



روش نوین کاهش چگالی وزنی فوم‌های ساختاری ترموپلاستیک با توجه به طراحی قالب در فرآیند قالبگیری تزریق

احمدضیاء احمدزی^۱، امیرحسین بهروش^{۲*}

۱- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۴۱۱۵، amirhb@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۰۲ مرداد ۱۳۹۲

پذیرش: ۱۵ مرداد ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۲۰ فروردین ۱۳۹۳

کلید واژگان:

فوم‌های تزریقی

چگالی نسبی

انبساط فوم

طراحی قالب

چکیده

این مقاله به مطالعه تجربی اثر پارامترهای فرآیندی و طراحی قالب بر انبساط فوم تولید شده به روش قالبگیری تزریقی می‌پردازد. یکی از چالش‌های اساسی در فرآیند تزریق فوم محدودیت انبساط بوده که پارامترهای مختلفی بر آن اثرگذار است. ایده روش نوین ارائه شده، از روش‌های قالبگیری باز، فشار معکوس و تزریق به کمک سیال گرفته شده است. از ماده پلی استایرین به‌عنوان ماده پلیمری و از نیتروژن به‌عنوان عامل فوم‌زایی فیزیکی استفاده شده است. تغییر در طراحی قالب شامل تعبیه یک حفره اضافی و یک دریچه ثانویه بوده که بین حفره اصلی و حفره اضافه قرار می‌گیرد. پارامترهای مورد مطالعه شامل ضخامت قطعه و اندازه پهنای دریچه ثانویه بوده که برای انجام آزمایش از روش فاکتوریال کامل استفاده شد. نتایج آزمایش نشان داد که حفره اضافه مواد و پهنای دریچه اثر قابل توجهی بر انبساط و کاهش چگالی نسبی دارد. همچنین مشخص شد که مهم‌ترین پارامتر موثر بر انبساط و کاهش چگالی نسبی ضخامت قطعه است.

A new method to reduce weight density by considering the mold design in injection molding process of thermoplastic structural foam

Ahmad Zia Ahmadzai¹, Amir Hussein Behravesheh^{2*}

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* P. O. B. 14115-143 Tehran, Iran, amirhb@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 24 July 2013
Accepted 06 August 2013
Available Online 09 April 2014

Keywords:

Foam Injection Molding (FIM)
Relative Density
Foam Expansion
Mold Design

ABSTRACT

This paper presents an experimental study on the mold design and the effect of processing parameters on the expansion of foam injection molded parts. Limitation in foam expansion is a primary challenge in foam injection molding process. In this study a novel approach in mold design is introduced to take advantages of concepts such as counter-pressure and mold opening to further extend the expansion range. Polystyrene and Nitrogen (N₂) as an amorphous thermoplastic and the physical blowing agent (PBA), was used in the experiments respectively. A modular sheet mold with a rectangular cavity and a fan gate was designed and manufactured. The mold includes a main cavity, the thickness of which could be varied, connected to an overflow channel via a secondary gate, the size of which was also varied in this research. The investigated parameters were part thickness, secondary gate width. Full factorial test experiments were carried out in this research work. The results indicated the high effectiveness of the proposed approach in further reducing the foamed part weight. For the parts with a larger thickness, a noticeable decrease in bulk density and an increase in cell population density along with an improvement in cellular structure uniformity were observed.

۱- مقدمه

نیتروژن به‌عنوان عامل فوم‌زا استفاده می‌کنند. این گازها از طریق یک سامانه ویژه وارد دستگاه تزریق یا اکستروژن شده تا تحت فشار بالا در داخل پلیمر حل و محلول تک‌فاز (پلیمر-گاز) تشکیل گردد. پس از تزریق محلول پلیمر-گاز به داخل حفره قالب، به طور آبی، به دلیل افت سریع فشار، هسته‌های جوانه‌زا تولید و شروع به جوانه‌زنی و رشد می‌نمایند. تشکیل هسته‌های جوانه‌زا و رشد آن بستگی زیادی به شرایط فرآیندی و پارامترهای مختلف دارد [۱، ۲]. شیمبو در سال ۱۹۹۹ مراحل تولید فوم‌های ریزسولولی دستگاه قالب‌گیری

در دهه‌های اخیر فوم‌های ساختاری به‌عنوان یکی از پرکاربردترین انواع فوم در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. این فوم‌ها به دلیل ثبات ابعادی، فشار تزریق پایین، زمان تولید کوتاه‌تر، چگالی نسبی کمتر و ساختار بهتر سلول (هسته فوم‌شده و پوسته فوم‌نشده) مورد توجه صنایع و محققان قرار گرفته است. این نوع فوم با ایجاد اصلاحات و تغییرات در دستگاه معمولی تزریق و اکستروژن تولید می‌شود. معمولاً از گازهای خنثی دی اکسید کربن و

Please cite this article using:

A.Z. Ahmadzai, A.H. Behravesheh, A new method to reduce weight density by considering the mold design in injection molding process of thermoplastic structural foam, Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 1, pp. 203-209, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

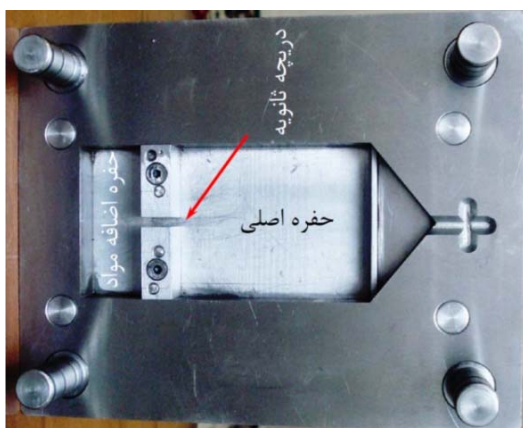
نسبی کمتر داشته باشد. یکی از مزیت‌ها در طراحی و ساخت قالب، قابلیت تغییر ضخامت و درجه‌های ثانویه بوده که می‌توان آن‌ها را در مدت زمان کوتاه در جریان آزمایش به راحتی تعویض نمود. این قالب متشکل از حفره اصلی، درجه ثانویه و حفره اضافه مواد است (شکل ۱). در این قالب درجه ثانویه مانع فرار گاز بیشتر از جبهه جریان در حین پُر شدن قالب می‌گردد، زیرا گازهای متواری از پلیمر، پس از برخورد به دیواره درجه ثانویه، فشار برعکس، شبیه روش قالبگیری فشار معکوس، به جبهه جریان مواد اعمال می‌نماید و موجب می‌شود تا گاز کمتری از محلول پلیمر-گاز فرار نماید. حفره مواد اضافه نیز شبیه روش قالبگیری باز عمل می‌نماید؛ زیرا ایجاد فضای بیشتر که این حفره در اختیار مواد مذاب قرار می‌دهد سبب می‌شود تا افت فشار در این ناحیه بیشتر گردد، ضمن اینکه افت فشار بیشتر همراه با فضای مناسب شرایط بهتر را برای انبساط فراهم می‌نماید. از طرف دیگر بر اثر انبساط در حفره اصلی، زمانی که مواد هنوز گرم است و سلول‌ها رشد می‌نمایند، مقداری مواد از حفره اصلی از طریق درجه ثانویه عبور و به حفره مواد اضافه می‌ریزد که در نتیجه آن وزن و چگالی نسبی قطعه کاهش می‌یابد که مطلوب است

۳- مواد و تجهیزات

پلی‌استایرن، نوع 861 N GPPS با چگالی وزنی $1/04 \text{ g/cm}^3$ به‌عنوان ماده پلیمری آمورف و نیتروژن با خلوص ۹۹٪ به‌عنوان عامل فوم‌زایی فیزیکی مورد استفاده قرار گرفته است. برای تولید فوم‌های ریزسولوی از دستگاه تزریق آزمایشگاهی ۷۰ تن و یک مجموعه کنترل و تزریق گاز N_2 استفاده شده است.

۴- روش کار

پارامترهای مورد مطالعه در این تحقیق برپایه طراحی پیشنهادی قالب انتخاب شدند. این پارامترها عبارت از اندازه پهنای درجه ثانویه و ضخامت قطعه بوده که هرکدام در چهار سطح و با روش فاکتوریل کامل مورد آزمایش قرار گرفته است. مجموع آزمایش‌ها ۱۶ سطح و پس از دستیابی به شرایط پایدار فرآیندی برای هر یک از سطوح شش نمونه به‌منظور تکرارپذیری تولید شده است. پارامترهای متغیر آزمایش‌ها در جدول ۱ و پارامترهای ثابت در جدول ۲ درج گردیده است. دمای مذاب برای تمامی آزمایش‌ها 240°C ثابت در نظر گرفته شد و به‌صورت مداوم توسط دماسنج لیزری قبل از تزریق به حفره قالب کنترل گردیده است. قالب با استفاده از یک سیستم سردکننده، توسط آب، خنک و دمای قالب توسط دو عدد ترموکوپل، که در صفحات متحرک و ثابت جاسازی شده، کنترل گردیدند. شکل ۲ شمایی از دستگاه تزریق و مجموعه کنترل جریان گاز را نشان می‌دهد.



شکل ۱ شمایی از قالب مورد آزمایش

تزریقی همراه با گاز CO_2 و تزریق مستقیم آن به‌عنوان عامل پف‌دهنده در درون سیلندر را گزارش نمود. نتایج شیمو ساختار ناهمگن و غیریکنواخت سلول‌ها و قطعات تولید شده را که اندازه سلول‌های آن به ۲۰ تا $100 \mu\text{m}$ می‌رسید نشان داد [۳]. در همین سال فن‌شمیت و میکائیلی اثر شرایط فرآیندی بر چگالی نسبی و ساختار فوم را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش دمای مذاب و سرعت تزریق چگالی نسبی قطعات تولید شده حدود ۵۰٪ کاهش می‌یابد. همچنین، آن‌ها دریافتند که با افزایش دمای قالب، توزیع چگالی سلول یکنواختی بهتری می‌یابد [۴].

در سال ۲۰۰۴ مولر و هرینستاین با تغییر و اصلاحات در دستگاه تزریق معمولی و با استفاده از روش قالبگیری باز توانستند قطعاتی تولید نمایند که حدود ۵۰٪ کاهش وزن داشت [۵].

بهروش و رجب‌پور اثر حجم تزریق بر ساختار فوم‌های تزریقی را مورد مطالعه قرار دادند و به نسبت انبساط ۱/۲ دست یافتند. همچنین نموداری را معرفی نمودند که اثر حجم تزریق بر انبساط را مشخص می‌نمود [۶].

رضاوند و همکارانش روی خواص فیزیکی و مکانیکی فوم‌های ریزسولوی مطالعه و تحقیق نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش فشار تزریق و دمای قالب، چگالی نسبی و ضخامت پوسته فوم نشده کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش حجم تزریق، چگالی نسبی و ضخامت پوسته افزایش می‌یابد [۷-۹].

هدف اصلی این تحقیق بررسی تجربی اثر پارامترهای فرآیندی و طراحی قالب بر کاهش وزن و چگالی نسبی فوم‌های تزریقی می‌باشد. این قالب خاص با توجه به مطالعه مزایای روش‌های مختلف قالبگیری تزریقی از جمله روش قالبگیری باز، روش قالبگیری فشار معکوس^۱ و همچنین تجربه قبلی نگارندگان در زمینه تزریق به‌کمک سیال، با استفاده از حفره مواد اضافه، طراحی و ساخته شده است و اثر ضخامت قطعه و پهنای درجه ثانویه بر کاهش وزن را مورد مطالعه قرار داده است.

۲- قالب

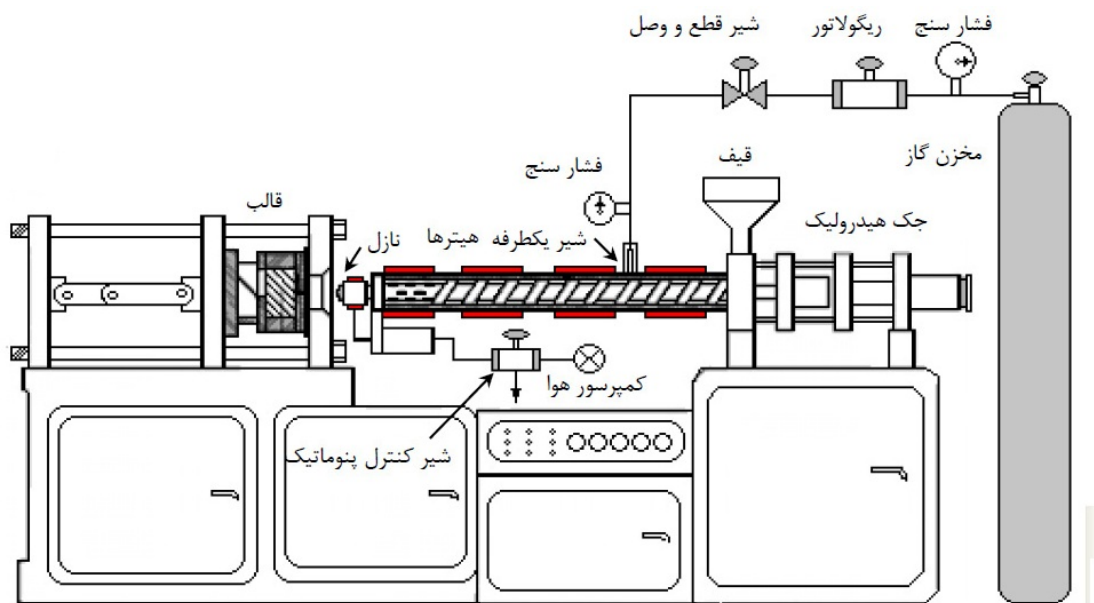
طراحی قالب براساس تجربه قبلی در زمینه تزریق به‌کمک سیال (گاز و آب) و با الهام از روش قالبگیری فشار معکوس و قالبگیری باز انجام شد. تجربه آزمایش تزریق به‌کمک سیال نشان داد که حفره اضافه مواد فضای مناسب را برای سرریز مواد فراهم نموده تا سیال پس از نفوذ به هسته قطعه، که هنوز گرم است، مقداری مواد را به‌سمت حفره اضافه مواد حرکت داده و در نهایت قطعه میان تهی با تقارن بهتر ایجاد می‌شود [۱۰، ۱۱].

در روش قالبگیری باز، حفره قالب به‌طور کامل از مواد مذاب پُر می‌گردد. پس از زمان کوتاه، دو کفه قالب به‌اندازه معینی از هم فاصله می‌گیرند که فضای حدود ۵۰-۱۵۰٪ ایجاد می‌شود. در این هنگام، به‌دلیل دمای بالای مواد مذاب و افت فشاری که ایجاد گردیده، جوانه‌های تشکیل شده شروع به رشد می‌نمایند. در این روش کاهش وزن تا ۳۰-۴۰٪ گزارش شده است [۱۲].

در روش قالبگیری فشار معکوس، نخست مواد مذاب به داخل حفره قالب تزریق شده سپس از جهت مخالف جریان مواد مذاب گاز متراکم (CO_2 یا N_2) تحت فشار به حفره قالب هدایت می‌شود. جریان این گاز، فشار معکوس به مواد اعمال می‌نماید و مانع فرار گاز از مواد مذاب می‌گردد. در نتیجه قطعات تولید شده با این روش دارای سلول‌های بیشتر، ریزتر و ساختار یکنواخت‌تر می‌باشد. در این روش قالبگیری سوراخ‌هایی برای خروج گاز در قالب در نظر گرفته می‌شود و اطمینان از عدم نشستی در قالب نیز حاصل می‌گردد [۱۳-۱۵].

پس از بررسی مزایا و معایب روش‌های ذکر شده، قالبی طراحی و ساخته شد که مزایای روش‌های فوق را برای تولید فوم‌های با انبساط بالا و چگالی

1- Counter pressure foam molding



شکل ۲ شمای کلی دستگاه تزریق معمولی که با نصب تجهیزات لازم، توانایی تولید قطعات فوم ریزسولوی را دارد

جدول ۱ پارامترهای متغیر در سطوح مختلف و چگالی به‌دست آمده از نتایج آزمایش‌ها

شماره آزمایش	عامل فومزا (wt.%)	ضخامت قطعه (mm)	پهنای درجه ثانویه (mm)	چگالی نسبی (g/cm ³)
۱	۱/۵	۳/۲	دریچه بسته	۰/۸۹
۲	۱/۵	۳/۲	۳/۵	۰/۷۳
۳	۱/۵	۳/۲	۷	۰/۷۲
۴	۱/۵	۳/۲	۱۴	۰/۷۸
۵	۱/۵	۶	دریچه بسته	۰/۷۶
۶	۱/۵	۶	۳/۵	۰/۷
۷	۱/۵	۶	۷	۰/۶۶
۸	۱/۵	۶	۱۴	۰/۷۲
۹	۱/۵	۹	دریچه بسته	۰/۷۴
۱۰	۱/۵	۹	۳/۵	۰/۱۶
۱۱	۱/۵	۹	۷	۰/۵۵
۱۲	۱/۵	۹	۱۴	۰/۶۴
۱۳	۱/۵	۱۵	دریچه بسته	۰/۶۵
۱۴	۱/۵	۱۵	۳/۵	۰/۱۵
۱۵	۱/۵	۱۵	۷	۰/۴۸
۱۶	۱/۵	۱۵	۱۴	۰/۵۳

جدول ۲ پارامترهای ثابت آزمایش

فشار تزریق (MPa)	قطر نازل تزریق (mm)	دمای مذاب (°C)	دمای قالب (°C)	زمان تأخیر باز شدن نازل (s)	حجم تزریق بر حسب ضخامت (%)			
					(mm)۳/۲	(mm)۶	(mm)۹	(mm)۱۵
۶۰	۴	۲۴۰	۲۰	۲	۸۵	۷۵	۶۵	۵۵

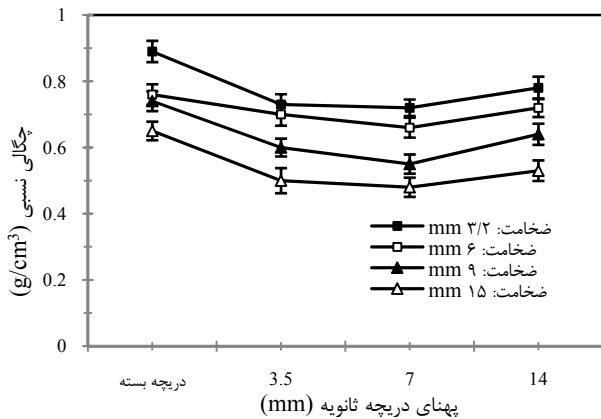
الکترونی فیلیپس (XL-30) عکسبرداری گردیده است.

۵- اندازه‌گیری

تعیین چگالی به‌روش ارشمیدس و بررسی ساختار به‌کمک تصاویر میکروسکوپ الکترونی^۱ انجام گردید. سه ناحیه مورد مطالعه با ابعاد mm ۱۵×۱۰ از سمت جریان مواد مذاب به‌سمت حفره اضافه مواد انتخاب شد (شکل ۳). نخست نمونه‌ها به مدت ۱۵ دقیقه به‌منظور ایجاد شرایط شکست ترد، در نیتروژن مایع غوطه‌ور گشته و توسط ضربه به دو قسمت تقسیم گردیده است. سپس مقطع نواحی جدا شده از قطعات توسط میکروسکوپ

چگالی نسبی از رابطه (۱) و چگالی (تعداد) سلول‌ها در هر مقطع از رابطه (۲) محاسبه شد [۱۶]. در این رابطه، $\rho_{relativ}$ چگالی نسبی، ρ_{foam} چگالی نمونه فوم‌شده و $\rho_{polymer}$ چگالی ترموپلاستیک فوم‌نشده است. همچنین، N چگالی سلول‌ها (cells/cm³) در ناحیه مورد نظر و n تعداد سلول‌ها در محدوده به ابعاد $a \times b$ (mm×mm) از ناحیه مورد نظر در تصویر میکروسکوپ الکترونی مقطع آن ناحیه است. ρ_{core} چگالی هسته فوم شده از رابطه (۳) به‌دست می‌آید [۱۷] که در آن d ضخامت قطعه و e_1 و e_2 ضخامت پوسته فوم

۱- SEM



شکل ۵ اثر درپچه بر چگالی نسبی

اثر ضخامت قطعه بر کاهش چگالی نسبی در این نمودار به‌وضوح قابل مشاهده است، زیرا کاهش چگالی نسبی قطعاتی که با ضخامت ۱۵ mm تولید شده در مقایسه با قطعاتی که در شرایط یکسان فرآیندی و درپچه ثانویه با ضخامت ۳/۲ mm تولید شده است قابل توجه است. با افزایش ضخامت قطعه فضا بیشتر و زمان خنک‌کاری قطعه افزایش می‌یابد. در نتیجه فضای بیشتر، دما و زمان کافی برای جوانه‌زنی و رشد حباب‌ها فراهم می‌شود. بنابراین انبساط بیشتری در قطعاتی ضخیم‌تر امکان‌پذیر می‌گردد.

۶-۲- چگالی سلول

در شکل ۶ چگالی سلولی در سه ناحیه انتخاب شده نشان داده شده است. به‌طور کلی در ناحیه (A1) نزدیک به درپچه اصلی (فن گیت) چگالی سلول نسبت به ناحیه (A3) (دورترین ناحیه) کمتر است، زیرا این ناحیه، به‌دلیل جریان مداوم مواد و پُرشدن قالب، افت فشار کمتری دارد. زمانی که محلول پلیمر-گاز وارد حفره قالب و به سمت انتهای قالب در حرکت است، به‌دلیل افت فشار ایجاد شده در زمان ورود به قالب، به‌خصوص در قسمت جبهه مذاب، موجب تشکیل هسته‌های جوانه‌زا و رشد آن‌ها می‌گردد. گرادایان افت فشار در انتهای قالب به‌دلیل وجود درپچه ثانویه و حفره مواد اضافه افزایش می‌یابد، که معمولاً از فشار انحلال کمتر است. در نتیجه مقدار بیشتری عامل فوم‌زا از محلول پلیمر-گاز جدا و به سمت انتهای قالب فرار می‌کند. بخشی از این توده گاز جدا شده، پس از برخورد به دیواره درپچه ثانویه، از طریق درپچه به سمت حفره اضافه مواد فرار کرده و بخشی دیگر دوباره به سمت جبهه جریان برگشت خورده و باعث اعمال فشار بر جبهه مذاب می‌شود. فشار اعمالی مانند روش قالبگیری فشار معکوس عمل کرده که این فشار مانع فرار بیشتر گازها از محلول پلیمر-گاز می‌شود. نکته قابل ذکر این است که مقدار این فشار وابسته به پهنای درپچه ثانویه است. چنین به‌نظر می‌رسد که در نتیجه فشار اعمال شده رشد سلول‌ها کنترل شده و در بعضی موارد (به‌عنوان مثال، فشار زیاد تولید شده بدون درپچه ثانویه) حتی موجب فروپاشی سلول می‌گردد و تعداد سلول‌ها (چگالی سلولی) کاهش می‌یابد [۱۶، ۱۷]. جدول ۳ چگالی سلول‌ها در سه ناحیه انتخاب شده را نشان می‌دهد.

نتایج اندازه‌گیری چگالی سلول قطعات تولید شده نشان می‌دهد که اکثر قطعات دارای چگالی سلول در محدوده 10^7 Cell/cm^3 می‌باشند. پیچیدگی فرآیند حلالیت، هسته‌زایی و رشد سلول‌ها در فرآیند تزریق، سبب دشواری دستیابی به ساختارهای با چگالی بالاتر از 10^7 Cell/cm^3 می‌شود. همان‌گونه که در جدول و نمودارها مشخص شده است، چگالی سلول‌ها در ناحیه A2 بیشتر از نواحی دورتر از درپچه (انتهای قطعه) است.

نشده بوده که در شکل ۴ نشان داده شده است.

$$\rho_r = \left(\frac{\rho_{\text{foam}}}{\rho_{\text{polymer}}} \right) \quad (1)$$

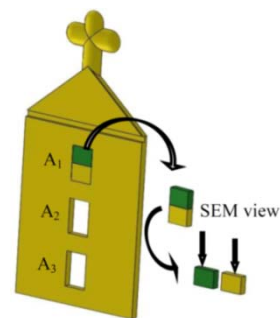
$$N = \left(\frac{n}{(a * b)} \right)^{\frac{3}{2}} * \frac{\rho_{\text{polymer}}}{\rho_{\text{core}}} * 10^{12} \quad (2)$$

$$\rho_{\text{core}} = \rho_{\text{polymer}} \left[\frac{\left(\frac{\rho_{\text{foam}}}{\rho_{\text{polymer}}} \right) d - (e_1 + e_2)}{d - (e_1 + e_2)} \right] \quad (3)$$

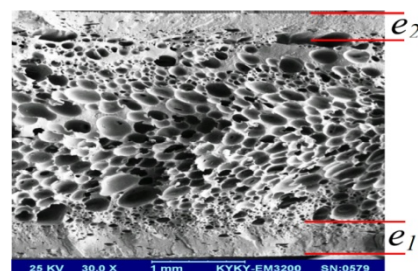
۶- نتایج

۶-۱- چگالی نسبی

میانگین چگالی نسبی قطعات تولید شده در ضخامت‌ها و اندازه پهنای درپچه‌های ثانویه مختلف در جدول ۱ درج شده است. همچنین، در شکل ۵ اثر درپچه ثانویه بر چگالی نسبی (درپچه بسته و درپچه ثانویه ۳/۵، ۷ و ۱۴ mm) در ضخامت‌های مختلف (۳/۲، ۶، ۹ و ۱۵ mm) نشان داده شده است. با ازدیاد پهنای درپچه از صفر به ۳/۵، ۷ و ۱۴ mm چگالی نسبی قطعات تولید شده کاهش و سپس افزایش می‌یابد. بیشترین کاهش دانسیته در اندازه پهنای ۷ mm رخ داده است. این نتیجه نشان می‌دهد که اثر تعبیه درپچه ثانویه بر روی کاهش دانسیته کاملاً مطلوب می‌باشد. افزایش اندازه پهنای تا میزان معین (۷ mm) در اینجا نشان‌دهنده مقاومت کمتر برای ایجاد فضای بیشتر برای انبساط می‌باشد. افزایش بیش از حد اندازه پهنای درپچه ثانویه (۱۴ mm) موجب ایجاد شرایط برای فرار بیشتر گاز از مواد می‌باشد. شایان ذکر است که در هنگام ورود مذاب محلول پلیمر-گاز به داخل قالب، به‌دلیل افت فشار، بخشی از گاز به خارج از مذاب فرار کرده و در نتیجه میزان گاز محلول در مذاب را برای تولید سلول‌ها، کاهش می‌دهد. فرار بیشتر گاز از یک‌سو باعث کاهش هسته‌های جوانه‌زا در مواد و از جانب دیگر موجب افزایش گرانیوی آن می‌گردد. در نتیجه، به‌دلیل کاهش عامل فوم‌زا، انبساط کمتر رخ می‌دهد. همچنین، به‌دلیل گرانیوی بالا، مقدار کمتر مواد مذاب از طریق درپچه ثانویه به حفره اضافه مواد می‌ریزد. بنابراین چگالی نسبی در قطعاتی که با درپچه ثانویه ۱۴ mm تولید شده بیشتر است.



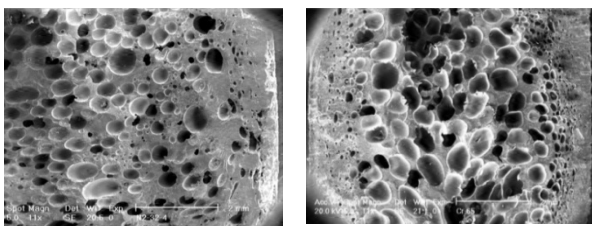
شکل ۳ سه ناحیه در نظر گرفته‌شده برای بررسی چگالی و ساختار



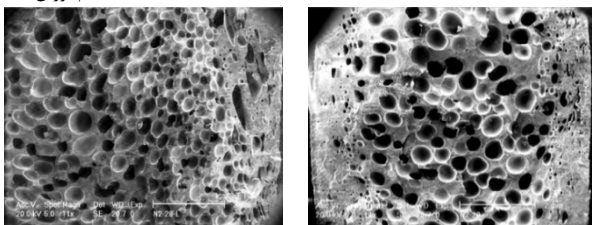
شکل ۴ نمونه‌ای از تصویر که از آن برای اندازه‌گیری ضخامت پوسته فوم‌نشده استفاده شده است

جدول ۳ چگالی سلول در سه ناحیه انتخاب شده (با توجه به شکل ۳)

شماره آزمایش	عامل فوم زا (wt.%)	ضخامت قطعه (mm)	پهنای دریچه ثانویه (mm)	چگالی سلول در نواحی سه‌گانه		
				ناحیه A ₁ (cells/cm ³)	ناحیه A ₂ (cells/cm ³)	ناحیه A ₃ (cells/cm ³)
۱	۱/۵	۳/۲	دریچه بسته	۰.۶E+۳/۹	۰.۶E+۴/۵۴	۰.۶E+۵/۸۲
۲	۱/۵	۳/۲	۳/۵	۰.۷E+۱/۲۹	۰.۷E+۱/۶	۰.۷E+۱/۵
۳	۱/۵	۳/۲	۷	۰.۷E+۱/۸	۰.۷E+۲/۲۹	۰.۷E+۲/۱۴
۴	۱/۵	۳/۲	۱۴	۰.۶E+۶/۵۷	۰.۶E+۶/۳	۰.۶E+۷/۶۶
۵	۱/۵	۶	دریچه بسته	۰.۷E+۲/۴۷	۰.۷E+۲/۹۳	۰.۷E+۲/۶۵
۶	۱/۵	۶	۳/۵	۰.۷E+۳/۵۳	۰.۷E+۳/۷۸	۰.۷E+۳/۸۵
۷	۱/۵	۶	۷	۰.۷E+۴/۱۹	۰.۷E+۴/۶۸	۰.۷E+۴/۴۶
۸	۱/۵	۶	۱۴	۰.۷E+۳/۲۱	۰.۷E+۳/۶۷	۰.۷E+۳/۵
۹	۱/۵	۹	دریچه بسته	۰.۷E+۳/۶۸	۰.۷E+۳/۹۲	۰.۷E+۳/۷۳
۱۰	۱/۵	۹	۳/۵	۰.۷E+۴/۲۹	۰.۷E+۴/۸۲	۰.۷E+۴/۷۳
۱۱	۱/۵	۹	۷	۰.۷E+۵/۳۵	۰.۷E+۵/۸۳	۰.۷E+۵/۶۳
۱۲	۱/۵	۹	۱۴	۰.۷E+۴/۱۴	۰.۷E+۴/۴۵	۰.۷E+۴/۳۳
۱۳	۱/۵	۱۵	دریچه بسته	۰.۷E+۴/۵۶	۰.۷E+۴/۷۵	۰.۷E+۴/۵۹
۱۴	۱/۵	۱۵	۳/۵	۰.۷E+۵/۰۳	۰.۷E+۵/۹۲	۰.۷E+۵/۶۴
۱۵	۱/۵	۱۵	۷	۰.۷E+۶/۳۹	۰.۷E+۶/۱۸	۰.۷E+۶/۱۷
۱۶	۱/۵	۱۵	۱۴	۰.۷E+۶/۷۷	۰.۷E+۵/۱۲	۰.۷E+۵/۱۷



(الف) ضخامت قطعه ۳/۲ mm، حجم تزریق ۸۵٪، (ب) ضخامت قطعه ۶ mm، حجم تزریق ۷۵٪

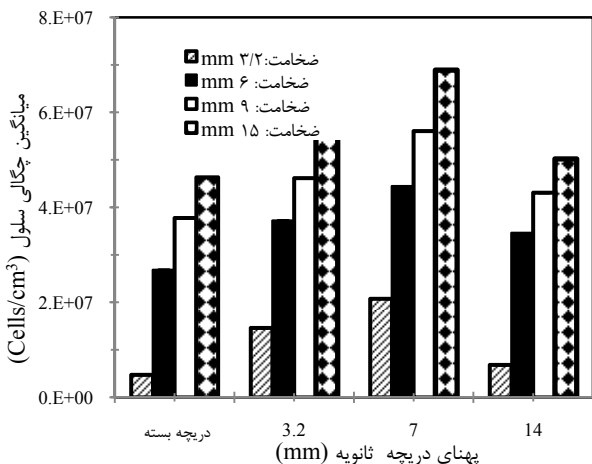


(ج) ضخامت قطعه ۹ mm، حجم تزریق ۶۵٪، (د) ضخامت قطعه ۱۵ mm، حجم تزریق ۵۵٪

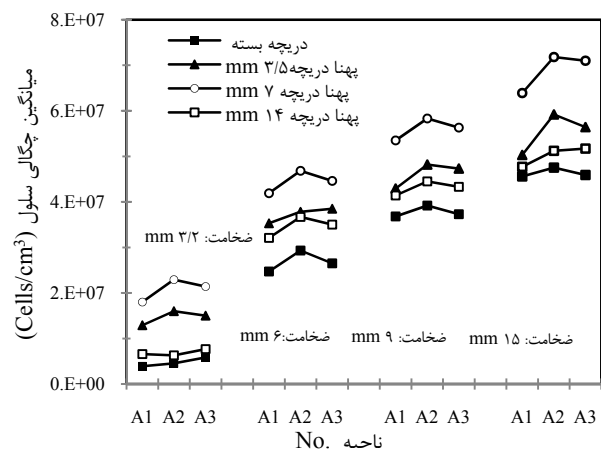
شکل ۷ تصاویر SEM از مقاطع نمونه‌ها در ضخامت‌های مختلف (پهنای دریچه ثانویه ۷ mm)

علت این تفاوت فرار گاز از جبهه جریان در حین پُردن قالب است. مواد مذاب در بدو ورود به داخل حفره قالب به دلیل مواجهه با فضای خالی قالب (فشار اتمسفر) از افت فشار بیشتری برخوردار است، زیرا زمانی که قسمتی از حفره توسط ماده پُرسیده باشد فشار در درون حفره قالب به دلیل برخورد گازهای متواری به دیواره دریچه ثانویه و برگشت به سمت جبهه جریان اندکی افزایش می‌یابد.

شکل ۷ تصاویر گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی از مقاطع قطعات تولید شده در ضخامت‌های مختلف را در ناحیه A₃ (دورترین ناحیه از قطعه) با دریچه ثانویه ۷ mm نشان داده است. از نتایج جدول ۳ و تصاویر می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که با افزایش ضخامت قطعه چگالی سلول افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۷-الف مشاهده می‌شود، چگالی سلول در ضخامت ۳/۲ mm به مراتب کمتر از چگالی سلول در ضخامت ۱۵ mm با همان شرایط فرآیندی است (شکل ۷-د). در شکل ۸ اثر دریچه ثانویه بر چگالی سلول در ضخامت‌های مختلف به صورت نمودار میله‌ای نشان داده شده است.



شکل ۸ اثر دریچه ثانویه بر میانگین چگالی سلول در ضخامت‌های مختلف قطعات



شکل ۶ اثر دریچه ثانویه بر چگالی سلول در سه ناحیه انتخاب شده

جدول ۴ ضخامت پوسته فوم نشده در سه ناحیه انتخاب شده (با توجه به شکل ۳)

شماره آزمایش	عامل فوم زا (wt.%)	ضخامت قطعه (mm)	پهنای دریچه ثانویه (mm)	ضخامت پوسته فوم نشده در نواحی سه‌گانه		
				ناحیه A ₁ (μm)	ناحیه A ₂ (μm)	ناحیه A ₃ (μm)
۱	۱/۵	۳/۲	دریچه بسته	۸۰۰	۷۰۰	۹۵۰
۲	۱/۵	۳/۲	۳/۵	۷۰۰	۶۰۰	۸۰۰
۳	۱/۵	۳/۲	۷	۶۰۰	۵۵۰	۶۰۰
۴	۱/۵	۳/۲	۱۴	۷۵۰	۶۶۰	۹۰۰
۵	۱/۵	۶	دریچه بسته	۹۵۰	۹۰۰	۱۰۰۰
۶	۱/۵	۶	۳/۵	۸۰۰	۷۶۰	۹۰۰
۷	۱/۵	۶	۷	۷۵۰	۶۰۰	۸۰۰
۸	۱/۵	۶	۱۴	۸۶۰	۷۰۰	۹۵۰
۹	۱/۵	۹	دریچه بسته	۱۲۰۰	۱۰۰۰	۱۲۵۰
۱۰	۱/۵	۹	۳/۵	۱۰۰۰	۹۰۰	۱۰۰۰
۱۱	۱/۵	۹	۷	۹۰۰	۸۰۰	۹۰۰
۱۲	۱/۵	۹	۱۴	۱۱۰۰	۱۰۵۰	۱۱۰۰
۱۳	۱/۵	۱۵	دریچه بسته	۱۰۰۰	۹۰۰	۱۱۰۰
۱۴	۱/۵	۱۵	۳/۵	۹۵۰	۹۵۰	۹۷۰
۱۵	۱/۵	۱۵	۷	۸۴۰	۸۰۰	۹۰۰
۱۶	۱/۵	۱۵	۱۴	۱۰۰۰	۸۵۰	۹۳۰

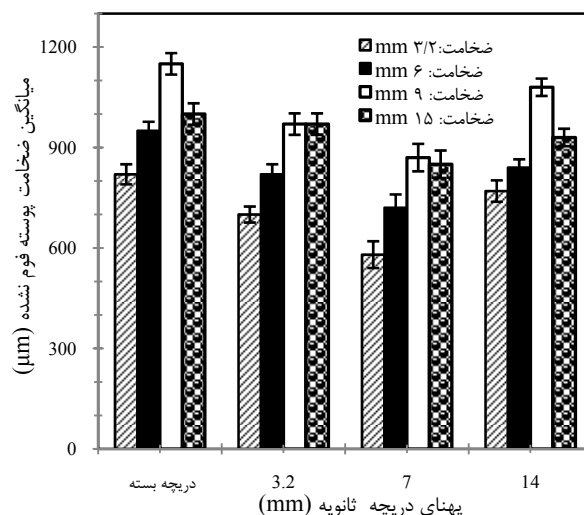
خنک شده، در نتیجه گرانیوی مواد افزایش یافته و فرصت ایجاد و رشد حباب در این ناحیه کاهش می‌یابد [۲۰،۲۱]. انتقال حرارت بین دیواره قالب و مواد مذاب وابسته به شرایط و پارامترهای فرآیندی بوده که می‌تواند بر تشکیل پوسته فوم‌نشده مؤثر باشد. به دلیل اختلاف دما بین مواد مذاب و دیواره قالب ضخامت پوسته فوم‌نشده افزایش می‌یابد. از طرف دیگر اختلاف کمتر بین دمای مذاب و قالب باعث می‌شود تا ضخامت پوسته کاهش یابد [۲۲،۲۳].

در شکل ۹ اثر پارامترهای فرآیندی بر ضخامت پوسته فوم‌نشده نشان داده شده است. میانگین ضخامت پوسته فوم نشده در جدول ۴ درج گردیده است. بیشترین ضخامت پوسته در قطعاتی مشاهده می‌شود که دریچه بسته و در ضخامت ۹ mm تولید گردیده است و کمترین ضخامت پوسته فوم‌نشده (با توجه به ضخامت قطعه بر پوسته فوم‌نشده) در قطعاتی ایجاد شده است که با دریچه ۷ mm و ضخامت ۱۵ mm تولید شده است، زیرا با افزایش ضخامت قطعه زمان خنک‌کاری قطعه طولانی می‌گردد. در طول این مدت به دلیل دمای بالای مواد مذاب هسته‌های جوانه‌زای بیشتری تشکیل شده و حباب‌ها رشد نموده و به سطح قطعه نزدیک‌تر می‌شود و پوسته اصلی را تشکیل می‌دهد [۲۴،۲۵]. قابل توجه است که کمترین ضخامت پوسته در اندازه پهنای دریچه بهینه ۷ mm رخ می‌دهد که نشان‌دهنده افزایش انبساط می‌باشد. به عبارت دیگر، این تحقیق نشان می‌دهد که وجود دریچه ثانویه نه تنها به طور قابل توجهی بر کیفیت فوم تولیدی اثر داشته، بلکه اندازه آن نیز بایستی بهینه گردد.

۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، اثر طراحی قالب بر انبساط فوم‌های تزریقی مورد مطالعه قرار گرفته است. طرح پیشنهادی شامل ایجاد حفره اضافی و تعبیه دریچه بین حفره اصلی و اضافی می‌باشد. پارامترهای متغیر ضخامت قطعه و پهنای دریچه ثانویه در نظر گرفته شده است. چگالی نسبی ضخامت پوسته فوم‌نشده، چگالی و اندازه سلول‌ها مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج حاصل به شرح زیر به دست آمده است.

۱- وجود دریچه ثانویه بر انبساط و کاهش چگالی نسبی، نقش بسزایی دارد.



شکل ۹ اثر پهنای دریچه ثانویه بر پوسته فوم‌نشده در ضخامت‌های مختلف قطعه

پهنای دریچه ثانویه اثر قابل توجهی بر چگالی سلول در قطعات تولید شده دارد. همان‌طوری که نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد، بیشترین چگالی سلول در قطعاتی مشاهده می‌شود که با دریچه ثانویه ۷ mm تولید شده است. پس می‌توان چنین نتیجه گرفت که برای ایجاد فشار معکوس، که بتواند از فرار گازهای بیشتر از مواد مذاب جلوگیری نماید و از طرفی افت فشار مناسب را ایجاد نماید تا جوانه‌ها رشد نمایند، پهنای دریچه بهینه وجود دارد. برای قالب مورد نظر دریچه ثانویه ۷ mm دریچه بهینه است. بدیهی است که این اندازه وابسته به پارامترهایی مانند ابعاد قطعه مورد مطالعه دارد که نیاز به بررسی بیشتر خواهد داشت.

۶-۳- ضخامت پوسته فوم‌نشده

پوسته فوم‌نشده با میانگین‌گیری از ضخامت پوسته در دو سمت هسته اندازه‌گیری می‌شود. دلیل ایجاد پوسته فوم‌نشده می‌تواند عدم وجود شرایط هسته‌زایی در پوسته باشد، زیرا مواد مذاب در تماس با دیواره سرد قالب سریعاً

- [13] C. B. Park, A. H. Behraves, R. D. Venter, A Strategy for the suppression of cell coalescence in the extrusion of microcellular high-impact polystyrene foams, *ACS Symposium Series*, Vol. 669, pp. 115-129, 1997.
- [14] A. H. Behraves, , C. B. Park, M. Pan, R. D. Venter, Effective suppression of cell coalescence during shaping in the extrusion of microcellular hips foams", american chemical society, polymer preprints, *J. Division of Polymer Chemistry*, Vol. 37, No. 2, pp. 767-768, 1996.
- [15] S. C. Chen, P. S. Hsu, Y. W. Lin, Establishment of gas counter pressure technology and its application to improve the surface quality of microcellular injection molded parts, *J. International Polymer Processing*, Vol. 26, No. 3, pp. 275-282, 2011.
- [16] C. B. Park, P. C. Lee, J. Wang, V. Padareva, strategies for achieving microcellular ldpe foams in extrusio, *J. Cellular Polymer*, Vol. 25, No. 1, pp. 1-18, 2006.
- [17] J. F. Blanchet, D. Rodrigue, The effect of skin thickness on the mechanical properties of structural foams, *J. Cellular Polymers*, Vol. 23, pp. 193-210, 2004.
- [18] M. Mahmoodi, A. H. Behraves, S. A. M. Rezavand, M. Golzar Theoretical and visual study of bubble dynamics in foam injection molding, *J. Polymer Engineering and Science*, Vol. 50, No. 3, pp. 561-569, 2010.
- [19] M. Mahmoodi, A. H. Behraves, S. A. M. Rezavand, A. Pashaei, Visualization of bubble dynamics in foam injection molding, *J. Applied Polymer Science*, Vol. 116, No. 6, pp. 3346-3355, 2010.
- [20] J. J. Lee, S. W. Cha, Influence of mould temperature on the thickness of a skin layer and impact strength in the microcellular injection moulding process, *Cell. Polym.*, Vol. 24, No. 5, pp. 279-297, 2005.
- [21] S. C. Chen, J. P. Yang, Y. W. Lin, P. S. Hsu, S. S. Hwang, Study on pressure control device to improve foaming uniformity for the injection molding microcellular foaming process, *Proceedings of SPE ANTEC*, pp. 699-703, 2007.
- [22] L. Turng, H. Kharbas, Effect of process conditions on the weld-line strength and microstructure of microcellular injection molded parts, *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 43, pp. 157-160, 2003.
- [23] J. Lee, L. S. Turng, J. Peng, E. Dougherty, P. Gorton, The effect of polymer additives on surface quality of microcellular injection molded parts, *International Polymer Processing*, Vol. 4, pp. 429-436, 2011.
- [24] S. Hakan Yetkina, H. Unala, A. Mimaroglu, 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.
- [25] M. Yuan, L. S. Turng, D. F. Caulfield, C. Hunt, R. Spindler, Study of injection molded microcellular polyamide-6 nano composites, *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 44, No. 4, pp. 673-686, 2006.
- وجود دیواره دریاچه ثانویه مانع فرار گاز بیشتر از پلیمر می‌گردد، زیرا گازهای متواری، پس از برخورد با دیواره، دوباره به سمت جلو مواد مذاب حرکت نموده و فشار معکوس اعمال می‌نماید. در نتیجه باعث کاهش قطر سلول و توزیع مناسب سلول در قطعات تولید شده می‌شود.
- ۲- بیشترین انبساط و چگالی سلول‌ها در اندازه پهنای دریاچه ثانویه بهینه رخ می‌دهد. به طوری که افزایش و یا کاهش اندازه پهنای سبب کاهش انبساط و چگالی سلول‌ها می‌گردد.
- ۳- با افزایش ضخامت قطعه، میزان انبساط به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. ایجاد فضای بیشتر، به خصوص از جهت جانبی، عامل اصلی انبساط بیشتر می‌باشد.
- ۴- نتایج آزمایش‌ها فرضیه ایجاد فشار معکوس کنترل شده توسط دیواره مواد اضافه و فراهم کردن فضای بیشتر برای انبساط با استفاده از حفره مواد اضافه (فرای فضای حفره اصلی) را به اثبات می‌رساند که مشابه فرآیند فوم قالب‌باز^۱ است.

۸- مراجع

- [1] D. Rodrigue, S. Leduc, The influence of injection molding conditions and polymer composition on skin thickness and flexural properties of HDPE Structural Foams, *Proceedings of the 19th Annual Meeting of the Polymer Processing Society: PPS-19*, Melbourne, Australia, pp. 41-46, 2003.
- [2] J. F. Blanchet, D. Rodrigue, The effect of skin thickness on the mechanical properties of structural foams, *Cellular Polymers*, Vol. 23, No. 4, pp. 193-210, 2004.
- [3] M. Shimbo, K. Nishida, T. Heraku, K. Iijima, T. Sekino, T. Terayama, Foam processing technology of microcellular plastics by injection mold machine, *First Int. Conf.*, Canada, Toronto University, pp. 132-137, May 1999.
- [4] O. Phannschmidt, W. Michaeli, Foam injection molding of thermoplastics loaded with carbon dioxide prior to processing, *SPE ANTEC.*, pp. 2100- 2115, 1999.
- [5] N. Muller G. W. Ehrenstein, Evaluation and modeling of injection-molded rigid polypropylene integral foam, *Cell. Plast.*, Vol. 40, No. 1, pp. 45- 51, 2004.
- [6] A. H. Behaves, M. Rajapour, Experimental study on filling stage of microcellular injection molding process, *J. Cellular Polymers.*, Vol. 25, pp. 85-97, 2006.
- [7] S. A. M. Rezavand, A. H. Behraves, M. Mahmoodi, P. Shahi, Experimental study on microstructural, surface hardness and flexural strength of injection molded microcellular foamed parts, *J. Cellular Polymers.*, Vol. 28, pp. 405-428, 2009.
- [8] S. A. M. Rezavand, A. H. Behraves, M. Mahmoodi, An experimental study of the effect of injection pressure and mold temperature on the relative density of the microcellular injection molded parts, *19th Annual Manufacturing Conference of Iran*, Birjand, Birjand University, March 1387. (In Persian)
- [9] S. A. M. Rezavand, A. H. Behraves, M. Mahmoodi, Experimental study of the effect of manufacturing parameters on the distribution of surface hardness in injection molding process in microcellular thermoplastic foam, *17th Annual Conference (International) Mechanical Engineering ISME 2009*, Iran, Tehran, Tehran University, May 1388. (In Persian)
- [10] A. Ahmadzai, A. H. Behraves, An experimental investigation on water penetration in the process of water assisted injection molding of polypropylene, *J. POLIMERY*, Vol. 54, No. 7-8, pp. 564-572, 2009.
- [11] A. Ahmadzai, A. H. Behraves, Effect of processing parameters on water penetration in water assisted injection molding of ABS, *J. POLIMERY*, Vol. 56, No. 3, pp. 232-239, 2011.
- [12] N. Müller, G. W. Ehrenstein, Lightweight performance of load bearing plastic components with an integral foam structure, *SPE ANTEC.*, pp. 1830-1834, 2003.

1- Mold opening foam molding