



بررسی تجربی و شبیه سازی پارامترهای مؤثر در شکل دهی قطعات دو پله ای و بهینه سازی ابعاد ورق اولیه

رضا موسوی پور¹، عبدالحمید گرجی^{2*}، محمد بخشی³، قربان محمد علی نژاد⁴

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

4- مربی، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

* بابل، صندوق پستی 47148-71167، hamidgorji@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 12 آذر 1393

پذیرش: 11 بهمن 1393

ارائه در سایت: 06 اسفند 1393

کلید واژگان:

هیدروفورمینگ ورق

محفظه روغن خودرو

قطعات دو پله ای

هیدروپدینامیکی فشار شعاعی

بهینه سازی

چکیده

تولید قطعات ورق فلزی دو پله‌ای در صنایع امری دشوار و پیچیده تلقی می‌شود. محفظه روغن خودرو از جمله قطعات دو پله‌ای است که در صنعت خودروسازی جز، قطعات پیچیده محسوب می‌شود که تولید آن با روش‌های سنتی با مشکلات زیادی همراه می‌باشد. در این مقاله، قابلیت شکل‌پذیری این قطعات به روش کشش عمیق هیدروپدینامیکی با فشار شعاعی به صورت تجربی و شبیه‌سازی مورد مطالعه قرار گرفت. نشان داده شده است که می‌توان محفظه روغن خودرو را در طی یک مرحله توسط فرآیند هیدروفورمینگ با موفقیت شکل داد. بعلاوه، اثر فشار شکل‌دهی بر روی توزیع ضخامت و پرشدگی قالب، تاثیر پارامترهای هندسی مانند شعاع گوشه سنبه و ارتفاع پله بر روی نازک‌شدگی و نیز تعیین شکل بهینه ورق اولیه در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت. این نتیجه حاصل شد که با انتخاب فشار شکل‌دهی مناسب می‌توان شکل‌پذیری را بهبود بخشید و میزان پرشدگی قالب را افزایش داد. با بررسی تاثیر شعاع گوشه سنبه مشاهده شد که با افزایش شعاع گوشه سنبه، حداکثر نازک‌شدگی کاهش و توزیع ضخامت بهبود می‌یابد. با افزایش ارتفاع پله، نازک‌شدگی در ناحیه دیواره پله اول و شعاع گوشه سنبه افزایش می‌یابد و هر چه ارتفاع پله کاهش داده شود، موفقیت نازک‌شدگی به سمت پله دوم جابه‌جا می‌شود. همچنین با بهینه‌سازی ورق اولیه این نتیجه حاصل شد که بهینه‌سازی شکل ورق اولیه تاثیر زیادی بر روی جریان مواد و تاخیر در پارگی خواهد داشت.

Experimental and Numerical Study of Effective Parameters in Forming of Double-Stepped Parts and Optimization of the Initial Blank Shape

Reza Mousavipoor, Abdolhamid Gorji*, Mohammad Bakhshi, Ghorban Mohammad Alinejad

Department of Mechanical Engineering, Babol University of Technology, Babol, Iran

* P.O.B. 47148-71167 Babol, Iran, hamidgorji@nit.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 03 December 2014

Accepted 31 January 2015

Available Online 25 February 2015

Keywords:

Sheet hydroforming

Crankcase

double-stepped parts

hydrodynamic radial pressure

optimization

ABSTRACT

Production of double-stepped metal sheet parts is considered a complex and difficult task in industries. The crankcase is such a complex double-stepped part for the automobile industry and its production with traditional methods is associated with many problems. In this paper, the formability of this stepped part has been studied experimentally and by simulation using hydrodynamic deep-drawing with radial pressure. It is shown that the crankcase can be formed successfully in one step by the hydroforming process. Moreover, the effect of fluid pressure on the thickness distribution and die filling and the effect of geometric parameters such as punch corner radius and the height of the steps on the thinning, and also optimal shape design of the original blank were investigated. The study showed that choosing the correct forming pressure can improve formability and increase the amount of die filling. It is also illustrated that by increasing the punch corner radius, the maximum thinning is reduced and the thickness distribution is improved and, by increasing the height of the steps, thinning in the wall of the first step and the punch corner radius increase; by decreasing the height of the steps, thinning position will be shifted toward the second step. Also, by optimizing the original blank, it has been concluded that the optimization of the shape of original blank has a major impact on the material flow and will delay the sheet rupture.

1- مقدمه

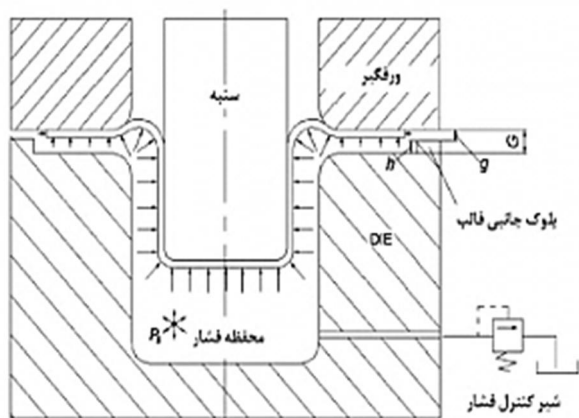
چروکیدگی و یا پارگی، اطلاق می‌شود [1]. در فرآیند کشش عمیق، یک ورق گیر لبه ورق را به ماتریس فشار داده و آن را محکم نگه می‌دارد. همزمان با آن، سنبه کشش، ورق را به داخل ماتریس کشانده و یک قطعه توخالی بوجود

کشش عمیق به فرآیند تبدیل گرده فلزی اولیه (بلانک) به حجم‌های توخالی و یا به فرآیند تبدیل گرده به شکلی مرتفع در جهت عمق، بدون هرگونه

Please cite this article using:

R. Mousavipoor, A. Gorji, M. Bakhshi, Gh. M. Alinejad, Experimental and Numerical Study of Effective Parameters in Forming of Double-Stepped Parts and Optimization of the Initial Blank Shape, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 177-187, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:



شکل 1 شماتیک فرآیند کشش عمیق هیدروپنمایی با فشار شعاعی [3]

در زمینه هیدروفرمینگ قطعات پله ای (دوپله) تحقیقات محدودی انجام گرفته است. کیم و همکاران [5] شکل دهی یک قطعه مستطیلی پله ای را در فرآیند هیدروفرمینگ چند مرحله ای به صورت تجربی و شبیه سازی مورد بررسی قرار دادند. این محققان در ابتدا قطعه را در سه مرحله شبیه سازی کرده و شکل پذیری قطعه را مورد آزمایش قرار دادند. با انجام آزمایش، به این نتیجه رسیدند که با بکارگیری روش هیدروفرمینگ سه مرحله ای، نازک شدگی در نواحی بحرانی کاهش می یابد. در ادامه، شکل دهی تک مرحله ای قطعه مذکور را بررسی و مشاهده کردند که با توجه به پیچیدگی هندسه تعریف شده، بدلیل نازک شدگی شدید در ناحیه شعاع سنبه، قطعه دچار پارگی خواهد شد. همچنین آنان به این نتیجه رسیدند که با استفاده از فرآیند هیدروفرمینگ سه مرحله ای، حداکثر نازک شدگی در نواحی بحرانی به مقدار 6 درصد کاهش می یابد.

نو و همکاران [6] شکل دهی یک فنجان پله ای (دوپله) را در فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی به صورت تجربی و شبیه سازی مورد بررسی قرار دادند. این محققان شکل پذیری قطعه را در ارتفاع های پله 20، 10 و 40 میلی متر در فشارهای مختلف مورد بررسی قرار دادند. آن ها به این نتیجه رسیدند که در فشار بیشینه 25 مگاپاسکال، با افزایش ارتفاع پله به اندازه 40 میلی متر، قطعه دچار پارگی می شود. اما در فشار بین 25 تا 46 مگاپاسکال، بدلیل افزایش سطح تماس بین ورق و سنبه، قطعه با موفقیت و بدون پارگی شکل می گیرد. این محققان با بررسی تاثیر ارتفاع پله بر روی توزیع ضخامت دریافتند که در ارتفاع پله 10 و 20 میلی متر، تغییرات نازک شدگی مانند یک فنجان ساده (بدون پله) می باشد و حداکثر نازک شدگی در ناحیه شعاع فصل مشترک پله ایجاد می شود. اما با افزایش ارتفاع تا 40 میلی متر، حداکثر نازک شدگی در ناحیه شعاع و دیواره پله اول (پله پایینی) رخ می دهد.

کوبن و همکاران [7] یک بررسی عددی از پارامترهای طراحی در فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیکی برای فنجان پله ای (دوپله) انجام دادند. این محققان در شبیه سازی عددی، در ابتدا شکل پذیری ورق را برای پرشدگی کامل، مطابق با هندسه تعریف شده مورد بررسی قرار دادند. آنان دریافتند که در طی شکل دهی فنجان پله ای، به منظور شکل گیری کامل ورق، فشار بیشینه باید در ناحیه فصل مشترک بین پله ها اعمال گردد تا ورق شکل کامل سنبه را در این ناحیه به خود بگیرد. این محققان با بررسی توزیع ضخامت نمونه در مسیر فشارهای مختلف به این نتیجه رسیدند که بیشترین نازک شدگی در یک ارتفاع پله مشخص، در ناحیه شعاع سنبه و در فصل مشترک پله اول و دوم اتفاق می افتد.

می آید. فرآیند هیدروفرمینگ ورق از فرآیندهای متداول کشش ورق بوده که قبل از جنگ جهانی دوم مورد استفاده قرار گرفته است. این روش در تولید قطعات خودرو و بدنه هواپیما در سال 1980 مورد استفاده قرار گرفت [2]. در فرآیند کشش عمیق هیدروفرمینگ از فشار سیال برای شکل دهی ورق استفاده می شود. در این فرآیند، همزمان با حرکت سنبه به داخل حفره قالب، سیال در حفره قالب فشرده شده و به ورق نیرو وارد می کند. در اثر نیروی وارد شده، ورق شکل سنبه را به خود می گیرد.

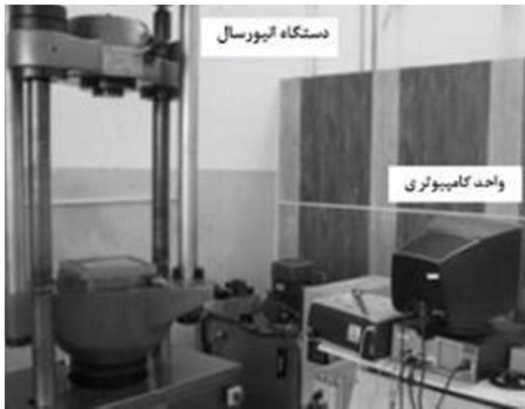
فرآیند کشش عمیق هیدروپنمایی با فشار شعاعی یکی از انواع فرآیندهای هیدروفرمینگ است که دارای مزایای زیادی از جمله استفاده از ابزاربندی ساده تر، عدم نیاز به آب بند و افزایش در میزان شکل پذیری ورق است. شکل 1 شماتیک فرآیند کشش عمیق هیدروپنمایی با فشار شعاعی را نشان می دهد [3]. در این فرآیند وقتی سنبه به سمت پایین (حفره قالب) حرکت می کند، مایع در حفره قالب فشرده شده و ورق را محکم به سطح سنبه می چسباند. با توجه به عدم استفاده از آب بند مقداری از مایع در حفره قالب از فاصله بین ورق گیر و قالب به صورت دینامیکی به بیرون می ریزد. چون لقی بین ماتریس و ورق گیر (گپ¹) خیلی کوچک است، مایع کمی از این فاصله به خارج جریان یافته در نتیجه از طرف سیال بر لبه ورق فشار اعمال می شود. فشار شعاعی در این فرآیند می تواند نیروی کشش را کاهش و نسبت کشش را افزایش دهد [4]. از مزایای دیگر این فرآیند می توان به شکل دهی قطعات پیچیده، کیفیت سطح خوب، نسبت کشش بیشتر و دقت ابعادی بالا اشاره کرد [4]. در این پژوهش با توجه به مزایای زیاد فرآیند هیدروفرمینگ هیدروپنمایی با فشار شعاعی، برای شکل دهی قطعه دوپله استفاده شده است.

قطعات ورقی پله ای² از جمله قطعات پیچیده هستند که توسط فرآیند های شکل دهی تولید می شوند. این گونه قطعات دارای کاربرد گسترده ای در صنایع مختلف بخصوص صنعت خودروسازی می باشند. از جمله کاربردهای این قطعات می توان به محفظه روغن خودرو (کارتز) و در مواردی باک بنزین اشاره نمود. در تولید این گونه قطعات از روش های متداول سنتی همانند استمپینگ³ استفاده می شود. در تولید به روش سنتی، بدلیل پیچیدگی هندسه، دستیابی به توزیع ضخامت یکنواخت و کیفیت بالای تولید، امری بسیار دشوار می باشد. تولید قطعه با این روش ها نیاز به چندین مرحله شکل دهی می باشد. با استفاده از روش های جدید در تولید این گونه قطعات ورقی، توزیع ضخامت یکنواخت تر و کیفیت بالاتر قابل دستیابی است.

در قطعات پله ای با توجه به پیچیده بودن هندسه و اختلاف اندازه در طول و عرض، شکل دهی یک قطعه سالم با پرشدگی کامل در گوشه ها، مشکل می باشد و سبب تمایز آن با انواع دیگر قطعات ورقی می شود. در این مقاله به بررسی امکان شکل گیری قطعات مستطیلی دوپله پرداخته می شود. تعریف هندسه مستطیلی، شکل گیری و پرشدگی قالب در گوشه ها را دشوار می سازد.

در تحقیقات قبلی انجام شده در این زمینه توسط محققان [5]، قطعه دو پله تعریف شده، با استفاده از روش هیدروفرمینگ در طی سه مرحله با موفقیت شکل گرفت، اما محققان موفق به شکل دهی کامل قطعه در یک مرحله توسط فرآیند هیدروفرمینگ نشده اند. در این تحقیق به بررسی شکل پذیری کامل قطعه در طی یک مرحله پرداخته می شود.

1- Gap
2- Stepped sheet parts
3- Stamping



شکل 3 دستگاه آزمایش انیورسال و سیستم کامپیوتری متصل به آن

است. با توجه به مقدار ناچیز بدست آمده برای ضریب ناهمسانگردی، ورق به صورت همسانگرد در نظر گرفته شده است. در شکل 4 نمودار تنش- کرنش حقیقی ورق مورد استفاده نشان داده شده است.

به منظور بررسی شکل پذیری قطعات پله ای، از مسیر فشار نشان داده شده در شکل 5 استفاده شده است. با توجه به نمودار نشان داده شده در شکل، بخش OA فشار پیش بکشه ای است که توسط واحد هیدرولیک ایجاد می شود، AB مسیر فشار تا رسیدن به حداکثر فشار و BC مسیر فشار ثابت را نشان می دهد. در این مسیر شیر کنترل فشار باز شده و سیال از طریق آن خارج می شود. شیب خط AB با سرعت سنبه، شکل سنبه، نوع سیال و ضخامت ورق مربوط می شود.

در این مقاله، دو هندسه از قطعات پله ای مورد مطالعه قرار گرفت. شماتیک این دو قطعه در شکل 6 نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشاهده می شود در قطعه (الف)، ارتفاع پله در وسط زیاد و در کناره های قطعه، پله کوتاه تر ایجاد شده است. این قطعه از این پس قطعه وسط پله نامیده می شود. به منظور بررسی یک قطعه با هندسه دو پله که دارای کاربرد صنعتی باشد، محفظه روغن خودرو (کارتز) بعنوان هندسه دوم انتخاب گردید. در شکل (ب) هندسه محفظه روغن خودرو نشان داده شده است، پله سمت راست دارای ارتفاع بیشتری است که در ادامه قطعه کنار پله نامیده می شود. در این شکل دو قطعه مورد نظر به منظور بررسی دقیق تر ناحیه بندی شده و ابعاد هر قطعه نیز بر روی آن نشان داده شده است.

3- شبیه سازی اجزای محدود

در این پژوهش از نرم افزار اجزای محدود آباکوس نسخه 6.10.1 برای شبیه سازی فرآیند استفاده شده است. در شبیه سازی با توجه به متقارن بودن هندسه قطعه ها نسبت به محور طولی، فقط یک دوم مجموعه قالب و ورق مدل شده است. از آنجایی که قالب به صورت صلب مدل شد، خواص مکانیکی

جدول 1 خواص مکانیکی و فیزیکی ورق فولادی st13

مشخصه	مقدار
استحکام تسلیم (MPa)	116
چگالی (kg/m^3)	7750
مدول الاستیسیته (GPa)	210
ضریب پواسون	0/33
توان کرنش سختی (n)	0/44
ناهمسانگردی (جهت نود درجه)	1/04
ناهمسانگردی (جهت صفر درجه)	1

1- ABAQUS 6.10.1

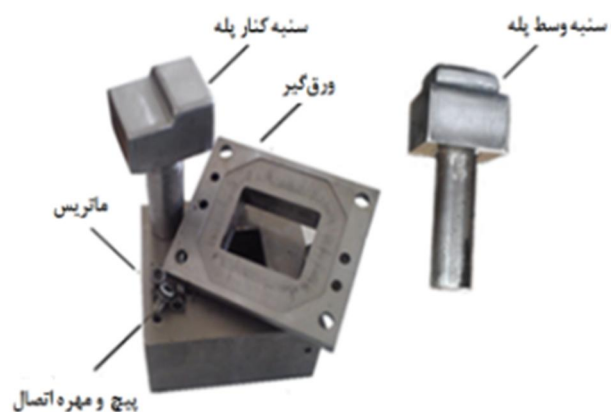
کانگ و همکاران [8] یک مطالعه مقایسه ای از فرآیندهای هیدروفرمینگ و استمپینگ برای شکل دهی مخزن سوخت خودرو با استفاده از تحلیل المان محدود انجام دادند. این محققان علاوه بر مقایسه فرآیند هیدروفرمینگ و استمپینگ، به بررسی تأثیر فشار شکل دهی بر روی پرشدگی قالب و توزیع ضخامت پرداختند. آن ها دریافتند که با افزایش فشار شکل دهی، بدلیل چسبندگی بیشتر ورق به سنبه، میزان پرشدگی قالب در گوشه ها افزایش می یابد. همچنین با بررسی نازک شدگی در نواحی مختلف قطعه شکل گرفته به این نتیجه رسیدند که با افزایش فشار شکل دهی، نازک شدگی در نواحی بحرانی کاهش می یابد. همچنین با مقایسه فرآیند استمپینگ و هیدروفرمینگ نشان داده شد که با به کارگیری فرآیند هیدروفرمینگ، نازک شدگی به میزان 12 درصد کاهش می یابد.

شیم و همکاران [9] از روش آنالیز حساسیت برای بهینه سازی شکل ورق اولیه استفاده نمودند. محققین یاد شده جهت بررسی روش ارایه شده، بهینه سازی ابعاد ورق اولیه را در قطعات با سطح مقطع مربعی، شبدر مانند و با شکل مورد بررسی قرار دادند. آنان دریافتند که با توجه به هندسه قطعات تعریف شده، در طی چند مرحله می توان بهینه سازی ابعاد ورق اولیه را انجام داد.

2- مراحل آزمایشگاهی

مجموعه قالب استفاده شده در این تحقیق، از سنبه، ماتریس و ورق گیر تشکیل شده است. شکل 2 مجموعه قالب استفاده شده را نشان می دهد. در مراحل ساخت قالب، به منظور افزایش دقت همراستایی سنبه و ورق گیر، از راهنما استفاده شده که بر روی ورق گیر نصب شده است. در شکل 3 دستگاه انیورسال و سیستم کامپیوتری متصل به آن نشان داده شده است. کلیه حرکات و تنظیمات این دستگاه دارای قابلیت کنترل با کامپیوتر بوده و سرعت آن تا 200 mm.min^{-1} قابل تغییر می باشد. آزمایش ها در سرعت 150 m.min^{-1} انجام شده است. برای تامین فشار اولیه از یک واحد هیدرولیکی استفاده گردیده است که قابلیت اعمال فشار تا حداکثر 50 مگاپاسکال را دارد.

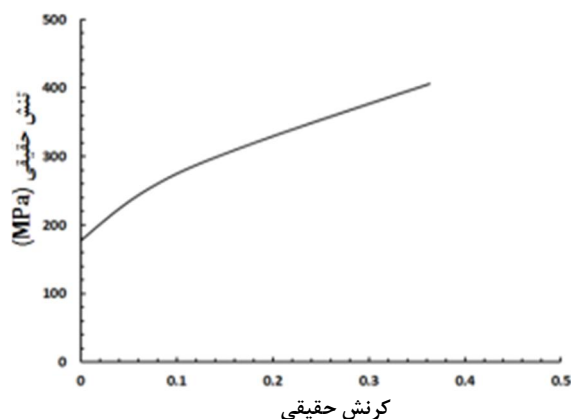
ورق استفاده شده از جنس فولاد st13 می باشد که مشخصات و خواص آن در جدول 1 آمده است. به منظور آزادسازی تنش های پسماند، یکنواختی ساختار و افزایش شکل پذیری، عملیات آنیل کاری بر روی ورق اولیه انجام شد. برای انجام این عملیات، با توجه به جنس مورد نظر برای ورق، دمای استنیتته 700 درجه سانتی گراد و مدت زمان نگهداری 30 دقیقه در نظر گرفته شده



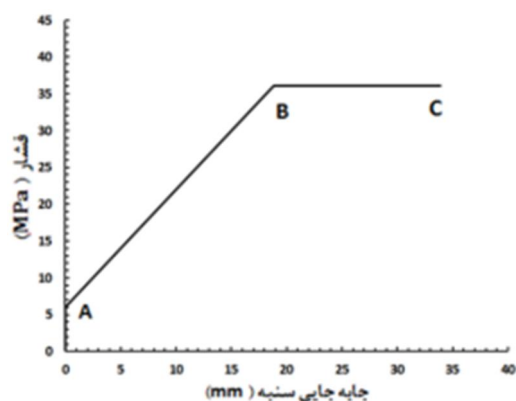
شکل 2 مجموعه قالب استفاده شده در آزمایش ها

در نظر گرفته شده است. برای تعریف تماس اجزا از تماس سطح به سطح³ و قید تماسی بین سطوح در تماس با یکدیگر، از نوع قید جنبشی⁴ تعریف شد. برای بیان رفتار اصطکاکی، از مدل اصطکاکی کولمب⁵ و شرایط تماسی پنالتی⁶ برای سطوح استفاده شده است. شکل 7 مدل مونتاژ قالب‌های شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. در جدول 2 مشخصات ابعادی قالب مورد استفاده برای قطعه وسط پله و قطعه کنار پله نشان داده شده است.

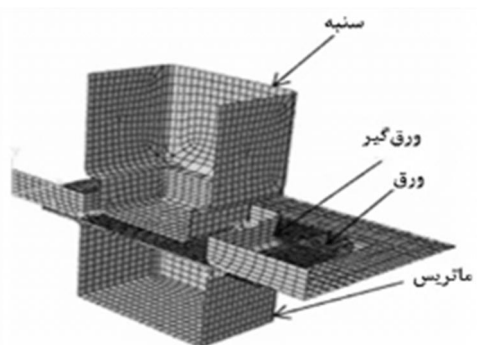
بر اساس مرجع [10]، ضریب اصطکاک بین سنبه و ورق 0/15 در نظر گرفته شده است. در آغاز شکل‌دهی، به دلیل اعمال سیال به زیر ورق، ورق با ورق گیر تماس داشته و با ادامه شکل‌دهی، با حرکت سنبه به سمت پایین، ورق با ناحیه شعاع ورودی محفظه و دیواره قالب در تماس قرار می‌گیرد. در



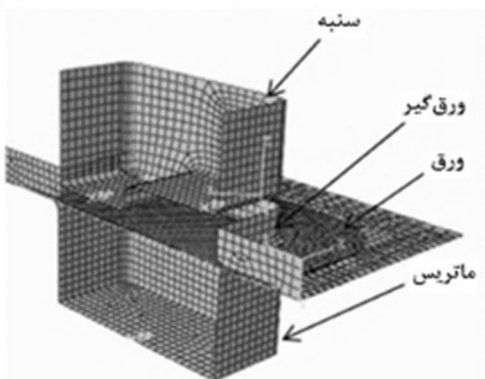
شکل 4 نمودار تنش - کرنش حقیقی حاصل از آزمایش کشش



شکل 5 مسیر فشار مورد استفاده در آزمایش‌ها و شبیه‌سازی



الف

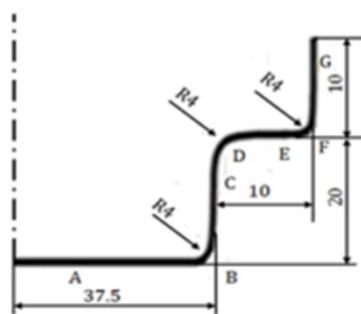


ب

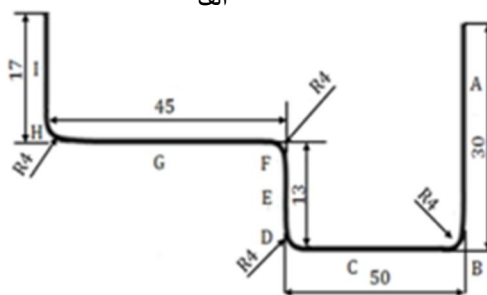
شکل 7 مدل مونتاژ شده و نحوه مش‌بندی اجزا در شبیه‌سازی فرآیند هیدروفرمینگ الف - قطعه وسط پله، ب - قطعه کنار پله

جدول 2 مشخصات ابعادی قالب مورد استفاده برای قطعه وسط پله و قطعه کنار پله

مقدار	مشخصه
95×75	ابعاد سنبه (قطعه وسط پله و کنار پله)
75×55	ابعاد سنبه پله دوم (قطعه وسط پله)
75×50	ابعاد سنبه پله دوم (قطعه کنار پله)
98/4×78/4	ابعاد ماتریس
4	شعاع ماتریس
0/25	لقی بین ورق گیر و ماتریس
1/75	فاصله گپ



الف



ب

شکل 6 ناحیه‌بندی قطعات دو پله، الف) قطعه وسط پله، ب) قطعه کنار پله (محفظه روغن خودرو)

به آن نسبت داده نشد. به منظور بررسی چروکیدگی و اعمال فشار شعاعی به لبه ورق، ورق به صورت شکل‌پذیر¹ و مجموعه قالب به صورت صلب گسسته²

1- Deformable

2- Discrete rigid
3- Surface to Surface
4- Kinematic Contact method
5- Colomb
6- penalty

موقعیت آن نقطه مادی قبل از تغییر شکل X باید به منظور ایجاد منحنی شکل یافته منطبق با منحنی هدف XT انتقال یابد. انتقال X ، یعنی تغییر شکل ورق اولیه، با معرفی مفهوم حساسیت شکل صورت می گیرد.

حساسیت شکل به صورت عددی با در نظر گرفتن دو ورق، یعنی ورق اصلی و ورق آفست یافته، بدست می آید. بردار موقعیت نقاط مادی بر روی منحنی ورق آفست یافته، از اطلاعات تجزیه و تحلیل تغییر شکل با ورق اولیه تعریف شده توسط X به صورت معادله (6) تعیین می شود [11]

$$X_{\delta} = X + \delta N \quad (6)$$

که در آن X_{δ} نشان دهنده بردار موقعیت یک نقطه مادی واقع در خارجی ترین گره ورق آفست یافته قبل از تغییر شکل، N بردار واحد درجهت تغییر شکل در مرحله اول و δ مقدار آفست است. با ورق آفست یافته تعریف شده توسط X_{δ} ، تجزیه و تحلیل فرآیند تغییر شکل برای به دست آوردن X_{δ} بردار موقعیت نقاط مادی تغییر شکل یافته با X_{δ} مجدداً صورت می گیرد. حساسیت به تغییر شکل در هر گره به صورت معادله (7) تعریف می شود.

$$S = \frac{|X_{\delta} - X|}{|X_{\delta} - x|} \quad (7)$$

تا زمانی که X بر روی منحنی هدف منطبق شود، موقعیت اولیه هر گره بر طبق معادله (8) انتقال می یابد [11].

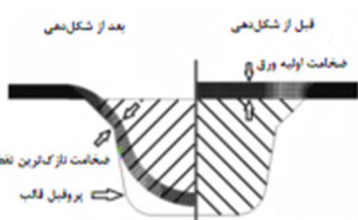
$$X^i = X^{i-1} - \varepsilon SN \quad (8)$$

در معادله (8)، ε خطای انحراف از منحنی هدف بوده و با فاصله بین X و X تعریف می شود. N بردار واحد در جهت تغییر شکل در حالت اولیه است و بالا نویسی i نیز به معنی تعداد تکرارها می باشد. در این بررسی تعداد 60 گره با فاصله مساوی در محیط ورق مشخص شده (تعداد گره ها در محیط ورق 120 گره بوده) و کلیه محاسبات در نرم افزار اکسل صورت گرفته است. در نهایت منحنی جدید ورق بهینه شده با توجه به مختصات بدست آمده، به کمک نرم افزار رسم شده و مجدداً به نرم افزار آباکوس ارسال گردید. پس از اصلاح شکل ورق، تجزیه و تحلیل فرآیند تغییر شکل تا رسیدن مقدار خطای انحراف از منحنی هدف، ε ، به مقدار تعیین شده در هر گره خارجی، مجدداً تکرار می شود [11].

5- معیار پرشدگی

برای بررسی دقیق تر پرشدگی در گوشه قالب، از معیار درصد پرشدگی استفاده گردید. درصد پرشدگی بر مبنای مساحت جاروب شده توسط ورق شکل داده شده به مساحت کل حفره قالب در ناحیه بحرانی می باشد که در شکل 8 به صورت هاشور خورده نشان داده شده است [12]. این معیار مطابق معادله (9) تعریف شده است.

$$\text{درصد پرشدگی} = \frac{\text{مساحت جاروب شده توسط ورق شکل داده شده}}{\text{مساحت کل حفره قالب}} \quad (9)$$



شکل 8 شماتیک روش تعیین درصد پرشدگی بر حسب مساحت اولیه و پر شده قالب

[12]

نتیجه برای این سطوح مطابق مرجع [10]، ضریب اصطکاک 0/04 تعریف می شود. در شبکه بندی ورق نوع المان هشت گره ای¹ انتخاب شد. تعداد المان ورق در امتداد ضخامت چهار می باشد. نوع المان ابزارها از نوع چهار گره ای² می باشد.

یکی از مهم ترین موارد در شبیه سازی ها، پیش بینی پارگی است. در این پژوهش از حداکثر مقدار نازک شدگی برای تعیین پارگی ورق استفاده شده است [10]. درصد نازک شدگی با معادله (1) قابل محاسبه است.

$$\text{درصد نازک شدگی} = \frac{t_0 - t_f}{t_f} \quad (1)$$

در رابطه (1)، t_0 ضخامت اولیه ورق و t_f ضخامت نهایی ورق می باشد. مقدار ضخامت نهایی ورق t_f ، با استفاده از مقدار کرنش ضخامتی ε_t بصورت معادله (2) محاسبه می شود.

$$t_f = t_0 \exp(\varepsilon_t) \quad \text{یا} \quad \varepsilon_t = \ln\left[\frac{t_f}{t_0}\right] \quad (2)$$

از طرفی کرنش مهندسی اصلی ε_r نیز در شرایط کرنش صفحه ای از معادله (3) تخمین زده می شود.

$$e_r = \text{FLD}_0 = \left(23.3 + \frac{360}{25.4} t_0\right) \left(\frac{n}{0.21}\right) \quad (3)$$

که در آن n نمای کرنش سختی و t_0 ضخامت اولیه بر حسب میلی متر می باشد. با توجه به معادله های (4) و (5) در شرایط کرنش صفحه ای، مقدار کرنش حقیقی اصلی ε_r و کرنش ضخامتی ε_t تعیین می شود [10].

$$\varepsilon_r = \ln\left(1 + \frac{r}{100}\right) \quad (4)$$

$$\varepsilon_t = -\varepsilon_r \quad (5)$$

با استفاده از رابطه های (4) و (5) و محاسبه ε_t و ε_r و با جاگذاری ε_t در معادله (2)، مقدار t_f بدست می آید و طبق رابطه (1)، حداکثر مقدار نازک شدگی محاسبه می شود. حداکثر نازک شدگی برای ورق فولادی st13 استفاده شده 30% بدست آمده است. با توجه به معیار پارگی بدست آمده، وقتی ضخامت ورق از 1/5 به 1/05 میلی متر برسد، قطعه دچار پارگی می شود.

4- بهینه سازی ابعاد اولیه ورق

بهینه سازی ابعاد ورق اولیه با هدف کاهش چروکیدگی و نازک شدگی دیواره ها، بهبود جریان مواد و افزایش کیفیت قطعه تولیدی انجام می شود. تعیین شکل بهینه ورق اولیه، بدلیل پیچیدگی رفتار مواد بسیار مشکل است. در این پژوهش، بهینه سازی ابعاد اولیه ورق در طی چند مرحله به روش آنالیز حساسیت انجام گردید.

4-1- روش آنالیز حساسیت

با توجه به الگوریتم روش آنالیز حساسیت، پس از معین شدن منحنی هدف مربوط به ناحیه فلنجی، یک ورق اولیه حدس زده می شود. با حدس زدن ابعاد ورق اولیه، شبیه سازی انجام می شود و در انتهای فرآیند شکل دهی، میزان انحراف همه گره ها نسبت به منحنی هدف بدست می آید. فرض می شود X نشان دهنده بردار موقعیت یک نقطه مادی واقع در خارجی ترین گره ورق اولیه قبل از تغییر شکل و X نشان دهنده بردار موقعیت همان نقطه مادی پس از تغییر شکل نهایی باشد. با ورق اولیه تعریف شده توسط بردار موقعیت X ، فرآیند تغییر شکل به روش المان محدود تجزیه و تحلیل می شود. اگر پس از تجزیه و تحلیل، بردار موقعیت X بر روی منحنی هدف XT منطبق نشود،

1- C3D8R
2- R3D4

6- نتایج

1-6- بررسی امکان شکل دهی قطعه وسط پله

در بررسی امکان شکل پذیری قطعات ورقی پله ای، پرشدگی در ناحیه گوشه فصل مشترک بین پله ها بسیار حائز اهمیت می باشد و از دلایل اصلی دشوار بودن شکل دهی اینگونه قطعات می باشد

یکی از پارامترهای تاثیر گذار بر روی پرشدگی گوشه فصل مشترک بین دو پله، فشار شکل دهی می باشد. فشار شکل دهی بر روی میزان پرشدگی، منحنی توزیع ضخامت و نیروی شکل دهی تاثیر گذار می باشد. افزایش فشار، از یک طرف باعث افزایش پرشدگی و از طرف دیگر باعث افزایش نیروی شکل دهی می شود. اثر فشار شکل دهی بر روی توزیع ضخامت، در هندسه ها و فرآیندهای مختلف متفاوت است. در این تحقیق به منظور رسیدن به مسیر فشار مطلوب برای شکل گیری دو قطعه تعریف شده، مسیر فشارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفتند.

قطعه وسط پله در فشارهای بیشینه 26، 30 و 35 مگاپاسکال به صورت سه بعدی شبیه سازی شدند. در فشار بیشینه 26 مگاپاسکال به دلیل کم بودن فشار شکل دهی، در ناحیه شعاع گوشه فصل مشترک پله اول و دوم (ناحیه D در شکل 6- الف)، پرشدگی کامل حاصل نشد. عدم پرشدگی در گوشه قطعه بخاطر وجود مواد اضافی در ناحیه فلنج و جریان نیافتن مواد می باشد. با افزایش فشار بیشینه به 30 مگاپاسکال، پرشدگی افزایش می یابد اما ورق به طور کامل شکل قالب را به خود نگرفت. میزان پرشدگی در فشار 26 و 30 مگاپاسکال به ترتیب 66 و 74 درصد بدست آمد. در شکل 9 قطعه بدست آمده در فشار 30 مگاپاسکال نشان داده شده است. با افزایش فشار به 35 مگاپاسکال مشاهده گردید که پرشدگی در ناحیه D افزایش یافت. در شکل 10 پرشدگی قطعه در این فشار نشان داده شده است. شکل 11 اثر فشار شکل دهی را بر روی درصد پرشدگی قالب نشان می دهد. با توجه به نمودار مشاهده می شود که با افزایش فشار شکل دهی، میزان پرشدگی قالب افزایش می یابد. حداکثر پرشدگی بدست آمده در این فشار 83 درصد می باشد.

2-6- بررسی امکان شکل دهی قطعه کنار پله (محفظه روغن خودرو)

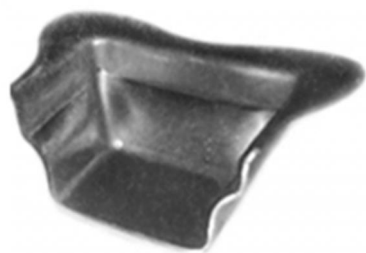
برای بررسی شکل پذیری قطعه کنار پله، فشارهای 26، 30، 35 و 40 مگاپاسکال استفاده شده است. با بررسی شکل پذیری در فشارهای مختلف، میزان پرشدگی در فشارهای 26، 30 و 35 مگاپاسکال به ترتیب 68، 76 و 81 درصد بدست آمد.

به منظور افزایش پرشدگی قالب، فشار بیشینه به اندازه 40 مگاپاسکال افزایش یافت. شکل 12 پرشدگی قطعه در این فشار را نشان می دهد. میزان پرشدگی در این فشار 90 درصد می باشد. در شکل 13 قطعه بدست آمده در فشار 40 مگاپاسکال نشان داده شده است. در شکل 14 نمودار تاثیر فشار شکل دهی بر روی پرشدگی قالب برای قطعه کنار پله نشان داده شده است.

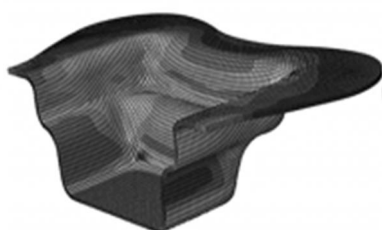
3-6- بررسی تاثیر فشار شکل دهی بر روی توزیع ضخامت

در شکل 15 و 16 نمودار توزیع ضخامت بدست آمده در فشار 30 مگاپاسکال برای قطعه وسط پله و 40 مگاپاسکال برای قطعه کنار پله نشان داده شده است. با توجه به نمودارها، مشاهده می شود مطابقت قابل قبولی بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی وجود دارد. مقدار بیشترین اختلاف بین نتایج شبیه سازی و آزمایشگاهی در حدود 6 درصد می باشد.

با بررسی نمودارهای بدست آمده، در ناحیه های کف پله های اول و دوم (ناحیه های A و E در شکل 6- الف) و (ناحیه های C و G در شکل 6- ب)، با



الف



ب

شکل 9 قطعه وسط پله بدست آمده در فشار 30 MPa، الف- آزمایشگاهی، ب- شبیه سازی



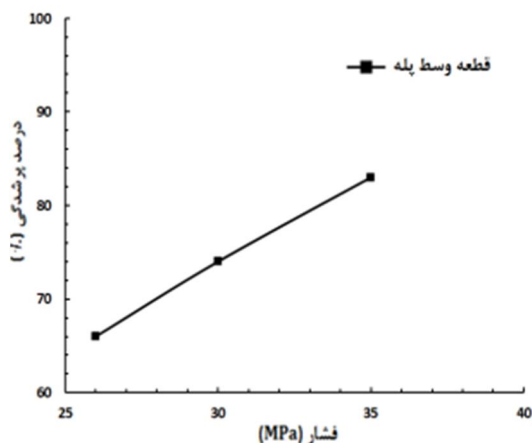
ب

الف



ج

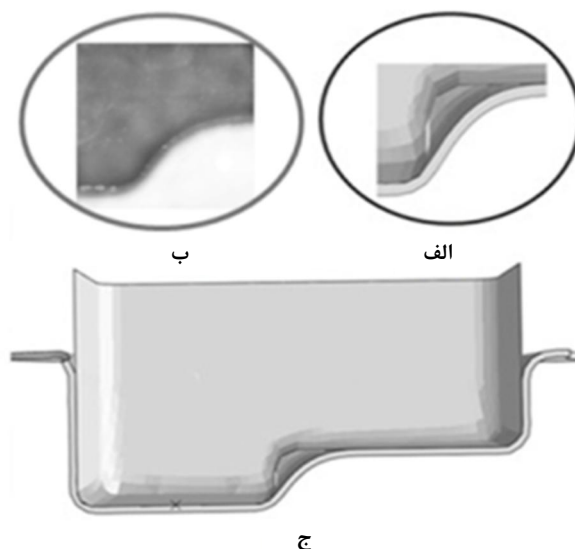
شکل 10 پرشدگی قطعه وسط پله در فشار 35 MPa، الف- بدست آمده از شبیه سازی، ب- بدست آمده از آزمایش، ج- شبیه سازی شکل پذیری ورق در این فشار



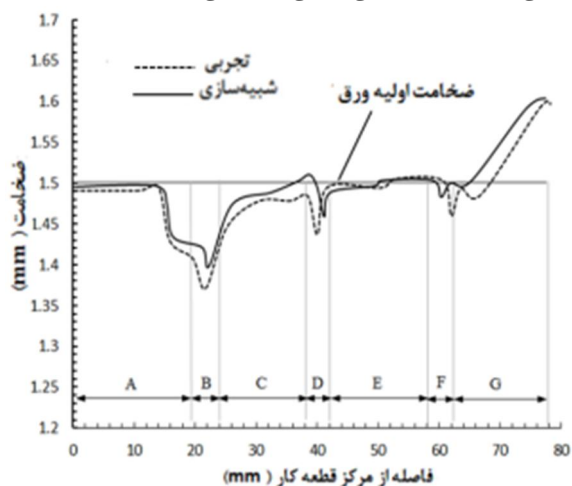
شکل 11 نمودار تاثیر فشار شکل دهی بر روی درصد پرشدگی قالب در گوشه (ناحیه D در شکل 6- الف)، قطعه وسط پله، بدست آمده از شبیه سازی

توجه به اعمال فشار سیال در زیر ورق، سنبه با ورق در تماس بوده و نازک شدگی ناچیز می باشد. در سه ناحیه شعاع گوشه سنبه (ناحیه های B, D و F در شکل 6- الف و ب) به دلیل خمش کششی¹ ایجاد شده در ناحیه شعاع خم، نازک شدگی حداکثر می باشد. در ناحیه دیواره پله اول (ناحیه C در شکل 6- الف) و (ناحیه A در شکل 6- ب)، بدلیل کشش بیشتر ورق در این نواحی، نازک شدگی بیشتری نسبت به دیواره پله دوم (ناحیه G در شکل 6- الف) و (ناحیه E در شکل 6- ب) ایجاد می شود.

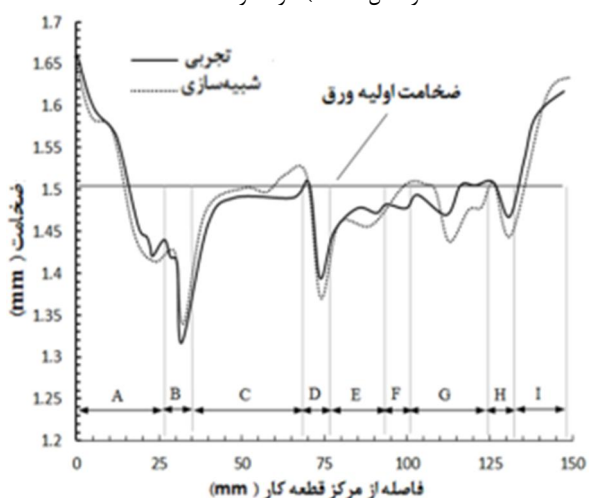
یکی از پارامترهای مهم در فرآیند هیدروفورمینگ، فشار شکل دهی می باشد. استفاده از مسیر فشار مطلوب در شکل پذیری قطعه و توزیع ضخامت یکنواخت حائز اهمیت می باشد. در شکل 17 نمودار تاثیر فشار بر روی توزیع ضخامت قطعه وسط پله در فشارهای 26، 30 و 35 مگاپاسکال نشان داده شده است. با توجه به هندسه تعریف شده برای قطعه وسط پله، با افزایش فشار شکل دهی، بدلیل افزایش سطح تماس بین سنبه و ورق، اصطکاک افزایش می یابد و با کاهش لغزش بین ورق و سنبه، نازک شدگی کاهش می یابد. در شکل 18 تاثیر مسیر فشارهای مختلف بر روی توزیع ضخامت در قطعه کنار پله نشان داده شده است. با توجه به نمودار، با افزایش فشار شکل دهی، حداکثر نازک شدگی بحرانی کاهش می یابد.



شکل 12 پرشدگی قطعه در فشار 40 MPa، الف- بدست آمده از شبیه سازی، ب- بدست آمده از آزمایش، ج- شبیه سازی شکل پذیری ورق در این فشار



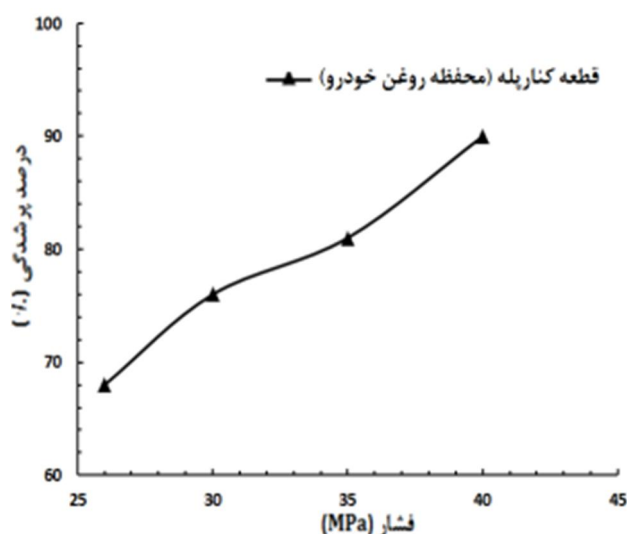
شکل 15 نمودار توزیع ضخامت قطعه وسط پله در جهت طولی (از نقطه A تا G در شکل 6- الف)، در فشار 30 MPa



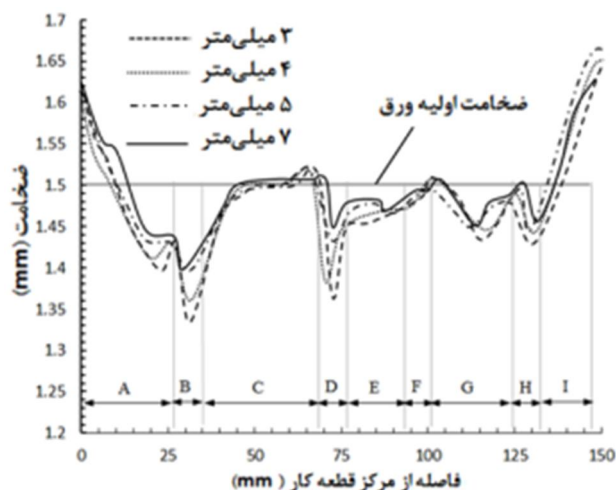
شکل 16 نمودار توزیع ضخامت قطعه کنار پله در فشار 40 MPa، در جهت طولی (از نقطه A تا I در شکل 6- ب)، بدست آمده از شبیه سازی و آزمایش



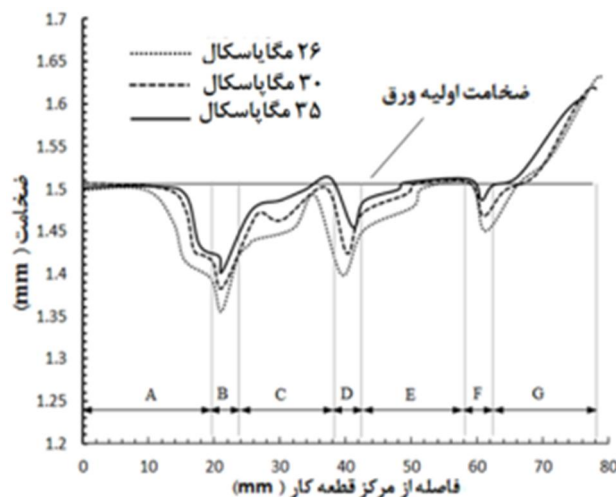
شکل 13 قطعه کنار پله بدست آمده در فشار 40، الف- آزمایشگاهی، ب- شبیه سازی



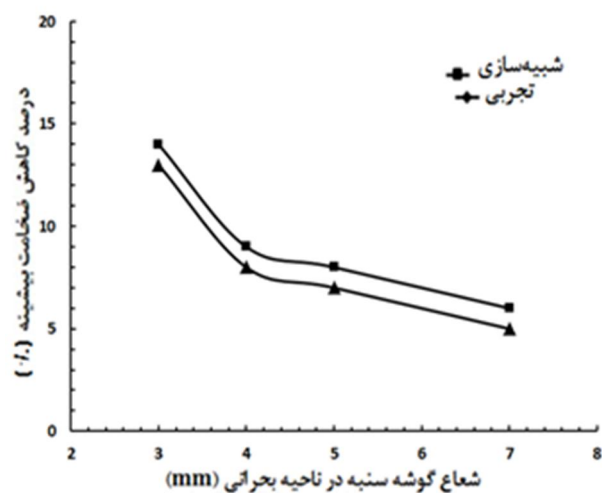
شکل 14 نمودار تاثیر فشار شکل دهی بر روی درصد پرشدگی قالب در گوشه (ناحیه F در شکل 6- ب)، قطعه کنار پله، بدست آمده از شبیه سازی



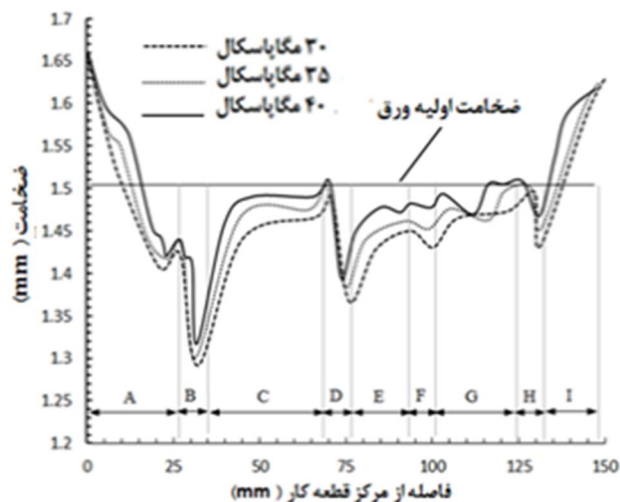
شکل 19 نمودار تاثیر شعاع گوشه سنبه بر روی توزیع ضخامت قطعه کنار پله در جهت برش طولی (از نقطه A تا I در شکل 6-ب)، فشار 40 MPa، بدست آمده از شبیه سازی



شکل 17 نمودار تاثیر فشار بر روی توزیع ضخامت قطعه وسط پله در جهت برش طولی (از نقطه A تا G در شکل 6-الف)، بدست آمده از شبیه سازی



شکل 20 نمودار درصد کاهش ضخامت برحسب شعاع گوشه در ناحیه بحرانی، قطعه کنارپله، فشار 40 MPa



شکل 18 نمودار تاثیر فشار بر روی توزیع ضخامت قطعه کنار پله در جهت برش طولی (از نقطه A تا I در شکل 6-ب)، بدست آمده از آزمایش

10، 13 و 20 میلی متر در نظر گرفته شد. همان طور که در شکل 21 مشاهده می شود با افزایش ارتفاع پله، به دلیل افزایش کرنش و کشیدگی بیشتر در پله اول، نازک شدگی در ناحیه دیواره پله اول و شعاع گوشه سنبه افزایش یافت. با بررسی مقدار درصد کاهش ضخامت در ارتفاع پله مختلف مشخص گردید که درصد کاهش ضخامت در ارتفاع پله 10، 13 و 20 میلی متر به ترتیب 7، 11 و 13 درصد می باشد که با توجه به معیار نازک شدگی در نظر گرفته شده مشاهده می شود در قطعه پارگی رخ نمی دهد. در شکل 22 قطعه کنار پله بدست آمده با ارتفاع پله مختلف در فشار 40 Mg پاسگال نشان داده شده است. همچنین در شکل 23 نمودار درصد کاهش ضخامت نقطه بحرانی در پله مختلف نشان داده شده است. با توجه به نمودار، با افزایش ارتفاع پله، نازک شدگی افزایش می یابد. در انجام شبیه سازی و آزمایش همانگونه که بیان گردید حداکثر نازک شدگی ورق در قطعه کنار پله، با ارتفاع پله 20 میلی متر به مقدار 13 درصد بدست آمد.

6-6- بررسی تاثیر بهینه سازی ابعاد ورق اولیه بر روی توزیع ضخامت با انجام مراحل بهینه سازی ابعاد ورق اولیه، تاثیر مراحل بهینه سازی بر روی

4-6- بررسی تاثیر شعاع گوشه سنبه بر روی توزیع ضخامت

به منظور بررسی تاثیر شعاع گوشه سنبه، قطعه کنار پله با شعاع گوشه مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در این بررسی شعاع های 3، 4، 5، 7 و 10 میلی متر مورد بررسی قرار گرفت. مطابق نمودار شکل 19، مشاهده می شود که با افزایش شعاع گوشه سنبه، در یک فشار ثابت، حداکثر نازک شدگی کاهش و توزیع ضخامت بهبود می یابد. با افزایش شعاع گوشه سنبه، خمش کاهش یافته و جریان مواد راحت تر انجام می گیرد. همچنین مشاهده گردید که در شعاع گوشه کوچکتر از 3 میلی متر، درصد کاهش ضخامت قطعه به بیشتر از 33 درصد می رسد که قطعه در ناحیه شعاع سنبه دچار پارگی می شود. در شکل 20 نمودار درصد کاهش ضخامت برای شعاع گوشه در ناحیه بحرانی مختلف نشان داده شده است. همان طور که از شکل پیداست با افزایش شعاع گوشه سنبه، نازک شدگی در ناحیه بحرانی کاهش می یابد. مشخص گردید که کمترین کاهش ضخامت در اثر افزایش شعاع سنبه به اندازه 5 درصد می باشد.

5-6- تاثیر ارتفاع پله بر روی توزیع ضخامت

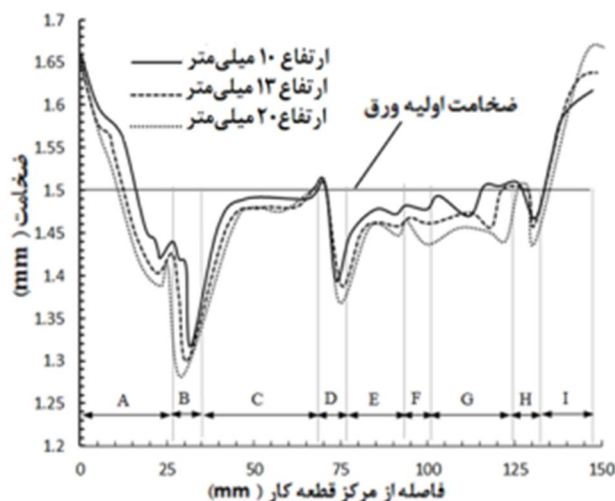
به منظور بررسی تاثیر ارتفاع پله بر روی نازک شدگی، ارتفاع پله در اندازه های

بهینه سازی شدند. در شکل 24 ورق اولیه بهینه سازی شده برای قطعه وسط پله و کنار پله نشان داده شده است. همچنین در شکل 25 قطعه وسط پله و کنار پله بدست آمده از ورق اولیه بهینه سازی شده نشان داده شده است. شکل 26 و 27 نمودارهای تأثیر بهینه سازی ابعاد ورق اولیه بر روی توزیع ضخامت را نشان می دهد.

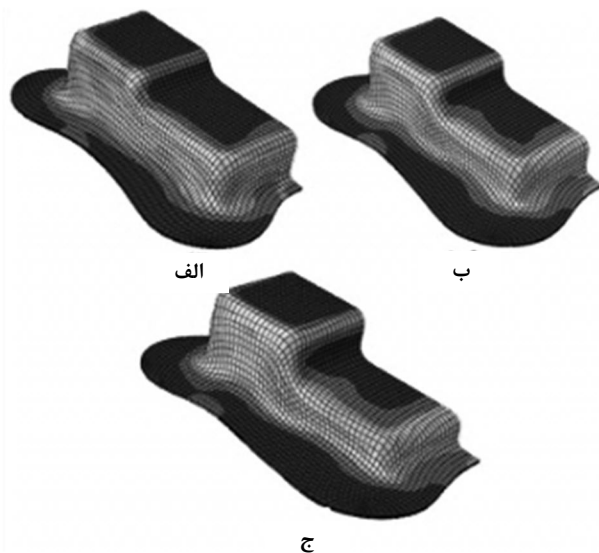
با توجه به نمودارهای نشان داده شده، با تغییر ابعاد ورق اولیه به شکل بهینه، به دلیل افزایش جریان مواد، نازک شدگی در ناحیه شعاع گوشه سنبه و در دیواره ها کاهش می یابد. دلیل این امر افزایش جریان مواد در گوشه ها و کشیدگی کمتر ورق در این ناحیه می باشد. با انجام مراحل بهینه سازی انجام شده، مقدار نازک شدگی در ناحیه بحرانی در قطعه کنار پله و وسط پله به اندازه 8 درصد کاهش یافت.

6-7- بررسی تأثیر نیروی سنبه

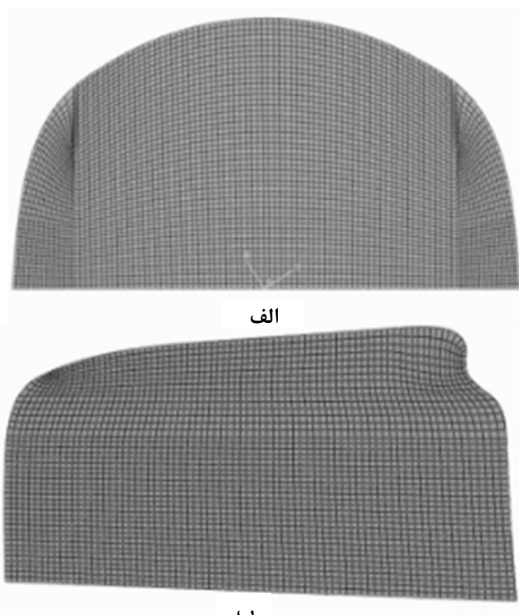
در شکل 28 نمودار نیروی سنبه بر حسب جابجایی قطعه کنار پله در فشارهای 30، 35 و 40 مگاپاسگال نشان داده شده است. در انجام آزمایش ها، مشاهده گردید که با افزایش فشار سیال به زیر ورق، بدلیل افزایش نیروی عمودی وارد بر سنبه، نیروی مورد نیاز شکل دهی افزایش یابد. در شکل 29 نمودار نیرو بر حسب جابجایی قطعه کنار پله در فشار 40 مگاپاسگال، قبل و



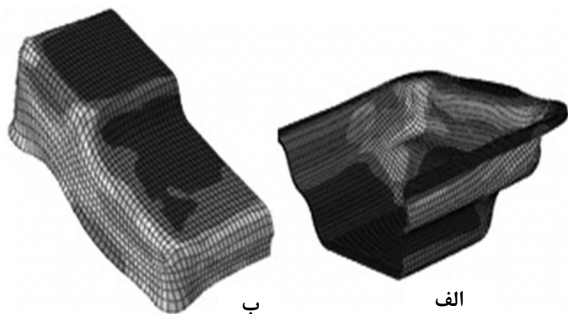
شکل 21 نمودار تأثیر ارتفاع پله بر روی توزیع ضخامت قطعه کنار پله در جهت برش طولی (از نقطه A تا I در شکل 6-ب)، بدست آمده از آزمایش



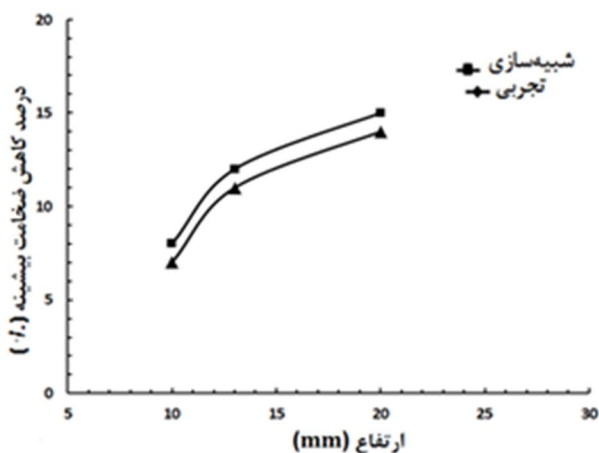
شکل 22 قطعه کنار پله بدست آمده در ارتفاع پله مختلف، الف- 10 میلی متر ب- 13 میلی متر و ج- 20 میلی متر، فشار 40 MPa، بدست آمده از شبیه سازی



شکل 24 ورق اولیه بهینه سازی شده، الف- قطعه وسط پله بدست آمده در دو مرحله، ب- قطعه کنار پله بدست آمده در سه مرحله

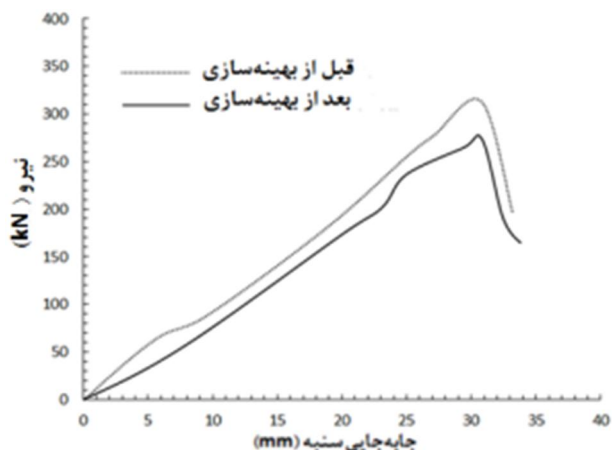


شکل 25 الف- قطعه وسط پله، ب- قطعه کنار پله، بدست آمده با ورق اولیه بهینه سازی شده

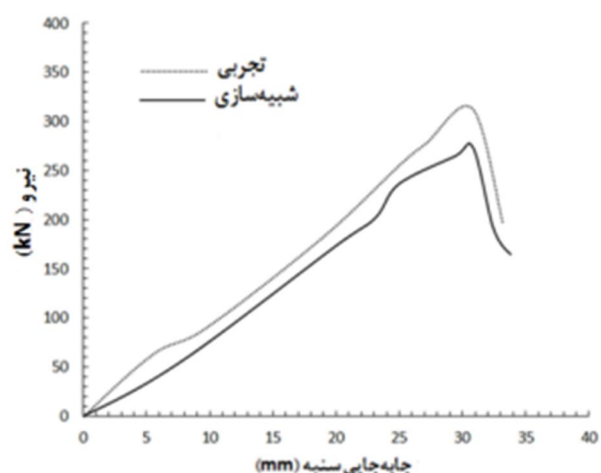


شکل 23 نمودار درصد کاهش ضخامت نقطه بحرانی در ارتفاع پله مختلف در قطعه کنار پله

توزیع ضخامت قطعات شکل داده شده مورد بررسی قرار گرفت. در مراحل بهینه سازی، ورق اولیه قطعه وسط پله و کنار پله بترتیب در 2 و 3 مرحله



شکل 29 نمودار نیروی سنبه بر حسب جابجایی قطعه کنار پله، فشار 40 MPa، قبل و بعد از بهینه سازی، بدست آمده از شبیه سازی



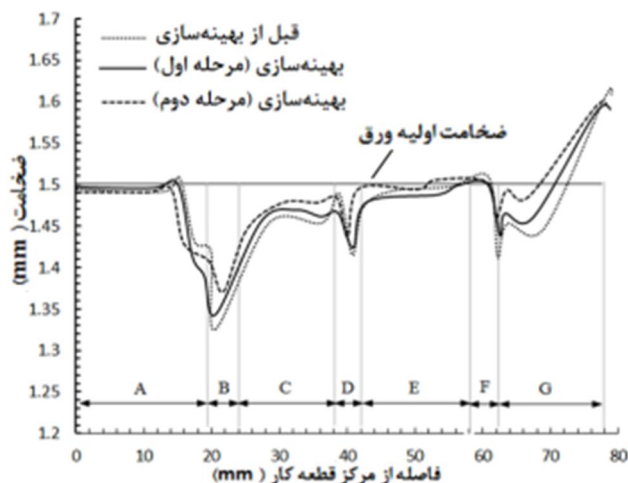
شکل 30 نمودار نیروی سنبه بر حسب جابجایی قطعه کنار پله، فشار 40 مگاپاسکال

با انجام مراحل بهینه سازی به اندازه 17 درصد می باشد. شکل 30 نمودار نیرو بر حسب جابجایی برای قطعه کنار پله در فشار 40 مگاپاسکال را نشان می دهد.

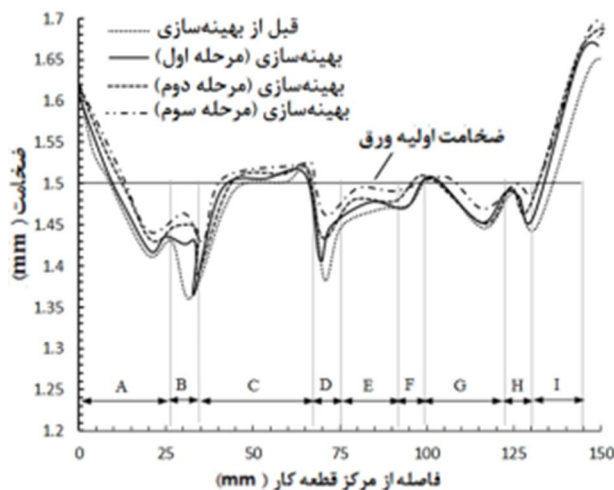
7- نتیجه گیری

در این پژوهش امکان تولید محفظه روغن خودرو (کنار پله) و قطعه دو پله (وسط پله) با استفاده از روش کشش عمیق هیدروپلاستیکی با فشار شعاعی به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفت. با بررسی تحقیقاتی که در پژوهش های پیشین صورت گرفته، تولید محفظه روغن خودرو در طی سه مرحله توسط فرآیند هیدروفرمینگ انجام شد. در این تحقیق شکل پذیری قطعات مورد نظر در یک مرحله توسط فرآیند هیدروفرمینگ مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت قطعه با موفقیت شکل یافت. همچنین با بررسی پارامترهای مؤثر در شکل پذیری و انجام بهینه سازی ابعاد ورق اولیه، نتایج زیر حاصل شد:

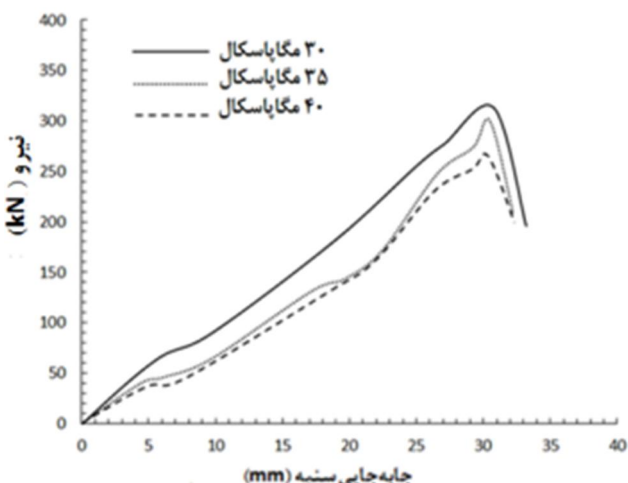
1. شکل پذیری قطعه دو پله با دو هندسه قطعه وسط پله و قطعه کنار پله (محفظه روغن خودرو) در یک مرحله توسط فرآیند هیدروفرمینگ مورد بررسی قرار گرفت. این نتیجه حاصل شد که با افزایش فشار بیشینه به اندازه 35 مگاپاسکال، پرشدگی قالب برای قطعه وسط پله و کنار پله بترتیب 83 و 81 درصد بدست



شکل 26 نمودار توزیع ضخامت قطعه وسط پله در جهت برش طولی (از نقطه A تا G در شکل 6-ب)، در مراحل بهینه سازی، بدست آمده از شبیه سازی



شکل 27 نمودار توزیع ضخامت قطعه کنار پله در جهت برش طولی (از نقطه A تا I در شکل 6-ب)، در مراحل بهینه سازی، بدست آمده از شبیه سازی



شکل 28 نمودار نیروی سنبه بر حسب جابجایی قطعه کنار پله، فشار 40 MPa

بعد از بهینه سازی نشان داده شده است. مشاهده می شود که با انجام مراحل بهینه سازی، به دلیل افزایش در جریان مواد در گوشه های ورق اولیه، حداکثر نیروی مورد نیاز به منظور شکل گیری ورق کاهش می یابد. مقدار کاهش نیرو

- drawing assisted by radial pressure: Part I. Experimental observations of the forming process of aluminum alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 148, pp. 119-131, 2004.
- [4] B.N.Huiting-Wang, B.LinGao, B.Minghe-Chen, Hydrodynamic deep drawing process assisted by radial pressure with inward flowing liquid, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 53, pp. 793-799, 2011.
- [5] T.Kim, D.Yang, S.Han, Numerical modeling of the Multi-stage sheet pair hydroforming process, *Journal of materials processing technology*, vol. 151, pp. 48-53, 2004.
- [6] J.Wua, R.Balendra, Y. Qin, A study on the limits of the hydromechanical deep drawing of with stepped geometries, *Journal of Materials procces Technology*, vol.145, pp.242-246, 2004.
- [7] Y.Qin, Balendra.R, Design considerations for hydromechanical deep drawing of sheet components with concave features, features, *Journal of Materials Processing Technology*, vol.145, pp. 163-170, 2004.
- [8] B.S. Kang , B.M. Sona, J. Kim, A comparative study of stamping and hydroforming processes for an automobile fuel tank using FEM, *International Journal of Machine Tools Manufacture*, vol. 44, pp. 87-94, 2004.
- [9] H. B. Shim, Determination of optimal blank shape by the radius vector of boundary nodes, *Engineering Manufacture*, vol. 218, pp. 1099-1111, 2004.
- [10] S.H.Zhang, M.R.Jensen, j.Danckert, K.B.Nielsen, L.H.Lang, D.C .Kang, analysis of the mechanical deep drawing of cylindric cups, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 103, pp.367-373 , 2000.
- [11] S. Hyunbo, S. Kichan, K. Kwanghee, Optimum blank shape design by sensitivity analysis, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 104, pp. 191-199, 2000.
- [12] N.Mohammadtabar, M. Bakhsi, S.J. Hosseinipour, A.H. Gorji, study of effective parameters in hydroforming of fuel cell metallic bipolar plates with parallel serpentine flow field, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 8, pp. 17-27, 2014. (In Persian).
- آمد. همچنین با بررسی شکل پذیری قطعه کنار پله (محفظه روغن خودرو) در فشار 40 مگاپاسکال، میزان پرشدگی به 90 درصد افزایش یافت.
2. مشاهده شد که بهینه سازی ابعاد ورق اولیه موجب می شود تا جریان مواد بهبود یافته و همچنین نازک شدگی در ناحیه شعاع سنبه و دیواره پله ها کاهش یابد. در این تحقیق حداکثر کاهش نازک شدگی بدست آمده حاصل از بهینه سازی، 8 درصد بدست آمد.
3. با افزایش ارتفاع پله، به دلیل افزایش تنش و کشیدگی بیشتر در پله اول، نازک شدگی در ناحیه دیواره پله اول و شعاع گوشه سنبه افزایش می یابد و هر چه ارتفاع پله کاهش یابد، نازک شدگی به سمت پله اول جابجا می شود. حداکثر نازک شدگی بدست آمده، در ارتفاع پله 20 میلی متر به اندازه 13 درصد حاصل شد.

8- مراجع

- [1] P.H.Joshi, *Design manual jig and fixture*, second edition, pp. 9.32-9.43, New York: McGRAW-Hill, 2003.
- [2] S.H.Zhang, Developments in hydroforming, *Journal of Materials Processing Technology*, vol.91. pp. 236-244, 1999.
- [3] L. Lang, J. Danckert, K. B. Nielsen, Investigation into hydrodynamic deep