



کمینه‌سازی نیروی لازم شکل‌دهی در فرایند هیدروفورمینگ ورق با استفاده از طرح عاملی کسری

وحید مدانلو^{۱*}، بهنام آخوندی^۱، یعقوب دادگر اصل^۲

۱- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

* سیرجان، صندوق پستی: ۷۸۱۳۷۳۳۳۸۵، v.modanloo@sirjantech.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

شکل‌دهی مطلوب قطعات فلزی با استفاده از حداقل نیروی لازم، همواره مورد توجه پژوهش‌گران بوده است. در این مقاله، پارامترهای مؤثر در فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی به‌منظور تولید قطعات استوانه‌ای با پیشانی تخت با حداقل نیروی لازم شکل‌دهی مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا با استفاده از روش طراحی آزمایش عاملی کسری، آزمایش‌های مورد نیاز طراحی شدند. در این طراحی، فشار بیشینه سیال، سرعت سنبه، شعاع گوشه سنبه، ضریب اصطکاک بین ورق با سنبه، ضریب اصطکاک بین ورق با قالب و شعاع گوشه ماتریس به‌عنوان متغیرهای ورودی در نظر گرفته شدند. آزمایش‌های طراحی‌شده به کمک مدل اجزای محدود صحت‌سنجی شده اجرا شده و بیشینه نیروی سنبه برای هر آزمایش استخراج گردید. در پایان، با انجام تحلیل واریانس، اثرات اصلی و متقابل پارامترها بر روی تابع بیشینه نیروی سنبه مشخص گردید. با بررسی نتایج، مشخص شد که فشار بیشینه سیال و شعاع گوشه سنبه بیشترین تأثیر را بر روی بیشینه نیروی سنبه دارند. کاهش فشار بیشینه سیال از ۳۹ تا ۱۵ مگاپاسکال، منجر به کاهش بیشینه نیروی سنبه به میزان ۵۵٪ می‌شود. همچنین، کاهش شعاع گوشه سنبه از ۱۰ تا ۲ میلی‌متر، منجر به کاهش بیشینه نیروی سنبه به میزان ۵۵٪ می‌شود.

مقاله پژوهشی
دریافت: ۱۳ خرداد ۱۴۰۲
داوری اولیه: ۲۹ خرداد ۱۴۰۲
پذیرش: ۶ تیر ۱۴۰۲

کلیدواژگان:

هیدروفورمینگ ورق
نیروی سنبه
طرح عاملی کسری
شبیه‌سازی اجزای محدود

Minimizing the required forming force in the sheet hydroforming process using a fractional factorial design

Vahid Modanloo^{1*}, Behnam Akhondi¹, Yaghoob Dadgar Asl²

1- Mechanical Engineering Department, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

* P.O.B. 7813733385 Sirjan, Iran, v.modanloo@sirjantech.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 3 June 2023
First Decision: 19 June 2023
Accepted: 27 June 2023

Keywords:

Sheet Hydroforming
Punch Force
Fractional Factorial Design
Finite Element Simulation

Abstract

The optimal forming of the metallic parts with the lowest required forming force has always been the focus of researchers. In this paper, effective parameters in hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure of cylindrical cups with a flat head with minimum required forming force have been investigated. At first, the necessary experiments were designed using the fractional factorial design of experiment. In this design, maximum fluid pressure, punch velocity, punch nose radius, friction coefficient between punch and sheet, friction coefficient between die and sheet, and die entrance radius were considered input variables. An experimentally validated finite element model was used for performing the designed experiments and extracting the maximum punch force for each experiment. Finally, by using analysis of variance, the main and the interaction effects of the parameters on the maximum punch force were determined. Results showed that the maximum fluid pressure and punch nose radius have the highest influence on the maximum punch force. Decreasing the maximum fluid pressure from 39 to 15 MPa, leads to a decrease of 55% in the maximum punch force. Also, by reducing the punch nose radius from 10 to 2 mm, the maximum punch force decreases by 55%.

۱- مقدمه

ویژه‌های برخوردار شده است [۲]. این روش در مقایسه با سایر روش‌های شکل‌دهی ورق نظیر کشش عمیق سنتی، دارای مزایایی از جمله نسبت کشش بیشتر، دقت ابعادی بالاتر، توزیع ضخامت یکنواخت‌تر و صافی سطح بهتر می‌باشد [۳]. این فرایند

در فرایند هیدروفورمینگ ورق از یک سیال تحت فشار برای شکل‌دهی استفاده می‌شود [۱]. امروزه این فرایند در صنعت شکل‌دهی فلزات به خاطر ویژگی‌های منحصر به فرد، از جایگاه

Please cite this article using:

V. Modanloo, B. Akhondi, Y. Dadgar Asl, Minimizing the required forming force in the sheet hydroforming process using a fractional factorial design, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 12, pp. 1- 9, 2023 (in Persian). <https://www.doi.org/10.22034/IJME.2023.400065.1788>

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

طی سال‌های اخیر در صنایع هوافضا، خودروسازی و انرژی بسیار مورد استفاده قرار گرفته است [۴]. در این فرایند در اثر فشار سیال درون محفظه و نیز حرکت سنبه، ورق به سطح سنبه چسبیده و به شکل آن در می‌آید. تاکنون روش‌های متفاوتی برای هیدروفورمینگ ورق گزارش شده است که می‌توان به کشش عمیق هیدرومکانیکی [۵]، کشش عمیق هیدرودینامیکی [۶] و کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی [۷] اشاره نمود. در روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی، اعمال فشار سیال به لبه ورق منجر به سیلان مطلوب‌تر ورق می‌شود [۸]. در شکل ۱ فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی به صورت شماتیک نشان داده شده است.

را به‌عنوان متغیرهای ورودی در نظر گرفتند. همچنین بیشترین مقدار کاهش ضخامت دیواره، شاخص ترک، ارتفاع چروکیدگی فلنج و شاخص چروکیدگی به‌عنوان توابع خروجی در نظر گرفته شدند. نتایج آن‌ها نشان داد که الگوریتم NSGA-III جهت بهینه‌سازی فرایند هیدروفورمینگ بسیار مؤثرتر است. مدانلو و همکاران [۱۱] با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی، به بهینه‌سازی کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی به‌صورت شبیه‌سازی و تجربی پرداختند. ورق استفاده شده در پژوهش آن‌ها از جنس مس خالص بود. آن‌ها هر یک از پارامترهای ورودی را در سه سطح کم، متوسط و زیاد در نظر گرفتند. همچنین خروجی مورد نظر نیز میزان نازک‌شدگی در نظر گرفته شد. آن‌ها با استفاده از تحلیل آنالیز واریانس، دریافتند که شعاع گوشه سنبه با مشارکت حدود ۴۶٪، مهم‌ترین پارامتر بر روی نازک‌شدگی می‌باشد؛ همچنین برای دستیابی به سطوح بهینه پارامترها از تحلیل سیگنال به نویز استفاده شد. در نهایت، با استفاده از سطح بهینه پارامترها، میزان نازک‌شدگی در حدود ۱۱٪ بهبود یافت. تورکاوز و همکاران [۱۲] با ترکیب شبیه‌سازی عددی با الگوریتم فازی انطباقی (aFEA-FLC)، موفق شدند فرایند کشش عمیق هیدرومکانیکی گرم را با دقت قابل قبولی مدل‌سازی کنند. آن‌ها توانستند مقادیر بهینه نیروی ورق‌گیر و فشار سیال را در بهبود شکل‌پذیری فنجان‌های استوانه‌ای از جنس آلومینیوم به دست آورند. آن‌ها همچنین موفق شدند نسبت کشش حادی را به کمک روش بهینه‌سازی پیشنهادی افزایش دهند. مدانلو و همکاران [۱۳] با استفاده از روش سطح پاسخ به بهینه‌سازی همزمان میزان نازک‌شدگی و بیشینه نیروی سنبه در فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی پرداختند. آن‌ها شعاع گوشه سنبه، فشار بیشینه سیال و شعاع گوشه ماتریس را به‌عنوان متغیرهای ورودی (هر کدام در دو سطح کمینه و بیشینه) در نظر گرفتند. آن‌ها با استفاده از تابع مطلوبیت و نمودارهای کانتوری، نازک‌شدگی را به میزان ۱۰٪ و همچنین بیشینه نیروی سنبه را در حدود ۲٪ کاهش دادند. یعقوبی و همکاران [۱۴] با استفاده از یک مدل ANFIS به پیش‌بینی موقعیت و میزان نازک‌شدگی بیشینه در فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی پرداختند. آن‌ها با استفاده از روش سطح پاسخ به طراحی آزمایش پرداخته و آزمایش‌ها را با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود اجرا کردند. آن‌ها از نتایج شبیه‌سازی برای آموزش مدل استفاده کردند. آن‌ها توانستند با درصد اطمینان قابل قبول، میزان نازک‌شدگی بیشینه و محل وقوع آن را پیش‌بینی کنند. مدانلو و

هم‌زمان با توسعه روزافزون صنعت شکل‌دهی فلزات و نیز هزینه‌های قابل توجه طراحی و انجام آزمایش‌های تجربی، مهندسان این حوزه بر آن شده‌اند که با ارائه روش‌های کنترل کیفیت قبل از فرایند، زمان و هزینه‌های تولید را کاهش داده و طراحی‌هایی با قابلیت اطمینان بالاتر ارائه دهند [۹]. از جمله عیوب رایج در تولید فنجان‌های فلزی به روش هیدروفورمینگ می‌توان به پارگی، ضخیم‌شدگی و چروکیدگی اشاره نمود که عمده پژوهش‌های پیشین جهت جلوگیری و به حداقل رساندن عیوب مذکور انجام شده است. تاکنون روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی و انتخاب سطوح بهینه پارامترهای هیدروفورمینگ ورق از سوی پژوهش‌گران ارائه شده است. بهینه‌سازی چندهدفه پارامترهای فرایند هیدروفورمینگ ورق به کمک الگوریتم‌های PSO و NSGA-III توسط ژانگ و همکاران [۱۰] صورت گرفت. آن‌ها به‌منظور بهینه‌سازی چندهدفه فرایند، پارامترهای فشار پیش‌کشش، فشار سیال، نیروی ورق‌گیر و شعاع گوشه ورق‌گیر

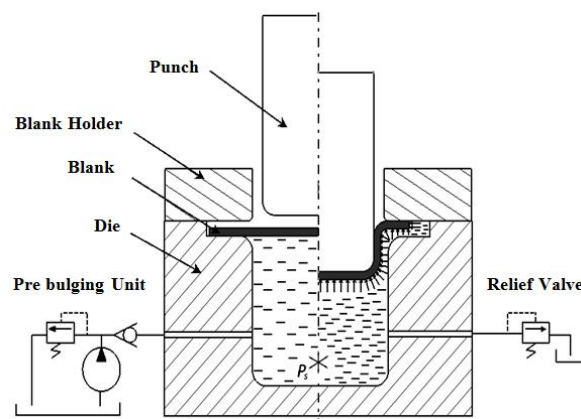


Fig. 1 Schematic of the hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure

شکل ۱ شماتیک فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی

هم‌زمان با توسعه روزافزون صنعت شکل‌دهی فلزات و نیز هزینه‌های قابل توجه طراحی و انجام آزمایش‌های تجربی، مهندسان این حوزه بر آن شده‌اند که با ارائه روش‌های کنترل کیفیت قبل از فرایند، زمان و هزینه‌های تولید را کاهش داده و طراحی‌هایی با قابلیت اطمینان بالاتر ارائه دهند [۹]. از جمله عیوب رایج در تولید فنجان‌های فلزی به روش هیدروفورمینگ می‌توان به پارگی، ضخیم‌شدگی و چروکیدگی اشاره نمود که عمده پژوهش‌های پیشین جهت جلوگیری و به حداقل رساندن عیوب مذکور انجام شده است. تاکنون روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی و انتخاب سطوح بهینه پارامترهای هیدروفورمینگ ورق از سوی پژوهش‌گران ارائه شده است. بهینه‌سازی چندهدفه پارامترهای فرایند هیدروفورمینگ ورق به کمک الگوریتم‌های PSO و NSGA-III توسط ژانگ و همکاران [۱۰] صورت گرفت. آن‌ها به‌منظور بهینه‌سازی چندهدفه فرایند، پارامترهای فشار پیش‌کشش، فشار سیال، نیروی ورق‌گیر و شعاع گوشه ورق‌گیر

همان‌طور که قابل مشاهده است، از روش‌های بهینه‌سازی متعددی برای مطالعه فرایند هیدروفرمینگ ورق تاکنون استفاده شده است. با این وجود، در زمینه بررسی پارامترهای مؤثر در نیروی شکل‌دهی در فرایند کشش عمیق هیدروفرمینگ با فشار شعاعی مطالعات اندکی گزارش شده و به‌ویژه در زمینه اثرات متقابل پارامترهای ورودی با استفاده از روش طرح عاملی کسری، مطالعه‌ای یافت نشده است. در این مقاله، با استفاده از کوپل کردن روش طراحی آزمایش‌ها با استفاده از طرح عاملی کسری و نیز روش اجزا محدود، مقادیر نیروی سنبه برای هر آزمایش استخراج می‌شود. سپس با استفاده از آنالیز واریانس، اثرات اصلی و متقابل پارامترهای ورودی بر تابع هدف مورد تحلیل قرار می‌گیرند. در نهایت میزان کمینه نیروی سنبه برای شکل‌دهی قطعات مسی با استفاده از سطوح بهینه پارامترها به دست خواهد آمد.

۲- طراحی آزمایش‌ها به روش عاملی کسری

هدف اصلی روش طراحی آزمایش‌ها، انتخاب بهترین حالت ممکن آزمایش است که با استفاده از آن بتوان فرایند را ضمن توجیه‌پذیر بودن تعداد آزمایش‌ها، به مطلوب‌ترین شکل ممکن بررسی نمود. از طراحی آزمایش به روش عاملی دو سطحی، زمانی استفاده می‌شود که از بین تعداد زیاد پارامترهای ورودی، هدف شناسایی پارامترهای تأثیرگذار باشد. در طرح‌های عاملی دو سطحی با افزایش تعداد عامل‌ها، تعداد آزمایش‌های مورد نیاز برای طرح نیز افزایش می‌یابد که اجرای این تعداد آزمایش نیز موجه نبوده و منجر به افزایش زمان و هزینه می‌شود [۲۰]. در این طرح با صرف‌نظر کردن از اثرات متقابل مرتبه بالا، می‌توان از یک طرح عاملی کسری استفاده نمود. کاربرد عمده طرح‌های عاملی کسری در آزمایش‌های غربال‌گری است. در این نوع آزمایش‌ها، در ابتدا عامل‌های زیادی مورد بررسی قرار گرفته و هدف مشخص نمودن عامل‌هایی است که اثر قابل توجهی دارند. از آنجاکه هر عامل دو سطحی است، فرض می‌شود که پاسخ در دامنه سطوح عامل انتخاب شده تقریباً خطی است که در اغلب آزمایش‌های غربالی، یک فرض منطقی می‌باشد. بدین ترتیب اطلاعات مناسبی در مورد اثرات اصلی و اثرات متقابل مرتبه پایین به دست خواهد آمد [۲۱]. پارامترهای مختلفی در فرایند کشش عمیق هیدروفرمینگ با فشار شعاعی نقش دارند. در این مقاله، فشار بیشینه سیال، سرعت سنبه، شعاع گوشه سنبه، شعاع گوشه ماتریس، ضریب اصطکاک بین ورق و سنبه و ضریب اصطکاک بین ورق و قالب به‌عنوان متغیرهای ورودی و نیروی

همکاران [۱۵] دستیابی به شرایط بهینه در فرایند شکل‌دهی ورق مسی با استفاده از کشش عمیق هیدروفرمینگ با فشار شعاعی را بررسی کردند. آن‌ها از روش‌های Topsis و MOORA که از روش‌های پرکاربرد تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه می‌باشند، برای انتخاب حالت بهینه استفاده کردند. در پژوهش آن‌ها، آزمایش‌های طراحی شده با روش تاگوچی به‌عنوان گزینه‌ها و نیز ضخامت نهایی قطعه، بیشینه نیروی سنبه و تنش شعاعی به‌عنوان معیارها در نظر گرفته شدند. برای وزن‌دهی به خروجی‌های مذکور، از یک تکنیک ترکیبی جدید متشکل از روش‌های AHP و Entropy استفاده شد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که برای بهینه‌سازی ضخامت نهایی قطعه‌کار و هم‌زمان با آن کمینه‌سازی نیروی سنبه و تنش شعاعی در قطعه‌کار، به نسبت کشش ۱/۸۱، فشار بیشینه سیال ۳۷ مگاپاسکال و فشار پیش‌بشکه‌ای ۱۵ مگاپاسکال نیاز است. هاشمی و همکاران [۱۶] به بهینه‌سازی فرایند هیدروفرمینگ ورق‌های کامپوزیتی چندلایه با استفاده از الگوریتم سرد شدن تدریجی پرداختند. آن‌ها با کوپل کردن روش بهینه‌سازی مذکور با یک مدل شبیه‌سازی انطباقی، توانستند مسیر فشار بهینه در شکل‌دهی قطعات مخروطی را بیابند. حقگو و همکاران [۱۷] به ارائه مدل شبکه عصبی GMDH به‌منظور پیش‌بینی رفتار ورق‌های مثلی تحت بارگذاری هیدروفرمینگ پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده به حداقل رسیدن انحراف نتایج تحلیلی از نتایج تجربی با کوپل کردن الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلف با روش‌های تجربی است. در نتیجه، مدل پیشنهاد شده را می‌توان به‌عنوان یک ابزار مناسب و قوی برای مدل‌سازی سیستم‌هایی که رفتار پیچیده‌ای دارند بکار برد. موسوی‌پور و همکاران [۱۸] با استفاده از روش آنالیز حساسیت، به بهینه‌سازی ابعاد ورق اولیه در هیدروفرمینگ قطعات دوپله با هندسه‌های متفاوت پرداختند. آن‌ها با انجام بهینه‌سازی موفق شدند حداکثر نازک‌شدگی را به میزان ۰.۸٪ کاهش دهند. به‌علاوه، نیروی سنبه به میزان ۲۴٪ کاهش یافت. ربیعی و همکاران [۱۹] با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی GWO، موفق به بهینه‌سازی فرایند هیدروفرمینگ ورق‌های کامپوزیتی شدند. آن‌ها برای مدل‌سازی، نرخ نازک‌شدگی، ارتفاع چروکیدگی و عمق شکل‌دهی را به‌عنوان معیار در نظر گرفتند؛ همچنین نیروی ورق‌گیر، فاصله ورق‌گیر با قالب و فشار محفظه به‌عنوان متغیرهای ورودی در نظر گرفته شدند. مدل به‌دست‌آمده توسط آن‌ها توانست با ضریب اطمینان بسیار بالایی مقادیر مورد نظر را تقریب بزند.

۹	۰/۰۲	۰/۰۵	۱۰	۵۰	۱۵	۲۰
۹	۰/۰۲	۰/۰۵	۲	۲۰۰	۱۵	۲۱
۹	۰/۱۰	۰/۰۵	۱۰	۵۰	۳۹	۲۲
۲	۰/۱۰	۰/۲۰	۱۰	۲۰۰	۱۵	۲۳
۲	۰/۰۲	۰/۰۵	۱۰	۲۰۰	۱۵	۲۴
۹	۰/۱۰	۰/۰۵	۱۰	۲۰۰	۱۵	۲۵
۲	۰/۰۲	۰/۲۰	۱۰	۲۰۰	۳۹	۲۶
۲	۰/۱۰	۰/۲۰	۱۰	۵۰	۳۹	۲۷
۲	۰/۰۲	۰/۰۵	۲	۲۰۰	۱۵	۲۸
۹	۰/۰۲	۰/۲۰	۱۰	۲۰۰	۱۵	۲۹
۲	۰/۰۲	۰/۲۰	۱۰	۵۰	۱۵	۳۰
۲	۰/۱۰	۰/۲۰	۲	۲۰۰	۳۹	۳۱
۲	۰/۱۰	۰/۰۵	۱۰	۲۰۰	۳۹	۳۲

سنبه به‌عنوان تابع پاسخ در نظر گرفته شده‌اند. هرکدام از متغیرهای ورودی، در دو سطح حداقل و حداکثر به‌عنوان عوامل ورودی مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شده‌اند.

جدول ۱ محدوده عوامل ورودی

Table 1 The range of input parameters			
عوامل ورودی	نماد	سطح حداقل	سطح حداکثر
فشار بیشینه سیال (MPa)	A	۱۵	۳۹
سرعت سنبه (mm/min)	B	۵۰	۲۰۰
شعاع گوشه سنبه (mm)	C	۲	۱۰
ضریب اصطکاک ورق با سنبه	D	۰/۰۵	۰/۲۰
ضریب اصطکاک ورق با قالب	E	۰/۰۲	۰/۱۰
شعاع گوشه ماتریس (mm)	F	۲	۹

۳- اجرای آزمایش‌ها به روش شبیه‌سازی اجزای محدود

۳-۱- جزئیات شبیه‌سازی عددی

از آنجاکه اجرای آزمایش‌ها به‌صورت تجربی، پرهزینه و زمان‌بر می‌باشد، در این مقاله به‌جای اجرای عملی آزمایش‌های طراحی‌شده، از مدل اجزا محدود صحت‌سنجی شده برای تحلیل استفاده شده و نیروی سنبه برای هر آزمایش استخراج شده است. ورق استفاده شده از جنس مس خالص با ضخامت ۲/۵ و قطر اولیه ۸۰ میلی‌متر می‌باشد که مشخصات رفتار مکانیکی این ماده با استفاده از مرجع [۲۳] در تحلیل فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی بکار گرفته شده است. در این مقاله، شبیه‌سازی‌های فرایند به‌وسیله نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس انجام شده است. چون قطعه متقارن می‌باشد، به‌منظور ساده‌سازی و کاهش زمان تحلیل فرایند، نیمی از ورق مدل شد. سنبه، ماتریس و ورق‌گیر به‌صورت صلب تحلیلی و ورق به‌صورت شکل‌پذیر مدل شده است. قطر سنبه ۳۸/۵ و شعاع گوشه آن ۶ میلی‌متر می‌باشد. قطر ورق‌گیر و ماتریس به ترتیب ۲۱ و ۲۲ میلی‌متر می‌باشد؛ همچنین شعاع گوشه هر دو جز مذکور ۶ میلی‌متر می‌باشد. تحلیل مسئله با استفاده از حل‌گر صریح دینامیکی انجام شده است. برای تعریف تماس ورق با اجزای قالب، از مدل اصطکاکی کولمب استفاده شده است. مطابق با مرجع [۲۳] ضریب اصطکاک بین سنبه با ورق ۰/۱۴ و بین ورق‌گیر و ماتریس با ورق ۰/۰۴ در نظر گرفته شده است. سنبه با سرعت ثابت ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه در راستای عمودی جابه‌جا می‌شود. چون مجموعه قالب به‌صورت صلب تحلیلی مدل شده‌اند، نیاز به شبکه‌بندی ندارند. برای شبکه‌بندی ورق از المان توپر هشت‌گانه استفاده گردید.

با توجه به تعداد ۶ فاکتور دو سطحی، اگر آزمایش‌ها به‌صورت طرح عاملی کامل طراحی شود، تعداد ۶۴ آزمایش لازم خواهد بود. از این‌رو برای کاهش تعداد آزمایش‌ها از روش طرح عاملی کسری استفاده شد. با اجرای روش طرح عاملی کسری ۱/۲، طرح آزمایش‌ها با ۳۲ آزمایش مطابق با جدول ۲ خواهد شد. برای طراحی و تحلیل آزمایش‌ها از نرم‌افزار مینی‌تب استفاده گردید [۲۲].

جدول ۲ طرح آزمایش عاملی کسری

Table 2 Fractional factorial design of experiment						
آزمایش	A	B	C	D	E	F
۱	۱۵	۵۰	۲	۰/۰۵	۰/۱۰	۹
۲	۱۵	۵۰	۱۰	۰/۲۰	۰/۱۰	۹
۳	۳۹	۵۰	۱۰	۰/۰۵	۰/۰۲	۲
۴	۳۹	۲۰۰	۲	۰/۰۵	۰/۰۲	۲
۵	۳۹	۲۰۰	۱۰	۰/۲۰	۰/۱۰	۹
۶	۳۹	۵۰	۲	۰/۰۵	۰/۰۲	۹
۷	۳۹	۵۰	۲	۰/۰۵	۰/۱۰	۲
۸	۱۵	۵۰	۱۰	۰/۲۰	۰/۱۰	۲
۹	۱۵	۵۰	۲	۰/۲۰	۰/۰۲	۹
۱۰	۳۹	۵۰	۲	۰/۲۰	۰/۱۰	۹
۱۱	۱۵	۲۰۰	۲	۰/۲۰	۰/۱۰	۹
۱۲	۳۹	۵۰	۱۰	۰/۲۰	۰/۰۲	۹
۱۳	۳۹	۵۰	۲	۰/۲۰	۰/۰۲	۲
۱۴	۱۵	۵۰	۲	۰/۰۵	۰/۱۰	۲
۱۵	۱۵	۲۰۰	۲	۰/۰۵	۰/۱۰	۲
۱۶	۱۵	۲۰۰	۲	۰/۲۰	۰/۰۲	۲
۱۷	۳۹	۲۰۰	۱۰	۰/۰۵	۰/۰۲	۹
۱۸	۳۹	۲۰۰	۲	۰/۲۰	۰/۰۲	۹
۱۹	۳۹	۲۰۰	۲	۰/۰۵	۰/۱۰	۹

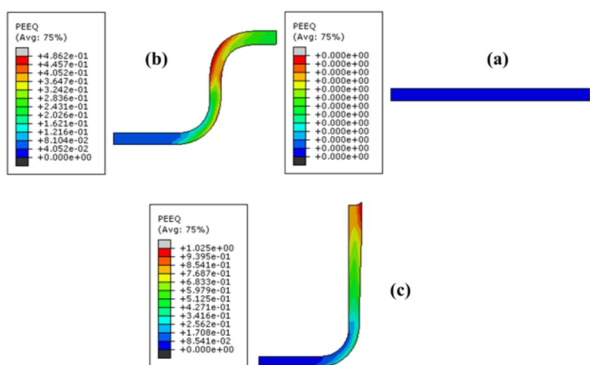


Fig. 3 Distribution of equivalent plastic strain in the sheet a) onset, b) middle, c) end of process

شکل ۳ توزیع کرنش پلاستیک معادل در ورق، الف) ابتدا (ب) میانه ج) انتهای فرایند

۴- نتایج و بحث

در این بخش تأثیر پارامترهای ورودی بر روی تابع پاسخ نیروی سنبه بررسی شده است و پارامترهای تأثیرگذار مشخص می‌شوند. در شکل ۴ نمودار احتمال توزیع نرمال نیروی سنبه نشان داده شده است. با توجه به نمودار، پراکندگی نقاط اطراف خط مورب بیان‌گر نرمال بودن توزیع داده‌ها می‌باشد [۲۷]. همچنین نتایج آنالیز واریانس برای نیروی سنبه در جدول ۴ آمده است. با توجه به مقادیر P (کمتر از ۰/۰۵) مشاهده می‌شود که پارامترهای فشار سیال و شعاع گوشه سنبه در مقدار نیروی سنبه مؤثر هستند.

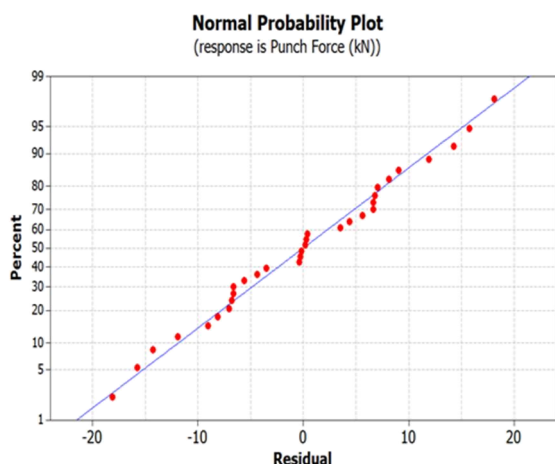


Fig. 4 Normal probability plot for punch force

شکل ۴ نمودار احتمال نرمال برای نیروی سنبه

شکل ۵ اثر فشار بیشینه سیال و شعاع گوشه سنبه را بر روی نیروی سنبه نشان می‌دهد. افزایش فشار بیشینه سیال از ۱۵ تا ۳۹ مگاپاسکال، منجر به افزایش بیشینه نیروی سنبه به میزان ۵۵٪ می‌شود. طبق رابطه $F=PA$ با افزایش فشار سیال، سنبه به

۳-۲- صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی

نتایج شبیه‌سازی زمانی معتبر و قابل استناد می‌باشند که با استفاده از نتایج تجربی صحت‌سنجی شوند [۲۶-۲۴]. در این مقاله، صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی با استفاده از نتایج تجربی مرجع [۲۳] بررسی و گزارش شده است که حاکی از تطابق خوب نتایج عددی و تجربی مطابق شکل ۲ می‌باشد. مطابق شرایط هر ۳۲ آزمایش، فرایند با روش اجزای محدود تحلیل و مقادیر نیروی سنبه استخراج شد که در جدول ۳ آمده است. شکل ۳ کانتور توزیع کرنش پلاستیک معادل در ابتدا، میانه و انتهای فرایند را نشان می‌دهد. مطابق با شکل، با حرکت سنبه به سمت پایین، مقاومت ورق در برابر تغییر شکل افزایش می‌یابد؛ به طوری که به نیروی بیشتری برای تغییر شکل نیاز است؛ به عبارت دیگر حین تغییر شکل ورق کار سخت می‌شود.

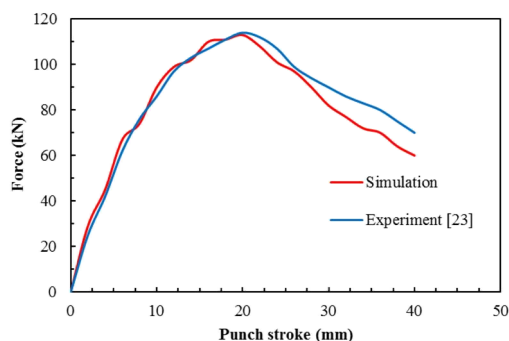


Fig. 2 Good agreement between experimental and simulation results

شکل ۲ تطابق قابل قبول بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی

جدول ۳ نتایج آزمایش‌ها

Table 3 Results of the experiments

شماره آزمایش	نیروی سنبه (kN)	شماره آزمایش	نیروی سنبه (kN)
۱	۵۲/۶۰	۱۷	۱۵۳/۰۰
۲	۱۱۵/۹۰	۱۸	۱۳۷/۸۰
۳	۱۸۴/۲۰	۱۹	۹۶/۲۶
۴	۹۷/۳۳	۲۰	۱۱۸/۴۰
۵	۱۴۳/۶۰	۲۱	۷۳/۱۶
۶	۹۸/۸۱	۲۲	۱۵۸/۹۰
۷	۸۹/۵۰	۲۳	۱۰۳/۶۰
۸	۱۱۴/۷۰	۲۴	۱۲۵/۲۰
۹	۹۸/۹۷	۲۵	۱۲۵/۰۰
۱۰	۱۴۱/۰۰	۲۶	۱۷۶/۱۰
۱۱	۶۵/۰۱	۲۷	۱۵۰/۸۰
۱۲	۱۵۵/۱۰	۲۸	۹۰/۰۰
۱۳	۱۱۶/۱۰	۲۹	۹۹/۷۹
۱۴	۵۵/۵۰	۳۰	۷۲/۲۸
۱۵	۴۲/۱۲	۳۱	۹۸/۷۶
۱۶	۴۵/۹۰	۳۲	۱۶۵/۳۰

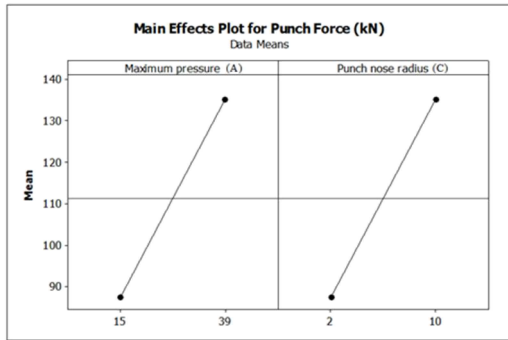


Fig. 5 Effects of maximum fluid pressure and punch nose radius on punch force

شکل ۵ تأثیر فشار بیشینه سیال و شعاع گوشه سنبه بر نیروی سنبه

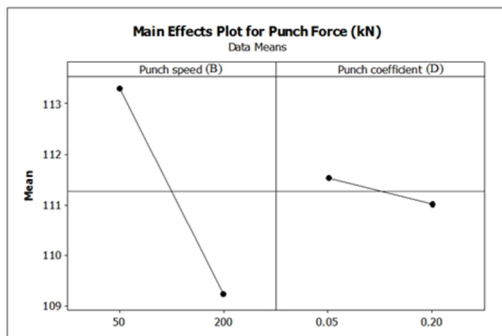


Fig. 6 Effects of speed and friction coefficient of the punch on punch force

شکل ۶ تأثیر سرعت و ضریب اصطکاک سنبه بر نیروی سنبه

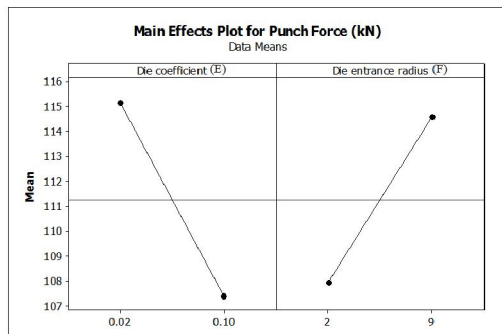


Fig. 7 Effects of nose radius and friction coefficient of the die on punch force

شکل ۷ تأثیر شعاع گوشه و ضریب اصطکاک ماتریس بر نیروی سنبه

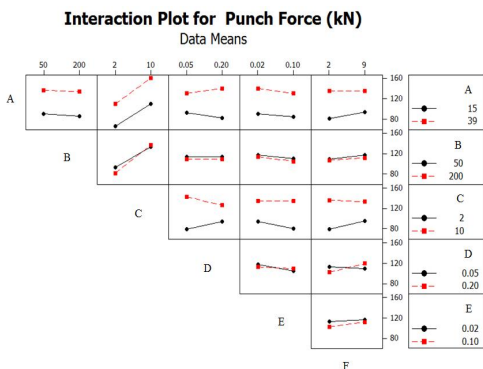


Fig. 8 Interaction effects of parameters on punch force

شکل ۸ نمودارهای اثرات متقابل بر روی نیروی سنبه

نیروی بیشتری برای نفوذ به درون محفظه قالب نیاز دارد. به‌علاوه، با افزایش شعاع گوشه سنبه از ۲ تا ۱۰ میلی‌متر، بیشینه نیروی سنبه به میزان ۵۵٪ افزایش می‌یابد. با افزایش شعاع گوشه سنبه، ورق پس از طی مسافت بیشتری به سنبه می‌چسبد که همین امر موجب افزایش کرنش سختی ماده و در نتیجه افزایش نیروی لازم شکل‌دهی می‌شود. شکل‌های ۶ و ۷ نمودارهای اثرات اصلی پارامترهای با تأثیر کم را نشان می‌دهد. در شکل ۸ نمودارهای اثرات متقابل فاکتورها نشان داده شده است. مشاهده شد که اکثر پارامترها با هم تداخل ندارند ولی پارامترهای ضریب اصطکاک سنبه با ضریب اصطکاک قالب و نیز ضریب اصطکاک سنبه با شعاع گوشه ماتریس اثر تعاملی دارند. سرعت و شعاع گوشه سنبه نیز اثر تعامل خیلی کمی دارند.

جدول ۴ نتایج آنالیز واریانس برای نیروی سنبه

Table 4 ANOVA results for punch force

منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	عدد فیشر	مقدار احتمال
اثرات اصلی	۶	۳۷۴۱۷/۵	۶۲۳۶/۳	۲۳/۷۱	۰/۰۰۰
A	۱	۱۸۲۶۱/۰	۱۸۲۶۱/۰	۶۹/۴۲	۰/۰۰۰
B	۱	۱۳۱/۳	۱۳۱/۳	۰/۵۰	۰/۴۹۶
C	۱	۱۸۱/۹۵	۱۸۱/۹۵	۶۹/۱۷	۰/۰۰۰
D	۱	۲/۱	۲/۱	۰/۰۱	۰/۹۳۰
E	۱	۴۷۷/۳	۴۷۷/۳	۱/۸۱	۰/۲۰۸
F	۱	۳۵۰/۵	۳۵۰/۵	۱/۳۳	۰/۲۷۵
اثرات متقابل	۱۵	۵۷۲۹/۳	۳۸۲/۰	۱/۴۵	۰/۲۷۹
A×B	۱	۴/۷	۴/۷	۰/۰۲	۰/۸۹۶
A×C	۱	۱۱۱/۹	۱۱۱/۹	۰/۴۳	۰/۵۲۹
A×D	۱	۸۰/۱۹	۸۰/۱۹	۳/۰۵	۰/۱۱۱
A×E	۱	۱۹/۶	۱۹/۶	۰/۰۷	۰/۷۹۰
A×F	۱	۲۷۱/۲	۲۷۱/۲	۱/۰۳	۰/۳۳۴
B×C	۱	۳۶۰/۸	۳۶۰/۸	۱/۳۷	۰/۲۶۹
B×D	۱	۰/۹	۰/۹	۰/۰	۰/۹۵۵
B×E	۱	۵/۸	۵/۸	۰/۰۲	۰/۸۸۵
B×F	۱	۲۳/۳	۲۳/۳	۰/۰۹	۰/۷۷۲
C×D	۱	۱۹۰۳/۳	۱۹۰۳/۳	۷/۲۴	۰/۰۲۳
C×E	۱	۳۸۵/۴	۳۸۵/۴	۱/۴۷	۰/۲۵۴
C×F	۱	۷۱۱/۵	۷۱۱/۵	۲/۷۰	۰/۱۳۱
D×E	۱	۱۴۳/۹	۱۴۳/۹	۰/۵۵	۰/۴۷۷
D×F	۱	۹۰۶/۸	۹۰۶/۸	۳/۴۵	۰/۰۹۳
E×F	۱	۷۸/۳	۷۸/۳	۰/۳۰	۰/۵۹۷
خطا	۱۰	۲۶۳/۰	۲۶۳/۰		
کل	۳۱	۴۵۷۷۷/۲			

$$\text{Force (kN)} = 26.2 + 1.991A - 0.0270B + 5.961C - 3.4D - 96.6E + 0.946F \quad (1)$$

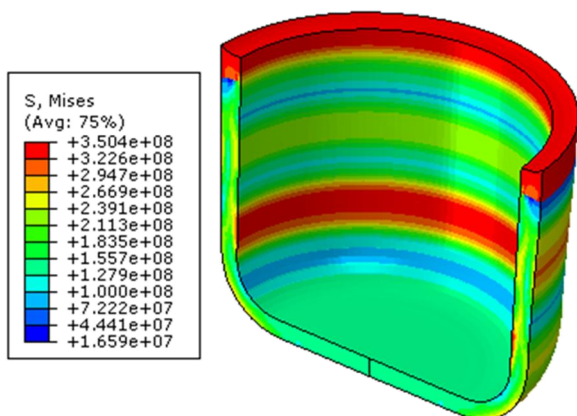


Fig. 11 Deformed cup after minimizing the force using optimum levels of the parameters

شکل ۱۱ فنجان شکل داده شده پس از کمینه‌سازی نیرو با استفاده از سطوح بهینه پارامترها

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر پارامترهای ورودی (فشار بیشینه سیال، سرعت سنبه، شعاع گوشه سنبه، ضریب اصطکاک بین ورق و سنبه، ضریب اصطکاک بین ورق و قالب و شعاع گوشه ماتریس) بر روی نیروی سنبه در فرایند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی بررسی شد. پس از طراحی آزمایش‌ها به روش طرح عاملی کسری و اجرای آن‌ها با استفاده از مدل اجزای محدود صحت‌سنجی شده، نتایج مورد نظر استخراج شد. سپس آنالیز واریانس برای تابع پاسخ نیروی سنبه صورت گرفت و نمودارهای اثرات اصلی و متقابل پارامترها به دست آمد. با بررسی نمودارها و همچنین آنالیز واریانس مشخص شد که:

۱. فشار بیشینه سیال و شعاع گوشه سنبه به‌عنوان تأثیرگذارترین پارامترها بر روی بیشینه نیروی سنبه در شکل‌دهی قطعات استوانه‌ای با پیشانی تخت به روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی می‌باشند.
۲. کاهش فشار بیشینه سیال از ۳۹ تا ۱۵ مگاپاسکال و نیز کاهش شعاع گوشه سنبه از ۱۰ تا ۲ میلی‌متر، منجر به کاهش بیشینه نیروی سنبه به میزان ۵۵٪ می‌شود.
۳. پارامترهای ضریب اصطکاک سنبه با ضریب اصطکاک قالب و نیز ضریب اصطکاک سنبه با شعاع گوشه ماتریس اثر متقابل دارند.
۴. با افزایش ضریب اصطکاک قالب در صورتی که ضریب اصطکاک سنبه در سطح کم باشد، میزان نیروی سنبه به میزان ۱۰٪ کاهش می‌یابد؛ همچنین با افزایش شعاع گوشه ماتریس، اگر

در شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب نمودارهای اثرات متقابل ضریب اصطکاک سنبه با ضریب اصطکاک قالب و نیز ضریب اصطکاک سنبه با شعاع گوشه ماتریس آمده است. طبق شکل‌ها، مشاهده شد که با افزایش ضریب اصطکاک قالب در صورتی که ضریب اصطکاک سنبه در سطح کم باشد، میزان نیروی سنبه بیشتر کاهش می‌یابد؛ همچنین با افزایش شعاع گوشه ماتریس، اگر ضریب اصطکاک سنبه در سطح کم باشد نیروی سنبه کاهش و اگر ضریب اصطکاک سنبه در سطح زیاد باشد، نیروی سنبه افزایش می‌یابد.

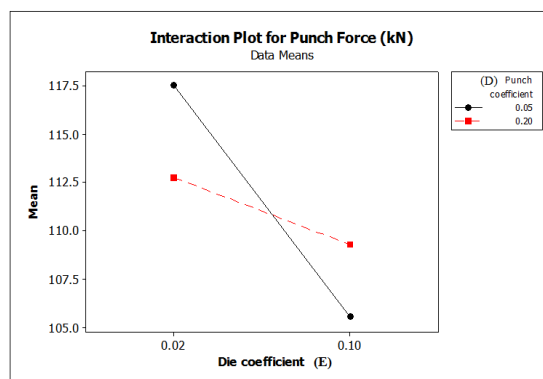


Fig. 9 Interaction of friction coefficients of the punch and die on punch force

شکل ۹ تعامل ضریب اصطکاک سنبه با ضریب اصطکاک قالب بر نیروی سنبه

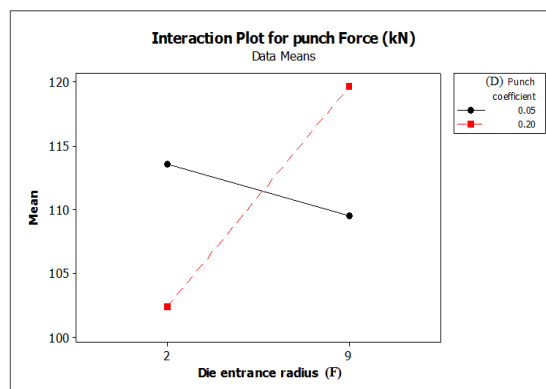


Fig. 10 Interaction of punch friction coefficient and die nose radius on punch force

شکل ۱۰ تعامل ضریب اصطکاک سنبه با شعاع گوشه ماتریس بر نیروی سنبه

معادله ۱ مدل رگرسیون برای نیروی سنبه بر اساس پارامترهای ورودی را نشان می‌دهد. همچنین میزان کفایت مدل (R^2) برابر با ۸۲٪ به دست آمد که مطلوب می‌باشد؛ به‌علاوه، تصویر فنجان شکل داده شده پس از کمینه‌سازی نیرو با استفاده از سطوح بهینه پارامترها در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

- in hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 41, pp. 1-16, 2019.
<https://doi.org/10.1007/s40430-019-1648-4>
- [9] V. Modanloo, V. Alimirzaloo, M. Elyasi, Optimal design of stamping process for fabrication of titanium bipolar plates using the integration of finite element and response surface methods, *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 45, pp. 1097-11017, 2020.
<https://doi.org/10.1007/s13369-019-04232-8>
- [10] Z. Zhang, F. Xu, X. Sun, Optimization of process parameters during hydroforming of tank bottom using NSGA-III algorithm, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 119, No. 5-6, pp. 4043-4055, 2022.
<https://doi.org/10.1007/s00170-021-08057-4>
- [11] V. Modanloo, A. Gorji, M. Bakhshi-Jooybari, A comprehensive thinning analysis for hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, Vol. 43, pp. 487-494, 2019.
<https://doi.org/10.1007/s40997-018-0221-6>
- [12] M. Türköz, H.S. Halkacı, An investigation of the effect of temperature variability of the tools on FEA of the warm hydromechanical deep drawing process, *SN Applied Sciences*, Vol. 2, No. 12, pp. 1939, 2020.
<https://doi.org/10.1007/s42452-020-03771-2>
- [13] V. Alimirzaloo, V. Modanloo, Minimization of the sheet thinning in hydraulic deep drawing process using response surface methodology and finite element method, *International Journal of Engineering*, Vol. 29, No. 2, pp. 264-273, 2016.
<https://doi.org/10.5829/idosi.ije.2016.29.02b.16>
- [14] A. Yaghoobi, A. Gorji, M. Bakhshi-Jooybari, H. Baseri, Artificial intelligence approach to predict thinning in the hydroforming process, *Advances in Materials and Processing Technologies*, Vol. 2, No. 2, pp. 252-257, 2016.
<https://doi.org/10.1080/2374068X.2016.1164530>
- [15] V. Modanloo, A. Doniavi, R. Hasanzadeh, Application of multi criteria decision making methods to select sheet hydroforming process parameters, *Decision Science Letters*, Vol. 5, No. 3, pp. 349-360, 2016.
<https://doi.org/10.5267/j.dsl.2016.2.005>
- [16] A. Hashemi, M. Hoseinpour-Gollo, S.H. Seyedkashi, A. Pourkamali-Anaraki, A new simulation-based metaheuristic approach in optimization of bilayer composite sheet hydroforming, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 39, pp. 4011-4020, 2017.
<https://doi.org/10.1007/s40430-017-0720-1>
- [17] M. Haghgoo, T. Mirzababaie Mostofi, M. Miralinaghi, H. Babaei, Using GMDH-type neural network model to predict the response of triangular plates under the hydrodynamic loading, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 10, No. 3, pp. 233-243, 2020.
- ضریب اصطکاک سنبه در سطح کم باشد نیروی سنبه کاهش و اگر ضریب اصطکاک سنبه در سطح زیاد باشد، نیروی سنبه افزایش می‌یابد.
۵. با توجه به نتایج مطلوب روش طرح عاملی کسری به دست آمده در این مقاله، پیشنهاد می‌شود که از این روش برای مدل‌سازی و پیش‌بینی پارامترهای اساسی و مؤثر در سایر فرایندهای پیچیده شکل‌دهی فلزات استفاده گردد.

۶- مراجع

- [1] Y. Gholyan, M. Elyasi, M. J. Mirnia, Study of fluid pressure on formability of metal sheets by using fixed and pulsating sheet hydroforming method, *Iranian journal of Marine technology*, vol. 8, No. 1, pp. 23-29, 2021. (in Persian)
<https://doi.org/10.22034/ijmt.2021.40609>
- [2] P. Ghanbari, B. Akhoundi, V. Modanloo, Numerical analysis of forming the tri-layer non-homogeneous bellows via the hydroforming process, *Trends in Computer Science and Information Technology*, Vol. 8, No. 1, pp. 016-022, 2023.
<https://doi.org/10.17352/tcsit.000064>
- [3] V. Modanloo, A. Gorji, M. Bakhshi, Experimental and numerical investigation of the sheet forming in hydroforming process, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 5, No. 4, pp. 27-33, 2015. (in Persian)
<https://doi.org/10.22044/jsfm.2015.566>
- [4] S. M. Hejazi Alhossini, M. Elyasi, M. J. Mirnia, Effect of heat treatment on formability of AA6061 aluminum alloy in the sheet hydroforming process, *Iranian journal of Marine technology*, Vol. 7, No. 3, pp. 39-50, 2020. (in Persian)
- [5] R. Ghasemi, M. Elyasi, H. Baseri, M. J. Mirnia, Microstructural analysis of sheet hydroforming process assisted by radial ultrasonic punch vibration in a hydro-mechanical deep drawing die, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 125, No. 11-12, pp. 5359-5368, 2023.
<https://doi.org/10.1007/s00170-023-11007-x>
- [6] V. Modanloo, B. Akhoundi, A. Mashayekhi, H. Talebi-Ghadikolaee, A. Zeinolabedin Beygi, The study of forming of steel cups using hydrodynamic deep drawing process, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 9, No. 8, pp. 56-64, 2022. (in Persian)
<https://doi.org/10.22034/ijme.2023.385634.1748>
- [7] M. Salahshoor, A. Gorji, M. B. Jooybari, The study of forming concave-bottom cylindrical parts in hydroforming process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 79, pp. 1139-1151, 2015.
<https://doi.org/10.1007/s00170-015-6908-6>
- [8] M. Salahshoor, H. Gorji, M. Bakhshi-Jooybari, Analysis of the effects of tool and process parameters

- Technology, Vol. 30, pp. 2237-2242, 2016.
<https://doi.org/10.1007/s12206-016-0433-x>
- [24] V. Modanloo, H. Talebi-Ghadikolaee, B. Akhoundi, A. Mashayekhi, F. Ahmadi Khatir, A. Zeinolabedin Beygi, Investigation of process parameters of the hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure using Taguchi and finite element methods, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, 2023. (in Persian)
<https://doi.org/10.22034/ijme.2023.390896.1762>
- [25] S. Hajiahmadi, M. Elyasi, M. Shakeri, Investigation of a new methodology for the prediction of drawing force in deep drawing process with respect to dimensionless analysis, *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, vol. 14, no. 1, pp. 1-13, 2019.
<https://doi.org/10.1186/s40712-019-0110-9>
- [26] S. Hajiahmadi, M. Elyasi, M. Shakeri, Development a new methodology for measuring deep drawing forces based on dimensionless evaluation, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 235, No. 19, pp. 4057-4069, 2021.
<https://doi.org/10.1177/0954406220969718>
- [27] E. Babazadeh Asbagh, V. Modanloo, V. Alimirzaloo, A. Donyavi, Experimental investigation of the effect of process parameters on the surface roughness in finishing process of chrome coated printing cylinders, *International Journal of Engineering*, Vol. 29, No. 12, pp. 1775-1782, 2016.
<https://doi.org/10.5829/idosi.ije.2016.29.12c.17>
- <https://doi.org/10.22044/jsfm.2020.9237.3087>
- [18] R. Mousavipoor, A. Gorji, M. Bakhshi, Optimization of the Initial Blank Shape in hydroforming Double-Stepped Parts, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 5, No. 3, pp. 137-149, 2015. (in Persian)
<https://doi.org/10.22044/jsfm.2015.582>
- [19] A.H. Rabiee, E. Sherkatghanad, A. Zeinolabedin Beygi, H. Moslemi Naeni, L. Lang, Experimental investigation and modeling of fiber metal laminates hydroforming process by GWO optimized neuro-fuzzy network, *Journal of Computational & Applied Research in Mechanical Engineering (JCARME)*, Vol. 12, No. 2, pp. 193-209, 2023.
<https://doi.org/10.22061/jcarme.2022.8268.2101>
- [20] D.C. Montgomery, Design and analysis of experiments, *John wiley & sons*, 2017.
- [21] J.D. Kechagias, K.E. Aslani, N.A. Fountas, N.M. Vaxevanidis, D.E. Manolakos, A comparative investigation of Taguchi and full factorial design for machinability prediction in turning of a titanium alloy, *Measurement*, Vol. 151, pp. 107213, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107213>
- [22] M. Moradian, A. Doniavi, V. Modanloo, V. Alimirzaloo, Process parameters optimization in gas blow forming of pin-type metal bipolar plates using Taguchi and finite element methods, *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*, Vol. 10, No. 2, pp. 101-107, 2017.
- [23] V. Modanloo, A. Gorji, M. Bakhshi-Jooybari, Effects of forming media on hydrodynamic deep drawing, *Journal of Mechanical Science and*