



The Influence of Uniform and Localized Blast Loading on the Response of Single-Layered Circular Plates: Experimental Study and Regression Analysis Using Response Surface Methodology

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Sayah Badkhor M.¹ PhD,
Mirzababaie Mostofi T.¹ PhD,
Babaei H.^{*2} PhD

How to cite this article

Sayah Badkhor M, Mirzababaie Mostofi T, Babaei H. The Influence of Uniform and Localized Blast Loading on the Response of Single-Layered Circular Plates: Experimental Study and Regression Analysis Using Response Surface Methodology. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(8):2045-2060.

¹Mechanical Engineering Department, Faculty of Electrical, Computer and Mechanical Engineering, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran

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

*Correspondence

Address: University of Guilan, 5th km of Persian Gulf Highway, Rasht, Iran.
Phone: +98 (13) 33690539
Fax: +98 (13) 33690595
ghbabaei@guilan.ac.ir

Article History

Received: February 10, 2020
Accepted: May 26, 2020
ePublished: August 15, 2020

ABSTRACT

In the present study, the experimental study and regression analysis of the dynamic response of circular plates under uniform and localized blast loading were investigated. To this end, several experiments were performed on steel plates under different conditions in the experimental section. In order to complete the database and perform a comprehensive analysis, fourteen series of experiments and 562 data in the open literature were added to the experimental results of the present study. Subsequently, the effect of the radius and thickness of the plate, the impulse of applied load, the mechanical properties of the plate, the loading radius, and the standoff distance on the maximum deflections of circular plates were simultaneously investigated using the Design-Expert software package and response surface methodology. In order to find a significant model, the confidence level of 95% was considered in the analysis. Two separate analyses were done based on the types of loading. The values of R^2 for uniform and localized blast loading are equal to 0.9712 and 0.9548, respectively. The results show that the predicted values of the models are in good agreement with the experimental data and the presented models are suitable. Optimal conditions for the minimum deflection of the circular plates under dynamic loading with uniform and local distribution were also presented.

Keywords Uniform Load; Local Load; Plate Deflection; Circular Plate; Optimization; Response Surface Methodology

CITATION LINKS

[1] Theoretical analysis on the effect of ... [2] Closed-form analytical analysis on ... [3] On dimensionless numbers for the ... [4] The influence of gas mixture detonation ... [5] Large transverse deformation of double ... [6] Experimental and theoretical study on large ductile ... [7] Gas mixture detonation method, a novel ... [8] Experimental and theoretical study of ... [9] Experimental investigation and ... [10] Experimental study and analytical ... [11] New dimensionless numbers for ... [12] Dynamic plastic response of double-layered circular ... [13] Repeated localized impulsive ... [14] Effect of gas detonation on response of ... [15] Experimental investigation and ... [16] Experimental investigation and ... [17] Study on the response of circular thin plate ... [18] Study on the response of circular thin ... [19] A theory of the dynamic plastic ... [20] Large deflection dynamic response ... [21] A theoretical study of the dynamic plastic ... [22] A theoretical and experimental ... [23] Kinetics of the axisymmetric ... [24] Membrane mode solutions for impulsively ... [25] Application of response number for dynamic ... [26] Simplified large deflection mode ... [27] Predictions of transverse deflections ... [28] Deformation of thin plates subjected to ... [29] Deformation of thin plates subjected to ... [30] The effect of stand-off distance on ... [31] A simple modelling method for deflection ... [32] Analytical and experimental studies for ... [33] Investigation into the response of fully ... [34] Analytical study of plastic deformation ... [35] On the influence of radial displacements and ... [36] Deformation of thin plates subjected to ... [37] Experimental and numerical investigation ... [38] Friction surfacing of AA7075-T6 deposition ... [39] Experimental and numerical analysis and ... [40] Numerical investigation and optimization on ... [41] Low-velocity impact response of plate ... [42] Experimental study and optimization ... [43] Dynamic response of metal powder ... [44] Experiments on viscoplastic response ... [45] The deformation and tearing of thin ... [46] Predicting the onset of necking and hence ... [47] The effect of boundary conditions on ... [48] Tearing of blast loaded plates with ... [49] Deflection and tearing of clamped stiffened ... [50] Scaling aspects of quadrangular plates subjected ... [51] Deformation and tearing of uniformly blast ...

اثر بارگذاری انفجاری یکنواخت و محلی روی پاسخ ورق‌های تک‌لایه دایره‌ای: مطالعه تجربی و تحلیل رگرسیونی با استفاده از روش رویه پاسخ

مصطفی سیاح بادخور PhD

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

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

چکیده

در مطالعه حاضر، به بررسی تجربی و تحلیل رگرسیونی پاسخ دینامیکی ورق‌های دایره‌ای تحت بار انفجاری یکنواخت و محلی پرداخته شده است. بدین منظور در بخش مطالعه آزمایشگاهی، آزمایش‌هایی روی ورق‌های فولادی در شرایط مختلف انجام شد. به منظور تکمیل بانک اطلاعاتی و انجام یک تحلیل جامع، چهارده سری آزمایش و ۵۶۲ داده موجود در ادبیات تحقیق به نتایج تجربی مطالعه حاضر اضافه شد. در ادامه، با استفاده از نرم‌افزار طراح آزمایش و روش رویه پاسخ، اثر شعاع و ضخامت ورق، شدت بار وارده، خواص مکانیکی ورق، شعاع بارگذاری و فاصله استقرار روی خیز ورق‌های دایره‌ای به صورت هم‌زمان بررسی شد. به منظور دستیابی به یک مدل معنی‌دار، سطح اطمینان ۹۵٪ در تحلیل در نظر گرفته شد. با توجه به نوع بارگذاری‌ها، دو تحلیل جداگانه انجام شد. مقادیر R^2 برای بارگذاری دینامیکی با توزیع یکنواخت و محلی به ترتیب برابر ۹۷۱۲٪ و ۹۵۴۸٪ به دست آمد. نتایج حاصل حاکی از آن است که مقادیر به دست آمده از پیش‌بینی مدل‌ها با داده‌های تجربی مطابقت خوبی دارد و مدل‌های ارائه شده مناسب هستند. شرایط بهینه برای کمترین تغییر شکل ورق‌های تک‌لایه دایره‌ای تحت بارگذاری دینامیکی با توزیع یکنواخت و محلی نیز ارائه شد.

کلیدواژه‌ها: بارگذاری یکنواخت، بارگذاری محلی، خیز ورق، ورق دایره‌ای، بهینه‌سازی، روش سطح پاسخ

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۰۶

*نویسنده مسئول: ghbabaei@guilan.ac.ir

مقدمه

یکی از روش‌های مرسوم و متداول در شکل‌دهی دفعی ورق، استفاده از خرج مسطح انفجاری به صورت آزاد در هوا است [1-3]. در این روش، با افزایش فاصله خرج انفجاری از سطح ورق، بار دفعی به طور کاملاً یکنواخت، تمام یا قسمتی از سطح نمونه را در بر می‌گیرد. همچنین در بسیاری از موارد، خرج انفجاری به صورت دایره یا مستطیل‌های هم‌مرکز برای اعمال بار دفعی یکنواخت مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این روش، میزان بار دفعی اعمال شده بر ورق یا همان ایمپالس ورودی ناشی از انفجار، توسط یک پاندول بالستیک اندازه‌گیری و ارزیابی می‌شود [1-3]. تاکنون، روابط تحلیلی و تجربی بسیاری برای بررسی رفتار دینامیکی ساختارهای

مختلف شامل ورق‌های مستطیلی تحت بار دفعی و انفجار مخلوط گازها [1-10] و ورق‌های دایره‌ای تحت بارهای دینامیکی با توزیع متفاوت [11-36] ارائه شده که در ادامه به اهم آنها پرداخته می‌شود. هادسون، مجموعه‌ای از دستگاه معادلات دیفرانسیلی غیرخطی جفت‌شده را حل نمود و توانست در نهایت شکل نهایی ورق دایره‌ای پس از تغییر شکل پلاستیک-دینامیکی، توزیع ضخامت در آن و زمان خاتمه تغییر شکل ورق را به کمک نظریه ساده‌ای با در نظر گرفتن تنها تنش‌های کششی در روش شکل‌دهی انفجاری درون آب و با چشم‌پوشی کردن از اثرات تنش‌های خمشی و نیز اثرات حساسیت به نرخ کرنش به دست آورد [19]. دافی، به بررسی تحلیلی تغییر شکل پلاستیک ورق‌های دایره‌ای تحت بار دفعی یکنواخت با فرض رفتار ماده به صورت ایده‌آل صلب-پلاستیک و با استفاده از روش انرژی پرداخت. او با صرف نظر کردن از اثرات نرخ کرنش، مقدار انرژی کرنشی را با انرژی جنبشی اولیه ورق برابر قرار داد. تغییر شکل‌های متعددی شامل توابع سینوسی و چندجمله‌ای برای نزدیک‌تر شدن پیش‌بینی تحلیلی به نتایج تجربی مورد آزمایش قرار گرفتند [20]. جونز، برای نخستین بار با در نظر گرفتن فرض رفتار ایده‌آل صلب-پلاستیک، اثرات نیروهای غشایی و ممان‌های خمشی برای ماده، رفتار تیرها، ورق‌های دایره‌ای و مستطیلی تحت بارهای دفعی یکنواخت را شرح داد [21]. ویززیکی و فلورنس، با در نظر گرفتن رفتار ویسکوالاستیک خطی برای ماده و با وارد کردن هم‌زمان ممان‌های خمشی و نیروهای غشایی در معادلات حرکت و با فرض اینکه که ورق تنها در جهت قائم حرکت کند، توانستند پیش‌بینی‌های بهتری ارائه دهند. بنابراین، آنها حساسیت به نرخ کرنش را در محدوده‌ای از ایمپالس‌های اعمالی که حایز اهمیت است، تأثیر دادند و از شرط تسلیم هوپر-میسز برای آنکه میان تنش‌های منتهجه و مؤلفه‌های نرخ کرنش رابطه برقرار شود، استفاده کردند [22]. لیمن، از اثرات خمشی صرف‌نظر و تنها نیروهای غشایی را در معادلات حرکت با فرض رفتار شبیه به یک غشا برای ورق در جریان شکل‌دهی انفجاری، وارد کرد. او همچنین با استفاده از شرط تسلیم ترسکا و قوانین سیلان، یک معادله دیفرانسیل جزئی غیرخطی مرتبه دوم با فرض اینکه المان‌های ورق تنها به طور افقی به سمت پایین حرکت می‌کنند، به دست آورد که حل عددی آن پروفیل تقریبی تغییر شکل ورق را در هر لحظه از تغییر شکل مشخص می‌کرد [23]. سیموندز و ویززیکی، رفتار غشایی را بررسی کردند. آنها دریافتند که مدل تحلیلی ارائه شده، تنها خیزهای نهایی موجود در محدوده خیزهای کوچک و پایین‌تر از مقادیر تجربی را تخمین می‌زند [24]. هو، با صرف نظر کردن از کرنش‌های الاستیک در مقایسه با کرنش‌های پلاستیک و با بیان پیچیدگی حل مسایل مربوط به پاسخ دینامیکی سازه‌ها تحت بارهای دفعی در محدوده تغییر شکل‌های پلاستیک، به حل دقیق‌تر معادلات مربوطه پرداخت. او برای کم کردن پیچیدگی حل معادلات بدون کاهش دقت، رفتار ماده را به صورت صلب-پلاستیک، در نظر گرفت [25]. پرون و بهادر، به

مکانیکی و ریزساختار به‌کمک این روش را بررسی کردند [38]. بیگدلی و همکاران، با استفاده از روش سطح پاسخ به مطالعه تجربی و عددی شرایط بهینه برای فشرده‌سازی استاتیکی سیلندرهای جدار نازک پرداختند. آنها ضمن مطالعه تأثیر پارامترهای مختلف به‌صورت هم‌زمان، شرایط بهینه را نیز تعیین کردند [39]. سیاح بادخور و همکاران، به بررسی عددی و بهینه‌سازی رفتار ساختارهای ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری تحت بارگذاری انفجاری با استفاده از روش سطح پاسخ پرداختند. آنها اثر شرایط مختلف بارگذاری و همچنین هندسه ساختار بر رفتار ساختار ساندویچی تحت بارگذاری یکنواخت را مورد مطالعه قرار دادند. آنها در مطالعه خود، ابتدا یک مدل عددی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، جهت شبیه‌سازی پاسخ دینامیکی و تغییر شکل پلاستیک سازه‌های ساندویچی انجام دادند. سپس در بحث مطالعه پارامتریک، تأثیر پارامترهای موثر بر مقاومت این ساختار ساندویچی نظیر ضخامت صفحات بالا و پایین فلزی، تعداد صفحات در هسته و همچنین ضخامت آنها تحت بارگذاری انفجاری با جرم خرج‌های مختلف ۰/۵، ۱ و ۵/۵ کیلوگرم را مورد بررسی قرار دادند. در انتها نیز استفاده از طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ، مدلی مناسب جهت پیش‌بینی میزان تغییر شکل مرکزی صفحات بالا و پایین ساختار ساندویچی ارائه کردند [40]. در مطالعه دیگری سیاح بادخور و همکاران، به بررسی تجربی و مدل‌سازی پاسخ ضربه سرعت‌پایین ورق با هندسه‌های مختلف تحت بار هیدرودینامیکی پرداختند. آنها در مدل‌سازی خود از روش سطح پاسخ استفاده کردند. ضخامت ورق، ارتفاع وزنه و جرم وزنه را به‌عنوان پارامترهای مستقل کمی و هندسه ورق و جنس ورق را به‌عنوان پارامترهای مستقل کیفی در نظر گرفتند [41]. میرزا بابایی مستوفی و سیاح بادخور به مطالعه تجربی و بهینه‌سازی پاسخ دینامیکی ورق‌های فلز-پلیمر تحت بار ضربه‌ای با استفاده از روش سطح پاسخ پرداختند. آنها با استفاده از روش سطح پاسخ تأثیر پارامترهای مستقل یعنی ضخامت ورق فلزی، ضخامت روکش پلیمری و ایمپالس بارگذاری ناشی از بار انفجار مخلوط گازی بر روی خروجی یعنی تغییر شکل ساختار دولایه را تعیین کردند [42]. سیاح بادخور و همکاران، به بررسی پاسخ دینامیکی پودرهای فلزی تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت‌پایین به‌صورت تجربی و بهینه‌سازی با روش سطح پاسخ پرداختند. آنها به مطالعه تجربی تراکم دینامیکی پودرهای آلومینیومی تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت‌پایین با استفاده از سامانه چکش پرتابه‌ای و همچنین بهینه‌سازی پارامترهای موثر در این فرآیند پرداختند. آنها اثر پارامترهای مستقل شامل اندازه دانه‌بندی ذرات، جرم چکش و ارتفاع چکش را روی چگالی سبز و مقاومت سبز مورد بررسی قرار دادند [43].

با مرور پژوهش‌های پیشین محققان، این نتیجه حاصل شد که در زمینه پاسخ پلاستیک ورق‌های دایره‌ای تحت بار دینامیکی با توزیع یکنواخت و محلی، داده‌های تجربی بسیاری وجود دارند اما

بررسی تغییر شکل بزرگ ورق‌های دایره‌ای ویسکوپلاستیک تحت بارگذاری دینامیکی با در نظر گرفتن تأثیر حساسیت به نرخ کرنش، پرداختند [26]. نوریک و همکاران [27] و نوریک و مارتین [28، 29] به ارائه مدل‌هایی برای ورق‌های دایره‌ای و مستطیلی با فرض شکل مد متغیر در روش تقریبی و در نظر گرفتن هم‌زمان جابه‌جایی‌های قائم و افقی پرداخته شد که در آن، شکل مد در هر گام زمانی محاسبه می‌شود. بنابراین، امکان پیش‌بینی توزیع کرنش‌های محیطی که تا آن زمان ممکن نبود، فراهم شد. ژاکوب و همکاران، به بررسی اثر فاصله استقرار و جرم خرج را بر پاسخ دینامیکی ورق‌های دایره‌ای کاملاً گیردار تحت بار انفجاری پرداختند. آنها به‌منظور پیش‌بینی خیز مرکزی ورق یک تحلیل تجربی انجام دادند که در آن اثر فاصله استقرار خرج به‌عنوان یک پارامتر مهم به اعداد بی‌بعد ایمپالس ارائه‌شده توسط نوریک و مارتین اضافه شد [30]. در مطالعاتی به ارائه مدل‌هایی تحلیلی برای پیش‌بینی خیز مرکزی ورق‌های دایره‌ای با پیرامون گیردار تحت بار انفجاری یکنواخت و غیریکنواخت پرداخته شد. نسبت خیز مرکزی به ضخامت ورق با استفاده از روش انرژی بر مبنای حل حد بالا و با فرض گسترده‌های تغییر شکل به فرم سهمی و تابع بسل مرتبه صفر، به‌دست آورده شد [31-34]. کولوت و نوریک، به بررسی این فرضیه که می‌توان از اثر جابه‌جایی‌های شعاعی و کرنش‌های خمشی در تحلیل تغییر شکل‌های بزرگ ورق‌های دایره‌ای تحت بار دفعی صرف‌نظر کرد، پرداختند و بنابراین، سه تحلیل انرژی ارائه کردند. در تحلیل اول، با افزودن جابه‌جایی‌های شعاعی به جابه‌جایی‌های عرضی، تنها کرنش‌های خمشی در نظر گرفته شد. آنها دریافتند که افزودن جابه‌جایی‌های شعاعی توزیع کرنش غیرالاستیک را تغییر می‌دهد اما تأثیری بر مقدار خیز نهایی ندارد. در مرحله دوم، یک مدل تحلیلی که اثر متقابل کرنش‌های خمشی و غشایی را در نظر می‌گیرد، ارائه کردند. در این مرحله دریافتند که در تغییر شکل‌های بزرگ می‌توان از کرنش‌های خمشی صرف‌نظر کرد. این بدین علت است که اثر کرنش‌های غشایی بر کرنش‌های خمشی غلبه می‌کند. در مرحله سوم، تاریخچه کرنش به‌صورت غیرخطی در نظر گرفته شد و نتایج به‌دست‌آمده تأثیر کم آن را در تحلیل تغییر شکل بزرگ پلاستیک ورق تأیید کرد [35]. یون و همکاران، توانستند با انجام یک سری آزمایش‌های جدید مدل‌های ارائه‌شده در مراجع قبلی را اصلاح نمایند و دقت مدل تجربی خود را بهبود دهند [36]. گلمکانی و همکاران، به مطالعه کشش عمیق با اجزاء لاستیکی پرداختند. آنها نمونه‌های مربعی را با استفاده از قالب با ماتریس لاستیکی به‌صورت عملی و شبیه‌سازی سه‌بعدی، شکل دادند. در نهایت به‌کمک روش پاسخ سطح به مطالعه پارامترهایی از جمله شعاع سنبه، جایگشت، جنس ورق و مقدار فاصله اولیه بین ورق‌گیر بر روی نازک‌شدگی، نیروی وارد بر سنبه و نیروی ورق‌گیر پرداختند [37]. مصطفی‌پور و همکاران، به مطالعه تأثیر پوشش‌دهی اصطاکی آلپاژ آلومینیوم بر روی یک فلز دیگر به روش سطح پاسخ پرداختند. آنها تأثیر پارامترهای فرآیند بر روی خواص

مشخصات کلی از قبیل نوع بارگذاری، محدوده شدت نیرو یا ایمپالس، هندسه ورق، محدوده تغییر شکل و همچنین مشخصه‌های مکانیکی ورق ارایه شده است. در تمامی آزمون‌های انجام شده، خرج انفجاری به کاررفته از نوع PE4 و شکل هندسی خرج مسطح دیسکی و مسطح حلقه‌ای بوده است. برای جلوگیری از آسیب‌های ناشی از انفجار بین خرج و ورق از فوم پلی‌استر استفاده شده است.

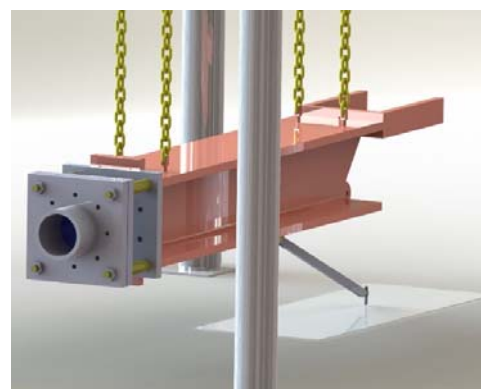
از مهم‌ترین پارامترهای موثر در فرآیند شکل‌دهی انفجاری ورق، مقدار و شکل هندسی خرج است. جرم خرج به کاررفته در هر آزمون رابطه کاملاً مستقیمی با ایمپالس تولیدشده از انفجار و به تبع آن جابه‌جایی مرکز ورق دارد. همچنین شکل هندسی خرج نیز تأثیر زیادی در نوع توزیع بار دینامیکی بر روی ورق و به تبع آن به پروفیل تغییر شکل ورق دارد. شکل‌های ۲ و ۳ دو پروفیل تغییر شکل متفاوت که در اثر بار دینامیکی با توزیع محلی و یکنواخت ایجادشده را نشان می‌دهند.

همان گونه که در شکل‌های ۲ و ۳ ملاحظه می‌شود، ورق‌هایی که تحت بار دینامیکی با توزیع یکنواخت قرار گرفتند، به صورت یکنواخت و گنبدی تغییر شکل داده‌اند؛ اما در ورق‌هایی که تحت بار محلی تغییر شکل یافته‌اند، گستره شکل نهایی، به صورت گنبدی مضاعف است به گونه‌ای که یکی از آنها کوچک بوده و بر روی دیگری که بزرگ‌تر است قرار دارد. از آنجایی که خرج‌های انفجاری به کاررفته در سامانه‌های دینامیکی به صورت خمیری شکل و از نوع PE4 است، لذا ایجاد اشکال مختلف خرج انفجاری امکان‌پذیر است. در مورد بارگذاری غیریکنواخت، خرج انفجاری به صورت یک دیسک استوانه‌ای شکل با ضخامت و شعاع مشخص بر روی فوم قرار داده می‌شود. بنابراین، توزیع بار ایمپالسی به وجودآمده نسبت به مرکز ورق به صورت متمرکز و غیریکنواخت است. در مورد بارگذاری یکنواخت، یک شبکه دایره‌ای شکل به وسیله خرج انفجاری ایجاد می‌شود. این شبکه شامل دو طرح دایره‌ای با ابعاد مشخص است. طرح‌های ایجادشده به وسیله خرج به یکدیگر متصل می‌شوند تا انفجار به طور کامل تحقق یابد. بار دفعی در این حالت به صورت تقریباً یکنواخت روی سطح ورق توزیع می‌شود. در تحقیقات تجربی شکل هندسی خرج انفجاری به دو صورت خرج انفجاری مسطح دیسکی و خرج انفجاری مسطح حلقه‌ای به کار برده شده است. در مورد خرج انفجاری مسطح دیسکی، خرج انفجاری به صورت یک دیسک استوانه‌ای شکل با ضخامت یک‌سوم قطر و به شعاع R_0 ، شکل داده شده است. توزیع بار دینامیکی به وجودآمده به صورت متمرکز نسبت به مرکز ورق و محلی است. این نوع شکل هندسی خرج به آسانی و در کوتاه‌ترین زمان توسط یک شابلون ایجاد می‌شود. شکل ۴ نمونه‌ای از این نوع خرج است [30-34]. در خرج مسطح حلقه‌ای شکل، یک شبکه دایره‌ای شکل به وسیله خرج انفجاری ایجاد می‌شود. این شبکه شامل ۲ حلقه دایره‌ای به شعاع $C_1 = 0/41R$ و $C_2 = 0/82R$ است که در آن شعاع ورق تحت بار است. حلقه‌های این شبکه

یک تحلیل کامل بر پارامترهای موثر در این زمینه، وجود ندارد. لذا بهینه‌سازی این پارامترها و بررسی میزان تأثیر هر کدام از آنها بر پاسخ پلاستیک ورق‌های دایره‌ای، ضروری است. بنابراین در ابتدا شش آزمایش تجربی روی ورق‌های دایره‌ای تحت بارگذاری انفجاری با توزیع یکنواخت و محلی انجام شده و سپس با استفاده از روش سطح پاسخ به بررسی هر کدام از پارامترهای موثر در این فرآیند روی پاسخ پلاستیک ورق‌های دایره‌ای پرداخته شده است. از مزیت‌های اصلی این روش می‌توان به سازمان‌دهی کارهای تجربی، پیش‌گیری از آزمایش‌های تکراری، بررسی و شناخت اثر هر یک از متغیرهای وابسته به فرآیند و همچنین تحلیل و تجزیه داده‌های آزمایشگاهی اشاره کرد، بنابراین نوآوری مقاله حاضر انجام یک تحلیل جامع بر داده‌های موجود در زمینه پاسخ پلاستیک ورق‌های دایره‌ای تحت بار دینامیکی به همراه بهینه‌سازی پارامترهای موثر با در نظرگرفتن شرایطی که موجب تغییر شکل زیاد ورق‌ها می‌شود، است.

داده‌های تجربی پیشنهادی پژوهش

برای بررسی تغییر شکل پلاستیک ورق‌های دایره‌ای و مستطیلی تحت بارگذاری دینامیکی با توزیع‌های مختلف، پژوهش‌های تجربی بسیاری انجام شده است. در این پژوهش‌ها، بیشترین خیز دائمی ورق و شدت اعمال بار اندازه‌گیری شده است. قابل توجه است که پروفیل و میزان ورق‌های تغییر شکل یافته به نوع بارگذاری دینامیکی اشاره دارد. از چهارده سری نتایج تجربی [22, 28, 30, 36, 44-51] به تعداد ۵۶۲ داده برای تعیین اثربخشی مقادیر مختلف از جمله ابعاد، خواص مواد و شرایط بارگذاری بر روی بیشترین خیز دائمی ورق‌های دایره‌ای تحت بارگذاری دینامیکی با توزیع یکنواخت و محلی استفاده شده است. باید توجه داشت که تمام نتایج تجربی از طریق یک روش مشابه و با استفاده از مواد منفجره و توسط آونگ بالستیک، مطابق با شکل ۱ به دست آمده است.



شکل ۱) دستگاه پاندول بالستیک

در جدول ۱، فهرست کاملی از تحقیقات انجام شده در زمینه شکل‌دهی ورق‌های دایره‌ای تحت بارگذاری انفجاری همراه با

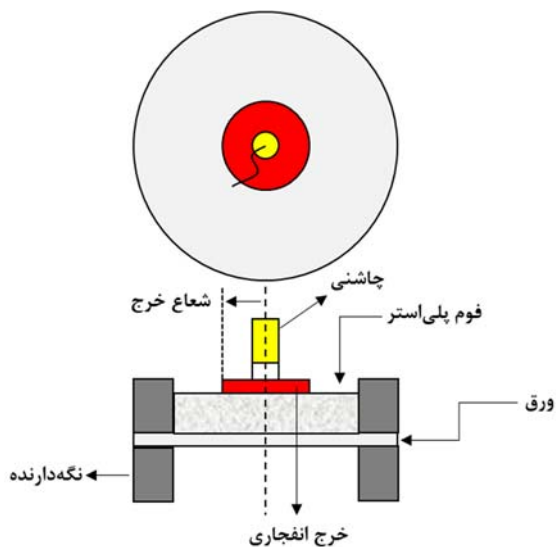
هر دو مورد فوق، چاشنی انفجار که معمولاً به صورت الکتریکی است، توسط آگرم از خرج (واسط) به مرکز هندسی خرج شکل‌داده شده نصب می‌شود. لازم به ذکر است که نصب چاشنی بدون به‌کاربردن آگرم از خرج واسط منجر به عدم انفجار خرج می‌شود. علاوه بر شکل هندسی خرج، یکی دیگر از عواملی که امکان تغییر توزیع بار دینامیکی را بر سطح ورق دارد، فاصله استقرار خرج تا ورق است. فاصله استقرار خرج در سامانه‌های دینامیکی، توسط لوله‌هایی با طول مختلف و با قطر ثابت و هم‌اندازه با قطر ورق ایجاد می‌شود. شکل ۶ نمونه‌هایی از این نوع لوله‌ها را با طول‌های مختلف نشان می‌دهد [30-34].

می‌بایست به‌وسیله خرج به یکدیگر متصل شوند تا انفجار به‌طور کامل تحقق یابد. بار دینامیکی در این حالت به‌صورت تقریباً یکنواخت روی سطح ورق توزیع می‌شود. ایجاد این نوع شکل خرج نیز توسط شابلون امکان‌پذیر است اما نصب آن نیاز به دقت داشته و تقریباً نسبت به مورد قبلی دشوارتر است. نمونه‌ای از خرج مسطح حلقه‌ای به‌صورت شماتیک در شکل ۵ نشان داده شده است [31-34]. در هر دو مورد از اشکال هندسی خرج انفجاری، بین خرج انفجاری و ورق از یک فوم پلی‌استر به ضخامت ۱۰ تا ۱۵ میلی‌متر استفاده می‌شود. هدف از به‌کارگیری آن، جلوگیری از آسیب ورق بر اثر انفجار و تثبیت مکانی خرج است. همچنین در

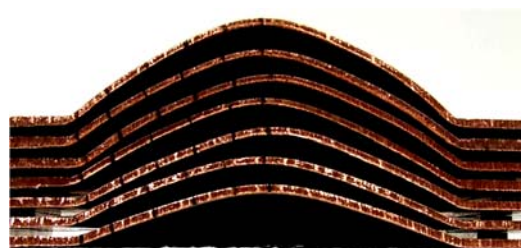
جدول (۱) نتایج تجربی موجود در ادبیات تحقیق

مطالعات پیشین	سال	تعداد آزمایش	قطر ورق (mm)	ضخامت ورق (mm)	نوع بارگذاری	نسبت شعاع خرج به ورق	تنش تسلیم (MPa)	محدوده بیشترین خیز (mm)	محدوده ایمپالس (N.s)
ویززیبک و فلورنس [22]	۱۹۷۰	۱۸	۲۰۳	۶/۲	یکنواخت	-	۲۸۳	۲۸/۴-۳/۸	۱۳۷/۶-۴۳/۸
نوریک و مارتین [28]	۱۹۸۹	۲۰	۱۰۰	۱/۶	یکنواخت	-	۲۸۲	۱۹/۸-۶/۱	۱۵/۶-۵/۶
ژاکوب و همکاران [30]	۲۰۰۷	۶۹	۱۰۶	۱/۹	محلی	۰/۳۳	۲۴۰	۲۸/۱-۵/۷	۳۳/۵-۸/۴
چانگ‌کیم یون و همکاران [36]	۲۰۱۷	۳۱	۱۰۰	۳/۶، ۲/۶، ۱/۶	محلی	۰/۳۳، ۰/۲۵، ۰/۴	۲۴۲	۳۰/۶-۷/۸	۲۹/۷-۶/۶
یون و همکاران [36]	۲۰۱۷	۵۴	۱۰۶	۲/۰	محلی	۰/۳۳	۲۶۱	۲۲/۰-۵/۰	۲۹/۰-۵/۴
بادنر و سیمونس [44]	۱۹۷۹	۸	۶۴	۱/۹	یکنواخت	-	۲۲۳	۱۲/۳-۰/۹	۷/۲-۰/۹
بادنر و سیمونس [44]	۱۹۷۹	۲۱	۶۴	۱/۹	محلی	۰/۵ و ۰/۳۳	۲۲۳	۱۱/۴-۲/۵	۴/۰-۰/۹
تیلینگ و نوریک [45]	۱۹۹۱	۹	۱۰۰	۱/۶	یکنواخت	-	۲۶۴	۳۰/۱-۳/۷	۲۹/۲-۴/۸
نوریک و تیلینگ [46]	۱۹۹۲	۱۴۳	۱۰۰	۱/۶	یکنواخت	-	۲۷۰	۲۷/۹-۴/۶	۲۲/۰-۴/۶
توماس [47]	۱۹۹۵	۲۰	۱۰۰	۳/۹-۳	یکنواخت	-	۲۶۲	۲۰/۹-۵/۶	۱۶/۳-۴/۶
نوریک و همکاران [48]	۱۹۹۶	۱۱۳	۱۰۰، ۸۰، ۶۰ و ۱۲۰	۱/۶	یکنواخت	-	۲۹۰	۳۴/۳-۲/۷	۳۰/۹-۱/۴
نوریک و لامپ [49]	۱۹۹۶	۷	۱۰۰	۱/۶	یکنواخت	-	۲۵۵	۲۰/۴-۷/۳	۱۶/۵-۵/۲
نوریک و رادفورد [50]	۱۹۹۷	۳۸	۱۰۰	۱/۶	محلی	۰/۲۵، ۰/۱۸، ۰/۴، ۰/۳۳	۱۹۴	۲۹/۹-۵/۴	۱۲/۴-۲/۷
یون و نوریک [51]	۲۰۰۰	۱۹	۱۰۰	۳/۶ و ۱/۶	محلی	۰/۳۳، ۰/۲۵، ۰/۴	۲۵۲	۳۱/۳-۱۶/۰	۳۱/۳-۶/۶

* توزیع بار دینامیکی محلی با استفاده از فاصله استقرار خرج



شکل (۴) بارگذاری دینامیکی با توزیع محلی



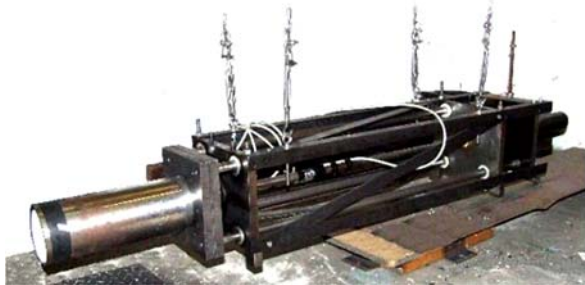
شکل (۲) نمایی از تغییر شکل تحت بار دینامیکی محلی [32]



شکل (۳) نمایی از تغییر شکل تحت بار دینامیکی یکنواخت [32]

خواص مکانیکی ماده

خواص مکانیکی مواد مورد استفاده در این مجموعه آزمایش‌ها از انجام آزمایش کشش تک‌محوری روی نمونه‌های آماده‌شده از ورق‌هایی از جنس فولاد نرم تعیین شده است. مقادیر تنش نهایی و تنش تسلیم برای هر نوع جنس در جدول ۲ درج شده است.



شکل ۷) سیستم مورد استفاده در انجام آزمایش‌ها^[30]

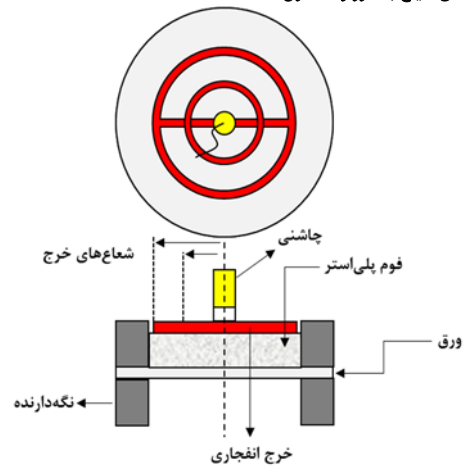
جدول ۲) خواص مکانیکی فولاد

مقدار	پارامتر
۱/۶	ضخامت ورق (mm)
۳۱۸	میانگین تنش تسلیم (MPa)
۳۷۵	میانگین تنش نهایی (MPa)
۲۰۷	مدول الاستیسیته (GPa)
۰/۳	ضریب پواسون

طراحی آزمایش

با توجه به تعداد زیاد پارامترهای موثر در فرآیند تغییر شکل ورق‌های تک‌لایه دایره‌ای تحت بارگذاری دینامیکی با توزیع یکنواخت و محلی، بررسی تأثیر هر کدام از آنها به صورت مجزا کار بسیار دشوار و زمان‌بری است، ضمناً نتیجه کافی هم نخواهد داشت. استفاده از روش‌های ساده مانند تغییر یک پارامتر در هر زمان نیز، نمی‌تواند به خوبی تأثیر و برهم‌کنش بین پارامترها را مشخص نماید؛ بنابراین استفاده از نرم‌افزار طراح آزمایش در این زمینه، نتایج بسیار خوبی خواهد داشت. 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 طراح آزمایش یا استفاده از نتایج آزمایش‌های انجام‌شده، می‌تواند تأثیر پارامترهای مهم را بر خروجی‌های نهایی تعیین نماید.

به منظور تعیین تأثیر پارامترهای فرآیند تغییر شکل ورق‌های تک‌لایه دایره‌ای تحت بارگذاری دینامیکی با توزیع یکنواخت و محلی، از داده‌های تجربی موجود در ادبیات پژوهش استفاده شده است. از مجموع ۵۶۲ داده موجود که در جدول ۱ آمده است، ۳۳۸ داده مربوط به بارگذاری دینامیکی با توزیع یکنواخت و ۲۲۴ داده مربوط به بارگذاری دینامیکی با توزیع محلی است. بنابراین با توجه به داشتن اطلاعات مربوط به آزمایش از طرح داده‌های تجربی در نرم‌افزار طراح آزمایش استفاده شده است. روش سطح



شکل ۵) بارگذاری دینامیکی با توزیع یکنواخت



شکل ۶) لوله‌های فولادی جهت ایجاد فاصله قرارگرفتن خرج تا ورق دایره‌ای^[30]

آزمایش تجربی

به منظور انجام آزمایش‌های تجربی، ابتدا نمونه ورق‌ها به صورت مربعی در ابعاد ۲۰۰×۲۰۰ میلی‌متر برش زده شده است. ورق‌های برش‌خورده جهت نصب و مهار، سوراخ‌کاری شده است. سپس نمونه‌ها میان دو صفحه فولادی به ابعاد ۲۰۰×۲۰۰ و با ضخامت ۲۰ میلی‌متر قرار داده شده و به وسیله پیچ‌هایی که در پیرامون صفحات گیره تعبیه شده‌اند، کاملاً مهار شده است. در وسط هر یک از صفحات گیره، سوراخی به قطر ۱۰۰ میلی‌متر ایجاد شده است. این سوراخ‌ها در صفحه جلویی گیره برای اعمال بار روی ورق و در صفحه پشتی برای امکان خروج و شکل‌گیری ورق است. دو فاصله استقرار برای ایجاد دو گستره بار متفاوت (یکنواخت و غیریکنواخت) در نظر گرفته شده است. به همین دلیل از دو لوله فولادی با قطر ۱۰۰ و به طول ۵۰ و ۳۰۰ میلی‌متر استفاده می‌شود. این لوله‌ها به صفحه جلویی گیره ورق متصل می‌شوند، در دهانه دیگر لوله خرج انفجاری کار گذاشته می‌شود. خرج روی یک فوم پلی‌استر که به قطر لوله و ضخامت ۱۵ میلی‌متر است چسبانده می‌شود و توسط آن در مرکز لوله نصب می‌شود. خرج انفجاری به کاررفته در این آزمایش‌ها از نوع C4 است. طرح شماتیک سامانه به کاررفته در انجام این مجموعه از آزمایش‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است. به منظور مقایسه نتایج بهینه‌سازی و ارزیابی مدل به دست آمده در بخش طراحی آزمایش از نتایج آزمایش‌های تجربی استفاده شده است. بنابراین شرایط نمونه‌های آزمایش‌شده در بخش بهینه‌سازی تعیین شده است.

تحلیل واریانس خروجی بارگذاری دینامیکی با توزیع یکنواخت

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 آزمایش‌ها برای تغییر شکل ورق‌های تک‌لایه دایره‌ای تحت بارگذاری دینامیکی با توزیع یکنواخت دارد. آنالیز واریانس برای عواملی که p -value آنها کمتر از ۰/۱ بود در جدول ۵ آمده است. این پارامترها نشان‌دهنده تأثیر بالای هر کدام از آنها بر خروجی است. در این بررسی به‌منظور معنی‌دار بودن مدل، سطح اطمینان ۹۵٪ در نظر گرفته شده است. بر این اساس، p -value برای مدل کمتر از ۰/۰۵ به‌دست آمده و این یعنی مدل در نظر گرفته شده معنی‌دار است. مقادیر R^2 و R^2_{adj} به‌ترتیب برابر ۰/۹۷۱۲ و ۰/۹۷۰۲ به‌دست آمده است. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن است که مدل ارایه‌شده برای این آزمایش‌ها مناسب بوده و مقادیر به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها با مقادیر پیش‌بینی‌شده برای خروجی، براساس مدل مطابقت دارد. مدل مرتبه دوم از تحلیل واریانس داده‌ها برای سطح پاسخ تغییر شکل ساختار دولایه به‌صورت رابطه ۲ به‌دست آمده است. این رابطه برحسب پارامترهای کدگذاری شده است.

$$Y_1 = 46.59 + 54.27X_1 - 12.98X_2 - 37.27X_3 + 8.93X_4 + 3.46X_1X_2 - 46.55X_1X_3 + 10.48 X_1X_4 - 3.49X_1^2 - 0.32X_2^2 + 8.12X_3^2 + 0.38X_4^2 \quad (2)$$

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 ورق‌های تک‌لایه دایره‌ای تحت بارگذاری دینامیکی با توزیع یکنواخت نسبت به آزمایش‌های تجربی دارد. همچنین تفاوت رنگ در نقاط داخل نمودار نشان‌دهنده تفاوت در مقدار تغییر شکل ورق‌ها که از آبی تا قرمز یعنی از کم تا زیاد، نشان داده شده است. در نمودارهای ۲ و ۳ به‌ترتیب، 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 سه ویژگی داشته باشند؛ اول اینکه باید داده‌های احتمالی بین ۲۵ تا ۷۵ باشند، دوم باید این داده‌ها بیشتر از ۹۹ و کمتر از ۱ نیز نباشند و سوم باید بیش از ۹۵٪ باقی‌مانده‌ها بین مقادیر ۲ و ۲- باشند. با توجه به این قانون کلی، نمودار احتمال نرمال باقی‌مانده‌ها، توزیع مناسبی از خطاها دارد و قابل قبول است. در نمودار ۲ نیز به‌عنوان 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.

پاسخ به‌منظور تجزیه و تحلیل نتایج، از ابزار قدرتمندی به نام تحلیل واریانس استفاده می‌کند. نتایج تحلیل واریانس به‌طور معمول به‌صورت 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 شده است.

با توجه به دو دسته داده موجود طبق نوع بارگذاری، فرآیند بهینه‌سازی به‌صورت جداگانه برای هر کدام از آنها انجام شده است. در بخش اول که مربوط به بارگذاری دینامیکی با توزیع یکنواخت است، چهار متغیر به‌عنوان پارامترهای مستقل و یک متغیر نیز به‌عنوان جواب در نظر گرفته شده است. تغییر شکل ورق دایره‌ای به‌عنوان پارامتر خروجی و ضخامت ورق دایره‌ای، شعاع ورق دایره‌ای، تنش تسلیم ورق دایره‌ای و ایمپالس بارگذاری به‌عنوان پارامترهای مستقل در این بخش هستند. در بخش دوم که مربوط به بارگذاری دینامیکی با توزیع محلی است، شش متغیر به‌عنوان پارامترهای مستقل و یک متغیر نیز به‌عنوان جواب در نظر گرفته شده است. تغییر شکل ورق دایره‌ای به‌عنوان پارامتر خروجی و ضخامت ورق دایره‌ای، شعاع ورق دایره‌ای، تنش تسلیم ورق دایره‌ای، ایمپالس بارگذاری، شعاع خرج مورد استفاده و فاصله خرج تا ورق دایره‌ای به‌عنوان پارامترهای مستقل در این بخش هستند. در جدول‌های ۳ و ۴ نماد این پارامترها و تغییرات آنها آمده است. رابطه بین خروجی و پارامترهای مستقل به‌صورت یک چندجمله‌ای با مرتبه دوم، مطابق رابطه ۱ 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 [40-43].

جدول ۳) پارامترهای روش سطح پاسخ و تغییرات آنها برای بارگذاری دینامیکی یکنواخت

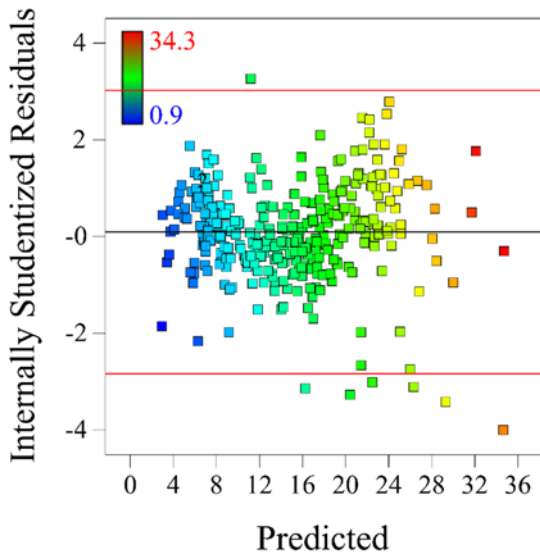
پارامتر	نماد	حداقل	حداکثر
ایمپالس (N.s)	X_1	۰/۹۱۲	۱۳۷/۵۶۳
ضخامت ورق دایره‌ای (m)	X_2	۰/۰۰۱۵۴۱	۰/۰۰۶۲۳۳۰
شعاع ورق دایره‌ای (m)	X_3	۰/۰۳	۰/۱۰۱۶
تنش تسلیم استاتیکی (Pa)	X_4	۲۲۳۰۰۰۰۰۰	۲۹۰۰۰۰۰۰۰۰
تغییر شکل ورق دایره‌ای (mm)	Y_1	-	-

جدول ۴) پارامترهای روش سطح پاسخ و تغییرات آنها برای بارگذاری دینامیکی محلی

پارامتر	نماد	حداقل	حداکثر
ایمپالس (N.s)	X_5	۰/۸	۳۵
ضخامت ورق دایره‌ای (m)	X_6	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۳
شعاع ورق دایره‌ای (m)	X_7	۰/۰۳۰	۰/۰۵۵
تنش تسلیم استاتیکی (Pa)	X_8	۱۹۰۰۰۰۰۰۰۰	۲۶۵۰۰۰۰۰۰۰۰
شعاع خرج (m)	X_9	۰/۰۰۹	۰/۰۲
فاصله خرج تا ورق (m)	X_{10}	۰	۰/۳
تغییر شکل ورق دایره‌ای (mm)	Y_2	-	-

جدول ۵) نتایج آزمون ANOVA مربوط به مدل سطح پاسخ جابه‌جایی ورق دایره‌ای برای بارگذاری دینامیکی یکنواخت (Y1)

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F-value	Probe > F
مدل (Y1)	۱۴۵۴۶/۸۳	۱۱	۱۳۲۲/۴۴	۹۹۹/۴۹	<۰/۰۰۰۱
X ₁	۵۹۰/۸۹	۱	۵۹۰/۸۹	۴۴۶/۵۹	<۰/۰۰۰۱
X ₂	۱۹/۴۷	۱	۱۹/۴۷	۱۴/۷۲	۰/۰۰۰۲
X ₃	۶۷/۰۲	۱	۶۷/۰۲	۵۰/۶۶	<۰/۰۰۰۱
X ₄	۱۳/۸۳	۱	۱۳/۸۳	۱۰/۴۵	۰/۰۰۱۳
X ₁ X ₂	۰/۶۱	۱	۰/۶۱	۰/۴۶	۰/۴۹۹۰
X ₁ X ₃	۵۷/۲۶	۱	۵۷/۲۶	۴۳/۲۸	<۰/۰۰۰۱
X ₁ X ₄	۱۶/۷۹	۱	۱۶/۷۹	۱۲/۶۹	۰/۰۰۰۴
X ₁ ²	۶/۱۰	۱	۶/۱۰	۴/۶۱	۰/۰۳۲۵
X ₂ ²	۰/۱۷	۱	۰/۱۷	۰/۱۳	۰/۹۰۸۹
X ₃ ²	۲۱/۷۳	۱	۲۱/۷۳	۱۶/۴۲	<۰/۰۰۰۱
X ₄ ²	۱/۳۲	۱	۱/۳۲	۱	۰/۳۱۹۱
باقی‌مانده	۴۳۱/۳۴	۳۲۶	۱/۳۲	-	-
خطای خالص	۲۱/۹۵	۳۸	۰/۵۸	-	-

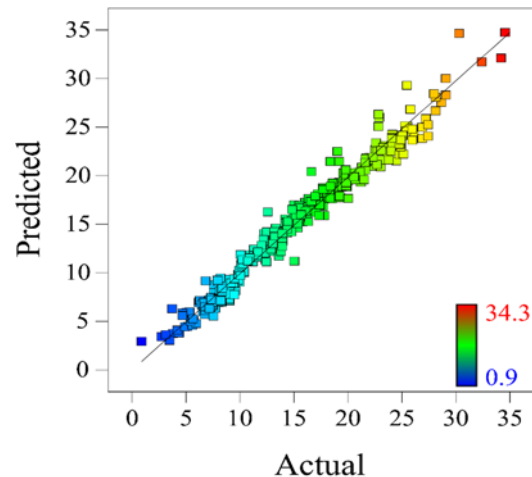


نمودار ۳) منحنی باقی‌مانده‌ها برحسب مقادیر پیش‌بینی‌شده برای بارگذاری دینامیکی یکنواخت

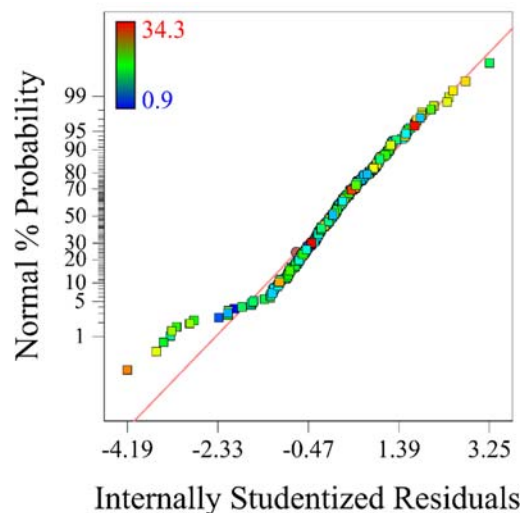
تحلیل آماری خروجی بارگذاری دینامیکی با توزیع یکنواخت

در این بخش به تأثیر متقابل پارامترهای مستقل به‌طور هم‌زمان روی خروجی پرداخته‌شده است. تأثیر پارامترهای مستقل بر روی تغییر شکل ورق‌های تک‌لایه دایره‌ای تحت بارگذاری دینامیکی با توزیع یکنواخت، در نمودار ۴ نشان داده شده است. تحلیل این نمودار بدان شکل است که شیب بیشتر خط مربوط به هر کدام از پارامترها نشان‌دهنده تأثیر بیشتر آن پارامتر روی خروجی است. بنابراین، شعاع ورق دایره‌ای بیشترین تأثیر و ایمپالس حاصل از انفجاز کمترین تأثیر را بر روی تغییر شکل ورق‌های دایره‌ای دارند. ضخامت ورق هم بیشتر از تنش تسلیم استاتیکی بر روی تغییر شکل ورق‌های دایره‌ای موثر است.

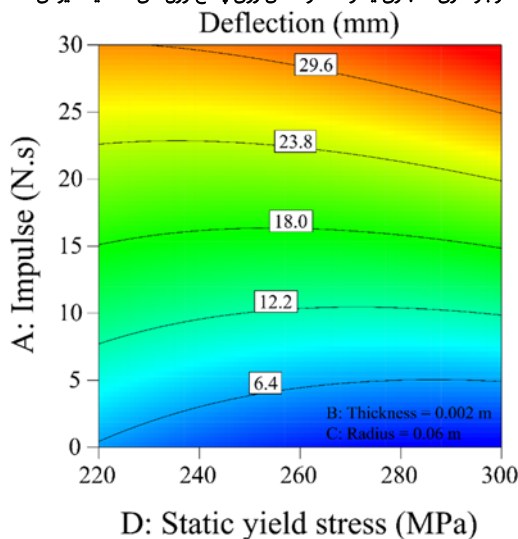
اثر متقابل دو پارامتر بر روی تغییر شکل ورق‌های تک‌لایه دایره‌ای تحت بارگذاری دینامیکی با توزیع محلی ضمن ثابت در نظرگرفتن سایر پارامترها به‌صورت کانتورهای رنگی، در نمودارهای ۵، ۶، ۷ و ۸ نشان داده شده است. در نمودار ۵، مقدار شعاع ورق‌های دایره‌ای و تنش تسلیم استاتیکی ثابت و ضخامت ورق دایره‌ای و ایمپالس تغییر می‌کنند. همان‌طور که در این نمودار مشخص است، با کاهش ضخامت ورق و افزایش ایمپالس مقدار تغییر شکل ورق‌های دایره‌ای افزایش می‌یابد. در نمودار ۶، مقدار ضخامت ورق دایره‌ای و تنش تسلیم استاتیکی ثابت و میزان ایمپالس و شعاع ورق دایره‌ای تغییر می‌کنند. مشاهده دقیق نمودار ارایه‌شده نشان می‌دهد که با افزایش ایمپالس و کاهش مقدار شعاع ورق، مقدار تغییر شکل ورق‌های دایره‌ای افزایش می‌یابد. در نمودار ۷، مقدار ضخامت و شعاع ورق دایره‌ای ثابت و میزان ایمپالس و تنش تسلیم استاتیکی تغییر می‌کنند. از نمودار ارایه‌شده به‌وضوح مشخص است که با افزایش ایمپالس و افزایش تنش تسلیم استاتیکی، مقدار تغییر شکل ورق‌های دایره‌ای افزایش می‌یابد. در نمودار ۸، مقدار ایمپالس و ضخامت ورق دایره‌ای ثابت و مقدار شعاع ورق دایره‌ای و تنش تسلیم استاتیکی



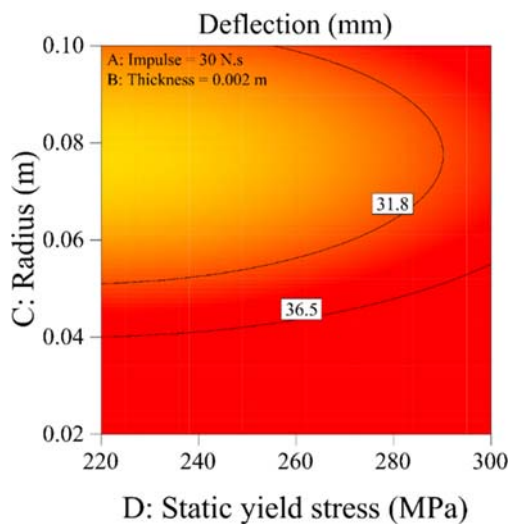
نمودار ۱) مقایسه بین مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل رگرسیونی و مقادیر واقعی برای بارگذاری دینامیکی یکنواخت



نمودار ۲) منحنی احتمال نرمال باقی‌مانده‌ها برای بارگذاری دینامیکی یکنواخت



نمودار ۷) تغییر شکل ساختار ورق دایره‌ای تحت بارگذاری یکنواخت به صورت کانتورهای رنگی با تغییرات ایمپالس و تنش تسلیم استاتیکی

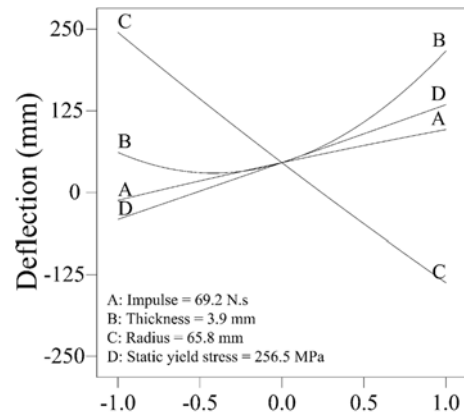


نمودار ۸) تغییر شکل ساختار ورق دایره‌ای تحت بارگذاری یکنواخت به صورت کانتورهای رنگی با تغییرات شعاع ورق و تنش تسلیم استاتیکی

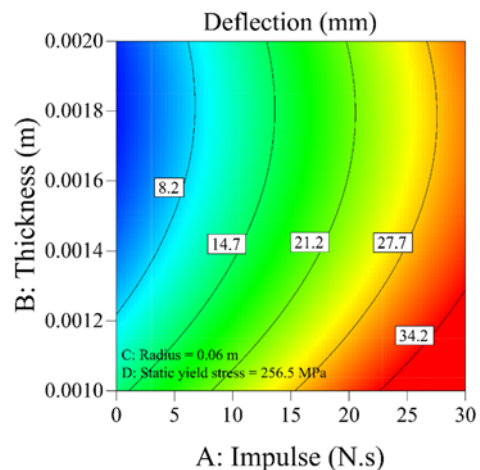
تحلیل واریانس خروجی بارگذاری دینامیکی با توزیع محلی

پس از بررسی مدل‌های مختلف ارائه شده 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 اصلاح شده، تطبیق بهتری با نتایج آزمایش‌ها برای تغییر شکل ورق‌های تک‌لایه دایره‌ای تحت بارگذاری دینامیکی با توزیع محلی دارد. آنالیز واریانس برای عواملی که p -value آنها کمتر از ۱٪ بود در جدول ۶ 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 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. R^2_{adj} به ترتیب برابر ۰/۹۵۴۸ و ۰/۹۵۱۳ به دست آمده است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که مدل ارائه شده برای این

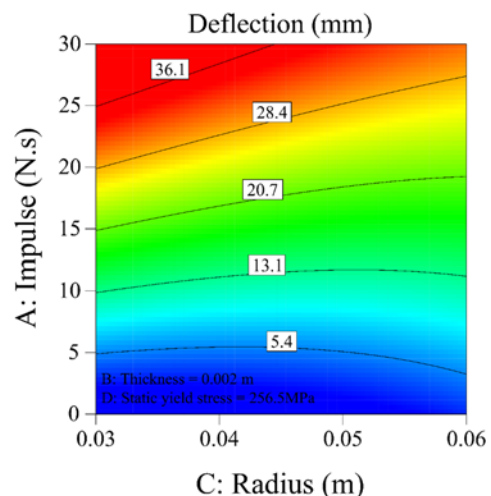
تغییر می‌کنند. از نمودار ارائه شده به وضوح مشخص است که با افزایش شعاع ورق دایره‌ای و کاهش تنش تسلیم استاتیکی، تغییر شکل ورق‌های دایره‌ای کاهش می‌یابد.



نمودار ۴) تأثیر پارامترهای مستقل بر روی تغییر شکل ورق دایره‌ای تحت بارگذاری دینامیکی یکنواخت



نمودار ۵) تغییر شکل ساختار ورق دایره‌ای تحت بارگذاری یکنواخت به صورت کانتورهای رنگی با تغییرات ضخامت ورق و ایمپالس

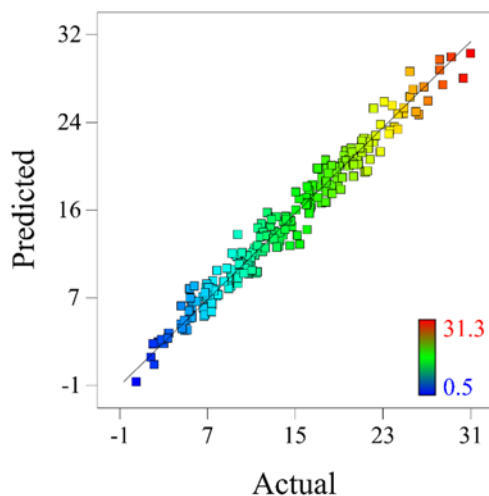


نمودار ۶) تغییر شکل ساختار ورق دایره‌ای تحت بارگذاری یکنواخت به صورت کانتورهای رنگی با تغییرات ایمپالس و شعاع ورق

استقرار خرج ثابت و میزان ایمپالس و تنش تسلیم استاتیکی تغییر می‌کنند. از نمودار آرایه‌شده به‌وضوح مشخص است که با افزایش ایمپالس و افزایش تنش تسلیم استاتیکی، مقدار تغییر شکل ورق‌های دایره‌ای افزایش می‌یابد. در نمودار ۱۶، مقدار ایمپالس، ضخامت ورق‌های دایره‌ای، شعاع خرج و فاصله تا محل استقرار خرج ثابت و مقدار شعاع ورق دایره‌ای و تنش تسلیم استاتیکی تغییر می‌کنند. از نمودار آرایه‌شده به‌وضوح مشخص است که با افزایش شعاع ورق دایره‌ای و کاهش تنش تسلیم استاتیکی، تغییر شکل ورق‌های دایره‌ای کاهش می‌یابد.

جدول ۶) نتایج آزمون ANOVA مربوط به مدل سطح پاسخ جابه‌جایی ورق دایره‌ای برای بارگذاری دینامیکی محلی (Y₂)

منبع	مجموع درجه آزادی	میانگین مربعات	F-value	Probe > F
مدل (Y ₂)	۹۷۵۸/۰۹	۶۰۹/۸۸	۲۷۳/۱۱	<۰/۰۰۰۱
X ₅	۳۴۹/۶۷	۳۴۹/۶۷	۱۵۶/۵۸	<۰/۰۰۰۱
X ₆	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	۰/۰۲۵	۰/۸۷۵۸
X ₇	۸/۸۱	۸/۸۱	۳/۹۴	۰/۰۴۸۴
X ₈	۵۵/۰۸	۵۵/۰۸	۲۴/۶۷	<۰/۰۰۰۱
X ₉	۵۶/۴۳	۵۶/۴۳	۲۵/۲۷	<۰/۰۰۰۱
X ₁₀	۱۱۱۶/۹۲	۱۱۱۶/۹۲	۵۰۰/۱۶	<۰/۰۰۰۱
X ₅ X ₆	۲۶/۳۲	۲۶/۳۲	۱۱/۷۹	۰/۰۰۰۷
X ₅ X ₇	۷۰/۴۲	۷۰/۴۲	۳۱/۵۳	<۰/۰۰۰۱
X ₅ X ₈	۷۸/۲۱	۷۸/۲۱	۳۵/۰۲	<۰/۰۰۰۱
X ₅ X ₁₀	۶۰/۴۱	۶۰/۴۱	۲۷/۰۵	<۰/۰۰۰۱
X ₆ X ₇	۱/۵۳	۱/۵۳	۰/۶۸	۰/۴۰۹۳
X ₆ X ₈	۳۹۶/۷۷	۳۹۶/۷۷	۱۷۷/۶۸	<۰/۰۰۰۱
X ₇ X ₈	۲۳/۱۲	۲۳/۱۲	۱۰/۳۵	۰/۰۰۱۵
X ₈ X ₉	۲۳/۷۲	۲۳/۷۲	۱۰/۶۲	۰/۰۰۱۳
X ₅ ²	۱۸/۸۵	۱۸/۸۵	۸/۴۴	۰/۰۰۴۱
X ₁₀ ²	۲۶۱/۵۳	۲۶۱/۵۳	۱۱۷/۱۲	<۰/۰۰۰۱
باقی‌مانده	۴۶۲/۲۶	۲/۲۳	-	-
خطای خالص	۱/۹۸	۰/۶۶	-	-



نمودار ۹) مقایسه بین مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل رگرسیونی و مقادیر واقعی برای بارگذاری دینامیکی محلی

آزمایش‌ها مناسب بوده و مقادیر به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها با مقادیر پیش‌بینی‌شده برای خروجی، براساس مدل مطابقت دارد. مدل مرتبه دوم از تحلیل واریانس داده‌ها برای سطح پاسخ تغییر شکل ساختار دولایه به‌صورت رابطه ۳ به‌دست آمده است. این رابطه برحسب پارامترهای کدگذاری شده است.

$$Y_2 = 33.93 + 31.28X_5 + 3.16X_6 - 34.28X_7 + 21.56X_8 - 1.41X_9 - 7.05X_{10} - 2.94X_5X_6 - 19.37X_5X_7 + 10.48X_1X_4 - 6.48X_5X_8 - 4.42X_5X_{10} - 28.10X_6X_7 + 12.52X_6X_8 - 22.56X_7X_8 - 1.20X_8X_9 - 2.60X_5^2 + 5.22X_{10}^2 \quad (3)$$

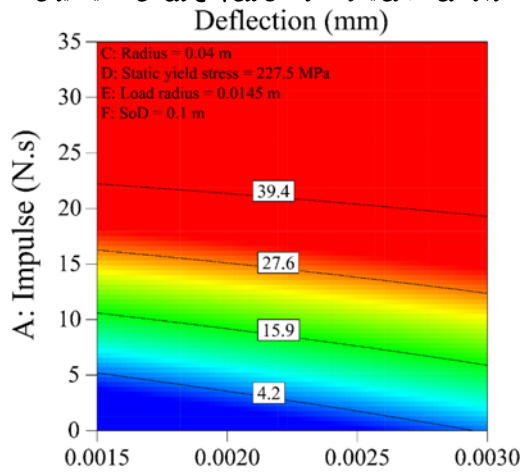
مقایسه بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده از روش سطح پاسخ در نمودار ۹ نشان داده شده است. نزدیک‌بودن داده‌ها نزدیک خط مورب بدان معنا است که مدل پیش‌بینی خوبی از تغییر شکل ورق‌های تک‌لایه دایره‌ای تحت بارگذاری دینامیکی با توزیع محلی نسبت به آزمایش‌های تجربی دارد.

در نمودارهای ۱۰ و ۱۱ به‌ترتیب، نمودارهای احتمال نرمال باقی‌مانده‌ها و باقی‌مانده‌ها برحسب مقادیر پیش‌بینی‌شده بعد از حذف عوامل غیرمؤثر در مدل رگرسیونی نشان داده شده است.

تحلیل آماری خروجی بارگذاری دینامیکی با توزیع محلی

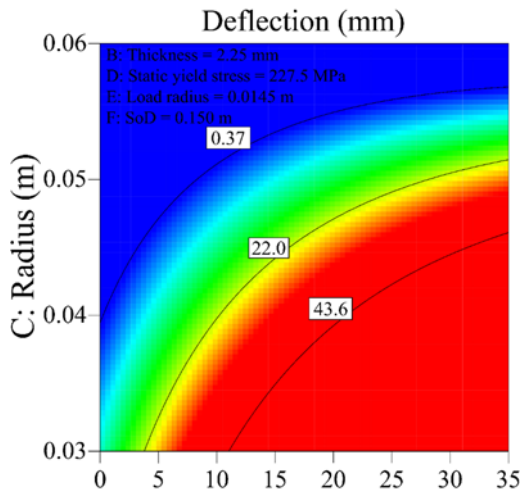
در این بخش به تأثیر متقابل پارامترهای مستقل به‌طور هم‌زمان روی خروجی پرداخته شده است. تأثیر پارامترهای مستقل بر روی تغییر شکل ورق‌های تک‌لایه دایره‌ای تحت بارگذاری دینامیکی با توزیع محلی، در نمودار ۱۲ نشان داده شده است. تحلیل این نمودار بدان شکل است که شیب بیشتر خط مربوط به هر کدام از پارامترها نشان‌دهنده تأثیر بیشتر آن پارامتر روی خروجی است. بنابراین، ایمپالس حاصل از انفجاز بیشترین تأثیر و شعاع خرج کمترین تأثیر را بر روی تغییر شکل ورق‌های دایره‌ای تحت بارگذاری دینامیکی با توزیع محلی دارند. سایر پارامترها به‌ترتیب تأثیرگذاری، شعاع ورق دایره‌ای، تنش تسلیم استاتیکی، فاصله تا محل استقرار خرج و ضخامت ورق هستند.

اثر متقابل دو پارامتر بر روی تغییر شکل ورق‌های تک‌لایه دایره‌ای تحت بارگذاری دینامیکی با توزیع محلی ضمن ثابت در نظرگرفتن سایر پارامترها به‌صورت کانتورهای رنگی، در نمودارهای ۱۳، ۱۴، ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است. در نمودار ۱۳، مقدار شعاع ورق‌های دایره‌ای، تنش تسلیم استاتیکی، شعاع خرج و فاصله تا محل استقرار خرج ثابت و ضخامت ورق دایره‌ای و ایمپالس تغییر می‌کنند. همان‌طور که در این نمودار مشخص است، با کاهش ضخامت ورق و افزایش ایمپالس مقدار تغییر شکل ورق‌های دایره‌ای، تنش تسلیم استاتیکی، شعاع خرج و فاصله تا محل استقرار خرج ثابت و میزان ایمپالس و شعاع ورق دایره‌ای تغییر می‌کنند. مشاهده نمودار آرایه‌شده نشان می‌دهد که با افزایش ایمپالس و کاهش مقدار شعاع ورق، مقدار تغییر شکل ورق‌های دایره‌ای، ضخامت ورق‌های دایره‌ای، شعاع خرج و فاصله تا محل



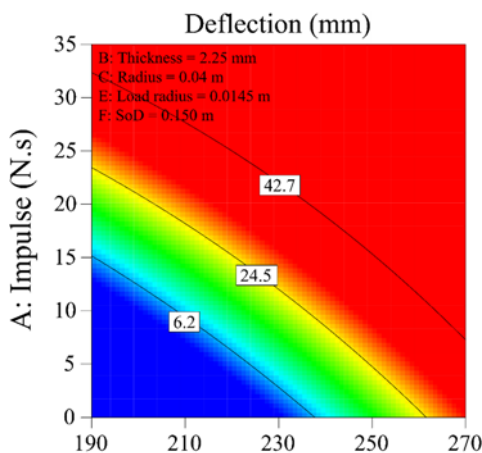
B: Thickness (m)

نمودار ۱۳ تغییر شکل ساختار ورق دایره‌ای تحت بارگذاری محلی به صورت کانتورهای رنگی با تغییرات ضخامت ورق و ایمپالس



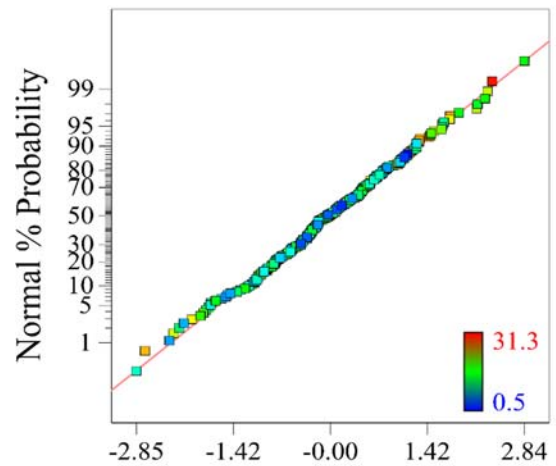
A: Impulse (N.s)

نمودار ۱۴ تغییر شکل ساختار ورق دایره‌ای تحت بارگذاری محلی به صورت کانتورهای رنگی با تغییرات شعاع ورق و ایمپالس



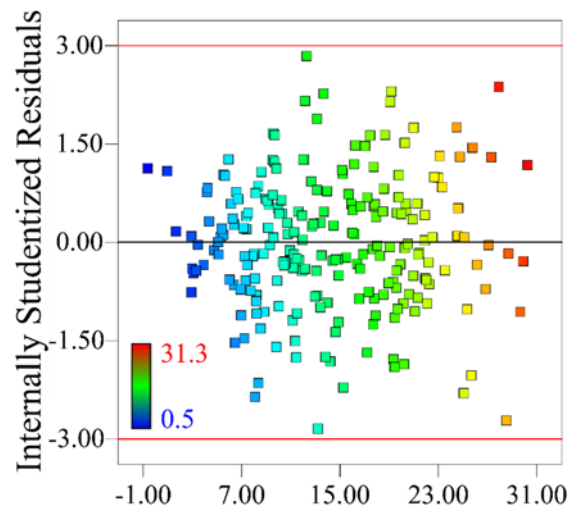
D: Static yield stress (MPa)

نمودار ۱۵ تغییر شکل ساختار ورق دایره‌ای تحت بارگذاری محلی به صورت کانتورهای رنگی با تغییرات ایمپالس و تنش تسلیم استاتیکی



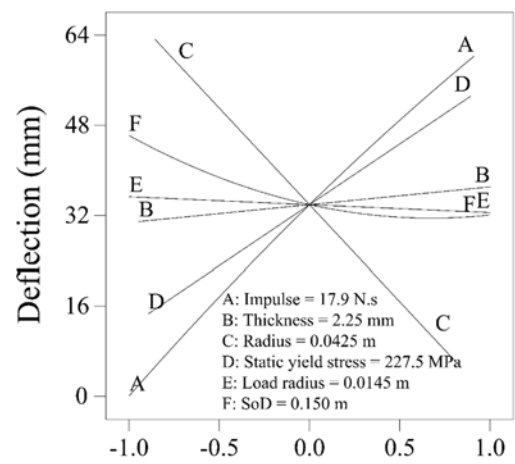
Internally Studentized Residuals

نمودار ۱۰ منحنی احتمال نرمال باقی‌مانده‌ها برای بارگذاری دینامیکی محلی



Predicted

نمودار ۱۱ منحنی باقی‌مانده‌ها برحسب مقادیر پیش‌بینی‌شده برای بارگذاری دینامیکی محلی



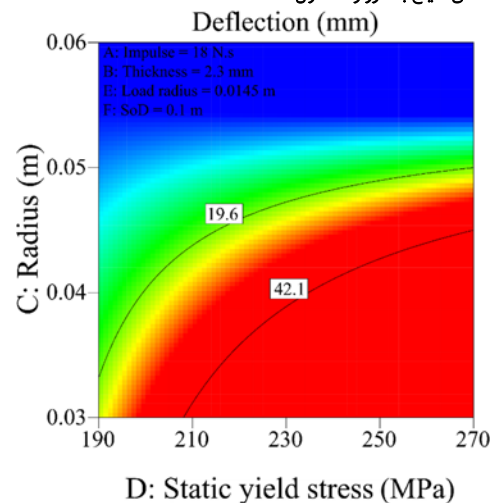
Deviation from Reference Point (Coded Units)

نمودار ۱۲ تأثیر پارامترهای مستقل بر روی تغییر شکل ورق دایره‌ای تحت بارگذاری دینامیکی محلی

یک تابع هدف است. با توجه به پارامترهای مستقل و خروجی، شرایط بهینه‌سازی عددی در جدول ۷ برای بارگذاری دینامیکی با توزیع یکنواخت و در جدول ۸ برای بارگذاری دینامیکی با توزیع محلی نشان داده شده است. در این جداول، هدف بهینه‌سازی هر فاکتور، بازه تغییرات و درجه اهمیت آن بیان شده است.

با در نظرگرفتن مقادیر جداول ۷ و ۸، شرایط بهینه مورد نظر به ترتیب مطلوبیت در جداول ۹ و ۱۰ آمده است. به منظور داشتن کمترین مقدار تغییر شکل در ساختار تک‌لایه ورق دایره‌ای، برای ضخامت ورق دایره‌ای کمترین مقدار خود و ایمپالس نیز بیشترین مقدار خود در نظر گرفته شده است. سایر پارامترها تغییراتی در بازه انتخابی دارند. نزدیک‌بودن مقدار مطلوبیت به عدد ۱ نشان‌دهنده شرایط بهینه، خیلی خوب است.

به‌منظور مقایسه نتایج بهینه‌سازی حاصل از مدل‌سازی، پنج آزمایش انجام شد. در جدول ۱۱، نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی و نتایج حاصل از بهینه‌سازی مدل مقایسه شده است. شکل ۸ هم نمونه‌ای از ورق آزمایش‌شده، نشان داده شده است.



D: Static yield stress (MPa)
نمودار ۱۶ تغییر شکل ساختار ورق دایره‌ای تحت بارگذاری محلی به‌صورت کانتورهای رنگی با تغییرات شعاع ورق و تنش تسلیم استاتیکی

تعیین شرایط بهینه

برای تعیین مطلوبیت تأثیر هر کدام از پارامترها بر خروجی نیاز به

جدول ۷) مشخصات پارامترهای مستقل و خروجی در بارگذاری دینامیکی با توزیع یکنواخت برای تعیین شرایط بهینه

پارامتر	هدف	کمترین مقدار	بیشترین مقدار	درجه اهمیت
ایمپالس (N.s)	بیشترین مقدار	۰/۹۱۲	۱۳۷/۵۶۳	۳
ضخامت ورق دایره‌ای (m)	کمترین مقدار	۰/۰۰۱۵۴۱	۰/۰۰۶۲۲۳	۳
شعاع ورق دایره‌ای (m)	در بازه مقادیر	۰/۰۳	۰/۱۰۱۶	۳
تنش تسلیم استاتیکی (Pa)	در بازه مقادیر	۲۲۳۰۰۰۰۰۰	۲۹۰۰۰۰۰۰۰	۳
تغییر شکل ورق دایره‌ای (mm)	کمترین مقدار	۰/۸۶۳۶	۳۴/۳۲	۵

جدول ۸) مشخصات پارامترهای مستقل و خروجی در بارگذاری دینامیکی با توزیع محلی برای تعیین شرایط بهینه

پارامتر	هدف	کمترین مقدار	بیشترین مقدار	درجه اهمیت
ایمپالس (N.s)	بیشترین مقدار	۰/۸	۳۵	۳
ضخامت ورق دایره‌ای (m)	کمترین مقدار	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۳	۳
شعاع ورق دایره‌ای (m)	در بازه مقادیر	۰/۰۳۰	۰/۰۵۵	۳
تنش تسلیم استاتیکی (Pa)	در بازه مقادیر	۱۹۰۰۰۰۰۰۰	۲۶۵۰۰۰۰۰۰	۳
شعاع خرج (m)	در بازه مقادیر	۰/۰۰۹	۰/۰۲	۳
فاصله خرج تا ورق (m)	در بازه مقادیر	۰	۰/۳	۳
تغییر شکل ورق دایره‌ای (mm)	کمترین مقدار	۰/۵	۳۱/۳۴۵۲	۵

جدول ۹) شرایط بهینه برای مشخصات پارامترهای جدول ۷

پارامتر	شماره				
	۱	۲	۳	۴	۵
ایمپالس (N.s)	۳۵	۳۴/۹۹۸	۳۵	۳۵	۲۹/۳۹۳
ضخامت ورق دایره‌ای (m)	۰/۰۰۳۸۴۸	۰/۰۰۳۷۹۳	۰/۰۰۳۹۵۷	۰/۰۰۳۸۲۲	۰/۰۰۴۲۸۷
شعاع ورق دایره‌ای (m)	۰/۰۹۶۴۱	۰/۰۹۶۳۳	۰/۰۹۶۹۴	۰/۰۹۵۴۲	۰/۰۸۴۶۴
تنش تسلیم استاتیکی (Pa)	۲۲۳۰۰۰۰۷۲	۲۲۳۰۰۰۱۶۵	۲۲۳۰۰۰۳۲۲	۲۲۳۶۸۳۷۷۹	۲۲۳۰۰۰۶۴۶
تغییر شکل ورق دایره‌ای (mm)	۹/۴۴۷	۹/۷۹۲۶	۸/۷۶۲۱	۹/۶۷۶۵	۵/۶۲۹۸
مطلوبیت	۰/۸۸۹	۰/۸۸۷	۰/۸۷۴	۰/۸۶۹	۰/۸۵۰

پارامتر	شماره				
	۱	۲	۳	۴	۵
ایمپالس (N.s)	۳۴/۹۹۳	۳۵	۳۵	۳۵	۳۵
ضخامت ورق دایره‌ای (m)	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۱۵
شعاع ورق دایره‌ای (m)	۰/۰۵۵۰	۰/۰۵۵۰	۰/۰۵۵۰	۰/۰۵۵۰	۰/۰۵۵۰
تنش تسلیم استاتیکی (Pa)	۲۶۴۹۷۴۷۴۲	۲۶۴۸۷۲۷۸۸	۲۶۴۹۹۸۶۵۳	۲۶۴۹۹۹۹۳۴	۲۵۸۸۹۷۴۶۴
شعاع خرج (m)	۰/۰۱۹۳	۰/۰۱۶۴	۰/۰۱۵۰	۰/۰۱۶۹	۰/۰۲۰۰
فاصله خرج تا ورق (m)	۰/۲۶۰	۰/۲۶۹	۰/۲۹۳	۰/۲۲۰	۰/۲۶۶
تغییر شکل ورق دایره‌ای (mm)	۸/۵۱۶	۹/۸۱۳	۱۰/۰۶۹	۱۱/۱۵۸	۱۱/۷۹۷
مطلوبیت	۰/۹۵۷	۰/۹۵۰	۰/۹۴۸	۰/۹۴۱	۰/۹۳۰

جدول ۱۱) مقایسه نتایج تجربی و بهینه‌سازی

پارامتر	شماره				
	۱	۲	۳	۴	۵
ماده	فولاد	فولاد	فولاد	فولاد	فولاد
ضخامت ورق (mm)	۱/۶	۱/۶	۱/۶	۱/۶	۱/۶
شعاع ورق (mm)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
قطر خرج (mm)	۳۳	۳۳	۳۳	۳۳	۳۳
فاصله استقرار (mm)	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰
تنش تسلیم استاتیکی (MPa)	۳۱۸	۳۱۸	۳۱۸	۳۱۸	۳۱۸
ایمپالس (N.s)	۱۳/۰۲	۱۳/۶۹	۱۷/۰۸	۲۰/۲۸	۲۵/۰۷
خیز مرکز ورق (mm)	۱۱/۲۸	۱۱/۳۶	۱۳/۷۲	۱۶/۵۰	۲۰
	۱۲/۳۴	۱۲/۴۴	۱۴/۰۲	۱۷/۱۴	۲۱/۰۲
	تجربی				
	مدل				



شکل ۸) نمونه ورق‌های تغییر شکل‌یافته

نتیجه‌گیری

تغییر شکل ساختارهای تک‌لایه فلز دایره‌ای تحت بارگذاری دفعی حاصل از انفجار، مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از ۵۶۲ داده تجربی موجود در ادبیات تحقیق مربوط به چهارده سری آزمایش در طول چهل سال گذشته، به بهینه‌سازی پارامترهای موثر در تغییر شکل پلاستیک ورق‌های دایره‌ای تحت بارگذاری یکنواخت و محلی پرداخته شد. در بخش تجربی، ضمن ایجاد شرایط مورد نیاز از جمله ساخت نمونه و آماده‌سازی سیستم پاندول، پنج آزمایش نیز انجام شد. در بخش مدل‌سازی، برای دو نوع بارگذاری یکنواخت و محلی از روش سطح پاسخ استفاده شد. نتایج مورد استفاده مربوط به ورق‌هایی بوده است که فقط تغییر شکل داشته و پارگی در آنها رخ نداده بود. بر این اساس در صورت پاره‌شدن ورق آن داده در تحلیل وارد نشده است. 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_{adj} و R^2

به‌دست 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 دارد. ضخامت ورق دایره‌ای، شعاع ورق دایره‌ای، ایمپالس انفجار، تنش تسلیم استاتیکی، شعاع خرج و فاصله تا محل استقرار خرج به‌عنوان پارامترهای مستقل تأثیرگذار بر روی خروجی یعنی تغییر شکل ورق دایره‌ای، در نظر گرفته شدند. برای داشتن شرایط بهینه یعنی کمترین مقدار تغییر شکل ورق دایره‌ای، ضخامت ورق دایره‌ای کمترین مقدار خود و ایمپالس نیز بیشترین مقدار خود را داشته باشند. ضمناً تغییرات سایر پارامترها در بازه انتخابی در نظر گرفته شدند.

نتایج مربوط به بارگذاری یکنواخت را می‌توان به‌صورت زیر طبقه‌بندی کرد:

۱- افزایش ایمپالس در ضخامت‌های مختلف ورق تأثیر یکسانی روی تغییر شکل ورق دارد.

investigation and empirical modelling. *Thin-Walled Structures*. 2017;118:1-11.

5- 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.

6- 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.

7- Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Namdari-Khalilabad M, Alitavoli M, Mohammadi K. Gas mixture detonation method, a novel processing technique for metal powder compaction: Experimental investigation and empirical modeling. *Powder Technology*. 2017;315:171-181.

8- 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.

9- 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.

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- 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*. 2020;234(2):231-245.

12- Rezasefat M, Mirzababaie Mostofi T, Babaei H, Ziya-Shamami M, Alitavoli M. Dynamic plastic response of 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*. 2019;233(7):1449-1471.

13- Rezasefat M, Mirzababaie Mostofi T, Ozbakkaloglu T. Repeated localized impulsive loading on monolithic and multi-layered metallic plates. *Thin-Walled Structures*. 2019;144:106332.

14- Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Sadraei SH. Effect of gas detonation on response of circular plate-experimental and theoretical. *Structural Engineering and Mechanics*. 2015;56(4):535-548.

15- Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Alitavoli M. Experimental investigation and analytical modelling for forming of circular-clamped plates by using gases mixture detonation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2020;234(5):1102-1111.

16- Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Alitavoli M, Darvizeh A. Empirical modelling for prediction of large deformation of clamped circular plates in gas detonation forming process. *Experimental Techniques*. 2016;40(6):1485-1494.

17- Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Alitavoli M. Study on the response of circular thin plate under low velocity

۲- افزایش شعاع ورق، تأثیر ایمپالس روی بیشترین تغییر شکل ورق را کاهش می‌دهد.

۳- با افزایش شعاع ورق دایره‌ای تأثیر تنش تسلیم استاتیکی روی تغییر شکل ورق دایره‌ای تقریباً ثابت باقی می‌ماند.

۴- افزایش تنش تسلیم استاتیکی، تأثیر ایمپالس روی بیشترین تغییر شکل ورق را افزایش می‌دهد.

نتایج مربوط به بارگذاری محلی را نیز می‌توان به صورت زیر طبقه‌بندی کرد:

۱- افزایش ضخامت ورق، تأثیر ایمپالس بر روی بیشترین تغییر شکل ورق را کاهش می‌دهد.

۲- افزایش شعاع ورق، تأثیر ایمپالس بر روی بیشترین تغییر شکل ورق را کاهش می‌دهد.

۳- افزایش تنش تسلیم استاتیکی تأثیر ایمپالس بر روی بیشترین تغییر شکل ورق را کاهش می‌دهد.

۴- افزایش تنش تسلیم استاتیکی تأثیر شعاع ورق بر روی کمترین تغییر شکل ورق را کاهش می‌دهد.

تشکر و قدردانی: نویسندگان مراتب سپاس و قدردانی خود را از دانشگاه گیلان و دانشگاه ایوان‌کی به منظور فراهم‌آوردن شرایط مناسب، اعلام می‌دارند.

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

تعارض منافع: هیچ گونه تعارض منافی با سازمان‌ها و اشخاص وجود ندارد.

سهم نویسندگان: مصطفی سیاح بادخور (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی (۴۰٪)؛ توحید میرزابابایی مستوفی (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی (۴۰٪)؛ هاشم بابایی (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۲۰٪).

منابع مالی: کلیه هزینه‌ها توسط نویسندگان تامین شده است.

منابع

1- 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.

2- 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.

3- Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Armoudli E. On dimensionless numbers for the dynamic plastic response 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. The influence of gas mixture detonation loads on large plastic deformation of thin quadrangular plates: Experimental

- impulsive loading. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*. 2012;7(4):309-322.
- 35- Cloete TJ, Nurick GN. On the influence of radial displacements and bending strains on the large deflections of impulsively loaded circular plates. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2014;82:140-148.
- 36- Yuen SCK, Nurick GN, Langdon G, Iyer Y. Deformation of thin plates subjected to impulsive load: Part III—an update 25 years on. *International Journal of Impact Engineering*. 2017;107:108-117.
- 37- 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]
- 38- 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]
- 39- 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*. 2018;26(19):1644-1660.
- 40- Sayah Badkhor M, Hasanzadeh M, Mirzababaie Mostofi T. Numerical investigation and optimization on performance of sandwich panel structures with honeycomb core subjected to blast loading by response surface methodology. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*. 2019;52(10):121-130. [Persian]
- 41- 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. [Persian]
- 42- Mirzababaie Mostofi T, Sayah Badkhor M. Experimental study and optimization of dynamic response of polymer-coated metal plates subjected to impact loading using response surface methodology. *Modares Mechanical Engineering*. 2020;20(4):1011-1023. [Persian]
- 43- Sayah Badkhor M, Mirzababaie Mostofi T, Babaei H. Dynamic response of metal powder subjected to low-velocity impact loading: Experimental investigation and optimization using response surface methodology. *Modares Mechanical Engineering*. 2020;20(4):863-876. [Persian]
- 44- Bodner SR, Symonds PS. Experiments on viscoplastic response of circular plates to impulsive loading. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1979;27(2):91-113.
- 45- Teeling-Smith RG, Nurick GN. The deformation and tearing of thin circular plates subjected to impulsive loads. *International Journal of Impact Engineering*. 1991;11(1):77-91.
- 46- Nurick GN, Teeling-Smith RG. Predicting the onset of necking and hence rupture of thin plates loaded impulsively—an experimental view. *Structures Under Shock and Impact II: Proceedings of the Second International Conference, 16-18 June 1992, Portsmouth, United Kingdom*. London: Thomas Telford Publishing; 1992.
- 47- Thomas B. The effect of boundary conditions on thin impact. *Geomechanics and Engineering*. 2015;9(2):207-218.
- 18- 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]
- 19- Hudson G. A theory of the dynamic plastic deformation of a thin diaphragm. *Journal of Applied Physics*. 1951;22(1):1-11.
- 20- Duffey TA. Large deflection dynamic response of clamped circular plates subjected to explosive loading. Albuquerque: Sandia Corp; 1967.
- 21- Jones N. A theoretical study of the dynamic plastic behavior of beams and plates with finite-deflections. *International Journal of Solids and Structures*. 1971;7(8):1007-1029.
- 22- Wierzbicki T, Florence AL. A theoretical and experimental investigation of impulsively loaded clamped circular viscoplastic plates. *International Journal of Solids and Structures*. 1970;6(5):553-568.
- 23- Lippmann H. Kinetics of the axisymmetric rigid-plastic membrane subject to initial impact. *International Journal of Mechanical Sciences*. 1974;16(5):297-303.
- 24- Symonds PS, Wierzbicki T. Membrane mode solutions for impulsively loaded circular plates. *Journal of Applied Mechanics*. 1979;46(1):58-64.
- 25- Hu YQ. Application of response number for dynamic plastic response of plates subjected to impulsive loading. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2000;77(12):711-714.
- 26- Perrone N, Bhadra P. Simplified large deflection mode solutions for impulsively loaded, viscoplastic, circular membranes. *Journal of Applied Mechanics*. 1984;51(3):505-509.
- 27- Nurick GN, Pearce HT, Martin JB. Predictions of transverse deflections and in-plane strains in impulsively loaded thin plates. *International Journal of Mechanical Sciences*. 1987;29(6):435-442.
- 28- Nurick GN, Martin JB. Deformation of thin plates subjected to impulsive loading—a review part II: Experimental studies. *International Journal of Impact Engineering*. 1989;8(2):171-186.
- 29- Nurick GN, Martin JB. Deformation of thin plates subjected to impulsive loading—a review: Part I: Theoretical considerations. *International Journal of Impact Engineering*. 1989;8(2):159-170.
- 30- Jacob N, Nurick GN, Langdon GS. The effect of stand-off distance on the failure of fully clamped circular mild steel plates subjected to blast loads. *Engineering Structures*. 2007;29(10):2723-2736.
- 31- Gharababaei H, Nariman-Zadeh N, Darvizeh A. A simple modelling method for deflection of circular plates under impulsive loading using dimensionless analysis and singular value decomposition. *Journal of Mechanics*. 2010;26(3):355-361.
- 32- Gharababaei H, Darvizeh A, Darvizeh M. Analytical and experimental studies for deformation of circular plates subjected to blast loading. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2010;24(9):1855-1864.
- 33- Babaei H, Darvizeh A. Investigation into the response of fully clamped circular steel, copper, and aluminum plates subjected to shock loading. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. 2011;39(4):507-526.
- 34- Babaei H, Darvizeh A. Analytical study of plastic deformation of clamped circular plates subjected to

Tait D. Scaling aspects of quadrangular plates subjected to localised blast loads-experiments and predictions. *International Journal of Impact Engineering*. 2004;30(8-9):1179-1208.

51- Yuen SCK, Nurick GN. Deformation and tearing of uniformly blast-loaded quadrangular stiffened plates. *Proceedings of the International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation*, 2-4 April 2001, Cape Town, South Africa. Amsterdam: Elsevier Science; 2001.

plates subjected to impulsive loading [dissertation]. Cape Town: University of Cape Town; 1995.

48- Nurick GN, Gelman ME, Marshall NS. Tearing of blast loaded plates with clamped boundary conditions. *International Journal of Impact Engineering*. 1996;18(7-8):803-827.

49- Nurick GN, Lumpp DM. Deflection and tearing of clamped stiffened circular plates subjected to uniform impulsive blast loads. *WIT Press*. 1996;25:393-404.

50- Jacob N, Yuen SCK, Nurick GN, Bonorchis D, Desai SA,