

مطالعه تأثیر ارتفاع پله بر توزیع ضخامت در شکل‌دهی قطعات مستطیلی

در فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی

محمد بخشی جویباری
استاد دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
bakhshi@nit.ac.ir

عبدالحمید گرجی ولوکلا
استادیار دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
hamidgorji@nit.ac.ir

رضا موسوی پور*
دانش‌آموخته کارشناس ارشد مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
mousavipoor.reza@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۲/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۰۱

چکیده

هیدروفرمینگ از جمله فرایندهای نوین در تولید قطعات ورقی است. در این فرایند از فشار سیال به‌منظور شکل‌دهی ورق فلزی استفاده می‌شود. فرایند هیدروفرمینگ دارای مزایایی چون بهبود شکل‌پذیری، قابلیت شکل‌پذیری قطعات پیچیده، کیفیت سطحی خوب و دقت ابعادی بالا می‌باشد. قطعات پله‌ای از جمله پیچیده‌ترین قطعاتی هستند که می‌توان با روش‌های هیدروفرمینگ تولید شوند. در این مقاله، به بررسی تأثیر ارتفاع پله بر توزیع ضخامت در قطعات ورقی مستطیلی پله‌ای از جنس فولاد اس. تی. ۱۳، به‌روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی به‌صورت تجربی و شبیه‌سازی پرداخته شد. شبیه‌سازی فرایند توسط نرم‌افزار آباکوس انجام شد. با انجام تست‌های تجربی نشان داده شد که نتایج حاصل از شبیه‌سازی مطابقت قابل قبولی با نتایج تجربی دارد. در پایان این نتیجه حاصل شد که با افزایش ارتفاع پله، حداکثر نازک‌شدگی بحرانی در ناحیه شعاع سنبه و دیواره پله اول (پله پایینی) افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش ارتفاع پله، حداکثر فشار شکل‌دهی به‌منظور پرشدگی قالب افزایش خواهد یافت.

واژگان کلیدی: ارتفاع پله، کشش عمیق هیدرودینامیکی، شبیه‌سازی اجزای محدود، قطعات پله‌ای، فشار شعاعی

۱. مقدمه

ارائه شده است. این روش یکی از مهمترین روش‌های شکل‌دهی ورق می‌باشد که از آن برای تغییر شکل ورق‌های فلزی و تبدیل آن به قطعات توخالی استفاده می‌شود. در واقع ورق مسطح و هموار به قطعاتی به شکل‌های استوانه‌ای، مخروطی و جعبه‌ای تبدیل خواهد شد. از جمله روش‌های هیدروفرمینگ ورق می‌توان به

فرایند هیدروفرمینگ ورق از فرایندهای متداول کشش ورق است که قبل از جنگ جهانی دوم آغاز شده است [۱]. این روش در تولید قطعات خودرو و بدنه هواپیما در سال ۱۹۸۰ م مورد استفاده قرار گرفت. در سال‌های ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۰ م این روش پیشرفت‌های زیادی داشته است [۲]. طی چند سال اخیر، نوآوری‌های زیادی در زمینه هیدروفرمینگ ورق



روش هیدروفرمینگ استاندارد و کشش عمیق هیدروفریم [۳]، کشش عمیق هیدرومکانیکی [۴]، کشش عمیق هیدرودینامیکی [۵] و کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی [۶] اشاره کرد. فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی از جمله انواع فرایندهای هیدروفرمینگ است که با به کارگیری آن در تولید قطعات ورق پله‌ای، با ابزاربندی ساده و بدون نیاز به آب‌بند می‌توان عملیات شکل‌دهی را انجام داد.

قطعات پله‌ای کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف به‌خصوص صنعت خودروسازی (به‌عنوان مثال در تولید کارتر خودرو) دارند. در شکل‌دهی این قطعات پیچیدگی‌هایی وجود دارد. از روش‌های تولید اینگونه قطعات می‌توان فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی را نام برد. در این روش سیال در زیر ورق قرار می‌گیرد و ضمن اعمال فشار در جهت محوری قائم، در جهت شعاعی نیز روی آن فشار وارد می‌کند. همچنین ورق بین ورق‌گیر و ماتریس آزاد است. در این فرایند وقتی پانچ به سمت پایین حفره قالب حرکت می‌کند، ورق به حفره قالب پر از مایع نیرو وارد می‌کند، مایع در حفره قالب فشرده شده و ورق را محکم به سطح سنبه می‌چسباند. همچنین مایع در حفره قالب از فاصله بین ورق و قالب به‌صورت دینامیکی می‌گریزد. در این فرایند چون فاصله بین ورق‌گیر و ماتریس کوچک و نشی سیال بین این فضا کم است، سیال به لبه ورق فشار وارد می‌کند. فشار شعاعی به راحت‌تر جاری شدن ورق در حفره قالب کمک می‌کند و نسبت کشش را افزایش می‌دهد. از مزایای دیگر این فرایند می‌توان به شکل‌دهی قطعات پیچیده، کیفیت سطح خوب و دقت ابعادی بالا اشاره کرد.

در زمینه هیدروفرمینگ قطعات پله‌ای تحقیقات محدودی انجام شده است. هوانگ و همکاران به بررسی پارامترهای بهینه فرایند هیدروفرمینگ آلومینیوم - تیتانیوم برای پوسته باتری پرداختند [۷]. آنها به این نتیجه رسیدند که بهینه‌سازی شکل ورق اولیه تأثیر زیادی بر جریان مواد و

تأخیر در پارگی خواهد داشت. همچنین به این نتیجه رسیدند که با افزایش لقی بین ماتریس و ورق‌گیر (گپ)، چروکیدگی در ناحیه فلنچ ورق رخ می‌دهد. کیم و همکاران شکل‌دهی یک قطعه مستطیلی پله‌ای را در فرایند هیدروفرمینگ چند مرحله‌ای به‌صورت تجربی و شبیه‌سازی مورد بررسی قرار دادند [۸]. در ابتدا شکل‌دهی قطعه را در سه مرحله شبیه‌سازی کرده و سپس قطعه را در سه مرحله شکل دادند. با انجام آزمایش، قابلیت شکل‌پذیری ورق و نیروی ورق‌گیر را بررسی نمودند و به این نتیجه رسیدند که شکل‌دهی هیدروفرمینگ نسبت به روش سنتی کشش عمیق مناسب‌تر است. در ادامه، شکل‌دهی تک‌مرحله‌ای قطعه مذکور را نیز به‌صورت شبیه‌سازی و تجربی بررسی و مشاهده کردند که به دلیل پیچیدگی هندسه تعریف‌شده، در قطعه پارگی رخ می‌دهد.

۲. شکل‌دهی ورق مستطیلی در فرایند کشش

عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی

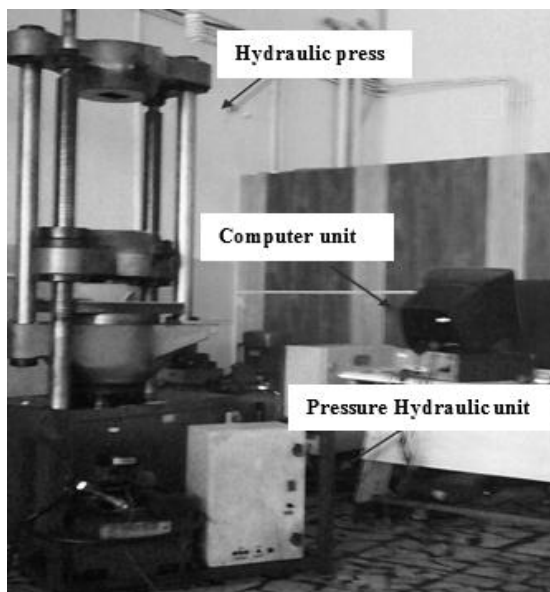
۲-۱. روش آزمایشگاهی

در انجام آزمایش‌ها از تجهیزات زیر استفاده شده است:

۱. دستگاه آزمایش انیورسال با ظرفیت ۶۰۰ کیلو نیوتن که برای تأمین حرکت ورق به‌درون قالب استفاده شده است. دستگاه پرس توسط کامپیوتر و رابط گرافیکی پیشرفته‌ای کنترل می‌شود که به‌سادگی کنترل سرعت و جابه‌جایی سنبه را میسر می‌سازد.
۲. به‌منظور تنظیم فشار داخل مخزن، از یک مدار هیدرولیکی استفاده شده است. این مدار هیدرولیکی از یک شیر کنترل فشار جهت تنظیم فشار نهایی، یک فشارسنج جهت نمایش مقدار فشار داخل لوله، یک شیر یک‌طرفه، سهراهی و اتصالات هیدرولیکی تشکیل می‌شود. حداکثر ظرفیت ایجاد فشار در این دستگاه ۵۰ مگاپاسکال می‌باشد. در شکل ۱ دستگاه پرس انیورسال استفاده شده در آزمایش و واحد هیدرولیکی اعمال فشار نشان داده شده است. در

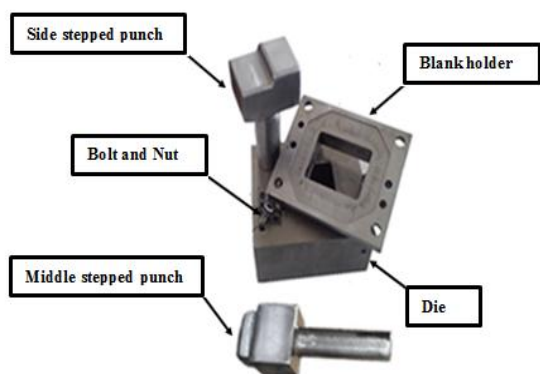


این پژوهش، از هیچ اورینگی برای آبندی استفاده نشده است. دلیل آن استفاده از فرایند هیدرودینامیکی می‌باشد. در نتیجه از فاصله بین ورق‌گیر و ماتریس سیال خارج می‌شود.



شکل ۱. دستگاه آزمایش انیورسال و سیستم کامپیوتری متصل

ورق مماس می‌شود. در این بررسی، مسیر فشار نیز به صورت سه مرحله‌ای به قسمت زیر و لبه‌های بیرونی ورق اعمال می‌گردد. در مرحله اول، فشار پیش بشکهای به سطح زیرین ورق اعمال می‌شود و سپس سنبه شروع به حرکت کرده و متناسب با حجم نفوذی سنبه، فشار داخل محفظه فشار تا حد تعیین شده‌ای (فشار تنظیمی روی شیر کنترل فشار) افزایش می‌یابد و تا رسیدن سنبه به انتهای کورس خود این فشار ثابت باقی می‌ماند. پس از رسیدن سنبه به انتهای کورس، مرحله سوم شروع می‌شود که در آن با ثابت بودن سنبه در محل خود، فشار درون محفظه فشار تا حد معین، جهت شکل‌دهی برآمدگی روی قطعه افزایش می‌یابد. در این مقاله، دو هندسه متفاوت از قطعات پله‌ای تعریف شد.



شکل ۲. مجموعه قالب استفاده شده در آزمایش‌ها

۲-۲. مسیر فشار

انتخاب مسیر فشار مناسب، در شکل‌دهی قطعات ورقی با روش‌های هیدروفورمینگ بسیار حائز اهمیت است. در این پژوهش به منظور انجام تست‌های آزمایشگاهی، از مسیر فشار نشان داده شده در شکل ۳ استفاده شده است. با توجه به نمودار نشان داده شده، بخش OA فشار پیش بشکهای، AB مسیر فشار تا رسیدن به حداکثر فشار و CD مسیر فشار در مرحله دوم را نشان می‌دهد. شیب خط AB با سرعت سنبه، شکل سنبه و ضخامت ورق در ارتباط می‌باشد.

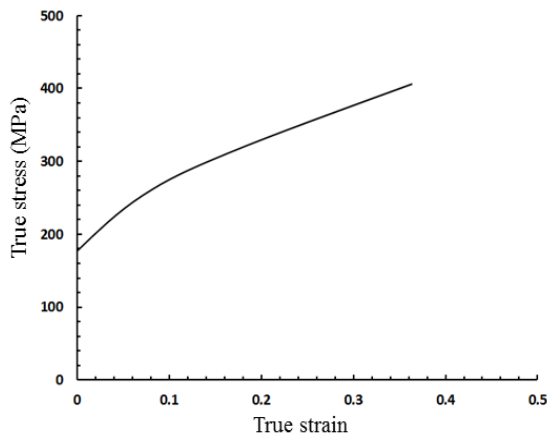
در شکل ۲ مجموعه قالب استفاده شده برای آزمایش‌ها و شبیه‌سازی اجزای محدود فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی نمایش داده شده است. جنس قالب از فولاد ابزار سردکار و جنس ورق، فولاد کم‌کربن بوده و طول، عرض و ضخامت آن به ترتیب ۱۵۲، ۱۵۰ و ۱/۵ میلی‌متر است. ورق به وسیله سنبه از بالا با سرعت ۱۵۰ میلی‌متر بر دقیقه و در پایین توسط سیال محبوس شده در حفره ماتریس فشرده می‌شود. کل جابه‌جایی سنبه برابر ۳۵ میلی‌متر است. نحوه عملکرد قالب هیدرودینامیکی با فشار شعاعی مورد استفاده در پژوهش به این صورت بوده که ابتدا ماتریس قالب روی میز دستگاه قرار گرفته و سنبه روی کوبه پرس نصب می‌گردد. پس از جانمایی ورق در محل مورد نظر روی ماتریس، ورق‌گیر روی ماتریس قرار داده شده و با پیچ‌های تعبیه شده در جای خود ثابت می‌گردد. با حرکت کوبه، نوک سنبه نیز با سطح



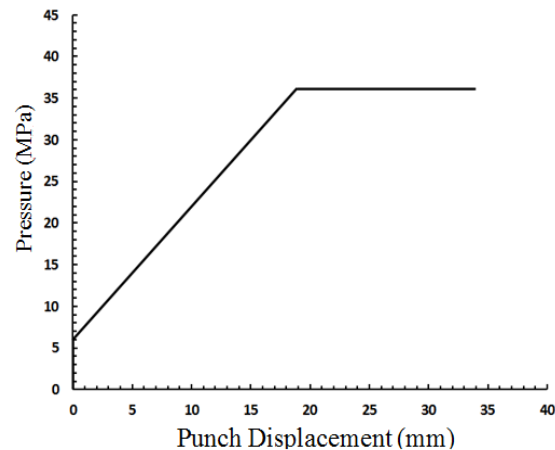
۳-۲. خواص مواد

معرفی گردید. در جدول ۱ خواص فیزیکی و مکانیکی ورق فولادی مورد استفاده در شبیه‌سازی نشان داده شده است.

تعیین محدوده پلاستیک منحنی تنش - کرنش حقیقی حاصل از تست کشش، به صورت شکل ۴ به نرم‌افزار



شکل ۴. نمودار تنش - کرنش حقیقی حاصل از آزمایش کشش



شکل ۳. مسیر فشار مورد استفاده شده در تحقیق

جدول ۱. خواص مکانیکی و فیزیکی ورق فولادی اس. تی. ۱۳

مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)	تنش تسلیم (مگاپاسکال)	ضریب پواسون	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)
۰/۱۱۷	۱۲۳	۰/۲۳	۸۹۴۰

۳. شبیه‌سازی المان محدود

فرایند هیدروفرمینگ ورق در قالب پله‌ای شکل توسط نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس مدل شد. مطابق شکل ۵ فقط نیمی از اجزای قالب و ورق مدل شده است. برای اعمال فشار شعاعی به لبه ورق، ورق به صورت شکل‌پذیر و مجموعه قالب به صورت صلب گسسته در نظر گرفته شده است. براساس مرجع [۹]، ضریب اصطکاک بین سنبه و ورق ۰/۱۵ و بین ورق با ورق‌گیر و ورق با قالب ۰/۰۴ در نظر گرفته شده است. تعداد المان ورق در امتداد ضخامت چهار می‌باشد. المان استفاده شده برای ورق از نوع R3D4 C3D8R است. قالب و سنبه با المان مدل‌سازی R3D4 مدل‌سازی شده است. مشخصات و خواص ورق در جدول ۲ آمده است.

۳-۱. معیار نازک‌شدگی

از جمله پارامترهای مهم در شبیه‌سازی فرایند، پیش‌بینی پارگی است. در این مقاله از حداکثر مقدار نازک‌شدگی برای بررسی پارگی ورق استفاده شده است [۹]. رابطه درصد نازک‌شدگی به صورت ۱ قابل محاسبه است.

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

به طوری که در این معادله، t_0 ضخامت اولیه و t_f ضخامت نهایی ورق است. مقدار ضخامت نهایی ورق با استفاده از مقدار کرنش ضخامتی ε_t به صورت ۲ محاسبه می‌شود.

$$t_f = t_0 e^{\varepsilon_t} \quad \text{or} \quad \varepsilon_t = \ln\left(\frac{t_f}{t_0}\right) \quad (2)$$

از طرفی کرنش مهندسی اصلی e_r نیز در شرایط کرنش صفحه‌ای از معادله ۳ تخمین زده می‌شود.



$$e_r = FLD_0 = \left(23.3 + \frac{360}{25.4} t_0 \right) \left(\frac{n}{0.21} \right) \quad (3)$$

که در آن n نمای کرنش سختی و t_0 ضخامت اولیه برحسب میلی‌متر است. با توجه به معادله ۴ و ۵ در شرایط کرنش صفحه‌ای، مقدار کرنش حقیقی اصلی ϵ_r و کرنش ضخامتی ϵ_t تعیین می‌شود.

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

$$\epsilon_t = -\epsilon_r \quad (5)$$

با استفاده از رابطه ۴ و ۵ و محاسبه ϵ_r و ϵ_t و با جایگذاری ϵ_t در معادله ۲ مقدار t_f به‌دست آمده و طبق معادله ۱ مقدار حداکثر نازک‌شدگی محاسبه می‌شود. حداکثر نازک‌شدگی برای ورق فولادی اس. تی. ۱۳ استفاده شده در تست‌های آزمایشگاهی ۳۰ درصد به‌دست آمده است. با توجه به معیار پارگی به‌دست آمده وقتی ضخامت ورق از ۱/۵ به ۱/۰۵ میلی‌متر برسد، قطعه دچار پارگی می‌شود. در جدول ۱ مشخصات ابعادی قالب مورد استفاده برای قطعه وسط پله و قطعه کنار پله (محفظه روغن خودرو) نشان داده شده است.

۴. نتایج و بحث

۴-۱. بررسی شکل‌پذیری

در شکل‌دهی قطعات ورقی پله‌ای، انتخاب مسیر فشار مناسب بایستی بر مبنای منطقی خاص باشد. بدین منظور در ابتدا شکل‌پذیری قطعه در فشارهای ۱۵ و ۲۰ مگاپاسکال به‌صورت شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفت. اما با بررسی نتایج به‌دست آمده و همچنین با توجه به تحقیقات پیشین در این زمینه [۷]، مشاهده شد که قطعه شکل نمی‌گیرد. به‌همین دلیل فشار سیال افزایش یافته و نتایج ارائه‌شده در مقاله مربوط به فشارهایی می‌باشد که قطعه شکل گرفته است. در انجام آزمایش و شبیه‌سازی، در ابتدا قطعه وسط پله طی سه مرحله در فشارهای ۲۶، ۳۰ و ۳۵ مگاپاسکال شکل داده شد. در ادامه تست‌های تجربی، با در نظر گرفتن فشارهای ۳۰، ۳۵ و ۴۰ مگاپاسکال، قطعه کنار پله طی سه

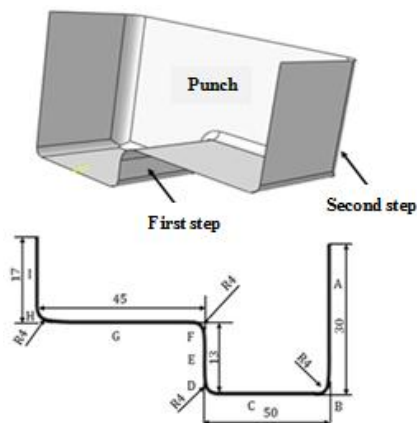
مرحله شکل داده شد. به‌منظور بررسی توزیع ضخامت قطعات وسط و کنار پله به‌دست آمده در فشارهای مختلف، نمونه‌ها در جهت طولی برش داده شده و ضخامت قطعات توسط ضخامت‌سنج در نقاط مختلف در جهت دانه‌بندی اندازه‌گیری شد و با نتایج شبیه‌سازی مقایسه گردید. در شکل ۶ قطعه وسط پله و کنار پله به‌ترتیب در فشارهای ۳۵ و ۴۰ مگاپاسکال نشان داده شده است. در شکل ۷ و ۸ به‌ترتیب نمودار توزیع ضخامت به‌دست آمده در فشار ۳۵ مگاپاسکال برای قطعه وسط پله و ۴۰ مگاپاسکال برای قطعه کنار پله نمایش داده شده است. با توجه به نمودارها مشاهده می‌شود مطابقت قابل قبولی بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی وجود دارد. مقدار بیشترین اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی در حدود ۶ درصد می‌باشد.

۴-۲. بررسی تأثیر ارتفاع پله بر توزیع ضخامت

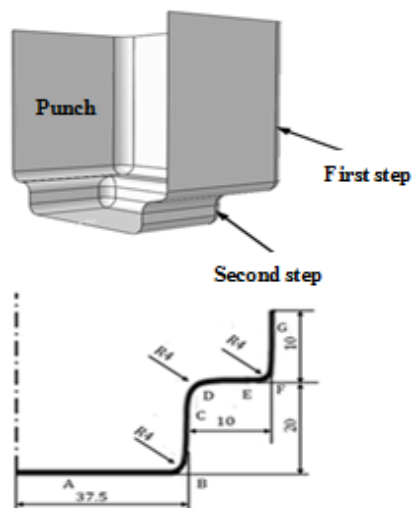
یکی از پارامترهایی که در تولید قطعات مستطیلی دو پله‌ای به‌کمک فرایند هیدروفرمینگ بسیار حائز اهمیت می‌باشد، تعیین ارتفاع پله است. ارتفاع پله در توزیع ضخامت یکنواخت قطعات پله‌ای (به‌خصوص دیواره پله‌ها) بسیار تأثیرگذار می‌باشد. در این مقاله، به‌منظور بررسی تأثیر ارتفاع پله روی توزیع ضخامت در قطعات پله‌ای، با انتخاب ارتفاع پله در اندازه‌های ۱۰، ۱۳ و ۲۰ میلی‌متر، تأثیر ارتفاع پله بر نازک‌شدگی مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۹ قطعه وسط پله‌ای به‌دست آمده در فشار ۳۵ مگاپاسکال با ارتفاع پله ۱۰، ۱۳ و ۲۰ میلی‌متر در حالت شبیه‌سازی نشان داده شده است. در شکل ۱۰ نمودار تأثیر ارتفاع پله بر توزیع ضخامت در قطعه وسط پله‌ای نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع پله، به‌دلیل افزایش تنش و کشیدگی بیشتر در پله اول، نازک‌شدگی در ناحیه دیواره پله اول و شعاع گوشه سنبه افزایش یافت. در شکل ۱۱ نمودار درصد کاهش ضخامت نقطه بحرانی در پله‌های مختلف در قطعه وسط پله‌ای نمایش داده شده است. با توجه به نمودار، با بررسی مقدار درصد کاهش ضخامت در

ارتفاع پله مختلف مشخص می‌شود که درصد کاهش ضخامت در ارتفاع پله ۱۰، ۱۳ و ۲۰ میلی‌متر به ترتیب ۱۰، ۱۵ و ۱۷ درصد می‌باشد و حداکثر نازک‌شدگی در ناحیه شعاع گوشه سنبه در فصل مشترک پله‌ها (ناحیه D در شکل الف ۶) ایجاد شد. همچنین با افزایش ارتفاع پله، حداکثر نازک‌شدگی در نقاط بحرانی افزایش می‌یابد.

ارتفاع پله مختلف مشخص می‌شود که درصد کاهش ضخامت در ارتفاع پله ۱۰، ۱۳ و ۲۰ میلی‌متر به ترتیب ۱۰، ۱۵ و ۱۷ درصد می‌باشد و حداکثر نازک‌شدگی در ناحیه شعاع گوشه سنبه در فصل مشترک پله‌ها (ناحیه D در شکل الف ۶) ایجاد شد. همچنین با افزایش ارتفاع پله، حداکثر نازک‌شدگی در نقاط بحرانی افزایش می‌یابد.



(ب)

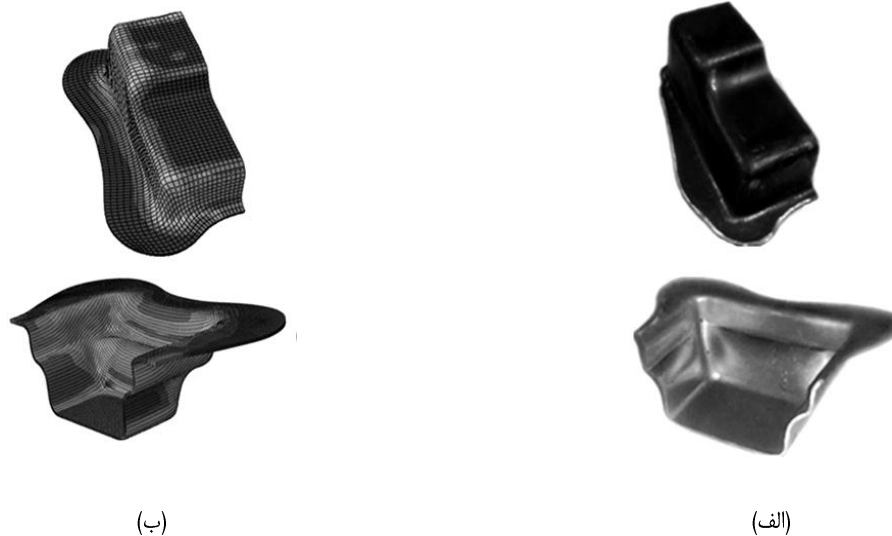


(الف)

شکل ۵. ناحیه‌بندی قطعات دو پله‌ای؛ الف) قطعه وسط پله، ب) قطعه کنار پله (محفظه روغن خودرو)

جدول ۲. مشخصات ابعادی قالب قطعات دو پله‌ای

ابعاد ماتریس (میلی‌متر)	شعاع ماتریس (میلی‌متر)	فاصله گپ (میلی‌متر)	لقی ورق‌گیر و ماتریس (میلی‌متر)
۹۵×۷۵	۴	۱/۷۵	۰/۲۵

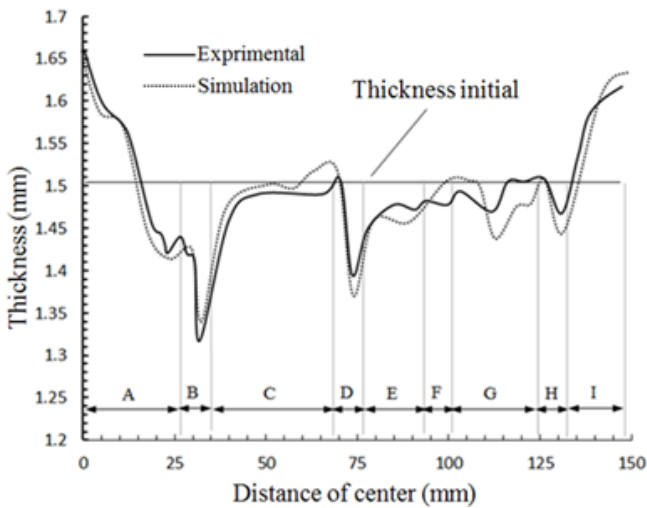


(ب)

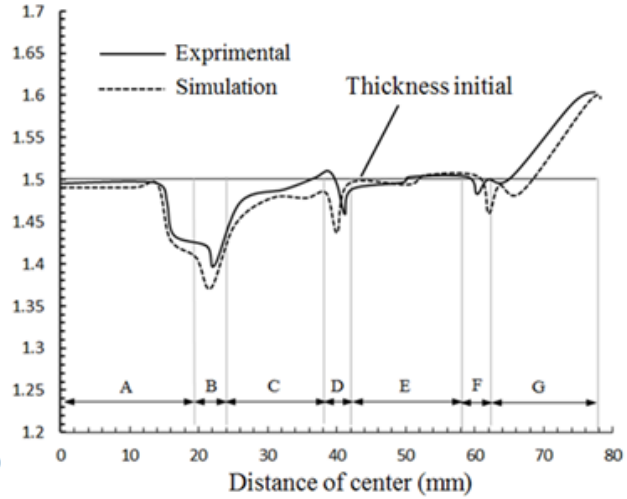
(الف)

شکل ۶. قطعه وسط پله‌ای به دست آمده در فشار ۳۵ مگاپاسکال؛ الف) آزمایشگاهی، ب) شبیه‌سازی

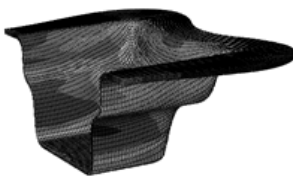




شکل ۸. توزیع ضخامت قطعه کنار پله در فشار ۴۰ مگاپاسکال، در جهت طولی (از نقطه A تا I در شکل ۵ ب)، به دست آمده از شبیه‌سازی و آزمایش



شکل ۷. توزیع ضخامت قطعه وسط پله در فشار ۳۵ مگاپاسکال در جهت برش طولی (از نقطه A تا G در شکل ۵ الف)، به دست آمده از شبیه‌سازی و آزمایش



(ج)

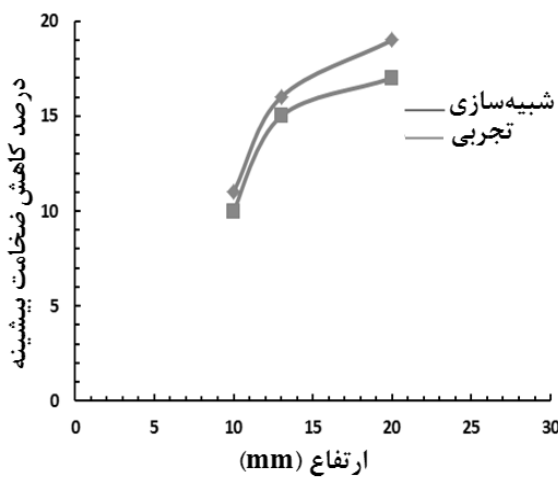


(ب)

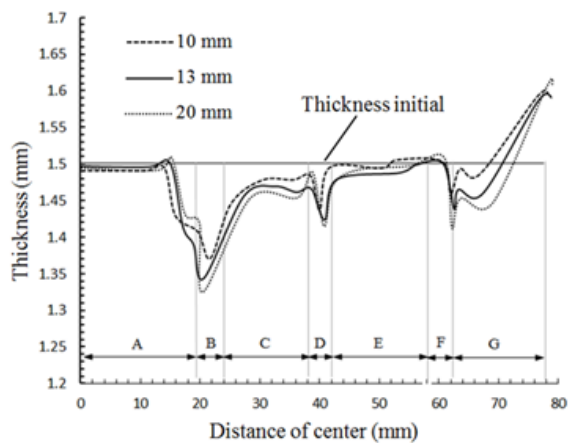


(الف)

شکل ۹. قطعه وسط پله‌ای به دست آمده در فشار ۳۰ مگاپاسکال با ارتفاع پله (الف) ۱۰ میلی‌متر، (ب) ۱۳ میلی‌متر، (ج) ۲۰ میلی‌متر در حالت شبیه‌سازی



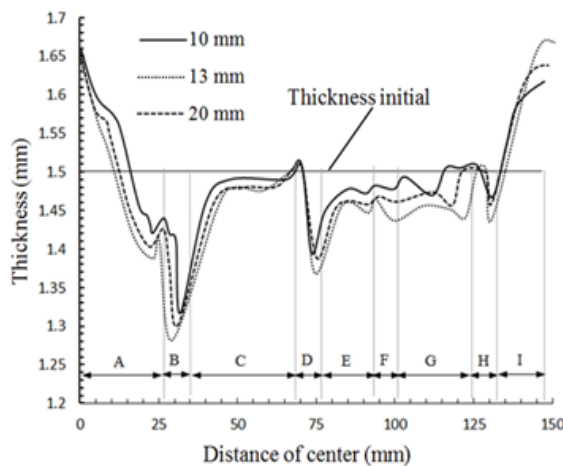
شکل ۱۱. نمودار درصد کاهش ضخامت نقطه بحرانی در پله‌های مختلف در قطعه وسط پله‌ای حاصل از شبیه‌سازی و تست آزمایشگاهی



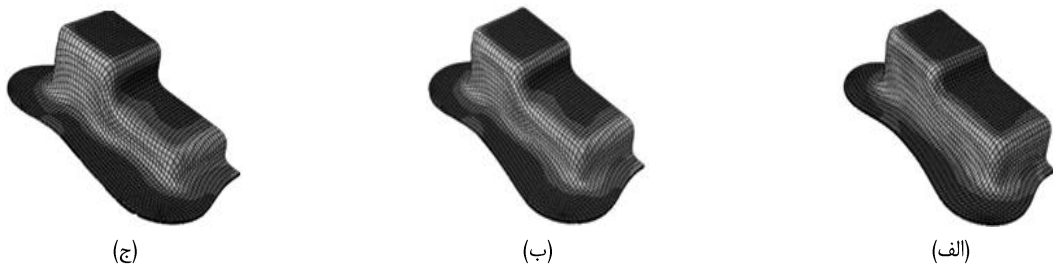
شکل ۱۰. نمودار تأثیر ارتفاع پله بر توزیع ضخامت در قطعه وسط پله‌ای به دست آمده از شبیه‌سازی

به منظور بررسی تأثیر ارتفاع پله در قطعه کنار پله‌ای، با تغییر ارتفاع پله در اندازه‌های مختلف ۱۰، ۱۳ و ۲۰ میلی‌متر در سنبه مورد استفاده، به بررسی تأثیر ارتفاع پله بر توزیع ضخامت پرداخته شد. در شکل ۱۲ نمودار تاثیر ارتفاع پله بر روی توزیع ضخامت در قطعه کنار پله‌ای در حالت آزمایشگاهی نشان داده شده است. با بررسی تأثیر ارتفاع پله بر توزیع ضخامت در قطعه کنار پله‌ای در نظر گرفته شده، مشخص گردید که با افزایش ارتفاع پله، به دلیل افزایش کرنش و کشیدگی بیشتر در پله اول، نازک‌شدگی در ناحیه دیواره پله اول و شعاع گوشه سنبه افزایش یافت. همچنین با افزایش ارتفاع پله، با توجه به اینکه تغییر ارتفاع در پله اول اعمال می‌شود، حداکثر نازک‌شدگی در پله اول خواهد بود، اما با کاهش ارتفاع، نازک‌شدگی در ناحیه دیواره پله دوم ایجاد می‌شود. در شکل ۱۳ قطعه کنار پله‌ای در فشار ۴۰ مگاپاسکال با ارتفاع پله ۱۰، ۱۳ و ۲۰ میلی‌متر نمایش

داده شده است. در شکل ۱۴ قطعه کنار پله‌ای به دست آمده با ارتفاع ۱۰ میلی‌متر در فشار ۴۰ مگاپاسکال نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱۵ نمودار درصد کاهش ضخامت نقطه بحرانی در پله‌های مختلف در قطعه کنار پله‌ای با فشار ۴۰ مگاپاسکال نمایش داده شده است. با توجه به نمودار، مقدار درصد کاهش ضخامت در ارتفاع پله ۱۰، ۱۳ و ۲۰ میلی‌متر به ترتیب ۱۱/۷ و ۱۳ درصد می‌باشد. همچنین با بررسی حداکثر نازک‌شدگی مشخص گردید که حداکثر نازک‌شدگی در ناحیه شعاع گوشه سنبه در پله اول ایجاد می‌شود. در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ تأثیر ارتفاع پله بر حداکثر نازک‌شدگی در نقطه بحرانی در فشارهای مختلف در قطعه وسط پله‌ای و کنار پله‌ای نشان داده شده است. با توجه به نمودارها مشاهده شد که در یک فشار ثابت، با افزایش ارتفاع پله، حداکثر نازک‌شدگی در نقاط بحرانی در قطعه وسط پله‌ای و کنار پله‌ای افزایش می‌یابد.



شکل ۱۲. نمودار تأثیر ارتفاع پله بر توزیع ضخامت قطعه کنار پله در جهت برش طولی، به دست آمده از آزمایش

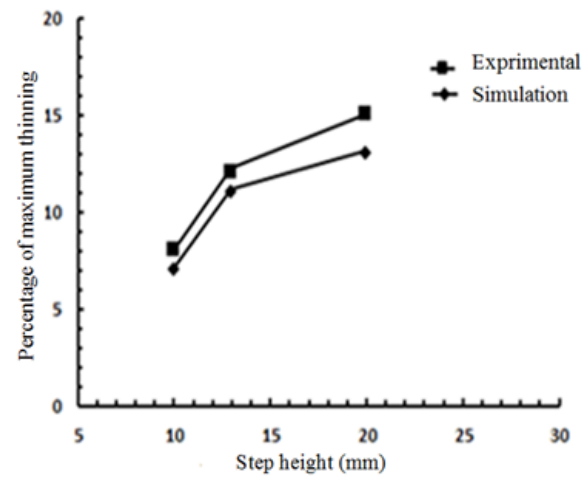
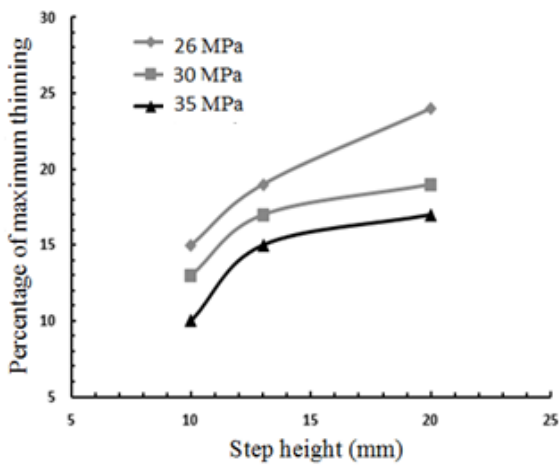


شکل ۱۳. قطعه کنار پله شکل داده شده در فشار ۴۰ مگاپاسکال

(الف) ارتفاع پله ۱۰ میلی‌متر، (ب) ارتفاع پله ۱۳ میلی‌متر، (ج) ارتفاع پله ۲۰ میلی‌متر، بدست آمده از شبیه‌سازی



شکل ۱۴. قطعه کنار پله‌ای با ارتفاع پله ۱۰ میلی‌متر در فشار ۴۰ مگاپاسکال، به‌دست آمده از تست آزمایشگاهی

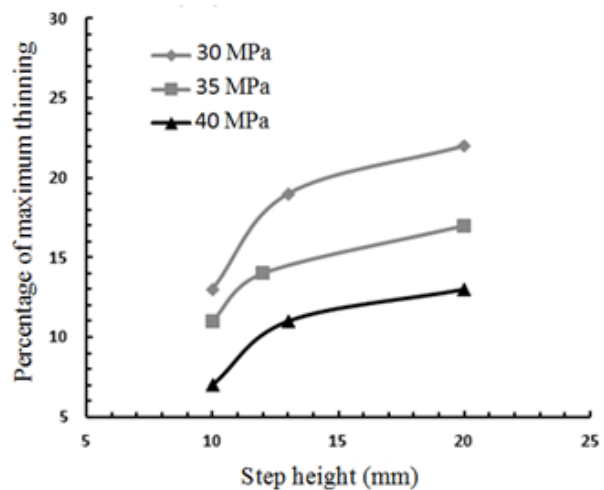
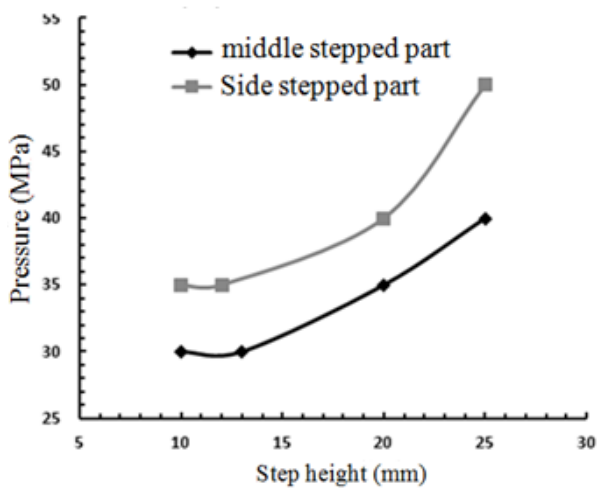


شکل ۱۵. نمودار درصد کاهش ضخامت نقطه بحرانی در پله مختلف

شکل ۱۶. نمودار تأثیر ارتفاع پله روی حداکثر نازک‌شدگی

در قطعه وسط پله‌ای، به‌دست آمده از شبیه‌سازی

در قطعه کنار پله‌ای، به‌دست آمده از شبیه‌سازی و تست آزمایشگاهی



شکل ۱۷. نمودار فشار پرشدگی در ارتفاع پله مختلف

شکل ۱۸. نمودار تأثیر ارتفاع پله بر حداکثر نازک‌شدگی

به‌دست آمده از شبیه‌سازی

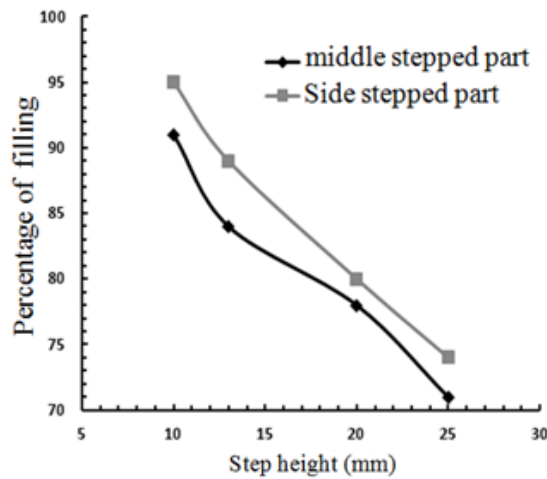
در قطعه وسط پله‌ای، به‌دست آمده از شبیه‌سازی

۳-۴. بررسی فشار پرشدگی در ارتفاع‌های مختلف

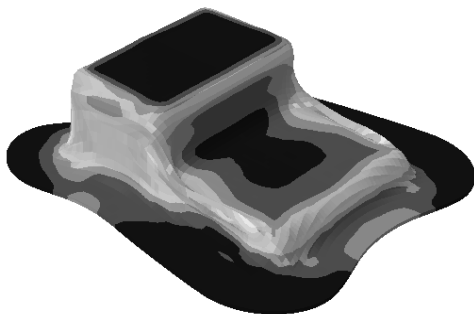
از جمله پارامترهای مهم در شکل‌پذیری قطعات دو پله‌ای، ارتفاع پله است. در شکل ۱۸ نمودار تأثیر ارتفاع پله روی فشار پرشدگی در قطعه وسط پله‌ای و کنار پله‌ای نمایش داده شده است. با توجه به نمودار، با افزایش ارتفاع پله، کشیدگی بیشتری در ورق باید ایجاد شده تا ورق شکل سنبه را به خود بگیرد. به همین منظور به افزایش فشار شکل‌دهی نیاز است. با افزایش فشار شکل‌دهی، به دلیل افزایش سطح تماس بین سنبه و ورق، کشیدگی بیشتری در ورق ایجاد شده و جریان مواد افزایش یافته و سبب پرشدگی کامل قالب خواهد شد. با بررسی نمودار مشخص شد که در قطعه وسط پله‌ای، حداکثر ارتفاع پله که ورق به‌طور کامل شکل گرفته و در فصل مشترک پله اول و دوم

پرشدگی کامل ایجاد می‌گردد، ارتفاع ۲۵ میلی‌متر با فشار پرشدگی ۴۰ مگاپاسکال می‌باشد. همچنین برای قطعه کنار پله‌ای، حداکثر ارتفاع پله ۲۵ میلی‌متر و فشار پرشدگی ۵۰ مگاپاسکال می‌باشد.

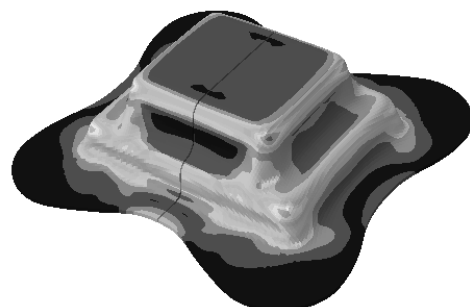
در شکل ۱۹ نمودار تأثیر ارتفاع مختلف روی میزان پرشدگی در قطعه وسط پله‌ای با فشار ۳۵ مگاپاسکال و قطعه کنار پله‌ای با فشار ۴۰ مگاپاسکال نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع پله، میزان پرشدگی قالب کاهش می‌یابد. در شکل ۲۰ قطعه وسط پله‌ای با ارتفاع ۲۵ میلی‌متر در فشار ۴۰ مگاپاسکال نمایش داده شده است. همچنین شکل ۲۱ قطعه کنار پله‌ای به‌دست آمده با ارتفاع ۲۵ میلی‌متر در فشار ۵۰ مگاپاسکال را نشان می‌دهد.



شکل ۱۹. نمودار تأثیر ارتفاع پله بر میزان پرشدگی



شکل ۲۱. قطعه کنار پله‌ای به‌دست آمده با ارتفاع ۲۵ میلی‌متر در فشار ۵۰ مگاپاسکال



شکل ۲۰. قطعه وسط پله‌ای به‌دست آمده با ارتفاع ۲۵ میلی‌متر در فشار ۴۰ مگاپاسکال

۵. نتیجه گیری

موقعیت فصل مشترک پله‌ها افزایش می‌یابد. دلیل این امر افزایش تنش و کشیدگی بیشتر در پله اول می‌باشد. همچنین با بررسی فشار پرشدگی در ارتفاع مختلف مشخص گردید که با افزایش ارتفاع پله، کشیدگی بیشتری در ورق می‌بایستی ایجاد شده تا ورق شکل سنبه را به خود بگیرد و نیاز به افزایش فشار شکل‌دهی می‌باشد. همچنین مشخص گردید که با افزایش ارتفاع پله، میزان پرشدگی قالب کاهش می‌یابد.

در این مقاله، به بررسی تأثیر ارتفاع پله بر حداکثر نازک‌شدگی قطعات مستطیلی پله‌دار پرداخته شد. با توجه به پیچیدگی قطعه و به‌منظور بررسی امکان شکل‌دهی قطعه در یک مرحله، با انجام مراحل شبیه‌سازی و تست‌های آزمایشگاهی، قطعات دو پله‌ای مورد نظر به‌طور کامل در یک مرحله شکل یافتند. با بررسی ارتفاع پله روی نازک‌شدگی مشخص شد که با افزایش ارتفاع پله، نازک‌شدگی در ناحیه شعاع گوشه سنبه، دیواره پله اول و

۶. مأخذ

- [1] Zhang, S. H. "Developments in hydroforming." *Journal of Materials Processing Technology*, 1999.
- [2] Zhang, S. H. J. Danckert. "Development of hydromechanical deep drawing." *Journal of Materials Processing Technology*, 1998.
- [3] Thiruvarudchelvan, S., F. W. Travis. "Hydraulic pressure enhanced cup drawing processes-an Technology." *Journal of Materials Process*, 2003.
- [4] khndeparker, T., M. liewald. "hydroechanical deep drawing of cups with stepped geometries." *Journal of materials processing technology*, 2008.
- [5] Kang, .D., L. lang, X. Meng, J. Juan. "Hydrodynamic deep drawing process." *Journal of Materials Processing Technology*, 2000.
- [6] Lang. L., J. Danckert. J. "Investigation into hydrodynamic deep assisted by radial pressure Part I. Experimental observations of the forming process of aluminum alloy." *Journal of Materials Processin Technology*, 2004.
- [7] Huang-Chi, T., W. Zong-Chun, H. Chinghua, L. Ming-Hu, H. Chin-Chuan. "Investigation of OptimumProcess Parameters on the Sheet Hydroforming of Titanium- Aluminum CladMetal for BatteryHousing." *Journal of materials process technology*, 2005.
- [8] Kim, T., D. Yang, S. Han. "Numerical modeling of the multi-stage sheet pair hydroforming process." *Journal of materials processing technology*, 2004.
- [9] Zhang, S. H., M. R. Jensen, J. Danckert, K. B. Lang, D. C. Kang, "analysis of the mechanical deep drawing of cylindric cups." *Journal of Materials Processing Technology*, 2000.

پی‌نوشت