



## بررسی اثر فاصله استقرار خرج انفجاری روی تغییر شکل ورق‌های فلزی دایروی

مصطفی سیاح بادخور<sup>۱</sup>، توحید میرزابابای مستوفی<sup>۱</sup> و هاشم بابایی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ایوان کی، ایوان کی، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

یادداشت تحقیقاتی، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۰۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۳/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۱۹

### چکیده

در این مقاله به بررسی تجربی و تحلیل رگرسیونی پاسخ دینامیکی ورق‌های فلزی تحت بار انفجاری پرداخته شده است. بدین منظور در بخش تجربی، ۸۶ آزمایش روی ورق‌های فلزی در شرایط مختلف انجام شد. این ورق‌ها از جنس‌های فولاد، مس و آلومینیوم و به شکل دایره بودند. با استفاده از نرم‌افزار طراح آزمایش و روش سطح پاسخ اثر پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایش تجربی که عبارتند از ضخامت ورق، ایمپالس بارگذاری، جرم خرج و فاصله استقرار روی خمیز ورق‌های دایره‌ای به صورت هم‌زمان بررسی شدند. در این بررسی جنس ورق‌ها به عنوان یک پارامتر مستقل کیفی در نظر گرفته شده است. به منظور دستیابی به یک مدل معنی‌دار، سطح اطمینان ۹۵٪ در بررسی در نظر گرفته شد. در این بررسی مقدار  $R^2$  و  $R_{adj}^2$  به ترتیب برابر ۰/۹۷۴۶ و ۰/۹۶۷۳ به دست آمده است. نتایج به دست آمده در بخش تحلیل آماری، حاکی از آن است که مقادیر به دست آمده از پیش‌بینی مدل‌ها با داده‌های تجربی مطابقت خوبی دارد و مدل‌های ارائه شده مناسب است. شرایط بهینه برای کم‌ترین تغییر شکل ورق‌های تک‌لایه دایره‌ای تحت بارگذاری دینامیکی نیز ارائه شد. ایمپالس بارگذاری، بیش‌ترین و جرم خرج، کم‌ترین تاثیر را روی تغییر شکل ورق دارند.

**کلمات کلیدی:** بارگذاری دینامیکی؛ آزمایش تجربی؛ تحلیل رگرسیونی؛ روش سطح پاسخ.

## Investigation of the Influence of Standoff Distance of Explosive Charge on the Response of Circular Metallic Plates

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

<sup>1</sup> Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran.

<sup>2</sup> Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

### Abstract

In this paper, the experimental study and regression analysis of the dynamic response of metal plates under impulsive loading are investigated. For this purpose, in the experimental section, 86 experiments were performed on metal plates under different conditions. The plates were made of steel, copper and aluminum in a circular shape. The effect of the measured parameters in the experimental tests such as plate thickness, loading impulse, charge mass, and standoff distance on the circular plates deflection were evaluated simultaneously using the Design-Expert software package and response surface methodology. In this study, the material of the plates is considered as an independent qualitative parameter. In order to find a significant model, the confidence level of 95% was considered in the analysis. In this study, the value of  $R^2$  and  $R_{adj}^2$  was 0.9746 and 0.9673, respectively. The results show that the predicted values of the models are in good agreement with the experimental tests and the presented models are suitable. Optimal conditions for the minimum deflection of the circular plates under impulsive loading were also presented. The impulse loading has the highest effect and the mass of the charge has the least effect on the plate deflection.

**Keywords:** Dynamic loading; Experimental test; regression analysis; response surface methodology.

## ۱- مقدمه

تغییر شکل ورق‌های فلزی همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. پژوهشگران روش‌های تجربی مختلفی را برای انجام آزمایش‌های انفجاری شکل دهی آزاد ورق‌های دایره‌ای بکار برده‌اند. یکی از این روش‌ها، انجام آزمایش در زیر آب است. هرچند که این روش از نظر ایمنی، کاهش صدا و همچنین بازدهی بار انفجاری مفید است، اما اندازه‌گیری پارامترهای ورودی و یا به عبارتی اندازه‌گیری بار ایمپالس امکان‌پذیر نمی‌باشد. از دیگر روش‌های متداول، استفاده از مواد مسطح انفجاری در هوا است. در این روش، ماده منفجره بطور یکنواخت تمام یا قسمتی از سطح ورق را پوشانده است؛ همچنین در بعضی مواقع مواد منفجره به صورت دایره‌های هم مرکز حلقوی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این روش، ایمپالس ورودی ناشی از انفجار توسط یک پاندول بالستیک اندازه‌گیری می‌شود. آنچه در مطالعه‌های تجربی فرآیند شکل دهی انفجاری از اهمیت بسزایی برخوردار است، شناخت و ارزیابی رفتار ورق‌ها تحت آزمایش نسبت به بار ایمپالسی است.

مطالعات تجربی در زمینه شکل‌دهی ورق‌های دایره‌ای تحت بارگذاری انفجاری از دهه ۱۹۶۰ آغاز شد. آزمایش‌های اولیه به‌وسیله سامانه‌های استاتیکی داخل آب یا در هوای آزاد انجام شده بود و میزان شکل‌گیری ورق به‌عنوان پارامتر خروجی مورد توجه قرار گرفته بود. در سال‌های ۱۹۸۵ تا ۱۹۸۹، نوریک و مارتین در آزمایش‌های تجربی خود به شکل‌دهی ورق‌های دایروی و مستطیلی گیردار از جنس فولاد تحت بار انفجاری مسطح حلقوی پرداختند. در این آزمایش‌ها، مقادیر ایمپالس با استفاده از یک پاندول بالستیک اندازه‌گیری شد و همچنین با به‌کارگیری روش تداخل نور، تاریخچه جابجایی - زمان ثبت شد [۴ و ۵]. نوریک و رافورد، آزمایش‌هایی را با هدف بررسی اثر ابعاد هندسی خرج بر تغییر شکل ورق‌های فولادی تحت بار انفجاری حاصل از خرج‌های مسطح دیسکی انجام دادند. آن‌ها مقادیر ایمپالس مختلف را با پاندول بالستیک اندازه‌گیری کردند [۶]. یوان و نوریک، اهمیت ضخامت ورق تحت بارهای انفجاری غیریکنواخت را با توجه به شکست ماده مورد مطالعه قراردادند. به همین منظور، یک سری آزمایش روی ورق‌های فولادی گیردار با ضخامت‌های متفاوت تحت بار انفجاری

غیریکنواخت انجام دادند [۷]. کولوت و همکارانش، به آزمایش تجربی تغییر شکل و شکست برشی ورق‌های دایروی تحت بار انفجاری پرداختند. در این آزمایش‌ها، زمان رخ دادن شکست برشی و همچنین میزان نیروی برشی اندازه‌گیری شده بود [۸]. ژاکوب و همکارانش، اثر فاصله استقرار و جرم خرج را بر پاسخ دینامیکی ورق‌های دایروی گیردار از جنس فولاد تحت بار انفجاری بررسی کردند [۹]. در سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۲، بابایی و همکارانش به آزمایش تجربی، تحلیلی و عددی تغییر شکل پلاستیک ورق‌های دایروی گیردار فولادی، مسی و آلومینیومی تحت شرایط بارگذاری انفجاری یکنواخت و غیریکنواخت پرداختند. آن‌ها آزمایش‌های تجربی زیادی را با به کار بردن پاندول بالستیک به همراه لوله‌های فولادی به‌عنوان فاصله استقرار خرج انجام دادند. آن‌ها دریافتند که پارامترهایی نظیر، خواص مکانیکی ورق، ضخامت آن و فاصله استقرار خرج تا ورق روی خیز مرکز ورق مؤثر است [۱۰-۱۳]. هوانگ و همکارانش، به آزمایش تجربی پاسخ دینامیکی و شکست ورق‌های فلزی تک لایه تحت بارهای دفعی مبتنی بر آب<sup>۱</sup> پرداختند. آزمایش تجربی متمرکز بر اثرهای ضخامت ورق، پارامتر اندرکنش بین جامد و سیال، مساحت ناحیه شکل‌گیری بر میزان تغییر شکل و شکست اهداف آلومینیومی تحت شرایط بارگذاری دفعی مبتنی بر آب و هوا با شدت‌های بود. آن‌ها دریافتند که خیز ورق تحت بارگذاری دفعی مبتنی بر آب در مقایسه با هوا به میزان ۵۳٪ کاهش می‌یابد [۱۴ و ۱۵].

سیاح بادخور و همکارانش در سال ۲۰۱۹، به مطالعه عددی و بهینه‌سازی رفتار پانل‌های ساندویچی با هسته مشبک تحت بارگذاری دفعی با استفاده از روش سطح پاسخ پرداختند. آن‌ها اثر شرایط مختلف بارگذاری و همچنین هندسه ورق بر رفتار پانل‌های ساندویچی تحت بارگذاری دفعی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در بررسی خود، ابتدا یک مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، جهت شبیه‌سازی پاسخ دینامیکی و تغییر شکل پلاستیک پانل‌های ساندویچی انجام دادند. سپس در بحث بررسی پارامتریک، تأثیر پارامترهای مؤثر بر مقاومت این پانل ساندویچی نظیر، ضخامت صفحات بالا و پایین فلزی، تعداد صفحات در هسته

<sup>1</sup> Water-Based Impulsive Loads

سبز و مقاومت سبز به صورت همزمان مورد بررسی قرار دهند. نتایج کار آنها نشان داد که برای دستیابی به بهینه‌ترین حالت یعنی، بیشترین مقدار چگالی سبز و مقاومت سبز باید اندازه دانه‌بندی ذرات، جرم و ارتفاع چکش بیشترین مقادیر خود را داشته باشند. بیش‌ترین و کمترین تأثیر بر پاسخ‌ها را به ترتیب ارتفاع چکش و اندازه دانه‌بندی ذرات داشتند [۲۰].

با مرور پژوهش‌های پیشین محققان این نتیجه حاصل شد که بهینه‌سازی هم‌زمان پارامترهای مؤثر در زمینه شکل‌دهی انفجاری ورق با خرج انفجاری [۲۱-۲۵]، بر خلف روش شکل‌دهی انفجار مخلوط گاز [۲۶-۳۲] انجام نشده است؛ بنابراین در این مقاله به بررسی تغییر شکل ورق‌های دایروی و بهینه‌سازی پارامترهای آن‌ها پرداخته شده است. در بخش تجربی از سه جنس فولادی، مسی و آلومینیومی برای ورق‌ها استفاده شده است. در بخش مدل‌سازی نیز، از نرم‌افزار طراح آزمایش و روش سطح پاسخ استفاده شده است. ضمن ارائه یک مدل مناسب برای تحلیل داده‌ها، به بهینه‌سازی آنها نیز پرداخته شده است. بر این اساس با در نظر گرفتن شرایط بهینه و استفاده از مدل ارائه شده، مقادیر خروجی تعیین و با آزمایش‌های تجربی نیز مقایسه شده است.

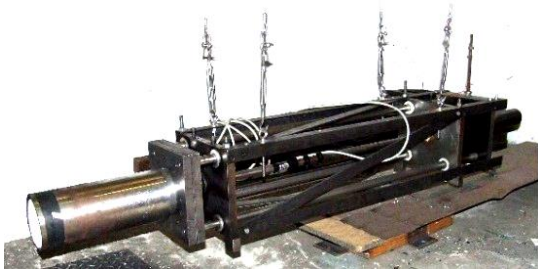
## ۲- بخش تجربی

نمونه ورق‌های مورد آزمایش از سه جنس مختلف فولاد، مس و آلومینیوم و در ضخامت‌های ۱/۶، ۲ و ۳ میلی‌متر تهیه شده است. ابتدا نمونه ورق‌ها به صورت مربعی در ابعاد  $200 \times 200$  میلی‌متر آماده شده است. ورق‌های آماده شده جهت نصب مهار روی آن، سوراخ‌کاری شده است. سپس نمونه‌ها میان دو صفحه فولادی به ابعاد  $200 \times 200$  میلی‌متر و با ضخامت ۲۰ میلی‌متر قرار داده شده و به وسیله پیچ‌هایی کاملاً مهار شده است که در پیرامون صفحه‌های گیره تعبیه شده‌اند. در وسط هر یک از صفحه‌های 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. در این آزمایش‌ها، دو فاصله استقرار برای ایجاد دو گستره بار متفاوت در نظر گرفته شده است. به همین دلیل از دو لوله فولادی با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و به طول ۵۰ و ۳۰۰ میلی‌متر استفاده شده است. این لوله‌ها به صفحه جلویی گیره ورق متصل و در دهانه دیگر لوله خرج

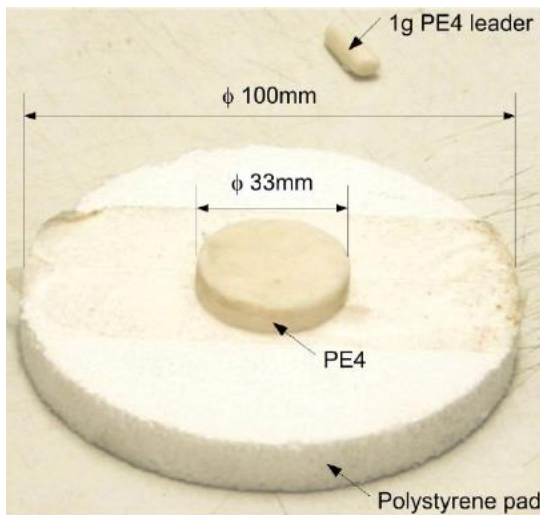
و همچنین ضخامت آن‌ها تحت بارگذاری انفجاری با جرم خرج‌های مختلف ۰/۵، ۱ و ۱/۵ کیلوگرم را مورد مطالعه قرار دادند. در انتها نیز استفاده از نرم‌افزار طراح آزمایش به روش سطح پاسخ، مدلی مناسب جهت پیش‌بینی میزان تغییر شکل مرکزی صفحات بالا و پایین پانل ساندویچی ارائه کردند [۱۶]. علی بیگدلی و همکارانش، با استفاده از روش سطح پاسخ به مطالعه تجربی و عددی شرایط بهینه برای فشرده‌سازی استاتیکی سیلندرهای جدار نازک پرداختند. آنها ضمن مطالعه تأثیر پارامترهای مختلف به صورت هم‌زمان، شرایط بهینه را نیز تعیین کردند [۱۷]. سیاح بادخور و همکارانش، به مطالعه تجربی و مدل‌سازی پاسخ ضربه سرعت‌پایین روی ورق تحت بار هیدرودینامیکی با هندسه‌های مختلف پرداختند. آنها در کار خود از روش رویه پاسخ استفاده کردند. آنها در تحلیل خود، پارامترهای مستقل کمی را ضخامت ورق، ارتفاع وزنه و جرم وزنه و پارامترهای مستقل کیفی را هندسه ورق و جنس ورق در نظر گرفتند. آنها نتیجه گرفتند که ارتفاع وزنه، بیشترین تأثیر و جرم چکش نیز، کمترین تأثیر را در تغییر شکل هر سه ورق دارد [۱۸]. در همین سال، میرزابابای مستوفی و سیاح بادخور به آزمایش تجربی و بهینه‌سازی پاسخ دینامیکی ورق‌های فلز - پلیمر تحت بار ضربه‌ای با استفاده از روش رویه پاسخ پرداختند. آنها تأثیر پارامترهای مستقل یعنی، ضخامت ورق فلزی، ضخامت روکش پلیمری و ایمپالس بارگذاری ناشی از بار انفجار مخلوط گازی روی خروجی یعنی تغییر شکل ساختار دولایه را با استفاده از روش رویه پاسخ تعیین کردند. آنها دریافتند که مقادیر به دست آمده از پیش‌بینی مدل با نتایج تجربی برای خروجی، مطابقت خوبی دارد. آنها همچنین شرایط بهینه برای کمترین تغییر شکل ساختار دولایه را تعیین و با نتایج آزمایش‌های تجربی مقایسه کردند [۱۹]. در ادامه نیز، سیاح بادخور و همکارانش، به انجام آزمایش‌های تجربی و بهینه‌سازی رفتار دینامیکی پودرهای فلزی تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت‌پایین مبادرت کردند. آنها در بخش تجربی برای تراکم دینامیکی پودرهای آلومینیومی تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت‌پایین از سامانه چکش پرتابه‌ای و در بخش بهینه‌سازی نیز، از نرم‌افزار طراح آزمایش و روش سطح پاسخ استفاده کردند. آنها توانستند، اثر پارامترهای مستقل شامل، اندازه دانه‌بندی ذرات، جرم و ارتفاع چکش را روی چگالی

### ۲-۱- خواص مکانیکی مواد

خواص مکانیکی مواد مورد استفاده در آزمایش‌ها از انجام آزمایش کشش تک‌محوری روی نمونه‌های آماده شده از ورق‌هایی از جنس فولاد، مس و آلیاژ آلومینیوم به دست آمده است. مقادیر تنش نهایی و تنش تسلیم برای هر کدام از ورق‌ها در جدول ۲ آماده است.



شکل ۱- سامانه پاندول مورد استفاده در انجام آزمایش‌ها



شکل ۲- نحوه آماده‌سازی خرج انفجاری

### جدول ۲- خواص مکانیکی ورق‌ها

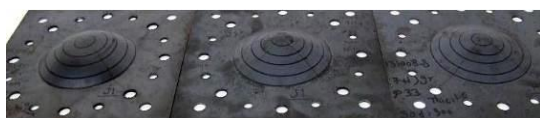
ماده	ضخامت ورق (mm)	تنش تسلیم (MPa)	مدول الاستیک (GPa)
فولاد	۳، ۲، ۱/۶	۳۱۸	۲۰۷
آلومینیوم	۲	۱۰۲	۱۲۹/۸
مس	۳	۱۰۲	۷۰

انفجاری قرار داده می‌شود. خرج روی یک فوم پلی‌استر قرار داده شده که به قطر لوله و ضخامت ۱۵ میلی‌متر است و توسط آن در مرکز لوله نصب شده است. هدف از به‌کارگیری آن، جلوگیری از آسیب ورق بر اثر انفجار و تثبیت مکانی خرج است. خرج انفجاری بکار رفته در این آزمایش‌ها از نوع C4 است. سامانه بکار رفته در انجام این آزمایش‌ها، در شکل ۱ نشان داده شده است.

نحوه آماده‌سازی خرج در شکل ۲ نشان داده شده است. چاشنی انفجار از نوع الکتریکی است که به وسیله یک گرم از خرج در مرکز به دیسک خرج اصلی متصل می‌شود. با توجه به نحوه قرارگیری خرج، دو نوع بارگذاری مختلف وجود دارد. بارگذاری غیریکنواخت و یکنواخت این دو نوع بارگذاری هستند. در مورد بارگذاری غیریکنواخت، خرج انفجاری به صورت یک دیسک استوانه‌ای شکل با ضخامت و شعاع مشخص روی فوم قرار داده می‌شود؛ بنابراین، توزیع بار ایмпالسی به وجود آمده 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 ۲ طرح دایره‌ای به ابعاد مشخص است. طرح‌های ایجاد شده 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. خلاصه‌ای از جزئیات و مشخصات تجهیزات این مجموعه آزمایش‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

### جدول ۱- شرایط مورد استفاده در آزمایش

پارامتر	وضعیت
جنس ورق‌ها	فولاد، آلومینیوم و مس
قطر دایره (میلی‌متر)	۱۰۰
ضخامت ورق (میلی‌متر)	۱/۶، ۲ و ۳
فواصل استقرار خرج (میلی‌متر)	۳۰ و ۵۰
قطر دیسک خرج (میلی‌متر)	۲۰ و ۳۳
حداقل و حداکثر جرم خرج (گرم)	۲-۱۹



(الف) ورق فولادی



(ب) ورق مسی



(ج) ورق آلومینیومی

شکل ۳- تصویر نمونه‌های آزمایش شده

به منظور بررسی تأثیر پارامترها، ۵ متغیر به عنوان ورودی و یک متغیر به عنوان خروجی در نظر گرفته شده است. تغییر شکل ورق دایره‌ای به عنوان پارامتر خروجی و ضخامت ورق دایره‌ای، ایمپالس بارگذاری، شعاع خرج مورد استفاده، فاصله خرج تا ورق دایره‌ای و جنس ورق به عنوان پارامترهای ورودی هستند. پارامترهای ضخامت ورق دایره‌ای، ایمپالس بارگذاری، شعاع خرج مورد استفاده و فاصله خرج تا ورق دایره‌ای، به عنوان پارامترهای کمی و جنس ورق، به عنوان پارامتر کیفی در نظر گرفته شده است. در جدول ۳، نماد این پارامترها و تغییرات آنها آمده است.

رابطه بین خروجی و پارامترهای مستقل به صورت یک چند جمله‌ای 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 محاسبه شده،  $X_1$  و  $X_j$  متغیرهای کدگذاری شده،  $\beta_0$  ضریب ثابت،  $\beta_j$  ضریب خطی،  $\beta_{ij}$  ضریب مرتبه دوم و  $\beta_{ij}$  ضریب متقابل است [۱۶].

### ۳-۱- تحلیل واریانس تغییر شکل ورق

پس از بررسی مدل‌های گوناگون، استفاده از روش تحلیل آماری واریانس، تحلیل پارامترهای مستقل و کمیت‌های  $R^2$  و  $R_{adj}^2$  مشخص شد که از بین مدل‌های پیشنهاد شده، مدل درجه دوم اصلاحی، تطبیق بهتری با نتایج آزمایش‌ها برای

### ۲-۲- نتایج آزمایش‌ها

تغییر شکل ورق‌ها در این آزمایش‌ها، نشان‌دهنده پاسخ و رفتار مکانیکی ورق‌ها تحت بارگذاری انفجاری است که در آن اثر تغییرات جنس ورق، ضخامت ورق، مقدار خرج، فاصله استقرار خرج و ایمپالس بارگذاری مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده در جدول الف بخش ضمایم آورده شده است. تصویر نمونه‌های آزمایش شده در شکل ۳ نشان داده شده است.

### ۳- بخش مدل‌سازی

در فرآیند تغییر شکل ورق‌ها تحت بار ضربه‌ای سرعت پایین و بالا [۳۳-۴۲]، بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بسیار اهمیت دارد. این پارامترها هرکدام به تنهایی یک تأثیر مشخص روی تغییر شکل ورق دارند؛ اما بررسی هم‌زمان آنها است که تأثیر واقعی را مشخص می‌کند. در نرم‌افزار طراح آزمایش با استفاده از روش رویه پاسخ می‌توان به خوبی تأثیر و برهمکنش بین پارامترها را مشخص کرد. در این روش، انجام تعدادی آزمایش تعیین شده توسط نرم‌افزار طراح آزمایش یا استفاده از نتایج آزمایش‌های انجام شده، می‌تواند تأثیر پارامترهای مهم را بر خروجی‌های نهایی تعیین نماید.

در این مقاله به منظور تعیین تأثیر پارامترهای فرآیند تغییر شکل ورق‌های تک لایه دایره‌ای تحت بارگذاری دینامیکی با توزیع یکنواخت و محلی، از آزمایش‌های انجام شده در بخش تجربی، استفاده شده است. از مجموع ۷۷ آزمایش انجام شده که داده‌های آنها در جدول ب آمده، استفاده شده است؛ بنابراین با توجه به داشتن اطلاعات مربوط به آزمایش از طرح داده‌های تجربی در نرم‌افزار طراح آزمایش استفاده شده است. روش سطح پاسخ به منظور تجزیه و تحلیل نتایج، از ابزار قدرتمندی به نام تحلیل واریانس<sup>۳</sup> استفاده می‌کند. نتایج تحلیل واریانس به طور معمول به صورت جدولی شامل، مجموع مربعات هر عامل و خطا، درجه آزادی هر عامل و خطا، میانگین مربعات (واریانس) هر عامل و خطا، پارامتر معنی‌داری پاسخ برای عامل (F) و سهم هر عامل در پاسخ (p-value) ارائه شده است.

<sup>1</sup> Response Surface Method

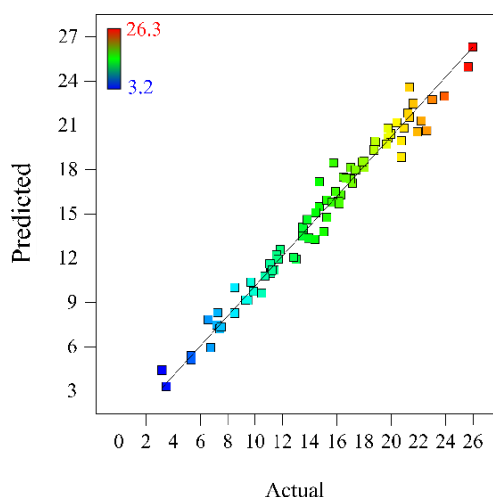
<sup>2</sup> Historical Data

<sup>3</sup> ANOVA

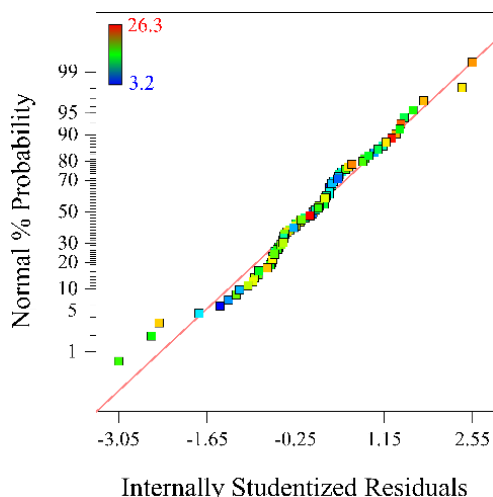
نمودارهای احتمال نرمال باقی‌مانده‌ها و باقی‌مانده‌ها برحسب مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط روش سطح پاسخ به ترتیب در شکل ۵ و شکل ۶ بعد از حذف عوامل غیر مؤثر در مدل رگرسیونی نشان داده شده است. طبق یک قانون کلی برای احتمال نرمال باقی‌مانده‌ها، داده‌های این نمودار باید ۳ مشخصه داشته باشند؛ اول اینکه باید داده‌های احتمالی بین

جدول ۳- پارامترهای روش سطح پاسخ و تغییرهای آنها

پارامتر	واحد	نماد	حداقل	حداکثر
ایمپالس	N.s	X <sub>1</sub>	۵	۳۵
ضخامت ورق دایره‌ای	mm	X <sub>2</sub>	۱	۳
جرم خرج	gr	X <sub>3</sub>	۲	۱۹
فاصله استقرار	mm	X <sub>4</sub>	۵۰	۳۰۰
جنس ورق	-	X <sub>5</sub>	-	-
تغییر شکل ورق دایره‌ای	mm	Y	-	-



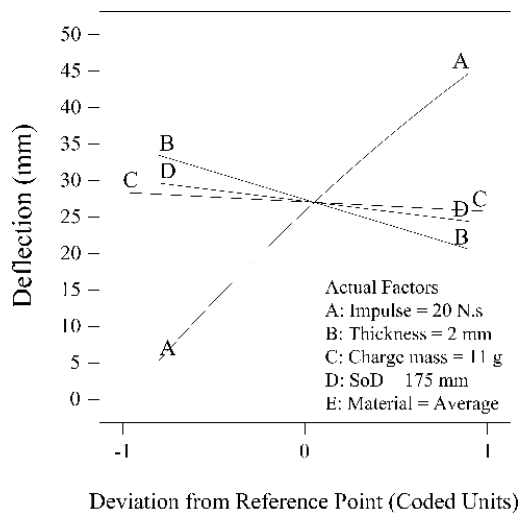
شکل ۴- مقایسه بین مقادیر پیش‌بینی شده در روش سطح پاسخ و مقادیر واقعی



شکل ۵- نمودار احتمال نرمال باقی‌مانده‌ها

تغییر شکل ورق‌های تک لایه دایره‌ای تحت بارگذاری دینامیکی دارد. آنالیز واریانس برای عواملی که مقدار p-value آنها کمتر از ۰/۱ بود، در جدول ب ضمایم 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. مقدار R<sup>2</sup> و R<sup>2</sup><sub>adj</sub> به ترتیب برابر ۰/۹۶۷۳ و ۰/۹۷۴۶ به دست آمده است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که مدل ارائه شده برای این آزمایش‌ها مناسب بوده و مقادیر به دست آمده از آزمایش‌ها با مقادیر پیش‌بینی‌شده برای خروجی، بر اساس مدل مطابقت دارد. مدل مرتبه دوم از تحلیل واریانس داده‌ها برای سطح پاسخ تغییر شکل ساختار دولایه به صورت رابطه (۲) به دست آمده است. این رابطه برحسب پارامترهای کدگذاری شده است. در شکل ۴ مقایسه بین مقادیر خروجی یعنی تغییر شکل ورق در دو حالت تجربی و پیش‌بینی‌شده از روش سطح پاسخ نشان داده شده است. نزدیک بودن داده‌ها نزدیک خط مورب، نشان‌دهنده آن است که مدل در نظر گرفته شده، پیش‌بینی خوبی از تغییر شکل ورق‌ها تحت بارگذاری دینامیکی نسبت به آزمایش‌های تجربی دارد؛ همچنین تفاوت رنگ در نقاط داخل شکل، نشان‌دهنده تفاوت در مقدار تغییر شکل ورق‌ها است که از آبی تا قرمز، یعنی از کم تا زیاد نشان داده شده است.

$$Y_1 = 27.01 + 19.67X_1 - 6.43X_2 - 1.10X_3 - 2.62X_4 - 10.68X_5 - 14.67X_1X_2 - 0.88X_1X_4 - 7.73X_1X_5 + 11.33X_2X_3 + 0.74X_2X_4 + 0.6X_2X_5 - 0.088X_4X_5 - 1.95X_1^2 \quad (2)$$



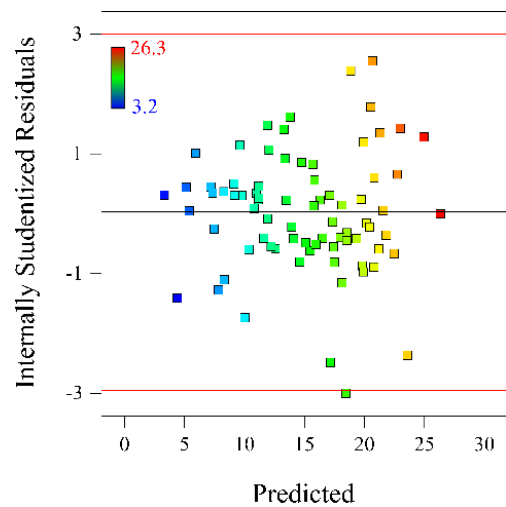
شکل ۷- تأثیر پارامترهای مستقل کمی روی تغییر شکل ورق دایره‌ای

خرج، کم‌ترین تأثیر را روی تغییر شکل ورق‌ها دارند. ضخامت ورق هم بیشتر از فاصله استقرار روی تغییر شکل ورق‌ها مؤثر است.

در شکل ۸، شکل ۹ و شکل ۱۰ اثر متقابل دو پارامتر روی تغییر شکل ورق تحت بارگذاری دینامیکی ضمن ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها به صورت کانتورهای رنگی نشان داده شده است. در هرکدام از این شکل‌ها، تغییرات پارامترهای مستقل کمی برای پارامتر مستقل کیفی، یعنی هر جنس به صورت جداگانه نشان داده شده است. در شکل ۸ جرم خرج و فاصله استقرار ثابت و ضخامت ورق و ایمپالس تغییر می‌کنند. همان‌طور که مشخص است، با کاهش ضخامت ورق و افزایش ایمپالس مقدار تغییر شکل ورق افزایش می‌یابد. این افزایش برای ورق فولادی دارای ناحیه حداکثری کمتر و برای ورق آلومینیومی دارای ناحیه حداکثری بیش‌تر است.

در شکل ۹ ضخامت ورق و جرم خرج ثابت و میزان ایمپالس و فاصله استقرار تغییر می‌کنند. همان‌طور که مشخص است، با افزایش ایمپالس و کاهش فاصله استقرار، مقدار تغییر شکل ورق افزایش می‌یابد. این افزایش برای ورق فولادی دارای ناحیه حداکثری کم‌تر و برای ورق آلومینیومی دارای ناحیه حداکثری بیش‌تر است.

در شکل ۱۰ ایمپالس و جرم خرج پارامترهای ثابت و ضخامت ورق و فاصله استقرار پارامترهای متغیر هستند.



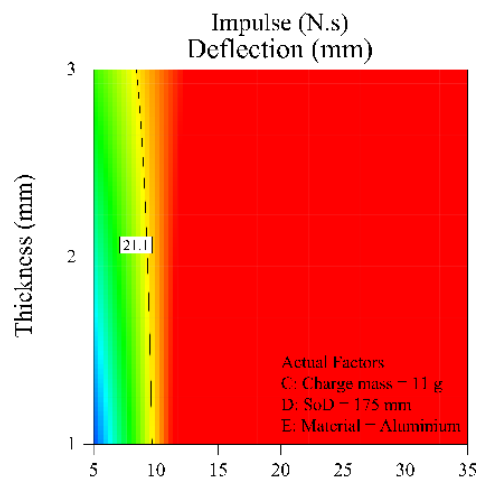
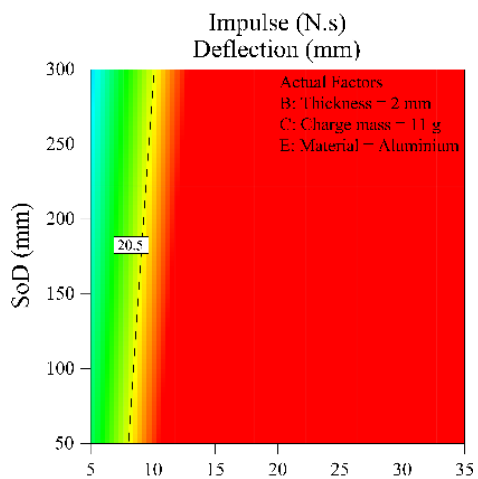
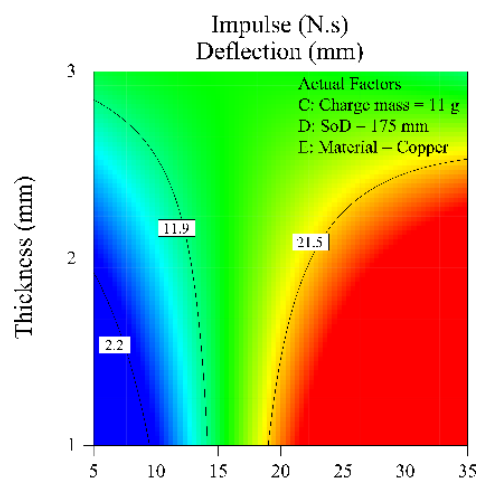
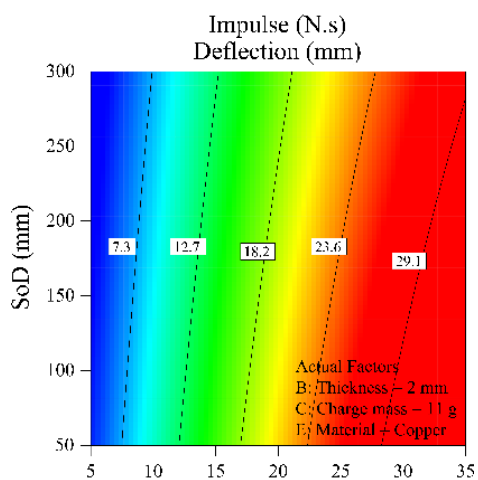
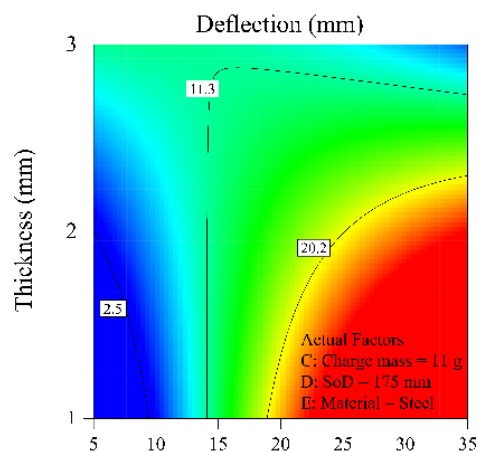
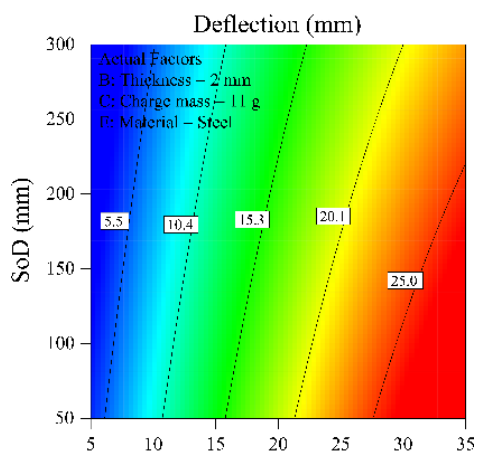
شکل ۶- نمودار باقی‌مانده‌ها بر حسب مقادیر پیش‌بینی شده در روش سطح پاسخ

۲۵ تا ۷۵ باشند، دوم اینکه باید این داده‌ها بیشتر از ۹۹ و کمتر از ۱ نیز نباشند و سوم اینکه باید بیش از ۹۵٪ باقی‌مانده‌ها بین مقادیر ۲ و ۲- باشند.

با توجه به این قانون کلی، نمودار احتمال نرمال باقی‌مانده‌ها، توزیع مناسبی از خطاها دارد و قابل قبول است. در شکل ۶ 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.

### ۳-۲- تحلیل آماری تغییر شکل ورق

در این بخش به تأثیر متقابل پارامترهای مستقل کمی و کیفی به‌طور هم‌زمان روی خروجی پرداخته شده است. در شکل ۷ تأثیر پارامترهای مستقل کمی روی تغییر شکل ورق تحت بارگذاری دینامیکی، نشان داده شده است. در این نمودار با توجه به اینکه جنس ورق به صورت یک پارامتر مستقل کیفی در نظر گرفته شده است، بنابراین از میانگین این پارامتر در این نمودار استفاده شده است. مقدار میانگین در نظر گرفتن نشان‌دهنده رفتار کلی هرکدام از پارامترهای مستقل کمی روی تغییر شکل ورق است. تحلیل این نمودار بدان شکل است که شیب هرکدام از خطوط که بیشتر باشد، نشان‌دهنده تأثیر بیشتر آن پارامتر روی خروجی است؛ بنابراین، ایمپالس حاصل از انفجار بیش‌ترین تأثیر و جرم



شکل ۹- تغییر شکل ورق‌های فولادی، مسی و آلومینیومی تحت بارگذاری دینامیکی به صورت کانتورهای رنگی با تغییرات فاصله استقرار و ایمپالس بارگذاری

شکل ۸- تغییر شکل ورق‌های فولادی، مسی و آلومینیومی تحت بارگذاری دینامیکی به صورت کانتورهای رنگی با تغییرات ضخامت ورق و ایمپالس بارگذاری



۹۵٪ در نظر گرفته شد. با استفاده از تحلیل واریانس مقادیر عددی ضرایب متغیرها، P-value و همچنین  $R^2$  و  $R^2_{adj}$  به دست آمد. با توجه به مقدار بالای ضریب همبستگی به دست آمده از روش سطح پاسخ می‌توان نتیجه گرفت که نتایج حاصل از مدل رگرسیونی، تطابق بسیار خوبی با نتایج تجربی دارد. در بخش مدل‌سازی پارامترهای مستقل به دو صورت کمی و کیفی در نظر گرفته شدند. ایمپالس بارگذاری، ضخامت ورق، جرم خرج و فاصله استقرار به عنوان پارامترهای مستقل کمی، جنس ورق به عنوان پارامتر مستقل کیفی و تغییر شکل ورق هم به عنوان خروجی در نظر گرفته شد. شرایط بهینه نیز با در نظر گرفتن کم‌ترین مقدار تغییر شکل ورق تعیین شد. در بخش بهینه‌سازی تغییرات همه پارامترها در محدوده انتخابی قرار داشت. نتایج زیر از این مدل‌سازی به دست آمده است.

- افزایش ایمپالس بارگذاری، تأثیر کاهش ضخامت ورق را

روی تغییر شکل ورق افزایش می‌دهد؛ بنابراین در ایمپالس‌های بالا، با کاهش ضخامت ورق، مقدار تغییر شکل با شدت بیشتری افزایش می‌یابد. با توجه به نرم بودن جنس آلومینیوم، تغییر شکل آن هم نسبت به سایر جنس‌ها در ایمپالس‌های یکسان، بیشتر است.

- افزایش ایمپالس بارگذاری در فاصله‌های مختلف استقرار تأثیر تقریباً یکسانی روی تغییر شکل ورق دارد، بنابراین با افزایش یا کاهش ایمپالس، میزان تغییر شکل به صورت مساوی در فاصله‌های مختلف استقرار تغییر می‌کند.

- افزایش ضخامت ورق در فاصله‌های مختلف استقرار تأثیر تقریباً یکسانی روی تغییر شکل ورق دارد؛ بنابراین با افزایش یا کاهش ضخامت ورق، میزان تغییر شکل به صورت مساوی در فاصله‌های مختلف استقرار تغییر می‌کند.

- با توجه به اینکه تنش تسلیم ورق فولادی از ورق مسی و ورق مسی از ورق آلومینیومی بیشتر است، بنابراین میزان تغییر شکل ورق فولادی از ورق مسی و ورق مسی از ورق آلومینیومی بیشتر است و این منجر به میزان مطلوبیت کمتر در ورق‌های آلومینیومی شده است.

همان‌طور که مشخص است، با افزایش ضخامت ورق و افزایش فاصله استقرار، مقدار تغییر شکل ورق کاهش می‌یابد. این کاهش برای ورق فولادی دارای ناحیه حداکثری بیش‌تر و برای ورق آلومینیومی، دارای ناحیه حداکثری کم‌تر است.

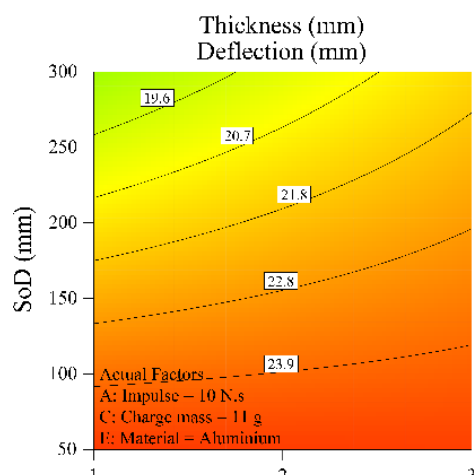
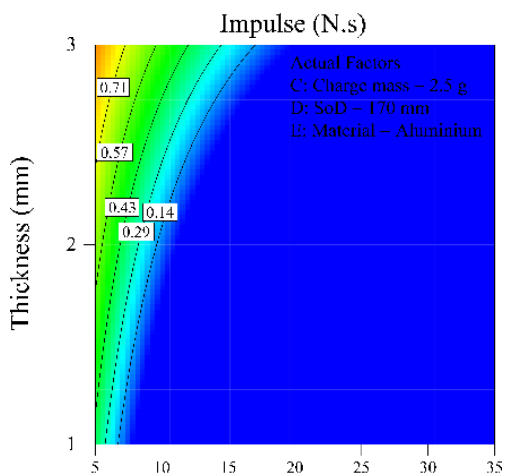
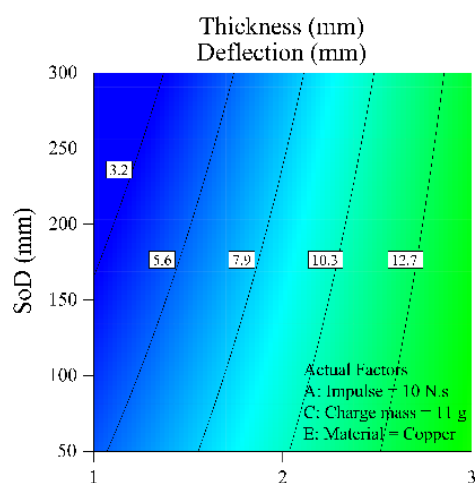
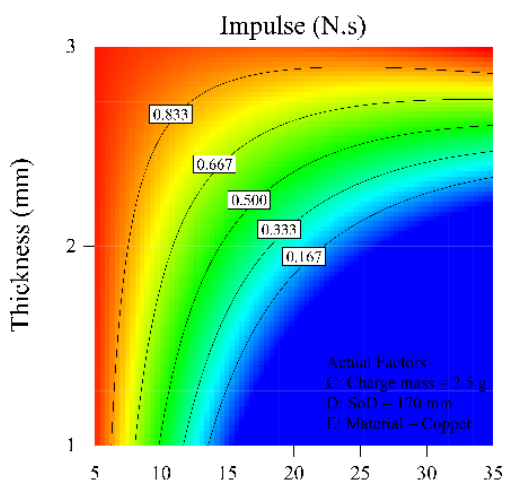
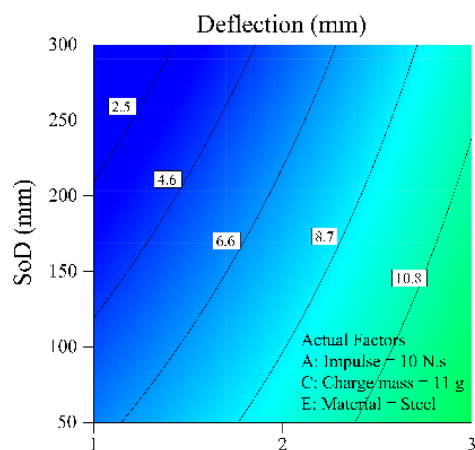
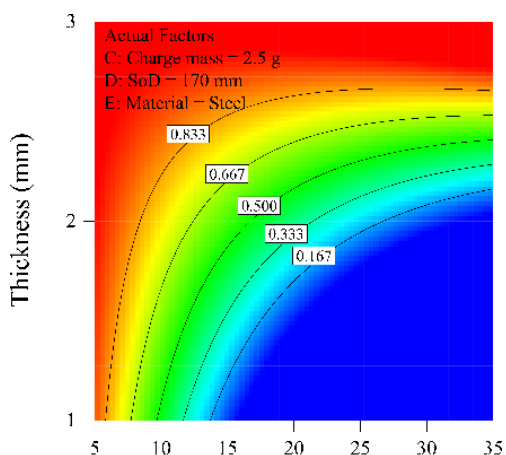
### ۳-۳- تعیین شرایط بهینه

برای تعیین مطلوبیت تأثیر هر کدام از پارامترها بر خروجی نیاز به یک تابع هدف است. با توجه به پارامترهای مستقل کمی و کیفی و خروجی، شرایط بهینه‌سازی عددی در جدول ۴ برای بارگذاری دینامیکی آمده است. در این جدول، هدف بهینه‌سازی هر فاکتور، بازه تغییرات و درجه اهمیت آن بیان شده است. با در نظر گرفتن مقادیر جدول ۴، شرایط بهینه موردنظر به ترتیب مطلوبیت در جدول ۵ آمده است. به منظور داشتن کم‌ترین مقدار تغییر شکل در ساختار تک لایه ورق، همه پارامترهای مستقل کمی در بازه تغییرات خود در نظر گرفته شده است. نزدیک بودن مقدار مطلوبیت به عدد یک، نشان‌دهنده شرایط بهینه، خوب است.

در شکل ۱۱ تغییرات مقادیر مطلوبیت برای هر کدام از جنس‌ها نشان داده شده است. در این شکل مقادیر مطلوبیت بین صفر تا یک متغیر است و بر اساس دو تا از مؤثرترین پارامترها یعنی ایمپالس و ضخامت ورق رسم شده است. برای داشتن تغییر شکل کم باید مقدار ایمپالس کم و ضخامت ورق زیاد باشد؛ بنابراین در گوشه سمت چپ بالا هر کدام از نمودارها در این شکل بیش‌ترین مقدار مطلوبیت است. با توجه به تغییر شکل زیاد ورق آلومینیومی و تغییر شکل کم ورق فولادی، ناحیه حداکثر مطلوبیت در این ورق‌ها به ترتیب کم‌ترین و بیش‌ترین است.

### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تغییر شکل ساختارهای تک لایه فلزی تحت بارگذاری دفعی حاصل از انفجار، مورد بررسی قرار گرفت. ۸۶ آزمایش با استفاده از سه جنس فولاد، مس و آلومینیوم انجام شد. در این آزمایش‌ها تغییرات پارامترهایی از جمله، ضخامت ورق، ایمپالس بارگذاری، جرم خرج و فاصله استقرار روی تغییر شکل ورق مورد بررسی قرار گرفت. در بخش مدل‌سازی با استفاده از روش سطح پاسخ، تأثیر پارامترها بر خروجی تعیین شد. به منظور، معنی‌دار بودن مدل، سطح اطمینان



شکل ۱۱- میزان مطلوبیت ورق‌های فولادی، مسی و آلومینیومی تحت بارگذاری دینامیکی به صورت کانتورهای رنگی بر اساس تغییرات ضخامت ورق و ایمپالس بارگذاری

شکل ۱۰- تغییر شکل ورق‌های فولادی، مسی و آلومینیومی تحت بارگذاری دینامیکی به صورت کانتورهای رنگی با تغییرات ضخامت ورق و فاصله استقرار

جدول ۴- مشخصات پارامترهای مستقل کمی و کیفی و خروجی برای تعیین شرایط بهینه

پارامتر	واحد	هدف	کمترین مقدار	بیشترین مقدار	درجه اهمیت
ایمپالس	N.s	در بازه مقادیر	۵	۳۵	۳
ضخامت ورق	mm	در بازه مقادیر	۱	۳	۳
جرم خرج	gr	در بازه مقادیر	۲	۱۹	۳
فاصله استقرار	mm	در بازه مقادیر	۵۰	۳۰۰	۳
جنس ورق	-	در بازه مقادیر	-	-	۳
تغییر شکل ورق	mm	کمترین مقدار	۳/۲۲	۲۶/۳	۵

جدول ۵- شرایط بهینه برای مشخصات پارامترهای جدول ۴

شماره	ایمپالس (N.s)	ضخامت ورق (mm)	جرم خرج (gr)	فاصله استقرار (mm)	جنس ورق	تغییر شکل ورق (mm)	مطلوبیت
۱	۲۶/۵	۱/۳	۱۲/۱	۲۴۱/۹	فولاد	۲۵/۷	۱
۲	۵/۶	۲/۷	۸/۲	۱۳۷/۱	فولاد	۷/۷	۱
۳	۲۷/۸	۲/۷	۱۳/۷	۲۷۹/۴	مس	۱۸/۸	۱
۴	۸/۲	۲/۱	۱۶/۸	۲۲۸/۴	آلومینیوم	۱۷/۱	۱
۵	۱۴/۷	۳	۲/۷	۵۹/۴	آلومینیوم	۲۲/۸	۱

part II: experimental studies. Int J Impact Eng 8(2): 171-186.

- [6] Nurick GN, Radford AM (1997) Deformation and tearing of clamped circular plates subjected to 185 localized central blast loads. In: Recent developments in computational and applied mechanics: A volume in honour of John B. Martin. Barcelona, Spain: International Centre for Numerical Methods in Engineering 276-301.
- [7] Chung Kim Yuen S, Nurick GN (2000) The significance of the thickness of a plate when subjected to localized blast load. In: 16<sup>th</sup> international symposium on military aspects of blast and shock, MABS 16, Oxford, UK, 491-499.
- [8] Cloete T, Nurick G, Palmer R (2005) The deformation and shear failure of peripherally clamped centrally supported blast loaded circular plates. Int J Impact Eng 32(1): 92-117.

## ۵- مراجع

- [1] Rezasefat M, Mostofi TM, Ozbakkaloglu T (2019) Repeated localized impulsive loading on monolithic and multi-layered metallic plates. Thin Wall Struct 144: 106332.
- [2] Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M, Lu G, Ruan D (2019) Large transverse deformation of double-layered rectangular plates subjected to gas mixture detonation load. Int J Impact Eng 125: 93-106.
- [3] Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M (2017) The influence of gas mixture detonation loads on large plastic deformation of thin quadrangular plates: Experimental investigation and empirical modelling. Thin Walled Struct 118: 1-11.
- [4] Nurick GN, Martin JB (1989) Deformation of thin plates subjected to impulsive loading—a review: Part I: Theoretical considerations. Int J Impact Eng 8(2): 159-170.
- [5] Nurick GN, Martin JB (1989) Deformation of thin plates subjected to impulsive loading—a review

- [20] Badkhor MS, Mostofi TM, Babaei H (2020) Dynamic response of metal powder subjected to low-velocity impact loading: experimental investigation and optimization using response surface methodology. *Modares Mech Eng* 20(4):863-76. (in Persian)
- [21] Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M (2016) Theoretical analysis on the effect of uniform and localized impulsive loading on the dynamic plastic behavior of fully clamped thin quadrangular plates. *Thin-Walled Struct* 109: 367-376.
- [22] Mostofi TM, Golbaf A, Mahmoudi A, Alitavoli M, Babaei H (2018) 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 Struct* 123: 48-56.
- [23] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Armoudli E (2017) On dimensionless numbers for the dynamic plastic response of quadrangular mild steel plates subjected to localized and uniform impulsive loading. *Proc Inst Mech Eng-Part E J Process MechEng* 231(5): 939-950.
- [24] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T (2020) New dimensionless numbers for deformation of circular mild steel plates with large strains as a result of localized and uniform impulsive loading. *Proc Inst Mech Eng-Part L J Mater Des Appl* 234(2): 231-245.
- [25] Rezasefat M, Mirzababaie Mostofi T, Babaei H, Ziya-Shamami M, Alitavoli M (2019) Dynamic plastic response of double-layered circular metallic plates due to localized impulsive loading. *Proc Inst Mech Eng-Part L J Mater Des Appl* 233(7): 1449-1471.
- [26] Babaei H, Mostofi T.M, Alitavoli M, Darvizeh A (2016) Empirical modelling for prediction of large deformation of clamped circular plates in gas detonation forming process. *Exp Tech* 40(6): 1485-1494.
- [27] Mirzababaie Mostofi T, Babaei H, Alitavoli M (2017) Experimental and theoretical study on large ductile transverse deformations of rectangular plates subjected to shock load due to gas mixture detonation. *Strain* 53(4): e12235.
- [28] Babaei H, Mostofi TM, Namdari-Khalilabad M, Alitavoli M, Mohammadi K (2017) Gas mixture detonation method, a novel processing technique for metal powder compaction: Experimental investigation and empirical modeling. *Powder Tech* 315: 171-81.
- [29] Babaei H, Mostofi TM, Sadraei SH (2015) Effect of gas detonation on response of circular plate-experimental and theoretical. *Struct Eng Mech* 56(4): 535-548.
- [9] Jacob N, Nurick GN, Langdon GS (2007) The effect of stand-off distance on the failure of fully clamped circular mild steel plates subjected to blast loads. *Eng Struct* 29(10): 2723-2736.
- [10] Babaei H, Darvizeh A (2011) Investigation into the response of fully clamped circular steel, copper, and aluminum plates subjected to shock loading. *Mech Based Des Struct* 39(4): 507-526.
- [11] Babaei H, Darvizeh A (2012) Analytical study of plastic deformation of clamped circular plates subjected to impulsive loading. *J Mech Mater Struct* 7(4):309-322.
- [12] Gharababaei, H, Darvizeh A (2010) Experimental and analytical investigation of large deformation of thin circular plates subjected to localized and uniform impulsive loading. *Mech Based Des Struct* 38(2): 171-189.
- [13] Gharababaei H, Nariman-Zadeh N, Darvizeh A (2010) A simple modelling method for deflection of circular plates under impulsive loading using dimensionless analysis and singular value decomposition. *J Mech* 26(03): 355-361.
- [14] Huang W, Jia B, Zhang W, Huang X, Li D, Ren P (2016) Dynamic failure of clamped metallic circular plates subjected to underwater impulsive loads. *Int J Impact Eng* 94: 96-108.
- [15] Huang W, Zhang W, Ye N, Gao Y, Ren P (2016) Dynamic response and failure of PVC foam core metallic sandwich subjected to underwater impulsive loading. *Compos Part B-Eng* 97: 226-238.
- [16] Badkhor MS, Hasanzadeh M, Mostofi TM (2019) Numerical investigation and optimization on performance of sandwich panel structures with honeycomb core subjected to blast loading by response surface methodology. *Amirkabir J Mech Eng* 52(10):121-30. (in Persian)
- [17] Bigdeli A, Damghani Nouri M (2019) Experimental and numerical analysis and multi-objective optimization of quasi-static compressive test on thin-walled cylindrical with internal networking. *Mech Adv Mater Struc* 26: 1644-1660.
- [18] Badkhor MS, Mostofi TM, Babaei H (2020) Low-velocity impact response of plate with different geometries under hydrodynamic load: experimental investigation and process optimization by response surface methodology. *Modares Mech Eng* 20(4): 807-18. (in Persian)
- [19] Mostofi TM, Badkhor MS (2020) Experimental study and optimization of dynamic response of polymer-coated metal plates subjected to impact loading using response surface methodology. *Modares Mech Eng* 20(4):1011-23. (in Persian)

- decomposition method. Proc Inst Mech Eng-Part L J Mater Des Appl 234(2): 246-254.
- [37] Babaei H, Mostofi TM, Alitavoli M (2020) Experimental investigation and analytical modelling for forming of circular-clamped plates by using gases mixture detonation. Proc Inst Mech Eng-Part C J Mech Eng Sci 234(5): 1102-1111.
- [38] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Alitavoli M (2015) Experimental study and analytical modeling for inelastic response of rectangular plates under hydrodynamic loads. Journal of Modares Mechanical Engineering 15(4): 361-368. (In Persian)
- [39] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Alitavoli M (2017) Experimental and theoretical study of large deformation of rectangular plates subjected to water hammer shock loading. Proc Inst Mech Eng-Part E: J Process Mech Eng 231(3): 490-496.
- [40] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Alitavoli M (2015) Study on the response of circular thin plate under low velocity impact. Geomech Eng 9(2): 207-218.
- [41] Ziya-Shamami M, Babaei H, Mostofi TM, Khodarahmi H (2020) Structural response of monolithic and multi-layered circular metallic plates under repeated uniformly distributed impulsive loading: An experimental study. Thin-Walled Struct 157: 107024.
- [42] Mostofi TM, Sayah-Badkhor M, Rezasefat M, Ozbakkaloglu T, Babaei H (2020) Gas mixture detonation load on polyurea-coated aluminum plates. Thin-Walled Struct 155: 106851.
- [30] Mostofi TM, Badkhor MS, Ghasemi E (2019) Experimental investigation and optimal analysis of the high-velocity forming process of bilayer plates. J Solid Fluid Mech 9(3) 65-80.
- [31] Mostofi TM, Babaei H (2019) Plastic deformation of polymeric-coated aluminum plates subjected to gas mixture detonation loading: Part I: Experimental studies. J Solid Fluid Mech 9(1): 71-83.
- [32] Mostofi TM, Babaei H (2019) Plastic deformation of polymeric-coated aluminum plates subjected to gas mixture detonation loading: Part II: Analytical and empirical modelling. J Solid Fluid Mech 9(2): 15-2.
- [33] Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M, Hosseinzadeh S (2017) On dimensionless numbers for predicting large ductile transverse deformation of monolithic and multi-layered metallic square targets struck normally by rigid spherical projectile. Thin-Walled Struct 112: 118-124.
- [34] Babaei H, Mostofi TM, Alitavoli M (2017) Experimental and analytical investigation into large ductile transverse deformation of monolithic and multi-layered metallic square targets struck normally by rigid spherical projectile. Thin Walled Struct 107: 257-265.
- [35] Babaei H, Mostofi TM, Alitavoli M, Saeidinejad A (2017) Experimental investigation and dimensionless analysis of forming of rectangular plates subjected to hydrodynamic loading. J Appl Mech Tech Phys 58(1): 139-147.
- [36] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T (2020) Modeling and prediction of fatigue life in composite materials by using singular value

## ۶- ضمائم

## جدول الف- نتایج آزمایش‌های تجربی

شماره آزمایش	ماده	ضخامت ورق (mm)	جرم خرج (gr)	قطر خرج (mm)	فاصله استقرار (mm)	ایمپالس (N.s)	خیز مرکز ورق (mm)
۱	فولاد	۱/۶	۵	۳۳	۳۰۰	۱۳/۰۲	۱۱/۲۸
۲	فولاد	۱/۶	۶	۳۳	۳۰۰	۱۳/۶۹	۱۱/۳۶
۳	فولاد	۱/۶	۸	۳۳	۳۰۰	۱۷/۰۸	۱۳/۷۲
۴	فولاد	۱/۶	۱۰	۳۳	۳۰۰	۲۰/۲۸	۱۶/۵۰
۵	فولاد	۱/۶	۱۲	۳۳	۳۰۰	۲۵/۰۷	۲۰
۶	فولاد	۱/۶	۱۳	۳۳	۳۰۰	۲۵/۹۶	۲۰/۲۰
۷	فولاد	۱/۶	۱۴	۳۳	۳۰۰	۲۷/۵۰	۲۲/۵۰

۱۵/۴۶	۱۲/۸۲	۵۰	۳۳	۶	۱/۶	فولاد	۸
۲۱/۶۰	۱۹/۶۶	۵۰	۳۳	۱۰	۱/۶	فولاد	۹
پارگی	۲۲/۵۶	۵۰	۳۳	۱۲	۱/۶	فولاد	۱۰
۸/۶۰	۱۲/۴۶	۳۰۰	-۳۳	۵	۲	فولاد	۱۱
۹/۵۸	۱۳/۶۰	۳۰۰	۳۳	۶	۲	فولاد	۱۲
۱۲	۱۸/۱۸	۳۰۰	۳۳	۸	۲	فولاد	۱۳
۱۳/۶۷	۲۰/۵۵	۳۰۰	۳۳	۱۰	۲	فولاد	۱۴
۱۷/۳۷	۲۵/۵۰	۳۰۰	۳۳	۱۳	۲	فولاد	۱۵
۱۶/۷	۲۶/۱۲	۳۰۰	۳۳	۱۳	۲	فولاد	۱۶
۱۹/۰۸	۳۰/۷۴	۳۰۰	۳۳	۱۶	۲	فولاد	۱۷
۱۱/۷۳	۱۲	۵۰	۳۳	۶	۲	فولاد	۱۸
۱۸/۲۴	۱۹/۳۶	۵۰	۳۳	۱۰	۲	فولاد	۱۹
۲۱/۵۰	۲۳/۷۸	۵۰	۳۳	۱۳	۲	فولاد	۲۰
پارگی	۲۶/۳۴	۵۰	۳۳	۱۵	۲	فولاد	۲۱
۳/۵۵	۱۱/۷۸	۳۰۰	۳۳	۵	۳	فولاد	۲۲
۳/۲۲	۱۲/۷۵	۳۰۰	۳۳	۶	۳	فولاد	۲۳
۶/۸۳	۱۸/۲۳	۳۰۰	۳۳	۸	۳	فولاد	۲۴
۶/۶۶	۲۰/۴۰	۳۰۰	۳۳	۱۰	۳	فولاد	۲۵
۱۰/۰۱	۲۶/۱۱	۳۰۰	۳۳	۱۳	۳	فولاد	۲۶
۱۰/۶۲	۲۶/۵۰	۳۰۰	۳۳	۱۳	۳	فولاد	۲۷
۱۱/۵۶	۲۸/۷۵	۳۰۰	۳۳	۱۵	۳	فولاد	۲۸
۷/۲۸	۱۱/۳۹	۵۰	۳۳	۶	۳	فولاد	۲۹
۱۳/۱۷	۱۹/۵۷	۵۰	۳۳	۱۰	۳	فولاد	۳۰
۱۴	۲۵/۰۹	۵۰	۳۳	۱۳	۳	فولاد	۳۱
۹/۸۲	۹/۳۵	۵۰	۳۳	۴	۲	مس	۳۲
۱۶/۱۱	۱۵/۰۴	۵۰	۳۳	۷	۲	مس	۳۳
۲۲/۱۸	۱۹/۲۲	۵۰	۳۳	۱۰	۲	مس	۳۴

۲۵/۹۷	۲۴/۱۰	۵۰	۳۳	۱۳	۲	مس	۳۵
پارگی	۲۶/۴۰	۵۰	۳۳	۱۴	۲	مس	۳۶
۵/۴	۵/۱۹	۵۰	۳۳	۳	۲	مس	۳۷
۱۴/۹	۱۳/۹۹	۵۰	۳۳	۶	۲	مس	۳۸
۲۰	۱۹/۳۴	۵۰	۳۳	۹	۲	مس	۳۹
۹/۴۳	۸/۴۶	۵۰	۲۰	۵	۲	مس	۴۰
۱۳/۶۸	۱۲/۴۷	۵۰	۲۰	۸	۲	مس	۴۱
۱۷/۲۳	۱۷/۰۴	۵۰	۲۰	۱۱	۲	مس	۴۲
۱۳	۱۳/۹۸	۳۰۰	۳۳	۶	۲	مس	۴۳
۱۶/۳۴	۱۸/۱۸	۳۰۰	۳۳	۸	۲	مس	۴۴
۱۸/۲۵	۲۱/۰۲	۳۰۰	۳۳	۱۰	۲	مس	۴۵
۱۰/۸۵	۱۲/۶	۳۰۰	۳۳	۵	۲	مس	۴۶
۱۴/۶۳	۱۷/۲۵	۳۰۰	۳۳	۷	۲	مس	۴۷
۱۷/۶	۲۰/۷۰	۳۰۰	۳۳	۹	۲	مس	۴۸
۲۰/۶۷	۲۴/۸۰	۳۰۰	۳۳	۱۱	۲	مس	۴۹
پارگی	۲۸/۶۰	۳۰۰	۳۳	۱۳	۲	مس	۵۰
۷/۵۲	۱۲/۳۹	۳۰۰	۳۳	۵	۳	مس	۵۱
۱۱/۸۵	۱۹/۱۳	۳۰۰	۳۳	۹	۳	مس	۵۲
۱۵/۴۶	۲۵/۶۰	۳۰۰	۳۳	۱۳	۳	مس	۵۳
۱۸/۱۲	۳۰/۲۰	۳۰۰	۳۳	۱۶	۳	مس	۵۴
۲۱/۲	۳۴/۶۳	۳۰۰	۳۳	۱۹	۳	مس	۵۵
۱۵/۸۸	۲۶/۴۶	۳۰۰	۳۳	۱۳	۳	مس	۵۶
۷/۶	۱۰/۲۵	۵۰	۳۳	۴	۳	مس	۵۷
۱۱/۲۴	۱۴/۲۲	۵۰	۳۳	۷	۳	مس	۵۸
۱۶/۴	۱۹/۵۵	۵۰	۳۳	۱۰	۳	مس	۵۹
۱۸/۹۷	۲۲/۹۸	۵۰	۳۳	۱۳	۳	مس	۶۰
پارگی	۲۷/۸۲	۵۰	۳۳	۱۶	۳	مس	۶۱

۸/۶	۵/۱۶	۳۰۰	۳۳	۲	۲	آلومینیوم	۶۲
۱۴/۹	۸/۲۵	۳۰۰	۳۳	۳	۲	آلومینیوم	۶۳
۲۴/۲۲	۱۰/۸۲	۳۰۰	۳۳	۴	۲	آلومینیوم	۶۴
۲۶/۳	۱۲/۳۲	۳۰۰	۳۳	۴/۵۰	۲	آلومینیوم	۶۵
۲۱	۹	۳۰۰	۳۳	۳/۵۰	۲	آلومینیوم	۶۶
پارگی	۱۴/۱۰	۳۰۰	۳۳	۵	۲	آلومینیوم	۶۷
۷/۳۵	۲/۷۲	۵۰	۳۳	۲	۲	آلومینیوم	۶۸
۱۱/۴	۳/۹۱	۵۰	۳۳	۳	۲	آلومینیوم	۶۹
۲۳/۳	۸/۶۲	۵۰	۳۳	۴	۲	آلومینیوم	۷۰
۱۵/۲۴	۴/۹۲	۵۰	۲۰	۲/۵۰	۲	آلومینیوم	۷۱
۱۹/۰۴	۷/۴۴	۵۰	۲۰	۳/۵۰	۲	آلومینیوم	۷۲
پارگی	۹/۷۵	۵۰	۳۳	۴/۵۰	۲	آلومینیوم	۷۳
۱۴/۱۰	۹/۷۲	۳۰۰	۳۳	۴	۳	آلومینیوم	۷۴
۱۹/۹	۱۳/۷۱	۳۰۰	۳۳	۵	۳	آلومینیوم	۷۵
۲۱/۹	۱۴/۹۶	۳۰۰	۳۳	۶	۳	آلومینیوم	۷۶
پارگی	۱۶/۲۰	۳۰۰	۳۳	۷	۳	آلومینیوم	۷۷
۵/۴	۲/۷۲	۵۰	۳۳	۳	۳	آلومینیوم	۷۸
۱۵/۹۷	۱۰/۸۴	۵۰	۳۳	۴	۳	آلومینیوم	۷۹
۲۲/۹	۱۱/۵۴	۵۰	۳۳	۵	۳	آلومینیوم	۸۰
۱۷/۲۱	۹/۶۵	۵۰	۳۳	۴/۵۰	۳	آلومینیوم	۸۱
۱۴/۵۶	۷/۲۸	۵۰	۲۰	۴	۳	آلومینیوم	۸۲
۱۶/۸۸	۹/۲۸	۵۰	۲۰	۵	۳	آلومینیوم	۸۳
۲۱	۱۰/۲۰	۵۰	۲۰	۶	۳	آلومینیوم	۸۴
۲۱/۶	۱۱/۹۱	۵۰	۲۰	۷	۳	آلومینیوم	۸۵
پارگی	۱۲/۸	۵۰	۳۳	۶	۳	آلومینیوم	۸۶



جدول ب- جدول ANOVA مربوط به مدل سطح پاسخ جابجایی ورق دایره‌ای برای بارگذاری دینامیکی یکنواخت (Y)

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	متوسط مربعات	F-value	Probe > F
مدل (Y)	۲۲۱۲/۳۲	۱۷	۱۳۰/۱۴	۱۳۳/۱۷	<۰/۰۰۰۱
X <sub>1</sub>	۲۱۶/۸۹	۱	۲۱۶/۸۹	۲۲۱/۹۵	<۰/۰۰۰۱
X <sub>2</sub>	۶۲۴/۰۲	۱	۶۲۴/۰۲	۶۳۸/۵۷	<۰/۰۰۰۱
X <sub>3</sub>	۲/۸۶	۱	۲/۸۶	۲/۹۳	۰/۰۹۲۳
X <sub>4</sub>	۱۳۹/۹۴	۱	۱۳۹/۹۴	۱۴۳/۲۰	<۰/۰۰۰۱
X <sub>5</sub>	۱۳۵۹/۸۵	۲	۶۷۹/۹۳	۶۹۵/۷۸	<۰/۰۰۰۱
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	۲۲/۷۳	۱	۲۲/۷۳	۲۳/۲۶	<۰/۰۰۰۱
X <sub>1</sub> X <sub>4</sub>	۳/۲۷	۱	۳/۲۷	۳/۳۵	۰/۰۷۲۴
X <sub>1</sub> X <sub>5</sub>	۱۱۳/۲۱	۲	۵۶/۶۱	۵۷/۹۲	<۰/۰۰۰۱
X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	۱۳/۷۳	۱	۱۳/۷۳	۱۴/۰۵	۰/۰۰۰۴
X <sub>2</sub> X <sub>4</sub>	۵/۰۹	۱	۵/۰۹	۵/۲۱	۰/۰۲۶۱
X <sub>2</sub> X <sub>5</sub>	۳۵/۲۹	۲	۱۷/۶۴	۱۸/۰۶	<۰/۰۰۰۱
X <sub>4</sub> X <sub>5</sub>	۷/۲۱	۲	۳/۶۱	۳/۶۹	۰/۰۳۰۹
X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	۴/۲۵	۱	۴/۲۵	۴/۳۵	۰/۰۴۱۳
باقیمانده	۵۷/۶۶	۵۹	۰/۹۸	-	-
خطای خالص	۲۲۶۹/۹۸	۷۶	-	-	-