



Behavior of Monolithic and Multi-Layered Aluminum Plates under Multiple Uniform Impulsive Loading: Experimental Study and Neural Network Modelling

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Ziya-Shamami M.¹ MSc,
Babaei H.*¹ PhD,
Mirzababaei Mostofi T.² PhD,
Khodarahmi H.² PhD

How to cite this article

Ziya-Shamami M, Babaei H, Mirzababaei Mostofi T, Khodarahmi H. Behavior of Monolithic and Multi-Layered Aluminum Plates under Multiple Uniform Impulsive Loading: Experimental Study and Neural Network Modelling. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(9):2313-2329.

¹Mechanical Engineering Department, Mechanical Engineering Faculty, University of Guilan, Rasht, Iran

²Mechanical Engineering Department, Mechanical Engineering Faculty, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Faculty, University of Guilan, 5th km of Persian Gulf Highway, Rasht, Iran.
Postal Code: 4199613776
Phone: +98 (13) 33690539
Fax: +98 (13) 33690271
ghbabaei@guilan.ac.ir

Article History

Received: June 8, 2020

Accepted: July 8, 2020

ePublished: September 20, 2020

ABSTRACT

In this paper, the large inelastic deformation and failure mechanism of single and multi-layered circular plates under repeated uniform impulsive loading were studied. The ballistic pendulum was used to conduct a series of experiments (67 experiments) on aluminum alloy plates with different structural configurations. Three different layering configurations including single, double, and triple-layered plates made of the same material were considered and tested for the range of charge masses from 1.5g to 12.5g up to five times for repeated loading. The experimental results indicated large plastic global deformation with thinning happening at the clamped boundary and also tearing for some experiments. The results also represented that the maximum permanent deflections of plates were increased by the increase of the charge mass and the number of blast loads. On the other hand, the progressive deflection of the plates at the center was decreased exponentially with increasing the number of blasts. Furthermore, in the numerical modeling section, the Group Method of Data Handling (GMDH) neural network was used to present a mathematical model based on dimensionless numbers to predict the maximum permanent deflection of single and multi-layered circular plates under repeated impulsive loading. In order to increase the prediction capability of the proposed neural network for this process, the experimental data were divided into two training and prediction sets. Good agreement between the proposed model and the corresponding experimental results is obtained and all and 77% of data points are within the <10% error range for single and multi-layered plates, respectively.

Keywords Repeated Loading; Multi-Layered Configuration; Circular Plate; Experimental Study; Neural Network Modelling

CITATION LINKS

[1] Effect of gas detonation on response of ... [2] Theoretical analysis on the effect of uniform ... [3] Experimental and ... [4] Closed-form analytical ... [5] Experimental investigation and analytical ... [6] Structural ... [7] Deformation of thin plates subjected ... [8] Suggestion of a new dimensionless number for ... [9] Blast loaded ... [10] Deformation and failure of ... [11] Gas mixture detonation load on ... [12] Deformation of mild steel ... [13] Dynamic plastic response of ... [14] Repeated localized impulsive loading ... [15] Response of structures to planar ... [16] Assessment of blast loading effects ... [17] Modelling the structural response of ... [18] Numerical simulation and ... [19] The response of mild steel and ... [20] The response of circular plates to ... [21] Response of low-temperature ... [22] Experimental study on the dynamic behaviour of ... [23] Dynamic response of stiffened ... [24] Experimental studies on the deformation ... [25] Experimental investigation on the ... [26] Multi-objective ... [27] Polynomial theory of complex ... [28] Deformation of thin plates ... [29] Deformation of thin plates ... [30] On dimensionless numbers for ... [31] Simple design formulae for ... [32] The effect of stand-off distance ... [33] Investigation into the response ... [34] A simple modelling method for deflection of ... [35] Analytical study of plastic deformation ... [36] Analytical and experimental studies ... [37] Study on the response of circular ... [38] Experimental study on the ... [39] Experimental and analytical ... [40] Empirical modelling for ... [41] On dimensionless numbers for ... [42] Experimental investigation and ... [43] The influence of gas mixture detonation loads on ... [44] On dimensionless numbers for predicting ... [45] New dimensionless numbers for ... [46] Modeling and prediction of fatigue life ... [47] The deformation and tearing of thin circular ... [48] System identification ... [49] Online evolution for cooperative behavior in ... [50] Self organizing methods in ... [51] Evolutionary design of ... [52] Inverse modelling of multi-objective ... [53] Reliability-based robust Pareto design ... [54] Polynomial modelling of ... [55] Large transverse deformation ... [56] Dynamic inelastic response of ... [57] Experimental and theoretical study of ...

رفتار ورق‌های تکلایه و چندلایه آلومینیومی تحت چندین بارگذاری دفعی یکنواخت: مطالعه تجربی و مدل‌سازی شبکه عصبی.

مجتبی ضیاء شمامی MSc

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

هاشم بابایی PhD

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

توحید میرزابابی مستوفی PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ایوان‌کی، ایوان‌کی، ایران

حسین خدارحمی PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ایوان‌کی، ایوان‌کی، ایران

چکیده

در این مقاله، مکانیسم تغییر شکل بزرگ پلاستیک و شکست ورق‌های دایره‌ای تک و چندلایه تحت بارگذاری دفعی مکرر یکنواخت مورد بررسی قرار گرفت. برای انجام یک سری آزمایش (۶۷ آزمایش) بر روی ورق‌های آلایژ آلومینیوم با ساختارهای مختلف از سامانه آونگ بالستیک استفاده شد. سه نوع لایه‌بندی مختلف شامل ساختارهای تکلایه، دولایه و سه‌لایه هم‌جنس در نظر گرفته شد و تحت محدوده وسیعی از جرم خرج از ۱/۵ تا ۱۲/۵ گرم تا پنج دفعه جهت بارگذاری مکرر آزمایش شد. نتایج آزمایشگاهی حاکی از تغییر شکل بزرگ پلاستیک همراه با نازک‌شدگی در مرزهای گیردار و همچنین پاره‌شدن برخی آزمایش‌ها است. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش جرم خرج و تعداد دفعات انفجار، بیشترین خیز دائمی ورق‌ها افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، با افزایش تعداد انفجارها، خیز پیش‌رونده ورق در مرکز آن به‌صورت نمایی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، در بخش مدل‌سازی عددی، از شبکه عصبی از نوع GMDH برای ارایه یک مدل ریاضی بر مبنای اعداد بی‌بعد جهت پیش‌بینی بیشترین خیز دائمی ورق‌های دایره‌ای تک و چندلایه تحت بارگذاری دفعی مکرر یکنواخت استفاده شد. به‌منظور افزایش قابلیت پیش‌بینی شبکه عصبی پیشنهادی برای این فرایند، داده‌ها به دو دسته آموزش و پیش‌بینی تقسیم شدند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که توافق خوبی بین مدل ارایه‌شده با مقادیر تجربی برقرار است، به‌طوری‌که به‌ترتیب تمامی و ۷۷٪ از نقاط مربوطه به ساختارهای تکلایه و چندلایه در محدوده خطای کمتر از ۱۰٪ قرار گرفتند.

کلیدواژه‌ها: بارگذاری دفعی مکرر، ساختار چندلایه، ورق دایره‌ای، مطالعه آزمایشگاهی، مدل شبکه عصبی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۳/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۱۸

*نویسنده مسئول: ghbabaei@guilan.ac.ir

مقدمه

مطالعه اثر بار انفجاری بر روی ساختارهای مختلف مورد توجه تعداد زیادی از محققان بوده است. تحقیقات صورت‌گرفته در این زمینه نشان می‌دهد که بیشتر این مطالعات به بررسی رفتار دینامیکی ساختارها تحت بار انفجاری پرداخته و هدف جذب انرژی هر چه بیشتر این ساختارها در مقابل بار انفجاری اعمال‌شده است. البته زمانی نیز یک سازه در برابر چند بارگذاری انفجاری در زمان‌های مختلف قرار می‌گیرد که با توجه به تغییرات به‌وجودآمده

در ساختار سازه در بارگذاری انفجاری اول، بررسی رفتار آن سازه را در برابر بارگذاری‌های انفجاری بعدی پیچیده‌تر می‌نماید؛ لذا مطالعه یک ساختار در مقابل بارگذاری انفجاری مکرر به‌منظور پیش‌بینی تخریب سازه از اهمیت زیادی برخوردار است. با توجه به توضیحات ارایه‌شده و احساس نیاز به تحقیق در این حوزه، هدف کلی تحقیقات در سال‌های اخیر، مطالعه پاسخ دینامیکی ساختارها تحت بارگذاری انفجاری چندمرحله‌ای یا مکرر است. البته بررسی منابع انجام‌شده در این زمینه نشان می‌دهد که تاکنون تحقیقات بسیار اندکی بر روی مکرر بودن این نوع بارگذاری انجام شده است.

تحقیقات تجربی و تحلیلی توسط محققین در زمینه بررسی بارگذاری انفجاری یکنواخت و محلی روی سازه‌های چهارگوش و دایره‌ای مختلف انجام شده است [1-5]. در پژوهش‌هایی به بررسی تحلیلی و تجربی اثر بار انفجاری بر روی ورق پرداخته شده است [6-9]. در مطالعات بیشتر، به بررسی اثر شرایط مرزی ورق، سطح مواجه ورق (دایروی، مستطیلی، مربعی) و نوع بارگذاری‌های مختلف انفجاری با استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود و آزمایش انجام شده است و مدل‌های تحلیلی نیز ارایه شده است [10-14]. محققان بسیار زیادی با استفاده از نرم‌افزار اتوداین و آباکوس به مدل‌سازی بار انفجاری بر روی سازه پرداخته و پروفیل فشار بار انفجاری نسبت به زمان و مکان ارایه نمودند [15-18]. البته با شبیه‌سازی‌ها قبلاً با نتایج تجربی صحت‌گذاری شده است. البته با توجه به زمان‌بر بودن نحوه مدل‌سازی بالا استفاده از روش کانوپ با لحاظ‌کردن شرایطی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد [19]. معمولاً روش کانوپ تطابق خوبی با نتایج تجربی دارد. در واقع در این روش جرم ماده منفجره با معادل جرم تی‌ان‌تی معادل می‌شود و از اثرات انعکاس موج انفجاری روی سازه صرف نظر می‌شود [19].

هنشیه و همکاران [20] به مطالعه تجربی و عددی اثر بارگذاری انفجاری یکنواخت مکرر بر روی ورق فولادی دایروی پرداختند. ورق دایروی مورد مطالعه آنها از جنس فولاد با ضخامت‌های ۲ و ۳ میلی‌متر بود که توسط دستگاه آونگ بالستیک در معرض ۵ مرتبه بار انفجاری مکرر با توزیع یکنواخت قرار گرفت. به‌طور کلی، تغییر شکل پلاستیک ورق‌ها به‌صورت نازک‌شدگی در قسمت‌های گیردار و گاهی هم به‌صورت پارگی بروز پیدا می‌کرد. با افزایش میزان و تعداد بار انفجاری انحراف بیشتری در میزان جابه‌جایی ورق دیده می‌شد. این نتایج همچنین نشان می‌دهد که با افزایش تعداد انفجار روی ورق، نرخ افزایش انحراف سطح ورق در نقطه میانی کاهش و سختی و یکپارچگی ورق در ناحیه مرزی و مرکزی افزایش می‌یابد. ترانگ و همکاران [21] به مطالعه تغییر شکل دائمی ورق آلومینیومی در معرض بارگذاری دفعی مکرر ناشی از ضربه‌زننده پرداختند. در این تحقیق معادلات فرم بسته دقیق ساده‌ای برای پیش‌بینی تغییر شکل دائمی ناشی از بارگذاری دفعی مکرر از نتایج مطالعه پارامتریک به‌دست آوردند. در همین راستا، ژو و همکاران [22] به مطالعه پاسخ دینامیکی ورق‌های

برای به حداقل رساندن انحراف از مقادیر واقعی استفاده می‌شود. الگوریتم GMDH پس از بررسی تابع هدف اولیه، یک ترکیبی از جفت ورودی‌های مختلف را انتخاب می‌کند. در سال‌های اخیر استفاده از چنین شبکه‌های خودسازمان‌دهی باعث کاربرد موفق الگوریتم‌های GMDH در بسیاری از کاربردهای مهندسی و اقتصادی شده است. در این مطالعه، شبکه عصبی GMDH تغییر شکل ورق‌های مثلثی را مدل و پیش‌بینی می‌کند. عملکرد شبکه عصبی توسط روش SVD بهبود یافته است. روش SVD برای حل مسایل حداقل مربعات با معادلات تکین مناسب است. در ادامه، روش‌های SVD و GMDH معادله‌ای را براساس داده‌های آزمایشگاهی برای محاسبه نسبت تغییر شکل ورق مثلثی به ضخامت آن پیش‌بینی می‌کنند. متغیرهای ورودی به صورت پارامترهای بدون بعد برای به دست آوردن نسبت تغییر شکل ورق‌های مثلثی به ضخامتشان به کار گرفته می‌شوند.

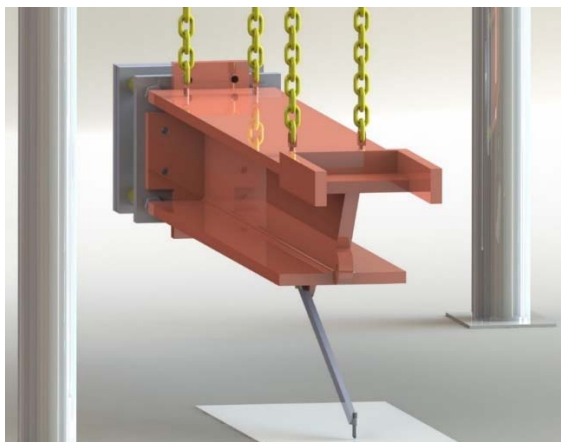
در بخش مدل‌سازی بر مبنای اعداد بدون بعد، موثرترین تحقیقات انجام گرفته در ادبیات تحقیق در ادامه به تفصیل شرح داده می‌شود. نوریک و مارتین^[28, 29] با فرض شکل مد متغیر در روش تقریبی و در نظر گرفتن همزمان جابه‌جایی‌های قائم و افقی، مدل‌هایی برای ورق‌های دایروی و مستطیلی ارائه کردند. لی و جونز^[30]، یک تحلیل بی‌بعد کلی برای پیش‌بینی رفتارهای دینامیکی و شکست ساختارهای مختلف ارائه کردند. پارک و چو^[31] یک عدد بی‌بعد مشابه عدد بی‌بعد نوریک برای ورق‌های تکلایه تحت بار انفجاری یکنواخت ارائه کردند که در آن نسبت طول به عرض ورق نیز اضافه شده بود. ژاکوب و همکاران^[32] اثر فاصله استقرار و جرم خرج را بر پاسخ دینامیکی ورق‌های دایروی کاملاً گیردار تحت بار انفجاری بررسی کردند. همچنین به منظور پیش‌بینی خیز مرکزی ورق یک تحلیل تجربی انجام شد که در آن اثر فاصله استقرار خرج به عنوان یک پارامتر مهم به اعداد بی‌بعد ایمپالس ارائه شده توسط نوریک و مارتین اضافه شد. در مطالعاتی مدل‌هایی تجربی بر مبنای اعداد بی‌بعد و روش انرژی برای پیش‌بینی خیز مرکزی ورق‌های تکلایه دایروی با پیرامون گیردار تحت بار انفجاری یکنواخت و محلی منفرد ارائه شد^[33-35].

با مرور مطالعات پیشین، این نتیجه حاصل شد که بیشتر مطالعات در زمینه شکل‌دهی سازه‌ها تحت بار انفجاری یکنواخت مکرر مربوط به ساختارهای تکلایه فولادی یا کامپوزیتی بوده و تاکنون تحقیقی روی ورق‌های آلومینیومی تکلایه و چندلایه تحت بار دفعی مکرر با توزیع یکنواخت انجام نشده است. لذا انجام مطالعات آزمایشگاهی روی ساختارهای دایره‌ای آلومینیومی به منظور مطالعه پارامترهای مختلف مانند میزان و فاصله خرج انفجاری تا ورق، چندلایه بودن و ضخامت ورق و اثر تکرار بارگذاری انفجاری و بررسی اثرگذاری آنها بر روی پاسخ دینامیکی و تغییر شکل پلاستیک سازه، می‌تواند از اهمیت بالایی برخوردار باشد. با توجه به توضیحات ارائه شده، مهم‌ترین نوآوری‌های تحقیق حاضر در بخش‌های مختلف تجربی و مدل‌سازی تجربی بر مبنای تحلیلی

تقویت‌شده تحت بارگذاری مکرر پرداختند. برخی از فرمول‌های ساده براساس روش کاملاً صلب- پلاستیک برای بررسی پاسخ دینامیکی ورق‌های مستطیلی تقویت‌شده تحت بارگذاری مکرر توسط ضربه‌زننده در هر مکان پیشنهاد شده است. همچنین در تحقیق دیگری ژو و همکاران^[23] به مطالعه تجربی رفتار دینامیکی سازه ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی در مقابل بارگذاری ضربه‌ای یک مرحله‌ای و مکرر در دمای پایین پرداختند. ژو و همکاران^[24] به مطالعه تجربی تغییر شکل و آسیب پوسته استوانه فولادی تحت بارگذاری انفجاری دومرحله‌ای پرداختند. پوسته‌های فلزی استوانه‌ای با ضخامت دیواره‌های مختلف در معرض دو بار بارگذاری انفجاری، با فاصله بارگذاری متفاوت نسبت به سازه قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که تغییر شکل پوسته‌های استوانه‌ای در معرض یک بارگذاری انفجاری قرار گرفته‌اند، انرژی بیشتری را با توجه به نظریه جذب انرژی نشان می‌دهد. آزمایش‌های سختی ویکرز نشان می‌دهد که در منطقه لولای پلاستیکی و منطقه مرکزی با افزایش تعداد بارگذاری انفجاری سختی نیز افزایش می‌یابد. گائو و همکاران^[25]، به مطالعه تجربی رفتار دینامیکی سازه ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی تحت تأثیر بارگذاری مکرر پرداختند. رفتار دینامیکی سازه ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی تحت بارگذاری مکرر توسط دستگاه سقوط وزنه مورد بررسی قرار گرفته است.

هر سیستم از روابط دقیق ریاضی که بین ورودی‌ها و خروجی‌هایش وجود دارد تبعیت می‌کند. روش‌های محاسبه نرم برای ارائه محاسبات نسبتاً دقیق از سیستم‌های پیچیده مورد استفاده قرار می‌گیرند. مهم‌ترین انواع محاسبات نرم، منطق فازی، شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک هستند. از این روش‌های محاسبات نرم برای حل کردن سیستم‌های غیرخطی پیچیده استفاده می‌شود^[26]. روش‌های متعددی برای استفاده از انواع مختلف محاسبات نرم پیشنهاد شده‌اند که از میان آنها روش GMDH یک روش خودسازمان‌ده است که به وسیله آن، مدل‌های پیچیده قابل محاسبه هستند. از مهم‌ترین موارد استفاده از این الگوریتم، شناسایی الگو و محاسبه و پیش‌بینی پدیده‌های پیچیده مرتبط با سیال واسط است. این روش براساس یک دسته داده‌های چند ورودی و یک خروجی عمل می‌کند. روش GMDH برای اولین بار توسط /یوخنکو^[27] برای غلبه بر مشکلات حاکم بر حل مسایل مربوط به سیستم‌های پیچیده ارائه شد. ایده اصلی روش GMDH، ساختن یک تابع تحلیلی در یک شبکه پیش‌خور براساس تابع انتقال گره‌ای چهارتایی است. ضرایب این شبکه پیش‌خور توسط تکنیک رگرسیون به دست می‌آید. روش GMDH در مقایسه با روش شبکه عصبی دارای طبیعت محدودتری است. در روش شبکه عصبی، واحد منطقی آستانه ماندنی به صورت یک تابع انتقال خطی یا غیرخطی در مسیر خروجی قرار می‌گیرد. هر واحد وابسته به شرایط واحدهای دیگر فعل و انفعالات جدیدی را در ساختار شبکه‌ای به وجود می‌آورد. باز نشر خطا در مسیر خروجی

شایان توجه است که با توجه به مطالعات انجام گرفته [1-5, 13, 14, 30, 32, 35-46] در صورتی که فاصله خرج انفجاری تا مرکز ورق بیشتر از شعاع باشد، بار توزیعی یکنواخت روی نمونه دارد.



شکل ۱) شماتیک سامانه آونگ بالستیک آزمایشگاه ضربه و انفجار دانشگاه گیلان

سامانه آزمایشی آونگ بالستیک شامل چهار بخش واحد اعمال بار انفجاری جایگذاری خرج، سیستم تحریک خرج انفجار با قابلیت کنترل از راه دور، واحد اندازه‌گیری دامنه نوسان و واحد شکل‌دهی و نگه‌دارنده‌ها است. در بخش اعمال بار، خرج انفجاری روی صفحه ضخیمی از جنس پلی‌استر به ضخامت ۱۵ میلی‌متر قرار داده می‌شود. ماده منفجره به‌کار گرفته‌شده برای انجام آزمایش‌های تجربی C4 بوده و مقدار آن بسته به نوع آزمایش مربوطه با ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم وزن شده است. خرج انفجاری هر آزمایش با توجه به خمیری‌شکل‌بودن آن با دست به‌صورت دیسکی به قطر ۳۵ میلی‌متر درآورده شده و روی صفحه پلی‌استری پهن شده است. در بخش دوم، برای تحریک ماده منفجره از چاشنی نمره ۸ نازل و به همراه دستگاه تحریک نازل استفاده می‌شود. در واحد شکل‌دهی، ورق‌های مربعی با سطح مواجهه دایره‌ای بین دو صفحه فولادی ضخیم با ضخامت ۲۵ میلی‌متر قرار داده شده است و با ۷ عدد پیچ M8 به یکدیگر ثابت شدند؛ بنابراین شرایط مرزی در این حالت به‌صورت کاملاً گیردار در نظر گرفته شده است. میزان تغییر شکل نهایی تمامی نمونه‌ها پس از انجام آزمایش‌های انفجاری، توسط کولیس ارتفاع‌سنج اندازه‌گیری شده است. نمونه ورق‌های مورد آزمایش، از جنس آلایژ آلومینیوم (Al-1050) در ضخامت‌های ۲ و ۳ میلی‌متر است. در ابتدا نمونه ورق‌ها در ابعاد ۲۵۰×۲۵۰ میلی‌متر مربع برش زده شدند. نمونه‌های آزمایشی دارای سطح شکل‌گیری یا مواجهه دایره‌ای شکل به قطر ۱۰۰ میلی‌متر هستند.

با توجه به توضیحات ارائه‌شده و مطابق با جدول ۱، ۶۷ ساختار تک‌لایه، دولایه و سه‌لایه آلومینیومی در سه گروه‌بندی S، D و T به‌منظور بررسی تغییر شکل پلاستیک و پاسخ دینامیکی ورق‌های آلومینیومی تک‌لایه و چندلایه تحت بار انفجاری یکنواخت مکرر

ابعادی شامل ۱) بررسی رفتار پلاستیک ساختارهای آلومینیومی تک‌لایه تحت بار دینامیکی یکنواخت منفرد و مکرر و مقایسه عملکرد آنها با ساختارهای چندلایه، ۲) ارایه اعداد بی‌بعد جدید جهت تحلیل ابعادی پاسخ پلاستیک ساختارهای تک‌لایه دایره‌ای تحت بار دینامیکی یکنواخت مکرر و تعمیم آنها برای ساختارهای چندلایه، ۳) ارایه یک مدل عددی با روش شبکه عصبی برای پیش‌بینی بیشترین خیز دائمی ورق‌های تک‌لایه و همچنین لایه‌های عقبی در ساختارهای چندلایه تحت چندین بارگذاری دفعی یکنواخت، هستند.

مطالعه آزمایشگاهی

سامانه تجربی، نمونه‌ها و خواص مکانیکی ماده

آنچه در مطالعات تجربی فرآیند شکل‌دهی تحت بار دفعی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است، شناخت و ارزیابی رفتار ساختارها و همچنین مقاومت انفجاری آنها تحت آزمایش نسبت به بار دفعی اعمالی است؛ لذا هدف از مطالعات آزمایشگاهی آن است تا بتوان رفتار دینامیکی ساختارهای تک‌لایه و چندلایه آلومینیومی تحت بار انفجاری یکنواخت مکرر را مورد بررسی قرار داد که تاکنون در پیشینه تحقیق در این زمینه مطالعه‌ای صورت نگرفته است.

شکل‌دهی آزاد یا بدون قالب ورق‌های آلومینیومی تک‌لایه و چندلایه دایره‌ای تحت بارگذاری دفعی یکنواخت مکرر در یک سامانه آزمایشی آونگ بالستیک انجام گرفته است که در شکل ۱ نشان داده شده است. سامانه آونگ بالستیک همراه با متعلقاتش به‌وسیله چهار کابل فولادی از ارتفاع معین به‌صورت افقی و تراز آویزان است. یک سمت پاندول قلم و کاغذ جهت ثبت حرکت پاندول نصب‌شده که دامنه حرکت رفت‌وبرگشت پاندول توسط قلم، روی کاغذی که در سطح زمین قرار داده شده است، ثبت می‌شود. سمت دیگر پاندول یک صفحه مربعی فولادی با ضخامت ۲۵ میلی‌متر متصل است. روی این صفحه چهار میله فولادی به قطر ۱۵ میلی‌متر نصب شده است که به‌صورت نر و ماده به گیره ورق متصل می‌شود. گیره ورق از دو صفحه مربعی فولادی با ضخامت ۲۵ میلی‌متر تشکیل شده است. وسط هر دو صفحه برحسب نوع تغییر شکل ورق منفذی جهت اعمال بار و خروج صفحه تعبیه شده است. همچنین در صفحه جلویی گیره ورق رزوه‌هایی جهت نصب لوله‌های استقرار خرج در نظر گرفته شده است. در برخی از موارد با به‌کاربردن لوله‌های بلند استقرار خرج، پاندول از حالت تعادل خارج می‌شود. برای رفع این مساله در سمت دیگر آن از وزنه‌هایی جهت برقراری تعادل استفاده می‌شود. از دو لوله به قطر داخلی ۱۰۰، قطر خارجی ۱۲۰ و طول‌های ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متر که جهت هدایت موج انفجار به سمت نمونه و همچنین یکنواخت‌کردن توزیع بار است، استفاده شده است. طول‌های مختلف برای لوله این امکان را فراهم می‌کند تا بتوان اثر فاصله خرج روی میزان تغییر شکل پلاستیک سازه را بررسی نمود.

خواص مکانیکی مواد فلزی مورد استفاده در این مجموعه آزمایشی از انجام آزمون کشش تک‌محوره روی نمونه‌های آماده‌شده از ورق‌هایی از جنس آلیاژ آلومینیوم (Al-1050) تعیین شده است. برای بررسی همگنی خواص مواد، از هر ورق در سه راستای مختلف افقی، عمودی و اریب (۴۵ درجه) نمونه‌هایی را با دستگاه وایرکات برش زده و سپس تحت آزمایش کشش با شرایط کاملاً یکسان قرار داده شد. برای تعیین تنش تسلیم استاتیکی و تنش نهایی استاتیکی، از هر ضخامت، دو نمونه آزمایشگاهی تهیه شد. در انجام آزمایش، نمونه‌ها با سه سرعت ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر بر دقیقه تحت کشش قرار گرفته‌اند. با توجه به طول اولیه نمونه‌ها (۵۰ میلی‌متر)، سه نرخ کرنش با مقادیر $1/67 \times 10^{-3}$ ، $3/33 \times 10^{-3}$ و $5/10 \times 10^{-3}$ معکوس زمان اعمال شد. لازم به ذکر است که برای ورق‌های آلومینیومی در ضخامت‌های متفاوت، منحنی تنش و کرنش کاملاً مشابه و منطبق بر یکدیگر هستند، لذا نمودارها برحسب ضخامت ورق تفکیک نشده‌اند. مقدار تنش تسلیم برای نمونه آزمایشی ۱۱۰ مگاپاسکال به دست آمد.

نتایج آزمایش‌ها و تحلیل

کلیه مشخصات و نتایج آزمایش‌های انجام‌شده روی ساختارهای آلومینیومی تکلایه و چندلایه تحت بار دفعی یکنواخت مکرر تا پنج دفعه، در جدول ۲ ارائه شده است.

طراحی و ساخته شده‌اند. هر گروه آزمایشی تحت چندین بارگذاری با جرم خرج‌های ۱/۵، ۲، ۳، ۵، ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵ گرم مورد بررسی قرار گرفته است. شایان توجه است که در این سری از آزمایش‌ها، تمرکز کارهای تجربی انجام‌گرفته بر میزان اثر بارگذاری دفعی مکرر روی مقاومت انفجاری ساختارها است.

جدول ۱) اطلاعات مربوط به گروه‌های آزمایشی

گروه آزمایشی	جرم خرج (g)	فاصله استقرار (mm)	تعداد آزمایش
S2	۱/۵	۳۰۰	۵
	۲	۳۰۰	۵
	۳	۳۰۰	۲
S3	۵	۲۰۰ و ۳۰۰	۵+۳
	۷/۵	۳۰۰	۳
D22	۵	۲۰۰	۵
	۷/۵	۲۰۰	۵
	۱۰	۲۰۰ و ۳۰۰	۵+۵
	۱۲/۵	۲۰۰	۳
	۵	۲۰۰	۵
T222	۷/۵	۲۰۰	۵
	۱۰	۲۰۰ و ۳۰۰	۵+۴
	۱۲/۵	۲۰۰	۲
	۱۲/۵	۲۰۰	۲

جدول ۲) نتایج آزمایشات تجربی

کد آزمایش	دفعات انفجار	شماره انفجار	جرم خرج (g)	ایمپالس (N·s)	فاصله استقرار (mm)	خیز (mm)
S2R5M1.5B1H300	۵	۱	۱/۵	۶/۶۱	۳۰۰	۶/۶
S2R5M1.5B2H300		۲	۱/۵	۶/۴۹	۳۰۰	۸/۱
S2R5M1.5B3H300		۳	۱/۵	۶/۷۸	۳۰۰	۹/۲
S2R5M1.5B4H300		۴	۱/۵	۶/۵۳	۳۰۰	۹/۹
S2R5M1.5B5H300		۵	۱/۵	۶/۶۸	۳۰۰	۱۰/۵
S2R5M2B1H300	۵	۱	۲	۸/۲۶	۳۰۰	۸/۰
S2R5M2B2H300		۲	۲	۸/۴۳	۳۰۰	۹/۷
S2R5M2B3H300		۳	۲	۸/۳۲	۳۰۰	۱۱/۲
S2R5M2B4H300		۴	۲	۸/۴۶	۳۰۰	۱۲/۵
S2R5M2B5H300		۵	۲	۸/۱۷	۳۰۰	پارگی
S2R2M3B1H300	۲	۱	۳	۱۰/۸۳	۳۰۰	۱۱/۵
S2R2M3B2H300		۲	۳	۱۱/۱۲	۳۰۰	پارگی
S3R5M5B1H300	۵	۱	۵	۱۴/۹۸	۳۰۰	۹/۰
S3R5M5B2H300		۲	۵	۱۵/۰۷	۳۰۰	۱۰/۴
S3R5M5B3H300		۳	۵	۱۵/۱۶	۳۰۰	۱۱/۷
S3R5M5B4H300		۴	۵	۱۴/۸۷	۳۰۰	۱۲/۵
S3R5M5B5H300		۵	۵	۱۵/۱۵	۳۰۰	۱۳/۲
S3R3M7.5B1H300	۳	۱	۷/۵	۱۹/۱۲	۳۰۰	۱۲/۳
S3R3M7.5B2H300		۲	۷/۵	۱۹/۳۳	۳۰۰	۱۵/۰
S3R3M7.5B3H300		۳	۷/۵	۱۹/۰۱	۳۰۰	پارگی
S3R3M5B1H200	۳	۱	۵	۱۳/۶۲	۲۰۰	۱۸/۲
S3R3M5B2H200		۲	۵	۱۳/۵۵	۲۰۰	۲۱/۸
S3R3M5B3H200		۳	۵	۱۳/۷۴	۲۰۰	پارگی

کد آزمایش	دفعات انفجار	شماره انفجار	جرم خرج (g)	ایمپالس (N·s)	فاصله استقرار (mm)	خیز (mm)
D33R5M5B1H200	۵	۱	۵	۱۲/۳۴	۲۰۰	۸/۲
D33R5M5B2H200		۲	۵	۱۲/۴۶	۲۰۰	۹/۸
D33R5M5B3H200		۳	۵	۱۲/۲۲	۲۰۰	۱۱
D33R5M5B4H200		۴	۵	۱۲/۳۷	۲۰۰	۱۱/۳
D33R5M5B5H200		۵	۵	۱۲/۵۴	۲۰۰	۱۱/۸
D33R5M7.5B1H200	۵	۱	۷/۵	۱۶/۱۱	۲۰۰	۱۱/۰
D33R5M7.5B2H200		۲	۷/۵	۱۶/۲۵	۲۰۰	۱۳/۹
D33R5M7.5B3H200		۳	۷/۵	۱۶/۲۸	۲۰۰	۱۵/۹
D33R5M7.5B4H200		۴	۷/۵	۱۶/۰۳	۲۰۰	۱۷/۱
D33R5M7.5B5H200		۵	۷/۵	۱۶/۱۹	۲۰۰	۱۸/۲
D33R5M10B1H200	۵	۱	۱۰	۲۰/۲۶	۲۰۰	۱۳/۸
D33R5M10B2H200		۲	۱۰	۲۰/۴۳	۲۰۰	۱۸/۱
D33R5M10B3H200		۳	۱۰	۲۰/۳۵	۲۰۰	۱۹/۹
D33R5M10B4H200		۴	۱۰	۲۰/۳۹	۲۰۰	۲۱/۵
D33R5M10B5H200		۵	۱۰	۲۰/۱۱	۲۰۰	پارگی
D33R5M12.5B1H200	۳	۱	۱۲/۵	۲۴/۴۴	۲۰۰	۱۷/۰
D33R5M12.5B2H200		۲	۱۲/۵	۲۴/۵۹	۲۰۰	۲۲/۳
D33R5M12.5B3H200		۳	۱۲/۵	۲۴/۵۷	۲۰۰	پارگی
D33R5M10B1H300	۵	۱	۱۰	۲۲/۲۳	۳۰۰	۶/۸
D33R5M10B2H300		۲	۱۰	۲۲/۱۲	۳۰۰	۸/۳
D33R5M10B3H300		۳	۱۰	۲۱/۹۷	۳۰۰	۹/۱
D33R5M10B4H300		۴	۱۰	۲۱/۷۴	۳۰۰	۹/۹
D33R5M10B5H300		۵	۱۰	۲۱/۸۱	۳۰۰	۱۰/۸
T222R5M5B1H200	۵	۱	۵	۱۲/۳۹	۲۰۰	۹/۰
T222R5M5B2H200		۲	۵	۱۲/۵۳	۲۰۰	۱۰/۸
T222R5M5B3H200		۳	۵	۱۲/۳۷	۲۰۰	۱۱/۹
T222R5M5B4H200		۴	۵	۱۲/۶۱	۲۰۰	۱۲/۹
T222R5M5B5H200		۵	۵	۱۲/۴۸	۲۰۰	۱۳/۶
T222R5M7.5B1H200	۵	۱	۷/۵	۱۶/۳۲	۲۰۰	۱۱/۷
T222R5M7.5B2H200		۲	۷/۵	۱۶/۱۶	۲۰۰	۱۴/۹
T222R5M7.5B3H200		۳	۷/۵	۱۶/۴۲	۲۰۰	۱۶/۶
T222R5M7.5B4H200		۴	۷/۵	۱۶/۰۵	۲۰۰	۱۷/۸
T222R5M7.5B5H200		۵	۷/۵	۱۶/۲۸	۲۰۰	پارگی
T222R4M10B1H200	۴	۱	۱۰	۲۰/۳۵	۲۰۰	۱۴/۴
T222R4M10B2H200		۲	۱۰	۲۰/۵۶	۲۰۰	۱۸/۸
T222R4M10B3H200		۳	۱۰	۲۰/۲۱	۲۰۰	۲۰/۶
T222R4M10B4H200		۴	۱۰	۲۰/۴۸	۲۰۰	پارگی
T222R2M12.5B1H200	۲	۱	۱۲/۵	۲۴/۶۹	۲۰۰	۱۸/۰
T222R2M12.5B2H200		۲	۱۲/۵	۲۴/۵۸	۲۰۰	پارگی
T222R5M10B1H300	۵	۱	۱۰	۲۲/۱۶	۳۰۰	۷/۶
T222R5M10B2H300		۲	۱۰	۲۲/۱۲	۳۰۰	۹/۰
T222R5M10B3H300		۳	۱۰	۲۱/۹۲	۳۰۰	۹/۹
T222R5M10B4H300		۴	۱۰	۲۱/۸۹	۳۰۰	۱۰/۷
T222R5M10B5H300		۵	۱۰	۲۱/۷۳	۳۰۰	۱۱/۶

ورق‌های آلومینیومی تحت دفعی یکنواخت مکرر است که در آن اثر تغییرات ضخامت ورق آلومینیومی در ساختارهای تک‌لایه، تعداد لایه‌ها در اهداف چندلایه و تعداد بارگذاری بررسی شده است. همچنین، تغییرات شدت نیروی وارد شده به نمونه یا به عبارتی افزایش انرژی انتقالی به ورق و تغییر نرخ تغییر شکل نیز

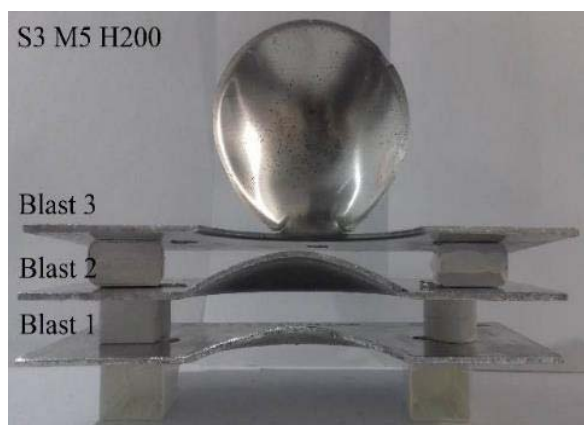
در این جدول مقادیر جرم خرج انفجاری، تعداد کل دفعات بارگذاری، شماره هر انفجار، ایمپالس ناشی از بارگذاری دفعی، بیشترین خیز دائمی نمونه و همچنین نسبت بی‌بعد خیز دائمی به ضخامت نمونه ارائه شده است. نتایج به‌دست‌آمده از مجموعه آزمایش‌های انجام‌گرفته نشان‌دهنده پاسخ و رفتار مکانیکی

نیروهای کششی غشایی است.

علاوه بر موارد ذکر شده، مطابق با نمودارهای ۱ و ۲ برای مواردی که در آن نمونه آزمایشی در معرض بار انفجاری مکرر قرار دارد یا شدت نیروی انفجاری افزایش یافته است، نازک‌شدگی و همچنین پاره‌شدن در لبه‌های گیردار مشاهده می‌شود که این مد از تغییر شکل مشابه با تحقیقات انجام‌شده توسط تیلینگ/سمیت و نوریک^[47] است. پارگی در مرزها هنگامی که ورق تحت بار انفجاری مکرر قرار دارد مشابه با حالت گسیختگی برشی (Shear Failure) است. شایان توجه است که گسیختگی برشی مشاهده‌شده در این سری از آزمایش‌ها از نظر ماهیت کاملاً متفاوت با حالت گسیختگی برشی (مد تغییر شکل سوم) است که قبلاً توسط تیلینگ/سمیت و نوریک^[47] تعریف شده است. این به دلیل آن است که نمونه پاره‌شده با کاهش تدریجی جابه‌جایی در منطقه مرکزی همراه بوده است. همچنین در این سری از آزمایش‌ها، مد تغییر شکل برش کششی (Tensile Shearing) که به‌طور معمول ایمپالس‌های پایین در بارگذاری انفجاری منفرد رخ می‌دهد، مشاهده نشد.

رابطه ایمپالس با جرم خرج

پس از تحلیل آماری نتایج تجربی به‌دست‌آمده در جدول ۲، یکی از مهم‌ترین مسایل مربوط به بارگذاری انفجاری، داشتن تخمینی از میزان ایمپالس بار وارده برحسب جرم خرج است؛ لذا بدین منظور ایمپالس‌های اندازه‌گیری‌شده برای هر آزمایش برحسب جرم خرج برای دو ساختار تکلایه و چندلایه آلومینیومی به‌ترتیب در نمودارهای ۱ و ۲ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که داده‌های تجربی انحراف بسیار اندک و قابل اطمینانی از دو رابطه خطی برازش‌شده برای دو ساختار تکلایه و چندلایه دارند و این دو رابطه قابلیت استفاده در ادامه کارهای تجربی در این محدوده را دارند. لازم به توضیح است که در تحلیل‌های انجام‌شده ایمپالس ناشی از انفجار یک گرم نائل به‌علت محاسبه میزان ایمپالس در حالت کلی، در مقدار ایمپالس لحاظ شده است.



شکل ۲) نمونه‌ای از ساختارهای تکلایه آلومینیومی تغییر شکل‌یافته

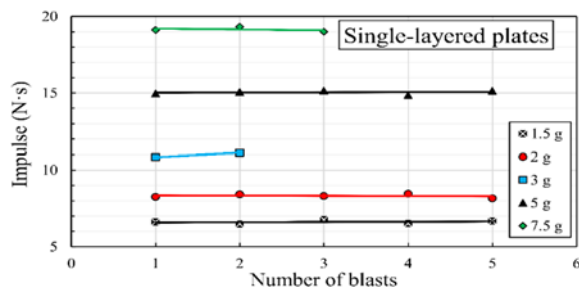
با تغییر جرم خرج انفجاری مورد مطالعه قرار گرفته است. شایان توجه است که یکی دیگر از اهداف انجام این سری از آزمایش‌ها، بررسی اثر فاصله خرج از نمونه آزمایشی در چندین دفعه بارگذاری دفعی با توزیع یکنواخت بوده است. لازم به توضیح است که در نتایج مربوط به ساختارهای چندلایه، مقادیر بیشترین خیز برای لایه عقبی ارایه شده است. در جدول ارایه‌شده، در ستون کد آزمایش S بیانگر ساختار تکلایه، D بیانگر ساختار دولایه، T نشان‌دهنده سه‌لایه‌بودن ساختار و اعداد بعد از آن به‌ترتیب ضخامت هر لایه است. همچنین R بیانگر تعداد کل دفعات بارگذاری، M بیانگر میزان جرم خرج، B بیانگر شماره بارگذاری از تعداد کل دفعات بارگذاری و H بیانگر فاصله خرج انفجاری تا ورق یا همان فاصله استقرار خرج است. در ادامه، تأثیر عوامل مختلف ازجمله میزان و فاصله خرج انفجاری تا ورق، چندلایه‌بودن و ضخامت ورق و اثر تکرار بارگذاری انفجاری موردبررسی قرارگرفته است.

پروپیل‌های تغییر شکل و الگوی شکست

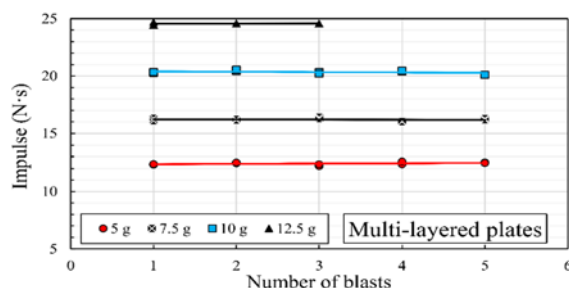
ابتدا به بیان مشاهدات تجربی در مورد مدهای تغییر شکل نمونه‌های آزمایشی پرداخته می‌شود و سپس تأثیر تغییر پارامترهای تجربی مانند افزایش جرم خرج انفجاری، افزایش ضخامت ورق آلومینیومی، نوع لایه‌بندی و افزایش تعداد لایه‌ها و تعداد بارگذاری انفجاری بر بیشترین خیز دائمی ساختار تکلایه و چندلایه آلومینیومی، مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. مشاهدات تجربی با هدف بررسی مدهای تغییر شکل ساختارهای تکلایه و چندلایه آلومینیومی تحت بار دفعی یکنواخت مکرر نشان می‌دهد که در طول ۶۷ آزمایش، تمامی ساختارها به‌غیر از ۹ نمونه سطوح مختلفی از تغییر شکل غیرالاستیک بزرگ یا همان مد اول تغییر شکل را نشان دادند. نمونه‌ای از پروپیل تغییر شکل ساختارهای تکلایه و چندلایه آلومینیومی در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است.

در این مجموعه آزمایشی، پروپیل تغییر شکل هر سه ساختار تکلایه، دولایه و سه‌لایه به‌صورت دومی‌شکل یا محدب (مد اول تغییر شکل^[47]) بوده و این بیانگر آن است که بار دفعی تولیدشده، به‌صورت کاملاً یکنواخت بر سطح نمونه‌های آزمایشی وارد می‌شود. شایان ذکر است که تغییر شکل غیرالاستیک بزرگ لایه جلویی، انرژی قابل توجهی از انفجار ماده منفجره را جذب می‌کند و انرژی جنبشی منتقل‌شده بر سطح لایه عقبی، موجب تغییر شکل دائمی آن می‌شود. به‌طور کلی شکل‌های ۲ و ۳ نشان می‌دهند که ناحیه دومی‌شکل از مرکز ساختار به سمت مرزهای گیردار حرکت می‌کنند، سطحی از ساختار که بین دو نگاه‌دارنده قرار دارد، دچار هیچ گونه تغییر شکل غیرالاستیک بزرگی نشده و مکان‌هایی که پیچ‌ها قرار دارند، دچار هیچ گونه کشیدگی نشده‌اند و نازک‌شدگی در طول مرزهای گیردار نشان‌دهنده تأثیر و عمل

وجود دارد و مشخص است که خطوط برازش شده روندی با گرادیان تقریباً صفر در بین انفجارهای اول تا پنجم در جرم خرج‌های مختلف دارد. نتایج همچنین بیانگر تکرارپذیری بسیار خوب برای ایمپالس و جرم خرج انفجاری است. لازم به ذکر است که ناحیه ورق تحت بار انفجاری در طول آزمایش‌ها ثابت در نظر گرفته شده است.



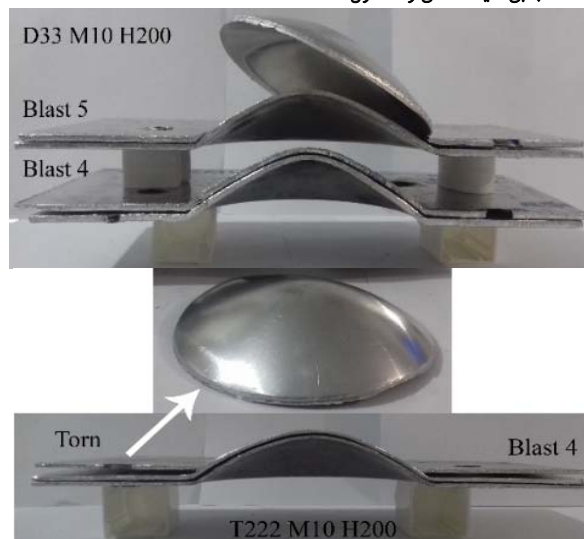
نمودار ۳) منحنی میزان ایمپالس برحسب تعداد دفعات بارگذاری برای ساختارهای تک‌لایه در فاصله استقرار ۳۰۰ میلی‌متر



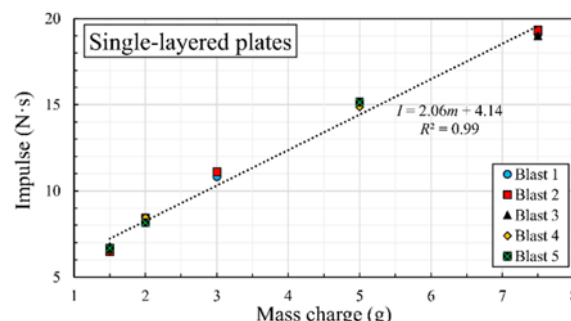
نمودار ۴) منحنی میزان ایمپالس برحسب تعداد دفعات بارگذاری برای ساختارهای چندلایه در فاصله استقرار ۲۰۰ میلی‌متر

تغییرات بیشترین خیز دائمی برحسب جرم خرج برای ساختارهای تک‌لایه

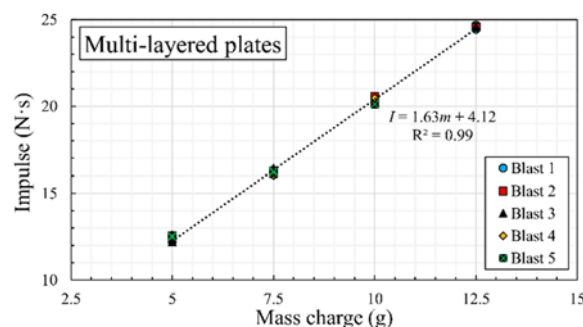
اکنون، پس از بررسی و تشریح مدهای تغییر شکل پلاستیک ساختارهای تک‌لایه و چندلایه آلومینیومی تحت بار دفعی مکرر به تحلیل نتایج تجربی کمی به‌دست‌آمده پرداخته می‌شود. لازم به توضیح است که در تحلیل‌های انجام‌شده، جرم خرج یک گرم نائل لحاظ نشده است. به همین منظور در اولین گام، تغییرات بیشترین خیز دائمی ورق‌های تک‌لایه آلومینیومی برحسب جرم خرج انفجاری با توجه به جدول ۲ تحلیل می‌شود. در حالت کلی، همان‌طور که انتظار می‌رفت، بیشترین خیز دائمی ورق‌های تک‌لایه آلومینیومی با بالارفتن میزان خرج انفجاری و بالارفتن سطح انرژی انتقالی، به‌صورت تدریجی افزایش می‌یابد به‌طوری که مطابق با جدول ۲، جرم خرج انفجاری و بیشترین خیز دائمی با یکدیگر رابطه مستقیم و خطی به‌صورت تک‌مرحله‌ای دارند. علاوه بر این، مقایسه نتایج تجربی به‌دست‌آمده برای ورق‌های تک‌لایه با ضخامت ۲ میلی‌متر نشان می‌دهد که افزایش جرم خرج در انفجار اول، منجر به افزایش خیز ورق آلومینیومی به میزان ۲۱/۲ و ۷۴/۲٪ به‌ترتیب در جرم خرج‌های ۲ و ۳ گرم در مقایسه با جرم خرج ۱/۵ گرم می‌شود. همچنین این مقادیر برای جرم



شکل ۳) نمونه‌ای از ساختارهای چندلایه آلومینیومی تغییر شکل‌یافته



نمودار ۱) منحنی میزان ایمپالس برحسب مقدار جرم خرج برای ساختارهای تک‌لایه در فاصله استقرار ۳۰۰ میلی‌متر



نمودار ۲) منحنی میزان ایمپالس برحسب مقدار جرم خرج برای ساختارهای چندلایه در فاصله استقرار ۲۰۰ میلی‌متر

رابطه ایمپالس با تعداد دفعات بارگذاری

همان‌طور که در بخش تحلیل مدهای تغییر شکل نمونه‌های آزمایشی نشان داده شد، ورق‌های آلومینیومی هنگام قرارگرفتن در معرض بار انفجاری یکنواخت مکرر، دچار تغییر شکل غیرالاستیک بزرگ شدند و پروفیل تغییر شکل آنها به‌صورت گنبدی شکل بود. در نمودارهای ۳ و ۴ به‌ترتیب مقدار ایمپالس برحسب دفعات بارگذاری برای ساختارهای تک‌لایه و چندلایه نمایش داده شده است که بازه تغییرات جرم خرج از ۵ تا ۱۲/۵ گرم است. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات بسیار کمی در ایمپالس منتقل‌شده به نمونه آزمایشی برای هر تکرار انفجار در این سری از آزمایش‌ها

مقایسه با جرم خرج ۵ گرم می‌شود. همچنین این مقادیر برای افزایش جرم خرج در انفجار دوم برابر با ۳۷/۹ و ۷۴/۱ به ترتیب در جرم خرج‌های ۷/۵ و ۱۰ گرم؛ در انفجار سوم برابر با ۳۹/۵ و ۷۳/۱ به ترتیب در جرم خرج‌های ۷/۵ و ۱۰ گرم؛ در انفجار چهارم برابر با ۳۸/۰ درصد در جرم خرج‌های ۷/۵ گرم می‌شود و ساختار در جرم خرج‌های بالاتر از ۵ گرم برخلاف ساختارهای دولایه قابلیت تحمل انفجار پنجم را ندارد.

اثر بارگذاری مکرر روی بیشترین خیز دائمی برای ساختارهای تکلایه

مطابق با جدول ۲، مقایسه نتایج تجربی برای ورق تکلایه ۲ میلی‌متری هنگامی که جرم خرج انفجاری ۱/۵ گرم است، نشان می‌دهد که این ساختار چهار دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ۲۲/۷، ۳۹/۳، ۵۰/۰ و ۵۹/۱ به ترتیب در دفعات دوم، سوم، چهارم و پنجم می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ۷/۶، ۱۳/۶، ۲۲/۷ و ۶/۱ نسبت به دفعه قبلی شده و تقریباً یک روند نمایی کاهشی را طی می‌کند. دلیل روند نمایی کاهش خیز را می‌توان ناشی از کارسختی ماده ورق بعد از هر بار بارگذاری مکرر دانست. میزان کارسختی و تنش پسماند با هر بار بارگذاری انفجاری در ورق افزایش می‌یابد و انباشته می‌شود و سبب کاهش روند افزایشی تغییر جابه‌جایی نقطه میانی ورق می‌شود. همچنین، مقایسه نتایج تجربی برای این ساختار هنگامی که جرم خرج انفجاری ۲ گرم است، نشان می‌دهد که ورق آلومینیوم ۲ میلی‌متری سه دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ۲۱/۳، ۴۰/۰ و ۵۶/۳ به ترتیب در دفعات دوم، سوم و چهارم می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ۲۱/۳، ۱۵/۴ و ۱۱/۶ نسبت به دفعه قبلی شده و روند نمایی کاهشی را حفظ می‌کند.

علاوه بر این، مطابق با جدول ۲، مقایسه نتایج تجربی برای ورق تکلایه ۳ میلی‌متری هنگامی که جرم خرج انفجاری ۵ گرم است، نشان می‌دهد که ورق آلومینیوم ۳ میلی‌متری چهار دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ۱۵/۶، ۳۰/۰، ۳۸/۹ و ۴۶/۷ به ترتیب در دفعات دوم، سوم، چهارم و پنجم می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ۱۵/۶، ۱۲/۵، ۶/۸ و ۵/۶ نسبت به دفعه قبلی شده و روند نمایی کاهشی را حفظ می‌کند. همچنین، مقایسه نتایج تجربی برای این ساختار هنگامی که جرم خرج انفجاری ۷/۵ گرم است، نشان می‌دهد که ورق آلومینیوم ۳ میلی‌متری یک دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ۲۲/۰ درصد در دفعه دوم می‌شود.

خرج‌های ۲ گرم در مقایسه با جرم خرج ۱/۵ گرم در انفجار دوم، سوم و چهارم به ترتیب منجر به افزایش خیز ورق به میزان ۱۹/۸، ۲۱/۷ و ۲۶/۳ می‌شود و ورق قابلیت تحمل بارگذاری مکرر برای جرم خرج‌های بیشتر از ۳ گرم را ندارد.

در مقابل، مقایسه نتایج تجربی به دست آمده برای ورق‌های تکلایه با ضخامت ۳ میلی‌متر نشان می‌دهد که افزایش یک میلی‌متری ضخامت ورق منجر به تحمل بار انفجاری مکرر در محدوده بزرگ‌تری می‌شود و آستانه تحمل ورق تا جرم خرج ۷/۵ گرم بالا می‌رود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزایش جرم خرج در انفجار اول، منجر به افزایش خیز ورق آلومینیومی به میزان ۳۶/۷ درصد در جرم خرج ۷/۵ گرم می‌شود؛ هر چند ورق قابلیت تحمل بار انفجاری حاصل از انفجار جرم خرج ۱۰ گرمی را ندارد. همچنین این مقدار برای افزایش جرم خرج در انفجار دوم منجر به افزایش خیز ورق به میزان ۴۴/۲ درصد در جرم خرج ۷/۵ گرم در مقایسه با جرم خرج ۵ گرم می‌شود و ورق قابلیت تحمل بارگذاری مکرر برای جرم خرج‌های بیشتر از ۷/۵ گرم را ندارد.

تغییرات بیشترین خیز دائمی برحسب جرم خرج برای ساختارهای چندلایه

پس از بررسی تغییرات بیشترین خیز دائمی ورق‌های تکلایه آلومینیومی برحسب جرم خرج انفجاری برای ساختارهای تکلایه، به تحلیل این موضوع برای ساختارهای چندلایه پرداخته می‌شود. به همین منظور در دومین گام، تغییرات بیشترین خیز دائمی ورق‌های دولایه و سه‌لایه آلومینیومی برحسب جرم خرج انفجاری با توجه به جدول ۲ تحلیل می‌شود. در حالت کلی، مشابه با ورق‌های تکلایه، بیشترین خیز دائمی ورق‌های چندلایه آلومینیومی نیز با بالارفتن میزان جرم انفجاری و به تبع آن بالارفتن سطح انرژی انتقالی، به صورت تدریجی افزایش می‌یابد. به طوری که مطابق با این جدول، جرم خرج انفجاری و بیشترین خیز دائمی با یکدیگر رابطه مستقیم و خطی به صورت تک‌مرحله‌ای دارند. علاوه بر این، مقایسه نتایج تجربی به دست آمده برای ورق‌های دولایه با ضخامت ۳+۳ میلی‌متر نشان می‌دهد که افزایش جرم خرج در انفجار اول، منجر به افزایش خیز ورق آلومینیومی به میزان ۳۴/۱، ۶۸/۳ و ۱۰۷/۳ به ترتیب در جرم خرج‌های ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵ گرم در مقایسه با جرم خرج ۵ گرم می‌شود. همچنین این مقادیر برای افزایش جرم خرج در انفجار دوم به ترتیب برابر با ۴۱/۸، ۸۴/۷ و ۱۲۷/۶ به ترتیب در جرم خرج‌های ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵ گرم؛ در انفجار سوم برابر با ۴۴/۵ و ۸۰/۹ به ترتیب در جرم خرج‌های ۷/۵ و ۱۰ گرم؛ در انفجار چهارم برابر با ۵۱/۳ و ۹۰/۳ به ترتیب در جرم خرج‌های ۷/۵ و ۱۰ گرم؛ در انفجار پنجم برابر با ۵۴/۲ درصد در جرم خرج‌های ۷/۵ گرم می‌شود.

در مقابل، مقایسه نتایج تجربی به دست آمده برای ورق‌های سه‌لایه با ضخامت ۲+۲+۲ میلی‌متر نشان می‌دهد که افزایش جرم خرج در انفجار اول، منجر به افزایش خیز ورق آلومینیومی به میزان ۳۰/۰، ۶۰/۰ و ۱۰۰/۰ به ترتیب در جرم خرج‌های ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵ گرم در

اثر بارگذاری مکرر روی بیشترین خیز دائمی برای ساختارهای چندلایه

مطابق با جدول ۲، نتایج تجربی بیانگر آن است که ساختار دولایه آلومینیومی با ضخامت $(3+3)$ میلی‌متر قابلیت تحمل بارگذاری مکرر برای دفعه چهارم و دوم را به ترتیب در جرم خرج‌های ۱۰ و ۱۲/۵ گرم ندارد. این در حالی است که مقایسه نتایج تجربی برای این ساختار هنگامی که جرم خرج انفجاری ۵ گرم است، نشان می‌دهد که ورق‌های دولایه با ضخامت $3+3$ میلی‌متر چهار دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان $19/5$ ، $34/1$ ، $37/8$ و $43/9$ ٪ به ترتیب در دفعات دوم، سوم، چهارم و پنجم می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان $19/5$ ، $12/2$ و $2/7$ ٪ نسبت به دفعه قبلی شده و روند نمایی کاهشی را حفظ می‌کند. همچنین برای این ساختار هنگامی که جرم خرج انفجاری $7/5$ گرم است، نشان می‌دهد که ورق‌های دولایه با ضخامت $3+3$ میلی‌متر همچنان چهار دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان $26/3$ ، $44/5$ ، $55/5$ و $65/4$ ٪ به ترتیب در دفعات دوم، سوم، چهارم و پنجم می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان $26/3$ ، $44/4$ ، $7/5$ و $6/4$ ٪ نسبت به دفعه قبلی شده و روند نمایی کاهشی را حفظ می‌کند. همچنین برای این ساختار هنگامی که جرم خرج انفجاری 10 گرم است، نشان می‌دهد که ورق‌های دولایه با ضخامت $3+3$ میلی‌متر تنها سه دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان $31/2$ ، $44/2$ و $55/8$ ٪ به ترتیب در دفعات دوم، سوم و چهارم می‌شود. همچنین افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان $31/2$ و $8/0$ ٪ نسبت به دفعه قبلی شده و روند نمایی کاهشی را حفظ می‌کند. در نهایت برای ساختار دولایه هنگامی که جرم خرج انفجاری $12/5$ گرم است، این ساختار تنها یک دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان $31/2$ ٪ در دفعه دوم می‌شود.

در مقابل، مطابق با جدول ۲، این نتیجه حاصل می‌شود که ساختار سه‌لایه آلومینیومی با ضخامت $(2+2+2)$ میلی‌متر قابلیت تحمل بارگذاری مکرر برای دفعه سوم و دوم را به ترتیب در جرم خرج‌های ۱۰ و $12/5$ گرم ندارد که نشان می‌دهد در مقایسه با ساختارهای دولایه یک دفعه بارگذاری انفجاری کمتری تحمل می‌کند و افزایش تعداد لایه‌ها از این دیدگاه موثر نیست. این در حالی است که مقایسه نتایج تجربی برای ساختار سه‌لایه هنگامی که جرم خرج انفجاری ۵ گرم است، نشان می‌دهد که ساختار سه‌لایه با ضخامت $2+2+2$ میلی‌متر چهار دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان

$20/0$ ، $32/2$ ، $43/3$ و $51/1$ ٪ به ترتیب در دفعات دوم، سوم، چهارم و پنجم می‌شود. همچنین افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان $20/0$ ، $10/2$ و $8/4$ و $5/4$ ٪ نسبت به دفعه قبلی شده و روند نمایی کاهشی را حفظ می‌کند. همچنین برای این ساختار هنگامی که جرم خرج انفجاری $7/5$ گرم است، نشان می‌دهد که ورق‌های سه‌لایه با ضخامت $2+2+2$ میلی‌متر برخلاف ساختارهای دولایه تنها سه دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان $27/4$ ، $41/9$ و $52/1$ ٪ به ترتیب در دفعات دوم، سوم و چهارم می‌شود. همچنین افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان $27/4$ ، $11/4$ و $7/2$ ٪ نسبت به دفعه قبلی شده و روند نمایی کاهشی را حفظ می‌کند. برای این ساختار هنگامی که جرم خرج انفجاری 10 گرم است، ورق‌های سه‌لایه با ضخامت $2+2+2$ میلی‌متر برخلاف ساختارهای دولایه تنها دو دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان $30/6$ و $43/1$ ٪ به ترتیب در دفعات دوم و سوم می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان $30/6$ و $9/6$ ٪ نسبت به دفعه قبلی شده و روند نمایی کاهشی را حفظ می‌کند. در نهایت برای ساختار سه‌لایه هنگامی که جرم خرج انفجاری $12/5$ گرم است، این ساختار بارگذاری مکرر را تحمل نمی‌کند و مقاومت انفجاری ضعیف‌تری در مقایسه با ساختار دولایه در برابر بار انفجاری مکرر دارد.

اثر فاصله استقرار خرج روی بیشترین خیز دائمی

پس از تحلیل کمی نتایج تجربی به دست آمده برای ساختارهای تک‌لایه و چندلایه آلومینیومی تحت بار دفعی مکرر و بررسی اثر بار مکرر روی بیشترین خیز ساختار، به تجزیه و تحلیل اثر فاصله استقرار خرج از سطح نمونه روی خیز دائمی با انجام آزمایش روی ساختارهای تک‌لایه و چندلایه آلومینیومی پرداخته می‌شود. بدین منظور، ۱۳ آزمایش جدید روی ورق تک‌لایه 3 میلی‌متری تحت بار دفعی حاصل از انفجار خرج 5 گرمی در فاصله استقرار خرج 200 میلی‌متری، ساختار دولایه $(3+3)$ میلی‌متری و ساختار سه‌لایه $(2+2+2)$ میلی‌متری تحت بار دفعی حاصل از انفجار خرج 10 گرمی در فاصله استقرار خرج 300 میلی‌متری از سطح ورق انجام شد.

نتایج به دست آمده در جدول ۲ برای ساختارهای تک‌لایه در فاصله استقرارهای 200 و 300 میلی‌متر نشان می‌دهد که افزایش 100 میلی‌متری فاصله خرج از سطح ورق، منجر به کاهش خیز دائمی ورق آلومینیومی 3 میلی‌متری به میزان $50/5$ و $52/3$ ٪ به ترتیب در انفجارهای اول و دوم می‌شود. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که افزایش 50 درصدی فاصله استقرار موجب می‌شود تا نمونه آزمایشی بتواند بار انفجاری مکرر را تا دفعات بیشتری تحمل کند. همچنین نتایج به دست آمده برای ساختارهای دولایه که افزایش 100 میلی‌متری فاصله خرج، منجر به کاهش خیز دائمی

حاصل این شناسایی یک تابع تقریبی ریاضی است. این تابع چندجمله‌ای، رابطه‌ای میان ورودی‌ها و خروجی و مدلی برای سیستم است [48]. به‌طور کلی مسایل شناسایی سیستم بدین گونه مطرح می‌شود که فرض می‌شود که رابطه خروجی (y) یک سیستم ناشناخته با m ورودی آن به‌صورت رابطه ۱ است.

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

با داشتن N نمونه از این داده‌های ورودی و خروجی، سیستمی همانند ماتریس زیر در رابطه ۲ به‌دست می‌آید [48].

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

عمل شناسایی سیستم را می‌توان انجام داد که حاصل آن تقریب تابع $\hat{f}$ است. که به‌موجب آن می‌توان به‌ازای بردار ورودی $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m)$ مقدار خروجی $\hat{y}$ را به‌صورت رابطه ۳ تقریب زد [48].

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

آنچه به‌طور معمول به‌عنوان هدف مشترک روش‌های شناسایی سیستم مطرح است، کمینه‌کردن مجموع مربعات خطا به‌ازای 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 $\hat{f}$ می‌تواند به‌صورت تابع خطی و یا غیرخطی از متغیرهای ورودی سیستم باشد [48].

به‌کاربردن شبکه‌های عصبی GMDH

شبکه GMDH، شبکه‌ای خود سازمانده و یک‌سویه است که از چندین لایه و هر لایه نیز از چندین عصب تشکیل شده است. تمامی عصب‌ها از یک ساختار مشابهی برخوردار هستند، همگی آنها دارای دو ورودی و یک خروجی هستند و هر نرون با پنج وزن و یک بایاس عمل پردازش را میان داده‌های ورودی و خروجی برقرار می‌کند که در رابطه ۵ نشان داده شده است [49].

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

در رابطه بالا، $i = 1, 2, 3, \dots, N$ است که در آن N تعداد نمونه‌های ورودی و خروجی بوده و $K = \{1, 2, 3, \dots, C_m^2\}$ و $\alpha, \beta \in \{1, 2, 3, \dots, m\}$ است، که در آنها m تعداد نرون‌های لایه قبلی است.

وزن‌ها براساس روش کمترین مربعات خطا محاسبه شده و سپس به‌عنوان مقادیر مشخص و ثابت در داخل هر عصب جایگذاری می‌شود. در این نوع از شبکه‌ها عصب‌های مرحله قبلی و یا لایه قبلی (m) عامل و یا مولد تولید عصب‌های جدید (به تعداد $C_m^2 = \frac{m(m-1)}{2}$) هستند. از میان عصب‌های تولیدشده، لزوماً بایستی تعدادی از آنها حذف شوند تا بدین‌وسیله از واگرایی شبکه جلوگیری به‌عمل آید. اصطلاحاً به این‌گونه عصب‌های حذف‌شده، عصب مرده گفته می‌شود. عصب‌هایی که برای ادامه و گسترش شبکه باقی می‌مانند، ممکن است برای ایجاد فرم همگرایی شبکه

ساختار دولایه به میزان $61/8$ ، $67/5$ ، $74/7$ ، $72/7$ و $68/5$ به‌ترتیب در انفجارهای اول، دوم، سوم، چهارم و پنجم می‌شود. این مقادیر برای ساختارهای سه‌لایه به‌ترتیب برابر با $53/9$ ، $65/6$ ، $67/7$ ، $66/4$ و $14/7$ است.

اثر افزایش تعداد لایه روی بیشترین خیز دائمی

پس از بررسی اثر فاصله استقرار خرج روی بیشترین خیز ساختارهای تکلایه و چندلایه آلومینیومی تحت بار دفعی منفرد و مکرر، به تجزیه و تحلیل افزایش تعداد لایه در ساختارهای چندلایه روی خیز دائمی پرداخته می‌شود. بدین منظور با توجه به جدول ۲، تغییرات بیشترین خیز دائمی ساختارهای چندلایه برحسب تعداد انفجار به‌ترتیب در جرم خرج‌های 5 ، $7/5$ ، 10 و $12/5$ گرم مقایسه می‌شود.

برای جرم خرج 5 گرم، افزایش تعداد لایه منجر به کاهش مقاومت انفجاری سازه و افزایش خیز ساختار به میزان $9/8$ ، $10/2$ ، $11/2$ ، $14/2$ و $15/3$ به‌ترتیب برای انفجارهای اول، دوم، سوم، چهارم و پنجم می‌شود و این نتایج همچنین نشان می‌دهد که ممکن است ساختارهای سه‌لایه هم‌جنس در انفجار اول عملکرد انفجاری مناسبی در مقایسه با ساختارهای دولایه داشته باشد اما با بالا رفتن تعداد انفجار، مقاومت انفجاری آنها کاهش می‌یابد و این پدیده به این علت است که با افزایش تعداد لایه در ساختارهای هم‌جنس، ضخامت هر لایه کاهش می‌یابد و این موضوع باعث کاهش مقاومت خمشی سازه می‌شود. همچنین، برای جرم خرج $7/5$ و 10 گرم، افزایش تعداد لایه همچنان منجر به کاهش مقاومت انفجاری سازه و افزایش خیز ساختار می‌شود؛ اما رفتاری کاملاً متفاوت با هنگامی که ورق تحت انفجار خرج 5 گرمی قرار دارد از خود نشان می‌دهد. برای بررسی این پدیده، مشابه با قسمت‌های قبلی، نتایج به‌طور دقیق‌تری تحلیل می‌شود. برای جرم خرج $7/5$ گرم، افزایش تعداد لایه منجر به کاهش مقاومت انفجاری سازه و افزایش خیز ساختار به میزان $6/5$ ، $6/4$ ، $4/4$ و $4/1$ به‌ترتیب برای انفجارهای اول، دوم، سوم و چهارم می‌شود. همچنین برای جرم خرج 10 گرم، افزایش تعداد لایه منجر به کاهش مقاومت انفجاری سازه و افزایش خیز ساختار به میزان $4/3$ ، $3/9$ و $3/5$ به‌ترتیب برای انفجارهای اول، دوم و سوم می‌شود. این بدان معنا است که با افزایش جرم خرج به‌تبع آن افزایش ایمپالس انفجار، ساختارهای چندلایه با تعداد لایه بیشتر مقاومت انفجاری بهتری از خود نشان می‌دهند و دیگر یک رابطه صعودی بین اختلاف بیشترین خیز دائمی ساختارهای چندلایه و تعداد انفجار برقرار نیست.

مدل‌سازی براساس شبکه عصبی

اصول و قواعد

در مدل‌سازی عددی، اجزای 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.

غیرعادی A ، از روش تجزیه مقادیر تکین (SVD) استفاده می‌شود [34, 54].

ارایه ورودی و خروجی‌های شبکه بر مبنای اعداد بی‌بعد

با توجه به هندسه پیچیده ورق‌های دایره‌ای، اعداد بی‌بعد ابتدا برای یک ورق مربعی استخراج و سپس این اعداد برای ورق‌های دایره‌ای تحت بارگذاری دینامیکی مکرر تعمیم داده می‌شود. تحلیل نیرویی برای یک المان از ورق، معادلات حاکم بر ورق تحت بار دینامیکی به صورت روابط ۱۵ تا ۱۷ ارایه می‌شود که با جایگذاری رابطه ۱۵ و ۱۶ در ۱۷، معادله به فرم رابطه ۱۸ تبدیل می‌شود [41, 43, 55].

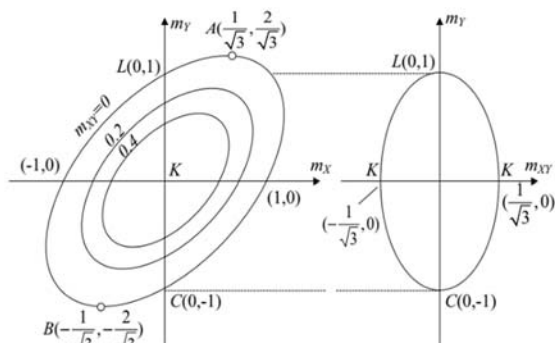
$$\frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} = Q_x \quad (15)$$

$$\frac{\partial M_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial M_y}{\partial y} = Q_y \quad (16)$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} + P = \rho H \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (17)$$

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} = \rho H \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - P \quad (18)$$

در معادلات بالا، M_x ، M_y و M_{xy} گشتاورهای خمشی، P نیروی دینامیکی، H ضخامت ورق و w میزان جابه‌جایی ورق است. هنگامی که نیروهای برشی Q_x و Q_y به عنوان نیروهای عامل در نظر گرفته می‌شوند، جریان پلاستیک دینامیکی ماده توسط گشتاورهای خمشی M_x ، M_y و M_{xy} کنترل می‌شود. بر این اساس شماتیک معیار عملکرد فون-مایسز در فضای نیروی سه‌بعدی عمومی برای جریان پلاستیک در شکل ۴ نشان داده شده است که در آن $m_x = \frac{M_x}{M_0}$ ، $m_y = \frac{M_y}{M_0}$ و $m_{xy} = \frac{M_{xy}}{M_0}$ هستند. همچنین، M_0 ، گشتار خمشی کاملاً پلاستیک است که به راحتی از رابطه $\sigma_0 H^2 / 4$ قابل محاسبه است [41, 43, 55]. در یک ورق مربعی کاملاً گیردار در لبه‌های مرزی، لولا پلاستیکی در دو قطر و چهار مرز گیردار روی محیط ورق شکل می‌گیرد و مقدار نیروی تعمیم‌یافته باید در نقاط L و C در شکل ۴، یک باشد. در لولاهای پلاستیک نیز باید سرعت خیز دائمی ورق صفر و در مرزهای گیردار باید خیز و سرعت اولیه مقداری برابر با صفر داشته باشد.



شکل ۴) شماتیک معیار فون-مایسز

با توجه به اینکه موضوع مورد نظر بررسی تغییر شکل بزرگ ورق بوده، لذا افزودن نیروهای غشایی (N_x ، N_y و N_{xy}) در معادله ۱۸

و عدم ارتباط آنها با عصب لایه آخر حذف شوند، که اصطلاحاً به آنها عصب غیرفعال می‌گویند. میزان مجموع مربعات خطا (r_j^2) میان مقادیر خروجی واقعی (y_i) و خروجی عصب زام (y_{ij}^*) ملاک و معیاری برای حذف مجموعه‌ای از عصب‌ها در یک لایه است که در رابطه ۶ نشان داده شده است [50].

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

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

نگاشتی که بین متغیرهای ورودی و خروجی توسط این نوع از شبکه‌های عصبی برقرار می‌شود به صورت تابع غیرخطی ولترا، به فرم رابطه ۷ است [51].

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

ساختاری را که برای عصب‌ها در نظر گرفته می‌شود، به صورت چندجمله‌ای دومتغیره درجه دوم، همانند رابطه ۸ است [52].

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

هدف در الگوریتم GMDH 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 نمونه‌های دو متغیر وابسته به سیستم $\{(x_{ip}, x_{iq}), i=1, 2, \dots, N\}$ خروجی مطلوب $\{(y_i), i=1, 2, \dots, N\}$ برقرار شود. به همین خاطر تابع f را براساس قاعده کمترین مربعات خطا، طبق رابطه ۹ ارایه شده است [53].

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

با این شرایطی که بر مساله حاکم است، بایستی دستگاه معادله‌ای را که دارای شش مجهول و N معادله است که در رابطه ۱۰ آمده است.

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

دستگاه معادله رابطه ۱۰ را می‌توان 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 می‌آیند [53].

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

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

و بردار Y مقادیر خروجی نیز از رابطه ۱۴ به دست آمده است [53].

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

برای حل معادله لازم است که شبه معکوس ماتریس غیرمربعی A محاسبه شود. به همین خاطر برای محاسبه شبه معکوس ماتریس

برحسب عدد بی‌بعد $\psi_{c,s}$ برابر است با:

$$\frac{W_0}{H} = C_0 \psi_{c,s} \quad (۲۶)$$

که در آن

$$\psi_{c,s} = \left(\frac{R}{H}\right)^{C_1} \cdot \left(\frac{\rho V_0^2}{\sigma_0}\right)^{C_2} \cdot \left(\frac{1}{\xi}\right)^{C_3} \quad (۲۷)$$

لازم به توضیح است که اعداد بی‌بعد $\psi_{c,s}$ برای تحلیل ورق‌های تکلایه دایره‌ای تحت بارگذاری دینامیکی یکنواخت پیشنهاد شده که از معادله بی‌بعد حاکم بر ورق استخراج شده‌اند. شایان توجه است که در تحلیل ابعادی ساختارهای دایره‌ای چندلایه تحت بارگذاری دینامیکی مکرر نسبت به تحلیل ابعادی ورق‌های تکلایه، کمیت‌های فیزیکی بیشتری وارد می‌شود. این کمیت‌ها شامل خواص مکانیکی و حساسیت ماده به نرخ کرنش برای هر لایه عقبی و جلویی یا حتی میانی و همچنین تعداد دفعات تکرار بارگذاری (n) که باید در تحلیل رفتار پلاستیک ساختارهای چندلایه تحت بارگذاری دینامیکی مکرر در نظر گرفته شود. با توجه به نکات ذکر شده و مطابق با تحلیل ابعادی مساله، رابطه بیشترین خیز دائمی هر کدام از لایه‌های جلویی، میانی و عقبی به ضخامت آن لایه برای ساختارهای دایره‌ای تکلایه و چندلایه تحت بار دفعی دینامیکی یکنواخت مکرر به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{W_0}{H} = C_0'' \psi_{c,s}^r \quad (۲۸)$$

$$\frac{W_0}{H} = C_0' \psi_{c,m}^r \quad (۲۹)$$

که در آنها

$$\psi_{c,s}^r = \left(\frac{R}{H}\right)^{C_1} \cdot \left(n \frac{\rho V_0^2}{\sigma_0}\right)^{C_2} \cdot \left(\frac{1}{\xi}\right)^{C_3} \quad (۳۰)$$

$$\psi_{c,s} = \left(\frac{R}{H_f}\right)^{C_1} \cdot \left(\frac{R}{H_m}\right)^{C_2} \cdot \left(\frac{R}{H_b}\right)^{C_3} \cdot \left(\frac{n \rho_f V_{0,f}^2}{M \sigma_{0,f}}\right)^{C_4} \cdot \left(\frac{n \rho_m V_{0,m}^2}{M \sigma_{0,m}}\right)^{C_5} \cdot \left(\frac{n \rho_b V_{0,b}^2}{M \sigma_{0,b}}\right)^{C_6} \cdot \left(\frac{1}{\xi_f}\right)^{C_7} \cdot \left(\frac{1}{\xi_m}\right)^{C_8} \cdot \left(\frac{1}{\xi_b}\right)^{C_9} \quad (۳۱)$$

شایان توجه است که رابطه ۳۱ برای یک ساختار سه‌لایه غیرهم‌جنس تحت بارگذاری دینامیکی یکنواخت ارایه شده که دارای سه‌لایه با سه ماده مختلف است که باید اثر خواص مکانیکی، ضخامت و همچنین حساسیت ماده به نرخ کرنش به معادلات اضافه شود. این موضوع بدان معنا است که برای یک ساختار سه‌لایه هم‌جنس که در آن ضخامت لایه‌ها برابر باشند ضرورتی بر اضافه کردن اعداد بی‌بعد مربوط لایه‌های میانی و جلویی نیست و رابطه ۳۱ به صورت رابطه ۳۲ ساده می‌شود.

$$\mu_{c,m}^r = \left(\frac{R}{H_b}\right)^{C_1} \cdot \left(\frac{n \rho_b V_{0,b}^2}{M \sigma_{0,b}}\right)^{C_2} \cdot \left(\frac{1}{\xi_b}\right)^{C_3} \quad (۳۲)$$

لازم به توضیح است که عدد بی‌بعد $\mu_{c,m}^r$ برای تحلیل ورق‌های چندلایه هم‌جنس دایره‌ای تحت بارگذاری دینامیکی یکنواخت مکرر با ضخامت یکسان پیشنهاد شده که M تعداد لایه‌ها است. اکنون، هدف به‌دست‌آوردن ضرایب مجهول در معادلات ۳۰ و ۳۲ برای ورق‌های تکلایه و چندلایه دایره‌ای تحت بارگذاری دینامیکی با توزیع یکنواخت مکرر است که این مقادیر به راحتی از روش تجزیه مقادیر منفرد بهینه‌شده قابل محاسبه هستند. این روش پیش‌تر در قسمت بعدی به تفصیل بیان شده است.

الزامی است و این معادله به صورت معادله ۱۹ تغییر می‌کند، [41, 43, 55]

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} + N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - 2 N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = \rho H \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - P \quad (۱۹)$$

با معرفی نمودن پارامترهای بی‌بعد نظیر $W = \frac{w}{L}$, $Y = \frac{y}{L}$, $X = \frac{x}{L}$ ، معادله حاکم بر ورق به فرم بی‌بعد معادله ۲۰ تبدیل می‌شود. در پارامترهای بی‌بعد ذکر شده، L نصف طول ورق مربعی، N_0 نیروی غشایی کاملاً پلاستیک که برابر است با $\sigma_0 H$ ، 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.

$$\frac{\partial^2 m_x}{\partial X^2} + 2 \frac{\partial^2 m_{xy}}{\partial X \partial Y} + \frac{\partial^2 m_y}{\partial Y^2} + 4 \left(n_x \frac{\partial^2 W}{\partial X^2} - 2 n_{xy} \frac{\partial^2 W}{\partial X \partial Y} + n_y \frac{\partial^2 W}{\partial Y^2} \right) = 4 \left(\frac{L}{H} \right)^2 \left(\frac{\rho C_s}{\sigma_0} \cdot \frac{\partial^2 W}{\partial T^2} - \frac{P}{\sigma_0} \right) \quad (۲۰)$$

در ادامه، جهت افزودن اثر حساسیت ماده به نرخ کرنش، رابطه ۵ به صورت معادله ۶ تغییر می‌کند.

$$\frac{\partial^2 m_x}{\partial X^2} + 2 \frac{\partial^2 m_{xy}}{\partial X \partial Y} + \frac{\partial^2 m_y}{\partial Y^2} + 4 \left(n_x \frac{\partial^2 W}{\partial X^2} - 2 n_{xy} \frac{\partial^2 W}{\partial X \partial Y} + n_y \frac{\partial^2 W}{\partial Y^2} \right) = 4 \left(\frac{L}{H} \right)^2 \left(\frac{\rho C_s}{\sigma_d} \cdot \frac{\partial^2 W}{\partial T^2} - \frac{P}{\sigma_d} \right) \quad (۲۱)$$

همان طور که از معادله ۲۱ برمی‌آید، سه عبارت هندسه ساختار L/H ، توانایی مقاومت دینامیکی ماده در برابر تغییر شکل پلاستیک و $\frac{1}{\sigma_d}$ نسبت بار دینامیکی به مقاومت ماده $\frac{P}{\sigma_d}$ که فشار دینامیکی متناسب است با ρV_0^2 ، در آن وجود دارد [56]. این موضوع نشان‌دهنده آن است که پاسخ یک ورق با هر هندسه‌ای تحت بار دینامیکی باید بر مبنای سه عدد فوق‌الذکر بیان شود. لذا در ادامه می‌توان مقدار کمی تنش تسلیم دینامیکی را برحسب نرخ کرنش متوسط، ضرایب ماده و هندسه ورق در معادله وارد کرد. اکنون با به کارگیری معادله ساختاری کوپر-سیموندز [39, 56, 57] و همچنین استفاده از مقدار نرخ کرنش متوسط برای یک ورق دایره‌ای [56]، عدد بی‌بعد اثر نرخ کرنش ξ به صورت معادله ۲۴ تعریف می‌شود [27, 39, 44].

$$\sigma_d = \sigma_0 \left(1 + \frac{\xi_m}{D} \right)^{\frac{1}{q}} = \sigma_0 \left(1 + \xi \left(\frac{W_0}{H} \right)^{\frac{1}{q}} \right) \quad (۲۲)$$

$$\xi_m = \frac{W_0 V_0}{3\sqrt{2} R^2} = \frac{I W_0}{3\sqrt{2} \rho \pi H R^4} \quad (۲۳)$$

$$\xi = \left(\frac{I}{3\sqrt{2} \rho \pi R^4 D} \right)^{\frac{1}{q}} \quad (۲۴)$$

با جایگذاری معادلات ۲۲ و ۲۴ در معادله ۲۱ و همچنین تغییر طول ورق مربعی به شعاع ورق دایره‌ای، تحلیل ابعادی برای معادله بی‌بعد حاکم بر ورق دایره‌ای تحت بار دینامیکی یکنواخت منجر می‌شود به:

$$\frac{W_0}{H} = f \left(\frac{R}{H}, \frac{P}{\sigma_0}, \frac{1}{\xi} \right) = f \left(\frac{R}{H}, \frac{\rho V_0^2}{\sigma_0}, \frac{1}{\xi} \right) \quad (۲۵)$$

در نهایت، رابطه بیشترین خیز دائمی ورق به ضخامت آن برای ورق‌های تکلایه دایره‌ای تحت بارگذاری دینامیکی یکنواخت

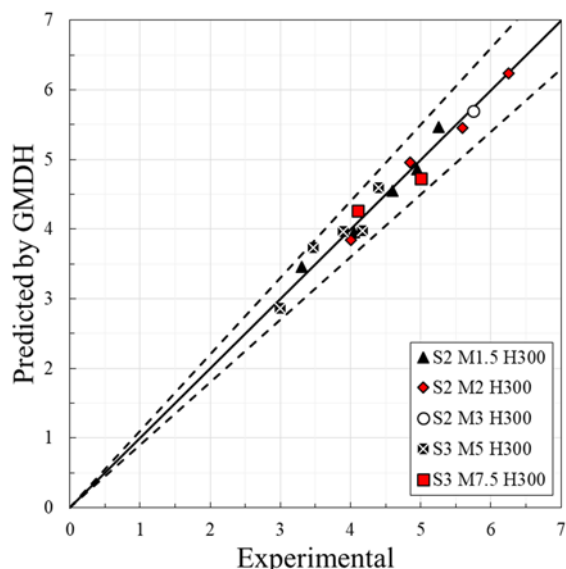
نتایج مدل سازی

در مدل سازی فرآیند شکل دهی ساختارهای تک لایه و چند لایه آلومینیومی تحت چندین بارگذاری دفعی یکنواخت به ترتیب از ۱۹ و ۳۹ دسته داده ورودی- خروجی برای ساختارهای تک لایه (فاصله استقرار ۳۰۰ میلی متر) و چند لایه (فاصله استقرار ۲۰۰ میلی متر) به عنوان ورودی شبکه عصبی از نوع GMDH استفاده شده است. به منظور افزایش قابلیت پیش بینی شبکه عصبی پیشنهادی برای این فرآیند، داده ها به دو دسته تقسیم شده اند که شامل دسته داده های آموزشی و پیش بینی هستند؛ بنابراین، ۷۵٪ از داده ها برای آموزش شبکه و ۲۵٪ از داده ها برای پیش بینی خروجی شبکه استفاده شده است. با توجه به توضیحات ارائه شده، نسبت بیشترین خیز دائمی لایه عقبی ساختارهای تک لایه و چند لایه آلومینیومی به ضخامت کلی ساختار با استفاده از معادلات ارائه شده در قسمت پیوست ارائه شده، به دست می آید. لازم به توضیح است که این معادلات به صورت شبکه به یکدیگر متصل هستند. مقایسه بین خروجی های حاصل از مدل ریاضی به دست آمده از شبکه عصبی از نوع GMDH و خروجی های تجربی در ۱۹ و ۳۹ داده ورودی- خروجی فرآیند شکل دهی ساختارهای تک لایه و چند لایه آلومینیومی تحت چندین بارگذاری دفعی یکنواخت در نمودارهای ۵ و ۶ نشان داده شده است.

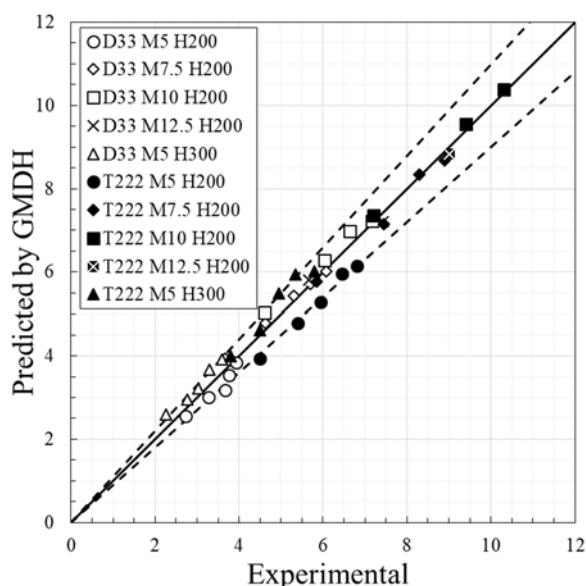
در روش شبکه عصبی از نوع GMDH، انطباق بسیار خوبی بین خروجی های مدل شده و خروجی های به دست آمده و انحراف داده های آزمایشگاهی و مقادیر پیش بینی شده توسط شبکه عصبی GMDH بسیار اندک است. این انحراف در بعضی از بخش ها به صفر می رسد.

مطابق نمودار ۵ توافق خوبی بین مدل ارائه شده با مقادیر تجربی برای ساختارهای تک لایه تحت چندین بار بارگذاری دفعی مشاهده می شود به طوری که تمامی نقاط در محدوده خطای کمتر از ۱۰٪ قرار دارند.

همچنین، مطابق نمودار ۶ توافق خوبی بین مدل ارائه شده با مقادیر تجربی برای ساختارهای چند لایه تحت چندین بار بارگذاری دفعی مشاهده می شود، به طوری که ۷۷٪ از نقاط در محدوده خطای کمتر از ۱۰٪ قرار دارند. نتایج روش مدل سازی انجام شده برای پاسخ دینامیکی ساختارهای تک لایه و چند لایه آلومینیومی تحت چندین بارگذاری دفعی یکنواخت، 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 به نتایج خوبی منجر شده است، 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 می توان از آن به عنوان یک مدل کاملاً مناسب برای پیش بینی رفتار پلاستیک ساختارهای تک لایه و چند لایه آلومینیومی استفاده کرد.



نمودار ۵) مقایسه نتایج تجربی و مدل ریاضی ارائه شده توسط روش شبکه عصبی GMDH برای ساختارهای تک لایه



نمودار ۶) مقایسه نتایج تجربی و مدل ریاضی ارائه شده توسط روش شبکه عصبی GMDH برای ساختارهای چند لایه

نتیجه گیری

به بررسی تجربی و مدل سازی پاسخ دینامیکی و تغییر شکل پلاستیک ورق های دایره ای تک و چند لایه آلومینیومی در برابر بارگذاری انفجاری مکرر پرداخته شده است. نتایج نشان می دهد که خیز دائمی ورق در نقطه میانی با افزایش تعداد بارگذاری انفجاری، افزایش می یابد به طوری که بیشترین مقدار در اولین بارگذاری و انفجار رخ می دهد و به تدریج از روند افزایشی آن کاهش می یابد و یک روند نمایی نزولی را طی می کند. دلیل این پدیده را می توان ناشی از کارسختی حاصل از هر دفعه بارگذاری مکرر دانست. میزان کارسختی و تنش پسماند با هر دفعه بارگذاری

پلاستیک ورق‌های دایره‌ای تک و چندلایه آلومینیومی در برابر بارگذاری انفجاری مکرر استفاده شد. به‌منظور افزایش قابلیت پیش‌بینی شبکه عصبی پیشنهادی برای این فرآیند، داده‌ها به دو دسته تقسیم شده‌اند به‌طوری که ۷۵٪ از داده‌ها جزء دسته داده برای آموزش شبکه و ۲۵٪ بقیه جزء دسته داده دیگر برای پیش‌بینی خروجی شبکه استفاده شد. نتایج حاصل‌شده بیانگر توافق خوب بین مدل ارایه‌شده با مقادیر تجربی است، به‌طوری که به‌ترتیب برای ساختارهای تکلایه و چندلایه تمامی و ۷۷٪ از نقاط در محدوده خطای کمتر از ۱۰٪ قرار دارند؛ بنابراین، با توجه به کم‌بودن خطای پیش‌بینی مدل ارایه‌شده 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.

تشکر و قدردانی: موردی بیان نشده است.

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

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

سهم نویسندگان: مجتبی ضیاء شماری (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ هاشم بابایی (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی (۲۰٪)؛ توحید میرزابابایی (نویسنده سوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی (۲۰٪)؛ حسین خداحمی (نویسنده چهارم)، پژوهشگر اصلی (۱۰٪).

منابع مالی: کلیه هزینه‌ها توسط نویسندگان تأمین شده است.

پیوست

معادلات برای ساختارهای چندلایه

$$G_1 = -1.224 - 12.29\pi_1 + 98.17\pi_3 + 0.2895\pi_1^2 - 19.64\pi_2^2 + 0.2227\pi_1\pi_3 \quad \text{الف-۱}$$

$$\pi_0 = 0.4180 + 0.5394\pi_2 + 0.5922G_1 - 0.1533\pi_2^2 - 0.0189G_1^2 + 0.1627\pi_2G_1 \quad \text{الف-۲}$$

معادلات برای ساختارهای تکلایه

$$G_1 = 0.013 + 0.131\pi_1 + 0.3778\pi_2 - 0.0004\pi_1^2 - 0.0765\pi_2^2 + 0.0284\pi_1\pi_2 \quad \text{الف-۳}$$

$$G_2 = 0.0133 - 0.2786\pi_3 + 0.5666G_1 - 0.1018\pi_3^2 - 0.0213G_1^2 + 0.3644\pi_3G_1 \quad \text{الف-۴}$$

$$G_3 = -0.5202 + 0.4682\pi_2 + 0.4516G_2 + 0.04292\pi_2^2 + 0.133G_2^2 - 0.197\pi_2G_2 \quad \text{الف-۵}$$

$$G_4 = 4.209 - 11.354G_1 + 10.64G_3 + 6.677G_1^2 + 4.74G_3^2 - 11.25G_1G_3 \quad \text{الف-۶}$$

$$G_5 = 32.23 - 26.23\pi_3 - 1.533G_4 + 0.5536\pi_3^2 + 11.95G_4^2 + 0.7545\pi_3G_4 \quad \text{الف-۷}$$

$$\pi_0 = -0.1055 + 2.369G_4 - 1.371G_5 + 1.72G_4^2 + 2.175G_5^2 - 3.893G_5G_4 \quad \text{الف-۸}$$

منابع

1- Babaei H, Mirzababaei Mostofi T, Sadraei SH. Effect of gas detonation on response of circular plate-

انفجاری در ورق افزایش یافته و انباشته می‌شود و سبب کاهش روند افزایشی تغییر جابه‌جایی نقطه میانی ورق می‌شود. سایر نتایج تجربی به‌صورت زیر خلاصه می‌شود:

۱- در حالت کلی، بیشترین خیز دائمی ورق‌های تکلایه و چندلایه آلومینیومی با بالارفتن میزان خرج انفجاری و به‌تبع آن بالارفتن سطح انرژی انتقالی، به‌صورت تدریجی افزایش می‌یابد، به‌طوری که جرم خرج انفجاری و بیشترین خیز دائمی با یکدیگر رابطه مستقیم و خطی به‌صورت تک‌مرحله‌ای دارند.

۲- ساختار سه‌لایه در جرم خرج‌های بالاتر از ۵ گرم برخلاف ساختارهای دولایه قابلیت تحمل انفجار پنجم را ندارد.

۳- ساختار دولایه آلومینیومی با ضخامت (۳+۳) ۶ میلی‌متر قابلیت تحمل بارگذاری مکرر برای دفعه چهارم و دوم را به‌ترتیب در جرم خرج‌های ۱۰ و ۱۲/۵ گرم ندارد. همچنین برای ساختار دولایه هنگامی که جرم خرج انفجاری ۱۲/۵ گرم است، این ساختار تنها یک دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ۳۱/۲٪ در دفعه دوم می‌شود.

۴- ساختار سه‌لایه آلومینیومی با ضخامت (۲+۲+۲) ۶ میلی‌متر قابلیت تحمل بارگذاری مکرر برای دفعه سوم و دوم را به‌ترتیب در جرم خرج‌های ۱۰ و ۱۲/۵ گرم ندارد که نشان می‌دهد در مقایسه با ساختارهای دولایه یک دفعه بارگذاری انفجاری کمتری تحمل می‌کند و افزایش تعداد لایه‌ها از این دیدگاه موثر نیست. همچنین برای ساختار سه‌لایه هنگامی که جرم خرج انفجاری ۱۲/۵ گرم است، این ساختار بارگذاری مکرر را تحمل نمی‌کند و مقاومت انفجاری ضعیف‌تری در مقایسه با ساختار دولایه در برابر بار انفجاری مکرر دارد.

۵- نتایج تجربی برای جرم خرج ۵ گرم نشان داد که افزایش تعداد لایه منجر به کاهش مقاومت انفجاری سازه و افزایش خیز می‌شود.

۶- این نتایج همچنین نشان می‌دهد که ممکن است ساختارهای سه‌لایه هم‌جنس در انفجار اول عملکرد انفجاری مناسبی در مقایسه با ساختارهای دولایه داشته باشد اما با بالارفتن تعداد انفجار، مقاومت انفجاری آنها کاهش می‌یابد.

۷- نتایج تجربی برای جرم خرج ۷/۵ و ۱۰ گرم نشان داد که افزایش تعداد لایه همچنان منجر به کاهش مقاومت انفجاری سازه و افزایش خیز ساختار می‌شود؛ اما رفتاری کاملاً متفاوت با هنگامی که ورق تحت انفجار خرج ۵ گرمی قرار دارد از خود نشان می‌دهد به‌طوری که با افزایش جرم خرج به‌تبع آن افزایش ایمپالس انفجار، ساختارهای چندلایه با تعداد لایه بیشتر مقاومت انفجاری بهتری از خود نشان می‌دهند و دیگر یک رابطه صعودی بین اختلاف بیشترین خیز دائمی ساختارهای چندلایه و تعداد انفجار برقرار نیست.

علاوه‌بر این، در بخش مدل‌سازی، از روش شبکه عصبی برای ارایه یک مدل دقیق جهت پیش‌بینی پاسخ دینامیکی و تغییر شکل

- 17- Soutis C, Mohamed G, Hodzic A. Modelling the structural response of GLARE panels to blast load. *Composite Structures*. 2011;94(1):267-276.
- 18- Spranghers K, Vasilakos I, Lecompte D, Sol H, Vantomme J. Numerical simulation and experimental validation of the dynamic response of aluminum plates under free air explosions. *International Journal of Impact Engineering*. 2013;54:83-95.
- 19- Mehreganian N, Louca LA, Langdon GS, Curry RJ, Abdul-Karim N. The response of mild steel and armour steel plates to localised air-blast loading-comparison of numerical modelling techniques. *International Journal of Impact Engineering*. 2018;115:81-93.
- 20- Henchie TF, Yuen SCK, Nurick GN, Ranwaha N, Balden VH. The response of circular plates to repeated uniform blast loads: An experimental and numerical study. *International Journal of Impact Engineering*. 2014;74:36-45.
- 21- Truong DD, Jung HJ, Shin HK, Cho SR. Response of low-temperature steel beams subjected to single and repeated lateral impacts. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2018;10(6):670-682.
- 22- Zhu L, Guo K, Li Y, Yu TX, Zhou Q. Experimental study on the dynamic behaviour of aluminium foam sandwich plates under single and repeated impacts at low temperature. *International Journal of Impact Engineering*. 2018;114:123-132.
- 23- Zhu L, Shi S, Jones N. Dynamic response of stiffened plates under repeated impacts. *International Journal of Impact Engineering*. 2018;117:113-122.
- 24- Zhou Y, Ji C, Long Y, Yu Y, Li Y, Wang T. Experimental studies on the deformation and damage of steel cylindrical shells subjected to double-explosion loadings. *Thin-Walled Structures*. 2018;127:469-482.
- 25- Guo K, Zhu L, Li Y, Yu TX, Shenoi A, Zhou Q. Experimental investigation on the dynamic behaviour of aluminum foam sandwich plate under repeated impacts. *Composite Structures*. 2018;200:298-305.
- 26- Jamali A, Babaei H, Nariman-Zadeh N, Ashraf Talesh S, Mirzababaei Mostofi T. Multi-objective optimum design of ANFIS for modelling and prediction of deformation of thin plates subjected to hydrodynamic impact loading. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2020;234(3):368-378.
- 27- Ivakhnenko AG. Polynomial theory of complex systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1971;1(4):364-378.
- 28- Nurick GN, Martin JB. Deformation of thin plates subjected to impulsive loading-a review part II: Experimental studies. *International Journal of Impact Engineering*. 1989;8(2):171-186.
- 29- Nurick GN, Martin JB. Deformation of thin plates subjected to impulsive loading-a review: Part I: Theoretical considerations. *International Journal of Impact Engineering*. 1989;8(2):159-170.
- 30- Li QM, Jones N. On dimensionless numbers for dynamic plastic response of structural members. *Archive of Applied Mechanics*. 2000;70(4):245-254.
- 31- Park BW, Cho SR. Simple design formulae for predicting the residual damage of unstiffened and stiffened plates under explosion loadings. *International Journal of Impact Engineering*. 2006;32(10):1721-1736.
- 32- Jacob N, Nurick GN, Langdon GS. The effect of stand-off distance on the failure of fully clamped circular mild experimental and theoretical. *Structural Engineering Mechanics*. 2015;56(4):535-548.
- 2- Mirzababaei Mostofi T, Babaei H, Alitavoli M. Theoretical analysis on the effect of uniform and localized impulsive loading on the dynamic plastic behaviour of fully clamped thin quadrangular plates. *Thin-Walled Structures*. 2016;109:367-376.
- 3- Mirzababaei 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(1):12235.
- 4- Mirzababaei Mostofi T, Golbaf A, Mahmoudi A, Alitavoli M, Babaei H. Closed-form analytical analysis on the effect of coupled membrane and bending strains on the dynamic plastic behaviour of fully clamped thin quadrangular plates due to uniform and localized impulsive loading. *Thin-Walled Structures*. 2018;123:48-56.
- 5- Babaei H, Mirzababaei Mostofi T, Alitavoli M. Experimental investigation and analytical modelling for forming of circular-clamped plates by using gases mixture detonation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2020;234(5):1102-1111.
- 6- Jones N. *Structural impact*. Cambridge: Cambridge University Press; 1997.
- 7- Yuen SCK, Nurick GN, Langdon GS, Iyer Y. Deformation of thin plates subjected to impulsive load: Part III—an update 25 years on. *International Journal of Impact Engineering*. 2017;107:108-117.
- 8- Zhao YP. Suggestion of a new dimensionless number for dynamic plastic response of beams and plates. *Archive of Applied Mechanics*. 1998;68(7-8):524-538.
- 9- Rajendran R, Lee JM. Blast loaded plates. *Marine Structures*. 2009;22(2):99-127.
- 10- Rudrapatna NS, Vaziri R, Olson MD. Deformation and failure of blast-loaded square plates. *International Journal of Impact Engineering*. 1999;22(4):449-467.
- 11- Mirzababaei Mostofi T, Sayah Badkhor M, Rezasefat M, Ozbakkaloglu T, Babaei H. Gas mixture detonation load on polyurea-coated aluminum plates. *Thin-Walled Structures*. 2020;155:106851.
- 12- Yuen SCK, Nurick GN, Verster W, Jacob N, Vara AR, Balden VH, et al. Deformation of mild steel plates subjected to large-scale explosions. *International Journal of Impact Engineering*. 2008;35(8):684-703.
- 13- Rezasefat M, Mirzababaei Mostofi T, Babaei H, Ziya-Shamami M, Alitavoli M. Dynamic plastic response of double-layered circular metallic plates due to localized impulsive loading. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2019;233(7):1449-1471.
- 14- Rezasefat M, Mirzababaei Mostofi T, Ozbakkaloglu T. Repeated localized impulsive loading on monolithic and multi-layered metallic plates. *Thin-Walled Structures*. 2019;144:106332.
- 15- Børvik T, Hanssen AG, Langseth M, Olovsson L. Response of structures to planar blast loads—A finite element engineering approach. *Computers & Structures*. 2009;87(9-10):507-520.
- 16- Cullis IG, Schofield J, Whitby A. Assessment of blast loading effects—Types of explosion and loading effects. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2010;87(9):493-503.

- 45- Babaei H, Mirzababaei Mostofi T. New dimensionless numbers for deformation of circular mild steel plates with large strains as a result of localized and uniform impulsive loading. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2020;234(2):231-245.
- 46- Babaei H, Mirzababaei Mostofi T. Modeling and prediction of fatigue life in composite materials by using singular value decomposition method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2020;234(2):246-254.
- 47- Teeling-Smith RG, Nurick GN. The deformation and tearing of thin circular plates subjected to impulsive loads. *International Journal of Impact Engineering*. 1991;11(1):77-91.
- 48- Aström KJ, Eykhoff P. System identification-a survey. *Automatica*. 1971;7(2):123-162.
- 49- Lee DW, Seo SW, Sim KB. Online evolution for cooperative behavior in group robot systems. *International Journal of Control, Automation, and Systems*. 2008;6(2):282-287.
- 50- Farlow SJ. Self organizing methods in modeling: GMDH type algorithms. Boca Raton: CRC Press; 1984.
- 51- Nariman-Zadeh N, Darvizeh A, Jamali A, Moeini A. Evolutionary design of generalized polynomial neural networks for modelling and prediction of explosive forming process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005;164-165:1561-1571.
- 52- Nariman-Zadeh N, Atashkari K, Jamali A, Pilechi A, Yao X. Inverse modelling of multi-objective thermodynamically optimized turbojet engines using GMDH-type neural networks and evolutionary algorithms. *Engineering Optimization*. 2005;37(5):437-462.
- 53- Jamali A, Hajiloo A, Nariman-Zadeh N. Reliability-based robust Pareto design of linear state feedback controllers using a multi-objective uniform-diversity genetic algorithm (MUGA). *Expert Systems with Applications*. 2010;37(1):401-413.
- 54- Nariman-Zadeh N, Darvizeh A, Felezi ME, Gharababaei H. 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*. 2002;10(6):727.
- 55- Mirzababaei Mostofi T, Babaei H, Alitavoli M, Lu G, Ruan D. Large transverse deformation of double-layered rectangular plates subjected to gas mixture detonation load. *International Journal of Impact Engineering*. 2019;125:93-106.
- 56- Jones N. Dynamic inelastic response of strain rate sensitive ductile plates due to large impact, dynamic pressure and explosive loadings. *International Journal of Impact Engineering*. 2014;74:3-15.
- 57- Babaei H, Mirzababaei Mostofi T, Alitavoli M. Experimental and theoretical study of large deformation of rectangular plates subjected to water hammer shock loading. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2017;231(3):490-496.
- steel plates subjected to blast loads. *Engineering Structures*. 2007;29(10):2723-2736.
- 33- Babaei H, Darvizeh A. Investigation into the response of fully clamped circular steel, copper, and aluminum plates subjected to shock loading. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. 2011;39(4):507-526.
- 34- Gharababaei H, Nariman-Zadeh N, Darvizeh A. A simple modelling method for deflection of circular plates under impulsive loading using dimensionless analysis and singular value decomposition. *Journal of Mechanics*. 2010;26(3):355-361.
- 35- Babaei H, Darvizeh A. Analytical study of plastic deformation of clamped circular plates subjected to impulsive loading. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*. 2012;7(4):309-322.
- 36- Babaei H, Darvizeh A, Darvizeh M. Analytical and experimental studies for deformation of circular plates subjected to blast loading. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2010;24(9):1855-1864.
- 37- Babaei H, Mirzababaei Mostofi T, Alitavoli M. Study on the response of circular thin plate under low velocity impact. *Geomechanics and Engineering*. 2015;9(2):207-218.
- 38- Aune V, Fagerholt E, Hauge KO, Langseth M, Børvik T. Experimental study on the response of thin aluminium and steel plates subjected to airblast loading. *International Journal of Impact Engineering*. 2016;90:106-121.
- 39- Babaei H, Mirzababaei Mostofi T, Alitavoli M. Experimental and analytical investigation into large ductile transverse deformation of monolithic and multi-layered metallic square targets struck normally by rigid spherical projectile. *Thin-Walled Structures*. 2016;107:257-265.
- 40- Babaei H, Mirzababaei Mostofi T, Alitavoli M, Darvizeh A. Empirical modelling for prediction of large deformation of clamped circular plates in gas detonation forming process. *Experimental Techniques*. 2016;40(6):1485-1494.
- 41- Babaei H, Mirzababaei Mostofi T, Armoudli E. On dimensionless numbers for the dynamic plastic response of quadrangular mild steel plates subjected to localized and uniform impulsive loading. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2017;231(5):939-950.
- 42- Babaei H, Mirzababaei Mostofi T, Alitavoli M, Saeidinejad A. Experimental investigation and dimensionless analysis of forming of rectangular plates subjected to hydrodynamic loading. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2017;58(1):139-147.
- 43- Mirzababaei Mostofi T, Babaei H, Alitavoli M. The influence of gas mixture detonation loads on large plastic deformation of thin quadrangular plates: Experimental investigation and empirical modelling. *Thin-Walled Structures*. 2017;118:1-11.
- 44- Mirzababaei Mostofi T, Babaei H, Alitavoli M, Hosseinzadeh S. On dimensionless numbers for predicting large ductile transverse deformation of monolithic and multi-layered metallic square targets struck normally by rigid spherical projectile. *Thin-Walled Structures*. 2017;112:118-124.