرخ افت فشارهای متفاوت جهت بهبود و بررسی خواص ساختاری است می‌توان رسید [۱۲]. محاسبه چگالی فوم از طریق روش ارسמידس محاسبه گردید [۳]، قطر سلول نمونه‌ها به وسیله تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ و با استفاده از نرم‌افزار بل ویو^۲ اندازه‌گیری و محاسبه گردید، بر همین اساس، در تحقیق حاضر یک مدل تئوری برحسب اندازه سلولی و چگالی فوم ارائه می‌شود و کارایی آن در قیاس با نتایج تجربی تحقیقات دیگر محققین بررسی شده است. با توجه به رابطه تئوری ۸، باید قالب‌هایی طراحی گردد و آزمایش‌هایی با شرایط متفاوت هندسه قالب‌ها برای تولید فوم پلیمری انجام داد، که اقدام به طراحی و ساخت قالب‌هایی در سه قطر ۱، ۲ و ۳ میلی‌متر شده است.

با توجه به اینکه عامل فشار و نرخ افت فشار که پارامتر مؤثر در تراکم و چگالی سلولی پلیمر است [۶]، تعداد سه عدد قالب در سه قطر متفاوت از جنس فولاد آلیاژی Mo40 ساخته شده است. شکل ۱ تصویری از قالب‌های طراحی شده و ساخته شده (الف) قالب‌های طراحی شده با قطرهای متفاوت (ب) قالب‌های ساخته شده با قطرهای متفاوت مورد استفاده در پژوهش را نشان می‌دهد.

¹ SEM

² BelView



شکل ۱ تصویری از قالب‌های طراحی شده و ساخته شده (الف) قالب‌های طراحی شده با قطرهای متفاوت (ب) قالب‌های ساخته شده با قطرهای متفاوت

در ابتدا پلی‌اتیلن سنگین با یک درصد وزنی تالک ترکیب شد. چندین مرحله نمونه‌گیری به منظور دستیابی به شرایط فرآیندی خصوصاً دور ماردون و دمای قالب خروجی انجام شد. در این آزمایش‌ها شاهد پدیده گرفتگی رابط تزریق گاز در حالت بالا بودن دور ماردون بودیم که اقدام به کاهش دور ماردون از ۸ دور در دقیقه به ۵ و ۴ دور در دقیقه شد و در نتیجه مطلوب‌ترین دور تنظیمی ماردون ۳ دور در دقیقه مشخص شد. علاوه بر این هم‌زمان دمای قالب خروجی تحت کنترل بود. محدوده دمایی مناسب دمای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. همچنین در نمونه‌های اولیه اقدام به افزودن ۱ درصد وزنی تالک شد که نتایج حاصل از چگالی سنجی این نمونه‌ها مطلوب نبوده و هسته‌زایی بسیار اندک و پراکنده مشاهده شد و چگالی نمونه فوم افزایش چشمگیری نداشته است، بنابراین با بررسی اطلاعات موجود، تصمیم به استفاده از تالک ۲ درصد وزنی گردید و یکسان بودن درصد وزنی عامل هسته‌زا تالک و دور ماردون در تمام نمونه‌های تولیدی به انتخاب بهترین شرایط موادی و فرآیندی مطابق جدول ۱ شد، جدول ۱ شرایط موادی و فرآیندی نمونه‌های تولیدی در این پژوهش و شکل ۲ نمونه‌های تولیدی در این پژوهش و شکل ۲ نمونه‌های تولید شده و برش داده شده جهت بررسی، A نمونه شماره ۱، B نمونه شماره ۲ و C نمونه شماره ۳، مطابق شرایط ارایه شده در جدول ۱ نشان می‌دهد.

جدول ۱ شرایط موادی و فرآیندی نمونه‌های تولیدی در این پژوهش

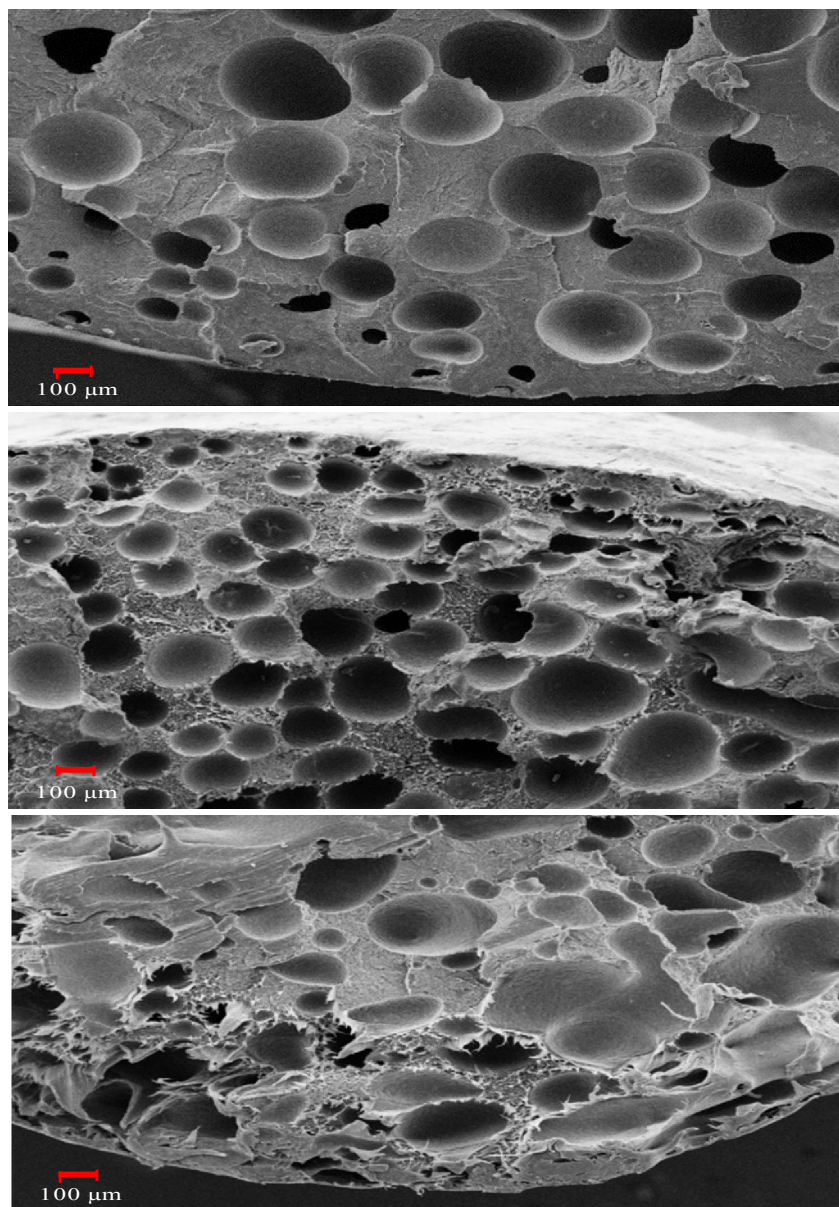
شماره نمونه	ماده زمینه	دمای قالب (°C)	عامل هسته‌زا (wt%)	قطر قالب (mm)
نمونه شماره ۱ (A)	پلی‌اتیلن سنگین	۱۳۰	۲	۱
نمونه شماره ۲ (B)	پلی‌اتیلن سنگین	۱۳۰	۲	۲
نمونه شماره ۳ (C)	پلی‌اتیلن سنگین	۱۳۰	۲	۳



شکل ۲ نمونه‌های تولید شده و برش داده شده جهت بررسی، A نمونه شماره ۱، B نمونه شماره ۲ و C نمونه شماره ۳، مطابق شرایط ارایه شده در جدول ۱

۳- نتایج و بحث

ابتدا در مرحله اول آزمایش، نمونه A از قالب با قطر نازل ۱ میلی‌متر با شرایط موادی یکسان با آزمایش‌های مراحل دوم و سوم، حاوی پلی‌اتیلن سنگین به همراه ۲ درصد وزنی پودر تالک و با دور ماردون ۳ دور در دقیقه و در دمای خروجی قالب ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد تولید شده‌اند و سپس آزمایش مرحله دوم نمونه B و آزمایش مرحله سوم نمونه C نیز مطابق مرحله اول با شرایط یکسان به ترتیب با قالب با قطر خروجی ۲ میلی‌متر و ۳ میلی‌متر تولید شده‌اند و جهت بررسی تأثیر هندسه قالب تولید و بررسی انجام گرفت، شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های A، B و C طبق شرایط موادی و فرآیندی جدول ۱ نشان داده شده است.



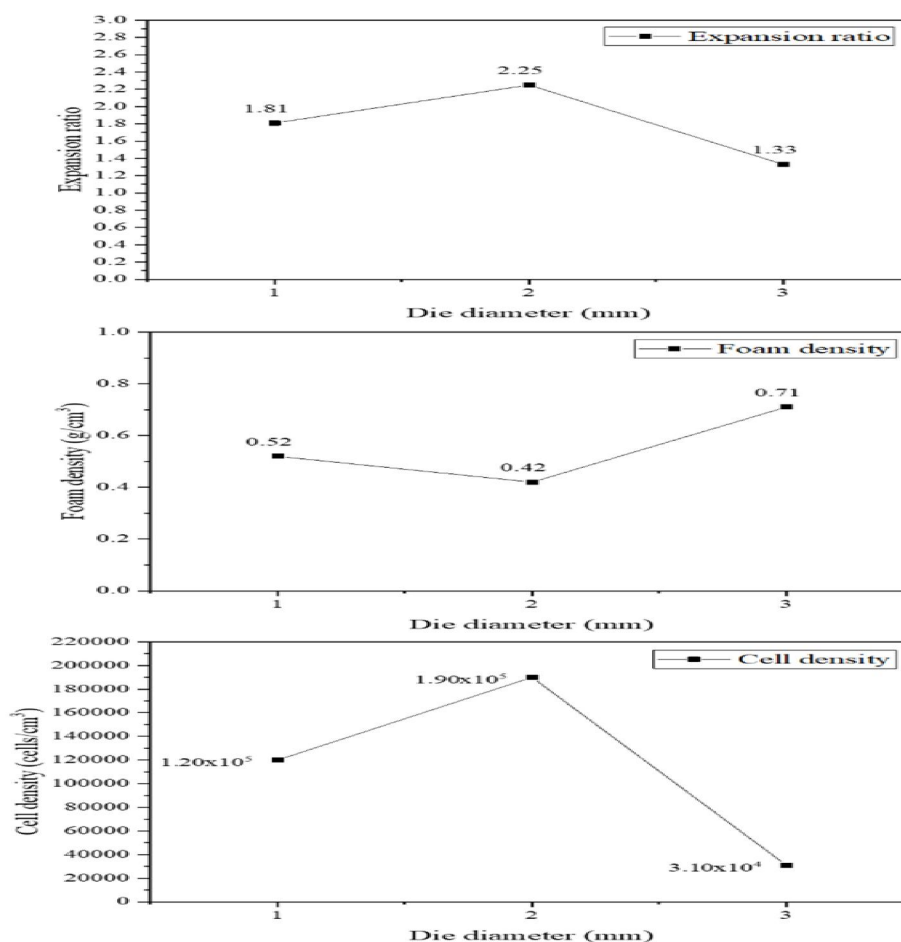
شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های A، B و C طبق شرایط موادی و فرآیندی جدول ۱

جدول ۲ نتایج حاصل از تصاویر میکروسکوپی و نتایج ساختاری نمونه‌های تولید شده را نشان می‌دهد.

جدول ۲ نتایج حاصل نمونه‌های آزمایش شده

شماره نمونه	چگالی فوم (g/cm ³)	نسبت انبساط	چگالی سلولی (cell/cm ³)
نمونه شماره ۱ (A)	۰/۵۲۰	۱/۸۱	۱/۲×۱۰ ^۵
نمونه شماره ۲ (B)	۰/۴۲۰	۲/۲۵	۱/۹×۱۰ ^۵
نمونه شماره ۳ (C)	۰/۷۱۰	۱/۳۳	۳/۱×۱۰ ^۴

با بررسی تصاویر میکروسکوپی از ساختار نمونه‌ها و نتایج به دست آمده می‌توان این چنین بیان کرد، با توجه به اینکه نرخ افت فشار رابطه معکوس با قطر قالب دارد، قالب با قطر ۱ میلی‌متر نرخ افت فشار بالایی را رقم می‌زند، دلیل اصلی این نرخ افت فشار بالا به دلیل کوچک‌تر شدن خروجی قالب و در نتیجه بالا رفتن فشار مجموعه سیستم است. با توجه به نتایج حاصل از نمونه A به دلیل فراتر بودن فشار مجموعه سیستم نسبت به فشار گاز ورودی به سیستم گاز کمتری به سیستم وارد شده که چگالی سلولی پایین‌تر و نسبت انبساط کمتری را رقم زده است و در تولید نمونه‌های مرحله دوم با حفظ شرایط موادی و فرآیندی به دلیل غلبه فشار گاز ورودی به سیستم در فرآیند تولید نمونه، با توجه به نسبت انبساط چگالی فوم و اندازه سلولی حاصل مشاهده می‌شود که میزان گاز بیشتری نسبت به آزمایش‌ها مرحله اول وارد سیستم شده و دلیل این امر بزرگ‌تر بودن قطر قالب خروجی و پایین بودن فشار سیستم نسبت به مرحله قبل است همچنین نمونه‌های تولید شده در مرحله سوم نسبت به نمونه‌های تولید شده مرحله اول و دوم در شرایط یکسان موادی و فرآیندی انجام گرفته که، چگالی سلولی پایین‌تر و سلول‌های بزرگ‌تر و تراکم سلولی کمتری داشته و ساختار غیریکنواخت‌تری دارند. شکل ۴ نمودارهای نسبت انبساط، چگالی فوم و چگالی سلولی نمونه‌ها در قطر قالب‌های متفاوت در این پژوهش را نمایش می‌دهد.



شکل ۴ نمودارهای نسبت انبساط، چگالی فوم و چگالی سلولی نمونه‌ها در قطر قالب‌های متفاوت در این پژوهش

۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، بررسی و تأثیر هندسه قالب خروجی، که یکی از پارامترهای مؤثر بر خواص ساختاری فوم‌های پلیمری تولید شده به روش اکستروژن می‌باشد، در دستور کار قرار گرفت. اثر پارامتر قطر قالب مورد بحث و مطالعه قرار گرفت، قطر قالب خروجی برای ایجاد نرخ افت فشار بالاتر جهت تولید فوم‌هایی با چگالی پایین، پارامتر مهمی است به طوری که کاهش قطر قالب خروجی باعث بالا رفتن فشار داخل سیستم اکستروژن و نرخ افت فشار بالاتر می‌شود همچنین افزایش قطر قالب خروجی موجب پایین آمدن فشار داخل و نرخ افت فشار کمتر گردیده است، که بر اساس روابط تجربی بیان شده در این تحقیق قالب با قطر ۱ میلی‌متر نسبت به دو قالب دیگر که به ترتیب دارای قطر ۲ میلی‌متر و ۳ میلی‌متر می‌باشد، نرخ افت فشار بالاتر را می‌تواند ایجاد کند، اما هنگام آزمایش با قالب ۱ میلی‌متر و با توجه به فشار داخلی سیستم اکستروژن در آزمایش‌های انجام گرفته، به دلیل عدم غلبه فشار پمپ تزریق گاز به داخل سیستم، فشار داخلی سیستم از فشار گاز تزریقی فراتر رفته و گاز کمتری وارد سیستم و ماتریس پلیمری گشته، در حالت کلی علاوه بر تأثیر قطر قالب در ایجاد نرخ افت فشار بالاتر، غلبه فشار گاز تزریقی به فشار داخل سیستم نیز پارامتر مهمی می‌باشد که موجب می‌شود تا گاز بیشتری وارد ماتریس پلیمری شود و در نتیجه گاز بیشتری جهت هسته‌زایی و رشد سلولی در دسترس خواهد بود با توضیحات ذکر گردیده و براساس نتایج به دست آمده بالاترین نسبت انبساط، چگالی فوم و چگالی سلولی در نمونه B با قالب قطر ۲ میلی‌متر به دست آمده است.

References

- [1] Sohi MJ, Ali M. Fabrication and numerical analysis of glass fiber reinforced composite air manifold under vibration loading. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2021 Feb 19;7(12):64-75. [In Persian]
- [2] Ansari MJ, Jabbaripour B. Manufacture and comparison of mechanical properties of reinforced polypropylene nanocomposite with carbon fibers and calcium carbonate nanoparticles. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2019 Oct ;6(5):1-12. [In Persian]
- [3] Goodarzi A, Shahrjaban H. Fabrication of polylactic acid/polyethylene glycol/ hydroxyapatite nanoparticles nanocomposite foam by mass porosity method. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2022 Nov;8(9):37-49. [In Persian]
- [4] 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*. 2017 Apr 21;46(4):155-62. doi: 10.1080/14658011.2017.1300210
- [5] Chen L, Sheth H, Wang X. Effects of shear stress and pressure drop rate on microcellular foaming process. *Journal of cellular plastics*. 2001 Jul;37(4):353-63. doi: 10.1106/VHC8-33K7-M1C7-0M2H
- [6] Rostami M, Azdast T, Hasanzadeh R, Moradian M. A study on fabrication of nanocomposite polyethylene foam through extrusion foaming procedure. *Cellular Polymers*. 2021 Nov;40(6):231-43. doi: 10.1177/02624893211040949
- [7] Demirtaş E, Özkan H, Nofar M. Continuous foam extrusion of high impact polystyrene (HIPS): Effects of processing parameters and blowing agent type and content. In *AIP Conference Proceedings 2019 Jan 22 (Vol. 2055, No. 1)*. AIP Publishing. doi: 10.1063/1.5084843
- [8] Nofar M. Effects of nano-/micro-sized additives and the corresponding induced crystallinity on the extrusion foaming behavior of PLA using supercritical CO₂. *Materials & design*. 2016 Jul 5; 101:24-34. doi: 10.1016/j.matdes.2016.03.147
- [9] Azdast T, Hasanzadeh R. Increasing cell density/decreasing cell size to produce microcellular and nanocellular thermoplastic foams: A review. *Journal of Cellular Plastics*. 2021 Sep;57(5):769-97. doi: 10.1177/0021955X20959301
- [10] Hasanzadeh R, Azdast T, Doniavi A, Esmaili P, Mamaghani S, Eungkee Lee R. Experimental investigation of properties of polymeric nanocomposite foams containing multi-walled carbon nanotubes using Taguchi method. *Journal of Science and Technology of Composites*. 2016 Mar 1;2(4):37-44.
- [11] Ameli A, Jahani D, Nofar M, Jung PU, Park CB. Development of high void fraction polylactide composite foams using injection molding: Mechanical and thermal insulation properties. *Composites Science and Technology*. 2014 Jan 10; 90:88-95. doi: 10.1016/j.compscitech.2013.10.019
- [12] Ashby MF, Messler RW, Asthana R, Furlani EP, Smallman RE, Ngan AH, Crawford RJ, Mills N. *Engineering materials and processes desk reference*. Butterworth-Heinemann; 2009 Jan 6.
- [13] Altan M. *Thermoplastic foams: Processing, manufacturing, and characterization*. Polymerization. London: IntechOpen. 2018 Jan 17; 6:117-37. doi: 10.5772/intechopen.71083