



## Plastic Deformation of Reinforced Aluminum Plates with Polyurea Coating under Impulsive Loading

T. Mirzababaie Mostofi<sup>1</sup>, M. Sayah Badkhor<sup>1</sup>, M. Miralinaghi<sup>2</sup>, H. Babaei<sup>3\*</sup>

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

<sup>2</sup>Department of Chemistry, Faculty of Science, Islamic Azad University, Varamin-Pishva Branch, Varamin, Iran

<sup>3</sup>Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

**ABSTRACT:** A single-stage gas detonation apparatus was used for the free forming of metallic-polymeric structures. In the experimental section, to improve the performance of aluminum plates under gas mixture detonation loading, a layer of polyurea material was sprayed onto the back surface of the metallic plate. To investigate the effect of the thickness of the metallic and polymeric layers on the dynamic response of the structure, aluminum plates with different thicknesses of 1, 1.5, 2, and 2.5 mm, as well as polyurea coatings with different thicknesses of 3, 4, 5 and 6 mm, were used. Experimental results showed that spraying the polyurea coating onto the back surface of aluminum plates can significantly reduce the maximum permanent deflection of the structure and also prevent the rupture of the aluminum specimens. In the numerical modeling section, the group method of data handling neural network was used to present a mathematical model based on dimensionless numbers to predict the maximum permanent deflection of metallic-polymeric structures under impulsive loading. To increase the prediction capability of the proposed neural network for this process, the experimental data were divided into two training and prediction sets. The results showed that good agreement between the proposed model and the corresponding experimental results is obtained and all data points are within the  $\pm 10\%$  error range.

### Review History:

Received: Sep. 29, 2019

Revised: Dec. 13, 2019

Accepted: Mar. 10, 2020

Available Online: Mar. 10, 2020

### Keywords:

Aluminum

Polyurea

Gas Detonation Forming Method

Neural Network

Modelling

## 1. INTRODUCTION

Up to now, a high energy rate sheet forming against impulsive loads is mostly performed using a ballistic pendulum method with the aid of plastic explosive charges [1, 2]. In the last decades, the gas mixture detonation approach [3-9] has been used to sheet and tube forming processes instead of using the ballistic pendulum. The main advantages of gas detonation forming methods are easy automation, clean combustion, higher safety in comparison with using plastic explosive charges, little requirement for external devices and good formability for different materials. So, it seems necessary to track investigations on the possible utilization of this method concerning forming technology to design an economic appliance. It is noteworthy to mention that few experimental investigations exist in the literature about the forming of metal plates using the gas detonation method.

The influence of polyurea coatings on the dynamic plastic response and failure mechanism of polyurea-coated metallic plates under extreme dynamic load has been an interesting research topic in recent years. Several investigations on the dynamic behavior of polyurea-coated steel plates subjected to impulsive loading have been conducted, whereas no experimental study has been reported on polyurea-coated aluminum plates using the gas detonation forming technique. To this end, eight different types of PU-Al plates with the same layering configuration have been tested under five different loading intensities. Furthermore, experimental data

are used to find an equation for predicting the deflection thickness ratio using the GMDH-type neural network and SVD method.

## 2. METHODOLOGY

To investigate the large transverse deformation and performance of polyurea-coated aluminum plates, a total of 40 specimens were designed and fabricated. Different layering thicknesses were used. The tests were conducted by using a single-stage gas mixture detonation apparatus, which was designed and manufactured at the Impact and Blast Laboratory of the University of Guilan (IBLUG). The dynamic plastic response quantities including maximum permanent transverse deflection of polyurea-coated aluminum plates, the pre-detonation pressures of the gas mixture, and pressure-time history after detonation were measured and documented.

The gas mixture detonation testing apparatus used for studying the free forming of polyurea-coated aluminum plates has been demonstrated in Fig. 1, which was placed in the explosion-protected area of IBLUG.

This experimental setup includes four main units: 1) ignition unit, 2) gas flow control unit, 3) pressure measurement unit, and 4) forming unit. The ignition unit consists of a seamless steel combustion chamber with 120 mm inner diameter, 40 mm wall thickness, and with a length of 530 mm which is filled with acetylene and oxygen cylinders using two controlling valves for adjusting the pre-detonation pressure

\*Corresponding author's email: ghbabaei@guilan.ac.ir





Fig. 1. Gas mixture detonation apparatus at the University of Guilan

of each gas inserted into the chamber. The gas mixture is detonated at the closed end of the combustion chamber using a spark plug. The detonation wave is generated and moves forward through the combustion chamber, and then applies to the specimen. In this experimental setup, the length of the chamber in comparison to specimen dimensions is great, and as a result, the distribution of gas mixture detonation load can be assumed uniform over a plate [3-9].

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

To investigate the resistance of polyurea-coated aluminum plates subjected to gas detonation loads, all configurations were tested under five different pre-detonation pressures of acetylene and oxygen mixture with progressively increasing detonation pressure. To better understand and explain the effects of polyurea and aluminum layer thicknesses on the maximum permanent transverse deflection of polyurea-coated aluminum plates, the clustered column charts have been used in Figs. 2 and 3. To present the GMDH-type neural networks for conducted experiments, two different sets of data were generated, namely the training set and the testing set. It is clear that the training set that contained 25 data pairs out of 33 input-output data, is used to train the GMDH-type neural network models by employing the SVD approach. The data for the training set was selected randomly, and to demonstrate the ability of the neural network in finding the optimal coefficients of quadratic polynomials, 8 unforeseen testing input-output data was used through the training process. The obtained quadratic polynomial based on the GMDH-type neural network were presented in the Persian format of this paper. Fig. 4 shows the modeling and prediction mid-point deflection thickness ratio, using the GMDH-type network model constructed with a singular value decomposition approach for the coefficients of the quadratic polynomials. It is evident from Fig. 4 that all experimental data points were located between the less than 10% Error lines.

### 4. CONCLUSIONS

In this paper, 40 experiments were performed to evaluate the influence of polyurea coatings on the dynamic plastic response of coated aluminum plates under gas mixture detonation loading. The experimental results showed that the polyurea coating significantly improved the resistance of aluminum plates due to increasing the tangent modulus while it is sprayed onto the rear side of metallic specimens.

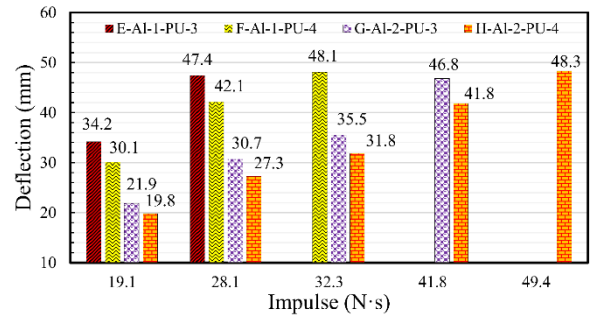


Fig. 2. Variation of the maximum permanent deflections of coated aluminum plates versus impulse (Experimental groups: E, F, G, and H)

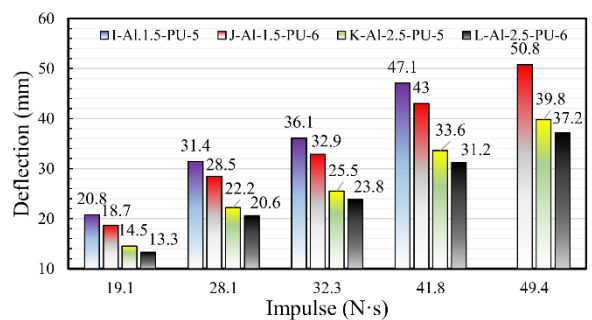


Fig. 3. Variation of the maximum permanent deflections of coated metallic aluminum versus impulse (Experimental groups: I, J, K, and L)

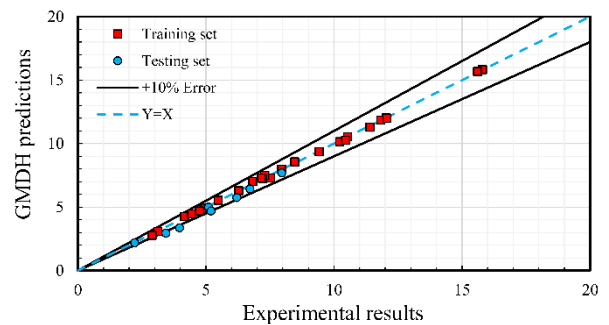


Fig. 4. Comparison of experimental results and mathematical model presented by GMDH neural network

### 5. REFERENCES

- [1] T.M. Mostofi, H. Babaei, M. Alitavoli, 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*, 109 (2016) 367-376.
- [2] T.M. Mostofi, A. Golbaf, A. Mahmoudi, M. Alitavoli, H. Babaei, 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*, 123 (2018) 48-56.
- [3] H. Babaei, T.M. Mostofi, S.H. Sadraei, Effect of gas detonation on response of circular plate-experimental and theoretical, *Structural Engineering and Mechanics*, 56(4) (2015) 535-548.
- [4] H. Babaei, T. Mirzababaie Mostofi, M. Alitavoli, 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) 0954406215614336.
- [5] H. Babaei, T.M. Mostofi, M. Alitavoli, A. Darvizeh, Empirical modelling for prediction of large deformation of clamped circular plates in gas detonation forming process, *Experimental Techniques*, 40(6) (2016) 1485-1494.
- [6] H. Babaei, T.M. Mostofi, M. Namdari-Khalilabad, M. Alitavoli, K. Mohammadi, Gas mixture detonation method, a novel processing technique for metal powder compaction: Experimental investigation and empirical modeling, *Powder technology*, 315 (2017) 171-181.
- [7] T.M. Mostofi, H. Babaei, M. Alitavoli, The influence of gas mixture detonation loads on large plastic deformation of thin quadrangular plates: Experimental investigation and empirical modelling, *Thin-Walled Structures*, 118 (2017) 1-11.
- [8] T. Mirzababaie Mostofi, H. Babaei, M. Alitavoli, Experimental and theoretical study on large ductile transverse deformations of rectangular plates subjected to shock load due to gas mixture detonation, *Strain*, 53(4) (2017) e12235.
- [9] T.M. Mostofi, H. Babaei, M. Alitavoli, G. Lu, D. Ruan, Large transverse deformation of double-layered rectangular plates subjected to gas mixture detonation load, *International Journal of Impact Engineering*, 125 (2019) 93-106.

**HOW TO CITE THIS ARTICLE**

T. Mirzababaie Mostofi, M. Sayah Badkhor, M. Miralinaghi, H. Babaei, *Plastic Deformation of Reinforced Aluminum Plates with Polyurea Coating under Impulsive Loading*. *Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(special issue 2) (2021) 297-300.

DOI: [10.22060/mej.2020.17127.6515](https://doi.org/10.22060/mej.2020.17127.6515)







## تغییر شکل پلاستیک ورق‌های آلومینیومی تقویت‌شده با روکش پلی‌اوره تحت بار دفعی: بررسی تجربی و مدل‌سازی با شبکه‌ی عصبی

توحید میرزابابای مستوفی<sup>۱</sup>، مصطفی سیاح بادخور<sup>۱</sup>، مهساسادات میر علینقی<sup>۲</sup>، هاشم بابایی<sup>۳\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی برق، کامپیوتر و مکانیک، دانشگاه ایوان‌کی، ایوان‌کی، ایران

<sup>۲</sup> دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ورامین-پیشوا، ورامین، ایران

<sup>۳</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۰۷

بازنگری: ۱۳۹۸/۰۹/۲۲

پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۲۰

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۱/۰۱

### کلمات کلیدی:

آلومینیوم

پلی‌اوره

انفجار مخلوط گاز

شبکه عصبی

مدل‌سازی

**خلاصه:** از سامانه تک‌مرحله‌ای انفجار مخلوط گاز برای شکل‌دهی آزاد ساختارهای فلز - پلیمر استفاده شده است. در بخش تجربی، به منظور بهبود عملکرد ورق‌های آلومینیومی در برابر بار ضربه‌ای حاصل از انفجار مخلوط گاز، لایه‌ای از ماده پلی‌اوره به پشت ورق فلزی پاشیده شد. به منظور بررسی اثر ضخامت لایه‌های فلزی و پلیمری بر پاسخ دینامیکی سازه، از ورق آلومینیومی در ضخامت‌های ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ میلی‌متر و همچنین روکش پلی‌اوره در ضخامت‌های ۳، ۴، ۵ و ۶ میلی‌متر استفاده شده است. نتایج تجربی نشان داد که پاشش ماده پلی‌اوره به پشت ورق آلومینیومی می‌تواند بیشترین خیز دائمی سازه را تا میزان بسیار چشم‌گیری کاهش داده و از پارگی نمونه‌های آلومینیومی جلوگیری کند. در بخش مدل‌سازی عددی، از شبکه عصبی از نوع دسته‌بندی گروهی داده‌ها برای ارائه یک مدل ریاضی بر مبنای اعداد بی‌بعد جهت پیش‌بینی بیشترین خیز دائمی ساختارهای فلز - پلیمر تحت بار دفعی استفاده شد. به منظور افزایش قابلیت پیش‌بینی شبکه عصبی پیشنهادی برای این فرآیند، داده‌ها به دو دسته آموزش و پیش‌بینی تقسیم شدند نتایج بدست‌آمده نشان داد که توافق خوبی بین مدل ارائه‌شده با مقادیر تجربی برقرار است به طوری که تمامی نقاط در محدوده خطای کمتر از ۱۰٪ قرار گرفتند.

### ۱- مقدمه

ایجاد شوک ناشی از انفجار، فشار دینامیکی باعث تغییر شکل جسم می‌شود [۳-۷]. در دهه اخیر تحقیقات به نسبت خوبی در این زمینه انجام شده است. در طی سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶، بابایی و همکارانش مطالعات خود را روی شکل‌دهی ورق‌های دایره‌ای با استفاده از روش انفجار مخلوط گازها در آزمایشگاه ضربه و انفجار دانشگاه گیلان متمرکز کردند. در مطالعات انجام‌گرفته، از دو گاز اکسیژن و استیلن برای تولید بار دفعی (بار ایمپالسیو واردشده به نمونه) و شکل‌دهی نمونه به دو طریق با قالب مخروطی و بدون قالب، به صورت تجربی پرداخته شد. در بخش مدل‌سازی تحلیلی از روش انرژی بر مبنای تئوری حد بالا جهت ارائه یک مدل برای پیش‌بینی بیشترین خیز دائمی ورق‌های دایره‌ای تحت بار انفجار مخلوط گازی استفاده شد. همچنین رابطه‌ای تجربی بر مبنای اعداد بی‌بعد جدید جهت پیش‌بینی این کمیت ارائه گردید [۸-۱۰]. در سال ۲۰۱۷، آن‌ها در

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 [۱]. روش‌های شکل‌دهی با سرعت بالا شامل، شکل‌دهی با خرج انفجاری، انفجار مخلوط گازها، الکترومغناطیسی و الکتروهایدرولیکی است. با توجه به مزایا و معایب که در روش‌های شکل‌دهی ذکر شده وجود دارد، اما 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 [۲]. فرآیند شکل‌دهی با روش انفجار مخلوط گازها نتیجه یک فرآیند شیمیایی گرمازا میان یک ماده سوختنی و عامل اکسیدکننده است که با تولید گرما و تغییر شیمیایی مواد اولیه همراه می‌شود. پس از

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ghbabaei@guilan.ac.ir



تقویت شده با روکش پلیمری یا ساختارهای فلز - پلیمر صورت نگرفته است. با استفاده از روش انفجار مخلوط گازها ادامه دادند.

در زمینه شکل دهی ساختارهای فلزی تقویت شده با لایه پلی اوره با خرج انفجاری، مهم ترین تحقیقات بین سال های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۹ گزارش شده است [۲۵-۱۸]. در سال ۲۰۱۰، امینی و همکارانش به بررسی تجربی رفتار دینامیکی و مدهای شکست ورق های تک لایه دایره ای فولادی و همچنین ورق های دولایه فولاد- پلی اوره تحت بارگذاری دفعی (بار ایмпالس وارد شده به نمونه) پرداختند. [۱۸-۲۱]. در سال ۲۰۱۳، به منظور بررسی اثر پوشش پلی اوره بر مقاومت انفجاری ورق های فولادی نرم، آکلند و همکارانش مطالعاتی تجربی و عددی انجام دادند. در تحقیقات تجربی، ورق های فولادی مربعی با و بدون پوشش پلی اوره تحت بارگذاری دفعی غیریکنواخت قرار داده شدند [۲۲]. در سال ۲۰۱۶، تران و همکاران به بررسی عددی نحوه تغییر شکل و مکانیسم شکست ساختار کامپوزیتی چندلایه الاستومر با کامپوزیت مسلح شده پلیمری تحت بار انفجاری با استفاده از تئوری شکست هاشین پرداختند. یک لایه نازک الاستومر (پلی اوره) به قسمت عقبی ساختار اعمال شد تا میزان آسیب وارد شده به چندلایه های کامپوزیتی را کاهش دهد [۲۳]. در سال ۲۰۱۷، رمینکوو و همکارانش به بررسی تغییر شکل پلاستیک سه نوع ورق فولادی شامل فولاد نرم، فولاد با مقاومت بالا و فولاد زنگ نزن تحت بار دفعی یکنواخت با استفاده از انفجار خرج های کروی نیترومتان پرداختند. همچنین آنها در تعدادی آزمایش دیگر، ورق های فولادی مذکور با پوشش پلی اوره و کامپوزیتی تحت بار دفعی غیریکنواخت قرار داده شد [۲۴].

مدل سازی فرآیندها و شناسایی سیستم ها با بکاربردن داده های ورودی - خروجی، یکی از زمینه های مورد بررسی در بسیاری از تحقیقات بوده است. روش های شناسایی سیستم در بسیاری از شاخه های علوم مهندسی به منظور مدل سازی و پیش بینی رفتارهای پیچیده و مبهم این سیستم ها با استفاده از داده های آزمایشگاهی ورودی و خروجی استفاده می شود. به این ترتیب، یکی از دلایل اصلی این پیشرفت سریع را می توان استفاده از محاسبات نرم دانست [۲۷]. مهم ترین انواع محاسبات نرم، منطق فازی، شبکه های عصبی و الگوریتم ژنتیک هستند. از این روش های محاسبات نرم برای حل کردن سیستم های غیرخطی پیچیده استفاده می شود [۲۸ و ۲۹]. روش های متعددی برای استفاده از انواع مختلف محاسبات نرم پیشنهاد شده اند که از میان آنها روش

ادامه تحقیقات خود، به معرفی روش شکل دهی انفجار مخلوط گازها به عنوان یک فرآیند جدید برای تغییر شکل پودرهای فلزی پرداختند [۱۱]. در سال های ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷، پاتیل و همکارانش به بررسی تجربی و عددی تغییر شکل پلاستیک ساختارهای فنجان فولادی با استفاده از روش انفجار مخلوط گازهای اکسیژن و هیدروژن پرداختند. در بخش شبیه سازی عددی، شبیه سازی ها روی مدل های سه بعدی محاسباتی با استفاده از مدل ماده جانسون- کوک و تحلیل دینامیکی صریح انجام شد. یکی از نکات بسیار مهم در بخش عددی، در نظر گرفتن منحنی واقعی فشار-زمان به دست آمده از حسگر به عنوان ورودی مسئله بود. در ادامه این تحقیقات، آن ها به مطالعه تجربی و عددی اتصال لوله های مسی و فولادی با همین روش پرداختند [۱۲-۱۴]. در طی سال های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۹، میرزابابای مستوفی و همکارانش، مطالعات تجربی خود را روی شکل دهی ورق های مستطیلی تک لایه [۱۵ و ۱۶] و دولایه [۱۷] با استفاده از روش انفجار مخلوط گازها ادامه دادند. مشابه با ساختارهای تک لایه، نمونه های دولایه نیز از ترکیب، یک لایه جلویی از جنس آلیاژ آلومینیوم (صفحه ای که بار انفجاری را تحمل می کند) و یک لایه عقبی از جنس فولاد نرم ساخته شدند. چهار نوع متفاوت از پیکربندی های با ضخامت مختلف، یعنی،  $1\text{mm}+1\text{mm}$ ،  $1\text{mm}+2\text{mm}$ ،  $2\text{mm}+1\text{mm}$  و  $2\text{mm}+2\text{mm}$ ، انتخاب شدند تا بتوان تاثیر ضخامت لایه های جلویی و عقبی بر مقاومت تغییر شکل ساختار دولایه بررسی شود. هر گروه آزمایشی در معرض پنج فشار پیش از انفجار مخلوط اکسیژن و استیلن قرار گرفت. نتایج تجربی نشان داد که هنگامی که بین لایه ها فاصله ای در نظر گرفته نشده باشد و لایه جلویی استحکام و چگالی کمتری نسبت به لایه عقبی داشته باشد، بیشترین خیز دائمی لایه عقبی تقریباً برابر با بیشترین خیز دائمی لایه جلویی است؛ همچنین یک مدل تحلیلی با فرم بسته مبتنی بر روش انرژی برای ساختارهای دو لایه در معرض بار دفعی یکنواخت حاصل از انفجار مخلوط گازها ارائه شد. علاوه بر این، فرمول های طراحی تجربی براساس اعداد بدون بعد جدید برای پیش بینی حداکثر خیز دائمی لایه های عقب و جلو بدست آمدند. لازم به توضیح است که در روابط تحلیلی و بی بعد، تاثیر حساسیت نرخ کرنش مواد در نظر گرفته شد. ادبیات تحقیق در مورد روش شکل دهی ورق های فلزی با انفجار مخلوط گاز نشان می دهد که به دلیل نوین بودن آن، تحقیقات بسیار اندکی در زمینه شکل دهی ورق با استفاده از این روش ارائه شده و تاکنون تحقیقی روی ساختارهای فلزی

جدول ۱: مشخصات فنی قبل از ترکیب ماده پلی‌اوره

Table 1. Polyurea technical specifications before composition

جزء دوم	جزء اول	
ایزوسیانات آروماتیک	پلی آمین	شرح شیمیایی
مایع	مایع	حالت فیزیکی
$> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$	$> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$	نقطه اشتعال
زرد	زرد (بدون رنگ‌دانه)	رنگ
۱/۱۴	۱/۱	$20\text{ }^{\circ}\text{C}$
۱/۱۰	۰/۹۸	$60\text{ }^{\circ}\text{C}$
۸۰۰	۴۷۵	$20\text{ }^{\circ}\text{C}$
۴۵۰	۲۵۰	$30\text{ }^{\circ}\text{C}$
۲۰۰	۹۰	$50\text{ }^{\circ}\text{C}$
۱۲۰	۶۵	$60\text{ }^{\circ}\text{C}$

جدول ۲: مشخصات فنی ترکیب نهایی ماده پلی‌اوره

Table 2. Polyurea technical specifications after composition

توضیحات	ویژگی
غشاء جامد الاستومتری	حالت فیزیکی
طوسی، آبی، قرمز و بژ	رنگ
۵۵ D	سختی
$950\text{ (kg/m}^3\text{)}$	چگالی
۲۲۵٪	حداکثر کشیدگی
۱۶/۲	مقاومت کششی (MPa)
۱۰۰	استحکام پارگی ( $\text{N/mm}^2$ )

تحت بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها.

## ۲- مطالعه تجربی

در سال‌های اخیر استفاده از فن ریخته‌گری پاششی یک لایه ماده پلیمری بر روی ورق فولادی جهت بهبود عملکرد دینامیکی و مقاومت شکست آن علاقه‌مندان زیادی را جذب کرده است [۲۱-۲۴]. با توجه به ادبیات تحقیق، به نظر می‌رسد که در میان پلیمرهای موجود، پلی‌اوره یک انتخاب خوب با خواص منحصر به فرد 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  $50^{\circ}\text{C}$  - درجه سانتی‌گراد بوده که خیلی پایین‌تر از حد معمول دمای عملکرد است [۳۱-۳۳]. این الاستومر به‌طور گسترده در صنعت ریخته‌گری در فرم جامد مانند تونل‌ها، پل‌ها، سقف‌ها، مخازن ذخیره‌سازی و کشتی‌های حمل‌ونقل، استفاده می‌شود. علاوه بر صنعت ریخته‌گری، اخیراً این ماده به‌منظور افزایش مقاومت ساختمان‌ها، وسایل نقلیه و سازه‌ها در برابر نیروهای ضربه‌ای و انفجاری مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به توضیحات ارائه 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 سپینا سروین سازه پارس تهیه شده در جدول ۱ و جدول ۲ ارائه شده است. در بخش تجربی از این تحقیق، هدف آن است تا بتوان با افزودن

دسته‌بندی گروهی داده‌ها یک روش خودسازمان‌ده است که به وسیله آن، مدل‌های پیچیده قابل محاسبه هستند. این روش بر اساس یک دسته داده‌های چندرودی و یک خروجی عمل می‌کند. روش دسته‌بندی گروهی داده‌ها برای اولین بار توسط ایوانکو [۳۰] برای غلبه بر مشکلات حاکم بر حل مسائل مربوط به سیستم‌های پیچیده ارائه شد. ایده اصلی روش دسته‌بندی گروهی داده‌ها، ساختن یک تابع تحلیلی در یک شبکه پیش‌خور بر اساس تابع انتقال گره‌ای چهارتایی است. ضرایب این شبکه پیش‌خور توسط تکنیک رگرسیون به دست می‌آید.

با مرور مطالعات پیشین محققان، این نتیجه حاصل شد که تمامی مطالعات در زمینه شکل‌دهی ساختارهای فلز - پلیمر با استفاده از خرج‌های انفجاری بوده و تحقیقات انجام شده با روش انفجار مخلوط گازها محدود به ورق‌های فلزی دایره‌ای و مستطیلی است [۳-۲۶]. اکنون، با توجه به توضیحات ارائه شده در ادبیات تحقیق، انجام مطالعات آزمایشگاهی روی ساختارهای فلزی شده با روکش پلیمری به‌منظور مطالعه پارامترهای مختلف و بررسی اثرگذاری آن‌ها، می‌تواند از اهمیت بالایی برخوردار باشد. با توجه به توضیحات ارائه شده، مهم‌ترین نوآوری‌های تحقیق حاضر، به شرح زیر است: (۱) بررسی تغییر شکل پلاستیک ساختارهای فلز - پلیمر با ضخامت‌های مختلف لایه فلزی و پلیمری تحت بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها در سطوح مختلف انرژی، (۲) ارائه یک مدل عددی با روش شبکه عصبی دسته‌بندی گروهی داده‌ها<sup>۱</sup> برای پیش‌بینی بیشترین خیز دائمی لایه‌های جلویی و عقبی در ساختارهای دولایه مستطیلی



Fig. 1. Gas mixture detonation apparatus at the University of Guilan

شکل ۱: دستگاه انفجار مخلوط گازها در دانشگاه گیلان

تقویت سیگنال‌های دریافتی از حس‌گر پیزوالکتریک و یک سامانه ثبت داده‌های دینامیکی برای ذخیره نمودار فشار- زمان از حس‌گر پیزوالکتریک است [۱۵-۱۷].

نمونه ساختارهای فلز - پلیمر مورد آزمایش، از ترکیب ورق فلزی از جنس آلومینیوم در ضخامت‌های ۱ میلی‌متر، ۱/۵ میلی‌متر، ۲ میلی‌متر و ۲/۵ میلی‌متر با لایه پلی‌اوره در ضخامت‌های تشکیل شده است. شایان توجه است که نمونه‌های آزمایشی در ابعاد ۳۴۵×۳۹۰ میلی‌متر مربع برش زده شدند. لازم به توضیح است که خواص مکانیکی ورق‌های فلزی در تحقیقات پیشین توسط نویسنده مسئول این تحقیق ارائه شده است [۱۵ و ۱۶].

با توجه به توضیحات ارائه شده، پاسخ دینامیکی و تغییر شکل پلاستیک ۴۰ ساختار فلز - پلیمر در هشت گروه‌بندی مختلف از نظر ضخامت و چگالی سطح یعنی؛ ۳-E-Al-۱-PU، ۴-F-Al-۱-PU، ۳-G-Al-۲-PU، ۴-H-Al-۲-PU، ۵-I-Al-۱/۵-PU، ۶-J-Al-۱/۵-PU، ۵-K-Al-۲/۵-PU و ۶-L-Al-۲/۵-PU تحت پنج 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 گرفته در این سری از آزمایش‌ها بر میزان اثربخشی افزایش ضخامت لایه فلزی و پلیمری بر مقاومت دینامیکی ساختار دولایه فلز - پلیمری و افزایش آستانه تحمل بار دفعی ورق‌های نازک آلومینیومی است.

لایه پلی‌اوره، از به‌وجود 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 استفاده شده است که تصویر آن در شکل ۱ نشان داده شده است. این سامانه آزمایشی شامل چهار بخش اصلی است: (۱) واحد اشتعال، (۲) شیر کنترل گاز (۳) واحد سیستم اندازه‌گیری فشار (۴) واحد شکل‌دهی. واحد اشتعال این سامانه شامل، سیلندرهای 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، به‌منظور 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 جرقه‌زن منفجر می‌شود. واحد سیستم اندازه‌گیری فشار شامل، یک مانومتر به‌منظور 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



### ۳- مدل سازی

#### ۳-۱- اصول و قواعد

یکسویه است که از چندین لایه و هر لایه نیز از چندین عصب تشکیل شده است. تمامی عصبها از یک ساختار مشابهی برخوردار می باشند، همگی آنها دارای دو ورودی و یک خروجی اند و هر نرون با ۵ وزن و یک بایاس عمل پردازش را میان داده های ورودی و خروجی برقرار می کند که در رابطه (۵) نشان داده شده است [۳۴].

$$y_{ik}^* = N(x_{i\alpha}, x_{i\beta}) = b^k + w_1^k x_{i\alpha} + w_2^k x_{i\beta} + w_3^k x_{i\alpha}^2 + w_4^k x_{i\beta}^2 + w_5^k x_{i\alpha} x_{i\beta} \quad (5)$$

در رابطه بالا،  $i = 1, 2, 3, \dots, N$  است که در آن  $N$  تعداد نمونه های ورودی و خروجی بوده و  $(K = 1, 2, 3, \dots, C_m^2)$  و  $\alpha, \beta \in \{1, 2, 3, \dots, m\}$  می باشد، که در آنها  $m$  تعداد نرون های لایه قبلی است.

وزن ها براساس روش کمترین مربعات خطا محاسبه شده و سپس به عنوان مقادیر مشخص و ثابت در داخل هر عصب جایگذاری می شود. در این نوع از شبکه ها عصب های مرحله قبلی و یا لایه قبلی  $(m)$  عامل و یا مولد تولید عصب های جدید (به تعداد  $C_m^2 = \frac{m(m-1)}{2}$ ) اند. از میان عصب های تولید شده، لزوماً بایستی تعدادی از آنها حذف گردند تا بدین وسیله از واگرایی شبکه جلوگیری بعمل آید. اصطلاحاً به اینگونه عصب های حذف شده، عصب مرده گفته می شود. عصب هایی که برای ادامه و گسترش شبکه باقی می ماند، امکان دارند برای ایجاد فرم همگرایی شبکه و عدم ارتباط آنها با عصب لایه آخر حذف گردند، که اصطلاحاً به آنها عصب غیرفعال می گویند. میزان مجموع مربعات خطا  $(r_j^2)$  میان مقادیر خروجی واقعی  $(y_i)$  و خروجی عصب  $z$  ام  $(y_{ij}^*)$  ملاک و معیاری برای حذف مجموعه ای از عصبها در یک لایه است که در رابطه (۶) نشان داده شده است [۳۵].

$$r_j^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - y_{ij}^*)^2}{\sum_{i=1}^N y_i^2} \rightarrow \min \quad (6)$$

در رابطه بالا  $j \in \{1, 2, 3, \dots, C_m^2\}$  است که در آن  $m$  تعداد عصب های گزینش شده در لایه قبلی است.

نگاشتی که بین متغیرهای ورودی و خروجی توسط این نوع از شبکه های عصبی برقرار می شود به صورت تابع غیرخطی ولترا، به فرم رابطه (۷) است [۳۶].

$$\hat{y} = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n a_{ijk} x_i x_j x_k + \dots \quad (7)$$

ساختاری را که برای عصبها در نظر گرفته می شود، بصورت چند

در مدل سازی عددی، اجزاء سیستم مجهول بوده و تنها ورودی و خروجی آن در دسترس است. در مدلسازی عددی، شناسایی سیستم مبتنی بر اطلاعات ورودی و خروجی مورد نظر است. حاصل این شناسایی یک تابع تقریبی ریاضی است. این تابع چندجمله ای، رابطه ای میان ورودی ها و خروجی و مدلی برای سیستم است [۳۰]. به طور کلی مسائل شناسایی سیستم بدین گونه مطرح می گردد که فرض می شود که رابطه خروجی  $(y)$  یک سیستم ناشناخته با  $m$  ورودی آن به صورت رابطه (۱) است.

$$y_i = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m) \quad (1)$$

با داشتن  $N$  نمونه از این داده های ورودی و خروجی، سیستمی همانند ماتریس زیر در رابطه (۲) به دست می آید [۳۰].

$$\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \dots & x_{1m} & y_1 \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \dots & x_{2m} & y_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{N1} & x_{N2} & x_{N3} & \dots & x_{Nm} & y_N \end{bmatrix} \quad (2)$$

عمل شناسایی سیستم را می توان انجام داد که ماحصل آن تقریب تابع  $\hat{f}$  می باشد. که به موجب آن می توان به ازای بردار ورودی  $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m)$  مقدار خروجی  $\hat{y}$  را به صورت رابطه (۳) تقریب زد [۳۰].

$$\hat{y} = \hat{f}(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m) \quad (3)$$

آنچه به طور معمول به عنوان هدف مشترک روش های شناسایی سیستم مطرح است، کمینه کردن مجموع مربعات خطا به ازای  $N$  نمونه است که در رابطه (۴) آمده است.

$$\sum_{i=1}^N [\hat{f}(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m) - y_i]^2 \rightarrow \min \quad (4)$$

که در آن تابع  $(\hat{f})$  می تواند بصورت تابع خطی و یا غیرخطی از متغیرهای ورودی سیستم باشد [۳۰].

۲-۳ به کاربردن شبکه های عصبی روش دسته بندی گروهی داده ها شبکه دسته بندی گروهی داده ها، شبکه ای خودسازمانده و

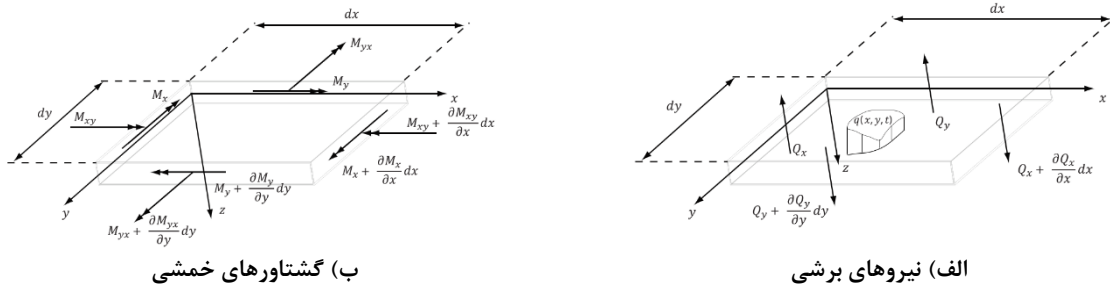


Fig. 2. Free diagram for an element of a plate

شکل ۲: دیاگرام آزاد در یک المان از ورق

$$A = \begin{bmatrix} 1 & x_{1p} & x_{1q} & x_{1p}x_{1q} & x_{1p}^2 & x_{1q}^2 \\ 1 & x_{2p} & x_{2q} & x_{2p}x_{2q} & x_{2p}^2 & x_{2q}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{Np} & x_{Nq} & x_{Np}x_{Nq} & x_{Np}^2 & x_{Nq}^2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

و بردار  $Y$  مقادیر خروجی نیز از رابطه (۱۴) بدست آمده است [۳۸ و ۳۹].

$$Y = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_N\} \quad (14)$$

برای حل معادله لازم است که شبه معکوس ماتریس غیرمربعی  $A$  محاسبه گردد. به همین خاطر برای محاسبه شبه معکوس ماتریس غیرعادی  $A$ ، از روش تجزیه مقادیر تکیه استفاده می شود [۴۰-۴۲].

### ۳-۳ ارائه اعداد بی بعد جهت مدل سازی فرآیند شکل دهی انفجاری مخلوط گازها

با مرور مطالعات و تحقیقات انجام شده روی تحلیل ابعادی رفتار پلاستیک-دینامیکی و شکست سازه های متفاوت اعم از تیر، ورق و پوسته ها تحت بارگذاری دفعی [۱۷] این نتیجه به دست آمد که روش تحلیل ابعادی و به تبع آن استخراج روابط تجربی بر اساس اعداد بی بعد پیشنهادی، دارای مزیت هایی مانند سازمان دهی کارهای تجربی و دوری از انجام آزمایش های غیرضروری است؛ لذا می توان از این روش به عنوان یک روش جایگزین مؤثر برای به دست آوردن یک رابطه بین پارامترهای ورودی و خروجی مسئله در هر فرآیندی نام برد. با توجه به تحلیل نیرویی نشان داده شده در شکل ۲ و شکل ۳ برای یک المان از ورق، معادلات حاکم بر ورق تحت بار دینامیکی به صورت رابطه (۱۵) ارائه می شود [۱۵].

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} = \rho H \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - P \quad (15)$$

جمله ای دو متغیره درجه دوم، همانند رابطه (۸) است [۳۷].

$$y_i = f(x_{ip}, x_{iq}) = a_0 + a_1 x_{ip} + a_2 x_{iq} + a_3 x_{ip} x_{iq} + a_4 x_{ip}^2 + a_5 x_{iq}^2 \quad (8)$$

هدف در الگوریتم دسته بندی گروهی داده ها یافتن ضرایب ناشناخته  $a_0$  است. تابع  $f$  در رابطه (۷) دارای شش ضریب مجهول است. لذا بایستی آنها را طوری تعیین کنیم که به ازای تمام نمونه های دو متغیر وابسته به سیستم  $\{(x_{ip}, x_{iq}), i=1, 2, \dots, N\}$  خروجی مطلوب  $\{(y_i), i=1, 2, \dots, N\}$  برقرار گردد. به همین خاطر تابع  $f$  را بر اساس قاعده کمترین مربعات خطا، طبق رابطه (۹) ارائه شده است [۳۸ و ۳۹].

$$\sum_{k=1}^N [(f(x_{ki}, x_{kj}) - y_i)^2] \rightarrow \min \quad (9)$$

با این شرایطی که بر مسئله حاکم است، بایستی دستگاه معادله ای را که دارای شش مجهول و  $N$  معادله می باشد، که در رابطه (۱۰) آمده است.

$$\begin{cases} a_0 + a_1 x_{1p} + a_2 x_{1q} + a_3 x_{1p} x_{1q} + a_4 x_{1p}^2 + a_5 x_{1q}^2 = y_1 \\ a_0 + a_1 x_{2p} + a_2 x_{2q} + a_3 x_{2p} x_{2q} + a_4 x_{2p}^2 + a_5 x_{2q}^2 = y_2 \\ \dots \\ a_0 + a_1 x_{Np} + a_2 x_{Nq} + a_3 x_{Np} x_{Nq} + a_4 x_{Np}^2 + a_5 x_{Nq}^2 = y_N \end{cases} \quad (10)$$

دستگاه معادله رابطه (۱۰) را می توان به فرم ماتریسی رابطه (۱۱) نمایش داد.

$$Aa = Y \quad (11)$$

که در آن  $a$  و  $A$  از رابطه (۱۲) و رابطه (۱۳) به دست می آیند [۳۸ و ۳۹]:

$$a = \{a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\}^T \quad (12)$$

ماده  $P/\sigma_d$  که فشار دینامیکی متناسب است با  $\rho V_0^2$ . اکنون با به‌کارگیری معادله ساختاری کوپر - سیموندز ( $q$  و  $D$  ثابت های ماده هستند) و استفاده از تقریب جونز [۱۷]، برای محاسبه مقدار نرخ کرنش متوسط  $\dot{\epsilon}_m$ ، عدد بی‌بعد اثر نرخ کرنش  $\xi$  به صورت معادله ۱۹ تعریف می‌شود.

$$\sigma_d = \sigma_0 \left( 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}_m}{D} \right)^{\frac{1}{q}} \right) = \sigma_0 \left( 1 + \xi \left( \frac{W_0}{H} \right)^{\frac{1}{q}} \right) \quad (18)$$

$$\xi = \left( \frac{I}{12\sqrt{2}\rho L^2 B^2 D} \right)^{\frac{1}{q}} \quad (19)$$

با جایگذاری معادلات (۱۸) و (۱۹) در معادله (۱۷)، تحلیل ابعادی برای معادله بی‌بعد حاکم بر ورق منجر می‌شود به:

$$\frac{W_0}{H} = f \left( \frac{L}{H}, \frac{B}{H}, \frac{P}{\sigma_0}, \frac{1}{\xi} \right) \quad (20)$$

لازم به توضیح است که نسبت بی‌بعد  $B/H$  برای در نظر گرفتن ابعاد ورق در هر دو جهت طولی و عرضی به تحلیل اضافه شده است. لازم به توضیح است که اعداد و پارامترهای بی‌بعد داخل پرانتز، برای تحلیل ورق‌های چهارگوش تحت بارگذاری دفعی یکنواخت پیشنهاد شده که از معادله بی‌بعد حاکم بر ورق استخراج شده‌اند. به منظور افزودن اثرات فشار قبل از انفجار گازهای اکسیژن و استیلن در پاسخ دینامیکی ورق نازک چهارگوش تحت بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها، می‌توان نسبت فشار دینامیکی اعمالی به مقاومت ماده را به صورت معادله (۲۱) بیان کرد تا اثر فشارهای قبل از انفجار در معادله ظاهر گردد.

$$\frac{P}{\sigma_0} \propto \frac{P_{O_2} \cdot P_{C_2H_2}}{\sigma_0^2} \quad (21)$$

با توجه به توضیحات ارائه شده رابطه بیشترین خیز دائمی ورق به ضخامت آن برای ورق‌های مستطیلی تحت بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها برابر با رابطه (۲۲) است.

$$\frac{W_0}{H} = f \left( \frac{L}{H}, \frac{B}{H}, \frac{P_{O_2} \cdot P_{C_2H_2}}{\sigma_0^2}, \frac{1}{\xi} \right) \quad (22)$$

لازم به توضیح است که رابطه (۲۲) برای تحلیل ورق‌های مستطیلی تحت بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها پیشنهاد شده که از معادله بی‌بعد حاکم بر ورق استخراج شده است. شایان

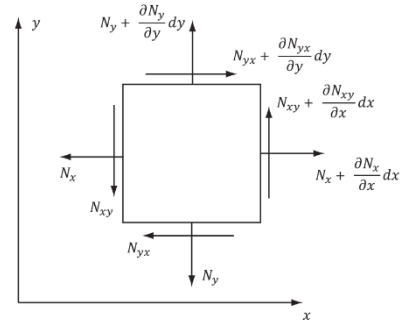


Fig. 3. Free diagram of the membrane forces on a plate element  
شکل ۳: دیاگرام آزاد نیروهای غشایی در یک المان از ورق

با تعریف پارامترهای بی‌بعد  $Y = y/L$ ،  $X = x/L$ ،  $m_y = M_y/M_0$ ،  $m_x = M_x/M_0$ ،  $T = C_s t/H$ ،  $W = w/H$ ،  $n_{xy} = N_{xy}/N_0$ ،  $n_y = N_y/N_0$ ،  $n_x = N_x/N_0$ ،  $m_{xy} = M_{xy}/M_0$  و همچنین اضافه نمودن اثر نیروهای غشایی، معادله حاکم بر ورق مربعی به فرم بی‌بعد تبدیل می‌شود (معادله (۱۶)) (۱۵).

$$\frac{\partial^2 m_x}{\partial X^2} + 2 \frac{\partial^2 m_{xy}}{\partial X \partial Y} + \frac{\partial^2 m_y}{\partial Y^2} + 4 \left( n_x \frac{\partial^2 W}{\partial X^2} - 2n_{xy} \frac{\partial^2 W}{\partial X \partial Y} + n_y \frac{\partial^2 W}{\partial Y^2} \right) = 4 \left( \frac{L}{H} \right)^2 \left( \frac{\rho C_s^2}{\sigma_0} \frac{\partial^2 W}{\partial T^2} - \frac{P}{\sigma_0} \right) \quad (16)$$

در تعاریف بالا،  $L$  نصف طول ورق مربعی،  $M_0$  گشتار خمشی کاملاً پلاستیک،  $N_0$  نیروی غشایی کاملاً پلاستیک،  $C_s$  سرعت صوت در محیط،  $X$  و  $Y$  مختصات بی‌بعد،  $T$  زمان بی‌بعد و  $W$  خیز بی‌بعد هستند؛ همچنین،  $m_x$ ،  $m_y$  و  $m_{xy}$ ، گشتاورهای خمشی بی‌بعد و  $n_x$ ،  $n_y$  و  $n_{xy}$ ، نیروهای غشایی بی‌بعد هستند. جهت افزودن اثر حساسیت ماده به نرخ کرنش، رابطه (۱۶) به صورت معادله (۱۷) تغییر می‌کند [۱۵].

$$\frac{\partial^2 m_x}{\partial X^2} + 2 \frac{\partial^2 m_{xy}}{\partial X \partial Y} + \frac{\partial^2 m_y}{\partial Y^2} + 4 \left( n_x \frac{\partial^2 W}{\partial X^2} - 2n_{xy} \frac{\partial^2 W}{\partial X \partial Y} + n_y \frac{\partial^2 W}{\partial Y^2} \right) = 4 \left( \frac{L}{H} \right)^2 \left( \frac{\rho C_s^2}{\sigma_d} \frac{\partial^2 W}{\partial T^2} - \frac{P}{\sigma_d} \right) \quad (17)$$

همان‌طور که از معادله (۱۷) برمی‌آید، سه عبارت در آن وجود دارد: هندسه ساختار  $L/H$ ، توانایی مقاومت دینامیکی ماده در برابر تغییر شکل پلاستیک  $1/\sigma_d$  و نسبت بار دینامیکی به مقاومت

#### ۴-۲ گستره تغییرشکل ساختارهای فلز - پلیمر

در این بخش به بیان مشاهدات تجربی در مورد گستره یا مدهای تغییرشکل ساختارهای دولایه فلز - پلیمری پرداخته شده است. بررسی مشاهدات تجربی نشان می‌دهد که در طول ۴۰ آزمایش، تمامی ساختارها به غیر از ۷ نمونه سطوح مختلفی از تغییرشکل غیر الاستیک بزرگ یا همان مد اول تغییرشکل را نشان دادند. نمونه‌ای از پروفیل تغییرشکل ساختارهای فلز - پلیمری در شکل ۴ نشان داده شده است.

در این مجموعه آزمایشی، پروفیل تغییرشکل ورق آلومینیومی تقویت شده با روکش پلی‌اوره نیز، به صورت دومی شکل یا محدب بوده و این بیان‌گر آن است که بار دفعی تولید شده، به صورت کاملاً یکنواخت بر سطح ساختار دولایه فلز - پلیمری وارد می‌شود. نتایج حاصل شده از شکل ۴ را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی کرد: (۱) در نمونه‌های پاره نشده، هیچ‌گونه جدایشی بین روکش پلیمری و ورق آلومینیومی رخ نمی‌دهد، (۲) ناحیه دومی شکل از مرکز ساختار به سمت مرزهای کاملاً گیردار حرکت می‌کند، (۳) سطحی از ساختار که بین دو نگه‌دارنده قرار دارد، دچار هیچ‌گونه تغییرشکل غیرالاستیک بزرگی نشده و مکان‌هایی که در آن‌ها پیچ‌ها قرار دارند، دچار هیچ‌گونه کشیدگی نشده‌اند، (۴) نازک‌شدگی در طول مرزهای گیردار مشابه با ورق‌های تک‌لایه و دولایه مشهود است و این نشان‌دهنده تأثیر و عمل نیروهای کششی غشایی است و (۵) لولاهای پلاستیک در امتداد خط‌های قطری کشیده شده روی نمونه، از گوشه‌های ساختار تا مرکز آن گسترش می‌یابد.

#### ۴-۳ تاثیر ضخامت لایه فلزی و پلیمری

اکنون، پس از بررسی و تشریح مدهای تغییرشکل پلاستیک ساختارهای دولایه فلز - پلیمری به تحلیل نتایج تجربی کمی به دست آمده پرداخته می‌شود. لذا در این بخش تأثیر تغییر پارامترهای تجربی مانند، افزایش میزان ایمپالس، افزایش ضخامت ورق فلزی و روکش پلی‌اوره و همچنین اثر افزایش چگالی سطحی بر بیشترین خیز دائمی ساختار دولایه فلز - پلیمر، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. به همین منظور در شکل ۵، نمودار تغییرات بیشترین خیز دائمی ساختارهای فلز - پلیمر برحسب ایمپالس، نمایش داده شده است.

در شکل ۵، همان‌طور که انتظار می‌رفت، بیشترین خیز دائمی

توجه است که در تحلیل ابعادی ساختارهای مستطیلی دولایه تحت بارگذاری دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها نسبت به تحلیل ابعادی ورق‌های تک‌لایه، کمیت‌های فیزیکی بیشتری وارد می‌شود. این کمیت‌ها شامل خواص مکانیکی و حساسیت ماده به نرخ کرنش برای هر دو لایه عقبی و جلویی است که باید در تحلیل رفتار پلاستیک ساختارهای دولایه در نظر گرفته شود. با توجه به نکات ذکر شده و مطابق با تحلیل ابعادی مسئله، رابطه بیشترین خیز دائمی هر کدام از لایه‌های جلویی و عقبی به ضخامت آن لایه برای ساختارهای مستطیلی دولایه تحت بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها به صورت رابطه (۲۳) بیان می‌شود.

$$\frac{W_0}{H_b} = f\left(\frac{L}{H_b}, \frac{B}{H_f}, \frac{P_{O_2} P_{C_2H_2}}{\sigma_{0,b} \sigma_{0,f}}, \frac{1}{\xi_b}, \frac{1}{\xi_f}\right) \quad (23)$$

اکنون، رابطه فوق را می‌توان بصورت رابطه (۲۴) در نظر گرفت.

$$Y = \frac{W_0}{H_b} = f(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) \quad (24)$$

برای محاسبه مدل بیشترین خیز دائمی ساختار فلز - پلیمر در شکل‌دهی انفجاری مخلوط گاز از داده‌های آزمایشگاهی استفاده می‌شود. در این معادلات  $(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5)$  داده‌های ورودی و  $Y$  داده‌ی خروجی شبکه است.

#### ۴- بحث و بررسی نتایج

##### ۴-۱ نتایج تجربی

در جدول ۳، کلیه مشخصات و نتایج آزمایش‌های انجام شده روی ساختارهای دولایه فلز - پلیمر ارائه شده است. در این جدول مقادیر میانگین ایمپالس برای آزمایش‌هایی که در آن میزان بارگذاری (مقادیر پیش فشار) یکسان بوده، محاسبه شده است. نتایج به دست آمده در مجموعه آزمایش‌های انجام گرفته روی ساختارهای دولایه فلز - پلیمری، نشان‌دهنده پاسخ و رفتار مکانیکی ورق‌های آلومینیومی تقویت شده 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 به عبارتی افزایش انرژی انتقالی به ورق و به تبع آن تغییر نرخ سرعت تغییرشکل بررسی شده است.

جدول ۳: نتایج کارهای تجربی  
Table 3. Experimental results

بیشترین خیز دائمی (mm)	فشار استیلین (bar)	فشار اکسیژن (bar)	ایمپالس (N.s)	شماره آزمایش
۳۴/۲	۰/۱۵	۰/۲	۱۹/۱	E-۱
۴۷/۴	۰/۲۵	۰/۳	۲۸/۱	E-۲
پارگی	۰/۲۵	۰/۳۵	۳۲/۳	E-۳
پارگی	۰/۳	۰/۴	۴۱/۸	E-۴
پارگی	۰/۴	۰/۶	۴۹/۴	E-۵
۳۰/۱	۰/۱۵	۰/۲	۱۹/۱	F-۶
۴۲/۱	۰/۲۵	۰/۳	۲۸/۱	F-۷
۴۸/۱	۰/۲۵	۰/۳۵	۳۲/۳	F-۸
پارگی	۰/۳	۰/۴	۴۱/۸	F-۹
پارگی	۰/۴	۰/۶	۴۹/۴	F-۱۰
۲۱/۹	۰/۱۵	۰/۲	۱۹/۱	G-۱۱
۳۰/۷	۰/۲۵	۰/۳	۲۸/۱	G-۱۲
۳۵/۵	۰/۲۵	۰/۳۵	۳۲/۳	G-۱۳
۴۶/۸	۰/۳	۰/۴	۴۱/۸	G-۱۴
پارگی	۰/۴	۰/۶	۴۹/۴	G-۱۵
۱۹/۸	۰/۱۵	۰/۲	۱۹/۱	H-۱۶
۲۷/۳	۰/۲۵	۰/۳	۲۸/۱	H-۱۷
۳۱/۸	۰/۲۵	۰/۳۵	۳۲/۳	H-۱۸
۴۱/۸	۰/۳	۰/۴	۴۱/۸	H-۱۹
۴۸/۳	۰/۴	۰/۶	۴۹/۴	H-۲۰
۲۰/۸	۰/۱۵	۰/۲	۱۹/۱	I-۲۱
۳۱/۴	۰/۲۵	۰/۳	۲۸/۱	I-۲۲
۳۶/۱	۰/۲۵	۰/۳۵	۳۲/۳	I-۲۳
۴۷/۱	۰/۳	۰/۴	۴۱/۸	I-۲۴
پارگی	۰/۴	۰/۶	۴۹/۴	I-۲۵
۱۸/۷	۰/۱۵	۰/۲	۱۹/۱	J-۲۶
۲۸/۵	۰/۲۵	۰/۳	۲۸/۱	J-۲۷
۳۲/۹	۰/۲۵	۰/۳۵	۳۲/۳	J-۲۸
۴۳/۰	۰/۳	۰/۴	۴۱/۸	J-۲۹
۵۰/۸	۰/۴	۰/۶	۴۹/۴	J-۳۰
۱۴/۵	۰/۱۵	۰/۲	۱۹/۱	K-۳۱
۲۲/۲	۰/۲۵	۰/۳	۲۸/۱	K-۳۲
۲۵/۵	۰/۲۵	۰/۳۵	۳۲/۳	K-۳۳
۳۳/۶	۰/۳	۰/۴	۴۱/۸	K-۳۴
۳۹/۸	۰/۴	۰/۶	۴۹/۴	K-۳۵
۱۳/۳	۰/۱۵	۰/۲	۱۹/۱	L-۳۶
۲۰/۶	۰/۲۵	۰/۳	۲۸/۱	L-۳۷
۲۳/۸	۰/۲۵	۰/۳۵	۳۲/۳	L-۳۸
۳۱/۲	۰/۳	۰/۴	۴۱/۸	L-۳۹
۳۷/۲	۰/۴	۰/۶	۴۹/۴	L-۴۰

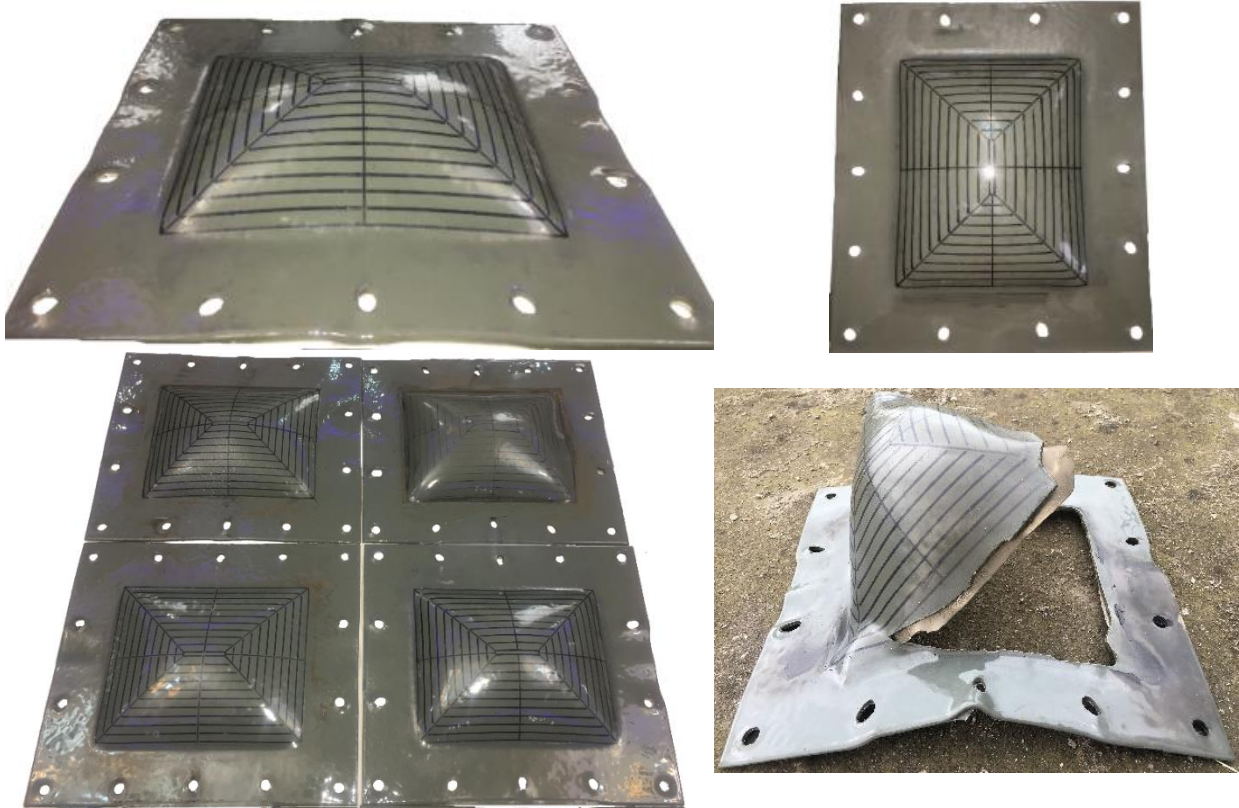


Fig. 4. Metal-polymer configurations under impulsive loading

شکل ۴: ساختارهای فلز - پلیمر بعد از اعمال بار دفعی

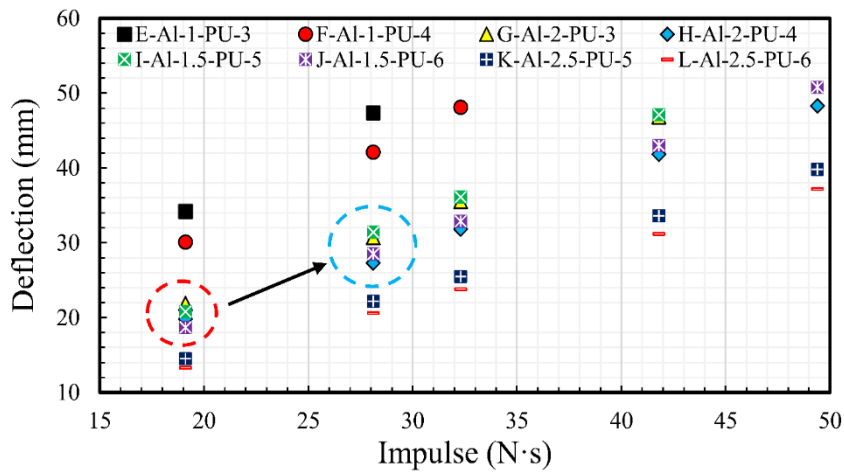


Fig. 5. Variation of the maximum permanent deflections of coated metallic plates versus impulse

شکل ۵: تغییرات بیشترین خیز دائمی ساختارهای فلز - پلیمر برحسب ایمپالس

تک‌لایه فلزی این است که تغییرشکل پلاستیک این ساختارها در یک مرحله با نرخ‌های افزایشی مختلف رخ می‌دهد. همان‌طور که در نواحی دایره‌ای قرمز و آبی‌رنگ در شکل ۵ نشان داده شده، در ایمپالس‌های پایین، دو گروه آزمایشی H و I که تقریباً دارای چگالی سطحی یکسان دارند، دارای خیزهای دائمی تقریباً برابر هستند اما

ساختارهای دولایه فلز - پلیمری با بالارفتن سطح انرژی انتقالی، به‌صورت تدریجی افزایش می‌یابد و در حالت کلی، ایمپالس و بیشترین خیز دائمی 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

جدول ۴: منحنی‌های درجه اول برازش شده

Table 4. Fit first-order curves

$R^2$	منحنی برازش شده	مشخصات آزمایش
۰/۹۹۷	$W_0 = 1.10I + 0.39$	G-Al-۲-PU-۳
۰/۹۹۸	$W_0 = 0.96I + 0.98$	H-Al-۲-PU-۴
۰/۹۹۹	$W_0 = 1.16I - 1.24$	I-Al-۱/۵-PU-۵
۰/۹۹۹	$W_0 = 1.06I - 1.38$	J-Al-۱/۵-PU-۶
۰/۹۹۹	$W_0 = 0.84I - 1.39$	K-Al-۲/۵-PU-۵
۰/۹۹۹	$W_0 = 0.79I - 1.62$	L-Al-۲/۵-PU-۶

پلیمری و ورق آلومینیومی در مقایسه با لایه‌بندی‌های ۳-PU-۲- در ۳۲/۸٪ و ۳۳/۸٪ در ایمپالس ۱۹/۱ N·s، فلز - پلیمری به میزان ۲۴/۵٪ در ایمپالس ۲۸/۱ N·s، ۲۸/۲٪ و ۲۵/۲٪ در ۲۷/۷٪ و ۲۸/۲٪، ۳۲/۳ N·s، و ۲۸/۲٪ و ۲۵/۴٪ در ایمپالس ۴۱/۸ N·s می‌شود و آستانه تحمل ساختار ۳-G-Al-۲-PU- را تا ایمپالس ۴۹/۴ N·s بالا می‌برد. این در حالی است که مقایسه نتایج تجربی برای دو لایه‌بندی ۵-I-Al-۱/۵-PU- و ۵-K-Al-۲/۵-PU- نشان می‌دهد که افزایش ۱ میلی‌متری ضخامت ورق آلومینیومی، منجر به کاهش خیز ساختار دولایه فلز - پلیمری با روکش پلیمری به ضخامت ۵ میلی‌متر به میزان ۳۰/۳٪، ۲۹/۳٪، ۲۹/۴٪ و ۲۸/۷٪ به ترتیب در ایمپالس‌های ۱۹/۱ N·s، ۲۸/۱ N·s، ۳۲/۳ N·s و ۴۱/۸ N·s می‌شود. مقایسه بیشتر نتایج تجربی برای دو لایه‌بندی ۳-PU- و ۱-E-Al-۱-PU-۴ و ۴-F-Al-۱-PU- نشان می‌دهد که افزایش ضخامت روکش پلیمری، منجر به کاهش خیز ساختار دولایه فلز - پلیمری با ورق آلومینیومی ۱ میلی‌متر [۱۵ و ۱۶] به میزان ۱۱/۹٪ و ۱۱/۱٪ به ترتیب در ایمپالس‌های ۱۹/۱ N·s و ۲۸/۱ N·s می‌شود. این در حالی است که مقایسه نتایج تجربی به‌دست‌آمده برای دو لایه‌بندی ۳-PU- و ۱-E-Al-۱-PU- نشان می‌دهد که افزایش ضخامت ورق آلومینیومی، منجر به کاهش خیز ساختار دولایه فلز - پلیمری با روکش پلیمری به ضخامت ۳ میلی‌متر به میزان ۳۵/۹٪ و ۳۵/۲٪ به ترتیب در ایمپالس‌های ۱۹/۱ N·s و ۲۸/۱ N·s می‌شود. همچنین، مقایسه نتایج تجربی به‌دست‌آمده برای دو لایه‌بندی ۳-PU-۲- و ۴-G-Al-۲-PU- نشان می‌دهد که افزایش ضخامت روکش پلیمری، منجر به کاهش خیز ساختار دولایه فلز - پلیمری با

در ایمپالس‌های بالاتر، ساختار H مقاومت بیشتری در برابر بار دفعی دارد، بنابراین؛ این نتیجه حاصل می‌شود 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 دائمی ساختارهای فلز - پلیمر برحسب ایمپالس برای گروه‌های آزمایشی مختلف به‌صورت 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 ارائه نشده است.

به منظور درک و توضیح بهتر میزان اثربخشی، استفاده از روکش پلی‌اوره و تغییر ضخامت آن بر بیشترین خیز دائمی ساختار دولایه فلز - پلیمری، در شکل ۶، نمودارهای ستونی تغییرات بیشترین خیز دائمی ساختارهای دولایه فلز - پلیمری برحسب ایمپالس نمایش داده شده است.

مقایسه نتایج تجربی برای دو لایه‌بندی ۵-I-Al-۱/۵-PU- و ۶-J-Al-۱/۵-PU- نشان می‌دهد که افزایش ۲ و ۰/۵ میلی‌متری ضخامت روکش پلیمری و ورق آلومینیومی در مقایسه با لایه‌بندی‌های ۳-E-Al-۱-PU- و ۴-F-Al-۱-PU- به ترتیب منجر به کاهش خیز ساختار دولایه فلز - پلیمری به میزان ۳۹/۲٪ و ۳۷/۹٪ در ایمپالس ۱۹/۱ N·s و ۳۳/۸٪ و ۳۲/۳٪ در ایمپالس ۲۸/۱ N·s می‌شود و آستانه تحمل ساختار فلز - پلیمر را به ترتیب تا ایمپالس ۴۱/۸ N·s و ۴۹/۴ N·s بالا می‌برد. این در حالی است که مقایسه نتایج تجربی به‌دست‌آمده برای دو لایه‌بندی ۵-K-Al-۲/۵-PU- و ۶-L-Al-۲/۵-PU- نشان می‌دهد که افزایش ۲ و ۰/۵ میلی‌متری ضخامت روکش

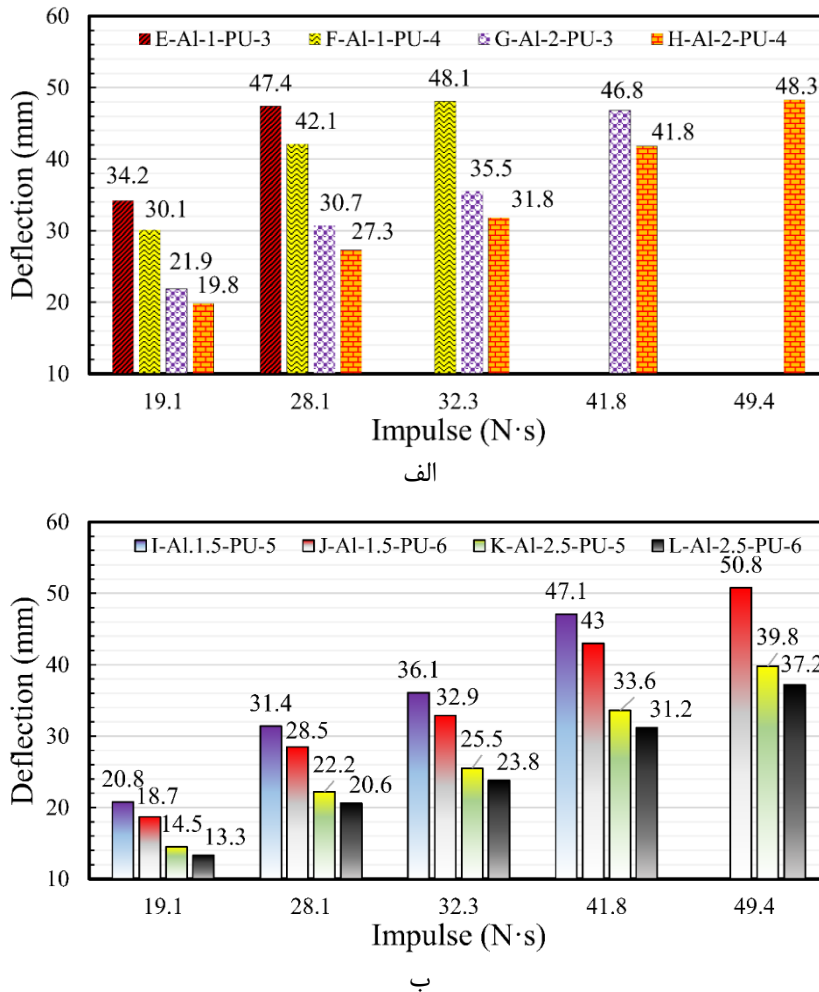


Fig. 6. Variation of the maximum permanent deflections of coated metallic plates versus impulse

شکل ۶: نمودار ستونی تغییرات بیشترین خیز دائمی ساختارهای فلز - پلیمر برحسب ایمپالس

ضخامت ۱ (۱۵ و ۱۶)، 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 شکل ۷، به منظور بررسی اثر چگالی سطحی بر مقاومت ساختارهای دولایه فلز - پلیمری، نمودار تغییرات بیشترین خیز دائمی برحسب چگالی سطحی نمایش داده شده است.

همان‌طور که انتظار می‌رفت، افزایش چگالی سطحی نمونه، باعث کاهش میزان تغییرشکل پلاستیک در هر شرایط بارگذاری می‌شود. به‌طور مثال در شکل ۷ ب، برای هنگامی که نمونه‌های آزمایشی تحت بارگذاری دفعی با مقادیر پیش فشار  $P_{O_2} = 0.4 \text{ bar}$  و  $0.3 \text{ bar}$  قرار دارند، با تغییر چگالی سطحی از  $9/6 \text{ kg/m}^2$  به  $10/7 \text{ kg/m}^2$  خیز دائمی ساختار از  $47/1$  میلی‌متر به  $43/0$  میلی‌متر کاهش می‌یابد. این بدان معناست که شیب کاهشی خیز دائمی

ورق آلومینیومی ۲ میلی‌متر به میزان  $9/6\%$ ،  $11/1\%$ ،  $10/4\%$  و  $10/7\%$  به ترتیب در ایمپالس‌های  $19/1 \text{ N}\cdot\text{s}$ ،  $28/1 \text{ N}\cdot\text{s}$ ،  $32/3 \text{ N}\cdot\text{s}$  و  $41/8 \text{ N}\cdot\text{s}$  می‌شود. این در حالی است که مقایسه نتایج تجربی برای دو لایه‌بندی  $F\text{-Al-1-PU-4}$  و  $H\text{-Al-2-PU-4}$  نشان می‌دهد که افزایش ضخامت ورق آلومینیومی، منجر به کاهش خیز ساختار دولایه فلز - پلیمری با روکش پلیمری به ضخامت ۴ میلی‌متر به میزان  $34/2\%$ ،  $35/2\%$  و  $33/9\%$  به ترتیب در ایمپالس‌های  $19/1 \text{ N}\cdot\text{s}$ ،  $28/1 \text{ N}\cdot\text{s}$  و  $32/3 \text{ N}\cdot\text{s}$  می‌شود. مقایسه بیشتر نتایج تجربی نشان می‌دهد که افزودن روکش پلیمری با ضخامت‌های ۳ و ۴ میلی‌متر به ورق آلومینیومی ۲ میلی‌متری به ترتیب موجب کاهش خیز دائمی ساختار به میزان  $12/7\%$  و  $21/1\%$  در ایمپالس  $19/1 \text{ N}\cdot\text{s}$ ،  $22/2\%$  و  $30/9\%$  در ایمپالس  $28/1 \text{ N}\cdot\text{s}$  و در نهایت  $23/3\%$  و  $31/3\%$  در ایمپالس  $32/3 \text{ N}\cdot\text{s}$  شده است. لازم به توضیح است که برای ورق‌های آلومینیومی با



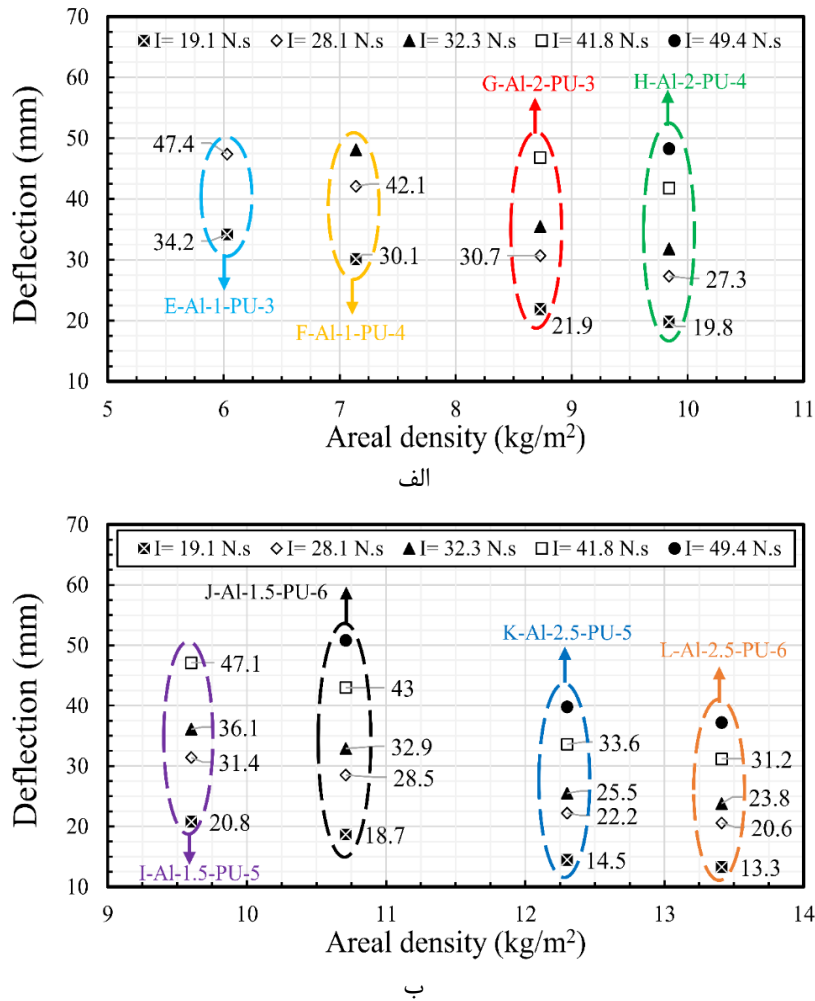


Fig. 7. Variation of the maximum permanent deflections of coated metallic plates versus areal density

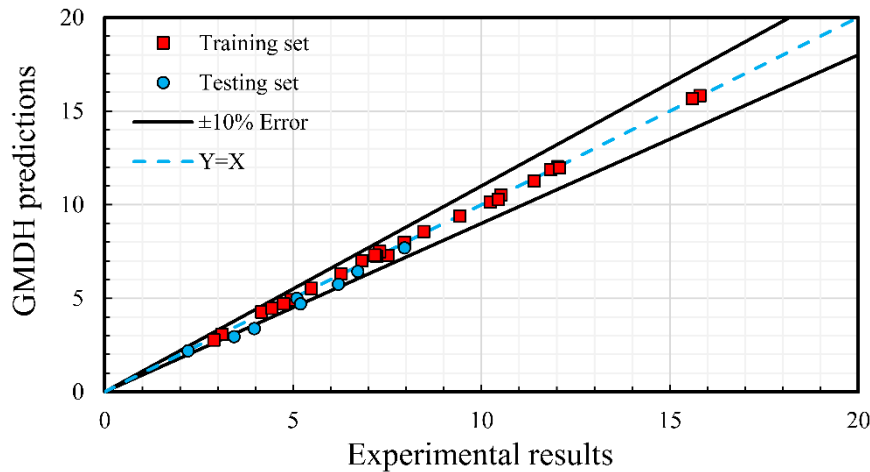
شکل ۷: تغییرات بیشترین خیز دائمی ساختارهای دولایه فلز - پلیمری برحسب چگالی سطحی

ورودی- خروجی آن به‌عنوان ورودی شبکه عصبی از نوع دسته‌بندی گروهی داده‌ها استفاده شده است. به‌منظور افزایش قابلیت پیش‌بینی شبکه عصبی پیشنهادی برای این فرآیند، داده‌ها به دو دسته تقسیم شده‌اند که شامل دسته داده‌های آموزشی و پیش‌بینی هستند. بنابراین، ۲۵ دسته داده برای آموزش شبکه و ۸ دسته داده دیگر برای پیش‌بینی خروجی شبکه استفاده شده است. با توجه به توضیحات ارائه شده، نسبت بیشترین خیز دائمی ساختار فلز - پلیمر به ضخامت لایه عقبی با استفاده از ده سری معادلات ارائه شده در قسمت پیوست ارائه شده، به دست می‌آید. لازم به توضیح است که این معادلات به صورت شبکه به یکدیگر متصل هستند. مقایسه بین خروجی‌های حاصل از مدل ریاضی بدست‌آمده از شبکه عصبی از نوع دسته‌بندی گروهی داده‌ها و خروجی‌های تجربی در ۳۳ داده ورودی- خروجی فرآیند شکل‌دهی ساختارهای فلز - پلیمر در شکل ۸ نشان داده شده

ساختار برحسب چگالی سطحی در مرحله اول  $3/7 \text{ kg/mm}\cdot\text{m}^2$  است. لازم به توضیح است که این شیب کاهشی برای مراحل دوم و سوم یعنی زمانی که چگالی سطحی به ترتیب از  $10/7 \text{ kg/m}^2$  به  $12/3 \text{ kg/m}^2$  و از  $12/3 \text{ kg/m}^2$  به  $13/4 \text{ kg/m}^2$  تغییر می‌کند، برابر است با  $5/9 \text{ kg/mm}\cdot\text{m}^2$  و  $2/2 \text{ kg/mm}\cdot\text{m}^2$ ؛ همچنین برای هنگامی که نمونه‌های آزمایشی تحت بارگذاری دفعی با مقادیر پیش فشار  $P_{O_2} = 0.35 \text{ bar}$  و  $P_{C_2H_2} = 0.25 \text{ bar}$  قرار دارند، این مقادیر به ترتیب برابر است با  $2/9 \text{ kg/mm}\cdot\text{m}^2$ ،  $4/7 \text{ kg/mm}\cdot\text{m}^2$  و  $1/53 \text{ kg/mm}\cdot\text{m}^2$ .

#### ۴-۴ نتایج مدل‌سازی با روش شبکه عصبی

در مدل‌سازی فرآیند شکل‌دهی ساختارهای فلز - پلیمر تحت بارگذاری دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها از ۳۳ دسته داده



**Fig. 8. Comparison of experimental results and mathematical model presented by GMDH neural network**

شکل ۸: مقایسه نتایج تجربی و مدل ریاضی ارائه شده توسط روش شبکه عصبی دسته بندی گروهی داده ها

#### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، تغییر شکل دائمی ساختارهای دولایه فلز - پلیمر تحت بارگذاری دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها به صورت تجربی و عددی، مورد بررسی قرار گرفت. در بخش تجربی، با استفاده از سامانه شکل دهی تک مرحله ای انفجار مخلوط گاز، ۴۰ آزمایش روی ورق های آلومینیومی تقویت شده با روکش پلی اوره انجام شد. جهت بررسی اثر ضخامت لایه های فلزی و پلیمری روی پاسخ نهایی ساختار، ورق آلومینیومی و روکش پلی اوره در چهار ضخامت مختلف و هشت گروه آزمایش تهیه شد. نتایج تجربی نشان داد که افزودن لایه پلی اوره به پشت ورق آلومینیومی موجب بالارفتن آستانه تحمل سازه در برابر بار دفعی شده و میزان خیز دائمی ساختار را به طرز چشم گیری افزایش می دهد. مقایسه نتایج تجربی به دست آمده برای دو لایه بندی ۵-PU-۲/۵-Al-K و ۶-PU-۲/۵-Al-L نشان داد که افزایش ۲ و ۰/۵ میلی متری ضخامت روکش پلیمری و ورق آلومینیومی در مقایسه با لایه بندی های ۳-PU-۲-Al-G و ۴-PU-۲-Al-H، منجر به کاهش خیز ساختار دولایه فلز - پلیمری به میزان ۳۳/۸٪ و ۳۲/۸٪ در ایمپالس N·s ۱/۱۹، ۲۷/۷٪ و ۲۴/۵٪ در ایمپالس N·s ۱/۲۸، ۲۸/۲٪ و ۲۵/۲٪ در ایمپالس N·s ۳/۳۲، و ۲۵/۴٪ و ۲۵/۴٪ در ایمپالس N·s ۱/۸۴ می شود و آستانه تحمل ساختار ۳-PU-۲-Al-G را تا ایمپالس N·s ۴/۴۹ بالا می برد. مقایسه نتایج تجربی برای دو لایه بندی ۵-PU-۱/۵-Al-I و ۶-PU-۱/۵-Al-J،

است.

در روش شبکه عصبی از نوع دسته بندی گروهی داده ها، انطباق خروجی های مدل شده و خروجی های تجربی بر حسب معیار ضریب تبیین  $R^2$  برابر ۰/۹۹۹ برای داده های آموزشی و ۰/۹۸۹ برای داده های پیش بینی بدست آمده و انحراف داده های آزمایشگاهی و مقادیر پیش بینی شده توسط شبکه عصبی با روش دسته بندی گروهی داده ها بسیار اندک است. این انحراف در بعضی از بخش ها به صفر می رسد؛ بنابراین، مطابق شکل ۸ توافق خوبی بین مدل ارائه شده با مقادیر تجربی مشاهده می شود به طوری که تمامی نقاط در محدوده خطای کمتر از ۱۰٪ قرار دارند. نتایج روش مدل سازی انجام شده برای فرآیند شکل دهی انفجاری ساختارهای فلز - پلیمر تحت بارگذاری دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها، نشان دهنده دقت بالا و توانایی شبکه عصبی ارائه شده در طراحی و مدل سازی این فرآیند است. کاملاً مشخص است که هم خطای مدل سازی و هم خطای پیش بینی مدل ارائه شده در این تحقیق به نتایج خوبی منجر شده، به خصوص این مورد را می توان در مورد خطای پیش بینی با وضوح بیشتری مشاهده کرد. با توجه به کم بودن خطای پیش بینی مدل ارائه شده در این تحقیق می توان از آن به عنوان یک مدل کاملاً مناسب برای پیش بینی رفتار پلاستیک ساختارهای فلز - پلیمر مستطیلی تحت بارگذاری دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها استفاده کرد.

- [5] M. Kleiner, M. Hermes, M. Weber, H. Olivier, G. Gershteyn, F.-W. Bach, A. Brosius, Tube expansion by gas detonation, *Production Engineering*, 1(1) (2007) 9-17.
- [6] M.K. Meybodi, H. Bisadi, Gas Detonation Forming by a mixture of H<sub>2</sub>+ O<sub>2</sub> Detonation, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 33 (2009) 55-58.
- [7] M. Khaleghi, B.S. Aghazadeh, H. Bisadi, Efficient oxyhydrogen mixture determination in gas Detonation forming, *Int. J. Mech. Mechatron. Eng.*, 7 (2013) 1748-1754.
- [8] H. Babaei, T.M. Mostofi, S.H. Sadraei, Effect of gas detonation on response of circular plate-experimental and theoretical, *Structural Engineering and Mechanics*, 56(4) (2015) 535-548.
- [9] H. Babaei, T. Mirzababaie Mostofi, M. Alitavoli, 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) 0954406215614336.
- [10] H. Babaei, T.M. Mostofi, M. Alitavoli, A. Darvizeh, Empirical modelling for prediction of large deformation of clamped circular plates in gas detonation forming process, *Experimental Techniques*, 40(6) (2016) 1485-1494.
- [11] H. Babaei, T.M. Mostofi, M. Namdari-Khalilabad, M. Alitavoli, K. Mohammadi, Gas mixture detonation method, a novel processing technique for metal powder compaction: Experimental investigation and empirical modeling, *Powder technology*, 315 (2017) 171-181.
- [12] S.P. Patil, M. Popli, V. Jenkouk, B. Markert, Numerical modelling of the gas detonation process of sheet metal forming, in: *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 2016, pp. 032099.
- [13] V. Jenkouk, S. Patil, B. Markert, Joining of tubes by gas detonation forming, in: *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 2016, pp. 032101.
- [14] S. Patil, K. Prajapati, V. Jenkouk, H. Olivier, B. Markert, Experimental and numerical studies of sheet metal forming with damage using gas detonation process, *Metals*, 7(12) (2017) 556.
- نشان داد که افزایش ۲ و ۰/۵ میلی‌متری ضخامت روکش پلیمری و ورق آلومینیومی در مقایسه با لایه‌بندی‌های E-Al-۱-PU-۳ و F-Al-۱-PU-۴، به ترتیب منجر به کاهش خیز ساختار دولایه فلز - پلیمری به میزان ۳۹/۲٪ و ۳۷/۹٪ در ایمپالس N·s ۱۹/۱، ۳۳/۸٪ و ۳۲/۳٪ در ایمپالس N·s ۲۸/۱ می‌شود و آستانه تحمل ساختار فلز - پلیمر را به ترتیب تا ایمپالس N·s ۴۱/۸ و ۴۹/۴ بالا می‌برد. در بخش مدل‌سازی، از روش شبکه عصبی برای ارائه یک مدل دقیق جهت پیش‌بینی بیشترین خیز دائمی ساختار فلز - پلیمر تحت بار دفعی استفاده شد. به‌منظور افزایش قابلیت پیش‌بینی شبکه عصبی پیشنهادی برای این فرآیند، داده‌ها به دو دسته تقسیم شده‌اند به‌طوری‌که ۲۵ دسته داده برای آموزش شبکه و ۸ دسته داده دیگر برای پیش‌بینی خروجی شبکه استفاده شد. نتایج حاصل شده بیان‌گر توافق خوب بین مدل ارائه‌شده با مقادیر تجربی است به‌طوری‌که تمامی نقاط در محدوده خطای کمتر از ۱۰٪ قرار دارند. بنابراین، با توجه به کم‌بودن خطای پیش‌بینی مدل ارائه‌شده در این تحقیق می‌توان از آن به‌عنوان یک مدل کاملاً مناسب برای پیش‌بینی رفتار پلاستیک ساختارهای فلز - پلیمر مستطیلی تحت بارگذاری دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها استفاده کرد.

## مراجع

- [1] T.M. Mostofi, H. Babaei, M. Alitavoli, 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*, 109 (2016) 367-376.
- [2] T.M. Mostofi, A. Golbaf, A. Mahmoudi, M. Alitavoli, H. Babaei, 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*, 123 (2018) 48-56.
- [3] M. Yasar, Gas detonation forming process and modeling for efficient spring-back prediction, *Journal of materials processing technology*, 150(3) (2004) 270-279.
- [4] M. Yaşar, H.I. Demirci, I. Kadi, Detonation forming of aluminium cylindrical cups experimental and theoretical modelling, *Materials & design*, 27(5) (2006) 397-404.

- response of steel plates subjected to close-in blast loading from spherical liquid explosive charges, *International journal of impact engineering*, 101 (2017) 78-89.
- [25] Y. Li, Z. Chen, T. Zhao, X. Cao, Y. Jiang, D. Xiao, D. Fang. An experimental study on dynamic response of polyurea coated metal plates under intense underwater impulsive loading. *International Journal of Impact Engineering*. 133 (2019) 103361.
- [26] L. H. Dai, C. Wu, F. J. An, S. S. Liao. Experimental Investigation of Polyurea-Coated Steel Plates at Underwater Explosive Loading. *Advances in Materials Science and Engineering* (2018).
- [27] E. Sanchez, T. Shibata, L.A. Zadeh, Genetic algorithms and fuzzy logic systems: Soft computing perspectives, World Scientific, 1997.
- [28] K. Kristinsson, G.A. Dumont, System identification and control using genetic algorithms, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 22(5) (1992) 1033-1046.
- [29] A.G. Ivakhnenko, Polynomial theory of complex systems, *IEEE transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, (4) (1971) 364-378.
- [30] K.J. Åström, P. Eykhoff, System identification—a survey, *Automatica*, 7(2) (1971) 123-162.
- [31] Z. Xue, J.W. Hutchinson, Neck retardation and enhanced energy absorption in metal–elastomer bilayers, *Mechanics of Materials*, 39(5) (2007) 473-487.
- [32] O. Izadi, M. Silani, P. Mosaddegh, M. Farzin. Warpage and bending behavior of polymer–metal hybrids: experimental and numerical simulations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 98(1-4) (2018) 873-885.
- [33] O. Izadi, P. Mosaddegh, M. Silani, M. Dinari. An experimental study on mechanical properties of a novel hybrid metal–polymer joining technology based on a reaction between isocyanate and hydroxyl groups. *Journal of Manufacturing Processes*, 30 (2017) 217-225.
- [34] D.-W. Lee, S.-W. Seo, K.-B. Sim, Online evolution for cooperative behavior in group robot systems, *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 6(2) (2008) 282-287.
- [15] T.M. Mostofi, H. Babaei, M. Alitavoli, The influence of gas mixture detonation loads on large plastic deformation of thin quadrangular plates: Experimental investigation and empirical modelling, *Thin-Walled Structures*, 118 (2017) 1-11.
- [16] T. Mirzababaie Mostofi, H. Babaei, M. Alitavoli, Experimental and theoretical study on large ductile transverse deformations of rectangular plates subjected to shock load due to gas mixture detonation, *Strain*, 53(4) (2017) e12235.
- [17] T.M. Mostofi, H. Babaei, M. Alitavoli, G. Lu, D. Ruan, Large transverse deformation of double-layered rectangular plates subjected to gas mixture detonation load, *International Journal of Impact Engineering*, 125 (2019) 93-106.
- [18] M. Amini, J. Isaacs, S. Nemat-Nasser, Experimental investigation of response of monolithic and bilayer plates to impulsive loads, *International Journal of Impact Engineering*, 37(1) (2010) 82-89.
- [19] M. Amini, A. Amirkhizi, S. Nemat-Nasser, Numerical modeling of response of monolithic and bilayer plates to impulsive loads, *International Journal of Impact Engineering*, 37(1) (2010) 90-102.
- [20] M. Amini, J. Isaacs, S. Nemat-Nasser, Investigation of effect of polyurea on response of steel plates to impulsive loads in direct pressure-pulse experiments, *Mechanics of Materials*, 42(6) (2010) 628-639.
- [21] M. Amini, J. Simon, S. Nemat-Nasser, Numerical modeling of effect of polyurea on response of steel plates to impulsive loads in direct pressure-pulse experiments, *Mechanics of Materials*, 42(6) (2010) 615-627.
- [22] K. Ackland, C. Anderson, T.D. Ngo, Deformation of polyurea-coated steel plates under localised blast loading, *International Journal of Impact Engineering*, 51 (2013) 13-22.
- [23] P. Tran, T.D. Ngo, A. Ghazlan, Numerical modelling of hybrid elastomeric composite panels subjected to blast loadings, *Composite Structures*, 153 (2016) 108-122.
- [24] A. Remennikov, T. Ngo, D. Mohotti, B. Uy, M. Netherton, Experimental investigation and simplified modeling of

under impulsive loading using dimensionless analysis and singular value decomposition, *Journal of Mechanics*, 26(3) (2010) 355-361.

[42] M.A. Ahmadi, M. Golshadi, Neural network based swarm concept for prediction asphaltene precipitation due to natural depletion, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 98 (2012) 40-49.

#### پیوست:

$$H_1 = 21.06 + 0.4860X_1 - 26.05X_4 + 0.0003030X_1^2 + 6.304X_4^2 - 0.1033X_1X_4 \quad (۱)$$

$$H_2 = -1.611 + 0.08627X_2 + 0.009411H_1 - 0.0005109X_2^2 + 0.03495H_1^2 + 0.006868X_2H_1 \quad (۲)$$

$$H_3 = 13.30 - 4.182X_5 + 1.463H_2 + 0.3335X_5^2 + 0.001991H_2^2 - 0.08128X_5H_2 \quad (۳)$$

$$H_4 = -0.3780 + 0.4094H_1 + 0.7214H_3 - 0.09037H_1^2 - 0.04024H_3^2 + 0.1224H_1H_3 \quad (۴)$$

$$H_5 = -0.3871 + 1.278H_2 - 0.1598H_4 - 1.028H_2^2 - 0.8945H_4^2 + 1.1917H_2H_4 \quad (۵)$$

$$H_6 = -1.290 - 0.2387X_5 + 1.409H_5 + 0.05852X_5^2 - 0.003844H_5^2 - 0.05125X_5H_5 \quad (۶)$$

$$H_7 = -0.1088 + 0.1102H_1 + 0.9162H_6 - 0.005987H_1^2 + 0.002980H_6^2 + 0.001539H_1H_6 \quad (۷)$$

$$H_8 = 0.1790 + 0.05165H_5 + 0.9259H_7 - 12.52H_5^2 - 12.44H_7^2 + 24.96H_5H_7 \quad (۸)$$

$$H_9 = -0.01609 + 0.4358H_4 + 0.5776H_8 - 1.203H_4^2 - 1.167H_8^2 + 2.369H_4H_8 \quad (۹)$$

$$H_{10} = -0.1355 - 1.153H_6 + 2.176H_9 + 5.373H_6^2 + 5.242H_9^2 - 10.62H_6H_9 \quad (۱۰)$$

[35] S.J. Farlow, *Self-organizing methods in modeling: GMDH type algorithms*, CrC Press, 1984.

[36] N. Nariman-Zadeh, A. Darvizeh, A. Jamali, A. Moeini, Evolutionary design of generalized polynomial neural networks for modelling and prediction of explosive forming process, *Journal of Materials Processing Technology*, 164 (2005) 1561-1571.

[37] N. Nariman-Zadeh, K. Atashkari, A. Jamali, A. Pilechi, X. Yao, Inverse modelling of multi-objective thermodynamically optimized turbojet engines using GMDH-type neural networks and evolutionary algorithms, *Engineering Optimization*, 37(5) (2005) 437-462.

[38] A. Jamali, A. Hajiloo, N. Nariman-Zadeh, Reliability-based robust Pareto design of linear state feedback controllers using a multi-objective uniform-diversity genetic algorithm (MUGA), *Expert systems with Applications*, 37(1) (2010) 401-413.

[39] M. Ahmadi, M.-A. Ahmadi, M. Mehrpooya, M. Rosen, Using GMDH neural networks to model the power and torque of a stirling engine, *Sustainability*, 7(2) (2015) 2243-2255.

[40] N. Nariman-Zadeh, A. Darvizeh, M. Felezi, H. Gharababaei, Polynomial modelling of explosive compaction process of metallic powders using GMDH-type neural networks and singular value decomposition, *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 10(6) (2002) 727.

[41] H. Gharababaei, N. Nariman-Zadeh, A. Darvizeh, A simple modelling method for deflection of circular plates

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

T. Mirzababaie Mostofi, M. Sayah Badkhor, M. Miralinaghi, H. Babaei, *Plastic Deformation of Reinforced Aluminum Plates with Polyurea Coating under Impulsive Loading*. *AmirKabir J. Mech Eng.*, 53(special issue 2) (2021) 1251-1268.

DOI: 10.22060/mej.2020.17127.6515



