



## The Effect of Extreme Dynamic Loading on Plastic Deformation of Quadrangular Plates: Experimental Investigation, Regression Analysis, and Multi-Objective Optimization

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Mirzababaie Mostofi T.<sup>1</sup> PhD,  
Sayah Badkhor M.<sup>1</sup> PhD,  
Babaei H.<sup>\*2</sup> PhD

#### How to cite this article

Mirzababaie Mostofi T, Sayah Badkhor M, Babaei H. The Effect of Extreme Dynamic Loading on Plastic Deformation of Quadrangular Plates: Experimental Investigation, Regression Analysis, and Multi-Objective Optimization. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(10):2495-2507.

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Department, Electrical, Computer and Mechanical Engineering Faculty, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran

<sup>2</sup>Mechanical Engineering Department, Mechanical Engineering Faculty, 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) 33690271  
ghbabaei@guilan.ac.ir

#### Article History

Received: May 30, 2020  
Accepted: August 10, 2020  
ePublished: October 21, 2020

### ABSTRACT

In present study, the experimental investigation and regression analysis of the large plastic deformation of square and rectangular plates subjected to extreme dynamic loading with uniform and localized distribution were discussed. In the experimental section, 5 experiments were conducted on mild steel plates with different thicknesses. To perform the regression analysis and multi-objective optimization, Design-Expert software in conjunction with the response surface methodology were exerted. Subsequently, the effect of parameters such as the thickness of the plate, the impulse of applied load, the mechanical properties of the plate, the loading radius, and the ratio of width to length of the plate on the maximum deflection of quadrangular plates was simultaneously investigated. Two separate analyses based on statistical analysis and ANOVA were performed for each type of uniform and localized loading. The values obtained for the coefficient of determination (R<sup>2</sup>) of two types of uniform and localized loading showed that the models have a good prediction ability of the experimental results and it can be used to evaluate the plastic deformation of the quadrangular plates. Subsequently, the optimal conditions for each effective parameter including yield stress and width to length ratio were determined with respect to considering the minimum values for central deflection and plate thickness simultaneously. The multi-objective optimization results were compared to the experimental results of the present study.

**Keywords** Experimental Test; Quadrangular Plate; Uniform Loading; Localized Loading; Multi-Objective Optimization

### CITATION LINKS

[1] The dynamic plastic behavior of fully clamped rectangular plates. International Journal ... [2] A theoretical study of the dynamic plastic behavior of beams and plates with ... [3] Deformation and rupture of blast loaded square plates-predictions and ... [4] Response of clamped single and double stiffened rectangular plates subjected to ... [5] The deformation and tearing of thin square plates subjected to impulsive loads-an ... [6] Scaling aspects of quadrangular plates subjected to localised blast loads-experiments ... [7] Experimental and numerical studies on the response of quadrangular stiffened ... [8] The effect of welded boundaries on the response of rectangular hot-rolled mild steel ... [9] Predictions of transverse deflections and in-plane strains in impulsively loaded thin ... [10] Deformation of thin plates subjected to impulsive loading—a review: Part I: Theoretical ... [11] Deformation of thin plates subjected to impulsive loading—a review part II ... [12] A new bound solution for quadrangular plates subjected to impulsive ... [13] Dynamic response and failure of fully clamped circular plates under impulsive ... [14] On dimensionless numbers for dynamic plastic response of structural ... [15] Simple design formulae for predicting the residual damage of unstiffened and ... [16] Dynamic inelastic response of strain rate sensitive ductile plates due to large impact ... [17] Theoretical analysis on the effect of uniform and localized impulsive loading on the dynamic ... [18] Closed-form analytical analysis on the effect of coupled membrane and bending strains on the dynamic plastic behaviour of fully ... [19] Deformation of thin plates subjected to impulsive load: Part III—an ... [20] Experimental and numerical investigation important ... [21] Friction surfacing of AA7075-T6 deposition on AA2024-T351; Statistical ... [22] Experimental and numerical analysis and multi-objective optimization ... [23] On dimensionless numbers for the dynamic plastic response of ... [24] The influence of gas mixture detonation loads on large plastic ... [25] Large transverse deformation of double-layered rectangular plates subjected to gas mixture ... [26] Experimental and theoretical study on large ductile transverse ...

## اثر بار دینامیکی شدید روی تغییر شکل پلاستیک ورق‌های چهارگوش: مطالعه تجربی، تحلیل رگرسیونی و بهینه‌سازی چندهدفه

توحید میرزابابای مستوفی PhD

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

مصطفی سیاح بادخور 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 این مقاله، به بررسی تجربی و تحلیل رگرسیونی تغییر شکل پلاستیک بزرگ ورق‌های مربعی و مستطیلی تحت بار دینامیکی شدید با توزیع یکنواخت و محلی پرداخته شده است. در بخش تجربی، پنج آزمایش روی ورق‌های فولادی در ضخامت‌های مختلف انجام شد. جهت انجام تحلیل رگرسیونی و بهینه‌سازی چندهدفه، نرم‌افزار طراح آزمایش به همراه روش رویه پاسخ به‌کار گرفته شد. سپس، اثر پارامترهایی از قبیل ضخامت ورق، شدت بار وارده، خواص مکانیکی ورق، نوع بارگذاری، شعاع بارگذاری و نسبت عرض به طول روی خیز ورق‌های چهارگوش به‌صورت هم‌زمان بررسی شده است. دو تحلیل جداگانه براساس تحلیل واریانس و آماری برای هر کدام از بارگذاری‌های یکنواخت و محلی انجام شد. مقادیر به‌دست‌آمده برای ضریب تعیین دو نوع بارگذاری یکنواخت و محلی نشان داد که مدل‌ها، پیش‌بینی خوبی از نتایج تجربی دارند و می‌توانند جهت ارزیابی تغییر شکل پلاستیک ورق مورد استفاده قرار گیرند. در ادامه، شرایط بهینه برای هر یک از پارامترهای موثر شامل تنش تسلیم و نسبت عرض به طول ورق با توجه به شرط دنرنگرفتن کمترین مقادیر ضخامت و خیز مرکزی ورق برای هر دو نوع بارگذاری تعیین شد. نتایج به‌دست‌آمده برای بهینه‌سازی چندهدفه با نتایج مطالعات تجربی تحقیق حاضر مقایسه شد.

**کلیدواژه‌ها:** آزمایش تجربی، ورق چهارگوش، بارگذاری یکنواخت، بارگذاری محلی، بهینه‌سازی چندهدفه

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۲۰

\*نویسنده مسئول: ghbabaei@guilan.ac.ir

### مقدمه

انقلاب صنعتی اروپا سبب شد تا شکل‌دهی فلزات در مسیر تازه‌ای قرار گیرد. در زمان جنگ جهانی دوم، روش‌های شکل‌دهی انفجاری و ضربه‌ای به‌منظور ساخت و شکل‌دهی فلزات با اشکال پیچیده پیشنهاد شد، اما به‌علت محدودیت‌هایی که این روش دارا بود، چندان مورد استفاده قرار نمی‌گرفت. یکی از روش‌های پرکاربرد در شکل‌دهی دفعی ورق، استفاده از خرج انفجاری است. در این روش، با تنظیم فاصله خرج انفجاری از سطح ورق، بار دفعی به‌طور یکنواخت، تمام یا قسمتی از سطح نمونه را در برمی‌گیرد. همچنین در بسیاری از موارد، خرج انفجاری به‌صورت دایره یا مستطیل‌های هم‌مرکز برای اعمال بار دفعی یکنواخت مورد استفاده قرار می‌گیرند. تاکنون، روابط تحلیلی و تجربی بسیار

زیادی برای بررسی رفتار دینامیکی ساختارهای مختلف به‌خصوص ورق‌ها تحت بارهای دینامیکی با توزیع متفاوت ارائه شده که در ادامه به آنها پرداخته شده است.

جونز و همکاران، آزمایش‌های تجربی را روی صفحات مستطیلی با شرایط مرزی کاملاً گیردار انجام دادند. آنها مقدار ایمپالس را به‌وسیله یک پاندول بالستیک اندازه‌گیری کردند<sup>[1]</sup>. *السون* و همکاران، بررسی‌های خود را به‌منظور یافتن مدلی جهت پیش‌بینی گسیختگی ورق‌ها، در مورد ورق‌های مربعی کاملاً گیردار از جنس فولاد نرم تحت بارگذاری انفجاری یکنواخت انجام دادند<sup>[3]</sup>. *نوریک* و *کانولی*<sup>[4]</sup> و *نوریک* و *شیو*<sup>[5]</sup>، آزمایش‌هایی روی پاسخ پلاستیک ورق‌های مربعی فولادی با شرایط مرزی کاملاً گیردار تحت بارگذاری دینامیکی یکنواخت با استفاده از خرج‌های انفجاری انجام دادند. مشاهده مدهای مختلف تخریب و چگونگی پارگی ورق تحت بار دینامیکی، از جمله نتایج آنها بود. *جاکوب* و همکاران، به بررسی روی ورق‌های مستطیلی فولادی نرم با شرایط مرزی کاملاً گیردار تحت بارگذاری دینامیکی غیریکنواخت پرداختند. آنها، ورق‌هایی با ضخامت‌های مختلف ۱/۶، ۲، ۳ و ۴ میلی‌متر و نسبت‌های طول به عرض متنوع ۲/۴ به یک تحت بارهای انفجاری غیریکنواخت قرار دادند<sup>[6]</sup>. *یوان* و *نوریک*، به بررسی رفتار پلاستیک ورق‌های مستطیلی فولادی با تکیه‌گاه یکپارچه تحت شرایط بارگذاری یکنواخت پرداختند<sup>[7]</sup>. *بونورچیس* و *نوریک*، به بررسی اثر مرزهای جوش‌شده به ورق مستطیلی بر رفتار پلاستیک آن تحت بار انفجاری غیریکنواخت پرداختند. آنها در آزمایش‌های خود از دو جوش مختلف تیگ و میگ روی نمونه‌هایی از جنس فولادی نرم استفاده نمودند<sup>[8]</sup>. در پژوهش‌هایی، مدل‌هایی برای ورق‌های دایره‌ای و مستطیلی با فرض شکل مد متغیر در روش تقریبی و دنرنگرفتن هم‌زمان جابه‌جایی‌های افقی و قائم ارائه شد که در آن، شکل مد در هر گام زمانی قابل محاسبه بود؛ بنابراین، امکان پیش‌بینی توزیع کرنش‌های محیطی که تا آن زمان وجود نداشت، فراهم شد<sup>[9-11]</sup>. چن، مدل‌هایی تحلیلی برای پیش‌بینی بیشترین خیز دائمی ورق‌های مستطیلی تحت بارگذاری دینامیکی یکنواخت با دنرنگرفتن رفتار ایده‌آل صلب- پلاستیک برای ماده با استفاده از تئوری‌های حدود بالا و پایین، ارائه داد<sup>[12]</sup>. *شن* و *جونز*، با ارائه یک مدل تحلیلی مدهای دوم و سوم شکست را نیز پیش‌بینی کردند. برای این کار رفتار ماده را به‌صورت صلب- پلاستیک دنرنگرفتند<sup>[13]</sup>. *لی* و *جونز*، برای پیش‌بینی رفتارهای دینامیکی و شکست ساختارهای مختلف، یک تحلیل بی‌بعد کلی ارائه کردند. تحلیل آنها، اثرات نرخ کرنش، کارسختی، تغییرات دما، شکل پالس بارگذاری و جرم ضربه‌زننده را دنرنگرفته بودند<sup>[14]</sup>. *پارک* و *چو*، اعلام کردند که اعداد بی‌بعد ارائه‌شده توسط *نوریک* و *مارتین*<sup>[10]</sup> <sup>[11]</sup> و *لی* و *جونز*<sup>[14]</sup> ناقص بوده و نیازمند برخی اصلاحات است. آنها یک عدد بی‌بعد، مشابه عدد بی‌بعد *نوریک* و *مارتین*<sup>[10]</sup> <sup>[11]</sup> برای ورق‌های تک‌لایه تحت بار انفجاری یکنواخت ارائه کردند که

مستطیلی تحت بارگذاری انفجاری یکنواخت و محلی وجود ندارد؛ بنابراین، بهینه‌سازی این پارامترها و بررسی میزان تأثیر هر کدام از آنها بر پاسخ پلاستیک ورق‌های مستطیلی، ضروری است؛ بنابراین، علاوه بر انجام کارهای تجربی، به جمع‌آوری داده‌های موجود در ادبیات تحقیق نیز پرداخته شده است تا بتوان با دقت بیشتری به بررسی هر کدام از پارامترهای موثر روی پاسخ پلاستیک ورق‌های مستطیلی با استفاده از روش سطح پاسخ در یک محدوده وسیع پرداخت. از مزیت‌های اصلی این روش می‌توان به منسجم‌نمودن کارهای تجربی، پیش‌گیری از آزمایش‌های تکراری، مطالعه و شناخت اثر هر یک از متغیرهای وابسته به فرآیند و همچنین تحلیل و تجزیه داده‌های آزمایشگاهی اشاره کرد. به‌منظور مقایسه نتایج حاصل از مدل به‌دست‌آمده نیز، تعدادی آزمایش طراحی و انجام شده است.

### مطالعه تجربی

همان‌طور که در بخش مقدمه ذکر شد، یکی از اهداف، یافت اثر پارامترهای مختلف موثر در فرآیند شکل‌دهی انفجاری ورق‌های چهارگوش تحت بارگذاری دفعی یکنواخت و محلی است. این پارامترها که به‌عنوان ورودی مساله هستند شامل ایمپالس بار دفعی، ضخامت ورق، خواص مکانیکی سازه، نسبت عرض به طول و میزان شعاع خرج است. هدف آن است تا بتوان اثر کمیت‌های مذکور را روی خروجی مساله؛ یعنی، بیشترین خیز دائمی ورق بررسی کرد و مقادیر بهینه هر یک از این پارامترها را در شرایط مورد نظر به‌دست آورد. جهت تحقق این هدف، تعدادی آزمایش تجربی انجام شده است که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

شکل‌دهی آزاد یا بدون قالب ورق‌های فولاد نرم در ضخامت ۱/۶ و ۲ میلی‌متر تحت بارگذاری دفعی یکنواخت در یک سامانه آزمایشی آونگ بالستیک انجام گرفت. سامانه آونگ بالستیک همراه با متعلقاتش به‌وسیله چهار کابل فولادی از ارتفاع معین به‌صورت افقی و تراز آویزان بود. یک سمت پاندول قلم و کاغذ جهت ثبت حرکت پاندول نصب شده که دامنه حرکت رفت‌وبرگشت پاندول توسط قلم، روی کاغذی که در سطح زمین قرار داده شده را ثبت کند. گیره ورق از دو صفحه مربعی فولادی با ضخامت ۲۵ میلی‌متر تشکیل شد. وسط هر دو صفحه برحسب نوع تغییر شکل ورق منفذی جهت اعمال بار و خروج صفحه تعبیه شد. از یک لوله به قطر داخلی ۱۰۰، قطر خارجی ۱۲۰ و طول ۳۰۰ میلی‌متر که جهت هدایت موج انفجار به سمت نمونه و همچنین یکنواخت‌کردن توزیع بار است، استفاده شد. شایان توجه است که با توجه به مطالعات انجام‌گرفته [23-26]، در صورتی که فاصله خرج انفجاری تا مرکز ورق بیشتر از شعاع باشد، بار توزیعی یکنواخت روی نمونه دارد. سامانه آزمایشی آونگ بالستیک شامل چهار بخش واحد اعمال بار انفجاری جایگذاری خرج، سیستم تحریک خرج انفجار با قابلیت کنترل از راه دور، واحد اندازه‌گیری دامنه نوسان و واحد شکل‌دهی و نگه‌دارنده‌ها است. در بخش اعمال بار، خرج انفجاری

در آن نسبت طول به عرض ورق نیز اضافه شده بود [15]. چون به بررسی بخش اعظمی از ادبیات تحقیق که روی رفتار پلاستیک-دینامیکی ورق‌های دایره‌ای و مستطیلی در معرض بارهای دینامیکی بزرگ انجام شده بود، پرداخت. در این بررسی، یک روش نظری با دینامیک رفتار ماده به‌صورت ایده‌آل صلب-پلاستیک برای پالس‌های فشار دینامیکی، جرم‌های ضربه‌زننده، سرعت آنی یا بارگذاری انفجاری بر روی ورق‌های مذکور ارائه کرد [16]. میرزابابایی مستوفی و همکاران با ارائه یک حل تحلیلی تقریبی به بررسی رفتار غیرالاستیک ورق‌های نازک مستطیلی تحت دو نوع بارگذاری مختلف دینامیکی پرداختند. حل آنها براساس کار پلاستیک و انرژی جنبشی و با فرض رفتار صلب-پلاستیک ورق انجام شده بود. آنها در تحلیل خود، از سطح تسلیمی استفاده کردند که در آن تنها نیروهای غشایی به‌عنوان کار پلاستیک در نظر گرفته و از معادله کوپر-سیموندز برای بررسی اثر نرخ کرنش استفاده شده بود [17, 18]. یوان و همکاران، موفق شدند با انجام یک سری آزمایش‌های جدید مدل‌های ارائه‌شده در مراجع قبلی را اصلاح نمایند و دقت مدل تجربی خود را بالا ببرند [19].

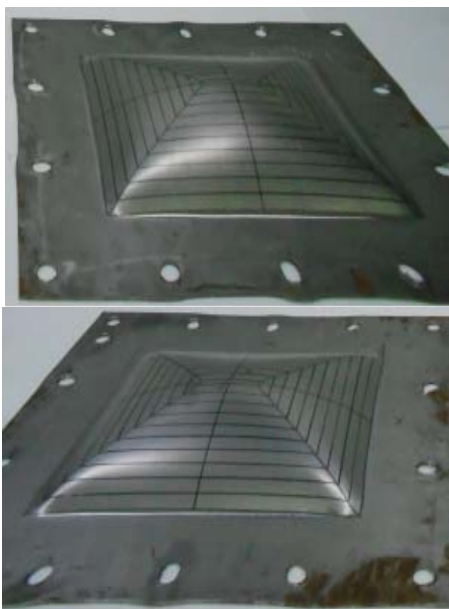
روش‌های مدل‌سازی و شناسایی سیستم‌ها در بسیاری از زمینه‌ها به‌منظور طراحی و پیش‌بینی رفتارهای نامشخص و پیچیده سیستم‌های با داده‌های ورودی و خروجی استفاده می‌شود. یکی از دلایل اصلی این پیشرفت را می‌توان در استفاده از روش‌های سطح پاسخ، منطق فازی، شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم‌های تکاملی دانست که به محاسبات نرم معروف هستند و توانایی زیادی در تحلیل سیستم‌های غیرخطی پیچیده و مسایل کنترل دارند. گل‌مکانی و همکاران به بررسی فرآیند کشش عمیق با اجزای لاستیکی پرداختند. آنها با استفاده از قالب، نمونه‌های مربعی را با ماتریس لاستیکی به‌صورت عملی و شبیه‌سازی سه‌بعدی، شکل دادند. در انتها نیز به کمک روش سطح پاسخ به بررسی 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 [20]. مصطفی‌پور و همکاران به بررسی تأثیر پوشش‌دهی اصطکاکی آلیاژ آلومینیوم بر روی فلز به روش سطح پاسخ پرداختند. آنها تأثیر پارامترهای مختلف بر روی خواص مکانیکی را به کمک این روش بررسی نمودند [21]. بیگدلی و نوری دامغانی با استفاده از روش سطح پاسخ به بررسی تجربی و عددی شرایط بهینه برای فشرده‌سازی استاتیکی سیلندرهای جدار نازک پرداختند. آنها ضمن بررسی تأثیر پارامترهای مختلف به‌صورت همزمان، شرایط بهینه را نیز مشخص نمودند [22].

تحقیقات تجربی و تحلیلی پاسخ دینامیکی ورق‌های مستطیلی، تحت بار ضربه‌ای به‌علت پیچیدگی هندسه بسیار محدود است. با مرور مطالعات پیشین محققان این نتیجه حاصل شد که در زمینه پاسخ پلاستیک ورق‌های مستطیلی تحت بار دینامیکی با توزیع یکنواخت و محلی، داده‌های تجربی مختلفی وجود دارند اما یک تحلیل کامل بر اثر پارامترهای موثر در فرآیند شکل‌دهی ورق‌های

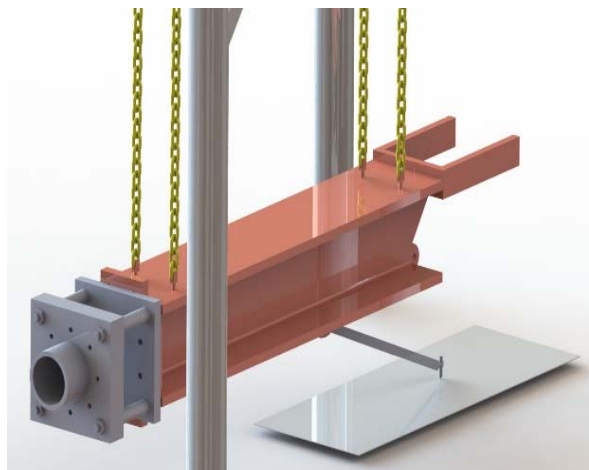
کلی از قبیل نوع بارگذاری، محدوده شدت نیرو یا ایمپالس، هندسه ورق، محدوده تغییر شکل و همچنین مشخصه‌های مکانیکی ورق در جدول ۲ ارایه شده است. در تمامی آزمون‌های انجام شده در جدول ۲، خرج انفجاری به‌کاررفته از نوع PE4 و شکل هندسی خرج مسطح دیسکی و مسطح چهارگوش بوده است. برای جلوگیری از آسیب‌های ناشی از انفجار بین خرج و ورق از فوم پلی‌استر استفاده شده است.

جدول ۱) نتایج آزمایش‌های تجربی

شماره آزمایش	ماده	خیز مرکز ورق (mm)	ایمپالس (N.s)	جرم خرج (g)	ضخامت ورق (mm)
۱	فولاد	۷/۲	۷/۸	۴	۱/۶
۲	فولاد	۸/۴	۸/۱	۴/۵	۱/۶
۳	فولاد	۹/۳	۹/۱	۵/۵	۱/۶
۴	فولاد	۵۱/۱	۳۵/۲۴	۱۸	۲
۵	فولاد	۵۷/۲	۳۹/۴۸	۲۰/۵	۲



شکل ۱) نمونه تغییر شکل یافته (بالا: آزمایش پنجم، پایین: آزمایش چهارم)



شکل ۲) سیستم پاندول بالستیک

روی صفحه ضخیمی از جنس پلی‌استر به ضخامت ۱۵ میلی‌متر قرار داده شد. ماده منفجره به‌کار گرفته‌شده برای انجام آزمایش‌های تجربی C4 بوده و مقدار آن بسته به نوع آزمایش مربوطه با ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم وزن شد. خرج انفجاری هر آزمایش با توجه به خمیری شکل‌بودن آن با دست به‌صورت مسطح درآورده شد و روی صفحه پلی‌استری پهن شد. در بخش دوم، برای تحریک ماده منفجره از چاشنی نمره ۸ نائل و به همراه دستگاه تحریک نائل استفاده شد.

نمونه ورق‌های مورد آزمایش از جنس فولاد نرم در ضخامت ۱/۶ و ۲ میلی‌متر است. در ابتدا نمونه ورق‌ها به‌صورت مستطیلی در ابعاد ۳۹۰×۳۴۵ میلی‌متر برش زده شدند. ورق‌های برش‌خورده جهت نصب در نگه‌دارنده‌ها و ثابت نگه‌داشتن آنها در سامانه پاندول بالستیک، سوراخ‌کاری شدند. ورق‌های فلزی بین دو نگه‌دارنده عقبی و جلویی به ضخامت ۲۰ میلی‌متر قرار داده شد. لازم به توضیح است که جهت اعمال بار به ورق، هر یک از نگه‌دارنده‌ها دارای سوراخی با ابعاد ۲۵۰×۲۵۰ میلی‌متر هستند.

برای تعیین تنش تسلیم استاتیکی و تنش نهایی استاتیکی، از هر ضخامت، سه نمونه آزمایشگاهی در سه راستای صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه تهیه شد؛ بنابراین، جمعاً شش نمونه برای هر ضخامت ورق آزمون کشش محوری انجام گرفت تا بتوان نمونه‌ها را در دو سرعت ۲ و ۵۰ دقیقه بر میلی‌متر تحت کشش قرار داد. شباهت تقریبی منحنی‌های تنش- کرنش استخراج‌شده از آزمون کشش تک‌محوری در سه راستای مختلف نشان می‌دهد که می‌توان ماده را همسانگرد فرض کرد. مقادیر تنش نهایی و تنش تسلیم برای فولاد نرم به ترتیب ۴۷۶ و ۲۸۹ مگاپاسکال است.

کلیه مشخصات و نتایج آزمایش‌های انجام‌شده روی ورق‌های فولادی در جدول ۱ آمده است. نمونه‌ای از ورق‌های شکل‌داده‌شده در شکل ۱ نمایش داده شده است.

تاکنون تحقیقات تجربی بسیار مختلفی برای بررسی تغییر شکل پلاستیک ورق‌های مستطیلی تحت بارگذاری دینامیکی با توزیع‌های مختلف انجام شده است. در این تحقیقات، بیشترین خیز دائمی ورق و شدت اعمال بار اندازه‌گیری شده است. لازم به توضیح است که گستره تغییر شکل ورق در طول فرآیند بارگذاری تحت تاثیر نوع بارگذاری دینامیکی قرار دارد و از روی فرم تغییر شکل می‌توان به نوع بارگذاری پی برد. علاوه بر کارهای تجربی انجام‌گرفته از هشت سری نتایج تجربی موجود در پژوهش‌های پیشین [8-10, 19] به تعداد ۲۶۵ داده برای تعیین اثربخشی مقادیر مختلف از جمله ابعاد، خواص مواد و شرایط بارگذاری بر روی بیشترین خیز دائمی ورق‌های مستطیلی تحت بارگذاری دینامیکی با توزیع یکنواخت و محلی استفاده شد. تمام نتایج تجربی، از طریق یک روش مشابه و با استفاده از مواد منفجره و توسط آونگ بالستیک به‌دست آمده که در شکل ۲ نشان داده شده است.

فهرست کاملی از تحقیقات انجام‌شده در زمینه شکل‌دهی آزاد ورق‌های مستطیلی تحت بارگذاری انفجاری همراه با مشخصات

پژوهش‌های پیشین	تعداد آزمایش	ابعاد ورق (mm)	ضخامت ورق (mm)	نوع بارگذاری	شعاع خرج (mm)	تنش تسلیم (MPa)	محدوده بیشترین خیز (mm)	محدوده ایмпالس (N·s)	
جونز و همکاران <sup>[1]</sup>	۲۲	۱۲۸/۶×۷۶/۲	۴/۴، ۲/۵، ۱/۶	یکنواخت	-	۲۴۸	۱۰/۸-۱/۴	۱۸/۳-۴/۷	
نوریک و مارتین <sup>[۱۰]</sup>	۸۴	۸۹×۸۹ و ۱۱۳×۷۰	۱/۶	یکنواخت	-	۲۹۶، ۲۸۲	۲۱/۳-۴/۷	۱۹/۰-۵/۲	
اولسون و همکاران <sup>[۳]</sup>	۴	۸۹×۸۹	۱/۶	یکنواخت	-	۲۹۲	۱۷/۴-۱۱/۶	۱۴/۲-۹/۹	
نوریک و کانولی <sup>[۴]</sup>	۷	۱۱۳×۷۰	۱/۶	یکنواخت	-	۲۶۶	۱۳/۷-۳/۶	۱۳/۳-۳/۱	
جاکوب و همکاران <sup>[۶]</sup>	۱۲۶	۱۶۰×۱۶۰، ۲۹۰×۱۲۹، ۱۹۰×۱۹۰، ۲۸۸×۱۲۰، ۱۸۰×۱۸۰، ۲۱۰×۱۷۵، ۲۱۰×۱۵۰، ۲۴۰×۱۴۸، ۲۴۰×۱۳۳، ۲۹۰×۱۴۵، ۲۹۰×۱۳۲	۴، ۳، ۲، ۱/۶	محلی	۱۸، ۱۷/۵، ۱۵، ۱۴/۸، ۱۳/۳، ۱۳/۲، ۱۴/۵	۲۳۰	۲۳۰، ۲۶۸، ۲۸۸	۴۸/۳-۸/۴	۳۸/۲-۴/۹
یوان و نوریک <sup>[۷]</sup>	۳	۱۲۶×۱۲۶	۱/۶	محلی	۱۸	۲۸۸	۳۱/۸-۲۰/۵	۱۲/۵-۸/۱	
بونورچیس و نوریک <sup>[۸]</sup>	۷	۲۰۰×۱۲۰	۳	محلی	۳۷/۵	۳۲۴، ۲۸۱	۲۲/۴-۱۸/۱	۲۸/۱-۲۳/۴	
یوان و همکاران <sup>[۱۹]</sup>	۱۴	۳۰۰×۳۰۰	۴	محلی	۳۷/۵، ۳۰، ۲۲/۵، ۵۰	۲۶۵	۵۲/۵-۱۸/۰	۷۶/۶-۲۳/۴	

طرحی از لوله‌های فاصله استقرار خرج انفجاری استفاده شده تا بتوان بار را به صورت یکنواخت به نمونه وارد نمود.



شکل ۳) تغییر شکل ورق تحت بار دینامیکی محلی



شکل ۴) تغییر شکل ورق تحت بار دینامیکی یکنواخت

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 ایмпالس تولید شده از انفجار به تبع آن جابه‌جایی مرکز ورق دارد. همچنین شکل هندسی خرج نیز تأثیر بسیار زیادی در نوع توزیع بار دینامیکی بر روی ورق و به تبع آن به پروفیل تغییر شکل ورق دارد. شکل‌های ۳ و ۴ دو پروفیل تغییر شکل متفاوت که در اثر بار دینامیکی با گستره محلی و یکنواخت ایجاد شده را نشان می‌دهند.

در مورد خرج انفجاری مسطح دیسکی، خرج انفجاری به صورت یک دیسک استوانه‌ای شکل با ضخامت مشخص و به شعاع  $R_0$  شکل داده می‌شود. توزیع بار دینامیکی به وجود آمده به صورت متمرکز نسبت به مرکز ورق و گسترده محلی یا غیریکنواخت است. شکل ۵ نمونه‌ای از این نوع خرج را نشان می‌دهد [13-16].

در خرج مسطح حلقه‌ای شکل، یک شبکه مستطیلی شکل به وسیله خرج انفجاری ایجاد می‌شود. این شبکه شامل دو مستطیل است. مستطیل‌های این شبکه باید به وسیله خرج به یکدیگر متصل شوند تا انفجار به طور کامل تحقق یابد. بار دینامیکی در این حالت به صورت تقریباً یکنواخت روی سطح ورق توزیع می‌شود. در شکل ۶ نمونه‌ای از خرج مسطح مستطیلی نشان داده شده است [13-16]. لازم به توضیح است که به علت سخت و پیچیده بودن اجرای چنین

محل، از داده‌های تجربی موجود در ادبیات پژوهش استفاده شده است. از مجموع ۲۶۵ داده موجود که در جدول ۲ آمده است، ۱۱۵ داده مربوط به بارگذاری دینامیکی با توزیع یکنواخت و ۱۵۰ داده مربوط به بارگذاری دینامیکی با توزیع محلی است؛ بنابراین، با توجه به داشتن اطلاعات مربوط به آزمایش از طرح داده‌های تجربی در نرم‌افزار طراحی آزمایش استفاده شده است. روش سطح پاسخ به‌منظور تجزیه و تحلیل نتایج، از ابزار قدرتمندی به‌نام 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 و سهم هر عامل در پاسخ ارائه شده است.

با توجه به دودسته 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 مستطیلی به‌عنوان پارامتر خروجی و ضخامت ورق مستطیلی، تنش تسلیم ورق مستطیلی، ایمپالس بارگذاری و نسبت عرض به طول ورق مستطیلی ( $\beta$ ) به‌عنوان پارامترهای مستقل در این بخش هستند. در بخش دوم که مربوط به بارگذاری دینامیکی با توزیع محلی است، پنج متغیر به‌عنوان پارامترهای مستقل و یک متغیر نیز به‌عنوان جواب در نظر گرفته شده است. تغییر شکل ورق مستطیلی به‌عنوان پارامتر خروجی و ضخامت ورق مستطیلی، تنش تسلیم ورق مستطیلی، ایمپالس بارگذاری، نسبت عرض به طول ورق مستطیلی و شعاع خرج مورد استفاده، به‌عنوان پارامترهای مستقل در این بخش هستند. در جدول‌های ۳ و ۴ نماد این پارامترها و تغییرات آنها آمده است.

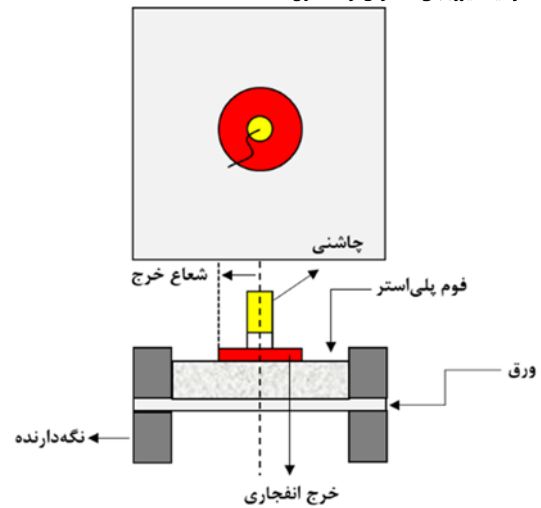
رابطه بین خروجی و پارامترهای مستقل به‌صورت یک چندجمله‌ای با مرتبه دوم، مطابق رابطه ۱ است.

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

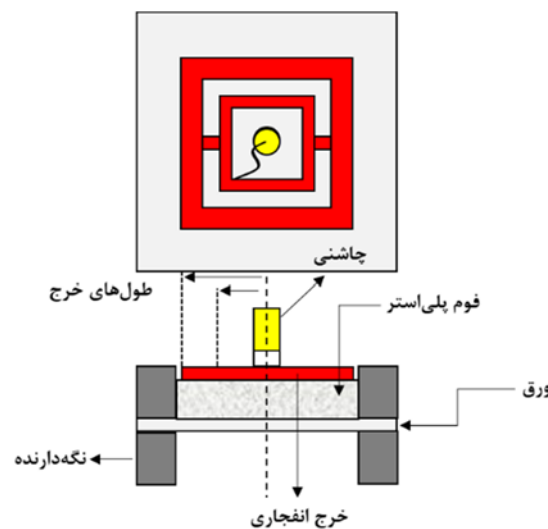
که در آن  $Y$  پاسخ محاسبه شده،  $x_i$  و  $x_j$  متغیرهای کدگذاری شده،  $\beta_0$  ضریب ثابت،  $\beta_i$  ضریب خطی،  $\beta_{ii}$  ضریب مرتبه دوم،  $\beta_{ij}$  ضریب متقابل و  $n$  تعداد پارامترهای مستقل است.

#### تحلیل واریانس خروجی بارگذاری دینامیکی با توزیع یکنواخت

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 تغییر شکل ورق‌های تک‌لایه مستطیلی 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



شکل ۵) بارگذاری دینامیکی با توزیع محلی



شکل ۶) بارگذاری دینامیکی با توزیع یکنواخت

#### طراحی آزمایش

با توجه به تعداد زیاد پارامترهای تأثیرگذار در فرآیند تغییر شکل ورق‌های تک‌لایه مستطیلی تحت بارگذاری دینامیکی با توزیع یکنواخت و محلی، بررسی تأثیر هر کدام از آنها به‌صورت مجزا کار بسیار دشوار و زمان‌بری است. استفاده از روش‌های ساده مانند تغییر یک پارامتر در هر زمان نیز، نمی‌تواند به‌خوبی تأثیر و برهمکنش بین پارامترها را مشخص نماید؛ بنابراین، استفاده از نرم‌افزار طراحی آزمایش در این زمینه، نتایج بسیار ارزشمندی خواهد داشت. در بین روش‌های طراحی آزمایش، روش سطح پاسخ به‌علت دقت خوب در تعیین تأثیر برهمکنشی پارامترها، اهمیت بیشتری دارد. در این روش، انجام تعدادی آزمایش تعیین شده توسط نرم‌افزار طراحی آزمایش یا استفاده از نتایج آزمایش‌های انجام شده، می‌تواند تأثیر پارامترهای مهم را بر خروجی نهایی تعیین نماید.

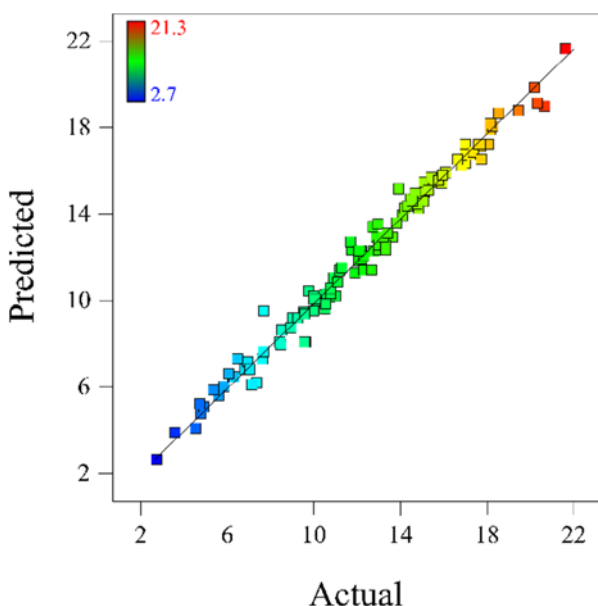
به‌منظور تعیین تأثیر پارامترهای فرآیند تغییر شکل ورق‌های تک‌لایه مستطیلی تحت بارگذاری دینامیکی با توزیع یکنواخت و

رابطه برحسب پارامترهای کدگذاری شده است.

$$Y_1 = 8.54 + 7.31X_1 - 5.13X_2 - 1.35X_3 + 1.91X_4 - 1.76X_1X_2 + 0.46X_1X_4 - 0.56X_3X_4 - 1.56X_3^2 \quad (2)$$

مقایسه بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده از روش سطح پاسخ در نمودار ۱ نشان داده شده است. نزدیک بودن داده‌ها به خط مورب بدان معنا است که مدل قادر به ارایه یک پیش‌بینی مناسب از میزان تغییر شکل ورق‌های مستطیلی تحت بارگذاری دینامیکی یکنواخت در مقایسه با نتایج تجربی است. 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.

منحنی‌های احتمال نرمال باقی‌مانده‌ها و باقی‌مانده‌ها برحسب مقادیر پیش‌بینی شده بعد از حذف عوامل غیرمؤثر در مدل رگرسیونی به ترتیب در نمودارهای ۲ و ۳ 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 اینکه باید این داده‌ها بیشتر از ۹۹ و کمتر از یک 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 پیش‌بینی شده، در محدوده مشخص قرار دارند و قابل قبول هستند.



نمودار ۱) مقایسه بین مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی میزان بیشترین خیز ورق برای بارگذاری دینامیکی یکنواخت

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 به دست آمده و این یعنی مدل در نظر گرفته شده معنی‌دار است.  $R^2$  و  $R_{adj}^2$  به ترتیب برابر ۰/۹۸۴ و ۰/۹۸۳ است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که مدل ارایه شده برای این آزمایش‌ها مناسب بوده و مقادیر به دست آمده از آزمایش‌ها با مقادیر پیش‌بینی شده برای خروجی، براساس مدل مطابقت دارد.

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

پارامتر	نماد	حداقل	حداکثر
ایمپالس (N.s)	$X_1$	۳	۱۹
ضخامت (mm)	$X_2$	۱/۶	۴/۴
تنش تسلیم (MPa)	$X_3$	۲۳۳	۲۹۶
نسبت عرض به طول	$X_4$	۰/۵	۱
تغییر شکل	$Y_1$	-	-

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

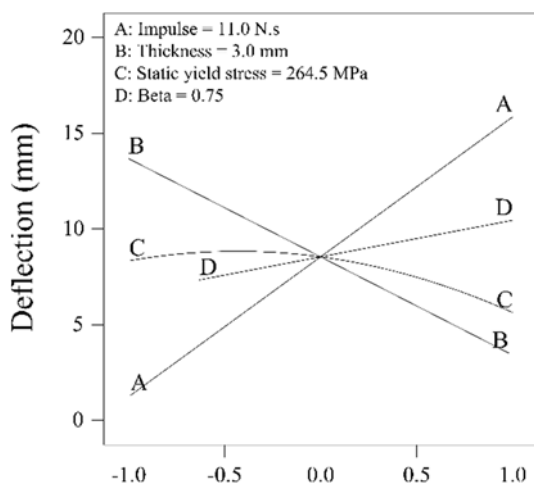
پارامتر	نماد	حداقل	حداکثر
ایمپالس (N.s)	$X_5$	۴	۷۷
ضخامت (mm)	$X_6$	۱/۶	۴
تنش تسلیم (MPa)	$X_7$	۲۳۰	۳۲۴
نسبت عرض به طول	$X_8$	۰/۴	۱
شعاع خرج (mm)	$X_9$	۱۰	۷۰
تغییر شکل (mm)	$Y_2$	-	-

جدول ۵) جدول ANOVA مربوط به مدل سطح پاسخ جابه‌جایی ورق دایره‌ای برای بارگذاری دینامیکی یکنواخت ( $Y_1$ )

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	متوسط مربعات	F-value	Probe > F
مدل ( $Y_1$ )	۱۹۰۵/۹۲	۸	۲۳۸/۲۴	۸۰۷/۷۱	<۰/۰۰۰۱
X1	۷۰/۴۹	۱	۷۰/۴۹	۲۳۸/۹۸	<۰/۰۰۰۱
X2	۶۶/۵۴	۱	۶۶/۵۴	۲۲۵/۵۹	<۰/۰۰۰۱
X3	۰/۶۲	۱	۰/۶۲	۲/۱۱	۰/۱۴۸۹
X4	۰/۵۴	۱	۰/۵۴	۱/۸۳	۰/۱۷۸۷
X1X2	۳/۸۵	۱	۳/۸۵	۱۳/۰۶	۰/۰۰۰۵
X1X4	۱/۵۳	۱	۱/۵۳	۵/۱۹	۰/۰۲۴۷
X3X4	۰/۰۴۲	۱	۰/۰۴۲	۰/۱۴	۰/۷۰۶۰
$X_3^2$	۳/۴۶	۱	۳/۴۶	۱۱/۷۴	۰/۰۰۰۹
باقی‌مانده	۳۱/۲۷	۱۰۶	۰/۲۹	-	-
خطای خالص	۵/۰۷	۱۵	۰/۳۴	-	-

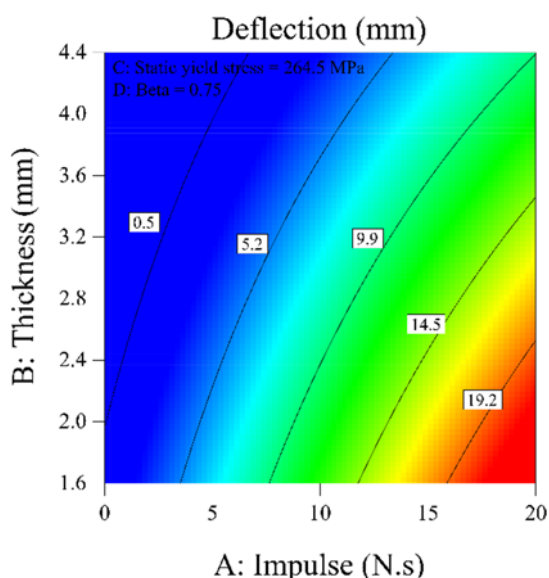
مدل مرتبه دوم از تحلیل واریانس داده‌ها برای سطح پاسخ تغییر شکل ساختار تک‌لایه به‌صورت رابطه ۲ به دست آمده است. این

طول ورق ثابت و پارامترهای ایمپالس و ضخامت ورق تغییر می‌کنند. همان طور که در این نمودار مشخص است، با کاهش ضخامت ورق و افزایش ایمپالس مقدار تغییر شکل ورق‌های مستطیلی افزایش می‌یابد. در نمودار ۶ پارامترهای ضخامت ورق و تنش تسلیم ثابت و پارامترهای ایمپالس و نسبت عرض به طول ورق تغییر می‌کنند. مشاهده دقیق نمودار ارایه‌شده نشان می‌دهد که با افزایش ایمپالس و افزایش نسبت عرض به طول ورق، مقدار تغییر شکل ورق‌های مستطیلی افزایش می‌یابد. در نمودار ۷ پارامترهای ایمپالس و ضخامت ورق ثابت و پارامترهای تنش تسلیم و نسبت عرض به طول ورق تغییر می‌کنند. از نمودار ارایه‌شده به‌وضوح مشخص است که با افزایش تنش تسلیم و کاهش نسبت عرض به طول ورق، مقدار تغییر شکل ورق‌های مستطیلی کاهش می‌یابد.



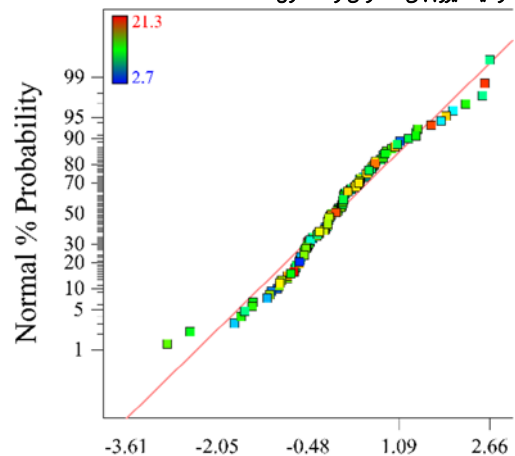
Deviation from Reference Point (Coded Units)

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



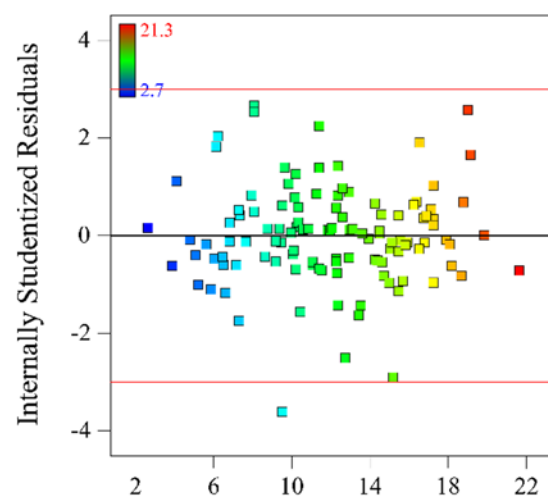
A: Impulse (N.s)

نمودار ۵) خیز ورق مستطیلی تحت بارگذاری دینامیکی یکنواخت با تغییرات ضخامت ورق و ایمپالس



Internally Studentized Residuals

نمودار ۲) منحنی احتمال نرمال باقی‌مانده‌ها برای بارگذاری دینامیکی یکنواخت



Predicted

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

## نتایج و بحث

### تحلیل آماری خروجی بارگذاری دینامیکی با توزیع یکنواخت

در این بخش به تأثیر متقابل پارامترهای مستقل به‌طور همزمان روی خروجی پرداخته شده است. در نمودار ۴ تأثیر این پارامترها بر تغییر شکل ورق‌های مستطیلی تحت بارگذاری دینامیکی یکنواخت، نشان داده شده است. در این نمودار، شیب بیشتر خط، مربوط به هر کدام از پارامترها نشان‌دهنده تأثیر بیشتر آن پارامتر روی خروجی است؛ بنابراین، ایمپالس حاصل از انفجار بیشترین و نسبت عرض به طول ورق کمترین تأثیر را بر روی تغییر شکل ورق‌های مستطیلی دارند. ضخامت ورق هم بیشتر از تنش تسلیم بر روی تغییر شکل موثر است.

اثر متقابل دو پارامتر بر روی تغییر شکل ورق‌های تک‌لایه مستطیلی تحت بارگذاری یکنواخت ضمن ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها به‌صورت کانتورهای رنگی در نمودارهای ۵ تا ۷ نشان داده شده است. در نمودار ۵ پارامترهای تنش تسلیم و نسبت عرض به



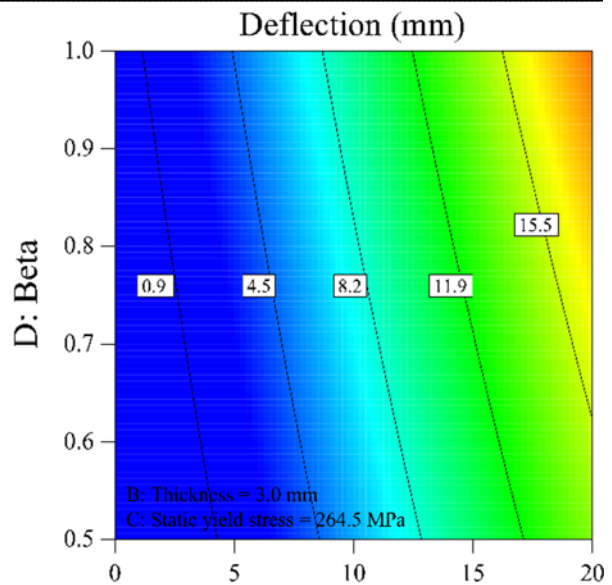
آنها کمتر از ۱/۰ بود در جدول ۶ آمده است. این پارامترها نشان‌دهنده تأثیر بالای هر کدام از آنها بر خروجی است.  $R^2$  و  $R_{adj}^2$  به ترتیب برابر ۰/۹۶۱ و ۰/۹۵۶ به دست آمده است. نتایج حاکی از آن است که مدل ارایه شده برای این آزمایش‌ها مناسب بوده و مقادیر به دست آمده از آزمایش‌ها با مقادیر پیش‌بینی شده برای خروجی، بر اساس مدل مطابقت دارد. مدل مرتبه دوم از تحلیل واریانس داده‌ها برای سطح پاسخ تغییر شکل ساختار تک‌لایه به صورت رابطه ۳ به دست آمده است. این رابطه برحسب پارامترهای کدگذاری شده است.

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

Probe > F	F-value	متوسط مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	منبع
<۰/۰۰۰۱	۲۰۱/۹۸	۵۹۱/۵۴	۱۶	۹۴۶۴/۷۱	مدل (Y2)
<۰/۰۰۰۱	۴۵۴/۵۷	۱۳۳۱/۲۸	۱	۱۳۳۱/۲۸	X5
<۰/۰۰۰۱	۲۸۵/۰۱	۸۳۴/۷۰	۱	۸۳۴/۷۰	X6
<۰/۰۰۰۱	۴۷/۹۹	۱۴۰/۵۵	۱	۱۴۰/۵۵	X7
۰/۰۰۴۰	۸/۵۶	۲۵/۰۸	۱	۲۵/۰۸	X8
۰/۰۰۴۰	۸/۵۶	۲۵/۰۶	۱	۲۵/۰۶	X9
<۰/۰۰۰۱	۵۱/۷۴	۱۵۱/۵۴	۱	۱۵۱/۵۴	X5X6
۰/۰۱۴۱	۶/۱۹	۱۸/۱۲	۱	۱۸/۱۲	X5X7
۰/۰۰۳۶	۸/۷۶	۲۵/۶۹	۱	۲۵/۶۹	X5X9
<۰/۰۰۰۱	۲۷/۵۵	۸۰/۶۹	۱	۸۰/۶۹	X6X7
۰/۶۰۵۳	۰/۲۷	۰/۷۹	۱	۰/۷۹	X6X8
۰/۱۱۳۷	۲/۵۴	۷/۴۳	۱	۷/۴۳	X6X9
۰/۰۰۶۷	۷/۵۹	۲۲/۲۲	۱	۲۲/۲۲	X7X9
۰/۰۰۲۳	۹/۶۷	۲۸/۳۳	۱	۲۸/۳۳	X8X9
۰/۵۳۲۹	۰/۳۹	۱/۱۴	۱	۱/۱۴	X <sub>5</sub> <sup>2</sup>
<۰/۰۰۰۱	۵۷/۵۹	۱۶۸/۶۶	۱	۱۶۸/۶۶	X <sub>6</sub> <sup>2</sup>
<۰/۰۰۰۱	۱۸/۱۵	۵۳/۱۵	۱	۵۳/۱۵	X <sub>7</sub> <sup>2</sup>
-	-	۲/۹۳	۱۳۳	۳۸۹/۵۱	باقی‌مانده
-	-	۰/۳۲	۱	۰/۳۲	خطای خالص

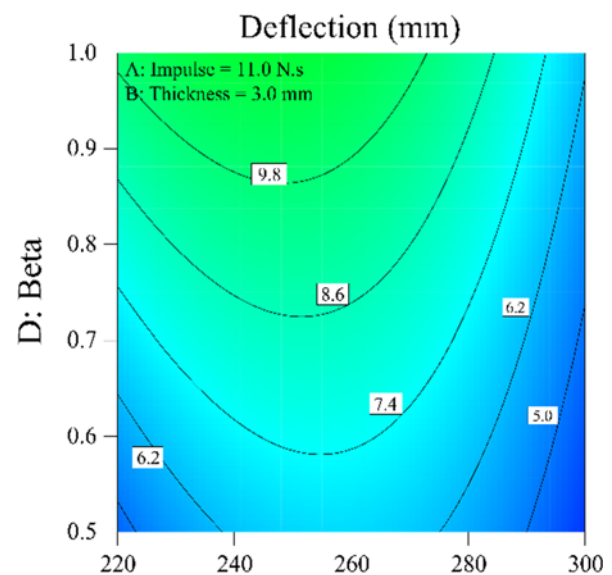
$$Y_2 = 40.31 + 43.26X_5 - 26.17X_6 - 13.94X_7 - 4.27X_8 - 7.43X_9 - 22.62X_5X_6 - 8.87X_5X_7 - 0.56X_3X_4 - 12.04X_5X_9 + 15.94X_6X_7 - 0.15X_6X_8 + 5.18X_6X_9 + 9.31X_7X_9 - 5.77X_8X_9 - 1.58X_5^2 + 19.95X_6^2 + 5.63X_7^2 \quad (3)$$

مقایسه بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده از روش سطح پاسخ در نمودار ۸ نشان داده شده است. نزدیک بودن داده‌ها نزدیک خط مورب بدان معنا است که مدل پیش‌بینی خوبی از خروجی نسبت به داده‌های تجربی دارد. در نمودارهای ۹ و ۱۰ به ترتیب، منحنی‌های احتمال نرمال باقی‌مانده‌ها و باقی‌مانده‌ها برحسب مقادیر پیش‌بینی شده بعد از حذف عوامل غیرمؤثر در مدل رگرسیونی نشان داده شده است.



A: Impulse (N.s)

نمودار ۶) خیز ورق مستطیلی تحت بارگذاری دینامیکی یکنواخت با تغییرات ایمپالس و نسبت عرض به طول



C: Static yield stress (MPa)

نمودار ۷) خیز ورق مستطیلی تحت بارگذاری دینامیکی یکنواخت با تغییرات تنش تسلیم و نسبت عرض به طول

### تحلیل واریانس خروجی بارگذاری دینامیکی با توزیع محلی

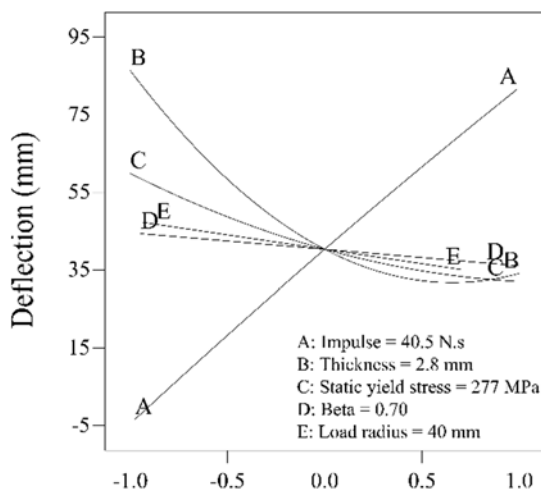
پس از بررسی مدل‌های مختلف ارایه شده و استفاده از روش تحلیل آماری واریانس، تحلیل پارامترهای مستقل و کمیت‌های  $R^2$  و  $R_{adj}^2$  مشخص شد که از بین مدل‌های پیشنهادی، مدل درجه دوم اصلاح شده، تطبیق بهتری با نتایج آزمایش‌ها برای تغییر شکل ورق‌های مستطیلی تحت بارگذاری دینامیکی محلی دارد. آنالیز واریانس برای عواملی که P-value

**تحلیل آماری خروجی بارگذاری دینامیکی با توزیع محلی**

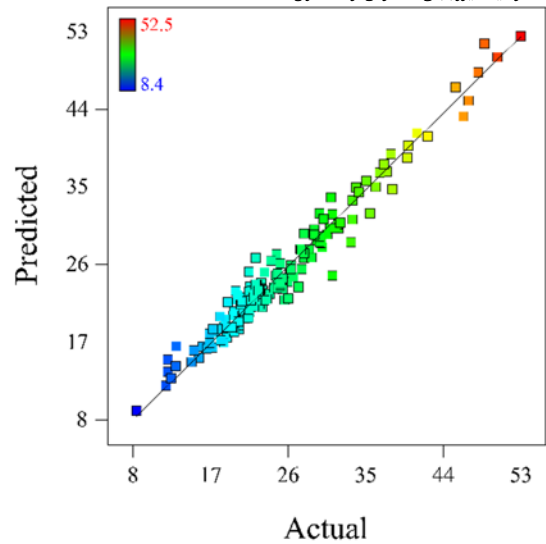
در این بخش به تأثیر متقابل پارامترهای مستقل به طور همزمان روی خروجی پرداخته شده است. در نمودار ۱۱ تأثیر پارامترهای مستقل بر روی تغییر شکل ورق‌های تک‌لایه مستطیلی تحت بارگذاری دینامیکی محلی، نشان داده شده است.

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 انفجار بیشترین تأثیر و شعاع خرج کمترین تأثیر را بر روی تغییر شکل ورق‌های دایره‌ای تحت بارگذاری دینامیکی با توزیع محلی دارند. سایر پارامترها به ترتیب تأثیرگذاری، شعاع ورق دایره‌ای، تنش تسلیم استاتیکی، فاصله تا محل استقرار خرج و ضخامت ورق هستند.

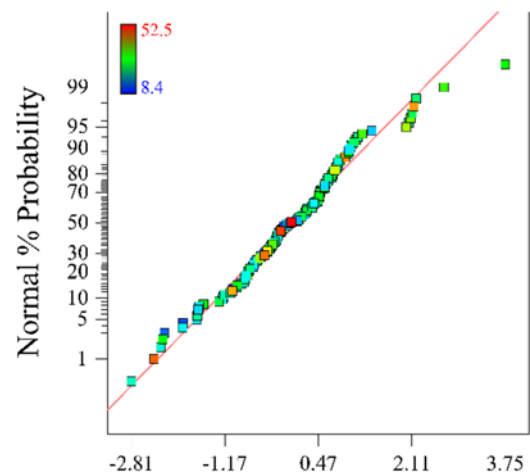
اثر متقابل دو پارامتر بر روی تغییر شکل ورق‌های تک‌لایه مستطیلی تحت بارگذاری دینامیکی با توزیع محلی ضمن ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها به صورت کانتورهای رنگی در نمودارهای ۱۲ تا ۱۴ نشان داده شده است. در نمودار ۱۲ پارامترهای تنش تسلیم استاتیکی، نسبت عرض به طول ورق و شعاع خرج ثابت و پارامترهای ضخامت ورق و ایمپالس تغییر می‌کنند. همان طور که مشخص است، با کاهش ضخامت ورق و افزایش ایمپالس مقدار تغییر شکل ورق‌های مستطیلی افزایش می‌یابد. در نمودار ۱۳ پارامترهای ضخامت ورق، نسبت عرض به طول ورق و شعاع خرج ثابت و پارامترهای ایمپالس و تنش تسلیم استاتیکی تغییر می‌کنند. مشاهده نمودار ارایه شده نشان می‌دهد که با افزایش ایمپالس و کاهش تنش تسلیم استاتیکی، مقدار تغییر شکل ورق‌های مستطیلی افزایش می‌یابد. در نمودار ۱۴ پارامترهای ایمپالس، تنش تسلیم و شعاع خرج ثابت و پارامترهای ضخامت ورق و نسبت عرض به طول ورق تغییر می‌کنند. همان طور که مشخص است با کاهش ضخامت ورق و کاهش نسبت عرض به طول ورق، مقدار تغییر شکل ورق‌های مستطیلی افزایش می‌یابد.



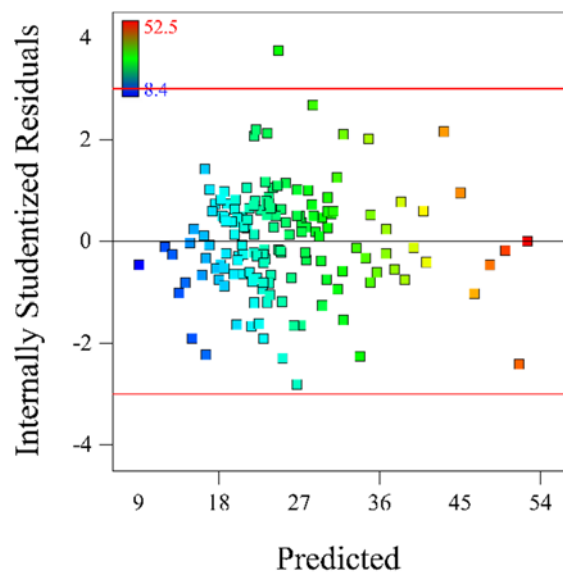
**نمودار ۱۱) تأثیر پارامترهای مستقل بر روی تغییر شکل ورق مستطیلی تحت بارگذاری دینامیکی محلی**



**نمودار ۸) مقایسه بین مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی میزان بیشترین خیز ورق برای بارگذاری دینامیکی محلی**



**نمودار ۹) منحنی احتمال نرمال باقی‌مانده‌ها برای بارگذاری دینامیکی محلی**



**نمودار ۱۰) منحنی باقی‌مانده‌ها بر حسب مقادیر پیش‌بینی شده برای بارگذاری دینامیکی محلی**

**بهینه‌سازی**

برای تعیین مطلوبیت تأثیر هر کدام از پارامترها بر خروجی نیاز به 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 جدول‌ها، هدف بهینه‌سازی هر فاکتور، بازه تغییرات و درجه اهمیت آن بیان شده است. با در نظر گرفتن مقادیر جدول‌های ۷ و ۸ شرایط بهینه مورد نظر به ترتیب مطلوبیت در جدول‌های ۹ و ۱۰ آمده است. همان طور که مشخص است برای داشتن کمترین مقدار تغییر شکل در ساختار تک‌لایه ورق مستطیلی باید ضخامت ورق مستطیلی بیشترین و ایمپالس کمترین مقدار خود را داشته باشند. نزدیک‌بودن مقدار مطلوبیت (D) به عدد یک نشان‌دهنده شرایط بهینه، بسیار خوب است.

به‌منظور مقایسه نتایج بهینه‌سازی حاصل از مدل‌سازی، سه آزمایش در حال بارگذاری یکنواخت انجام شد. در جدول ۱، نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی آمده است. در این آزمایش‌ها به‌منظور مقایسه از مقادیر ایمپالس نزدیک به مدل رگرسیونی استفاده شده است. همان طور که مشخص است مدل رگرسیونی پیش‌بینی خیلی خوبی از مقدار تغییر شکل ورق مستطیلی داشته است و بیشترین خطا برابر ۶/۴٪ است.

**جدول ۷** مشخصات پارامترهای مستقل و خروجی در بارگذاری دینامیکی یکنواخت برای تعیین شرایط بهینه

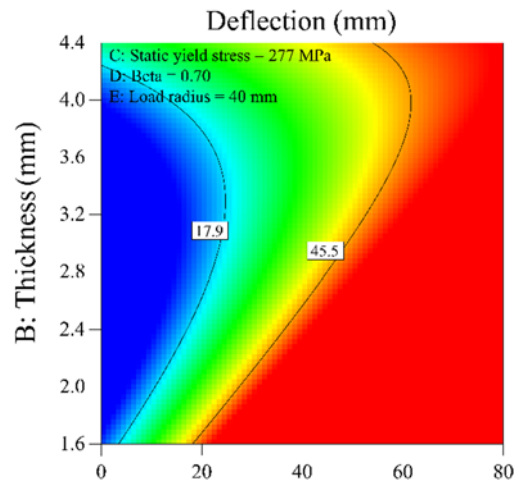
پارامتر	هدف	حد پایین	حد بالا	درجه اهمیت
ایمپالس (N.s)	در بازه	۳	۱۹	۳
ضخامت (mm)	کمترین	۱/۶	۴/۴	۳
تنش تسلیم (MPa)	در بازه	۲۳۳	۲۹۶	۳
نسبت عرض به طول	در بازه	۰/۵	۱	۳
تغییر شکل (mm)	کمترین	۱۰	۲۱/۳	۵

**جدول ۸** مشخصات پارامترهای مستقل و خروجی در بارگذاری دینامیکی محلی برای تعیین شرایط بهینه

پارامتر	هدف	حد پایین	حد بالا	درجه اهمیت
ایمپالس (N.s)	در بازه	۴	۷۷	۳
ضخامت (mm)	کمترین	۱/۶	۴	۳
تنش تسلیم (MPa)	در بازه	۲۳۰	۳۲۴	۳
نسبت عرض به طول	در بازه	۰/۴	۱	۳
شعاع خرج (mm)	در بازه	۱۰	۷۰	۳
تغییر شکل (mm)	کمترین	۱۲	۵۲/۵	۵

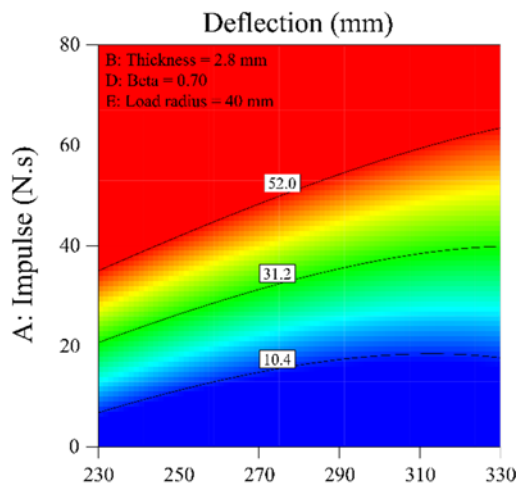
**جدول ۹** شرایط بهینه برای مشخصات پارامترهای جدول ۷

پارامتر	شماره				
	۱	۲	۳	۴	۵
ایمپالس (N.s)	۸/۷	۸/۶	۹/۰	۶/۸	۱۰/۷
ضخامت (mm)	۱/۶	۱/۶	۱/۶	۱/۶	۱/۵
تنش تسلیم (MPa)	۲۸۵	۲۹۰	۲۹۳	۲۶۰	۲۹۶
$\beta$	۰/۶	۱	۰/۵	۰/۹	۰/۶۸
خیز (mm)	۸/۸	۹/۹	۷/۶	۹/۹	۹/۸
D	۱	۱	۱	۱	۱



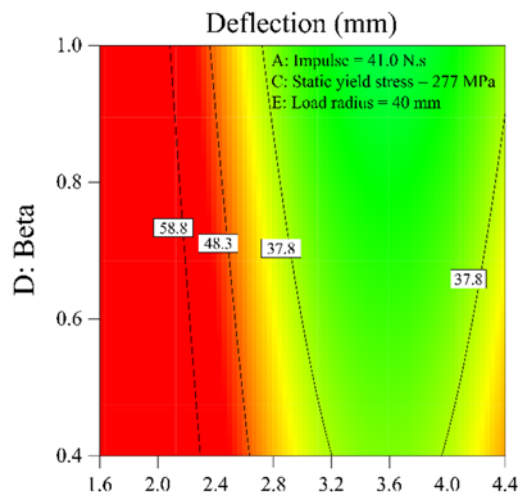
**A: Impulse (N.s)**

**نمودار ۱۲** خیز ورق مستطیلی تحت بارگذاری دینامیکی محلی با تغییرات ضخامت ورق و ایمپالس



**C: Static yield stress (MPa)**

**نمودار ۱۳** خیز ورق مستطیلی تحت بارگذاری دینامیکی محلی با تغییرات ایمپالس و تنش تسلیم



**B: Thickness (m)**

**نمودار ۱۴** خیز ورق مستطیلی تحت بارگذاری دینامیکی محلی با تغییرات ضخامت ورق و نسبت عرض به طول

پارامتر	شماره				
	۵	۴	۳	۲	۱
ایمپالس (N.s)	۷	۴/۱	۴/۸	۷/۸	۵/۱
شعاع خرج (mm)	۶۰	۵۲	۲۷	۴۶	۶۸
تنش تسلیم (MPa)	۳۱۳	۳۰۶	۳۰۱	۳۲۳	۲۷۵
$\beta$	۱	۰/۷	۰/۶	۰/۸	۱
خیز (mm)	۸/۲	۱۱/۳	۹/۸	۱۰/۳	۱۱/۴
D	۱	۱	۱	۱	۱

### نتیجه گیری

تغییر شکل ورق‌های مستطیلی تحت بارگذاری دفعی حاصل از انفجار، مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از ۲۶۵ داده تجربی موجود در ادبیات تحقیق و همچنین داده‌های آزمایشگاهی، به بهینه‌سازی پارامترهای موثر در تغییر شکل پلاستیک ورق‌های مستطیلی تحت بارگذاری یکنواخت و محلی پرداخته شد. در بخش مدل‌سازی، برای دو نوع بارگذاری یکنواخت و محلی 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  $R^2_{adj}$  به‌دست آمدند. 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 دارند. نتایج نشان داد که برای هر دو بارگذاری، افزایش ضخامت ورق، تأثیر ایمپالس روی بیشترین تغییر شکل ورق را افزایش می‌دهد. همچنین برای بارگذاری یکنواخت، افزایش نسبت عرض به طول ورق، تأثیر ایمپالس و تنش تسلیم استاتیکی را همزمان روی بیشترین تغییر شکل ورق را افزایش می‌دهد.

**تشکر و قدردانی:** نویسندگان مراتب قدردانی خود را از کارکنان دانشگاه گیلان و دانشگاه ایوان کی اعلام می‌دارند.

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

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

**سهم نویسندگان:** وحید میرزابابای مستوفی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۳۵٪)؛ مصطفی سیاح بادخور (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۳۵٪)؛ هاشم بابایی (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی (۳۰٪).

**منابع مالی:** کلیه هزینه‌ها توسط نویسندگان تأمین شده است.

### منابع

International Journal of Solids and Structures. 1971;7(8):1007-1029.

3- Olson MD, Nurick GN, Fagnan JR. Deformation and rupture of blast loaded square plates-predictions and experiments. International Journal of Impact Engineering. 1993;13(2):279-291.

4- Nurick GN, Conolly AG. Response of clamped single and double stiffened rectangular plates subjected to blast loads. WIT Transactions on The Built Environment. 1970;8:207-220.

5- Nurick GN, Shave GC. The deformation and tearing of thin square plates subjected to impulsive loads-an experimental study. International Journal of Impact Engineering. 1996;18(1):99-116.

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

7- Yuen SCK, Nurick GN. Experimental and numerical studies on the response of quadrangular stiffened plates. Part I: subjected to uniform blast load. International Journal of Impact Engineering. 2005;31(1):55-83.

8- Bonorchis D, Nurick GN. The effect of welded boundaries on the response of rectangular hot-rolled mild steel plates subjected to localised blast loading. International Journal of Impact Engineering. 2007;34(11):1729-1738.

9- Nurick G, 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.

10- 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.

11- Nurick G, 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.

12- Chen W. A new bound solution for quadrangular plates subjected to impulsive loads. The Third International Offshore and Polar Engineering Conference, 6-11 June 1993, Singapore, Singapore. Mountain View: International Society of Offshore and Polar Engineers; 1993

13- Shen WQ, Jones N. Dynamic response and failure of fully clamped circular plates under impulsive loading. International Journal of Impact Engineering. 1993;13(2):259-278.

14- Li QM, Jones N. On dimensionless numbers for dynamic plastic response of structural members. Archive of Applied Mechanics. 2000;70(4):245-254.

15- Park BW, Cho SR. Simple design formulae for predicting the residual damage of unstiffened and stiffened plates under explosion loadings. International Journal of Impact Engineering. 2006;32(10):1721-1736.

16- Jones N. Dynamic inelastic response of strain rate sensitive ductile plates due to large impact, dynamic pressure and explosive loadings. International Journal of Impact Engineering. 2014;74:3-15.

17- Mirzababaei 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.

1- Jones N, Uran TO, Tekin SA. The dynamic plastic behavior of fully clamped rectangular plates. International Journal of Solids and Structures. 1970;6(12):1499-1512.

2- Jones N. A theoretical study of the dynamic plastic behavior of beams and plates with finite-deflections.

with internal networking. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2018;26(19):1644-1660.

23- 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.

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

25- 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.

26- 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):12235.

18- 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.

19- Yuen SCK, Nurick GN, Langdon GS, 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.

20. 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]

21. 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]

22- Bigdeli A, Damghani Nouri M. Experimental and numerical analysis and multi-objective optimization of quasi-static compressive test on thin-walled cylindrical