شبیه سازی اجزای محدود و بررسی تجربی شکل دهی قطعات مخروطی با روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی

عبدالحميد گرجی'، حسن علوی هاشمی ٔ و محمد بخشی ؓ 🚽 محمد ابراهیم ولی زاده ٔ و اکبر شیرخورشیدیان ؓ صنايع شهيد صياد شيرازي

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۰۳/۰۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۰۹/۱۴)

حكىدە

شکل دهی قطعات مخروطی در صنعت یکی از زمینههای پیچیده و دشوار فرایندهای شکل دهی فلزات محسوب می شود. به علت تماس کم سطح ورق با سنبه در مراحل اولیه شکل دهی، تنش زیادی به ورق اعمال شده که موجب پارگی آن می شود. به علاوه، از آنجا که بخش عمدهای از سطح ورق در ناحیه بین نوک سنبه و ورق گیر آزاد است، در صورت کشیده شدن ورق، در دیواره قطعه مخروطی چروک ایجاد می شود. به همین دلیل، ایـن قطعـات را در صـنعت عمومـاً بـا روش اسـیینینگ، شکلدهی انفجاری و یا با کشش عمیق چند مرحلهای شکل میدهند. در زمینه شکلدهی قطعات مخروطی، تحقیقات محدودی صورت گرفته است. در این مقاله، شکل دهی قطعات مخروطی در فرآیند هیدروفرمینگ با استفاده از شبیه سازی اجزای محدود و مراحل آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است. با بررسی مسیرهای فـشار متفـاوت، تـأثیر مـسیر فـشار بـر یارگی و توزیع ضخامت قطعه مورد بررسی قرار گرفت. با اعمال مسیر فشار مطلوب، قطعات مخروطی با عمق زیاد و با کیفیت مناسب شکل داده شده است.

واژه های کلیدی: هیدروفرمینگ ورق، قطعات مخروطی، کشش عمیق هیدرودینامیکی، شبیهسازی اجزای محدود

Finite Element Simulation and Experimental Study of Forming Conical Parts, Using Hydrodynamic Deep Drawing with Radial Pressure

A. Gorji, H. Alavi Hashemi, and M. Bakhshi Mech. Eng. Dep't., Babol Noshirvani Univ. of Tech.

M.E. Valizadeh and A. Shirkhorshidian Shahid Sayyad Shirazi Industries

ABSTRACT

Forming conical parts is one of the complex and difficult fields in metal forming processes. Because of low contact area of the sheet with punch in the initial stages of forming, high stresses is applied to the sheet that causes tearing. Moreover, since most of the sheet surface in the area between the punch tip and the blank holder is free, when the sheet is drawn, wrinkles are occurred in the wall of the part. Thus, these parts are normally formed by spinning, explosive forming, or multistage deep drawing processes. A few number of research works have been carried out in the area of forming conical parts. In this paper, forming these parts in the hydroforming process is studied, using finite element simulation and experiments. By examining several pressure paths, the effect of pressure path on tearing and thickness distribution of the sheet has been studied. By obtaining the desired pressure path, a conical part with a high depth has been formed.

Keywords: Sheet Hydroforming, Conical Parts, Hydrodynamic Deep Drawing, Finite Element Method

۱- دانشجوی دکترا (نویسنده یاسخگو): hamidgorji@nit.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد: h.alavi.memp@stu.nit.ac.ir

۳- استاد: bakhshi@nit.ac.ir

ab.valizadeh@gmail.com - کارشناس:

۵- کارشناس: khorshidian_99@yahoo.com

٧٠

۱– مقدمه

در طی سال های اخیر تکنولوژی هیدروفرمینگ برای شکل دهی قطعات متنوع و پیچیده مورد توجه زیادی قرار گرفته و در زمینه های مختلف ساخت و تولید از جمله صنایع اتومبیل سازی، صنایع هوا و فضا و صنایع نفت و گاز کاربرد وسیعی یافته است. در مقایسه با سایر روش های شکل دهی، هیدروفرمینگ ورق دارای مزایای زیادی از جمله نسبت کشش زیاد، کیفیت سطح مطلوب، دقت ابعادی بالا و قابلیت شکل دهی قطعات پیچیده می باشد[۴–۱].

در طی سالهای گذشته نوآوریهای زیادی در زمینه هیدروفرمینگ ورق ارایه شده است که به عنوان مثال میتوان از هیدروریم [۱]، هیدرو فرمینگ استاندارد [۲،۱]، کشش عمیق آکوادرا [۲]، کشش عمیق هیدرومکانیکی [۲]، کشش عمیق هیدرودینامیکی [۲]، هیدروفرمینگ ورق با قالب متحرک [۲]، هیدروفرمینگ ورق دو بشکه ای' [۲] و کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی [۴–۳] نام برد. از میان انواع روشهای ذکر شده، کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی برای تولید قطعات استوانه ای با نسبت کشش بالا در یک مرحله نتیجه خوبی داده است. در شکل ۱ شماتیک این فرآیند نشان داده شده است. در این روش سیال در زیر ورق قرار می گیرد و ضمن اعمال فشار در جهت محوری قائم، در جهت شعاعی نیز بر روی آن فشار وارد می کند. بعلاوه، ورق بین ورقگیر و ماتریس آزاد است.



شکل (۱): شماتیک فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی [۴،۳].

قطعات مخروطی در صنعت دارای کاربرد گسترده ای می باشند. این قطعات در صنایع نظامی دارای کاربرد ویژه ای هستند. شکل دهی قطعات مخروطی با فرآیند کـشش عمیق موضوع دشوار و پیچیـده ای محـسوب مـی گـردد [۸–۸]. شکل ۲ شماتیک این فرآیند را برای شـکل دهـی یک قطعه مخروطی نشان می دهد. همانطور که در شکل نشان داده شده است به دلیل تماس کم سطح ورق و سنبه در مراحل اولیه، تنش زیادی در ناحیه تماس با سـر سنبه، به ورق اعمال می شود که این امر موجب پارگی آن می گردد. بعلاوه، از آنجا که بخش عمده ای از سطح ورق در ناحیه بین نوک سنبه و ورقگیر آزاد است، در صورت کشیده شدن ورق، در دیواره قطعه مخروطی چروک ایجاد می شود. شکل ۳ چروکهای ایجاد شده در ناحیه های فلنج و دیواره قطعه مخروطی را که با روش کشش عمیق معمولی کشیدہ شدہ است، نےشان مے دہدا از این رو، قطعات مخروطی در صنعت عموماً با کـشش عميـق چنـد مرحله ای [۷]، اسپینینگ [۹] یا با شکل دهی انفجاری [۱۰-۱۱] شکل داده می شوند.



شکل (۲): شکل دهی قطعه مخروطی درقالب کشش عمیق معمولی.



شکل (۳): چروکهای ایجاد شده در ناحیه های فلنج و دیواره قطعه مخروطی در فرآیند کشش عمیق معمولی [۵].

www.SID.ir

¹⁻Twin Bulging

کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی می تواند از ایجاد چروک در دیواره قطعات مخروطی جلوگیری کند. در این روش فشار سیال از یک طرف باعث افزایش اصطکاک بین سنبه و ورق و در نتیجه بهبود نسبت کشش در قطعات استوانه ای می شود. از سوی دیگر، بکار گیری سیال سبب روغنکاری بین سطوح تماس ورق با اجزای قالب و در نتیجه موجب کاهش اصطکاک می شود. این امر باعث بهبود قابلیت شکل پذیری می گردد [۴–۳].

در زمینه هیدروفرمینگ قطعات مخروطی تحقیقات محدودی انجام شده است. خاندپرکار^۱ و همکارش [۱۴] با استفاده از یک قالب جدید که آن را هیدرو مکانیکی به همراه فیشار پشتیبان نامیدند به بررسی شکل دهی یک قطعه با هندسه پله دار (استوانهای- مخروطی-استوانه ای) پرداختند. همچنین محققان تأثیر پیش-بالج و منحنی فشار بهینه بر بهبود شکل دهی قطعه مخروطی پله دار را با شبیه سازی اجزای محدود نشان دادند.

لانگ¹ و همکاران [۱۵] بررسی تجربی و شبیه سازی اجزای محدود تأثیر مرحله کالیبراسیون را در فرآیند هیدروفرمینگ چند مرحله ای ورق برای شکل دهی قطعات مخروطی و شبه مخروطی بر روی موادی با قابلیت شکل دهی کم، از جمله آلیاژهای آلومینیم و آلیاژهای فولاد استحکام بالا مورد مطالعه قرار داده اند. آنها در نوع اول انجام کالیبراسیون را به دو نوع تقسیم نمودند. به صورت پیوسته و بدون توقف، و نوع دوم کالیبراسیون با استفاده از تغییر ابزار (تغییر در سنبه و ماتریس) که در پایان هر مرحله از فرآیند تغییر می کند. محققان در نهایت تأکید می کنند که استفاده از مرحله کالیبراسیون می تواند از وقوع چروک و پارگی بویژه در قطعات پیچیده

مهم ترین پارامتر مؤثر در شکل دهی ورقهای فلزی با روش هیدروفرمینگ، مسیر فشار اعمالی است که در بسیاری از تحقیقات انجام شده از سوی محققان مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است [۴–۱] و [۱۳–۱۲]. در این مقاله، هدف، بررسی اثر مسیر فشار بر شکل پذیری و

ضخامت قطعات مخروطی با استفاده از روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی، می باشد. جهت تعیین مسیر فشار مطلوب، با روش شبیه سازی اجزای محدود، مسیرهای فشار متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. برای تایید نتایج شبیه سازی، آزمایشها نیز انجام شد. ابتدا مسیر های فشار که منجر به پارگی (عدم شکل پذیری) می شد بررسی، و در مراحل بعدی تغییر ضخامت قطعه مخروطی در مسیر های فشار که قطعه شکل داده شد مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مراحل آزمایشگاهی

شکل ۴ شماتیک مجموعه قالب هیدرودینامیکی استفاده شده در این پژوهش را نشان می دهد. همانگونه که از شکل مشخص است بوجود آمدن فشار شعاعی در ناحیه فلنج ورق باعث جریان یافتن راحت تر ورق می شود. از طرف دیگر، فشار سیال در زیر ورق، سطح تماس ورق و سنبه را افزایش داده و در نتیجه از ایجاد چروک در سطوح آزاد ورق در فاصله بین نوک سنبه و ورقگیر جلوگیری می کند. در شکل ۵ نقشه قطعه مورد تحقیق به همراه ابعاد آن نشان داده شده است.



شکل (۴): شماتیک مجموعه قالب هیدرودینامیکی استفاده شده.

¹⁻Khandeparkar

²⁻Lang

مسیر فشار BC مسیر فشار ثابتی است که فشار حداکثر اعمالی است و در طی آن سیال از شیر کنترل فشار تخلیه می گردید. مسیر فشار AB مسیر فشار خطی است که با تغییر در سرعت سنبه شیب آن قابل تغییر بود. ورق مورد آزمایش از جنس مس خالص به ضخامت ۲ میلیمتر و به قطر ۸۰ میلیمتر بوده است. شکل ۸ نمودار تنش-کرنش مربوط به ورق مسی را نشان می دهد که از آزمایش کشش بدست آمد. جنس سیال استفاده شده روغن ۸۰ SAE



شکل (۵): نقشه قطعه مخروطی، ابعاد به میلیمتر.

تمام آزمایشها با استفاده از یک دستگاه آزمایش اونيورسال DMG' با ظرفيت KN ٢٠٠ انجام شد. كليه حركات دستگاه توسط واحد كامپيوترى متصل به أن قابل کنترل می باشد. شکل ۶ مجموعه قالب استفاده شده را درحالت نصب شده بر روی دستگاه نشان می دهد. در حين انجام آزمايش ها با حركت سنبه به درون حفره ماتریس، فشار سیال افزایش می یافت و از این طریق فشار مورد نیاز برای شکل دهی تامین می گردید. با این وجود، جهت تامین فشار اولیه از یک واحد هیدرولیکی نیز استفاده شد. به منظور تنظیم حداکثر فشار، یک شیر کنترل فشار مورد استفاده قرار گرفت. برای بهبود بخشیدن به جریان فلز در حین فرآیند هیدروفرمینگ، ابتدا یک فشار اولیه محدودی در زیر ورق اعمال گردید. سپس همزمان با حرکت سنبه و افزایش فشار درون محفظه ماتریس، ورق به داخل ماتریس کشیده شد. پس از رسيدن فشار سيال به مقدار بيشينه، شير كنترل فشار باز گردید و از آن پس عملیات شکل دهی با فشار ثابت انجام گرفت. بدلیل استفاده از فرآیند هیدرودینامیکی در این پژوهش، آب بندی انجام شده بین ورقگیر و ماتریس از نوع فلز با فلز بوده و از هیچ اورینگی برای آب بندی استفاده نگردید. در نتیجه از فاصله بین ورقگیر و ماتریس سیال نشت مي كرد. از اين رو، امكان اعمال فشار اوليه بالا وجود نداشت. در مجموعه قالب این مقاله حداکثر فشار اولیه قابل اعمال ۲ MPa بود. شكل ۷ مسير فشار نمونه اعمالي در این پژوهش را نشان می دهد که در آن مسیر فشار OA، فشار اوليه MPa است كه بدون حركت سنبه اعمال می گردید.

¹⁻ Denison Mayes Group



شکل (۷): مسیر فشار نمونه اعمالی در آزمایش.



شکل (**۸**): نمودار تنش-کرنش مس خالص.

۳- شبیه سازی اجزای محدود

برای انجام شبیه سازی از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS 6.7 استفاده شد. در شبیهسازی، ماده همسانگرد فرض شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از این پژوهش، ملاحظه گردید که این فرض با دقت بالایی با نتایج آزمایشگاهی مطابقت دارد. شکل **۹** مجموعه قالب شبیهسازی شده را نشان می دهد. بدلیل تقارن محوری، از مدل های دو بعدی برای شبیه سازی قالب و ورق استفاده گردید. ورق بصورت دو بعدی شکل پذیر¹ و با المان مدل گردید که به دلیل انتخاب نوع مسئله تماس (صلب تحلیلی)، مش بندی نشده و تحلیل نیز نگردیدند. در مدل شبیه سازی از روش ABAQUS/Explicit جهت تحلیل استفاده شد. بر اساس مرجع [۱۴] مقدار ضریب اصطکاک در شبیه سازی برای سطح تماس سنبه با ورق برابر ۱/۱۴

- 1 Axisymmetric Deformable
- 2 Axisymmetric Rigid Analytical

۲۰۰ mm/min در نظر گرفته شد و از مدل مستقل از نرخ استفاده شده است. نـوع تمـاس بـین ورق و اجـزای قالـب سطح به سطح^۳ می باشد. نوع مدل ماده اسـتفاده شـده از نوع الاستوپلاسـتیک^۴ مـی باشـد. خـواص مکـانیکی ورق مسی که در شبیه سازی اعمال شد در جدول **۱** نشان داده شده است.



شکل (۹): مجموعه قالب شبیه سازی شده.

جدول (۱): خواص مکانیکی و فیزیکی ورق مسی.

معادله مشخصه،[MPa]	V 530.98 A ⁴⁴
مدول الاستيسيته، GPa	E = 117
چگالی، Kg/m ³	CE 8940
ضريب پوآسون	= 0.32

در این پژوهش معیار پارگی در شبیه سازی طبق مرجع [۱۶] مقدار بیشینه کرنش مؤثر در نظر گرفته شد. بر طبق این معیار، پارگی زمانی اتفاق می افتد که:

ē ns,

که در آن،

(1)

4- Elastoplastic

³⁻ Surface to Surface

s 1 R/
$$(1 2R)^{\frac{1}{2}}$$
. (Y)

در رابطه های بالا، Ē کرنش مؤثر، n نمای کرنش- سختی و R نسبت کرنش پلاستیک است. با توجه به فرض همسانگرد بودن ورق مسی، R = ۱. در نتیجه معیار پارگی به صورت زیرخواهد بود:

$$\overline{e} \quad \frac{2}{\sqrt{3}} n$$
 (°)

از طرفی، مطابق شکل ۸ و جدول ۱، نمای کرنش- سختی ورق مسی استفاده شده در این پژوهش برابر ۱/۴۴ می باشد. با جایگذاری این مقدار در رابطه (۳) معیار پارگی به صورت زیر بدست می آید:

$$\overline{\mathbf{e}} = 1.15 \,\mathrm{n} = 0.5.$$
 (*)

۴- نتایج و بحث

مسیر فشار نمونه اعمالی در این مقاله در شکل ۷ نشان داده شد و در بخش ۲ مورد بحث قرار گرفت. به ازای هر فشار بیشینه معین، یک فشار اولیه OA و یک مسیر فشار AB با شیب های متفاوت قابل تعریف بود. شیب مسیر فشار AB با تغییر در سرعت سنبه تعیین می گردد. از این مقار AB با تغییر در سرعت سنبه تعیین می گردد. از این رو، برای هر فشار حداکثر دلخواه، فرآیند شکل دهی قطعه محروطی در نرم افزار شبیه سازی گردید تا بتوان یک مسیر فشار مطلوب را بدست آورد. شکل ۱۰ مسیر فشار مطلوب را برای فشار حداکثر APM نشان می دهد که با شبیه سازی بدست آمده است. در ابتدا یک فشار اولیه با شبیه سازی بدست آمده است. در ابتدا یک فشار اولیه مرکت سنبه اندکی کشیده (بالچ) شود. در طی حرکت سنبه، فشار به تدریج افزایش یافته تا به فشار ماکزیمم مسیره، فشار به تدریج افزایش یافته تا به فشار ماکزیمم فشار تا انتهای عملیات شکل دادن ثابت ماند.

مقدار فشار نهایی نقش بسیار مهمی در ایجاد پارگی و توزیع ضخامت قطعات تولید شده ایفا می کند. جهت بررسی تاثیر آن بر کیفیت قطعه شکل داده شده، مسیرهای فشار مطلوب برای فشارهای نهایی متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. شکل **۱۱** مسیرهای فشار مطلوب را در

فشار های نهایی ۱۵ تا MPa ۶۰ نشان می دهد که با شبیه سازی بدست آمده است.



شکل (۱۰): مسیر فشار اعمالی مطلوب جهت شکل دهی قطعه مخروطی برای فشار نهایی P max=۳۰MPa.



شکل (۱۱): مسیرهای فشار مطلوب برای فشار های نهایی گوناگون P _{max} بدست آمده از شبیه سازی.



شکل (۱۲): ناحیه های مختلف مورد مطالعه در قطعه مخروطی.

برای بررسی دقیق تر توزیع ضخامت در نمونه های تولید شده، قطعه مخروطی مطابق شکل **۱۲** به نواحی مختلفی تقسیم شده و در ادامه به این نواحی ارجاع شده است.



شکل (۱۳): مسیر فشار متناظر با فشار نهایی ۱۰ MPa.



الف – قطعه توليد شده.



ب – نتیجه شبیه سازی.

شکل (۱۴): شکل دهی برای مسیر فشار نهایی NPa و ایجاد پارگی در قطعه در ناحیه B.

شکل **۱۳** مسیر فشار را برای فشار حداکثر **۱۳** م نشان می دهد. در شکل **۱۴** قطعه شکل داده شده متناظر با این مسیر فشار به همراه نتیجه به دست آمده از شبیه سازی نشان داده شده اند. همانطور که از شکل پیداست در ناحیه B در قطعه پارگی رخ داده است.

شکل **۵۱** مسیر فشار را برای فشار حداکثر MPa نشان می دهد. در شکل **۶۱** قطعه مخروطی شکل داده شده بر اساس این مسیر فشار همراه با نتیجه بدست آمده از شبیه سازی آمده است. برای شکل دهی ابتدا مطابق شکل **۵۱** یک فشار اولیه MPa ۲ در زیر قطعه اعمال گردید. سپس با حرکت سنبه فشار به تدریج افزایش یافته تا در فشار MPa ۱ با باز شدن شیر کنترل فشار، ثابت تا در فشار همانا این فشار در انتهای فرآیند سبب شکل شده است. اعمال این فشار در انتهای فرآیند سبب شکل ملاحظه می شود در ناحیه B قطعه تولید شده، (ناحیه تماس شعاع نوک سنبه با ورق) عیب نازک شدگی (گلویی شدن) رخ داده است.



شکل (۱۵): مسیر فشار مطلوب با فشار نهایی ۱۵ MPa.

شکل **۱۷** منحنی توزیع ضخامت قطعه شبیه سازی شده و تجربی را در امتداد A-E شکل **۱۲** نشان می دهد. همانگونه که در شکل ملاحظه می شود انطباق قابل قبولی بین دو منحنی برقرار است.



الف – قطعه توليد شده.



ب – نتیجه شبیه سازی.

شکل (۱۶): شکل دهی بر اساس مسیر با فشار نهایی ۱۵ MPa او ایجاد پدیده گلویی شدن در قطعه.



شکل (۱۷): مقایسه توزیع ضخامت قطعه مخروطی تولید شده و شبیه سازی برای فشار نهایی ۱۵ MPa، ضخامت اولیه ورق mm ۲.

شکل ۸۸ مسیر فشار را برای فشار حداکثر ۳۰MPa نشان می دهد. در شکل ۱۹ قطعه مخروطی شبیه سازی شده و تجربی بر اساس این مسیر فشار نـشان داده شـده اسـت.

مشابه حالت قبل ابتدا یک فشار اولیه MPa در زیر ورق اعمال گردید تا قطعه در خلاف جهت حرکت سنبه اندکی کشیده (بالج) شود. در طی حرکت سنبه، فشار به تدریج افزایش یافته تا به مقدار حداکثر ۳۰MPa برسد. اعمال این فشار در مرحله پایانی سبب شکل گیری کامل قطعه بدون عیب نازک شدگی (گلویی شدن) و ایجاد شکل هندسی دقیق شد.



شکل (۱۸): مسیر فشار مطلوب مربوط به فشار نهایی ۳۰۰MPa.



الف – قطعه توليد شده.



ب– نتیجه شبیه سازی.

شکل (۱۹): شکل دهی بر اساس مسیر با فشار نهایی ۳۰MPa و تولید قطعه مطلوب.

A-E شکل ۲۰ نمودارهای توزیع ضخامت قطعه را در مسیر A-E شکل ۱۲ برای فشار نهایی ۳۰MPa نشان می دهد. همانگونه که در شکل مشاهده می شود نتایج توزیع ضخامت در حالت تجربی و شبیه سازی به هم نزدیک بوده و انطباق قابل قبولی دارد.



شکل (۲۰): منحنی های توزیع ضخامت قطعه مخروطی برای مسیر فشار نهایی ۳۰MPa، ضخامت اولیه ورق mm ۲.

شکل ۲۱ منحنی توزیع ضخامت حاصل از شبیه سازی را برای فشارهای نهایی متفاوت نشان می دهد. همانطور که از شکل پیداست بیشترین کاهش ضخامت مربوط به ناحیه های B و D است و ناحیه بحرانی نیز ناحیه B می باشدکه در نتایج قبلی هم این موضوع نشان داده شد. از شکل واضح است که افزایش فشار از ۱۵ تا ۳۰ MPa تاثیر زیادی بر جلوگیری از کاهش ضخامت در نقاط مختلف قطعه بویژه در منطقه بحرانی B دارد، در حالی که با افزایش فشار از ۳۰ MPa تغییر چندانی بر کاهش ضخامت دیده نمی شود.

برای تعیین مناسبترین مسیر فشار شکل دهی جهت حصول قطعه با بهترین توزیع ضخامت، منحنی های تغییرات کاهش ضخامت نواحی B و D در فشار های مختلف مورد مقایسه قرار گرفتند. شکل ۲۲ منحنی تغییرات کاهش ضخامت قطعه شکل داده شده را در ناحیه B بر حسب فشار نهایی سیال نشان می دهد. همانطور که از شکل پیداست بیشترین کاهش ضخامت مربوط به مسیر

شکل (۲۱): توزیع ضخامت حاصل از شبیه سازی برای فشار نهایی مختلف، ضخامت اولیه ورق ۲ mm.

فشار نهایی MPa **۵** می باشد. همانطور که در شکل **۱۶** نشان داده شد، در این فشار در ناحیه B قطعه، نازک شدگی رخ داده است. از شکل پیداست که با افزایش فشار حداکثر به حدود ۳۰MPa کاهش ضخامت با شیب تندی کاهش می یابد. از فشار حداکثر حدود ۳۰MPa و بیشتر از آن این شیب به صورت تقریباً افقی در می آید. بنا براین افزایش فشار حداکثر به بیش از MPa بر ضخامت قطعه در ناحیه B



شکل (۲۲): منحنی تغییرات کاهش ضخامت ناحیه B در فشار های مختلف نهایی.

شکل **۲۳** منحنی تغییرات کاهش ضخامت قطعه شکل داده شده را در ناحیه D بر حسب فشار نهایی سیال نشان می دهد. همانطور که از شکل پیداست کمترین کاهش ضخامت مربوط به فشار حداکثر MPa ۵۱می باشد. با افزایش فشار حداکثر تا ۳۰MPa کاهش ضخامت با شیب تندی افزایش می یابد. از فشار حداکثر حدود ۳۰MPa و بیشتر از آن این شیب تقریباً به صورت افقی در می آید.

شکل (۲۳): منحنی تغییرات کاهش ضخامت ناحیه D در فشار های مختلف نهایی.

بنا براین افزایش فشار حداکثر به بیش از ۳۰MPa بر ضخامت قطعه در ناحیه D تاثیر مثبتی ندارد.

با ملاحظه مباحث مذکور این نتیجه گیری حاصل شده است که برای قطعه مورد نظر و شرایط موجود، مسیر فشار مربوط به فشار نهایی ۳۰MPa مناسب ترین مسیر برای دستیابی به بهترین توزیع ضخامت قطعه می باشد.

نمودار نیرو برحسب جابجایی سنبه برای شکل دهی قطعه مخروطی مطلوب در شکل ۲۴ برای حالت های شبیه سازی و تجربی نشان داده شده است. همانطور که از شکل پیداست بین نمودار های دو حالت هماهنگی قابل قبولی وجود دارد. حداکثر نیرو برای شکل دهی این قطعه حدود ۱۰۰KN است که مقدار زیادی نمی باشد.



شکل (۲۴): نمودار نیرو _جابجایی سنبه.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله چگونگی شکل دهی یک قطعه مخروطی از جنس ورق مسی در فرآیند هیدروفرمینگ به روش هیدرودینامیکی با فشار شعاعی به صورت شبیه سازی و تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. جهت تعیین فشار مناسب، مسیر های مختلف فشار با شبیه سازی بررسی گردید و اثر آنها بر پارگی و توزیع ضخامت قطعه مورد مطالعه قرار گرفت. مشاهده شد که در فشار پایین تر از MPa ١۵عملیات شکل دھی شبیہ فرآیند کشش عمیق معمولی عمل کرده و به دلیل ایجاد تنش زیاد در ناحیه تماس نوک سنبه با ورق، پارگی در آن ناحیه ایجاد می گردد. در فشار MPa ا۵ و بالا تر از آن قطعه شکل می گیرد ولی توزیع ضخامت در قطعه شکل گرفته شده در فشار های مختلف متفاوت بوده است. با بررسی توزیع ضخامت در فشار های متفاوت مشاهده شد که در فشار ۳۰MPa کیفیت قطعه مطلوب بوده و افزایش بیشتر فشار تاثیری بر بهبود توزيع ضخامت قطعه ندارد. همچنين مشاهده شد که اعمال یک فشار پیش کشش ۲ MPa در ابتدای فرآیند تاثیر مثبتی بر شکل دهی مطلوب محصول دارد. هم بطور تجربی و هم با شبیه سازی نشان داده شد که استفاده از مسير فشار مناسب موجب افزايش عمق كشش و حصول قطعه ای مطلوب با صافی سطح مناسب در یک مرحله می گر دد.

مراجع

- 1. Thiruvarudchelvan, S. and Travis, F.W., "Hydraulic-Pressure-Enhanced Cup-Drawing Processes-An Appraisal", J. Material Process Tech., Vol. 140, No. 1, pp. 70-75, 2003.
- Zhang, S.H., Wang, Z.R., Xu, Y., Wang, Z.T., and Zhou, L.X., "Recent Developments in Sheet Hydroforming Technology", J. Material Process Tech., Vol. 151, No. 3, pp. 237-241, 2004.
- 3. 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. Material Process Tech., Vol. 148, No. 1, pp. 119-131, 2004.
- 4. Lang, L., Danckert, J., and Nielsen, K.B., "Investigation into Hydrodynamic Deep Dawing

Sheet Hydroforming, Using Poor-formability Materials'', J. Material Process Tech., Vol. 201, No. 1, pp. 97-100, 2008.

- 16. Wu, J., Balendra, R., and Qin, Y., "A Study on the Forming Limits of the Hydromechanical Deep Drawing of Components with Stepped Geometries", J. Material Process Tech., Vol. 145, No. 4, pp. 242–246, 2004.
- 17. Thiruvarudchelvan, S. and Travis, F.W., "Hydraulic-Pressure-Enhanced Cup-Drawing Processes-An Appraisal", J. Material Process Tech., Vol. 140, No. 1, pp. 70-75, 2003.

Asisted by Rdial Pessure Part II. Numerical Aalysis of the Drawing Mechanism and the Process Parameters'', J. Mater. Process Tech., Vol. 166, No. 1, pp. 150-161, 2005.

- Kawka, M., Olejnik, L., Rosochowski, A., Sunaga, H., and Makinouchi, A., "Simulation of Wrinkling in Sheet Metal Forming", J. Material Process Tech., Vol. 109, No. 2, pp. 283-289, 2001.
- 6. Thiruvarudchelvan, S. and Gan, J.G., "Drawing of Conical Cup with Friction Actuated Blank Holding", J. Material Shaping Tech., Vol. 9, No. 1, pp. 59-65, 1991.
- Thiruvarudchelvan, S. and Tan, M.J., "The Drawing of Conical Cups, Using an Annular Urethane Pad", J. Material Process Tech., Vol. 147, No. 1, pp. 163-166, 2004.
- Sheng, Z.Q., Jirathearanat, S., and Altan, T., "Adaptive FEM Simulation for Prediction of Variable Blank Holder Force in Conical Cup Drawing", Int. J. Machine Tools & Manufacture, Vol. 44, No. 2, pp. 487-494, 2004.
- 9. Wong, C.C., Dean, T.A., and Lin, J., "A Review of Spinning, Shear Forming and Flow Forming Processes", Int. J. Machine Tools & Manufacture, Vol. 43, No. 1, pp. 1419-1435, 2003.

úù. اسماعیل آبادی، مریم.، "بررسی پارامتر های موًثر در شکلدهی

لیاقت، غ.، درویزه، ا.، جواب ور، د. و عبدا..، ا.، "تحلیل فرآیند

شکل دهی انفجاری مخروط، مقایسه نتایج تجربی و شبیه سازی اجزای محدود"، مجله امیر کبیر، سال سیزدهم، شماره ۵۰، ص.ص. ۲۵۰ -۲۵۴، ۱۳۸۱.

- 12. Liu, X., Xu, Y., and Yuan, Sh., "Effects of Loading Paths on Hydrodynamic Deep Drawing with Independent Radial Hydraulic Pressure of Aluminum Alloy Based on Numerical Simulation", J. Material Sci. Tech., Vol. 24, No.3, pp. 395-399, 2008.
- 13. Lang, L., Danckert, J., and Nielsen, K.B. "Investigation into the Effect of Pre-bulging During Hydromechanical Deep Drawing with Uniform Pressure onto the Blank", Int. J. Machine Tools & Manufacture, Vol. 44, No. 1, pp. 649-657, 2004.
- 14. Khandeparkar, T. and Liewald, M., "Hydromechanical Deep Drawing of Cups with Stepped Geometries", J. Material Process Tech., Vol. 202, No. 2, pp. 246-254, 2008.
- 15. Lang, L., Gu, G., Li, T., and Zhou, X., "Numerical and Experimental Confirmation of the Calibration Stage's Effect in Multi-operation