

## بررسی پارامترهای فرآیندی در تولید قطعات استوانه‌ای از جنس

### آلومینیوم ۵۰۵۲ با هیدروفرمینگ گرم

سید محمد حسین پور<sup>۱</sup>، حمید گرجی<sup>۲\*</sup>، محمد بخشی جوئیباری<sup>۳</sup>

مهندسی مکانیک گروه شکل‌دهی فلزات

دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۲/۰۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۲۳)

#### چکیده

امروزه استفاده از آلیاژهای آلومینیوم در ساختار وسایل نقلیه برای سبک کردن قطعات تولیدی و کاهش مصرف سوخت افزایش یافته است. به منظور افزایش شکل‌پذیری آلیاژهای آلومینیوم و با توجه به مشکلات شکل‌پذیری این آلیاژها در دمای اتاق، استفاده از شکل‌دهی گرم ضروری است. یکی از فرآیندهای شکل‌دهی در دمای بالا فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی در حالت گرم می‌باشد. در این مقاله، پس از بررسی اثر پارامترهای هندسی و دما (هم‌دما و غیرهم‌دما) روی توزیع ضخامت و نیروی سنبه، اثر پارامترهای مختلف (دما، فشار سیال و سرعت سنبه) روی نسبت کشش حدی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که در حالت غیرهم‌دما با افزایش دما، نازک‌شدگی بیشینه ثابت ولی نیروی سنبه بیشینه کاهش یافت. همچنین نسبت کشش حدی با افزایش دما در حالت غیرهم‌دما، فشار سیال تا مقدار خاص و سرعت سنبه و نیز کاهش دما در حالت هم‌دما، افزایش یافته است. در این پژوهش بیشترین نسبت کشش ۲/۵۲ می‌باشد که مربوط به دمای ۲۵۰ درجه سانتیگراد و شرایط دمایی غیرهم‌دما بوده است.

**واژه‌های کلیدی:** هیدروفرمینگ گرم، فشار شعاعی، هم‌دما و غیرهم‌دما، نسبت کشش حدی

## Investigation of Process Parameters in Production of Cylindrical Parts of Aluminum 5052 by Warm Hydroforming

S. M. Hosseinpour

Mechanical Engineering  
Department  
Noshirvani University of  
Technology

H. Gorji

Mechanical Engineering Department  
Noshirvani University of  
Technology

M. Bakhshi Jooybari

Mechanical Engineering Department  
Noshirvani University of  
Technology

(Received: 28/February/2015; Accepted: 12/May/2016)

#### ABSTRACT

Nowadays, using aluminum alloys in construction of transportation vehicles to lighten final product weight and reduce fuel consumption has increased. To increase the formability of aluminum alloys and due to formability problems of these alloys in room temperature using of warm forming process is necessary. One of the forming processes at elevated temperatures is warm hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure. In the paper, after investigating the effect of Geometric Parameters and temperature (isothermal and non-isothermal) on thickness distribution and punch force, the effect of different parameters (temperature, media pressure and forming speed) on the limit drawing ratio was investigated. The result show that in the non-isothermal conditions, with increase in temperature, the maximum thickness reduction remained unchanged but the punch force was decreased. Additionally, the limit drawing ratio was increased with increasing temperature in the non-isothermal conditions, media pressure and forming speed and with decreasing temperature in the isothermal conditions. In this study maximum LDR is 2.52, in non-isothermal warming condition and temperature of 250°C.

**Keywords:** Warm Hydroforming, Radial Pressure, Isothermal and Non-Isothermal, Limit Drawing Ratio

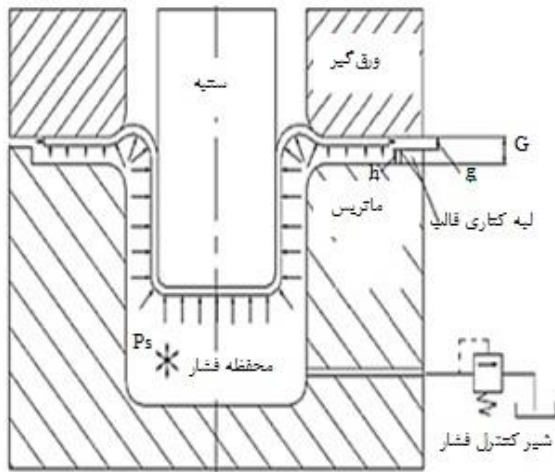
۱ - دانشجوی دکترا: Hosseinpour.m@stu.nit.ac.ir

۲ - دانشیار (نویسنده پاسخگو): Hamidgorji@nit.ac.ir

۳ - استاد: Bakhshi@nit.ac.ir

## ۱- مقدمه

امروزه استفاده از آلیاژهای آلومینیوم به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا و خواص ضد خوردگی، در صنایع مختلف از جمله صنعت خودروسازی و هوا فضا گسترش یافته است. آلیاژهای آلومینیوم سری ۵۰۰۰ دارای قابلیت کرنش سختی، قابلیت جوشکاری خوب، چگالی کم و سفتی خیلی زیاد حتی در دمای تبریدی می باشند. این آلیاژها در صنایع کشتی سازی و هوافضا و ... به عنوان جایگزینی برای ورق های فولادی مورد استفاده قرار گرفته اند [۱].



شکل (۱): شماتیکی از فرآیند کشش عمیق هیدروپنمایی با فشار شعاعی [۷].

گروچ<sup>۱</sup> و همکاران استراتژی قابل قبولی برای افزایش نسبت کشش ارائه دادند و به این نتیجه رسیدند که با گرم شدن ناحیه فلنچ، تنش جریان در این ناحیه کم شده و نسبت کشش افزایش می یابد. در ادامه این نتیجه حاصل گردید که کاهش نیروی اصطکاک در شعاع گوشه قالب باعث افزایش نسبت کشش می گردد [۹].

چانگ<sup>۲</sup> و همکاران، کشش عمیق گرم همدم را برای آلیاژ منیزیمی AZ31 به طور تجربی بررسی کرده اند. در دمای شکل دهی کمتر از  $150^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی گراد در ورق به راحتی ترک ایجاد می شود، اما در دمای  $150^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی گراد و سرعت  $15\text{ mm/min}$  نسبت کشش حدی به ۲ می رسد. در ادامه بررسی ها این نتیجه حاصل شد که از دمای  $200^{\circ}\text{C}$  تا  $300^{\circ}\text{C}$  نسبت کشش حدی می تواند به ۳ برسد [۱۰].

وانگ<sup>۳</sup> و همکاران، شکل پذیری آلیاژ آلومینیومی ۷۰۷۵ با ضخامت  $2\text{ mm}$  را در فرآیند کشش عمیق گرم همدم مورد بررسی قرار دادند. آن ها به این نتیجه رسیدند که شکل پذیری آلیاژ تا دمای  $100^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی گراد بدون تغییر می باشد و با افزایش دما تا  $180^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی گراد نسبت کشش تا ۲ افزایش می یابد. با ادامه گرم کردن تا دمای  $220^{\circ}\text{C}$  و  $260^{\circ}\text{C}$  درجه - سانتی گراد نسبت کشش کم شده و به  $1/9$  می رسد [۱۱].

چن<sup>۴</sup> و همکاران تاثیر توزیع دما روی فرآیند کشش عمیق گرم گرادانی  $5083$  در محدوده دمایی  $25^{\circ}\text{C}$  -  $250^{\circ}\text{C}$  را

در طی سال های اخیر، فرآیند هیدروفرمینگ ورق به منظور تولید قطعات متنوع و پیچیده، توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است [۴-۲]. در این فرآیند از یک سیال تحت فشار در درون محفظه قالب، به عنوان محیط تغییر شکل دهنده استفاده می شود [۵]. فرآیند هیدروفرمینگ در مقایسه با فرآیند کشش عمیق سنتی دارای مزایایی مانند نسبت کشش بالاتر، دقت ابعادی بیشتر، کاهش برگشت پذیری، کیفیت سطح بیشتر، تولید قطعات با نسبت استحکام به وزن بالاتر و ... می باشد [۶].

فرآیند هیدروفرمینگ دارای روش های مختلفی می باشد که یکی از این روش ها، کشش عمیق هیدروپنمایی با فشار شعاعی می باشد. در این روش با ایجاد پله در قالب، به لبه ورق فشار وارد می شود. این فشار (فشار شعاعی) باعث جریان بهتر ورق به درون قالب، افزایش نسبت کشش، کاهش نیروی پرس و شکل دهی قطعات پیچیده تر می شود [۷]. در شکل ۱ شماتیکی از فرآیند کشش عمیق هیدروپنمایی با فشار شعاعی نشان داده شده است.

علاوه بر مزایای ذکر شده برای آلیاژهای آلومینیوم در بالا، این آلیاژها دارای یک عیب عمده بوده و آن قابلیت شکل پذیری پایین در دمای اتاق در مقایسه با فولادهای کم کربن می باشد. برای رفع این مشکل، شکل دهی در دماهای بالاتر از دمای اتاق صورت می گیرد. بدین ترتیب روش های شکل دهی گرم رونق پیدا کردند [۸]. یکی از فرآیندهای گرم، فرآیند هیدروفرمینگ گرم می باشد.

فرآیند هیدروفرمینگ گرم از نظر دمایی مجموعه به دو دسته گرم همدم و گرم گرادانی دسته بندی می شود. در حالت همدم، تمامی اجزا (مجموعه قالب، ورق و سیال) در دمای یکسان قرار داشته اما در حالت گرادانی یکی از اجزا (که معمولاً سنبه می باشد) در دمایی متفاوت قرار دارد.

1- Groche  
2- Chang  
3- Wang  
4- Chen

فشار سیال و سرعت سنبه روی نسبت کشش حدی مورد مطالعه قرار گرفت.

## ۲- آزمایش تجربی

در این مقاله، آزمایش‌ها بر روی ورق آلومینیومی ۵۰۵۲ به ضخامت ۲ mm برای تولید قطعه استوانه‌ای سرتخت و بررسی پارامترهای تاثیرگذار روی آن با استفاده از قالب کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی انجام شده است. ابعاد هندسی قالب در جدول ۱ آورده شده است. تمامی آزمایش‌ها با دستگاه پرس اوینورسال انجام شد. این دستگاه دارای سامانه کنترل بوده و می‌توان به کمک آن تمامی حرکات دستگاه را در حین انجام آزمایش کنترل نمود. همچنین قابلیت تنظیم سرعت که یکی از فاکتورهای تاثیرگذار در فرآیندهای گرم بوده را نیز دارا می‌باشد.

جدول (۱): ابعاد هندسی قالب.

مقدار	مشخصه
۳۶	قطر سنبه (mm)
۶	شعاع گوشه سنبه (mm)
۴۰/۶	قطر محفظه داخلی قالب (mm)
۶	شعاع ورودی محفظه قالب (mm)
۰/۳	لقی بین ورق و ورق گیر (mm)

فرآیند هیدروفرمینگ گرم نیازمند تجهیزاتی است که دمای اجزا را تامین، کنترل و اندازه‌گیری کند. نحوه گرم و سرد کردن اجزا به حالت دمایی مورد نظر بستگی دارد. همان‌طوری‌که اشاره شد می‌توان تمامی اجزا را تا یک دمای یکسان گرم یا این‌که دماهای متفاوت برای آن‌ها ایجاد نمود. بدین ترتیب دو حالت هم‌دما و غیرهم‌دما تعریف می‌گردد. برای ایجاد دمای مورد نظر برای شکل‌دهی از گرم‌کن‌های میله‌ای ۲ KW و با جاسازی کردن در شیارهای ایجادشده در ماتریس و ورق‌گیر استفاده شد. برای اندازه‌گیری دمای اجزا از دماسنج‌های جاسازی‌شده در ماتریس و ورق‌گیر استفاده شد. در شکل ۲ قالب استفاده‌شده در آزمایش‌های تجربی مشاهده می‌شود. برای بررسی دقیق‌تر توزیع ضخامت در قطعات شکل گرفته شده، قطعه با توجه به شکل ۳، به سه ناحیه کف قطعه‌کار (A)، ناحیه شعاع گوشه سنبه (B) و دیواره قطعه (C) تقسیم‌بندی و برای اندازه‌گیری ضخامت از ضخامت‌سنج دستی استفاده شد.

توسط آزمایشات تجربی و شبیه‌سازی مورد تحلیل قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که جهت افزایش شکل‌پذیری، دماهای متفاوتی را باید به نقاط مختلف سنبه و قالب‌ها اعمال کرد. نتایج آن‌ها نشان داد که برای دست‌یابی به بالاترین نسبت کشش مهم‌ترین منطقه، منطقه B (دما در گوشه سنبه) می‌باشد که باید در دمای محیط نگه داشته شود در حالی‌که منطقه C (دما در ورق‌گیر) و F (دما در سطح قالب) را باید به دمای ۲۵۰°C رساند [۱۲].

کورز<sup>۱</sup> نشان داد که در فرآیند کشش عمیق با افزایش دما، نسبت کشش ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. وی مشاهده نمود که با استفاده از فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی به دلیل افزایش اصطکاک بین ورق و سنبه به‌خاطر فشار سیال می‌توان در دمای کمتر به نسبت کشش بیشتری نسبت به کشش عمیق دست یافت [۱۳].

چوی<sup>۲</sup> و همکاران شکل‌دهی با استفاده از فرآیندهای کشش عمیق سنتی و هیدرومکانیکی را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها مشاهده نمودند که با بالا رفتن دمای فلنچ نسبت کشش حدی در هر دو فرآیند افزایش و مقدار آن برای کشش عمیق هیدرومکانیکی بیشتر می‌باشد. در ادامه به بهینه‌کردن دمای اجزای مختلف سامانه در فرآیندهای ذکرشده پرداختند و به این نتیجه رسیدند که سنبه برای افزایش استحکام قسمت‌هایی از ورق در تماس با آن باید در دمای سرد و ناحیه فلنچ برای جریان بهتر ورق به داخل حفره قالب باید در دمای بالا قرار داشته باشد [۱۴].

در زمینه هیدروفرمینگ گرم ورق، پژوهش‌های کمی صورت گرفته است. اغلب پژوهش‌هایی که با استفاده از این فرآیند انجام شده از قالب کشش عمیق هیدرومکانیکی استفاده شده است. در این پژوهش بررسی‌ها با استفاده از قالب کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی صورت گرفته است. اثر پارامترهای فرآیندی شامل هندسه ابزار (شعاع گوشه سنبه و شعاع ورودی محفظه قالب) بر روی توزیع ضخامت و نیروی سنبه و نیز دمای شکل‌دهی در دو حالت گرم هم‌دما و گرم گرادایانی (سنبه سرد) برای تولید قطعه استوانه‌ای سرتخت از جنس آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۲ مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه نیز اثر سه پارامتر دما شکل‌دهی (هم‌دما و غیرهم‌دما)،

1- Kurz

2- Choi

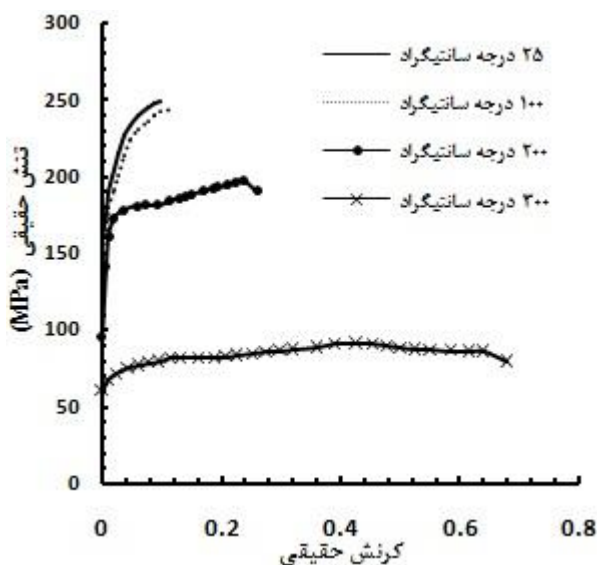
ورق در جدول ۲ و دیگر اطلاعات شبیه‌سازی در جدول ۳ آورده شده است که به همراه قسمت پلاستیک منحنی تنش- کرنش حقیقی (شکل‌های ۴-۵) در محیط تعریف خواص در نرم‌افزار آباکوس به نرم‌افزار معرفی و به ورق اعمال شد. شکل ۶ مدل مونتاژ شده را نشان می‌دهد.

جدول (۲): مشخصات مکانیکی و خواص فیزیکی ورق آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۲ [۱۵].

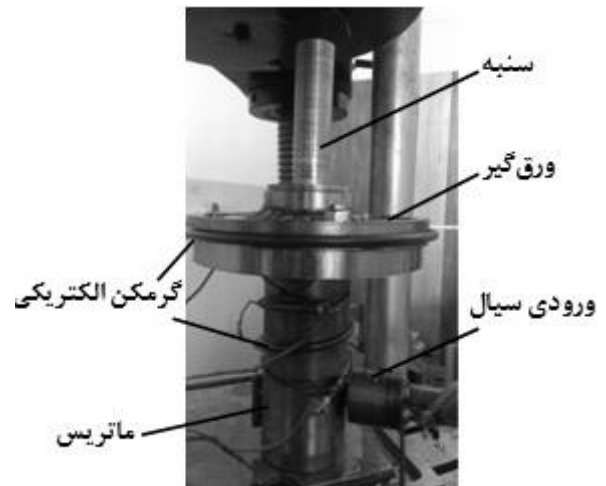
مقدار	مشخصه
۸۹/۶	استحکام تسلیم (MPa)
۲۶۸۰	چگالی ( $\text{Kg/m}^3$ )
۷۰/۳	مدول الاستیسیته (GPa)
۰/۳۳	نسبت پواسون

جدول (۳): مقادیر داده‌های ورودی به نرم افزار.

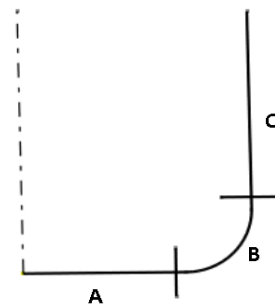
مقدار	مشخصه
۱۴۰۰	ضریب هدایت تماسی ورق با قالب [۱۶] ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )
۱۷۰	ضریب همرفت سیال [۱۴] ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )
۱۳۷	ضریب رسانندگی حرارتی ( $\text{W/Mk}$ )
۸۸۰	ظرفیت گرمایی ( $\text{J/Kg.K}$ )



شکل (۴): نمودار تنش- کرنش آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۲ در دماهای مختلف و در نرخ کرنش ۰/۰۰۱۳ [۱۵].



شکل (۲): قالب استفاده شده در آزمایش‌های تجربی.



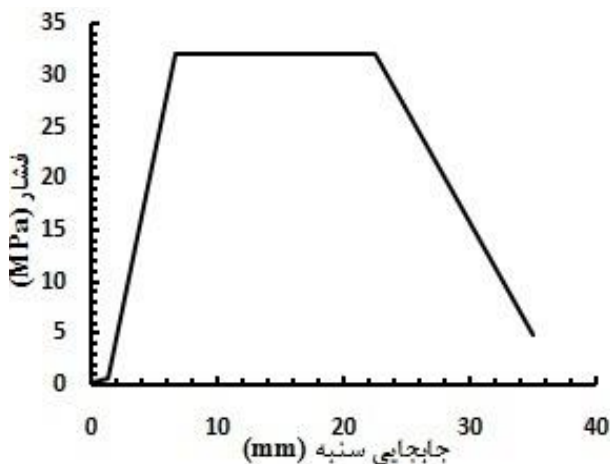
شکل (۳): ناحیه بندی قطعه.

### ۳- شبیه‌سازی اجزای محدود

در این پژوهش، از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس<sup>۱</sup> جهت شبیه‌سازی فرآیند استفاده شد. به دلیل متقارن بودن قطعه و هندسه قالب، مدل متقارن محوری<sup>۲</sup> انتخاب و ورق به صورت شکل پذیر<sup>۳</sup> و با المان توپر چهارگره‌ای<sup>۴</sup> شبکه‌بندی شد. یکی از تفاوت‌های شبیه‌سازی فرآیند در دو حالت سرد و گرم این می‌باشد که در حالت گرم به دلیل تاثیر دمایی اجزا قالب از یکدیگر و نیز وجود توزیع دمایی در آن‌ها، علاوه بر ورق، اجزا قالب نیز باید شبکه‌بندی<sup>۵</sup> شوند. بدین منظور، این اجزا نیز به صورت شکل پذیر مدل می‌شوند. برای جلوگیری از تغییر شکل اجزایی چون سنبله، ورق گیر و ماتریس، در قسمت قیدگذاری<sup>۶</sup> قید صلب به آن‌ها اعمال گردید. مشخصات مکانیکی و فیزیکی

- 1- Abaqus
- 2- Axisymmetric
- 3- Deformable
- 4- CAX4RT
- 5- Mesh
- 6- Constraint

در واحد بار، یک مسیر فشار با فشار بیشینه معین تعریف و به سطح زیرین و نیز به سطح جانبی به دلیل ایجاد حالت فشار شعاعی اعمال گردید. سپس قیدهای حرکتی و دمایی تعریف شدند. با انجام آزمایش تجربی مسیر فشار مربوط به این بررسی‌ها در شکل ۷ نشان داده می‌شود.

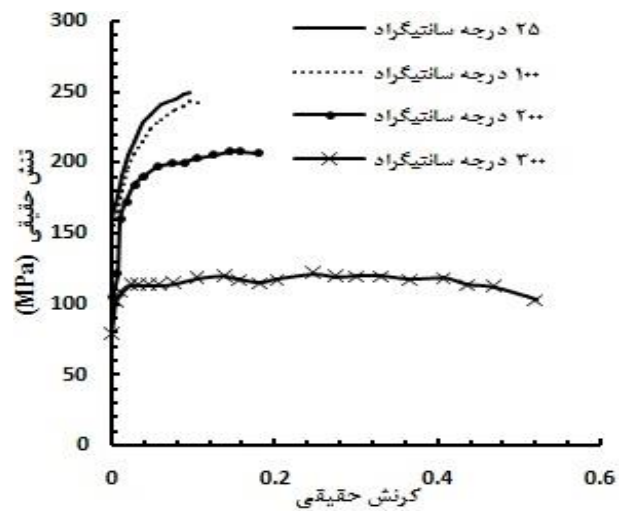


شکل (۷): مسیر فشار مربوط به بررسی‌ها.

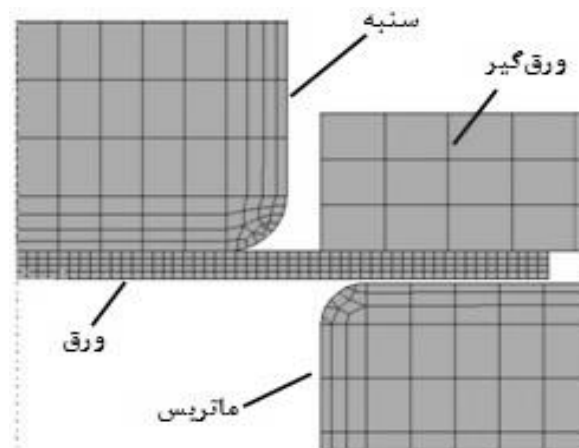
#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- صحت سنجی

دلیل استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود علاوه بر به دست آوردن مقادیر حدودی برای انجام آزمایش‌های تجربی، صحت‌سنجی نتایج به کمک آن می‌باشد. در شکل‌های ۸-۹ به ترتیب مقایسه منحنی‌های توزیع ضخامت و منحنی‌های نیروی سنبه مربوط به قطعه شکل داده شده در دمای  $200^{\circ}\text{C}$ ، سرعت  $50\text{ mm/min}$  و فشار بیشینه  $32\text{ MPa}$  و شکل‌های ۱۰-۱۱ به ترتیب منحنی‌های توزیع ضخامت و نیروی سنبه را در دمای اتاق، سرعت  $50\text{ mm/min}$  و فشار  $32\text{ MPa}$  نشان می‌دهند. در دمای  $200^{\circ}\text{C}$  اختلاف بین نازک‌شدگی بیشینه کمتر از  $3/5$  درصد بوده و نیروی بیشینه سنبه تقریباً برابر می‌باشد. در دمای محیط نیز اختلاف بسیار جزئی بین نازک‌شدگی بیشینه و نیروی بیشینه سنبه در دو حالت شبیه‌سازی و تجربی وجود دارد. در جدول ۴ اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی آورده شده است. اختلاف جزئی بین نتایج مربوط به کنترل فرآیند از نظر شرایط دمایی و انتقال حرارت تعریف شده می‌باشد و از آنجایی که مقدار اختلاف کم بوده می‌توان از آن چشم‌پوشی کرد.



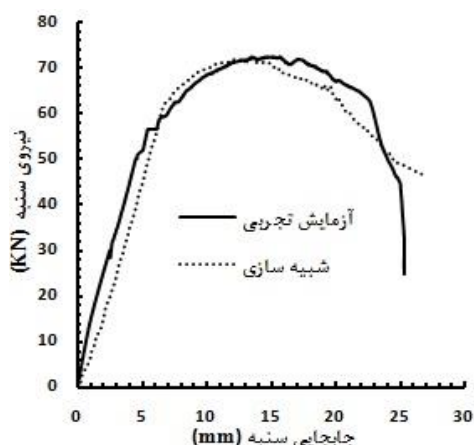
شکل (۵): نمودار تنش - کرنش آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۲ در دماهای مختلف و نرخ کرنش  $0.013/15$ .



شکل (۶): مدل مونتاژ شده و المان‌بندی شده اجزا.

فرآیند در یک گام و به صورت کوپل جابجایی-حرارتی<sup>۱</sup> بوده و دینامیکی مدل شد و نوع حل صریح<sup>۲</sup> بوده است. تعریف شرایط اصطکاکی بین سطوح در واحد برهم‌کنش<sup>۳</sup> صورت می‌گیرد. با انجام شبیه‌سازی در چند ضریب اصطکاک و مقایسه نتایج با نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی و نیز با توجه به موارد گزارش شده توسط محققان دیگر از تماس آلومینیوم با فولاد، ضریب اصطکاک بین ورق‌گیر با ورق و نیز ورق با ماتریس  $0.06$  و ضریب اصطکاک بین سنبه با ورق  $0.15$  بوده و در این پژوهش با توجه به مرجع [۱۷] ضریب اصطکاک ثابت در نظر گرفته شده است.

1- Temp-disp  
2- Explicit  
3- Interaction



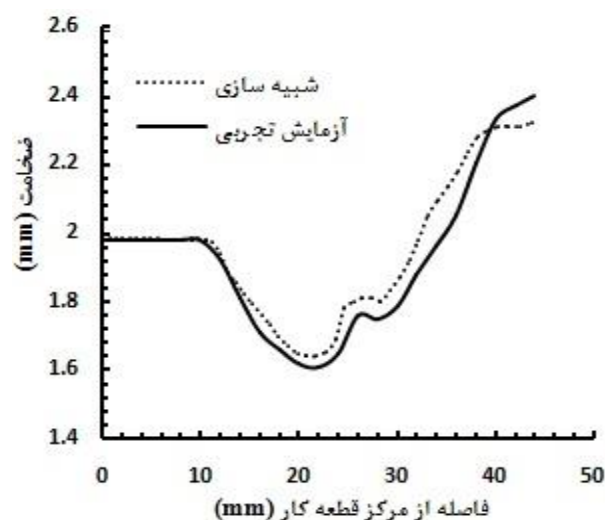
شکل (۱۱): نمودار نیروی سنبه در دمای اتاق.

جدول (۴): اختلاف بین نتایج تجربی و شبیه سازی.

درصد	مشخصه
۱/۵	نازک شدگی بیشینه در دمای محیط
۱	نیروی بیشینه در دمای محیط
۳/۵	نازک شدگی بیشینه در دمای $200^{\circ}\text{C}$
۰/۵	نیروی بیشینه در دمای $200^{\circ}\text{C}$

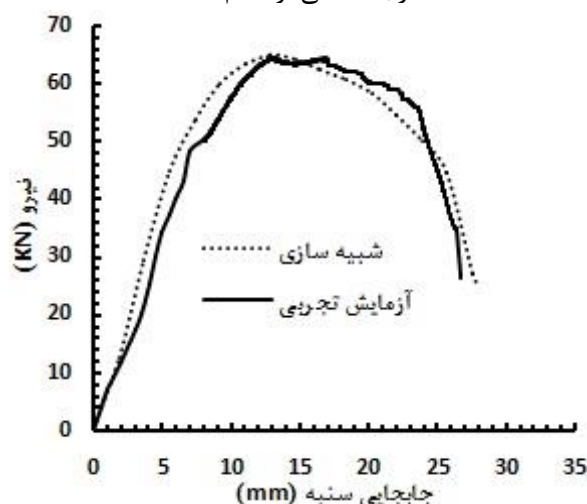
#### ۴-۲- بررسی پارامترهای هندسی

در این قسمت به بررسی اثر شعاع گوشه سنبه و شعاع ورودی ماتریس در دمای  $250^{\circ}\text{C}$  هم‌دمای و فشار  $32\text{ MPa}$  پرداخته می‌شود. برای انجام اولین آزمایش، هر دو شعاع  $3\text{ mm}$  انتخاب و به دلیل عدم جریان مناسب و کشش ناکافی ورق در این دو ناحیه، نمونه پاره شد. در ادامه با ثابت نگاه داشتن اندازه شعاع گوشه سنبه در  $3\text{ mm}$ ، شعاع ورودی محفظه قالب  $4\text{ mm}$  و  $6\text{ mm}$  در نظر گرفته شد و دوباره در قطعه پارگی مشاهده شد. در مرحله بعد آزمایش‌ها در شعاع گوشه سنبه  $4\text{ mm}$  و با شعاع قالب  $3$ ،  $4$  و  $6\text{ mm}$  انجام شد. مشاهده گردید که در شعاع گوشه سنبه  $4\text{ mm}$  و شعاع‌های ورودی محفظه قالب  $3\text{ mm}$  و  $4\text{ mm}$ ، قطعه پاره و در حالت سوم قطعه سالم شکل گرفته است. در ادامه با انجام آزمایش‌هایی در شعاع گوشه سنبه  $6\text{ mm}$  و شعاع ورودی محفظه قالب  $3$ ،  $4$  و  $6\text{ mm}$  بجز شعاع ورودی قالب  $3\text{ mm}$  در بقیه شرایط قطعه سالم شکل گرفت. نتایج شکل‌دهی در شعاع‌های مختلف در شکل ۱۲ قابل مشاهده می‌باشد. دیگر حالت‌ها با شبیه‌سازی مورد ارزیابی قرار گرفتند. در شکل ۱۳، دو نمونه از قطعات پاره شده و در شکل ۱۴ قطعات شکل گرفته شده، مشاهده می‌شود.

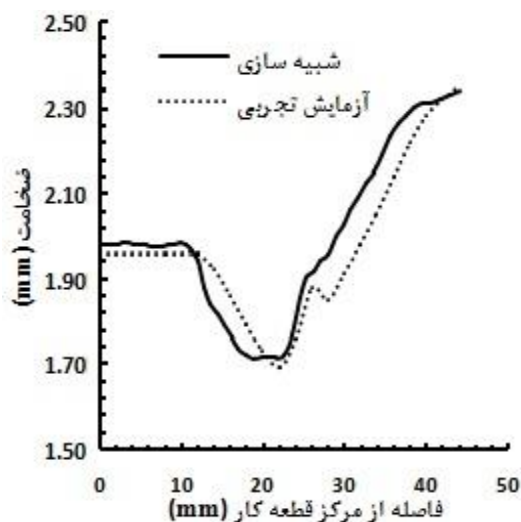


شکل (۸): نمودار توزیع ضخامت قطعه کار در دمای  $200^{\circ}\text{C}$

درجه سانتی‌گراد هم‌دمای.



شکل (۹): نمودار نیروی سنبه در دمای  $200^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی‌گراد هم‌دمای.

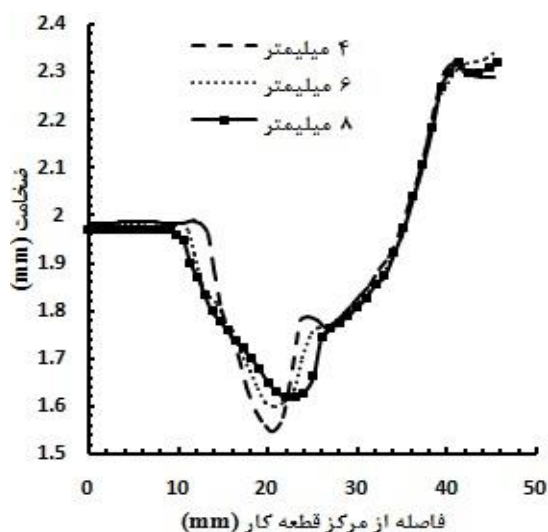


شکل (۱۰): نمودار توزیع ضخامت قطعه کار در دمای اتاق.

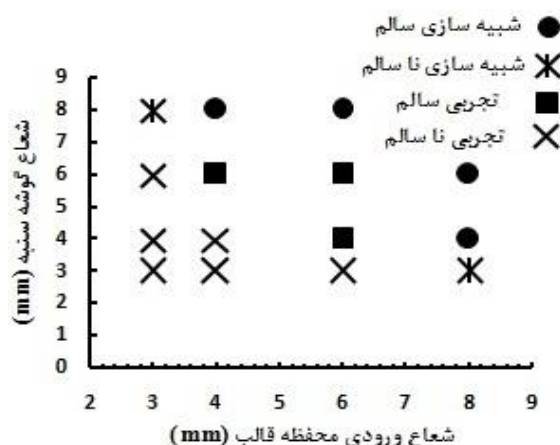


بیشینه با افزایش شعاع گوشه سنبه از یک حد خاص (۶ mm)، شعاع گوشه سنبه ۶ mm مناسب‌ترین مقدار می‌باشد.

با مطالعه تاثیر شعاع ورودی محفظه قالب شکل ۱۷ برای توزیع ضخامت در شعاع گوشه سنبه ۶ mm به دست آمد. با افزایش شعاع ورودی محفظه قالب تا ۶ mm نازک‌شدگی بیشینه به دلیل جریان بهتر ورق روی ناحیه شعاع و نیز کاهش خمش، کاهش یافته است. با بررسی شعاع‌های بالاتر از ۶ mm مشاهده گردید که توزیع ضخامت بدون تغییر باقی مانده است. دلیل این امر در شکل ۱۸ قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به این شکل، در فشارهای شکل‌دهی بالا، در شعاع‌های ورودی محفظه قالب زیاد تماسی بین ورق و ناحیه شعاع وجود ندارد. برای مطالعه دقیق‌تر، فشار شکل‌دهی پایین نیز مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به شکل ۱۹، مشاهده شد که در فشارهای شکل‌دهی پایین، در شعاع‌های ورودی محفظه بالا نیز بین ورق و این ناحیه از قالب تماس وجود داشته و بر روی شکل‌دهی تاثیرگذار می‌باشد. با بررسی نیروی سنبه نمودار شکل ۲۰ حاصل شد. با توجه به شکل، با افزایش شعاع ورودی محفظه قالب تا ۶ mm، نیروی سنبه بیشینه به دلیل جریان بهتر ورق برای ورود به محفظه قالب در حین شکل‌دهی کاهش یافته است و در شعاع‌های بیشتر با توجه به شکل ۱۸، تغییری در نیرو حادث نمی‌گردد. نتایج به دست آمده در این بخش نشان می‌دهد که (شکل‌های ۱۷ و ۲۰) شعاع ورودی محفظه قالب ۶ mm مناسب می‌باشد.



شکل (۱۵): نتایج شبیه‌سازی توزیع ضخامت در شعاع گوشه سنبه مختلف.



شکل (۱۲): نتایج شکل‌دهی در شعاع‌های مختلف.

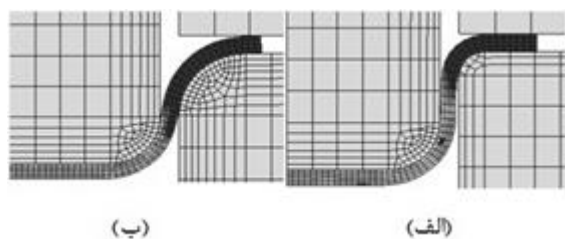


شکل (۱۳): قطعات پاره شده در اثر کم بودن مقدار شعاع.

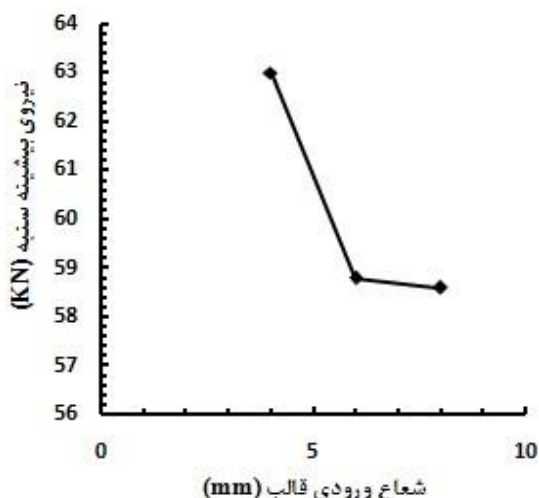


شکل (۱۴): قطعات شکل گرفته شده در آزمایش تجربی.

شکل (۱۵) نمودار توزیع ضخامت در شعاع‌های گوشه سنبه مختلف را نشان می‌دهد. با افزایش شعاع گوشه سنبه تا ۶ mm، نازک‌شدگی بیشینه به دلیل کم‌شدن خمش ورق کاهش و از ۶ تا ۸ mm تغییر چندانی نکرد. همچنین نازک‌شدگی در ناحیه کف قطعه کار به دلیل لغزش بیشتر ورق روی سنبه افزایش یافت. اثر شعاع گوشه سنبه بر روی نیروی سنبه نیز بررسی شد که در شکل (۱۶) مشاهده می‌شود. با افزایش شعاع گوشه سنبه، نیروی بیشینه تغییر نکرده ولی جابجایی سنبه تا رسیدن به مقدار بیشینه زیاد می‌گردد. (افزایش شعاع گوشه سنبه باعث زیاد شدن محیط در این قسمت شده و در نتیجه جابجایی بیشتری لازم است تا شکل‌دهی ورق به قطعه مورد نظر کامل گردد و در پی آن جابجایی مربوط به نیروی بیشینه هم افزایش می‌یابد.) با توجه به شکل‌های ۱۶-۱۵، با توجه به ثابت ماندن نیروی بیشینه سنبه و نیز عدم تغییر محسوس نازک‌شدگی



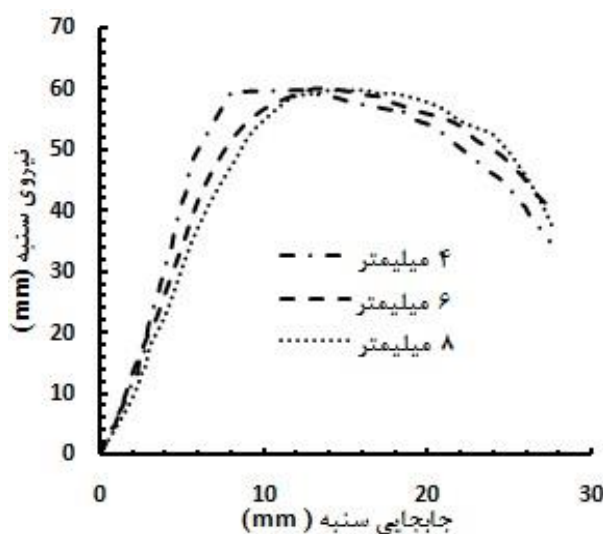
شکل (۱۹): مدل‌های شبیه‌سازی شده در فشار ۱۰ MPa و شعاع ورودی محفظه قالب: (الف) ۳ mm (ب) ۸ mm.



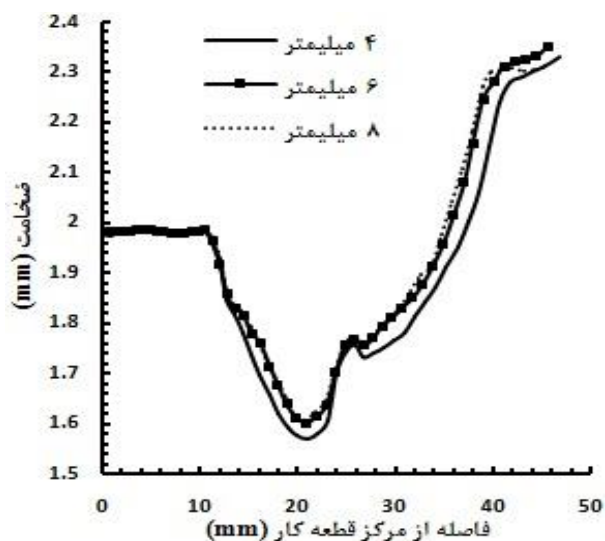
شکل (۲۰): نمودار نیروی بیشینه سنبه در شعاع‌های ورودی محفظه قالب مختلف.

#### ۴-۳- تاثیر دمای شکل‌دهی

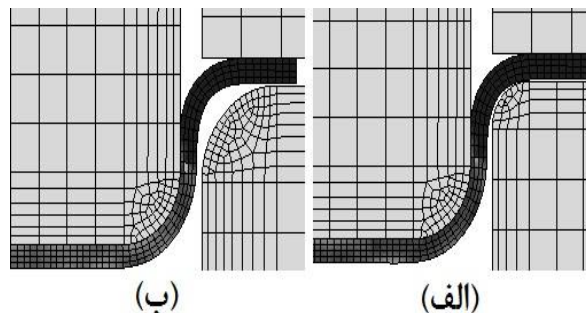
با توجه به ماهیت فرآیند (فرآیند هیدروفرمینگ گرم)، مهمترین فاکتور قابل بررسی، دمای شکل‌دهی بوده که در این بخش از پژوهش به بررسی اثر آن روی شکل‌دهی با استفاده از آزمایش‌های تجربی پرداخته می‌شود. بررسی‌ها در شعاع گوشه سنبه و شعاع ورودی محفظه قالب ۶ mm انجام شدند. در شکل ۲۱ نمودار تجربی توزیع ضخامت در دماهای مختلف را در فشار بیشینه ۳۲ MPa، سرعت ۵۰ mm/min و در حالت هم‌دما نشان می‌دهد. برای این حالت آزمایش‌ها در دماهای ذکر شده در نمودار انجام شد. با افزایش دما به دلیل افزایش چسبندگی ورق با سنبه و در پی آن کاهش کشش در آن، ورق در ناحیه کف قطعه کار کمتر دچار نازک‌شدگی می‌گردد. در ناحیه شعاع گوشه سنبه در قطعه کار (بحرانی‌ترین ناحیه در شکل‌دهی قطعات استوانه‌ای سرتخت)، با افزایش دما، نازک‌شدگی بیشینه به دلیل کم‌شدن استحکام ورق با افزایش دما و زیاد شدن قابلیت کشیدگی افزایش می‌یابد.



شکل (۱۶): نمودار حاصل از شبیه‌سازی نیروی سنبه در شعاع‌های گوشه سنبه مختلف.



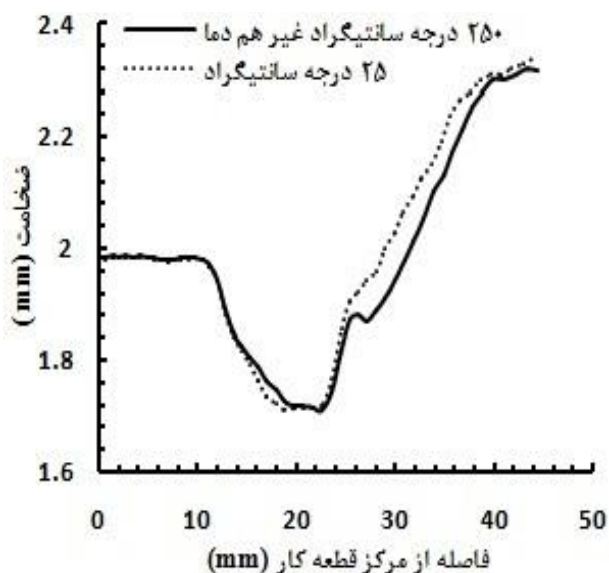
شکل (۱۷): نمودار توزیع ضخامت در شعاع‌های ورودی محفظه قالب مختلف.



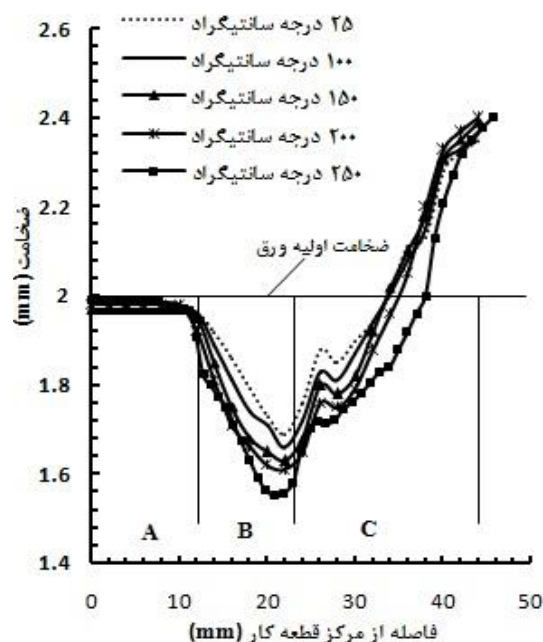
شکل (۱۸): مدل‌های شبیه‌سازی شده در فشار ۳۲ MPa و شعاع ورودی محفظه قالب: (الف) ۴ mm (ب) ۸ mm.



بررسی اثر دما در حالت غیرهم‌دما (سنبه سرد) با استفاده از شبیه‌سازی در سه دمای ۲۵، ۲۰۰ و ۲۵۰ °C صورت گرفت. شکل ۲۳ توزیع ضخامت در قطعه‌کار و شکل (۲۴) نمودار درصد نازک‌شدگی بیشینه را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که داده‌های مربوط به دمای ۲۰۰ °C بین دو نمودار ۲۵ °C و ۲۵۰ °C قرار داشته است. به دلیل نزدیک بودن منحنی‌ها و نیز برای عدم تداخل، منحنی مربوط به دمای ۲۰۰ °C در شکل ۲۳ آورده نشد. در حالت غیرهم‌دما از ابتدا تا انتهای شکل‌دهی، سنبه با ورق در ناحیه کف و شعاع گوشه سنبه (به‌خصوص کف) در تماس است و از آنجایی‌که بررسی‌ها در سرعت سنبه ۵۰ mm/min انجام شد، زمان فرآیند و در نتیجه انتقال حرارت بین سنبه و ورق در این نواحی زیاد می‌باشد. در نتیجه، این نواحی در دمای سرد و دیگر قسمت‌ها در دمای گرم می‌باشند. (با بررسی توزیع دما در قطعه با استفاده از شبیه‌سازی مشاهده شد که با دور شدن از مرکز قطعه‌کار دما افزایش می‌یابد.) کم‌شدن دمای ناحیه شعاع گوشه سنبه باعث افزایش استحکام و در پی آن کاهش نازک‌شدگی بیشینه نسبت به حالت گرم می‌گردد. با توجه به دلایل ذکر شده، حداکثر نازک‌شدگی که در ناحیه شعاع گوشه سنبه می‌باشد تقریباً یکسان بوده است.

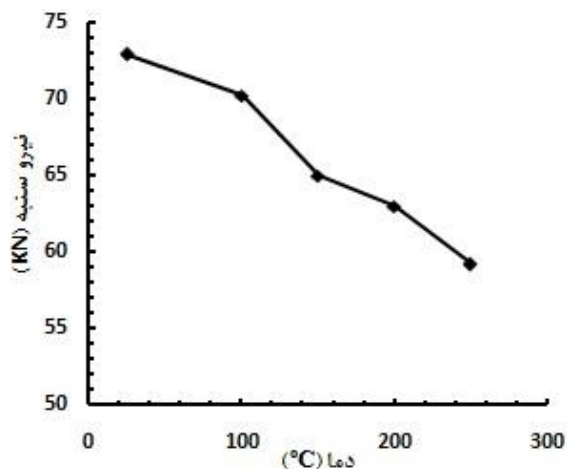


شکل (۲۳): نتایج شبیه‌سازی توزیع ضخامت در حالت غیر هم‌دما.

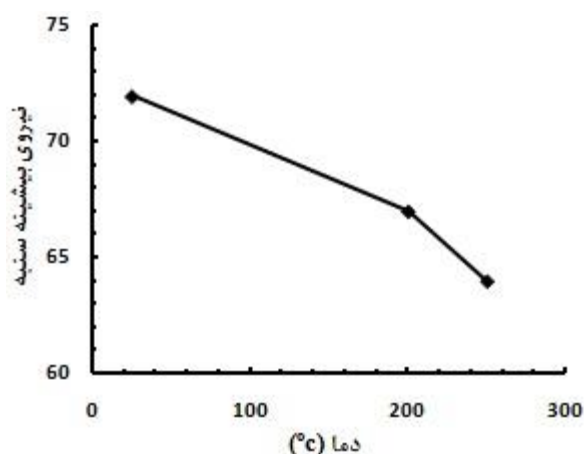


شکل (۲۱): نتایج تجربی توزیع ضخامت در دماهای مختلف در حالت هم‌دما.

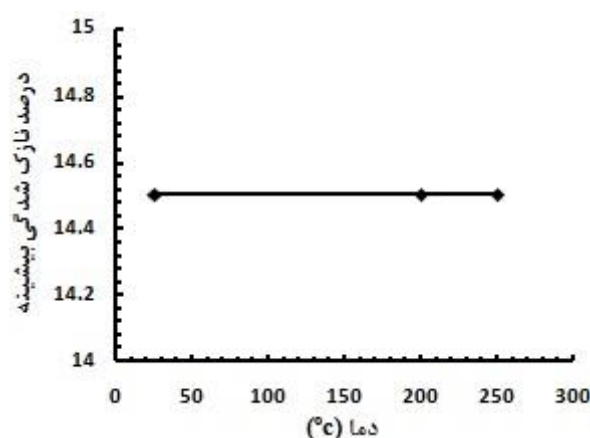
نمودار شکل ۲۲ برای نیروی سنبه بیشینه در دماهای مختلف حاصل شد. با افزایش دما، مقاومت ماده در برابر تغییر شکل کاهش و در نتیجه نیروی سنبه بیشینه مورد نیاز کم شد. این نتیجه با بررسی تنش بیشینه ایجاد شده در قطعه‌کار در حین شکل‌دهی نیز قابل توجیه می‌باشد. افزایش نازک‌شدگی بیشینه یک عیب برای شکل‌دهی محسوب می‌شود. در فرآیند هم‌دما در مقابل افزایش حداکثر نازک‌شدگی بر اثر افزایش دما ارتفاع قطعه تولیدی نیز افزایش می‌یابد که یک حسن برای این حالت شکل‌دهی محسوب می‌شود. قابل ذکر است که افزایش ارتفاع ذکر شده در دماهای بالا بیشتر نمایان است.



شکل (۲۲): نتایج تجربی نیروی سنبه بیشینه در دماهای مختلف در حالت هم‌دما.



شکل (۲۴): نمودار نیروی بیشینه سنبه در دماهای مختلف در حالت هم‌دما.

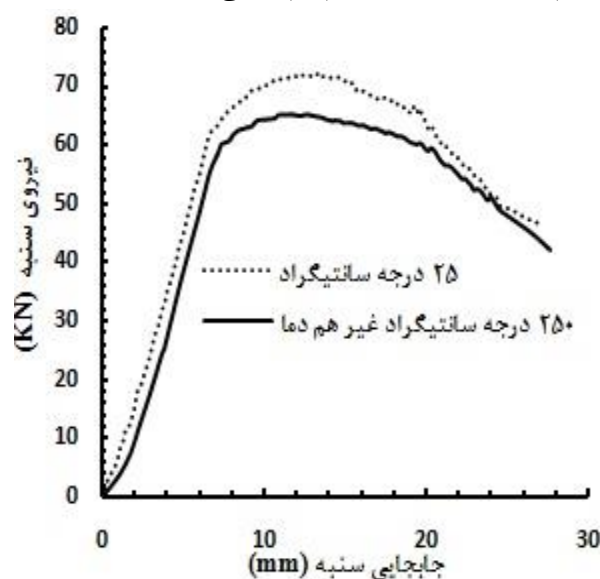


شکل (۲۵): منحنی نیرو سنبه برحسب جابجایی آن و شکل ۲۶ نیروی بیشینه را در دماهای مختلف در حالت غیرهم‌دما

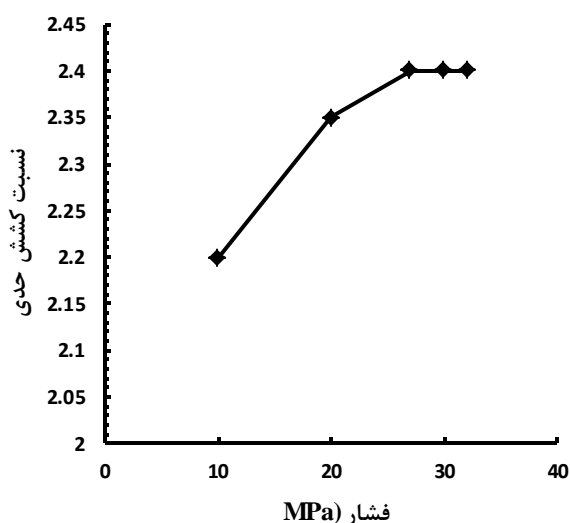
#### ۴-۴- بررسی نسبت حد کشش

در این بخش، به بررسی نسبت حد کشش در دماهای مختلف شکل‌دهی در دو حالت هم‌دما و غیرهم‌دما و نیز تاثیر فشارهای سیال و سرعت‌های سنبه روی آن با استفاده از شبیه‌سازی پرداخته می‌شود. بررسی‌ها با افزایش تدریجی ۱ mm بر قطر ورق برای هر دما انجام شد. قابل ذکر است که برای انجام این بررسی‌ها از معیار حداکثر نازک‌شدگی با حداکثر نازک‌شدگی ۳۵٪ استفاده شده است. به طوری که این مقدار در دماهای مختلف ثابت در نظر گرفته شده است [۱۷-۱۸]. شکل ۲۷ نسبت کشش در دماهای مختلف، سرعت ۵۰ mm/min و فشار بیشینه ۳۲ MPa را در دو حالت هم‌دما و غیرهم‌دما نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده حاکی از بهبود نسبت کشش حدی در حالت غیرهم‌دما با افزایش دما می‌باشد. در حالت غیرهم‌دما تا دمای ۱۰۰ °C، افزایش قابل توجهی در نسبت کشش مشاهده نشد که در واقع با توجه به نمودار تنش- کرنش (استحکام ماده تا این دما تغییر چندانی نسبت به دمای محیط نداشته است)، قابل توجیه می‌باشد. با افزایش دما تا ۲۵۰ °C، با توجه به این که ناحیه بحرانی (شعاع گوشه سنبه) در دمای پایین قرار داشته و ناحیه فلنج و دیواره در حالت گرم قرار دارند، کاهش استحکام ماده و سهولت جریان مواد با افزایش دما سبب عدم مقاومت به تغییر شکل قطر بزرگتر شده و نسبت کشش حدی افزایش می‌یابد. بالاترین نسبت کشش حدی به دست آمده در این پژوهش، ۲/۵۲ مربوط به دمای ۲۵۰ °C می‌باشد. با توجه به شکل ۲۷، بررسی نسبت کشش در حالت هم‌دما نشان می‌دهد که با افزایش دمای شکل‌دهی نسبت کشش حدی کاهش یافته است.

شکل ۲۵ منحنی نیرو سنبه برحسب جابجایی آن و شکل ۲۶ نیروی بیشینه را در دماهای مختلف در حالت غیرهم‌دما نشان می‌دهد. با افزایش دما به دلیل جریان راحت‌تر ورق در ناحیه فلنج و نیز کشیدگی آسان‌تر در ناحیه دیواره (هرچند ناحیه کف و شعاع گوشه در دمای سرد قرار دارند) نیروی سنبه بیشه کاهش یافته است. با توجه به نمودارهای توزیع ضخامت مربوط به حالت هم‌دما و غیرهم‌دما مشاهده شد که در حالت غیرهم‌دما، ناحیه بحرانی در شکل‌دهی قطعات استوانه‌ای سرتخت که شعاع گوشه سنبه می‌باشد به دلیل پایین بودن سطح دمایی از نظر نازک‌شدگی تحت کنترل می‌باشد که این مهم‌ترین مزیت حالت غیرهم‌دما نسبت به حالت گرم هم‌دما می‌باشد.

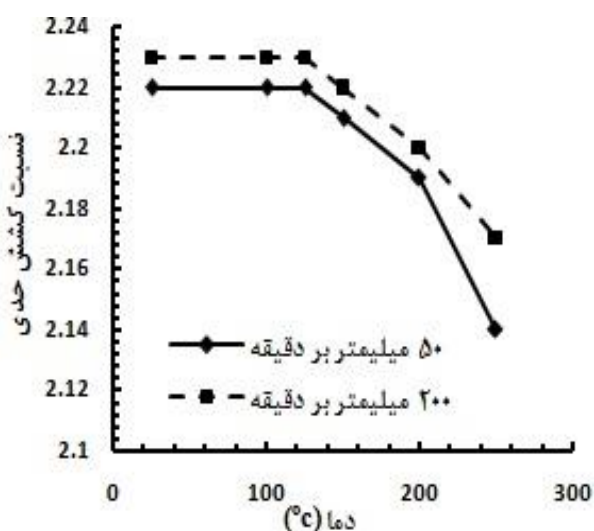


شکل (۲۶): نتایج شبیه‌سازی نیروی سنبه در حالت غیر هم-دما.



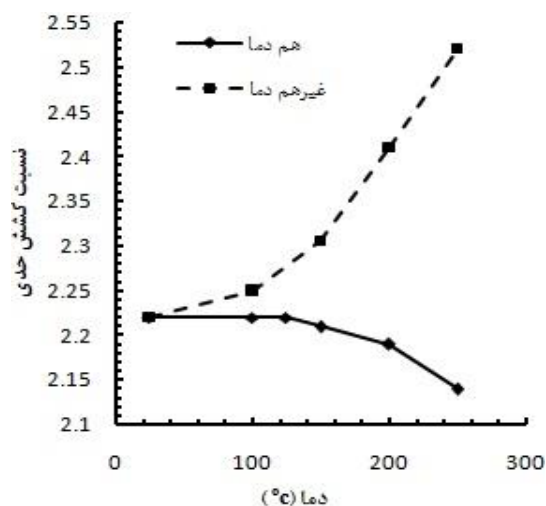
شکل (۲۹): منحنی نسبت کشش حدی در فشارهای سیال مختلف در حالت هم‌دما.

در ادامه تاثیر سرعت سنبه در دماهای مختلف و در فشار MPa ۳۲ نیز روی نسبت حد کشش مورد مطالعه قرار گرفت و منحنی شکل ۳۰ حاصل شد. با توجه به شکل، مشاهده می‌شود که در تمامی دماها با افزایش سرعت سنبه نسبت کشش حدی افزایش یافته است. دلیل این امر این می‌باشد که با بالا رفتن سرعت، استحکام افزایش پیدا کرده و در نتیجه کشش در ورق کاهش می‌یابد و کاهش کشش عاملی برای کاهش نازک‌شدگی و بالا رفتن نسبت کشش حدی می‌باشد.

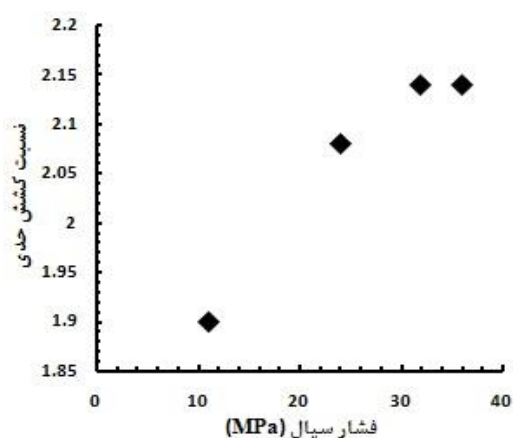


شکل (۳۰): منحنی نسبت کشش حدی در سرعت‌های مختلف در حالت هم‌دما.

با مطالعه اثر فشار سیال رو نسبت کشش حدی نمودار شکل ۲۸ برای حالت هم‌دما و نمودار شکل ۲۹ برای حالت غیر هم‌دما به دست آمد. با افزایش فشار سیال به دلیل بالا رفتن سطح تماس ورق با سنبه، اصطکاک بین این دو افزایش می‌یابد. بالا رفتن اصطکاک سبب کاهش لغزش ورق روی سنبه و در پی آن کاهش کشش و نازک‌شدگی می‌گردد که نتیجه آن، افزایش نسبت کشش حدی با بالا رفتن فشار سیال می‌باشد. این افزایش نسبت حد کشش تا فشار خاصی ادامه پیدا کرده و سپس ثابت باقی می‌ماند. فرق بین بررسی در حالت هم‌دما با حالت غیرهم‌دما این بوده که در شرایط دمایی غیرهم‌دما، در فشار شکل‌دهی کمتری به هم‌گرایی می‌توان رسید (در فشار کمتری می‌توان به نسبت کشش بیشینه رسید).



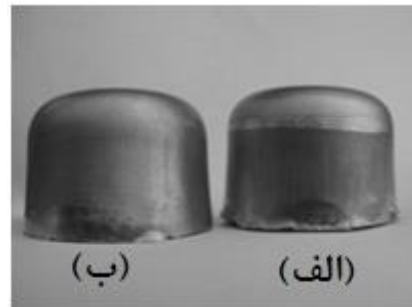
شکل (۲۷): نسبت کشش در دماهای مختلف.



شکل (۲۸): منحنی نسبت کشش حدی در فشارهای سیال مختلف در حالت هم‌دما.

## ۴-۵- کیفیت سطح قطعه کار

قطعات شکل گرفته در دمای محیط همانند ورق اولیه کاملاً صاف و صیقلی می‌باشند. با افزایش دما، قطعات علاوه بر کدر شدن ناشی از حرارت‌دهی، دارای خراشیدگی‌های حرارتی در جهت طولی بوده است. تمامی قطعات در قسمت دیواره دارای مرز مشخصی هستند که دو ناحیه مختلف را تشکیل می‌دهند. قسمتی از بلنک که پس از تماس با سنبه به آن چسبیده و هیچ جریان ماده‌ای در آن حادث نمی‌شود کاملاً صیقلی باقی می‌ماند، اما در ناحیه دیواره و فلنچ به علت جریان ماده بین شعاع گوشه سنبه و شعاع حفره قالب سایش را خواهیم داشت که منجر به ایجاد سطح زبری می‌شود. لازم به ذکر است که این زبری سطح در قطعه کار تولیدشده با استفاده از فرآیند هیدروفورمینگ به دلیل وجود روغن کمتر از قطعات تولیدی با استفاده از فرآیند کشش عمیق می‌باشد. در شکل ۳۱، قطعات شکل داده شده در دمای محیط و دمای  $200^{\circ}\text{C}$  نشان داده شده‌اند.



شکل (۳۱): دمای (الف)  $200^{\circ}\text{C}$ ، (ب) دمای محیط.

ندارد و افزایش شعاع ورودی محفظه قالب تا یک مقدار معین نیروی سنبه را کاهش و از آن مقدار بیشتر تاثیری ندارد.

- با افزایش دمای شکل‌دهی در حالت هم‌دما، حداکثر نازک‌شدگی افزایش و نیروی سنبه کاهش می‌یابد. در حالت غیرهم‌دما، با افزایش دمای شکل‌دهی، نازک‌شدگی بیشینه تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند ولی نیروی بیشینه سنبه مانند حالت هم‌دما کم می‌شود.
- در حالت هم‌دما با افزایش دمای شکل‌دهی ارتفاع قطعات شکل گرفته شده افزایش می‌یابد.
- نیروی سنبه بیشینه و حداکثر نازک‌شدگی برای حالت گرم هم‌دما از حالت گرم غیرهم‌دما بیشتر شده است.
- در حالت هم‌دما، با افزایش دمای شکل‌دهی نسبت کشش حدی به صورت جزئی کاهش می‌یابد ولی در حالت غیرهم‌دما، با افزایش دما نسبت کشش حدی زیاد می‌شود به طوری که در دمای  $250^{\circ}\text{C}$  در حالت غیرهم‌دما نسبت کشش حدی به  $2/52$  رسیده است.
- با افزایش فشار سیال نسبت حد کشش در هر دو حالت هم‌دما و غیرهم‌دما، ابتدا افزایش و سپس ثابت باقی می‌ماند.
- با افزایش سرعت سنبه، نسبت حد کشش در تمام دماها افزایش یافته است.

## ۷- مراجع

1. Ambrogio, G., Filice, L., Palumbo, G. and Pinto, S. "Prediction of Formability Extension in Deep Drawing when Superimposing a Thermal Gradient", J. Materials Processing Technology, Vol. 162, pp. 454-460, 2005.
2. Thiruvarudchelvan, S. and Travis, F. "Hydraulic-Pressure-enhanced Cup-drawing Processes an Appraisal", J. Materials Processing Technology, Vol. 140, No. 1, pp. 70-75, 2003.
3. Owsia, M.B., Hosseini-pour, S.J., Bakhshi, M. and Gorji, A. "The Experimental and Simulation Investigation of Process and Geometrical Parameters for Hydroforming of Pin-type Metallic Bipolar Plates", Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 8, pp. 215-226, 2015. (in Persian ).
4. Mohammadtabar, N., Bakhshi, M., Hosseini-pour, S.J. and Gorji, A. "Study of Effective Parameters Inhydroforming of Fuel Cell Metallic Bipolar Plates with Parallel Serpentine Flow Field",

## ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به تولید قطعه استوانه‌ای سرتخت به کمک فرآیند هیدروفورمینگ گرم با استفاده از روش هیدرودینامیکی با فشار شعاعی پرداخته شد. در ادامه به بررسی پارامترهای فرآیندی پرداخته و نتایج زیر به دست آمد:

- با انجام آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود بهترین حالت هندسی برای ابزار در شکل‌دهی حاضر تعیین شد که مقدار  $6\text{ mm}$  برای شعاع گوشه سنبه و شعاع ورودی محفظه قالب می‌باشد.
- با بررسی‌های انجام‌شده، افزایش شعاع گوشه سنبه و شعاع ورودی محفظه قالب تا یک مقدار خاص نازک‌شدگی بیشینه کاهش و از این مقدار بیشتر تاثیری ندارد. تغییر شعاع گوشه سنبه تاثیری در نیروی بیشینه

12. Chen, P. "Parametric Analysis of Warm Forming of Aluminum Blanks with FEA and DOE", Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol. 16, No. 2, pp. 267-273, 2006.
13. Kurz, G. "Heated Hydro-mechanical Deep Drawing of Magnesium Sheet Metal", Magnesium Technology Symp, TMS Annual Meeting, pp. 67-71, 2004.
14. Choi, H., Koc, M. and Ni, J. "A Study on Warm Hydroforming of Al and Mg Sheet Materials: Mechanism and Proper Temperature Conditions", J. Manufacturing Technology, Vol. 130, No. 4, pp. 410071-4100714, 2008.
15. Mahabunphachai, S. and Koc, M. "Investigations on Forming of Aluminium 5052 and 6061 Sheet Alloys at Warm Temperatures", J. material and design, Vol. 31, pp. 2422-2434, 2010.
16. Takuda, H. "Finite Element Simulation of Warm Deep Drawing of Aluminium Alloy Sheet When Accounting for Heat Conduction", J. Materials Processing Technology, Vol, 120, No. 1, p. 412, 2002.
17. Yadav, A. "Process Analysis and Design in Stamping and Sheethydroforming", PhD Thesis, University of Ohio, Ohio, Columbus, 2008.
18. Kim, H.S., Koc, M., Ni, J. and Ghosh, A. "FE Modeling and Analysis of Warm Forming of Aluminum Alloys-validation Through comparison with Experiments and Determination of a Failure Criterion", ASME J. Manufacturing Science and Engineering, Vol, 128, No. 3, pp. 613-621, 2006.
- Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 8, pp. 17-27, 2014. (in Persian)
5. Kawka, M. "Simulation of Wrinkling in Sheet Metal Forming", J. Materials Processing Technology, Vol. 109, No. 3, pp. 283-289, 2001.
6. Zhang, S.H. "Developments in Hydroforming", J. Materials Processing Technology, Vol. 91, pp. 236-244, 1999.
7. Lang, L., Danckert, J. and Nielsen, K.B. "Investigation into Hydrodynamic Deep Drawing Assisted by Radial Pressure Part I. Experimental Observations of the Forming Process of Aluminum Alloy", J. Materials Processing Technology, Vol. 148, pp. 119-131, 2004.
8. Toros, S., Ozturk, F. and Kacar, I. "Review of Warm Forming of Aluminum-Magnesium Alloys", J. Materials Processing Technology, Vol. 207, No. 1, pp. 1-12, 2008.
9. Groche, P., Huber, R., Doerr, J. and Schmoeckel, D. "Hydromechanical Deep-drawing of Aluminium-alloys at Elevated Temperatures", CIRP Annals- Manufacturing Technology, Vol. 51, pp. 215-218, 2002.
10. Chang, Q.F., Li, D.Y., Peng, Y.H. and Zeng, X.Q. "Experimental and Numerical Study of Warm Deep Drawing of AZ31 Magnesium Alloy Sheet", Int. J. Machine Tools and Manufacture, Vol. 47, No. 3, pp. 436-443, 2007.
11. Wang, H., Luo, Y.B., Friedman, P., Chen, M.H. and Gao, L. "Warm Forming Behavior of High Strength Aluminum Alloy AA7075", Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol. 22, No. 1, pp. 1-7, 2012.