



## بررسی تجربی تأثیر ضخامت، زمان حرارت دهی و جهت اکستروود بر انقباض حرارتی و تغییرات ضخامت ورق ABS در فرایند وکیوم فرمینگ

یوسف میرزالو<sup>1</sup>، پیام سرائیان<sup>2\*</sup>، احسان شکوری<sup>3</sup>، محمد نجفی<sup>4</sup>

1- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

4- دانشیار، مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

\* نجف آباد، کدپستی: 8514143131. p\_saraeian@iau-tnb.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

در فرایند وکیوم فرمینگ تعیین شرایط بهینه و انتخاب مقادیر مناسب پارامترها سبب بهبود کیفیت ابعادی و ظاهری قطعات و کاهش ضایعات و دورریز قطعات، طی فرایند تولید می‌شود. در این تحقیق ورق با ضخامت 2 میلی‌متر از جنس ABS انتخاب و قالب آن از جنس آلومینیوم ساخته شد، سپس آزمون‌های تجربی با دو ضخامت اولیه ورق (4 و 5 میلی‌متر)، شش زمان حرارت دهی ("315"، "330"، "345" و "360"، "375"، "390") و جهت تغذیه ورق (عمودی یا افقی جهت اکستروود) انجام گردید. بعد از اندازه برداری سه بعدی قطعات وکیوم شده، تأثیر پارامترهای فوق بر روی تغییرات ضخامت و انقباض حرارتی مورد بررسی قرار گرفت. افزایش زمان حرارت دهی سبب بهبود جریان پذیری و توزیع یکنواخت ضخامت ورق گردیده و کمترین تغییرات ضخامت تا 2 درصد در زمان حرارت دهی "345" برای ورق 4 میلی‌متر و "390" برای ورق 5 میلی‌متر و کمترین انقباض حرارتی 0/3 درصد در زمان حرارت دهی "315" برای ورق 4 میلی‌متر در شرایط یکسان تغذیه ورق (عمود بر جهت اکستروود) حاصل گردید. با تغییر ضخامت اولیه ورق از 4 به 5 میلی‌متر، تغییرات ضخامت روند کاهشی داشته اما انقباض حرارتی تا 0/9 درصد افزایش یافت. عمود بودن ساختار زنجیره ای مواد اکستروود شده با جهت وکیوم باعث مقاومت لغزش لایه‌ها بر روی یکدیگر و کاهش تغییرات ضخامت در حالت عمودی V از 35 درصد به صفر و انقباض حرارتی از 1/2 به 0/3 درصد شده است.

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 20 مهر 1398  
داوری اولیه 18 اسفند 1398  
پذیرش: 16 فروردین 1399

### کلیدواژگان:

ضخامت  
زمان حرارت دهی  
جهت اکستروود  
انقباض حرارتی

## Experimental investigation on the effect of thickness, heating time and extrude direction on thermal shrinkage and thickness variations ABS sheet in vacuum forming process

Yousef Mirzaloo<sup>1</sup>, Payam Saraeian<sup>2\*</sup>, Ehsan Shakouri<sup>3</sup>, Mohammad Najafi<sup>1</sup>

1- Mechanical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Mechanics, Najaf Abad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

3- Mechanics, Tehran North Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

\* P.O.B. 8514143131 Najafabad, Iran, p\_saraeian@iau-tnb.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received: 12 October 2019  
First Decision: 9 March 2020  
Accepted: 4 April 2020

### Keywords:

Thickness  
Heating Time  
Extruded Direction  
Thermal Shrinkage

### Abstract

In vacuum forming process, determining the optimum conditions and selecting the appropriate values of parameters improves the dimensional and physical quality of the components and reduces waste and discarded parts during the manufacturing process. In this research, the ABS sheet with 2 mm thickness was selected and the mold was made from aluminum, then the experimental tests were performed by varying the initial sheet thickness (4 and 5 mm), Six temperature times (390", 375", 360" and 345", 330", 315") and direction of feeding the sheet (vertical or horizontal for extruding). After 3D-measurement of vacuum components, the influence of the values and conditions of the parameters on the thickness and thermal shrinkage changes were studied. Increasing the heating time resulted in improved flow and steady distribution of sheet thickness, While the minimum changes of thickness (up to 2%) for the vacuum of the 4 mm sheet happened in heating time of 345", and for the vacuum of the 5mm sheet occurred in heating time of 390", and minimum thermal shrinkage (0.3%) was seen in heating time of 315" for 4 mm sheet by the direction of extrudes. By changing the primary thickness of the sheets from 4mm to 5 mm, thickness variations reduced but the thermal shrinkage increased up to 0.9%. The vertical position of extruded materials chained structure with vacuum orientation caused the layers slippage resistance on each other and led to decreased thickness variations from 35% to zero and also reduced thermal shrinkage from 1.2 to 0.3%.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Y. Mirzaloo, P. Saraeian, E. Shakouri, M. Najafi, Experimental investigation on the effect of thickness, heating time and extrude direction on thermal shrinkage and thickness variations ABS sheet in vacuum forming process, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 8, pp. 1- 9, 2020 (in Persian)

## 1- مقدمه

فرایند ترموفرمینگ<sup>1</sup> (شکل دهی گرمایی) یک فرایند مهم به دلیل هزینه کم و شکل پذیری خوب در صنعت می باشد. با پیدایش مواد و کاربردهای جدید، رشد این فرایند بطور چشمگیر افزایش یافت [1]. تعیین شرایط پارامترها و انتخاب مقادیر مناسب آنها نسبت به هم در فرآیند وکیوم قطعه ای با شکل و هندسه متفاوت کار آسانی نبوده و عموماً بصورت تجربی انجام می گردد. کیفیت ابعادی، ظاهری و استحکام قطعات تولید شده به پارامترهای مختلفی همچون ضخامت اولیه ورق، جهت تغذیه ورق، ارتفاع نرم شدگی ورق، زمان حرارت دهی و غیره بستگی دارند. در صورت انتخاب نامناسب ضخامت اولیه ورق، تغییرات ضخامت در نقاط قطعه وکیوم شده متفاوت بوده و منجر به استحکام پایین و پارگی می گردد. بعلاوه اگر زمان حرارت دهی مناسب نباشد، ورق به نرم شدگی لازم نرسیده و با عدم فرم پذیری و سوختگی روبرو خواهد شد [2]. سه نوع ورق پلی اتیلن وینیل استات کوپلیمر، الفین کوپلیمر و پلی الفین پلی استایرن پلیمر با شرایط ارتفاع حباب 15 میلی متر برای وکیوم بررسی و مشخص شد کاهش تغییرات ضخامت در الفین کوپلیمر بهتر از سایر ورق ها بود [3]. بررسی پارامتر فشار خلاء وکیوم بر توزیع مناسب ضخامت ورق پی وی سی نشان داد افزایش شعاع دیواره قالب منجر به بهبود شرایط می گردد [4]. بررسی فرم قالب استوانه ای و مخروطی و انجام وکیوم به کمک ارتفاع حباب پلاگین، توزیع ضخامت یکنواخت تری نسبت به شکل گیری منفی فراهم می کند [5]. تکنیک های ترموفرمینگ و جانمایی موقعیت مدل قبل از فرآیند وکیوم بر روی ورق اتیلن وینیل استات و تأثیر تغذیه از جلو با فاصله 40 میلی متری در بهبود توزیع ضخامت انجام شده است [6]. بررسی شرایط مناسب حرارتی ورق های پلی استایرن با چهار شرایط نرم شدگی ورق آشکار ساخت که وضعیت نرم شدگی در ارتفاع 10 میلی متر دارای بیشترین ضخامت می باشد [7]. در یکی دیگر از مطالعات بررسی تأثیر سه زمان وکیوم قطعه (بلافاصله، 5 و 10 ثانیه) بعد از حرارت دهی ورق، محققان دریافتند وکیوم ورق در زمان های 5 و 10 ثانیه دارای افت ضخامت کمتری می باشد [8]. توزیع ضخامت مواد در گوشه ها، دیوارها و سطوح بستگی به ماده آزمایش و روند تشکیل آن داشته و با افزایش شعاع گوشه ها، شرایط قطعه بهبود می یابد [9]. بررسی تأثیر شکل ورق اولیه (چهارگوش و گرد با نرم شدگی 15 و 10 میلی متر در دو جهت

تغذیه ورق عمودی جهت اکستروژن<sup>2</sup> و افقی جهت اکستروژن<sup>3</sup> نشان داد ورق گرد با توجه به شکل قطعه در جهت تغذیه عمودی دارای کمترین انقباض حرارتی می باشد [10]. روش های وکیوم آزاد (بدون قالب) و وکیوم با کمک ارتفاع حباب پلاگین بررسی و با توجه به معایب و مزایای هر دو روش پیشنهاد گردید که جهت توزیع یکنواخت و عدم اثرپذیری علامتی روی قطعه از ترکیب دو روش استفاده گردد [11]. مطالعه بر روی شکل اولیه دو ورق اتیلن وینیل استات با توجه به شرایط فرم دهان نشان داد ورق اولیه با ایجاد شیار V شکل در هنگام وکیوم دارای کمترین افت ضخامت می باشد [12]. بررسی شرایط گرمادهی ورق یکطرفه برای ارتفاع وکیوم 95 میلی متر و دو طرفه برای 110 میلی متر، پیشنهاد افزایش شعاع گوشه ها و شیب دیواره به منظور بهبود توزیع ضخامت ورق را مطرح نمود [13]. در خصوص تأثیر افزایش ضخامت قطعه در ازدیاد انقباض حرارتی پلاستیک ها [14] و توزیع ضخامت دیواره قطعه در شرایط متفاوت گرمادهی ورق مطالعاتی به انجام رسیده است [15]. تحقیقی در خصوص هندسه قطعه و هندسه ابزار بستن ورق انجام پذیرفته و پیشنهاد گردیده که جهت توزیع ضخامت یکنواخت، هندسه ابزار بستن دایره ای برای قطعات استوانه ای و مستطیل شکل برای قطعات مستطیل انتخاب شود [16]. مطالعات نشان دادند که پارامترهای دمای ورق، سرعت وکیوم و اصطکاک در سطح وکیوم در میزان کاهش تغییرات ضخامت قطعه مؤثر می باشند [17]. توزیع ضخامت در قطعه ای به شکل لیوان نشان داد که افت ضخامت در گوشه قطعه نسبت به دیواره و سطوح تخت بیشتر بوده که با افزایش شعاع منجر به بهبود می گردد [18]. تحقیقاتی در خصوص جهت تغذیه ورق عمودی و افقی انجام شده و تأثیر کاهش انقباض حرارتی در شرایط عمود بر جهت اکستروژن گزارش شده است [19]. در تحقیقات قبلی عمدتاً یک یا دو پارامتر مثل ضخامت، جهت اکستروژن بررسی و تأثیرات آن در برخی بر روی تغییرات ضخامت و در برخی تحقیق ها بر روی انقباض حرارتی بررسی شده است. در این تحقیق سه پارامتر مؤثر شامل جهت تغذیه ورق (عمودی یا افقی)، ضخامت اولیه ورق (4 و 5 میلی متر) و از همه مهمتر زمان حرارت دهی بخصوص بر روی ورق ABS (پرکاربرد در صنعت خودرو) انتخاب و تأثیر آن نسبت به هم بصورت همزمان بر روی تغییرات ضخامت و انقباض حرارتی بررسی گردیده است.

<sup>2</sup> Vertical for extruding<sup>3</sup> Horizontal for extruding<sup>1</sup> Thermoforming

## 2- تجربی

برای انجام این تحقیق طراحی و ساخت قالب مطابق با قطعه شکل 1 انجام گردید. نمونه‌های مورد آزمایش و کیوم شده و پس از اندازه برداری سه بعدی، تأثیر شرایط سه پارامتر (ضخامت اولیه ورق، زمان حرارت دهی و جهت تغذیه ورق)، بر تغییرات ضخامت و انقباض حرارتی<sup>1</sup> بررسی گردیده که در ادامه توضیح داده شده است.

### 2-1- تهیه قطعه و قالب

مشخصات ورق قطعه از جنس ای بی اس<sup>2</sup> جهت آزمایشات مطابق جدول 1 می‌باشد. مساحت ورق اولیه و کیوم شده با ضخامت 2 میلی‌متر حدود 0/28 متر مربع می‌باشد. برای رسیدن به این ضخامت بعد از و کیوم و همچنین جهت بررسی و مشخص نمودن وضعیت تغییرات ضخامت و انقباض حرارتی، ضخامت اولیه ورق در دو حالت حداقل و حداکثر ضخامت یعنی 4 و 5 میلی‌متر در ابعاد 400×400 میلی‌متر انتخاب گردید.

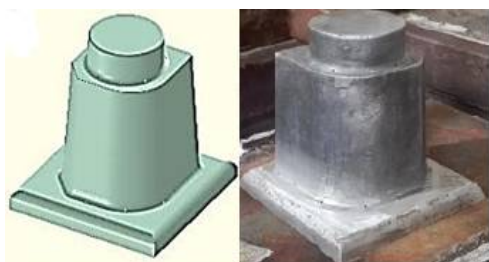


Fig. 2 Die for vacuum forming of the samples

شکل 2 قالب جهت و کیوم فرمینگ نمونه‌ها

جدول 2 شرایط آزمایش و کیوم فرمینگ

Table 2 Vacuum forming test conditions

شماره	پارامترهای متغیر آزمایش	دمای ورق در	زمان و کیوم	زمان حرارت دهی (ثانیه)	جهت تغذیه	ضخامت ورق	آزمایش
1	V	200 درجه	315"	4	V		
2	H	206 درجه	330"	4	H		
3	V	210 درجه	345"	4	V		
4	H	215 درجه	360"	5	H		
5	V	218 درجه	375"	5	V		
6	H	220 درجه	390"	5	H		

جدول 3 وضعیت قطعه در زمان و کیوم

Table 3 The status of the piece at vacuum time

وضعیت قطعه	زمان حرارت ورق 4	زمان حرارت ورق 5
پارگی و عدم و کیوم	300"	345"
و کیوم	3150"	360"
و کیوم	330"	375"
و کیوم	345"	390"
سوختگی، پارگی	360"	405"

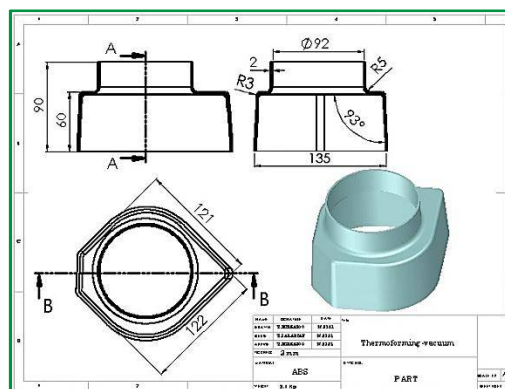


Fig. 1 Piece model for testing the samples

شکل 1 مدل قطعه جهت تست نمونه‌ها

جدول 1 مشخصات ورق جهت تست نمونه‌ها

Table 1 Sheet specifications for samples test

شرکت ورق	Mfi	Shrinkage	Specific Gravity
ABS قاندر	35g/10min At 10kg load,	0.4 - 0.4%-	1.04At +23c°
50 بصیر	220c°- ASTM D1238	ASTM D955	ASTM D792

قالب از جنس آلومینیوم مطابق شکل 2 جهت و کیوم قطعات ساخته شده و سوراخ‌های مکش هوا روی قالب ایجاد گردید.

### 2-2- و کیوم

در این تحقیق ضخامت اولیه ورق (4 و 5 میلی‌متر)، شش زمان

<sup>1</sup> Thermal shrinkage

<sup>2</sup> Acrylonitrile Butadiene Styrene

بعد از جدا نمودن دورریز قطعات و کیوم شده، اندازه‌گیری ابعادی قطعات توسط دستگاه سه بعدی نوری انجام گرفته و فایل سه بعدی بدست آمده توسط نرم‌افزار مدل‌سازی با فایل قطعه اصلی منطبق می‌گردد.

برای بررسی تغییرات ضخامت، چهار نقطه ( $t_1, t_2, r_3, r_4$ ) مطابق شکل 5 بر روی قطعه مشخص گردید و با اندازه‌گیری ضخامت قطعات و کیوم شده و تعیین میانگین نتایج، تأثیرات هر کدام از پارامترهای متغیر (زمان حرارتی، ضخامت قطعه و جهت اکستروژن ورق) در آن نقاط مورد بررسی قرار گرفت. قطعه و کیوم شده با رنگ بنفش و قطعه اصلی با رنگ سبز در شکل‌های زیر مشخص شده است.

برای بررسی انقباض حرارتی، چهار مقطع ( $Q_1, L_2, L_3, L_4$ ) مطابق شکل 6 بر روی قطعه مشخص گردید و با اندازه‌گیری انحراف ابعادی قطعات و کیوم شده و تعیین میانگین، تأثیر هر کدام از پارامترهای متغیر (زمان حرارتی، ضخامت قطعه و جهت اکستروژن ورق) در آن ابعاد مورد بررسی قرار گرفت.

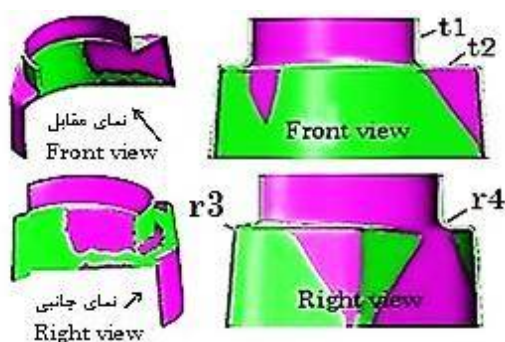


Fig. 5 Specific sections for thickness variations analysis  
شکل 5 مقاطع مشخص شده جهت بررسی تغییرات ضخامت

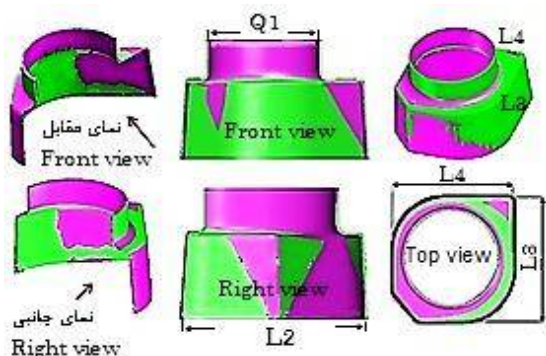


Fig. 6 Specific sections for thermal shrinkage analysis  
شکل 6 مقاطع مشخص شده جهت بررسی انقباض حرارتی

### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- تغییرات ضخامت

تأثیر زمان حرارت دهی بر روی تغییرات ضخامت بر اساس

بعد از تنظیمات مربوط به مقادیر ثابت پارامترها، قالب بسته شده روی دستگاه توسط هیتر گرم کن به دمای 57 درجه می‌رسد. مطابق مراحل آزمایش مشخص شده در جدول 2 ورق با در نظر گرفتن جهت تغذیه ورق بصورت افقی یا عمود بر جهت اکستروژن، بر روی کف دستگاه قرار گرفته و ورق گیر دور آن را احاطه می‌کند. بلافاصله هیتر دستگاه با دمای 300 درجه سانتی‌گراد روی ورق هدایت شده و بر اساس زمان حرارت دهی تعیین شده در هر مرحله آزمایش شروع به حرارت دهی ورق میکند. بعد از اتمام هر مرحله زمان حرارت دهی، هیتر از روی ورق کنار رفته و بلافاصله دمای ورق توسط دستگاه دما سنج لیزری ثبت می‌گردد. سپس ارتفاع حباب جهت توزیع یکنواخت ضخامت ورق که حدود 85 درصد عمق نرینگی قالب بوده توسط دمش هوا زیر ورق مطابق شکل 3 ایجاد می‌گردد.

در این مرحله قالب به سمت ورق هدایت شده و کیوم قطعه انجام می‌گیرد. در این لحظه با مکش هوا ورق به آرامی دور سنبه قالب را در بر گرفته و شکل قالب را به خود می‌گیرد. فرایند خنک‌کاری طی مدت 60 ثانیه از طریق فن کوئل بالای دستگاه انجام گرفته و قطعه و کیوم شده از دستگاه خارج می‌گردد. تمامی آزمایشات مشخص شده در جدول 2 مطابق مراحل ذکر شده فوق در سه مرحله تکرارپذیری و کیوم شده و نمونه قطعات مطابق شکل 4 تولید گردید.



Fig. 3 Primary bubble and heater of the sheet for vacuum forming  
شکل 3 هیتر حرارت دهی و حباب اولیه ورق جهت کیوم فرمینگ



Fig. 4 Sample of vacuum formed parts

شکل 4 نمونه قطعات و کیوم شده

ضخامت کاهش می‌یابد. زیرا بر پایه مطالعه تحقیقات انجام شده با افزایش زمان حرارت دهی، دما در سطح ورق افزایش یافته و منجر به جریان پذیری و توزیع یکنواخت ضخامت ورق و کاهش تغییرات ضخامت می‌گردد [17، 18].

- تأثیر مقدار ضخامت بر روی تغییرات ضخامت بر اساس میانگین نتایج در شکل 8 مشخص گردیده است.

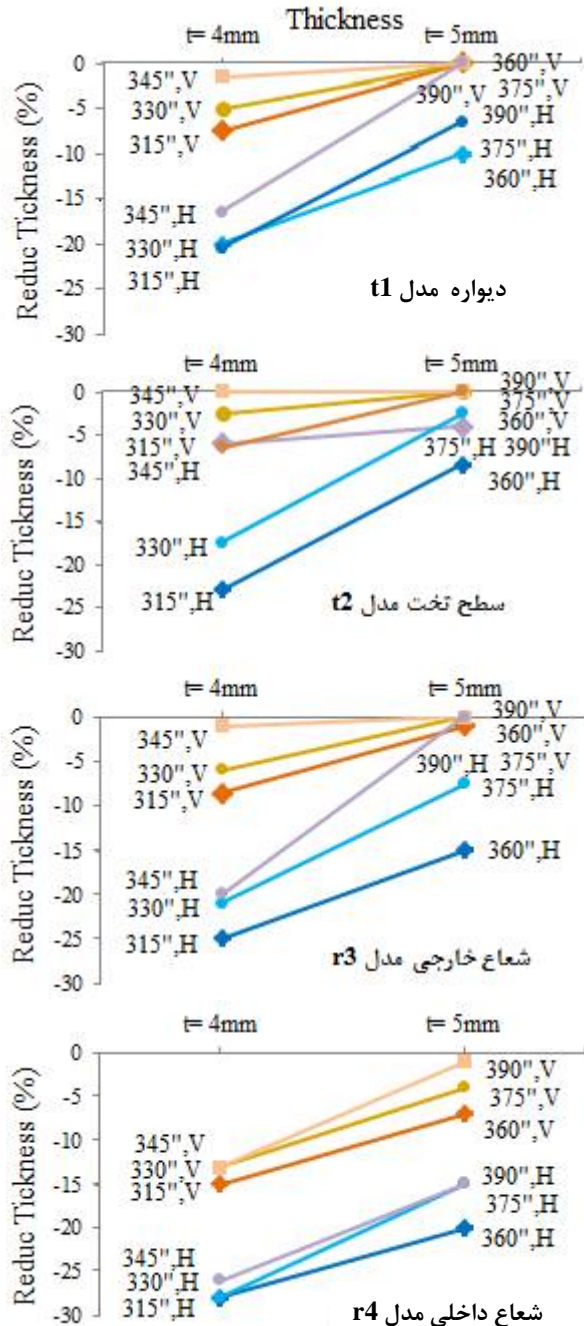


Fig. 8 Results of the thickness effect on thickness variations  
شکل 8 نتایج تأثیر مقدار ضخامت بر روی تغییرات ضخامت

در ادامه طبق شش زمان حرارت دهی و اندازه‌گیری ضخامت در قطعات وکیوم شده با ورق اولیه 4 و 5 میلی‌متر مشخص

میانگین نتایج در شکل 7 مشخص گردیده است.

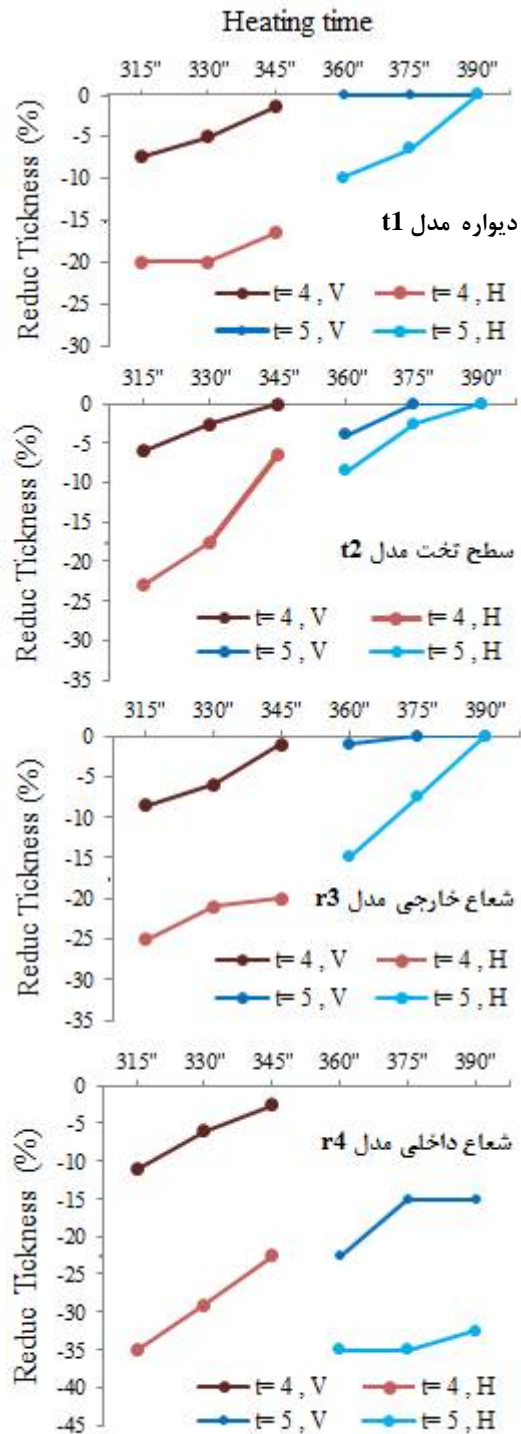


Fig. 7 Results of the heating time effect on thickness variations  
شکل 7 نتایج تأثیر زمان حرارت دهی بر روی تغییرات ضخامت

مطابق شش زمان حرارت دهی و آزمایش‌های انجام گرفته روی ورق ضخامت 4 و 5 میلی‌متر و با اندازه‌گیری ضخامت در چهار نقطه مورد نظر قطعات وکیوم شده ( $t_1, t_2, r_3, r_4$ ) مشخص گردید که با افزایش زمان حرارت دهی درصد تغییرات

مطابق نتایج شکل 9 در چهار نقطه قطعات وکیوم شده مشخص گردید جهت قرار گیری یا تغذیه ورق روی دستگاه در حالت اکستروژن عمودی V به دلیل عمود بودن ساختار زنجیره‌ای مواد با جهت وکیوم منجر به کاهش درصد تغییرات ضخامت می‌گردد. بر پایه تحقیقات انجام شده در شرایط عمودی جهت اکستروژن، مقاومت لغزش لایه‌ها روی هم و ایجاد کرنش‌های برشی پلاستیک درون هر لایه در جهت وکیوم افزایش یافته و منجر به کاهش درصد تغییرات می‌شود [12، 19].

### 2-3- انقباض حرارتی

نتایج تأثیر زمان حرارت دهی بر روی انقباض حرارتی بر اساس میانگین انحراف در شکل 10 ارائه گردیده است.

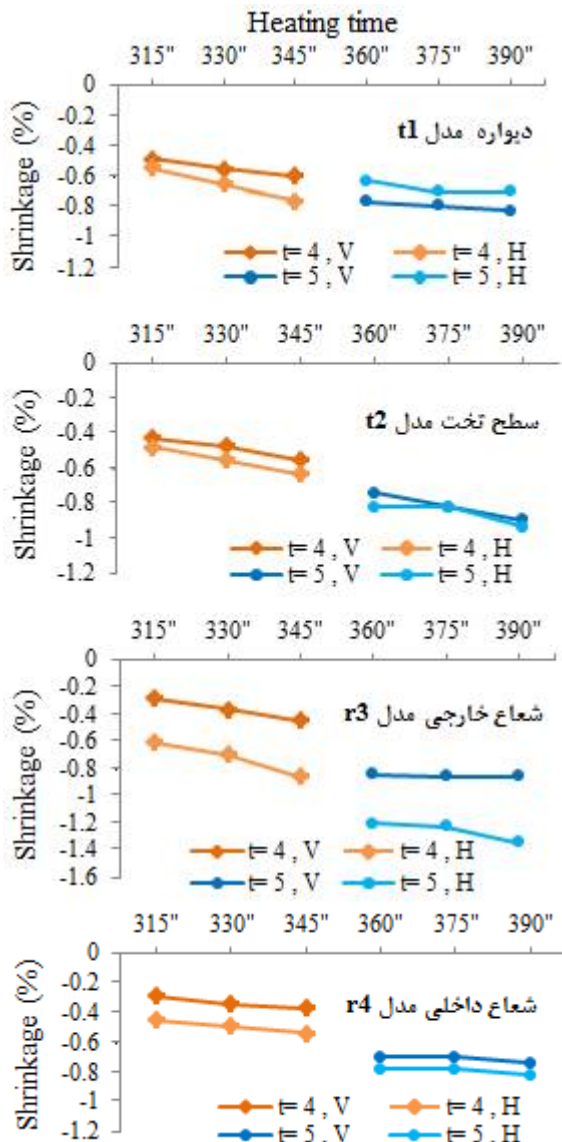


Fig.10 Results of the heating time effect on thermal shrinkage

شکل 10 نتایج تأثیر زمان حرارت دهی بر روی انقباض حرارتی

گردید افزایش ضخامت ورق از 4 به 5 میلی‌متر باعث کاهش درصد تغییرات ضخامت می‌گردد. بر پایه مطالعه تحقیقات انجام شده افزایش ضخامت، اختلاف تغییراتی که در اثر دما و انقباض حرارتی در زمان وکیوم ورق ایجاد می‌شود را جبران می‌کند. ضمناً وضعیت کاهش درصد تغییرات ضخامت در حالت تغذیه ورق در جهت عمودی V بهتر از جهت افقی H بوده است [14]. تأثیر تغذیه ورق در جهت اکستروژن عمودی V و افقی H بر روی تغییرات ضخامت بر اساس میانگین در شکل 9 مشخص گردید.

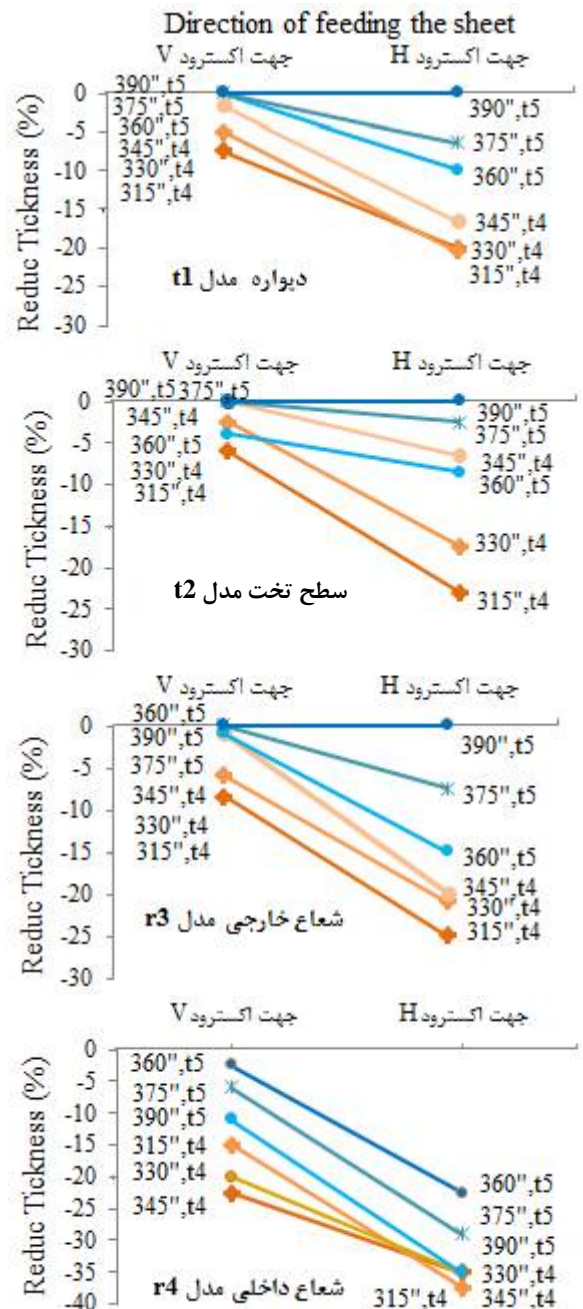


Fig. 9 Results of the extrude direction effect on thickness variations

شکل 9 نتایج تأثیر جهت اکستروژن بر روی تغییرات ضخامت

در شکل 11، وضعیت انقباض حرارتی را نسبت به جهت تغذیه ورق با ضخامت اولیه ورق 4 و 5 میلی‌متر و شش زمان حرارتی ارائه نموده و آشکار گردیده است که با افزایش ضخامت، درصد انقباض حرارتی افزایش می‌یابد. مطابق تحقیقات دلیل این افزایش، کاهش سرعت سرد شدن به دلیل دمای بالا و امکان بیشتری برای ذرات ماده جهت تشکیل بلورینگی می‌باشد [14].

نتایج تأثیر جهت اکستروژن (عمودی و افقی) بر روی انقباض حرارتی بر اساس میانگین انحراف در شکل 12 ارائه گردیده است.

مطابق شکل 10 در شش زمان حرارت دهی و دو جهت تغذیه ورق و با اندازه‌گیری ابعاد چهار مقطع ( $Q_1, L_2, L_3, L_4$ ) با ضخامت اولیه ورق 4 و 5 میلی‌متر مشخص شد با افزایش زمان حرارت دهی درصد انقباض حرارتی نیز افزایش می‌یابد. در سایر تحقیقات نیز، نشان داده شده است که با افزایش زمان حرارت دهی نیرو و استحکام کششی کاهش و با نرم شدن فاز مواد، لغزش لایه‌ها و کرنش‌های برشی به سهولت انجام گرفته و افزایش انقباض را در پی دارد [17-19]. نتایج تأثیر مقدار ضخامت بر روی انقباض حرارتی بر اساس میانگین انحراف در شکل 11 مشخص گردیده است.

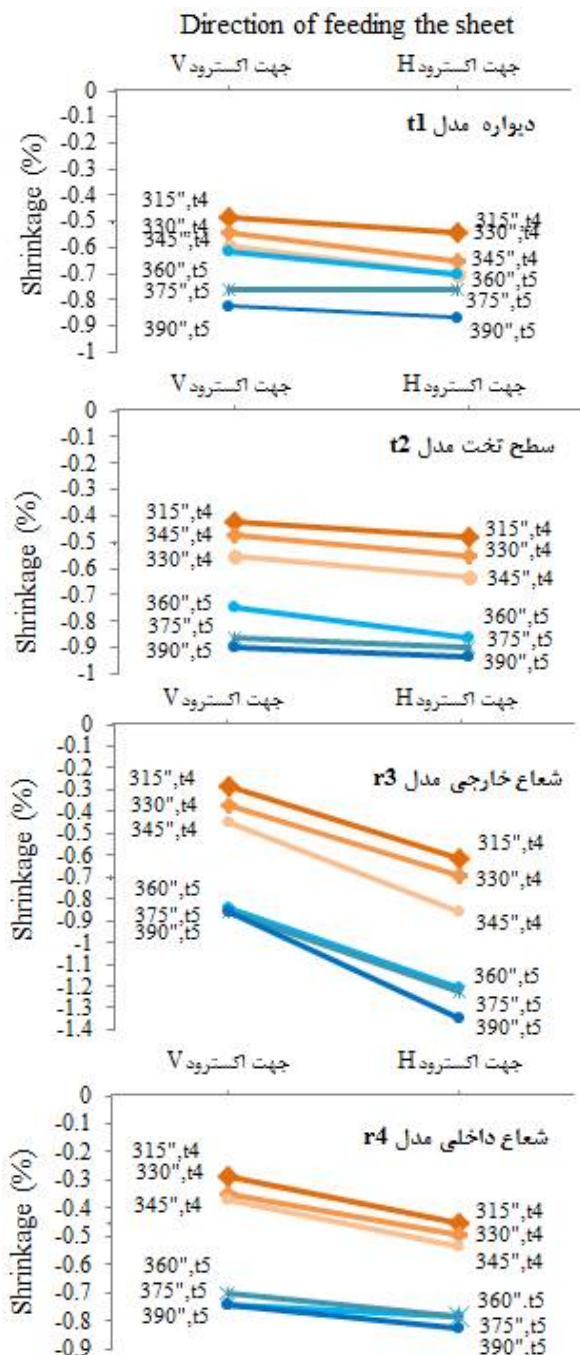


Fig. 12 Results of the extrude direction effect on thermal shrinkage  
شکل 12 نتایج تأثیر جهت اکستروژن بر روی انقباض حرارتی

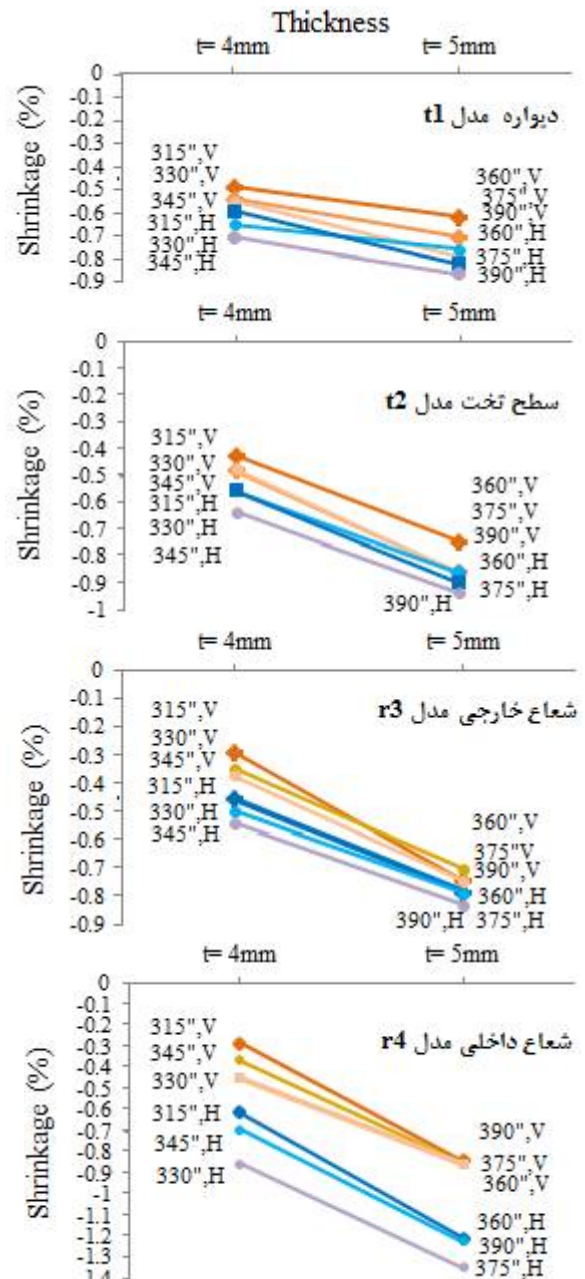


Fig. 11 Results of the thickness effect on thermal shrinkage  
شکل 11 نتایج تأثیر مقدار ضخامت بر روی انقباض حرارتی

به صفر کاهش نموده و کمترین انقباض حرارتی تا 0/3 درصد در زمان حرارت دهی 315" ثبت گردید. در وکیوم ورق 5 میلی‌متر با تغذیه ورق عمود بر جهت اکستروژن، با افزایش زمان حرارت دهی از 360" تا 390" تغییرات ضخامت در نقاط مشخص شده از 22/5 درصد به صفر کاهش نموده و کمترین انقباض حرارتی تا 0/6 درصد در زمان حرارت دهی 360" ثبت شد. این شرایط نشان دهنده این است که با افزایش زمان حرارت دهی، دما در سطح ورق بیشتر شده و منجر به بهبود در جریان پذیری و توزیع یکنواخت ضخامت ورق گردیده و درصد تغییرات ضخامت و انقباض حرارتی را کاهش می‌دهد.

- با افزایش ضخامت اولیه ورق از 4 به 5 میلی‌متر نیز درصد تغییرات ضخامت در نقاط و مقاطع مشخص شده از 10 درصد به صفر روند کاهشی داشته است. اما درصد انقباض حرارتی در این نقاط از 0/3 به 0/9 درصد افزایش پیدا نمود. این امر به دلیل افزایش ضخامت و کاهش سرعت سرد شدن قطعه به دلیل دمای بالا به ذرات ماده فرصت بیشتری برای تشکیل بلور داده و منجر به افزایش درصد انقباض حرارتی می‌گردد.

تغییرات ابعادی و انقباض حرارتی در گذر زمان می‌تواند توسط عامل‌های مختلفی مثل شرایط کاری، وجود نیروها و فشار خارجی و ... اتفاق بیافتد. اما در این تحقیق بررسی تغییرات ضخامت و انقباض حرارتی صرفاً مربوط به زمان انجام فرایند وکیوم بوده تا فقط نقش و تأثیر پارامترهای متغیر زمان حرارت دهی، ضخامت قطعه و جهت تغذیه ورق بر روی قطعات وکیوم شده بررسی شود. در این خصوص پارامترهایی همچون دمای قالب، زمان وکیوم، فشار خلاء مکش هوا، دمای هیتر دستگاه، زمان خنک‌کاری، ارتفاع نرم‌شدگی در تمامی آزمایشات جزو پارامترهای ثابت در نظر گرفته شده است. بعد از وکیوم قطعات نیز بلافاصله اندازه‌گیری سه بعدی قطعات انجام گرفته است. لذا سرعت سرد شدن، ضخامت قطعه، درصد بلورینگی و دمای کاری قطعه تا مرحله اندازه‌گیری سه بعدی بصورت ثابت و یکسان برای کلیه آزمایشات می‌باشد.

## 5- مراجع

- [1] T. Kittikanjanaruk, S. Patcharaphun, *Computer Simulation and Experimental Investigations of Wall-Thickness Distribution in High Impact Polystyrene and Amorphous Polyethylene Terephthalate Thermoformed Parts*, Department of Materials Engineering, Vol. 47(2), pp. 302-309, 2013.
- [2] K. Atashgar, O. Asghari, *Control of the thermal forming process of decorative parts of the car using the profile approach*, *Journal of Quarterly Journal*

در شکل 12، نتایج چهار مقطع مورد نظر قطعات وکیوم شده ارائه گردیده است. این نتایج آشکار ساختند جهت تغذیه ورق در حالت اکستروژن عمودی V به دلیل عمود بودن ساختار زنجیره ای مواد با جهت وکیوم علاوه بر کاهش درصد تغییرات ضخامت مطابق شکل 9، منجر به کاهش درصد انقباض حرارتی گردیده است. بر پایه مطالعه تحقیقات انجام شده عمود بودن ساختار زنجیره ای مواد اکستروژن شده با جهت وکیوم باعث مقاومت در لغزش لایه‌ها بر روی یکدیگر و ایجاد کرنشهای برشی پلاستیک درون هر لایه در جهت وکیوم گردیده و مقاومت حاصله باعث کاهش درصد انقباض حرارتی می‌گردد [12, 19].

## 4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق جهت بررسی تأثیر سه پارامتر مؤثر و متغیر ضخامت ورق ABS، زمان حرارت دهی و جهت تغذیه ورق عمودی یا افقی جهت اکستروژن بر تغییرات ضخامت و انقباض حرارتی، قالب آلومینیومی بر اساس نقشه قطعه ساخته شد. پارامترهای ثابت (دمای قالب 57 درجه، زمان وکیوم 30 ثانیه، فشار خلاء مکش هوا 0/6- > مگاپاسکال، دمای هیتر دستگاه 300 درجه، زمان خنک کاری 60"، ارتفاع نرم شریگی 85 درصد عمق نرینگی) مشخص و فرایند وکیوم فرمینگ بر اساس شرایط آزمایش تعیین شده در جدول 2 با سه مرحله تکرارپذیری انجام گرفت. قطعات وکیوم شده توسط دستگاه سه بعدی اندازه برداری و بعد از انطباق با فایل قطعه و بررسی ضخامت و ابعاد قطعات، میزان تغییرات ضخامت و انقباض حرارتی در آنها بر اساس میانگین نتایج بدست آمده مورد بررسی قرار گرفت. اهم نتایج بدست آمده پس از آزمایش به شرح ذیل است.

- با تغییر جهت تغذیه ورق از حالت افقی به حالت عمود بر جهت اکستروژن، درصد تغییرات ضخامت در نقاط و مقاطع مشخص شده از 35 درصد به 10 درصد و درصد انقباض حرارتی از 1/3 درصد به 0/3 درصد کاهش پیدا کرده است. عمود بودن ساختار زنجیره ای مواد اکستروژن شده با جهت وکیوم باعث مقاومت لغزش لایه‌ها بر روی یکدیگر و ایجاد کرنشهای برشی پلاستیک درون هر لایه در جهت وکیوم می‌گردد. این حالت نشان دهنده بهبود و تثبیت در وضعیت کیفی و ابعادی قطعه در حالت عمودی نسبت به افقی می‌باشد.

- در وکیوم ورق 4 میلی‌متر با تغذیه ورق عمود بر جهت اکستروژن، با افزایش زمان حرارت دهی از 315" تا 345" تغییرات ضخامت در نقاط و مقاطع مشخص شده از 11 درصد



- thickness variation of a hemispherical PMMA sheet in thermoforming process*, Int J Adv Manuf Technol, Vol. 64, pp. 113-122, 2013.
- [12] M. Takahashi, F. Mizuhashi, *Differences in the thickness of mouthguards fabricated from ethylene vinyl acetate copolymer sheets with differently arranged v-shaped grooves: Part 2 - effect of shape on the working model*, Dental Traumatology, Vol. 30(6), July 2014.
- [13] P. Shyam Kumar, G. Kiran Kumar, S. Kommoji, R. Banerjee, A. K Ghosh, *The effect of material characteristics and mould parameters on the thermoforming of thick polypropylene sheets*, Journal of Plastic Film & Sheeting, Vol. 0(2), pp.162-180, 2014.
- [14] N. Jafarian Jam, P.Saraeian, A. Arab Aminabadi, *Experimental And Numerical Investigation of Thickness on The Shrinkage And out of Roundness Cylindrical Parts In Injection Molding Process*, Scientific, Journal of Solid Mechanics In Engineering, pp. 45-57, Vol. (6), winter 2014. (in فارسی)
- [15] S. Karabeyoglu, O. Ekşi, S. Erdoğan, *An Experimental Study On Wall Thickness Distribution In Thermoforming*, Advances in Science and Technology, pp.139-142, Vol. (11), September 2017.
- [16] E. Selcuk Erdogan, O. Ekşi, *Prediction of Wall Thickness Distribution in Simple Thermoforming Moulds*, Scientific, Journal of Mechanical Engineering, pp. 195-202, Vol. (60), 2014.
- [17] R. McCool, P.J. Martin, *The Role of Process Parameters in Determining Wall Thickness Distribution in Plug-Assisted Thermoforming*, Society of Plastics Engineers, pp. 1923-1934, 2010.
- [18] S. Kommoji, R. Banerjee, N. Bhatnagar, A. K Ghosh, *Studies on the stretching behaviour of medium gauge high impact polystyrene sheets during positive thermoforming*, Journal of Plastic Film & Sheeting, pp. 96-112, Vol. 31(1), 2015.
- [19] Y. Satoh, S. ichi Iwasaki, *Effect of thermal shrinkage during thermoforming on the thickness of fabricated mouthguards: Part 2 pressure formation*, Dental Traumatology, Vol. 33, pp. 106-109, April 2017.
- of Industrial Management*, Azad University, Vol.28, pp. 55-67, summer 2015.
- [3] M. Takahashi, K. Koide, S. ichi Iwasaki, *Thickness of mouthguard sheets after vacuum-pressure formation: influence of mouthguard sheet material*, Dental traumatology, Vol. 32, pp. 201-205, January 2016.
- [4] Y. Li, *Study on thickness distribution of thermoformed medical PVC blister*, IOP Conference Series Earth and Environmental Science, Vol. 81(1), pp. 012-043, August 2017.
- [5] O. Ekşi, S. Süreyya Karabeyoğlu, *The Effect of Process Parameters on Thickness Distribution In Thermoforming*, Advances in Science and Technology Research Journal, Vol. 11, pp. 198-204, June 2017.
- [6] Y. Bando, M.Takahashi, *Thermoforming method to effectively maintain mouthguard thickness: Effect of moving the model position just before vacuum formation*, Dental Traumatology, Vol. 9, pp. 1-20, October 2018.
- [7] S. ichi Iwasaki, M. Takahashi, *Optimal heating condition of mouthguard sheet in vacuum-pressure formation: Part 3 styrene-based thermoplastic elastomer*, Dental Traumatology, Vol. 32(6), pp. 464-468, December 2016.
- [8] F. Mizuhashi, M. Takahashi, *Difference in vacuum-formed mouthguard thickness according to timing of vacuum application*, Dental Traumatology, Vol. 32(4), November 2015.
- [9] M. Buntinx, G. Willems, G. Knockaert, D. Adons, J. Yperman, R. Carleer, R. Peeters, *Evaluation of the Thickness and Oxygen Transmission Rate before and after Thermoforming Mono- and Multi-layer Sheets into Trays with Variable Depth*, journal/polymers 2014, Vol. (6), pp. 3019-3043, December 2014.
- [10] K. Koide, M. Takahashi, *Variation in mouthguard thickness according to heating conditions during fabrication Part 2: Sheet shape and effect of thermal shrinkage*, Dental Traumatology, Vol. 32(3), pp. 185-191, September 2015.
- [11] T. Azdast, A. Doniavi, S. Rash Ahmadi, E. Amiri, *Numerical and experimental analysis of wall*