



## 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.<sup>1</sup> PhD,  
Sayah Badkhor M.<sup>1</sup> PhD,  
Babaei H.\*<sup>2</sup> 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.

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Department, Electrical, Computer and Mechanical Engineering Faculty, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran

<sup>2</sup>Mechanical 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 multi-layered metallic ... [42] Experimental investigation on the ballistic resistance of ...

## 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 ایوان کی، ایوان کی، ایران

مصطفی سیاح پادخور PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی برق، مکانیک و کامپیوتر، دانشگاه ایوان کی، ایوان کی، ایران

هاشم بابایی PhD

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

### چکیده

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 به‌کارگیری 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 ۵/۲ میلی‌متر و ورق‌های آلومینیومی در ضخامت‌های یک و ۲ میلی‌متر 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 آفت 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: ۱۳۹۹/۰۴/۲۵

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 [5-10] 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 می‌گیرد. آغاز این روش شکل‌دهی به اواسط قرن نوزدهم برمی‌گردد، به‌نحوی که محققین متوجه شدند از انرژی حاصل از انفجار خرج‌های انفجاری می‌توان در جهت شکل‌دهی دلخواه ورق‌ها استفاده کرد. با توجه به توضیحات ارائه‌شده، 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 [11-14]. همچنین ارائه اعداد بی‌بعد مناسب جهت پیش‌بینی رفتار این سازه‌ها تحت بار انفجاری نیز از دیگر اهداف این حوزه از فن است [15-22].

جونز و همکاران، آزمایش‌های تجربی را بر روی ورق‌های مستطیلی‌شده انجام دادند. در این آزمایش‌ها ورق‌ها به‌صورت کاملاً گیردار در نظر گرفته شدند. همچنین به‌منظور اندازه‌گیری ایمپالس به‌صورت مستقیم از سامانه پاندول بالستیک 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 ارائه 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]. 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، ارائه 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 ۱۲ میلی‌متر به‌دست آورده بود، تطابق خوبی داشت [25]. رادراپاتنا و همکاران برای پارگی ورق‌های مربعی تقویت‌شده مدلی را ارائه 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 جزئی 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 با ضخامت‌های 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

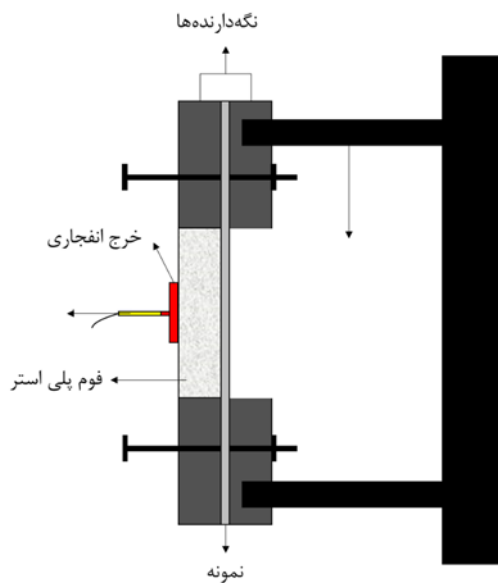
با ضخامت‌های متفاوت انجام دادند. یکی از اهداف این مطالعات یافتن نسبت‌های ترکیب متفاوت دو گاز استیلن و اکسیژن برای شکل‌دادن ورق‌های مستطیلی بود<sup>[34]</sup>. سیاح بادخور و همکاران به مطالعه اثر شرایط مختلف بارگذاری و همچنین هندسه ساختار بر رفتار ساختار ساندویچی تحت بارگذاری دفعی یکنواخت پرداختند. آنها ضمن مدل‌سازی عددی به مطالعه پارامترهای مهم در این فرآیند نیز پرداختند<sup>[35]</sup>. 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 پاسخ را دارد<sup>[36]</sup>. 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<sup>[37]</sup>. میرزابابی 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<sup>[38]</sup>. میرزابابی 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 تشکیل‌شده با این روش نسبت به سایر روش‌ها بسیار خوب است<sup>[39]</sup>. میرزابابی 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 پلی‌اوره بود<sup>[40]</sup>.

با بررسی کارهای پیشین محققین، این نتیجه به دست 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<sup>[41, 42]</sup>. 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 مستطیل‌شکل 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 مربعی‌شکل به صورت روش تماس مستقیم بر روی ورق‌هایی از جنس آلومینیوم و فولاد با ضخامت‌های مختلف و به صورت دولایه و بررسی خیز ناشی از بارگذاری انفجاری انجام شده است. همچنین محاسبه ایمپالس ناشی از انفجار ماده

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 با ضخامت یکسان و ارتفاع متنوع خرج را با نسبت ثابت خرج به عرض ورق بررسی نمودند<sup>[29]</sup>. پارک و چو، توانستند عدد بی‌بعد ارایه‌شده توسط جونز را با ارایه معادله عددی بی‌بعد برای ورق‌های مستطیلی تحت بارگذاری انفجاری که در آن نسبت طول به عرض ورق نیز مشاهده می‌شد اصلاح کنند. در این تحقیق معادله پیشنهادشده با نتایج تجربی توافق نسبتاً خوبی داشت<sup>[30]</sup>. شارما و روت با شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار ال‌اس‌داینا و با به‌کارگیری روش حل صریح، فرآیند هیدروفورمینگ 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<sup>[31]</sup>. بابایی و همکاران به بررسی تجربی و تحلیلی تغییر شکل غیرالاستیک ورق‌های مستطیلی گیردار با استفاده از بار هیدرودینامیکی پرداختند. در این سری از مطالعات از سامانه چکش پرتابه‌ای به منظور ایجاد بار هیدرودینامیکی برای شکل‌دهی به‌کار 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<sup>[32]</sup>. بابایی و همکاران به بررسی تجربی و عددی تغییر شکل پلاستیک ورق‌های فولادی مستطیلی با روش انفجار مخلوط گازها پرداختند. ورق‌های فولادی با ضخامت‌های 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 انجام گرفت. برای صحت‌گذاری مدل عددی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی مقایسه شد که حاکی از سازگاری قابل قبولی نتایج عددی با نتایج تجربی داشت<sup>[33]</sup>. میرزابابی مستوفی و همکاران مطالعه تجربی و تحلیلی 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

در انتهای بدنه پاندول قلم و میله نگه‌دارنده قلم متصل شده است. بر اثر انتقال انرژی ناشی از انفجار پاندول به صورت 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 ایمپالس از آن می‌توان استفاده نمود.

به منظور 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 به وسیله 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  $۳۰ \times ۴۰ \times ۳$  سانتی‌متر برای نگه‌دارنده‌های مستطیلی و  $۳۰ \times ۳۰ \times ۳$  سانتی‌متر برای نگه‌دارنده‌های مربعی برش خورده و برای قرارگیری بین نگه‌دارنده‌های مورد نظر، مطابق با نقشه نگه‌دارنده‌ها سوراخ‌کاری شده است. ورق‌های سوراخ‌کاری شده با استفاده از پیچ و مهره بین نگه‌دارنده‌ها قرار گرفته و برای جلوگیری از لقی به خوبی سفت شده است. در نمونه‌هایی که قبل از آزمایش‌ها اصلی بر روی ورق‌های تک‌لایه و به منظور 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 با ضخامت کم استفاده شده است.

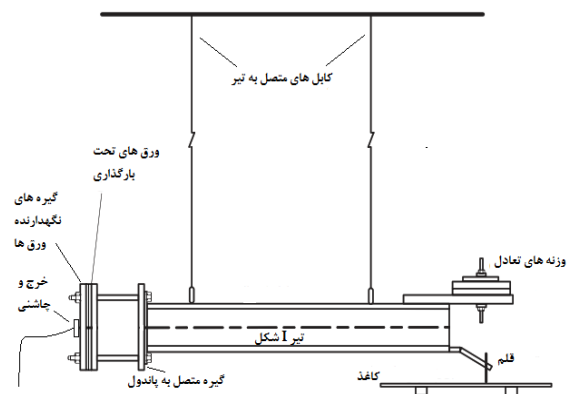
#### خواص مکانیکی مواد

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

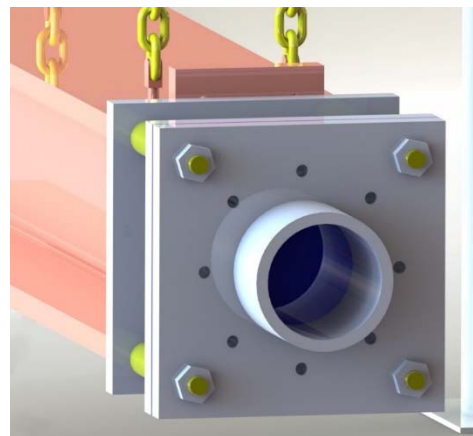
منفجره و با استفاده معادلات مکانیکی وابسته به پاندول بالستیک و نیز بررسی کرنش‌های عرضی و طولی ناشی از تغییر شکل ارایه شده است.

#### مطالعه تجربی

به منظور 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. به منظور تثبیت و ثابت کردن ورق‌های تحت بارگذاری انفجاری از دو نگه‌دارنده از جنس آلومینیوم استفاده شده است. ورق‌ها با استفاده از ۱۲ پیچ و مهره بین دو نگه‌دارنده ثابت شده و سپس به وسیله ۴ پیچ بلند به نگه‌دارنده متصل می‌شود. در شکل ۲ شماتیکی از نحوه اتصال پاندول به بدنه اصلی نگه‌دارنده نمایش داده شده است.



شکل ۱) شماتیک پاندول بالستیک



شکل ۲) شماتیک اتصال نگه‌دارنده به بدنه اصلی پاندول بالستیک

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.

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

که در آن  $X_0$  سرعت اولیه پاندول و  $\omega_d$  از رابطه ۵ محاسبه می‌شود.

$$\omega_d = \sqrt{\omega_n^2 - \beta^2} \quad (5)$$

با در نظر گرفتن  $x_1$  به‌عنوان مقدار جابه‌جایی روبه‌جلوی پاندول در لحظه  $t = \frac{T}{4}$  و  $x_2$  مقدار جابه‌جایی روبه‌عقب در لحظه  $t = \frac{3T}{4}$  و سپس با قراردادن این مقادیر در معادله ۴، مقادیر  $x_1$  و  $x_2$  به‌ترتیب به‌صورت روابط ۶ و ۷ به‌دست می‌آیند.

$$x_1 = \frac{x_0 T}{2\pi} e^{-\beta T/4} \quad (6)$$

$$x_2 = \frac{x_0 T}{2\pi} e^{-3\beta T/4} \quad (7)$$

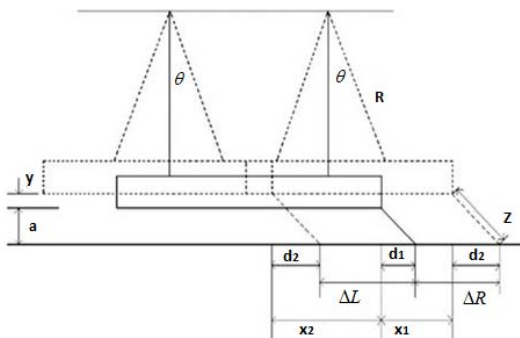
نسبت دو دامنه متوالی به‌صورت رابطه ۸ قابل محاسبه است.

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{e^{-\beta T/4}}{e^{-3\beta T/4}} = e^{-\beta T/2} \quad (8)$$

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.

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

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 داده شده است.



شکل ۴ طرح شماتیک حرکت پاندول بالستیک

شده است. برای بررسی همگن بودن 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 تعیین 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

پارامتر	جنس ورق	
	آلومینیوم	فولاد
ضخامت (mm)	یک، ۲ و ۲/۵	یک و ۲
چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	۲۷۰۰	۷۸۵۰
مدول الاستیسیته (GPa)	۶۹/۹	۲۰۰
تنش تسلیم (MPa)	۱۵۷	۲۲۶
ضریب پواسون	۰/۳۳	۰/۳

### محاسبه ایمپالس توسط پاندول بالستیک

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 مقیاس‌بندی شده بنا شده است، نمی‌توانند مبنای دقیقی برای پیش‌بینی و تخمین ایمپالس انفجار و در نتیجه استفاده در شکل‌دهی باشند. از سوی دیگر به‌دلیل فشار بسیار بالای موج‌های انفجاری استفاده از وسایل اندازه‌گیری بسیار هزینه‌بر خواهند بود و همچنین دقت تجهیزات اندازه‌گیری در طی مراحل انجام آزمون تحت شعاع قرار می‌گیرد. برای اندازه‌گیری ایمپالس از سامانه پاندول بالستیک استفاده شده است. سازوکار اندازه‌گیری ایمپالس براساس قوانین فیزیکی، مکانیکی و ارتعاشی حاکم بر پاندول است. در نتیجه می‌توان بیان نمود در صورت فراهم آوردن 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 در حرکت پاندول، می‌توان معادله حرکت پاندول را به‌صورت معادله ۱ در نظر گرفت.

$$\ddot{X} + 2\beta\dot{X} + \omega_n^2 X = 0 \quad (1)$$

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

$$\beta = \frac{c}{2M} \quad (2)$$

$$\omega_n = \frac{2\pi}{T} \quad (3)$$

با قراردادن روابط ۱۴ و ۱۰ در روابط ۱۵ و ۱۶ به ترتیب مقادیر  $x_1$  و  $x_2$  برحسب ابعاد قابل اندازه‌گیری و ثبت شده مطابق روابط ۱۷ و ۱۸ به دست خواهند آمد.

$$x_1 = \Delta R - \sqrt{\left(Z^2 - \left(a + \frac{x_1^2}{2R}\right)^2\right) + \sqrt{Z^2 - a^2}} \quad (17)$$

$$x_2 = \Delta R - \sqrt{\left(Z^2 - \left(a + \frac{x_1^2}{2R}\right)^2\right) - \sqrt{Z^2 - a^2}} \quad (18)$$

جابه‌جایی به سمت جلو ( $x_1$ ) بهترین تقریب برای محاسبه سرعت اولیه حرکت پاندول بالستیک است بنابراین با استفاده از معادله ۶ می‌توان رابطه ۱۹ را به دست آورد.

$$\dot{X}_0 = \frac{2\pi x_1 e^{\beta T/4}}{T} \quad (19)$$

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

$$I = M\dot{X}_0 \quad (20)$$

### نتایج و بحث

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

مطابق شکل ۴ لازم به ذکر است که طول خطوط  $\Delta L$  و  $\Delta R$  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.

$$d_1 = \sqrt{Z^2 - a^2} \quad (10)$$

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

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

با فرض کوچک بودن زاویه نوسان و خطی بودن طول کمان، روابط ۱۲ و ۱۳ به دست می‌آیند.

$$x_1 = R\theta \quad (12)$$

$$y = \frac{R\theta^2}{2} \quad (13)$$

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

$$d_2 = \sqrt{\left(Z^2 - \left(a + \frac{x_1^2}{2R}\right)^2\right)} \quad (14)$$

بنابراین روابط  $x_1$  و  $x_2$  را می‌توان به ترتیب به صورت روابط ۱۵ و ۱۶ به دست آورد.

$$x_1 = \Delta R + d_1 - d_2 \quad (15)$$

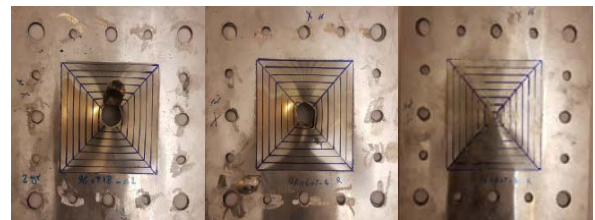
$$x_2 = \Delta L - d_1 + d_2 \quad (16)$$

جدول ۲) نتایج آزمایش‌های انجام شده روی ورق‌های مربعی

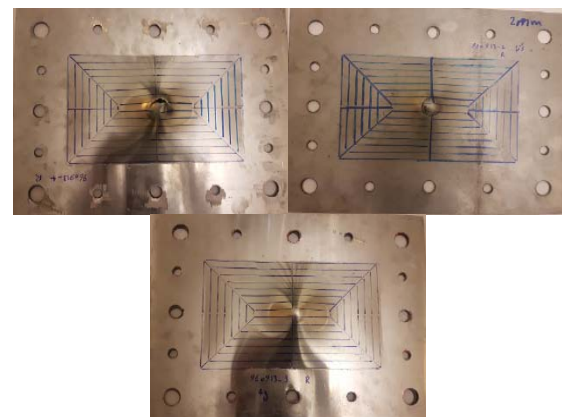
گروه	شماره آزمایش	جنس و ضخامت ورق جلویی (mm)		جنس و ضخامت ورق پشتی (mm)		جرم خرج (g)	قطر خرج (mm)	ایمپالس (N.s)	خیز مرکز ورق (mm)		خیز مرکز ورق نسبت به ضخامت (Wo/h)
		ورق جلویی	ورق پشتی	ورق جلویی	ورق پشتی						
یک	۱	ST-1	ST-2	پارگی	پارگی	۷+۱	۳۰	۱۹/۶۲	پارگی	پارگی	
	۲	ST-1	ST-2	پارگی	پارگی	۵+۱	۳۰	۱۵/۱۷	پارگی	پارگی	
	۳	ST-1	ST-2	پارگی	پارگی	۴+۱	۳۰	۱۲/۳۷	پارگی	پارگی	
	۴	ST-1	ST-2	پارگی	پارگی	۳+۱	۳۰	۸/۲۰	۱۱/۵	۱۳/۵	۶/۷۵
۲	۵	ST-2	ST-2.5	پارگی	پارگی	۴+۱	۳۰	۱۲/۷۷	۱۶/۵	۱۷/۵	۷
	۶	ST-2	ST-2.5	پارگی	پارگی	۵+۱	۳۰	۱۵/۰۳	۲۰/۵	۲۱	۱۰/۲۵
	۷	ST-2	ST-2.5	پارگی	پارگی	۶+۱	۳۰	۱۷/۰۴	۲۴	۱۲	پارگی
۳	۸	ST-2.5	AL-2	پارگی	پارگی	۲+۱	۳۰	۵/۲	۸	۸/۵	۴/۲۵
	۹	ST-2.5	AL-2	پارگی	پارگی	۳+۱	۳۰	۸/۲۱	۱۱/۵	۱۲/۵	۴/۶
	۱۰	ST-2.5	AL-2	پارگی	پارگی	۴+۱	۳۰	۱۲/۷۸	پارگی	پارگی	پارگی
۴	۱۱	ST-2.5	ST-2.5	پارگی	پارگی	۷+۱	۳۰	۲۰/۳	۲۴/۵	۲۵	۹/۸
	۱۲	ST-2.5	ST-2.5	پارگی	پارگی	۹+۱	۳۰	۲۲/۱۳	پارگی	پارگی	پارگی
	۱۳	ST-1	AL-2	پارگی	پارگی	۲+۱	۳۰	۷/۱۲	پارگی	پارگی	پارگی

گروه	شماره آزمایش	جنس و ضخامت ورق جلویی (mm)		جنس و ضخامت ورق پشتی (mm)	جرم خرج (g)	قطر خرج (mm)	ایمپالس (N.s)	خیز مرکز ورق (mm)		خیز مرکز ورق نسبت به ضخامت (Wo/h)
		ورق جلویی	ورق پشتی					ورق جلویی	ورق پشتی	
۶	۱۴	ST-1	ST-2	۱۸/۵	۱۹	۳۰	۱۰/۸۸	۱۸/۵	۱۸/۵	۹/۵
	۱۵	ST-1	ST-2	۱۹/۵	۲۰/۵	۳۰	۱۲/۰۳	۱۹/۵	۱۹/۵	۱۰/۲۵
	۱۶	ST-1	ST-2	۲۵	۲۵/۵	۳۰	۱۶/۳۳	۲۵	۲۵	۱۲/۷۵
۷	۱۷	ST-2/5	AL-2	۱۸/۵	۲۰	۳۰	۱۲/۳۷	۱۸/۵	۱۸/۵	۱۰
	۱۸	ST-2/5	AL-2	پارگی	پارگی	۳۰	۱۶/۴۰	پارگی	پارگی	پارگی
	۱۹	ST-2/5	AL-2	پارگی	پارگی	۳۰	۱۸/۲۹	پارگی	پارگی	پارگی
۸	۲۰	ST-2	ST-2/5	۱۵	۱۵/۵	۳۰	۱۳/۵	۱۵	۱۵	۶/۲
	۲۱	ST-2	ST-2/5	۱۸/۵	۱۹	۳۰	۱۶/۳۲	۱۸/۵	۱۸/۵	۷/۶
	۲۲	ST-2	ST-2/5	۲۰	۲۱	۳۰	۱۸/۳۱	۲۰	۲۰	۸/۴
۹	۲۳	ST-2/5	ST-2/5	۲۳	۲۳/۵	۳۰	۲۳/۷۵	۲۳	۲۳	۹/۴
	۲۴	ST-2/5	ST-2/5	۲۶/۵	۲۶/۵	۳۰	۲۶/۲۶	۲۶/۵	۲۶/۵	۱۱
۱۰	۲۵	ST-1	AL-2	۲۴	۲۵/۵	۳۰	۶/۸	۲۴	۲۴	۱۲/۷۵
	۲۶	ST-1	AL-2	پارگی	پارگی	۳۰	۱۰/۸۵	پارگی	پارگی	پارگی

به مستطیلی مشاهده می‌شود که ورق‌های مستطیلی در مقدار جرم‌های بیشتر و در نتیجه مقدار انرژی بالاتری به پارگی می‌رسد. با مقایسه نتایج آزمایش در گروه‌های یک و ۵ هندسه مربعی مشاهده می‌شود که به دلیل استفاده از ورق‌های آلومینیومی در لایه پشتی گروه ۵، این گروه در مقادیر جرم پایین‌تری 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 به دلیل استفاده از ورق‌های فولادی با ضخامت بالاتر در مقابل خرج انفجار در مقادیر بالاتری از جرم‌های خرج انفجاری به حالت پارگی رسیده است که 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 نمود. با مقایسه نتایج آزمایش در گروه‌های ۶ و ۱۰ هندسه مستطیلی مشاهده می‌شود که به دلیل 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 به دلیل استفاده از ورق‌های فولادی با ضخامت 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.



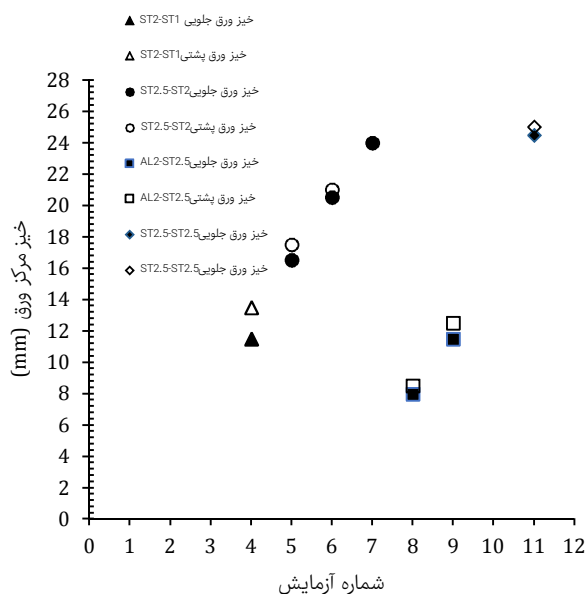
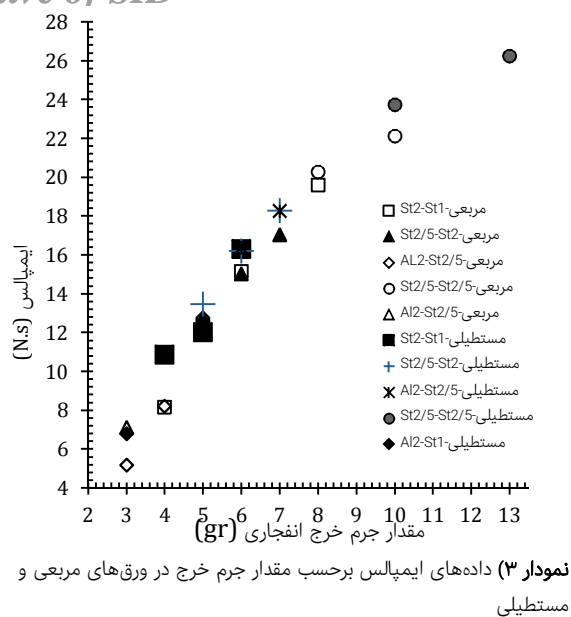
شکل ۵) نمونه ورق‌های مربعی پس از شکل‌دهی انفجاری



شکل ۶) نمونه ورق‌های مستطیلی پس از شکل‌دهی انفجاری

### مقایسه خیز در ورق جلویی و پشتی ورق‌های مربعی و مستطیلی

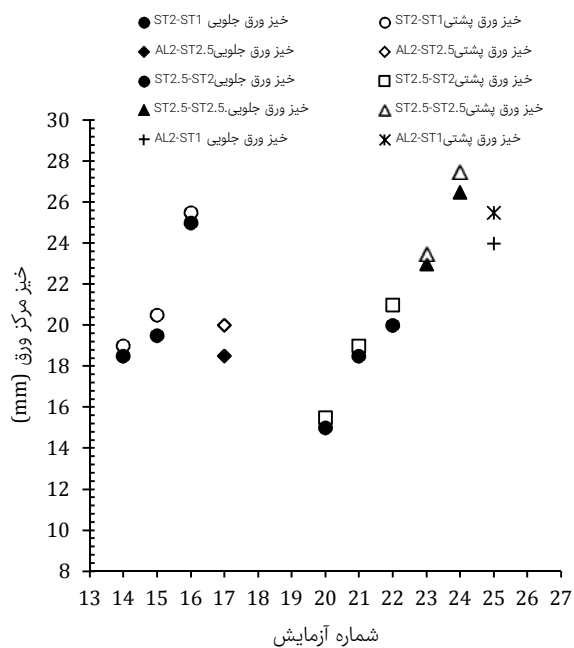
مقایسه مقدار خیز ورق جلویی و پشتی در آزمایش‌های تجربی برای ورق‌های مربعی و مستطیلی در نمودارهای ۱ و ۲ نمایش داده شده است. در نمودار ۱ در آزمایش‌های یک الی ۴ با افزایش شماره آزمایش مقدار جرم خرج انفجاری کاهش می‌یابد و در سایر آزمایش‌ها با افزایش شماره آزمایش مقدار جرم خرج انفجاری افزایش پیدا می‌کند. مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار جرم خرج میزان خیز مرکز ورق‌های دولایه افزایش می‌یابد همچنین با توجه به نمودار ۲، جدول‌های ۲ و ۳ با تغییر ابعاد ورق از مربعی



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

### خیز مرکز ورق برحسب ایمپالس

مقایسه مقدار خیز مرکز ورق برحسب ایمپالس ناشی از انفجار به‌ترتیب برای ورق‌های مربعی و مستطیلی در نمودارهای ۴ و ۵ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشخص است با افزایش ایمپالس، خیز مرکز ورق افزایش می‌یابد. با ادامه افزایش ایمپالس ورق دچار پارگی خواهد شد. با توجه به جدول‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود که در آزمایش گروه ۵ به دلیل استفاده از ورق‌های آلومینیومی در لایه پشتی و به دلیل 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 می‌شود که ورق‌ها در مقادیر ایمپالس‌های بالاتری نسبت به گروه ۵ به پارگی می‌رسند. با مقایسه نتایج آزمایش‌ها گروه‌های ۲ و ۴ مشاهده می‌شود که ورق‌های گروه ۴ به دلیل استفاده از ورق‌های فولادی با ضخامت بالاتر در مقابل خرج انفجار در مقادیر ایمپالس بالاتری به حالت پارگی رسیده است. با مقایسه نتایج آزمایش در گروه‌های ۶ و ۱۰ هندسه مستطیلی مشاهده می‌شود که به دلیل استفاده از ورق‌های آلومینیومی در لایه پشتی گروه ۱۰ آزمایش، این گروه در مقادیر ایمپالس 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 پارگی رسیده است. با مقایسه نتایج آزمایش‌های گروه ۸ و ۹ مشاهده می‌شود که ورق‌های گروه ۹ به دلیل استفاده از ورق‌های فولادی با ضخامت بالاتر در مقابل خرج انفجار در مقادیر بالاتری از ایمپالس 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.



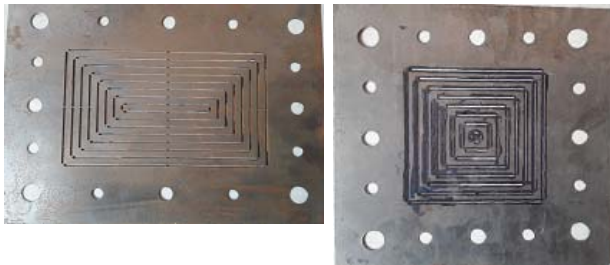
نمودار ۲) مقایسه خیز ورق‌های جلویی و پشتی در ورق‌های مستطیلی

### مقدار ایمپالس برحسب گرم

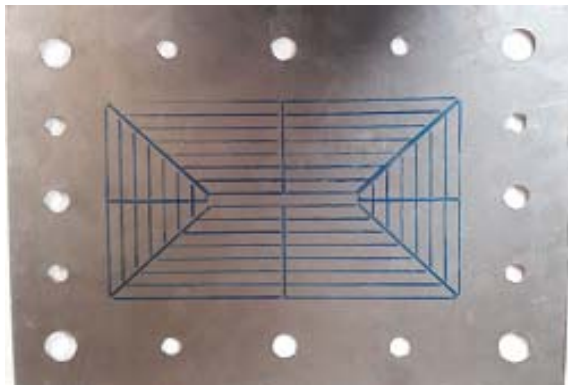
منحنی مقدار ایمپالس برحسب جرم خرج در آزمایش‌ها در نمودار ۳ نمایش داده شده است. همان‌گونه که در این نمودار مشخص است با افزایش جرم ماده منفجره ایمپالس ناشی از انفجار نیز افزایش خواهد یافت. این نکته مهم است که در آزمایش‌های ۱۴ و ۱۸ تا ۲۶ برای انفجار از ماده انفجاری جدید استفاده شد که قدرت انفجاری آن نسبت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



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 ۰/۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. شکل ۷ 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

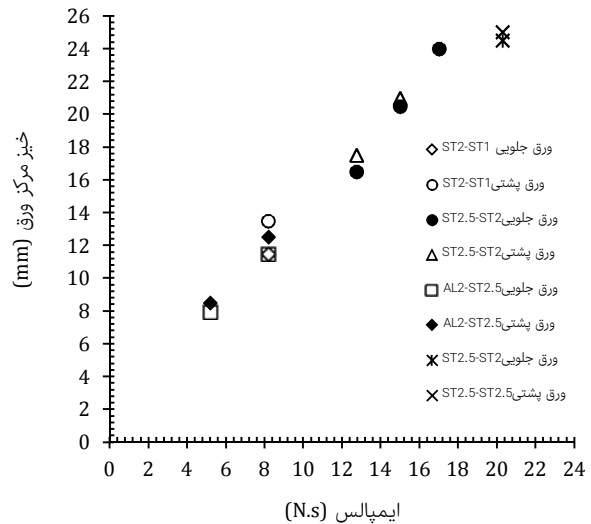
برای محاسبه کرنش ناشی از تغییر شکل انفجاری از رابطه ۲۱ استفاده شده است.

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) \quad (21)$$

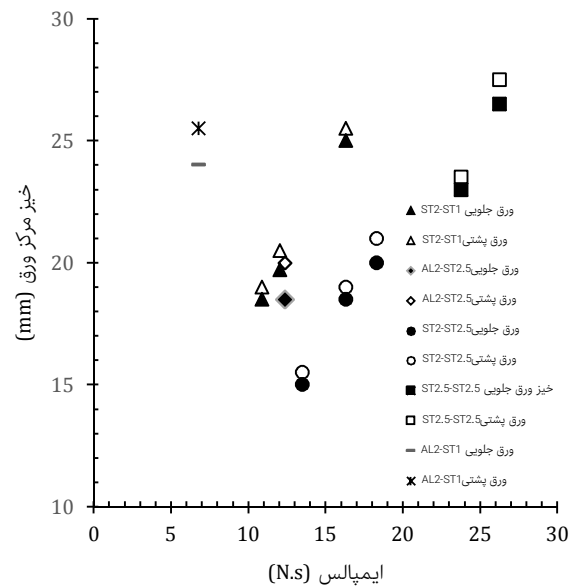
در این رابطه  $L_0$  و  $L$  به ترتیب طول ناحیه مورد نظر قبل و پس از تغییر شکل هستند.

در محاسبه کرنش‌های طولی و عرضی با توجه به برابری طول و عرض ابعاد ورق‌های مربعی تحت بارگذاری و همچنین متقارن بودن 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 به دلیل رفتار مشابه و کم شدن حجم نمودارها تنها از هر گروه دو آزمایش مورد بررسی قرار گرفته شده است. منحنی کرنش‌های عرضی، طولی و قطری برای برخی از آزمایش‌های ورق مستطیلی دولایه تحت بارگذاری در نمودارهای ۱۶ تا ۳۰ نمایش داده شده است.

همچنین با تغییر ابعاد ورق از مربعی به مستطیل شکل مشاهده می‌شود که ورق در ایمپالس بالاتری دچار پارگی می‌شود که می‌توان نتیجه گرفت با تغییر ابعاد از ورق مربعی به ورق مستطیلی می‌توان از مقادیر ایمپالس‌های بالاتری به منظور تغییر شکل ورق بهره برد.



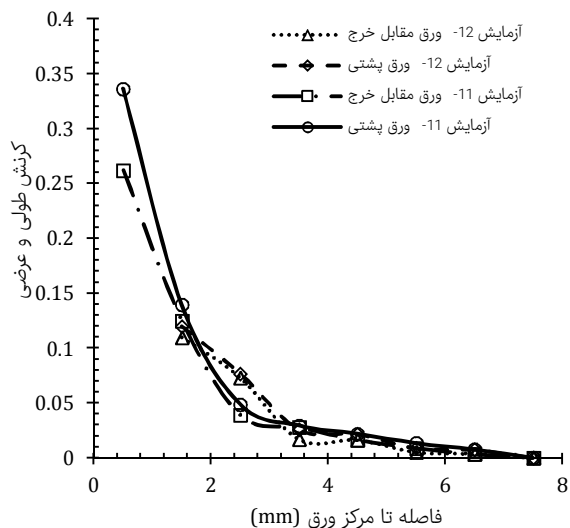
نمودار ۴) منحنی خیز مرکز ورق برحسب ایمپالس برای ورق‌های مربعی



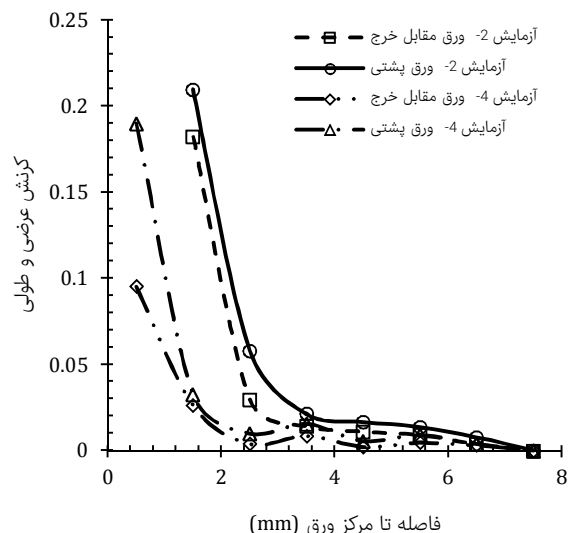
نمودار ۵) منحنی خیز مرکز ورق برحسب ایمپالس برای ورق‌های مستطیلی

### کرنش‌های طولی و عرضی و قطری ناشی از بارگذاری انفجاری

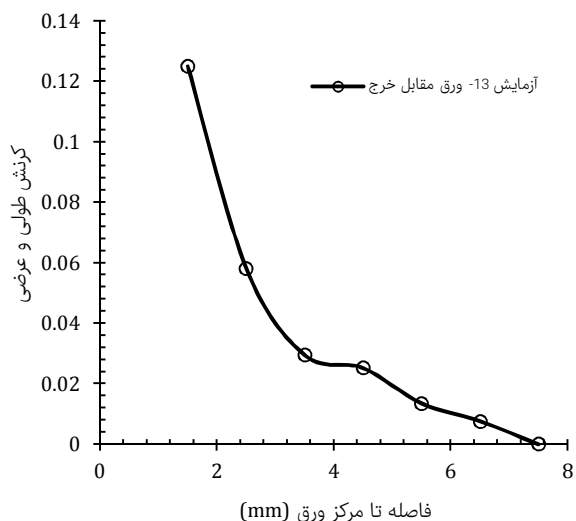
در این بخش به اندازه‌گیری کرنش‌های منتجه ناشی از شکل‌دهی انفجاری پرداخته شده است. برای اندازه‌گیری کرنش‌ها در ورق‌های مستطیلی تغییر شکل یافته ابتدا قبل از انجام آزمایش، توسط یک شبکه مستطیلی با مربع‌های هم‌مرکز که به فاصله یک سانتی‌متر از هم قرار دارند را روی سطح ورق با استفاده از شابلون مربوطه و



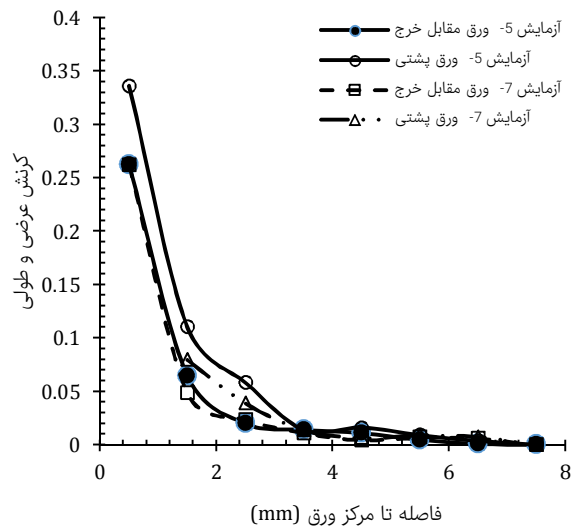
نمودار ۹) منحنی کرنش طولی و عرضی در آزمایش‌های ۱۱ و ۱۲



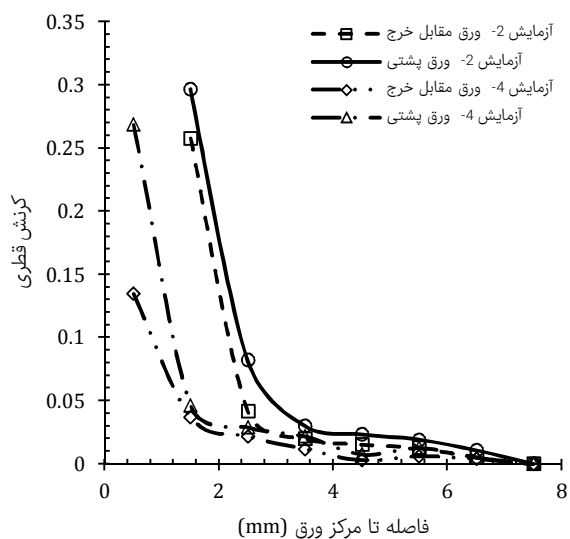
نمودار ۶) منحنی کرنش طولی و عرضی در آزمایش‌های ۲ و ۴



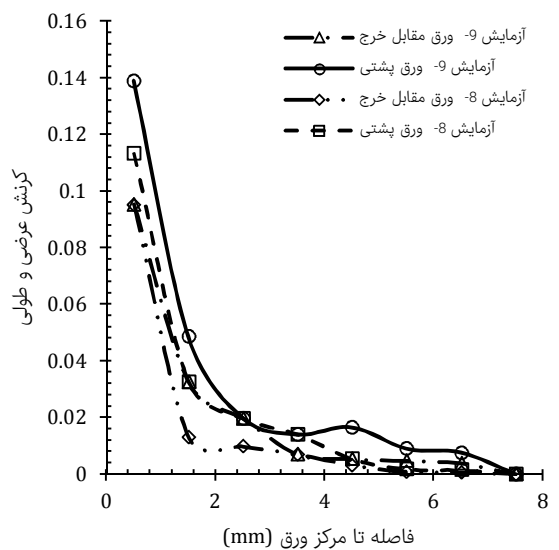
نمودار ۱۰) منحنی کرنش طولی و عرضی در آزمایش ۱۳



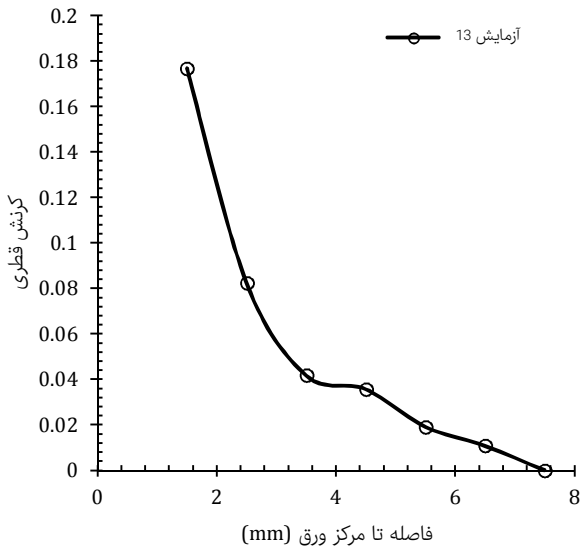
نمودار ۷) منحنی کرنش طولی و عرضی در آزمایش‌های ۵ و ۷



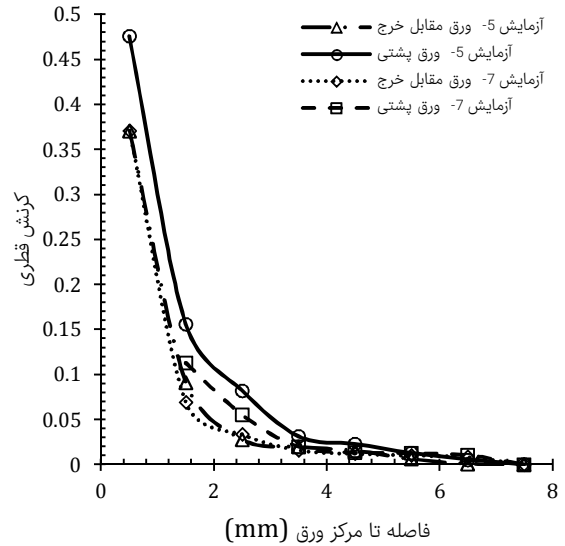
نمودار ۱۱) منحنی کرنش قطری در آزمایش‌های ۲ و ۴



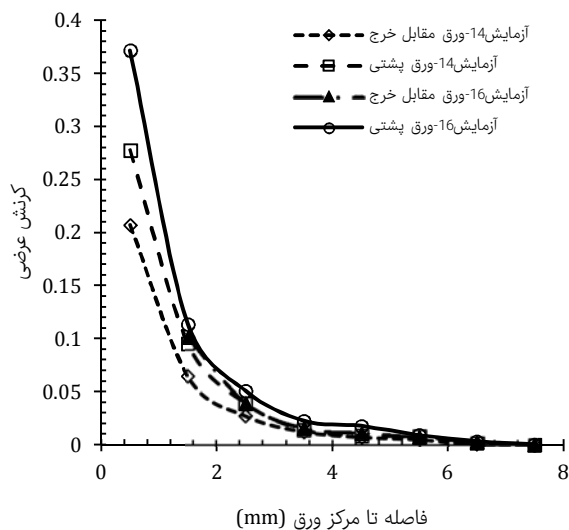
نمودار ۸) منحنی کرنش طولی و عرضی در آزمایش‌های ۸ و ۹



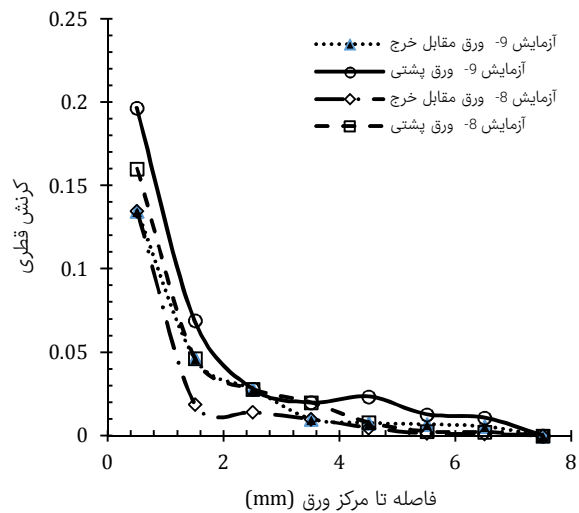
نمودار ۱۵) منحنی کرنش قطری در آزمایش ۱۳



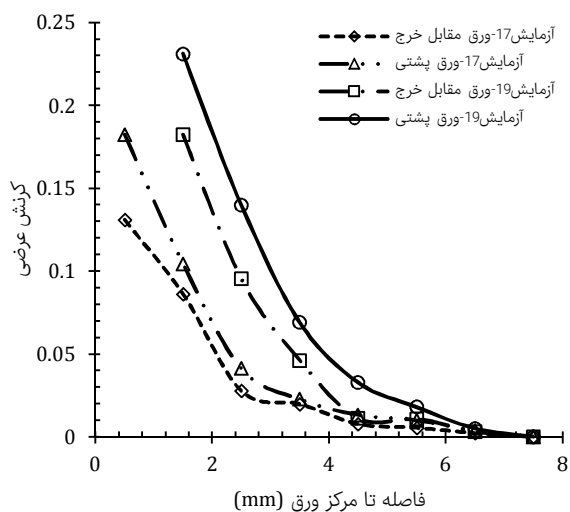
نمودار ۱۲) منحنی کرنش قطری در آزمایش‌های ۵ و ۷



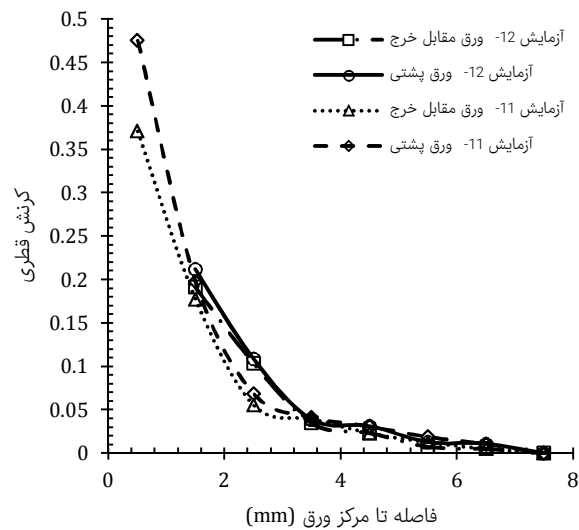
نمودار ۱۶) منحنی کرنش عرضی در آزمایش‌های ۱۴ و ۱۶



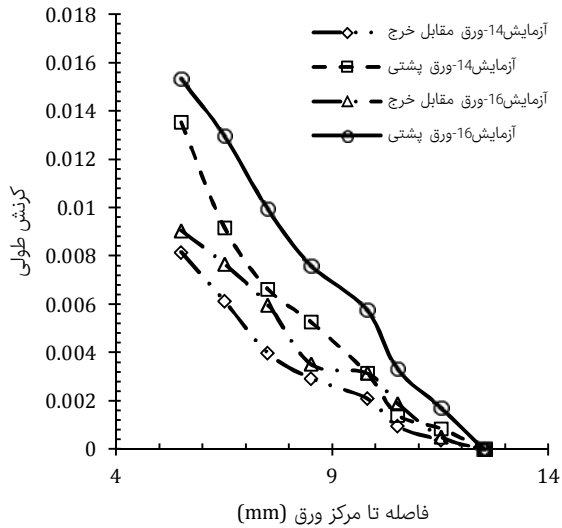
نمودار ۱۳) منحنی کرنش قطری در آزمایش‌های ۸ و ۹



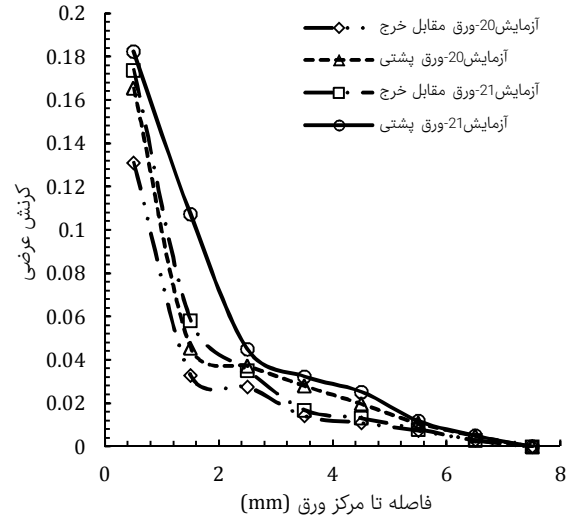
نمودار ۱۷) منحنی کرنش عرضی در آزمایش‌های ۱۷ و ۱۹



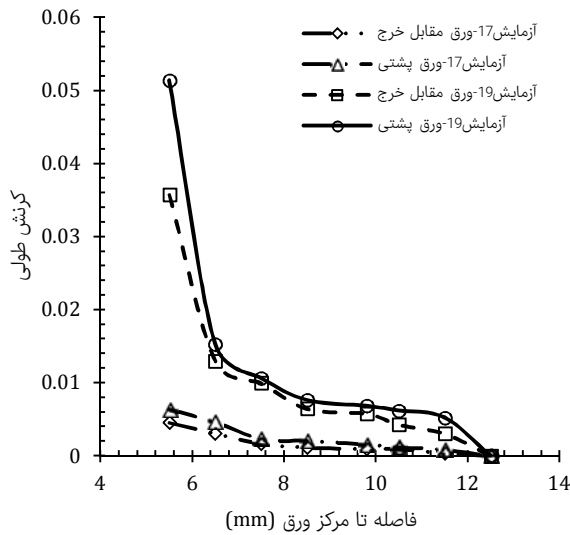
نمودار ۱۴) منحنی کرنش قطری در آزمایش‌های ۱۱ و ۱۲



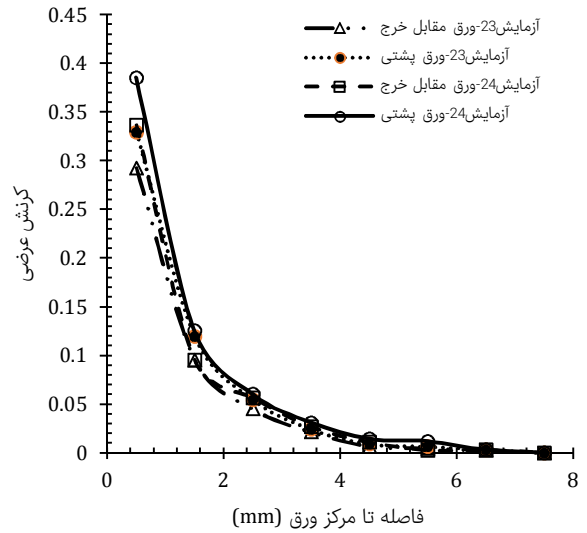
نمودار ۲۱) منحنی کرنش طولی در آزمایش‌های ۱۴ و ۱۶



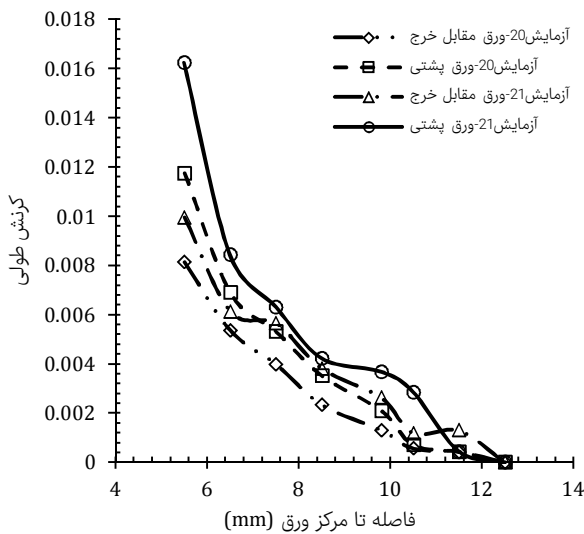
نمودار ۱۸) منحنی کرنش عرضی در آزمایش‌های ۲۰ و ۲۱



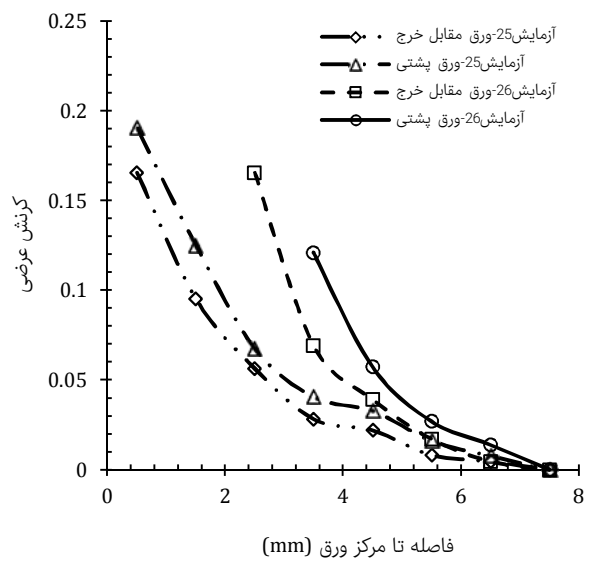
نمودار ۲۲) منحنی کرنش طولی در آزمایش‌های ۱۷ و ۱۹



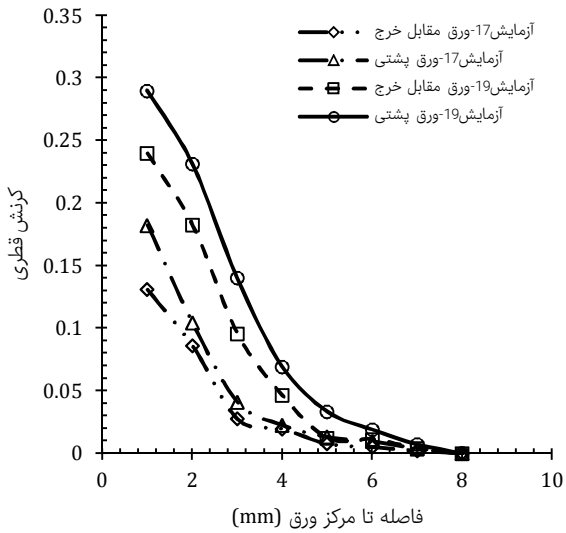
نمودار ۱۹) منحنی کرنش عرضی در آزمایش‌های ۲۳ و ۲۴



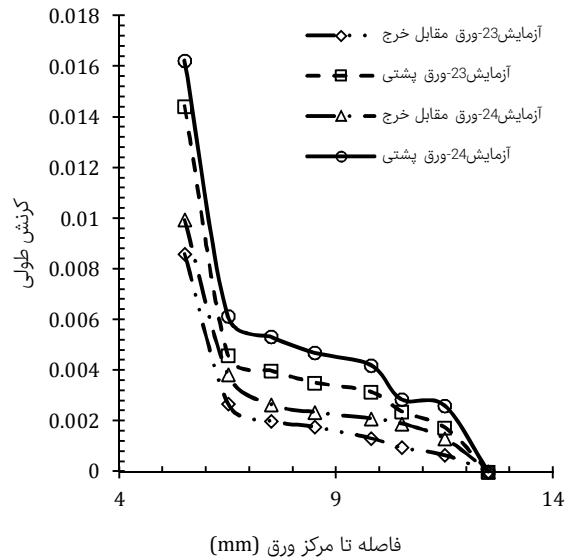
نمودار ۲۳) منحنی کرنش طولی در آزمایش‌های ۲۰ و ۲۱



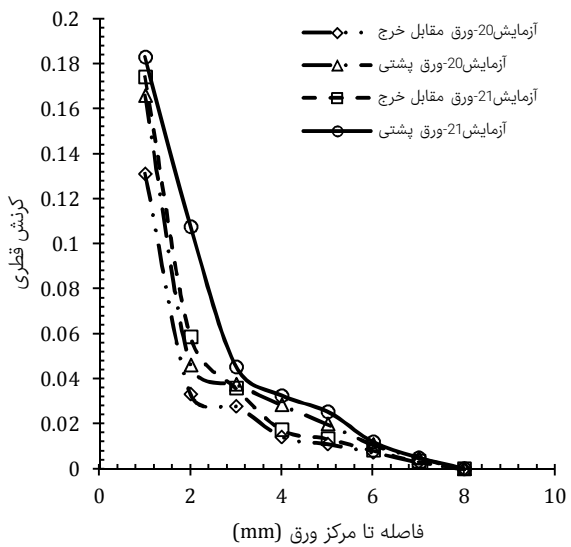
نمودار ۲۰) منحنی کرنش عرضی در آزمایش‌های ۲۵ و ۲۶



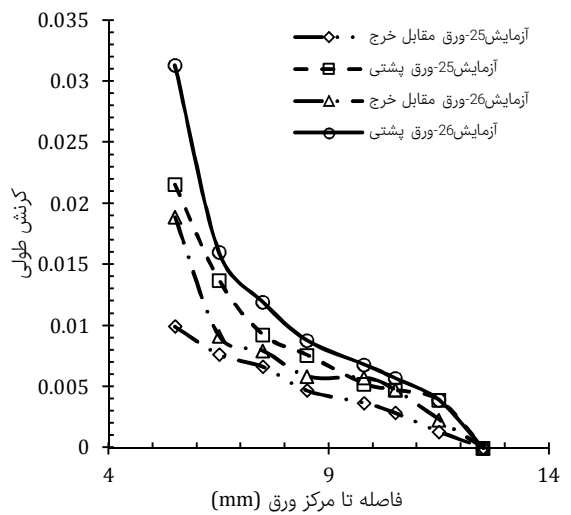
نمودار ۲۷) منحنی کرنش قطری در آزمایش‌های ۱۷ و ۱۹



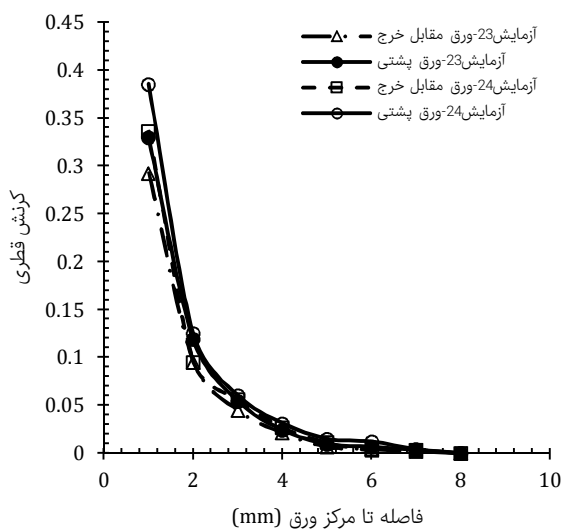
نمودار ۲۴) منحنی کرنش طولی در آزمایش‌های ۲۳ و ۲۴



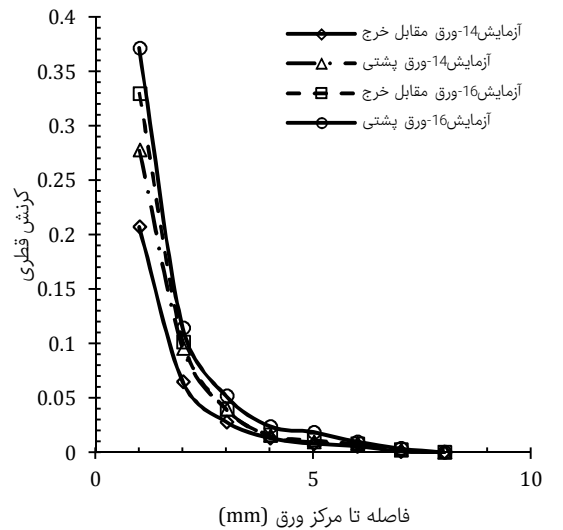
نمودار ۲۸) منحنی کرنش قطری در آزمایش‌های ۲۰ و ۲۱



نمودار ۲۵) منحنی کرنش طولی در آزمایش‌های ۲۵ و ۲۶



نمودار ۲۹) منحنی کرنش قطری در آزمایش‌های ۲۳ و ۲۴



نمودار ۲۶) منحنی کرنش قطری در آزمایش‌های ۱۴ و ۱۶

بررسی کرنش‌های عرضی و طولی ناشی از تغییر شکل ورق‌ها پرداخته شد. نتایج کلی به صورت 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. به عبارت دیگر می‌توان نتیجه گرفت با تغییر ابعاد از ورق مربعی به مستطیلی می‌توان از مقادیر ایمپالس‌های بالاتری به منظور 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 کارگرفته‌شده جلوی ورق آلومینیومی قرار گرفته و با قابلیت شکل‌پذیری مناسب خود علاوه بر افزایش مدت‌زمان انجام فرآیند، از پارگی ورق‌های آلومینیومی به هنگام تغییر شکل جلوگیری می‌کند. هر دو عمل انجام‌شده گام مهمی در زمینه شکل‌دهی در صنعت است.

۳- با توجه به آزمایش‌های تجربی مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار جرم خرج انفجاری، مقدار ایمپالس و خیز افزایش می‌یابد.

۴- 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.

۵- 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 در نتیجه آن کاهش ضخامت بیشتر در مرزهای طولی ورق می‌شود.

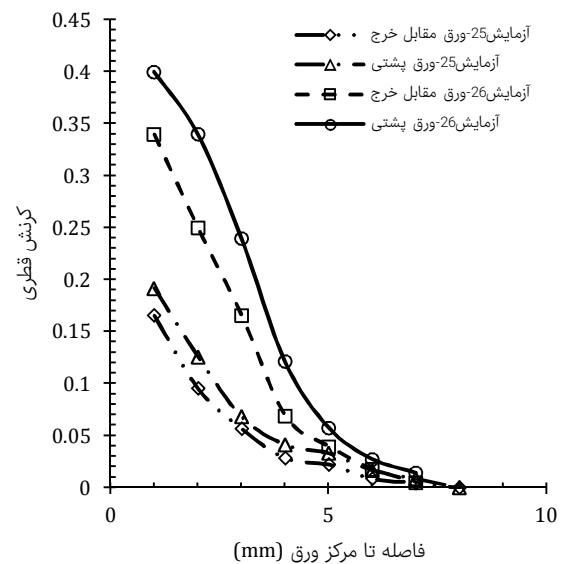
۶- در آزمایش‌های ۸، ۹، ۱۳، ۱۷، ۱۹، ۲۵ و ۲۶ اختلاف کرنش بین ورق مقابل خرج و ورق پشتی به دلیل اختلاف در به تسلیم‌رسیدن آلومینیوم و فولاد دانست. در ورق مقابل خرج که از جنس فولاد است دیرتر به ناحیه تسلیم می‌رسد در صورتی که در ورق پشتی که جنس آن از آلومینیوم است تسلیم زودتر اتفاق می‌افتد و ورق وارد ناحیه پلاستیک می‌شود.

۷- 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 تأخیرآفتادن 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.

**تائیدیه‌های 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.



نمودار ۳۰) منحنی کرنش قطری در آزمایش‌های ۲۵ و ۲۶

همان گونه که در نمودارها فوق مشاهده می‌شود 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 ایمپالس با مقادیر کمتری باید بهره برد. در آزمایش‌های ۸، ۹، ۱۷، ۱۹، ۲۵ و ۲۶ اختلاف کرنش بین ورق مقابل خرج و ورق پشتی به دلیل 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 پلاستیک می‌شود.

## نتیجه‌گیری

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

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 multi-layered 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 low-velocity 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 multi-layered 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.