



Experimental Study and Optimization of Dynamic Response of Polymer-Coated Metal Plates Subjected to Impact Loading Using Response Surface Methodology

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Mirzababaie Mostofi T.¹ PhD,
Sayah Badkhor M.*¹ PhD

How to cite this article

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.

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

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Electrical, Mechanics & Computer Engineering Faculty, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran
Phone: -
Fax: -
mostafa.sayah@eyc.ac.ir

Article History

Received: June 22, 2019
Accepted: August 04, 2019
ePublished: April 17, 2020

ABSTRACT

One of the main aims of the current study is the experimental investigation and optimization of the dynamic response of polymer-coated aluminum plates under impulsive load. In the experimental study, the effect of several important parameters on the free forming of these structures under gas mixture detonation load, including the effect of aluminum plate thickness and polymeric coating, as well as the effect of applied load on the maximum permanent transverse deflection were investigated. In the optimization section, Design Expert Software was used to investigate the simultaneous effect of the mentioned parameters on the plastic deformation of the structure. In this software, the effect of independent parameters such as metal sheet thickness, polymer-coated thickness and loading impulse on the deflection of the two-layer structure has been investigated using the response surface method. Accordingly, the p-value for the model was less than 0.05, which means that the model is significant. The value of R2 is also equal to 0.9980. The results indicate that the presented model is suitable for these experimental data. The values obtained from the prediction of the model are consistent with the experimental results. Optimal conditions for the minimize deflection of the two-layer structure were also determined and tested experimentally. The result indicates that the prediction of the regression model and experimental data have a good agreement.

Keywords Dynamic Response; Plastic Deformation; Metal Plate; Polymeric Coating; Optimization; Response Surface Methodology

CITATION LINKS

[1] Theoretical analysis on the effect of uniform and localized impulsive loading on the dynamic plastic behaviour of fully ... [2] Closed-form analytical analysis on the effect of coupled membrane and bending strains ... [3] Gas detonation forming process and modeling for ... [4] Detonation forming of aluminium cylindrical cups experimental ... [5] Tube expansion by gas ... [6] Gas Detonation Forming by a mixture of ... [7] Efficient oxyhydrogen mixture determination ... [8] Effect of gas detonation on response of circular ... [9] Experimental investigation and analytical modelling ... [10] Empirical modelling for prediction of large deformation ... [11] Gas mixture detonation method, a novel processing technique for metal powder compaction: Experimental ... [12] Numerical modelling of the gas detonation process ... [13] Joining of tubes by gas detonation ... [14] Experimental and numerical studies of sheet metal forming with damage using gas detonation ... [15] The influence of gas mixture detonation loads ... [16] Experimental and theoretical study on large ... [17] Large transverse deformation of double-layered rectangular ... [18] Experimental investigation of response of monolithic and bilayer plates ... [19] Numerical modeling of response of monolithic and bilayer plates to ... [20] Investigation of effect of polyurea on response of steel plates to impulsive loads ... [21] Numerical modeling of effect of polyurea on response of steel ... [22] Deformation of polyurea-coated steel plates under localised blast loading ... [23] Numerical modelling of hybrid elastomeric composite panels subjected to blast ... [24] Experimental investigation and simplified modeling of response of steel plates subjected to ... [25] Genetic algorithms and fuzzy logic systems: Soft ... [26] Experimental and numerical investigation of the maximum deflection of circular ... [27] Investigation of steel column behavior with different cross section under ... [28] Experimental and numerical investigation important parameters in deep drawing square sections two layers sheet with ... [29] Experimental and numerical analysis and multi-objective optimization of quasi-static compressive test on thin-walled cylindrical ... [30] Neck retardation and enhanced energy absorption in metal-elastomer ... [31] Response surface methodology: Process and product optimization using designed ...

مطالعه تجربی و بهینه‌سازی پاسخ دینامیکی ورق‌های فلز- پلیمر تحت بار ضربه‌ای با استفاده از روش سطح پاسخ

توحید میرزابابای مستوفی PhD

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

مصطفی سیاح‌بادخور* PhD

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

چکیده

یکی از اهداف اصلی مطالعه حاضر بررسی تجربی و بهینه‌سازی رفتار دینامیکی ورق‌های آلومینیومی با روکش پلیمری تحت بار دفعی است. در بخش مطالعه آزمایشگاهی به بررسی پارامترهای مهم بر فرآیند شکل‌دهی آزاد این ساختارها تحت بار انفجار مخلوط گازها شامل اثر ضخامت لایه آلومینیومی و پلیمری و همچنین اثر بار اعمالی بر میزان بیشترین خیز دایمی پرداخته شد. در بخش بهینه‌سازی به منظور بررسی تاثیر همزمان پارامترهای اشاره‌شده روی تغییر شکل پلاستیک ساختار از نرم‌افزار طراح آزمایش استفاده شده است. در این نرم‌افزار با استفاده از روش سطح پاسخ تاثیر 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 بررسی شده است. در این بررسی به منظور معنی‌داربودن 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 R2 نیز برابر ۰/۹۹۸۰ به دست آمده است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که مدل ارائه شده برای این آزمایش مناسب بوده و مقادیر به دست آمده از پیش‌بینی مدل با نتایج تجربی برای خروجی مطابقت دارد. شرایط بهینه برای کمترین تغییر شکل ساختار دولایه نیز تعیین و مورد آزمایش تجربی قرار گرفته است. نتیجه به دست آمده حاکی از تطابق خیلی خوب پیش‌بینی مدل رگرسیونی و آزمایش تجربی است.

کلیدواژه‌ها: پاسخ دینامیکی، تغییر شکل پلاستیک، ورق فلزی، روکش پلیمری، بهینه‌سازی، روش سطح پاسخ

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۵/۱۳

*نویسنده مسئول: mostafa.sayah@eyc.ac.ir

۱- مقدمه

فرآیند شکل‌دهی با سرعت بالا، فرآیندی است که در آن مقدار زیادی انرژی در فاصله زمانی کوتاه آزاد می‌شود، لذا قطعه کار در برابر فشار زیادی قرار می‌گیرد [1]. روش‌های شکل‌دهی با سرعت بالا، شامل شکل‌دهی با خرج انفجاری، انفجار مخلوط گازها، الکترومغناطیسی و الکتروهیدرولیکی است. با توجه به مزایا و معایبی که در روش‌های شکل‌دهی ذکر شده وجود دارد، روش‌های شکل‌دهی با سرعت بالا به دلیل کوتاه‌بودن زمان تولید، هزینه پایین فرآیند و همچنین تولید قطعات پیچیده در یک مرحله همواره مورد توجه محققین بوده است [2]. فرآیند شکل‌دهی با روش انفجار مخلوط گازها نتیجه یک فرآیند شیمیایی گرمازا میان یک ماده

سختی و عامل اکسیدکننده است که با تولید گرما و تغییر شیمیایی مواد اولیه همراه می‌شود. پس از ایجاد شوک ناشی از انفجار، فشار دینامیکی باعث تغییر شکل جسم می‌شود. در دهه اخیر، تحقیقات به نسبت خوبی در این زمینه انجام شده است [3-17]. هرچند به دلیل نوین‌بودن آن، تحقیقات بسیار اندکی در زمینه شکل‌دهی ورق با استفاده از این روش ارائه شده و تاکنون تحقیقی روی ساختارهای فلزی تقویت‌شده یا ساختارهای فلز- پلیمر صورت نگرفته است.

در زمینه شکل‌دهی ساختارهای فلزی تقویت‌شده با لایه پلی‌اوره با خرج انفجاری، مهم‌ترین تحقیقات بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۷ گزارش شده است. امینی و همکاران، به بررسی تجربی رفتار دینامیکی و مدهای شکست ورق‌های تک‌لایه دایره‌ای فولادی DH-36 و همچنین ورق‌های دولایه فولاد- پلی‌اوره تحت بارگذاری دفعی (بار ایمپالسی واردشده به نمونه) پرداختند. در آزمایش‌های انجام‌شده، یک پالس فشار آبی از طریق آب یا ماده پلی‌اورتان نرم به ورق فولادی وارد شده که بارگذاری شوک با فشار ۸۰MPa در مدت ۵۰µs را شبیه‌سازی می‌کند. به طور کلی، هدف این گروه تحقیقاتی از انجام این سری از آزمایش‌های تجربی، بررسی اهمیت موقعیت نسبی روکش پلی‌اوره با توجه به جهت بارگذاری بود. به عنوان مثال، آنها بررسی کردند که پاشش روکش پلی‌اوره روی لایه جلویی موجب کم‌تر شدن اثر تخریبی بار دفعی می‌شود؛ یا پاشش آن روی لایه عقبی فولادی عملکرد بهتری دارد. نتایج تجربی به دست آمده نشان داد که استفاده از روکش پلی‌اوره به عنوان لایه عقبی می‌تواند تاثیر بسزایی روی پاسخ ورق‌های فولادی تحت بار دفعی از هر دو منظر جذب انرژی و کاهش اثرات مخرب بارگذاری داشته باشد [21-18].

آکنند و همکاران، به منظور بررسی اثر پوشش پلی‌اوره بر مقاومت انفجاری ورق‌های فولادی نرم، مطالعاتی تجربی و عددی انجام دادند. در تحقیقات تجربی، ورق‌های فولادی مربعی با و بدون پوشش پلی‌اوره تحت بارگذاری دفعی غیریک‌نواخت قرار داده شدند. در این سری از آزمایش‌ها، روکش پلیمری بر سطح عقبی نمونه فلزی اعمال شده بود. ضخامت این لایه‌ها به گونه‌ای انتخاب شده بود که هر یک از نمونه‌های آزمایشی، چگالی سطحی معادل با 4 J/g/cm^2 در ناحیه شکل‌گیری داشت. نتایج تجربی نشان داد که میزان تغییر شکل ورق با افزایش همزمان ضخامت روکش پلی‌اوره و کاهش ضخامت ورق فولادی افزایش می‌یابد. همچنین، ثبت تغییر شکل گذرای ورق با دوربین‌های سرعت بالا نشان داد که به علت انبساط هایدرولاستیک روکش پلی‌اوره، جدایش این پوشش در یک ناحیه دایره‌ای شکل رخ می‌دهد و تغییر شکل گذرای آن تقریباً دو برابر نمونه فولادی بدون روکش پلیمری است [22].

تران و همکاران، به بررسی عددی نحوه تغییر شکل و مکانیسم شکست ساختار کامپوزیتی چندلایه الاستومر با FRP تحت بار انفجاری با استفاده از تئوری شکست هاشین پرداختند. یک لایه

گمکنانی و همکاران، به بررسی کشش عمیق با اجزاء لاستیکی پرداختند. آنها نمونه مربعی را با استفاده از قالب با ماتریس لاستیکی به صورت عملی و شبیه‌سازی سه بعدی، شکل دادند. در نهایت به کمک روش پاسخ سطح به بررسی پارامترهایی از جمله شعاع سنبه، جایگشت، جنس ورق و مقدار فاصله اولیه بین ورق گیر روی نازک‌شدگی، نیروی وارد بر سنبه و نیروی ورق گیر پرداختند [28].

بیگدلی و همکاران، با استفاده از روش پاسخ سطح به بررسی تجربی و عددی شرایط بهینه برای فشرده‌سازی استاتیکی سیلندرهاى جدار نازک پرداختند. آنها ضمن بررسی پارامترهای مختلف به صورت همزمان، شرایط بهینه را نیز تعیین کردند [29].

با مرور مطالعات پیشین، این نتیجه حاصل شد که تمامی مطالعات در زمینه شکل‌دهی ساختارهای فلز- پلیمر با استفاده از خرج‌های انفجاری بوده و تحقیقات انجام‌شده با روش انفجار مخلوط گازها محدود به ورق‌های فلزی دایره‌ای و مستطیلی است [24-3]. اکنون، با توجه به توضیحات ارائه‌شده در ادبیات تحقیق، انجام مطالعات آزمایشگاهی روی ساختارهای فلزی‌شده با روکش پلیمری به منظور مطالعه پارامترهای مختلف و بررسی اثرگذاری آنها، می‌تواند از اهمیت بالایی برخوردار باشد. شایان توجه است که در تحقیقات انجام‌شده، تاکنون مطالعه‌ای روی مدل‌سازی فرآیند شکل‌دهی ورق‌های فلز- پلیمر با روش انفجار مخلوط گازها و شناسایی پارامترهای موثر بر آن نیز انجام نگرفته است؛ بنابراین، مهم‌ترین نوآوری‌های تحقیق حاضر در بخش آزمایشگاهی شامل بررسی رفتار پلاستیک ساختارهای فلز- پلیمر با ضخامت‌های مختلف لایه فلزی و پلیمری تحت بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها و در بخش مدل‌سازی شامل ارائه مدلی برای فرآیند شکل‌دهی ساختارهای دولایه با روش انفجار مخلوط گازها با استفاده از داده‌های ورودی- خروجی است که از روش سطح پاسخ استفاده می‌شود. با استفاده از این روش ضمن بررسی اثرات متقابل پارامترها بر خروجی، شرایط بهینه هر کدام از آنها نیز تعیین می‌شود.

۲- مطالعه تجربی

در سال‌های اخیر، استفاده از فن ریخته‌گری پاششی یک لایه ماده پلیمری روی ورق فولادی جهت افزایش عملکرد دینامیکی و مقاومت شکست آن علاقه‌مندان زیادی را جذب کرده است [21-24]. با توجه به ادبیات تحقیق، به نظر می‌رسد که در میان پلیمرهای موجود، پلی‌اوره یک انتخاب خوب با خواص منحصربه‌فرد مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی جهت افزایش مقاومت شکست در ورق‌های فلزی است. این پلیمر می‌تواند طیف گسترده‌ای از خواص مکانیکی، از لاستیک نرم تا پلاستیک سخت بسته به ویژگی‌های شیمیایی آن را نمایش دهد. دمای انتقال شیشه پلی‌اوره کمتر از ۵-درجه سانتی‌گراد بوده که خیلی پایین‌تر از حد معمول دمای عملکرد است [30]. این الاستومر به‌طور گسترده در

نازک الاستومر (پلی‌اوره) به قسمت عقبی ساختار اعمال شد تا میزان آسیب واردشده به چندلایه‌های کامپوزیتی را کاهش دهد. جدایش بین لایه‌های ساختار کامپوزیتی با استفاده از المان‌های چسب سه‌بعدی با رفتار دوخطی لحاظ شد. تاریخچه تغییر شکل‌های پیش‌بینی‌شده، ارزیابی الگوهای آسیب الیاف/زمینه و لایه‌لایه‌شدگی بین چندلایه‌ها در ساختارهای کامپوزیتی مورد نظر مشاهده و مقایسه شد. نتایج به‌دست‌آمده از مدل عددی نشان‌دهنده کاهش موثر میزان بار دفعی منتقل‌شده به لایه عقبی ساختار و همچنین کاهش لایه‌لایه‌شدگی ضمن حفظ سفتی کلی بود که این موضوع را می‌توان از نقش‌های کلیدی لایه الاستومر در بهبود عملکرد قلمداد کرد [23].

رمنیکوو و همکاران، به بررسی تغییر شکل پلاستیک سه نوع ورق فولادی شامل فولاد نرم، فولاد با مقاومت بالا و فولاد زنگ‌نزن تحت بار دفعی یکنواخت با استفاده از انفجار خرج‌های کروی نیترومتان پرداختند. همچنین آنها در تعدادی آزمایش دیگر، ورق‌های فولادی مذکور با پوشش پلی‌اوره و کامپوزیتی تحت بار دفعی غیریکنواخت قرار داده شد. در طی هر آزمایش، منحنی‌های فشار- زمان انفجار و جابجایی ورق‌های فولادی اندازه‌گیری شد. در این سری از آزمایش‌ها، نتایجی را برای کالیبراسیون مدل‌های عددی و ساده‌سازی مدل‌های تجربی به منظور پیش‌بینی بارهای انفجار و پاسخ دینامیکی ساختار ارائه کرد [24].

مدل‌سازی فرآیندها و شناسایی سیستم‌ها با به‌کاربردن داده‌های ورودی- خروجی، یکی از زمینه‌های مورد بررسی در بسیاری از تحقیقات بوده است. روش‌های شناسایی سیستم در بسیاری از شاخه‌های علوم مهندسی به منظور مدل‌سازی و پیش‌بینی رفتارهای پیچیده و مبهم این سیستم‌ها با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی ورودی و خروجی استفاده می‌شود. به این ترتیب، یکی از دلایل اصلی این پیشرفت سریع را می‌توان استفاده از محاسبات نرم دانست [25].

زمانی و گودرز، به بررسی تجربی و عددی ماکزیمم خیز ورق‌های دایروی تحت اثر موج شوک حاصل از انفجار پرداختند. آنها دو سری آزمایش انجام دادند که در سری اول موج شوک رسیده به سازه، غیریکنواخت و در سری دوم موج شوک رسیده به سازه یکنواخت بود. هدف آنها از طراحی و اجرای آزمایش‌ها، بررسی تاثیر نحوه برخورد موج بر میزان تغییر شکل و استخراج دو مدل نیمه‌تجربی برای پیش‌بینی میزان خیز ماکزیمم وسط ورق دایروی در دو حالت موج شوک یکنواخت و غیریکنواخت بود [26].

هادیان‌فرد و همکاران، به بررسی رفتار ستون‌های فولادی با مقاطع عرضی مختلف، تحت بار انفجار پرداختند. آنها دریافتند که ستون با مقطع عرضی بال پهن در زاویه انفجار صفر درجه نسبت به مقاطع عرضی دیگر حول محور قوی، جابجایی کمتر و عملکرد مطلوب‌تری دارد. همچنین در زاویه انفجار ۴۵ درجه، مقاطع عرضی دارای دو محور قوی، جابجایی کمتر و عملکرد مطلوب‌تری را نسبت به مقطع بال‌پهن با یک محور قوی نشان می‌دهند [27].

استفاده شده است (شکل ۱). این سامانه آزمایشی شامل چهار بخش اصلی است: واحد اشتعال، شیر کنترل گاز، واحد سیستم اندازه‌گیری فشار و واحد شکل‌دهی.



شکل ۱) سامانه انفجار مخلوط گازها

واحد اشتعال این سامانه، شامل سیلندره‌های ذخیره گاز اکسیژن و استیلن و یک محفظه احتراق ۶ لیتری از جنس فولاد ضدزنگ است که توسط گازهای اکسیژن و استیلن پر می‌شود. این محفظه احتراق دارای یک شیر تخلیه جهت خارج کردن گازهای موجود در سیلندر نیز است. در بخش دوم، به منظور تنظیم میزان فشار قبل از انفجار هر یک از گازهای ورودی، از شیرهای کنترل گاز استفاده می‌شود. مخلوط گاز در انتهای بسته محفظه احتراق توسط یک سیستم جرقه زن منفجر می‌شود. واحد سیستم اندازه‌گیری فشار، شامل یک مانومتر به منظور اندازه‌گیری میزان فشار وارد شده داخل محفظه احتراق قبل از انفجار، یک حسگر فشار پیزوالکتریک به منظور ثبت فشار پس از انفجار اعمالی بر سطح نمونه، یک سیستم تقویت‌کننده یا آمپلی‌فایر جهت تقویت سیگنال‌های دریافتی از حسگر پیزوالکتریک و یک سامانه ثبت داده‌های دینامیکی برای ذخیره نمودار فشار- زمان از حسگر پیزوالکتریک است [15-17].

نمونه ساختارهای فلز- پلیمر مورد آزمایش، از ترکیب ورق فلزی از جنس آلومینیوم Al-1100 در ضخامت‌های ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ میلی‌متر با لایه پلی‌اوره در ضخامت‌های تشکیل شده است. شایان توجه است که نمونه‌های آزمایشی در ابعاد ۳۹۰×۳۴۵ میلی‌متر مربع برش زده شدند. لازم به توضیح است که خواص مکانیکی ورق‌های فلزی در تحقیقات پیشین [15, 16] ارایه شده است.

با توجه به توضیحات ارایه شده، پاسخ دینامیکی و تغییر شکل پلاستیک ۴۰ ساختار فلز- پلیمر در ۸ گروه‌بندی مختلف از نظر ضخامت و چگالی سطح (G-Al-1-PU-4, E-Al-1-PU-3, J-Al-1.5-PU-6, I-Al-1.5-PU-5, H-Al-2-PU-4, K-Al-2.5-PU-5 و L-Al-2.5-PU-6) تحت ۵ بارگذاری با فشارهای قبل از انفجار متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. در این ساختارها، لایه جلویی و عقبی به ترتیب از جنس ورق آلومینیومی و ماده پلیمری پلی‌اوره در نظر گرفته شده است. همان‌طور که پیشتر ذکر شد، تمرکز کارهای تجربی انجام شده در این سری از آزمایش‌ها بر میزان اثر بخشی افزایش ضخامت لایه

صنعت ریخته‌گری در فرم جامد مانند تونل‌ها، پل‌ها، سقف‌ها، مخازن ذخیره‌سازی و کشتی‌های حمل و نقل، استفاده می‌شود. علاوه بر صنعت ریخته‌گری، اخیراً این ماده به منظور افزایش مقاومت ساختمان‌ها، وسایل نقلیه و سازه‌ها در برابر نیروهای ضربه‌ای و انفجاری مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به توضیحات ارایه شده و با توجه به اینکه این ماده پلیمری به راحتی به سطوح فلزی متصل می‌شود و در زمان بسیار کوتاهی به عمل می‌آید، لذا در این تحقیق از روکش پلی‌اوره با پاشش گرم جهت بهبود تقویت ورق‌های آلومینیومی در برابر بار انفجاری استفاده شده است. مشخصات فنی قبل و بعد از ترکیب این ماده که از شرکت سپنتا سروین سازه پارس تهیه شده در جدول‌های ۱ و ۲ ارایه شده است.

جدول ۱) مشخصات فنی قبل از ترکیب ماده پلی‌اوره

ویژگی	جزء اول	جزء دوم
شرح شیمیایی	پلی‌آمین	ایزوسیانات آروماتیک
حالت فیزیکی	مایع	مایع
نقطه اشتعال	$> 100^{\circ}\text{C}$	$> 100^{\circ}\text{C}$
رنگ	زرد (بدون رنگ‌دانه)	زرد
چگالی (kg/m^3)	$1/1$	$1/14$
لزجت (MPa.s)	20°C	470
	30°C	250
	50°C	90
	60°C	70

جدول ۲) مشخصات فنی ترکیب نهایی ماده پلی‌اوره

ویژگی	توضیحات
حالت فیزیکی	غشاء جامد الاستومتری
رنگ	طوسی، آبی، قرمز و بژ
سختی	۵۵D
چگالی	90 kg/m^3
خواص مکانیکی	حداکثر کشیدگی
	مقاومت کششی
	استحکام پارگی

در بخش تجربی از این تحقیق، هدف آن است تا بتوان با افزودن لایه پلی‌اوره، از به وجود آمدن مدهای تخریب در ورق‌های آلومینیومی پیش‌گیری کرد و آستانه تحمل بار دفعی اعمال شده بر این ساختارها را افزایش داد. همچنین یکی دیگر از اهداف این تحقیق بررسی تاثیر ضخامت‌های مختلف لایه فلزی و پلیمری بر پاسخ دینامیکی ساختارهای فلز- پلیمر تحت بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها است تا بتوان یک بانک اطلاعاتی جامع تجربی تهیه کرد.

جهت شکل‌دهی آزاد ساختارهای فلز- پلیمر و اعمال بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها از سامانه آزمایشی دانشگاه گیلان

در این جدول مقادیر میانگین ایمپالس برای آزمایش‌هایی که در آن میزان بارگذاری (مقادیر پیش فشار) یکسان بوده، محاسبه شده است. نتایج به‌دست‌آمده در مجموعه آزمایش‌های انجام‌شده روی ساختارهای دولایه فلز- پلیمری، نشان‌دهنده پاسخ و رفتار مکانیکی ورق‌های آلومینیومی تقویت‌شده با روکش پلیمری پلی‌اوره تحت بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها است که در آن اثر تغییرات ضخامت ورق آلومینیومی و روکش پلیمری و تغییرات مقدار ایمپالس یا به‌عبارتی افزایش انرژی انتقالی به ورق و به‌تبع آن تغییر نرخ سرعت تغییر شکل بررسی شده است.

۳-۱- گستره تغییر شکل ساختارهای فلز- پلیمر

در این بخش به بیان مشاهدات تجربی در مورد گستره یا مدهای تغییر شکل ساختارهای دولایه فلز- پلیمری پرداخته شده است. بررسی مشاهدات تجربی نشان می‌دهد که در طول ۴۰ آزمایش، تمامی ساختارها غیر از ۷ نمونه، سطوح مختلفی از تغییر شکل غیرالاستیک بزرگ یا همان مد اول تغییر شکل را نشان دادند. نمونه‌ای از پروفیل تغییر شکل ساختارهای فلز- پلیمری در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲) ساختارهای فلز- پلیمر بعد از اعمال بار دفعی

در این مجموعه آزمایشی، پروفیل تغییر شکل ورق آلومینیومی تقویت‌شده با روکش پلی‌اوره نیز، به‌صورت دمی‌شکل یا محدب بوده و این بیانگر آن است که بار دفعی تولیدشده، به‌صورت کاملاً یکنواخت بر سطح ساختار دولایه فلز- پلیمری وارد می‌شود. نتایج حاصل از شکل ۲ را می‌توان به‌صورت زیر دسته‌بندی کرد:
- در نمونه‌های پاره‌نشده، هیچ‌گونه جدایشی بین روکش پلیمری و ورق آلومینیومی رخ نمی‌دهد.

فلزی و پلیمری بر مقاومت دینامیکی ساختار دولایه فلز- پلیمری و افزایش آستانه تحمل بار دفعی ورق‌های نازک آلومینیومی است.

۳- نتایج تجربی

در جدول ۳، کلیه مشخصات و نتایج آزمایش‌های انجام‌شده روی ساختارهای دولایه فلز- پلیمری ارائه شده است.

جدول ۳) نتایج آزمایش‌های انجام‌شده روی ساختارهای دولایه فلز- پلیمری

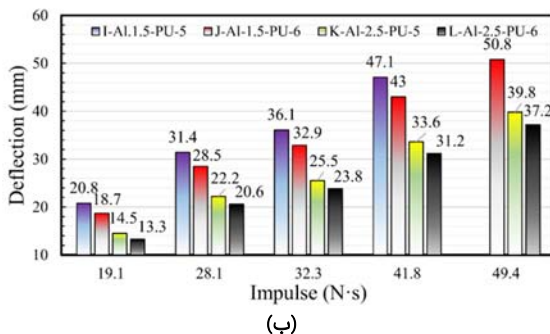
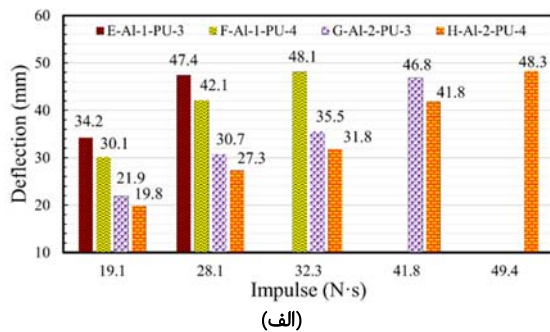
شماره آزمایش	ایمپالس (N·s)	فشار اسیژن (bar)	فشار استیلن (bar)	بیشترین خیز دایمی (mm)
E-1	۱۹/۱	۰/۲	۰/۱۵	۳۴/۲
E-2	۲۸/۱	۰/۳	۰/۲۵	۴۷/۴
E-3	۳۲/۳	۰/۳۵	۰/۲۵	پارگی
E-4	۴۱/۸	۰/۴	۰/۳	پارگی
E-5	۴۹/۴	۰/۶	۰/۴	پارگی
F-6	۱۹/۱	۰/۲	۰/۱۵	۳۰/۱
F-7	۲۸/۱	۰/۳	۰/۲۵	۴۲/۱
F-8	۳۲/۳	۰/۳۵	۰/۲۵	۴۸/۱
F-9	۴۱/۸	۰/۴	۰/۳	پارگی
F-10	۴۹/۴	۰/۶	۰/۴	پارگی
G-11	۱۹/۱	۰/۲	۰/۱۵	۲۱/۹
G-12	۲۸/۱	۰/۳	۰/۲۵	۳۰/۷
G-13	۳۲/۳	۰/۳۵	۰/۲۵	۳۵/۵
G-14	۴۱/۸	۰/۴	۰/۳	۴۶/۸
G-15	۴۹/۴	۰/۶	۰/۴	پارگی
H-16	۱۹/۱	۰/۲	۰/۱۵	۱۹/۸
H-17	۲۸/۱	۰/۳	۰/۲۵	۲۷/۳
H-18	۳۲/۳	۰/۳۵	۰/۲۵	۳۱/۸
H-19	۴۱/۸	۰/۴	۰/۳	۴۱/۸
H-20	۴۹/۴	۰/۶	۰/۴	۴۸/۳
I-21	۱۹/۱	۰/۲	۰/۱۵	۲۰/۸
I-22	۲۸/۱	۰/۳	۰/۲۵	۳۱/۴
I-23	۳۲/۳	۰/۳۵	۰/۲۵	۳۶/۱
I-24	۴۱/۸	۰/۴	۰/۳	۴۷/۱
I-25	۴۹/۴	۰/۶	۰/۴	پارگی
J-26	۱۹/۱	۰/۲	۰/۱۵	۱۸/۷
J-27	۲۸/۱	۰/۳	۰/۲۵	۲۸/۵
J-28	۳۲/۳	۰/۳۵	۰/۲۵	۳۲/۹
J-29	۴۱/۸	۰/۴	۰/۳	۴۳/۵
J-30	۴۹/۴	۰/۶	۰/۴	۵۰/۸
K-31	۱۹/۱	۰/۲	۰/۱۵	۱۴/۵
K-32	۲۸/۱	۰/۳	۰/۲۵	۲۲/۲
K-33	۳۲/۳	۰/۳۵	۰/۲۵	۲۵/۵
K-34	۴۱/۸	۰/۴	۰/۳	۳۳/۶
K-35	۴۹/۴	۰/۶	۰/۴	۳۹/۸
L-36	۱۹/۱	۰/۲	۰/۱۵	۱۳/۳
L-37	۲۸/۱	۰/۳	۰/۲۵	۲۰/۶
L-38	۳۲/۳	۰/۳۵	۰/۲۵	۲۳/۸
L-39	۴۱/۸	۰/۴	۰/۳	۳۱/۲
L-40	۴۹/۴	۰/۶	۰/۴	۳۷/۲

که استفاده از رویه‌های پلی‌اوره در ایمپالس‌های پایین کمک شایانی به مقاومت سازه در برابر بار انفجاری ضمن پایین‌نگه‌داشتن جرم سازه می‌کند. همچنین در این نمودار، مقادیر خیز دایمی ساختارهای فلز- پلیمر برحسب ایمپالس برای گروه‌های آزمایشی مختلف به صورت منحنی درجه یک برازش شده‌اند. توابع برازش در جدول ۴ بیان شده است. با توجه به اینکه در گروه‌های آزمایشی E و F تعداد داده‌های تجربی برابر با ۳ یا کمتر از آن است؛ لذا نتایج منحنی‌های برازش‌شده برای این دو گروه ارایه نشده است.

جدول (۴) منحنی‌های درجه اول برازش‌شده

R^2	منحنی برازش‌شده	مشخصات آزمایش
۰/۹۹۷	$W_0 = 1.10I + 0.39$	G-Al-2-PU-3
۰/۹۹۸	$W_0 = 0.96I + 0.98$	H-Al-2-PU-4
۰/۹۹۹	$W_0 = 1.16I - 1.24$	I-Al-1.5-PU-5
۰/۹۹۹	$W_0 = 1.06I - 1.38$	J-Al-1.5-PU-6
۰/۹۹۹	$W_0 = 0.84I - 1.39$	K-Al-2.5-PU-5
۰/۹۹۹	$W_0 = 0.79I - 1.62$	L-Al-2.5-PU-6

به منظور درک و توضیح بهتر میزان اثربخشی، استفاده از روکش پلی‌اوره و تغییر ضخامت آن بر بیشترین خیز دایمی ساختار دولایه فلز- پلیمری (نمودار ۲)، نمودارهای ستونی تغییرات بیشترین خیز دایمی ساختارهای دولایه فلز- پلیمری برحسب ایمپالس نمایش داده شده است.



نمودار (۲) نمودار ستونی تغییرات بیشترین خیز دایمی ساختارهای فلز- پلیمر برحسب ایمپالس

مقایسه نتایج تجربی برای دو لایه‌بندی I-Al- و I-Al-1.5-PU-5 و 1.5-PU-6 نشان می‌دهد که افزایش ۲ و ۵ میلی‌متری ضخامت

ناحیه دمی‌شکل از مرکز ساختار به سمت مرزهای کاملاً گیردار حرکت می‌کند.

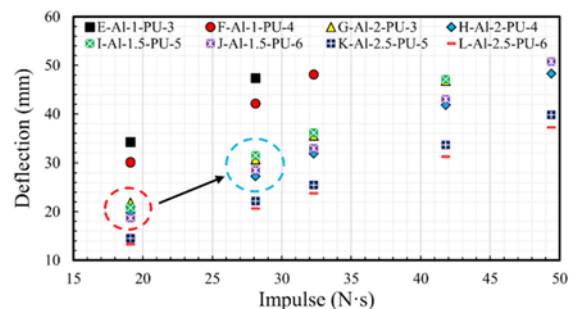
سطحی از ساختار که بین دو نگه‌دارنده قرار دارد، دچار هیچ‌گونه تغییر شکل غیرالاستیک بزرگی نشده و مکان‌هایی که در آنها پیچ‌ها قرار دارند، دچار هیچ‌گونه کشیدگی نشده‌اند.

نازک‌شدگی در طول مرزهای گیردار مشابه با ورق‌های تک‌لایه و دولایه مشهود است و این نشان‌دهنده تاثیر و عمل نیروهای کششی غشایی است.

لولاهای پلاستیک در امتداد خط‌های قطری کشیده‌شده روی نمونه از گوشه‌های ساختار تا مرکز آن گسترش می‌یابد.

۳-۲- تاثیر ضخامت لایه فلزی و پلیمری

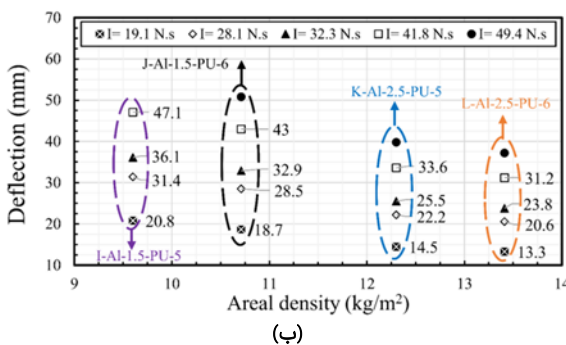
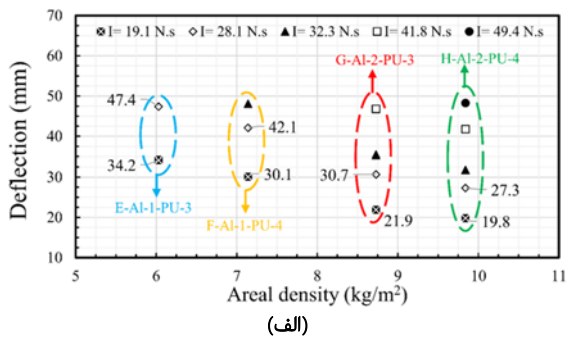
اکنون، پس از بررسی و تشریح مدهای تغییر شکل پلاستیک ساختارهای دولایه فلز- پلیمری به تحلیل نتایج تجربی کمی به دست آمده پرداخته می‌شود. لذا در این بخش تاثیر تغییر پارامترهای تجربی، مانند افزایش میزان ایمپالس، افزایش ضخامت ورق فلزی و روکش پلی‌اوره و همچنین اثر افزایش چگالی سطحی بر بیشترین خیز دایمی ساختار دولایه فلز- پلیمر، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. به همین منظور در نمودار ۱، تغییرات بیشترین خیز دایمی ساختارهای فلز- پلیمر برحسب ایمپالس، نمایش داده شده است.



نمودار (۱) تغییرات بیشترین خیز دایمی ساختارهای فلز- پلیمر برحسب ایمپالس

در نمودار ۱، همان‌طور که انتظار می‌رفت، بیشترین خیز دایمی ساختارهای دولایه فلز- پلیمری با بالارفتن سطح انرژی انتقالی، به صورت تدریجی افزایش می‌یابد و در حالت کلی، ایمپالس و بیشترین خیز دایمی با یکدیگر رابطه مستقیم و خطی دارند. یکی از نکات جالب در رفتار ساختارهای فلز- پلیمر تحت بار انفجار مخلوط گازها برخلاف ساختارهای دولایه فلزی و مشابه با ساختارهای تک‌لایه فلزی، این است که تغییر شکل پلاستیک این ساختارها در یک مرحله با نرخ‌های افزایشی مختلف رخ می‌دهد. همان‌طور که در نواحی دایره‌ای قرمز و آبی در نمودار ۱ نشان داده شده، در ایمپالس‌های پایین، دو گروه آزمایشی H و I که تقریباً دارای چگالی سطحی یکسان دارند، دارای خیزهای دایمی تقریباً برابر هستند اما در ایمپالس‌های بالاتر، ساختار H مقاومت بیشتری در برابر بار دفعی دارد؛ بنابراین، این نتیجه حاصل می‌شود

۲۸/۱N۰s و در نهایت ۲۳/۳ و ۳۱/۳% در ایمپالس ۳۲/۳N۰s شده است. لازم به توضیح است که برای ورق‌های آلومینیومی با ضخامت ۱ [15, 16]، استفاده از روکش پلیمری ۳ و ۴ میلی‌متری، به ترتیب موجب ۲/۱ و ۲/۴ برابر کردن آستانه تحمل بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها شده است. در نمودار ۳، به منظور بررسی اثر چگالی سطحی بر مقاومت ساختارهای دولایه فلز- پلیمری، تغییرات بیشترین خیز دایمی برحسب چگالی سطحی نمایش داده شده است.



نمودار ۳) تغییرات بیشترین خیز دایمی ساختارهای دولایه فلز- پلیمری برحسب چگالی سطحی

همان‌طور که انتظار می‌رفت، افزایش چگالی سطحی نمونه، باعث کاهش میزان تغییر شکل پلاستیک در هر شرایط بارگذاری می‌شود. به‌طور مثال در نمودار ۳- ب، برای هنگامی که نمونه‌های آزمایشی تحت بارگذاری دفعی با مقادیر پیش فشار $P_{02} = 0.4 \text{ bar}$ و $P_{C2H2} = 0.3 \text{ bar}$ قرار دارند، با تغییر چگالی سطحی از $9/6$ به $10/7 \text{ kg/m}^2$ ، خیز دایمی ساختار از $47/1$ به $43/0$ میلی‌متر کاهش می‌یابد. این بدان معناست که شیب کاهش خیز دایمی ساختار برحسب چگالی سطحی در مرحله اول $3/7 \text{ mm}^2/\text{kg}$ است. لازم به توضیح است که این شیب کاهش برای مراحل دوم و سوم یعنی زمانی که چگالی سطحی به ترتیب از $10/7$ به $12/3 \text{ kg/m}^2$ و از $12/3$ به $13/4 \text{ kg/m}^2$ تغییر می‌کند، برابر است با $5/79$ و $2/2 \text{ mm}^2/\text{kg}$ و همچنین برای هنگامی که نمونه‌های آزمایشی تحت بارگذاری دفعی با مقادیر پیش فشار $P_{02} = 0.35 \text{ bar}$ و $P_{C2H2} = 0.25 \text{ bar}$ قرار دارند، این مقادیر به ترتیب برابر است با $4/7$ و $2/9$ و $1/53 \text{ mm}^2/\text{kg}$.

روکش پلیمری و ورق آلومینیومی در مقایسه با لایه‌بندی‌های E-Al-1-PU-3 و F-Al-1-PU-4، به ترتیب منجر به کاهش خیز ساختار دولایه فلز- پلیمری به میزان $39/2$ و $37/9$ % در ایمپالس $19/1 \text{ N} \cdot \text{s}$ ، $33/8$ و $32/3$ % در ایمپالس $28/1 \text{ N} \cdot \text{s}$ می‌شود و آستانه تحمل ساختار فلز- پلیمر را به ترتیب تا ایمپالس $41/8$ و $49/4 \text{ N} \cdot \text{s}$ بالا می‌برد. این در حالی است که مقایسه نتایج تجربی به دست آمده برای دو لایه‌بندی K-Al-2.5-PU-5 و L-Al-2.5-PU-6 نشان می‌دهد که افزایش ۲ و $5/0$ میلی‌متری ضخامت روکش پلیمری و ورق آلومینیومی در مقایسه با لایه‌بندی‌های G-Al-2-PU-3 و H-Al-2-PU-4، منجر به کاهش خیز ساختار دولایه فلز- پلیمری به میزان $33/8$ و $32/8$ % در ایمپالس $19/1 \text{ N} \cdot \text{s}$ ، $27/7$ و $24/5$ % در ایمپالس $28/1 \text{ N} \cdot \text{s}$ ، $25/2$ و $28/2$ % در ایمپالس $41/8 \text{ N} \cdot \text{s}$ می‌شود و آستانه تحمل ساختار G-Al-2-PU-3 را تا ایمپالس $49/4 \text{ N} \cdot \text{s}$ بالا می‌برد. این در حالی است که مقایسه نتایج تجربی برای دو لایه‌بندی I-Al-1.5-PU-5 و K-Al-2.5-PU-5 نشان می‌دهد که افزایش 5 میلی‌متری ضخامت ورق آلومینیومی، منجر به کاهش خیز ساختار دولایه فلز- پلیمری با روکش پلیمری به ضخامت 5 میلی‌متر به میزان $30/3$ ، $29/4$ و $28/7$ % به ترتیب در ایمپالس‌های $19/1$ ، $28/1$ و $41/8 \text{ N} \cdot \text{s}$ می‌شود. مقایسه بیشتر نتایج تجربی برای دو لایه‌بندی E-Al-1-PU-3 و F-Al-1-PU-4 بیانگر آن است که افزایش ضخامت روکش پلیمری، منجر به کاهش خیز ساختار دولایه فلز- پلیمری با ورق آلومینیومی 15 و 16 میلی‌متر [15, 16] به میزان $11/1$ و $11/9$ % به ترتیب در ایمپالس‌های $19/1$ و $28/1 \text{ N} \cdot \text{s}$ می‌شود. این در حالی است که مقایسه نتایج تجربی به دست آمده برای دو لایه‌بندی E-Al-1-PU-3 و G-Al-2-PU-3 نشان می‌دهد که افزایش ضخامت ورق آلومینیومی، منجر به کاهش خیز ساختار دولایه فلز- پلیمری با روکش پلیمری به ضخامت 3 میلی‌متر به میزان $35/9$ و $35/2$ % به ترتیب در ایمپالس‌های $19/1$ و $28/1 \text{ N} \cdot \text{s}$ می‌شود. همچنین، مقایسه نتایج تجربی به دست آمده برای دو لایه‌بندی G-Al-2-PU-3 و H-Al-2-PU-4 نشان می‌دهد که افزایش ضخامت روکش پلیمری، منجر به کاهش خیز ساختار دولایه فلز- پلیمری با ورق آلومینیومی 2 میلی‌متر به میزان $9/6$ ، $11/1$ و $10/4$ % به ترتیب در ایمپالس‌های $19/1$ ، $28/1$ و $41/8 \text{ N} \cdot \text{s}$ می‌شود. این در حالی است که مقایسه نتایج تجربی برای دو لایه‌بندی F-Al-1-PU-3 و PU-4 و H-Al-2-PU-4 نشان می‌دهد که افزایش ضخامت ورق آلومینیومی، منجر به کاهش خیز ساختار دولایه فلز- پلیمری با روکش پلیمری به ضخامت 4 میلی‌متر به میزان $34/2$ و $35/2$ % و $33/9$ % به ترتیب در ایمپالس‌های $19/1$ ، $28/1$ و $41/8 \text{ N} \cdot \text{s}$ می‌شود. مقایسه بیشتر نتایج تجربی نشان می‌دهد که افزودن روکش پلیمری با ضخامت‌های 3 و 4 میلی‌متر به ورق آلومینیومی 2 میلی‌متری به ترتیب موجب کاهش خیز دایمی ساختار به میزان $12/7$ و $21/1$ % در ایمپالس $19/1 \text{ N} \cdot \text{s}$ و $22/2$ و $30/9$ % در ایمپالس

۴- طراحی آزمایش

با توجه به تعداد زیاد پارامترهای موثر در فرآیند شکل‌دهی ورق‌های دولایه، بررسی تاثیر هر کدام از آنها به صورت جداگانه کار بسیار دشوار و زمان‌بری است. استفاده از روش‌های ساده مانند تغییر یک پارامتر در هر زمان نیز، نمی‌تواند به خوبی تاثیر و برهمکنش بین پارامترها را نشان دهد؛ بنابراین استفاده از نرم‌افزار طراح آزمایش می‌تواند موثر باشد. در بین روش‌های طراحی آزمایش، روش سطح پاسخ به علت دقت خوب در تعیین تاثیرات 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 تاثیر پارامترهای مهم را بر خروجی‌های نهایی تعیین کند.

در این مقاله، به منظور تعیین تاثیر پارامترهای فرآیند شکل‌دهی ورق‌های دولایه تحت بارگذاری انفجاری و 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 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 می‌شود.

تعداد ۴۰ آزمایش انجام شد که داده‌های آنها در جدول ۳ آمده است. با توجه به داده‌ها، ۳ متغیر به عنوان پارامترهای مستقل و یک متغیر نیز به عنوان جواب در نظر گرفته شده است. تغییر شکل ورق دولایه پارامتر خروجی و ضخامت ورق آلومینیومی، ضخامت روکش پلیمری و ایمپالس بارگذاری که مربوط به ترکیب گازهی اکسیژن و استیلن در محفظه انفجار است، پارامترهای مستقل در این بررسی هستند. در جدول ۵ نماد این پارامترها و تغییرات آنها آمده است.

جدول ۵) پارامترهای روش سطح پاسخ و تغییرات آنها

پارامتر	واحد	نماد	حداقل	حداکثر
ضخامت ورق فلزی	mm	X1	۱	۲/۵
ضخامت روکش پلیمری	mm	X2	۳	۶
ایمپالس	N.s	X3	۱۹/۱	۴۹/۴
تغییر شکل ورق دولایه	mm	Y1	-	-

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

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

که در آن Y پاسخ محاسبه شده، x_i و x_j متغیرهای کدگذاری شده، β_0 ضریب ثابت، β_j ضریب خطی، β_{jj} ضریب مرتبه دوم و β_{ij} ضریب متقابل است [31].

۵- بحث و بررسی نتایج

۵-۱- تحلیل واریانس خروجی

پس از بررسی مدل‌های مختلف ارایه‌شده و استفاده از روش تحلیل آماری واریانس، تحلیل پارامترهای مستقل و کمیت‌های R^2 و R_{adj}^2 مشخص شد که از بین مدل‌های پیشنهادی، مدل درجه دوم اصلاح‌شده، تطبیق بهتری با نتایج آزمایش برای تغییر شکل ساختار دولایه دارد. آنالیز واریانس برای عواملی که مقدار p-value آنها کمتر از ۰/۱ بود در جدول ۶ آمده است. این پارامترها نشان‌دهنده تاثیر بالای هر کدام از آنها بر خروجی دارد. در این بررسی به منظور معنی‌دار بودن مدل، سطح اطمینان ۹۵٪ در نظر گرفته شده است. بر این اساس، p-value برای مدل کمتر از ۰/۰۵ به دست آمده و این یعنی مدل در نظر گرفته شده معنی‌دار است. مقدار R^2 و R_{adj}^2 به ترتیب برابر ۰/۹۹۸۰ و ۰/۹۹۷۲ به دست آمده است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که مدل ارایه‌شده برای این آزمایش مناسب بوده و مقادیر به دست آمده از آزمایش با مقادیر پیش‌بینی‌شده برای خروجی، بر اساس مدل مطابقت دارد.

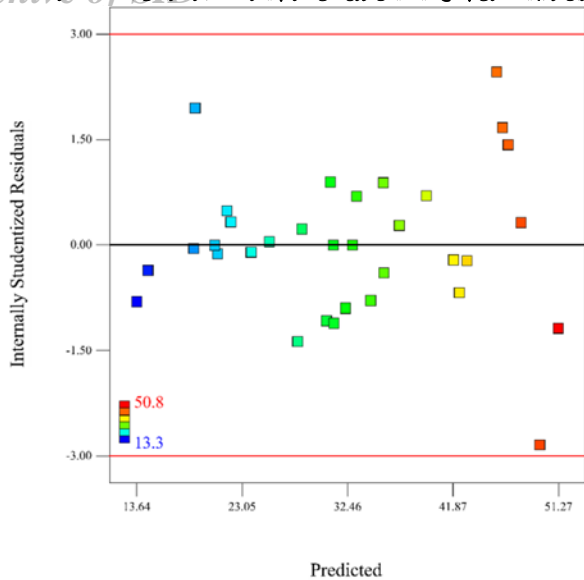
جدول ۶) نتایج آزمون تحلیل واریانس مربوط به مدل سطح پاسخ جابجایی ساختار دولایه Y

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	متوسط مربعات	F-value	Probe > F
مدل Y	۳۵۷۱/۵۶	۸	۴۴۶/۴۴	۱۴۵۳/۴۰	<۰/۰۰۰۱
X ₁	۱۰۳۰/۷۴	۱	۱۰۳۰/۷۴	۳۳۵۵/۵۷	<۰/۰۰۰۱
X ₂	۲۸۷/۹۶	۱	۲۸۷/۹۶	۹۳۷/۴۷	<۰/۰۰۰۱
X ₃	۲۳۰۷/۲۸	۱	۲۳۰۷/۲۸	۷۵۱۱/۳۶	<۰/۰۰۰۱
X ₁ X ₂	۲/۴۷	۱	۲/۴۷	۸/۰۵	۰/۰۰۹۱
X ₁ X ₃	۵۴/۸۸	۱	۵۴/۸۸	۱۷۸/۶۷	<۰/۰۰۰۱
X ₂ X ₃	۶/۱۵	۱	۶/۱۵	۲۰/۰۱	۰/۰۰۰۲
X ₁ ²	۸/۰۳	۱	۸/۰۳	۲۶/۱۵	<۰/۰۰۰۱
X ₂ ²	۲/۵۶	۱	۲/۵۶	۸/۳۴	۰/۰۰۸۱
باقیمانده	۷/۳۷	۲۴	۰/۳۱	-	-
خطای خالص	۳۵۷۸/۹۳	۳۲	-	-	-

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.

$$Y = 35.82 - 10.14X_1 - 4.76X_2 + 16.17X_3 + 1.26X_1X_2 - 3.42X_1X_3 - 1.03X_2X_3 + 2.48X_1^2 + 0.7X_2^2 \quad (2)$$

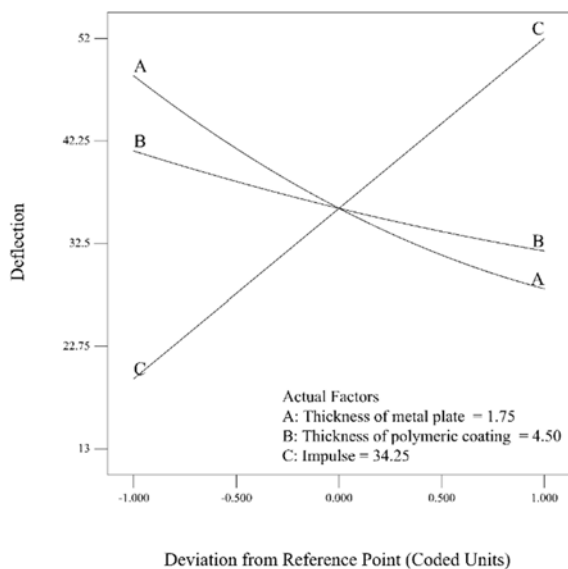
مقایسه بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده از روش سطح پاسخ در نمودار ۴ نشان داده شده است. نزدیک بودن داده‌ها نزدیک خط مورب بدان معنا است که مدل، پیش‌بینی خوبی از تغییر شکل ساختار دولایه نسبت به آزمایش‌های تجربی دارد. همچنین تفاوت رنگ در نقاط داخل شکل، نشان‌دهنده تفاوت در مقدار تغییر شکل ساختار دولایه که از آبی تا قرمز یعنی از کم تا زیاد نشان داده شده است.



نمودار (۶) نمودار باقی‌مانده‌ها برحسب مقادیر پیش‌بینی‌شده

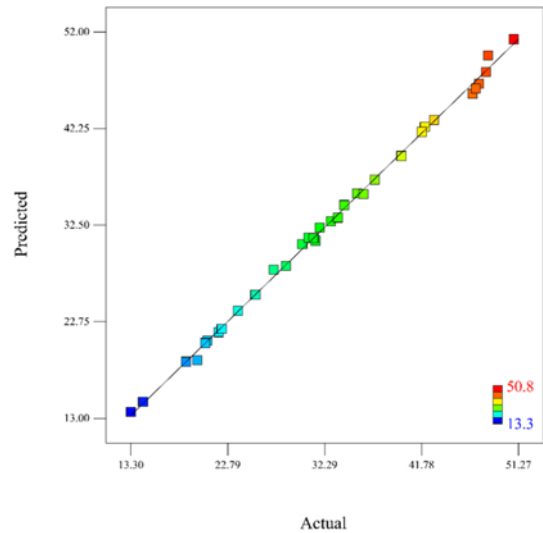
۵-۲- تحلیل آماری خروجی

در این بخش، به تاثیر متقابل پارامترهای مستقل به‌طور همزمان روی خروجی پرداخته شده است. در نمودار ۷ تاثیر پارامترهای مستقل بر تغییر شکل ساختار دولایه نشان داده شده است. تحلیل این نمودار بدان شکل است که شیب بیشتر خط مربوط به هر کدام از پارامترها نشان‌دهنده تاثیر بیشتر آن پارامتر روی تغییر شکل ساختار دولایه است. با توجه به توضیحات ارائه‌شده و نتایج به‌دست‌آمده، ای‌مپالس حاصل انفجار مخلوط گاز بیشترین تاثیر و ضخامت روکش پلیمری به‌علت کم‌تر بودن تنش تسلیم استاتیکی آن در مقایسه با ورق آلومینیومی کمترین تاثیر را بر تغییر شکل ساختار دولایه دارد.



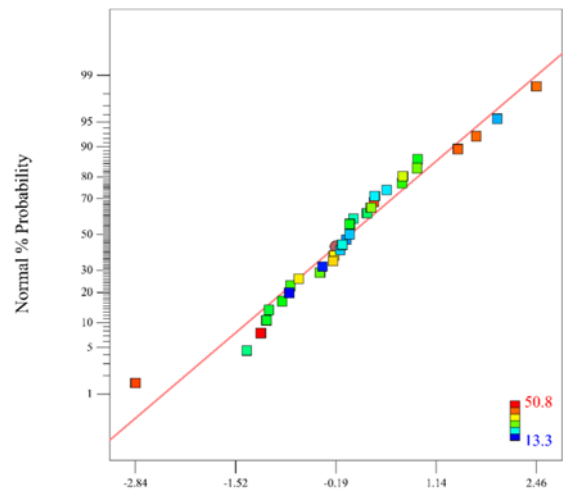
نمودار (۷) تاثیر پارامترهای مستقل بر تغییر شکل ساختار دولایه

در نمودارهای ۸ تا ۱۰، اثر متقابل دو پارامتر بر تغییر شکل ساختار دولایه ضمن ثابت در نظر گرفتن پارامتر سوم نشان داده شده است.



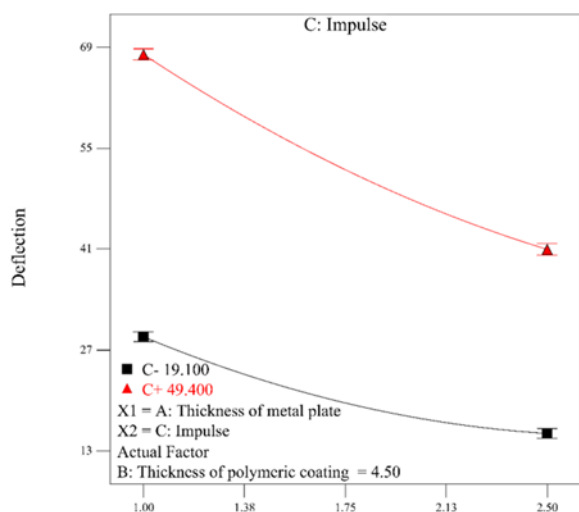
نمودار (۴) مقایسه بین مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل رگرسیونی و مقادیر واقعی

در نمودارهای ۵ و ۶ به‌ترتیب، نمودارهای احتمال نرمال باقی‌مانده‌ها و باقی‌مانده‌ها برحسب مقادیر پیش‌بینی‌شده بعد از حذف عوامل غیرمؤثر در مدل رگرسیونی نشان داده شده است. طبق یک قانون کلی برای احتمال نرمال باقی‌مانده‌ها، داده‌های این نمودار باید ۳ ویژگی داشته باشند؛ اول اینکه باید داده‌های احتمالی بین ۲۵ تا ۷۵ باشند، دوم اینکه 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 نمودار ۶ نیز نمودار باقی‌مانده‌ها برحسب مقادیر پیش‌بینی‌شده نشان داده شده است. در اینجا 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.



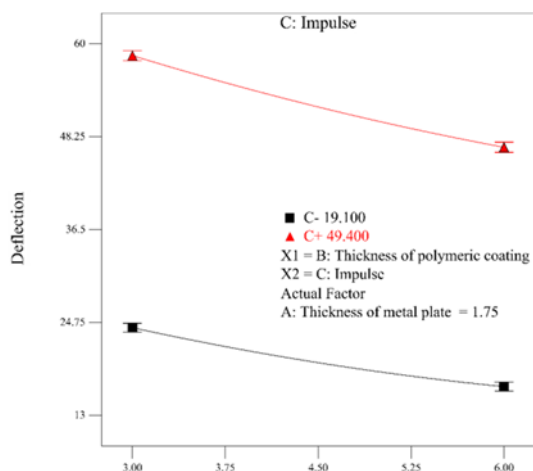
نمودار (۵) احتمال نرمال باقی‌مانده‌ها

روکش پلیمری تاثیر ایمپالس بر تغییر شکل ساختار دولایه تقریباً ثابت باقی می ماند.



A: Thickness of metal plate

نمودار ۹) تاثیر ضخامت ورق فلزی و ایمپالس بر تغییر شکل ساختار دولایه

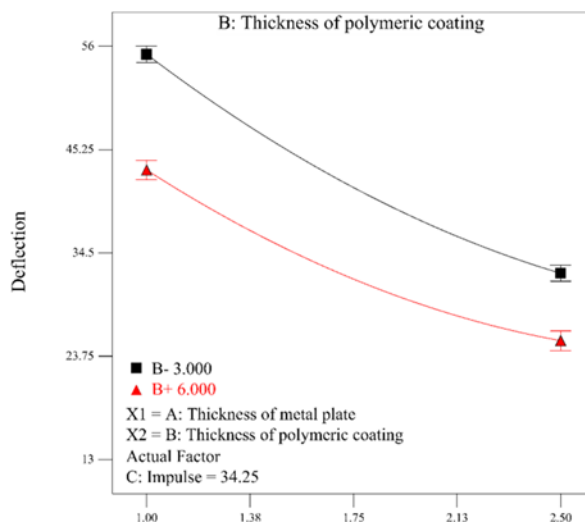


B: Thickness of polymeric coating

نمودار ۱۰) تاثیر ضخامت روکش پلیمری و ایمپالس بر تغییر شکل ساختار دولایه

برای درک بهتر نتایج به دست آمده در نمودارهای ۸ تا ۱۰، اثرات متقابل پارامترها بر بیشترین خیز دائمی ساختار دولایه به صورت کانتورهای رنگی دوبعدی و سه بعدی در نمودارهای ۱۱ تا ۱۳ نشان داده شده است. نمودار ۱۱، بیانگر تغییرات ضخامت های ورق فلزی و روکش پلیمری در ایمپالس ثابت، نمودار ۱۲ نشان دهنده تغییرات ضخامت ورق فلزی و ایمپالس در ضخامت روکش پلیمری ثابت و نمودار ۱۳ بیانگر تغییرات ضخامت روکش پلیمری و ایمپالس در ضخامت ورق فلزی ثابت بر بیشترین خیز دائمی ساختار دولایه فلز- پلیمر تحت بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها است.

در نمودار ۸، مقدار ایمپالس ثابت و ضخامت های ورق فلزی و روکش پلیمری تغییر می کنند. با افزایش ضخامت های ورق فلزی و روکش پلیمری مقدار تغییر شکل ساختار دولایه کاهش می یابد. کاهش فاصله بین نقاط حداکثر و حداقل ضخامت روکش پلیمری همزمان با افزایش ضخامت ورق فلزی نشان دهنده آن است که افزایش ضخامت ورق فلزی تاثیر ضخامت روکش پلیمری بر تغییر شکل ساختار دولایه کاهش می دهد و روکش پلیمری در ضخامت های پایین تر ورق فلزی تاثیرگذاری بیشتری روی تغییر شکل ساختار دولایه فلز- پلیمر دارد.

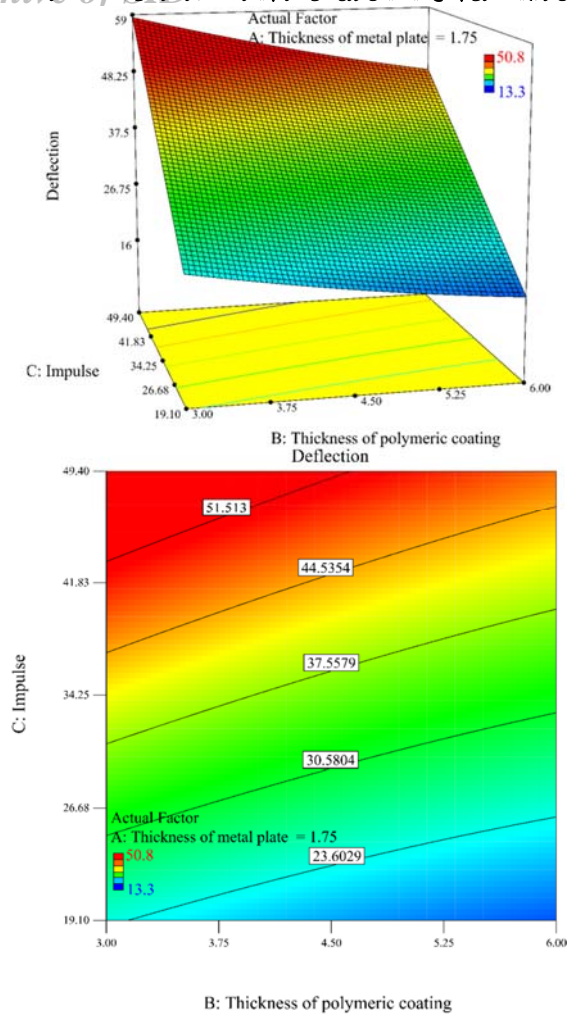


A: Thickness of metal plate

نمودار ۸) تاثیر ضخامت های ورق فلزی و روکش پلیمری بر تغییر شکل ساختار دولایه

در نمودار ۹، مقدار ضخامت روکش پلیمری ثابت و میزان ایمپالس و ضخامت ورق فلزی تغییر می کنند. مشاهده دقیق نمودار ارایه شده نشان می دهد که با افزایش ضخامت ورق فلزی و کاهش همزمان میزان ایمپالس، مقدار بیشترین خیز دائمی ساختار دولایه کاهش می یابد. در این نمودار نیز به طور مشابه کاهش فاصله بین نقاط حداکثر و حداقل ایمپالس همزمان با افزایش ضخامت ورق فلزی بیانگر این است که افزایش ضخامت ورق فلزی تاثیر ایمپالس بر بیشترین خیز دائمی ساختار دولایه کاهش می دهد.

در نمودار ۱۰، مقدار ضخامت ورق فلزی ثابت و میزان ایمپالس بار دفعی و ضخامت روکش پلیمری تغییر می کنند. از نمودار ارایه شده به وضوح مشخص است که با افزایش ضخامت روکش پلیمری و کاهش میزان ایمپالس بار دفعی، مقدار بیشترین خیز دائمی ساختار دولایه فلز- پلیمر کاهش می یابد. با توجه به اینکه فاصله بین نقاط حداکثر و حداقل ایمپالس با افزایش ضخامت روکش پلیمری تقریباً ثابت است، بنابراین با افزایش ضخامت



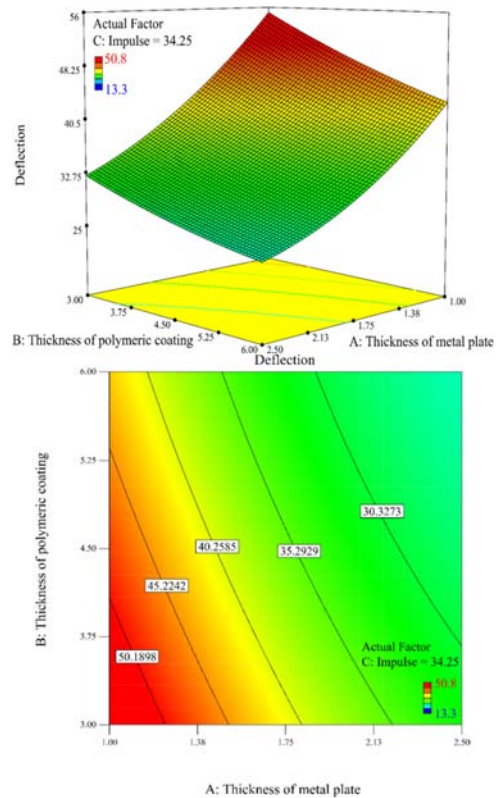
نمودار ۱۰) تغییر شکل ساختار دولایه به صورت کانتورهای رنگی دوبعدی و سه‌بعدی با تغییرات ضخامت‌های روکش پلیمری و ایمپالس

۳-۵- تعیین شرایط بهینه

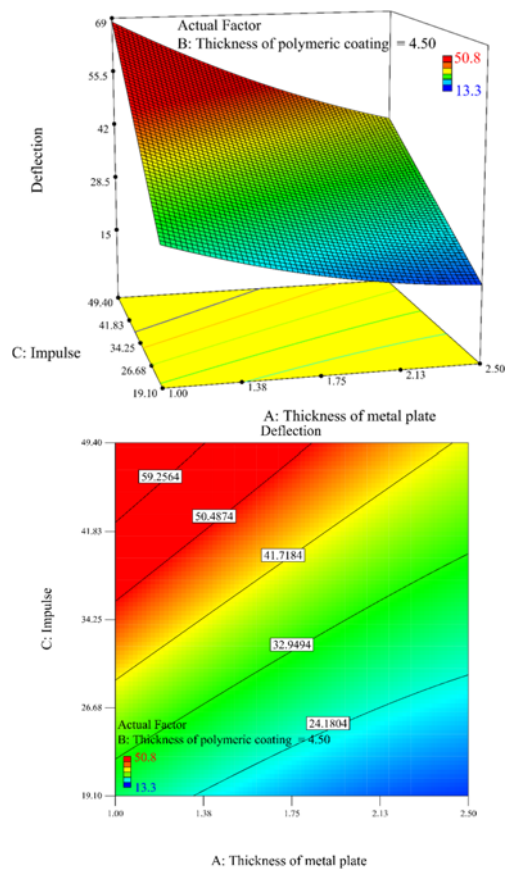
برای تعیین مطلوبیت، تاثیر هر کدام از پارامترها بر خروجی نیاز به یک تابع هدف است. با توجه به پارامترهای مستقل و خروجی، شرایط بهینه‌سازی عددی در جدول ۷ نشان داده شده است. در این جدول، هدف بهینه‌سازی هر فاکتور، بازه تغییرات و درجه اهمیت آن بیان شده است.

جدول ۷) مشخصات پارامترهای مستقل و خروجی برای تعیین شرایط بهینه

پارامتر	هدف	کمترین مقدار	بیشترین مقدار	درجه اهمیت
ضخامت ورق فلزی	در بازه مقادیر	۱	۲/۵	۳
ضخامت روکش پلیمری	در بازه مقادیر	۳	۶	۳
ایمپالس	در بازه مقادیر	۱۹/۱	۴۹/۴	۳
تغییر شکل ساختار دولایه	کمترین مقدار	۱۳/۳	۵۰/۸	۵



نمودار ۱۱) تغییر شکل ساختار دولایه به صورت کانتورهای رنگی دوبعدی و سه‌بعدی با تغییرات ضخامت‌های ورق فلزی و روکش پلیمری



نمودار ۱۲) تغییر شکل ساختار دولایه به صورت کانتورهای رنگی دوبعدی و سه‌بعدی با تغییرات ضخامت‌های ورق فلزی و ایمپالس

معنی‌دار بودن مدل، سطح اطمینان ۹۵٪ در نظر گرفته شد؛ بدان معنا است که چنانچه p -value برای مدل کمتر از ۰/۰۵ باشد، مدل در نظر گرفته شده معنی‌دار است. با استفاده از تحلیل واریانس مقادیر عددی ضرایب متغیرها، p -value و همچنین R^2 و R^2_{adj} به دست آمد. با توجه به مقدار بالای ضریب همبستگی ($R^2=0/9980$) به دست آمده از روش سطح پاسخ می‌توان نتیجه گرفت که نتایج حاصل از مدل رگرسیونی تطابق بسیار خوبی با نتایج تجربی دارد. ضخامت ورق فلزی، ضخامت روکش پلیمری و ایمپالس انفجار مخلوط گازها به عنوان پارامترهای مستقل تاثیرگذار بر خروجی یعنی تغییر شکل ساختار دولایه، در نظر گرفته شدند. ایمپالس مربوط به انفجار مخلوط گازها بیشترین تاثیر و ضخامت روکش پلیمری کمترین تاثیر را بر تغییر شکل ساختار دولایه دارند. با افزایش ضخامت ورق فلزی تاثیر ضخامت روکش پلیمری و ایمپالس بر تغییر شکل ساختار دولایه کاهش می‌یابد. ضمناً با افزایش ضخامت روکش پلیمری تاثیر ایمپالس بر تغییر شکل ساختار دولایه تقریباً ثابت باقی می‌ماند. برای داشتن شرایط بهینه یعنی کمترین مقدار تغییر شکل در ساختار دولایه باید ضخامت‌های ورق فلزی و روکش پلیمری بیشترین مقادیر خود و ایمپالس کمترین مقدار خود را داشته باشند.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

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

تعارض منافع: این مقاله هیچ‌گونه تعارض منافی با سازمان‌ها و اشخاص ندارد.

سهم نویسندگان: توحید میرزابابای مستوفی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش‌شناسی/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪): مصطفی سیاح‌بادخور (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/روش‌شناسی/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪).

منابع مالی: کلیه هزینه‌ها توسط نویسندگان تامین شده است.

منابع

- 1- Mirzababaie Mostofi, 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, 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- Yasar M. Gas detonation forming process and modeling for efficient spring-back prediction. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004;150(3):270-279.
- 4- Yaşar M, Demirci HI, Kadi I. Detonation forming of

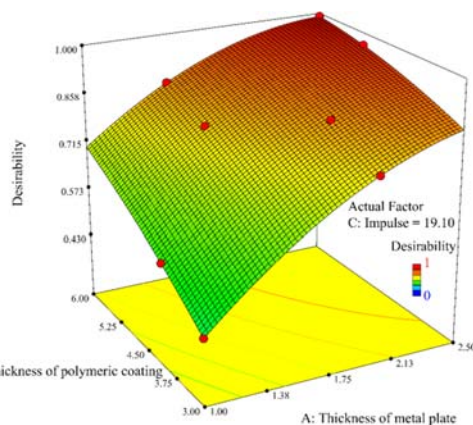
با در نظر گرفتن مقادیر جدول ۷، شرایط بهینه مورد نظر به ترتیب مطلوبیت در جدول ۸ آمده است. همان‌طور که مشخص است، برای داشتن کمتر مقدار تغییر شکل در ساختار دولایه باید ضخامت‌های ورق فلزی و روکش پلیمری بیشترین مقادیر خود و ایمپالس کمترین مقدار خود را داشته باشند. نزدیک بودن مقدار مطلوبیت به عدد ۱ نشان‌دهنده شرایط بهینه، خیلی خوب است.

به منظور بررسی نتایج به دست آمده برای شرایط بهینه تعیین شده در جدول ۸، مقادیر شماره ۱ در یک آزمایش تجربی مورد ارزیابی قرار گرفتند. مقدار تغییر شکل ساختار دولایه با آزمایش تجربی برای این شرایط برابر ۱۳/۳۵ میلی‌متر به دست آمد؛ بنابراین مقدار خطا بین مقدار تجربی و پیش‌بینی شده تنها ۲/۱۸٪ است.

در نمودار ۱۴، تغییرات مطلوبیت شرایط بهینه برای کمترین تغییر شکل ساختار دولایه بر اساس تغییر ضخامت‌های ورق فلزی و روکش پلیمری و با ثابت نگه داشتن ایمپالس نشان داده شده است.

جدول ۸) شرایط بهینه برای مشخصات پارامترهای جدول ۷

شماره	ضخامت ورق فلزی (mm)	ضخامت روکش پلیمری (mm)	ایمپالس (N.s)	تغییر شکل ساختار دولایه (mm)	مطلوبیت
۱	۲/۵	۶	۱۹/۱۰	۱۳/۶۴۱۲	۰/۹۹۱
۲	۲/۳۹	۶	۱۹/۱۲	۱۳/۷۷۹۲	۰/۹۸۷
۳	۲/۳۰	۶	۱۹/۱۰	۱۳/۹۵۶۲	۰/۹۸۳
۴	۲/۵	۴/۹۱	۱۹/۱۰	۱۴/۷۹۱	۰/۹۶۰
۵	۲/۵	۳/۹۱	۱۹/۱۰	۱۶/۴۸۳۲	۰/۹۱۵



نمودار ۱۴) تغییرات مطلوبیت شرایط بهینه بر اساس تغییر ضخامت‌های ورق فلزی و روکش پلیمری

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تغییر شکل ساختارهای دولایه فلز-پلیمر تحت بارگذاری دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها به صورت تجربی و عددی، مورد بررسی قرار گرفت. در بخش تجربی ۴۰ آزمایش با سامانه انفجار گاز انجام شد و از ماده پلی‌اوره به عنوان لایه تقویت‌کننده ورق فلزی آلومینیوم استفاده شد. در بخش مدل‌سازی، از روش سطح پاسخ استفاده شد. به منظور بررسی

18- Amini MR, Isaacs JB, Nemat-Nasser S. Experimental investigation of response of monolithic and bilayer plates to impulsive loads. *International Journal of Impact Engineering*. 2010;37(1):82-89.

19- Amini M, Amirkhizi A, Nemat-Nasser S. Numerical modeling of response of monolithic and bilayer plates to impulsive loads. *International Journal of Impact Engineering*. 2010;37(1):90-102.

20- Amini MR, Isaacs J, Nemat-Nasser S. Investigation of effect of polyurea on response of steel plates to impulsive loads in direct pressure-pulse experiments. *Mechanics of Materials*. 2010;42(6):628-639.

21- Amini MR, Simon J, Nemat-Nasser S. Numerical modeling of effect of polyurea on response of steel plates to impulsive loads in direct pressure-pulse experiments. *Mechanics of Materials*. 2010;42(6):615-627.

22- Ackland K, Anderson C, Ngo TD. Deformation of polyurea-coated steel plates under localised blast loading. *International Journal of Impact Engineering*. 2013;51:13-22.

23- Tran P, Ngo TD, Ghazlan A. Numerical modelling of hybrid elastomeric composite panels subjected to blast loadings. *Composite Structures*. 2016;153:108-122.

24- Remennikov A, Ngo T, Mohotti D, Uy B, Netherton M. Experimental investigation and simplified modeling of response of steel plates subjected to close-in blast loading from spherical liquid explosive charges. *International Journal of Impact Engineering*. 2017;101:78-89.

25- Sanchez E, Shibata T, Zadeh LA. *Genetic algorithms and fuzzy logic systems: Soft computing perspectives*. Singapore: World Scientific; 1997.

26- Zamani J, Goudarzi M. Experimental and numerical investigation of the maximum deflection of circular aluminum plate subjected to free air explosion. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(1):219-226. [Persian]

27- Hadianfard MA, Nemati A, Johari A. Investigation of steel column behavior with different cross section under blast loading. *Modares Civil Engineering Journal*. 2016;16(4):265-278. [Persian]

28- 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]

29- Bigdeli A, Damghani Nouri M. Experimental and numerical analysis and multi-objective optimization of quasi-static compressive test on thin-walled cylindrical with internal networking. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2019;2(19):1644-1660.

30- Xue Z, Hutchinson JW. Neck retardation and enhanced energy absorption in metal-elastomer bilayers. *Mechanics of Materials*. 2007;39(5):473-487.

31- Myers RH, Montgomery DC, Anderson-Cook CM. *Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments*. 4th Edition. Hoboken: John Wiley & Sons; 2016.

aluminium cylindrical cups experimental and theoretical modelling. *Materials & Design*. 2006;27(5):397-404.

5- Kleiner M, Hermes M, Weber M, Olivier H, Gershteyn G, Bach FW, et al. Tube expansion by gas detonation. *Production Engineering*. 2007;1:9-17.

6- Meybodi MK, Bisadi H. Gas Detonation Forming by a mixture of H₂ + O₂ Detonation. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*. 2009;3:1037-1040.

7- Khaleghi M, Aghazadeh BS, Bisadi H. Efficient oxyhydrogen mixture determination in gas detonation forming. *International Journal Mechanics Mechatron Engineering*. 2013;7:1748-1754.

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

9- 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*. 2015 October.

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

11- Babaei H, Mirzababaie Mostofi, 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.

12- Patil SP, Popli M, Jenkouk V, Markert B. Numerical modelling of the gas detonation process of sheet metal forming. *Journal of Physics: Conference Series*. 2016;734:032099.

13- Jenkouk V, Patil S, Markert B. Joining of tubes by gas detonation forming. *Journal of Physics: Conference Series*. 2016;734:032101.

14- Patil SP, Prajapati KG, Jenkouk V, Olivier H, Markert B. Experimental and numerical studies of sheet metal forming with damage using gas detonation process. *Metals*. 2017;7(12):556.

15- Mirzababaie Mostofi, 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.

16- 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.

17- Mirzababaie Mostofi, 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*.