

Experimental Investigation into the Dynamic Response of Double-Layered Quadrangular Metallic Plates Subjected to Localized Impulsive Loading

ARTICLE INFO

Article Type Original Research

Authors Mirzababaie Mostofi T.¹ *PhD*, Sayah Badkhor M.¹ *PhD*, Babaei H.*² *PhD*

How to cite this article

Mirzababaie Mostofi T, Sayah Badkhor M, Babaei H. Experimental Investigation into the Dynamic Response of Double-Layered Quadrangular Metallic Plates Subjected to Localized Impulsive Loading. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(10):2445-2460.

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

²Mechanical Engineering Department, Mechanical Engineering Faculty, University of Guilan, Rasht, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, 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: July 15, 2020 Accepted: August 10, 2020 ePublished: October 21, 2020

ABSTRACT

One of the main objectives of impact mechanics is the design of a structure resistant to explosion by introducing a structure with a special design pattern while maintaining its lightweight conditions. In this study, the plastic deformation and failure pattern of quadrangular metallic plates under localized impulsive loading were investigated due to the lack of experimental, analytical, and numerical results in the field of deformation of multilayer structures under impulsive loading. In this series of experiments, 26 double-layered metallic plates with different layering arrangements of steel-steel and steel-aluminum in different thicknesses were fabricated and designed. To apply the localized impulsive load, a ballistic pendulum system was used without using standoff distance blast tubes. A thick layer of polyester foam was used to prevent explosive debris. Steel plates in different thicknesses of 1, 2, and 2.5mm, and aluminum plates in different thicknesses of 1 and 2mm in 5 different layering configurations were used. In the experimental study, parameters such as impulse, central permanent deflection, and longitudinal strains in x and y directions were measured. The results showed that the use of aluminum plate as a backing layer reduces the explosive performance of the double-layered mixed configurations of steel-aluminum plates under localized impulsive loading.

Keywords Plastic Deformation; Square Plate; Rectangular Plate; Impulsive Loading; Experimental Test

CITATION LINKS

[1] Multi-objective optimum design of ANFIS for ... [2] Study on the response of circular ... [3] Experimental investigation and dimensionless ... [4] Experimental and theoretical study ... [5] Dynamic inelastic response of strain ... [6] Theoretical analysis on the effect of ... [7] Closed-form analytical analysis on the ... [8] Deformation of thin plates subjected to ... [9] Numerical simulation and experimental ... [10] The response of mild steel and armour ... [11] Dynamic plastic response of double-layered circular ... [12] Repeated localized impulsive loading on monolithic ... [13] The response of circular plates to repeated ... [14] Large transverse deformation of double-layered ... [15] Experimental and analytical investigation into large ductile ... [16] Empirical modelling for prediction of large ... [17] On dimensionless numbers for the dynamic ... [18] The influence of gas mixture detonation loads ... [19] On dimensionless numbers for predicting ... [20] New dimensionless numbers for deformation ... [21] Modeling and prediction of fatigue life in composite ... [22] Gas mixture detonation method, a novel ... [23] The dynamic plastic behavior of fully clamped rectangular ... [24] An experimental study of the dynamic plastic ... [25] Deformation of thin plates subjected ... [26] Deformation of thin plates subjected ... [27] Predictions of transverse deflections and in-plane ... [28] Deformation and failure of blast-loaded square ... [29] Scaling aspects of quadrangular plates ... [30] Simple design formulae for predicting the residual ... [31] Finite element analysis of sheet hydromechanical ... [32] Experimental investigation and analytical modeling ... [33] Effect of gas detonation on response of circular ... [34] Experimental and theoretical study on large ductile ... [35] Numerical investigation and optimization on ... [36] Low-velocity impact response of plate with different ... [37] Dynamic response of metal powder subjected to ... [38] Experimental study and optimization of dynamic ... [39] High-velocity compaction of aluminum powder by gas ... [40] Gas mixture detonation load on polyurea-coated aluminum ... [41] Ballistic performance of multilayered metallic ... [42] Experimental investigation on the ballistic resistance of ...

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

بررسی تجربی پاسخ دینامیکی ورقهای دولایه چهارگوش فلزی تحت بارگذاری دفعی غیریکنواخت

توحید میرزابابای مستوفی PhD

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

مصطفى سياح بادخور PhD

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

هاشم بابایی ٔ PhD

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

چکیدہ

یکی از اهداف اصلی مکانیک ضربه، طراحی مقاوم یک سازه در برابر انفجار با معرفی ساختاری با الگوی طراحی خاص ضمن حفظ شرایط سبکوزنی آن است. با توجه به کمبود نتایج تجربی، تحلیلی و عددی در زمینه تغییر شکل ساختارهای چندلایه تحت بار دفعی، در این تحقیق، تغییر شکل پلاستیک و الگوی شکست ورقهای دولایه چهارگوش فلزی تحت بارگذاری دفعی غیریکنواخت مورد بررسی قرار گرفته است. در این سری از آزمایشها، ۲۶ نمونه دولایه فلزی با چیدمانهای مختلف فولاد- فولاد و فولاد- آلومینیوم در ضخامتهای مختلف ساخته و طراحی شد. جهت اعمال بار دفعی غیریکنواخت از سامانه آونگ بالستیک بدون به کارگیری لولههای فاصله استقرار خرج استفاده شد. جهت جلوگیری از ترکشهای خرج انفجاری از یک لایه ضخیم فوم پلیاستر استفاده شد. از ورقهای فولادی در ضخامتهای یک، ۲ و ۲/۵میلیمتر و ورقهای آلومینیومی در ضخامتهای یک و ۲میلیمتر در پنج لایهبندی مختلف بهره گرفته شد. در آزمایشهای تجربی، پارامترهایی از قبیل ایمپالس، بیشترین خیز دائمی نمونه و کرنشهای طولی و عرضی مورد اندازهگیری قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از ورق آلومینیومی بهعنوان لایه عقبی باعث اُفت عملکرد انفجاری ساختار دولایه ترکیبی فولاد و آلومینیوم تحت بارگذاری دفعی غیریکنواخت میشود.

کلیدواژهها: تغییر شکل پلاستیک، ورق مربعی، ورق مستطیلی، بارگذاری دفعی، آزمایش تجربی

> تاریخ دریافت: ۱۳۹۹٬۰۴/۷۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹٬۰۵/۲۰ *نویسنده مسئول: ghbabaei@guilan.ac.ir

مقدمه

با توجه به اهمیت و کاربرد بالای فلزات در صنعت، فرآیندهای متنوعی جهت شکلدهی فلزات و ساخت قطعات مورد نیاز متناسب با نوع کاربرد آنها ابداع شده است. فرآیندهای شکلدهی بهصورت کلی به دو روش شکلدهی با نرخ انرژی پایین^[1-4] و شکلدهی با نرخ انرژی بالا^[10-5] تقسیم میشوند. در فرآیندهای شکلدهی با نرخ انرژی بالا نحوه شکلدهی به این صورت است که در زمان بسیار کوتاهی انرژی بسیار زیادی آزاد شده و قطعه به سرعت و شتاب بالایی دست مییابد. فرآیندهای مختلفی جهت شکلدهی با سرعت بالا وجود دارد که میتوان به شکلدهی با استفاده از انفجار گاز، شکلدهی با استفاده از بار هیدرودینامیکی،

شکلدهی الکترومغناطیسی و شکلدهی با استفاده از خرج انفجاری اشاره کرد. فرآیند شکلدهی انفجاری فرآیندی است که در آن از انرژی حاصل از انفجار برای تغییر شکل ورق یا قطعه مورد استفاده قرار می گیرد. آغاز این روش شکلدهی به اواسط قرن نوزدهم برمیشود، بهنحوی که محققین متوجه شدند از انرژی حاصل از انفجار خرجهای انفجاری میتوان در جهت شکلدهی دلخواه ورقها استفاده کرد. با توجه به توضیحات ارایهشده، یکی از اهداف اصلی مکانیک ضربه، طراحی مقاوم یک سازه در برابر انفجار با معرفی ساختاری با الگوی طراحی خاص ضمن حفظ شرایط سبکوزنی آن است^[11-11]. همچنین ارایه اعداد بی بعد مناسب جهت پیش بینی رفتار این سازه ای تحت بار انفجاری نیز از دیگر اهداف این حوزه از فن است^[15-21].

جونز و همکاران، آزمایشهای تجربی را بر روی ورقهای مستطيلىشده انجام دادند. در اين آزمايشها ورقها بهصورت کاملاً گیردار در نظر گرفته شدند. همچنین بهمنظور اندازهگیری ايمپالس بهصورت مستقيم از سامانه پاندول بالستيک استفاده شد. آنها در ادامه تحقیقات خود در مورد تغییر شکل غیرالاستیک ورقها تحت بارگذاری انفجاری انجام دادند و توانستند با استفاده از روابط ریاضی، مدلی را ارایه دهند که در آن قادر به محاسبه حداکثر خیز مرکز ورقهای مربعی بود. آنها در مدل خود اثر گشتاورهای خمشی و نیروهای غشایی را در نظر گرفته بودند ^[23] ^{24]}. *نوریک* و همکاران، توانستند مدلی تحلیلی برای ورقهای مستطیلی با در نظرگرفتن فرض متغیربودن شکل مود در روش تقریبی و تأثیر همزمان جابهجاییهای افقی و قائم، ارایه کنند بهطوریکه امکان محاسبه شکل مود در هر لحظه وجود دارد. با این محاسبه توزیع کرنشها محیطی، ممکن شد. مدلهای قبلی که بهمنظور پیشبینی توزیع این کرنشها بهکار میرفت نشان از وقوع کرنشها بزرگ در نواحی بیرونی و کرنشها کوچک در نواحی مرکزی داشت که کاملاً برعکس نتایج و شواهد تجربی بود. پیشبینیهای این مدل بهخوبی با نتایج تجربی که نوریک برای ورقهای مستطیلی و مربعی با پیرامون گیردار تا نسبتهای خیز به ضخامت ۱۲میلیمتر بهدست آورده بود، تطابق خوبی داشت^{-25]} ^{[27}. *رادراپاتنا* و همکاران برای پارگی ورقهای مربعی تقویتشده مدلی را ارایه کردند که تنش برشی بهطور یکنواخت در پیرامون مرز گیردارشده توزیع شده و تنش برشی میانگین در هر لحظه با استفاده از معادلات تعادل نیرویی کل سیستم محاسبه شده بود. با وجود اینکه این مدل اثرات برهمکنشی را در نظر گرفته بود باز هم بهدلیل یکنواخت فرضکردن برش در مرزهای گیردار مد شکست جزیی قابل محاسبه نبود^[28]. *ژاکوب* و همکاران آزمایشهایی روی ورقهای فولادی نرم گیردارشده مستطیلی تحت بارگذاری غیریکنواخت و بهصورت متمرکزشده انجام دادند. در این تحقیقات ورق باضخامتهای مختلف و نسبتهای طول به عرض متنوع تحت بارهای انفجاری متمرکزشده قرار گرفته شده بود. آنها با انجام سه نوع آزمایش تأثیر پارامترهای مختلف بر روی پاسخ

ورق را بررسی کردند. در آزمایش اول، اثر ارتفاع خرج با قطر خرج یکسان و در آزمایش دوم، اثر قطر متنوع خرج با ارتفاع خرج ثابت را بر روی ضخامتهای مختلف ورق بررسی کردند. در آزمایش سوم، اثر نسبت طول به عرض مختلف ورق باضخامت یکسان و ارتفاع متنوع خرج را با نسبت ثابت خرج به عرض ورق بررسی نمودند^[29]. *پارک* و چو، توانستند عدد بیبعد ارایه شده توسط جونز را با ارایه معادله عددی بیبعد برای ورقهای مستطیلی تحت بارگذاری انفجاری که در آن نسبت طول به عرض ورق نیز مشاهده مىشد اصلاح كنند. در اين تحقيق معادله پيشنهادشده با نتايج تجربی توافق نسبتاً خوبی داشت^[30]. *شارما* و *روت* با شبیهسازی عددی با استفاده از نرمافزار ال اسداینا و با به کارگیری روش حل صریح، فرآیند هیدروفرمینگ را برای ورقهای دایروی انجام دادند. آنها کار خود را با نتایج تجربی مورد ارزیابی قراردادند. نتایج نشان میداد که در این فرآیند در توزیع نازکشدگی ضریب اصطکاک نقش موثرتری نسبت به خواص ماده ایفا میکند^[31]. بابایی و همكاران به بررسی تجربی و تحلیلی تغییر شكل غیرالاستیک ورقهای مستطیلی گیردار با استفاده از بار هیدرودینامیکی پرداختند. در این سری از مطالعات از سامانه چکش پرتابهای بهمنظور ایجاد بار هیدرودینامیکی برای شکلدهی به کار برده شد. آنها با استفاده از دو روش لولای پلاستیک و روش انرژی مدلهای تحلیلی برای پیشبینی خیز مرکز ورق ناشی از بارگذاری هیدرودینامیکی ارایه کردند. در روش لولای پلاستیک فرض میشود که ورق دارای یک لولای مرکزی و چهار لولای غیرمرکزی در داخل ورق و همچنین چهار لولا برای شرایط تکیهگاهی است. در روش انرژی نیز با فرض پروفیل تغییر شکل در سه راستا و با استفاده از پروفیل تغییر شکل کسینوسی تأثیر کرنش غشایی و خمشی و همچنین تأثیر نرخ کرنش در محاسبات لحاظ شده بود. با مقایسه نتایج تحلیلی و تجربی نشان داد که نتایج بهدستآمده از روشهای تحلیلی صحت قابل قبولی دارد^[32]. *بابایی* و همکاران به بررسی تجربی و عددی تغییر شکل پلاستیک ورقهای فولادی مستطیلی با روش انفجار مخلوط گازها پرداختند. ورقهای فولادی باضخامتهای مختلف تحت اثر فشار شوک ناشی از انفجار با سرعتبالا تغییر شکل داده شدند. همچنین فشار حاصل از انفجار مخلوط گازها با استفاده از حسگر فشار پیزوالکتریکی بعد از انفجار اندازهگیری شده بود. نتایج تجربی مربوط به اثر پارامترهایی نظیر درصد مخلوط گاز، ضخامت ورق و شرایط مرزی بر توزیع کرنش طولی، عرضی و قطری و همچنین خیز مرکز ورق، ارایه شد. شبیهسازی عددی با استفاده از نرمافزار المان محدود آباکوس انجامگرفت. برای صحهگذاری مدل عددی، نتایج حاصل از شبیهسازی با نتایج تجربی مقایسه شد که حاکی از سازگاری قابل قبولی نتایج عددی با نتایج تجربی داشت^[33]. میرزابابای مستوفی و همكاران مطالعه تجربی و تحليلی با استفاده از سامانه انفجار مخلوط گازهای استیلن و اکسیژن بر روی تغییر شکل ناشی از انفجار گاز بر روی ورقهای از جنس فولاد نرم و آلومینیوم

باضخامتهای متفاوت انجام دادند. یکی از اهداف این مطالعات یافتن نسبتهای ترکیب متفاوت دو گاز استیلن و اکسیژن برای شکلدادن ورقهای مستطیلی بود^[34]. *سیاح بادخور* و همکاران به مطالعه اثر شرایط مختلف بارگذاری و همچنین هندسه ساختار بر رفتار ساختار ساندویچی تحت بارگذاری دفعی یکنواخت پرداختند. آنها ضمن مدلسازی عددی به مطالعه پارامترهای مهم در این فرآیند نیز پرداختند^[35]. *سیاح بادخور* و همکاران به بررسی تجربی و عددی تغییر شکل غیرالاستیک ورقهای دایروی، مستطیلی و مثلثی کاملاً گیردار تحت بارگذاری هیدرودینامیکی با سرعت پایین توسط سامانه چکش پرتابهای پرداختند. آنها دریافتند که ارتفاع وزنه بیشترین تأثیر و جرم چکش نیز کمترین اثر بر یاسخ را دارد^[36]. آنها در پژوهش دیگری به مطالعه تجربی تراکم دینامیکی پودرهای آلومینیومی تحت بارگذاری ضربهای سرعت پایین با استفاده از سامانه چکش پرتابهای و همچنین بهینهسازی پارامترهای موثر در این فرآیند پرداختند^[37]. *میرزابابای مستوفی* و سیاح بادخور به بررسی تجربی و تحلیل رگرسیونی پاسخ دینامیکی ورقهای دایرهای تحت بار انفجاری یکنواخت و محلی پرداختند. آنها شرایط بهینه برای کمترین تغییر شکل ورقهای یکلایه دایرهای تحت بارگذاری دینامیکی با توزیع یکنواخت و محلی را نیز تعیین کردند^[38]. *میرزابابای مستوفی* و همکاران به بررسی تراکم پودر آلومینیوم با سرعت بالا تحت بار انفجاری پرداختند. آنها ضمن انجام آزمایش تجربی به بهینهسازی پارامترها پرداختند و نشان دادند که کیفیت فلز تشکیل شده با این روش نسبت به سایر روشها بسیار خوب است^[39]. *میرزابابای مستوفی* و همکاران به بررسی ورقهای آلومینیومی با روکش پلیاوره تحت بارگذاری انفجاری پرداختند و بهینهسازی این ورقها پرداختند. نتیجه کلی، کاهش تغییر شکل ورق در ضخامت یکسان با استفاده از روکش يلىاورە بود^[40].

با بررسی کارهای پیشین محققین، این نتیجه بهدست آمد که با توجه به اهمیت فرآیندهای شکلدهی در جهت دستیابی به روشهای کمهزینه و پرسرعت و در عین حال افزایش کیفیت محصول نهایی نیازمند تحقیقات بیشتر است^[41, 42]. همچنین این نتیجه حاصل شد که مطالعات بسیار محدودی در زمینه تغییر شکل پلاستیک ساختارهای چندلایه تحت بار انفجاری وجود دارد؛ بنابراین، در این مقاله به بررسی تغییر شکل ورقهای مستطیل شکل دولایه تحت بارگذاری بار دفعی ناشی از انفجار به کمک آزمایشهای تجربی پرداخته شده است. بدین منظور، مطالعه تجربی بر روی فرآیند شکلدهی با استفاده از سامانه پاندول بالستیک و همچنین معرفی و بررسی اجزای تشکیلدهنده این سامانه انجام شده است. آزمایشهای تجربی بر روی ورقهای مستطیلی و مربعی شکل به صورت روش تماس مستقیم بر روی ورقهایی از جنس آلومینیوم و فولاد باضخامتهای مختلف و بهصورت دولایه و بررسی خیز ناشی از بارگذاری انفجاری انجام شده است. همچنین محاسبه ایمپالس ناشی از انفجار ماده

۲۴۴۸ توحید میرزابابای مستوفی و همکاران ـ

منفجره و با استفاده معادلات مکانیکی وابسته به پاندول بالستیک و نیز بررسی کرنشهای عرضی و طولی ناشی از تغییر شکل ارایه شده است.

مطالعه تجربى

بهمنظور شکلدهی ورقهای مستطیل و مربعی از سامانه پاندول بالستیک استفاده شده است. یکی از اهداف استفاده از این سامانه، محاسبه ایمپالس وارد به ورق (قطعهکار) با بهکارگرفتن معادلات مکانیکی پاندول بالستیک است. در این سامانه انرژی حاصل از انفجار ماده منفجره باعث حرکت پاندول (تابخوردن یا حرکت آونگی) میشود که با استفاده از روابط حاکم بر پاندول میتوان ایمپالس را محاسبه نمود. این طریقه محاسبه ایمپالس دقت به نسبت بالایی در مقایسه با حسگرهای اندازهگیری فشار دارد. در شکل ۱ شماتیک پاندول بالستیک نمایش داده شده است. دو نگهدارنده از جنس آلومینیوم استفاده شده است. ورقها با بهمنظور تثبیت و ثابتکردن ورقهای تحت بارگذاری انفجاری از بهوسیله ۴ پیچ بلند به نگهدارنده متصل میشود. در شکل ۲ شماتیکی از نحوه اتصال پاندول به بدنه اصلی نگهدارنده نمایش



شکل ۱) شماتیک پاندول بالستیک



شکل ۲) شماتیک اتصال نگهدارنده به بدنه اصلی پاندول بالستیک

در انتهای بدنه پاندول قلم و میله نگهدارنده قلم متصل شده است. بر اثر انتقال انرژی ناشی از انفجار پاندول بهصورت حرکت آونگی به جلو و عقب حرکت میکند. با استفاده از قلم میزان حرکت آونگی پاندول بر روی کاغذ زیر قلم رسم میشود که در محاسبه ایمیالس از آن میتوان استفاده نمود.

بهمنظور شکلدهی نیاز به ایجاد انرژی و فشار زیاد و در زمان کوتاه است. به همین دلیل از مواد منفجره برای ایجاد فشار بالا و لحظهای میتوان استفاده کرد. از ماده منفجره C4 استفاده شده است. برای تحریک ماده منفجره از چاشنی استفاده میشود و چاشنی بهوسیله الکتریسیته باعث تحریک ماده انفجاری و در نهایت باعث انفجار آن میشود. در شکل ۳ شماتیک چاشنی انفجاری نمایش داده شده است.



شکل ۳) شماتیک چاشنی انفجاری

به جهت انجام آزمایشهای تجربی ورقهای فولادی و آلومینیومی به ابعاد ۲۰۰×۳۰سانتیمتر برای نگهدارندههای مستطیلی و ۳۰×۳۰سانتیمتر برای نگهدارندههای مربعی برش خورده و برای قرارگیری بین نگهدارندههای مورد نظر، مطابق با نقشه نگهدارندهها سوراخکاری شده است. ورقهای سوراخکاریشده با استفاده از پیچ و مهره بین نگهدارندهها قرار گرفته و برای جلوگیری از لقی بهخوبی سفت شده است. در نمونههایی که قبل از آزمایشها اصلی بر روی ورقهای تکلایه و بهمنظور اطمینان از روند انجام آزمایشها انجام شد، تأثیر ترکشهای چاشنی انفجاری بر روی ورقها مشاهده شد. بنا بر همین دلیل برای جلوگیری از برخورد ترکشهای چاشنی به هنگام انفجار بین خرج و ورقها از یکلایه یونولیت باضخامت کم استفادهشده است.

خواص مکانیکی مواد

از ورقهای فولادی و آلومینیوم استفاده شد که خواص مکانیکی آنها از انجام آزمون کشش تک محوره در مرکز پژوهش رازی حاصل

شده است. برای بررسی همگنبودن نمونههای تهیهشده، ورقها در سه راستای افقی، عمودی و اریب برش خورده و سپس تحت آزمایش کشش با شرایط کاملاً یکسان قرار گرفتند. لازم به ذکر است که آزمون کشش بر روی ورقهای بریدهشده برای تعین نمودار نیرو- جابهجایی مطابق با استاندارد ISO/IEC17025 صورت گرفته است. مشخصات و ضخامت ورقهای مورد استفاده در انجام آزمایشهای تجربی مطابق با جدول ۱ است.

جدول ۱) مشخصات، ضخامت و جنس ورقهای استفادهشده در آزمایشها

، ورق	ر ایام ت			
آلومينيوم	فولاد	پرشتر –		
یک و ۲	یک، ۲ و ۲/۵	ضخامت (mm)		
۲۷۰۰	۷۸۵۰	چگالی (kg/m³)		
۶۹/۹	٢٠٠	مدول الاستيسيته (GPa)		
۱۵Y	448	تنش تسليم (MPa)		
∘/٣٣	∘/٣	ضريب پواسون		

محاسبه ايمپالس توسط پاندول بالستيک

مقدار ایمپالس موج انفجار به سه پارامتر، بیش فشار، مدتزمان موج و سرعت کاهش بیش فشار بستگی دارد. برای اندازهگیری ایمپالسهای ناشی از موج انفجار هم میتوان از روابط تجربی و هم از وسایل اندازهگیری استفاده کرد. با توجه به این موضوع که این روابط بر پایه و اساس قوانین مقیاس بندی شده بنا شده است، نمی توانند مبنای دقیقی برای پیش بینی و تخمین ایمپالس انفجار نمی توانند مبنای موجهای انفجاری استفاده از وسایل اندازهگیری بسیار بسیار بالای موجهای انفجاری استفاده از وسایل اندازهگیری بسیار مراحل انجام آزمون تحت شعاع قرار می گیرد. برای اندازه گیری ایمپالس از سامانه پاندول بالستیک استفاده شده است. سازوکار اندازه گیری ایمپالس براساس قوانین فیزیکی، مکانیکی و ارتعاشی خاکم بر پاندول است. درنتیجه میتوان بیان نمود در صورت فراهمآوردن شرایط آزمایشگاهی مطلوب، نتایج حاصل از استفاده سامانه پاندول بالستیک دارای دقت قابل قبولی خواهد بود.

دامنه نوسان اولیه پاندول بالستیک نسبت مستقیمی با ایمپالس ناشی از انفجار بر نمونه (ورقهای دولایه) دارد. با بهکارگیری قلم متصل به انتهای پاندول دامنه نوسان حرکتی پاندول بالستیک بر روی ورق زیر پاندول ثبت و اندازهگیری میشود. با فرض میرایی ویسکوز درحرکت پاندول، میتوان معادله حرکت پاندول را بهصورت معادله ۱ در نظر گرفت.

$$\ddot{X} + 2\beta \dot{X} + \omega_n^2 X = 0 \tag{1}$$

پارامترهای معادله ۱ در روابط ۲ و ۳ بیان شده است.

- $\beta = \frac{c}{2M} \tag{Y}$
- $\begin{aligned}
 \rho &= \frac{1}{2M} \\
 \omega_n &= \frac{2\pi}{T}
 \end{aligned} \tag{(4)}$

بررسی تجربی پاسخ دینامیکی ورق،های دولایه چهارگوش فلزی تحت بارگذاری دفعی غیریکنواخت ۲۴۴۹

در معادلات فوق *C* ضریب میرایی و *M* جرم کل سیستم (حاصل جمع جرم پاندول جرم نگهدارندههای متصل به ورق و پاندول جرم وزنههای تعادل) و *T* زمان دوره نوسان پاندول است. زمان دوره *T* با اندازهگیری تعداد نوسانهای پاندول مشخص میشود.

با بهکارگیری شرایط مرزی و حل معادله ۱، جواب آن بهصورت معادله ۴ بهدست میآید.

$$X = \frac{e^{-\beta T} \dot{X_0} sin(\omega_d t)}{\omega_d} \tag{(4)}$$

که در آن \dot{X}_o سرعت اولیه پاندول و ω_a از رابطه ۵ محاسبه میشود.

$$\omega_d = \sqrt{\omega_n^2 - \beta^2} \tag{(a)}$$

با در نظرگرفتن x_1 به عنوان مقدار جابه جایی روبه جلوی پاندول در لحظه $\frac{T}{4} = t = \frac{3}{4}$ مقدار جابه جایی روبه عقب در لحظه $\frac{T}{4} = t = t$ و سپس با قراردادن این مقادیر در معادله ۴، مقادیر x_1 و x_2 به ترتیب به صورت روابط ۶ و ۷ به دست می آیند.

$$x_1 = \frac{\dot{x_0}T}{2\pi} e^{-\beta T/4}$$
(8)

$$x_2 = \frac{\frac{\dot{X}_0 T}{2\pi}}{2\pi} e^{-3\beta T} /_4 \tag{Y}$$

نسبت دو دامنه متوالی بهصورت رابطه ۸ قابل محاسبه است.

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{e^{-\beta T}/_4}{e^{-\beta T}/_4} = e^{-\beta T}/_2 \tag{A}$$

با گرفتن لگاریتم طبیعی از دو طرف معادله ۸ ثابت میرایی بهدست خواهد آمد. باید در نظر داشت که ثابت میرایی برای هر آزمون مقداری مشخص دارد که بهصورت رابطه ۹ است.

$$\beta = \frac{2}{r} \ln \left(\frac{x_1}{x_2} \right) \tag{9}$$

در معادله فوق x_1 و x_2 اولین جابهجایی حرکت نوسانی پاندول به سمت جلو و عقب است که از طریق اندازهگیری طولهایی که توسط قلم بر کاغذ زیر پاندول ثبت شده قابل محاسبه است. در شکل ۴ بهصورت شماتیک حرکت نوسانی پاندول بالستیک تحت تأثیر انفجار نمایش دادهشده است.



شکل ۴) طرح شماتیک حرکت پاندول بالستیک

۰۲۴۵۰ توحید میرزابابای مستوفی و همکاران ــ

مطابق شکل ۴ لازم به ذکر است که طول خطوط R و $\Delta \Delta$ که توسط قلم و کاغذ ثبت شده با جابهجایی واقعی پاندول بالستیک برابر نیست ولی با استفاده از اندازه این خطوط و روابط زیر میتوان جابهجایی نوسان اولیه پاندول را محاسبه نمود؛ بنابراین رابطه فاصله نقطه انتهایی تیرک پاندول تا نوک قلم در حالت سکون مطابق رابطه ۱۰ قابل محاسبه است.

$$d_1 = \sqrt{Z^2 - a^2} \tag{(1)}$$

در رابطه فوق a فاصله بین تیرک و زمین و Z طول بازویی است که قلم به آن متصل است. هنگامیکه پاندول در اولین نوسان به بیشترین فاصله از حالت تعادل خود میرسد فاصله نوک قلم تا نقطه انتهایی تیرک از رابطه ۱۱ محاسبه میشود.

$$d_2 = \sqrt{(Z^2 - (a+y)^2)}$$
(11)

با فرض کوچکبودن زاویه نوسان و خطیبودن طول کمان، روابط ۱۲ و ۱۳ بهدست میآیند.

$$x_1 = R\theta \tag{1Y}$$

$$y = \frac{R\theta^2}{2} \tag{11}$$

با قراردادن روابط ۱۲ و ۱۳ در معادله ۱۱، رابطه ۱۴ بهدست میآید.

$$d_{2} = \sqrt{\left(Z^{2} - \left(a + \frac{x_{1}^{2}}{2R}\right)^{2}\right)}$$
(14)

بنابراین روابط x_1 و x_2 را میتوان بهترتیب بهصورت روابط ۱۵ و ۱۶ بهدست آورد.

$$x_1 = \Delta R + d_1 - d_2 \tag{10}$$

$$x_2 = \Delta L - d_1 + d_2 \tag{19}$$

جدول ۲) نتایج آزمایشهای انجامشده روی ورقهای مربعی

با قراردادن روابط ۱۴ و ۱۰ در روابط ۱۵ و ۱۶ بهترتیب مقادیر x₁ و x₂ برحسب ابعاد قابل اندازهگیری و ثبتشده مطابق روابط ۱۷ و ۱۸ بهدست خواهند آمد.

$$x_1 = \Delta R - \sqrt{\left(Z^2 - \left(a + \frac{x_1^2}{2R}\right)^2\right) + \sqrt{Z^2 - a^2}}$$
(1Y)

$$x_{2} = \Delta R - \sqrt{\left(Z^{2} - \left(a + \frac{x_{1}^{2}}{2R}\right)^{2}\right) - \sqrt{Z^{2} - a^{2}}}$$
(1A)

جابهجایی به سمت جلو (x₁) بهترین تقریب برای محاسبه سرعت اولیه حرکت پاندول بالستیک است بنابراین با استفاده از معادله ۶ میتوان رابطه ۱۹ را بهدست آورد.

$$\dot{X}_{0} = \frac{2\pi x_{1} e^{\beta T/4}}{T}$$
(19)

در نهایت مقدار ایمپالس را میتوان با استفاده از رابطه ۲۰ محاسبه کرد.

$$I = M\dot{X_0} \tag{(Y)}$$

نتايج و بحث

در این قسمت نتایج حاصل از آزمایشهای تجربی به همراه بحث روی آنها ارایه خواهد شد. ابتدا به بررسی خیز و ایمپالس ناشی از بارگذاری و سپس به بررسی کرنشهای ناشی از بارگذاری پرداخته شده است. نتایج آزمایشهای انجامشده روی ورقهای مربعی و مستطیلی که با استفاده از چاشنی حدود یک گرم ماده انفجاری انجام شده است بهترتیب در جدولهای ۲ و ۳ آمده است. در شکلهای ۵ و ۶ نیز بهترتیب نمونه ورقهای مربعی و مستطیلی بعد از شکلدهی نشان دادهشده است.

گروہ	شماره آزمایش	جنس و ضخامت منقحات (mm)	جنس و ضخامت منقیشت (mm)	جرم خرج	قطر خرج	ایمپالس (۵۱۵)	خيز مركز ور	ق (mm)	خيز مرکز ورز ضخامت (ی نسبت به (Wo/h)
		ورق جنویی (۱۱۱۱۱)	ورق پستی (۱۱۱۱۱)	(g)	(mm)	(N.S)	ورق جلویی	ورق پشتی	ورق جلویی	ورق پشتی
	یک	ST-1	ST-2	Υ+۱	٣٥	19/84	پارگى	پارگى	پارگى	پارگى
. 5.	۲	ST-1	ST-2	۵+۱	٣٠	۱۵/۱۲	پارگى	پارگى	پارگى	پارگى
ι Δ	٣	ST-1	ST-2	k+1	٣٠	۱۲/۳۷	پارگى	پارگى	پارگى	پارگى
	k	ST-1	ST-2	٣+١	٣٠	٨/٢٥	11/۵	۱۳/۵	۱۱/۵	۶/۷۵
	۵	ST-2	ST-2.5	k+1	٣٥	14/44	۱۶/۵	۱Y/۵	٨/٢۵	٧
۲	۶	ST-2	ST-2.5	۵+۱	٣٠	10/04	۲۰/۵	۲۱	۱۰/۲۵	۴
	Y	ST-2	ST-2.5	۶+۱	٣٠	17/04	۲۴	پارگى	١٢	پارگى
	٨	ST-2.5	AL-2	7+1	٣٠	۵/۲	٨	٨/۵	٣/٢	۴/۲۵
٣	٩	ST-2.5	AL-2	۳+۱	٣٠	٨/٢١	11/۵	۱۲/۵	۴/۶	۶/۲۵
	١٠	ST-2.5	AL-2	k+1	٣٠	١٢/٧٨	پارگى	پارگى	پارگى	پارگى
ĸ))	ST-2.5	ST-2.5	γ+۱	٣٠	۲۰/۳	26/0	۲۵	٩/٨	١٠
r	١٢	ST-2.5	ST-2.5	٩+١	٣٠	44/12	پارگى	پارگى	پارگى	پارگى
۵	۱۳	ST-1	AL-2	۲+۱	٣٠	٧/١٢	يارگى	يارگى	يارگى	يارگى

بررسی تجربی پاسخ دینامیکی ورقهای دولایه چهارگوش فلزی تحت بارگذاری دفعی غیریکنواخت ۲۴۵۱

جدول ۳) نتایج آزمایشهای انجامشده روی ورقهای مستطیلی										
ق نسبت به [Wo/h]	خيز مركز ورز ضخامت (ق (mm)	خيز مرکز ور	ایمپالس (N s)	قطر خرج (mm)	جرم خرج	جنس و ضخامت مرقب شتی (mm)	جنس و ضخامت مرقر جامر ب (mm)	شماره آزمایش	گروه
ورق پشتی	ورق جلویی	ورق پشتی	ورق جلویی	(14.3)	(IIIII)	(8)	() ورق پستی (
۹/۵	۱۸/۵	19	۱۸/۵	۱∘/۸۸	٣٠	٣+١	ST-2	ST-1	١۴	
۱۰/۲۵	۱۹/۵	۲۰/۵	۱۹/۵	۱۲/۰۳	٣٠	<i>ب</i> +۱	ST-2	ST-1	۱۵	۶
۱۲/۷۵	۲۵	۲۵/۵	۲۵	18/37	٣٠	۵+۱	ST-2	ST-1	18	
١٠	۷/۴	۲۰	۱۸/۵	۱۲/۳۷	٣٠	k+1	AL-2	ST-2/5	١٧	
پارگى	پارگى	پارگى	پارگى	18/160	٣。	۵+۱	AL-2	ST-2/5	۱۸	۷
پارگى	پارگى	پارگى	پارگى	۱۸/۲۹	٣٠	۶+۱	AL-2	ST-2/5	19	
۶/۲	٧/۵	۱۵/۵	۱۵	۱۳/۵	٣。	k+1	ST-2/5	ST-2	۲۰	
۷/۶	٩/٢۵	19	۱۸/۵	18/37	٣٠	۵+۱	ST-2/5	ST-2	۲۱	٨
٨/۴	١٠	۲۱	۲۰	۱۸/۳۱	٣。	۶+۱	ST-2/5	ST-2	۲۲	
٩/۴	٩/٢	۲۳/۵	٢٣	۲۳/۷۵	٣。	۹+۱	ST-2/5	ST-2/5	۲۳	۵
11	۱۰/۶	۲۲/۵	۲۶/۵	48/48	٣。	14+1	ST-2/5	ST-2/5	۲۴	`
۱۲/۷۵	44	۲۵/۵	46	۶/٨	٣。	۲+۱	AL-2	ST-1	۲۵	١.
پارگى	پارگى	پارگى	پارگى	۱۰/۸۵	٣。	٣+١	AL-2	ST-1	48	10



شکل ٥) نمونه ورقهای مربعی پس از شکلدهی انفجاری



شکل ٦) نمونه ورقهای مستطیلی پس از شکلدهی انفجاری

مقایسه خیز در ورق جلویی و پشتی ورقهای مربعی و مستطیلی مقایسه مقدار خیز ورق جلویی و پشتی در آزمایشهای تجربی برای ورقهای مربعی و مستطیلی در نمودارهای ۱ و ۲ نمایش داده شده است. در نمودار ۱ در آزمایشهای یک الی ۴ با افزایش شماره آزمایش مقدار جرم خرج انفجاری کاهش مییابد و در سایر آزمایشها با افزایش شماره آزمایش مقدار جرم خرج انفجاری افزایش پیدا میکند. مشاهده میشود که با افزایش مقدار جرم خرج میزان خیز مرکز ورقهای دولایه افزایش مییابد همچنین با

جرمهای بیشتر و درنتیجه مقدار انرژی بالاتری به پارگی میرسد. با مقایسه نتایج آزمایش در گروههای یک و ۵ هندسه مربعی مشاهده می شود که به دلیل استفاده از ورق های آلومینیومی در لایه پشتی گروه ۵، این گروه در مقادیر جرم خرج پایین تری نسبت به گروه یک به پارگی رسیده است. همچنین مشاهده میشود با افزایش ضخامت ورق مقابل خرج در لایه جلویی ورقهای آلومینیومی (گروه ۳) ورقها در جرم خرجهای بالاتری نسبت به گروه ۵ به حالت پارگی میرسد. با مقایسه نتایج آزمایشهای گروه ۲ و ۴ مشاهده میشود که ورقهای گروه ۴ بهدلیل استفاده از ورقهای فولادی باضخامت بالاتر در مقابل خرج انفجار در مقادیر بالاتری از جرمهای خرج انفجاری به حالت پارگی رسیده است که مىتوان نتيجه گرفت كه با افزايش ضخامت لايه مقابل خرج انفجاری تا حدود قابل توجهی از تخریب و آسیبرسیدن به لایه دوم در هنگام شکلدهی جلوگیری نمود. با مقایسه نتایج آزمایش در گروههای ۶ و ۱۰ هندسه مستطیلی مشاهده میشود که بهدلیل استفاده از ورقهای آلومینیومی در لایه پشتی گروه ۱۰ آزمایش، این گروه در مقادیر جرم خرج پایینتری نسبت به گروه ۶ به پارگی رسیده است. همچنین مشاهده میشود با افزایش ضخامت ورق مقابل خرج در لایه جلویی ورقهای آلومینیومی (گروه ۷) ورقها در جرم خرجهای بالاتری نسبت به گروه ۱۰ به حالت پارگی میرسد. با مقایسه نتایج آزمایشهای گروه ۸ و ۹ مشاهده میشود که ورقهای گروه ۹ بهدلیل استفاده از ورقهای فولادی باضخامت بالاتر در مقابل خرج انفجار در مقادیر بالاتری از جرمهای خرج انفجاری به حالت پارگی رسیده است و میتوان نتیجه گرفت که با افزایش ضخامت لایه مقابل خرج انفجاری تا حدود قابل توجهی از تخریب و آسیبرسیدن به لایه دوم در هنگام شکلدهی

جلوگیری کرد.

به مستطیلی مشاهده می شود که ورقهای مستطیلی در مقدار



نمودار ۱) مقایسه خیز ورقهای جلویی و پشتی در ورقهای مربعی



نمودار ۲) مقایسه خیز ورقهای جلویی و پشتی در ورقهای مستطیلی

مقدار ایمپالس برحسب گرم

منحنی مقدار ایمپالس برحسب جرم خرج در آزمایشها در نمودار ۳ نمایش داده شده است. همان گونه که در این نمودار مشخص است با افزایش جرم ماده منفجره ایمپالس ناشی از انفجار نیز افزایش خواهد یافت. این نکته مهم است که در آزمایشهای ۱۴ و ۱۸ تا ۲۶ برای انفجار از ماده انفجاری جدید استفاده شد که قدرت انفجاری آن نسبت ماده انفجاری که در سایر آزمایشهای استفادهشده بیشتر است و به همین دلیل تفاوت اندکی در مقدار ایمپالس وجود دارد.



نمودار ۳) دادههای ایمپالس برحسب مقدار جرم خرج در ورقهای مربعی و مستطیلی

خيز مركز ورق برحسب ايمپالس

مقایسه مقدار خیز مرکز ورق برحسب ایمپالس ناشی از انفجار بهترتیب برای ورقهای مربعی و مستطیلی در نمودارهای ٤ و ٥ نمایش داده شده است. همان طور که مشخص است با افزایش ايميالس، خيز مركز ورق افزايش مىيابد. با ادامه افزايش ايميالس ورق دچار پارگی خواهد شد. با توجه به جدولهای ۲ و ۳ مشاهده میشود که در آزمایش گروه ۵ بهدلیل استفاده از ورقهای آلومینیومی در لایه یشتی و بهدلیل مقاومت کمتر آن نسبت به ورقهای فولادی، در مقادیر ایمپالسهای کمتری نسبت به گروه یک دچار پارگی شدند. با افزایش ضخامت ورق مقابل خرج در مقابل ورقهای آلومینیومی (گروه ۳) مشاهده می شود که ورقها در مقادیر ایمیالسهای بالاتری نسبت به گروه ۵ به پارگی میرسند. با مقایسه نتایج آزمایشها گروههای ۲ و ۴ مشاهده میشود که ورقهای گروه ۴ بهدلیل استفاده از ورقهای فولادی باضخامت بالاتر در مقابل خرج انفجار در مقادیر ایمپالس بالاتری به حالت یارگی رسیده است. با مقایسه نتایج آزمایش در گروههای ۶ و ۱۰ هندسه مستطیلی مشاهده می شود که به دلیل استفاده از ورقهای آلومینیومی در لایه پشتی گروه ۱۰ آزمایش، این گروه در مقادیر ایمیالس پایینتری نسبت به گروه ۶ به پارگی رسیده است. همچنین مشاهده میشود با افزایش ضخامت ورق مقابل خرج در لایه جلویی ورقهای آلومینیومی (گروه ۷) ورقها در مقدار ایمپالس بالاتری نسبت به گروه ۱۰ به حالت یارگی رسیده است. با مقایسه نتایج آزمایشهای گروه ۸ و ۹ مشاهده میشود که ورقهای گروه ۹ بهدلیل استفاده از ورقهای فولادی باضخامت بالاتر در مقابل خرج انفجار در مقادیر بالاتری از ایمیالس به حالت پارگی دست مییابند و میتوان نتیجه گرفت که با افزایش ضخامت لایه مقابل خرج انفجاری تا حدود قابلتوجهی از تخریب و آسیبرسیدن به لایه دوم در هنگام شکلدهی جلوگیری کرد.



نمودار ۴) منحنی خیز مرکز ورق برحسب ایمپالس برای ورقهای مربعی



نمودار ۵) منحنی خیز مرکز ورق برحسب ایمپالس برای ورقهای مستطیلی

کرنشهای طولی و عرضی و قطری ناشی از بارگذاری انفجاری

در این بخش به اندازه گیری کرنشهای منتجه ناشی از شکلدهی انفجاری پرداخته شده است. برای اندازهگیری کرنشها در ورقهای مستطیلی تغییر شکلیافته ابتدا قبل از انجام آزمایش، توسط یک شبکه مستطیلی با مربعهای هممرکز که به فاصله یک سانتیمتر از هم قرار دارند را روی سطح ورق با استفاده از شابلون مربوطه و

ـ بررسی تجربی پاسخ دینامیکی ورقهای دولایه چهارگوش فلزی تحت بارگذاری دفعی غیریکنواخت ۲۴۵۳

قلم با جوهر مقاوم ترسیم شده و پس از تغییر شکل ورق، طول و عرض شبکه مستطیلی و همچنین لولای پلاستیک قطری در محل ترسیم مستطیلها توسط یک کولیس با دقت ۰/۰۱ اندازهگیری شده است. شکل ۲ شابلون برای ورقهای مربعی و مستطیلی و شکل ۸ نمونه ورق مستطیلی آمادهشده قبل از انجام آزمایش را نشان میدهد.



شکل ۷) الف) شابلون برای ورقهای مربعی، ب) شابلون برای ورقهای مستطیلی



شکل ۸) ورق مستطیلی پس از رسم خطوط

 (γ)

برای محاسبه کرنش ناشی از تغییر شکل انفجاری از رابطه ۲۱ استفادهشده است.

$$\varepsilon = ln\left(\frac{L}{L_{0}}\right)$$

در این رابطه L_0 و L بهترتیب طول ناحیه مورد نظر قبل و پس از تغییر شکل هستند.

در محاسبه کرنشهای طولی و عرضی با توجه به برابربودن طول و عرض ابعاد ورقهای مربعی تحت بارگذاری و همچنین متقارنبودن بارگذاری، کرنشهای طولی و عرضی با هم برابر خواهند بود. در نمودارهای ۶ تا ۱۵ کرنشهای طولی، عرضی و قطری ورقهای مربعی تحت بارگذاری انفجاری ارایه شده است. لازم به ذکر این نکته است که بهدلیل رفتار مشابه و کمشدن حجم نمودارها تنها از هر گروه دو آزمایش موردبررسی قرارگرفته شده است. منحنی کرنشهای عرضی، طولی و قطری برای برخی از آزمایشهای ورق مستطیلی دولایه تحت بارگذاری در نمودارهای















نمودار ۹) منحنی کرنش طولی و عرضی در آزمایشهای ۱۱ و ۱۲



نمودار ۱۰) منحنی کرنش طولی و عرضی در آزمایش ۱۳



نمودار ۱۱) منحنی کرنش قطری در آزمایشهای ۲ و ۴



نمودار ۱۷) منحنی کرنش عرضی در آزمایشهای ۱۷ و ۱۹

Volume 20, Issue 10, October 2020

0.5 آزمایش 5- ورق مقابل خرج 🗕 آزمایش 5- ورق پشتی آزمایش 7- ورق مقابل خرج • آزمایش 7- ورق پشتی 2 4 6 8 فاصله تا مرکز ورق (mm)













نمودار ۲۳) منحنی کرنش طولی در آزمایشهای ۲۰ و ۲۱

ماهنامه علمی- پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس

كرنش

كرنش طولى

كرنش

اطولر

ـ بررسی تجربی پاسخ دینامیکی ورقهای دولایه چهارگوش فلزی تحت بارگذاری دفعی غیریکنواخت ۲۴۵۷



Modares Mechanical Engineering

Volume 20, Issue 10, October 2020



نمودار ۳۰) منحنی کرنش قطری در آزمایشهای ۲۵ و ۲۶

همان گونه که در نمودارها فوق مشاهده می شود با افزایش جرم ماده منفجره که منجر به افزایش انرژی واردشده به ورقهای تحت بارگذاری میشود میزان تغییر شکل افزایش مییابد و به همین دلیل موجب افزایش کرنش شده است. با توجه به نوع بارگذاری مشاهده میشود که کرنش در نقاط نزدیک به مرکز ورق مقدار بیشتری نسبت به نقاط مرزی دارد و مقدار کرنش از مرکز ورق به نقاط مرزی به سمت صفر میل میکند. دلیل این پدیده آن است که نقاط مرزی توسط گیره مهار شده و تغییر شکل در آن بسیار کم است و همچنین نقاط مرکزی ورق در اثر بارگذاری غیریکنواخت تغییر شکل بیشتری نسبت به نقاط مرزی دارند. هر چه مقادیر جرم خرج انفجار و ایمپالس ناشی از انفجار در آزمایشها هر گروه افزایش یابد ورقهای تغییر شکلیافته دچار آسیب و تخریب میشود. با توجه به بارگذاری انفجاری غیریکنواخت و مقادیر بالای کرنشها در نواحی مرکزی میتوان عنوان نمود برای جلوگیری از تخریب و آسیب ورقهای تحت بارگذاری و دستیابی به شکلدهی مطلوب از ایمیالس با مقادیر کمتری باید بهره برد. در آزمایشهای ۸، ۹، ۱۷، ۱۹، ۲۵ و ۲۶ اختلاف كرنش بين ورق مقابل خرج و ورق پشتى بهدليل اختلاف در به تسلیمرسیدن آلومینیوم و فولاد است. در ورق مقابل خرج که از جنس فولاد است در مدتزمان بیشتری به ناحیه تسلیم میرسد در صورتی که در ورق پشتی که جنس آن از آلومینیوم است تسلیم در مدتزمان کمتری اتفاق میافتد و ورق وارد ناحیه یلاستیک می شود.

نتيجهگيرى

آزمایشهای تجربی بر روی ورقهای مستطیلی و مربعیشکل از جنس آلومینیوم و فولاد باضخامتهای مختلف و بهصورت دولایه انجام شد. در این آزمایشها به بررسی خیز ناشی از بارگذاری انفجاری، محاسبه ایمپالس ناشی از انفجار ماده منفجره و نیز

بررسی کرنشهای عرضی و طولی ناشی از تغییر شکل ورقها پرداخته شد. نتایج کلی بهصورت زیر بیان شده است:

۱- با توجه به شکلدهی انفجاری برای ورقهای مربعی و مستطیلی و همچنین با توجه به بررسی مودهای شکست ناشی از شکلدهی مشاهده میشود با تغییر ابعاد ورق از هندسه مربعی به هندسه مستطیلی پارگی تحت بارگذاری با مقدار گرم خرج بالاتر و ایمپالس بالاتر رخ میدهد. بهعبارت دیگر میتوان نتیجه گرفت با تغییر ابعاد از ورق مربعی به مستطیلی میتوان از مقادیر ایمپالسهای بالاتری بهمنظور تغییر شکل ورق بهره برد.

۲- از مهمترین کارهای انجامشده ترکیب ورق آلومینیوم با ورق فولادی به هنگام شکلدهی است. چرا که ورق فولادی به کارگرفته شده جلوی ورق آلومینیومی قرار گرفته و با قابلیت شکل پذیری مناسب خود علاوه بر افزایش مدت زمان انجام فرآیند، از پارگی ورق های آلومینیومی به هنگام تغییر شکل جلوگیری می کند. هر دو عمل انجام شده گام مهمی در زمینه شکل دهی در صنعت است.

۳- با توجه به آزمایشهای تجربی مشاهده میشود که با افزایش معیابد.
 مقدار جرم خرج انفجاری، مقدار ایمپالس و خیز افزایش مییابد.
 ۶- با بررسی کرنشهای حاصل از آزمایشهای تجربی مشاهده میشود که کرنشهای حاصل از بارگذاری با افزایش مقدار جرم خرج و در نتیجه افزایش مقدار ایمپالس افزایش مییابد.

٥- با بررسی نمودارهای کرنش عرضی و طولی برای ورقهای مستطیلی مشاهده میشود که کرنشهای عرضی نسبت به کرنشهای طولی مقدار بیشتری دارد. این امر باعث کشیدگی بیشتر ورق در راستای عرضی و درنتیجه آن کاهش ضخامت بیشتر در مرزهای طولی ورق میشود.

۲- در آزمایشهای ۸، ۹، ۱۳، ۱۷، ۱۹، ۵۰ و ۲۲ اختلاف کرنش بین ورق مقابل خرج و ورق پشتی بهدلیل اختلاف در به تسلیمرسیدن آلومینیوم و فولاد دانست. در ورق مقابل خرج که از جنس فولاد است دیرتر به ناحیه تسلیم میرسد در صورتی که در ورق پشتی که جنس آن از آلومینیوم است تسلیم زودتر اتفاق میافتد و ورق وارد ناحیه پلاستیک میشود.

۲- نظر به اینکه قیمت ورقهای فولادی نسبت به ورقهای آلومینیومی ارزانتر است و همچنین با توجه به نتایج آزمایشهای تجربی میتوان عنوان نمود که با بهکارگیری از ورقهای نازک فولادی جلوی ورقهای آلومینیومی به هنگام بارگذاری، شکلپذیری ورق آلومینیومی افزایش پیدا میکند. چرا که باعث به تأخیرافتادن شکلدهی یا کاهش نرخ کرنش شکلدهی میشود. از این نتیجه میتوان در شکلدهی صنایع وابسته استفاده نمود.

تشکر و قدردانی: لطفاً با عبارت مناسب کامل کنید.

تاییدیههای 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. ـ بررسی تجربی پاسخ دینامیکی ورقهای دولایه چهارگوش فلزی تحت بارگذاری دفعی غیریکنواخت ۲۴۵۹

impulsive loading. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications. 2019;233(7):1449-1471

12- Rezasefat M, Mirzababaie Mostofi T, Ozbakkaloglu T. Repeated localized impulsive loading on monolithic and multi-layered metallic plates. Thin-Walled Structures. 2019;144:106332.

13- 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.

14- Mirzababaie 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.

15- Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Alitavoli M. Experimental and analytical investigation into large ductile transverse deformation of monolithic and multilayered metallic square targets struck normally by rigid spherical projectile. Thin-Walled Structures. 2016;107:257-265.

16- Babaei H, Mirzababaie 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.

17- Babaei H, Mirzababaie 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. 18- Mirzababaie 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.

19- Mirzababaie 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.

20- Babaei H, Mirzababaie 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.

21- Babaei H, Mirzababaie 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.

22- Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Namdari-Khalilabad M, Alitavoli M, Mohammadi K. Gas mixture detonation method, a novel processing technique for metal powder compaction: Experimental investigation and empirical modeling. Powder Technology. 2017;315:171-181.

23- Jones N, Uran TO, Tekin SA. The dynamic plastic behavior of fully clamped rectangular plates. International Journal of Solids and Structures. 1970;6(12):1499-1512. **سهم نویسندگان:** توحید میرزابابای مستوفی (نویسنده اول)، پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۳۵%)؛ مصطفی سیاح بادخور (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۳۵%)؛ هاشم بابایی (نویسنده سوم)، روششناس/پژوهشگر اصلی (۳۰%).

منابع مالی: کلیه هزینهها توسط نویسندگان تامین شده است.

منابع

1- Jamali A, Babaei H, Nariman-Zadeh N, Ashraf Talesh S, Mirzababaie 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.

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

3- Babaei H, Mirzababaie 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.

4- Babaei H, Mirzababaie 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, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. 2017;231(3):490-496.

5- 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.

6- Mirzababaie 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.

7- Mirzababaie 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.

8- 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.

9- 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.

10- 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.

11- Rezasefat M, Mirzababaie Mostofi T, Babaei H, Ziya-Shamami M, Alitavoli M. Dynamic plastic response of double-layered circular metallic plates due to localized Experimental and theoretical study on large ductile transverse deformations of rectangular plates subjected to shock load due to gas mixture detonation. Strain. 2017;53(4):12235.

35- Sayah Badkhor M, Hasanzadeh M, Mirzababaie Mostofi T. Numerical investigation and optimization on performance of sandwich panel structures with honeycomb core subjected to blast loading by response surface methodology. Amirkabir Journal of Mechanical Engineering. 2019;52(10):121-130. [Persian]

36- Sayah Badkhor M, Mirzababaie mostofi T, Babaei H. Low-velocity impact response of plate with different geometries under hydrodynamic load: Experimental investigation and process optimization by response surface methodology. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(4):807-818. [Persian]

37- Sayah Badkhor M, Mirzababaie Mostofi T, Babaei H. Dynamic response of metal powder subjected to lowvelocity impact loading: Experimental investigation and optimization using response surface methodology. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(4):863-876. [Persian]

38- Mirzababaie Mostofi T, Sayah Badkhor M. Experimental study and optimization of dynamic response of polymer-coated metal plates subjected to impact loading using response surface methodology. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(4):1011-1023. [Persian]

39- Mirzababaie Mostofi T, Sayah Badkhor M, Babaei H. High-velocity compaction of aluminum powder by gas detonation forming technique. International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology. 2020;13(1):17-29.

40- Mirzababaie 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.

41- Flores-Johnson EA, Saleh M, Edwards L. Ballistic performance of multi-layered metallic plates impacted by a 7.62-mm APM2 projectile. International Journal of Impact Engineering. 2011;38(12):1022-1032.

42- Deng Y, Zhang W, Cao Z. Experimental investigation on the ballistic resistance of monolithic and multilayered plates against hemispherical-nosed projectiles impact. Materials & Design. 2012;41:266-281. 24- Jones N, Baeder RA. An experimental study of the dynamic plastic behavior of rectangular plates. Symposium on Plastic Analysis of Structures, 1 September 1972, Iasi, Romania. Boston: Massachusetts Institute of Technology; 1972.

25- 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.

26- 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.

27- Nurick GN, Pearce HT, Martin JB. Predictions of transverse deflections and in-plane strains in impulsively loaded thin plates. International Journal of Mechanical Sciences. 1987;29(6):435-442.

28- Rudrapatna NS, Vaziri R, Olson MD. Deformation and failure of blast-loaded square plates. International Journal of Impact Engineering. 1999;22(4):449-467.

29- Jacob N, Yuen SCK, Nurick GN, Bonorchis D, Desai SA, Tait D. Scaling aspects of quadrangular plates subjected to localised blast loads—experiments and predictions. International Journal of Impact Engineering. 2004;30(8-9):1179-1208.

30- 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.

31- Sharma AK, Rout DK. Finite element analysis of sheet hydromechanical forming of circular cup. Journal of Materials Processing Technology. 2009;209(3):1445-1453.

32- Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Alitavoli M. Experimental investigation and analytical modelling for forming of circular-clamped plates by using gases mixture detonation. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2020;234(5):1102-1111.

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

34- Mirzababaie Mostofi T, Babaei H, Alitavoli M.