



Effect of Parison Thickness and Blowing Pressure on Distribution of Wall Thickness in Extrusion Blow Molding

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Babaei Kolaee M.¹ MSc,
Zolfaghari A.*¹ PhD,
Baseri H.¹ PhD

How to cite this article

Babaei Kolaee M, Zolfaghari A, Baseri H. Effect of Parison Thickness and Blowing Pressure on Distribution of Wall Thickness in Extrusion Blow Molding. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(8):2001-2008.

ABSTRACT

Blow molding is one of the most widely used processes for producing hollow plastic parts. In this process, the wall thickness uniformity of blow molded part is a prime concern. Processing parameters such as blowing pressure, melting temperature, and parison thickness affect the uniformity. In this paper, extrusion blow molding process for Peugeot 405 and Peugeot Pars water tanks has been studied by simulations and experiments. The effects of parison thickness in three levels and blowing pressure in two levels were investigated on the wall thickness of blow molded part. Parison thickness was varied by manipulating air gap between mandrel and die. The results indicated that the increase of blowing pressure had no effect on the part thickness. However, the parison thickness significantly influenced the thickness of molded part. Parison thickness was optimized by considering the weight and required strength of the part, so that, the material consumed was decreased. Also, Polyflow software was used to simulate the blow molding process. For this purpose, the initial parison geometry was experimentally determined by a measurement set-up, then the inflation process was simulated on this real parison. A good agreement was obtained between thicknesses of part in the experiments and simulations.

Keywords Polyethylene Water Tank; Thickness; Simulation; Polyflow

¹Manufacturing Department, Faculty of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

*Correspondence

Address: Faculty of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Shariati Avenue, Babol, Iran. Postal Code: 4714871167
Phone: +98 (11) 35501344
Fax: -
zolfaghari@nit.ac.ir

Article History

Received: November 22, 2019
Accepted: May 4, 2020
ePublished: August 15, 2020

CITATION LINKS

[1] Blow molding handbook [2] Polyflow software use to optimize the parison thickness in blowing extrusion [3] On-line measurement of parison geometry during blow molding: Parison swelling for three high-density polyethylenes with different molecular weights and molecular weight distributions [4] Parison formation and inflation behavior of polyamide-6 during extrusion blow molding [5] Fast online acquisition and analysis for parison swell and sag in blow molding [6] Optical measurement and numerical simulation of parison formation in blow moulding [7] Optimization of extrusion blow molding processes using soft computing and Taguchi's method [8] Simulation of blow molding using ansys polyflow [9] Comparison of bottle wall thickness distribution obtain in real manufacturing conditions and in ansys polyflow simulation environment [10] Computer simulation of the load test of an extrusion blow moulded product [11] Suitable die shaping for a rectangular shape bottle by application of FEM and AI technique [12] On viscosity — melt flow index relationship

اثر ضخامت پاريسون و فشار دمشی روی توزیع ضخامت در فرآیند قالب‌گیری دمشی اکستروژن

مهدی بابایی کلائی MSc

گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

عباس ذوالفقاری PhD

گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

حمید باصری PhD

گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

چکیده

قالب‌گیری دمشی یکی از فرآیندهای پرکاربرد برای تولید قطعات پلاستیکی توخالی است. در این فرآیند، یکنواختی ضخامت دیواره قطعه قالب‌گیری دمشی‌شده یک نگرانی اساسی است. پارامترهای فرآیند مانند فشار دمشی، دمای مذاب و ضخامت پاريسون بر یکنواختی تأثیر می‌گذارند. در این مقاله، فرآیند قالب‌گیری دمشی اکستروژن برای مخزن آب پژو ۴۰۵ و پارس با شبیه‌سازی و آزمایش مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر ضخامت دیواره پاريسون در سه سطح و فشار دمشی در دو سطح بر ضخامت نهایی دیواره قطعه قالب‌گیری دمشی‌شده، بررسی شد. ضخامت پاريسون با استفاده از تغییر گپ هوایی بین ماندل و دای، تغییر داده شد. نتایج نشان داد که فشار باد در هنگام دمش قطعه هیچ گونه تأثیری بر ضخامت دیواره قطعه ندارد. با این حال، ضخامت دیواره پاريسون به‌طور قابل توجهی بر ضخامت دیواره قطعه قالب‌گیری‌شده تأثیر می‌گذارد. ضخامت پاريسون با در نظر گرفتن وزن و استحکام مورد نیاز قطعه بهینه شد، به‌طوری که مقدار ماده مصرفی کاهش یافت. همچنین از نرم‌افزار پلی‌فلو برای شبیه‌سازی فرآیند قالب‌گیری دمشی استفاده شد. برای شبیه‌سازی، هندسه پاريسون اولیه به‌صورت تجربی توسط تجهیزات اندازه‌گیری تعیین شد. سپس فرآیند دمش در این پاريسون واقعی شبیه‌سازی شد. تطابق خوبی بین ضخامت قطعه در آزمایش‌ها و شبیه‌سازی‌ها به‌دست آمد.

کلیدواژه‌ها: مخزن آب پلی‌اتیلن، ضخامت، شبیه‌سازی، پلی‌فلو

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۱۵

*نویسنده مسئول: zolfaghari@nit.ac.ir

مقدمه

قطعات پلاستیکی توخالی مانند ظروف نوشیدنی، اسباب‌بازی، قطعات پزشکی، خودرویی و غیره با فرآیند قالب‌گیری دمشی تولید می‌شوند. مزایای اقتصادی این فرآیند نقش اساسی در توسعه سریع آن در طی دهه‌های گذشته داشته است. دو روش اصلی قالب‌گیری دمشی شامل قالب‌گیری دمشی اکستروژن (Extrusion Blow Molding) و قالب‌گیری دمشی تزریقی (Injection Blow Molding) است. قالب‌گیری دمشی اکستروژن از سه مرحله تشکیل پاريسون، بادکردن پاريسون و خنک‌کاری قطعه تشکیل شده است^[1]. کل بطری‌های تولیدشده در

صنایع نوشیدنی در سال ۲۰۰۰، از ۱۰ میلیارد قطعه فراتر رفته است و اکنون نیز بسیار بیشتر است^[2]. در سال ۲۰۱۵، تقاضای پلاستیک در اروپا ۴۹ میلیون تن بوده که ۴۰٪ استفاده آن در صنایع بسته‌بندی و ۹٪ آن در صنعت خودرو اتفاق افتاده است. این گونه محصولات توخالی باید از وزن کم ولی ضخامت دیواره کافی برخوردار باشند. افزایش وزن قطعات موجب بالارفتن ضریب ایمنی و در عین حال باعث افزایش قیمت می‌شود. بنابراین، تأثیر عواملی مانند ضخامت پاريسون، پارامترهای فرآیندی مانند دما، فشار دمشی و همچنین طراحی قالب باید به‌خوبی درک شود تا قطعات با کیفیت بالا تولید شوند. با این حال، پیدا کردن شرایط مطلوب در فرآیند قالب‌گیری دمشی با استفاده از آزمایش بسیار پرهزینه و زمان‌بر است. اخیراً، روش‌های عددی و استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی برای از بین بردن سعی و خطا پیش از طراحی تجهیزات تولید و یا طراحی محصول نهایی به‌کار گرفته شده است.

در تحقیقی استفاده از روش پردازش تصویر جهت اندازه‌گیری قطر و ضخامت پاريسون در حین تولید ارایه شده است. سه گرید پلی‌اتیلن سنگین مورد آزمایش قرار گرفت تا ارتباط بین رئولوژی پلیمرها و شکل هندسی پاريسون به‌دست آید^[3]. واگنر و کالیون^[4] تشکیل پاريسون و فرآیند دمش باد را به‌کمک یک قالب شفاف برای سه گرید از پلی‌آمید شامل پلیمر خالص، تقویت‌شده با فیبر و پلی‌اولفین (Polyolefin) اصلاح‌شده مقایسه کردند. آنها دریافتند که پلی‌آمید اصلاح‌شده با پلی‌اولفین در برابر گلوبی‌شدن و شکم‌دگی ناشی از وزن پاريسون بهتر از دو گرید دیگر مقاومت می‌کند. هو/نگ و لی^[5]، برای پیش‌بینی ضخامت و قطر پاريسون در هر نقطه از محور پاريسون از شبکه عصبی استفاده کردند. آنها برای آموزش و آزمایش شبکه از داده‌های تجربی استفاده نمودند که تطابق خوبی نیز بین نتایج آزمایش‌ها و شبیه‌سازی‌ها حاصل شد. بنابراین می‌توان این روش را برای سایر شرایط به‌کار برد. در تحقیقی دیگر برای تعیین ضخامت و قطر پاريسون توسط یک دوربین دیجیتال، روش نوری و بدون تماس ارایه شد^[6]. یو و همکاران، استراتژی شبکه عصبی-تاگوچی فازی با الگوریتم ژنتیک، را ارایه کردند. این روش مقرون‌به‌صرفه بوده و به‌منظور برنامه‌ریزی برای گپ بهینه برای دستیابی به یک قطعه با ضخامت یکنواخت به‌کار می‌رود^[7]. گوپتا و همکاران^[8]، جهت دستیابی به توزیع ضخامت قطعه نهایی، فرآیند تولید یک بطری را با استفاده از نرم‌افزار پلی‌فلو، که یک نرم‌افزار برای مدل‌سازی فرآیندهای پلیمری است، شبیه‌سازی کردند. جریان به‌صورت هم‌دما، سیال نیوتنی، گذرا با هندسه متقارن محوری برای پاريسون تعریف شد که در نهایت نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی تطابق خوبی داشتند. پپلینسکی و موزر^[9] نیز ضخامت‌های به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی را با هم مقایسه کردند که نتایج حاکی از شباهت آنها به همدیگر بود؛ اما در قسمت پایین بطری تفاوت زیادی به‌دست آمد. آنها همچنین

سانتی‌گراد است. همان‌طور که بیان شد، فشار دمش باد و ضخامت پاريسون به‌عنوان متغیر در نظر گرفته شده است. با توجه به آزمایش‌های اولیه، دو سطح فشار ۲ و ۴ بار مورد استفاده قرار گرفت. ضخامت پاريسون تولیدشده از طریق حرکت طولی ماندل در قالب پاريسون تغییر می‌کند. شکل ۲ ماندل و قالب پاريسون استفاده‌شده در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. با پایین‌رفتن ماندل، گپ بین قالب و ماندل افزایش می‌یابد و بنابراین ضخامت پاريسون نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۲ (الف) دای واگرا و ماندل، (ب) دای و ماندل مونتاژشده، (ج) شماتیکی از تغییر دادن گپ دای

در ابتدا، آزمایش‌های اولیه‌ای انجام شد تا محدوده مناسب ضخامت پاريسون مشخص شود. در ضخامت‌های خیلی کم و زیاد پاريسون به‌ترتیب پارگی و افزایش وزن قطعه حاصل می‌شد. در هنگام آزمایش‌ها سه سطح گپ ۲/۱، ۲/۴ و ۲/۸ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفت. تعادل جریان مذاب پلاستیک هنگام خارج شدن از گپ حلقوی بین قالب و ماندل می‌بایست انجام گیرد. هر گونه انحراف از این تعادل جریان، باعث می‌شود که در هنگام خروج مذاب از دهانه انتهایی قالب پاريسون، پاريسون به یک سمت منحرف شده و در نتیجه دچار اعوجاج شود. بنابراین، ضخامت گپ باید در کل فضای حلقوی یکسان باشد. همچنین، ضخامت گپ نابرابر در داخل قالب منجر به عدم ضخامت یکنواخت پاريسون شده و اختلاف ضخامت قطعه تولیدشده را بیشتر می‌کند. برای این منظور، از فاصله‌اندازهای فلزی با ضخامت‌های مختلف برای تنظیم گپ قالب استفاده شده است. تمام مناطق دمای اکسترودر و قالب در دمای ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم شدند. پس از تثبیت دما، پاريسون در گپ از پیش تعیین‌شده اکسترودر می‌شود. در همین حال، یک هوای کم‌فشار، به‌نام پیش-دمش (Pre-Blow)، به داخل پاريسون اعمال می‌شود. این فشار فقط در هنگام اکستروژن پاريسون بوده و برای جلوگیری از فروپاشی پاريسون و به‌هم چسبیدن آن در قسمت انتهایی و واسط آن، اعمال می‌شود. پاريسون با توجه به ارتفاع مخزن آب، تا طول حدود ۳۳۰ میلی‌متر اکسترودر می‌شود که از انتهای طول قالب نیز عبور می‌کند. سپس دو نیمه قالب بسته شده و فشارهای دمشی اصلی ۲ و ۴ بار اعمال شد. قطعه برای مدت‌زمان کافی سرد شده و سپس از قالب خارج می‌شود. سه نمونه در هر یک از حالات آزمایش تولید شدند. دستگاه قالب‌گیری دمشی استفاده‌شده در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به هندسه قطعه، نحوه اعمال فشار باد به‌صورت جانبی خواهد بود که در شکل آمده است.

ضخامت و قطر پاريسون را بهینه کردند تا توزیع یکنواخت‌تری از ضخامت دیواره برای بطری حاصل شود. مودلاوسکی و همکاران^[10]، از نرم‌افزار پلی‌فلو برای شبیه‌سازی قالب‌گیری اکستروژن دمشی قوطی‌های پلاستیکی استفاده کردند. ضخامت دیواره قطعه قالب‌گیری‌شده، از نرم‌افزار استخراج و وارد نرم‌افزار انسیس شد. نیرو بر قسمت فوقانی قطعه اعمال شد و بیشترین تنش در اطراف ورودی و دیواره‌های جانبی قطعه به‌وجود آمد. زیرا این مناطق در نتایج شبیه‌سازی استخراج‌شده توسط پلی‌فلو ضخامت کمتری داشتند. همچنین هندسه قالب برای دستیابی به ضخامت یکنواخت بطری مستطیل‌شکل با استفاده از روش المان محدود بهینه شد. نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی مقایسه و صحت‌سنجی شدند^[11].

با مرور مقالات فوق مشخص شد که اثر فشار دمشی بر روی ضخامت قطعه بررسی نشده است. بنابراین در مقاله حاضر، اثر فشار دمشی بر ضخامت دیواره قطعه قالب‌گیری‌شده به‌صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر فشار، ضخامت پاريسون نیز بررسی شده است. هدف این است که شرایط بهینه‌ای تعیین شود تا هم، وزن قطعه کاهش یافته و هم شرط ضخامت دیواره حداقل رعایت شود.

مطالعه موردی

مخزن آب شیشه‌شوی پژو ۴۰۵ و پارس به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. شکل ۱ این مخزن را نشان می‌دهد. این مخزن با قالب‌گیری بادی اکستروژن در صنعت پلاستیک تولید می‌شود. هندسه پیچیده و نامتقارن مخزن به‌ویژه در نقاطی که در شکل مشخص شده است، باعث عدم یکنواختی ضخامت دیواره قطعه می‌شود. با توجه به اینکه مخزن در تیراژ بالایی تولید می‌شود، مساله اصلی در کاهش مواد مصرفی است. مطابق با درخواست کارفرما، حداقل ضخامت لازم مخزن باید ۰/۷۵ میلی‌متر باشد.



شکل ۱ مجموعه مخزن شیشه‌شوی پژو ۴۰۵

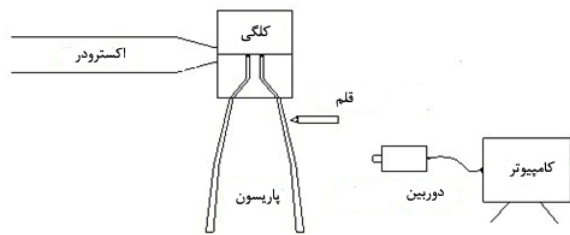
آزمایش‌ها

برای قالب‌گیری دمشی از پلی‌اتیلن سنگین گرید HB۰۰۳۵/B۳ محصول پتروشیمی بندر امام ایران، استفاده شد. شاخص جریان مذاب در دمای ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد و بار ۱/۲ کیلوگرم بر طبق استاندارد ASTM/D۱۲۳۸، ۲/۰ گرم بر ۱۰ دقیقه اندازه‌گیری شد. چگالی و نقطه ذوب به‌ترتیب براساس ASTM/D۱۵۰۵ و ASTM/D۲۱۱۷ به‌ترتیب ۹۵۹ کیلوگرم بر متر مکعب و ۱۳۰ درجه

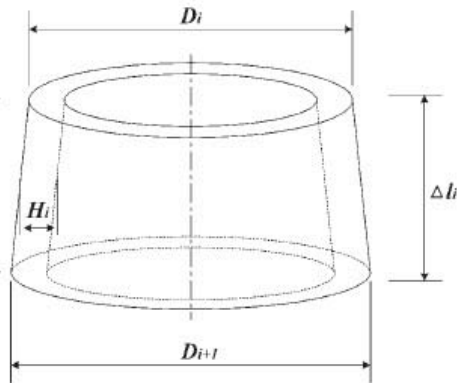
دوربین با وضوح بالا برای ثبت فیلم و تصویر از فرآیند اکستروژن پاريسون استفاده شد. نرم افزار پردازش تصویر، [Image]، برای یافتن لبه‌های پاريسون از تصاویر عکس برداری شده، به کار گرفته شد. برای محاسبه ضخامت هر بخش، از معادله ۱ استفاده شد [5]:

$$H_i = \frac{(D_{i+1} + D_i)}{4} - \sqrt{\left(\frac{D_{i+1} + D_i}{4}\right)^2 - \frac{Q \Delta t}{\rho \Delta l_i \pi}} \quad (1)$$

در این معادله D_i و D_{i+1} قطرهای بیرونی به ترتیب لبه‌های بالایی و پایینی هر مقطع هستند که در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۵) شماتیکی از تجهیزات برای اندازه‌گیری هندسه پاريسون



شکل ۶) شکل مخروط ناقص با ضخامت ثابت برای هر بخش پاريسون

این قطرها به وسیله پردازش تصویر قابل اندازه‌گیری است. ρ چگالی پلاستیک و مقدار آن ۹۵۹ کیلوگرم بر متر مکعب است. Δt مدت زمان سپری شده بین نشانه‌گذاری دو علامت متوالی است. این مقدار ثابت بوده و با توجه به سرعت چرخشی موتور برابر ۴۶/۰ ثانیه اندازه‌گیری شد. Δl_i طول هر مقطع بوده و به وسیله پردازش تصویر به دست می‌آید. Q نرخ جریان جرمی اکستروژن است. با توجه به اینکه زمان اکستروژن پاريسون و وزن آن به ترتیب ۴۲/۶ و ۶۲۹/۰ کیلوگرم است، نرخ جریان جرمی برابر با ۶۲۹/۰ تقسیم بر ۴۲/۶ یعنی Q برابر با ۰/۹۸ کیلوگرم بر ثانیه است. با جایگزینی پارامترهای فوق در معادله ۱، ضخامت H_i هر مقطع قابل محاسبه است. با محاسبه طول، قطر بیرونی و ضخامت هر مقطع، هندسه پاريسون به طور کامل مشخص می‌شود. از دستگاه اندازه‌گیری شاخص مذاب تولید شرکت سنتام ایران، برای اندازه‌گیری گران روی استفاده شد. روش کار برای پیدا کردن گران روی در مراجع مختلف به عنوان مثال در مطالعه دوتا [12] توضیح داده شده است. معادله ۲ برای محاسبه گران روی استفاده شده است:

قالب استفاده شده در شکل ۴ نشان داده شده است. به جهت نامتقارن بودن قطعه، قالب طراحی و ساخته شده توسط شرکت بهین کیفیت شمال که در اختیار محققین این مقاله قرار گرفته است نیز به صورت نامتقارن است. دو نیمه قالب در حالت‌های مختلف، در شکل ۴ نشان داده شده است. قالب از جنس فولاد $MO\phi 40$ است.



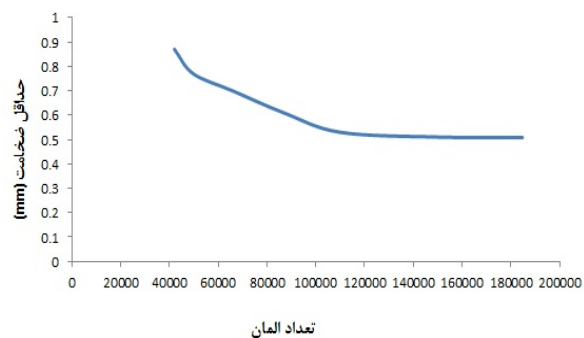
شکل ۳) ۱- مواد کش، ۲- سیلندر، ۳- المنت‌های حرارتی، ۴- کلگی دستگاه، ۵- دو نیمه قالب، ۶- پین باد، ۷- رگلاتور تنظیم فشار باد، ۸- مدار فرمان، ۹- چارچوب ماشین



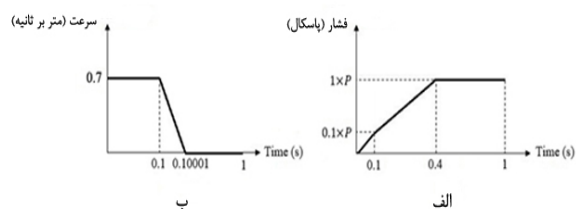
شکل ۴) دو نیمه قالب و مجموعه مونتاژ شده قالب

همان طور که بیان شد، از شبیه‌سازی عددی برای مدل‌سازی فرآیند قالب‌گیری دمشی استفاده شده است. لازم به ذکر است که شکل پاريسون مانند یک لوله مستقیم نیست. زیرا در حین تشکیل پاريسون، پدیده‌های شکم‌دادگی و تورم مذاب پلاستیک بر شکل هندسی پاريسون تاثیر می‌گذارد [5]. بنابراین، لازم است هندسه دقیق پاريسون هنگامی که از قالب خارج می‌شود را به طریقی استخراج کرده و به عنوان پاريسون واقعی در نرم افزار پلی فلو وارد کرد. برای این منظور، تجهیزات اندازه‌گیری برای مشاهده و به دست آوردن شکل پاريسون طراحی و ساخته شد که در شکل ۵ نشان داده شده است.

یک قلم آغشته به جوهر، توسط یک موتور الکتریکی کوچک چرخانده شده است. در هر دوره زمانی Δt ، پاريسون به وسیله قلم با یک خط افقی علامت‌گذاری می‌شود. بنابراین، پاريسون در طول آن به چندین بخش با ابعاد مختلف تقسیم می‌شود. از یک



نمودار ۱) رابطه بین حداقل ضخامت دیواره و تعداد المان

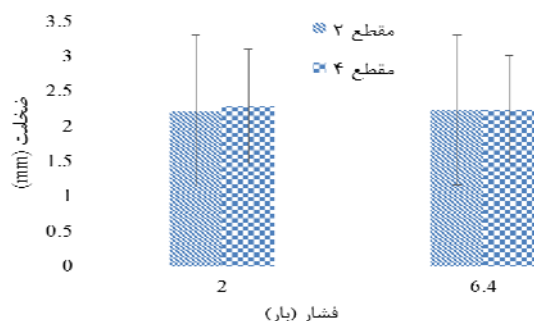


نمودار ۲) تغییرات: الف) فشار دمشی باد، ب) سرعت حرکت قالب بر حسب زمان در شبیه‌سازی‌ها

نتایج و بحث

اثر فشار دمشی روی ضخامت

میانگین و انحراف معیار ضخامت دیواره قطعه تولید شده در مقاطع ۲ و ۴ و در فشارهای ۲ و ۴ بار، در نمودار ۳ نشان داده شده است. مقادیر ضخامت دیواره میانگین ۶ نقطه اندازه‌گیری شده از سطح مقطع برش است. شماره مقاطع در شکل ۷ نشان داده شده است. این اطلاعات می‌تواند برای سطوح دیگر نیز بسط داده شود. نتایج به‌طور واضح نشان می‌دهد که فشار دمشی اثر قابل توجهی روی توزیع ضخامت قطعه نهایی ندارد. با این حال، فشار بالاتر ترجیح داده می‌شود. زیرا فشار دمشی بالاتر پاريسون را با نیروی بیشتری به سطح داخلی قالب می‌چسباند و باعث افزایش انتقال حرارت بین قطعه و قالب می‌شود. در نتیجه زمان خنک‌کاری قطعه کاهش یافته که موجب بهبود بازده فرآیند به‌ویژه در قطعات ضخیم خواهد شد.



نمودار ۳) میانگین و انحراف معیار ضخامت برای فشارهای ۲ و ۴ بار در مقاطع شماره ۲ و ۴

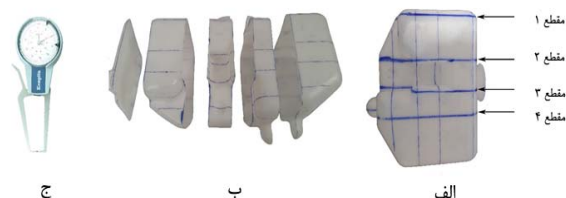
اثر گپ قالب پاريسون روی ضخامت دیواره مخزن

کمترین ضخامت و وزن قطعه تولید شده در هر سطح از گپ در جدول ۱ آمده است. هنگامی که گپ افزایش می‌یابد، کمترین

$$\eta = \frac{\pi \cdot \Delta P \cdot R^4}{8L \cdot \dot{V}} \quad (2)$$

در رابطه فوق ΔP افت فشار بین ورودی و خروجی دای موپین با شعاع ۱ و طول ۸ میلی‌متر، $\dot{V}$ نرخ جریان حجمی و از رابطه $V/t = M/(\rho \cdot t)$ به‌دست می‌آید. M و V به‌ترتیب حجم و جرم مذاب خارج شده از دای موپین در مدت آزمایش t است. ΔP از رابطه $\Delta P = F/(\frac{\pi}{4} D^2)$ محاسبه می‌شود که در آن F وزن بر روی پیستون و D قطر پیستون که برابر با ۹ میلی‌متر است.

قطعه قالب‌گیری دمشی شده به‌وسیله یک اهر در موقعیت‌های مورد نظر همان‌طور که در شکل ۷-الف نشان داده شده است، به بخش‌های کوچک‌تر تقسیم می‌شود تا ضخامت دیواره در قسمت‌های مختلف اندازه‌گیری شود. شکل ۷-ب قطعه برش‌خورده در مقاطع مختلف را نشان می‌دهد. نواحی بحرانی در دورترین مناطق از مرکز هندسی قطعه قرار گرفته‌اند. این نواحی بیشتر کشیده شده و در نتیجه، نازک‌شدگی بیشتری را نشان می‌دهد که باید بررسی شوند. ضخامت دیواره به‌وسیله یک ضخامت‌سنج (شکل ۷-ج) با دقت ۰/۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد.



شکل ۷) الف) مخزن آب تولید شده در گپ ۲/۱ میلی‌متری و فشار ۴/۶ بار، ب) نمونه برش‌خورده شده، ج) ضخامت‌سنج

شبیه‌سازی‌ها

نرم‌افزار پلی‌فلو برای شبیه‌سازی فرآیند قالب‌گیری دمشی در نظر گرفته شد. دو نیمه قالب و پاريسون به‌دست‌آمده از آزمایش‌های تجربی در نرم‌افزار وارد شد. پاريسون به‌عنوان سیال نیوتونی، پوسته‌ای و فرآیند به‌صورت هم‌دما تعریف و قالب نیز به‌عنوان جسم صلب در نظر گرفته شد. شبیه‌سازی‌ها در اندازه‌های مختلف مش انجام شده تا مستقل بودن نتایج از شبکه مش را نشان دهد. همان‌طور که در نمودار ۱ مشخص است، در تعداد المان بیش از ۱۵۰۰۰۰ عدد، کمترین ضخامت دیواره تغییر نمی‌کند. بنابراین برای صرفه‌جویی در زمان از این تعداد المان در شبیه‌سازی‌ها استفاده شد.

در تحلیل‌های شبیه‌سازی، در ابتدا دو نیمه قالب با سرعت ۰/۷ متر بر ثانیه به سوی هم حرکت می‌کنند. در این حین، پیش‌باد نیز به داخل پاريسون اعمال می‌شود. حدود ۱/۰ ثانیه طول می‌کشد تا دو نیمه قالب با همدیگر تماس پیدا کنند. بعد از به‌هم رسیدن دو نیمه قالب، فشار دمش از حالت پیش‌باد به فشار اصلی ۲ و یا ۴ بار تغییر می‌یابد. مساله مورد بررسی وابسته به زمان بوده و شبیه‌سازی برای مدت زمان کل ۱ ثانیه انجام شد. به‌عبارت دیگر ۰/۹ ثانیه فشار باد اعمال می‌شود. نمودار ۲ تغییرات سرعت حرکت قالب و فشار دمشی را با زمان فرآیند نشان می‌دهد.

فرآیند قالب‌گیری دمشی پایین است، مذاب به‌صورت سیال نیوتونی در نظر گرفته شد.

شبیه‌سازی فرآیند قالب‌گیری دمشی

فرآیندهای بستن دو نیمه قالب، دمش باد در داخل پاريسون و تشکیل قطعه در فواصل زمانی مشخص، در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به کانتور رنگ کاملاً مشخص است که ضخامت دیواره در فاصله‌های دور از مرکز پاريسون کمتر است. لازم به ذکر است که با انجام شبیه‌سازی‌های اولیه مشخص شد که با افزایش زمان فرآیند به بیش از ۱ ثانیه، تغییری در ضخامت‌ها ایجاد نمی‌شود.

مقایسه ضخامت‌های دیواره در شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌ها در شکل ۹ نشان داده شده است. گپ ۲/۱ میلی‌متر و فشار دمشی ۶/۴ بار به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. ابتدا سطح داخلی قالب در شکل ۹ ترسیم شده است. سپس، کانتور ضخامت که از مطالعه شبیه‌سازی‌ها و همچنین از اندازه‌گیری‌های تجربی به‌دست آمده است برای هر مقطع ترسیم شده است. ضخامت‌های تجربی و شبیه‌سازی میانگین‌گیری شده‌اند. شماره مقاطع نشان‌داده‌شده در شکل ۹، مطابق با برش‌های ایجادشده در شکل ۷-الف است.

همان طوری که مشخص است، نتایج تجربی و شبیه‌سازی تطابق خوبی با هم دارند. بنابراین شبیه‌سازی انجام‌شده ضخامت دیواره را به‌صورت مطلوبی پیش‌بینی می‌کند. نازک‌شدگی زیاد در گوشه‌های قطعه در شکل ۹ مشخص است. نتایج مذکور برای فشارها و گپ‌های مختلف نیز قابل تعمیم است. همچنین با توجه به شکل، در مقاطع مختلف ضخامت دیواره میانگین برای نقاط یکسان متغیر بود. زیرا سطح مقطع هر بخش متفاوت است. برای قطعات پیچیده، هندسه پاريسون باید در امتداد طول و با توجه به هندسه قطعه، قابل کنترل باشد تا دیواره‌های با ضخامت یکسانی در قطعه به‌وجود آید. به‌تازگی، ماشین‌های قالب‌گیری دمشی به یک واحد برنامه‌ریزی مجهز شدند که می‌توانند گپ بین ماندل و قالب پاريسون را در هر لحظه کنترل کرده تا ضخامت‌های دیواره متفاوتی را در هر مقطع پاريسون تشکیل دهد. با این پاريسون، یکنواختی ضخامت دیواره قطعه به‌طور قابل توجهی بهبود می‌یابد.

ضخامت دیواره نیز افزایش پیدا می‌کند. کمترین ضخامت مطابق با درخواست کارفرما ۷۵/۰ میلی‌متر است که باید رعایت شود. دو نمودار کمترین ضخامت و وزن بر حسب میزان گپ رسم شدند و با انطباق از روی آنها معادلات ۳ و ۴ به‌دست آمدند:

$$T = -0.035g^2 + 0.761g - 0.940 \quad (3)$$

$$W = 7.143g^2 + 7.857g + 197 \quad (4)$$

که در آن T ، W و g به‌ترتیب کمترین ضخامت قطعه، وزن قطعه و گپ هستند. با جایگذاری حداقل ضخامت درخواستی کارفرما یعنی ۷۵/۰ میلی‌متر برای T در معادله ۳، مقدار گپ ۲/۵ میلی‌متر حاصل می‌شود. با جایگذاری این گپ، در معادله ۴ وزن قطعه ۲۶۱ گرم به‌دست می‌آید. گپ به‌دست‌آمده در این حالت، بهینه خواهد بود و با تنظیم آن در فرآیند تولید پاريسون، قطعه‌ای با کمترین وزن حاصل می‌شود.

جدول ۱) کمترین ضخامت و وزن قطعه در سه مقدار گپ

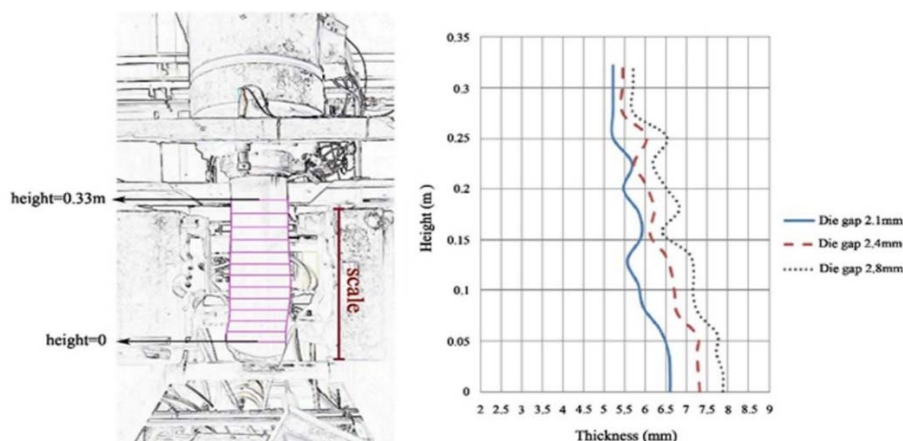
وزن قطعه (گرم)	کمترین ضخامت (میلی‌متر)	گپ (میلی‌متر)
۲۴۵	۰/۵	۲/۱
۲۵۷	۰/۶۸	۲/۴
۲۷۵	۰/۹۱	۲/۸

تعیین هندسه واقعی پاريسون

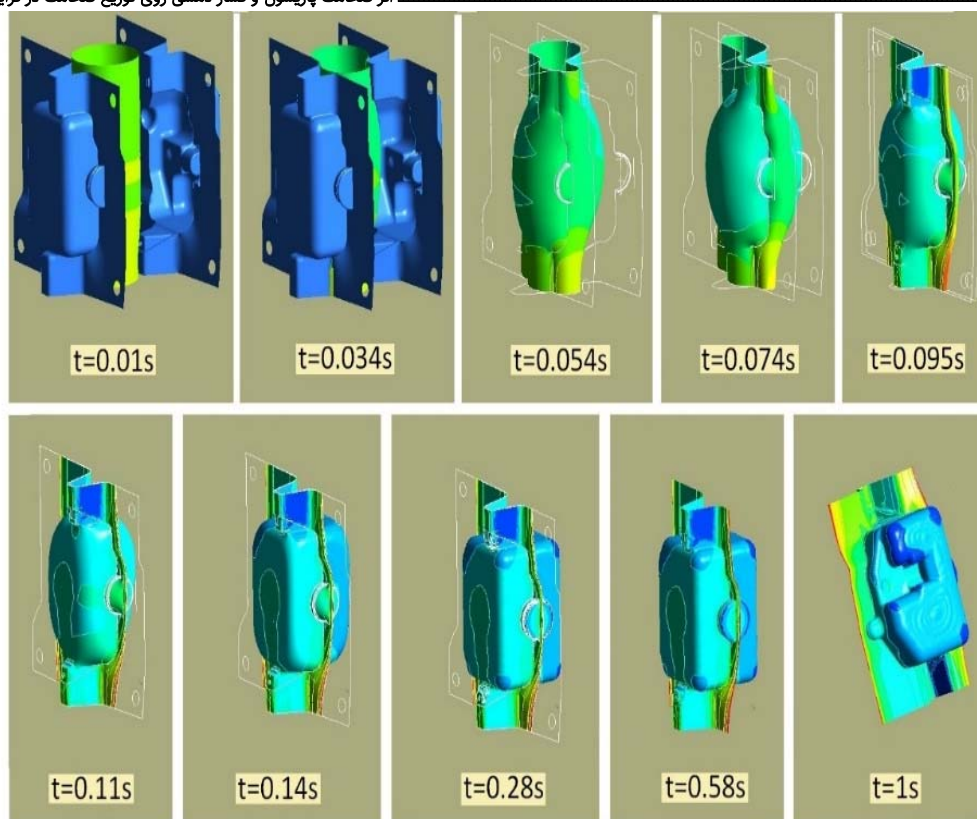
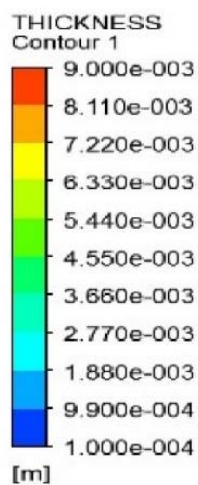
ضخامت اندازه‌گیری‌شده پاريسون در امتداد طول آن برای گپ‌های مختلف، در نمودار ۴ نشان داده شده است. با توجه به اینکه پاريسون در اثر وزن خودش از لبه‌های قالب کشیده می‌شود، در این نواحی باریک و نازک می‌شود. ولی در انتهای پاريسون ضخامت دیواره افزایش می‌یابد. با توجه به پدیده تورم در فرآیند اکستروژن مذاب ترموپلاستیک که یک سیال ویسکوالاستیک است مشاهده می‌شود که ضخامت پاريسون به‌طور کلی بیشتر از گپ دهانه قالب آن است. هندسه نهایی پاريسون با استفاده از ضخامت و قطر خارجی هر مقطع تعیین می‌شود. در نهایت، پاريسون توسط نرم‌افزار کتیا (Catia) مدل‌سازی شده و به‌عنوان پاريسون واقعی در پلی‌فلو وارد شده تا تحلیل جریان برای آن انجام گیرد.

اندازه‌گیری ویسکوزیته

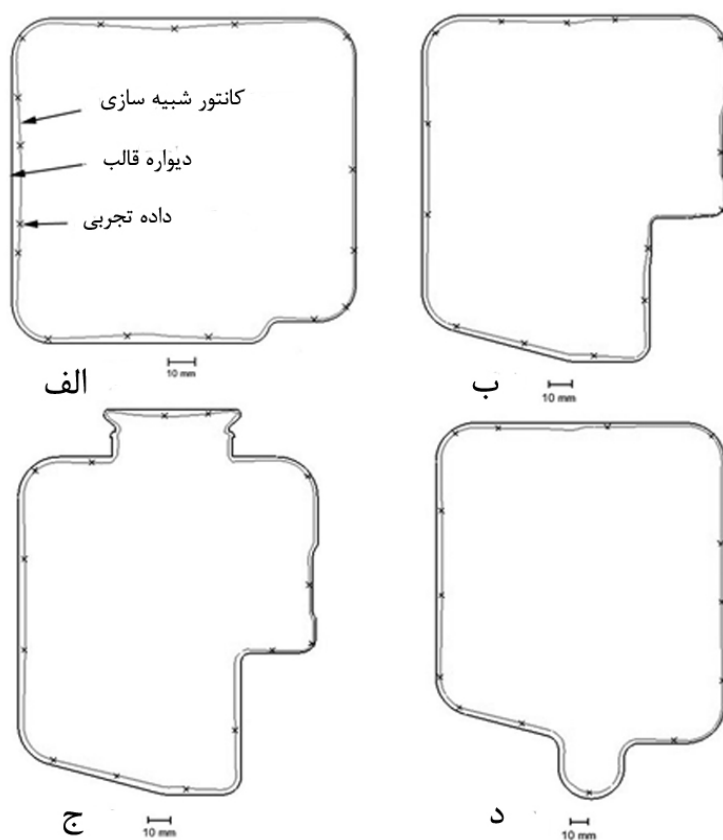
ویسکوزیته η مذاب پلاستیک در دمای ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد، ۲۶۱۰۰ پاسکال‌ثانیه اندازه‌گیری شد. از آنجایی که نرخ برشی در



نمودار ۴) تغییر ضخامت پاريسون در امتداد طول آن در سه گپ مختلف



شکل ۸) شبیه‌سازی فرآیند قالب‌گیری بادی مخزن



شکل ۹) مقایسه ضخامت بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی در گپ ۲/۸ میلی‌متری و فشار دمشی ۶/۴ بار برای مقاطع: الف) ۱، ب) ۲، ج) ۳، د) ۴

قالب گیری دمشی مخزن آب پژو ۴۰۵ و پارس با آزمایش ها و شبیه سازی ها بررسی شد. کمترین ضخامت مورد نیاز قطعه که ۷۵/۰ میلی متر است، در گپ ۲/۵ میلی متری به دست آمد که وزن قطعه متناظر با این میزان گپ برابر ۲۶۱ گرم بود. آزمایشات تجربی و شبیه سازی نشان داد که فشار دمشی، پارامتر موثری در یکنواختی و مقدار ضخامت دیواره قطعه نبود. روابط ریاضی و همچنین تجهیزاتی به کار گرفته شد تا هندسه پاريسون بعد از اینکه از قالب اکستروژد شد، اندازه گیری و تعیین شود. پاريسون واقعی در مطالعه شبیه سازی به کار گرفته شد و به عنوان اساس شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفت. گران روی سیال با استفاده از دستگاه MFI به دست آمده و سیال به صورت نیوتنی در نظر گرفته شد. مقایسه ضخامت بین نتایج تجربی و شبیه سازی انجام شد و تطابق آنها حاکی از صحت شبیه سازی بود. نتیجه کلی این است که پیش از ساخت قالب و قطعه در قالب گیری دمشی، شبیه سازی فرآیند مورد نیاز است تا سعی و خطای ناشی از طراحی قطعه و قالب به حداقل برسد. با انجام شبیه سازی می توان هزینه های اضافی مربوط به اصلاح قالب را حذف نمود و هزینه ها را به حداقل رساند.

تشکر و قدردانی: نویسندگان از حمایت مالی دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل و تخصیص گرنت به شماره BNUT/370119/97 تشکر می کنند. همچنین از کارکنان شرکت بهین کیفیت شمال واقع در بابلسر برای همکاری بی دریغ و در اختیار قراردادن مواد و تجهیزات کمال تشکر را دارند.

تأییدیه اخلاقی: مقاله حاضر با رعایت تمامی اصول اخلاقی ثبت شده است.

تعارض منافع: هیچ موردی از تعارض منافع در مقاله حاضر وجود ندارد.
سهم نویسندگان: مهدی بابایی کلایی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روشناس/پژوهشگر اصلی (۴۰٪)؛ عباس ذوالفقاری (نویسنده دوم)، روشناس/پژوهشگر کمکی (۳۰٪)؛ حمید باصری (نویسنده سوم)، روشناس/پژوهشگر کمکی (۳۰٪).

منابع مالی: هزینه های این پژوهش از گرنت شماره BNUT/370119/98

منابع

- 1- Brzeziński J. Blow molding handbook. In: Rosato DV, Rosato DV. Polymer International. Munich: Hanser Publications; 1991.
- 2- Pepliński K, Bieliński M. Polyflow software use to optimize the parison thickness in blowing extrusion. Journal of Polish CIMAC. 2009;4(3):99-103.
- 3- Eggen S, Sommerfeldt A. On-line measurement of parison geometry during blow molding: Parison swelling for three high-density polyethylenes with different molecular weights and molecular weight distributions. Polymer Engineering and Science. 1996;36(3):336-346.
- 4- Wagner AH, Kalyon DM. Parison formation and inflation behavior of polyamide-6 during extrusion blow molding. Polymer Engineering and Science. 1996;36(14):1897-1906.
- 5- Huang H-X, Li J-C. Fast online acquisition and analysis for parison swell and sag in blow molding. Journal of Applied Polymer Science. 2006;101(4):2399-2406.
- 6- Béreaux Y, Charneau JY, Balcaen J. Optical measurement and numerical simulation of parison formation in blow moulding. International Journal of Material Forming. 2010;3(1):595-598
- 7- Yu J-C, Chen X-X, Hung T-R, Thibault F. Optimization of extrusion blow molding processes using soft computing and Taguchi's method. Journal of Intelligent Manufacturing. 2004;15(5):625-634.
- 8- Gupta S, Uday V, Raghuwanshi AS, Chowkshey S, Das SN, Suresh S. Simulation of blow molding using ansys polyflow. APCBEE Procedia. 2013;5:468-473.
- 9- Pepliński K, Mozer A. Comparison of bottle wall thickness distribution obtain in real manufacturing conditions and in ansys polyflow simulation environment. Journal of Polish CIMAC. 2012;7(3):231-235.
- 10- Modławski M, Nabiałek J, Jaruga T. Computer simulation of the load test of an extrusion blow moulded product. MATEC Web of Conferences. 2018;157:01012.
- 11- Ploysook N, Rugsaj R, Suvanjumrat CT. Suitable die shaping for a rectangular shape bottle by application of FEM and AI technique. International Journal of Mechanical and Mechatronic Engineering. 2015;9(3):467-471.
- 12- Dutta A. On viscosity — melt flow index relationship. Rheologica Acta. 1984;23(5):565-569.