



بررسی تجربی و عددی فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی ظرف‌های با سطح مقطع مستطیلی و بهینه‌سازی ابعاد ورق اولیه

امیر حق پرست، حمید گرگی*، محمد بخشی، قربان محمد علی نژاد

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۶ بهمن ۱۳۹۴
بازنگری: ۱۸ اردیبهشت ۱۳۹۵
پذیرش: ۹ خرداد ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۱۸ آبان ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

هیدروفورمینگ
قطعات مستطیلی
کشش عمیق هیدرودینامیکی
شبیه‌سازی اجزا محدود
بهینه‌سازی

چکیده: تولید قطعات ورقی با مقطع مستطیلی با روش‌های کشش عمیق سنتی با مشکلات زیادی همراه است. عدم دوار بودن و اختلاف در طول و عرض، شکل‌دهی این قطعات را مشکل می‌سازد. در این مقاله، شکل‌دهی فنجان‌های مستطیلی در طی یک مرحله که امکان تولید آن با روش‌های سنتی و برای عمق و شعاع گوشه مورد نظر وجود نداشته است، با استفاده از روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش، پس از طراحی و ساخت قالب و شکل‌دهی قطعه مستطیلی، نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه و اعتباردهی قرار گرفت؛ به‌علاوه، اثر فشار شکل‌دهی روی توزیع ضخامت قطعه، مورد بررسی قرار گرفت. این نتیجه حاصل شد که با افزایش فشار شکل‌دهی تا حد بهینه، شکل‌پذیری و توزیع ضخامت بهبود می‌یابد. همچنین، با هدف حذف ناحیه فلنجی و بهبود شکل‌پذیری، بهینه‌سازی ابعاد ورق اولیه با استفاده از تجزیه و تحلیل حساسیت انجام گردید و این نتیجه به دست آمد که با بهینه‌سازی شکل ورق می‌توان ضمن بهبود توزیع ضخامت، دوربری نهایی را حذف و یک مرحله از تولید و در نتیجه، زمان و هزینه تولید را کاهش داد. در نهایت نشان داده شد که می‌توان با استفاده از ورق‌های اولیه بهینه، قطعه مستطیلی را در طی یک مرحله و به‌طور مطلوب شکل داد.

۱- مقدمه

امروزه با پیشرفت فناوری و افزایش بازار رقابتی، اغلب صنایع تولیدی قطعات فلزی ورقی، تمایل به تولید محصولات با کیفیت بهتر، کمترین دورریز، همراه با کاهش مراحل، زمان و هزینه تولید دارند. در میان روش‌های شکل‌دهی ورق‌های فلزی، فرآیند هیدروفورمینگ به دلیل امکان دستیابی به نسبت کشش بیشتر، تولید قطعات پیچیده‌تر و کیفیت بالای قطعات تولیدی، مورد توجه زیادی قرار گرفته است [۱]. در این فرآیند یک محفظه حاوی یک نوع سیال، جایگزین قالب سخت می‌شود. با حرکت سنبه به داخل محفظه، سیال درون آن فشرده شده و به زیر ورق فشار وارد می‌کند و آن را محکم به سنبه می‌چسباند و در نتیجه، ورق شکل سنبه را به خود می‌گیرد [۲].

فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی یکی از انواع فرآیندهای هیدروفورمینگ است که دارای مزایایی از جمله استفاده از ابزاربندی ساده‌تر، عدم نیاز به آب‌بند و افزایش نسبت کشش در ورق است. شکل ۱ شماتیک این فرآیند را نشان می‌دهد. طرح قالب در این فرآیند به‌گونه‌ای است که لقی بین ماتریس و ورق‌گیر خیلی کوچک است. از این رو، مقدار کمی از مایع از این فاصله به خارج جریان یافته و در نتیجه، از طرف سیال بر لبه ورق فشار اعمال می‌شود. با اعمال فشار شعاعی به لبه ورق، نیروی کشش کاهش و نسبت کشش افزایش می‌یابد [۳].

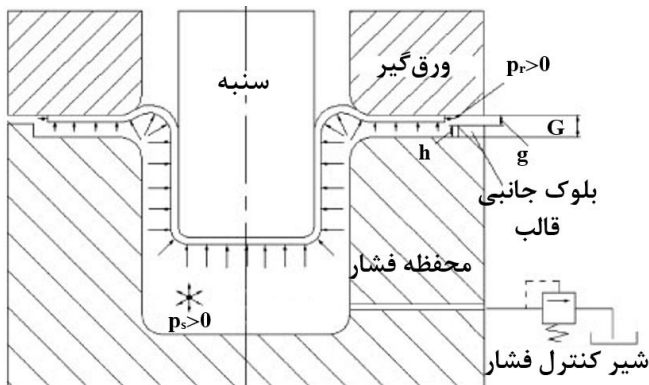


Fig. 1. schematic illustration of hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure [4]

شکل ۱: شماتیک فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی [۴]

ظرف‌های با سطح مقطع مستطیلی کاربرد گسترده‌ای در صنایع خودروسازی، لوازم آشپزخانه و مانند آنها دارند. از جمله این قطعات می‌توان به محفظه روغن خودرو و سینک ظرف‌شویی اشاره کرد. شکل‌دهی این‌گونه قطعات با توجه به غیر دوار بودن و اختلاف در طول و عرض، امری پیچیده است. تولید این قطعات با روش‌های سنتی مانند استمپینگ با مشکلاتی همراه می‌باشد. برای دستیابی به عمق‌های بالاتر و گوشه‌های تیزتر، از عملیات کشش چند مرحله‌ای بهره‌گیری می‌شود که گاهی انجام آن غیر

مقایسه با فرآیند استمپینگ تولید کرد؛ همچنین، با بررسی نازک‌شدگی در نواحی مختلف قطعه شکل گرفته، به این نتیجه رسیدند که با افزایش فشار شکل‌دهی، نازک‌شدگی در نواحی بحرانی کاهش می‌یابد؛ به علاوه، با مقایسه فرآیندهای استمپینگ و هیدروفورمینگ نشان دادند که با به‌کارگیری فرآیند هیدروفورمینگ، نازک‌شدگی بیشینه به میزان ۱۲ درصد کاهش می‌یابد.

شیم و همکاران [۱۰] از روش تحلیل حساسیت برای بهینه‌سازی شکل ورق اولیه در فرآیند کشش عمیق ساده، استفاده نمودند. این محققان جهت بررسی روش ارائه شده، بهینه‌سازی ابعاد ورق اولیه را بر طبق یک الگوریتم، در قطعات ورقی با سطح مقطع مربعی، شبدر مانند و L شکل مورد بررسی قرار دادند. آنها از نرم‌افزارهای I-DEAS و PAM-STAMP برای شبکه‌بندی و تحلیل اجزا محدود استفاده کردند و دریافتند که با توجه به هندسه قطعات تعریف شده، در طی چند مرحله می‌توان بهینه‌سازی ابعاد ورق اولیه را با دقت بالا انجام داد.

پگادا و همکاران [۱۱] الگوریتمی را برای تعیین شکل ورق اولیه بهینه در کشش عمیق فنجان‌های آلومینیومی ارائه کردند. این محققان بهینه‌سازی ورق اولیه را برای فنجان‌های دایره‌ای و مربعی با در نظر گرفتن ناهمسانگردی و پدیده گوشواره‌ای شدن، در شبیه‌سازی مورد بررسی قرار دادند. شکل اولیه ورق، دایره‌ای در نظر گرفته شد و از نرم‌افزار LS-DYNA3D برای شبیه‌سازی فرآیند استفاده کردند. آنها ابتدا فرآیند را شبیه‌سازی کردند و پس از تعیین منحنی هدف، با استفاده از الگوریتم ارائه شده، تا زمانی که مقدار خطا کمتر از مقدار مورد نظر گردد، شبیه‌سازی را مجدداً تکرار کردند و به این نتیجه رسیدند که با روش ارائه شده می‌توان پس از بهینه‌سازی ورق اولیه، به شکل مطلوب برای فلنج در قطعات مورد نظر، دست یافت.

در این مقاله، شکل‌دهی ظرف‌های با سطح مقطع مستطیلی با استفاده از فرآیند کشش عمیق هیدروفرمینگ با فشار شعاعی و بهینه‌سازی ابعاد اولیه ورق برای این قطعات، به صورت شبیه‌سازی و تجربی انجام گردیده که تحقیقی در این زمینه، تاکنون گزارش نشده است. برای انجام شبیه‌سازی اجزا محدود، از نرم‌افزار آباکوس^۱ استفاده شده است و اثر فشار شکل‌دهی به‌عنوان پارامتر فرآیندی، روی توزیع ضخامت قطعه، مورد بررسی قرار گرفت. همچنین با هدف بهبود شکل‌پذیری، حذف ناحیه فلنجی و در نتیجه کاهش زمان و هزینه تولید، بهینه‌سازی ابعاد ورق اولیه با استفاده از تحلیل حساسیت انجام شده و تأثیر آن بر روی شکل فلنج، توزیع ضخامت و نیروی شکل‌دهی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت، برای اعتبار بخشیدن به نتایج بهینه‌سازی در شبیه‌سازی، قطعه مستطیلی با ورق اولیه بهینه در آزمایشگاه شکل داده می‌شود.

۲- مراحل آزمایشگاهی

مجموعه قالب استفاده شده در این تحقیق، از سنبه، ماتریس و ورق گیر تشکیل شده است. شکل ۲ مجموعه قالب را در حالت نصب شده روی

ممکن می‌باشد [۵]. فرآیند هیدروفورمینگ از جمله روش‌هایی است که با توجه به مزایای ذکر شده می‌تواند به‌عنوان یک راه‌کار مناسب برای رفع مشکل موجود در زمینه شکل‌دهی قطعات پیچیده مانند ظرف‌های با سطح مقطع مستطیلی، مطرح گردد. در زمینه هیدروفورمینگ این قطعات، تحقیقات محدودی انجام گرفته است. منگ و همکاران [۶] تأثیر فشار محفظه در کشش عمیق هیدروفرمینگ ظرف با سطح مقطع مستطیلی از جنس آلومینیوم را مورد بررسی قرار دادند. آنها با بیان این که تولید قطعات مستطیلی با فرآیند کشش عمیق چند مرحله‌ای سنتی دارای مشکلاتی از قبیل کیفیت سطح پایین و زمان چرخه تولید بالاست، قطعه مذکور را با فرآیند هیدروفورمینگ و با انتخاب مسیر فشار مناسب در یک مرحله شکل دادند. آنان به این نتیجه رسیدند که با افزایش فشار، شکل‌پذیری بهبود می‌یابد.

رحمانی و همکاران [۷] به بررسی تجربی و شبیه‌سازی پارامترهای مؤثر در کشش عمیق هیدروفرمینگ ورقی با مقطع مربعی پرداختند. این محققان با استفاده از شبیه‌سازی اجزا محدود اثر پارامترهایی مانند فشار شکل‌دهی، ضریب اصطکاک و ضخامت ورق اولیه را روی ناحیه کاری که بیانگر حداکثر نسبت کشش قابل دستیابی بدون ایجاد پارگی در ورق است، مورد بررسی قرار دادند. آنان به این نتیجه رسیدند که با افزایش ضریب اصطکاک بین ورق با ماتریس، و ورق با ورق‌گیر، ناحیه کاری محدود می‌گردد، در حالی که با افزایش ضریب اصطکاک بین ورق با سنبه ناحیه کاری بزرگ‌تر می‌شود. همچنین، با افزایش ضخامت ورق اولیه می‌توان به ناحیه کاری بزرگ‌تر و نسبت کشش بالاتری دست یافت. در پایان با انجام آزمایش‌های تجربی، نتایج شبیه‌سازی را مورد مقایسه و اعتباردهی قرار دادند.

کیم و همکاران [۸] شکل‌دهی یک قطعه ورقی مستطیلی پله‌ای را در فرآیند هیدروفورمینگ چند مرحله‌ای به صورت تجربی و شبیه‌سازی مورد بررسی قرار دادند. این پژوهشگران در ابتدا قطعه را در سه مرحله شبیه‌سازی کرده و شکل‌پذیری قطعه را مورد آزمایش قرار دادند. با انجام آزمایش، به این نتیجه رسیدند که با به‌کارگیری روش هیدروفورمینگ سه مرحله‌ای، نازک‌شدگی در نواحی بحرانی کاهش می‌یابد. در ادامه، با بررسی شکل‌دهی تک مرحله‌ای قطعه مذکور مشاهده کردند که با توجه به پیچیدگی هندسه تعریف شده، به دلیل نازک‌شدگی شدید در ناحیه شعاع سنبه، قطعه دچار پارگی خواهد شد. آنان همچنین، به این نتیجه رسیدند که با استفاده از فرآیند هیدروفورمینگ سه مرحله‌ای، حداکثر نازک‌شدگی در قطعه به مقدار ۶ درصد کاهش می‌یابد.

کانگ و همکاران [۹] یک مطالعه مقایسه‌ای از فرآیندهای هیدروفورمینگ و استمپینگ برای شکل‌دهی مخزن سوخت خودرو با استفاده از تحلیل اجزا محدود انجام دادند. این محققان ابتدا دو فرآیند را با مسیرهای بارگذاری مختلف شبیه‌سازی کردند و نتایج آن را با نمونه‌های ساخته شده مورد مقایسه و اعتباردهی قرار دادند. آنان به این نتیجه رسیدند که با فرآیند هیدروفورمینگ می‌توان یک مخزن سوخت با توزیع ضخامت یکنواخت‌تر در

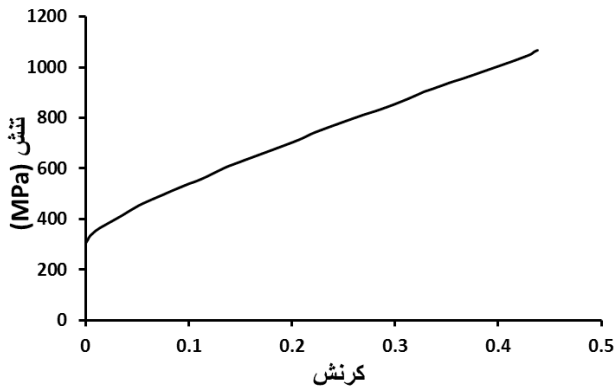


Fig. 3. true stress-strain curve of SS304 sheet

شکل ۳: نمودار تنش- کرنش حقیقی ورق SS304

جدول ۱: خواص فیزیکی و مکانیکی ورق SS304

Table 1. physical and mechanical properties of SS304 sheet

مقدار	خواص مکانیکی
۰/۷۸	ضخامت (mm)
۱۹۶	مدول الاستیسیته (GPa)
۲۹۳	تنش تسلیم (MPa)
۰/۳	ضریب پواسون
۰/۴۵	نمای کرنش سختی n
۱۳۰۰	ضریب مقاومت ماده k (MPa)
۰/۹۱۱	r0 ناهمسانگردی در جهت نورد
۱/۱۲۷	r45 ناهمسانگردی در جهت ۴۵
۰/۸۴۵	r90 ناهمسانگردی در جهت عمود بر نورد

کشش در سه امتداد ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به راستای نورد، به اندازه ۱۵ درصد کرنش کشیده شدند و با اندازه‌گیری عرض (w) و ضخامت (t) نمونه، با استفاده از رابطه زیر و با توجه به ثابت بودن حجم ماده، مقدار ناهمسانگردی در آن سه جهت، به دست آمد.

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = \frac{\ln\left(\frac{w}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{w_0 \times l_0}{w \times l}\right)} \quad (1)$$

به منظور بررسی شکل‌پذیری ظرف با سطح مقطع مستطیلی، از مسیر فشار نشان داده شده در شکل ۴ استفاده شده است. با توجه به نمودار نشان داده شده در شکل، بخش oa فشار پیش بشکه‌ای است که توسط واحد هیدرولیکی ایجاد می‌شود. ab مسیر فشار تا رسیدن به حداکثر فشار و bc مسیر فشار ثابت بیشینه را نشان می‌دهد که در طی آن شیر کنترل فشار باز شده و سیال از طریق آن خارج می‌گردد. شیب خط ab به سرعت سنبه، شکل سنبه، نوع سیال و ضخامت ورق مربوط می‌شود.

دستگاه آزمایش و نیز اجزای اصلی آن را نشان می‌دهد؛ به منظور افزایش دقت هم‌راستایی سنبه و ورق گیر و در نتیجه هدایت دقیق سنبه به درون محفظه قالب، از یک راهنما استفاده شده که روی ورق گیر تعبیه شده است. آزمایش‌ها به وسیله یک دستگاه آزمایش اونیورسال ۶۰۰ کیلو نیوتنی انجام شده است که توسط یک واحد کامپیوتری کنترل می‌شود و قابلیت تنظیم سرعت تا ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و ارائه نمودار نیرو-جابجایی را دارد. برای اعمال فشار سیال در فرآیند هیدروفرمینگ، از یک پمپ هیدرولیکی که قابلیت ایجاد فشار تا ۵۰ مگاپاسکال را دارا می‌باشد، به کار گرفته شده است. برای کنترل فشار نیز از شیر اطمینان و فشارسنج، استفاده گردید.

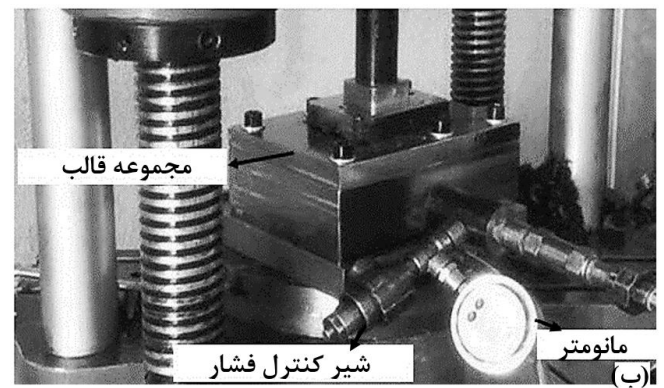
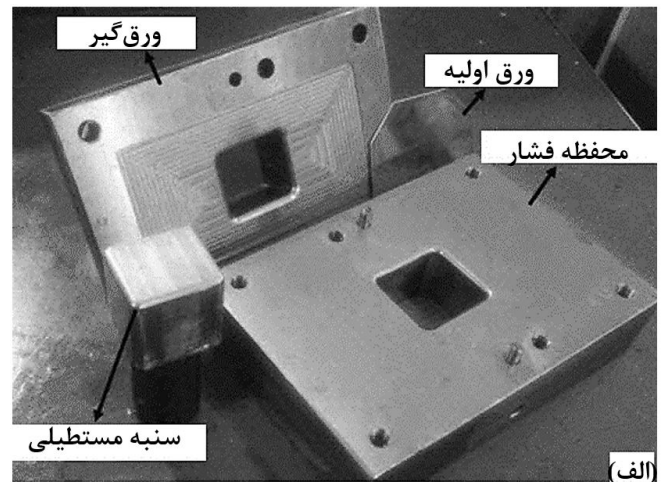


Fig. 2. a) details of the die set, b) die set assembled on the testing machine

شکل ۲: (الف) اجزای مجموعه قالب، (ب) مجموعه قالب در حالت نصب شده بر روی دستگاه آزمایش

ورق اولیه استفاده شده در این پژوهش از جنس فولاد زنگ نزن SS304 با ضخامت ۰/۷۸ میلی‌متر می‌باشد. جهت تعیین خواص مکانیکی و نمودار تنش-کرنش و ناهمسانگردی ورق مورد استفاده، نمونه‌های کشش با استفاده از استاندارد ASTM E8 در سه راستای ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه با دستگاه وایرکات بریده و با دستگاه آزمایش کشش، کشیده شدند. خواص مکانیکی و فیزیکی ورق در جدول ۱ و نمودار تنش-کرنش حقیقی در شکل ۳ ارائه گردیده است. برای به دست آوردن ناهمسانگردی در ورق مورد استفاده، سه نمونه

ورق مستطیلی با گوشه‌های بریده شده (هشت ضلعی) می‌باشد که نسبت به ورق اولیه مستطیلی برای شکل‌دهی قطعه مورد نظر ترجیح داده می‌شود [۱۲]. اجزای قالب مطابق شکل ۶ مدل شدند. مشخصات ابعادی قالب مورد استفاده برای شکل‌دهی قطعه مستطیلی در جدول ۲ نشان داده شده است. برای تعریف شرایط تماسی بین اجزا از مدل اصطکاکی کولمب^۳ استفاده شده است. برای تعیین ضرایب اصطکاک، با انجام چندین شبیه‌سازی و مقایسه منحنی‌های توزیع ضخامت و نیروی سنبه با نتایج تجربی، بهترین ضریب اصطکاک در سطح تماس سنبه و ورق ۰/۱۲ و در سطح تماس بین ورق‌گیر با ورق و نیز در سطح تماس قالب با ورق ۰/۰۵ در نظر گرفته شد. ضرایب به دست آمده در مقایسه با آنچه در مراجع [۷، ۱۳] گزارش شده اختلاف کمی دارند. در مرجع [۷] ضرایب مذکور به ترتیب ۰/۱ و ۰/۰۵ و در مرجع [۱۳] به ترتیب ۰/۱۴ و ۰/۰۴ تعیین شده بودند.

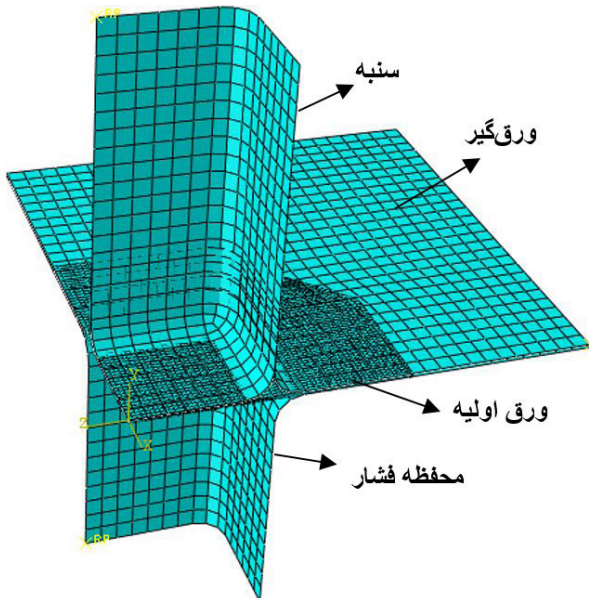


Fig. 6. assembled model and meshing of the parts in simulating the hydroforming process

شکل ۶: مدل مونتاژ شده و نحوه شبکه‌بندی اجزا در شبیه‌سازی فرآیند هیدروفرمینگ

جدول ۲: مشخصات ابعادی قالب مورد استفاده برای قطعه مستطیلی

Table 2. dimensional characteristics of the die for rectangular part

مقدار (mm)	مشخصه
۰/۷۸	ضخامت
۶۱/۵ × ۵۱/۵	ابعاد سنبه
۶	شعاع سنبه و ماتریس
۶۳/۵ × ۵۸/۵	ابعاد ماتریس
۰/۰۷	فاصله بین سطح بالایی ورق با ورق‌گیر قبل از شروع فرآیند

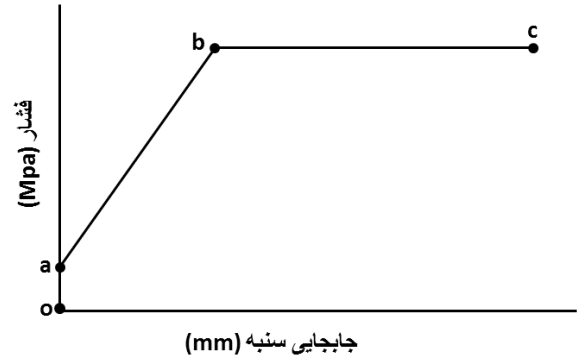


Fig. 4. pressure path used in experiments and simulations

شکل ۴: مسیر فشار مورد استفاده در آزمایش‌ها و شبیه‌سازی

به منظور تحلیل دقیق‌تر توزیع ضخامت، قطعه مورد نظر مطابق شکل ۵ به چهار ناحیه کف قطعه کار A، شعاع لبه سنبه B، دیواره قطعه کار D و ناحیه بحرانی شعاع گوشه سنبه C (محل ایجاد حداکثر نازک‌شدگی) تقسیم‌بندی گردید. (نقطه O مرکز قطعه کار می‌باشد)

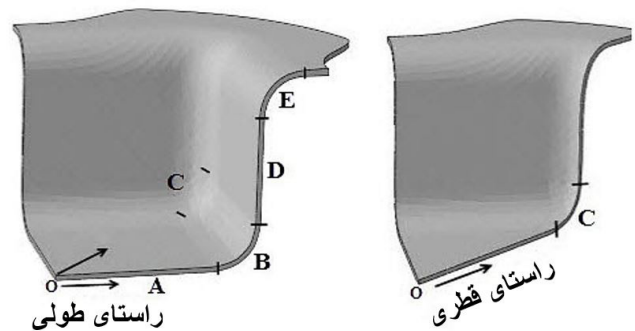


Fig. 5. dividing the workpiece into different regions to study thickness distribution, a) one fourth of the workpiece, A workpiece base, B punch corner radius, D workpiece wall, E die corner radius, B) diametrical direction, critical area C at the punch corner radius (place of maximum thinning)

شکل ۵: ناحیه‌بندی قطعه کار در راستای طولی و قطری برای بررسی توزیع ضخامت، A کف قطعه کار، B شعاع لبه سنبه، D دیواره قطعه کار، E شعاع لبه ماتریس و ناحیه بحرانی C در شعاع گوشه سنبه (محل ایجاد حداکثر نازک‌شدگی)

۳- شبیه‌سازی اجزا محدود

در این تحقیق از نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس ۶،۱۰،۱ برای شبیه‌سازی استفاده شده است. با توجه به متقارن بودن هندسه قطعه نسبت به محور طولی و عرضی، فقط یک‌چهارم از مجموعه قالب و ورق مدل شده است. مجموعه قالب به صورت صلب گسسته^۱ و با جزء چهار گره‌ای R3D4 مدل شده و با توجه به این که قالب به صورت صلب مدل شد، خواص مکانیکی به آن نسبت داده نشد. به منظور بررسی شکل‌پذیری و اعمال فشار شعاعی به لبه ورق، ورق به صورت شکل‌پذیر^۲ با جزء هشت گره‌ای C3D8R مدل شده و تعداد جزء ورق در امتداد ضخامت چهار می‌باشد. ورق اولیه مورد بررسی،

- 1 Discrete rigid
- 2 Deformable

۴-۱- روش تحلیل حساسیت

در روش تحلیل حساسیت، پس از تعیین منحنی هدف برای ناحیه فلنجی، شکل ورق اولیه حدس زده می‌شود. جهت اثبات نظریه آن، فرض می‌شود (X) نشان‌دهنده بردار موقعیت یک نقطه مادی واقع در خارجی‌ترین گره ورق اولیه قبل از تغییر شکل و (x) نشان‌دهنده بردار موقعیت همان نقطه مادی پس از تغییر شکل نهایی باشد. با بلانک اولیه تعریف شده توسط بردار موقعیت (X)، فرآیند تغییر شکل به روش اجزا محدود تجزیه و تحلیل شده است. شکل‌های ۷ (الف)، (ب) و (ج) جابه‌جایی یک گره در طی تغییر شکل و جزئیات آن را نشان می‌دهد. اگر پس از تجزیه و تحلیل، بردار موقعیت (x) روی منحنی هدف (X_T) منطبق نشود، موقعیت آن نقطه مادی قبل از تغییر شکل (X) باید به منظور ایجاد منحنی شکل یافته منطبق با منحنی هدف (X_T) انتقال یابد. انتقال (X)، یعنی تغییر شکل ورق اولیه که با معرفی مفهوم حساسیت شکل صورت می‌گیرد. حساسیت شکل به صورت عددی با در نظر گرفتن دو ورق، یعنی ورق اصلی و ورق انحراف یافته، به دست می‌آید. بردار موقعیت نقاط مادی بر روی منحنی ورق انحراف یافته، از اطلاعات تجزیه و تحلیل تغییر شکل با ورق اولیه تعریف شده توسط (X) به صورت زیر تعیین می‌شود [۱۰].

$$X_\delta = X + \delta N \quad (7)$$

که در آن (X_δ) نشان‌دهنده بردار موقعیت یک نقطه مادی واقع در خارجی‌ترین گره ورق انحراف یافته قبل از تغییر شکل، (N) بردار واحد در جهت تغییر شکل در مرحله اول و (δ) مقدار انحراف است.

با ورق اولیه انحراف یافته تعریف شده توسط (X_δ)، تجزیه و تحلیل فرآیند تغییر شکل آن انجام می‌شود. سپس (x_δ) بردار موقعیت نقاط مادی تغییر شکل یافته که پس از تغییر شکل ورق اولیه تعریف شده با (X_δ) حاصل می‌شود، به دست می‌آید. این چرخه برای به دست آوردن کلیه نقاط روی لبه ورق، مجدداً انجام می‌گیرد.

حساسیت به تغییر شکل در هر گره به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۰].

$$S = \frac{|X_\delta - X|}{|x_\delta - x|} \quad (8)$$

تا زمانی که (x) روی منحنی هدف منطبق شود، موقعیت اولیه هر گره بر طبق رابطه زیر انتقال می‌یابد [۱۰].

$$X^i = X^{i-1} + \varepsilon SN \quad (9)$$

که در آن (ε) خطای انحراف از منحنی هدف بوده و با فاصله بین (X_T) و (x) تعریف می‌شود. (N) بردار واحد در جهت تغییر شکل در حالت اولیه است و بالانویس i نیز به معنی تعداد تکرارها می‌باشد. در این پژوهش پس از تعیین منحنی هدف، برای شروع یک ورق اولیه در نظر گرفته شده و تعداد ۵۸ گره در محیط آن (کل گره‌ها در یک چهارم از محیط ورق اولیه) برای

یکی از مهم‌ترین موارد در شبیه‌سازی‌ها، پیش‌بینی پارگی می‌باشد. در این پژوهش فرض گردیده که رفتار پلاستیسیته ماده ناهمسانگرد است که با استفاده از معیار هیل ۴۸ به نرم‌افزار معرفی شد؛ اما رفتار گلوبی شدن ماده همسانگرد فرض گردید. براساس مرجع [۱۴] از معیار حداکثر مقدار نازک‌شدگی برای بررسی پارگی ورق استفاده شده است. حداکثر نازک‌شدگی با استفاده از رابطه (۲) مشخص می‌شود.

$$\% \text{thinning} = \frac{t_0 - t_f}{t_0} \quad (2)$$

که t_0 ضخامت اولیه ورق می‌باشد و مقدار ضخامت نهایی t_f از رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$t_f = t_0 \exp(\varepsilon_i) \quad (3)$$

از طرفی کرنش مهندسی اصلی (e_θ) در شرایط کرنش صفحه‌ای از طریق رابطه (۴) تخمین زده می‌شود [۱۴]:

$$e_\theta = \frac{\left(23.3 + \frac{360}{25.4} t_0\right) \left(\frac{n}{0.21}\right)}{100} \quad (4)$$

که در آن، n نمای کرنش سختی و t_0 ضخامت اولیه ورق می‌باشد. با توجه به برقراری رابطه‌های (۵) و (۶) در شرایط کرنش صفحه‌ای، مقدار کرنش حقیقی اصلی و کرنش ضخامتی ε_i تعیین می‌شود.

$$e_\theta = \ln(1 + e_\theta) \quad (5)$$

$$\varepsilon_i = -e_\theta \quad (6)$$

با استفاده از رابطه‌های (۵) و (۶) و محاسبه (ε_i) و جایگذاری آن در رابطه (۳) مقدار t_f به دست می‌آید و متعاقب آن طبق رابطه (۲) حداکثر نازک‌شدگی محاسبه می‌شود. براساس روابط فوق مقدار (t_f) (کم‌ترین ضخامت مجاز) ۰/۴۵ میلی‌متر و در نتیجه مقدار حداکثر نازک‌شدگی برای ورق SS304 به میزان ۴۲ درصد به دست آمد.

۴-۲- بهینه‌سازی ابعاد ورق اولیه

بهینه‌سازی ابعاد ورق اولیه با هدف بهبود شکل‌پذیری، افزایش کیفیت قطعه تولیدی، کاهش چروکیدگی و حذف ناحیه فلنجی و با در نظر گرفتن ابعاد و هندسه مورد نظر برای ناحیه فلنجی و در نتیجه حذف فرآیند دوربری پس از شکل‌دهی، انجام می‌شود. تعیین شکل بهینه ورق اولیه، به دلیل پیچیدگی رفتار مواد بسیار مشکل است. در این پژوهش، بهینه‌سازی ابعاد اولیه ورق، طی چند مرحله به روش تحلیل حساسیت انجام گردید.

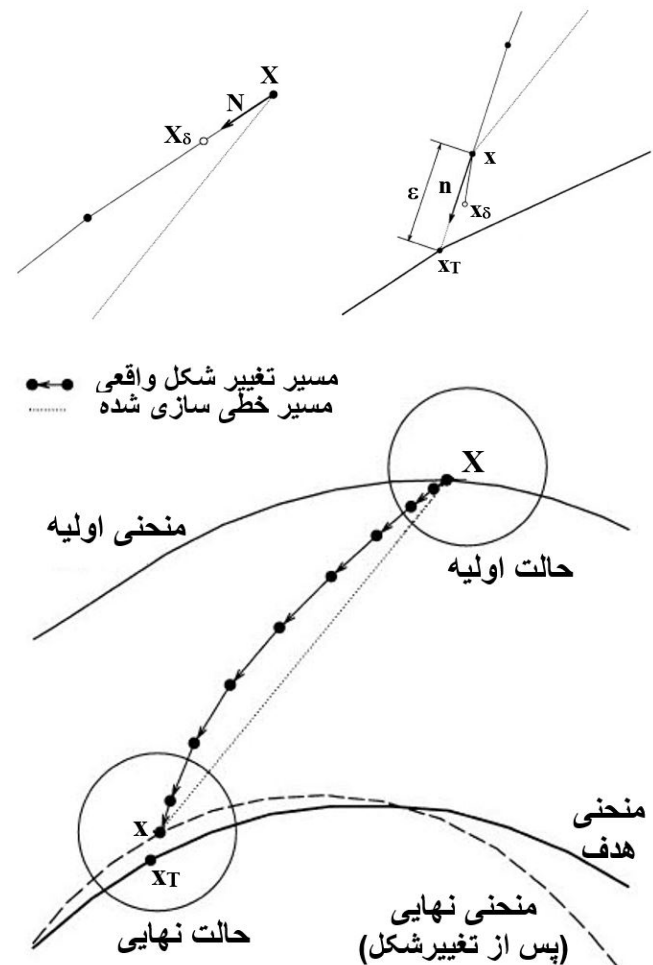
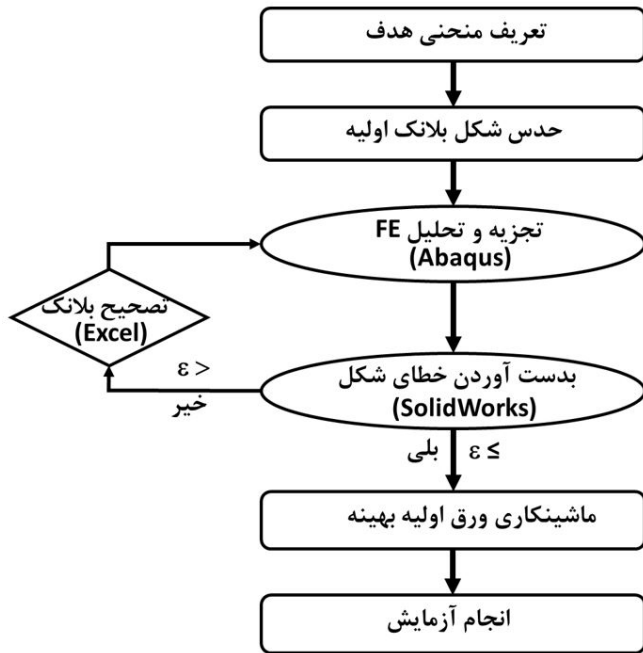


Fig. 7. initial position of the node, b) final position of the node, c) the displacement path of an outer node during the process [10]

شکل ۷: الف: موقعیت اولیه گره، ب: موقعیت نهایی گره، ج: مسیر جابه‌جایی یک گره خارجی در طول فرآیند [۱۰]

انجام محاسبات تعیین شد که این تعداد در هر مرحله با توجه به تغییر منحنی ورق اولیه تغییر می‌کند. پس از تجزیه و تحلیل فرآیند در نرم‌افزار آباکوس، اختلاف بین منحنی‌های مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار سالیدورکس^۱ به دست آمده و داده‌ها به نرم‌افزار اکسل انتقال داده شده و کلیه محاسبات با توجه به روابط (۸) و (۹) انجام شده است. لازم به ذکر است که در این پژوهش از در نظر گرفتن یک ضریب حساسیت ثابت برای کلیه گره‌ها اجتناب شده و ضریب حساسیت برای تک تک گره‌ها با استفاده از رابطه (۸) به دست آمده است، این کار از طرفی زمان‌بر بوده؛ اما دقت بهینه‌سازی را افزایش داده و به همگرایی سرعت می‌بخشد. به این ترتیب پس از اصلاح شکل بلانک، 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 می‌شود. نمودار شکل ۸، روند بهینه‌سازی را در این پژوهش نشان می‌دهد که به مفهوم روش تصحیح خطا می‌پردازد.

1 Solidworks

Fig. 8. the proposed algorithm for optimization of the initial sheet blank
شکل ۸: الگوریتم پیشنهادی برای بهینه‌سازی ابعاد ورق اولیه

۵- نتایج و بحث

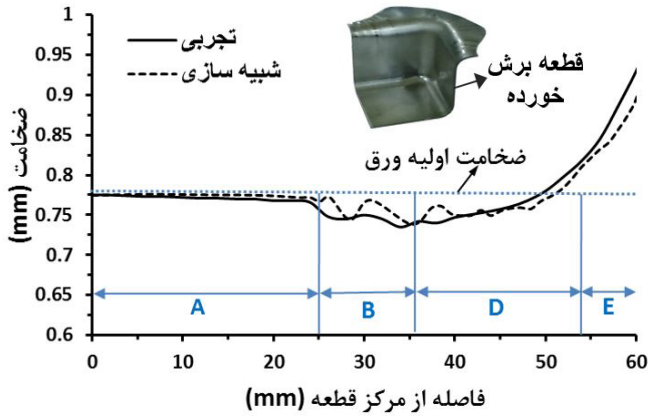
۵-۱- تأیید شبیه‌سازی

شکل ۹ قطعه شکل داده شده با روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی را در حالت‌های تجربی و شبیه‌سازی در فشار ۲۲ مگاپاسکال نشان می‌دهد. به منظور افزایش دقت در تأیید شبیه‌سازی، توزیع ضخامت قطعه در دو راستای طولی و قطری (در ناحیه بحرانی شعاع گوشه سنبه) مطابق شکل ۱۰ و نمودار نیرو-جابه‌جایی سنبه مطابق شکل ۱۱ در حالت‌های تجربی و شبیه‌سازی مورد مقایسه قرار گرفتند. همان‌طور که از شکل‌ها پیداست نتایج تجربی با نتایج شبیه‌سازی مطابقت خوبی دارد و حداکثر اختلاف بین آنها ۶ درصد می‌باشد.

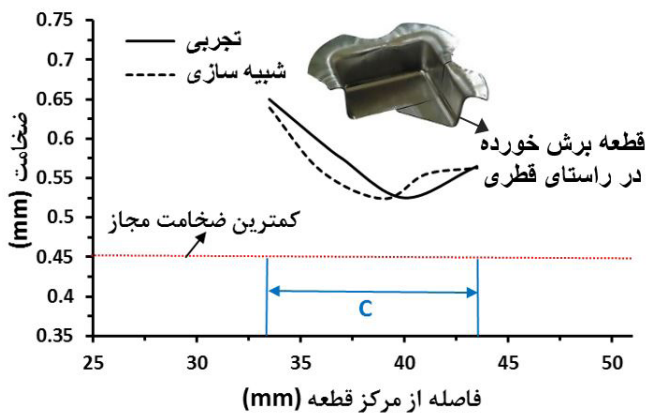
به منظور بررسی توزیع ضخامت، قطعه شکل داده شده با استفاده از دستگاه وایرکات در دو راستای مورد نظر برش داده شده است. همچنین، جهت تأیید عدد به دست آمده برای نازک‌شدگی مجاز از رابطه (۲) تا (۶) در بخش ۳، کمترین ضخامت چند نمونه تجربی شکل داده شده در شرایط مختلف، اندازه‌گیری شد و این نتیجه حاصل شد که قطعه مستطیلی تا ضخامت کمینه ۰/۴۶ میلی‌متر به صورت سالم شکل گرفته و در ضخامت ۰/۴۳ میلی‌متر دچار گلویی شدن می‌شود؛ بدین ترتیب عدد به دست آمده از روابط مذکور (۰/۴۵ میلی‌متر) مورد تأیید قرار گرفته و به عنوان معیاری برای حداکثر نازک‌شدگی مجاز در این پژوهش در نظر گرفته شد.

۵-۲- مقایسه کشش عمیق ساده و هیدروفورمینگ

در این بخش پس از اطمینان از صحت شبیه‌سازی جهت تعیین بهترین روش شکل‌دهی قطعه مستطیلی در عمق ۳۵ میلی‌متر یک مقایسه بین دو



(الف)



(ب)

Fig. 10. thickness distribution diagram of the rectangular part at 22 MPa pressure and 30 mm depth (from A to E in Fig. 7) a) Longitudinal, b) Diametrical direction (maximum thinning at punch corner radius)

شکل ۱۰: نمودار توزیع ضخامت قطعه مستطیلی در فشار ۲۲ مگاپاسکال و عمق ۳۰ میلی‌متر، (از A تا E در شکل ۷)، (الف): راستای طولی و (ب): راستای قطری (حداکثر نازک‌شدگی در شعاع گوشه سنبه)

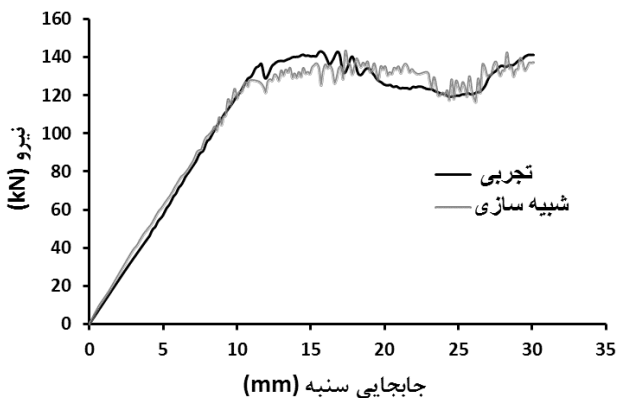
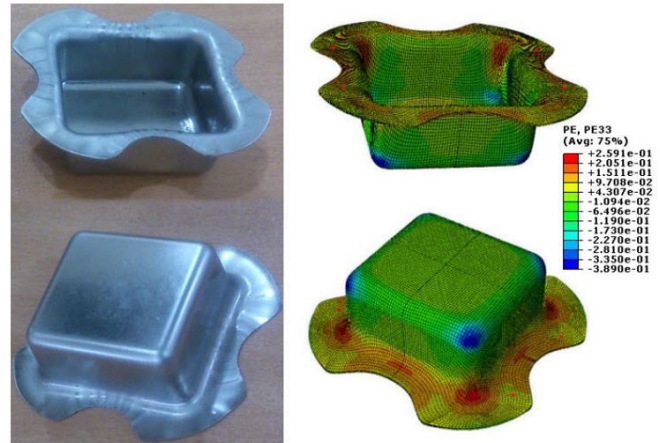


Fig. 11. punch force-displacement diagram for rectangular part

شکل ۱۱: نمودار نیرو-جابجایی سنبه برای قطعه مستطیلی



(الف)

(ب)

Fig. 9. rectangular part formed by hydroforming process at 22 MPa pressure, drawing depth 30mm, a) experimental, b) simulation

شکل ۹: ظرف با سطح مقطع مستطیلی شکل داده شده با فرآیند هیدروفرمینگ در فشار ۲۲ مگاپاسکال، عمق کشش ۳۰ میلی‌متر، (الف): تجربی (ب): شبیه‌سازی

فرآیند کشش عمیق ساده و کشش عمیق هیدروپلاستیکی با فشار شعاعی با فشار پیش بشکه‌ای ۲/۵ مگاپاسکال و حداکثر فشار ۲۵ مگاپاسکال صورت گرفت. نتایج این مقایسه در شبیه‌سازی و قطعات شکل یافته در آزمایش، به ترتیب در شکل ۱۲ ارائه گردیده است.

همان‌طور که شکل ۱۲ (ب) نشان می‌دهد، نازک‌شدگی در شعاع گوشه سنبه در قطعه شکل یافته به روش کشش عمیق ساده بیشتر از معیار نازک‌شدگی محاسبه شده می‌باشد و قطعه در این ناحیه دچار پارگی می‌شود؛ در حالی که در روش هیدروفرمینگ قطعه به صورت سالم شکل می‌گیرد.

۵-۳- بررسی تأثیر فشار شکل‌دهی روی توزیع ضخامت

یکی از پارامترهای مهم در فرآیند هیدروفرمینگ، فشار شکل‌دهی می‌باشد. استفاده از مسیر فشار مطلوب در شکل‌پذیری قطعه و توزیع ضخامت یکنواخت حائز اهمیت است. در این مقاله به منظور بهبود توزیع ضخامت و دستیابی به فشار مناسب جهت شکل‌دهی قطعه در عمق ۳۵ میلی‌متر به بررسی تأثیر فشار شکل‌دهی پرداخته می‌شود.

شکل ۱۳ مسیر فشار مطلوب برای فشارهای نهایی متفاوت را نشان می‌دهد و شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نمودار تأثیر فشار بر روی توزیع ضخامت در فشارهای بیشینه ۱۰، ۱۵ و ۲۵ مگاپاسکال و با پیش‌فشار ثابت ۲/۵ مگاپاسکال را در راستای طولی و قطری نشان می‌دهد. دلیل انتخاب فشارهای یاد شده این است که در فشارهای کمتر از ۱۰ مگاپاسکال نازک‌شدگی قطعه در ناحیه بحرانی افزایش یافته و همان‌طور که در بخش قبل نشان داده شد، بدون فشار سیال (کشش عمیق ساده) قطعه مستطیلی در عمق مورد بررسی دچار پارگی می‌شود. همچنین شکل‌دهی قطعه مستطیلی در فشارهای بیشتر از ۲۵ مگاپاسکال نیز مورد بررسی قرار گرفت و با توجه به این که تأثیری در بهبود توزیع ضخامت نداشته و تنها باعث افزایش نیروی شکل‌دهی می‌شد،

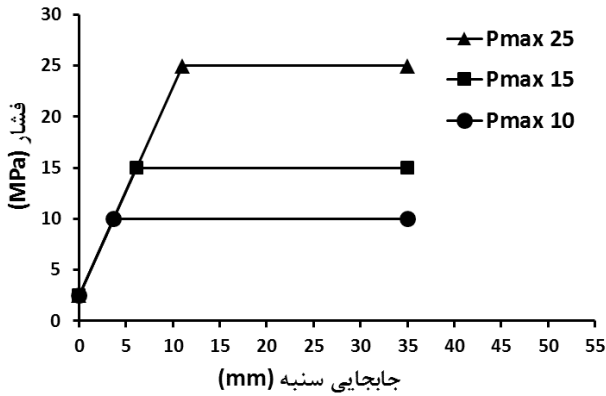


Fig. 13. pressure path diagram at different maximum pressures
شکل ۱۳: نمودار مسیر فشار در فشارهای بیشینه مختلف

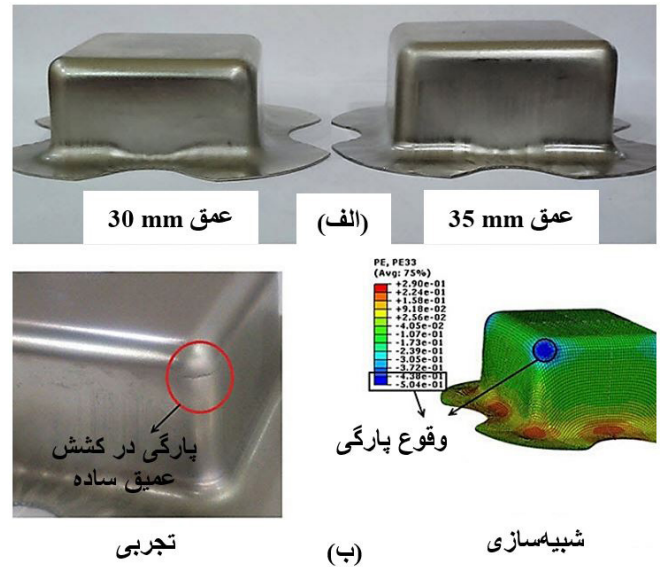


Fig. 12. rectangular single-stage hydro formed part at 25 MPa, drawing depth 35 mm b) tearing occurrence of rectangular part at 35mm depth in simple deep drawing, experiment and simulation, PE33 represents thickness strain in each element.

شکل ۱۲: (الف): طرف‌های با سطح مقطع مستطیلی شکل داده شده در عمق ۳۵ میلی‌متر و در یک مرحله با روش هیدروفورمینگ در فشار ۲۵ مگاپاسکال، (ب): وقوع پارگی در شکل‌دهی طرف مستطیلی در عمق ۳۵ میلی‌متری با روش کشش عمیق ساده در آزمایش و شبیه‌سازی، PE33 بیانگر کرنش ضخامت می‌باشد.

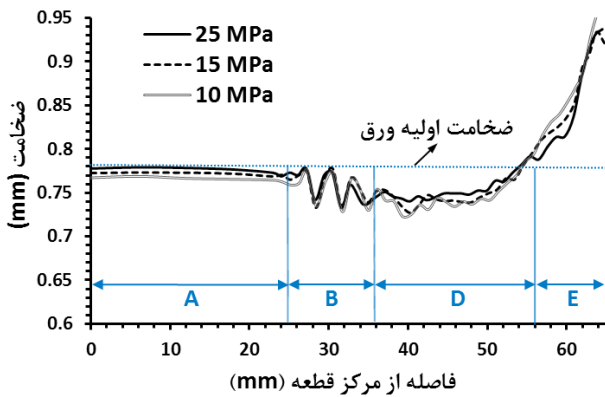


Fig. 14. Diagram of pressure effect on thickness distribution, Longitudinal direction (from A to E in Fig. 7), obtained from simulation
شکل ۱۴: نمودار تأثیر فشار بر روی توزیع ضخامت، راستای طولی (از A تا E در شکل ۷)، به دست آمده از شبیه‌سازی

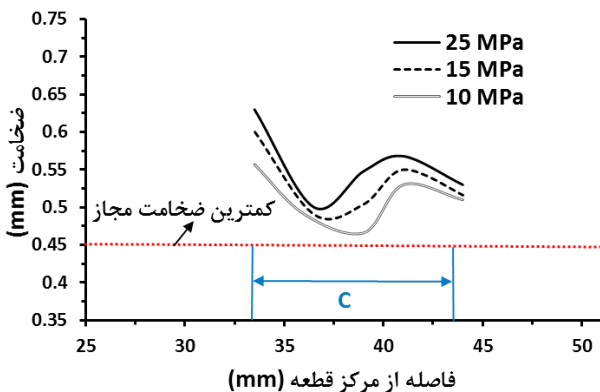


Fig. 15. Diagram of pressure effect on thickness distribution, diametrical direction and maximum thinning at punch corner radius, obtained from simulation

شکل ۱۵: نمودار تأثیر فشار بر روی توزیع ضخامت، راستای قطری و حداکثر نازک‌شدگی در شعاع گوشه سنبه، به دست آمده از شبیه‌سازی

از آوردن آن صرف‌نظر شد. با بررسی نمودارهای به دست آمده و با توجه به شکل ۵، در ناحیه کف سنبه A، با توجه به اینکه فشار سیال در طول فرآیند در ناحیه کف سنبه به صورت عمود وارد شده، ورق با سنبه در تماس بوده و نیروی عمودی حاصل از فشار و اصطکاک در این ناحیه بیشترین مقدار خود را دارا می‌باشد. در نتیجه، از لغزش ورق در این ناحیه جلوگیری می‌شود و نازک‌شدگی کمترین مقدار خود را دارد. از طرفی در ناحیه بحرانی شعاع گوشه سنبه C به دلیل خمش کششی ایجاد شده در ناحیه شعاع خم، نازک‌شدگی حداکثر می‌باشد. دیواره قطعه D نیز در طول فرآیند در اثر کشش ایجاد شده دچار نازک‌شدگی می‌شود. در نتیجه با افزایش فشار شکل‌دهی، به دلیل افزایش سطح تماس بین سنبه و ورق، اصطکاک افزایش یافته و با کاهش لغزش بین ورق و سنبه، نازک‌شدگی کاهش و توزیع ضخامت بهبود یافته و حداکثر نازک‌شدگی قطعه در شعاع گوشه سنبه، کاهش می‌یابد.

۴-۵ بررسی تأثیر بهینه‌سازی ابعاد ورق اولیه در شکل‌دهی طرف با سطح مقطع مستطیلی

طرف‌های با سطح مقطع مستطیلی به دلیل غیر دوار بودن و جریان غیریکنواخت مواد در طول فرآیند شکل‌دهی، دارای فلنج با هندسه پیچیده می‌باشند. اختلاف در طول، عرض و گوشه‌های نسبتاً تیز در ظرف مستطیلی مورد بررسی، بهینه‌سازی ورق اولیه و کنترل جریان مواد را پیچیده‌تر می‌کند. در این بخش بهینه‌سازی ابعاد اولیه ورق با توجه به مراحل تشریح شده در بخش ۴، به روش حساسیت انجام شد. با توجه به تقارن طولی و

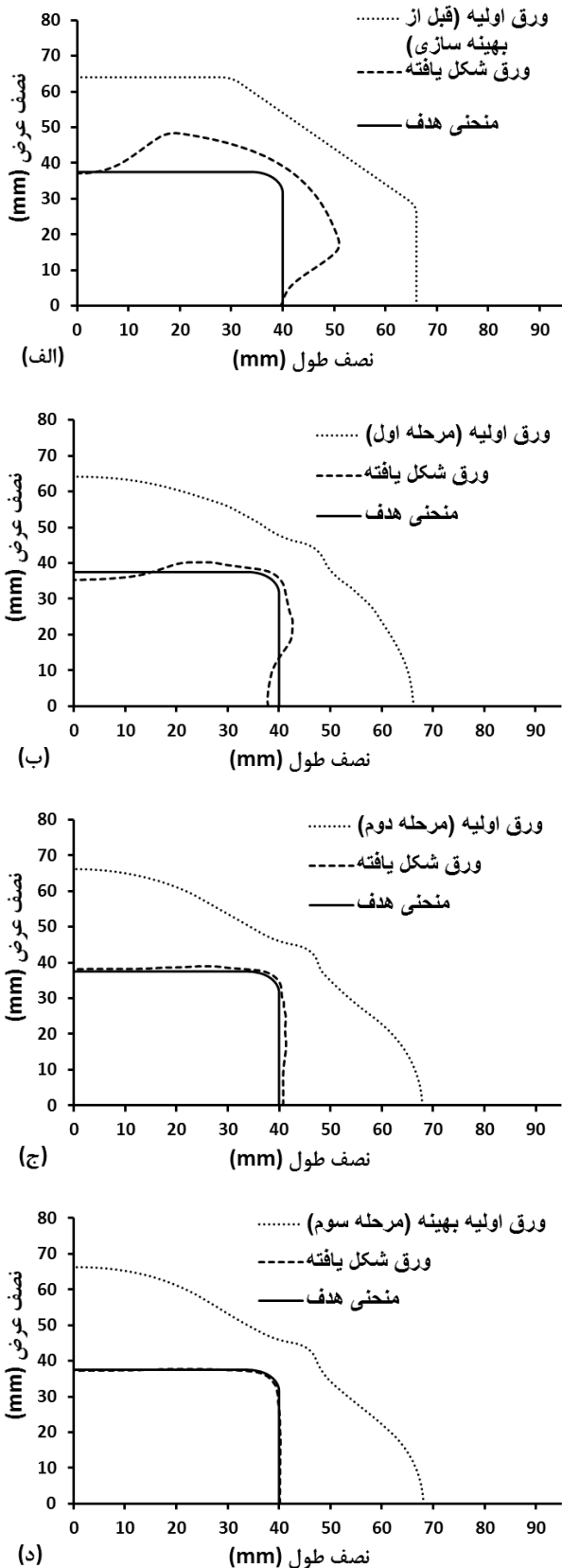


Fig. 16. optimization stages a) stage of before optimization, b) first stage of optimization, c) second stage of optimization, d) third and final stage of optimization

شکل ۱۶: مراحل بهینه‌سازی (الف): مرحله قبل از بهینه‌سازی، (ب): مرحله اول بهینه‌سازی، (ج): مرحله دوم بهینه‌سازی، (د): مرحله سوم و نهایی بهینه‌سازی

عرضی قطعه، یک‌چهارم ورق در نظر گرفته شده است و در کلیه مراحل بهینه‌سازی، شبیه‌سازی‌ها با فشار پیش بشکته‌ای ۲/۵ مگاپاسکال، حداکثر فشار ۲۵ مگاپاسکال و با عمق کشش ۳۵ میلی‌متر انجام گردید. دقت بهینه‌سازی مقدار ۰/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد؛ در نتیجه، با توجه به شکل ۸، بهینه‌سازی ورق اولیه تا زمانی که مقدار ε (خطای انحراف از منحنی هدف) برای هر گره خارجی کوچکتر یا مساوی ۰/۵ میلی‌متر شود، تکرار می‌شود.

شکل ۱۶ مراحل بهینه‌سازی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۶ (د) نشان داده شده است، پس از ۳ مرحله بهینه‌سازی منحنی ورق شکل یافته و منحنی هدف بر روی هم منطبق شده‌اند و در نتیجه ورق اولیه در این مرحله به‌عنوان ورق اولیه بهینه در نظر گرفته شده است. شکل ۱۷ ورق اولیه و ورق بهینه به دست آمده و قطعات شکل داده شده متناظر را با استفاده از شبیه‌سازی نشان می‌دهد.

پس از دستیابی به نتایج مورد نظر در بهینه‌سازی و شبیه‌سازی، از جمله حذف ناحیه فلنجی غیرضروری، بهبود شکل‌پذیری، کاهش نازک‌شدگی و کاهش چروکیدگی، شکل‌دهی ظرف مستطیلی با ورق بهینه به طور آزمایشگاهی انجام گردید تا نتایج به‌دست آمده از بهینه‌سازی، مورد ارزیابی قرار گیرد. بدین ترتیب منحنی ورق اولیه بهینه با استفاده از دستگاه وایرکات و با دقت ۰/۱ میلی‌متر روی ورق فولادی SS304 تهیه گردید.

شکل ۱۸ ورق اولیه بهینه و قطعه تولید شده با آن را در آزمایش تجربی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با استفاده از ورق اولیه بهینه ظرف با سطح مقطع مستطیلی طی یک مرحله به طور کامل تا عمق مورد نظر شکل یافته است. به‌علاوه، در ناحیه فلنج چروکیدگی تقریباً به‌طور کامل برطرف شده و ناحیه فلنج به‌طور بسیار مطلوبی براساس هندسه تعریف شده (منحنی هدف) ایجاد گردیده است.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش شکل‌پذیری ظرف‌های با سطح مقطع مستطیلی از جنس فولاد زنگ نزن SS304 با روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی به‌صورت تجربی و شبیه‌سازی اجزا محدود مورد بررسی قرار گرفت. پس از شکل‌دهی قطعه مستطیلی مورد نظر، نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی با نمونه‌های شکل داده شده در آزمایشگاه مورد مقایسه و اعتباردهی قرار گرفتند. پس از تأیید شبیه‌سازی و بررسی تأثیر فشار شکل‌دهی در فرآیند، با انجام بهینه‌سازی ابعاد ورق اولیه و بررسی آن در شبیه‌سازی و آزمایش تجربی، نتایج زیر حاصل شد:

۱. بهینه‌سازی ابعاد ورق اولیه با استفاده از تحلیل حساسیت طی سه مرحله انجام گردید و این نتیجه حاصل شد که با استفاده از ورق اولیه بهینه می‌توان با یک مرحله شکل‌دهی قطعه به هندسه مورد نظر برای ناحیه فلنج نیز، دست یافت و ضمن کاهش چروکیدگی در این ناحیه، دوربری نهایی را حذف و یک مرحله از تولید و

نازک‌شدگی کاهش می‌یابد و افزایش بیش از آن تأثیر اندکی روی توزیع ضخامت داشته و تنها نیروی شکل‌دهی را افزایش می‌دهد. ۳. قطعه مستطیلی به ابعاد مقطع $۵۶/۵ \times ۶۱/۵$ میلی‌متر با شعاع گوشه ۶ میلی‌متر و عمق کشش ۳۵ میلی‌متر به صورت تجربی و شبیه‌سازی در یک مرحله و به‌طور سالم، شکل داده شد. بررسی‌ها نشان داد که به روش کشش عمیق ساده، قطعه مورد نظر در ناحیه بحرانی شعاع گوشه سنبه دچار پارگی می‌شود.

منابع

- [1] S.H. Zhang, Developments in hydroforming, *Journal of Materials Processing Technology*, 91(1-3) (1999) 236-244.
- [2] A. Kandil, An experimental study of hydroforming deep drawing, *Journal of materials processing Technology*, 134(1) (2003) 70-80.
- [3] 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*, 53 (2011) 793-799.
- [4] L. Lang, J. Danckert, K.B. Nielsen, Investigation into hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure: Part I. Experimental observations of the forming process of aluminum alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 148(1) (2004) 119-131.
- [5] B.-S. Kang, W.-J. Song, T.-W. Ku, Study on process parameters and its analytic application for nonaxisymmetric rectangular cup of multistage deep drawing process using low carbon thin steel sheet, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49(9-12) (2010) 925-940.
- [6] B. Meng, M. Wan, S. Yuan, X. Xu, J. Liu, Z. Huang, Influence of cavity pressure on hydrodynamic deep drawing of aluminum alloy rectangular box with wide flange, *International Journal of Mechanical Sciences*, 77 (2013) 217-226.
- [7] F. Rahmani, S. Hashemi, H. Moslemi Naeini, H. Deylami Azodi, Numerical and Experimental Study of the Efficient Parameters on Hydromechanical Deep Drawing of Square Parts, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22(2) (2013) 338-344.
- [8] T.J. Kim, D.Y. Yang, S.S. Han, Numerical modeling of the multi-stage sheet pair hydroforming process, *Journal of Materials Processing Technology*, 151(1-3) (2004) 48-53.
- [9] B.-S. Kang, B.-M. Son, J. Kim, A comparative study of stamping and hydroforming processes for an automobile fuel tank using FEM, *International Journal of Machine*

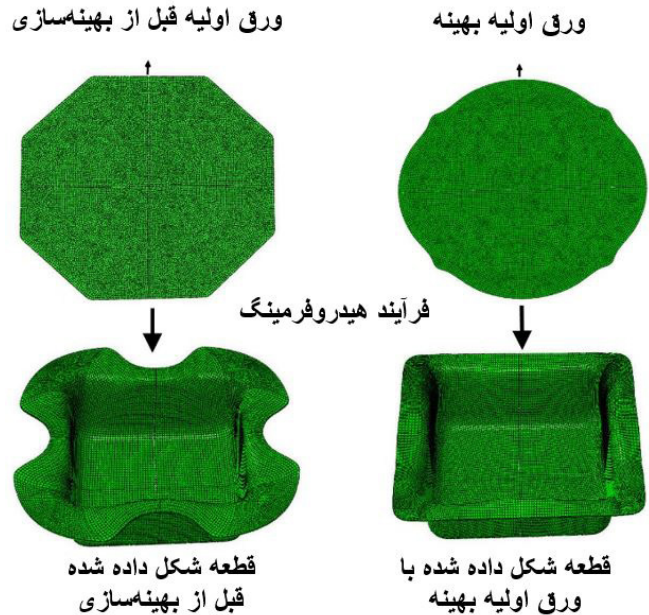


Fig. 17. initial sheet before and after optimization and corresponding parts, obtained from simulation

شکل ۱۷: ورق اولیه قبل و بعد از بهینه‌سازی و قطعات حاصل از آنها، به دست آمده از شبیه‌سازی

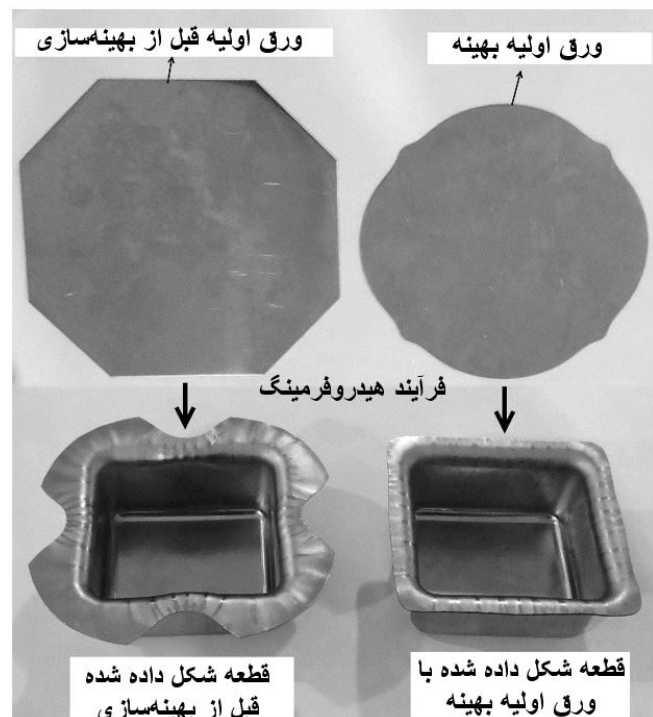


Fig. 18. initial blank before and after optimization and the corresponding deformed parts at 35mm depth and 25 MPa pressure

شکل ۱۸: ورق اولیه قبل و بعد از بهینه‌سازی و قطعات حاصل از آنها در عمق ۳۵ میلی‌متر و فشار ۲۵ مگاپاسکال، به دست آمده از آزمایش

در نتیجه زمان و هزینه تولید را کاهش داد.

۲. با بررسی فشار شکل‌دهی این نتیجه حاصل شد که با افزایش فشار تا ۲۵ مگاپاسکال توزیع ضخامت بهبود یافته و حداکثر

- Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(5) (2008) 532-542.
- [13] L. Xiaojing, X. Yongchao, Y. Shijian, Effects of loading paths on hydrodynamic deep drawing with independent radial hydraulic pressure of aluminum alloy based on numerical simulation, *J Mater Sci Technol*, 24 (2008) 395-399.
- [14] Y. Aue-U-Lan, G. Ngaile, T. Altan, Optimizing tube hydroforming using process simulation and experimental verification, *Journal of Materials Processing Technology*, 146(1) (2004) 137-143.
- Tools and Manufacture*, 44(1) (2004) 87-94.
- [10] H. Shim, K. Sona, K. Kim, Optimum blank shape design by sensitivity analysis, *Materials Processing Technology*, 104 (2000) 191-199.
- [11] V. Pegada, Y. Chun, S. Santhanam, An algorithm for determining the optimal blank shape for the deep drawing of aluminum cups, *Journal of Materials Processing Technology*, 125-126 (2002) 743-750.
- [12] E. Önder, A.E. Tekkaya, Numerical simulation of various cross sectional workpieces using conventional deep drawing and hydroforming technologies, *International*

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

A. Haghparast, A. Gorji, M. Bakhshi, G.M. Alinejad, Experimental and Numerical Study of Hydrodynamic Deep Drawing Process of Rectangular Cups and Blank Shape Optimization, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 49(4) (2018) 851-862.

DOI: 10.22060/mej.2016.807



