Archive of SID

مجله مهندسی ساخت و تولید ایران، آبان 1398، دوره 6، شماره 5، ص‌ص. 39-46

ماه‌نامه علمی پژوهشی

مهندسی ساخت و تولید ایران

www.smeir.org

کنترل اعوجاج قطعات در فرایند قالب‌گیری تزریق پلاستیک به کمک بررسی شبیه‌سازی تفاوت دمای خنک کار در سنبه و ماتریس

محمد کوچکی[1]، احسان سوری[2*]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک-ساخت و تولید، دانشگاه اراک، اراک

2- استادیار، مهندسی مکانیک-ساخت و تولید، دانشگاه اراک، اراک

* شهر، صندوق پستی 38156-879، e-soury@araku.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 14 دی 1397

پذیرش: 20 اسفند 1397

ارائه در سایت: مهر 1398

کلیدواژگان:

تزریق پلاستیک

انقباض

اعوجاج

خنک‌کاری

چکیده

اعوجاج بوجود آمده در قطعات تولید شده به روش قالب‌گیری تزریقی همواره مسئله‌ای مشکل‌ساز بوده است تا جایی که ممکن است عملکرد قطعه را تحت تأثیر قرار داده و آن را بلا استفاده سازد. عوامل مؤثر بر اعوجاج قطعات پلاستیکی تزریقی شامل سرد شدن غیریکنواخت قسمت‌های مختلف قالب، انقباض غیریکنواخت قطعه، اثرات جهت‌گیری اجزای پلیمری، و اثرات گوشه‌ها می‌باشند، که بسته به نوع قطعه اثر هر کدام نسبت به دیگر عوامل بیشتر یا کمتر خواهدبود. یکی از عوامل اصلی انقباض غیریکنواخت در قطعات، اختلاف دمای دو نیمه مختلف قالب با یکدیگر است، که می‌توان این انقباض را با نزدیک‌کردن دمای این نیمه‌ها به یکدیگر به حداقل رساند. پس از بررسی و پی‌بردن به علت و متغیر اصلی دخیل در اعوجاج به کمک نرم‌افزار می‌توان اقدام به بهبودی و حداقل کردن اعوجاج بوجود آمده در قطعه بوسیله بهینه‌سازی این متغیر نمود. یکی از متغیرهایی که با حداقل هزینه قابل تغییر است، دمای سیال خنک‌کار است، بنابراین در این مقاله تلاش شده‌است تا، امکان کنترل اعوجاج صرفا به کمک تغییر این متغیر به طور کامل برای یک قطعه نمونه کاربردی کاور موس بررسی شود. برای این کار یک طراحی آزمایش به منظور بررسی دماهای میانگین و اختلاف دماهای مختلف بین دو نیمه قالب، ترتیب داده شد. مشاهده شد که اختلاف دمای دو نیمه قالب تأثیر بیشتری نسبت به دمای میانگین این دو نیمه، بر روی میزان اعوجاج قطعات دارد. با نزدیک‌کردن دمای دو نیمه قالب به یکدیگر میزان اعوجاج قطعات کاهش یافت.

Controlling the warpage of plastic parts in injection molding process using the variation in coolant temperature of core and cavity

Mohammad Kouchaki, Ehsan Soury*

Department of Engineering, Arak University, Arak, Iran

* P.O.B. 38156-879 Arak, Iran, e-soury@araku.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received 4 January 2018

Accepted 11 March 2019

Available September 2019

Keywords:

Injection Molding

Shrinkage

Warpage

Cooling

Abstract

The warpage which has been occurred in the injected molded parts has always been a problem, as it may affect the function of the part and make it unusable. The main factors which has some effects on warpage of parts are the differential cooling, differential shrinkage, orientation effects and corner effects. According to the part each one of these effects may has the most impact on the warpage of the part. The most important reason which creates shrinkage in the parts is the difference between the temperatures of two sides of the molds (core side and cavity side), it is possible to minimize this shrinkage by decreasing this differential temperature. After a couple of analysis in Moldflow software it's been shown that the differential cooling has the most influence on warpage of the part. It is possible to control the differential cooling with the coolant temperature which inters to the cooling channels of the mold. In order to find the optimized coolant temperature for both sides of the mold to decrease warpage of the part, a DOE analysis has been prepared. It's been shown that the difference between the temperatures of the sides of the mold has much more influence than the average temperature of these sides on the warpage of the parts.

1- مقدمه

روش‌های مختلفی برای شکل‌دهی پلاستیک‌ها وجود دارد که فرایند تزریق پلاستیک از معمول‌ترین این روش‌هاست. فرایند تزریق پلاستیک متأثر از مشخصه‌های زیادی است که این مشخصه‌ها کیفیت قطعات تولیدی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. مشخصه‌هایی مانند دمای مذاب، دمای قالب، فشار تزریق، هندسه قطعه و ضخامت قطعه که می‌توانند باعث کاهش یا افزایش عیوب در قطعات تولیدی از قبیل تولید ناقص قطعات، تله‌های هوایی، خطوط جوش، انقباض[1]، اعوجاج[2]، عدم گردی در

[1] Shrinkage

[2] Warpage

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Kouchaki, E. Soury, Controlling the warpage of plastic parts in injection molding process using the variation in coolant temperature of core and cavity, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 6, No. 5, pp. 39-46, 2019 (in Persian)

www.SID.ir

Archive of SID

قطعات استوانه‌ای و غیره شوند.

اعوجاج پدیده‌ای است که در حین سردشدن مذاب پلیمر و شکل گرفتن قطعه اتفاق می‌افتد و اعوجاج و عدم‌گردی در قطعات استوانه‌ای نیز به دلیل اثرات حرارتی، عدم کنترل سیستم خنک‌کاری و وجود انقباض‌های غیرهمسان در قطعات، اتفاق می‌افتد. هنگامی که میزان انقباض ابعادی قطعات تولیدی یکنواخت نباشد، پدیده اعوجاج و عدم گردی اتفاق می‌افتد. مواد پلیمری مختلف با توجه به بلوری یا بی‌شکل بودن ساختارشان دارای میزان انقباض متفاوتی هستند و مواد پلیمری با ساختار بلوری[1] یا نیمه بلوری[2] دارای انقباض بیشتری نسبت به مواد با ساختار بی‌شکل[3] هستند. علاوه بر ساختار مواد پلیمری، مشخصه‌های بسیاری روی میزان انقباض تأثیر دارند، که این مشخصه‌ها شامل شرایط تزریق، ابعاد قطعه و برخی دیگر از عوامل می‌باشند.

در صنایع مختلفی از جمله صنایع پزشکی، صنایع اتومبیل‌سازی، صنایع لوله‌کشی و آبرسانی وغیره قطعات استوانه‌ای از جنس پلی‌پروپیلن کاربرد فراوانی دارند و پدیده‌هایی مانند انقباض و اعوجاج در اینگونه قطعات می‌توانند کیفیت ابعادی و کاربرد آنها را تحت تأثیر قرار دهند. بنابراین بررسی تأثیر متغیرهای مختلف از جمله شرایط تزریق، دمای مذاب، دمای قالب، سرعت چرخش مارپیچ دستگاه تزریق پلاستیک، فشار تزریق، فشار فاز تراکم، زمان فاز تراکم و زمان باز شدن قالب، هندسه و ابعاد قالب و قطعه بر روی این پدیده‌ها از اهمیت زیادی در صنعت تزریق پلاستیک و قالبسازی برخوردار است. در این تحقیق به بررسی اثر دمای سیال خنک‌کاری بر روی اعوجاج، که که خود متأثر از انقباض غیر یکنواخت قطعات است، پرداخته شده است.

1-1- مرور ادبیات تحقیق

چیانگ و چانگ، در سال 2006 میزان انقباض و اعوجاج در یک قطعه تزریقی جدار نازک (پوسته گوشی تلفن همراه) از جنس اکریلونیتریل بوتادین استایرن-پلی‌کربنات[4] را با روش تحلیل واریانس بررسی کرده‌اند و طبق این تحقیق، هنگامی که دمای قالب افزایش یابد، میزان انقباض افزایش می‌یابد و در دمای قالب بین 45 تا 55 درجه سلسیوس کمترین مقدار برای اعوجاج قطعه وجود دارد [1].

اکتم و همکاران در سال 2007، کاربرد تکنیک بهینه‌سازی تاگوچی به‌منظور کاهش اعوجاج به وجود آمده براثر تغییرات انقباض را که متأثر از پارامترهای فرایند در حین تولید قطعات پلاستیکی دیواره نازک مربوط به قطعه آرتوز[5] را موردبررسی قراردادند. آن‌ها بدین منظور تعدادی آنالیز بر روی ترکیبی از پارامترهای فرایند بر اساس آنالیز سه سطحی L27 و L9 طراحی آزمایش تاکوچی توسط نرم‌افزار مولدفلو ترتیب دادند. از نسبت S/N و آنالیز واریانس برای پیدا کردن سطوح بهینه ونیز به دست آوردن تأثیرات پارامترهای فرایند بر روی اعوجاج و انقباض به وجود آمده در نمونه‌ها استفاده کردند. آن‌ها توانستند با این کار اعوجاج و انقباض را به ترتیب حدود 2/17 درصد و 0/7 درصد بهبود دهند. یک‌راستی آزمایی نیز به‌منظور سنجیدن مؤثر بودن طراحی آزمایش تاکوچی بعد از به دست آوردن سطوح بهینه پارامترهای فرایند ترتیب دادند. آن‌ها به این نتایج دست یافتند که بر اساس نتایج آنالیز واریانس فشار نگهداری مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار بر روی اعوجاج و زمان نگهداری مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار بر روی انقباض به وجود آمده در قطعات است [2].

اوزچلیک و ارزوروملو در سال 2006، تأثیر موقعیت گیت، الگوی پر شدن و جریان را بر روی میزان اعوجاج به‌منظور حداقل کردن میزان اعوجاج توسط نرم‌افزار مولدفلو موردبررسی قرار داده است. آن‌ها دمای قالب، دمای تزریق، فشار نگهداری، زمان نگهداری، زمان خنک‌کاری، نوع سیستم راهگاه و موقعیت گیت را به‌عنوان متغیرهای مدل در نظر گرفتند. همچنین تأثیرات پارامترهای فرایند را بر روی قطعه پلاستیکی دیواره نازک با استفاده از طراحی آزمایش به روش تاگوچی و آنالیز المان محدود داخل نرم‌افزار مولدفلو بررسی کردند. از روش آنالیز واریانس به‌منظور یافتن مؤثرترین پارامتر تأثیرگذار بر روی اعوجاج قطعات و از شبکه عصبی برای به دست آوردن مینیمم مقدار اعوجاج استفاده کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که پارامترهای دمای قالب، دمای تزریق، زمان نگهداری، زمان خنک کاری، نوع سیستم راهگاه و موقعیت گیت به ترتیب به میزان 33/7، 21/6، 20/5، 16/1، 5/1، 1/5 و 1/3 درصد بر روی اعوجاج قطعات تأثیر دارند. یک مدل برای پیش‌بینی میزان اعوجاج برحسب مؤثرترین پارامتر فرایند را به‌وسیله شبکه عصبی به‌منظور کاهش دادن هزینه فرایند بهینه‌سازی به دست آوردند. اعوجاج قطعات به میزان 51 درصد کاهش یافت [3].

جعفریان و شاکری در سال 2005، تأثیر پارامترهای فرایند تزریق را بر روی میزان انقباض قطعات پلاستیکی (که بر روی

[1] Crystalline
[2] Semi-crystalline
[3] Amorphous
[4] ABS-PC
[5] Orthose part

www.SID.ir

Archive of SID

اعوجاج قطعات تأثیرگذار است) موردبررسی قراردادند. آن‌ها از یک مدل ساده سطحی استفاده کرده و یک کد آنالیزی را برای این کار ترتیب دادند. پس‌ازآن از طریق این کد تأثیر پارامترهای مختلف را بررسی کردند. این کد را برای پلی‌کربنات بکار برده و به‌طور هم‌زمان یک طراحی آزمایش به‌منظور یافتن تأثیرات پارامترهای مختلف بر روی انقباض را صورت دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که فشار نگهداری بیشترین تأثیر را روی انقباض در راستای سطح و ضخامت قطعه داشته و درحالی‌که دمای تزریق اولیه تأثیر خیلی کمی دارد. دمای قالب تأثیر خیلی کمی بر روی انقباض در راستای سطح، و تأثیر زیادی بر روی انقباض در راستای ضخامت دارد. سرد شدن گیت در فشار نگهداری ثابت هردوی انقباض‌ها را افزایش می‌دهد [4].

اکتم در سال 2011 مدل کردن و آنالیز تأثیرات پارامترهای فرایند بر روی انقباض را با سنجیدن و اندازه‌گیری کیفیت قطعه کاور DVD-ROM از جنس ABS موردبررسی قرارداد. اکتم برای این کار، یک مدل رگرسیون به‌منظور تعریف یک رابطه ریاضی ببین پارامترهای فرایند (دمای قالب، دمای مذاب، فشار تزریق، زمان تزریق و زمان خنک‌کاری) و انقباض حجمی با استفاده از آنالیز داده‌ها، به دست آورد. ایشان آنالیزهای المان محدود با کمک آرایه (L27) تاگوچی را در نرم‌افزار مولدفلو اجرا کردند. از یک آنالیز واریانس برای بررسی کفایت مدل رگرسیون و نیز برای به دست آوردن اثرات هر یک از پارامترها بر روی انقباض استفاده کردند. مدل‌های سطح 1 و سطح 2 آنالیز واریانسی که ترتیب دادند به ترتیب درصد خطایی برابر با 3/895 درصد و 3/994 درصد را نشان داد. آزمایش‌هایی شامل چهار عدد قطعه قالب‌گیری شده کاور به‌منظور کنترل دقت مدل رگرسیون، و نیز کنترل مقادیر انقباض با مقادیر به‌دست‌آمده از آنالیزهای المان محدود در نرم‌افزار مولدفلو صورت دادند. نتایجی که به دست آوردند نشان‌دهنده تطابق خیلی خوب مدل رگرسیون با آنالیز المان محدود و آزمایش‌ها صورت گرفته بود [5].

در تحقیق دیگری اچ. اکتم در سال 2011 شرایط تزریق را برای ارزیابی مشکلات انقباض در فرایند تزریق پلاستیک یک کاور از جنس اکریلونیتریل‌بوتادین‌استایرن، مدلسازی و تحلیل کرده‌است و دیده می‌شود که برای بررسی میزان انقباض روش اجزاء محدود و تحلیل واریانس روش‌های مناسبی است و دیگر اینکه انقباض با افزایش زمان خنک‌کاری، کاهش و با افزایش فشار تزریق، افزایش می‌یابد [6].

حسن و همکاران در سال 2010 در تحقیق دیگری، تأثیر سیستم خنک کاری را بر میزان انقباض یک محصول از جنس پلی‌استایرن مدلسازی و بررسی کرده‌اند و این نتیجه به دست آمده است که میزان انقباض قسمت‌های خارجی محصول بیشتر از قسمت‌های داخلی آن است و همچنین موقعیت کانال‌های سیستم خنک‌کاری، تأثیر زیادی روی فرایند خنک‌کاری محصول پلاستیکی دارد [7].

2- بیان مسئله، نوآوری اهداف

اعوجاج بوجود آمده در قطعات تولید شده به روش قالب‌گیری تزریقی همواره مسئله‌ای مشکل‌ساز بوده است تا جایی که ممکن است عملکرد قطعه را تحت تأثیر قرار داده و قطعه را بلااستفاده سازد. پدیده اعوجاج در قطعات پلاستیکی تزریق شده از معایب مهم بوده که با بهینه‌سازی متغیرهای فرایند مانند درجه حرارت مذاب، فشار تزریق، زمان خنک‌کاری، دمای سیال خنک‌کاری و غیره، می‌تواند به حداقل مقدار ممکن برسد. در این تحقیق، به منظور بررسی تأثیر درجه حرارت سیال خنک‌کاری بر پدیده اعوجاج، و به حداقل رساندن آن با استفاده از نرم‌افزار مولدفلو[1]، فرایند تزریق پلاستیک شبیه‌سازی و تحلیل می‌شود.

در عمل مشخص شده است که با توجه به تأثیر بسیار زیاد خنک‌کاری بر میزان انقباض و در نتیجه اعوجاج بوجود آمده در قطعات پلاستیکی، دمای سیال خنک‌کار جریان یافته در قالب تزریق پلاستیک، تأثیر بسیار زیادی بر میزان اعوجاج بوجود آمده دارد. بنابراین، به منظور کاهش اعوجاج در این قطعات تا حد مجاز طراحی و مونتاژ، توجه به سیستم خنک‌کاری مناسب امری حیاتی و ضروری است.

به نظر می‌رسد که مناسب‌ترین و کم هزینه‌ترین راه کاهش اعوجاج، بدست آوردن دمای سیال خنک‌کار و هندسه‌ی بهینه‌ی کانال‌های سیال خنک‌کار به کمک نرم‌افزار مولدفلو است. مهم‌ترین دلیلی که برای این فرضیه می‌توان مطرح کرد این است که طراحی و ساخت سیستم‌های خنک‌کاری مرسوم[2] که در شکل 1 نشان داده شده است ساده است که موجب کاهش ابعاد و هزینه‌های ساخت قالب در این نوع سیستم‌های خنک‌کاری می‌گردد. در حالی که در روش‌های طراحی و ساخت سیستم‌های خنک‌کاری نوین قالب تزریق پلاستیک نظیر سیستم خنک‌کاری کانفورمال[3]، هزینه‌ی ساخت بسیار بالاست؛ چراکه در آن کانال‌های خنک‌کاری شکل کلی سنبه و یا ماتریس قالب را به خوبی دنبال کرده و پوشش می‌دهند و این کار

[1] Autodesk Moldflow Insight Ultimate 2017.3 V35.0.6.0
[2] Conventional cooling systems
[3] Conformal cooling

www.SID.ir

Archive of SID

مستلزم بکارگیری دستگاه‌های پرینتر سه بعدی اس‌ال‌ام[1] است که هزینه‌های ساخت را بالا می‌برد.

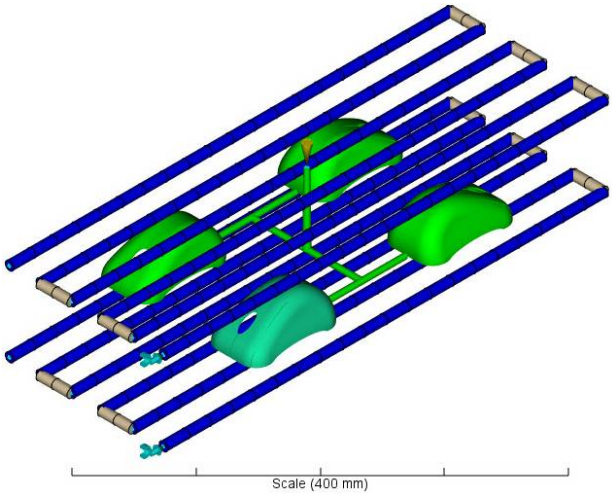

Fig. 1 Mouse cover parts, runner system and cooling channels that has been created

شکل 1 قطعات کاور موس مدلسازی شده به همراه سیستم راهگاه و کانال‌های راه‌آب قالب

3- روش تحقیق

کار با مدل‌سازی کاور موس و واردکردن آن به نرم‌افزار مولدفلو آغاز می‌شود. پس از مش زنی قطعه، همان‌طور که در شکل 2 نشان داده شده‌است، با توجه به تعداد حفره‌های قالب که در اینجا چهار حفره است قطعه چیده شده و سپس سیستم راهگاهی[2] طراحی شده و مش زنی انجام می‌گردد (با تعداد 62890 المان مش برای هر قطعه). پس از آن سیستم راه‌آب قالب طراحی و برای این سیستم ورودی و خروجی تعریف می‌شود. ماده اولیه ای‌بی‌اس از نوع HG-173 مربوط به پتروشیمی ال‌جی کمیکالز[3] است که در کتابخانه نرم‌افزار نیز مشخصات آن وجود دارد. همان‌طور که در شکل 2 مشخص است، با درنظر گرفتن ابعاد بلوک قالب، آن را در نرم‌افزار با استفاده از ابزارهای مخصوص مدل کرده و سپس در دو مرحله مش زنی انجام می‌شود. پس از آن متغیرهای فرایند بدین صورت تنظیم شدند: دمای مذاب 250 درجه سلسیوس، زمان باز بودن قالب 5 ثانیه، زمان بسته شدن قالب قبل از تزریق 0 ثانیه، تنظیم زمان تزریق + اتوکشی + خنک‌کاری 10 ثانیه. همچنین گزینه دمای قالب بر روی (Averaged within cycle) و آهنگ کنترل جریان بر روی 52.4 cm^3/s قرار گرفت.

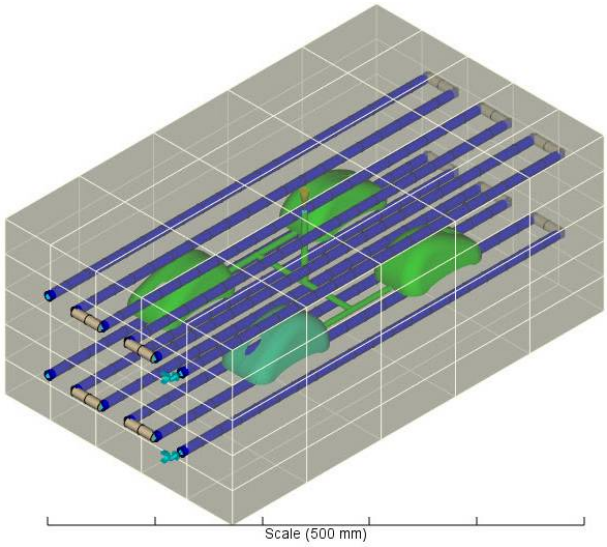

Fig. 2 Mouse cover parts, runner system, cooling channels and mold block that has been created

شکل 2 قطعات کاور موس به همراه سیستم راهگاه و کانال‌های راه‌آب و بلوک قالب

4- ارائه نتایج و بحث

در این پژوهش، از نتایج تغییر شکل به منظور بدست آوردن علل اعوجاج استفاده شده‌است. چهار آنالیز اعوجاج با چهار متغیر مختلف تأثیر گذار بر انقباض، نظیر، سردشدن غیریکنواخت، انتقباض غیر یکنواخت، اثرات جهت‌گیری اجزای پلیمری، اثرات گوشه‌ها به منظور یافتن علل اعوجاج صورت گرفته است.

آنالیز اعوجاج، نمودارهای تغییر شکل برای همه‌ی اثرات سهیم در این تغییر شکل و نیز چهار متغیر ذکر شده را فراهم می‌کند. این نمودارها امکان بررسی تأثیر هر یک از متغیرهای مختلف بر روی اعوجاج و نیز مقایسه تأثیر هر یک از این متغیرها با یکدیگر و در نهایت بدست آوردن علت اعوجاج را فراهم می‌کنند.

شکل‌های 3 و 4، اثرات سردشدن غیریکنواخت بر تغییر شکل قطعات (شکل 3- الف)، اثرات انقباض بر تغییرشکل قطعات (شکل 3- ب)، اثرات گوشه‌ها بر تغییرشکل قطعات (شکل 4- ج)، و اثرات جهت‌گیری اجزاء پلیمری بر تغییر شکل قطعات (شکل 4- د) را نشان می‌دهد.

همان‌طور که از شکل 3- الف مشخص است، و با توجه به تغییرشکل واضح صورت گرفته در قسمت دکمه‌های کاور موس و نواحی اطراف آن، متغیری که بیشترین تغییرشکل را در این ناحیه موجب شده‌است، به وضوح علت اصلی اعوجاج می‌باشد، که در این مورد به خصوص این متغیر سردشدن غیریکنواخت قطعه است.

[1] SLM (Selective Laser Melting) Technology
[2] Runner system
[3] LG Chemicals

www.SID.ir

Archive of SID

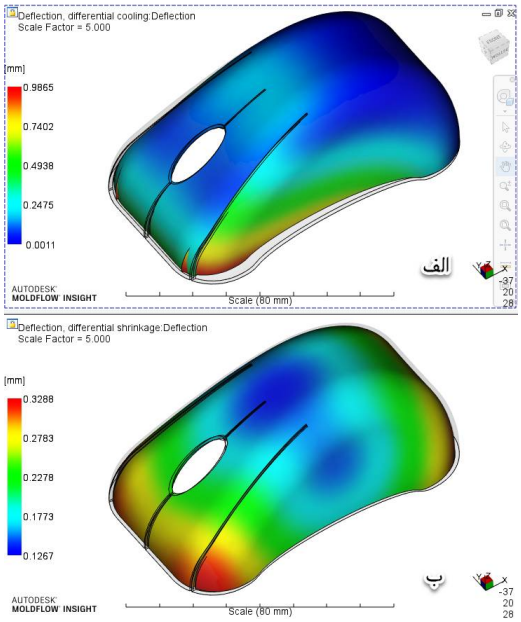

Fig. 3 Effects of differential cooling and differential shrinkage on the warpage of the parts

شکل 3 مقایسه تأثیر دو پدیده مختلف سرد شدت غیر یکنواخت و انقباض غیر یکنواخت بر روی میزان اعوجاج بوجود آمده در قطعات به کمک مدلسازی المان محدود

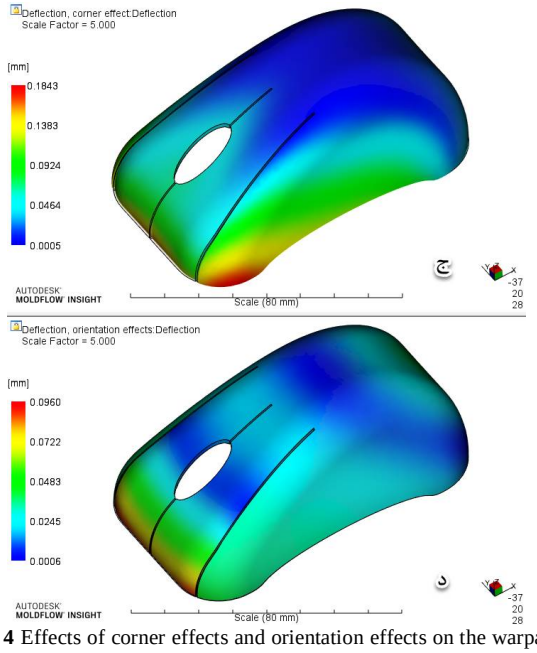

Fig. 4 Effects of corner effects and orientation effects on the warpage of the parts

شکل 4 مقایسه تأثیر دو پدیده مختلف اثرات گوشه ها و اثرات جهت گیری بر روی میزان اعوجاج بوجود آمده در قطعات به کمک مدلسازی المان محدود

علت اصلی اعوجاج در این قطعه سردشدن غیریکنواخت قطعه است، بدین شکل که یک طرف قطعه زودتر از طرف دیگر سرد می‌شود و در نتیجه باعث بوجود آمدن تغییرشکل و اعوجاج در قطعه می‌شود. در این قطعه اعوجاج بوجود آمده در راستای محورهای x و y یعنی اعوجاج در صفحه (xy) مورد نظر می‌باشد. با توجه به نتایج حاصله از چندین آنالیز مختلف این نتیجه حاصل شده است که نیمه سنبه قطعه خیلی گرم‌تر از نیمه ماتریس قطعه می‌باشد. این موضوع از شکل 5، که توزیع دمای میانگین قالب در نمای برش خورده را نشان می‌دهد، مشخص است.

بطور عملی راه حلی که برای برطرف کردن این مشکل پیشنهاد می‌شود این است که تا حد امکان اختلاف دمای بین قسمت سنبه و ماتریس[1] قطعه کاهش یابد، بدین صورت که یا دمای قسمت ماتریس افزایش یافته و یا از دمای قسمت سنبه کاسته شود. بدین منظور طبق جدول 1، دو آنالیز مختلف با دماهای مختلف در دو قسمت سنبه و ماتریس صورت گرفت. در این جدول، چند دمای مختلف بر اساس راه حل پیشنهادی و نیز چند آنالیز ساده‌تر، برای سیال خنک‌کار در نیمه سنبه و نیمه ماتریس درنظر گرفته می‌شود و دو آنالیز پیش‌رو طبق آنها صورت می‌گیرد.

در آنالیز شماره 1 دمای سیال خنک‌کار نیمه سنبه به مقدار 20 درجه سلسیوس کاهش یافت تا این نیمه که نسبت به نیمه ماتریس خیلی گرم‌تر است خنک‌تر شود. نتیجه حاصل از آنالیز به صورت شکل 6 نمایش داده شده است.

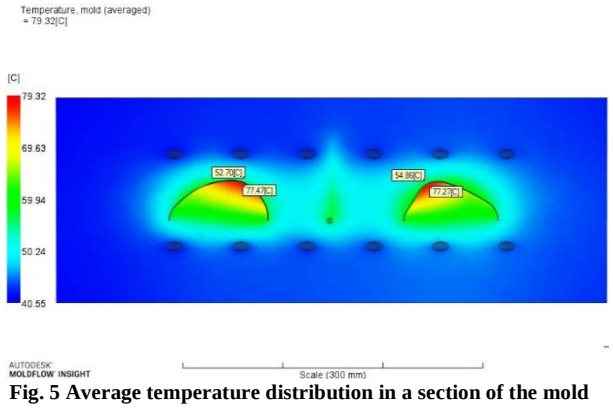

Fig. 5 Average temperature distribution in a section of the mold with the same coolant temperature in the core and cavity

شکل 5 توزیع دمای میانگین قالب در نمای برش خورده با دمای یکسان سیال خنک‌کاری سنبه و ماتریس

جدول 1 دمای سیال خنک‌کار در هر آنالیز و تأثیر آن بر روی اعوجاج

Table 1 Cooling fluid temperature in each analysis and its effect on warpage

	دمای سنبه (C)	دمای ماتریس (C)	حداکثر اعوجاج (%)
متغیر پیش فرض	40	40	0/99
آنالیز شماره 1	20	40	0/71
آنالیز شماره 2	20	60	0/36

[1] Core and cavity side

www.SID.ir

Archive of SID

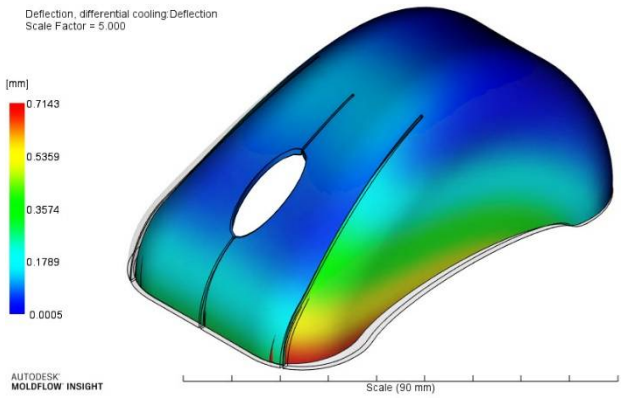

Fig. 6 The amount of warpage in the part which caused by differential cooling in analysis

شکل 6 میزان اعوجاج بوجود آمده در اثر خنک‌کاری غیریکنواخت در آنالیز 1

با توجه به شکل 5 مشخص است که میزان اعوجاج کاهش یافته است. این روند ادامه داده می‌شود و برای نزدیک کردن دمای بین نیمه سنبه و نیمه ماتریس، دمای نیمه ماتریس 20 درجه افزایش داده می‌شود. نتیجه حاصل از این آنالیز در شکل 7 نمایش داده شده‌است. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، مقدار اعوجاج به شکل قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا کرده است. پس می‌توان نتیجه گرفت که احتمالا راه حل پیشنهادی صحیح و قابل پیاده‌سازی است.

به منظور بدست آوردن دمای بهینه سیال ورودی به کانال‌ها و محدوده دمای بین سیال ورودی به کانال‌های نیمه سنبه و نیمه ماتریس قالب، طراحی آزمایش به روش فاکتوریل کامل[1] صورت پذیرفت. در این طراحی آزمایش دو متغیر دمای میانگین سیال ورودی و اختلاف دمای بین سیال ورودی دو کانال به عنوان دو متغیر مختلف درنظر گرفته شدند. که هر کدام از این متغیرها خود دارای سه مقدار مختلف است که به عنوان سطوح آن متغیرها تعریف می‌شوند. بدین صورت 9 آزمایش به صورت جدول 2 برای بدست آوردن حالت بهینه تنظیم شد. هر یک از این حالات در نرم‌افزار مولدفلو شبیه‌سازی شده و پس از آنالیز، نتایج حاصل در همین جدول وارد شدند.

شکل 8 نتایج حاصل از بهینه‌سازی داده‌های ورودی به کمک نرم‌افزار دیزاین اکسپرت[2] را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این نمودار مشخص است، بهینه‌ترین حالت ممکن زمانی اتفاق می‌افتد که دمای میانگین سیال ورودی 60 درجه و محدوده دمای سیال بین دو کانال 30 درجه سلسیوس باشند.

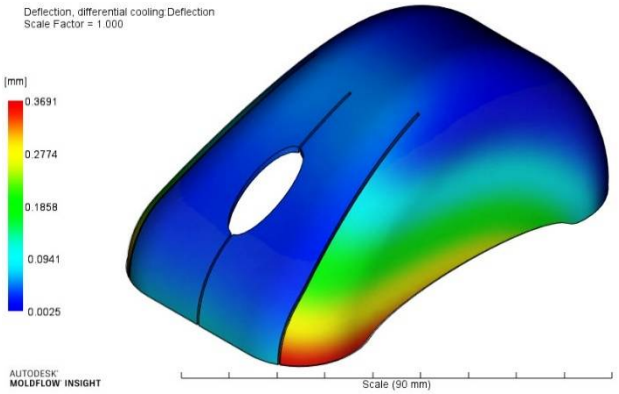

Fig. 7 The amount of warpage in the part which caused by differential cooling in analysis

شکل 7 میزان اعوجاج بوجود آمده در اثر خنک‌کاری غیریکنواخت در آنالیز 1

جدول 2 آزمایش‌های طراحی شده و نتایج حاصل از آنالیز

Table 2 Designed tests and results of analysis

شماره آزمایش	دمای میانگین (C)	محدوده دمایی (C)	حداکثر اعوجاج (%)
1	50	30	0/1233
2	40	20	0/3690
3	50	10	0/6720
4	60	10	0/5894
5	60	30	0/1121
6	60	20	0/3216
7	50	20	0/3667
8	40	30	0/1268
9	40	10	0/6708

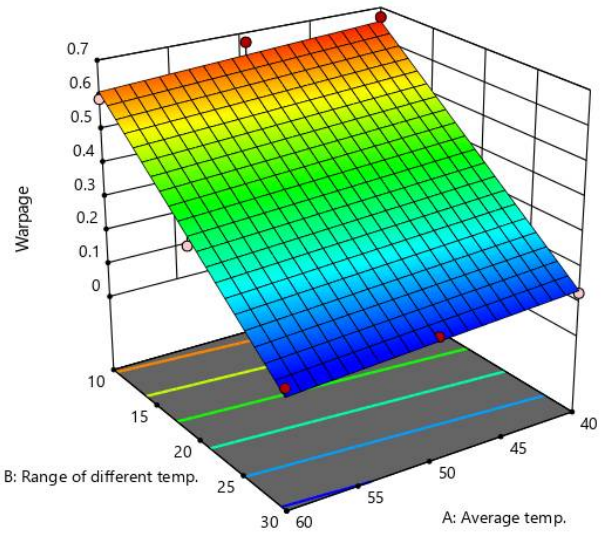

Fig. 8 Differential warpages in compare with average temperatures and range of different temperatures

شکل 8 نمودار تغییرات اعوجاج نسبت به متغیرهای دمای میانگین سیال خنک‌کار و اختلاف دمای بین سیال ورودی به کانال‌های خنک‌کار

[1] Full factorial
[2] Design Expert

www.SID.ir

Archive of SID

همان‌طور که از شکل 8 مشخص است، با افزایش دمای میانگین سیال و نیز با افزایش محدوده دمایی سیال ورودی به کانال‌ها، نمودار به حداقل مقدار خود یعنی حداقل مقدار اعوجاج ممکن که با رنگ آبی نشان داده شده است، می‌رسد. هرچه محدوده دمای سیال ورودی به کانال‌ها افزایش یابد نمودار با شیب بیشتری کاهش می‌یابد، می‌توان نتیجه گرفت که این متغیر روی میزان اعوجاج تأثیر زیادی دارد. هرچقدر دمای میانگین سیال ورودی به کانال‌ها افزایش یابد، نمودار با شیب خیلی کمی کاهش می‌یابد، یعنی دمای میانگین سیال ورودی به کانال‌ها تأثیر خیلی کمی بر روی میزان اعوجاج دارد.

به علت تأثیر کم دمای میانگین سیال بر میزان اعوجاج و تلاش برای عدم نیاز به سیال‌های دیگری همچون روغن و تجهیزات مجزای مربوط به آن که هزینه تولید را بالا می‌برند، دمای میانگین سیال 50 درجه و محدوده دمایی سیال ورودی به کانال‌ها 30 درجه سلسیوس انتخاب می‌شود. یعنی برای به حداقل رساندن میزان اعوجاج، بایستی دمای سیال ورودی به کانال نیمه سنبه قالب بر روی 20 درجه و دمای سیال ورودی به کانال نیمه ماتریس قالب بر روی 80 درجه تنظیم شوند. درنتیجه میزان حداکثر اعوجاج 0/1233 میلی‌متر می‌شود. این مقدار حداقل مقدار اعوجاج بوجود آمده در قطعات است.

همان‌طور که در شکل 9 نشان داده شده است، اختلاف دمای بین نیمه سنبه و نیمه ماتریس قالب نسبت به حالتی که دمای سیال خنک‌کاری این دو نیمه یکسان بود (شکل 5)، کاهش یافته است. توزیع دمای میانگین نیمه سنبه قالب از 79 درجه به 72 درجه سلسیوس کاهش یافته و توزیع دمای نیمه ماتریس قالب از 54 درجه به 63 درجه سلسیوس افزایش یافته است.

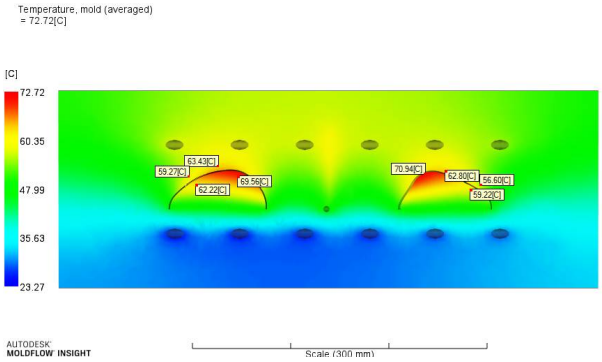

Fig. 9 Average temperature distribution in a section of the mold with the optimized coolant temperature in the core and cavity

شکل 9 توزیع دمای میانگین قالب در نمای برش خورده با دمای سیال خنک‌کاری بهینه سنبه و ماتریس

همچنین با توجه به توزیع دمای دو نیمه قالب در شکل های 9 و5، اختلاف دمای بین نیمه سنبه قالب و نیمه ماتریس قالب تقریباً از 25 درجه به 6 درجه سلسیوس کاهش یافته است.

5- نتیجه‌گیری

اعوجاج[1] پدید آمده در قطعات تولید شده به روش تزریقی را می‌توان به کمک نرم‌افزار بررسی کرده و به علت و متغیر اصلی دخیل در آن پی‌برد و پس از آن اقدام به بهبود، بهینه‌سازی و حداقل کردن اعوجاج بوجود آمده در این قطعات نمود. در این تحقیق متغیر اصلی بررسی شده برای کاهش اعوجاج در قطعه، خنک‌کاری غیریکنواخت قطعه است.

با توجه به اختلاف دمای زیاد بین نیمه سنبه[2] و نیمه ماتریس[3] قالب، با تغییر دمای سیال خنک‌کار این دو نیمه سعی‌شد که دمای این دو نیمه به یکدیگر نزدیک‌تر شوند. برای بدست آوردن دمای بهینه سیال ورودی به کانال‌ها یک طراحی آزمایش به روش فاکتوریل کامل، صورت پذیرفت. دمای سیال خنک‌کار نیمه سنبه 20 درجه و دمای سیال خنک‌کار نیمه ماتریس قالب 80 درجه سلسیوس بدست آمد. این تغییر دما در سیال خنک‌کاری باعث به حداقل رسیدن میزان اعوجاج به میزان قابل قبولی شد. نزدیک کردن دمای سیال دو نیمه سنبه و ماتریس به یکدیگر می‌تواند باعث کاهش اختلاف دمای دو نیمه قطعه و در نتیجه کاهش میزان انقباض غیریکنواخت[4] قطعه شد. باید توجه داشت که این انقباض غیریکنواخت در قطعات است که باعث بوجود آمدن اعوجاج در قطعه می‌شود.

از نتایج این مطالعه مشخص شد که تأثیر اختلاف دمای سیال ورودی بر میزان اعوجاج بوجود آمده در قطعات خیلی بیشتر از تأثیر دمای میانگین سیال بر روی این اعوجاج است. بطوری که صرف‌نظر از اینکه دمای میانگین سیال خنک‌کار چقدر باشد، محدوده دمای بین سیال خنک‌کار ورودی به کانال‌ها تعیین کننده میزان اعوجاج بوجود آمده در قطعات است.

6- مراجع

[1] Chiang, K.-T. and F.-P.J.T.I.J.o.A.M.T. Chang, Analysis of shrinkage and warpage in an injection-molded part with a thin shell feature using the response surface methodology, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*,

[1] Warpage
[2] Core side
[3] Cavity side
[4] Differential shrinkage

www.SID.ir

Archive of SID

Vol. 35, No. 5-6, pp. 468-479, 2007.

[2] Oktem, H., T. Erzurumlu, and I. Uzman, Application of Taguchi optimization technique in determining plastic injection molding process parameters for a thin-shell part, *Materials & Design*, Vol. 28, No. 4, pp. 1271-1278, 2007.

[3] Ozcelik, B. and T. Erzurumlu, Comparison of the warpage optimization in the plastic injection molding using ANOVA, neural network model and genetic algorithm, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 171, No. 3, pp. 437-445, 2006.

[4] Jafarian, A. and M.J.A.J.o.A.S. Shakeri, Investigating the Influence of Different Process Parameters on Shrinkage of Injection-Molded Parts, Vol. 2, No. 3, pp. 688-700, 2005.

[5] Öktem, H.J.T.I.J.o.A.M.T., Optimum process conditions on shrinkage of an injected-molded part of DVD-ROM cover using Taguchi robust method, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 61, No. 5-8, pp. 519-528, 2012.

[6] Öktem, H.J.J.o.m.e. and performance, Modeling and analysis of process parameters for evaluating shrinkage problems during plastic injection molding of a DVD-ROM cover, *Journal of Materials Engineering Performance*, Vol. 21, No. 1, pp. 25-32, 2012.

[7] Hassan, H., et al., Modeling the effect of cooling system on the shrinkage and temperature of the polymer by injection molding, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 30, No. 13, pp. 1547-1557, 2010.

www.SID.ir