Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 6) (2021) 955-958
DOI: 10.22060/mej.2021.19334.7001

Experimental investigation and mathematical modeling of the response of circular metallic plates under successive intense dynamic loading

M. Ziya-Shamami[1], H. Babaei[1]* , T. Mirzababaie Mostofi[2], H. Khodarahmi[2]

[1] Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran
[2] Faculty of Mechanical Engineering, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran

ABSTRACT: In the current research, the plastic behavior of circular plates under dynamic loading was investigated. In the experimental section, a ballistic pendulum apparatus and aluminum alloy plates were used. To investigate the deformation profile and the failure pattern of the specimens, dynamic loads were applied in a wide range from 6.49 to 24.69 Ns. To test the behavior under successive loading, each experiment was continued up to 5 loadings. Experimental observations indicate a large plastic deformation of the structure along with the thinning of the test specimens at fully clamped boundaries and the rupture of some in the same area. The results showed that with increasing the number of explosions and the charge mass, the maximum deflection increases, but the progressive deflection decreases exponentially. In the modeling section, some closed-form relations were proposed using the dimensional analysis approach to predict the maximum permanent deflection plates. In these relations, the effect of various parameters such as the plate geometry, inertia of the applied load, and strain rate sensitivity of material was considered. Comparing the results of the model with the experimental results showed that there is a very good agreement between the experimental results and the predictions of the model.

Review History:

Received: Dec. 03, 2020
Revised: Jan. 24, 2021
Accepted: Jan. 28, 2021
Available Online: Mar. 03, 2021

Keywords:

Intense dynamic loading
Successive loading
Circular plate
Mathematical modeling
Dimensional analysis.

1- Introduction

Over the past two decades, many experimental, analytical, and numerical studies were conducted on the large plastic deformation and failure mechanism of single- and multi-layered metallic plates under single uniform and localized blast loading [1]. However, structural elements such as beams, plates, and shells which are widely used in vehicle, marine, and building structures may experience repeated blast loading during military operations and weapon bombing attacks. In the general form, the blast energy is dissipated by large plastic deformation and failure of structures around the contact zones. During the repeated blast loading, the plastic deformation can accumulate and the permanent deflections will be characterized by the number of blasts and the severity of the loadings. In some cases, moderate repeated blast loading may engender disastrous consequences and result in notably severe damages. Hence, the assessment of dynamic plastic response and failure mode of monolithic and multi-layered metallic plates subjected to repeated blast or impulsive loading is a significant topic and of practical engineering interest. Nevertheless, few fundamental and pivotal investigations have been presented on this topic, i.e., under multiple uniformly and locally distributed blast loadings, and several limited investigations mostly concentrated on the performance of cylindrical shells, square tubes, reinforced concrete, composite structures, and rocks.

To the best of our knowledge and the description provided, there has been no experimental study and empirical modeling on the plastic deformation of single- and multi-layered aluminum plates and also multi-layered mixed configurations under multiple uniform blast loading so far. Therefore, the current study brings forward the experimental results of an investigation into the dynamic plastic response of circular metallic plates subjected to five consecutive blast loading. Deformation and failure modes of tested specimens, as well as a quantitative analysis of experimental results including the influence of different charge masses, layering configurations, layering arrangements, layer thicknesses, stand-off distances, and the number of blasts, are discussed in detail. Furthermore, an empirical model based on the new dimensionless numbers is presented to predict permanent central deflections of single- and multi-layered circular plates subjected to repeated uniform blast loading

2- Experimental Work

To study the dynamic plastic response and failure mechanism of single- and multi-layered circular plates without any gap in-between under repeated uniform blast loading, a total of 112 single-, double-, and triple-layered specimens were designed and fabricated. Different materials, layering thicknesses, and layering arrangements were considered for this series of experiments. The ballistic

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

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

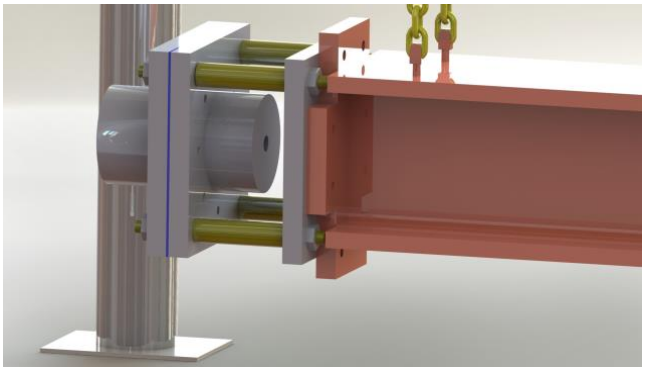


Fig. 1. Ballistic pendulum

pendulum apparatus designed and manufactured at the Impact and Blast Laboratory of the University of Guilan (IBLUG) was used to conduct 112 experimental tests. The experimental study consists of two distinguished sections: 1) description of the test specimen and its mechanical properties; 2) experimental setup and loading conditions.

All experiments on single- and multi-layered plates under repeated uniform blast loading were carried at the Impact and Blast Laboratory of the University of Guilan (IBLUG) using a ballistic pendulum, as shown in Fig. 1. This figure shows that the ballistic pendulum comprised a steel I-beam suspended on four spring steel cables which were attached to the beam via four adjustable screws. Also, four space bars with a radius of 7.5 mm were used to attach the clamping frames to the front of the ballistic pendulum. It is assumed that clamping steel frames are rigid bodies due to their thicknesses, i.e., they do not experience significant inelastic deformation in comparison to thin test specimens. Each specimen was bolted and fully clamped between thick steel frames with seven bolts around a circular region with a radius of 85 mm. For the reduction of the pressure build-up at the edge of the plate, clamping frames were chamfered. Furthermore, to provide a mean for the direction of the blast wave towards the specimens, two mild steel cylindrical tubes with the same inner radius of 50 mm, the same outer radius of 60 mm, and different lengths of 200 mm and 300 mm were fitted onto the front clamping frame. In all experiments, the length of the cylindrical tube was defined as the stand-off distance which is the distance between the nearest face of the explosive charge and the specimen surface.

To create a blast load, the plastic explosive charge (PE4) was used and formed into a disc with a radius of 17.5 mm. The charge was spread onto a polystyrene foam pad with a thickness of 15 mm and it was centrally located at the end of the cylindrical tube along its longitudinal axis. An instantaneous electrical detonator taped to 1 g of explosive was attached to the center of the charge in a hole cut out in the polystyrene pad. In this series of experiments, the charge was detonated at different stand-off distances of 200 mm and 300 mm, and its mass was changed from 1.5 g to 12.5 g at a constant radius by increasing the height of the charge in the experiments. During this process, the influence of the polystyrene foam pad on shock-wave propagation was ignored. To apply repeated blast loading on the test specimens, each specimen was again left in the testing section of the apparatus and was subjected to further blasts with the same previous loading condition. This process was repeated for a required number of blasts up to five times depending on the failure mode of the test plate. During each blast loading, the amount of the transmitted impulse was measured and recorded. Based on previous studies, it was assumed that the distribution of the blast load is uniform over the entire deformable area of the test plate because the ratios of the explosive charge diameter to stand-off distance were assigned to be 0.175 (35/200) and 0.117 (35/300).

3- Results and Discussion

In general form, the post-test inspection of the tested monolithic and multi-layered plates under repeated blast loading shows that all specimens exhibited different levels of large plastic deformation (Mode I failure) with the dome-like shape on the back, middle, and front layers. This type of deformation mode is indicative of uniformly distributed impulsive loading on specimens for different load intensities as presented by Jacob et al. [1]. Besides, for some of the tested specimens, the other failure modes such as Mode Ia and Ib, i.e., large plastic deformation with necking around part of the clamped boundary and the entire boundary, and Mode II* and Mode II, i.e., large plastic deformation with partial and complete tearing around the clamped boundary, were observed. As the plate deformation increases, shear stresses and membrane actions along with the evidence of rupture are present. Different types of deformation and failure modes including large plastic deformation, necking, thinning, and tearing around the boundary are illustrated in Fig. 2.

For both monolithic and multi-layered aluminum plates, large global plastic deformation (Mode I) of specimens is observed and significant tensile deformation happened at the center of specimens. As expected, larger permanent deformations produce by increasing the number of blasts and charge mass for a given stand-off distance. Since the plate was secured between two thick supporting frames by seven bolts, no plastic deformation, crack, and in-plane slip occurred at the constrained zone of the plate and bolted holes. Thinning at the clamped boundary occurred for both monolithic and multi-layered plates subjected to higher impulsive loads by increasing the charge mass or a combination of repeated blast loading.

4- Conclusions

The present research study brings insight into the experimental results on the structural response of monolithic and multi-layered metallic plates under repeated uniform impulsive loading. The impulsive load was generated by the detonation of different quantities of charge mass with a constant charge radius of 17.5 mm at two different stand-

Fig. 2. Typical specimens after blast loading

off distances of 200 mm and 300 mm. A ballistic pendulum was used to carry out 112 experiments on monolithic, double-layered, triple-layered, and triple-layered mixed configurations made of aluminum alloy and mild steel materials.

References

[1] N. Jacob, G. Nurick, G. Langdon, The effect of stand-off distance on the failure of fully clamped circular mild steel plates subjected to blast loads, Engineering Structures, 29(10) (2007) 2723-2736.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Ziya-Shamami, H. Babaei, T. Mirzababaie Mostofi, H. Khodarahmi , Experimental investigation and mathematical modeling of the response of circular metallic plates under successive intense dynamic loading , Amirkabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 6) (2021) 955-958.

DOI: 10.22060/mej.2021.19334.7001

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳، شماره ویژه ۶، سال ۱۴۰۰، صفحات ۴۰۲۳ تا ۴۰۵۰
DOI: 10.22060/mej.2021.19334.7001

بررسی تجربی و مدل‌سازی ریاضی پاسخ ورق‌های فلزی مدور تحت بارگذاری دینامیکی شدید پی‌درپی

مجتبی ضیاء شمامی[۱]، هاشم بابایی*[۱]، توحید میرزابابای مستوفی[۲]، حسین خدارحمی[۲]

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ایوان‌کی، ایوان‌کی، ایران

خلاصه: در پژوهش حاضر، رفتار پلاستیک ورق‌های مدور تحت بارگذاری دفعی مکرر بررسی شده‌است. در بخش تجربی از سامانه پاندول بالستیک جهت اعمال بار دینامیکی و ورق‌های آلیاژ آلومینیوم استفاده شد. جهت بررسی پروفیل تغییر شکل و الگوی شکست نمونه‌ها، بار دینامیکی در محدوده وسیعی از ۶/۴۹ تا ۲۴/۶۹ نیوتن در ثانیه اعمال شد. جهت بررسی رفتار تحت بارگذاری مکرر، هر آزمایش تا ۵ دفعه بارگذاری ادامه پیدا کرد. مشاهدات تجربی بیانگر تغییر شکل پلاستیک بزرگ سازه همراه با نازک‌شدگی نمونه‌های آزمایشی در مرزهای گیردار و همچنین پارگی برخی در همین ناحیه است. نتایج مشخص کرد که با افزایش تعداد دفعات انفجار و جرم خرج، خیز دائمی افزایش می‌یابد ولی خیز پیش‌رونده ورق به‌صورت نمایی کاهش می‌یابد. در بخش مدل‌سازی، با بهره‌گیری از روش تحلیل ابعادی، روابطی با فرم بسته بر مبنای اعداد بدون بعد به منظور پیش‌بینی بیشترین خیز دائمی ورق استخراج شد که بر اساس مراجع موجود، تاکنون در ادبیات موضوع ارائه نشده‌است. در این روابط، تأثیر پارامترهای مختلف مانند هندسه ورق، اینرسی بار اعمال‌شده و حساسیت ماده به نرخ کرنش در نظر گرفته‌شد. مقایسه نتایج حاصل از مدل با نتایج تجربی نشان داد که توافق بسیار خوبی بین نتایج تجربی و پیش‌بینی‌های مدل حاصل شده‌است.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۱۳
بازنگری: ۱۳۹۹/۱۱/۰۵
پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۱۰
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۲/۱۳

کلمات کلیدی:
بارگذاری دینامیکی شدید
بارگذاری پی در پی
ورق مدور
مدل‌سازی ریاضی
تحلیل ابعادی

۱- مقدمه

مطالعه اثر بار انفجاری روی ساختارهای مختلف موردتوجه 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 می‌باشد. 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 می‌شود؛ لذا مطالعه یک ساختار در مقابل بارگذاری انفجاری مکرر به‌منظور پیش‌بینی تخریب سازه از اهمیت زیادی برخوردار است. با توجه به توضیحات ارائه‌شده و احساس نیاز به تحقیق در این حوزه به علت بالابردن مقاومت انفجاری سازه‌ها در برابر بار انفجاری به خصوص در زمان حملات تروریستی و هوایی در صنایع نظامی، هدف کلی تحقیقات در سال‌های اخیر، مطالعه پاسخ دینامیکی ساختارها تحت بارگذاری انفجاری چندمرحله‌ای یا مکرر است. البته بررسی منابع در این زمینه نشان می‌دهد که تاکنون تحقیقات بسیار اندکی روی مکرربودن این نوع بارگذاری انجام شده‌است.

در منابع [۵-۱]، تحقیقات تجربی و تحلیلی توسط محققین در زمینه بررسی بارگذاری انفجاری یکنواخت و محلی روی سازه‌های چهارگوش و دایره‌ای مختلف پرداخته شده‌است. جونز [۶]، نوریک [۷]، ژائو [۸] و راجندران و [۹]، به بررسی تحلیلی و تجربی اثر بار انفجاری بر روی ورق پرداختند. مطالعات بیشتر [۱۴-۱۰]، 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 انجام‌شده است و مدل‌های تحلیلی نیز ارائه شده‌است. محققینی [۱۸-۱۵] با استفاده از نرم‌افزار اتوداین و آباکوس به مدل‌سازی بار انفجاری روی سازه پرداخته و پروفیل فشار بار انفجاری نسبت به زمان و مکان ارائه شده‌است. البته این شبیه‌سازی‌ها قبلاً با نتایج تجربی صحه‌گذاری شده‌است. البته با توجه به زمان‌بربودن نحوه مدل‌سازی بالا استفاده از روش کانوپ با لحاظ‌کردن شرایطی می‌تواند

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

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

مورداستفاده قرارگیرد [۱۹]. معمولاً روش کانوپ تطابق خوبی با نتایج تجربی دارد. در واقع در این روش جرم ماده منفجره با معادل جرم تی‌ان‌تی معادل می‌گردد و از اثرات انعکاس موج انفجاری روی سازه صرف‌نظر می‌گردد [۱۹].

در سال ۲۰۱۴، هنشیه و همکاران [۲۰] به مطالعه تجربی و عددی اثر بارگذاری انفجاری یکنواخت مکرر بر روی ورق فولادی دایروی پرداختند. ورق دایروی موردمطالعه آن‌ها از جنس فولاد باضخامت‌های ۲ و ۳ میلی‌متر بوده که توسط دستگاه آونگ بالستیک در معرض ۵ مرتبه بار انفجاری مکرر با توزیع یکنواخت قرار گرفت. به‌طورکلی، 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 جابجایی 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 ویکرز ورق در ناحیه مرزی و مرکزی افزایش می‌یابد. در ادامه در سال ۲۰۱۷، ترانگ و همکاران [۲۱] به مطالعه تغییر شکل دائمی ورق آلومینیومی در معرض بارگذاری دفعی مکرر ناشی از ضربه زننده پرداختند. در این تحقیق معادلات فرم بسته دقیق ساده‌ای برای پیش‌بینی تغییر شکل دائمی ناشی از بارگذاری دفعی مکرر از نتایج مطالعه پارامتریک به دست آوردند. در بخش مدل‌سازی تجربی بر مبنای اعداد بدون بعد، مؤثرترین تحقیقات انجام‌گرفته در ادبیات تحقیق در ادامه به‌تفصیل شرح داده‌می‌شود. در سال ۱۹۸۹، نوریک و همکارانش [۲۲] با فرض شکل مد متغیر درروش تقریبی و در نظر گرفتن هم‌زمان جابجایی‌های قائم و افقی، مدل‌هایی برای ورق‌های دایروی و مستطیلی ارائه کردند [۲۳] که در آن شکل مد در هر گام زمانی محاسبه می‌شود. در سال ۲۰۰۰، لی و جونز، یک تحلیل بی‌بعد کلی برای پیش‌بینی رفتارهای دینامیکی و شکست ساختارهای مختلف ارائه کردند [۲۴]. در سال ۲۰۰۶، پارک و چو یک عدد بی‌بعد مشابه عدد بی‌بعد نوریک برای ورق‌های تک لایه تحت بار انفجاری یکنواخت ارائه کردند که در آن نسبت طول به عرض ورق نیز اضافه شده‌بود [۲۵]. در سال ۲۰۰۷، ژاکوب و همکارانش [۲۶] اثر فاصله استقرار و جرم خرج را بر پاسخ دینامیکی ورق‌های دایروی کاملاً گیردار تحت بار انفجاری بررسی کردند.

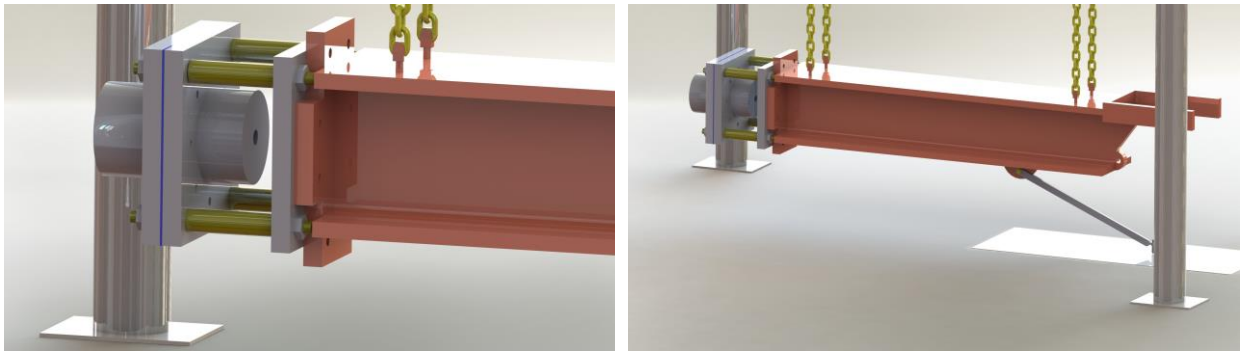
با مرور مطالعات پیشین محققان، این نتیجه حاصل شد که بیشتر مطالعات در زمینه شکل‌دهی سازه‌ها تحت بار انفجاری یکنواخت مکرر مربوط به ساختارهای تک‌لایه فولادی یا کامپوزیتی بوده و تاکنون تحقیقی روی ورق‌های آلومینیومی تک‌لایه و چندلایه تحت بار دفعی مکرر با توزیع یکنواخت انجام نشده‌است. لذا انجام مطالعات آزمایشگاهی روی ساختارهای دایره‌ای آلومینیومی به‌منظور مطالعه پارامترهای مختلف مانند میزان و فاصله خرج انفجاری تا ورق، چندلایه‌بودن و ضخامت ورق و اثر تکرار بارگذاری انفجاری و بررسی اثرگذاری آن‌ها روی پاسخ دینامیکی و تغییر شکل پلاستیک سازه، می‌تواند از اهمیت بالایی برخوردار باشد. با توجه به توضیحات ارائه‌شده، مهم‌ترین نوآوری‌های تحقیق حاضر در بخش‌های مختلف تجربی و مدل‌سازی تجربی بر مبنای تحلیلی ابعادی به شرح زیر است: ۱) بررسی رفتار پلاستیک ساختارهای آلومینیومی تک‌لایه تحت بار دینامیکی یکنواخت منفرد و مکرر و مقایسه عملکرد آن‌ها با ساختارهای چندلایه، ۲) ارائه اعداد بی‌بعد جدید جهت تحلیل ابعادی پاسخ پلاستیک ساختارهای تک‌لایه دایره‌ای تحت بار دینامیکی یکنواخت مکرر و تعمیم آن‌ها برای ساختارهای چندلایه. لازم به توضیح است که مدل‌های تجربی بر مبنای تحلیل ابعادی و از بی‌بعد سازی معادلات حاکم بر ورق تحت بار دینامیکی به دست می‌آیند.

۲- مطالعه تجربی

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 در این تحقیق، هدف از مطالعات آزمایشگاهی آن است تا بتوان رفتار دینامیکی ساختارهای تک‌لایه و چند لایه آلومینیومی تحت بار انفجاری یکنواخت مکرر را موردبررسی قرار داد که تاکنون در پیشینه تحقیق در این زمینه مطالعه‌ای صورت نگرفته‌است.

شکل‌دهی آزاد یا بدون قالب ورق‌های آلومینیومی تک لایه و چند لایه دایره‌ای تحت بارگذاری دفعی یکنواخت مکرر در یک سامانه آزمایشی آونگ بالستیک که تصویر آن در شکل ۱ نشان داده شده، انجام گرفته‌است.

سامانه آونگ بالستیک همراه با متعلقاتش به‌وسیله چهار کابل فولادی از ارتفاع معین به‌صورت افقی 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 شده‌است، 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 نصب‌شده که به‌صورت نر و ماده به گیره ورق متصل می‌شود. گیره ورق از دو صفحه مربعی فولادی با ضخامت ۲۵ میلی‌متر تشکیل شده‌است. وسط



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

Fig. 1. Schematic of the ballistic pendulum at the Impact and Blast Laboratory of University of Guilan (IBLUG)

هر دو صفحه برحسب نوع تغییر شکل ورق منفذی جهت اعمال بار و خروج صفحه تعبیه شده‌است. همچنین در صفحه جلویی گیره ورق رزوه‌هایی جهت نصب لوله‌های استقرار خرج در نظر گرفته شده‌است. در برخی از موارد با بکاربردن لوله‌های بلند استقرار خرج، پاندول از حالت تعادل خارج می‌شود. برای رفع این مسئله در سمت دیگر آن از وزنه‌هایی جهت برقراری تعادل استفاده می‌شود.

در تحقیق حاضر از دو لوله به قطر داخلی ۱۰۰ میلی‌متر، قطر خارجی ۱۲۰ میلی‌متر و طول‌های ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متر که جهت هدایت موج انفجار به سمت نمونه و همچنین یکنواخت کردن توزیع بار می‌باشد، استفاده شده‌است. طول‌های مختلف برای لوله این امکان را فراهم می‌کند تا بتوان اثر فاصله خرج روی میزان تغییر شکل پلاستیک سازه را بررسی نمود. شایان توجه است که با توجه به پیشینه [۷، ۱۲، ۱۹، ۲۲، ۲۳ و ۲۶]، درصورتی‌که فاصله خرج انفجاری تا مرکز ورق بیشتر از شعاع باشد، بار توزیعی یکنواخت روی نمونه دارد. نمونه‌هایی از این لوله‌ها در شکل ۲ نمایش داده شده‌است.

سامانه آزمایشی آونگ بالستیک شامل چهار بخش است: ۱) واحد اعمال بار انفجاری جایگذاری خرج، ۲) سیستم تحریک خرج انفجار با قابلیت کنترل از راه دور ۳) واحد اندازه‌گیری دامنه نوسان ۴) واحد شکل‌دهی و نگه‌دارنده‌ها. در بخش اعمال بار، خرج انفجاری روی صفحه ضخیمی از جنس پلی‌استر به ضخامت ۱۵ میلی‌متر قرار داده می‌شود. در تحقیق حاضر ماده منفجره بکارگرفته‌شده برای انجام آزمایش‌های تجربی C4 بوده و مقدار آن بسته به نوع آزمایش مربوطه با ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ گرم وزن شده است. خرج انفجاری هر آزمایش با توجه به خمیری‌شکل‌بودن آن با دست به‌صورت

شکل ۲. لوله فولادی جهت ایجاد فاصله استقرار خرج تا ورق

Fig. 2. Mild steel blast tubes used for standoff distance

دیسکی به قطر ۳۵ میلی‌متر درآورده شده و روی صفحه پلی‌استری پهن‌شده است. در بخش دوم، برای تحریک ماده منفجره از چاشنی نمره ۸ نانل و به همراه دستگاه تحریک نانل استفاده می‌شود. در واحد شکل‌دهی، ورق‌های مربعی با سطح مواجهه دایره‌ای بین دو صفحه فولادی ضخیم با ضخامت ۲۵ میلی‌متر قرار داده‌شده و با ۷ عدد پیچ M8 ثابت شدند؛ بنابراین شرایط مرزی در این حالت به‌صورت کاملاً گیردار در نظر گرفته شده‌است. میزان تغییر شکل نهایی تمامی نمونه‌ها پس از انجام آزمایش‌های انفجاری، توسط کولیس ارتفاع‌سنج اندازه‌گیری شده‌است. نمونه ورق‌های مورد آزمایش، از جنس آلیاژ آلومینیوم (Al-۱۰۵۰) در ضخامت‌های ۲ و ۳ میلی‌متر است. در ابتدا نمونه ورق‌ها در ابعاد ۲۵۰×۲۵۰ میلی‌متر مربع برش زده شدند.

جدول ۱. گروه‌های آزمایشی

Table 1. Experimental groups

گروه آزمایشی	ضخامت هر لایه (mm)	قطر مواجهه ورق (mm)	نسبت ضخامت به قطر هر لایه	جرم خرج (g)	فاصله استقرار (mm)	تعداد آزمایش
S2	۲	۱۰۰	۰/۰۲	۱/۵، ۲ و ۳	۳۰۰	۱۲
S3	۳	۱۰۰	۰/۰۲	۵ و ۷/۵	۳۰۰	۸
				۵	۲۰۰	۳
D22	۲	۱۰۰	۰/۰۲	۵، ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵	۲۰۰	۱۸
				۱۰	۳۰۰	۵
T222	۲	۱۰۰	۰/۰۲	۵، ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵	۲۰۰	۱۶
				۱۰	۳۰۰	۵

نمونه‌های آزمایشی دارای سطح شکل‌گیری یا مواجهه دایره‌ای شکل به قطر ۱۰۰ میلی‌متر هستند.

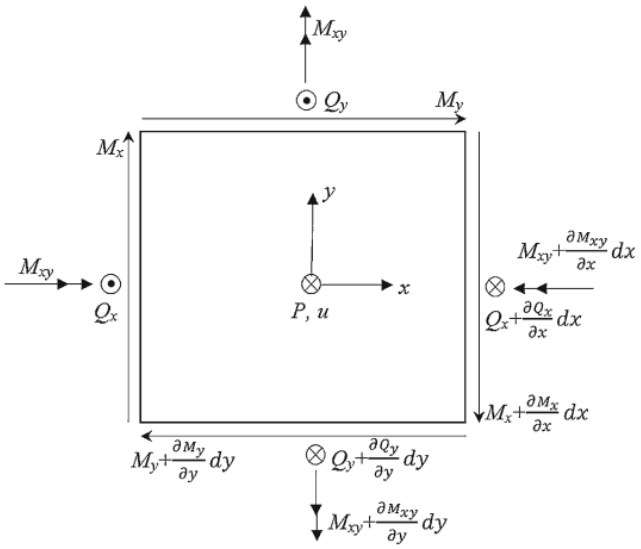
با توجه به توضیحات ارائه‌شده و مطابق با جدول ۱، ۶۷ ساختار تک‌لایه، دو لایه و سه لایه آلومینیومی در سه گروه‌بندی S، D و T به‌منظور بررسی تغییر شکل پلاستیک و پاسخ دینامیکی ورق‌های آلومینیومی تک‌لایه و چندلایه تحت بار انفجاری یکنواخت مکرر طراحی و ساخته‌شده‌اند.

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

۳- تحلیل و مدل‌سازی بی‌بعد

۳- ۱- ارائه اعداد بی‌بعد برای ورق‌های دایره‌ای تک‌لایه و چندلایه تحت بارگذاری انفجاری مکرر

با توجه به پیچیدگی هندسه ورق‌های دایره‌ای برای تحلیل، اعداد بی‌بعد ابتدا برای یک ورق مربعی استخراج و سپس این اعداد برای ورق‌های دایره‌ای تعمیم داده می‌شود. مطابق شکل ۳، تحلیل نیرویی برای یک المان از ورق، معادلات حاکم بر ورق تحت بار دینامیکی به‌صورت روابط (۱) تا (۳) ارائه می‌شود که با جایگذاری رابطه (۱) و (۲) در (۳)، معادله به فرم رابطه (۴) تبدیل می‌گردد [۲۹-۲۷].

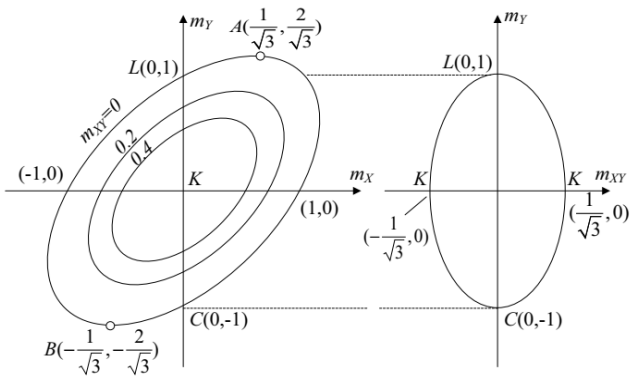


شکل ۳. تحلیل نیرویی برای یک المان از ورق

Fig. 3. Free diagram for an element of a plate

$$\frac{\partial M_x}{\partial x}+\frac{\partial M_{xy}}{\partial y}=Q_x \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial M_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial M_y}{\partial y}=Q_y \qquad (۲)$$



شکل ۴. شماتیک معیار فون-مایسز

Fig. 4. Schematic of von Mises criterion

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x}+\frac{\partial Q_y}{\partial y}+P=\rho H\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \qquad (۳)$$

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2}+2\frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x\partial y}+\frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2}=\rho H\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}-P \qquad (۴)$$

در معادلات بالا، M_x، M_y و M_{xy} گشتاورهای خمشی، P نیروی دینامیکی، H. ضخامت ورق و w میزان جابجایی ورق است. هنگامی‌که نیروهای برشی Q_x و Q_y به‌عنوان 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 شده‌است که در آن $m_x=M_x/M_0$، $m_y=M_y/M_0$ و $m_{xy}=M_{xy}/M_0$ هستند. همچنین، M_0، گشتار خمشی کاملاً پلاستیک است که به‌راحتی از رابطه $\sigma_0 H^2/4$ قابل‌محاسبه است [۲۹]. 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، ۱ باشد. در لولاهای پلاستیک نیز باید سرعت خیز دائمی ورق صفر باشد. همچنین در مرزهای گیردار باید خیز و سرعت اولیه مقداری برابر با صفر داشته باشد.

با توجه به اینکه موضوع موردنظر در این تحقیق بررسی تغییر شکل بزرگ ورق بوده، لذا افزودن نیروهای غشایی (N_x، N_y و N_{xy}) در معادله (۴) الزامی است و معادله (۴) به‌صورت معادله (۵) تغییر می‌کند [۲۹-۲۷].

$$\begin{aligned}&\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2}+2\frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x\,\partial y}+\frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2}\\&+N_x\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}-2N_{xy}\frac{\partial^2 w}{\partial x\,\partial y}\\&+N_y\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}=\rho H\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}-P\end{aligned} \qquad (۵)$$

با معرفی‌نمودن پارامترهای بی‌بعد نظیر $Y=y/L$، $X=x/L$، $W=w/H$، $T=C_s t/H$، $n_x=N_x/N_0$، $n_y=N_y/N_0$، $n_{xy}=N_{xy}/N_0$، معادله حاکم بر ورق به فرم بی‌بعد معادله (۶) تبدیل می‌شود. در پارامترهای بی‌بعد ذکرشده، 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.

$$\begin{aligned}&\frac{\partial^2 m_x}{\partial X^2}+2\frac{\partial^2 m_{xy}}{\partial X\,\partial Y}+\frac{\partial^2 m_y}{\partial Y^2}\\&+4\left(n_x\frac{\partial^2 W}{\partial X^2}-2n_{xy}\frac{\partial^2 W}{\partial X\,\partial Y}+n_y\frac{\partial^2 W}{\partial Y^2}\right)=\\&4\left(\frac{L}{H}\right)^2\left(\frac{\rho C_s^2}{\sigma_0}\frac{\partial^2 W}{\partial T^2}-\frac{P}{\sigma_0}\right)\end{aligned} \qquad (۶)$$

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

$$\begin{aligned}&\frac{\partial^2 m_x}{\partial X^2}+2\frac{\partial^2 m_{xy}}{\partial X\,\partial Y}+\frac{\partial^2 m_y}{\partial Y^2}+\\&4\left(n_x\frac{\partial^2 W}{\partial X^2}-2n_{xy}\frac{\partial^2 W}{\partial X\,\partial Y}+n_y\frac{\partial^2 W}{\partial Y^2}\right)=\\&4\left(\frac{L}{H}\right)^2\left(\frac{\rho C_s^2}{\sigma_d}\frac{\partial^2 W}{\partial T^2}-\frac{P}{\sigma_d}\right)\end{aligned} \qquad (۷)$$

همان‌طور که از معادله (۷) برمی‌آید، سه عبارت در سمت راست 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 ماده P/σ_d که

فشار دینامیکی متناسب است با ρV_0^2 [۳۰]. این موضوع نشان‌دهنده آن است که پاسخ یک ورق با هر هندسه‌ای تحت بار دینامیکی باید بر مبنای سه عدد فوق‌الذکر بیان گردد. لذا در ادامه می‌توان مقدار کمی تنش تسلیم دینامیکی را بر حسب نرخ کرنش متوسط، ضرایب ماده و هندسه ورق در معادله وارد کرد. اکنون با به‌کارگیری معادله ساختاری کوپر–سیموندز [۳۰–۳۲] و همچنین استفاده از مقدار نرخ کرنش متوسط برای یک ورق دایره‌ای [۳۰]، عدد بی‌بعد اثر نرخ کرنش ξ به‌صورت معادله ۱۰ تعریف می‌گردد [۳۲–۳۴].

$$\sigma_d = \sigma_0\left(1+\left(\frac{\dot{\varepsilon}_m}{D}\right)^{\frac{1}{q}}\right) = \sigma_0\left(1+\xi\left(\frac{W_0}{H}\right)^{\frac{1}{q}}\right) \tag{۸}$$

$$\dot{\varepsilon}_m = \frac{V_0 W_0}{3\sqrt{2}R^2} = \frac{I W_0}{3\sqrt{2}\pi\rho H R^4} \tag{۹}$$

$$\xi = \left(\frac{I}{3\sqrt{2}\pi\rho R^4 D}\right)^{\frac{1}{q}} \tag{۱۰}$$

با جایگذاری معادلات (۸) و (۱۰) در معادله (۷) 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:

$$\frac{W_0}{H} = f\left(\frac{R}{H},\frac{P}{\sigma_0},\frac{1}{\xi}\right) = f\left(\frac{R}{H},\frac{\rho V_0^2}{\sigma_0},\frac{1}{\xi}\right) \tag{۱۱}$$

درنهایت، رابطه بیشترین خیز دائمی ورق به ضخامت آن برای ورق‌های تک‌لایه دایره‌ای تحت بارگذاری دینامیکی یکنواخت برحسب عدد بی‌بعد $\psi_{c,s}$ برابر است با:

$$\frac{W_0}{H} = C_0 \cdot \psi_{c,s} \tag{۱۲}$$

که در آن

$$\psi_{c,s} = \left(\frac{R}{H}\right)^{C_1}\cdot\left(\frac{\rho V_0^2}{\sigma_0}\right)^{C_2}\cdot\left(\frac{1}{\xi}\right)^{C_3} \tag{۱۳}$$

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 چند لایه 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 چند لایه تحت بارگذاری دینامیکی مکرر در نظر گرفته شود. با توجه به نکات ذکرشده و مطابق با تحلیل ابعادی مسئله، رابطه بیشترین خیز دائمی هرکدام از لایه‌های جلویی، میانی و عقبی به ضخامت آن لایه برای ساختارهای دایره‌ای تک‌لایه و چندلایه تحت بار دفعی دینامیکی یکنواخت مکرر به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{W_0}{H} = C_0' \cdot \psi_{c,s}^r \tag{۱۴}$$

$$\frac{W_0}{H_b} = C_0'' \cdot \psi_{c,m}^r \tag{۱۵}$$

که در آن‌ها

$$\psi_{c,s}^r = \left(\frac{R}{H}\right)^{C_1}\cdot\left(n\frac{\rho V_0^2}{\sigma_0}\right)^{C_2}\cdot\left(\frac{1}{\xi}\right)^{C_3} \tag{۱۶}$$

$$\begin{aligned}\psi_{c,m}^r = &\left(\frac{R}{H_f}\right)^{C_1}\cdot\left(\frac{R}{H_m}\right)^{C_2}\cdot\left(\frac{R}{H_b}\right)^{C_3}\cdot\\ &\left(n\frac{\rho_f V_{0,f}^2}{\sigma_{0,f}}\right)^{C_4}\cdot\left(n\frac{\rho_m V_{0,m}^2}{\sigma_{0,m}}\right)^{C_5}\cdot\\ &\left(n\frac{\rho_b V_{0,b}^2}{\sigma_{0,b}}\right)^{C_6}\cdot\left(\frac{1}{\xi_f}\right)^{C_7}\cdot\left(\frac{1}{\xi_m}\right)^{C_8}\cdot\left(\frac{1}{\xi_b}\right)^{C_9}\end{aligned} \tag{۱۷}$$

شایان توجه است که رابطه (۱۷) برای یک ساختار سه‌لایه غیر هم‌جنس

تحت بارگذاری دینامیکی یکنواخت ارائه 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 گردد. این موضوع بدان معناست که برای یک ساختار سه‌لایه هم‌جنس که در آن ضخامت لایه‌ها برابر باشند ضرورتی بر اضافه‌کردن اعداد بی‌بعد مربوط لایه‌های میانی و جلویی نیست و رابطه (۱۷) به‌صورت رابطه (۱۸) ساده می‌گردد.

$$\mu_{c,m}^{r}=\left(\frac{R}{H_b}\right)^{C_1'}\cdot\left(\frac{n}{M}\cdot\frac{\rho_b V_{0,b}{}^2}{\sigma_{0,b}}\right)^{C_2'}\cdot\left(\frac{1}{\xi_b}\right)^{C_3'} \qquad (۱۸)$$

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 در آن M تعداد لایه‌ها است. اکنون، هدف به‌دست‌آوردن ضرایب مجهول در معادلات (۱۶) و (۱۸) برای ورق‌های تک‌لایه و چندلایه دایره‌ای تحت بارگذاری دینامیکی با توزیع یکنواخت مکرر است که این مقادیر به‌راحتی از روش تجزیه مقادیر منفرد بهینه‌شده قابل‌محاسبه هستند. این روش در قسمت بعدی به‌تفصیل بیان شده‌است.

۳- ۲- روش تجزیه مقادیر منفرد

به‌طورکلی هدف از مدل‌سازی، پیداکردن یک تابع ریاضی $\hat{f}$ است که به‌موجب آن می‌توان رفتار یک سیستم واقعی f را به‌صورت تقریبی پیش‌بینی و توصیف کرد. بدین منظور تلاش بر این است تا به ازای هر بردار ورودی معلوم $\mathbf{X}=(x_1,x_2,x_3,...,x_N)$، مقدار خروجی $\hat{y}$ به‌گونه‌ای تعیین شود که تا حد امکان به خروجی واقعی سیستم ناشناخته y نزدیک باشد (N تعداد ورودی‌های سیستم است)؛ بنابراین با داشتن M نمونه از این زوج داده‌های چندورودی-تک‌خروجی می‌بایست رابطه زیر برقرار باشد [۲۷, ۳۵]:

$$y_i=f\left(x_{i1},x_{i2},x_{i3},\ldots,x_{iN}\right)\ \ i=1,2,3,\ldots,M \qquad (۱۹)$$

اکنون به ازای هر بردار ورودی معلوم رابطه (۲۰)، مقادیر خروجی $\hat{y}_i$ را با استفاده از تابع f پیش‌بینی کرد:

$$X_i=\left(x_{i1},x_{i2},x_{i3},\ldots,x_{iN}\right)\ \ i=1,2,3,\ldots,M \qquad (۲۰)$$

$$\hat{y}_i=\hat{f}\left(x_{i1},x_{i2},x_{i3},\ldots,x_{iN}\right)\ \ i=1,2,3,\ldots,M \qquad (۲۱)$$

شناسایی سیستم و تعیین تابع f باید به‌گونه‌ای انجام شود که مربع اختلاف میان خروجی واقعی و پیش‌بینی شده حداقل باشد که در رابطه (۲۲) ارائه شده‌است.

$$\sum_{i=1}^{M}\left[\hat{f}\left(x_{i1},x_{i2},x_{i3},\ldots,x_{iN}\right)-y_i\right]^2\rightarrow\min \qquad (۲۲)$$

در مدل‌سازی با استفاده از روش تحلیل ابعادی، پارامترهای بی‌بعد $\pi=\{\pi_0,\pi_1,\pi_2,\pi_3,...,\pi_N\}$ با استفاده از متغیرهای فیزیکی و حقیقی سیستم $\{y,X\}=\{y,x_1,x_2,x_3,...,x_N\}$ تشکیل می‌شود. رابطه بین پارامترهای بی‌بعد به صورت معادله (۲۳)، توسط تابع $\hat{f}$ برقرار می‌شود.

$$\hat{\pi}_{0i}=\hat{f}\left(\pi_{1i},\pi_{2i},\pi_{3i},\ldots,\pi_{Ni}\right)\ \ i=1,2,3,\ldots,M \qquad (۲۳)$$

به‌طوری‌که تابع $\hat{f}$ بر اساس رابطه (۲۴) تعیین می‌شود.

$$\sum_{i=1}^{M}\left[\hat{f}\left(\pi_{i1},\pi_{i2},\pi_{i3},\ldots,\pi_{iN}\right)-\hat{\pi}_{0i}\right]^2\rightarrow\min \qquad (۲۴)$$

برای استخراج مدل، تابع f به شکل زیر در نظر گرفته‌می‌شود.

$$\pi_0=C_0\cdot\left(\pi_1\right)^{C_1}\cdot\left(\pi_2\right)^{C_2}\cdot\left(\pi_3\right)^{C_3}\cdot\cdots\left(\pi_N\right)^{C_N} \qquad (۲۵)$$

ضرایب مجهول در معادله فوق به‌گونه‌ای تعیین می‌شود که قاعده کمترین مربعات خطا (معادله ۲۴) برقرار باشد. با گرفتن لگاریتم طبیعی از طرفین معادله (۲۵) نتیجه می‌شود:

$$\ln(\pi_0)=\ln(C_0)+C_1\ln(\pi_1)+C_2\ln(\pi_2)+\cdots+C_N\ln(\pi_N) \qquad (۲۶)$$

درنتیجه لازم است که یک دستگاه معادله جبری خطی که شامل $K=N+1$ مجهول و M معادله است، حل شود. (M تعداد زوج داده‌های ورودی-خروجی است و یا به عبارتی تعداد آزمایش‌های تجربی است).

$$\begin{cases} \ln(C_0)+C_1\zeta_{11}+C_2\zeta_{12}+\cdots+C_N\zeta_{1N}=\zeta_{10} \\ \ln(C_0)+C_1\zeta_{21}+C_2\zeta_{22}+\cdots+C_N\zeta_{2N}=\zeta_{20} \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ \ln(C_0)+C_1\zeta_{M1}+C_2\zeta_{M2}+\cdots+C_N\zeta_{MN}=\zeta_{M0} \end{cases} \quad (۲۷)$$

که در آن

$$\zeta_{ij}=\ln(\pi_{ij}) \quad i=1,2,3,\ldots,M \quad j=1,2,3 \quad (۲۸)$$

$$\zeta_{i0}=\ln(\pi_{i0}) \quad i=1,2,3,\ldots,M \quad (۲۹)$$

دستگاه معادله فوق را که در آن $M\rangle\rangle K$ را می‌توان به شکل ماتریسی زیر نمایش داد:

$$AX=Y \quad (۳۰)$$

که در آن X، Y و A از روابط (۳۱)، (۳۲) و (۳۳) حاصل شده‌است:

$$X=\left[\ln(C_0)C_1\,C_2\cdots C_N\right]^{\mathrm{T}} \quad (۳۱)$$

$$Y=\left[\zeta_{10}\;\zeta_{20}\cdots\zeta_{M0}\right]^{\mathrm{T}} \quad (۳۲)$$

$$A=\begin{bmatrix} 1 & \zeta_{11} & \zeta_{12} & \cdots & \zeta_{1N} \\ 1 & \zeta_{21} & \zeta_{22} & \cdots & \zeta_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \zeta_{M1} & \zeta_{M2} & \cdots & \zeta_{MN} \end{bmatrix} \quad (۳۳)$$

حل معادله (۳۰) منوط به محاسبه معکوس ماتریس غیر مربعی A است. به همین جهت برای محاسبه شبه معکوس ماتریس A، از روش تجزیه مقادیر منفرد استفاده می‌شود. درروش تجزیه مقادیر منفرد ماتریس غیرعادی A به حاصل‌ضرب یک ماتریس متعامد ستونی $U\in\Re^{M\times K}$، یک ماتریس قطری $W\in\Re^{K\times K}$ با عناصر مثبت یا صفر (مقادیر تکینه) و ترانهاد یک ماتریس متعامد $V\in\Re^{K\times K}$ تجزیه می‌شود، به‌طوری‌که معادله (۳۴) برقرار است:

$$A=UWV^T \quad (۳۴)$$

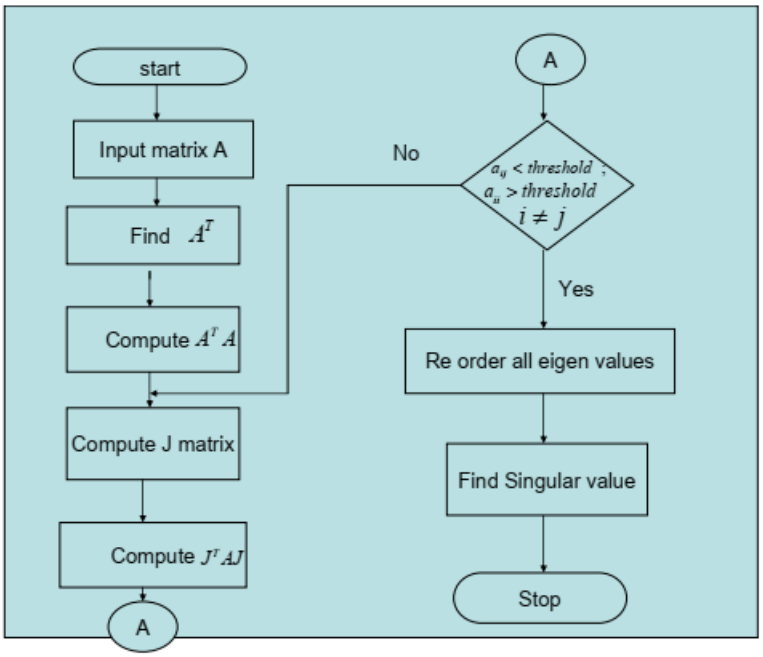
(K تعداد گروه‌های مستقل است). هدف، انتخاب بهینه بردار ضرایب در معادله (۳۴) است که این امر مستلزم یافتن معکوس اصلاح‌شده ماتریس قطری W است. بدین منظور، معکوس عناصر قطر با تکینه‌های صفر یا نزدیک به صفر $\left(1/w_j\right)=0$ برابر صفر قرار داده می‌شوند، سپس بردار ضرایب بهینه‌شده مطابق رابطه (۳۵) به دست می‌آیند. فلوچارت روش حل در شکل ۵ ارائه شده‌است.

$$X=V\left[\operatorname{diag}\left(\frac{1}{w_j}\right)\right]U^{\mathrm{T}}Y \quad (۳۵)$$

۴- نتایج و بحث

۴- ۱- نتایج تجربی

در جدول ۲ تا ۵ کلیه مشخصات و نتایج آزمایش‌های انجام‌شده روی ساختارهای آلومینیومی تک‌لایه و چندلایه تحت بار دفعی یکنواخت مکرر تا ۵ دفعه ارائه شده‌است. در این جدول مقادیر جرم خرج انفجاری، تعداد کل دفعات بارگذاری، شماره هر انفجار و همچنین بیشترین خیز دائمی ارائه شده‌است. نتایج به‌دست‌آمده از مجموعه آزمایش‌های انجام‌گرفته نشان‌دهنده پاسخ و رفتار مکانیکی ورق‌های آلومینیومی تحت بار دفعی یکنواخت مکرر است که در آن اثر تغییرات ضخامت ورق آلومینیومی در ساختارهای تک‌لایه، تعداد لایه‌ها در اهداف چندلایه و تعداد بارگذاری بررسی شده‌است. همچنین، تغییرات شدت نیروی واردشده به نمونه یا به عبارتی افزایش انرژی انتقالی به ورق و به‌تبع آن تغییر نرخ سرعت تغییر شکل نیز با تغییر جرم خرج انفجاری موردمطالعه قرار گرفته‌است. 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 بوده‌است. لازم به توضیح است که در نتایج مربوط به ساختارهای چند لایه، مقادیر بیشترین خیز برای لایه عقبی ارائه شده‌است. در جدول ارائه‌شده، در ستون کد آزمایش حرف S بیانگر ساختار تک لایه، حرف D بیانگر ساختار دو لایه، حرف T

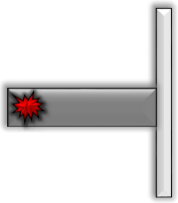


شکل ۵. فلوچارت روش حل ریاضی

Fig. 5. Flowchart of the mathematical solution method

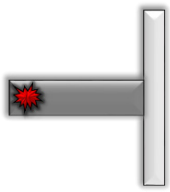
جدول ۲. نتایج آزمایش‌های تجربی برای ورق‌های تک‌لایه ۲ میلی‌متری

Table 2. Experimental results for 2 mm thick single-layered plates

شماتیک ساختار	کد آزمایش	تعداد دفعات انفجار	شماره انفجار	جرم خرج (g)	ایمپالس (N·s)	فاصله استقرار (mm)	خیز (mm)
	S2R5M1.5B1H300		۱	۱/۵	۶/۶۱	۳۰۰	۶/۶
	S2R5M1.5B2H300		۲	۱/۵	۶/۴۹	۳۰۰	۸/۱
	S2R5M1.5B3H300	۵	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		۱	۲	۸/۲۶	۳۰۰	۸/۰
	S2R5M2B2H300		۲	۲	۸/۴۳	۳۰۰	۹/۷
	S2R5M2B3H300	۵	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

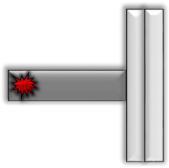
جدول ۲. نتایج آزمایش‌های تجربی برای ورق‌های تک‌لایه ۲ میلی‌متری

Table 2. Experimental results for 2 mm thick single-layered plates

شماتیک ساختار	کد آزمایش	تعداد دفعات انفجار	شماره انفجار	جرم خرج (g)	ایمپالس (N·s)	فاصله استقرار (mm)	خیز (mm)
	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

جدول ۳. نتایج آزمایش‌های تجربی برای ورق‌های تک‌لایه ۳ میلی‌متری

Table 3. Experimental results for 3 mm thick single-layered plates

شماتیک ساختار	کد آزمایش	تعداد 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

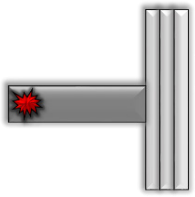
جدول ۴. نتایج آزمایش‌های تجربی برای ورق‌های دو لایه ۳+۳ میلی‌متری

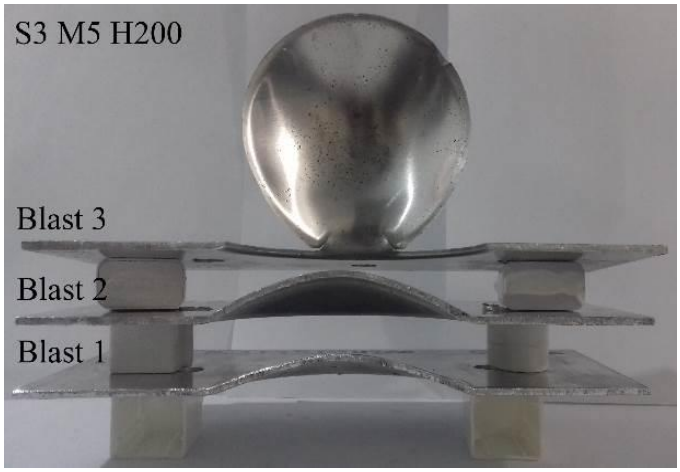
Table 4. Experimental results for 3+3 mm thick double-layered plates

شماتیک ساختار	کد آزمایش	تعداد دفعات انفجار	شماره انفجار	جرم خرج (g)	ایمپالس (N·s)	فاصله استقرار (mm)	خیز (mm)
	D33R5M5B1H200		۱	۵	۱۲/۳۴	۲۰۰	۸/۲
	D33R5M5B2H200		۲	۵	۱۲/۴۶	۲۰۰	۹/۸
	D33R5M5B3H200	۵	۳	۵	۱۲/۲۲	۲۰۰	۱۱
	D33R5M5B4H200		۴	۵	۱۲/۳۷	۲۰۰	۱۱/۳
	D33R5M5B5H200		۵	۵	۱۲/۵۴	۲۰۰	۱۱/۸
	D33R5M7.5B1H200		۱	۷/۵	۱۶/۱۱	۲۰۰	۱۱/۰
	D33R5M7.5B2H200		۲	۷/۵	۱۶/۲۵	۲۰۰	۱۳/۹
	D33R5M7.5B3H200	۵	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

جدول ۵. نتایج آزمایش‌های تجربی برای ورق‌های سه لایه ۲+۲+۲ میلی‌متری

Table 5. Experimental results for 2+2+2 mm thick triple-layered plates

شماتیک ساختار	کد آزمایش	تعداد دفعات انفجار	شماره انفجار	جرم خرج (g)	ایمپالس (N·s)	فاصله استقرار (mm)	خیز (mm)
	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



شکل ۶. نمونه‌ای از ساختارهای تک‌لایه آلومینیومی تغییر شکل‌یافته

Fig. 6. A typical deformed shape of a single-layered aluminum specimen

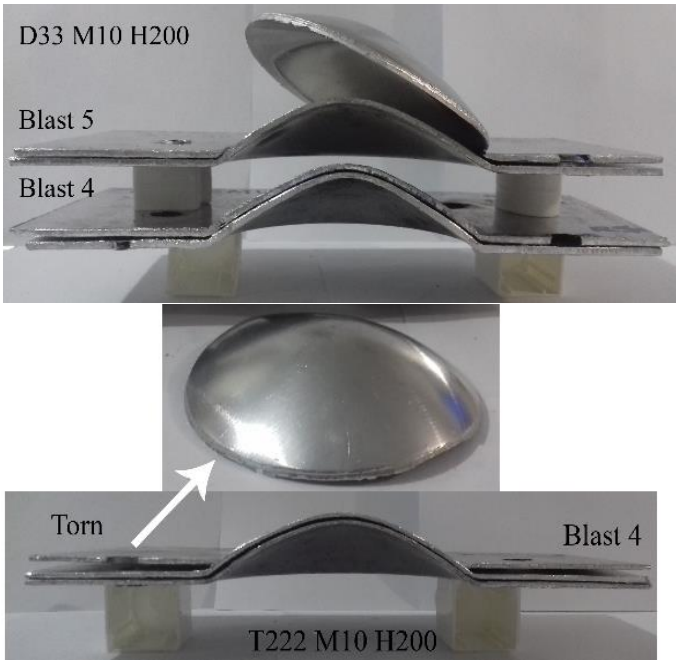
نشان‌دهنده سه‌لایه‌بودن ساختار و اعداد بعد از آن به ترتیب ضخامت هر لایه است. همچنین حرف R بیانگر تعداد کل دفعات بارگذاری، حرف M بیانگر میزان جرم خرج، حرف B بیانگر شماره بارگذاری از تعداد کل دفعات بارگذاری و حرف H بیانگر فاصله خرج انفجاری تا ورق یا همان فاصله استقرار خرج است. در ادامه، تأثیر عوامل مختلف ازجمله میزان و فاصله خرج انفجاری تا ورق، چندلایه‌بودن و ضخامت ورق و اثر تکرار بارگذاری انفجاری موردبررسی قرارگرفته‌است.

در این قسمت از تحقیق، در 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 تجزیه‌وتحلیل قرارمی‌گیرد.

مشاهدات تجربی با هدف بررسی مدهای تغییر شکل ساختارهای تک‌لایه و چندلایه آلومینیومی تحت بار دفعی یکنواخت مکرر نشان می‌دهد که در طول ۵۴ آزمایش، تمامی ساختارها به‌غیراز ۸ نمونه سطوح مختلفی از تغییر شکل غیر الاستیک بزرگ یا همان مد اول تغییر شکل را نشان دادند. نمونه‌ای از پروفیل تغییر شکل ساختارهای تک‌لایه و چندلایه آلومینیومی در شکل ۶ و شکل ۷ نشان داده شده‌است.

در این مجموعه آزمایشی، پروفیل تغییر شکل هر سه ساختار تک‌لایه، دولایه و سه‌لایه به‌صورت گنبدی شکل یا محدب (مد اول تغییر شکل [۳۶]) بوده و این بیان‌گر آن است که بار دفعی تولیدشده، به‌صورت کاملاً یکنواخت بر سطح نمونه‌های آزمایشی وارد می‌شود. شایان‌ذکر است که تغییر شکل غیرالاستیک بزرگ لایه جلویی، انرژی قابل‌توجهی از انفجار ماده منفجره را جذب می‌کند و انرژی جنبشی منتقل‌شده بر سطح لایه عقبی، موجب تغییر شکل دائمی آن می‌شود. به‌طورکلی شکل‌های ۶ و ۷ نشان می‌دهند: ۱) ناحیه گنبدی شکل از مرکز ساختار به سمت مرزهای گیردار حرکت می‌کنند ۲) سطحی از ساختار که بین دو نگه‌دارنده قرار دارد، دچار هیچ‌گونه تغییر شکل غیر الاستیک بزرگی نشده و مکان‌هایی که در آن‌ها پیچ‌ها قرار دارند، دچار هیچ‌گونه کشیدگی نشده‌اند ۳) نازک‌شدگی در طول مرزهای گیردار نشان‌دهنده تأثیر و عمل نیروهای کششی غشایی است.

علاوه بر موارد بالا، مطابق با شکل ۸ و شکل ۹ برای مواردی که در آن نمونه آزمایشی در معرض بار انفجاری مکرر قرار دارد یا شدت نیروی انفجاری افزایش یافته‌است، نازک‌شدگی و همچنین پاره‌شدن در لبه‌های گیردار مشاهده می‌شود که این مد از تغییر شکل مشابه با تحقیقات انجام‌شده توسط تیلینگ‌اسمیت و نوریک [۳۶] است. پارگی در مرزها هنگامی‌که ورق تحت بار انفجاری مکرر قرار دارد مشابه با حالت گسیختگی برشی یا shear failure است. شایان توجه است که گسیختگی برشی مشاهده‌شده در این سری از آزمایش‌ها ازنظر ماهیت کاملاً متفاوت با حالت گسیختگی

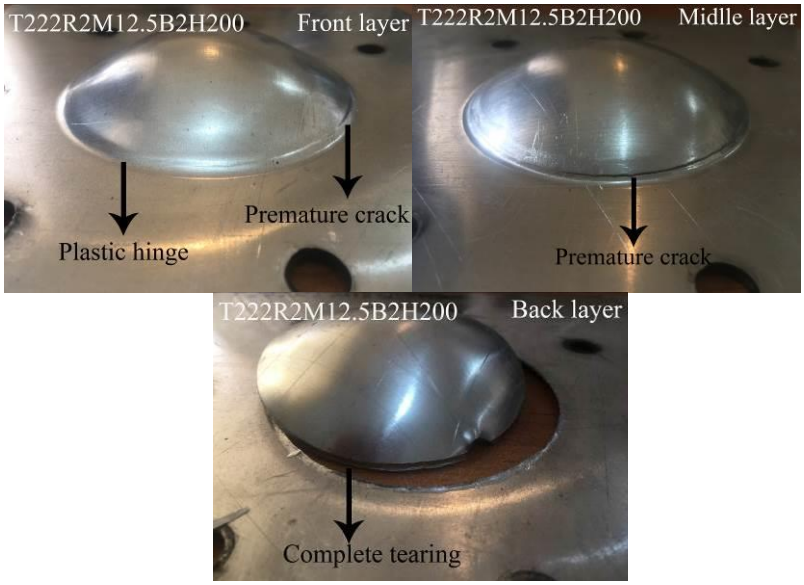


شکل ۷. نمونه‌ای از ساختارهای چندلایه آلومینیومی تغییر شکل‌یافته

Fig. 7. A typical deformed shape of a multi-layered aluminum specimen

شکل ۸. نمونه‌ای از ساختارهای دولایه آلومینیومی پاره‌شده و در معرض گلویی‌شدن

Fig. 8. Typical deformed shapes of double-layered aluminum specimens being torn and exposed to necking



شکل ۹. نمونه‌ای از ساختارهای سه‌لایه آلومینیومی پاره‌شده

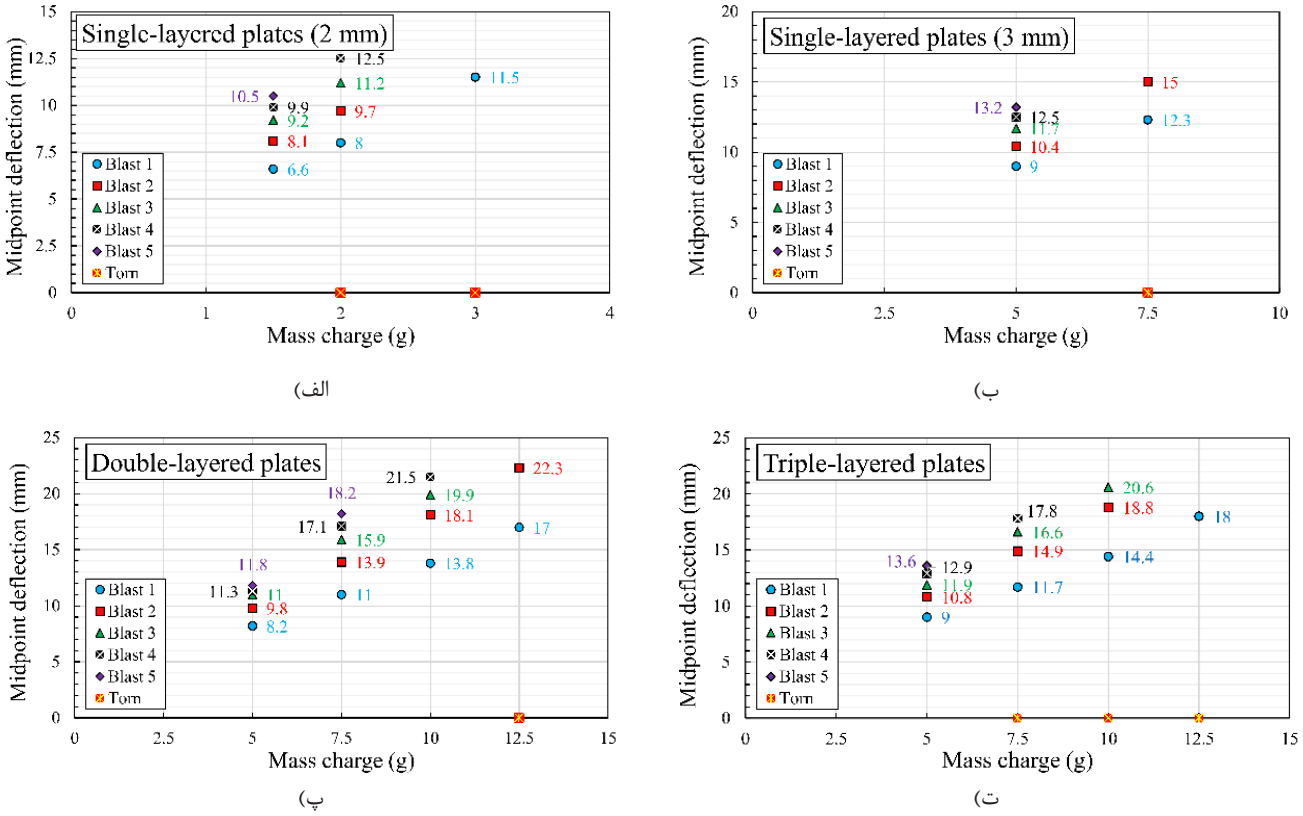
Fig. 9. A typical fractured shape of a triple-layered aluminum specimen

برشی (مد تغییر شکل سوم) می‌باشد که قبلاً توسط تیلینگ‌اسمیت و نوریک [۳۶] تعریف شده‌است. این به دلیل آن است که نمونه پاره‌شده با کاهش تدریجی جابجایی در منطقه مرکزی همراه بوده‌است. همچنین در این سری از آزمایش‌ها، مد تغییر شکل برش کششی یا tensile shearing که به‌طورمعمول ایمپالس‌های پایین در بارگذاری انفجاری منفرد رخ می‌دهد، مشاهده نشد.

۴- ۲- تحلیل آماری و کمی نتایج تجربی

۴- ۲- ۱- رابطه بین بیشترین خیز دائمی و جرم خرج

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 در این بخش، جرم خرج ۱ گرم نانل لحاظ نشده‌است). به همین منظور در اولین گام، تغییرات بیشترین خیز دائمی ورق‌های تک‌لایه آلومینیومی برحسب جرم خرج انفجاری با توجه به جدول ۲ و ۳ و شکل ۱۰ تحلیل می‌گردد. در حالت کلی، همان‌طور که انتظار می‌رفت، بیشترین خیز دائمی ورق‌های تک‌لایه آلومینیومی با بالارفتن میزان خرج انفجاری و به‌تبع آن بالارفتن سطح انرژی انتقالی، به‌صورت تدریجی افزایش می‌یابد به‌طوری‌که مطابق با جداول ۲ و ۳، 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 به ترتیب در جرم خرج‌های ۲ گرم و ۳ گرم در مقایسه با جرم خرج ۱/۵ گرم می‌شود. همچنین این مقادیر برای جرم 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 به‌دست‌آمده برای ورق‌های تک لایه 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 در جرم خرج ۷/۵ گرم می‌شود؛ هرچند 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 در جرم خرج ۷/۵

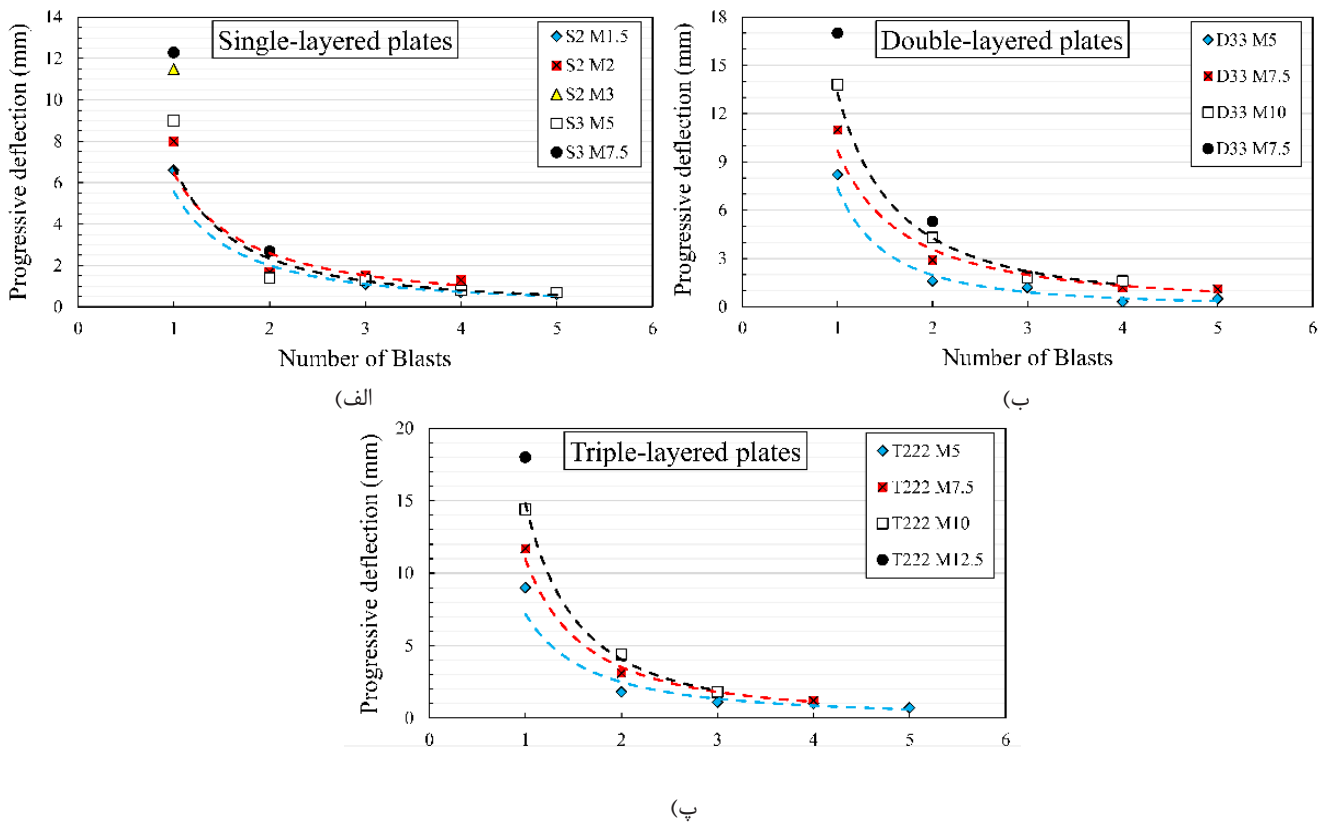


شکل ۱۰. تغییرات بیشترین خیز دائمی برحسب جرم خرج: الف) ورق تک‌لایه ۲ میلی‌متری، ب) ورق تک‌لایه ۳ میلی‌متری، پ) ورق دولایه با ضخامت ۳+۳ میلی‌متر، ت) ورق سه‌لایه با ضخامت ۲+۲+۲ میلی‌متر

Fig. 10. Variations of maximum permanent deflection versus charge mass: a) 2 mm thick single-layered plate; b) 3 mm thick single-layered plate; c) 3+3 mm thick double-layered plate; d) 2+2+2 mm thick triple-layered plate

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.

نتایج برای ساختارهای چندلایه نیز مشابه با ورق‌های تک‌لایه با توجه به جدول ۴ و ۵ تحلیل می‌گردد. در حالت کلی، بیشترین خیز دائمی ورق‌های چند لایه آلومینیومی نیز با بالارفتن میزان خرج انفجاری و به‌تبع آن بالا رفتن سطح انرژی انتقالی، به‌صورت تدریجی افزایش می‌یابد به‌طوری‌که مطابق با این جداول، 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 دو لایه 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 در جرم خرج‌های ۷/۵ گرم می‌شود. در مقابل، مقایسه نتایج تجربی به‌دست‌آمده برای ورق‌های سه لایه 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



شکل ۱۱. تغییرات خیز دائمی جلورونده (افزایشی) برحسب تعداد دفعات انفجار: الف) ورق تک‌لایه ۲ و ۳ میلی‌متری، ب) ورق دولایه با ضخامت ۳+۳ میلی‌متر، پ) ورق سه‌لایه با ضخامت ۲+۲+۲ میلی‌متر

Fig. 11. Variations of progressive deflection versus the number of blasts: a) 2 mm and 3 mm thick single-layered plates; b) 3+3 mm thick double-layered plate; c) 2+2+2 mm thick triple-layered plate.

۱۰۰/۰٪ 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 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٪ در جرم خرج‌های ۷/۵ گرم می‌شود و ساختار در جرم خرج‌های بالاتر از ۵ گرم برخلاف ساختارهای دو لایه قابلیت تحمل انفجار پنجم را ندارد.

۴- ۲- ۲- رابطه بین تعداد بارگذاری و بیشترین‌خیز دائمی

مطابق با جدول ۲ و ۳ و شکل ۱۱، مقایسه نتایج تجربی برای ورق تک لایه ۲ میلی‌متری هنگامی‌که جرم خرج انفجاری ۱/۵ گرم است، نشان می‌دهد که این ساختار ۴ دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ۲۲/۷٪، ۳۹/۴٪، 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 ۲۲/۷٪، ۱۳/۶٪، ۷/۶٪ 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 کار سختی ماده ورق بعد از هر بار بارگذاری مکرر دانست. میزان کار سختی و تنش پسماند با هر بار بارگذاری انفجاری در ورق افزایش می‌یابد و انباشته می‌گردد و سبب کاهش روند افزایشی تغییر

جابجایی نقطه میانی ورق می‌گردد. همچنین، مقایسه نتایج تجربی برای این ساختار هنگامی‌که جرم خرج انفجاری ۲ گرم است، نشان می‌دهد که ورق آلومینیوم ۲ میلی‌متری ۳ 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 و ۳، مقایسه نتایج تجربی برای ورق تک لایه ۳ میلی‌متری هنگامی‌که جرم خرج انفجاری ۵ گرم است، نشان می‌دهد که ورق آلومینیوم ۳ میلی‌متری ۴ 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 هنگامی‌که جرم خرج انفجاری ۷/۵ گرم است، نشان می‌دهد که ورق آلومینیوم ۳ میلی‌متری ۱ دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ٪۲۲/۰ در دفعه دوم می‌شود.

مطابق با جدول ۴، نتایج تجربی بیان‌گر آن است که ساختار دو لایه آلومینیومی با ضخامت ۶ (۳+۳) 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 هنگامی‌که جرم خرج انفجاری ۵ گرم است، نشان می‌دهد که ورق‌های دو لایه با ضخامت ۳+۳ میلی‌متر ۴ دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ٪۱۹/۵، ٪۳۴/۱، ٪۳۷/۸ و ٪۴۳/۹ 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 ٪۱۹/۵، ٪۱۲/۲، ٪۲/۷ و ٪۴/۴ نسبت به دفعه قبلی شده و روند نمایی کاهشی را حفظ می‌کند. همچنین برای این ساختار هنگامی‌که جرم خرج انفجاری ۷/۵ گرم است، نشان می‌دهد که ورق‌های دو لایه با ضخامت ۳+۳ میلی‌متر همچنان ۴ دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ٪۲۶/۳، ٪۴۴/۵، ٪۵۵/۵ و ٪۶۵/۴ 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 ٪۲۶/۳، ٪۱۴/۴، ٪۷/۵ و ٪۶/۴ نسبت به دفعه قبلی شده و روند نمایی کاهشی را حفظ می‌کند. همچنین برای این ساختار هنگامی‌که جرم خرج انفجاری ۱۰ گرم است، نشان می‌دهد که ورق‌های دو لایه با ضخامت ۳+۳ میلی‌متر تنها ۳ دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ٪۳۱/۲، ٪۴۴/۲ و ٪۵۵/۸ به ترتیب در دفعات دوم، سوم و چهارم می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ٪۳۱/۲، ٪۹/۹ و ٪۸/۰ نسبت به دفعه قبلی شده و روند نمایی کاهشی را حفظ می‌کند. درنهایت نتایج نشان می‌دهند که برای ساختار دو لایه هنگامی‌که جرم خرج انفجاری ۱۲/۵ گرم است، این ساختار تنها ۱ دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ٪۳۱/۲ در دفعه دوم می‌شود.

در مقابل، مطابق با جدول ۵، این نتیجه حاصل می‌شود که ساختار سه‌لایه آلومینیومی با ضخامت ۶ (۲+۲+۲) میلی‌متر قابلیت تحمل بارگذاری مکرر برای دفعه سوم و دوم را به ترتیب در جرم خرج‌های ۱۰ و ۱۲/۵ گرم ندارد که نشان می‌دهد در مقایسه با ساختارهای دو لایه یک دفعه بارگذاری انفجاری کمتری تحمل می‌کند و افزایش تعداد لایه‌ها از این دیدگاه مؤثر نیست. این در حالی است که مقایسه نتایج تجربی برای ساختار سه لایه هنگامی‌که جرم خرج انفجاری ۵ گرم است، نشان می‌دهد که ساختار سه‌لایه با ضخامت ۲+۲+۲ میلی‌متر ۴ دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ٪۲۰/۰، ٪۳۲/۲، ٪۴۳/۳ و ٪۵۱/۱ 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 ٪۲۰/۰، ٪۱۰/۲، ٪۸/۴ و ٪۵/۴ نسبت به دفعه قبلی شده و روند نمایی کاهشی را حفظ می‌کند. همچنین برای این ساختار هنگامی‌که جرم خرج انفجاری ۷/۵ گرم است، نشان می‌دهد که ورق‌های سه‌لایه با ضخامت ۲+۲+۲ میلی‌متر برخلاف ساختارهای دولایه تنها ۳ دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ٪۲۷/۴، ٪۴۱/۹ و ٪۵۲/۱ به ترتیب در دفعات دوم، سوم و چهارم می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ٪۲۷/۴، ٪۱۱/۴ و ٪۷/۲ نسبت به دفعه قبلی شده و روند نمایی کاهشی را حفظ می‌کند. همچنین برای این ساختار هنگامی‌که جرم خرج انفجاری ۱۰ گرم است،

جدول ۶. نتایج تجربی بیشتر برای ساختارهای تک و چندلایه

Table 6. Further experimental results for single- and multi-layered plates

کد آزمایش	تعداد دفعات انفجار	شماره انفجار	جرم خرج (g)	فاصله استقرار (mm)	خیز (mm)
S3R3M5B1H200		۱	۵	۲۰۰	۱۸/۲
S3R3M5B2H200	۳	۲	۵	۲۰۰	۲۱/۸
S3R3M5B3H200		۳	۵	۲۰۰	پارگی
D33R5M10B1H300		۱	۱۰	۳۰۰	۶/۸
D33R5M10B2H300		۲	۱۰	۳۰۰	۸/۳
D33R5M10B3H300	۵	۳	۱۰	۳۰۰	۹/۱
D33R5M10B4H300		۴	۱۰	۳۰۰	۹/۹
D33R5M10B5H300		۵	۱۰	۳۰۰	۱۰/۸
T222R5M10B1H300	۵	۱	۱۰	۳۰۰	۷/۶
T222R5M10B2H300		۲	۱۰	۳۰۰	۹/۰
T222R5M10B3H300		۳	۱۰	۳۰۰	۹/۹
T222R5M10B4H300		۴	۱۰	۳۰۰	۱۰/۷
T222R5M10B5H300		۵	۱۰	۳۰۰	۱۱/۶

نشان می‌دهد که ورق‌های سه لایه با ضخامت ۲+۲+۲ میلی‌متر برخلاف ساختارهای دو لایه تنها ۲ دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ٪۳۰/۶ و ٪۴۳/۱ به ترتیب در دفعات دوم و سوم می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ٪۳۰/۶ و ٪۹/۶ نسبت به دفعه قبلی شده و روند نمایی کاهشی را حفظ می‌کند. درنهایت نتایج نشان می‌دهند که برای ساختار سه لایه هنگامی‌که جرم خرج انفجاری ۱۲/۵ گرم است، این ساختار بارگذاری مکرر را تحمل نمی‌کند و مقاومت انفجاری ضعیف‌تری در مقایسه با ساختار دو لایه در برابر بار انفجاری مکرر دارد.

۴- ۲- ۳- رابطه بین فاصله استقرار خرج و بیشترین خیز دائمی

اکنون، پس از تحلیل کمی نتایج تجربی به‌دست‌آمده برای ساختارهای تک‌لایه و چندلایه آلومینیومی تحت بار دفعی مکرر و بررسی اثر بار مکرر روی بیشترین خیز ساختار، به تجزیه‌وتحلیل اثر فاصله استقرار خرج از سطح نمونه روی خیز دائمی با انجام آزمایش روی ساختارهای تک لایه و چند لایه آلومینیومی پرداخته می‌شود. بدین منظور، مطابق با جدول ۶، سیزده آزمایش جدید روی ورق تک لایه ۳ میلی‌متری تحت بار دفعی حاصل از انفجار خرج ۵ گرمی در فاصله ۲۰۰ میلی‌متری از سطح ورق و ساختارهای دو لایه ۶ (۳+۳) میلی‌متری و سه لایه ۶ (۲+۲+۲) میلی‌متری تحت بار دفعی حاصل از انفجار خرج ۱۰ گرمی در فاصله ۲۰۰ میلی‌متری از سطح ورق انجام شد.

نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۲ و جدول ۶ برای ساختارهای تک‌لایه و در فاصله استقرارهای ۳۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متر نشان می‌دهد که افزایش ۱۰۰ میلی‌متری فاصله خرج از سطح ورق، منجر به کاهش خیز دائمی ورق آلومینیومی ۳ میلی‌متری به میزان ٪۵۰/۵ و ٪۵۲/۳ به ترتیب در انفجارهای اول و دوم می‌گردد. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که افزایش ٪۵۰ درصدی فاصله استقرار موجب می‌شود تا نمونه آزمایشی بتواند بار انفجاری مکرر را تا دفعات بیشتری تحمل کند. همچنین نتایج به‌دست‌آمده برای ساختارهای

دولایه که افزایش ۱۰۰ میلی‌متری فاصله خرج، منجر به کاهش خیز دائمی ساختار دولایه به میزان ٪۶۱/۸، ٪۶۷/۵، ٪۷۴/۷، ٪۷۲/۷ و ٪۶۸/۵ به ترتیب در انفجارهای اول، دوم، سوم، چهارم و پنجم می‌گردد. این مقادیر برای ساختارهای سه‌لایه به ترتیب برابر است ٪۵۳/۹، ٪۶۵/۶، ٪۶۷/۷ و ٪۶۶/۴.

۴- ۲- ۴- رابطه بین تعداد لایه و بیشترین خیز دائمی

اکنون، پس از بررسی اثر فاصله استقرار خرج روی بیشترین خیز ساختارهای تک‌لایه و چندلایه آلومینیومی تحت بار دفعی منفرد و مکرر، به تجزیه‌وتحلیل افزایش تعداد لایه در ساختارهای چند لایه روی خیز دائمی پرداخته می‌شود. بدین منظور با توجه به جداول ۴ و ۵، تغییرات بیشترین خیز دائمی ساختارهای چندلایه برحسب تعداد انفجار به ترتیب در جرم خرج‌های ۵، ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵ گرم مقایسه می‌شود.

مطابق با جداول ۴ و ۵، برای جرم خرج ۵ گرم، افزایش تعداد لایه منجر به کاهش مقاومت انفجاری سازه و افزایش خیز ساختار به میزان ٪۹/۸، ٪۱۰/۲، ٪۱۱/۲، ٪۱۴/۲ و ٪۱۵/۳ به ترتیب برای انفجارهای اول، دوم، سوم، چهارم و پنجم می‌گردد و این نتایج همچنین نشان می‌دهد که ممکن است ساختارهای سه لایه هم‌جنس در انفجار اول عملکرد انفجاری مناسبی در مقایسه با ساختارهای دولایه داشته باشد اما با بالارفتن تعداد انفجار، مقاومت انفجاری آن‌ها کاهش می‌یابد و این پدیده به‌این‌علت است که با افزایش تعداد لایه در ساختارهای هم‌جنس، ضخامت هر لایه کاهش می‌یابد و این موضوع باعث کاهش مقاومت خمشی سازه می‌گردد.

همچنین، برای جرم خرج ۷/۵ و ۱۰ گرم، افزایش تعداد لایه همچنان منجر به کاهش مقاومت انفجاری سازه و افزایش خیز ساختار می‌شود؛ اما رفتاری کاملاً متفاوت با هنگامی‌که ورق تحت انفجار خرج ۵ گرمی قرار دارد از خود نشان می‌دهد. برای بررسی این پدیده، مشابه با قسمت‌های قبلی، نتایج به‌طور دقیق‌تری تحلیل می‌گردد. برای جرم خرج ۷/۵ گرم، افزایش تعداد لایه منجر به کاهش مقاومت انفجاری سازه و افزایش خیز ساختار به میزان ٪۶/۵، ٪۶/۴، ٪۴/۴ و ٪۴/۱ به ترتیب برای انفجارهای اول، دوم، سوم و چهارم می‌گردد. همچنین برای جرم خرج ۱۰ گرم، افزایش تعداد لایه منجر به کاهش مقاومت انفجاری سازه و افزایش خیز ساختار به میزان ٪۴/۳، ٪۳/۹ و ٪۳/۵ به ترتیب برای انفجارهای اول، دوم و سوم می‌گردد. این بدان معناست که با افزایش جرم خرج به‌تبع آن افزایش ایمپالس انفجار، ساختارهای چند لایه با تعداد لایه بیشتر مقاومت انفجاری بهتری از خود نشان می‌دهند و دیگر یک رابطه صعودی بین اختلاف بیشترین خیز دائمی ساختارهای چند لایه و تعداد انفجار برقرار نیست.

۴- ۲- ۵- رابطه بین ایمپالس و جرم خرج

پس از تحلیل آماری نتایج تجربی به‌دست‌آمده در جداول ۲ تا ۵، یکی از مهم‌ترین مسائل 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 به ترتیب در شکل ۱۲ و شکل ۱۳ نشان داده شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که داده‌های تجربی انحراف بسیار اندک و قابل‌اغماضی از دو رابطه خطی برازش شده 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 در این بخش، ایمپالس ناشی از انفجار ۱ گرم نائل به علت محاسبه میزان ایمپالس در حالت کلی، در مقدار ایمپالس لحاظ شده‌است.

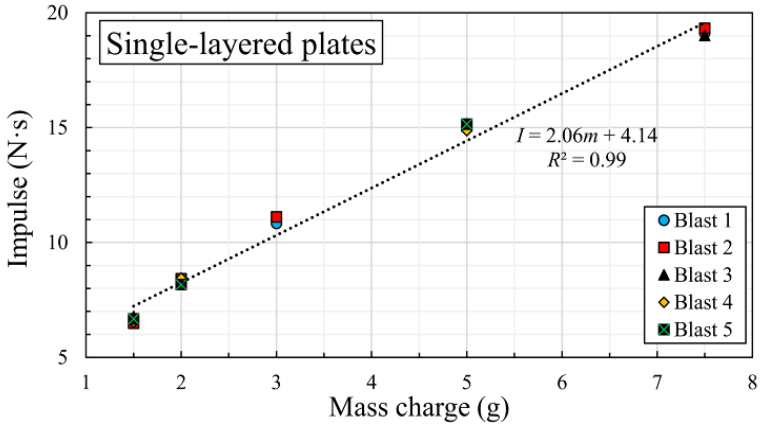
۴- ۲- ۶- رابطه بین ایمپالس و تعداد دفعات بارگذاری

همان‌طور که در بخش تحلیل مودهای تغییر شکل نمونه‌های آزمایشی نشان داده شد، ورق‌های آلومینیومی هنگام قرارگرفتن در معرض بار انفجاری یکنواخت مکرر، دچار تغییر شکل غیر الاستیک بزرگ شدند و پروفیل تغییر شکل آن‌ها به‌صورت گنبدی شکل بود. در شکل ۱۴ و شکل ۱۵ به ترتیب مقدار ایمپالس بر حسب دفعات بارگذاری برای ساختارهای تک‌لایه و چندلایه نمایش داده شده‌است که بازه تغییرات جرم خرج در این نمودارها از ۵ گرم تا ۵/۱۲ گرم می‌باشد.

نتایج نشان می‌دهد که تغییرات بسیار کمی در ایمپالس منتقل‌شده به نمونه آزمایشی برای هر تکرار انفجار در این سری از آزمایش‌ها وجود دارد و مشخص است که خطوط برازش‌شده، 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 شده‌است.

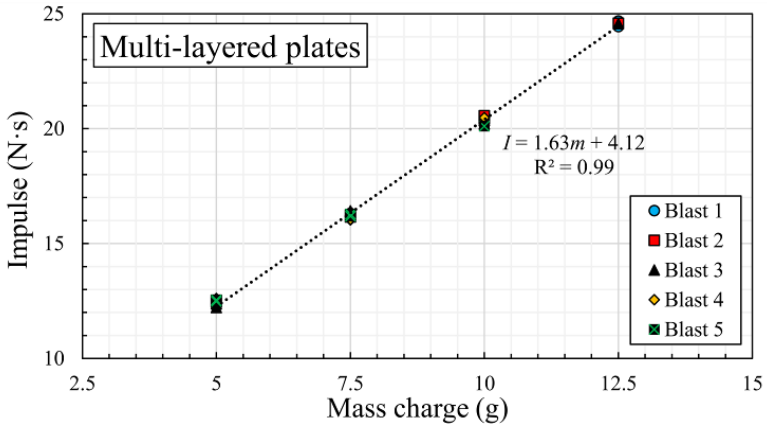
۴- ۳- نتایج مدل‌سازی عددی

در بخش سوم، دو عدد بی‌بعد $\psi_{c,s}^{r}$ و $\mu_{c,m}^{r}$ به ترتیب برای پیش‌بینی بیشترین خیز دائمی ورق‌های دایره‌ای تک‌لایه و چندلایه تحت بار دینامیکی



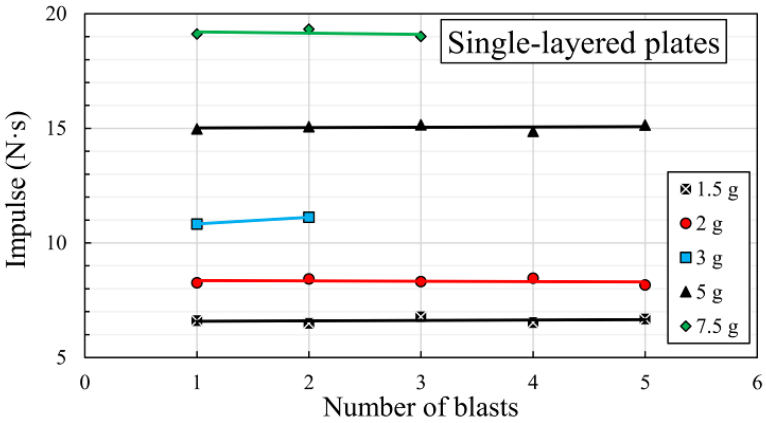
شکل ۱۲. نمودار میزان ایمپالس برحسب مقدار جرم خرج برای ساختارهای تک‌لایه در فاصله استقرار ۳۰۰ میلی‌متر

Fig. 12. The graph of impulse versus charge mass for single-layered specimens at the stand-off distance of 300 mm



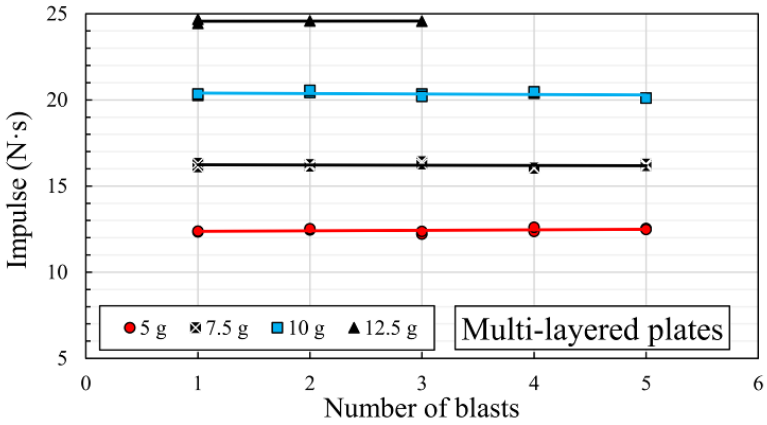
شکل ۱۳. نمودار میزان ایمپالس برحسب مقدار جرم خرج برای ساختارهای چندلایه در فاصله استقرار ۲۰۰ میلی‌متر

Fig. 13. The graph of impulse versus charge mass for multi-layered specimens at the standoff distance of 200 mm



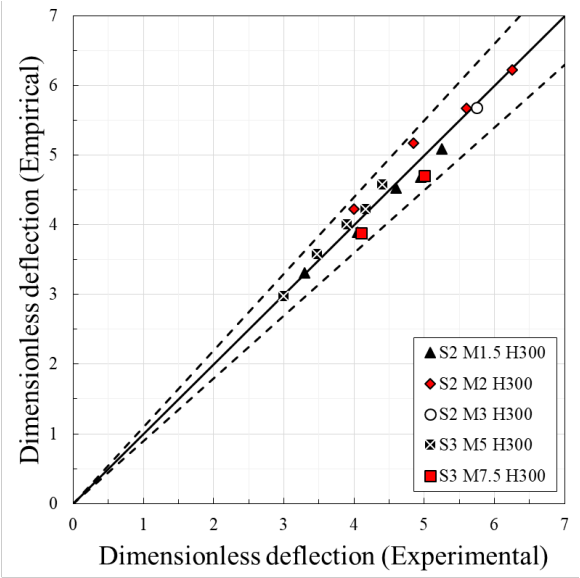
شکل ۱۴. نمودار میزان ایمپالس برحسب تعداد دفعات بارگذاری برای ساختارهای تک‌لایه در فاصله استقرار ۳۰۰ میلی‌متر

Fig. 14. The graph of impulse versus the number of blasts for single-layered specimens at the standoff distance of 300 mm



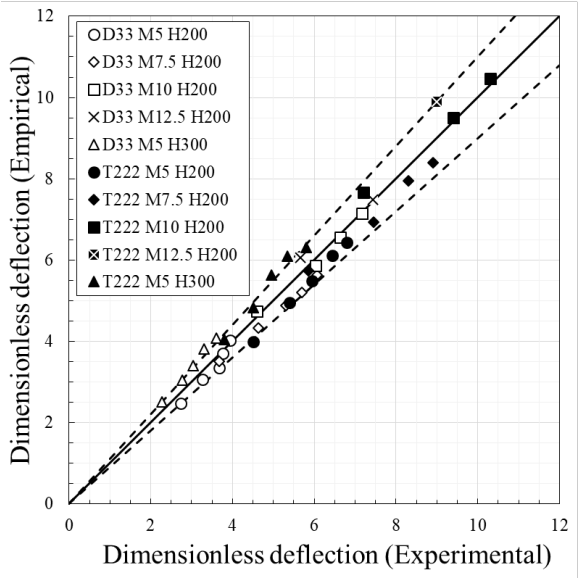
شکل ۱۵. نمودار میزان ایمپالس برحسب تعداد دفعات بارگذاری برای ساختارهای چندلایه در فاصله استقرار ۲۰۰ میلی‌متر

Fig. 15. The graph of impulse versus the number of blasts for multi-layered specimens at the standoff distance of 200 mm



شکل ۱۶. مقایسه بین پیش‌بینی مدل تجربی در معادله ۳۶ و مقادیر تجربی برای ساختارهای تک‌لایه تحت بارگذاری انفجاری یکنواخت مکرر

Fig. 16. The comparison between the predicted results by Eq. (36) and corresponding experimental results for single-layered plates under repeated blast loading



شکل ۱۷. مقایسه بین پیش‌بینی مدل تجربی در معادله ۳۷ و مقادیر تجربی برای ساختارهای چندلایه تحت بارگذاری انفجاری یکنواخت مکرر

Fig. 17. The comparison between the predicted results by Eq. (37) and corresponding experimental results for multi-layered plates under repeated blast loading

یکنواخت مکرر ارائه شدند. در اولین گام از بخش حاضر، داده‌های تجربی موجود در جدول ۲ تا ۵ به فرم سه دو عدد بی‌بعد $\psi_{c,s}^{r}$ و $\mu_{c,m}^{r}$ تبدیل شدند. لازم به توضیح است که برای محاسبه عدد بی‌بعد نرخ کرنش از ضرایب موجود در مرجع [۳۰] برای ورق آلومینیومی استفاده شد و مقدار تنش تسلیم ورق نیز ۱۱۰ مگا پاسکال در نظر گرفته شد. در گام بعدی، روش تجزیه مقادیر منفرد برای تعیین ضرایب مجهول معادلات (۱۶) و (۱۸) و درنهایت استخراج معادلات تجربی برای پیش‌بینی بیشترین خیز دائمی ورق‌های دایره‌ای تک‌لایه و چندلایه تحت بار دینامیکی یکنواخت مکرر بکار گرفته شد. نتایج به‌دست‌آمده از روش ریاضی پیشنهادی برای ضرایب مجهول در معادلات بالا، به‌صورت معادلات (۳۶) و (۳۷) است:

$$\frac{W_0}{H} = 0.0017 \cdot \psi_{c,s}^{r} \qquad (۳۶)$$

$$\frac{W_0}{H_b} = 0.027 \cdot \mu_{c,m}^{r} \qquad (۳۷)$$

که در آن

$$\psi_{c,s}^{r} = \left(\frac{R}{H}\right)^{1.95} \cdot \left(n\frac{\rho V_0^{2}}{\sigma_0}\right)^{0.26} \cdot \left(\frac{1}{\xi}\right)^{2.29} \qquad (۳۸)$$

$$\mu_{c,m}^{r} = \left(\frac{R}{H_b}\right)^{0.87} \cdot \left(\frac{n}{M} \cdot \frac{\rho_b V_{0,b}^{2}}{\sigma_{0,b}}\right)^{0.29} \cdot \left(\frac{1}{\xi_b}\right)^{2.94} \qquad (۳۹)$$

برای تمامی نتایج تجربی ارائه‌شده در جداول ۲ تا ۶ برای ورق‌های دایره‌ای تک‌لایه و چندلایه تحت بار دینامیکی یکنواخت مکرر، خیز نرمال‌شده (نسبت خیز به ضخامت ورق) به‌دست‌آمده از پیش‌بینی مدل‌های تجربی ارائه‌شده در معادلات (۳۶) و (۳۷) برحسب نتایج تجربی متناظر با آن‌ها به ترتیب در شکل ۱۶ و شکل ۱۷ نمایش داده شده‌است. در این اشکال، خط ممتد مشکی‌رنگ با شیب ۱ نشان‌دهنده تطابق کامل نتایج مدل‌سازی و تجربی ارائه‌شده در تحقیق حاضر است. همچنین، محدوده بین دو خط‌چین مشکی‌رنگ بافاصله، محدوده‌ای است که در آن خطای پیش‌بینی کمتر از ۱۰٪ است و جهت سنجش میزان دقت مدل تجربی

پیشنهادی رسم شده‌است. مطابق با شکل‌های ارائه‌شده، تطابق خوبی بین نتایج پیش‌بینی مدل و مقادیر تجربی مشاهده می‌شود به‌طوری‌که برای ساختارهای تک‌لایه و چندلایه، به ترتیب ۱۰۰٪ و ۹۷٪ از کل نقاط تجربی در محدوده خطای کمتر از ۱۰٪ قرار دارند.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی تجربی و مدل‌سازی پاسخ دینامیکی و تغییر شکل پلاستیک ورق‌های دایره‌ای تک و چندلایه آلومینیومی در برابر بارگذاری انفجاری مکرر پرداخته‌شده است. نتایج نشان می‌دهد که خیز دائمی ورق در نقطه میانی با افزایش تعداد بارگذاری انفجاری، افزایش می‌یابد به‌طوری‌که بیشترین مقدار در اولین بارگذاری و انفجار رخ می‌دهد و به‌تدریج از روند افزایشی آن کاهش می‌یابد و یک روند نمایی نزولی را طی می‌کند. دلیل این پدیده را می‌توان ناشی از کار سختی حاصل از هر دفعه بارگذاری مکرر دانست. میزان کار سختی و تنش پسماند با هر دفعه بارگذاری انفجاری در ورق افزایش‌یافته و انباشته می‌گردد و سبب کاهش روند افزایشی جابجایی نقطه میانی ورق می‌گردد. سایر نتایج تجربی به‌صورت زیر خلاصه می‌گردد:

- 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 به‌طوری‌که جرم خرج انفجاری و بیشترین خیز دائمی با یکدیگر رابطه مستقیم و خطی به‌صورت تک‌مرحله‌ای دارند
- ساختار سه لایه در جرم خرج‌های بالاتر از ۵ گرم برخلاف ساختارهای دولایه قابلیت تحمل انفجار پنجم را ندارد.
- ساختار دولایه آلومینیومی با ضخامت ۶ (۳+۳) میلی‌متر قابلیت تحمل بارگذاری مکرر برای دفعه چهارم و دوم را به ترتیب در جرم خرج‌های ۱۰ و ۱۲/۵ گرم ندارد. همچنین برای ساختار دولایه هنگامی‌که جرم خرج انفجاری ۱۲/۵ گرم است، این ساختار تنها ۱ دفعه بارگذاری مکرر را تحمل می‌کند و افزایش دفعات بارگذاری، منجر به افزایش خیز ساختار به میزان ۳۱/۲٪ در دفعه دوم می‌شود.
- ساختار سه لایه آلومینیومی با ضخامت ۶ (۲+۲+۲) میلی‌متر قابلیت تحمل بارگذاری مکرر برای دفعه سوم و دوم را به ترتیب 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 مؤثر نیست. همچنین برای ساختار سه‌لایه هنگامی‌که 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.
- نتایج تجربی برای جرم خرج ۵ گرم نشان داد که افزایش تعداد لایه منجر به کاهش مقاومت انفجاری سازه و افزایش خیز می‌گردد.
- این نتایج همچنین نشان می‌دهد که ممکن است ساختارهای سه لایه هم‌جنس در انفجار اول عملکرد انفجاری مناسبی در مقایسه با ساختارهای دو لایه داشته باشد اما با بالارفتن تعداد انفجار، مقاومت انفجاری آن‌ها کاهش می‌یابد.
- 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 هنگامی‌که ورق تحت انفجار خرج ۵ گرمی قرار دارد از خود نشان می‌دهد به‌طوری‌که 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.

علاوه بر این، در تحقیق حاضر سعی شد تا برخلاف روند موجود در ادبیات تحقیق برای ارائه روابط تجربی به‌منظور پیش‌بینی بیشترین خیز دائمی ورق‌های دایره‌ای تک‌لایه و چندلایه تحت بار انفجاری یکنواخت مکرر، یک بیان مناسب برای پیشنهاد اعداد بی‌بعد بر مبنای تحلیل ابعادی ارائه شود. به همین جهت در اولین قدم، معادلات حاکم بر ورق چهارگوش تحت بار دینامیکی نوشته و اثرات نیروهای غشایی به آن افزود شد. در گام بعدی، با تعریف پارامترهایی بی‌بعد برای بیشترین خیز دائمی، هندسه ساختار، گشتاورهای خمشی و نیروهای غشایی، این معادله به فرم بی‌بعد تبدیل شد. درنهایت، معادله دیفرانسیل بی‌بعدشده بیانگر سه جنبه تأثیرگذار بر پاسخ دینامیکی سازه، یعنی؛ هندسه ساختار، نسبت بار دینامیکی اعمالی به مقاومت ماده و توانایی مقاومت دینامیکی ماده در برابر تغییر شکل پلاستیک بود که هرکدام از این جنبه‌ها به‌عنوان یک عدد بی‌بعد بیان شد. در ادامه، با تغییر عدد بی‌بعد مربوط به هندسه چهارگوش به دایره‌ای، اعداد بی‌بعد برای ورق‌های تک‌لایه دایره‌ای تک‌لایه و چندلایه تحت بار انفجاری یکنواخت مکرر ارائه شد. شایان توجه است که مدل حاضر تنها قادر به پیش‌بینی داده‌های تجربی پاره نشده‌است. نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان داد که

تطابق خوبی بین نتایج پیش‌بینی مدل و مقادیر تجربی وجود دارد به‌طوری‌که برای ساختارهای تک‌لایه و چندلایه، به ترتیب ۱۰۰٪ و ۹۷٪ از کل نقاط تجربی در محدوده خطای کمتر از ۱۰٪ قرار دارند.

منابع

[1] H. Babaei, T.M. Mostofi, S.H. Sadraei, Effect of gas detonation on response of circular plate-experimental and theoretical, Struct Eng Mech, 56(4) (2015) 535-548.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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, 234(5) (2020) 1102-1111.

[6] N. Jones, Structural impact, Cambridge university press, 2012.

[7] S.C.K. Yuen, G. Nurick, G. Langdon, Y. Iyer, Deformation of thin plates subjected to impulsive load: Part III–an update 25 years on, International Journal of Impact Engineering, 107 (2017) 108-117.

[8] Y.-P. Zhao, Suggestion of a new dimensionless number for dynamic plastic response of beams and plates, Archive of Applied Mechanics, 68(7-8) (1998) 524-538.

[9] R. Rajendran, J. Lee, Blast loaded plates, Marine Structures, 22(2) (2009) 99-127.

[10] N. Rudrapatna, R. Vaziri, M. Olson, Deformation and failure of blast-loaded square plates, International journal of impact engineering, 22(4) (1999) 449-467.

[11] N. Rudrapatna, R. Vaziri, M. Olson, Deformation and failure of blast-loaded stiffened plates, International Journal of Impact Engineering, 24(5) (2000) 457-474.

[12] S.C.K. Yuen, G. Nurick, W. Verster, N. Jacob, A. Vara, V. Balden, D. Bwalya, R. Govender, M. Pittermann, Deformation of mild steel plates subjected to large-scale explosions, International journal of impact engineering, 35(8) (2008) 684-703.

[13] M. Rezasefat, T. Mirzababaie Mostofi, H. Babaei, M. Ziya-Shamami, M. Alitavoli, 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, 233(7) (2019) 1449-1471.

[14] M. Rezasefat, T.M. Mostofi, T. Ozbakkaloglu, Repeated localized impulsive loading on monolithic and multi-layered metallic plates, Thin-Walled Structures, 144 (2019) 106332.

[15] T. Børvik, A. Hanssen, M. Langseth, L. Olovsson, Response of structures to planar blast loads–A finite element engineering approach, Computers & Structures, 87(9-10) (2009) 507-520.

[16] I.G. Cullis, J. Schofield, A. Whitby, Assessment of blast loading effects–Types of explosion and loading effects, International journal of pressure vessels and piping, 87(9) (2010) 493-503.

[17] C. Soutis, G. Mohamed, A. Hodzic, Modelling the structural response of GLARE panels to blast load, Composite Structures, 94(1) (2011) 267-276.

[18] K. Spranghers, I. Vasilakos, D. Lecompte, H. Sol, J. Vantomme, Numerical simulation and experimental validation of the dynamic response of aluminum plates under free air explosions, International Journal of Impact

Engineering, 54 (2013) 83-95.

[19] N. Mehreganian, L. Louca, G. Langdon, R. Curry, N. Abdul-Karim, The response of mild steel and armour steel plates to localised air-blast loading-comparison of numerical modelling techniques, International Journal of Impact Engineering, 115 (2018) 81-93.

[20] T.F. Henchie, S.C.K. Yuen, G. Nurick, N. Ranwaha, V. Balden, The response of circular plates to repeated uniform blast loads: An experimental and numerical study, International Journal of Impact Engineering, 74 (2014) 36-45.

[21] D.D. Truong, H.-J. Jung, H.K. Shin, S.-R. Cho, Response of low-temperature steel beams subjected to single and repeated lateral impacts, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 10(6) (2018) 670-682.

[22] G. Nurick, J. Martin, Deformation of thin plates subjected to impulsive loading—a review part II: experimental studies, International journal of impact engineering, 8(2) (1989) 171-186.

[23] G. Nurick, J. Martin, Deformation of thin plates subjected to impulsive loading—a review: Part i: Theoretical considerations, International Journal of Impact Engineering, 8(2) (1989) 159-170.

[24] Q. Li, N. Jones, On dimensionless numbers for dynamic plastic response of structural members, Archive of Applied Mechanics, 70(4) (2000) 245-254.

[25] B.-W. Park, S.-R. Cho, Simple design formulae for predicting the residual damage of unstiffened and stiffened plates under explosion loadings, International Journal of Impact Engineering, 32(10) (2006) 1721-1736.

[26] N. Jacob, G. Nurick, G. Langdon, The effect of stand-off distance on the failure of fully clamped circular mild steel plates subjected to blast loads, Engineering Structures, 29(10) (2007) 2723-2736.

[27] H. Babaei, T. Mirzababaie Mostofi, E. Armoudli, 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, 231(5) (2017) 939-950.

[28] 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.

[29] 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.

[30] N. Jones, Dynamic inelastic response of strain rate sensitive ductile plates due to large impact, dynamic pressure and explosive loadings, International Journal of Impact Engineering, 74 (2014) 3-15.

[31] H. Babaei, T. Mirzababaie Mostofi, M. Alitavoli, 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, 231(3) (2017) 490-496.

[32] H. Babaei, T.M. Mostofi, M. Alitavoli, 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, 107 (2016) 257-265.

[33] T.M. Mostofi, H. Babaei, M. Alitavoli, S. Hosseinzadeh, 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, 112 (2017) 118-124.

[34] H. Babaei, T.M. Mostofi, M. Alitavoli, Study on the response of circular thin plate under low velocity impact, Geomechanics and Engineering, 9(2) (2015) 207-218.

[35] H. Babaei, T. Mirzababaie Mostofi, New dimensionless numbers for deformation of circular mild steel plates

[36] R. Teeling-Smith, G. Nurick, The deformation and tearing of thin circular plates subjected to impulsive loads, International Journal of Impact Engineering, 11(1) (1991) 77-91.

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, 234(2) (2020) 231-245.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Ziya-Shamami, H. Babaei, T. Mirzababaie Mostofi, H. Khodarahmi, Experimental investigation and mathematical modeling of the response of circular metallic plates under successive intense dynamic loading , Amirkabir J. Mech Eng., 53(Special Issue 6)(2021) 4023-4050.

DOI: 10.22060/mej.2021.19334.7001

این صفحه عمداً خالی است