



## مطالعه تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود شکل‌دهی قطعات مخروطی به روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی: نمودار پنجره فرایند

عباس هاشمی<sup>۱</sup>، محمد حسین پور<sup>۲\*</sup> و سید محمد حسین سیدکاشی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

<sup>۲</sup>استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

<sup>۳</sup>استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۶/۰۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۳/۱۲/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۱۶

### چکیده

چروکیدگی و پارگی عیوب اصلی در شکل‌دهی قطعات مخروطی هستند. روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی برای تولید قطعات مخروطی با نسبت کشش بالا در یک مرحله، روش مناسبی در میان فرایندهای شکل‌دهی محسوب می‌شود. توزیع ضخامت مناسب‌تر، کیفیت سطح بهتر، کشش حدی بالاتر، دقت ابعادی بیشتر و توانایی شکل‌دهی قطعات با منحنی‌های پیچیده از جمله مزایای این روش در مقایسه با روش کشش عمیق سنتی می‌باشد. در این مقاله، نمودار پنجره فرایند برای شکل‌دهی قطعات مخروطی با این روش با تغییر برخی پارامترها شامل مسیر فشار، ضخامت و جنس ورق اولیه با استفاده از روش اجزای محدود بدست آمد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود با استفاده از آزمایش‌های تجربی اعتبارسنجی شد. نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از نمودار پنجره فرایند بدست‌آمده می‌توان نواحی مطلوب شکل‌دهی، احتمال وقوع چروکیدگی و پارگی را با تغییرات مسیر فشار پیش‌بینی نمود. مقایسه نمونه‌های شبیه‌سازی شده با نمونه‌های تجربی حاصل از مسیرهای فشار مختلف در نواحی پنجره فرایند تطابق مناسبی را نشان می‌دهد. این نتایج می‌تواند به عنوان یک راهنمای کاربردی برای فناوری هیدروفرمینگ محصولات مخروطی شکل در صنایع خودروسازی و هوافضا مورد استفاده قرار گیرد.

**کلمات کلیدی:** قطعات مخروطی؛ کشش عمیق هیدرودینامیکی؛ شبیه‌سازی اجزای محدود؛ پنجره فرایند.

## Finite Element Simulation and Experimental Study of Forming of Conical Parts by HDDRP Method: Process Window Diagram

A. Hashemi<sup>1</sup>, M. Hoseinpour<sup>2,\*</sup>, and S.M.H. Seyedkashi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> PhD Student, Mech. Eng., Shahid Rajaee Teacher Training Univ., Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Assis. Prof., Mech. Eng., Shahid Rajaee Teacher Training Univ., Tehran, Iran.

<sup>3</sup> Assis. Prof., Mech. Eng., Univ. of Birjand, Birjand, Iran.

### Abstract

Wrinkling and rupturing are two major defects in the forming of conical cups. Among the forming processes used for producing conical parts with high drawing ratio in one stage, the hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure (HDDRP) method is a highly reliable one. Compared with conventional deep drawing, this method has some advantages such as more appropriate thickness distribution, better surface quality, higher limit drawing ratio, higher dimensional accuracy, and ability of forming complex parts. In this work, the process window diagram of the HDDRP method for forming of conical parts is obtained considering several parameters including pressure path, initial thickness, and material of the blank by the finite element method (FEM). The results obtained are validated by the experimental tests. The process window diagram obtained could be used to predict the appropriate forming area and the possibility of wrinkling and rupturing occurrence with different pressure paths. Comparison of the simulation results with the experimental parts shows a suitable conformity. These results can provide an applicable guidelines for a sound hydroforming of conical products in the automotive and aerospace industries.

**Keywords:** Conical Parts; Hydrodynamic Deep Drawing; Finite Element Simulation; Process Window.

## ۱- مقدمه

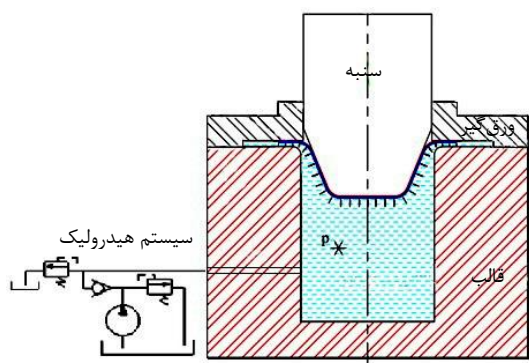
یکی از روش‌های فناوری هیدروفورمینگ ورق، فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی<sup>۱</sup> است. این فرایند ترکیبی از روش کشش عمیق سنتی و روش هیدروفورمینگ است که از مزایای هر دو روش بهره‌مند می‌باشد. فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی با نام‌های گوناگون دیگری از قبیل کشش عمیق هیدرولیکی با فشار معکوس، شکل‌دهی به کمک سیال، آکوادرا و هیدرومک شناخته شده است [۱]. فرایند هیدرودینامیکی یک نوع فرایند شکل‌دهی انعطاف‌پذیر است و توانایی شکل‌دهی قطعات با اشکال پیچیده مانند قطعات با هندسه سهموی و مخروطی را با نسبت کشش بالا در یک مرحله دارد. در این فرایند، سنبه به درون محفظه قالب انباشته از سیال شکل‌دهی هدایت می‌شود. بنابراین فشار درون محفظه قالب افزایش یافته و ورق را به سنبه می‌چسباند [۲]. این افزایش فشار موجب می‌شود تا از یک سو سطح تماس ورق و سنبه افزایش یافته که از نازک شدن یا پارگی ورق در ابتدای فرایند جلوگیری می‌نماید و از سوی دیگر نیروی بیشتری به ناحیه تغییرشکل انتقال یافته که افزایش نسبت کشش و بهبود قابلیت شکل‌پذیری را نتیجه می‌دهد [۳]. همچنین سیال درون محفظه قالب نقش روانکار را نیز داشته و موجب کاهش اصطکاک بین سطوح تماس ورق با اجزای قالب (ورق‌گیر و قالب) می‌شود.

فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی یک کاربرد خاص از فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی است، به طوری که فشار سیال شکل‌دهی علاوه بر سطح زیرین ورق، به لبه بیرونی ورق در ناحیه فلنج نیز اعمال شده و فرایند شکل‌دهی را بهبود می‌بخشد. فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی را می‌توان به دو گروه تقسیم نمود:

(الف) هیدروریم<sup>۲</sup>: در این فرایند از سیستم آب‌بندی در ناحیه فلنج استفاده می‌شود. در فرایند هیدروریم به دلیل اعمال فشار جانبی به لبه‌های ورق نسبت کشش افزایش یافته، اما احتمال ایجاد چروکیدگی در ورق نسبت به فرایند کشش

عمیق هیدرودینامیکی بیشتر می‌باشد، زیرا ورق در هر دو طرف آزاد است [۴].

(ب) کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی<sup>۳</sup>: با ایجاد تغییراتی در قالب فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی می‌توان فشار شعاعی را در لبه‌های ورق ایجاد نمود. در این فرایند به دلیل عدم استفاده از هرگونه رینگ آب‌بند، امکان خروج سیال شکل‌دهی از فاصله بین ورق‌گیر و قالب وجود داشته و به علت کوچک بودن این فاصله، فشار شعاعی در اطراف ورق ایجاد می‌شود [۵]. در پژوهش حاضر فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی به منظور شکل‌دهی قطعات مخروطی مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۱).



شکل ۱- طرح‌واره مجموعه قالب کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی مورد استفاده در این پژوهش

در یک دهه گذشته پژوهش‌های محدودی در زمینه شکل‌دهی قطعات مخروطی به روش هیدروفورمینگ انجام شده است. کاوکا و همکارانش [۶] به بررسی تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود چروکیدگی فنجان مخروطی در فرایند کشش عمیق معمولی پرداختند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود این محققان نشان داد که تعداد المان و نوع شبکه انتخابی حتی با اختلاف‌های بسیار کم در حصول نتیجه دقیق‌تر بسیار مؤثر است. تیرووارودچولوان و همکارش [۷] با استفاده از لایه اورتان حلقوی تو خالی روش جدیدی را برای شکل‌دهی فنجان‌های مخروطی در فرایند کشش عمیق معمولی ارائه دادند. در این روش لایه اورتان مانع از تماس

<sup>3</sup> Hydrodynamic Deep Drawing with Radial Pressure (HDDRP)

<sup>1</sup> Hydrodynamic Deep Drawing (HDD)

<sup>2</sup> Hydro-Rim

شکل‌دهی، ناحیه چروکیدگی و پارگی را پیش‌بینی و مقدار بیشینه نازک‌شدگی مربوط به نواحی مختلف شکل‌دهی را ارزیابی نمود. تطابق نمونه تجربی و شبیه‌سازی به صورت منحنی توزیع ضخامت قطعه نهایی نشان‌دهنده صحت روش اجزای محدود به منظور ترسیم نمودار پنجره فرایند می‌باشد. آزمایش‌های تجربی متعددی در مسیرهای فشار منتخب از نواحی مختلف نمودار پنجره فرایند به منظور دستیابی به قطعات سالم، نمایش چروکیدگی و نمونه‌های معیوب در ناحیه پارگی در ضخامت‌های مختلف انجام گردید.

## ۲- مراحل آزمایشگاهی

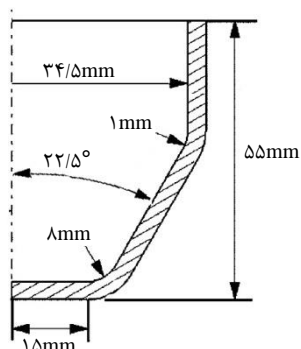
برای انجام آزمایش‌ها از ورق‌های مس خالص (۹۹/۹٪)، فولاد St14 و آلومینیوم A11050 با ضخامت‌های مختلف، به منظور بررسی شکل‌دهی فنجان‌های مخروطی در یک مرحله با روش کشش عمیق هیدرونیامیکی با فشار شعاعی استفاده شد. برای تعیین خواص مکانیکی و ناهمسانگردی مواد، آزمون کشش بر روی نمونه‌ها انجام گردید. نمونه‌ها در سه راستای نورد ۰ درجه، ۴۵ درجه و ۹۰ درجه تحت کشش قرار گرفتند، نتایج و برخی مشخصات فیزیکی نمونه‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. در تمامی ورق‌های مورد آزمایش نسبت کشش ثابت ۳/۹۳ در قطعات مخروطی بر اساس نسبت ورق اولیه به کمترین قطر سنبه حاصل می‌شود. (قطر ورق اولیه ۱۱۸mm، کمترین قطر سنبه ۳۰mm)

جدول ۱- خواص مواد

ماده	مس خالص	فولاد St14	آلومینیوم A11050
مدول الاستیسیته (GPa)	۱۱۷	۲۱۰	۷۰
ضریب پواسون	۰/۳۲	۰/۳	۰/۳۳
تنش تسلیم (MPa)	۱۲۳	۲۱۴	۳۲
ضریب استحکام (MPa)	۵۳۰/۹۸	۶۶۸/۳	۱۴۰
توان کرنش سختی	۰/۴۴	۰/۳۴	۰/۲۵
ضریب ناهمسانگردی r0	۱	۱/۸۷	۱/۳۹
ضریب ناهمسانگردی r45	۱	۱/۶۵	۱/۲۴
ضریب ناهمسانگردی r90	۱	۲/۱۴	۱/۴۶

نوک سنبه با ورق فلزی شده و از پارگی ورق به خصوص در مراحل اولیه فرایند جلوگیری می‌کند. لنگ و همکارانش [۸] به صورت تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود تأثیر کالیبراسیون را در فرایند هیدروفرمینگ چند مرحله‌ای برای شکل‌دهی قطعات مخروطی بر روی موادی با قابلیت شکل‌دهی کم مورد مطالعه قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد که استفاده از روش کالیبراسیون می‌تواند از وقوع چروکیدگی و پارگی در این قطعات جلوگیری کند. گرجی و همکارانش [۹] شکل‌دهی فنجان‌های مخروطی- استوانه‌ای را با روش کشش عمیق هیدرونیامیکی با فشار شعاعی به صورت تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود مورد بررسی قرار دادند. این محققان به منظور تعیین مسیر فشار مطلوب، مسیرهای فشار متعددی را در نظر گرفته و تأثیر آن را بر پیشامد عیوب و توزیع ضخامت قطعه شکل‌داده شده مورد مطالعه قرار دادند. تاکنون مقالات متعددی در زمینه طراحی نمودارهای پنجره فرایند در روش‌های مختلف شکل‌دهی ارائه شده است. چو و همکارش [۱۰] بر اساس روابط تئوری نمودار پنجره فرایندی را برای هیدروفرمینگ لوله ارائه نمودند. نمودار پنجره فرایند پیشنهاد شده توسط ایشان به صورت فشار داخلی نسبت به نیروی محوری برای پیش‌بینی خم‌شدگی، چروکیدگی و پارگی در هیدروفرمینگ لوله طراحی شد. ولترسن و همکارش [۱۱] در فرایند کشش عمیق میکرو تأثیر سرعت سنبه را بر روی نمودار پنجره فرایند به صورت نیروی ورق‌گیر بر روی نسبت کشش مورد بررسی قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد که با افزایش سرعت سنبه، حد بالای مجاز نیروی ورق‌گیر افزایش می‌یابد. گائو و همکارانش [۱۲] نمودارهای پنجره فرایند را با در نظر گرفتن تأثیرات طول و قطر اولیه در فشردگی لوله به کمک شکل‌دهی فشار ویسکوز ترسیم نمودند. نتایج این محققان نشان داد که با افزایش طول فشردگی لوله، هر دو ناحیه سالم و ناحیه حذف چروکیدگی کاهش می‌یابند و با افزایش قطر اولیه لوله، ناحیه سالم کاهش و ناحیه حذف چروکیدگی افزایش می‌یابد.

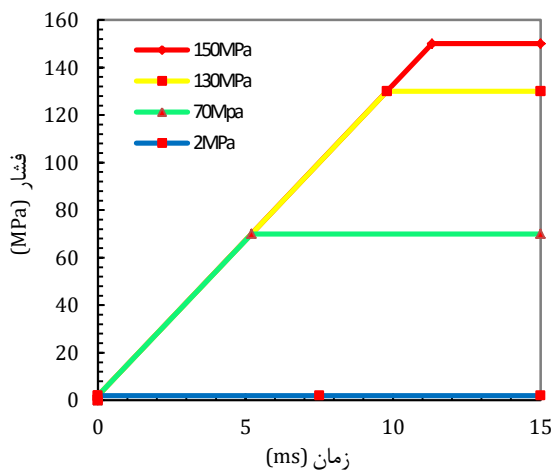
در این مقاله، با در نظر گرفتن مسیر فشار شکل‌دهی، ضخامت ورق اولیه و جنس آن در فرایند کشش عمیق هیدرونیامیکی با فشار شعاعی نمودار پنجره فرایند برای شکل‌دهی قطعات مخروطی با استفاده از روش اجزای محدود ترسیم شد. با استفاده از نمودار حاصل می‌توان ناحیه مطلوب



شکل ۲- مشخصات ابعادی قطعه مخروطی شکل‌دهی شده



شکل ۳- اجزای قالب به همراه نمونه قطعات شکل‌دهی شده



شکل ۴- نمونه منحنی مسیره‌های بارگذاری فشار

در روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی هم‌زمان با حرکت سنبله به سمت پایین و افزایش فشار درون محفظه روغن، ورق به داخل قالب کشیده شده و در اثر فشار سیال به سطح سنبله چسبانده می‌شود. در این زمان سیال تحت فشار می‌تواند از فاصله بین ورق و محفظه عبور کرده و از فاصله بین برآمدگی ایجاد شده روی ورق‌گیر و محفظه نشت کند. اما از آنجایی که این فضای خالی بسیار کوچک است باعث ایجاد فشار شعاعی به لبه ورق در ناحیه فلنج می‌شود که به هدایت راحت‌تر ورق به درون قالب کمک می‌کند. به عبارتی تأثیر مثبت فشار شعاعی ایجاد شده باعث کاهش نیروی کشش و افزایش نسبت کشش در این فرآیند می‌شود [۱۳].

شکل ۲ ابعاد قطعه نهایی در این پژوهش را نمایش می‌دهد. آزمایش‌ها با استفاده از یک ماشین انیورسال با ظرفیت ۲۰۰ KN انجام شد. شکل ۳ مجموعه قالب هیدروفرمینگ آزمایشگاهی، ورق‌های اولیه و نمونه قطعات را به صورت مجزا نمایش می‌دهد. نمونه‌ای از مسیرهای فشار کاربردی در این پژوهش در شکل ۴ نشان داده شده است. نمودار فشار-زمان شامل سه بخش اصلی بیان شده است: (۱) فشار پیش‌بالج (۲) فشار خطی افزایشی (۳) فشار بیشینه. در تمامی مسیرهای فشار به کاررفته، فشار اولیه محدودی (۲ MPa) به عنوان فشار پیش‌بالج اعمال می‌شود که سطح تماس ورق با سنبله را افزایش داده و باعث بهبود جریان فلز در شروع فرایند می‌شود. حرکت سنبله به درون محفظه قالب و به دنبال آن فشردگی سیال، فشار خطی افزایشی را نتیجه خواهد داد. فشار بیشینه<sup>۱</sup> یکی از عوامل موثر در قابلیت شکل‌پذیری قطعات مخروطی در فرایند هیدرودینامیکی با فشار شعاعی است که در آزمایشگاه توسط شیر کنترل فشار تنظیم می‌گردد. کمینه و بیشینه فشار شکل‌دهی برحسب جنس و ضخامت ورق اولیه تغییر می‌یابد که با استفاده از نمودارهای پنجره فرایند می‌توان این مقادیر را تعیین نمود. در منحنی‌های نشان‌داده شده در شکل ۴ فشار بیشینه ۷۰ MPa برای آلومینیم، فشار ۱۳۰ MPa برای مس خالص و فشار ۱۵۰ MPa برای فولاد در ضخامت ورق اولیه ۲٫۵ mm به عنوان نمونه مسیرهای بارگذاری فشار شکل‌دهی نمایش داده شده است.

<sup>1</sup> Maximum Pressure (Pmax)

### ۳- شبیه‌سازی اجزای محدود

برای انجام شبیه‌سازی فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی، از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS 6.12 استفاده شد. در شبیه‌سازی‌ها، برای فولاد St14 و آلومینیوم Al1050 ضرایب ناهمسانگردی از نتایج آزمایش کشش مورد استفاده قرار گرفت. در شبیه‌سازی مس خالص، رفتار مواد همسانگرد فرض شد که نتایج آزمایشگاهی این فرض را تصدیق نمود. به‌منظور وارد نمودن ضرایب ناهمسانگردی در شبیه‌سازی فرایند، نسبت‌های تنش پلاستیک با استفاده از روابط (۱) تا (۴) بر اساس نظریه مومسانی هیل مورد استفاده قرار گرفت [۱۴]. نتایج نسبت‌های تنش پلاستیک برای فولاد و آلومینیوم در جدول ۲ نشان داده شده است.

$$R_{11} = 1 \quad (1)$$

$$R_{22} = \sqrt{\frac{R_{90}(R_0+1)}{R_0(R_{90}+1)}} \quad (2)$$

$$R_{33} = \sqrt{\frac{R_{90}(R_0+1)}{R_0+R_{90}}} \quad (3)$$

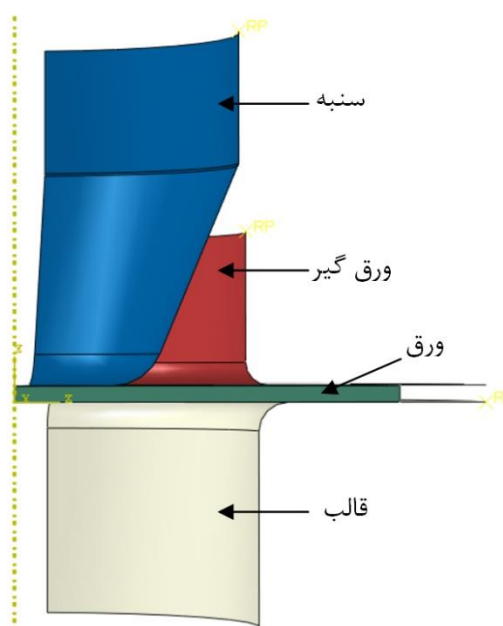
$$R_{12} = \sqrt{\frac{3R_{90}(R_0+1)}{2(R_{45}+1)(R_0+R_{90})}} \quad (4)$$

شکل ۵ مجموعه قالب شبیه‌سازی‌شده را به شکل سه بعدی و یک‌چهارم نشان می‌دهد. ورق به صورت متقارن تغییرشکل‌پذیر<sup>۱</sup> و با المان حجمی ۸ گره‌ای (C3D8R) و قالب به صورت صلب گسسته<sup>۲</sup> و با المان ۴ گره‌ای (R3D4) مدل شد. آنالیز حساسیت شبکه به ابعاد مش، به‌منظور تعیین تعداد المان‌های استفاده‌شده در طراحی ورق اولیه بر روی نتایج عددی در فرایند هیدرودینامیکی با فشار شعاعی انجام گردید. نتایج آنالیز حساسیت در شکل ۶ مقدار همگرایی شبکه را در ۵۸۰۰ المان شبکه‌بندی‌شده برای یک نمونه ورق اولیه نشان می‌دهد. نوع تماس بین ورق و اجزای قالب سطح به سطح<sup>۳</sup> می‌باشد. مقدار ضریب اصطکاک در شبیه‌سازی برای سطح تماس سنبه-ورق برابر ۰/۱۴ و برای سطوح ورق-قالب و ورق-ورق‌گیر ۰/۰۴ در نظر گرفته شد [۱۵]. سرعت نرمال سنبه ۰/۲ m/min می‌باشد که به منظور کاهش زمان محاسبات فاکتور سرعت ۱۰۰ در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت [۱۶]. نتایج عددی حاصل نسبت انرژی جنبشی به

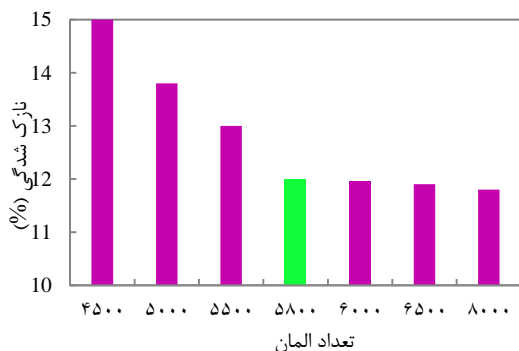
انرژی درونی (KE/IE) را کم‌تر از ۰/۱ نشان دادند. این نتایج ضابطه‌ای را که بایستی مقادیر انرژی جنبشی کم‌تر از انرژی درونی باشد، ارضا می‌نماید. معیار شکست، ۳۰٪ نازک‌شدگی ورق فرض شد که معیار مورد قبول در شکل‌دهی قطعات صنعتی می‌باشد [۱۷-۱۸].

جدول ۲- نسبت های تنش تسلیم در شبیه‌سازی

مواد	R <sub>33</sub>	R <sub>22</sub>	R <sub>12</sub>
St14	۱/۰۲۲۷	۱/۲۳۷۶	۰/۹۳۱۱
Al1050	۱/۰۱۴۸	۱/۱۰۵۳	۰/۹۰۴۵



شکل ۵- مدل اجزای محدود فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی



شکل ۶- تاثیر تعداد المان‌ها بر درصد کاهش ضخامت ورق اولیه در شبیه‌سازی فرایند

<sup>1</sup> Deformable Axisymmetric

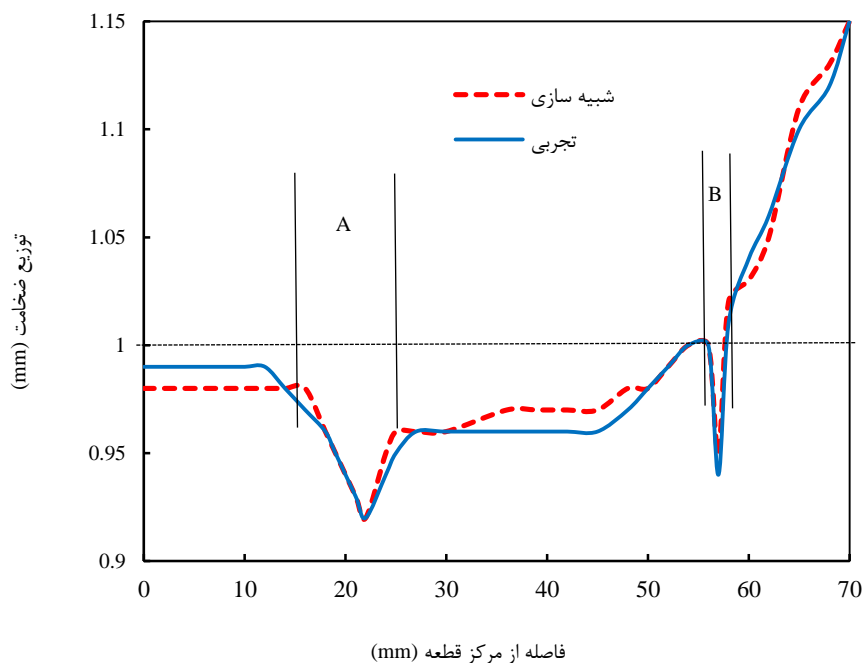
<sup>2</sup> Discrete Rigid

<sup>3</sup> Surface-to-Surface

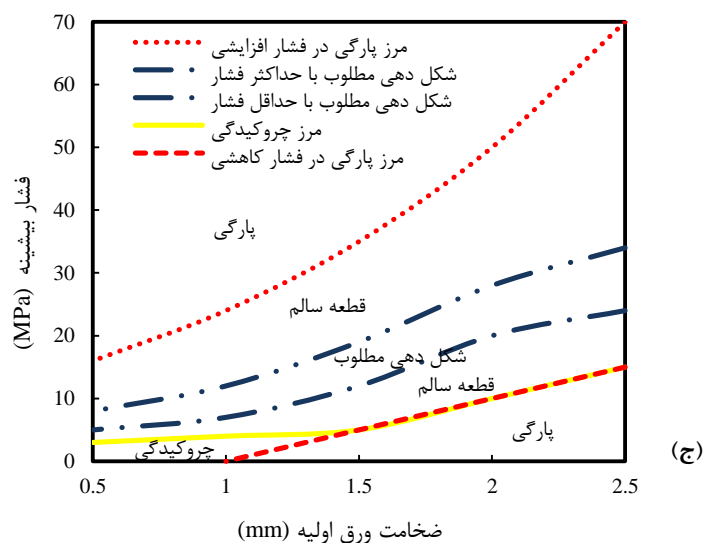
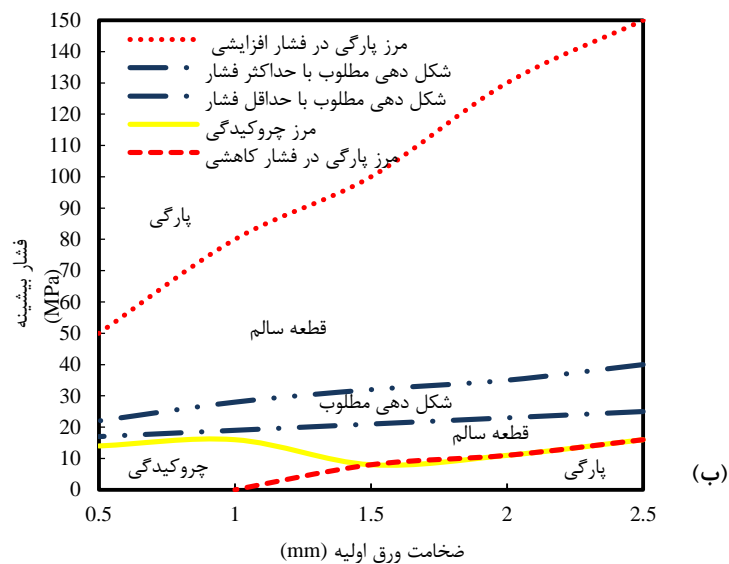
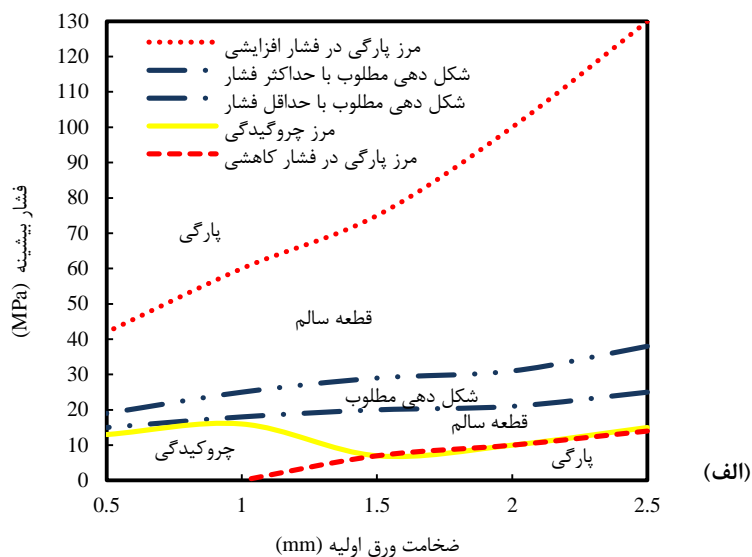
## ۴- نتایج و بحث

شکل‌دهی بخش استوانه‌ای قطعه، حداکثر اختلاف بین دو نمونه تجربی و شبیه‌سازی در حدود یک درصد بوده که نشان‌دهنده تطابق مناسب بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی است. مسیر فشار نقش بسیار مهمی در شکل‌پذیری و توزیع ضخامت قطعه نهایی تولیدشده ایفا می‌کند. بنابراین مسیرهای بارگذاری با فشارهای بیشینه مختلف بر اساس نمونه آزمایشگاهی شکل ۴ به‌عنوان پارامتر اصلی در ترسیم نمودار پنجره فرایند به کمک شبیه‌سازی اجزای محدود برای قطعات مخروطی مورد بررسی قرار گرفت. با تغییر ضخامت ورق اولیه، محدوده فشار جهت شکل‌دهی قطعه سالم و یا وقوع عیوب احتمالی تغییر خواهد نمود. از این‌رو ضخامت ورق اولیه نیز به‌عنوان یکی از پارامترهای موثر در این پژوهش در ترسیم نمودار پنجره فرایند به‌کار گرفته شد. نمودار پنجره فرایند برای هر یک از مواد مس خالص، فولاد St14 و آلومینیوم Al1050 برای شکل‌دهی قطعه مخروطی با روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی مطابق با مسیرهای فشار مختلف نسبت به تغییر ضخامت ورق اولیه در شکل ۸ نمایش داده شده است.

به‌منظور بررسی صحت شبیه‌سازی اجزای محدود آزمایش-های متعددی انجام شد که نتایج یک نمونه فولادی با ضخامت یک میلی‌متر در شکل ۷ نمایش داده می‌شود. در این شکل نمودار توزیع ضخامت نمونه‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی با یکدیگر مقایسه می‌شود. منحنی‌های حاصل از نمونه تجربی و شبیه‌سازی با اختلاف کم، رفتار نزولی و صعودی مشابهی را نشان می‌دهند. تغییرات شرایط مرزی و شرایط اصطکاک، خصوصیات ناهمسانگردی مواد و خطاهای اندازه‌گیری در نتایج آزمایشگاهی می‌تواند از جمله دلایل اختلاف بین دو منحنی تجربی و شبیه‌سازی باشد. دو ناحیه بحرانی مربوط به شعاع راس سنبه (ناحیه A) و ناحیه گذار مخروطی-استوانه‌ای (ناحیه B) در شکل ۷ مشاهده می‌شود. بحرانی‌ترین ناحیه با توجه به مقدار فشار بیشینه می‌تواند در یکی از دو ناحیه A یا B واقع شود. دو عامل در کاهش ضخامت در ناحیه گذار مخروطی-استوانه‌ای (ناحیه B) تاثیرگذار هستند: نخست تمرکز تنش بالا در شعاع کوچک ۱ میلی‌متری در این ناحیه و دوم عمل خم و واخم در



شکل ۷- منحنی توزیع ضخامت قطعه فولادی با ضخامت ۱mm حاصل از فشار بیشینه ۲۰MPa



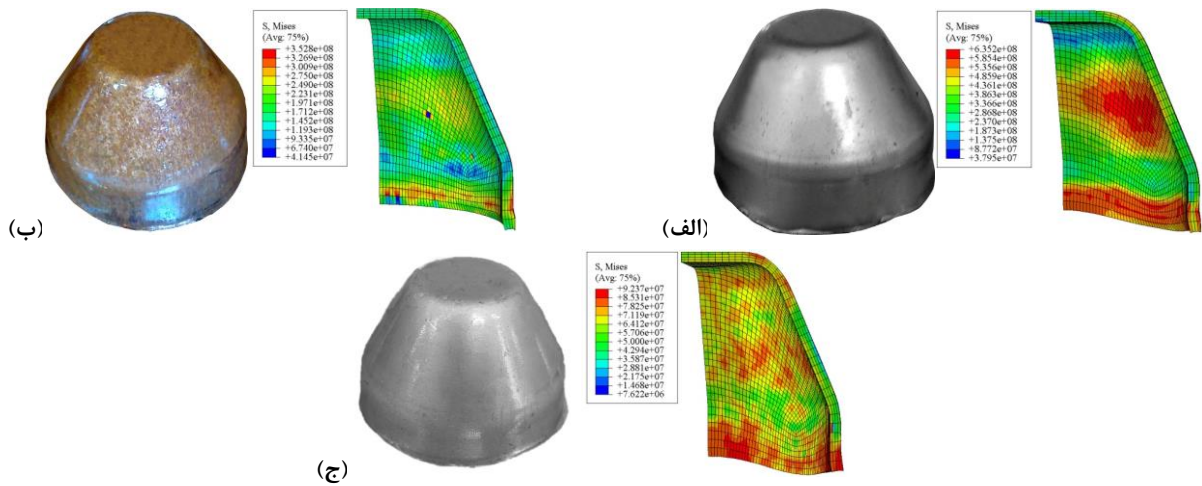
شکل ۸- نمودار پنجره فرایند شکل دهی قطعه مخروطی (الف) مس خالص (ب) فولاد St14 (ج) آلومینیوم Al1050

بنابراین با کاهش ضخامت ورق اولیه، محدوده ناحیه شکل-دهی باریک‌تر شده و احتمال وقوع چروکیدگی قطعه نیز افزایش می‌یابد. اعمال مسیر فشار ۱۶MPa تا ۵۰MPa برای فولاد، مسیر فشار ۱۶MPa تا ۴۲MPa برای مس خالص و مسیر فشار ۱۵MPa تا ۱۶MPa برای آلومینیوم ناحیه امن برای شکل‌دهی قطعه سالم را برای هر ضخامت منتخب در نمودار پنجره فرایند نتیجه می‌دهد. مقایسه این نتایج بین ورق‌های فولادی، مسی و آلومینیومی نشان می‌دهد که با افزایش استحکام ورق، محدوده فشار شکل‌دهی گسترش می‌یابد. همچنین با توجه به نمودارهای شکل ۸ می‌توان نتیجه گرفت با تغییر جنس ورق اولیه محدوده فشار شکل‌دهی قطعه سالم و وقوع عیوب احتمالی متفاوت بوده درحالی‌که نحوه چیدمان و قالب کلی مشابهی در این نمودارها در هر سه جنس فولاد، مس و آلومینیوم مشاهده می‌شود.

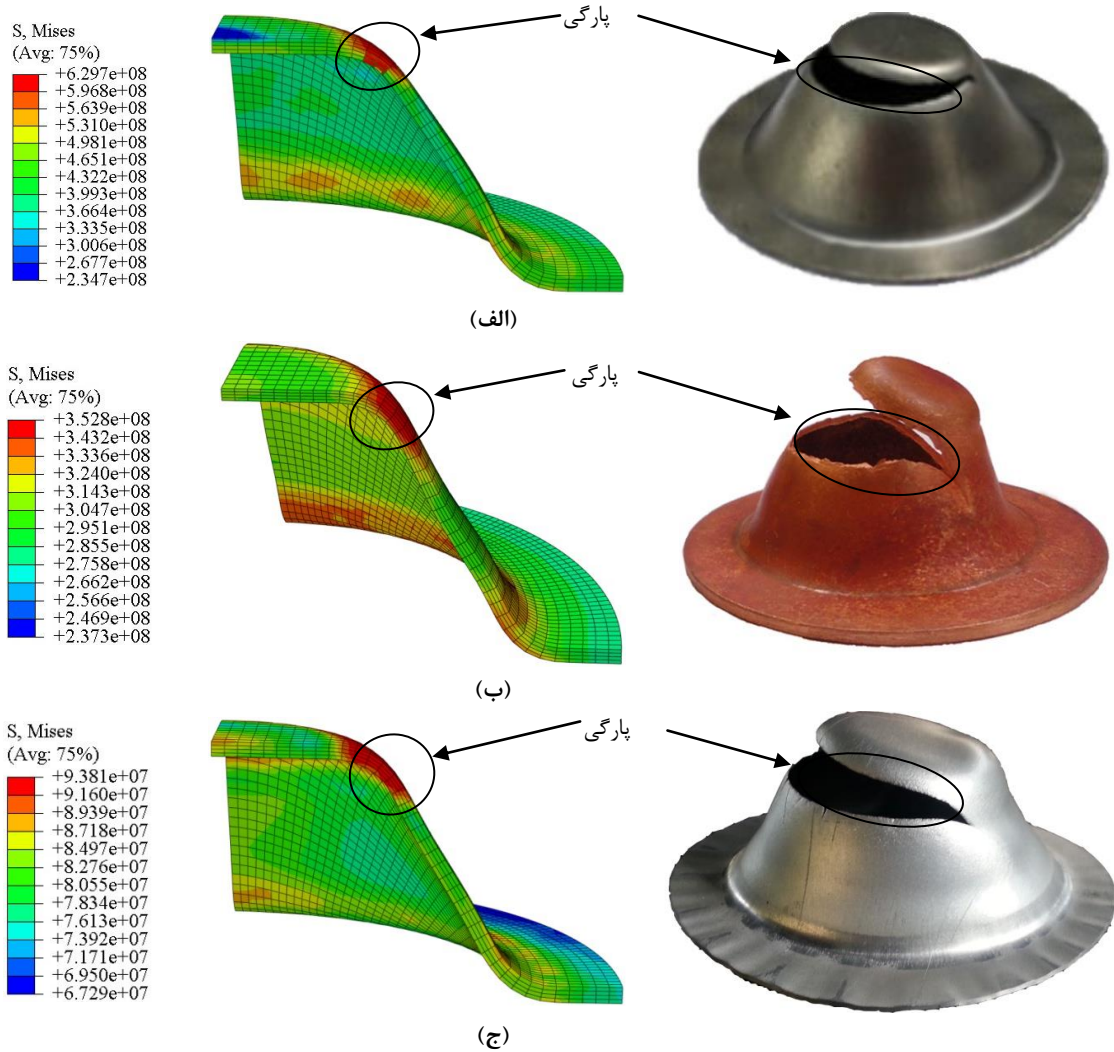
در شکل ۹ قطعات سالم با جنس مس خالص و فولاد St14 با ضخامت ۲٫۵ میلی‌متر با استفاده از مسیر فشار ۲۵MPa و قطعه آلومینیوم A11050 با مسیر فشار ۲۴MPa در شکل ۸ نمایش داده شده است. در شکل ۱۰ نمونه‌های تجربی و شبیه‌سازی مربوط به قطعات معیوب در ناحیه پارگی نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود مسیرهای فشار ۴MPa، ۵MPa و ۶MPa به ترتیب برای فولاد St14، مس خالص و آلومینیوم A11050 با ضخامت ۲ میلی‌متر منجر به پارگی در قسمت شعاع نوک قطعات مخروطی شده است. نمونه‌های آزمایشگاهی با مدل-های شبیه‌سازی شده در ضخامت ۱ میلی‌متر از لحاظ چروکیدگی در شکل ۱۱ با یکدیگر مقایسه می‌شوند. در این شکل تعداد چروک‌های رخ داده در مدل شبیه‌سازی کمتر از نمونه‌های تجربی بوده که علت این امر را می‌توان به تعداد و شکل مش‌بندی، نحوه توزیع مش‌ها و اعمال بالای سرعت سنبه در مدل اجزای محدود نسبت داد. در مدل‌های المان محدود نشان داده شده در شکل ۱۱، چروکیدگی به صورت عدم انطباق قطعه با سنبه نمایش داده شده است. در این شکل به منظور نمایش چروکیدگی در قطعات فولادی، مسی و آلومینیومی به ترتیب مسیرهای فشار ۴MPa، ۵MPa و ۶MPa برای ورق اولیه با ضخامت ۱ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت.

در نمودارهای شکل ۸، نواحی مربوط به شکل‌دهی قطعه مخروطی سالم و نواحی عیوب احتمالی مشخص شده است. ناحیه شکل‌دهی قطعه سالم، محدوده‌ای از تغییرات فشار بیشینه را برای ضخامت‌های مختلف ورق نمایش داده که دست‌یابی به قطعه ایده‌آل در این بازه قرار می‌گیرد. در نمودار پنجره فرایند ناحیه مربوط به قطعه سالم به سه محدوده (الف) شکل‌دهی مطلوب، (ب) شکل‌دهی با فشار افزایشی و (ج) شکل‌دهی با فشار کاهشی تقسیم شده است. دست‌یابی به قطعه‌ای با توزیع ضخامت یکنواخت و حداقل نازک‌شدگی در ناحیه بحرانی به‌عنوان بازه شکل‌دهی مطلوب تعریف می‌شود. ناحیه شکل‌دهی با فشار افزایشی در قسمت فوقانی مرز شکل‌دهی مطلوب با حداکثر فشار قرار داشته و در این ناحیه با افزایش هرچه بیشتر فشار بیشینه، مقدار نازک‌شدگی در نواحی بحرانی افزایش می‌یابد، اما از مقدار معین شده در معیار تسلیم (۳۰٪ نازک‌شدگی) تجاوز ننموده تا به مرز پارگی در قطعه منتهی می‌شود. در قسمت زیرین مرز شکل‌دهی مطلوب با حداقل فشار، ناحیه شکل‌دهی با فشار کاهشی واقع شده است، که با کاهش فشار بیشینه مقدار نازک‌شدگی همانند ناحیه (ب) روند افزایشی داشته، با این تفاوت که در ناحیه (ج) با روند کاهشی فشار بسته به ضخامت ورق اولیه احتمال وقوع هر یک از عیوب چروکیدگی و پارگی وجود دارد. با کاهش فشار از ناحیه (ج) در قطعات مخروطی با ضخامت بین ۱٫۵ تا ۲ میلی‌متر، عیب پارگی و با ضخامت کمتر از ۱ میلی‌متر، عیب چروکیدگی و با ضخامت بین ۱ تا ۱٫۵ میلی‌متر، در ابتدا عیب چروکیدگی و سپس در فشارهای پایین‌تر پارگی اتفاق خواهد افتاد. در ضخامت‌های کمتر از ۱٫۵ میلی‌متر با افت بیشتر فشار، نیروی لازم جهت چسباندن ورق به سنبه اعمال نشده و در نتیجه باعث ایجاد چروک در این نواحی می‌شود. در پنجره فرایند حاصل با کاهش ضخامت ورق اولیه، محدوده فشار شکل‌دهی قطعه سالم برای نمونه فولادی بین ۱۱ تا ۷۴ درصد، برای نمونه مسی بین ۲۱ تا ۷۵ درصد و برای نمونه آلومینیومی بین ۲۷ تا ۷۹ درصد روند نزولی را نسبت به محدوده فشار ضخامت ۲٫۵ میلی‌متر نشان می‌دهد. همچنین بازه فشار شکل‌دهی قطعه مطلوب برای هر سه جنس مذکور بین ۲۰ تا ۷۰ درصد با کاهش ضخامت ورق اولیه نسبت به ضخامت ۲٫۵ میلی‌متر کاهش می‌یابد.

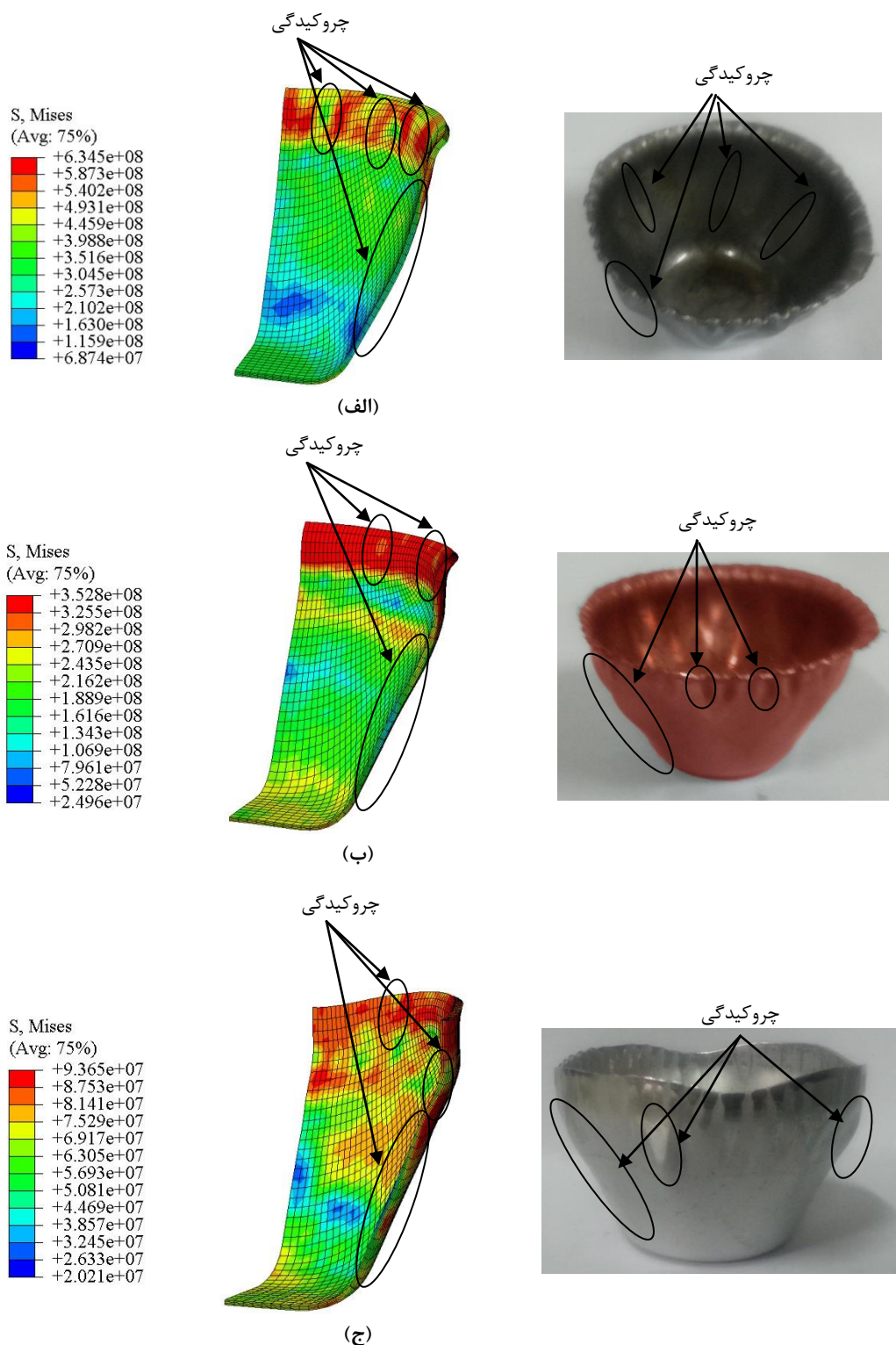




شکل ۹- قطعات سالم شکل‌دهی شده با ضخامت ۲/۵ میلی‌متر با مسیرهای فشار مطلوب (الف) فولاد St14 با فشار ۲۵MPa (ب) مس خالص با فشار ۲۵MPa (ج) آلومینیوم Al1050 با فشار ۲۴MPa



شکل ۱۰- قطعات با عیب پارگی با ضخامت ۲ میلی‌متر (الف) فولاد St14 با فشار ۴MPa (ب) مس خالص با فشار ۵MPa (ج) آلومینیوم Al1050 با فشار ۶MPa



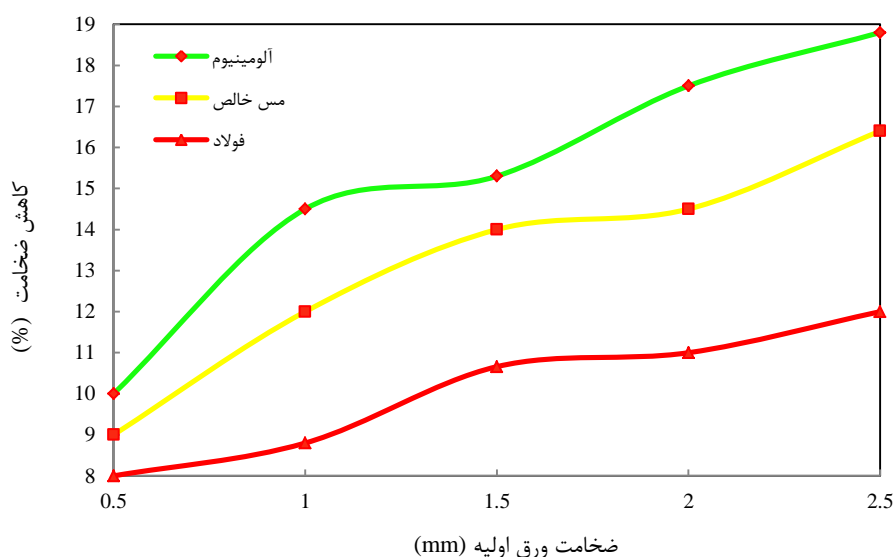
شکل ۱۱- قطعات با عیب چروکیدگی با ضخامت ۱ میلی‌متر (الف) فولاد St14 با فشار ۶MPa (ب) مس خالص با فشار ۵MPa (ج) آلومینیوم Al1050 با فشار ۲MPa

در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل آلومینیوم Al1050 نسبت به ضخامت‌های مختلف ورق اولیه

درصد نازک‌شدگی قطعات شکل‌دهی شده با استفاده از مسیر فشار مطلوب برای سه جنس مس خالص، فولاد St14 و

فشار بیشینه مورد نیاز برای شکل‌دهی مطلوب ورق‌های با ضخامت پایین‌تر و متعاقباً اعمال تنش‌های محیطی کمتر در حین فرایند شکل‌دهی می‌باشد. با توجه به شکل ۱۲، قطعه فولادی کمترین درصد کاهش ضخامت را نسبت به دو جنس دیگر نشان داده و بنابراین توزیع ضخامت یکنواخت‌تر و شکل‌پذیری بهتر در فولاد St14 با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر اتفاق می‌افتد.

مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت ورق اولیه، مقدار نازک‌شدگی برای قطعه فولادی بین ۸ تا ۱۲ درصد، نمونه مسی بین ۹ تا ۱۶/۴ درصد و نمونه آلومینیومی بین ۱۰ تا ۱۸/۸ درصد روند صعودی را نشان می‌دهد. بنابراین قطعه مخروطی با ضخامت ورق اولیه کمتر در فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی دارای توزیع ضخامت یکنواخت‌تر و شکل‌پذیری بهتری است. علت این امر کاهش



شکل ۱۲- درصد کاهش ضخامت در ناحیه بحرانی A حاصل از فشار بیشینه مطلوب

ابتدا عیب چروکیدگی و با افت بیشتر فشار پارگی اتفاق خواهد افتاد. با افزایش فشار از ناحیه شکل‌دهی با فشار افزایشی برای ضخامت‌های مختلف عیب نازک‌شدگی و پارگی در قطعات پیش‌بینی شده است.

- با کاهش ضخامت ورق اولیه، محدوده ناحیه شکل‌دهی برای نمونه فولادی بین ۱۱ تا ۷۴ درصد، برای نمونه مسی بین ۲۱ تا ۷۵ درصد و برای نمونه آلومینیومی بین ۲۷ تا ۷۹ درصد باریک‌تر شده و احتمال وقوع عیوب چروکیدگی و پارگی نیز افزایش می‌یابد.
- ورق با ضخامت اولیه کمتر و استحکام بیشتر، شکل‌پذیری مناسب‌تر و یکنواختی توزیع ضخامت قطعه نهایی را نتیجه می‌دهد. بنابراین قطعه فولادی مقدار نازک‌شدگی کمتری نسبت به مس و آلومینیوم دارد.

##### ۵- نتیجه گیری

بر اساس نمودار پنجره فرایند حاصل در این مقاله برای شکل‌دهی قطعات مخروطی با روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی، نتایج ذیل را می‌توان دلالت نمود:

- نواحی شکل‌دهی قطعه سالم، چروکیدگی و پارگی در نمودار بر اساس تغییرات فشار قابل پیش‌بینی است.
- ناحیه قطعه سالم به سه ناحیه شکل‌دهی مطلوب، شکل‌دهی با فشار افزایشی و فشار کاهش‌ی تقسیم‌بندی شد. قطعه ایده‌آل با بهترین توزیع ضخامت و کمینه نازک‌شدگی در ناحیه شکل‌دهی مطلوب قرار می‌گیرد. با افت فشار از ناحیه شکل‌دهی با فشار کاهش‌ی برای ضخامت‌های ۱/۵ تا ۲ میلی‌متر عیب پارگی، کمتر از ۱ میلی‌متر عیب چروکیدگی و ضخامت‌های ۱ تا ۱/۵ میلی‌متر، در

- sheet metal forming. *J Mater Process Tech* 109: 283-289.
- [7] Thiruvarduchelvan S, Tan MJ (2004) The drawing of conical cups using an annular urethane pad. *J Mater Process Tech* 147: 163-166.
- [8] Lang L, Gu G, Li T, Zhou X (2008) Numerical and experimental confirmation of the calibration stage's effect in multi-operation sheet hydroforming using poor-formability materials. *J Mater Process Tech* 201: 97-100.
- [9] Gorji A, Alavi-Hashemi H, Bakhshi-jooybari M, Nourouzi S, Hosseinipour SJ (2011) Investigation of hydrodynamic deep drawing for conical-cylindrical cups. *Int J Adv Manuf Technol* 56: 915-927.
- [10] Chu E, Xu Y (2004) Hydroforming of aluminum extrusion tubes for automotive applications. Part II: process window diagram. *Int J Mech Sci* 46: 285-297.
- [11] Vollertsen F, Hu Z (2010) Analysis of punch velocity dependent process window in micro deep drawing. *PROD ENGINEER* 4: 553-559.
- [12] Gao T, Liu Y, Wang Z (2014) Research on process window diagrams of tube-compression by viscous pressure forming. *J Mater Eng Perform* 23: 2020-2024.
- [13] Lang L, Danckert J, Nielsen KB (2005) Investigation into hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure Part II. Numerical analysis of the drawing mechanism and the process parameters. *J Mater Process Tech* 166: 150-161.
- [14] ABAQUS 6.12. Documentation, User's manual.
- [15] Liu X, Xu Y, Yuan Sh (2008) Effects of loading paths on hydrodynamic deep drawing with independent radial hydraulic pressure of aluminum alloy based on numerical simulation. *Int Mater Sci Technol* 24: 395-399.
- [16] Lang L, Danckert J, Nielsen KB (2005) Investigation into hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure Part II. Numerical analysis of the drawing mechanism and the process parameters. *J Mater Process Tech* 166: 150-161.
- [17] Choi H, Koc M, Ni J (2007) Determination of optimal loading profiles in warm hydroforming of lightweight materials. *J Mater Process Tech* 190: 230-242.
- [18] Papadia G, DelPrete A, Spagnolo A, Anglani A (2010) Pre-Bulging influence on an inverse drawn shape obtained with Hydromechanical Deep Drawing (HDD). *Int J Mater Form* 3: 287-290.
- با تغییر جنس ورق اولیه محدوده فشار شکل‌دهی قطعه سالم یا معیوب تغییر نموده، درحالی‌که نحوه ترکیب‌بندی و چیدمان نواحی مختلف پنجره فرایند رفتار مشابهی را پیروی می‌نماید. تعداد نواحی پیش‌بینی‌شده، موقعیت قرارگیری عیوب احتمالی بر اساس ضخامت، روند کاهش بازه فشار در ناحیه شکل‌دهی مطلوب بین ۲۰ تا ۷۰ درصد برای هر سه جنس مذکور نتایج یکسانی را نشان می‌دهد.
  - بدون در نظر گرفتن مقدار ضخامت ورق اولیه در این نمودارها می‌توان مسیر فشار ۱۶MPa تا ۵۰MPa برای فولاد، مسیر فشار ۱۶MPa تا ۴۲MPa برای مس خالص و مسیر فشار ۱۵MPa تا ۱۶MPa برای آلومینیوم به منظور شکل‌دهی قطعه سالم انتخاب نمود. بر اساس بازه‌های مذکور می‌توان مسیر فشار ۱۶MPa را برای هر سه جنس مس خالص، فولاد و آلومینیوم با هر ضخامت منتخب در نمودار حاصل به منظور شکل‌دهی قطعات سالم اعمال نمود.
- ### ۶- مراجع
- [1] Zhang SH, Dankert J (1998) Development of hydro mechanical deep drawing. *J Mater Process Tech* 83: 14-25.
- [2] Lang LH, Wang ZR, Kang DC, Yuan SJ, Zhang SH, Danckert J, Nielsen KB (2004) Hydroforming highlights: sheet hydroforming and tube hydroforming. *J Mater Process Tech* 151: 165-177.
- [3] Khandeparkar T, Liewald M (2008) Hydromechanical deep drawing of cups with stepped geometries. *J Mater Process Tech* 202: 246-254.
- [4] Zhang SH, Wang ZR, Xu Y, Wang ZT, Zhou LX (2004) Recent developments in sheet hydroforming technology. *J Mater Process Tech* 151: 237-241.
- [5] Lang L, Danckert J (2004) Investigation into hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure Part I. Experimental observations of the forming process of aluminum alloy. *J Mater Process Tech* 148: 119-131.
- [6] Kawka M, Olejnik L, Rosochowski A, Sunaga H, Makinouchi A (2001) Simulation of wrinkling in