



Low-Velocity Impact Response of Plate with Different Geometries under Hydrodynamic Load: Experimental Investigation and Process Optimization by Response Surface Methodology

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Sayah Badkhor M.¹ MSc,
Mirzababaie Mostofi T.¹ PhD,
Babaei H. ^{*3} PhD

How to cite this article

Sayah Badkhor M, Mirzababaie Mostofi T, Babaei H. Low-Velocity Impact Response of Plate with Different Geometries under Hydrodynamic Load: Experimental Investigation and Process Optimization by Response Surface Methodology. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(4):807-818.

¹Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran
²Mechanical Engineering Faculty, University of Guilan, Rasht, Iran

*Correspondence

Address: University of Guilan, 5th Kilometers of Persian Gulf Highway, Rasht, Iran
Phone: +98 (13) 33690539
Fax: +98 (13) 33690271
ghbabaei@guilan.ac.ir

Article History

Received: July 2, 2019
Accepted: July 29, 2019
ePublished: April 17, 2020

ABSTRACT

In this paper, an experimental and numerical study on the inelastic deformation of fully clamped circular, rectangular and triangular plates under the low-velocity hydrodynamic loads has been conducted using the drop-hammer machine. In the experimental section, steel and aluminum plates with three different geometries of circular, rectangular and triangular in different thicknesses of 1 to 3 mm were examined. Experiments were carried out under different levels of energy by changing the height and mass of the hammer and the maximum permanent transverse deflection was recorded as the test output. For better understanding the effect of effective parameters in these experiments, the Design-Expert software was used. In this software, the simultaneous effect of these parameters was investigated using the response surface method. The plate thickness, the standoff distance of the hammer and the mass of hammer were considered as independent quantitative parameters, and the geometry of the plates along with the material of plates was considered as independent qualitative parameters. The obtained regression model has a confidence level of 95% for output prediction. Accordingly, the p-value for the model is less than 0.05, which means that the regression model is significant. The values of R2 and R2adj was 0.9803 and 0.97131, respectively. The results of the regression model have a good agreement with experimental results. In all experiments, the standoff distance of the hammer was the most effective parameter while the mass of the hammer had the least effect on the response. The optimum conditions for each plate were also determined.

Keywords Rectangular Plate; Circular Plate; Triangular Plate; Drop-Hammer; Inelastic Deformation; Response Surface Methodology

CITATION LINKS

[1] Large transverse deformation of double-layered rectangular plates subjected to gas mixture detonation ... [2] New dimensionless numbers for deformation of circular mild steel plates with large strains as a result of localized and uniform ... [3] On dimensionless numbers for the dynamic plastic response of quadrangular mild ... [4] Theoretical analysis on the effect of uniform and localized impulsive loading on the dynamic plastic behaviour of fully clamped ... [5] A note on hydroforming with constant fluid ... [6] Technology of sheet hydroforming with a movable female ... [7] On the hydrodynamic deep-drawing ... [8] An investigation of high-speed forming of circular plates in a liquid ... [9] Experimental and analytical investigation into plastic deformation of circular ... [10] Experimental study and analytical modeling for inelastic response of rectangular plates ... [11] Experimental and numerical investigation important parameters in deep drawing square sections two ... [12] Friction surfacing of AA7075-T6 deposition on AA2024-T351, Statistical ... [13] Experimental and numerical analysis and multi-objective optimization of quasi-static compressive test on thin-walled ... [14] Experimental investigation and dimensionless analysis of forming of rectangular ... [15] Study on the response of circular thin plate under low velocity ... [16] Experimental and theoretical study of large deformation of rectangular plates subjected to ... [17] Experimental investigation and numerical simulation of fluid-structure interaction on hydroforming process of triangular ... [18] Multi-objective optimum design of ANFIS for modelling and prediction of deformation of thin plates subjected to hydrodynamic ... [19] Closed-form analytical analysis on the effect of coupled membrane and bending ... [20] Dynamic plastic response of double-layered circular metallic plates due to localized ... [21] The influence of gas mixture detonation loads on large plastic deformation of thin quadrangular ... [22] Experimental and theoretical study on large ductile transverse deformations of rectangular plates subjected to shock load due ... [23] Response surface methodology: Process and product optimization using designed ...

پاسخ ضربه سرعت‌پایین ورق با هندسه‌های مختلف تحت بار هیدرودینامیکی: مطالعه تجربی و بهینه‌سازی فرآیند با روش سطح پاسخ

مصطفی سیاح‌بادخور MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی برق، مکانیک و کامپیوتر، دانشگاه ایوان‌کی، ایوان‌کی، ایران

توحید میرزابابایی مستوفی PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی برق، مکانیک و کامپیوتر، دانشگاه ایوان‌کی، ایوان‌کی، ایران

هاشم بابایی PhD*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

چکیده

در این مقاله به بررسی تجربی و عددی تغییر شکل غیرالاستیک ورق‌های دایروی، مستطیلی و مثلثی کاملاً گیردار تحت بارگذاری هیدرودینامیکی با سرعت پایین توسط سامانه چکش پرتابه‌ای پرداخته شده است. در بخش تجربی، ورق‌های فولادی و آلومینیومی با سه هندسه دایره‌ای، مستطیلی و مثلثی در ضخامت‌های ۱ تا ۳ میلی‌متر مورد آزمایش قرار گرفت. آزمایش‌ها تحت سطوح انرژی مختلف با تغییر ارتفاع و جرم چکش انجام گرفت و بیشترین خیز دائمی ورق به‌عنوان خروجی آزمایش ثبت شد. به‌منظور فهم بهتر اثر پارامترهای مهم این آزمایش‌ها از نرم‌افزار طراح آزمایش استفاده شد که با استفاده از روش سطح پاسخ به بررسی تاثیر همزمان این پارامترها پرداخته شد. ضخامت ورق، ارتفاع وزنه و جرم وزنه در این آزمایش به‌عنوان پارامترهای مستقل کمی و هندسه ورق و جنس ورق به‌عنوان پارامترهای مستقل کیفی در نظر گرفته شد. مدل رگرسیون به‌دست‌آمده، دارای سطح اطمینان ۹۵٪ برای پیش‌بینی خروجی است. بر این اساس، p-value برای مدل کمتر از ۰/۰۵ به‌دست آمد و این یعنی مدل دنظرگرفته‌شده معنی‌دار است. در این بررسی مقدار R^2 و R^2_{adj} به‌ترتیب برابر ۰/۹۸۰۳ و ۰/۹۷۱۳ به‌دست آمده است. نتایج حاصل از مدل رگرسیونی با نتایج تجربی مطابقت خیلی خوبی دارد. در تمامی آزمایش‌ها، ارتفاع وزنه بیشترین تاثیر و جرم چکش نیز کمترین اثر بر پاسخ را داشت. ضمناً شرایط بهینه برای هرکدام از ورق‌ها نیز تعیین شده است.

کلیدواژه‌ها: ورق مستطیلی، ورق دایره‌ای، ورق مثلثی، چکش پرتابه‌ای، تغییر شکل غیرالاستیک، روش سطح پاسخ

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۴/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۵/۷

*نویسنده مسئول: ghbabaei@guilan.ac.ir

۱- مقدمه

فرآیند شکل‌دهی با سرعت بالا، فرآیندی است که در آن مقدار زیادی انرژی در فاصله زمانی کوتاه آزاد می‌شود، لذا قطعه کار در برابر فشار زیادی قرار می‌گیرد. در این روش، ماده در کسری از ثانیه به سرعت و شتاب بالایی می‌رسد؛ به‌طوری که سرعت شکل‌گیری قطعه بیش از ۱۵ متر بر ثانیه است. در روش شکل‌دهی با نرخ انرژی پایین، برای شکل‌دهی فلزات از یک جرم به‌عنوان ضربه‌زننده استفاده می‌شود. آنچه در این شیوه اهمیت دارد، آن است که سرعت جرم هنگام ضربه‌زدن، می‌تواند حدود کمتر از ۹ متر

بر ثانیه باشد. انرژی تولیدی در این روش با انرژی تولیدشده به روش شکل‌دهی با سرعت بالا که در آن سرعت موج ضربه حدود ۷۶۰۰ متر بر ثانیه است، قابل قیاس نیست؛ بنابراین در روش شکل‌دهی با سرعت بالا فشار زیادی در مدت کوتاهی بر قطعه اعمال می‌شود [1, 2].

روش نرخ انرژی بالا دارای معایب و مزایایی است. به‌طور مثال، این روش معمولاً توسط خرج انفجاری انجام می‌شود که صدای ناهنجار انفجار، امکان بروز حادثه، عدم دسترسی آسان به مواد منفجره و مسائل امنیتی از معایب و محدودیت‌های این روش است. شایان توجه است که در شکل‌دهی سرعت‌پایین قطعات، معایب ذکرشده برای نمونه‌ها حذف شده و این موضوع می‌تواند از نقاط قوت آن در مقایسه با روش‌های شکل‌دهی با سرعت بالا باشد.

در روش‌های با نرخ انرژی پایین، با وجود اینکه میزان شکل‌پذیری ورق محدود بوده و با سرعتی پایین انجام می‌شود، ولی ارزان و قابل دسترس هستند که این موضوع باعث جذب محققین شده است. این روش، در شمار پایین تولید و در مقیاس نمونه‌سازی می‌تواند جایگزین مناسبی برای فرآیند با نرخ انرژی بالا باشد [3, 4].

تحقیقات تجربی نسبتاً گسترده‌ای در زمینه شکل‌دهی با نرخ انرژی بالا توسط خرج انفجاری انجام شده است؛ اما در خصوص شکل‌دهی با نرخ انرژی پایین با دستگاه چکش پرتابه‌ای، تحقیقات بسیار محدود بوده که شاخص‌ترین آن مربوط به آزمایش‌های کوزینگ و اسکيو بوده است. آنها از ورق‌های مسی با ضخامت‌های متفاوت برای انجام آزمایش‌های خود استفاده کردند. در این تحقیقات، برای مدل‌سازی تحلیلی از معادلات انرژی مولر استفاده شده است [5-8].

از تحقیقات انجام‌شده با سامانه چکش پرتابه‌ای می‌توان به تحقیق بابایی و همکاران اشاره کرد. در این تحقیقات به بررسی تجربی و تحلیلی تغییر شکل پلاستیک ورق‌های دایروی و مستطیلی تحت بارگذاری هیدرودینامیکی پرداخته شده است که در قسمت تحلیلی با استفاده از روش انرژی یک رابطه برای حداکثر خیز مرکز ورق ارائه شده است [9, 10].

گلمکانی و همکاران، به بررسی کشش عمیق با اجزاء لاستیکی پرداختند. آنها نمونه مربعی را با استفاده از قالب با ماتریس لاستیکی به‌صورت عملی و شبیه‌سازی سه‌بعدی، شکل دادند. در نهایت به کمک روش پاسخ سطح به بررسی پارامترهایی از جمله شعاع سنبه، جایگشت، جنس ورق و مقدار فاصله اولیه بین ورق‌گیر بر نازک‌شدگی، نیروی وارد بر سنبه و نیروی ورق‌گیر پرداختند [11].

مصطفی‌پور و همکاران، به بررسی تاثیر پوشش‌دهی اصطکاکی آلیاژ آلومینیوم روی یک فلز دیگر به روش سطح پاسخ پرداختند. آنها تاثیر پارامترهای فرآیند بر خواص مکانیکی و ریزساختار را به کمک این روش بیان کردند [12].

بیگدلی و همکاران، با استفاده از روش سطح پاسخ به بررسی

۲-۱- دستگاه چکش پرتابه‌ای

یکی از سامانه‌های به‌کاررفته جهت شکل‌دهی ضربه‌ای ورق با سرعت پایین، سامانه چکش پرتابه‌ای است که در شکل ۱ نمایش داده شده است. عملکرد این سامانه بدین گونه است که انرژی پتانسیل ناشی از رهاسازی وزنه‌ای در ارتفاع مشخص به انرژی جنبشی پیستون تبدیل شده و به‌صورت بار ضربه‌ای به سیال به‌کاررفته در حوضچه جوش‌شده به سیلندر وارد می‌شود. به‌عبارت دیگر انرژی جنبشی پیستون به فشار هیدرودینامیکی در سیال تبدیل می‌شود و به‌تبع آن ورق تغییر شکل می‌یابد. اجزاء مختلف این سامانه و نحوه عملکرد آن در مرجع [9] به‌تفصیل مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱) دستگاه چکش پرتابه‌ای

۲-۲- نمونه‌های آزمایشی

در این بخش، سه ورق با هندسه و شرایط متفاوت برای آزمایش ساخته شده است. در مطالعات آزمایشگاهی روی ورق‌های مستطیلی، نمونه ورق‌های مورد آزمایش از جنس فولاد نرم و آلیاژ آلومینیم در ضخامت‌های متفاوت ۱، ۲ و ۳ میلی‌متر است. در ابتدا نمونه ورق‌ها به‌صورت مستطیلی در ابعاد 31×26 سانتی‌متر برش زده شده‌اند. ورق‌های برش‌خورده جهت نصب در ورق‌گیرهای جلو و عقبی و همچنین مهار آن، سوراخ‌کاری شده است. سپس نمونه‌ها میان دو صفحه فولادی به ابعاد 31×26 سانتی‌متر و با ضخامت 20 میلی‌متر قرار داده شده و به‌وسیله پیچ‌هایی که در پیرامون این صفحات تعبیه شده‌اند، مهار شده است. شایان ذکر است که ورق‌گیر (گیره) جلو به حوضچه‌ای به ابعاد 20×15 سانتی‌متر و سیلندری کاملاً صیقلی به قطر داخلی 12 سانتی‌متر به‌صورت یکپارچه جوش داده شده است. در وسط صفحه پایینی، سوراخی به ابعاد 20×15 سانتی‌متر ایجاد شده است. این سوراخ‌ها برای اعمال بار هیدرودینامیکی روی ورق و در صفحه پایینی شکل‌گیری ورق است. همچنین در میانه و کف سیلندر، به‌ترتیب سوراخی جهت هواگیری و نصب حسگر فشار قرار گرفته است. شایان ذکر است که حسگر فشار استفاده‌شده به شکل استوانه‌ای، قطر 16 و ارتفاع 33 میلی‌متر است که قابلیت کار در محیط سیال و گاز را دارد. جداره این حسگر دارای رزوه‌ای است که برای استفاده باید

تجربی و عددی شرایط بهینه برای فشرده‌سازی استاتیکی سیلندره‌ای جدار نازک پرداختند. آنها ضمن بررسی پارامترهای مختلف به‌صورت همزمان، شرایط بهینه را نیز تعیین کردند [13]. با مرور مطالعات پیشین، این نتیجه حاصل شد که تمامی مطالعات در زمینه شکل‌دهی با نرخ انرژی پایین [14-18] و بالا [19-22] مربوط به بررسی‌های تجربی و عددی برای ورق‌های دایره‌ای و مستطیلی بوده و کمترین تحقیقی در زمینه شکل‌دهی ورق‌های مثلثی با آب انجام شده است؛ لذا انجام مطالعات آزمایشگاهی روی پاسخ سرعت پایین ورق‌های فلزی دایره‌ای، مستطیلی و مثلثی به‌منظور مطالعه پارامترهای مختلف و بررسی اثرگذاری آنها، می‌تواند از اهمیت بالایی برخوردار باشد. شایان توجه است که در تحقیقات انجام‌شده توسط محققان، تاکنون مطالعه‌ای روی مدل‌سازی فرآیند شکل‌دهی ورق‌های مثلثی با نرخ انرژی پایین با سامانه چکش پرتابه‌ای و شناسایی پارامترهای موثر بر آن نیز انجام نگرفته است.

با توجه به توضیحات ارائه‌شده، مهم‌ترین نوآوری‌های تحقیق حاضر در بخش آزمایشگاهی شامل بررسی رفتار پلاستیک ورق‌های فلزی دایره‌ای، مستطیلی و مثلثی با ضخامت‌های مختلف و در بخش مدل‌سازی شامل ارائه مدلی برای فرآیند شکل‌دهی ورق‌های فلزی دایره‌ای، مستطیلی و مثلثی تحت بارگذاری ضربه‌ای است. با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها و نرم‌افزار طراح آزمایش و روش سطح پاسخ، تاثیر پارامترهای مختلف روی این روش شکل‌دهی مشخص شده است. در انتها نیز شرایط بهینه برای کمترین تغییر شکل در ورق تعیین شده است.

۲- مطالعه تجربی

شکل‌دهی هیدرودینامیکی روشی مبتنی بر انتقال نرخ انرژی پایین است. سامانه به‌کاررفته در این فرآیند، دستگاه چکش پرتابه‌ای است که به‌وسیله آن انرژی پتانسیل وزنه‌ای در ارتفاع معین به انرژی جنبشی تبدیل شده و به‌صورت بار ضربه‌ای به پیستون و سیال واسط (آب) وارد می‌شود. به‌عبارت دیگر انرژی جنبشی پرتابه به فشار هیدرودینامیکی در سیال تبدیل می‌شود و به‌تبع آن تغییر شکل ورق رخ می‌دهد. نرخ تغییر شکل در این فرآیند در بازه میلی‌ثانیه است. این روش ماهیتی کاملاً مکانیکی دارد. در این فرآیند به دلیل توزیع یکنواخت فشار چکش، از سیال واسط نظیر آب بین ورق و چکش استفاده می‌شود. اختلاف عمده روش هیدروفرمینگ نسبت به فرآیند موسوم به کشش ورق، در نوع سنبه آن است. در واقع در این روش از یک سیال (معمولاً آب یا ترکیب آب و روغن) یا یک ماده انعطاف‌پذیر به‌جای سنبه استفاده می‌شود. کیفیت سطحی بالای قطعات، یکنواختی ضخامت، کشش قطعات پیچیده در یک مرحله، عمق کشش بیشتر به همراه توزیع مناسب کرنش و عدم نیاز به ساخت قالب و در نتیجه کاهش هزینه از مزایای این روش نسبت به فرآیند کشش عمیق است [8].

در ابعاد 200×250 میلی‌متر برش خورده و سوراخ‌کاری شده است [17].

۲-۳- خواص مکانیکی ورق‌ها

خواص مکانیکی مواد مورد استفاده در این مجموعه آزمایش‌ها از انجام آزمون کشش تک‌محوری روی نمونه‌های آماده‌شده از ورق‌هایی با جنس فولاد نرم و آلومینیوم تعیین شده است. برای بررسی همگنی خواص مواد، از هر ورق در سه راستای مختلف افقی، عمودی و اریب (45° درجه) نمونه‌هایی را با دستگاه وایرکات برش زده و سپس تحت آزمایش کشش با شرایط کاملاً یکسان قرار داده شده‌اند. شایان ذکر است که آزمون کشش روی ورق‌های بریده‌شده برای تعیین نمودار تنش- کرنش مطابق با استاندارد ASTM-E8 صورت گرفته است. خواص مکانیکی مربوط به هر کدام از آزمایش‌ها در جدول ۱ آمده است.

۲-۴- نتایج آزمایش‌ها

در این قسمت، نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های انجام شده، بیانگر حداکثر خیز و همچنین حداکثر فشار اعمال‌شده به ورق‌های مورد آزمایش تحت بارگذاری هیدرودینامیکی توسط سامانه چکش پرتابه‌ای است که در آن اثر تغییرات جنس، ضخامت ورق و تغییرات شرایط بارگذاری، با توجه به تغییرات ارتفاع چکش پرتابه‌شده، در نظر گرفته شده است. تغییر ارتفاع چکش پرتابه‌شده موجب افزایش انرژی انتقالی به ورق و به‌تبع آن تغییر نرخ سرعت تغییر شکل می‌شود. انرژی تولیدشده در این فرآیند با صرف‌نظر از اصطکاک از رابطه ۱ به‌دست می‌آید:

$$U = mgh \quad (1)$$

که در آن m جرم چکش و h ارتفاع چکش نسبت به ورق قبل از سقوط آزاد است.

در شکل ۲، نمونه‌هایی از تغییر شکل پلاستیک ورق‌های مستطیلی، دایره‌ای و مثلثی تحت بارگذاری هیدرودینامیکی با دستگاه چکش پرتابه‌ای نشان داده شده است. در تصاویر نشان‌داده‌شده، هیچ گونه آثار تخریب ناشی از بارگذاری دیده نمی‌شود. در جدول ۲ کلیه مشخصات و نتایج آزمایش‌های انجام‌شده روی نمونه‌ها آمده است.

جداره سیلندر را در انتهای‌ترین قسمت قلاویز کرد و این حسگر را در آن قسمت قرار داد. پس از بستن صفحات بالایی و پایینی، در داخل سیلندر، آب تا ارتفاع بیش از محل قرارگیری شیر تخلیه هوا ریخته می‌شود و سپس با قراردادن پیستون و فشاردادن آن به سمت پایین، تخلیه هوا صورت گرفته و سامانه آماده برخورد چکشی که از ارتفاع معین پرتاب می‌شود، است [10].

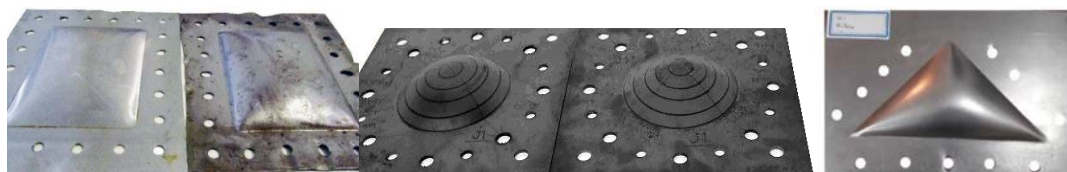
در مطالعات آزمایشگاهی روی ورق‌های دایروی، نمونه ورق‌های مورد آزمایش از دو جنس مختلف، فولاد نرم و آلومینیوم ۱۱۰۰ استفاده شده است. لازم به ذکر است که ورق‌های فولادی در ضخامت‌های ۱ و ۲ میلی‌متر و همچنین ورق‌های آلومینیومی با ضخامت‌های ۱، ۲ و ۳ میلی‌متر تهیه شده است. سپس نمونه‌ها میان دو صفحه فولادی به ابعاد 250×250 میلی‌متر و با ضخامت ۲۰ میلی‌متر قرار داده شده و به‌وسیله پیچ‌هایی که در پیرامون ورق‌گیر تعبیه شده‌اند، کاملاً مهار می‌شوند. در وسط ورق‌گیر، سوراخی به قطر ۱۰۰ میلی‌متر ایجاد شده است. این سوراخ در ورق‌گیر جوش شده به سیلندر برای اعمال بار هیدرودینامیکی روی ورق و در ورق‌گیر پشتی برای امکان خروج و شکل‌گیری ورق طراحی شده است. ورق‌گیر جلویی به سیلندری با جدار کاملاً صیقلی به‌صورت یکپارچه جوش داده شده است. پس از بستن برق‌گیرهای جلویی و پشتی، در داخل سیلندر، آب تا ارتفاع بیش از محل قرارگیری شیر تخلیه هوا ریخته می‌شود و سپس با قراردادن پیستون و تخلیه هوا، سامانه آماده برخورد چکش می‌شود.

مطابق شکل ۱، وزنه‌ای به جرم $70/4$ کیلوگرم در میان چهار ریل مهارشده تا ارتفاع متناسب با انرژی پتانسیل مورد نظر توسط موتور الکتریکی به سمت بالا کشانده و با رهاسازی دستگیره مغناطیسی، وزنه سقوط آزاد کرده و انرژی جنبشی حاصل از سقوط وزنه به سیال واسط منتقل شده و در نهایت موجب شکل‌دهی ورق می‌شود [9].

برای ورق‌های مثلثی، نمونه ورق‌های مورد آزمایش از جنس فولاد نرم در ضخامت‌های متفاوت ۱ و میلی‌متر است. نمونه‌ها بر اساس حوضچه سامانه و پیچ‌های آن برای ثابت نگه‌داشتن ورق،

جدول ۱) خواص مکانیکی

| هندسه | ماده | میانگین تنش نهایی (MPa) | میانگین تنش تسلیم استاتیکی (MPa) | چگالی (kg/m^3) | مدول الاستیسیته (GPa) | ضریب پواسون |
|----------|-----------|-------------------------|----------------------------------|---------------------------|-----------------------|-------------|
| مستطیلی | فولاد | ۴۷۶ | ۲۸۹ | ۷۸۵۰ | ۲۱۰ | ۰/۳ |
| | آلومینیوم | ۱۵۳ | ۱۲۶ | ۲۷۰۰ | ۷۰ | ۰/۳۳ |
| دایره‌ای | فولاد | ۳۷۰ | ۳۲۰ | ۷۸۳۰ | ۲۱۰ | ۰/۳ |
| | آلومینیوم | ۱۵۰ | ۱۲۰ | ۲۷۰۰ | ۷۰ | ۰/۳۳ |
| مثلثی | فولاد | ۳۷۰ | ۳۰۵ | ۷۸۶۱ | ۲۱۰ | ۰/۳ |



شکل ۲) نمونه‌هایی از تغییر شکل ورق مستطیلی، دایره‌ای و مثلثی تحت بارگذاری هیدرودینامیکی

| شماره آزمایش | هندسه | جنس ورق | ضخامت ورق (mm) | ارتفاع وزنه (cm) | خیز مرکز ورق (mm) |
|--------------|----------|-----------|----------------|------------------|-------------------|
| ۱ | مستطیلی | فولاد | ۳ | ۲۸۰ | ۲۲/۰۵ |
| ۲ | مستطیلی | فولاد | ۳ | ۲۵۰ | ۲۰/۲۷ |
| ۳ | مستطیلی | فولاد | ۲ | ۲۵۰ | ۲۳/۹۸ |
| ۴ | مستطیلی | فولاد | ۱ | ۲۵۰ | ۳۵/۶۰ |
| ۵ | مستطیلی | فولاد | ۳ | ۲۲۵ | ۱۹/۴۲ |
| ۶ | مستطیلی | فولاد | ۲ | ۲۲۵ | ۲۳/۶۸ |
| ۷ | مستطیلی | فولاد | ۱ | ۲۲۵ | ۳۳/۸۵ |
| ۸ | مستطیلی | فولاد | ۳ | ۲۰۰ | ۱۸/۱۳ |
| ۹ | مستطیلی | فولاد | ۲ | ۲۰۰ | ۲۲/۴۷ |
| ۱۰ | مستطیلی | فولاد | ۱ | ۲۰۰ | ۳۱/۰۶ |
| ۱۱ | مستطیلی | فولاد | ۳ | ۱۷۰ | ۱۵/۰۶ |
| ۱۲ | مستطیلی | فولاد | ۲ | ۱۷۰ | ۱۸/۲۰ |
| ۱۳ | مستطیلی | فولاد | ۱ | ۱۷۰ | ۲۸/۹۷ |
| ۱۴ | مستطیلی | فولاد | ۲ | ۱۵۰ | ۱۸/۱۰ |
| ۱۵ | مستطیلی | فولاد | ۱ | ۱۵۰ | ۲۶/۸۱ |
| ۱۶ | مستطیلی | آلومینیوم | ۱ | ۴۰ | ۲۶/۰۱ |
| ۱۷ | مستطیلی | آلومینیوم | ۲ | ۴۰ | ۱۴/۱۰ |
| ۱۸ | مستطیلی | آلومینیوم | ۲ | ۵۰ | ۱۷/۰۱ |
| ۱۹ | مستطیلی | آلومینیوم | ۱ | ۳۵ | ۲۴/۴۱ |
| ۲۰ | مستطیلی | آلومینیوم | ۲ | ۷۰ | ۲۲/۷۷ |
| ۲۱ | مستطیلی | آلومینیوم | ۱ | ۲۵ | ۲۱/۷۷ |
| ۲۲ | مستطیلی | آلومینیوم | ۲ | ۶۰ | ۱۸/۶۸ |
| ۲۳ | مستطیلی | آلومینیوم | ۱ | ۱۵ | ۱۴/۱۲ |
| ۲۴ | مستطیلی | آلومینیوم | ۲ | ۳۰ | ۱۰/۷۰ |
| ۲۵ | مستطیلی | آلومینیوم | ۱ | ۲۰ | ۱۷/۴۹ |
| ۲۶ | دایره‌ای | فولاد | ۱ | ۱۰۰ | ۱۶/۰ |
| ۲۷ | دایره‌ای | فولاد | ۱ | ۱۲۵ | ۱۷/۸ |
| ۲۸ | دایره‌ای | فولاد | ۱ | ۱۵۰ | ۱۹/۸ |
| ۲۹ | دایره‌ای | فولاد | ۲ | ۱۰۰ | ۱۱/۹ |
| ۳۰ | دایره‌ای | فولاد | ۲ | ۲۰۰ | ۱۴/۴ |
| ۳۱ | دایره‌ای | فولاد | ۲ | ۳۰۰ | ۱۸/۷ |
| ۳۲ | دایره‌ای | آلومینیوم | ۱ | ۱۰ | ۸/۲ |
| ۳۳ | دایره‌ای | آلومینیوم | ۱ | ۲۰ | ۱۱/۵ |
| ۳۴ | دایره‌ای | آلومینیوم | ۱ | ۳۰ | ۱۴/۴ |
| ۳۵ | دایره‌ای | آلومینیوم | ۲ | ۳۰ | ۵/۸ |
| ۳۶ | دایره‌ای | آلومینیوم | ۲ | ۵۰ | ۱۱/۳ |
| ۳۷ | دایره‌ای | آلومینیوم | ۲ | ۶۵ | ۱۵/۰ |
| ۳۸ | دایره‌ای | آلومینیوم | ۳ | ۵۰ | ۸/۵ |
| ۳۹ | دایره‌ای | آلومینیوم | ۳ | ۶۵ | ۹/۳ |
| ۴۰ | دایره‌ای | آلومینیوم | ۳ | ۱۰۰ | ۱۵/۳ |
| ۴۱ | مثلثی | فولاد | ۱ | ۲۰۰ | ۲۲/۵ |
| ۴۲ | مثلثی | فولاد | ۱ | ۷۵ | ۲۱/۹ |
| ۴۳ | مثلثی | فولاد | ۱ | ۱۵۰ | ۲۱/۲۱ |
| ۴۴ | مثلثی | فولاد | ۱ | ۷۵ | ۱۹/۵۱ |
| ۴۵ | مثلثی | فولاد | ۱ | ۵۰ | ۱۹/۱ |
| ۴۶ | مثلثی | فولاد | ۱ | ۱۰۰ | ۱۸/۹۳ |
| ۴۷ | مثلثی | فولاد | ۱ | ۵۰ | ۱۶/۳۴ |
| ۴۸ | مثلثی | فولاد | ۱ | ۲۵۰ | پارگی |
| ۴۹ | مثلثی | فولاد | ۱ | ۱۵۰ | پارگی |
| ۵۰ | مثلثی | فولاد | ۱ | ۱۰۰ | پارگی |
| ۵۱ | مثلثی | فولاد | ۲ | ۲۵۰ | ۱۶/۱۲ |
| ۵۲ | مثلثی | فولاد | ۲ | ۲۰۰ | ۱۵/۱۲ |
| ۵۳ | مثلثی | فولاد | ۲ | ۱۵۰ | ۱۵/۰۴ |
| ۵۴ | مثلثی | فولاد | ۲ | ۲۵۰ | ۱۴/۹ |
| ۵۵ | مثلثی | فولاد | ۲ | ۱۰۰ | ۱۴/۱ |
| ۵۶ | مثلثی | فولاد | ۲ | ۲۰۰ | ۱۴/۰۲ |
| ۵۷ | مثلثی | فولاد | ۲ | ۱۵۰ | ۱۳/۹ |
| ۵۸ | مثلثی | فولاد | ۲ | ۱۰۰ | ۱۱/۷۲ |

۳- طراحی آزمایش

۳-۱- تحلیل واریانس خروجی

پس از بررسی مدل‌های مختلف ارایه‌شده و استفاده از روش تحلیل آماری واریانس، تحلیل پارامترهای مستقل و کمیت‌های R^2 و R^2_{adj} مشخص شد که از بین مدل‌های پیشنهادی، مدل درجه دوم اصلاح‌شده، تطبیق بهتری با نتایج آزمایش برای تغییر شکل ساختار دو لایه دارد. آنالیز واریانس برای عواملی که مقدار p آنها کمتر از ۰/۱ بود در جدول ۴ آمده است. این پارامترها نشان‌دهنده تاثیر بالای هر کدام از آنها بر خروجی دارد. در این بررسی به منظور معنی‌دار بودن مدل، سطح اطمینان ۹۵٪ در نظر گرفته شده است. بر این اساس، p -value برای مدل کمتر از ۰/۰۵ به دست آمده و این یعنی مدل در نظر گرفته شده معنی‌دار است. مقدار R^2 و R^2_{adj} به ترتیب برابر ۰/۹۸۰۳ و ۰/۹۷۱۳ به دست آمده است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که مدل ارایه‌شده برای این آزمایش مناسب بوده و مقادیر به دست آمده از آزمایش با مقادیر پیش‌بینی‌شده برای خروجی، بر اساس مدل مطابقت دارد. مقایسه بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده از روش سطح پاسخ در نمودار ۱ نشان داده شده است. نزدیک بودن داده‌ها نزدیک خط مورب بدان معنا است که مدل، پیش‌بینی خوبی از تغییر شکل ساختار دو لایه نسبت به آزمایش‌های تجربی دارد. همچنین تفاوت رنگ در نقاط داخل نمودار، نشان‌دهنده تفاوت در مقدار تغییر شکل ورق که از آبی تا قرمز (یعنی از کم تا زیاد) نشان داده شده است.

در نمودارهای ۲ و ۳، به ترتیب، نمودارهای احتمال نرمال باقی‌مانده‌ها و باقی‌مانده‌ها برحسب مقادیر پیش‌بینی‌شده بعد از حذف عوامل غیرموثر در مدل رگرسیونی نشان داده شده است. طبق یک قانون کلی برای احتمال نرمال باقی‌مانده‌ها، داده‌های این نمودار باید ۳ ویژگی داشته باشند؛ اول اینکه باید داده‌های احتمالی بین ۲۵ تا ۷۵ باشند، دوم اینکه باید این داده‌ها بیشتر از ۹۹ و کمتر از ۱ نیز نباشند و سوم اینکه باید بیش از ۹۵٪ باقی‌مانده‌ها بین مقادیر ۲ و ۲- باشند.

جدول ۴) نتایج آزمون آنوا برای مدل سطح پاسخ جابجایی ورق (Y)

| منبع | مجموع مربعات | درجه آزادی | متوسط مربعات | F-value | Probe > F |
|-------------------------------|--------------|------------|--------------|---------|-----------|
| مدل (Y) | ۱۹۹۱/۹۵ | ۱۷ | ۱۱۷/۱۷ | ۱۰۸/۵۵ | <۰/۰۰۰۱ |
| X ₁ | ۱۸۱/۳۸ | ۲ | ۹۰/۶۹ | ۸۴/۰۲ | <۰/۰۰۰۱ |
| X ₂ | ۸۳۶/۲۷ | ۱ | ۸۳۶/۲۷ | ۷۷۴/۷۴ | <۰/۰۰۰۱ |
| X ₃ | ۲۰۳/۴۱ | ۱ | ۲۰۳/۴۱ | ۱۸۸/۴۴ | <۰/۰۰۰۱ |
| X ₄ | ۱۰/۴۶ | ۱ | ۱۰/۴۶ | ۹/۶۹ | ۰/۰۰۳۶ |
| X ₅ | ۵۶/۸۰ | ۲ | ۲۸/۴۰ | ۲۶/۳۱ | <۰/۰۰۰۱ |
| X ₁ X ₂ | ۸/۲۴ | ۲ | ۴/۱۲ | ۳/۸۲ | ۰/۰۳۱۱ |
| X ₁ X ₃ | ۱۹۴/۵۸ | ۲ | ۹۷/۲۹ | ۹۰/۱۳ | <۰/۰۰۰۱ |
| X ₂ X ₃ | ۱۵/۶۸ | ۱ | ۱۵/۶۸ | ۱۴/۵۳ | ۰/۰۰۰۵ |
| X ₂ X ₅ | ۲۵/۶۲ | ۲ | ۱۲/۸۱ | ۱۱/۸۷ | ۰/۰۰۰۱ |
| X ₃ X ₅ | ۱۴/۶۹۷ | ۲ | ۷۳/۴۸ | ۶۸/۰۸ | <۰/۰۰۰۱ |
| X ₂ ² | ۳۳/۷۲ | ۱ | ۳۳/۷۲ | ۳۱/۲۴ | <۰/۰۰۰۱ |
| باقی‌مانده | ۳۹/۹۴ | ۳۷ | ۱/۰۸ | - | - |
| خطای خالص | ۲۰۳۱/۸۹ | ۵۴ | - | - | - |

با توجه به اینکه پارامترهای موثر در فرآیند شکل‌دهی ورق‌ها با سرعت پایین زیاد است، بنابراین استفاده از روش‌های ساده مانند تغییر یک پارامتر در هر زمان نیز نمی‌تواند به خوبی تاثیر و برهمکنش بین پارامترها را نشان دهد؛ بنابراین استفاده از نرم‌افزار طراحی آزمایش می‌تواند موثر باشد. در بین روش‌های طراحی آزمایش، روش سطح پاسخ (RSM) به علت دقت خوب در تعیین تاثیرات برهمکنشی پارامترها، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این روش، انجام تعدادی آزمایش تعیین‌شده توسط نرم‌افزار طراحی آزمایش یا استفاده از نتایج آزمایش‌های انجام‌شده، می‌تواند تاثیر پارامترهای مهم را بر خروجی‌های نهایی تعیین کند.

به منظور تعیین تاثیر پارامترهای فرآیند شکل‌دهی ورق‌های دو لایه تحت بارگذاری انفجاری و با توجه به داشتن اطلاعات مربوط به آزمایش از طرح داده‌های تجربی (Historical Data) در نرم‌افزار طراحی آزمایش استفاده شده است. روش سطح پاسخ به منظور تجزیه و تحلیل نتایج، از ابزار قدرتمندی به نام تحلیل واریانس (ANOVA) استفاده می‌کند. نتایج تحلیل واریانس به طور معمول به صورت جدولی شامل مجموع مربعات هر عامل و خطا، درجه آزادی هر عامل و خطا، میانگین مربعات (واریانس) هر عامل و خطا، پارامتر معنی‌داری پاسخ برای عامل (F) و سهم هر عامل در پاسخ (p-value) ارایه می‌شود.

تعداد ۵۸ آزمایش انجام شد که داده‌های آنها در جدول ۲ آمده است. با توجه به داده‌های انجام آزمایش‌ها، ۳ متغیر به عنوان پارامترهای مستقل عددی و دو متغیر به عنوان پارامترهای مستقل کیفی و یک متغیر نیز به عنوان جواب در نظر گرفته شده است. تغییر شکل ورق دو لایه پارامتر خروجی، تنش تسلیم و هندسه ورق پارامترهای مستقل کیفی و ضخامت ورق، وزن چکش و ارتفاع سقوط چکش پارامترهای مستقل عددی در این بررسی هستند (جدول ۳).

رابطه بین خروجی و پارامترهای مستقل به صورت یک چند جمله‌ای با مرتبه دوم است که معادله آن در زیر آمده است:

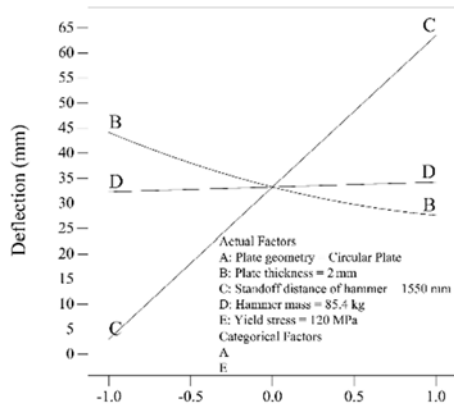
$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=2}^3 \beta_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

که در آن Y پاسخ محاسبه‌شده، X_i و X_j متغیرهای کدگذاری‌شده، β_0 ضریب ثابت، β_j ضریب خطی، β_{jj} ضریب مرتبه دوم و β_{ij} ضریب متقابل است [14].

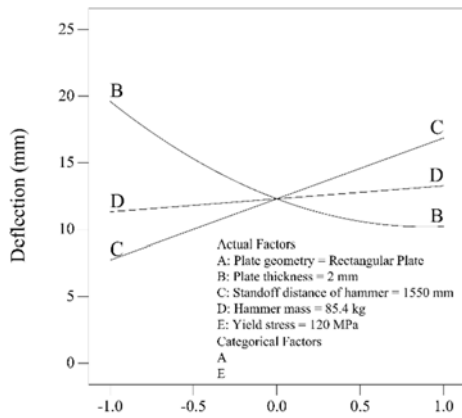
جدول ۳) پارامترهای روش سطح پاسخ و تغییرات آنها

| پارامتر | نوع پارامتر | واحد | نماد | حداقل | حداکثر |
|---------------|-------------|------|----------------|-------|--------|
| هندسه ورق | کیفی | - | X ₁ | - | - |
| ضخامت ورق | کمی | mm | X ₂ | ۱ | ۳ |
| ارتفاع وزنه | کمی | mm | X ₃ | ۱۰۰ | ۳۰۰۰ |
| جرم وزنه | کمی | kg | X ₄ | ۷۰/۴ | ۱۰۰/۴ |
| تنش تسلیم | کیفی | MPa | X ₅ | ۱۲۰ | ۳۲۰ |
| تغییر شکل ورق | کمی | mm | Y ₁ | - | - |

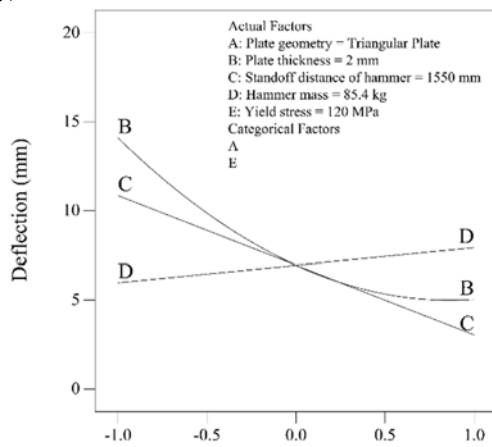
نمودار بدین ترتیب است که شیب بیشتر خط مربوط به هر کدام از پارامترها، نشان‌دهنده تاثیر بیشتر آن پارامتر روی تغییر شکل ورق است. به منظور بررسی همزمان متغیرها، تغییر شکل هر سه ورق در تنش تسلیم ۱۲۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. در تغییر شکل هر سه ورق، ارتفاع وزنه بیشترین تاثیر و جرم چکش نیز کمترین تاثیر را دارد. در نمودارهای ۵ تا ۹، اثر متقابل دو پارامتر بر تغییر شکل ورق ضمن ثابت‌در نظر گرفتن پارامتر سوم نشان داده شده است.



(الف)

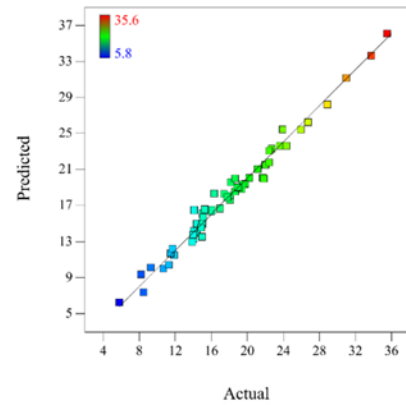


(ب)

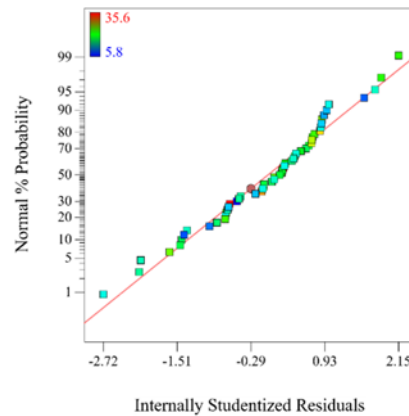


(ج)

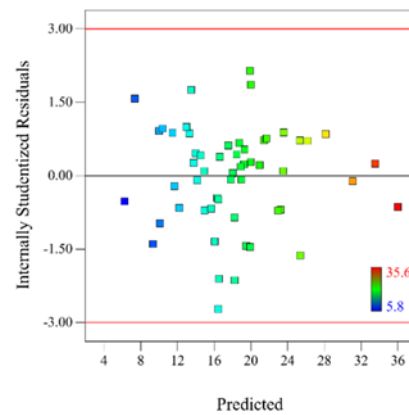
نمودار ۴) تاثیر پارامترهای مستقل بر تغییر شکل ورق: الف) ورق دایره‌ای، ب) ورق مستطیلی، ج) ورق مثلثی



نمودار ۱) مقایسه بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده از روش سطح پاسخ



نمودار ۲) احتمال نرمال باقی‌مانده‌ها

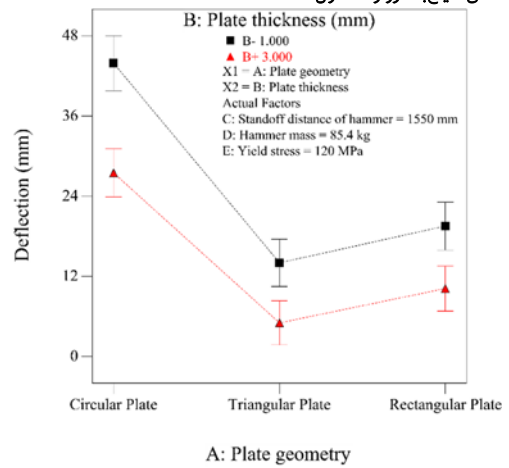
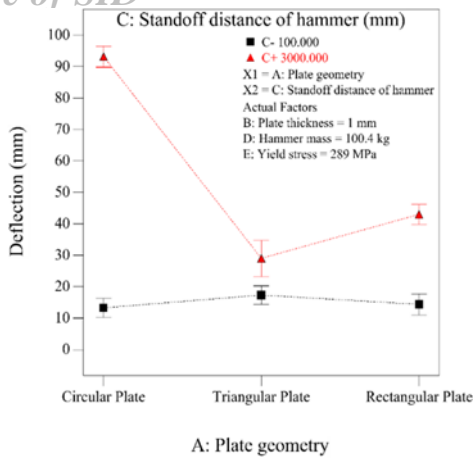


نمودار ۳) باقی‌مانده‌ها بر حسب مقادیر پیش‌بینی‌شده

با توجه به این قانون کلی، نمودار احتمال نرمال باقی‌مانده‌ها، توزیع مناسبی از خطاها دارد و قابل قبول است. در نمودار ۳ نیز نمودار باقی‌مانده‌ها بر حسب مقادیر پیش‌بینی‌شده نشان داده شده است. در اینجا نیز به عنوان یک قانون کلی برای باقی‌مانده‌ها، باید خطاها بین مقادیر ۳ و -۳ توزیع شده باشند؛ بنابراین این نمودار نشان می‌دهد که خطاهای مقادیر پیش‌بینی‌شده، در محدوده مشخص قرار دارند و قابل قبول هستند.

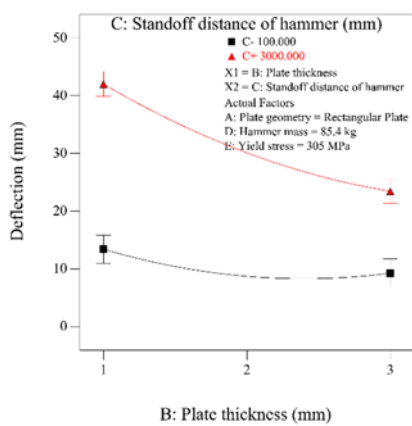
۳-۲- تحلیل آماری خروجی

در این بخش به تاثیر متقابل پارامترهای مستقل به طور همزمان روی خروجی پرداخته شده است. در نمودار ۴، تاثیر پارامترهای مستقل بر تغییر شکل ورق نشان داده شده است. تحلیل این

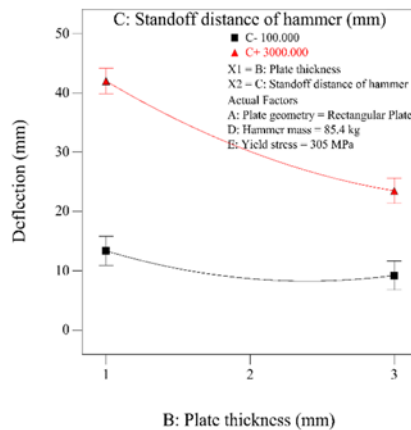


نمودار (۶) تاثیر هندسه ورق و ارتفاع وزنه بر تغییر شکل ورق

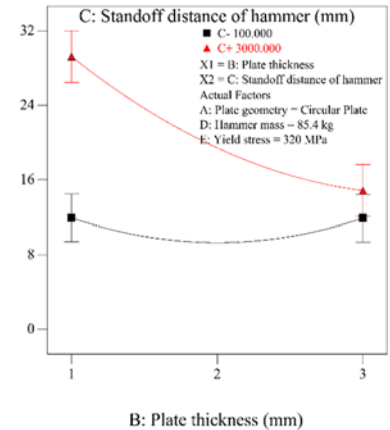
نمودار (۵) تاثیر ضخامت و هندسه ورق بر تغییر شکل ورق



(ج)

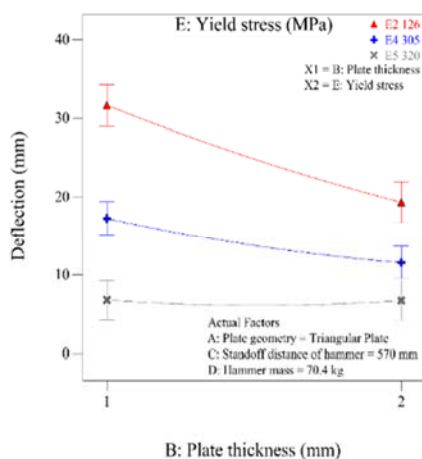


(ب)

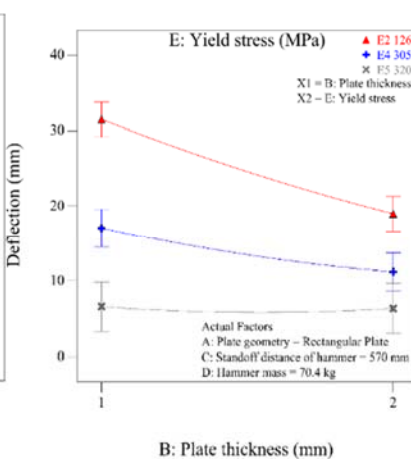


(الف)

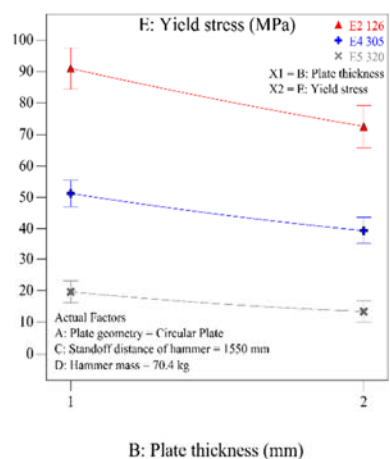
نمودار (۷) تاثیر ضخامت ورق و ارتفاع وزنه بر تغییر شکل ورق؛ الف) ورق دایره‌ای، ب) ورق مستطیلی، ج) ورق مثلثی



(ج)



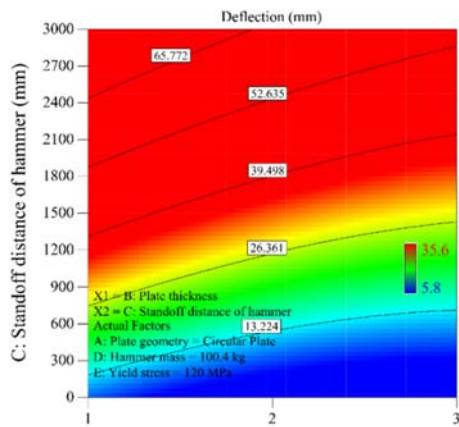
(ب)



(الف)

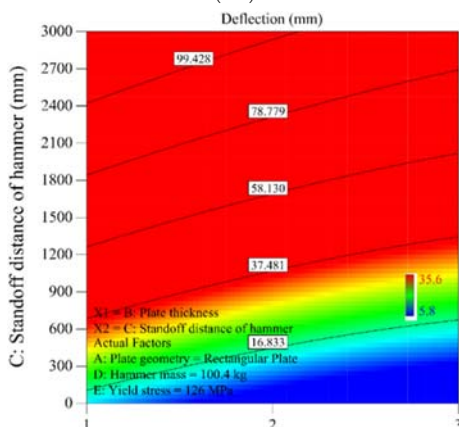
نمودار (۸) تاثیر ضخامت و جنس ورق بر تغییر شکل ورق؛ الف) ورق دایره‌ای، ب) ورق مستطیلی، ج) ورق مثلثی

پارامترهای ثابت، هندسه ورق، جرم وزنه و تنش تسلیم ورق است. در هر سه ورق، با افزایش ارتفاع وزنه و کاهش ضخامت ورق مقدار تغییر شکل افزایش می‌یابد. در نمودار ۱۱، تغییرات خیز ورق به صورت سه‌بعدی نشان داده شده است. تغییر شکل ورق، ارتفاع وزنه و ضخامت ورق، محورهای این نمودار هستند.



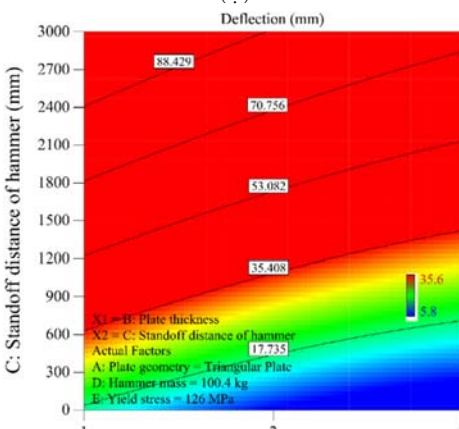
B: Plate thickness (mm)

(الف)



B: Plate thickness (mm)

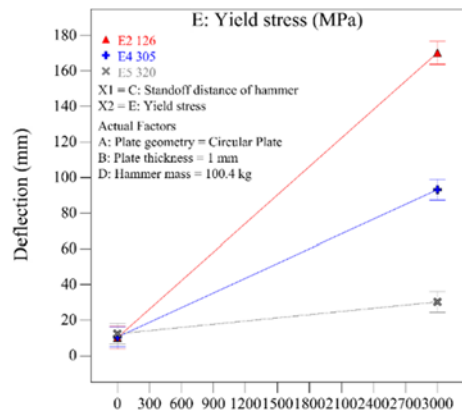
(ب)



B: Plate thickness (mm)

(ج)

نمودار ۱۰ تغییر شکل ورق به صورت کانتورهای رنگی با تغییرات ضخامت ورق و ارتفاع وزنه؛ (الف) ورق دایره‌ای، (ب) ورق مستطیلی، (ج) ورق مثلثی



C: Standoff distance of hammer (mm)

نمودار ۹ تاثیر جنس ورق و ارتفاع وزنه بر تغییر شکل ورق دایره‌ای

در نمودار ۵، پارامترهای ارتفاع وزنه، جرم وزنه و تنش تسلیم ورق، ثابت و هندسه ورق و ضخامت ورق تغییر می‌کنند. همان‌طور که در نمودار مشخص است، با افزایش ضخامت‌های ورق در هر کدام از هندسه‌ها، مقدار تغییر شکل ورق کاهش می‌یابد. این کاهش تغییر شکل در ورق‌های دایره‌ای بیشتر است.

در نمودار ۶، پارامترهای ضخامت ورق، جرم وزنه و تنش تسلیم ورق، ثابت و هندسه ورق و ارتفاع وزنه تغییر می‌کنند. مشاهده دقیق نمودار ارایه‌شده، نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع وزنه در هر کدام از ورق‌ها مقدار خیز افزایش می‌یابد. تاثیر تغییر ارتفاع وزنه در ورق‌های دایره‌ای بیشتر از سایر ورق‌ها و در ورق‌های مثلثی کمتر از آنها است. در نمودار ۷، پارامترهای هندسه ورق، تنش تسلیم و جرم وزنه، ثابت و ارتفاع وزنه و ضخامت ورق تغییر می‌کنند. از نمودارهای ارایه‌شده مشخص است که با افزایش ضخامت ورق و کاهش ارتفاع وزنه، مقدار خیز ورق کاهش می‌یابد. ضخامت ورق تاثیر بیشتری بر تغییر شکل ورق دارد، زیرا با افزایش آن، مقدار تغییر شکل ورق بیشتر کاهش می‌یابد. در واقع اختلاف بین نقاط حداکثر و حداقل ارتفاع در ضخامت‌های بیشتر، کمتر شده است.

در نمودار ۸ پارامترهای هندسه ورق، ارتفاع وزنه و جرم وزنه، ثابت و تنش تسلیم ورق و ضخامت ورق تغییر می‌کنند. همان‌طور که مشخص است با افزایش تنش تسلیم ورق و ضخامت ورق مقدار تغییر شکل ورق کاهش می‌یابد. ضخامت ورق تاثیر بیشتری بر تغییر شکل ورق دارد، زیرا با افزایش آن، مقدار تغییر شکل ورق بیشتر کاهش می‌یابد. در نمودار ۹، پارامترهای هندسه ورق، ضخامت ورق و جرم وزنه، ثابت و تنش تسلیم ورق و ارتفاع وزنه تغییر می‌کنند. همان‌طور که مشخص است با افزایش ارتفاع وزنه و کاهش تنش تسلیم ورق، تغییر شکل ورق افزایش می‌یابد. ارتفاع وزنه تاثیر خیلی بیشتری بر تغییر شکل ورق دارد، زیرا با افزایش آن، مقدار تغییر شکل ورق بیشتر افزایش می‌یابد.

برای درک بهتر نتایج، در نمودار ۱۰، اثرات متقابل پارامترها بر تغییر شکل ورق به صورت کانتورهای رنگی نشان داده شده است. این شکل بیانگر تغییرات ضخامت‌های ورق و ارتفاع وزنه در

جدول به‌دست‌آمده است. نزدیک‌بودن مقدار مطلوبیت به عدد ۱ نشان‌دهنده شرایط بهینه، خیلی خوب است. به‌منظور بررسی نتایج به‌دست‌آمده برای شرایط بهینه تعیین‌شده در جدول ۶، مقادیر شماره ۱ در یک آزمایش تجربی مورد ارزیابی قرار گرفتند. مقدار تغییر شکل ورق با آزمایش تجربی برای این شرایط برابر ۱۲/۳ میلی‌متر به‌دست آمد؛ بنابراین مقدار خطا بین مقدار تجربی و پیش‌بینی‌شده تنها ۳/۲۶۸٪ است.

جدول ۵) مشخصات پارامترهای مستقل و خروجی برای تعیین شرایط بهینه

| پارامتر | هدف | واحد | کمترین مقدار | بیشترین مقدار | درجه اهمیت |
|---------------|----------------|------|--------------|---------------|------------|
| هندسه ورق | در بازه مقادیر | - | - | - | ۳ |
| ضخامت ورق | در بازه مقادیر | mm | ۱ | ۳ | ۳ |
| ارتفاع وزنه | بیشترین مقدار | mm | ۱۰۰ | ۳۰۰۰ | ۵ |
| جرم وزنه | در بازه مقادیر | kg | ۷۰/۴ | ۱۰۰/۴ | ۳ |
| تنش تسلیم ورق | در بازه مقادیر | MPa | - | - | ۳ |
| تغییر شکل ورق | در بازه مقادیر | mm | ۱ | ۱۵ | ۳ |

جدول ۶) شرایط بهینه برای مشخصات پارامترهای جدول ۵

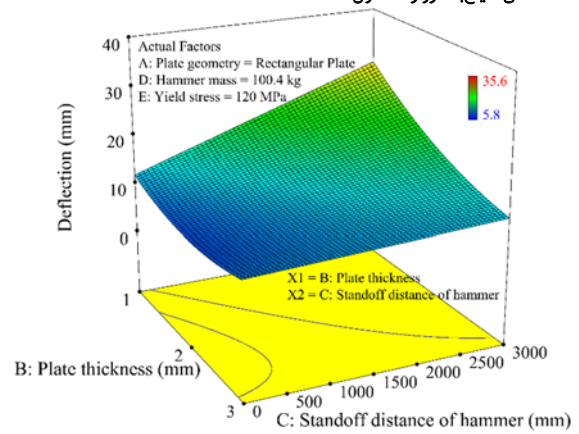
| شماره | هندسه ورق | ارتفاع وزنه (mm) | جرم وزنه (kg) | تنش تسلیم ورق (MPa) | تغییر شکل ورق (mm) |
|-------|-----------|------------------|---------------|---------------------|--------------------|
| ۱ | مستطیلی | ۳۰۰۰ | ۸۶/۴ | ۱۲۰ | ۱۱/۸۹۸ |
| ۲ | مثلثی | ۳۰۰۰ | ۹۰/۵ | ۲۸۹ | ۱۰/۶۶۶ |
| ۳ | دایروی | ۳۰۰۰ | ۷۳/۶ | ۳۲۰ | ۱۴/۱۸۷ |
| ۴ | مستطیلی | ۳۰۰۰ | ۷۱/۹ | ۲۸۹ | ۱۰/۳۷۱ |
| ۵ | دایروی | ۳۰۰۰ | ۸۴ | ۳۲۰ | ۱۴/۸۰۴ |

ضخامت ورق برای همه شماره‌ها ۳ میلی‌متر و میزان مطلوبیت آنها ۱ است.

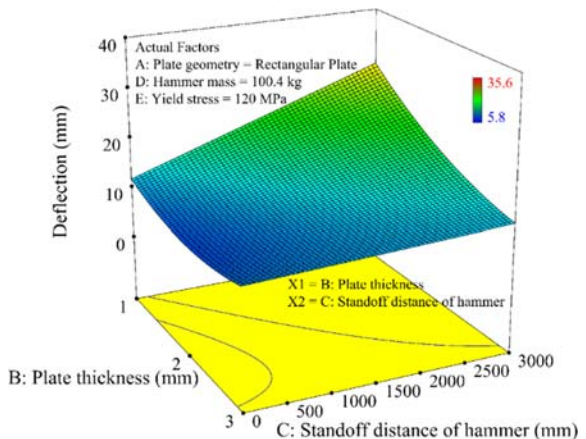
۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله تغییر شکل غیرالاستیک ورق‌های مستطیلی، دایروی و مثلثی تحت بارگذاری هیدرودینامیکی توسط سامانه چکش پرتابه‌ای به‌صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفت. از مزیت‌های روش شکل‌دهی با این سامانه می‌توان به‌سادگی، ارزان و کم‌خطر بودن اشاره کرد؛ در صورتی که کیفیت تغییر شکل ورق مشابه سایر فرآیندهای شکل‌دهی است. در این فرآیند ورق شکل‌داده‌شده بسیار متقارن و گنبدی است؛ به این معنا که فشار هیدرودینامیکی به‌صورت کاملاً یکنواخت وارد شده است. در بخش تجربی، تعداد ۵۸ آزمایش برای ورق‌ها با سه هندسه مختلف و از دو جنس متفاوت فولاد و آلومینیوم در نظر گرفته شد و با ورق‌ها با جنس‌ها و ضخامت‌های مختلف پرداخته شد.

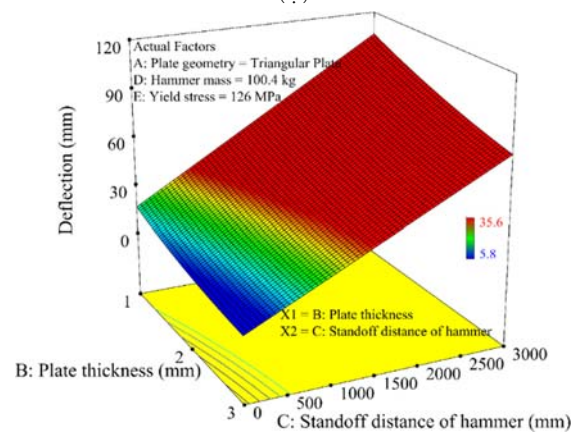
در بخش مدل‌سازی، از روش سطح پاسخ استفاده شد. به‌منظور بررسی معنی‌دار بودن مدل، سطح اطمینان ۹۵٪ در نظر گرفته شد



(الف)



(ب)



(ج)

نمودار ۱۱) تغییر شکل ورق به‌صورت سه‌بعدی با تغییرات ضخامت ورق و ارتفاع وزنه؛ الف) ورق دایره‌ای، ب) ورق مستطیلی، ج) ورق مثلثی

۳-۳- تعیین شرایط بهینه

برای تعیین مطلوبیت تاثیر هر کدام از پارامترها بر خروجی نیاز به یک تابع هدف است. با توجه به پارامترهای مستقل کمی و کیفی و خروجی، شرایط بهینه‌سازی عددی در جدول ۵ نشان داده شده است. در این جدول، هدف بهینه‌سازی هر فاکتور، بازه تغییرات و درجه اهمیت آن بیان شده است. با در نظر گرفتن مقادیر جدول ۵، شرایط بهینه مورد نظر به‌ترتیب مطلوبیت در جدول ۶ آمده است. همان‌طور که مشخص است برای داشتن مقدار تغییر شکل ورق در بازه مورد نظر با توجه به بیشترین مقدار ارتفاع وزنه، اعداد این

of quadrangular mild steel plates subjected to localized and uniform impulsive loading. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. 2017;231(5):939-950.

4- Mirzababaie Mostofi T, Babaei H, Alitavoli M. Theoretical analysis on the effect of uniform and localized impulsive loading on the dynamic plastic behaviour of fully clamped thin quadrangular plates. Thin-Walled Structures. 2016;109:367-376.

5- Thiruvurudchelvan S, Lewis W. A note on hydroforming with constant fluid pressure. Journal of Materials Processing Technology. 1999;88(1-3):51-56.

6- Zhang SH, Zhou LX, Wang ZT, Xu Y. Technology of sheet hydroforming with a movable female die. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2003;43(8):781-785.

7- Tirosh J, Konvalina P. On the hydrodynamic deep-drawing process. International Journal of Mechanical Sciences. 1985;27(9):595-607.

8- Kosing O, Skews BW. An investigation of high-speed forming of circular plates in a liquid shock tube. International Journal of Impact Engineering. 1998;21(9):801-816.

9- Babaei H, Darvizeh A, Alitavoli M, Mirzababaie Mostofi T. Experimental and analytical investigation into plastic deformation of circular plates subjected to hydrodynamic loading. Modares Mechanical Engineering. 2015;15(2):305-312. [Persian]

10- Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Alitavoli M. Experimental study and analytical modeling for inelastic response of rectangular plates under hydrodynamic loads. Modares Mechanical Engineering. 2015;15(4):361-368. [Persian]

11- Golmakani H, Moradi Besheli S, Mazdak S, Sharifi E. Experimental and numerical investigation important parameters in deep drawing square sections two layers sheet with rubber matrix. Modares Mechanical Engineering. 2016;16(2):79-87. [Persian]

12- Mostafapour A, Kamali H, Moradi M. Friction surfacing of AA7075-T6 deposition on AA2024-T351, Statistical modeling using response surface methodology. Modares Mechanical Engineering. 2017;17(8):224-230. [Persian]

13- Bigdeli A, Damghani Nouri M. Experimental and numerical analysis and multi-objective optimization of quasi-static compressive test on thin-walled cylindrical with internal networking. Mechanics of Advanced Materials and Structures. 2019;26(19):1644-1660.

14- Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Alitavoli M, Saeidinejad A. Experimental investigation and dimensionless analysis of forming of rectangular plates subjected to hydrodynamic loading. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2017;58(1):139-147.

15- Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Alitavoli M. Study on the response of circular thin plate under low velocity impact. Geomechanics and Engineering. 2015;9(2):207-218.

16- Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Alitavoli M. Experimental and theoretical study of large deformation of rectangular plates subjected to water hammer shock loading. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. 2017;231(3):490-496.

17- Babaei H, Alitavoli M, Mahmoudi A, Golbaf A. Experimental investigation and numerical simulation of fluid-structure interaction on hydroforming process of

که بدان معنا است که چنانچه p -value برای مدل کمتر از $0/05$ باشد، مدل در نظر گرفته شده معنی‌دار است. با استفاده از تحلیل واریانس مقادیر عددی ضرایب متغیرها، p -value و همچنین R^2 و R^2_{adj} به دست آمد. با توجه به مقدار بالای ضریب همبستگی $(R^2=0/9803)$ به دست آمده از روش سطح پاسخ می‌توان نتیجه گرفت که نتایج حاصل از مدل رگرسیونی تطابق بسیار خوبی با نتایج تجربی دارد. ضخامت ورق، ارتفاع وزنه، جرم وزنه، هندسه ورق و تنش تسلیم ورق به عنوان پارامترهای مستقل تاثیرگذار بر خروجی یعنی تغییر شکل ورق، در نظر گرفته شدند. در تغییر شکل هر سه ورق، ارتفاع وزنه بیشترین تاثیر و جرم چکش نیز کمترین تاثیر را دارد. با افزایش ضخامت‌های ورق در هر کدام از هندسه‌ها مقدار تغییر شکل ورق کاهش می‌یابد. این کاهش تغییر شکل در ورق‌های دایره‌ای بیشتر است. با افزایش ارتفاع وزنه در هر کدام از ورق‌ها، مقدار خیز افزایش می‌یابد. تاثیر تغییر ارتفاع وزنه در ورق‌های دایره‌ای بیشتر از سایر ورق‌ها و در ورق‌های مثلثی کمتر از آنها است. به منظور دستیابی به شرایط بهینه با توجه به متغیرهای ورودی و خروجی‌ها و بر اساس بیشترین ارتفاع وزنه و کمترین تغییر شکل ورق، ضخامت ورق باید بیشترین مقدار خود را داشته باشد. این مقدار باید در هر کدام از ورق‌های مستطیلی، دایروی و مثلثی برقرار باشد. با توجه مقدار مطلوبیت هر کدام از شرایط بهینه، اولویت بین انتخاب نوع ورق وجود ندارد و شرایط بهینه برای هر سه نوع ورق، مقدار مطلوبیت یکسانی دارد.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و صحت نتایج آن نیز بر عهده آنها است.

تعارض منافع: این مقاله هیچ گونه تعارض منافعی با سازمان‌ها و اشخاص ندارد.

سهم نویسندگان: مصطفی سیاح بادخور (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر کمکی (40٪)؛ توحید میرزابابایی مستوفی (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر کمکی (30٪)؛ هاشم بابایی (نویسنده سوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی (20٪)

منابع مالی: کلیه هزینه‌ها توسط نویسندگان تامین شده است.

منابع

- 1- Mirzababaie Mostofi T, Babaei H, Alitavoli M, Lu G, Ruan D. Large transverse deformation of double-layered rectangular plates subjected to gas mixture detonation load. International Journal of Impact Engineering. 2019;125:93-106.
- 2- Babaei H, Mirzababaie Mostofi T. New dimensionless numbers for deformation of circular mild steel plates with large strains as a result of localized and uniform impulsive loading. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications. 2016 Jun.
- 3- Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Armoudli E. On dimensionless numbers for the dynamic plastic response

double-layered circular metallic plates due to localized impulsive loading. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications. 2018;233(7):1449-1471.

21- Mirzababaie Mostofi T, Babaei H, Alitavoli M. The influence of gas mixture detonation loads on large plastic deformation of thin quadrangular plates: Experimental investigation and empirical modelling. Thin-Walled Structures. 2017;118:1-11.

22- Mirzababaie Mostofi T, Babaei H, Alitavoli M. Experimental and theoretical study on large ductile transverse deformations of rectangular plates subjected to shock load due to gas mixture detonation. Strain. 2017;53(4):e12235.

23- Myers RH, Montgomery DC, Anderson-Cook CM. Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments. Hoboken: John Wiley & Sons; 2016.

triangular plates under impact loading. Modares Mechanical Engineering. 2018;17(12):114-122.

18- Jamali A, Babaei H, Nariman-Zadeh N, Ashraf Talesh SH, Mirzababaie Mostofi T. Multi-objective optimum design of ANFIS for modelling and prediction of deformation of thin plates subjected to hydrodynamic impact loading. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications. 2016 Jul.

19- Mirzababaie Mostofi T, Golbaf A, Mahmoudi A, Alitavoli M, Babaei H. Closed-form analytical analysis on the effect of coupled membrane and bending strains on the dynamic plastic behaviour of fully clamped thin quadrangular plates due to uniform and localized impulsive loading. Thin-Walled Structures. 2018;123:48-56.

20- Rezasefat M, Mirzababaie Mostofi T, Babaei H, Ziya-Shamami M, Alitavoli M. Dynamic plastic response of