

علمی- پژوهشی

بررسی تجربی و تحلیل رگرسیونی شکل‌دهی آزاد و با قالب ورق‌های فلزی دایره‌ای با انفجار مخلوط گاز

هاشم بابایی^{۳*}دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه گیلانمصطفی سیاح بادخور^۲گروه مهندسی مکانیک
دانشگاه ایوانکیتوحید میرزابابایی مستوفی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۰۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۹)

چکیده

در این مقاله به بررسی تجربی و تحلیل رگرسیونی پارامترهای مؤثر در فرآیند شکل‌دهی آزاد و با قالب ورق‌های فلزی دایره‌ای با انفجار مخلوط گازها پرداخته شده است. در بخش تجربی از ورق‌های فولادی، آلومینیومی و برنجی در ضخامت‌های مختلف استفاده شده است. به‌منظور ارزیابی بهتر نتایج تجربی، از شرط چگالی سطحی برابر برای مقایسه نتایج ورق‌های فولادی، آلومینیومی و برنجی در شرایط بارگذاری یکسان استفاده شده است. در بخش تحلیل رگرسیونی از نرم‌افزار طراحی آزمایش و روش سطح پاسخ استفاده شده است. اثر پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های تجربی که عبارت‌اند از فشار گاز اکسیژن، فشار گاز استیلن، ضخامت ورق و زاویه رأس قالب روی خیز ورق‌های دایره‌ای به‌صورت هم‌زمان بررسی شدند. به‌منظور دستیابی به یک مدل معنی‌دار، سطح اطمینان ۹۵٪ در بررسی در نظر گرفته شد. نتایج تجربی نشان داد که استفاده از قالب با زاویه رأس ۶۰ درجه باعث می‌شود که خیز دائمی ورق کاهش یابد. از طرفی استفاده از ورق‌های آلومینیومی و برنجی در شکل‌دهی با قالب موجب کاهش بیشتر خیز دائمی نسبت به شکل‌دهی آزاد شده است. نتایج به‌دست‌آمده در بخش تحلیل رگرسیونی حاکی از آن است که مقادیر به‌دست‌آمده از پیش‌بینی مدل‌ها با داده‌های تجربی مطابقت خوبی دارد و مدل ارائه‌شده مناسب است. شرایط بهینه برای کم‌ترین تغییر شکل ورق‌های تک‌لایه دایره‌ای تحت بارگذاری انفجاری نیز ارائه شد. فشار گاز اکسیژن و زاویه رأس قالب بیشترین و کمترین تأثیر را روی ورق‌های فلزی دایره‌ای دارند.

واژه‌های کلیدی: آزمایش تجربی، تحلیل رگرسیونی، تغییر شکل ورق؛ روش سطح پاسخ؛ بارگذاری دینامیکی.

Experimental study and regression analysis of free and die forming of circular metallic plates using gas mixture explosion

T. Mirzababaei Mostofi¹M. Sayah Badkhor²H. Babaei^{3*}Faculty of Mechanical Engineering,
University of EyvanekeyFaculty of Mechanical Engineering,
University of Guilan

(Received: 22/July/2020; Accepted: 9/September/2020)

ABSTRACT

In this paper, experimental and regression analysis of the effective parameters in the free and die forming of circular metallic plates using gas mixture detonation were investigated. In the experimental section, steel, aluminum, and brass plates in different thicknesses were used. To better evaluate the experimental results, the condition of the same areal density was used to compare the results of steel, aluminum, and brass plates under the same loading conditions. In the regression analysis section, the Design-Expert software package and response surface methodology were used. The effect of parameters measured in experimental tests including the pressure of Oxygen, the pressure of Acetylene, plate thickness and die apex angle on the deflection of circular plates were investigated simultaneously. To find a significant model, the confidence level of 95% was considered in the analysis. Experimental results showed that using a die with an apex angle of 60° leads to the decrease of the maximum permanent deflection. On the other hand, using aluminum and brass plates in the die forming resulted in a more reduction of permanent deflection in comparison with free forming. The results of the regression analysis show that the predicted values of the model are in good agreement with the experimental data and the presented model is suitable. Optimal conditions for the minimum deflection of the circular plates under explosive loading were also presented. The pressure of Oxygen and the die apex angle has the highest effect and the least effect on the forming of circular metallic plates.

Keywords: Experimental Test; Regression Analysis; Plate Deformation; Response Surface Methodology; Dynamic Loading.

^۱ - استادیار t.m.mostofi@eyc.ac.ir

^۲ - استادیار (نویسنده پاسخگو): mostafa.sayah@eyc.ac.ir

^۳ - دانشیار hgbabaei@guilan.ac.ir

۱- مقدمه

پرداختند که در آن عامل شکل‌دهی ورق‌های فلزی، انرژی حاصل از انفجار ماده منفجره بود. در طی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰، بابایی و همکاران [۱۱-۱۳] بررسی‌های خود را روی شکل‌دهی آزاد ورق‌های دایره‌ای با استفاده از روش انفجار مخلوط گازها متمرکز کردند. آن‌ها از دو گاز اکسیژن و استیلن برای تولید بار دفعی استفاده کرده بودند. بابایی و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۷، در ادامه کارهای خود، به بررسی روش شکل‌دهی انفجار مخلوط گازها به‌عنوان یک فرآیند جدید برای تغییر شکل پودرهای فلزی پرداختند. میرزابابایی مستوفی و همکاران در طی سال‌های ۲۰۱۷ [۱۸] و [۱۹] و [۲۰ و ۲۱] بررسی‌های تجربی خود را روی شکل‌دهی ورق‌های مستطیلی تک‌لایه و دولایه با استفاده از روش انفجار مخلوط انجام دادند. در سال ۲۰۱۹، میرزابابایی مستوفی و همکاران [۲۲] به مطالعه تغییر شکل بزرگ ورق‌های نازک مستطیلی آلومینیومی با روکش پلیمری پلی‌اوره در معرض بار دفعی یکنواخت حاصل از انفجار مخلوط گازهای اکسیژن و استیلن پرداختند. آن‌ها دریافتند که افزودن روکش پلیمری با ضخامت‌های ۳ و ۴ میلی‌متر به ورق آلومینیومی ۲ میلی‌متری موجب کاهش بیشترین خیز دائمی ساختار در برابر این نوع از بارگذاری انفجاری می‌شود. میرزابابایی مستوفی و همکاران [۲۳] در سال ۲۰۲۰ به مطالعه ورق‌های آلومینیومی با روکش پلی‌اوره تحت بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها پرداختند. آن‌ها ضمن انجام آزمایش‌های تجربی به بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر این ورق‌ها نیز پرداختند. آن‌ها دریافتند که تغییر شکل ورق در ضخامت یکسان با استفاده از روکش پلی‌اوره کاهش می‌یابد. در ادامه تحقیقات انجام‌شده در زمینه شکل‌دهی سازه با روش انفجار مخلوط گازها، رخی و سوری [۲۴] به بررسی عددی انبساط لوله‌های آلومینیومی پرداختند. همچنین در سال ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰، دو و همکاران [۲۵-۲۷] تغییر شکل پلاستیک و الگوی شکست لوله‌های آلومینیومی دارای ترک را بررسی نمودند.

با مرور پژوهش‌های پیشین محققان، این نتیجه حاصل شد که بیشتر مطالعه‌ها در زمینه استفاده از روش جایگزین انفجار مخلوط گازها، به‌صورت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی روی شکل‌دهی آزاد ورق‌های دایره‌ای انجام‌گرفته و تاکنون پژوهشی روی شکل‌دهی با قالب ورق‌های فلزی انجام نشده است [۱۱-۱۳]؛ لذا انجام بررسی آزمایشگاهی

در طول تاریخ و پس از اکتشاف فلزات به دلیل نقش بارز و اساسی این عناصر در زندگی همواره انسان به دنبال یافتن روش‌هایی جهت تغییر شکل دادن فلزات با توجه به احساس نیاز خود بود. پس از انقلاب صنعتی و با توجه به توسعه چشمگیر صنعت، فرآیندهای شکل‌دهی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱ و ۲]. امروزه محققان و صنعتگران به دنبال روش‌هایی جهت کاهش هزینه تولید قطعات و نیز کاهش زمان موردنیاز جهت تولید و همچنین یافتن روش‌هایی جهت تغییر شکل قطعات پیچیده می‌باشند. شکل‌دهی به روش انفجار مخلوط گازها یکی از روش‌های نوین شکل‌دهی سرعت‌بالا محسوب می‌شود که در سال‌های اخیر بسیار موردتوجه پژوهشگران بوده است [۳ و ۴]. بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه شکل‌دهی به روش انفجار مخلوط گازها مربوط به استفاده از مخلوط دو گاز هیدروژن و اکسیژن است و پژوهش‌های کم‌تری روی سایر مخلوط‌های گازی مانند اکسیژن و استیلن که قدرت بیشتری دارند، صورت گرفته است.

هوندا و سوزوکی [۵] در سال ۱۹۹۹ به بررسی شکل‌دهی فلزات با انفجار مخلوط گازهای اکسیژن و متان پرداختند. آن‌ها به ذکر اصول این روش پرداختند و با ساخت سامانه موردنظر و استفاده از مخلوط متان و اکسیژن، کاربردهای این روش را بیان کردند. آن‌ها موفق به شکل‌دهی ورق با قطر ۱ متر شدند. یاشار و همکاران [۶] و [۷] در سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۶ به مطالعه پارامترهای موجود در شکل‌دهی ساختارهای فنجانی با استفاده از روش انفجار مخلوط گازهای اکسیژن و استیلن پرداختند. آن‌ها در کار تجربی خود با استفاده از سامانه شکل‌دهی انفجاری دومرحله‌ای و در نظر گرفتن نسبت حجمی برابر برای گازهای استیلن و اکسیژن به ایجاد ساختارهای فنجانی شکل پرداختند. وبر و همکاران [۸] در سال ۲۰۰۷ به بررسی کاربرد مستقیم موج‌های حاصل از انفجار گازها به‌عنوان منبع اصلی انرژی برای انبساط لوله‌ها پرداختند. آن‌ها به مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از شکل‌دهی آزاد و با قالب انبساط لوله‌ها با نتایج به‌دست‌آمده از شکل‌دهی شبه استاتیک آن‌ها در روش هیدروفرمینگ پرداختند. در سال ۲۰۰۹ و ۲۰۱۳، خالقی میبدی و همکاران [۹ و ۱۰] به مطالعه فرآیند شکل‌دهی فلزات به کمک انفجار مخلوط گاز

در واحد شکل‌دهی، نمونه‌های آزمایشی بین دو نگاه‌دارنده عقبی و جلویی به ضخامت ۲۵ میلی‌متر قرار داده شده و توسط ۸ پیچ به‌طور کاملاً گیردار مهار گردیده است. با توجه به شرایط هندسی مسئله، هر دو نگاه‌دارنده دارای سوراخی به قطر ۱۲۰ میلی‌متر هستند که این سوراخ در نگاه‌دارنده عقبی برای اعمال بار روی ورق و در نگاه‌دارنده جلویی برای امکان خروج و شکل‌گیری ورق است. نمونه ورق‌های مورد آزمایش، از جنس فولاد نرم (St-13) در ضخامت‌های ۱، ۲ و ۳ میلی‌متر، آلیاژ برنج در ضخامت ۱ میلی‌متر و در نهایت آلیاژ آلومینیوم (Al-1100) در ضخامت‌های ۳ میلی‌متر است. در ابتدا نمونه ورق‌ها در ابعاد ۲۵۰ × ۲۵۰ میلی‌متر مربع برش زده شدند. مشخصات مکانیکی مواد مورد استفاده در این تحقیق، به‌طور خلاصه در جدول ۱ داده شده است. برای اطلاعات بیشتر و منحنی‌های تنش-کرنش مواد استفاده‌شده فولادی و آلومینیومی می‌توان به نتایج ارائه‌شده در مراجع [۱۸-۲۰] مراجعه کرد. واحد سیستم اندازه‌گیری فشار واردشده داخل محفظه احتراق قبل از انفجار، یک حس‌گر فشار پیزوالکتریک به‌منظور ثبت فشار پس از انفجار اعمالی بر سطح نمونه، یک سیستم تقویت‌کننده یا آمپلی‌فایر جهت تقویت سیگنال‌های دریافتی از حس‌گر پیزوالکتریک و یک سامانه ثبت داده‌های دینامیکی برای ذخیره نمودار فشار-زمان از حس‌گر پیزوالکتریک است. لازم به ذکر است که تمامی تجهیزات اندازه‌گیری استفاده‌شده در این سامانه، ساخت شرکت سینوکرا (SINOCERA) [۱۸-۲۰] است. مشخصات سیستم‌های اندازه‌گیری استفاده‌شده در تحقیق حاضر در جدول الف در پیوست ارائه شده است.

جدول ۱: خواص مکانیکی مواد [۲۰-۱۸].

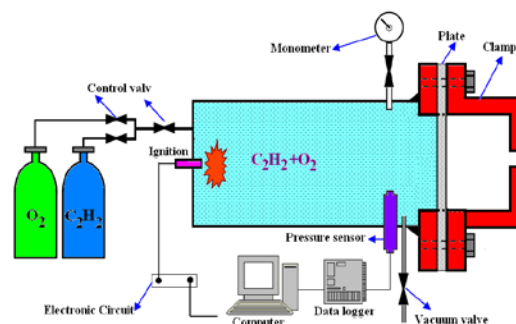
ضرب پواسون	تنش تسلیم (MPa)	مدول کشسان (GPa)	چگالی (kg/m^3)	ضخامت (mm)	ماده
۰/۳	۲۸۱	۲۱۰	۷۸۵۰	۲، ۱ و ۳	فولاد
۰/۳۳	۱۱۹	۶۹	۲۷۰۰	۳	آلومینیوم
۰/۳۴	۲۲۶	۹۸	۸۵۳۰	۱	برنج

به‌منظور انجام آزمایش‌های تجربی، ۳۲ نمونه آزمایشی فولادی در قالب شش گروه A، B، C، D، E و F به‌منظور

روی ورق‌های تک‌لایه فلزی مانند فولادی، آلومینیومی و برنجی به‌منظور مطالعه پارامترهای مختلف و بررسی اثرگذاری آن‌ها، می‌تواند از اهمیت بالایی برخوردار باشد. بنابراین نوآوری‌های تحقیق حاضر در بخش تجربی شامل، بررسی اثر زاویه رأس قالب، میزان ایمپالس ناشی از بار دفعی، ضخامت ورق و درصد اختلاط‌های مختلف روی رفتار پلاستیک و الگوی تغییر شکل ورق‌های فلزی تحت بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها و در بخش تحلیل رگرسیونی تعیین میزان اهمیت این پارامترها، بررسی تأثیر هم‌زمان این پارامترها روی خروجی یعنی تغییر شکل ورق و تعیین شرایط بهینه برای خروجی است.

۲- مطالعه تجربی

هدف در آزمایش‌های تجربی دستیابی به یک دید مناسب نسبت به رفتار ورق‌های فلزی تحت بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها است. شکل‌دهی آزاد و با قالب ورق‌های فلزی دایره‌ای تحت بارگذاری دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها در یک سامانه آزمایشی که تصویر آن در شکل ۱ نشان داده شده، انجام گرفته است. این سامانه آزمایشی شامل چهار بخش اصلی واحد اشتعال، شیر کنترل گاز، واحد سیستم اندازه‌گیری فشار و واحد شکل‌دهی است.



شکل ۱: شماتیک و تصویر سامانه انفجار مخلوط گازها.

گردد. در این بخش با استفاده از نرم‌افزار طراحی آزمایش (Design-Expert) به بررسی رابطه این پارامترها به صورت هم‌زمان روی خروجی پرداخته شده است. در بین روش‌های طراحی آزمایش، روش سطح پاسخ به علت دقت خوب در تعیین تأثیرات 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 تأثیر پارامترهای مهم را بر خروجی‌های نهایی تعیین نماید.

در این مقاله به منظور تعیین تأثیر پارامترهای فرآیند شکل‌دهی آزاد و با قالب ورق‌های فلزی دایره‌ای با انفجار مخلوط گازها، از نتایج آزمایش‌های تجربی انجام‌شده استفاده گردیده است. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ب و پ در پیوست ارائه شده است. بنابراین با توجه به داشتن اطلاعات مربوط به آزمایش از طرح داده‌های تجربی در نرم‌افزار طراحی آزمایش استفاده شده است. روش سطح پاسخ به منظور تجزیه و تحلیل نتایج، از ابزار قدرتمندی به نام تحلیل واریانس 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) ارائه می‌گردد.

در این بررسی، ۴ متغیر به‌عنوان پارامترهای مستقل و یک متغیر نیز به‌عنوان جواب در نظر گرفته شده است. تغییر شکل ورق دایره‌ای به‌عنوان پارامتر خروجی و فشار گاز اکسیژن، فشار گاز استیلن، ضخامت ورق دایره‌ای و زاویه رأس قالب به‌عنوان پارامترهای مستقل هستند. در جدول ۲ نماد این پارامترها و تغییرات آن‌ها با جزئیات بیان شده است.

رابطه بین خروجی و پارامترهای مستقل به صورت یک‌چند جمله‌ای با مرتبه دوم، مطابق رابطه (۱) در تحلیل رگرسیونی در نظر گرفته شده 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 محاسبه شده، X_i و X_j متغیرهای کدگذاری شده، β_0 ضریب ثابت، β_i ضریب خطی، β_{ij} ضریب مرتبه دوم و β_{ij} ضریب متقابل است [۲۹].

بررسی تغییر شکل پلاستیک و الگوی شکست ورق‌های دایره‌ای در برابر بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها طراحی و ساخته شد. همچنین، در این سری از آزمایش‌ها، تمرکز کارهای تجربی انجام‌گرفته بر میزان تأثیر افزایش ضخامت ورق، زاویه رأس قالب و میزان ایمپالس بر مقاومت دینامیکی ساختار فلزی در برابر بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازهای اکسیژن و استیلن است. لازم به توضیح است که در این گروه‌بندی، گروه‌های آزمایشی A و D به ترتیب به شکل‌دهی آزاد و با قالب (زاویه رأس ۶۰ درجه) ورق‌های فولادی با ضخامت ۱ میلی‌متر می‌پردازد. گروه‌های آزمایشی B و E نیز به بررسی رفتار دینامیکی ورق‌های فولادی با ضخامت ۲ میلی‌متر به ترتیب در شکل‌دهی آزاد و با قالب می‌پردازد. در نهایت، گروه‌های آزمایشی C و F مربوط به ورق‌های فولادی با ضخامت ۳ میلی‌متر تحت شرایط آزمایشی قبلی است. شایان توجه است که هر گروه آزمایشی تحت بیش از ۳ بارگذاری با فشارهای قبل از انفجار متفاوت جهت تعیین رفتار دینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که جهت ارزیابی رفتار مواد فلزی مختلف تحت بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها، دو ماده دیگر از آلیاژ آلومینیوم و برنج با خواص مکانیکی مختلف که شامل درصد ازدیاد طول، تنش تسلیم، میزان سختی، چگالی و مدول الاستیسیته است، در نظر گرفته شد و تحت شرایط آزمایشگاهی یکسان در قیاس با ورق فولادی مورد آزمایش قرار گرفت. جهت ایجاد شرایط آزمایشگاهی، شرط چگالی سطحی تقریباً یکسان برقرار شد و از ورق‌های آلومینیومی و برنجی در ضخامت‌های ۳ و ۱ میلی‌متر استفاده شد. این آزمایش‌ها تحت شرایط بارگذاری در پیش فشارهای ۵ psi و ۲/۵ psi برای گازهای اکسیژن و استیلن انجام شد.

۳- تحلیل رگرسیونی

در فرآیند شکل‌دهی آزاد و با قالب ورق‌های فلزی دایره‌ای با انفجار مخلوط گازها ۴ پارامتر مؤثر شامل فشار گاز اکسیژن، فشار گاز استیلن، ضخامت ورق و زاویه رأس قالب وجود دارد. بررسی تأثیر هر کدام از آن‌ها روی شکل‌دهی ورق به صورت مجزا کار بسیار دشوار و زمان‌بری است، ضمناً نتیجه خوبی نخواهد داشت. به‌هرحال نیاز است تا تأثیر این پارامترها به صورت هم‌زمان روی خروجی یعنی شکل‌دهی ورق تعیین

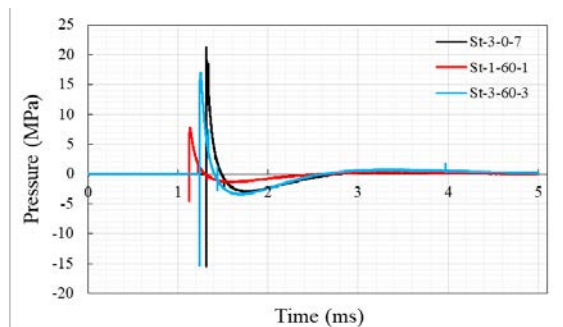
جدول ۲: پارامترهای روش سطح پاسخ و تغییرات آن‌ها.

پارامتر	واحد	نماد	حداقل	حداکثر
فشار گاز اکسیژن	psi	X ₁	۳	۴۰
فشار گاز استیلن	psi	X ₂	۲/۵	۳۰
ضخامت ورق دایره‌ای	mm	X ₃	۱	۳
زاویه رأس قالب	degree	X ₄	۰	۶۰
تغییر شکل ورق دایره‌ای	mm	Y ₁	-	-

در این جداول، برای هر آزمایش، مقدار ایمپالس با انتگرال‌گیری عددی از منحنی فشار-زمان به‌دست‌آمده است که برای نمونه، چندین نمودار فشار-زمان در شکل ۲ ارائه شده است. مطابق شکل ۲، منحنی‌های فشار-زمان حاصل از انفجار مخلوط گازها تمامی مشخصات منحنی فشار-زمان بار دفعی حاصل از خرج انفجاری را مانند فاز مثبت، زمان اوج کوتاه، تابع فشار تأخیری و فاز منفی داراست.

شایان‌ذکر است که منحنی‌های فشار-زمان حاصل از انفجار مخلوط گازها برای سایر آزمایش‌ها نیز مشابه با این نمودارها بوده و از نمایش آن‌ها خودداری می‌شود.

در هر گروه آزمایش، کد اول مربوط به جنس ماده، دوم ضخامت ورق، سوم زاویه رأس قالب (نماد ND به معنای عدم استفاده از قالب است) و کد چهارم شماره آزمایش در گروه آزمایشی مربوطه است.



شکل ۲: منحنی فشار-زمان ثبت شده توسط حس‌گر فشار برای چندین آزمایش

مشاهده‌های تجربی باهدف بررسی مدهای تغییر شکل ورق‌های فولادی تحت بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها نشان می‌دهد که در طول ۱۹ آزمایش روی شکل‌دهی بدون قالب و آزاد، تمامی ساختارها، سطوح مختلفی از تغییر شکل غیر الاستیک بزرگ یا همان مد اول تغییر شکل همراه با گستره تغییر شکل گنبدی را نشان دادند. این بدان مفهوم است که در ایمپالس‌های مختلف در روش انفجار مخلوط گازها، اعمال بار انفجاری به ورق به‌صورت یکنواخت صورت می‌پذیرد و دلیل این امر فاصله ۵۳۰ میلی‌متری جرقه زن از نمونه آزمایشی است. این فاصله به‌مراتب از شعاع ورق بالاتر است و با توجه به نتایج مراجع [۲۰-۱۸]

۴- نتایج و بحث

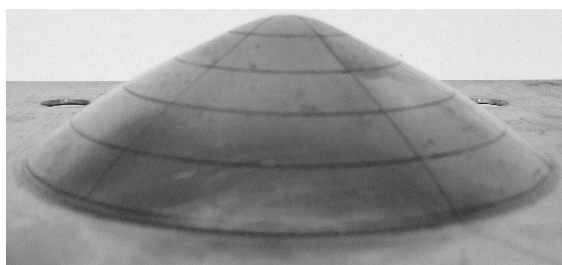
در این بخش نتایج تجربی و تحلیل رگرسیونی ارائه و مورد بحث قرار گرفته است.

۴-۱- نتایج تجربی

در جدول ب و پ در بخش پیوست کلیه مشخصات و نتایج آزمایش‌های انجام‌شده روی ورق‌های دایره‌ای ارائه شده است. نتایج به‌دست‌آمده در مجموعه آزمایش‌های انجام‌گرفته روی ساختارهای تک‌لایه، نشان‌دهنده پاسخ و رفتار مکانیکی ورق‌های فولادی، آلومینیومی و برنجی تحت بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها است که در آن برای نمونه‌های فولادی اثر تغییرات ضخامت ورق، تأثیر شکل‌دهی با قالب و تغییرات مقدار ایمپالس یا به عبارتی افزایش انرژی انتقالی به ورق و به‌تبع آن تغییر نرخ سرعت تغییر شکل بررسی شده است. از دیگر اهداف این بخش، می‌توان به ارزیابی و مقایسه نتایج تجربی برای ورق‌های فولادی، آلومینیومی و برنجی در دو حالت شکل‌دهی با قالب و بدون قالب ورق‌های فلزی در شرایط جرمی و آزمایشگاهی یکسان در برابر بار دفعی اشاره کرد.



(الف)



(ب)

شکل ۵: نمونه‌ای از ورق‌های آلومینیومی تغییر شکل یافته:

(الف) شکل‌دهی آزاد؛ (ب) شکل‌دهی با قالب

۴-۲- تحلیل واریانس خروجی

پس از بررسی مدل‌های مختلف ارائه شده و استفاده از روش تحلیل آماری واریانس، تحلیل پارامترهای مستقل و کمیت‌های R^2 و R_{adj}^2 مشخص شد که از بین مدل‌های پیشنهادی، مدل درجه دوم اصلاح شده، تطبیق بهتری با نتایج آزمایش‌ها برای شکل‌دهی آزاد و با قالب ورق‌های فلزی دایره‌ای با انفجار مخلوط گازها دارد. آنالیز واریانس برای عواملی که مقدار p-value آن‌ها کمتر از ۰/۱ بود در جدول ۳ آمده است. این پارامترها نشان‌دهنده تأثیر بالای هر کدام از آن‌ها بر خروجی است. در این بررسی به منظور معنی‌دار بودن مدل، سطح اطمینان ۹۵٪ در نظر گرفته شده و 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_{adj}^2 به ترتیب برابر ۰/۹۹۰۱ و ۰/۸۹۷۴ به دست آمده است. نتایج به دست آمده حاکی است که مدل ارائه شده برای این آزمایش‌ها مناسب بوده و مقادیر به دست آمده با مقادیر پیش‌بینی شده برای خروجی، بر اساس مدل مطابقت دارد.

فرضیه بارگذاری یکنواخت برای این روش شکل‌دهی بدون قالب قابل استناد است. همچنین در نمونه‌های ارائه شده برای شکل‌دهی با قالب، فرم مخروطی نمونه‌ها با توجه به زاویه رأس ۶۰ درجه کاملاً مشهود است. نمونه‌ای از پروفیل تغییر شکل ورق‌های فولادی، آلومینیومی و برنجی به ترتیب در شکل ۳ تا شکل ۵ نشان داده شده است.

مشاهده شکل ۳ تا شکل ۵ برای شکل‌دهی آزاد ورق‌های فولادی نشان می‌دهد که ناحیه گنبدی شکل از مرکز ساختار به سمت مرزهای کاملاً گیردار حرکت می‌کند و سطحی از ساختار که بین دو نگه‌دارنده قرار دارد، دچار هیچ‌گونه تغییر شکل غیر الاستیک بزرگی نشده و مکان‌هایی که در آن‌ها پیچ‌ها قرار دارند، دچار هیچ‌گونه کشیدگی نشده است. ضمناً نازک شدگی در طول مرزهای گیردار مشهود است و این نشان‌دهنده تأثیر و عمل نیروهای کششی غشایی است.



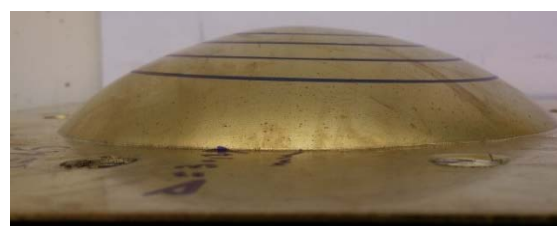
(ب)



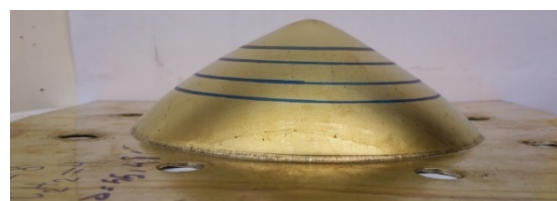
(الف)

شکل ۳: نمونه‌ای از ورق‌های فولادی تغییر شکل یافته: (الف)

شکل‌دهی آزاد؛ (ب) شکل‌دهی با قالب



(الف)



(ب)

شکل ۴: نمونه‌ای از ورق‌های برنجی تغییر شکل یافته: (الف)

شکل‌دهی آزاد؛ (ب) شکل‌دهی با قالب

$$Y = 28.81 + 17.47X_1 + 4.71X_2 - 19.34X_3 - 1.90X_4 + 2.67X_1X_2 - 3.19X_1X_3 - 1.28X_1X_4 - 0.94X_2X_3 - 16.84X_1^2 + 6.84X_3^2 \quad (2)$$

مدل مرتبه دوم از تحلیل واریانس داده‌ها برای سطح پاسخ تغییر شکل ساختار دولایه به صورت رابطه (۲) به دست آمده است. این رابطه برحسب پارامترهای کدگذاری شده است.

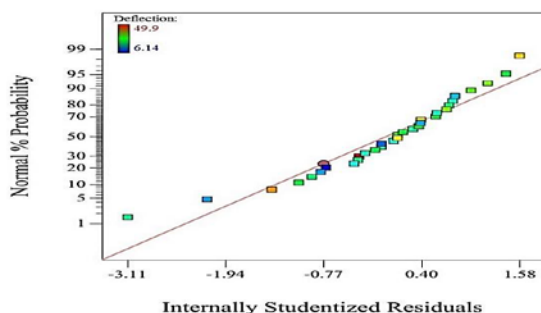
جدول ۳: جدول آنوا مربوط به مدل سطح پاسخ جابجایی ورق دایره‌ای (Y)

Probe > F	F-value	متوسط مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	منبع
<0.0001	8/88	225/30	12	2703/54	مدل (Y)
0/0019	12/92	327/69	1	327/69	X ₁
0/2036	1/73	43/97	1	43/97	X ₂
<0.0001	60/69	1539/72	1	1539/72	X ₃
0/1199	2/65	67/27	1	67/27	X ₄
0/1780	0/080	2/02	1	2/02	X ₁ X ₂
0/1752	0/1	2/59	1	2/59	X ₁ X ₃
0/1756	0/099	2/52	1	2/52	X ₁ X ₄
0/1852	0/035	0/90	1	0/90	X ₂ X ₃
0/1226	2/61	66/23	1	66/23	X ₁ ²
0/0724	3/62	91/77	1	91/77	X ₃ ²
-	-	25/37	19	482/01	باقیمانده
-	-	-	31	3185/55	خطای خالص

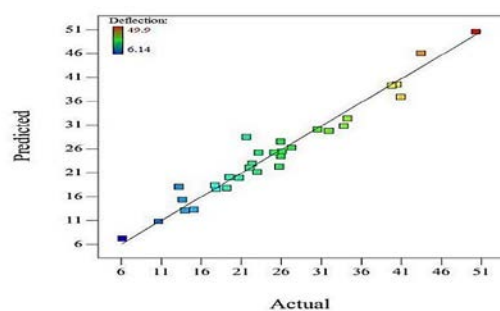
نباید بیشتر از ۹۹ و کمتر از ۱ نیز باشند و سوم باید بیش از ۹۵٪ باقی‌مانده‌ها بین مقادیر ۲ و ۳ باشند. با توجه به این قانون، نمودار احتمال نرمال باقی‌مانده‌ها، توزیع مناسبی از خطاها دارد و قابل قبول است. در شکل ۸ نیز به‌عنوان یک قانون برای باقی‌مانده‌ها، باید خطاها بین مقادیر ۳ و ۳- توزیع شده باشند؛ بنابراین نمودار نشان می‌دهد که خطاهای مقادیر پیش‌بینی‌شده، در محدوده مشخص قرار داشته و قابل قبول هستند.

مقایسه بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده از روش سطح پاسخ در شکل ۶ نشان داده شده است.

نزدیکی داده‌ها به خط مورب بدان معناست که مدل پیش‌بینی خوبی از شکل‌دهی آزاد و با قالب ورق‌های فلزی دایره‌ای با انفجار مخلوط گازها نسبت به آزمایش‌های تجربی دارد. همچنین تفاوت رنگ در نقاط داخل شکل نشان‌دهنده تفاوت در مقدار تغییر شکل ورق‌ها و آبی تا قرمز یعنی از کم تا زیاد نشان داده شده است. در شکل ۷ و شکل ۸ به ترتیب، نمودارهای احتمال نرمال باقی‌مانده‌ها برحسب مقادیر پیش‌بینی‌شده بعد از حذف عوامل غیرمؤثر 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 این داده‌ها

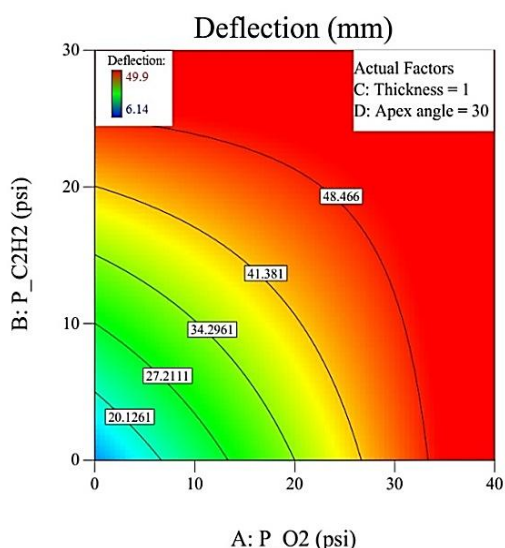


شکل ۷: نمودار احتمال نرمال باقی‌مانده‌ها



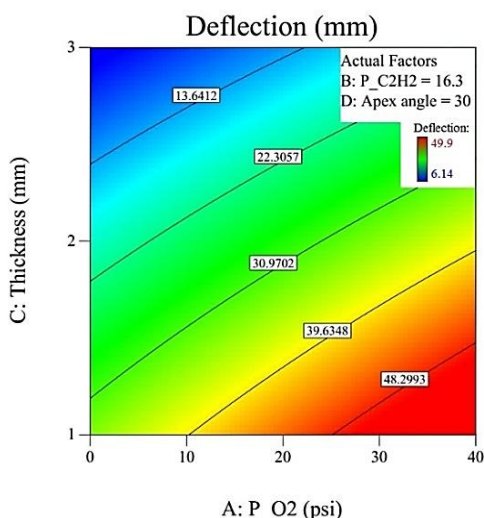
شکل ۶: مقایسه بین مقادیر پیش‌بینی‌شده در روش سطح پاسخ و مقادیر واقعی.

انفجار مخلوط گازها دارند. ضخامت ورق هم بیشتر از فشار گاز استیلین روی شکل‌دهی آزاد و با قالب ورق‌های فلزی دایره‌ای با انفجار مخلوط گازها مؤثر است

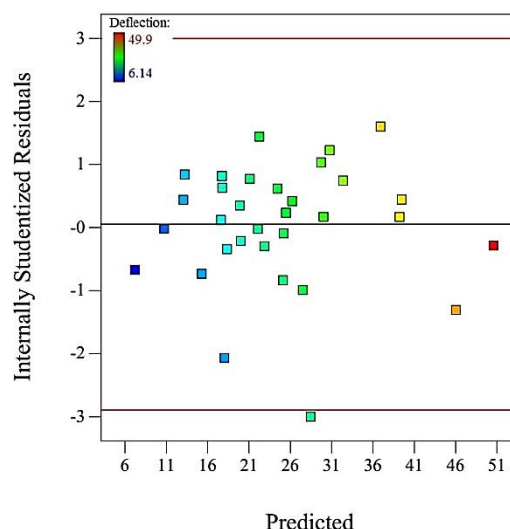


شکل ۱۰: تغییر شکل ورق‌های فلزی دایره‌ای با انفجار مخلوط گازها به صورت کانتورهای رنگی با تغییرات فشار گاز اکسیژن و فشار گاز استیلین

در شکل ۱۰، شکل ۱۱، شکل ۱۲ و شکل ۱۳ اثر متقابل دو پارامتر روی شکل‌دهی آزاد و با قالب ورق‌های فلزی دایره‌ای با انفجار مخلوط گازها ضمن ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها به صورت کانتورهای رنگی نشان داده شده است.



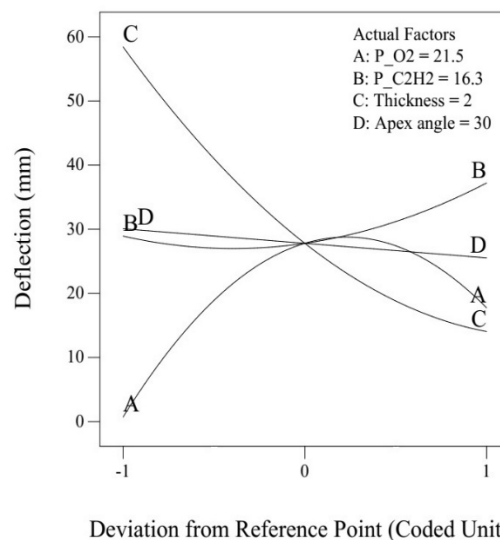
شکل ۱۱: تغییر شکل ورق‌های فلزی دایره‌ای با انفجار مخلوط گازها به صورت کانتورهای رنگی با تغییرات فشار گاز اکسیژن و ضخامت ورق



شکل ۸: نمودار باقی‌مانده‌ها برحسب مقادیر پیش‌بینی شده در روش سطح پاسخ

۳-۴- تحلیل آماری خروجی

در تحلیل آماری به تأثیر متقابل پارامترهای مستقل به‌طور هم‌زمان روی خروجی پرداخته شده است. در شکل ۹ تأثیر پارامترهای مستقل روی شکل‌دهی آزاد و با قالب ورق‌های فلزی دایره‌ای با انفجار مخلوط گازها، نشان داده شده است.



شکل ۹: تأثیر پارامترهای مستقل کمی بر روی تغییر شکل ورق دایره‌ای

تحلیل این نمودار بدان شکل است که شیب بیشتر خط مربوط به هرکدام از پارامترها نشان‌دهنده تأثیر بیشتر آن پارامتر روی خروجی است. بنابراین، بنابراین، فشار گاز اکسیژن بیشترین تأثیر و زاویه رأس قالب کمترین تأثیر را روی شکل‌دهی آزاد و با قالب ورق‌های فلزی دایره‌ای با

ورق‌های فلزی دایره‌ای افزایش می‌یابد. در شکل ۱۲، مقدار ضخامت و فشار گاز اکسیژن ثابت و میزان فشار گاز استیلن و زاویه رأس قالب تغییر می‌کنند. از شکل ارائه‌شده به‌وضوح مشخص است که با افزایش فشار گاز استیلن و کاهش زاویه رأس قالب، مقدار تغییر شکل ورق‌های دایره‌ای افزایش می‌یابد. در شکل ۱۳، مقدار فشار گاز اکسیژن و فشار گاز استیلن ثابت و مقدار ضخامت ورق دایره‌ای و زاویه رأس قالب تغییر می‌کنند. از شکل ارائه‌شده به‌وضوح مشخص است که با افزایش ضخامت ورق دایره‌ای و افزایش زاویه رأس قالب، تغییر شکل ورق‌های دایره‌ای کاهش می‌یابد.

۴-۴- تعیین شرایط بهینه

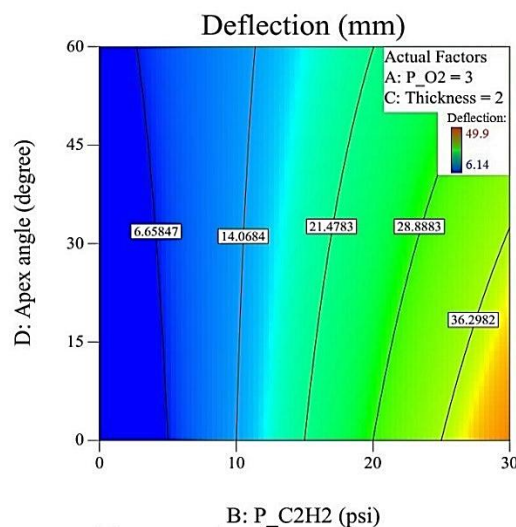
برای تعیین مطلوبیت تأثیر هرکدام از پارامترها بر خروجی نیاز به یک تابع هدف است. با توجه به پارامترهای مستقل و خروجی، شرایط بهینه‌سازی عددی در جدول ۴ برای شکل‌دهی آزاد و با قالب ورق‌های فلزی دایره‌ای با انفجار مخلوط گازها نشان داده‌شده است. در این جداول، هدف بهینه‌سازی هر فاکتور، بازه تغییرات و درجه اهمیت آن بیان شده است.

جدول ۴: مشخصات پارامترهای مستقل کمی و کیفی و

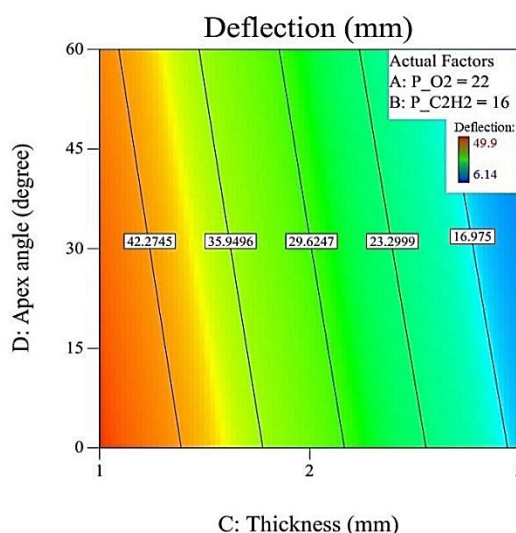
خروجی برای تعیین شرایط بهینه.

پارامتر	واحد	هدف	کم‌ترین مقدار	بیش‌ترین مقدار	درجه اهمیت
فشار گاز اکسیژن	psi	در بازه مقادیر	۳	۴۰	۳
فشار گاز استیلن	psi	در بازه مقادیر	۲/۵	۳۰	۳
ضخامت ورق	mm	در بازه مقادیر	۱	۳	۳
زاویه رأس قالب	degree	در بازه مقادیر	۰	۶۰	۳
تغییر شکل ورق	mm	کمترین مقدار	۶/۱۴	۴۹/۹	۵

با در نظر گرفتن مقادیر جدول ۴ شرایط بهینه موردنظر به ترتیب مطلوبیت در جدول ۵ آمده است. به‌منظور داشتن



شکل ۱۲: تغییر شکل ورق‌های فلزی دایره‌ای با انفجار مخلوط گازها به‌صورت کانتورهای رنگی با تغییرات فشار گاز استیلن و زاویه رأس قالب



شکل ۱۳: تغییر شکل ورق‌های فلزی دایره‌ای با انفجار مخلوط گازها به‌صورت کانتورهای رنگی با تغییرات ضخامت ورق و زاویه رأس قالب

در شکل ۱۰، مقدار ضخامت ورق و زاویه رأس قالب ثابت و فشار گاز اکسیژن و فشار گاز استیلن تغییر می‌کنند. همان‌طور که در این شکل مشخص است، با افزایش فشار گاز اکسیژن و افزایش فشار گاز استیلن مقدار تغییر شکل ورق‌های فلزی دایره‌ای افزایش می‌یابد. در شکل ۱۱، مقدار فشار گاز استیلن زاویه رأس قالب ثابت و میزان فشار گاز اکسیژن و ضخامت ورق دایره‌ای تغییر می‌کنند. مشاهده دقیق شکل ارائه‌شده نشان می‌دهد که با افزایش فشار گاز اکسیژن و کاهش مقدار ضخامت ورق، مقدار تغییر شکل

شکل ورق دایره‌ای، تغییرات پارامترهای مستقل در بازه انتخابی در نظر گرفته شدند. مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده از کارهای آزمایشگاهی و تحلیل رگرسیونی تحقیق حاضر به‌صورت زیر خلاصه‌شده است:

- در شکل‌دهی بدون قالب و آزاد، تمامی ساختارها سطوح مختلفی از تغییر شکل غیر الاستیک بزرگ یا همان مد اول تغییر شکل همراه با گستره تغییر شکل گنبدی را نشان دادند. این بدان مفهوم است که در مقدارهای متفاوت فشارهای گازهای اکسیژن و استیلن در روش انفجار مخلوط گازها، اعمال بار انفجاری به ورق به‌صورت یکنواخت صورت می‌پذیرد.

- در شکل‌دهی با قالب، فرم مخروطی نمونه‌ها با توجه به زاویه رأس ۶۰ درجه کاملاً مشهود بود و هیچ‌گونه پارگی در نمونه‌های شکل‌دهی با قالب در شرایط آزمایشگاهی یکسان دیده نشد.

- فشار گاز اکسیژن بیشترین تأثیر و زاویه رأس قالب کمترین تأثیر را روی شکل‌دهی آزاد و با قالب ورق‌های فلزی دایره‌ای با انفجار مخلوط گازها دارند. ضخامت ورق هم بیشتر از فشار گاز استیلن روی شکل‌دهی آزاد و با قالب ورق‌های فلزی دایره‌ای با انفجار مخلوط گازها مؤثر است.

- افزایش فشار گاز اکسیژن در فشارهای بالای گاز استیلن موجب تغییر شکل بیش‌تر ورق‌های دایره‌ای می‌گردد. به‌عبارت‌دیگر در فشار گاز اکسیژن پایین، تغییر شکل ورق با افزایش فشار گاز استیلن تغییرات کمی دارد این در حالی است که در فشار گاز اکسیژن بالا، تغییر شکل ورق با افزایش فشار گاز استیلن تغییرات زیادی دارد.

- افزایش فشار گاز استیلن در ضخامت‌های بالا موجب تغییر شکل کم‌تر ورق‌های دایره‌ای می‌گردد. به‌عبارت‌دیگر در فشار گاز استیلن پایین، تغییر شکل ورق با کاهش ضخامت ورق تغییرات بیشتری دارد این در حالی است که در فشار گاز استیلن بالا، تغییر شکل ورق با کاهش ضخامت ورق تغییرات کم‌تری دارد.

- افزایش فشار گاز استیلن زاویه‌های بالای رأس قالب موجب تغییر شکل بیش‌تر ورق‌های دایره‌ای می‌گردد. به‌عبارت‌دیگر در فشار گاز استیلن پایین، تغییر شکل ورق با کاهش زاویه رأس قالب تغییرات کمی دارد این در حالی

کمترین مقدار تغییر شکل در شکل‌دهی آزاد و با قالب ورق‌های فلزی دایره‌ای با انفجار مخلوط گازها، تغییرات پارامترها در بازه انتخابی قرار دارند. نزدیکی مقدار مطلوبیت به عدد ۱ نشان‌دهنده شرایط بهینه، خیلی خوب است.

جدول ۵: شرایط بهینه برای مشخصات پارامترهای

جدول ۴.

ردیف	تغییر شکل ورق (mm)	زاویه رأس قالب (degree)	ضخامت ورق (mm)	فشار گاز استیلن (psi)	فشار گاز اکسیژن (psi)	مؤلفه
۱	۵/۸۳	۵۲	۳	۲/۹	۲۱/۴	۱
۲	۴/۹۸	۲۲	۲	۳/۴	۴/۶	۲
۳	۲/۴۸	۵۸	۳	۳/۳	۱۷/۵	۳
۴	۰/۷۰	۱۷	۳	۴/۷	۱۳/۴	۴
۵	۸/۲۲	۰	۳	۲/۵	۲۴/۷	۵

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، شکل‌دهی آزاد و با قالب ورق‌های فلزی دایره‌ای با انفجار مخلوط گازها، مورد بررسی قرار گرفت. این بررسی در دو بخش تجربی و تحلیل رگرسیونی انجام شد. در بخش تجربی ۳۲ آزمایش انجام داده شد. در این آزمایش‌ها به بررسی تغییر شکل پلاستیک ورق‌های نازک فولادی، آلومینیومی و برنجی دایره‌ای تحت بارگذاری دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها به دو صورت شکل‌دهی آزاد و با قالب پرداخته شد. در این تحقیق تأثیر پارامترهایی مانند، جنس ماده، ضخامت‌های مختلف ورق و میزان انرژی وارده یا همان ایمپالس بر تغییر شکل پلاستیک ساختار بررسی شد. در بخش مدل‌سازی از روش سطح پاسخ استفاده شد. به‌منظور، معنی‌دار بودن مدل، سطح اطمینان ۹۵٪ در نظر گرفته شد. 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 به‌دست‌آمده از روش سطح پاسخ می‌توان نتیجه گرفت که نتایج حاصل از مدل رگرسیونی تطابق بسیار خوبی با نتایج تجربی داشت. فشار گاز اکسیژن، فشار گاز استیلن، ضخامت ورق دایره‌ای و زاویه رأس قالب به‌عنوان پارامترهای مستقل تأثیرگذار بر روی خروجی یعنی تغییر شکل ورق دایره‌ای، در نظر گرفته شدند. برای داشتن شرایط بهینه یعنی کمترین مقدار تغییر

- cylindrical cups experimental and theoretical modelling”, *Mater. design.*, Vol. 27, No. 5, pp. 397-404, 2006.
8. Kleiner M., Hermes M., Weber M., Olivier H., Gershteyn G., and Bach F. W. “Tube expansion by gas detonation”, *J. Prod. Eng.*, Vol. 1, No. 1, pp. 9-17, 2007.
 9. Meybodi M. K., and Bisadi H. “Gas Detonation Forming by a mixture of H₂+ O₂ Detonation”, *World Acad. Sci. Eng. Technol.*, Vol. 33, pp. 55-58, 2009.
 10. Khaleghi M., Aghazadeh B. S., and Bisadi H. “Efficient oxyhydrogen mixture determination in gas Detonation forming”, *Int. J. Mech. Mechatron. Eng.*, Vol. 7, pp. 1748-54, 2013.
 11. Babaei H., Mostofi T. M., and Sadraei S. H. “Effect of gas detonation on response of circular plate-experimental and theoretical”, *Struct. Eng. Mech.*, Vol. 56, No. 4, pp. 535-48, 2015.
 12. Babaei H., Mostofi T. M., Alitavoli M., and Darvizeh A. “Empirical modelling for prediction of large deformation of clamped circular plates in gas detonation forming process”, *Exp. Tech.* Vol. 40, No. 6, pp. 1485-94, 2016.
 13. Babaei H., Mostofi T. M., and Alitavoli M. “Experimental investigation and analytical modelling for forming of circular-clamped plates by using gases mixture detonation”, *Proc. Inst. Mech. Eng. Pt. C J. Mech. Eng. Sci.*, Vol. 234, No. 5, pp. 1102-11, 2020.
 14. Patil S. P., Popli M., Jenkouk V., and Markert B. “Numerical modelling of the gas detonation process of sheet metal forming”, *J. Phys. Conf. Ser.*, Vol. 734, p. 032099, 2016.
 15. Jenkouk V., Patil S., and Markert B. “Joining of tubes by gas detonation forming”, *J. Phys. Conf. Ser.*, Vol. 737, p. 032099, 2016.
 16. Patil S., Prajapati K., Jenkouk V., Olivier H., and Markert B. “Experimental and numerical studies of sheet metal forming with damage using gas detonation process”, *J. Met.*, Vol. 7, No. 12, p. 556, 2017.
 17. Babaei H., Mostofi T. M., Namdari-Khalilabad M., Alitavoli M., and
- است که در فشار گاز استیلن بالا، تغییر شکل ورق با زاویه رأس قالب تغییرات زیادی دارد.
- افزایش ضخامت ورق در زاویه‌های بالای رأس قالب موجب تغییر شکل کمتر ورق‌های دایره‌ای می‌گردد. به عبارت دیگر در ضخامت پایین، تغییر شکل ورق با کاهش زاویه رأس قالب تغییرات بیشتری دارد این در حالی است که در ضخامت بالا، تغییر شکل ورق با کاهش زاویه رأس قالب تغییرات کمتری دارد.
- ### ۶- مراجع
1. Mostofi T. M., Babaei, H., and 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 Wall. Struct.*, Vol. 109, pp. 367-76, 2016.
 2. Mostofi T. M., Golbaf A., Mahmoudi A., Alitavoli M., and 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 Wall. Struct.*, Vol. 123, pp. 48-56, 2018.
 3. Rezasefat M., Mostofi T. M., Babaei H., Ziya-Shamami M., and Alitavoli M. “Dynamic plastic response of double-layered circular metallic plates due to localized impulsive loading”, *Proc. Inst. Mech. Eng. Pt. L J. Mater. Des., Appl.*, Vol. 233, No. 7, pp. 1449-71, 2019.
 4. Rezasefat M., Mostofi T. M., and Ozbakkaloglu T. “Repeated localized impulsive loading on monolithic and multi-layered metallic plates”, *Thin Wall. Struct.* Vol. 144, p. 106332, 2019.
 5. Honda A., and Suzuki M. “Sheet metal forming by using gas imploding detonation”, *J. Mater. Process. Technol.* Vol. 85, No. 1-3, pp. 198-203, 1999.
 6. Yasar M. “Gas detonation forming process and modeling for efficient spring-back prediction”, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 150, No. 3, pp. 270-9, 2004.
 7. Yaşar M., Demirci H. I., and Kadi I. “Detonation forming of aluminium

- Using Response Surface Methodology”, *Modares Mech. Eng.*, Vol. 20, No. 4, pp. 1011-1023, 2020. (In Persian)
23. Mostofi, T. M., Sayah-Badkhor M., Rezasefat M., Ozbakkaloglu T., and Babaei H. “Gas mixture detonation load on polyurea-coated aluminum plates”, *Thin Wall. Struct.*, Vol. 155, p. 106851, 2020.
24. Rokhy, H., Soury, H. “Fluid structure interaction with a finite rate chemistry model for simulation of gaseous detonation metal-forming”, *Int. J. Hydrogen Energy.*, Vol. 44, No. 41, pp. 23289-232302.
25. Du, Y., Zhou, F., Hu, W., Ma, L., Xu, C., Chen, G. “Dynamic response and crack propagation of pre-flawed square tube under internal hydrogen-oxygen detonation”, *Int. J. Hydrogen Energy.*, Vol. 44, pp. 22507-22518, 2019.
26. Du, Y., Zhou, F., Zheng, L., Hu, W., Liao, B., Ma, L., Zheng, J. “Comparison of mode-crack propagation of tube subjected to internal hydrogen static and detonation loading”, *Int. J. Hydrogen Energy.*, Vol. 45, No. 19, pp. 11199-11210, 2020.
27. Du, Y., Zhou, F., Hu, W., Zheng, L. Ma, L., Zheng, J. "Incremental dynamic crack propagation of pipe subjected to internal gaseous detonation," *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 142, p. 103580, 2020.
- Mohammadi K. “Gas mixture detonation method, a novel processing technique for metal powder compaction: Experimental investigation and empirical modeling”, *Powder technol.*, Vol. 315, pp. 171-81, 2017.
18. Mostofi T. M., Babaei H., and Alitavoli M. “The influence of gas mixture detonation loads on large plastic deformation of thin quadrangular plates: Experimental investigation and empirical modelling”, *Thin Wall. Struct.*, Vol. 118, pp. 1-11, 2017.
19. Mostofi T. M., Babaei H., and Alitavoli M. “Experimental and theoretical study on large ductile transverse deformations of rectangular plates subjected to shock load due to gas mixture detonation”, *Strain.*, Vol. 53, No. 4, p. e12235, 2017.
20. Mostofi T. M., Babaei H., Alitavoli M., Lu G., and Ruan D. “Large transverse deformation of double-layered rectangular plates subjected to gas mixture detonation load”, *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 125, pp. 93-106, 2019.
21. Mostofi T. M., Sayah-Badkhor M., and Ghasemi E. “Experimental investigation and optimal analysis of the high-velocity forming process of bilayer plates”, *J. Solid Fluid Mech.*, Vol. 9, No. 3, pp. 65-80, 2019. (In Persian)
22. Mostofi T. M. and Sayah-Badkhor M. “Experimental Study and Optimization of Dynamic Response of Polymer-Coated Metal Plates Subjected to Impact Loading

پیوست:

جدول الف: اطلاعات سیستم‌های اندازه‌گیری

سیستم اندازه‌گیری	مدل	دمای کاری (درجه سانتی‌گراد)	شرکت سازنده	وزن (kg)	ابعاد
سنسور فشار	CY-YD-214	۴۰- تا ۱۵۰	SINOCERA	۰/۰۲	-
دیتالاگر	YE6233	۵۵- تا ۸۵	SINOCERA	۰/۵	۱۶۰×۲۶×۱۳۲
آمپلی فایر	YE5858	۵۵- تا ۸۵	SINOCERA	۱/۵	۲۰۰×۱۳۳×۷۰

جدول ب: نتایج کارهای تجربی برای نمونه‌های فولادی

گروه آزمایشی	شماره آزمایش	ایمپالس (N·s)	فشار اکسیژن (psi)	فشار استیلن (psi)	بیشترین خیز دائمی (mm)
A	St-1-ND-1	۴/۱۲	۳	۶	۶/۱
	St-1-ND-2	۸/۳۲	۵	۲/۵	۱۳/۲
	St-1-ND-3	۱۶/۸۹	۶	۳	۲۵/۶
	St-1-ND-4	۲۰/۲۶	۸	۴	۳۰/۳
	St-1-ND-5	۲۸/۵۴	۱۰	۵	۴۰/۶
	St-1-ND-6	۳۴/۷۸	۱۵	۱۵	۴۹/۹
B	St-2-ND-1	۲۵/۶	۱۰	۵	۱۹/۱
	St-2-ND-2	۲۷/۸۴	۲۰	۱۰	۲۱/۵
	St-2-ND-3	۳۱/۲۳	۱۵	۱۵	۲۵/۸
	St-2-ND-4	۴۳/۱۷	۳۰	۱۵	۳۱/۷
	St-2-ND-5	۴۵/۱۳	۲۰	۲۰	۳۳/۵
	St-2-ND-6	۵۴/۶۸	۳۰	۳۰	۴۰/۱

ادامه جدول ب: نتایج کارهای تجربی برای نمونه‌های فولادی.					
۱۳/۶	۱۰	۲۰	۲۲/۰۱	St-3-ND-1	C
۱۹/۴	۱۷/۵	۳۵	۳۲/۶۵	St-3-ND-2	
۱۷/۷	۲۰	۲۰	۳۵/۷۶	St-3-ND-3	
۱۹/۱	۱۵	۳۰	۳۷/۵۶	St-3-ND-4	
۲۲/۸	۲۰	۳۵	۴۲/۳۵	St-3-ND-5	
۲۲/۲	۲۰	۴۰	۴۷/۳۱	St-3-ND-6	
۲۵/۷	۳۰	۳۰	۵۱/۶۳	St-3-ND-7	
۲۵/۹	۴	۸	۲۰/۳۸	St-1-60-1	D
۳۴/۰	۵	۱۰	۲۸/۵۴	St-1-60-2	
۳۹/۵	۱۰	۱۲/۵	۳۱/۲۵	St-1-60-3	
۴۳/۱	۱۵	۱۵	۳۴/۱۸	St-1-60-4	
۲۰/۶	۱۵	۱۵	۳۱/۷۲	St-2-60-1	E
۲۱/۹	۱۲/۵	۱۷/۵	۳۶/۹۸	St-2-60-2	
۲۳/۰	۱۷/۵	۲۰	۳۹/۶۴	St-2-60-3	
۲۴/۹	۱۵	۳۰	۴۳/۱۹	St-2-60-4	
۲۷/۱	۲۰	۲۰	۴۵/۴۱	St-2-60-5	
۱۱/۳	۱۰	۲۰	۲۲/۱۳	St-3-60-1	F
۱۴/۶	۲۰	۲۰	۳۵/۲۳	St-3-60-2	
۱۵/۵	۱۵	۳۰	۳۷/۶۸	St-3-60-3	
۱۸/۲	۲۰	۴۰	۴۷/۵۲	St-3-60-4	

جدول پ: نتایج کارهای تجربی برای نمونه‌های آلومینیومی و برنجی					
گروه آزمایشی	شماره آزمایش	ایمپالس (N·s)	فشار اکسیژن (psi)	فشار استیلن (psi)	بیشترین خیز دائمی (mm)
G	Al-3-ND-1	۸/۴۱	۵	۲/۵	۱۵/۷
	Al-3-60-1	۸/۸۷	۵	۲/۵	۱۳/۸
H	Br-1-ND-1	۸/۶۵	۵	۲/۵	۱۴/۹