



بررسی تجربی و عددی ضخامت قطعه بر میزان جمع‌شدگی و عدم‌گردی قطعات استوانه‌ای در فرآیند تزریق پلاستیک

ناتان جعفریان جم^{۱*}، پیام سرائیان^۲، آیت اله عرب امین‌آبادی^۳

* نویسنده مسئول: pardisiau.ac.ir@jafarian

واژه‌های کلیدی

پلی‌پروپیلن، جمع‌شدگی، عدم‌گردی، دستگاه اندازه‌برداری سه‌بعدی نوری (OPTIC)، نرم افزار MOLDFLOW.

چکیده

فرآیند تزریق پلاستیک، یکی از مهم‌ترین روش‌های شکل‌دهی در صنعت تولید پلاستیک‌ها می‌باشد. جمع‌شدگی و عدم‌گردی پدیده‌هایی هستند که کیفیت نهایی محصول را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در این تحقیق تأثیر ضخامت قطعه استوانه‌ای از جنس پلی‌پروپیلن بر میزان جمع‌شدگی و عدم‌گردی بررسی شده است. بنابراین با استفاده از نرم‌افزار MOLDFLOW، فرآیند تزریق پلاستیک برای جمع‌شدگی و عدم‌گردی، شبیه‌سازی و تحلیل می‌شود. سپس یک قالب تزریق پلاستیک پنج‌حفره‌ای از قطعات استوانه‌ای توخالی با پنج ضخامت مختلف ساخته شده و با استفاده از یک دستگاه تزریق پلاستیک، حداقل ۵ نمونه از قطعات تولید می‌شود. در ادامه ابعاد نمونه‌های تولید شده توسط دستگاه اندازه‌برداری سه‌بعدی نوری اندازه‌گیری شده و میانگین جمع‌شدگی ابعادی هر نمونه به دست می‌آید. با انجام این تحقیق نتیجه می‌گیریم که با افزایش ضخامت قطعه، میزان جمع‌شدگی و عدم‌گردی افزایش می‌یابد و دلیل آن، آهسته‌تر سرد شدن پلیمر مذاب با افزایش ضخامت قطعه و داشتن زمان بیشتر برای تشکیل بلور است. بلورینگی بیشتر ماده موجب جمع‌شدگی و عدم‌گردی زیادتری می‌شود. در پایان نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی مقایسه می‌شوند و مشاهده می‌شود که نتایج تجربی و نتایج شبیه‌سازی تطابق خوبی با هم دارند.

۱- استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد پردیس

۲- استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد

۳- کارشناس ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد

۱- مقدمه

گردی در قطعات استوانه‌ای نیز به دلیل اثرات حرارتی، عدم کنترل سیستم خنک‌کاری و وجود جمع‌شدگی‌های غیرهمسان در قطعات، اتفاق می‌افتد. هنگامی که میزان جمع‌شدگی ابعادی قطعات تولیدی یکنواخت نباشد، پدیده تابیدگی و عدم‌گردی اتفاق می‌افتد. مواد پلیمری مختلف با توجه به بلوری^۶ یا بی‌شکل^۷ بودن ساختارشان دارای میزان جمع‌شدگی متفاوتی هستند و مواد پلیمری با ساختار بلوری یا نیمه‌بلوری^۸ دارای جمع‌شدگی بیشتری نسبت به مواد با ساختار بی‌شکل هستند. علاوه بر ساختار مواد پلیمری، مشخصه‌های بسیاری روی میزان جمع‌شدگی و عدم‌گردی تأثیر دارند، که این مشخصه‌ها شامل شرایط تزریق، ابعاد قطعه و غیره می‌باشند [۲].

در صنایع مختلفی از جمله صنایع پزشکی، صنایع اتومبیل-سازی، صنایع لوله‌کشی و آب‌رسانی و غیره قطعات استوانه‌ای از جنس پلی‌پروپیلن^۹ کاربرد فراوانی دارند و پدیده‌هایی مانند جمع‌شدگی، عدم‌گردی و تابیدگی در این گونه قطعات می‌توانند کیفیت ابعادی و کاربرد آن‌ها را تحت تأثیر قرار دهند. بنابراین بررسی تأثیر متغیرهای مختلف از جمله شرایط تزریق، هندسه و ابعاد قالب و قطعه بر این پدیده‌ها از اهمیت زیادی در صنعت تزریق پلاستیک و قالب‌سازی برخوردار است. در این تحقیق به بررسی اثر ضخامت قطعه بر این پدیده‌ها پرداخته می‌شود.

با توجه به اهمیت بالای میزان جمع‌شدگی و عدم‌گردی قطعات پلیمری تولیدی در فرآیند تزریق پلاستیک و تأثیر مستقیم این پدیده‌ها بر کیفیت نهایی محصولات، تحقیقات بسیاری بر روی تأثیر مشخصه‌های مختلف مانند شرایط تزریق از جمله، دمای مذاب، دمای قالب، سرعت چرخش

حدود یک‌صد سال از عمر پلاستیک می‌گذرد و این در حالی است که تا حدود شش دهه پیش کسی از وجود این صنعت به این صورت و وسعت، آگاهی نداشت. اگر هم‌اکنون به اطراف خود نگاهی بیندازید، بسیاری از محصولاتی که تا چندی پیش از آهن یا چوب ساخته می‌شدند، اکنون با استفاده از مواد پلاستیکی تولید می‌شوند. امروزه آنها جزئی از زندگی ما شده‌اند و در ساخت اشیای مختلف، از وسایل خانگی و مورد مصرف عمومی تا ابزار دقیق و پیچیده پزشکی و علمی، به کار می‌روند [۱]. مهندسان و طراحان، پلاستیک‌ها را به دلیل وجود ترکیبی از خواص متنوع، در مقایسه با سایر مواد مورد توجه قرار می‌دهند. این خواص عبارتند از: سبکی وزن، سختی، انعطاف پذیری، مقاومت در مقابل خوردگی، رنگ‌پذیری، شفافیت، سهولت شکل‌پذیری و غیره [۲]. روش‌های مختلفی برای شکل‌دهی پلاستیک‌ها وجود دارد که فرآیند تزریق پلاستیک از معمول‌ترین این روش‌ها می‌باشد. فرآیند 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^۱، هندسه قطعه و ضخامت قطعه که می‌تواند باعث کاهش یا افزایش عیوب در قطعات تولیدی از قبیل ناقص تولید شدن قطعات، تله‌های هوایی^۲، خطوط جوش^۳، جمع‌شدگی^۴، تابیدگی، عدم‌گردی^۵ در قطعات استوانه‌ای و غیره شوند [۱].

جمع‌شدگی پدیده‌ای است که در حین سرد شدن مذاب پلیمر و شکل‌گرفتن قطعه اتفاق می‌افتد و تابیدگی و عدم-

6- Crystalline
7- Amorphous
8- Semi-Crystalline
9- Polypropylene

1- Injection Pressure
2- Air Traps
3- Weld Lines
4- Shrinkage
5- Out of Roundness

جای-رن شای^{۱۱}، در سال ۲۰۰۷ بهینه‌سازی فرآیند تزریق پلاستیک برای اعوجاج‌های لبه خارجی و محیطی قطعات از جنس ترکیبات کامپوزیتی پلی‌پروپیلن به وسیله روش شبکه عصبی را انجام داده‌است و نشان می‌دهد که پارامترهای بهینه به دست آمده، برابر دمای مذاب ۲۰۲ درجه سانتی‌گراد، نسبت سرعت تزریق ۲۵ درصد و نسبت فشار تزریق ۲۸ درصد می‌باشد [۶].

سانتیس^{۱۲} و همکاران در سال ۲۰۰۸ بررسی کامل جمع-شدگی از لحظه جامد شدن اولیه قطعه داخل قالب تا چند دقیقه بعد از قالب‌گیری برای یک کوپلیمر صنعتی (لاستیک صنعتی پلی‌پروپیلن-اتیلن-پروپیلن)^{۱۳} را به صورت تجربی و تحلیلی انجام داده‌اند و نشان داده‌اند که اگر فشار فاز تراکم و زمان فاز تراکم افزایش یابد، جمع‌شدگی کاهش می‌یابد [۷].

ساراگا^{۱۴} و همکاران در تحقیق دیگری در سال ۲۰۰۹ به وسیله نرم افزار FESHAPE، تابیدگی و جمع‌شدگی و همچنین اعوجاج‌های تولیدشده بوسیله تنش‌های حرارتی یک قطعه را در فرآیند تزریق پلاستیک بررسی کرده‌اند و نتایج به دست آمده از تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که ترکیب تصویر حجمی^{۱۵} ابزار مفیدی برای مدل‌سازی تابیدگی و جمع‌شدگی قطعات در فرآیند تزریق پلاستیک می‌باشد [۸].

ام. آلتان^{۱۶}، در سال ۲۰۰۹ شرایط بهینه قالب‌گیری برای داشتن کمترین میزان جمع‌شدگی قطعات از جنس پلی‌کربنات^{۱۷} و پلی‌پروپیلن به وسیله روش‌های تاگوچی، شبکه عصبی^{۱۸} و تحلیل واریانس را بررسی کرده‌است و طبق نتایج به دست آمده از این تحقیق، با دمای مذاب ۲۶۰

ماریچ^۱ دستگاه تزریق پلاستیک، فشار تزریق، فشار فاز تراکم^۲، زمان فاز تراکم^۳ و زمان باز شدن قالب و مشخصه-های دیگری از جمله جنس قالب، جنس ماده تزریقی، ابعاد قطعه تولیدی و غیره، بر میزان جمع‌شدگی و تابیدگی و عدم‌گردی، انجام شده است.

ای. آر. جعفریان و ام. شاکری، در سال ۲۰۰۵ تأثیر پارامترهای مختلف تزریق ماده پلیمری پلی‌کربنات روی میزان جمع‌شدگی و تنش‌های پس‌ماند^۴ را بررسی کرده‌اند و در این تحقیق یک مدل صاف ساده^۵ برای بررسی تأثیر شرایط تزریق روی جمع‌شدگی و تنش‌های پس‌ماند استفاده شده‌است [۳].

چیانگ^۶ و چانگ^۷، در سال ۲۰۰۶ میزان جمع‌شدگی و تابیدگی در یک قطعه تزریقی جدار نازک (پوسته گوشه تلفن همراه) از جنس اکریلونیتریل‌بوتادین‌استایرن/پلی‌کربنات را با روش تحلیل واریانس بررسی کرده‌اند و طبق این تحقیق، هنگامی که دمای قالب افزایش یابد، میزان جمع‌شدگی افزایش می‌یابد و در دمای قالب بین ۴۵ تا ۵۵ درجه سانتی‌گراد کمترین مقدار برای تابیدگی قطعه وجود دارد [۴].

وو^۸ و هوانگ^۹، در سال ۲۰۰۶ تأثیر تغییر شکل حفره قالب روی جمع‌شدگی و تابیدگی قطعات گوه‌ای شکل از جنس پلی‌متیل‌متاکریلات^{۱۰} را بررسی کرده‌اند و نشان می‌دهند که دو مشخصه مهم برای جمع‌شدگی یک قطعه تزریقی، فشار فاز تراکم و دمای مذاب هستند که فشار فاز تراکم در این میان مهم‌تر از مشخصه دیگر است [۵].

11- Jie-Ren Shie
12- F. De Santis
13- Industrial Polypropylene-Ethylene-Propylene Rubber
14- Ramon F. Sarraga
15- Volume Morphing
16- Mirigul Altan
17- Polycarbonate
18- Neural Network

1- Screw Speed
2- Holding Pressure
3- Residence Time
4- Residual Stresses
5- Simple Flat Model
6- Ko-Ta Chiang
7- Fu-Ping Chang
8- Cheng-Hsien Wu
9- Yu-Jen Huang
10- Polymethyl Methacrylate

درجه سانتیگراد، فشار تزریق ۶۰ مگاپاسکال، فشار فاز تراکم ۵۰ مگاپاسکال و زمان فاز تراکم یا مکث ۱۵ ثانیه، کمترین جمع‌شدگی برای هر دو ماده پلیمری به دست می‌آید و نشان داده می‌شود که برای هر دو ماده پلیمری، فشار فاز تراکم و دمای مذاب، بیشترین تأثیر و فشار تزریق، کمترین تأثیر را بر میزان جمع‌شدگی دارند [۹].

کورت^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۹ تأثیر شرایط تزریق مانند فشار تزریق، دمای قالب، دمای مذاب و زمان سرد شدن قطعه بر میزان جمع‌شدگی و عدم‌گردی قطعات پلاستیکی را بررسی کرده‌اند و نشان داده‌اند در این میان فشار فاز تراکم و دمای مذاب از مؤثرترین عوامل در تعیین کیفیت قطعات تولیدی می‌باشند [۱۰].

حسن^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۰ در تحقیق دیگری، تأثیر سیستم خنک‌کاری روی میزان جمع‌شدگی یک محصول از جنس پلی‌استایرن^۳ را مدل‌سازی و بررسی کرده‌اند و این نتیجه به دست آمده‌است که میزان جمع‌شدگی قسمت‌های خارجی محصول بیشتر از قسمت‌های داخلی آن است و هم‌چنین موقعیت کانال‌های سیستم خنک‌کاری، تأثیر زیادی روی فرآیند خنک‌کاری محصول پلاستیکی دارد و نتایج کسب‌شده از این مقاله یک تطابق خوب بین روش حل عددی و واقعیت را نشان می‌دهد [۱۱].

طی تحقیقی توسط اچ. اکتیم در سال ۲۰۱۱ شرایط بهینه تزریق برای کمترین میزان جمع‌شدگی کاور دی‌وی‌دی-رم به وسیله روش تاگوچی^۴ بدست آمده‌است و دیده می‌شود میزان جمع‌شدگی به طور معمول با کاهش فشار تزریق و با افزایش دمای قالب، کاهش می‌یابد [۱۲].

در تحقیق دیگری اچ. اکتیم^۵ در سال ۲۰۱۱ شرایط تزریق را برای ارزیابی مشکلات جمع‌شدگی در فرآیند تزریق پلاستیک یک کاور دی‌وی‌دی-رم^۶ از جنس اکریلونیتریل بوتادین استایرن^۷، مدل‌سازی و تحلیل کرده‌است و دیده می‌شود که برای بررسی میزان جمع‌شدگی روش اجزاء محدود^۸ و تحلیل واریانس^۹ روش‌های مناسبی است و دیگر این که جمع‌شدگی با افزایش زمان خنک‌کاری، کاهش و با افزایش فشار تزریق، افزایش می‌یابد [۱۳].

در این تحقیق، به‌منظور بررسی تأثیر ضخامت قطعه بر این پدیده‌ها، با استفاده از نرم‌افزار MOLDFLOW فرآیند تزریق پلاستیک شبیه‌سازی و تحلیل می‌شود. سپس اثر ضخامت قطعه بر دو پدیده جمع‌شدگی و عدم‌گردی بررسی می‌شود. سپس به روش تجربی نیز مقادیر جمع‌شدگی و عدم‌گردی به دست می‌آید و در پایان، نتایج شبیه‌سازی این تحقیق با نتایج تجربی مقایسه می‌شوند.

در صنعت قطعات گرد مختلفی از جنس پلی‌پروپیلن کاربرد دارند و جمع‌شدگی و عدم‌گردی تأثیر زیادی بر کیفیت ابعادی و کاربرد این گونه قطعات دارند و هنوز در مورد تأثیر ضخامت قطعه بر این گونه عیوب تحقیق چندانی نشده‌است. با بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر جمع‌شدگی و عدم‌گردی، در آینده می‌توان در طراحی قطعه و قالب تأثیر پارامترهای مختلف را در نظر گرفته و قطعات با کیفیت بالاتری تولید نمود.

5- H. Oktem
6- DVD-ROM
7- Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)
8- Finite Element Analyse
9 -Analysis of Variance

1- Mustafa Kurt
2- Hamdy Hassan
3- Polystyrene
4- Taguchi Method

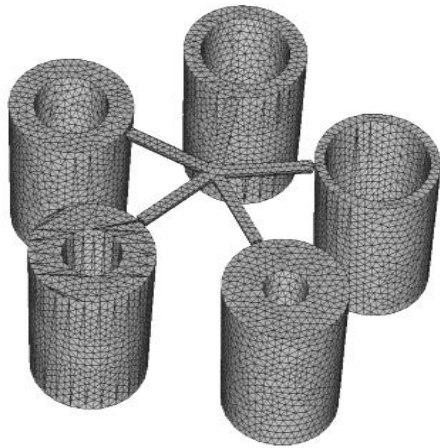
۲- روش کار در این تحقیق

روند انجام این تحقیق به صورت زیر است:

۱-۲- شبیه سازی^۱ فرآیند به کمک کامپیوتر

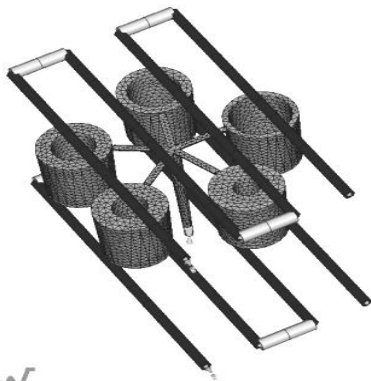
برای انجام این تحقیق، ابتدا شبیه سازی کامپیوتری فرآیند تزریق پلاستیک با نرم افزار MOLDFLOW انجام می شود که با استفاده از این نرم افزار، میزان جمع شدگی و عدم گردی قطعات با ضخامت های مختلف به دست می آید. طراح قالب می تواند قبل از طراحی یک قطعه و قالب آن، فرآیند تزریق و پارامترهای مورد نیاز تزریق و همچنین مشکلات موجود در ساخت قالب ها و عیوب محصولات تولیدی را به کمک کامپیوتر شبیه سازی کند و حتی طرح خود را بهینه سازی نماید.

برای شبیه سازی یک فرآیند تزریق پلاستیک، ابتدا باید قطعه مورد نظر در یکی از نرم افزارهای CAD مدل شود. سپس مدل با پسوند stl یا igs وارد محیط نرم افزار MOLDFLOW شده، با استفاده از دستور Mesh، آن مدل المان بندی می شود. شکل (۱) مدل CAD این نمونه ها و شکل (۲) مدل المان بندی شده نمونه ها را نشان می دهد.



شکل (۲) مدل المان بندی شده نمونه ها در نرم افزار MOLDFLOW

در ادامه ماده ی پلیمری مورد نظر برای تزریق از کتابخانه مواد موجود در نرم افزار MOLDFLOW انتخاب و محلی به عنوان محل تزریق برگزیده می شود. سپس به مدل سازی سیستم خنک کاری و سیستم راه گاهی تزریقی پرداخته می شود و پس از تعیین تنظیمات فرآیند، تحلیل آغاز می شود [۱]. در شکل (۳) مدل سازی سیستم راه گاهی تزریقی و سیستم خنک کاری نمونه ها نشان داده شده است.

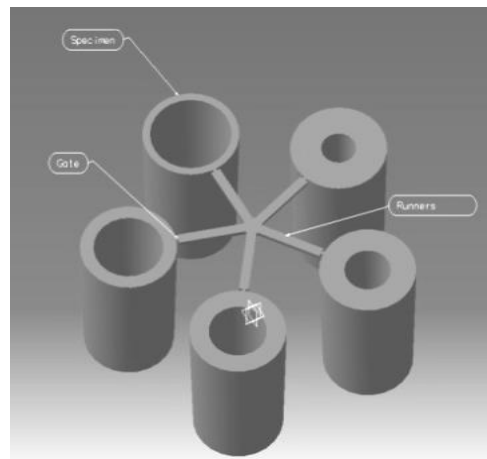


شکل (۳) مدل سازی سیستم راه گاهی تزریقی و سیستم خنک کاری

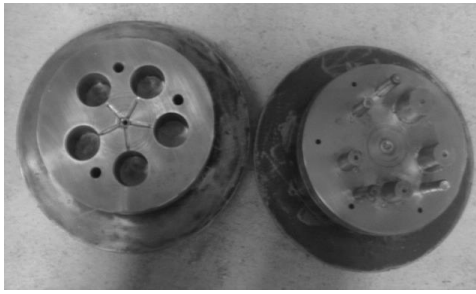
پس از اجرای تحلیل، به بررسی نتایج حاصل از تحلیل پرداخته می شود.

۲-۲ فرآیند ساخت قالب نمونه ها و انجام آزمایش ها

به منظور تحقیق و مطالعه تجربی در فرآیندهای تزریق پلاستیک، چندین مرحله باید دنبال شود. اولین قدم، طراحی و کشیدن نقشه دقیق نمونه ها می باشد. سپس باید طراحی



شکل (۱) مدل طراحی شده نمونه ها در نرم افزار CATIA



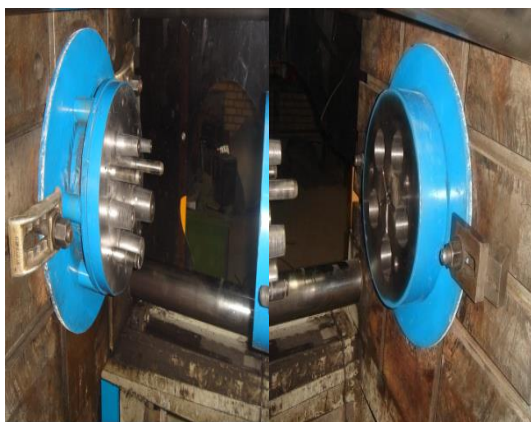
شکل (۶) قالب تزریق ساخته شده جهت تولید نمونه‌ها

سپس با دستگاه تزریق پلاستیک، تولید نمونه‌ها انجام می‌شود. با مراجعه به هندبوک فرآیندهای تولید پلاستیک شرایط آماده‌سازی پلیمر پلی‌پروپیلن و همچنین شرایط قالب‌گیری مانند دمای مذاب و دمای قالب و غیره انتخاب شده و نمونه‌ها تولید می‌شود [۱۴]. (۳۰ ضرب از این قالب تولید کرده و ۵ ضرب از آن انتخاب می‌شود). جدول (۱) پارامترهای ماشین تزریق پلاستیک را حین تولید نمونه‌ها نشان می‌دهد.

جدول (۱) پارامترهای ماشین تزریق پلاستیک حین تولید نمونه‌ها

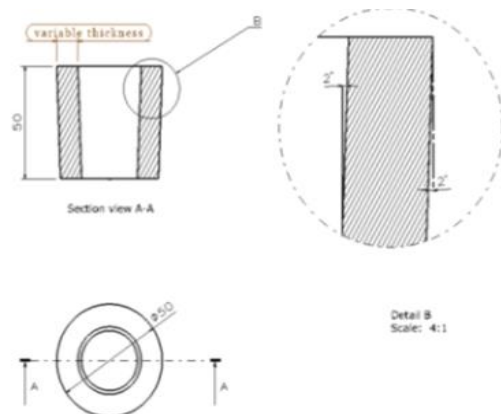
دمای المان‌های اطراف ماردون (درجه سلسیوس)	المنت سر: ۲۰۳	المنت وسط: ۱۹۲
فشار (مگاپاسکال)	فشار تزریق: ۷۲	فشار نگهدارنده: ۴۰
زمان (ثانیه)	زمان تزریق: ۵	زمان بارگیری: ۹
	زمان باز شدن قالب: ۵	زمان خنک‌کاری: ۳۰

شکل (۷) قالب تزریق بسته شده روی ماشین تزریق پلاستیک را نشان می‌دهد.



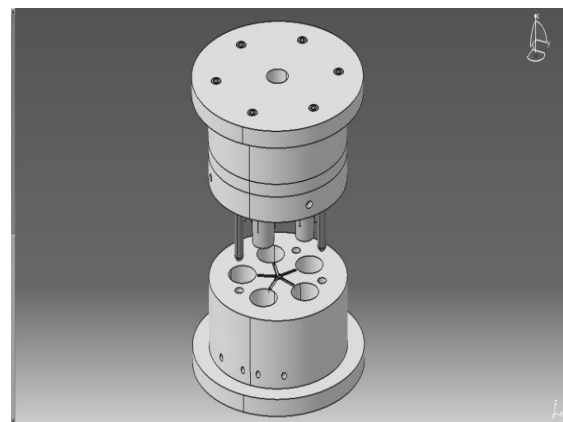
شکل (۷) قالب تزریق بسته شده روی دستگاه تزریق پلاستیک (سمت راست قسمت نری قالب و سمت چپ قسمت مادگی قالب)

قالب تزریق انجام شود. در این تحقیق، برای بررسی تأثیر ضخامت قطعه بر میزان جمع شدگی و عدم گردی، احتیاج به چند نمونه استوانه‌ای توخالی با ضخامت مختلف می‌باشد، که ۵ قطعه استوانه‌ای مختلف (قطعات استوانه‌ای توخالی با قطر خارجی ۵۰ میلی‌متر و ضخامت‌های ۴، ۷، ۱۰، ۱۳ و ۱۶ میلی‌متر) در نظر گرفته می‌شود. در شکل (۴) هندسه و ابعاد نمونه‌ها و همچنین ضخامت نمونه‌ها به صورت ضخامت متغیر (Variable thickness) مشخص شده‌است.



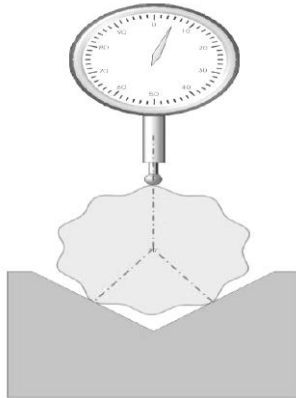
شکل (۴) هندسه و ابعاد نمونه‌ها

در این تحقیق یک قالب پنج حفره‌ای برای تولید نمونه‌ها طراحی می‌شود. جنس اجزاء قالب با مشورت چند قالب‌ساز ماهر از فولاد SPK و CK60 انتخاب می‌شود. شکل (۵) مدل سه‌بعدی قالب تزریق نمونه‌ها و شکل (۶) قالب ساخته شده را نشان می‌دهد.



شکل (۵) مدل سه‌بعدی قالب تزریق پلاستیک نمونه‌ها

برای به دست آوردن میزان عدم گردی از ساعت اندازه گیری با دقت ۰/۰۱ میلی متر و پایه ۷ شکل (جنافی) استفاده می شود (شکل ۹).



شکل (۹) اندازه گیری میزان عدم گردی با استفاده از جنافی و ساعت اندازه گیری

در ادامه داده های شبیه سازی همراه با داده های تجربی به دست آمده از آزمایش ها به نرم افزار Excel فرستاده می شود و این داده ها با یک دیگر مقایسه می شوند.

۳- نتایج

نتایج این تحقیق به دو دسته تقسیم می شود:

۳-۱- نتایج شبیه سازی

نتایج شبیه سازی به دست آمده از این تحقیق به شرح ذیل است:

۳-۱-۱- جمع شدگی حجمی قطعات

در جدول (۲) میزان جمع شدگی حجمی قطعات استوانه ای با ضخامت های ۴، ۷، ۱۰، ۱۳ و ۱۶ میلی متر به صورت درصد بیان شده است. کلیه این داده ها از قسمت نتیجه متنی Results summary برداشت شده است، که این نتیجه متنی پس از اجرای هر تحقیق (Study)، در قسمت Results ایجاد می شود.

شکل (۸) قطعات تولید شده در یک سیکل تولید را همراه با راه گاه های آن نشان می دهد.



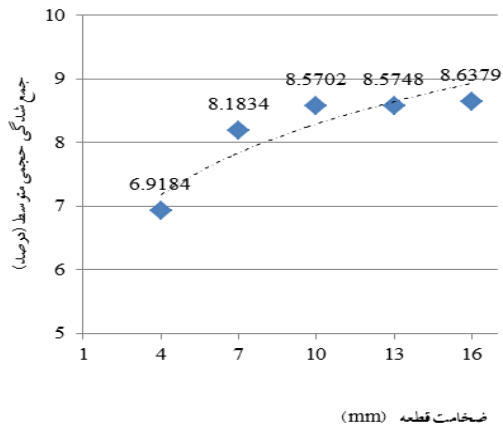
شکل (۸) نمونه های تولید شده از جنس پلی پروپیلن

سپس ابعاد نمونه ها با دستگاه اندازه برداری سه بعدی نوری به دست می آید و میزان جمع شدگی برای هر نمونه محاسبه می شود. به این منظور باید حداقل ۵ نمونه از این قطعات تولید شود و میزان جمع شدگی با معدل گیری این ۵ نمونه به دست می آید. میزان جمع شدگی با استفاده از رابطه (۱) تعیین می شود [۱۴].

$$S = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100 \quad (1)$$

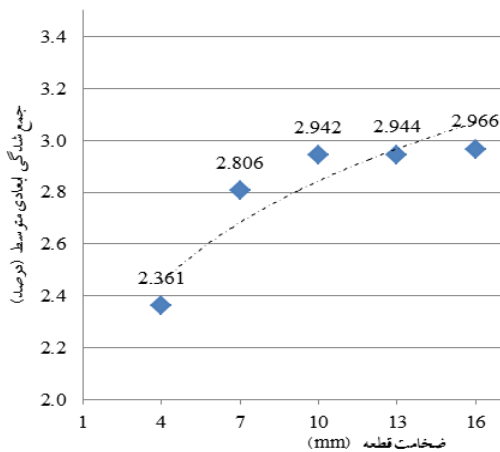
که در آن S میزان جمع شدگی ابعادی (بر حسب in./in. یا mm/mm) و L_f ابعاد قطعه نهایی^۱ (بر حسب in. یا mm) و L_0 ابعاد حفره قالب^۲ (بر حسب in. یا mm) می باشد. اگر در رابطه (۱) به جای L_f طول قطعه قرار داده شود، میزان جمع شدگی طولی به دست می آید و اگر حجم قطعه قرار داده شود، جمع شدگی حجمی به دست می آید. بین جمع - شدگی طولی (S_l) و جمع شدگی حجمی (S_v) رابطه (۲) برقرار می باشد [۱۴].

$$S_l = 1 - (1 - S_v)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$



شکل (۱۲) منحنی تغییرات جمع‌شدگی حجمی متوسط با افزایش ضخامت قطعه

جمع‌شدگی ابعادی طبق رابطه (۲) از روی جمع‌شدگی حجمی به دست می‌آید. در شکل (۱۳) تغییرات میزان جمع‌شدگی ابعادی متوسط برای قطعات، که از مقادیر جدول (۲) و طبق رابطه (۲) به دست آمده است، مشاهده می‌شود. (جمع‌شدگی ابعادی تقریباً معادل یک‌سوم جمع‌شدگی حجمی می‌باشد).



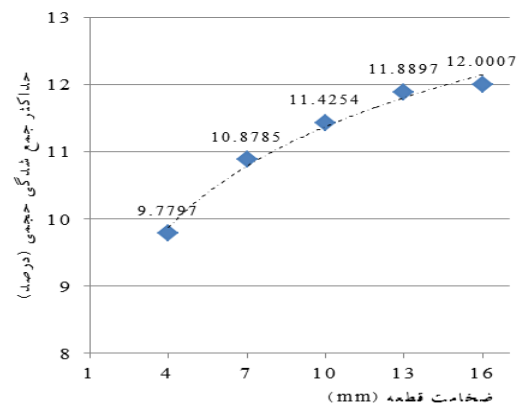
شکل (۱۳) منحنی تغییرات درصد جمع‌شدگی ابعادی متوسط با افزایش ضخامت قطعه

با توجه به شکل (۱۳) دیده می‌شود که با افزایش ضخامت قطعه، میزان جمع‌شدگی ابعادی از ۲/۳۶ درصد برای قطعه استوانه‌ای با ضخامت ۴ میلی‌متر به ۲/۹۷ درصد برای قطعه با ضخامت ۱۶ میلی‌متر می‌رسد.

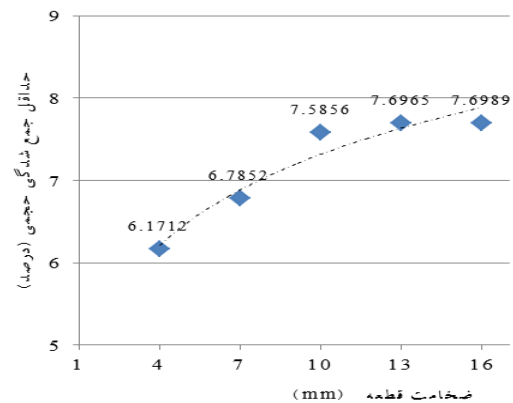
جدول (۲) میزان جمع‌شدگی حجمی قطعات با ضخامت‌های مختلف

ضخامت قطعه استوانه‌ای با قطر خارجی ۵۰ میلی‌متر و زاویه دیواره ۲ درجه	حداقل جمع‌شدگی حجمی (درصد)	جمع‌شدگی حجمی متوسط (درصد)	حداکثر جمع‌شدگی حجمی (درصد)
قطعه با ضخامت ۴ میلی‌متر	۶/۱۷۱۲	۶/۹۱۸۴	۹/۷۷۹۷
قطعه با ضخامت ۷ میلی‌متر	۶/۷۸۵۲	۸/۱۸۳۴	۱۰/۸۷۸۵
قطعه با ضخامت ۱۰ میلی‌متر	۷/۵۸۵۶	۸/۵۷۰۲	۱۱/۴۲۵۴
قطعه با ضخامت ۱۳ میلی‌متر	۷/۶۹۶۵	۸/۵۷۴۸	۱۱/۸۸۹۷
قطعه با ضخامت ۱۶ میلی‌متر	۷/۶۹۸۹	۸/۶۳۷۹	۱۲/۰۰۰۷

شکل‌های (۱۰)، (۱۱)، و (۱۲) به ترتیب نشان‌دهنده نمودارهای مربوط به تغییرات حداکثر جمع‌شدگی حجمی، حداقل جمع‌شدگی حجمی و جمع‌شدگی حجمی متوسط با افزایش ضخامت قطعه می‌باشند.



شکل (۱۰) منحنی تغییرات حداکثر جمع‌شدگی حجمی با افزایش ضخامت قطعه



شکل (۱۱) منحنی تغییرات حداقل جمع‌شدگی حجمی با افزایش ضخامت قطعه

۲-۳- نتایج تجربی جمع‌شدگی و عدم‌گردی

در این بخش نتایج عملی و آزمایشگاهی میزان جمع‌شدگی و عدم‌گردی بررسی می‌شود. در ابتدا برای تولید نمونه‌ها با ماشین تزریق پلاستیک، شرایط تزریق انتخاب می‌شود. زمان خنک‌کاری فرآیند با توجه به بحرانی‌ترین قطعه (قطعه استوانه‌ای با ضخامت ۱۶ میلی‌متر) باید انتخاب شود، تا از تابیدگی و جمع‌شدگی و عدم‌گردی خیلی زیاد جلوگیری شود. بقیه شرایط تزریق طبق جدول (۱) انتخاب می‌شوند.

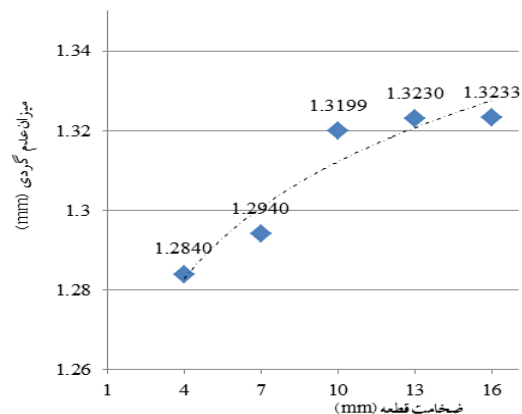
بعد از انتخاب شرایط تزریق، با ماشین تزریق پلاستیک ۳۵۰ گرمی تعداد ۳۰ ضرب از قالب نمونه‌ها تولید و ۵ ضرب از این نمونه‌ها به‌طور تصادفی انتخاب می‌شود. (البته ۱۰ ضرب اول نمونه‌ها کنار گذاشته و این ۵ ضرب انتخابی از بین ۲۰ ضرب بعدی انتخاب می‌شود، چون در ابتدای تولید با دستگاه تزریق، دمای قالب و مذاب پایین است و بعد از چند ضرب تولید، دماها تنظیم می‌شود.)

بعد از انتخاب نمونه‌ها، با دستگاه اندازه‌برداری سه‌بعدی نوری (Optic) از نمونه‌ها عکس‌برداری و فایل ابرنقاط نمونه‌ها با پسوند stl ایجاد می‌شود. این فایل‌ها به‌صورت مستقیم با دستور Open باز نمی‌شوند و باید آن‌ها در نرم‌افزار CATIA محیط Digitized Shape Editor، فراخوانی شوند.

در محیط Digitized Shape Editor از دستور Import استفاده می‌شود. بعد از اجرای دستور پنجره‌ای باز می‌شود که در این پنجره باید فرمت فایل ابرنقاط (بستگی به نوع فایل خروجی Optic دارد، که در اینجا stl انتخاب می‌شود) و محل ذخیره فایل ابرنقاط وارد شده و گزینه Statistics فعال می‌شود تا در صفحه ایجاد شده در پایین پنجره دستور اطلاعاتی شامل مرکز ابرنقاط، تعداد نقاط، طول، عرض و ارتفاع ابرنقاط ایجاد شود و بتوان از روی این اطلاعات ابعاد

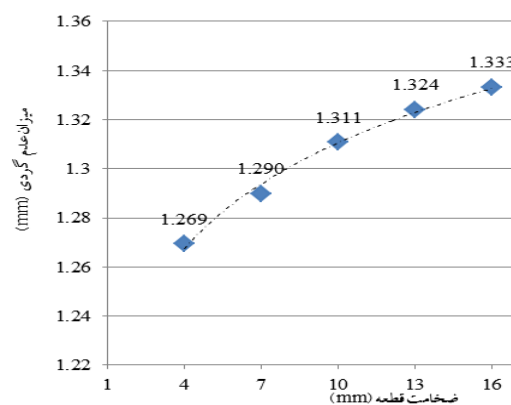
۳-۱-۲- میزان عدم‌گردی قطعات

برای به‌دست آوردن میزان عدم‌گردی قطعات از تحلیل تابیدگی استفاده می‌شود و برای هر قطعه استوانه‌ای، حداکثر مقدار تغییرشکل قطعه کار در دو جهت x و y به‌عنوان میزان عدم‌گردی بیان می‌شود. شکل‌های (۱۴) و (۱۵) به‌ترتیب تغییرات عدم‌گردی قطعات را در دو جهت x و y نسبت به ضخامت این قطعات نشان می‌دهد.



شکل (۱۴) میزان تغییرات عدم‌گردی نسبت به ضخامت قطعه در جهت

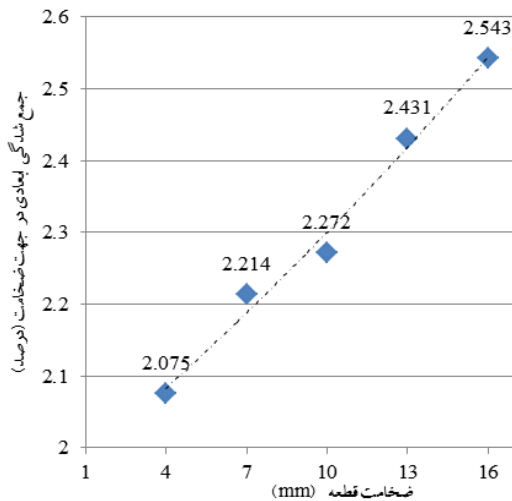
محور x



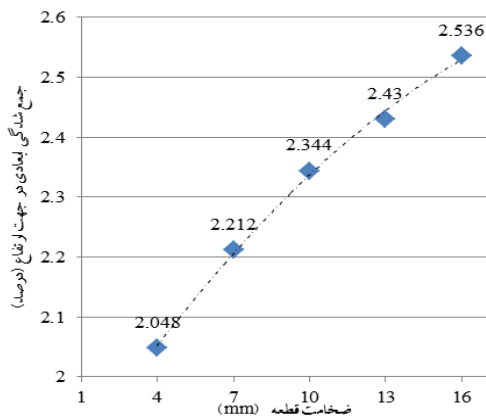
شکل (۱۵) میزان تغییرات عدم‌گردی نسبت به ضخامت قطعه در جهت

محور y

در شکل (۱۴) و (۱۵) نشان داده می‌شود که با افزایش ضخامت قطعات استوانه‌ای، عدم‌گردی آن‌ها افزایش می‌یابد.



شکل (۱۶) نمودار تجربی تغییرات جمع‌شدگی ایجابی در جهت ضخامت، نسبت به ضخامت قطعه



شکل (۱۷) نمودار تجربی تغییرات جمع‌شدگی ایجابی در جهت ارتفاع، نسبت به ضخامت قطعه

حال با استفاده از جناقی و ساعت اندازه‌گیری، میانگین مقادیر تجربی عدم‌گردی قطعات به‌دست آورده می‌شود و برای هر قطعه، ساعت اندازه‌گیری را در امتداد طول قطعه حرکت داده و بیشترین انحراف عقربه ساعت اندازه‌گیری ثبت می‌شود. این کار ۸ بار به‌ازای هر ۴۵ درجه چرخش قطعه کار تکرار می‌شود و در این میان بیشترین انحراف عقربه ساعت، میزان عدم‌گردی قطعه مورد اندازه‌گیری محسوب می‌شود. این عمل را برای پنج نمونه از هر ضخامت تکرار نموده و میانگین این داده‌ها محاسبه می‌شود. جدول (۵) میانگین مقادیر تجربی عدم‌گردی قطعات را با ضخامت‌های مختلف نشان می‌دهد و شکل (۱۸) نمودار

نمونه‌ها را به‌دست آورد. در این پنجره واحد فایل میلی‌متر و مقیاس بزرگ‌نمایی آن ۱ در نظر گرفته می‌شود. حال باید با استفاده از رابطه (۱) و ابعاد ابرنقاط به‌دست آمده نمونه‌ها، مقادیر جمع‌شدگی ایجابی محاسبه شود. در جدول (۳) میزان تجربی میانگین ابعاد قطعات و در جدول (۴) مقادیر جمع‌شدگی ایجابی تجربی به‌دست آمده به‌صورت درصد مشاهده می‌شود.

جدول (۳) میزان تجربی میانگین ابعاد قطعات با ضخامت‌های مختلف

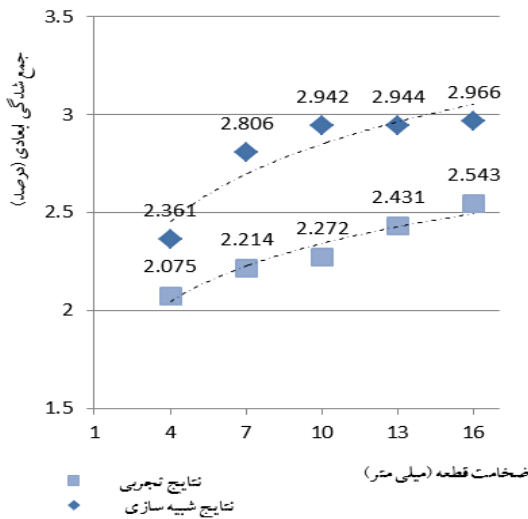
میانگین ارتفاع نمونه‌ها (میلی‌متر)	میانگین ضخامت نمونه‌ها (میلی‌متر)	ضخامت قطعه استوانه‌ای با قطر خارجی ۵۰ میلی‌متر و زاویه دیواره معادل ۲ درجه
۴۸/۹۷۶	۳/۹۱۷	قطعه با ضخامت ۴ میلی‌متر
۴۸/۸۹۴	۶/۸۴۵	قطعه با ضخامت ۷ میلی‌متر
۴۸/۸۲۸	۹/۷۷۳	قطعه با ضخامت ۱۰ میلی‌متر
۴۸/۷۸۵	۱۲/۶۸۴	قطعه با ضخامت ۱۳ میلی‌متر
۴۸/۷۳۲	۱۵/۵۹۳	قطعه با ضخامت ۱۶ میلی‌متر

جدول (۴) مقادیر تجربی جمع‌شدگی خطی قطعات با ضخامت‌های مختلف به صورت درصد

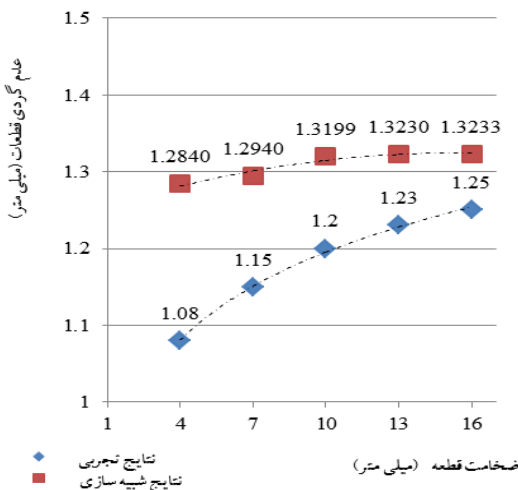
جمع‌شدگی ایجابی در جهت ارتفاع (درصد)	جمع‌شدگی ایجابی در جهت ضخامت (درصد)	ضخامت قطعه استوانه‌ای با قطر خارجی ۵۰ میلی‌متر و زاویه دیواره معادل ۲ درجه
۲/۰۴۸	۲/۰۷۵	قطعه با ضخامت ۴ میلی‌متر
۲/۲۱۲	۲/۲۱۴	قطعه با ضخامت ۷ میلی‌متر
۲/۳۴۴	۲/۲۷۰	قطعه با ضخامت ۱۰ میلی‌متر
۲/۴۳۰	۲/۴۳۱	قطعه با ضخامت ۱۳ میلی‌متر
۲/۵۳۶	۲/۵۴۳	قطعه با ضخامت ۱۶ میلی‌متر

شکل‌های (۱۶) و (۱۷) به‌ترتیب نمودارهای تجربی تغییرات جمع‌شدگی خطی نمونه‌ها در جهت ضخامت و در جهت ارتفاع نسبت به ضخامت این قطعات را نشان می‌دهد.

شکل (۲۰) نیز مقایسه نمودار نتایج شبیه سازی و نتایج تجربی عدم گردی آورده شده است و اختلاف بین این دو نمودار نیز به خاطر تفاوت در شرایط شبیه سازی با واقعیت می باشد. در دو شکل (۱۹) و (۲۰) دیده می شود که اختلاف بین مقادیر تجربی با مقادیر شبیه سازی در ضخامت های بالاتر، کمتر شده و این مقادیر به هم نزدیک می شوند و دیگر این که مقادیر تجربی به مقادیر موجود در هندبوک ها و منابع نزدیک تر است.



شکل (۱۹) مقایسه نتایج شبیه سازی و تجربی جمع شدگی ابعادی قطعات نسبت به ضخامت قطعه



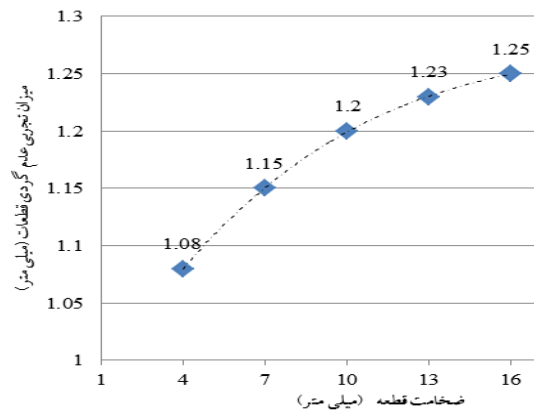
شکل (۲۰) مقایسه نتایج شبیه سازی و تجربی عدم گردی قطعات نسبت به ضخامت قطعه

تغییرات میانگین میزان تجربی عدم گردی قطعات را نسبت به ضخامت قطعه نشان می دهد.

جدول (۵) میانگین مقادیر تجربی عدم گردی قطعات با ضخامت های

مختلف با استفاده از ساعت اندازه گیری و جنافی

میانگین مقادیر تجربی عدم- گردی قطعات (میلی متر)	ضخامت قطعه استوانه ای با قطر خارجی ۵۰ میلی متر و زاویه دیواره معادل ۲ درجه
۱/۰۸	قطعه با ضخامت ۴ میلی متر
۱/۱۵	قطعه با ضخامت ۷ میلی متر
۱/۲۰	قطعه با ضخامت ۱۰ میلی متر
۱/۲۳	قطعه با ضخامت ۱۳ میلی متر
۱/۲۵	قطعه با ضخامت ۱۶ میلی متر



شکل (۱۸) نمودار تجربی تغییرات میانگین عدم گردی نمونه ها با استفاده از ساعت اندازه گیری و جنافی، نسبت به ضخامت قطعه

در این بخش می توان دید که با افزایش ضخامت قطعه، جمع شدگی ابعادی و میزان عدم گردی افزایش می یابد.

۳-۳- مقایسه نتایج شبیه سازی و تجربی

در این قسمت نتایج شبیه سازی با نتایج تجربی مقایسه می شود. در شکل (۱۹) نمودار میزان تجربی جمع شدگی ابعادی با نمودار میزان به دست آمده از شبیه سازی کامپیوتری مقایسه می شود و اختلاف بین داده های این دو نمودار به دلیل تفاوت بین شرایط شبیه سازی با واقعیت است. مثلاً در انتخاب مواد پلیمری، دستگاه تزریق پلاستیک و دیگر شرایط تفاوت های قابل ملاحظه ای وجود دارد و نمی توان دقیقاً شرایط تجربی را با شرایط شبیه سازی تطابق داد. در

۴- نتیجه‌گیری

همان‌گونه که از نتایج تجربی و شبیه‌سازی این تحقیق استنباط می‌شود، میزان جمع‌شدگی و عدم‌گردی با افزایش ضخامت، افزایش می‌یابد و دلیل آن این است که با افزایش ضخامت، قطعه هنگام بیرون آمدن آن از قالب دمای بیشتری داشته و ماده مذاب پلیمری آهسته‌تر سرد می‌شود؛ بنابراین ذرات ماده فرصت بیشتری برای تشکیل بلور دارند و این امر منجر به بلورینگی بیشتر ماده می‌شود و ساختار ماده فشرده‌تر شده و جمع‌شدگی مواد بیشتر می‌شود و عدم‌گردی بیشتر مواد با افزایش ضخامت قطعه نیز به‌همین دلیل است [۱].

یعنی منشأ عیوبی مانند جمع‌شدگی و عدم‌گردی، حرارت و مشکلات ناشی از عدم کنترل سیستم خنک‌کاری است.

جمع‌شدگی و عدم‌گردی عیب‌هایی هستند که در فرآیند تزریق پلاستیک کیفیت قطعات تولیدی را تحت تأثیر قرار می‌دهند و برای به‌کنترل درآوردن این عیوب باید عوامل تأثیرگذار بر این دو عیب بررسی شود. در این تحقیق تأثیر متغیر ضخامت قطعه بر این دو عیب بررسی می‌شود و این نتیجه گرفته می‌شود که با افزایش ضخامت قطعه، این دو عیب افزایش می‌یابند. برای مقاصد طراحی قالب تزریق پلاستیک، باید این مسئله در نظر گرفته شود و میزان جمع‌شدگی قطعه فقط براساس نوع ماده پلیمری و جداول مربوط به میزان جمع‌شدگی در منابع موجود انتخاب نشود. طراحان محصول ضخامت قطعه را بر اساس کاربرد قطعه تعیین می‌کنند و بی‌جهت نمی‌توان ضخامت قطعه را بدون در نظر گرفتن ملاحظات طراحی کاهش داد، ولی بعضی اوقات می‌توان کاهش ضخامت قطعه را با اضافه کردن برجستگی‌های تقویت‌کننده^۱ در قطعه جبران کرد و قطعاتی با ضخامت کمتر و با استحکام بالایی طراحی کرد و یا در قطعات استوانه‌ای جدارضخیم، به‌جای افزایش ضخامت

قطعه می‌توان دیواره ضخیم این‌گونه قطعات را به‌صورت توخالی و مشبک طراحی کرد تا میزان جمع‌شدگی و عدم‌گردی در این قطعات کاهش یابد. پیشنهاد دیگر این است که برای تولید قطعات استوانه‌ای و گرد به‌منظور جلوگیری از عدم‌گردی بیشتر در این‌گونه قطعات باید در حین تولید و باز شدن قالب و بیرون افتادن قطعه از داخل قالب، قطعات به‌طور یکنواخت و سریعتر از معمول سرد شود. برای این کار می‌توان محفظه‌های آب سرد در اختیار اپراتور دستگاه تزریق قرار داد و هنگام بیرون آمدن قطعه از داخل قالب، آن‌ها را تماماً داخل آب سرد غوطه‌ور کرد. این کار بسیاری از عیب‌های قطعه مانند عدم‌گردی و تابیدگی قطعات را کاهش می‌دهد؛ البته با این کار مقدار کمی تنش پسماند در قطعه تولیدی باقی می‌ماند ولی کیفیت قطعه را کمی بالا می‌برد.

همچنین با استفاده از نتایج این تحقیق می‌توان به یک دستورالعمل نسبی در مورد ارتباط بین میزان درصد افزایش جمع‌شدگی و عدم‌گردی با میزان افزایش درصد ضخامت قطعه دست یافت و در هنگام طراحی حفره‌های قالب با توجه به درصد افزایش ضخامت قطعه، میزان افزایش درصد جمع‌شدگی و عدم‌گردی را در نظر گرفت (جدول (۶)).

جدول (۶) دستورالعمل نسبی و تقریبی برای میزان افزایش درصد جمع‌شدگی و عدم‌گردی نسبت به افزایش درصد ضخامت قطعه (میانگین مقادیر تجربی و شبیه‌سازی درصد افزایش جمع‌شدگی و عدم‌گردی نسبت به افزایش درصد ضخامت قطعه)

افزایش ضخامت قطعه (درصد)	افزایش میزان عدم‌گردی (درصد)	افزایش میزان جمع‌شدگی (درصد)
۷۵	۳/۶	۱۲/۵
۱۵۰	۷	۱۶/۷
۲۲۵	۸/۵	۲۰/۶
۳۰۰	۹/۴	۲۳/۷

- industrial polypropylene injection molded parts: experiments and analysis, *Springer/esaform*, 2008, vol. 1, 2008, pp. 719-722.
- [8] Sarraga R. F., Oetjens T. J., Foss P. H., Leblanc P. A., Using volume morphing to compensate shape distortions associated with injection molding, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, vol. 26, 2009, pp. 129-135.
- [9] Altan M., Reducing shrinkage in injection moldings via the Taguchi, ANOVA and neural network methods, *ELSEVIER*, vol. 31, 2009, pp. 599-604.
- [10] Kurt M., Kaynak Y., Kamber O. S., Mutlu B., Bakir B., Koklu U., Influence of molding conditions on the shrinkage and roundness of injection molded parts, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, vol. 46, 2009, pp. 571-578.
- [11] Hassan H., Regnier N., Pujos C., Arquis E., Defaye G., Modeling the effect of cooling system on the shrinkage and temperature of the polymer by injection molding, *ELSEVIER*, No. 30, 2010, pp. 1547-1557.
- [12] Oktem H., 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*, 2011, vol. 61, 2011, pp. 519-528.
- [13] Oktem H., Modeling and Analysis of Process Parameters for Evaluating Shrinkage Problems During Plastic Injection Molding of a DVD-ROM Cover, *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 21, 2011, pp. 25-32.
- [14] Harper C. A., *Handbook of Plastic Processes*, Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2006.

فهرست علائم

S	جمع شدگی ابعادی
L_f	ابعاد قطعه نهایی
L_o	ابعاد حفره قالب
S_l	جمع شدگی طولی
S_v	جمع شدگی حجمی

مراجع

- [۱] آیت الهی، م.، غفوری آهنگر، ر. و صداقت، ا.، فرایند تزریق پلاستیک شبیه سازی به کمک نرم افزار MOLDFLOW به همراه چند مثال صنعتی، تهران، جهاد دانشگاهی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۹، ۲۶۰ صفحه.
- [۲] کرافورد، آر. جی.، /کوکبی، م.، مهندسی پلاستیک، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، مرکز نشر آثار علمی، ۱۳۸۵، ۶۹۵ صفحه.
- [3] Jafarian A. R., Shakeri M., Investigating the Influence of Different Process Parameters on Shrinkage of Injection-molded Parts, *American Journal of Applied Sciences*, vol. 2(3), 2005, pp. 688-700.
- [4] Chiang K.T., Chang F.P., 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*, 2006, vol. 35, 2006, pp. 468-479.
- [5] Wu C.-H., Huang Y.-J., The influence of cavity deformation on the shrinkage and warpage of an injection-molded part, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2006, vol. 32, 2006, pp. 1144-1154.
- [6] Shie J.-R., Optimization of injection molding process for contour distortions of polypropylene composite components by a radial basis neural network, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, vol. 36, 2007, pp. 1091-1103.
- [7] Santis F. D., Pantani R., Speranza V., Titomanlio G., As-molded shrinkage on

