مجله مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1396، دوره 17، شماره 12، ص‌ص 21-32

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی کیفیت هندسی و نوری لنز کروی دوبر محدب تولیدشده به روش تزریق پلاستیک

حامد برقی‌کار[1]، پیمان مصدق[2*]، مهدی رنجبر[3]، محمود معصومی[4]

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
3- دانشیار، فیزیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
4- استادیار، مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
* اصفهان، صندوق‌پستی 8415683111، mosadegh@cc.iut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 12 مرداد 1396
پذیرش: 20 مهر 1396
ارائه در سایت: 10 آذر 1396

کلید واژگان:
تزریق پلاستیک
لنز
انقباض
پیچیدگی
ضریب شکست

چکیده

این پژوهش به بررسی تأثیر پارامترهای تزریق بر کیفیت هندسی و اپتیکی لنزهای کروی دوبر محدب، تزریق‌شده با پلیمر آمورف پلی‌متیل متاکریلات پرداخته است. آن‌چه حائز اهمیت است، میزان تأثیرگذاری هر پارامتر بر کیفیت هندسی و اپتیکی لنز و به دست آوردن مقادیر بهینه برای تزریق است. براساس نتایج این پژوهش عوامل تأثیرگذار به صورت هم‌زمان بر کیفیت هندسی و کیفیت اپتیکی این نوع لنزها به ترتیب عبارت از دمای مذاب، زمان نگهداری، فشار تزریق و فشار نگهداری است. این عوامل مشخص می‌کند کنترل هم‌زمان فشار به ویژه در گودی قالب هم در مرحله تزریق و هم در مرحله نگهداری می‌تواند نشان‌دهنده یک تزریق مناسب با حداقل خطاهای اپتیکی باشد. بر طبق داده‌های به‌دست‌آمده بررسی انقباض حجمی میانگین به تنهایی معادل 5.847% که در این حالت ضریب شکست معادل 7.12E-05 است. تحلیل کمیت ضریب شکست به تنهایی معادل 6.28E-05 است. در این حالت حداقل میانگین انقباض حجمی 9.1% است؛ بنابراین بهینه کردن و به حداقل رساندن یکی از عامل‌های هندسی یا نوری به تنهایی سبب به وجود آمدن مقادیر مناسبی از عامل دیگر نخواهد بود. با استفاده از الگوریتم تاگوچی چندپاسخه سطح بهینه‌ای حاصل شد که در آن حداقل میانگین انقباض حجمی 5.503% و حداقل ضریب شکست برابر 6.96E-05 است.

Investigation and simulation of geometric and optical quality for bi-convex lens produced by injection molding process

Hamed Barghikar[1], Peiman Mosaddegh[1*], Mehdi Ranjbar[2], Mahmood Masoumi[3]

1- Mechanical Engineering Department, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
2- Physics Department, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
3- Chimical Engineering Department, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
* P.O.B. 8415683111, Isfahan, Iran, mosadegh@cc.iut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 03 August 2017
Accepted 12 October 2017
Available Online 01 December 2017

Keywords:
Injection Molding
Lens
Shrinkage
Warpage
Refractive Index

ABSTRACT

This study investigates the effect of injection parameters on the geometric and optical quality of a Bi-convex lens injected with PMMA polymer. An important part of this research is the effect of each parameter on the geometric and optical quality of the lens and the obtaining of optimal quantities for injection. According to the results of this study, the effective factors simultaneously on the geometric quality and the optical quality of these types of lenses are melt temperature, packing time, injection pressure and packing pressure, respectively. These factors indicate that the simultaneous control of the pressure, in the mold cavity both during the injection and at the packing stage, can represent a suitable injection with minimal optical errors. According to the collected data, the average volumetric shrinkage check is 5.847% singly, in this case the refractive index is equivalent to 7.12E-05. The refractive index analysis is 6.28E-05 singly. In this case, the minimum average volume contraction is 9.1%. Therefore, optimizing and minimizing one of the geometric or optical factors will not produce the proper values of the other factor. Using the multi response Taguchi method, is obtained the minimum average volumetric shrinkage is 5.503% and the minimum refractive index is 6.96E-05.

1- مقدمه

در اغلب تجهیزات الکترواپتیکی مانند تلفن‌های همراه، تبلت‌ها و لپ‌تاپ‌ها، لنزهای کروی پلاستیکی استفاده شده است. این لنزها به فرم هندسی کلی، قطاعی از یک کره با شعاع مشخص است. تزریق پلاستیک یکی از عمده روش‌های تولید این لنزهاست. تزریق پلاستیک روشی جهت شکل‌دهی مذاب پلیمر درون گودی قالب است که پارامترهای زیادی بر کیفیت قطعه تزریق‌شده نهایی اثرگذار خواهد بود. این پارامترها از ماده اولیه و کیفیت ساخت قالب تا پارامترهای تنظیمی بر دستگاه تزریق می‌تواند قابل تغییر باشد. تولید در حجم انبوه و قیمت تمام شده پایین در تولید لنزهای اپتیکی از اهداف صنایع نوری است [1].

وابستگی پیچیده‌ای بین پارامترهای تنظیمی فرآیند تزریق پلاستیک با مشخصه‌های شناختی و کیفیتی در لنزهای کروی و غیرکروی قالب‌گیری

Please cite this article using: **برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:**
H. Barghikar, P. Mosaddegh, M. Ranjbar, M. Masoumi, Investigation and simulation of geometric and optical quality for bi-convex lens produced by injection molding process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 12, pp. 21-32, 2018 (in Persian)

شده به روش تزریق پلاستیک وجود دارد. مشخصه‌هایی نظیر اعوجاج (پیچیدگی)[۱]، انقباض[۲]، تنش پسماند[۳]، انکسار مضاعف، شکل کانتور و یا پروفیل لنز و سینک مارک[۴] (شیارهای حین سرد شدن). تاکنون آزمایش‌های مختلفی در خصوص پارامترهای تنظیمی چون نرخ جریان پرشدگی قالب[۵]، زمان پر شدن قالب[۶]، سرعت تزریق[۷]، دمای ذوب[۸]، دمای قالب[۹]، فشار نگهداری[۱۰] و زمان خنک‌کاری[۱۱] صورت گرفته است. قطعات و قالب‌های دقیق وابستگی شدیدی به عوامل بالا دارند که می‌توان با تنظیم شرایط تطابق آن‌ها را با ایده‌آل‌ترین شکل لنز تا حد زیادی کنترل کرد [2]. آن‌چه که در این پژوهش دنبال می‌شود پیدا کردن سطح بهینه‌ای از تعداد 7 عامل در 3 سطح متفاوت تزریق جهت دستیابی به کیفیت مناسب لنز دوبر محدب هم از لحاظ هندسی و هم اپتیکی است. این سطح بهینه دارای اطلاعات فشاری و دمایی در داخل گودی قالب که این اطلاعات در نهایت با سطح بهینه منطبق شده است. این انطباق می‌تواند کاربر دستگاه تزریق را حین تولید لنز از کیفیت مناسب آن آگاه سازد. این اطلاعات می‌تواند از طریق سنسورهای فشار- دما که در داخل گودی قالب می باشند به صورت تزریق هم‌زمان دریافت گردد. در خصوص بررسی هندسی لنزهای کروی پژوهش‌هایی صورت گرفته از جمله بررسی سطح بهینه لنز مقعر- مقعر با وجود سه عامل سرعت تزریق، فشار نگهداری و دمای قالب در دو سطح متفاوت [3] . پژوهش دیگری در خصوص کیفیت هندسی لنز یک بر محدب برای یافتن سطح بهینه‌ای از پارامترها با تعداد 8 عامل در 3 سطح مختلف به صورت ترکیبی انجام گرفته است [4]. تحقیق دیگری به بررسی هندسی لنز یک‌بر و دوبر محدب به صورت تزریق هم‌زمان با تغییر پارامترهای تزریق پرداخته است و سپس مقادیر قله به دره[12]سطح اندازه‌گیری شده و در نهایت الگویی جهت بهبود کیفیت در تولید لنزها ارائه شده است [5]. در خصوص سایر پارامترهای غیروابسته به پارامترهای تزریق (وابسته به قالب) مانند هندسه[۱۳] ورودی ماده مذاب به قالب نیز تحقیقاتی انجام‌شده است [6]. بررسی کیفیت نوری لنز می‌تواند به بررسی انکسار مضاعف و یا تغییرات ضریب شکست منجر شود. انکسار مضاعف از خصوصیات پلیمرهای آمورف (بی‌شکل) و تحت تأثیر مستقیم تنش‌هاست [7].

شیوه انجام این پژوهش بر مبنای شکل 1 است. در ابتدا طراحی آزمایش به شیوه تاگوچی انجام شده است. سپس با توجه به آن شبیه‌سازی‌های پیچیدگی و میانگین انقباض حجمی لنز صورت پذیرفته است. داده‌های حاصل از این شبیه‌سازی‌ها مورد تحلیل *S/N* قرار گرفته و روند نمودارهای دما- فشار داخل گودی قالب مقایسه شده است. موارد یاد شده تحلیل هندسی لنز است. در ادامه ضریب شکست به عنوان یک عامل مهم در تحلیل اپتیکی لنز وارد شده و پس از بررسی در نهایت پیشنهادی برای یک لنز با کیفیت ارائه خواهد شد.

2- روش انجام تحقیق

شکل 2 و جدول 1 فرم کلی هندسه لنز دوبر محدب موردبحث را نشان می‌دهد. پارامترهای تزریق پلاستیک در این پژوهش که شامل دمای مذاب، دمای قالب، فشار تزریق، زمان تزریق، فشار نگهداری، زمان نگهداری و زمان خنک کاری است، در سه سطح در جدول 2 نشان داده شده است. ماده پلیمری از سری پلیمرهای شفاف آمورف (بی‌شکل) به نام پلی‌متیل متاکریلات[۱۸] است. روش تحلیل استفاده از الگوی آرایه‌ای متعامد تاگوچی L_{18} با 18 آزمایش است. تحلیل‌های میانگین انقباض حجمی[۱۹] و اعوجاج با

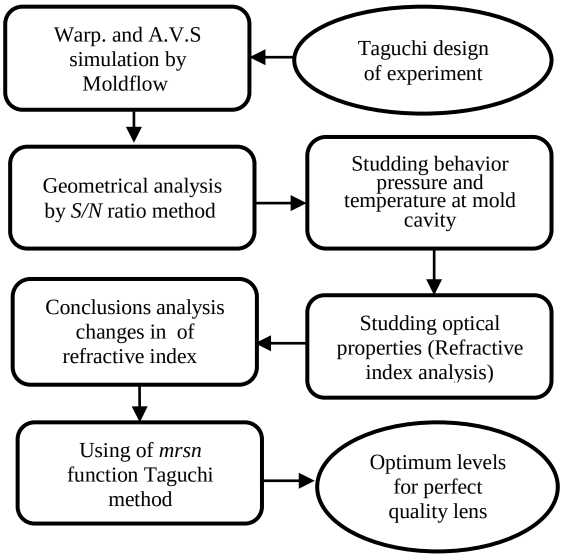

Fig. 1 The analysis steps of this research

شکل 1 مراحل انجام و بررسی این پژوهش

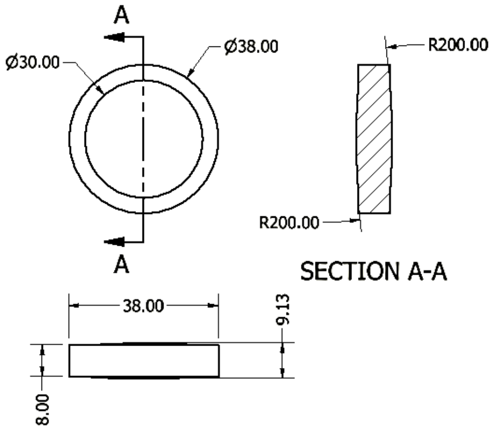

Fig. 2 Geometric of Bi-convex lens analyzed in this research

شکل 2 پارامترهای لنز دوبر محدب مورد استفاده در این تحقیق

جدول 1 مقادیر عددی پارامترهای لنز دوبر محدب

Table 1 Geometrical parameters for Bi-Convex Lens

نوع لنز	ضخامت مرکز لنز[۱۴] (میلی‌متر)	قطر لنز[۱۵] (میلی‌متر)	شعاع انحنای لنز[۱۶] (میلی‌متر)	فاصله کانونی[۱۷] مؤثر (میلی‌متر)
دوبر محدب	9.13	38	200 (هردوبر)	205.63

[1] Warpage(Deflection)
[2] Shrinkage
[3] Residual Stress
[4] Sink Mark
[5] Filling flow rate
[6] Filling time
[7] Injection velocity
[8] Melt temperature
[9] Mold temperature
[10] Packing pressure
[11] Cooling time
[12] Peak to Valley (P.V)
[13] Gate
[14] Center thickness
[15] Lens diameter
[16] Radius curvature
[17] Effective focal length
[18] PMMA- Sumipex HT55X
[19] Average Volumetric Shirinkage (A.V.S)

جدول 2 مقادیر در نظر گرفته‌شده برای پارامترهای تزریق

Table 2 Factors and levels considered for analysis

عامل‌ها	سطح 1	سطح 2	سطح 3
دمای مذاب (درجه سانتی‌گراد)[1]	230	240	250
دمای قالب(درجه سانتی‌گراد)[2]	60	70	80
فشار تزریق(مگا پاسکال)[3]	70	75	80
زمان تزریق (ثانیه)[4]	7.5	8.5	9.5
فشار نگه‌داری (مگا پاسکال)[5]	75	80	85
زمان نگه‌داری (ثانیه)[6]	4	5	6
زمان خنک کاری(ثانیه)[7]	100	150	200

نرم‌افزار مولدفلو[8] انجام شده است. تحلیل‌های تاگوچی با نرم‌افزار مینی‌تب[9] انجام شده است.

2-1- روش انتخاب سطوح

در خصوص انتخاب سطوح، میانگینی از مقادیر بر مبنای تحلیل‌های اولیه مورد استفاده قرار گرفته و براساس آن‌ها سطوح انتخاب شده است. سطوح دمای مذاب پلیمر بر مبنای برگه اطلاعات پلیمر (240-230 سانتی‌گراد) و پیشنهاد نرم‌افزار مولدفلو (240 سانتی‌گراد) است. دمای قالب بر مبنای پیشنهاد مولدفلو (70 درجه سانتی‌گراد) و مقالات انتخاب شده است [2,1]. سطوح فشار تزریق و مدت زمان آن با بررسی تحلیل‌های اولیه در خصوص سرعت پرشدن قالب صورت گرفته است. دستگاه تزریق پلاستیکی در نظر گرفته شده که تا اندازه اسمی 80 سانتی‌متر مکعب بر ثانیه سرعت تزریق دارد. با توجه به محاسبه‌های اولیه می‌توان نتیجه گرفت اگر از 50% ظرفیت این بارگذاری استفاده شود هر دو حفره را می‌توان نزدیک به یک ثانیه پر نمود. نتایج این تحلیل عدم یکنواختی در پرشدگی و تغییرات انقباض حجمی در حفره‌ها را نشان می‌دهد. شکل‌های 3 و 4 در زیر مقایسه بین دو وضعیت پرشدگی در 1 و 7.5 ثانیه را نشان می‌دهد؛ بنابراین سطوح زمان پرشدگی این عدد و بزرگ‌تر در نظر گرفته شده است.

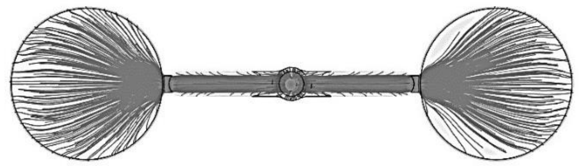

Fig. 3 Material flow at the filling time in 1 second

شکل 3 جریان مواد در مدت‌زمان پر شدن 1 ثانیه

Fig. 4 Material flow at the filling time in 7.5 second

شکل 4 جریان مواد در مدت‌زمان پر شدن 7.5 ثانیه

[1] Melt Temperature (A)
[2] Mold Temperature (B)
[3] Injection Pressure (C)
[4] Injection Time (D)
[5] Packing Pressure (E)
[6] Packing Time (F)
[7] Cooling Time (G)
[8] Moldflow Insight2016
[9] Minitab 17

سطوح فشار تزریق بین 65% تا 75% ظرفیت فشار بیشینه دستگاه تزریق (120 مگا پاسکال) انتخاب‌شده است. این فشار تزریق برای هماهنگی پرشدگی دو حفره، بر اساس تحلیل انجام‌شده اولیه، حدود 7 ثانیه به طول خواهد انجامید. سطوح فشار نگهداری و مدت‌زمان آن بر مبنای فشار تزریق و پرشدن قطعه به صورت 100% انتخاب‌شده است. به‌عبارت‌دیگر زمان نگهداری اولاً وقتی شروع می‌شود که حفره‌ها 100% پرشده باشند و ثانیاً دریچه ورودی مذاب پلیمر به حفره قالب مسدود گردد. نیز بر اساس نتایج تحلیل اولیه مدت‌زمانی در حدود 200 ثانیه طول می‌کشد تا قطعه 100% لایه‌های آن منجمد شود و به زیر دمای شیشه‌ای[10] برسد که مبنای انتخاب سطوح خنک کاری نیز همین تحلیل‌هاست.

تعداد کل آزمایش‌های مورد نیاز برای انجام موارد بالا به صورت کامل[11] برابر است با $3^7 = 2187$ که انجام این تعداد آزمایش عملاً امکان‌پذیر نیست. در این تحقیق از روش تاگوچی استفاده شده است. براساس تعریف تا گوچی و ارائه آرایه‌های متعامد[12] استاندارد از آرایه متعامد L_{18} با تعداد 18 آزمایش برای هر عدسی براساس جدول 3 درمجموع 18 آزمایش، استفاده می‌کنیم. آرایه متعامدL_{18} در حقیقت یک آرایه با بیشینه 8 عامل است که 7 عدد از این عوامل 3 سطحی و یکی از آن‌ها می‌تواند 2 سطحی باشد. از آن‌جا که عامل دوسطحی در طرح این مسأله وجود ندارد، ستون دوسطحی آرایه L_{18} مورداستفاده قرار نمی‌گیرد که در جدول 3 مشخص شده است.

2-2- مشخصات و خصوصیات فیزیکی- اپتیکی و ترمومکانیکال پلیمر

ماده پلیمری در نظر گرفته‌شده در این پروژه پلی‌متاکریلیت از شرکت شی‌می سنگاپور است [8]. خواص این ماده پلیمری با توجه به برگه خصوصیات ماده

جدول 3 آزمایش‌های پیشنهادی در آرایه L18 تاگوچی

Table 3 Taguchi design of experiment for L18 orthogonal array

عوامل آزمایش‌ها	استفاده نشده	A	B	C	D	E	F	G
شماره 1	1	1	1	1	1	1	1	1
شماره 2	1	1	2	2	2	2	2	2
شماره 3	1	1	3	3	3	3	3	3
شماره 4	1	2	1	1	2	2	3	3
شماره 5	1	2	2	2	3	3	1	1
شماره 6	1	2	3	3	1	1	2	2
شماره 7	1	3	1	2	1	3	2	3
شماره 8	1	3	2	3	2	1	3	1
شماره 9	1	3	3	1	3	2	1	2
شماره 10	2	1	1	3	3	3	3	1
شماره 11	2	1	2	1	1	3	3	2
شماره 12	2	1	3	2	2	1	1	3
شماره 13	2	2	1	2	3	1	3	2
شماره 14	2	2	2	3	1	2	1	3
شماره 15	2	2	3	1	2	3	2	1
شماره 16	2	3	1	3	2	3	1	2
شماره 17	2	3	2	1	3	1	2	3
شماره 18	2	3	3	2	1	2	3	1

[10] Frozen Layer
[11] Full Factorial
[12] Orthogonal Array

و آزمایش‌های لازم طبق استانداردی که توسط شرکت مذکور تهیه شده، وارد نرم‌افزار مولدفلو شده است. خواص فیزیکی- اپتیکی ماده یادشده در جدول 4 آورده شده است.

همچنین جدول 5 خواص مکانیکی این ماده شامل مدول الاستیک[1]، ضریب پواسون[2] و مدول برشی[3] را نشان می‌دهد.

در خصوص خواص ترمومکانیکال این ماده، شکل 5 تغییرات ویسکوزیته پلیمر (محور عمودی) براساس نرخ برش را نشان می‌دهد. براساس این نمودار، ماده در دماهای بالا دارای ویسکوزیته پایین‌تری است، همچنین در یک دمای ثابت هر چه نرخ برش افزایش یابد سیالیت بیشتر خواهد شد تا جایی که تقریباً از نرخ برشی 1000 بر ثانیه (1/s) نمودارها نزدیک به هم می‌شوند. به عبارت دیگر در فرآیند تزریق سه عامل نرخ برش، دما و ویسکوزیته به شدت به یکدیگر وابسته‌اند.

اطلاعات این نمودار باعث تحلیل نرخ برشی و یا تحلیل دمایی مذاب خصوصا در نواحی ورودی به گودی قالب است. از دیگر خواص ترمومکانیکال پلیمر تغییرات حجم مخصوص در برابر دماست. با توجه به شکل 6 هر منحنی در یک فشار خاص دارای دو شیب متفاوت است. در حقیقت پلیمر هنگام سرد شدن دچار تغییرات حجمی متفاوت می‌شود که این خود نشانی از انقباض ماده پلیمری را دارد. به عبارت دیگر کاهش حجم در فشارهای بالا باعث کاهش انقباض در پلیمر خواهد شد. از اطلاعات این نمودار در محاسبات

جدول 4 خواص اپتیکی- حرارتی پلیمر پلی‌متیل متاکریلات

Table 4 Physical and optical properties of PMMA

خواص	واحد	نوع استاندارد	مقدار
جذب آب[4]	درصد	ایزو 62	0.4
درصد انقباض طولی[5]	درصد	ایزو 4-294	0.4~0.7
ضریب شکست[6]		ایزو 489	1.49
انتقال نور[7]	درصد	ایزو 1-13468	91
دمای نرم‌شدگی[8]	سانتی‌گراد	ایزو 306	115
ضریب انبساط خطی[9]	بر سانتی‌گراد	ایزو 2-11359	9E-5
ضریب جریان مذاب[10]	گرم بر 10 دقیقه	ایزو 1133	2

جدول 5 خواص مکانیکی پلیمر پلی‌متیل متاکریلات

Table 5 Mechanical properties of PMMA

خواص مکانیکی	مقدار/واحد
مدول الاستیسیه در راستای اصلی اول[11]	2740 مگاپاسکال
مدول الاستیسیته در راستای اصلی دوم[12]	2740 مگاپاسکال
ضریب پواسون اصلی[13]	0.335
ضریب پواسون فرعی[14]	0.335
مدول برشی[15]	1011 مگاپاسکال
سختی راکول[16]	75

[1] Elastic modules
[2] Poison's ratio
[3] Shear Modulus
[4] Water Absorption
[5] Mold Shrinkage
[6] Refractive Index
[7] Light Transmission
[8] Vicat Softening Temp. (VST)
[9] Coefficient of Linear Expansion
[10] Melt Flow Index (MFR) 230℃, 37.3N(3.8kgf)
[11] Elastic Modulus, 1st principle Direction(E1)
[12] Elastic Modulus, 2nd Principle Direction(E2)
[13] Poisson's Ratio(ϑ_{12})
[14] Poisson's Ratio(ϑ_{23})
[15] Shear Modulus(G12)

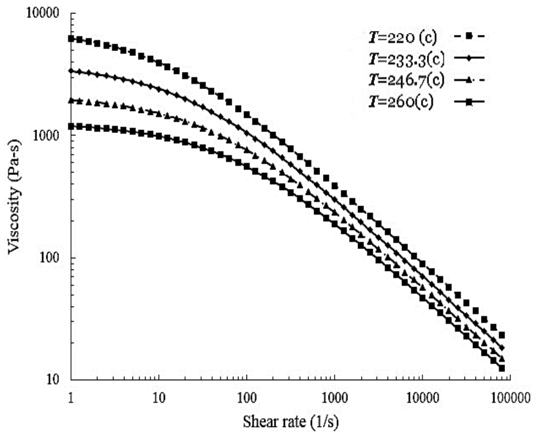

Fig. 5 Viscosity versus share rate at different temperatures

شکل 5 ویسکوزیته در برابر نرخ برش در دماهای مختلف

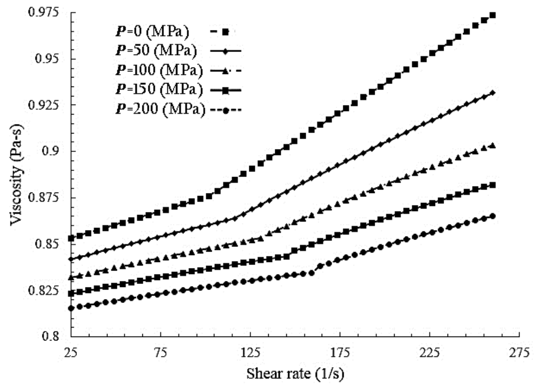

Fig.6 Specific volume versus temperature at different pressures

شکل 6 منحنی حجم مخصوص در برابر دما در فشارهای مختلف

انقباض پلیمر در گودی قالب استفاده می‌شود.

3-2- پیش تنظیمات مولدفلو در تحلیل‌های صورت گرفته

یکی از تنظیمات نرم‌افزار انتخاب کنترلر مناسب دستگاه تزریق است. از آن‌جا که دستگاه تزریق‌های‌ژینگ[17] در لیست کنترلرهای ثبت‌شده در نرم‌افزار مولدفلو نیست؛ بنابراین پارامترهای کنترلر را که شامل تناژ نیروی گیره‌بندی[18]، قطر ماردون[19]، طول کل اسپرو[20]، سرعت تزریق[21]، حداکثر فشار تزریق[22] است را از کاتالوگ دستگاه وارد نرم‌افزار می‌کنیم. جدول 6 این مشخصات را نشان می‌دهد.

دمای محیط 25 درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته‌شده و زمانی 100% لایه‌ها منجمد خواهند شد که دمای آن‌ها به زیر 90 درجه سانتی‌گراد برسد. جنس قالب جهت شبیه‌سازی نیز P20 یا همان فولاد گرم‌کار با استاندارد 1.2312 در نظر گرفته شده است. سایر تنظیمات به نحوی است که در جدول 3 براساس طراحی تاگوچی انجام می‌پذیرد.

3- تحلیل انقباض حجمی و پیچیدگی در لنز دوبر محدب

دو عامل مهم در تغییرات ابعادی لنزهای تزریقی، پیچیدگی و انقباض

[16] Rockwell Hardness (M Scale)
[17] Haixing-H88
[18] Clamp Force
[19] Machine Screw Diameter
[20] Machine Injection Stork
[21] Injection Rate
[22] Maximum Injection Pressure

جدول 6 مشخصات دستگاه تزریق در تحلیل مولدفلو

Table 6 Properties of injection molding machine in moldflow software

مشخصه ماشین	واحد	مقدار
قطر مارپیچ	میلی‌متر	35
نسبت طول به قطر مارپیچ	طول/عرض	20.6
حجم تزریق	سانتی‌متر مکعب	125
وزن تزریق بر پایه مواد پلی استایرن	گرم	109
فشار تزریق	مگا پاسکال	193
سرعت تزریق	میلی‌متر بر ثانیه	93
کورس جک تزریق	میلی‌متر	126
سرعت مواد گیری	دور بر دقیقه	0~220
قدرت گیره	کیلو نیوتن	880

حجمی[1] پس از خنک‌کاری لنز است. جدول 7 نتایج 18 تحلیل انجام شده را براساس حداکثر میانگین انقباض حجمی و حداکثر پیچیدگی در لنز دوبر محدب را نشان می‌دهد.

3-1- انقباضی حجمی و میانگین آن

انقباض حجمی ناشی از میزان تراکم محلی چگالی قطعه در مرحله نگهداری، حاصل از سرد شدن قطعه و تبادل حرارتی با محیط است. هر چه میزان این تراکم بیشتر باشد، درصد انقباض حجمی افزایش می‌یابد. محاسبات انقباض حجمی که آغاز می‌شود بر مبنای اختلاف بین شرایط کنونی PvT با وضعیت مرجع (فشار صفر و دما، دمای محیط اطراف[2](25 درجه سانتی‌گراد) است. رابطه (1) بیان‌کننده مقدار انقباض حجمی است.

$$VS(t) = \frac{AD(t)}{D(T_{\text{ambient}}, P_{\text{atm}})} \quad (1)$$

جدول 7 مقادیر پیچیدگی و میانگین انقباض حجمی مستخرج از نتایج تحلیل

Table 7 Values of Warp. and A.V.S with Moldflow analysis

نتایج / آزمایش‌ها	بیشترین مقدار میانگین انقباض حجمی (%) A.V.S	بیشترین مقدار پیچیدگی در کل لنز(mm) Warp.
شماره 1	8.828	0.1491
شماره 2	8.769	0.1494
شماره 3	8.682	0.1497
شماره 4	5.847	0.1083
شماره 5	9.488	0.1577
شماره 6	9.525	0.159
شماره 7	9.858	0.1589
شماره 8	9.863	0.1578
شماره 9	10.2	0.166
شماره 10	8.378	0.1425
شماره 11	8.649	0.1456
شماره 12	9.1	0.1549
شماره 13	8.61	0.1124
شماره 14	9.562	0.1585
شماره 15	9.487	0.1586
شماره 16	10.04	0.1613
شماره 17	9.91	0.1607
شماره 18	9.954	0.1624

[1] Volumetric Shrinkage
[2] Ambient Temperature

در این رابطه VS انقباض حجمی در یک‌زمان مشخص، AD میانگین چگالی و D چگالی، مقدار D همان مقدار چگالی مرجع در دمای محیط (T_{ambient}) و فشار صفر (P_{atm}) است.

در هر صورت اگر فشار نگهداری پیش از انجماد ماده قطع شود یا زمانی که هنوز فشار صفر نشده است، انقباض حجمی باعث برگشت مواد به سمت نازل یا قسمت‌های گرم‌تر قطعه شود. این حالت باعث به وجود آمدن برآمدگی‌های زائد و غیریکنواختی در قطعه شود [9].

میانگین انقباض حجمی ازجمله پارامترهایی است که در تحلیل قطعات نوری مورداستفاده قرار می‌گیرد و عبارت است از متوسط تغییرات حجم کل بر روی قطعه که بر سطح نشان داده می‌شود. به عبارت دیگر میانگین انقباض‌های مورد تحلیل نرم‌افزار در المان‌های توزیع‌شده روی سطح است. شکل‌های 7 و 8 انقباض حجمی و میانگین آن را برای لنز دوبر محدب نشان می‌دهد.

به دلیل برخورد مذاب با سطح قالب هنگام ورود و فریز شدن لایه‌های در تماس با قالب حداقل انقباض حجمی در لایه‌های بیرونی لنزها اتفاق می‌افتد. قسمت‌های مرکزی لنزها به دلیل تأخیر در مدت‌زمان خنک کاری باعث انقباض بیشتری از لایه‌های رویی خواهند شد (شکل 7) و نیز کاهش حجم کل لنز در قسمت‌های میانی بیشتر از قسمت‌های کناری است (شکل 8).

3-2- تغییرات پیچیدگی

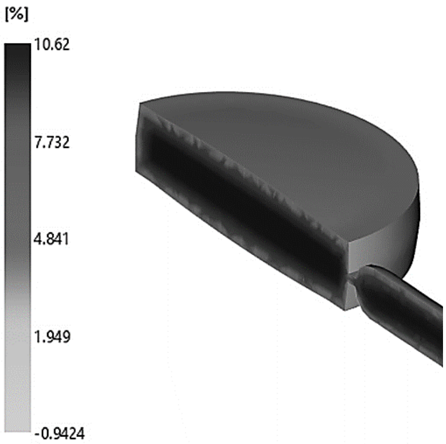

Fig. 7 Distribution of volumetric shrinkage as contour of Bi-convex lens

شکل 7 کانتور انقباض حجمی لنز دوبر محدب

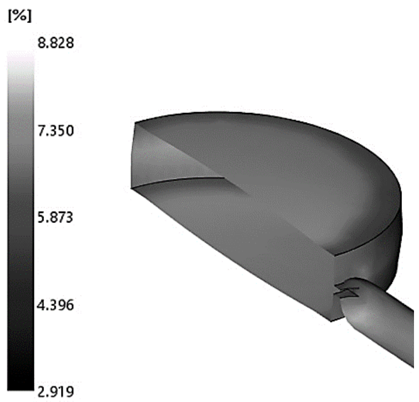

Fig. 8 Distribution of A.V.S as contour of Bi-convex lens

شکل 8 کانتور میانگین انقباض حجمی لنز دوبر محدب

از عوملی که می‌تواند باعث به وجود آمدن پیچیدگی در یک قطعه شود، تغییرات انقباض از یک منطقه به منطقه دیگر به دلیل تفاوت در نرخ خنک‌شدگی قطعه (انقباض دیفرانسیلی)[1] و همچنین تغییرات در مقدار انقباض در جهت موازی و عمود بر جهت جریان مواد (انقباض جهتی)[2] است. انقباض دیفرانسیلی از محاسبه انقباض حجمی در کل قطعه ناشی می‌شود به گونه‌ای که محاسبه این کمیت توسط مولدفلو در مناطق مختلف قطعه عامل به وجود آمدن پیچ و تاب در آن است. انقباض جهتی نیز مشابه انقباض دیفرانسیلی است، یعنی تغییرات کمیت انقباض حجمی در راستای جهت جریان و یا عمود بر آن، پیچیدگی را منجر خواهد شد [10]. براساس نتایج مولدفلو حالت پیچیدگی در لنز دوبر محدب مطابق شکل 9 است.

همان‌گونه که مشخص است نواحی اطراف دارای تغییرات پیچیدگی بیشتری است. علت نیز زمان خنک‌شدگی و از دست دادن زودتر دما نسبت به قسمت‌های دیگر آن است. هر چه از لبه به سمت مرکز لنز پیش‌روی شود به دلیل افزایش ضخامت و وجود گرادیان دمایی یکنواخت‌تر پیچیدگی آن کمتر می‌شود، به نحوی که در مرکز لنز پیچیدگی تغییرات تقریباً صفر است. با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام‌شده این تغییرات به صورت سه‌بعدی در سه راستای XYZ است. پیچیدگی در راستای محور Z (راستای ضخامت) کمترین و در راستای محور Y که همسو با ورودی جهت جریان، بیشترین است.

4- تحلیل تاگوچی، نسبت S/N

عموماً دودسته عامل برای یک آزمایش وجود دارد. عوامل کنترل‌پذیر (سیگنال)[3] به آن دسته از عوامل گفته می‌شود که توسط کاربر قابل تنظیم و کنترل است و عوامل کنترل‌ناپذیر (نویز)[4] که از عوامل قابل‌کنترل و تنظیم برای کاربر نیست. ایده اصلی در تحلیل S/N این است که شرایط بهینه در مسائل کنترل کیفیت و طراحی مطمئن بسیار مطلوب است، شرایطی که در آن حساسیت عملکرد و یا خروجی نسبت به نویزها کمترین مقدار باشد. به عبارت دیگر در یک آزمایش زمانی شرایط بهینه داریم که ایجاد تغییرات در خروجی بیشتر بر تغییرات مقادیر سیگنال تحت کنترل استوار باشد تا بر مقادیر نویز. با توجه به این توضیح تحلیل S/N مشخص می‌کند که شرایط بهینه مربوط به‌جایی است که در آنجا سیگنال به نویز مقادیر بیشینه باشد.

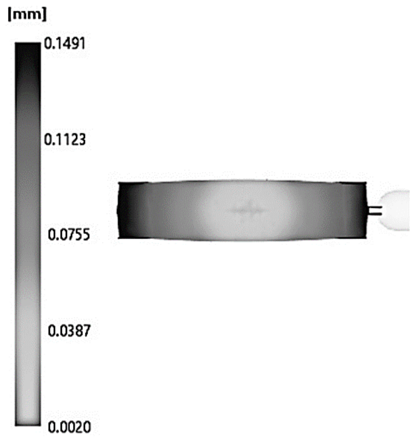

Fig. 9 Distribution of Warpage as contour of Bi-convex lens

شکل 9 کانتور پیچیدگی لنز دو بر محدب

[1] Differential shrinkage
[2] Orientation effects
[3] Signal
[4] Noise

هر چه کمتر بهتر[5] یکی از شاخصه‌های کیفیت در تحلیل نسبت است. مثلاً در تحلیل ابعادی لنز هر چه پیچیدگی ابعادی و انقباض حجمی کمتر باشد بهتر است. این پارامتر توسط رابطه (2) قابل‌بیان است.

$$\eta_i = -10 \log_{10} \sum_{i=1}^{n} y_i^2 \qquad (2)$$

در این رابطه y_i ها مقدار خروجی و به ازای i-امین ترکیب آزمایشی و n تعداد تکرار آزمایش است؛ بنابراین پارامتر بالا برای هر اجرای آزمایش که مربوط به یکسری تنظیمات عامل‌ها قابل‌محاسبه است. برای عامل‌های مختلف میانگین η در سطوح مورد نظر مبنای تحلیل است [11].

4-1- تحلیل S/N برای مقادیر کوچک‌تر بهتر در آنالیز پیچش لنز دوبر محدب

مقادیر بیشینه پیچیدگی در جدول 7 مشخص است. هرچه این بیشینه کمتر باشد نتایج بهتری حاصل می‌شود. نسبت سیگنال به نویز در جدول 8 مشخص شده و براساس بیشترین اختلاف مقادیر[6] رتبه‌بندی[7] می‌شود. بالاترین تأثیر در پیچیدگی لنز دوبر محدب مربوط به دمای قالب با رتبه 1 است و به همین ترتیب سایر عوامل تأثیرگذار عبارت از دمای مذاب، زمان نگهداری، فشار نگهداری، زمان تزریق، فشار تزریق، زمان خنک‌کاری است. در قطعات پلاستیکی با ضخامت بالا تغییرات دمایی نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کنند. علت این موضوع گرادیان دمایی حین خنک‌شدگی قطعه است که حالات متفاوتی را تجربه می‌کند. در لحظه ورود به قالب با دیواره قالب برخورد کرده و یک تغیر دمایی ناگهانی در لایه‌های رویی حاصل می‌شود که وابستگی مستقیم با دمای قالب دارد. همین عوامل باعث پررنگ‌تر شدن نقش دمایی چه مذاب و چه قالب نسبت به سایر پارامترها خواهد بود، اما در قطعات با دیواره نازک پارامترهای فشار تزریق و نگهداری نقش مهم‌تری را دارند چون مذاب گرادیان‌های دمایی زیادی را تجربه نمی‌کند و پس از برخورد با دیواره‌های قالب منجمد خواهد شد.

آزمایش و مشخص شدن مقادیر بیشینه شکل 10 و بررسی نمودار S/N نشان می‌دهد، تولید لنز دوبر محدب در شرایطی که حداقل پیچیدگی ابعادی را داشته باشد (بیشینه S/N)، معادل شرایط A2B1C1D2E2F3G3 است. با استفاده از این پیش‌بینی تاگوچی و تحلیل انجام‌شده در شکل 11 مقدار حداقل پیچیدگی برابر 0.1083 میلی‌متر شد، همچنین شکل 11 نحوه پیچیدگی لنز دوبر محدب را از نمای بالا نشان می‌دهد که بیشترین پیچیدگی‌ها در اطراف لنز خواهد بود.

جدول 8 مقادیر محاسبه‌شده سیگنال به نویز پیچیدگی لنز دوبر محدب

Table 8 *S/N* ratio of Warpage for Bi-convex lens

	دمای مذاب	دمای قالب	فشار تزریق	زمان تزریق	فشار نگهداری	زمان نگهداری	زمان خنک‌کاری
سطح اول	16.57	17.26	16.67	16.17	16.6	16.04	16.22
سطح دوم	17.05	16.2	16.58	16.65	16.69	16.21	16.61
سطح سوم	15.85	16.01	16.21	16.65	16.18	17.23	16.64
اختلاف	1.2	1.25	0.46	0.49	0.51	1.19	0.42
رتبه	2	1	6	5	4	3	7

[5] The-Smaller-The Better
[6] Delta
[7] Rank

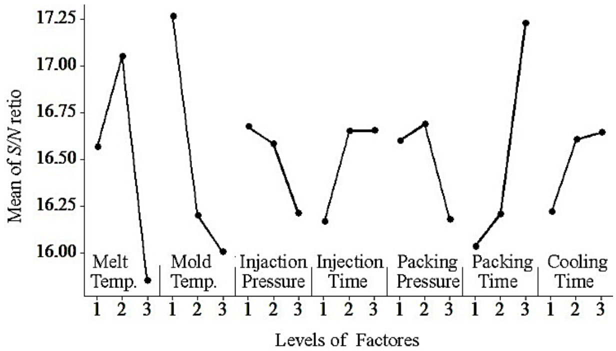

Fig. 10 *S/N* ratio chart of warpage Bi-convex lens at different levels and determine the maximum level

شکل 10 نمودار سیگنال به نویز پیچیدگی لنز دوبر محدب در سطوح مختلف

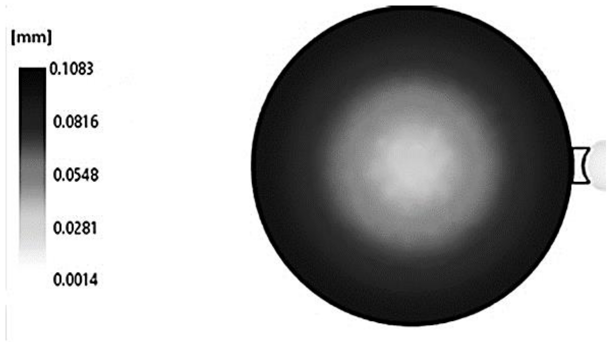

Fig. 11 Warpage contour of Bi-convex lens

شکل 11 کانتور پیچیدگی لنز دوبر محدب

4-2- تحلیل *S/N* برای مقادیر کوچک‌تر بهتر در آنالیز میانگین انقباض حجمی

در جدول 7 و باوجود بیشترین مقادیر میانگین انقباض حجمی می‌توان دریافت هر چه این مقادیر کمتر باشد، لنز نتایج هندسی بهتری خواهد داشت. براساس نتایج تحلیل سیگنال به نویز تاگوچی، جدول 9 و شکل 12 می‌توان نتیجه گرفت، اولین تأثیر در این نوع آنالیز دمای مذاب و به ترتیب زمان نگهداری، دمای قالب، فشار نگهداری، زمان تزریق، فشار تزریق، زمان خنک‌کاری است، همچنان مشاهده می‌شود تغییرات دمایی چه در قالب چه در مذاب نقش مهمی در تحلیل نتایج انقباض حجمی دارند. پیچیدگی و میانگین انقباض حجمی با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌ها ارتباط مستقیم با یکدیگر دارند به گونه‌ای که اگر در شرایط آزمایشی مقدار میانگین انقباض حجمی زیاد باشد مقدار پیچیدگی نیز زیاد است و بالعکس. بنابراین توضیحاتی که در خصوص نقش تغییرات دمایی در تحلیل پیچیدگی گفته شد برای درک عمیق‌تر میانگین انقباض حجمی نیز سازگار است.

جدول 9 مقادیر سیگنال به نویز میانگین انقباض حجمی لنز دوبر محدب

Table 9 *S/N* ratio of A.V.S for Bi-convex lens

	دمای مذاب	دمای قالب	فشار تزریق	زمان تزریق	فشار نگهداری	زمان نگهداری	زمان خنک‌کاری
سطح اول	-18.82	-18.55	-18.77	-19.45	-19.36	-19.58	19.38
سطح دوم	-18.72	-19.43	-19.35	-18.81	-18.73	-19.37	19.35
سطح سوم	-19.97	-19.55	-19.39	-19.26	-19.42	-18.57	18.78
اختلاف	1.26	0.98	0.62	0.64	0.68	1.01	0.6
رتبه	1	3	6	5	4	2	7

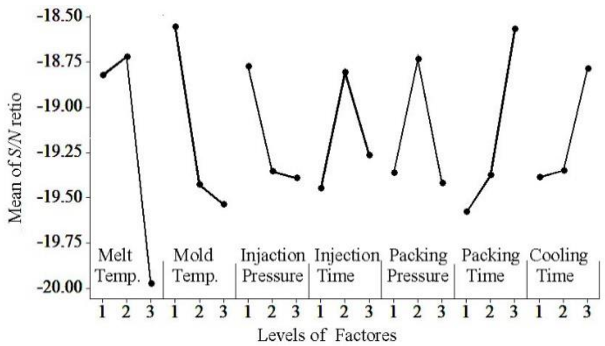

Fig. 12 *S/N* ratio chart of A.V.S Bi-convex lens at different levels and determine the maximum level

شکل 12 نمودار سیگنال به نویز میانگین انقباض حجمی لنز دوبر محدب در سطوح مختلف آزمایش و مشخص شدن مقادیر بیشینه

نمودار و بررسی *S/N* نشان می‌دهد کمترین مقدار A.V.S در شرایط A2B1C1D2E2F3G3 اتفاق می‌افتد. درصد کاهش حجم میانگین معادل 5.847% که کانتور آن در شکل 13 نشان داده شده است.

بیشترین انقباض در نواحی داخلی و مرکزی لنز اتفاق می‌افتد.

5- جمع‌بندی نتایج تحلیلی در خصوص دقت ابعادی لنز دو برمحدب

جدول 10 رتبه عامل‌ها را در تحلیل‌های انجام‌شده نشان می‌دهد. با توجه به نقاط اشتراک آن می‌توان نتایج زیر را درک کرد.

1- چهار عامل در تحلیل‌های پیچیدگی و میانگین انقباض حجمی اشتراک دارند، اما با درجه اهمیت‌های متفاوت. این چهار عامل عبارت از دمای مذاب، دمای قالب،زمان نگهداری و فشار نگهداری است.

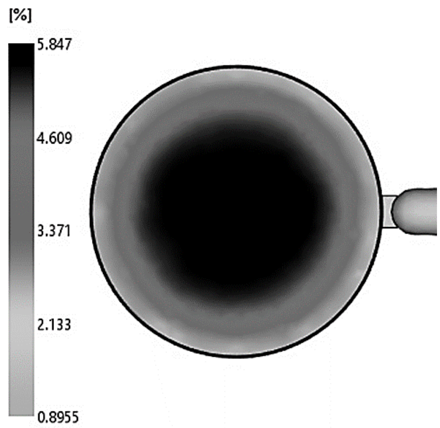

Fig. 13 A.V.S contour of Bi-convex lens

شکل 13 کانتور میانگین انقباض حجمی لنز دوبر محدب

جدول 10 رتبه‌بندی عامل‌های مختلف در تحلیل‌های انجام‌شده لنز دوبر محدب

Table 10 *S/N* ratio of Warpage for Bi-convex lens

	دمای مذاب	دمای قالب	فشار تزریق	زمان تزریق	فشار نگهداری	زمان نگهداری	زمان خنک‌کاری
تحلیل پیچیدگی	2	1	6	5	4	3	7
تحلیل میانگین انقباض حجمی	1	3	6	5	4	2	7

2-در تحلیل پیچیدگی نقش دمای قالب پررنگ‌تر از دمای مذاب است، چرا که در لحظه برخورد اولیه مذاب با سطح قالب منجمد شدن مذاب اتفاق افتاده و در پیچیدگی نقش مهمی دارد.

3- همان‌گونه که از داده‌های استخراجی قابل استنباط است، مرحله نگهداری در شکل هندسی و بررسی ابعادی لنزها نقش مؤثر و تأثیرگذاری دارد.

4- زمان خنک‌کاری برای هیچ‌کدام از تحلیل‌ها فاکتور مؤثری نیست.

5- بسته به شرایط تولید و کاربرد لنز و اهمیت هرکدام از موارد بالا می‌توان براساس رتبه‌بندی عوامل تأثیرگذار دقت نظر بیشتری انجام داد.

بنابر آن‌چه گفته شد لزوم کنترل دقیق‌تر بر دمای مذاب، دمای قالب و فشار نگهداری به شدت احساس می‌شود. این کنترل نه تنها بر سیستم تنظیمی دستگاه تزریق بلکه در داخل گودی قالب در طول فرآیند نیز مهم است. این مهم توسط حس‌گرهای دما- فشار در گودی قالب امکان‌پذیر است.

6- فشار- دمای گودی قالب با کیفیت هندسی لنز

فشار و دمای گودی قالب حین تزریق در حالاتی بررسی‌شده که شامل آزمایش‌های شماره 4 با کمترین مقادیر پیچیدگی و انقباض و شماره 9 با بیشترین پیچیدگی و انقباض است. نقاطی که برای لنز دوبرمحدب در این آنالیز مورد نظر قرارگرفته شامل فشار- دمای لحظه تزریقN51801، راهگاه N45938، شروع قوس لنز در ورودی N48742 دریچه تزریق، نقطه میانی (مرکز تقعر) لنز N47961 و نقطه مقابل دریچه ورودی در انتهای لنز N48468 است (شکل 14).

شکل‌های 15 و 16 دو نمودار فشار را برای وضعیت حداقل و حداکثر تغییرات هندسی عدسی دو بر محدب را نشان می‌دهد. نمودار فشار نشان می‌دهد اگر تغییرات به‌گونه‌ای باشد که از راهگاه تا انتهای لنز افت فشار وجود داشت، کیفیت هندسی لنز بهتر از حالتی است که همه نقاط اندازه‌گیری یک نرخ رشد و کاهش فشار را داشته باشند. همین امر برای وضعیت دما نیز صادق است، یعنی کیفیت هندسی لنزی بهتر است که تغییرات کاهش محسوس‌تری از دما را نسبت به نقاط دورتر از مبدأ تزریق داشته باشد (شکل‌های 17 و 18). به عبارت دیگر چنان‌چه افت و کاهش دما در نقاط مورد نظر داری فواصل بیشتری از هم باشند کیفیت لنز از لحاظ هندسی بهتر است. روند نمودارها در شکل 17 نسبت به شکل 18 دارای افت بیشتری است، می‌توان این طور بیان نمود که چنان‌چه جبهه موج سیال کاهش دمای محسوس‌تری را در نقاط مورد نظر تجربه کند نشان می‌دهد سیال منظم‌تر و با آرامش بیشتری وارد گودی قالب شده که این مسأله خود تأثیر مستقیم بر کیفیت هندسی به دلیل تفاوت در نرخ خنک‌شدگی دارد. تغییرات منظم فشار و دما در جبهه موج سیال به این معنی است که با دور شدن از منبع تزریق انتظار می‌رود کاهش فشار و دما بیشتر باشد و جبهه موج سیال فرصت منظم شدن و آرام گرفتن بیشتری دارد تا این‌که شرایط به‌گونه‌ای باشد که فشار و دما در تمام نقاط تزریق یک‌روند را طی کند.

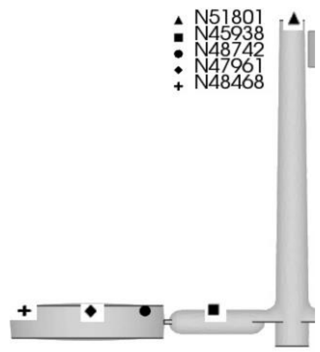

Fig. 14 Temperature and pressure measurement points in runner system and mold cavity

شکل 14 نقاط اندازه‌گیری دما و فشار در سیستم راهگاهی و گودی قالب

7- بررسی اپتیکی لنز کروی دوبر محدب

در این بررسی تغییرات ضریب شکست در راستای ضخامت لنز مورد بررسی

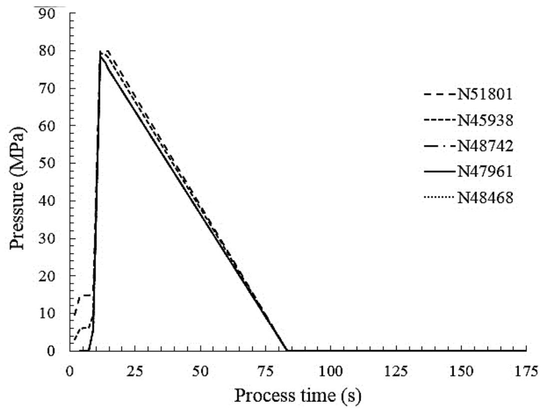

Fig. 15 Pressure diagram in the geometric minimal changes

شکل 15 نمودار فشار در وضعیت حداقل تغییرات هندسی

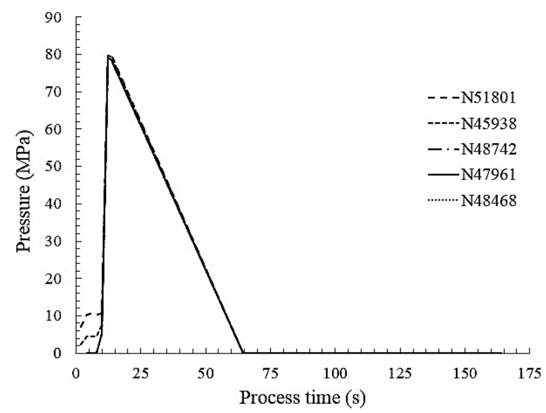

Fig. 16 Pressure diagram in the geometric maximum changes

شکل 16 نمودار فشار در وضعیت حداکثر تغییرات هندسی

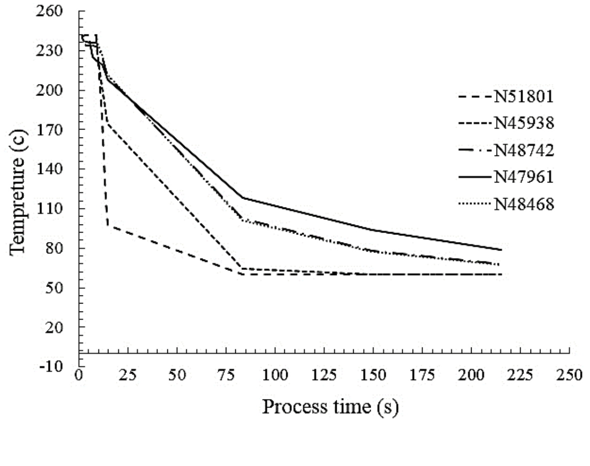

Fig. 17 Temperature diagram in the geometric minimal changes

شکل 17 نمودار دما در وضعیت حداقل تغییرات هندسی

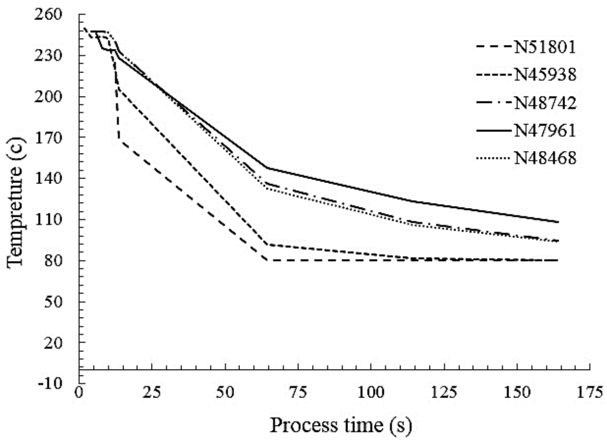

Fig. 18 Pressure diagram in the geometric minimal changes

شکل 18 نمودار دما در وضعیت حداکثر تغییرات هندسی

قرارگرفته است. این تغییرات ضریب شکست پس از شکل‌گیری نهایی لنز (پس از تابیدگی لنز) توسط نرم‌افزار مولدفلو شبیه سازی شده است. خروجی، میزان کاهش و یا افزایش ضریب شکست در نقاط مختلف لنز است. این نوع تحلیل توسط نرم‌افزار بر مبنای ضرایب معادله WLF[1] صورت می‌پذیرد.

7-1- معادل WLF

معادله WLF یک معادله تجربی منطبق بر اصل هم نهی زمان حرارت[2] در پلیمرهاست. شکل کلی معادله به صورت رابطه (3) است [13,12].

$$\log a_{\mathrm{T}} = \left[\frac{-A_1(T - T_{\mathrm{ref}})}{A_2 + T - T_{\mathrm{ref}}}\right] \qquad (3)$$

در این معادله T دمای پلیمر، T_{ref} دمای مرجع برای ساخت منحنی انطباق، A_1 و A_2 ضرایب ثابت تجربی جهت تنظیم انطباق پارامتر برهم‌نهی a_{T} است. از این معادله برای پیش‌بینی خواص ویسکوالاستیک پلیمرهای آمورف در دماهای مختلف استفاده می‌شود به این صورت که با در نظر گرفتن T_{ref} به دمای انتقال شیشه (T_{g}) می‌توان ضرایب A_1 و A_2 را به دست آورد. صحت این رابطه برای پلیمرهای آمورف در محدوده دمایی T_{g} و $T_{\mathrm{g}} + 100°\mathrm{C}$ است. حداقل یک مقدار برای به دست آورد ضرایب A_1 و A_2 مورد نیاز است، همچنین مقدار a_{T} با ویسکوزیته رابطه (4) را دارد.

$$\log a_{\mathrm{T}} = \frac{\eta_{\mathrm{T}}}{\eta_{\mathrm{T_g}}} \qquad (4)$$

بر طبق رابطه بالا لگاریتم a_{T} با نسبت ویسکوزیته پلیمردر یک دمای دلخواه (η_T) و ویسکوزیته آن در دمای انتقال شیشه‌ای (η_{T_g}) برابر است. این رابطه را می‌توان با معادله WLF برابر ساخت و ارتباط تساوی برابر بین ضرایب معادله WLF و ویسکوزیته را بیان کرد [13].

برای تحلیل خواص اپتیکی در نرم‌افزار مولدفلو علاوه‌بر ضریب شکست ماده پلیمری باید منحنی برهم‌نهی دما- زمان (نقاطی از آن) و همچنین ضرایب معادله WLF مشخص شود. نرم‌افزار با استفاده از داده‌های منحنی برهم‌نهی و ضرایب معادله WLF، مدول آسایش E[3] در دماهای مختلف و به دنبال آن تغییرات ویسکوزیته، چگالی و ضریب شکست را در نقاط مختلف ماده به دست می‌آورد. ضرایب به‌دست‌آمده برای پلیمر مورد نظر در این تحقیق در جدول 11 آمده است [15].

[1] Williams–Landel–Ferry Equation
[2] Time-Temperature Superposition (TTSP)
[3] Relaxation Modulus

جدول 11 ضرایب معادله WLF

Table 11 WLF equation coefficients

ضرایب معادله WLF	مقدار
Tref (کلوین)	432
$A1$	20
$A2$ (کلوین)	139.6

7-2- تغییرات ضریب شکست در مولدفلو

حالت تغییرات ضریب شکست در برش عرضی لنز در راستای ضخامت در سطوح مختلف تاگوچی به صورت شکل 19 است.

تغییرات تقریباً در قسمت‌های میانی لنز به دلیل چگالی یکنواخت‌تر کمتر و ثابت است. المان‌های مرکزی در راستای ضخامت لنز در تحلیل نتایج مورد بررسی قرار گرفته‌اند. به این صورت که اختلاف کمترین و بیشترین تغییرات ضریب شکست به عنوان یک کمیت در نظر گرفته شده است (جدول 11). هر چه اختلاف تغییرات ضریب شکست در لنز کمتر باشد، آن لنز خواص اپتیکی بهتری دارد. شکل 20 نمایش المان‌ها در بررسی ضریب شکست و شکل 21 نمودار تغییرات ضریب شکست در سه سطح مختلف از طراحی آزمایش تاگوچی را نشان می‌دهد. این سه سطح شامل آزمایش 13 با بیشترین تغییرات ضریب شکست در راستای ضخامت لنز، آزمایش 12 با کمترین میزان تغییرات و آزمایش 17 با تغییراتی ما بین کمترین و بیشترین تغییرات نشان داده شده است.

تحلیل تاگوچی حاصل از نتایج کمی جدول 12 به شرح جدول 13 و شکل 22 است. دمای مذاب، دمای قالب، زمان خنک‌کاری و زمان تزریق پارامترهای تأثیرگذار بر تغییرات ضریب شکست است. براساس شکل، بهترین سطح برای کمترین میزان تغییرات ضریب شکست A1B3C1D2E1F1G3 است.

7-3- بررسی ارتباط بین تحلیل اپتیکی و هندسی

کیفیت هندسی یک لنز بر کیفیت اپتیکی آن نیز تأثیر خواهد گذاشت، در لنزهای نازک اکثر بررسی‌ها و بهینه سازی‌ها بر این مهم است. اما وقتی لنز ضخیم می‌شود، علاوه‌بر کیفیت هندسی، تغییرات ضریب شکست در طول ضخامت نیز بر کیفیت اپتیکی لنز تأثیرگذار خواهد بود. با توجه به این

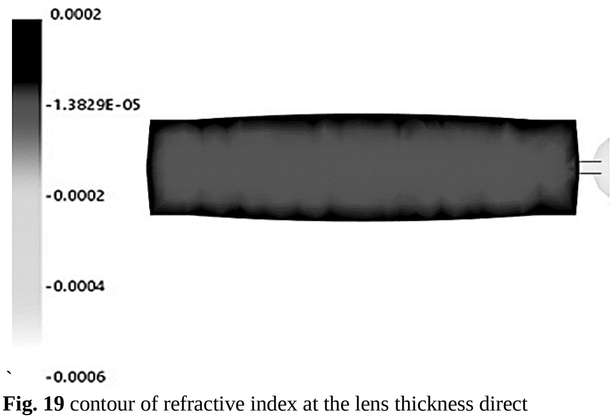

Fig. 19 contour of refractive index at the lens thickness direct

شکل 19 کانتور تغییرات ضریب شکست در راستای ضخامت لنز

Fig. 20 contour of refractive index at the lens thickness direct

شکل 20 المان‌های مشخص‌شده در راستای ضخامت جهت بررسی ضریب شکست

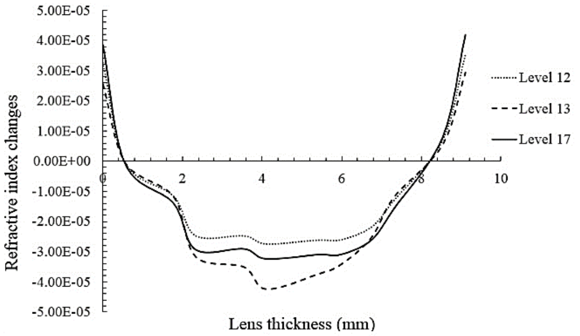

Fig. 21 3 level of refractive index changes in L18

شکل 21 تغییرات ضریب شکست در 3 سطح از طراحی آزمایش تاگوچی

جدول 12 مقادیر محاسبه‌شده کمیت ضریب شکست

Table 12 The calculated values of the refractive index quantity

آزمایش‌ها	کمیت ضریب‌شکست	آزمایش‌ها	کمیت ضریب‌شکست
شماره 1	7.01E-05	شماره 10	7.20E-05
شماره 2	6.77E-05	شماره 11	6.88E-05
شماره 3	6.45E-05	شماره 12	6.28E-05
شماره 4	7.12E-05	شماره 13	7.17E-05
شماره 5	7.03E-05	شماره 14	7.01E-05
شماره 6	6.64E-05	شماره 15	6.64E-05
شماره 7	7.81E-05	شماره 16	7.73E-05
شماره 8	7.54E-05	شماره 17	7.43E-05
شماره 9	6.91E-05	شماره 18	7.43E-05

جدول 13 مقادیر محاسبه‌شده سیگنال به نویز کمیت ضریب شکست در لنز دوبر محدب

Table 13 *S/N* ratio of refractive index quantity for Bi-convex lens

	دمای مذاب	دمای قالب	فشار تزریق	زمان تزریق	فشار نگهداری	زمان نگهداری	زمان خنک‌کاری
سطح اول	83.40	82.69	83.11	82.95	83.10	83.12	82.93
سطح دوم	83.18	82.97	83.02	83.10	83.01	83.01	83.09
سطح سوم	82.54	83.46	83	83.07	83.01	82.99	83.10
اختلاف	0.87	0.77	0.11	0.15	0.09	0.13	0.17
رتبه	1	2	6	4	7	5	3

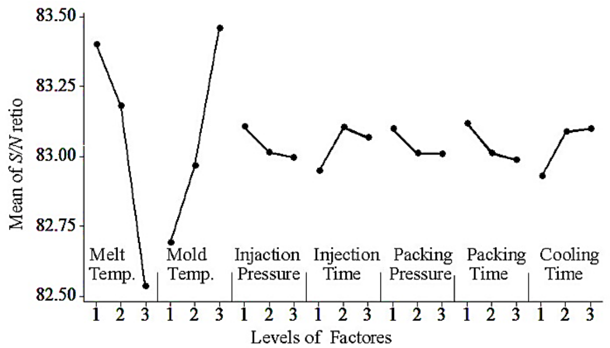

Fig. 22 *S/N* ratio of refractive index quantity graph

شکل 22 نمودار سیگنال به نویز کمیت ضریب شکس

توضیحات و نوع هندسه لنز انتخابی، لزوم بررسی هر دو کیفیت هندسی و اپتیکی مورد توجه است. عوامل مشترک تأثیرگذار بر کیفیت اپتیکی لنز نیز مانند بررسی هندسی، دمای قالب و دمای مذاب است. ازآن‌جا که بالا رفتن کیفیت کلی لنز به کاهش هر دو نتیجه منجر خواهد شد؛ بنابراین سطح بهینه انقباض حجمی ازلحاظ اپتیکی با سطح بهینه ضریب شکست از لحاظ هندسی بررسی و مقایسه شده است. دو سطح بهینه در جدول 14 مشخص است.

با بررسی اعداد مشخص است که پایین‌ترین کاهش انقباض حجمی، ضریب شکست مناسبی ندارد و یا بهترین ضریب شکست کاهش حجم پایینی را به دنبال ندارد. با توجه به این نتایج از الگوریتم تاگوچی چندپاسخه[1] برای تحلیل نتایج استفاده می‌نماییم.

8- تاگوچی چندپاسخه

اگر آزمایش‌های مورد نظر دارای پاسخ‌های متفاوت باشد به‌گونه‌ای که مثلاً کاهش همه موارد مدنظر باشد، از تحلیل چندپاسخه تاگوچی استفاده می‌شود.

در این روش ابتدا تابع اتلاف نرمال شده[2] برای هر خروجی محاسبه می‌شود، مقدار این تابع در رابطه (5) مشخص شده است.

$$C_{ij} = \frac{L_{ij}}{L_i^*} \quad , \; L_i^* = max\{L_{i1}, L_{i2}, \dots, L_{ij}\} \tag{5}$$

C_{ij} مقدار تابع اتلاف نرمال شده برای i امین خروجی در j امین آزمایش است. مقدار L_{ij} در مسائل هر چه کمتر بهتر مطابق رابطه (6) است.

$$L_{ij} = \frac{1}{n_i} \sum_{k=1}^{n_i} y_{ijk}^2 \tag{6}$$

در این رابطه n_i تعداد تکرار مربوط به پاسخ i-ام، y_{ijk} مقدار مشاهده‌شده برای خروجی i-ام، در تکرار K-ام از j-امین آزمایش و L_{ij} تابع اتلاف پاسخ i-ام در j-امین آزمایش است. برای هر پاسخ یک مقدار وزنی W_i که نشان‌دهنده اهمیت آن پاسخ نسبت به دیگر پاسخ‌هاست انتخاب می‌گردد. این انتخاب بسته به شرایط مسأله و تجربه است. مقدار وزن برای محاسبه تابع اتلاف نرمال شده کلی[3] (*tnql*) استفاده می‌شود. با استفاده از مقدار تابع اتلاف نرمال شده کلی می‌توان مقدار *S/N* چندهدفه[4] (*mrsn*) را به دست آورد. روابط (8,7) نشان‌دهنده این محاسبات است [16].

$$tnql_j = \sum_{i=1}^{m} w_i C_{ij} \tag{7}$$

$$mrsn_j = -10\log(tnql_j) \tag{8}$$

از آن‌جا کاهش خطای هندسی و اپتیکی مورد نظر است، مقدار تابع وزنی برای هر دو مقدار ضریب شکست و میانگین انقباض حجمی برابر 0.5 در نظر گرفته شده است. جهت مقادیر کوچک کمیت ضریب شکست کلیه داده‌ها در عدد ثابت 10^5 ضرب شده است. جدول 15 مقادیر تابع *mrsn* را با استفاده از محاسبات بالا نشان می‌دهد. این مقادیر در شکل 23 برحسب سطوح و عامل‌ها محاسبه میانگین شده و نشان می‌دهد سطح بهینه در این آزمایش A1B1C1D2E2F3G3 است. این سطح بهینه دارای کمترین میزان کاهش انقباض حجمی (از 100% داده‌ها کمتر) و مقدار کمیت شکست از 61% داده‌ها کمتر است (جدول 16)، همچنین براساس جدول 17 و اختلاف داده‌ها در رتبه‌بندی، دمای مذاب، زمان نگهداری، فشار تزریق و فشار نگهداری در اولویت تأثیرگذاری بر کیفیت نوری و هندسی لنزهاست.

[1] Multi Response Taguchi
[2] Normalized Loss Function
[3] Total Normalized Quality Loss Function
[4] Multi Response Signal to Noise

جدول 14 مقایسه سطوح بهینه هندسی و اپتیکی

Table 14 Comparison between optimal levels of geometrical and optical properties

		ضریب شکست	میانگین انقباض حجمی
سطح بهینه در میانگین انقباض حجمی	A2B1C1D2E2F3G3	7.12E-05	5.847
سطح بهینه در حداقل تغییرات ضریب شکست	A1B3C1D2E1F1G3	6.28E-05	9.100

جدول 15 مقادیر محاسبه‌شده میانگین *mrsn*

Table 15 The calculated means of *mrsn*

آزمایش‌ها	کمیت ضریب شکست *10^5	*mrsn*	آزمایش‌ها	کمیت ضریب شکست *10^5	*mrsn*
شماره 1	7.014	1.092	شماره 10	7.200	1.179
شماره 2	6.772	1.276	شماره 11	6.283	1.417
شماره 3	6.453	1.527	شماره 12	7.1711	1.092
شماره 4	7.117	2.370	شماره 13	7.014	0.744
شماره 5	7.033	0.768	شماره 14	6.639	1.003
شماره 6	6.640	0.983	شماره 15	7.727	0.116
شماره 7	7.812	0.145	شماره 16	7.4292	0.342
شماره 8	7.541	0.299	شماره 17	7.429	0.323
شماره 9	6.905	0.503	شماره 18	6.283	1.417

جدول 16 سطح بهینه در تحلیل کیفیت کلی لنز

Table 16 Optimal level in overall quality lens analysis

		ضریب شکست	میانگین انقباض حجمی
A1B1C1D2E2F3G3	سطح بهینه در *mrsn*	6.96E0-5	5.503
میزان کاهش به نسبت کل آزمایش‌ها		%61	%100

جدول 17 مقادیر محاسبه‌شده میانگین *mrsn*

Table 17 The calculated means of *mrsn*

	دمای مذاب	دمای قالب	فشار تزریق	زمان تزریق	فشار نگهداری	زمان نگهداری	زمان خنک‌کاری
سطح اول	-2.1882	4.1630	0.8196	4.4063	2.5585	4.2885	3.3911
سطح دوم	-0.5494	3.4097	3.8199	2.7508	1.1250	3.7652	3.3127
سطح سوم	11.8345	1.5296	4.4627	1.9451	5.3288	1.0487	2.3985
اختلاف	14.0173	2.6334	3.6431	2.4612	4.1137	3.2398	0.9927
رتبه	1	5	3	6	2	4	7

9- نتیجه‌گیری در خصوص تولید لنز بهینه

با توجه به بررسی‌های انجام‌شده عوامل تأثیرگذار بروی روی کیفیت هندسی لنز دمای مذاب، دمای قالب، زمان نگهداری و فشار نگهداری است.

عوامل تأثیرگذار بر کیفیت اپتیکی لنز به ترتیب اولویت عبارت از دمای مذاب، دمای قالب، زمان خنک‌کاری و زمان تزریق است.

مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر ترکیب دو عامل بالا که باعث مقدار کاهش هر دو عامل در ضریب شکست و میانگین انقباض حجمی می‌شود عبارت از

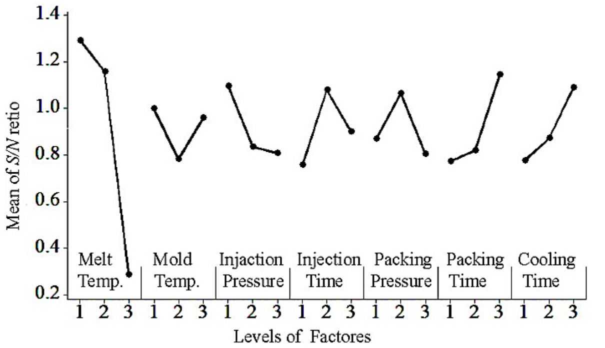

Fig. 23 *S/N* ratio of refractive index quantity graph

شکل 23 نمودار سیگنال به نویز کمیت ضریب شکست

دمای مذاب، زمان نگهداری، فشار تزریق و فشار نگهداری است. از مطالب و نتایج بالا می‌توان دریافت که کنترل میزان دمای قالب، مذاب و فشار داخل گودی قالب و همچنین نشان دادن وضعیت برخط[1] به اپراتور تزریق می‌تواند کمک شایانی در بهبود کیفیت لنز نماید. این مهم توسط قرار دادن حسگرهای کنترل فشار- دما در نقاط مورد نظر در قالب (به صورت نشان داده شده در تحلیل‌های بالا) صورت خواهد پذیرفت. شکل‌های 24 و 25 وضعیت نمودار فشار- دما را در بهترین سطح کیفی لنز نشان می‌دهد. آن‌چه حائز اهمیت است این وضعیت نمودارها با حالات بهترین وضعیت هندسی مطابقت می‌کند. به عبارت دیگر اگر روند رشد و افول نمودار فشار- دما مطابق شکل باشد می‌توان گفت بهترین کیفیت لنزی را درپی خواهد داشت.

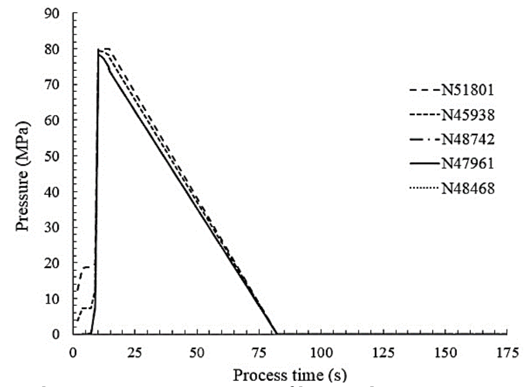

Fig. 24 The pressure curve in cavity of best quality Lens

شکل 24 نمودار فشار در گودی قالب در حالت بهترین کیفیت لنز

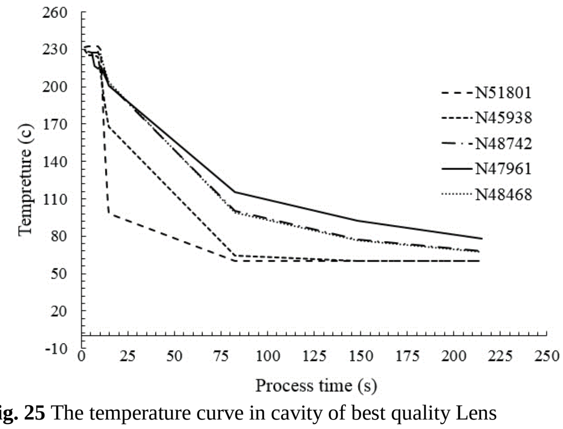

Fig. 25 The temperature curve in cavity of best quality Lens

شکل 25 نمودار دما در گودی قالب در حالت بهترین کیفیت لنز

[1] On line situation

10- مراجع

[1] K. M. Tsai, J. K. Lan, Correlation between runner pressure and cavity pressure within injection mold, *Advance Manufacture Technology*, Vol. 13, pp. 273-284, 2014.

[2] M. Sortino, G. Totis, E. Kuljanic, Comparison of injection molding technologeis for the of micro-optical devices, *Procedia Engineering*, Vol. 69, pp. 1296–1305, 2014.

[3] X. Lu, L. Soo Khim, A statistical experimental study of the injection molding of optical lens, *Material's Processing Technology*, Vol. 113, pp. 189-195, 2001.

[4] K. M. Tsai, C. Y. Hsieh, W. C. Lo, A study of the effects of proccess Parameter for injection molding on surface quality of optical lens, *Material's Processing Technology*, Vol. 209, pp. 3469-3477, 2009.

[5] R. Spina, J. Schild, C. Hopmann, Analysis of lens manufacturing wuth injection molding, *Precision Engeering And Manufacture*, Vol. 13, No. 11, pp. 2085-2095, 2012.

[6] K. M.Tsai, Runner design to improve quality of plastic optical lens, *Advance Manufacture Technology*, Vol. 66, pp. 523-536, 2013.

[7] Y. B. Lee, T. H. Kown, Modeling and numerical simulations of residual stresses and birefringence in Injection molded center-gated disks, *Materials Processing Technology*, Vol. 111, pp. 214-218, 2001.

[8] S. Chemical lab, Peroperties of PMMA HT-55X, Sumipex Acrilic Molding Resin, *Catalogue of Material*, Singapore, 2007.

[9] Autodesk co., *Average Volumetric Shirinkage*, https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-flex/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2015/ENU/MoldflowInsight360, 2014.

[10] Moldflow insight software, help, Contributors to warpage, 2016.

[11] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, Edition 5th, pp. 420-431, New York: Wiley, 2001.

[12] M. V. Gurp, J. Palmen, Time-Temperature superposition for polymeric blends, *Rheology Bulletin*, Vol. 67, pp. 5, 1998.

[13] WLF equation, https://en.wikipedia.org/wiki/Williams-Landel-Ferry_equation.

[14] R. Li, Time-temperature superposition method for glass transition temperature of plastic materials, *Materials Science and Engineering*, Vol. 77, pp. 36-45, 2000.

[15] Moldflow Plastic Lab.*Viscoelastic Peroperties of PMMA-HT55X, Viscoelastic Test Method (QOP-19-M)*, 2009.

[16] H. Mohamed, M. H. Lee, M. Sarahintu, S. Salleh, B. Sanugi, Taguchi's quality loss function approach in analysis performance of the dynamic source routing protocol, *Proceedings of the 5th Asian Mathematical Conference*, Issue.7, pp.1-7 Malaysia, June 22-26, 2009.