



Free and Die Forming of Circular Metallic Plates Using Gas Mixture Detonation of O_2 and C_2H_2 : An Experimental Study

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Ziya-Shamami M. ¹ MSc,
Mirzababaie Mostofi T. ² PhD,
Sayah Badkhor M. ² PhD,
Babaei H. ^{*1} PhD

How to cite this article

Ziya-Shamami M, Mirzababaie Mostofi T, Sayah Badkhor M, Babaei H. Free and Die Forming of Circular Metallic Plates Using Gas Mixture Detonation of O_2 and C_2H_2 : An Experimental Study. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(10):2559-2569.

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

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Electrical, Mechanical and Computer Engineering, University of Eyvanekey, Eyvanekey, 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 22, 2020

Accepted: August 19, 2020

ePublished: October 21, 2020

ABSTRACT

In the last decade, the gas mixture detonation forming (GDF) method has been introduced as a novel and alternative method instead of other high-velocity forming (HVF) methods such as explosive method. Due to the lack of research in this field, the present study investigates the free and die forming of circular metallic plates under gas mixture detonation loading. In this series of experiments, steel plates with thicknesses of 1, 2, and 3mm, aluminum plates with a thickness of 3mm, and brass plates with a thickness of 1mm were used. Furthermore, the test specimens were loaded in the impulse range of 4.12 to 54.68N•s. For better comparison, the same areal density condition was considered to compare the results of steel, aluminum, and brass plates under the same loading conditions. Experimental results showed that using a die with an apex angle of 60° leads to the decrease of the maximum permanent deflection by 14.8, 20.2, and 21.4% in 1, 2, and 3mm steel plates, respectively. Under the same loading and areal density conditions, for free forming, the use of aluminum and brass plates lead to increasing the maximum permanent deflection by 19.4 and 13.1% compared to the steel sample, respectively. However, in die forming, these values were 5 and 2%, respectively. Also, the comparison of the results for aluminum and brass plates shows that the using die forming reduces the maximum permanent deflection of the specimen by 12.1 and 10.6%.

Keywords Large Plastic Deformation; Metal Plate; Free Forming; Die Forming; Gas Mixture Detonation Forming Method

CITATION LINKS

[1] Theoretical analysis on the effect of uniform and localized impulsive loading on the ... [2] Dynamic inelastic response of strain rate sensitive ductile plates due to large impact, ... [3] The response of mild steel and armour steel plates to localised air-blast loading-comparison ... [4] Repeated localized impulsive loading on monolithic and multi-layered metallic ... [5] Sheet metal forming by using gas imploding ... [6] Gas detonation forming process and modeling for efficient spring-back ... [7] Detonation forming of aluminium cylindrical cups experimental and theoretical ... [8] Tube expansion by gas ... [9] Gas detonation forming by a mixture of H_2+O_2 ... [10] Efficient oxyhydrogen mixture determination in gas Detonation ... [11] Effect of gas detonation on response of circular plate-experimental and ... [12] Empirical modelling for prediction of large deformation of clamped circular plates in ... [13] Experimental investigation and analytical modelling for forming of circular-clamped ... [14] Numerical modelling of the gas detonation process of sheet metal ... [15] Joining of tubes by gas detonation ... [16] Experimental and numerical studies of sheet metal forming with damage using ... [17] Gas mixture detonation method, a novel processing technique for metal powder ... [18] The influence of gas mixture detonation loads on large plastic deformation of thin quadrangular plates: Experimental investigation and empirical ... [19] Experimental and theoretical study on large ductile transverse deformations of rectangular plates subjected to shock load due to gas mixture ... [20] Large transverse deformation of double-layered rectangular plates subjected to gas mixture ... [21] Experimental study on the response of thin aluminium and steel plates subjected to ... [22] On the dynamic response of blast-loaded steel plates with and without pre-formed ... [23] Numerical study on the structural response of blast-loaded thin aluminium and ... [24] Experimental and numerical studies on the dynamic response of steel plates subjected to confined ... [25] Gas mixture detonation load on polyurea-coated aluminum ... [26] The deformation and tearing of thin circular plates subjected to impulsive ... [27] The response of circular plates to repeated uniform blast loads: An experimental and numerical ... [28] Numerical simulation and experimental validation of the dynamic response of aluminum plates under free air ... [29] Blast loaded ... [30] Deformation and failure of blast-loaded square ... [31] Structural ...

شکل‌دهی آزاد و با قالب ورق‌های فلزی دایره‌ای با انفجار مخلوط گازهای اکسیژن و استیلن: بررسی تجربی

مجتبی ضیاء شمامی MSc

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

توحید میرزابابی مستوفی PhD

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

مصطفی سیاح 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

چکیده

در دهه اخیر، روش شکل‌دهی انفجار مخلوط گازها به‌عنوان یک روش نوین و جایگزین مناسب برای سایر روش‌های شکل‌دهی با سرعت بالا مانند روش شکل‌دهی انفجاری معرفی شده است. با توجه به کمبود تحقیق در این زمینه، تحقیق حاضر به بررسی شکل‌دهی آزاد و با قالب ورق‌های فلزی دایره‌ای تحت بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها پرداخته است. در این سری از آزمایش‌ها، از ورق‌های فولادی در ضخامت‌های یک، ۲ و ۳، ورق آلومینیومی با ضخامت ۳ و ورق برنجی با ضخامت یک میلی‌متر استفاده شد. همچنین نمونه‌های آزمایش در محدوده ایمپالس ۴/۱۲ تا ۵۴/۶۸ نیوتن در ثانیه تحت بارگذاری قرار داده شدند. برای مقایسه بهتر، شرط چگالی سطحی برابر برای مقایسه نتایج ورق‌های فولادی، آلومینیومی و برنجی در شرایط بارگذاری یکسان لحاظ شد. نتایج تجربی نشان داد که استفاده از قالب با زاویه رأس ۶۰ درجه باعث می‌شود که به‌ترتیب در ورق‌های یک، ۲ و ۳ میلی‌متر فولادی، بیشترین خیز دائمی ورق به‌طور متوسط به میزان ۱۴/۸، ۲۰/۲ و ۲۱/۴٪ کاهش یافته است. در شرایط یکسان بارگذاری و چگالی سطحی، برای شکل‌دهی آزاد، استفاده از ورق آلومینیومی و برنجی به‌ترتیب موجب افزایش ۱۹/۴ و ۱۳/۱٪ بیشترین خیز دائمی ورق در مقایسه با نمونه فولادی شده است. این در حالی است که در شکل‌دهی با قالب، این مقادیر به‌ترتیب به میزان ۵ و ۲٪ در ایمپالس پایین حاصل شد. همچنین مقایسه نتایج برای ورق‌های آلومینیومی و برنجی نشان می‌دهد که استفاده از قالب باعث کاهش بیشترین خیز دائمی به میزان ۱۲/۱ و ۱۰/۶٪ شده است.

کلیدواژه‌ها: تغییر شکل پلاستیک، ورق فلزی، شکل‌دهی آزاد، شکل‌دهی با قالب، روش انفجار مخلوط گازها

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۲۹

*نویسنده مسئول: ghababaei@guilan.ac.ir

مقدمه

شکل‌دهی به روش انفجار مخلوط گازها یکی از روش‌های نوین شکل‌دهی سرعت بالا محسوب می‌شود که در چند سال اخیر به‌عنوان یک جایگزین مناسب برای سایر روش‌های سرعت بالا مانند شکل‌دهی انفجاری [۱-۴] معرفی شده است. بیشتر تحقیقات انجام‌شده در این زمینه مربوط به استفاده از مخلوط دو گاز

هیدروژن و اکسیژن است و تحقیقات به نسبت کمی روی سایر مخلوط‌های گازی مانند اکسیژن و استیلن که قدرت بیشتری دارند، انجام شده است. به‌طور کلی، فرآیند شکل‌دهی با روش انفجار مخلوط گازها، نتیجه یک فرآیند شیمیایی گرمازا میان یک ماده سوختنی و عامل اکسیدکننده است که با تولید گرما و تغییر شیمیایی مواد اولیه همراه می‌شود [۵، ۶]. پس از ایجاد شوک ناشی از انفجار، فشار دینامیکی باعث تغییر شکل جسم می‌شود. با توجه به اینکه مخلوط‌کردن سوخت‌های گازی با هوا نسبتاً آسان است، لذا برای رسیدن به احتراق کامل سوخت‌های گازی، از مقدار کمی هوای اضافی استفاده می‌شود که مقدار آن به نوع سوخت بستگی دارد [۷، ۸]. از مزیت‌های روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌های شکل‌دهی با سرعت بالا می‌توان به مواردی همچون به حداقل رساندن خطر انفجار مخلوط گاز استیلن و اکسیژن نسبت به مواد منفجره، قابلیت انجام آزمایش با روش مورد نظر در کارگاه معمولی، قابل کنترل بودن فشارهای ورودی برای رسیدن به فشار نهایی خاص، خودکارکردن مراحل استفاده از انفجار گاز که سبب می‌شود تکرار آزمایش آسان باشد، به حداقل رساندن صدای تولیدشده و به حداقل رساندن هزینه‌های تحقیقاتی و آزمایش‌ها اشاره کرد [۹، ۱۰]. به دلیل نوین بودن روش انفجار مخلوط گازها، تحقیقات بسیار اندکی در زمینه شکل‌دهی ورق با استفاده از این روش ارایه شده است که در ادامه به چندین مرجع مهم در این مورد اشاره می‌شود.

هوند و سوزوکی پژوهشی با عنوان شکل‌دهی فلزات با انفجار مخلوط گازهای اکسیژن و متان ارایه دادند. در این تحقیق، آنها به ذکر اصول این روش پرداختند و با ساخت سامانه مورد نظر و استفاده از مخلوط استوکیومتری متان و اکسیژن، کاربردهای این روش را مورد مطالعه قرار دادند. آنها توانستند در نهایت ورق با قطر یک متر را شکل دهند [۵]. طی تحقیقی در دانشگاه کارابوک ترکیه، محققان به بررسی تجربی، عددی و بهینه‌سازی پارامترهای موجود در شکل‌دهی ساختارهای فنجان‌ی با استفاده از روش انفجار مخلوط گازهای اکسیژن و استیلن پرداختند. در بخش تجربی آنها با در نظر گرفتن نسبت حجمی برابر برای گازهای استیلن و اکسیژن، از سامانه شکل‌دهی انفجاری دومرحله‌ای برای ایجاد ساختارهای فنجان‌ی شکل استفاده کردند [۶، ۷]. کلیئر و همکاران از دانشگاه‌های مختلف در آلمان از کاربرد مستقیم موج‌های حاصل از انفجار گازها به‌عنوان منبع اصلی انرژی برای انبساط لوله‌ها استفاده کردند. در بخش تجربی، آنها در ابتدا به تشریح کامل سامانه ساخته‌شده و تجهیزات اندازه‌گیری برای ثبت نمودار فشار-زمان پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده از شکل‌دهی آزاد و با قالب انبساط لوله‌ها با نتایج به‌دست‌آمده از شکل‌دهی شبه‌استاتیک در روش هیدروفرمینگ مقایسه شد [۸].

خالقی میبدی و همکاران مقاله‌ای تحت عنوان فرآیند شکل‌دهی فلزات به‌کمک انفجار مخلوط گاز ارایه کردند که در آن انرژی حاصل از انفجار ماده منفجره، عامل شکل‌دهی ورق‌های فلزی بود.

مدل تحلیلی با فرم بسته مبتنی بر روش انرژی برای ساختارهای دولایه در معرض بار دفعی یکنواخت حاصل از انفجار مخلوط گازها ارائه شد. علاوه بر این، فرمول‌های طراحی تجربی براساس اعداد بدون بعد جدید برای پیش‌بینی حداکثر خیز دائمی لایه‌های عقب و جلو به‌دست آمدند.

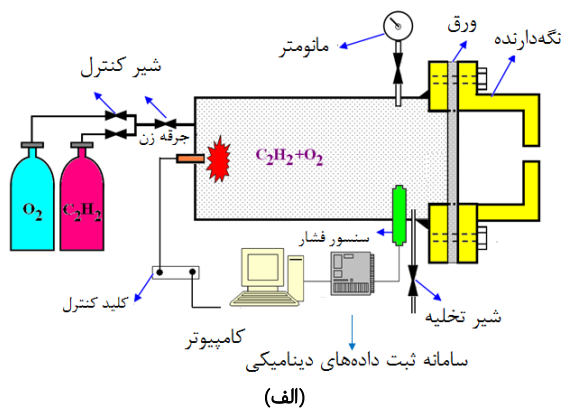
اون و همکاران به بررسی آزمایشگاهی اثر فاصله محل قرارگیری خرج بر رفتار پلاستیک ورق‌های مربعی شکل‌پذیر تحت بارگذاری انفجاری آزاد با خرج کروی شکل پرداختند. در این سری از آزمایش‌ها، نمونه‌هایی از جنس فولاد نرم و آلومینیوم با ناحیه شکل‌گیری $3/3 \times 0/3$ متر مربع فراهم و بار دفعی با انفجار خرج در فاصله استقرارهای مختلف نسبت به مرکز ورق ایجاد شد. برای ثبت نمودار فشار- زمان از حسگر پیزوالکتریک استفاده شده که با دو دوربین سرعت بالا برای عکاسی از تغییر شکل پلاستیک ورق در تماس بود. جهت اندازه‌گیری میزان تغییر شکل گذرا از ورق‌های مشبک با ضخامت $8/8$ میلی‌متر و روش همبستگی تصویربرداری دیجیتال سه‌بعدی استفاده شد. نتایج تجربی به‌دست‌آمده محدوده کاملی از پاسخ سازه از پارگی در مرزهای کاملاً گیردار تا اتفاقی عجیب مشابه با خیز دائمی ورق در جهت عکس بار اعمال‌شده به‌علت کمانش را پوشش داد. از نکات مهم نتایج تجربی می‌توان به اثر الاستیک و فاز منفی نمودار فشار- زمان با توجه به شدت بارگذاری و ویژگی‌های سازه اشاره کرد [21]. آنها در ادامه تحقیقات خود به بررسی تجربی و عددی پاسخ دینامیکی ورق‌های مستطیلی فولادی تحت بار انفجاری پرداختند. در این سری از آزمایش‌ها، سامانه لوله شوک به‌منظور تولید بار انفجاری به‌کار گرفته شد که پیش‌تر به‌عنوان یک روش موثر در کنترل شرایط اولیه هر آزمایش معرفی شده بود. تمرکز اصلی کارهای تجربی بر تأثیر سوراخ‌های از پیش‌ساخته‌شده بر روی پاسخ دینامیکی و مشخصه‌های شکست ورق‌های فولادی شکل‌پذیر قرار داده شد [22, 23]. ژنگ و همکاران نتایج تجربی و عددی پاسخ دینامیکی ورق‌های فولادی غیرمقاوم و مقاوم شده در برابر بار انفجاری تولیدی در یک محیط بسته را ارائه کردند. با در نظرگرفتن آرایش‌های مختلف برای مقاوم‌کننده، آزمایش‌های تجربی روی ورق‌های فولادی مربعی تحت بار تولیدشده با خرج انفجاری تری‌نیتروتولون (TNT) در محفظه مخصوص انفجار، طراحی و انجام شد. در این سری از آزمایش‌ها، گستره تغییر شکل دائمی نمونه‌های آزمایشی ثبت و ذخیره شد. ورق‌ها به‌طور کلی تغییر شکل غیرالاستیک بزرگ همراه با بیشترین خیز دائمی در مرکز آن را نشان دادند. با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده در این حالت با انفجار در محیط آزاد با همان میزان خرج انفجاری، این نتیجه حاصل شد که ایمپالس معادل اعمالی به ورق در حالت بار انفجاری در محیط بسته بین $4/03$ تا $5/63$ برابر بیشتر بوده که این میزان افزایش به‌علت بسته‌بودن محفظه انفجار است [24]. میرزاابایی مستوفی و همکاران [25] به بررسی تغییر شکل بزرگ ورق‌های نازک مستطیلی آلومینیومی با روکش پلیمری در معرض

در این تحقیق، ابتدا به بررسی این فرآیند پرداخته و سپس با استفاده از مخلوط گاز هیدروژن و اکسیژن، شکل‌دهی صفحات آلومینیومی انجام شده و پارامترهای موثر بر شکل‌دهی، مورد بحث قرار گرفته که در این خصوص شرایط مطلوب با مخلوط 30% اکسیژن و 70% هیدروژن حاصل شده است [9, 10]. بابایی و همکاران مطالعات خود را روی شکل‌دهی آزاد ورق‌های دایره‌ای با استفاده از روش انفجار مخلوط گازها متمرکز کردند. در مطالعات انجام‌گرفته، از دو گاز اکسیژن و استیلن برای تولید بار دفعی بهره گرفته شد [11-13].

در ادامه مجموعه کارهای تجربی انجام‌گرفته در آزمایشگاه موج شوک دانشگاه آلمان، محققان به بررسی تجربی و عددی تغییر شکل پلاستیک ساختارهای فنجانی فولادی با استفاده از روش انفجار مخلوط گازهای اکسیژن و هیدروژن پرداختند. در بخش شبیه‌سازی عددی، شبیه‌سازی‌ها روی مدل‌های سه‌بعدی محاسباتی با استفاده از مدل ماده جانسون- کوک و تحلیل دینامیکی صریح انجام شد. یکی از نکات بسیار مهم در بخش عددی، در نظرگرفتن منحنی واقعی فشار- زمان به‌دست‌آمده از حسگر به‌عنوان ورودی مساله بود. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده بیانگر وابستگی قابل توجه مد تغییر شکل و توزیع ضخامت به تغییر نرخ بارگذاری بود. لازم به توضیح است که مدل عددی ارائه‌شده، در مقایسه با کارهای عددی انجام‌شده در ادبیات تحقیق، قادر به پیش‌بینی لبه‌های بسیار تیز و تخمین درست آسیب ابتدایی و سیر تکامل تدریجی آن بود که عمدتاً به‌علت میزان بالای فشار یا جابه‌جایی اولیه قطعه‌کار در آزمایش رخ می‌داد. آنها همچنین در ادامه تحقیقات خود، به بررسی تجربی و عددی اتصال لوله‌های فولادی و مسی با استفاده از روش شکل‌دهی مذکور پرداختند [14-16].

بابایی و همکاران در ادامه تحقیقات خود، به معرفی روش شکل‌دهی انفجار مخلوط گازها به‌عنوان یک فرآیند جدید برای تغییر شکل پودرهای فلزی پرداختند [17]. میرزاابایی مستوفی و همکاران، مطالعات تجربی خود را روی شکل‌دهی ورق‌های مستطیلی تک‌لایه [18, 19] و دولایه [20] با استفاده از روش انفجار مخلوط گازها ادامه دادند. مشابه با ساختارهای تک‌لایه، نمونه‌های دولایه نیز از ترکیب، یک‌لایه جلویی از جنس آلایژ آلومینیوم (صفحه‌ای که بار انفجاری را تحمل می‌کند) و یک‌لایه عقبی از جنس فولاد نرم ساخته شدند. چهار نوع متفاوت از پیکربندی‌های با ضخامت مختلف، یعنی یک+یک، یک+۲، یک+۲ و ۲+۲ میلی‌متر، انتخاب شدند تا بتوان تأثیر ضخامت لایه‌های جلویی و عقبی بر مقاومت تغییر شکل ساختار دولایه بررسی شود. هر گروه آزمایشی در معرض پنج فشار پیش از انفجار مخلوط اکسیژن و استیلن قرار گرفت. نتایج تجربی نشان داد که هنگامی که بین لایه‌ها فاصله‌ای در نظر گرفته نشده باشد و لایه جلویی استحکام و چگالی کمتری نسبت به لایه عقبی داشته باشد، بیشترین خیز دائمی لایه عقبی تقریباً برابر با بیشترین خیز دائمی لایه جلویی است؛ همچنین یک

قطر داخلی ۱۲۰، قطر خارجی ۲۰۰، ضخامت دیواره ۴۰ و طول ۵۳۰ میلی‌متر است که توسط گازهای اکسیژن و استیلن پر می‌شود و توسط دو کمربندی فلزی (ورق ۱۰ میلی‌متری) با چهار عدد پیچ به میز متصل شده است. این محفظه احتراق دارای یک شیر تخلیه جهت خارج کردن گازهای موجود در سیلندر نیز است.



شکل ۱) سامانه انفجار مخلوط گازها در دانشگاه گیلان؛ (الف) شماتیک، (ب) واقعی

در بخش دوم، به منظور تنظیم میزان فشار قبل از انفجار هر یک از گازهای ورودی، از شیرهای کنترل گاز استفاده می‌شود. مخلوط گاز در انتهای بسته محفظه احتراق توسط یک سیستم جرقه زن منفجر می‌شود که ورودی دستگاه جرقه زن برق ۲۲۰ ولت است. همچنین در محل نصب جرقه زن و لوله‌های ورودی گازها، از یک درپوش جهت بسته شدن ابتدای سیلندر استفاده می‌شود که توسط ۸ عدد پیچ M12 به سیلندر متصل شده است. درپوش به ترتیب به قطر خارجی و ضخامت ۲۰۰ و ۳۰ میلی‌متر است. جهت آب‌بندی از واشر نسوز بین درپوش ابتدایی و سیلندر و همچنین بین ورق فلزی مورد آزمایش و رینگ واسط استفاده شده است. موج شوک حاصل از انفجار مخلوط گازی در طول محفظه احتراق حرکت می‌کند و در نهایت موجب تغییر شکل ورق می‌شود. واحد سیستم اندازه‌گیری فشار شامل یک مانومتر به منظور اندازه‌گیری میزان فشار وارد شده

بار دفعی یکنواخت حاصل از انفجار مخلوط گازها پرداختند. در این ساختارها، از روکش پلیمری پلی‌اوره با ضخامت‌های مختلف ۳ و ۴ میلی‌متری به عنوان یک لایه تقویت‌کننده برای ورق‌های آلومینیومی استفاده شد. اثر ضخامت لایه‌های عقبی و جلویی بر رفتار ساختار دولایه فلز- پلیمری تحت پنج بار دفعی مختلف، مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج تجربی نشان داد که افزودن روکش پلیمری با ضخامت‌های ۳ و ۴ میلی‌متر به ورق آلومینیومی ۲ میلی‌متری به ترتیب موجب کاهش خیز دائمی ساختار به میزان ۱۲/۷ و ۲۱/۱٪ در ایمپالس ۹/۱ نیوتن در ثانیه، ۲۲/۲ و ۳۰/۹٪ در ایمپالس ۲۸/۱ نیوتن در ثانیه و در نهایت ۲۳/۳ و ۳۱/۳٪ در ایمپالس ۳۲/۳ نیوتن در ثانیه، می‌شود. آنها همچنین ضمن انجام آزمایش‌های تجربی به بهینه‌سازی این ورق‌ها نیز پرداختند. نتیجه کلی، کاهش تغییر شکل ورق در ضخامت یکسان با استفاده از روکش پلی‌اوره بود.

با مرور مطالعات پیشین، این نتیجه حاصل شد که بیشتر مطالعه‌ها در زمینه بهره‌گیری از روش جایگزین انفجار مخلوط گازها، به صورت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی روی شکل‌دهی آزاد ورق‌های دایره‌ای انجام گرفته و تاکنون تحقیق روی شکل‌دهی با قالب ورق‌های فلزی انجام نشده است [11-13]؛ لذا انجام بررسی آزمایشگاهی روی ورق‌های تک‌لایه فلزی مانند فولادی، آلومینیومی و برنجی به منظور مطالعه پارامترهای مختلف شامل زاویه رأس قالب در شکل‌دهی با قالب، میزان ایمپالس ناشی بار دفعی، ضخامت ورق و نسبت اختلاط گازها و بررسی اثرگذاری آنها، می‌تواند از اهمیت بالایی برخوردار باشد و از جمله نوآوری‌های تحقیق حاضر در بخش آزمایشگاهی است. با توجه به توضیحات ارائه شده، اثر هر یک از این پارامترها روی رفتار پلاستیک و الگوی تغییر شکل ورق‌های فولادی تحت بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها و مقایسه عملکرد آنها با ساختارهای فلزی، آلومینیومی و برنجی تک‌لایه انجام می‌گیرد.

مطالعه تجربی

آنچه در بررسی‌های تجربی فرآیند شکل‌دهی تحت بار دفعی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است، شناخت و ارزیابی رفتار ساختارها تحت آزمایش نسبت به بار دفعی اعمالی است؛ لذا هدف از کارهای تجربی آن است تا بتوان یک دید مناسب نسبت به رفتار ورق‌های فلزی تحت بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها پیدا کرد.

شکل‌دهی آزاد و با قالب ورق‌های فلزی دایره‌ای تحت بارگذاری دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها در یک سامانه آزمایشی که در شکل ۱ نشان داده شده، انجام گرفته است. این سامانه آزمایشی شامل چهار بخش اصلی واحد اشتعال، شیر کنترل گاز، واحد سیستم اندازه‌گیری فشار، واحد شکل‌دهی است.

واحد اشتعال این سامانه شامل سیلندرهای ذخیره گاز اکسیژن و استیلن و یک محفظه احتراق ۶ لیتری از جنس فولاد ضدزنگ با

آزمایشگاهی یکسان در قیاس با ورق فولادی مورد آزمایش قرار گرفت. جهت ایجاد شرایط آزمایشگاهی، شرط چگالی سطحی تقریباً یکسان برقرار شد و از ورق‌های آلومینیومی و برنجی در ضخامت‌های ۳ و یک میلی‌متر استفاده شد. این آزمایش‌ها تحت شرایط بارگذاری در پیش فشارهای ۵ و ۲/۵ پوند بر اینچ مربع برای گازهای اکسیژن و استیلن انجام شد.

جدول ۱) خواص مکانیکی مواد

پارامتر	فولاد [18-20]	آلومینیوم [18-20]	برنج
ضخامت (mm)	یک، ۳، ۲	۳	یک
چگالی (kg/m^3)	۷۸۵۰	۲۷۰۰	۸۵۳۰
مدول الاستیسیته (GPa)	۲۱۰	۶۹	۹۸
تنش تسلیم (MPa)	۲۸۱	۱۱۹	۲۲۶
ضریب پواسون	۰/۳	۰/۳۳	۰/۳۴

بحث و بررسی نتایج

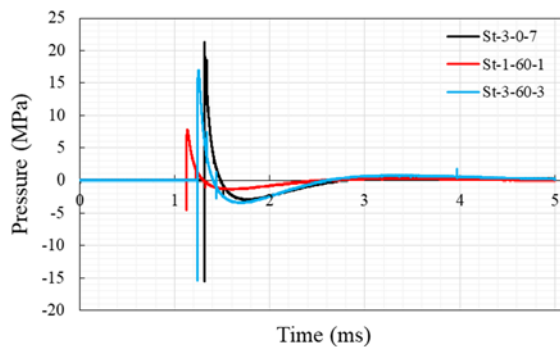
کلیه مشخصات و نتایج آزمایش‌های انجام‌شده روی ورق‌های دایره‌ای در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج به‌دست‌آمده در مجموعه آزمایش‌های انجام‌گرفته روی ساختارهای تک‌لایه، نشان‌دهنده پاسخ و رفتار مکانیکی ورق‌های فولادی، آلومینیومی و برنجی تحت بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها است که در آن برای نمونه‌های فولادی اثر تغییرات ضخامت ورق، تأثیر شکل‌دهی با قالب و تغییرات مقدار ایمپالس یا به‌عبارتی افزایش انرژی انتقالی به ورق و به‌تبع آن تغییر نرخ سرعت تغییر شکل بررسی شده است. از دیگر اهداف این بخش، می‌توان به ارزیابی و مقایسه نتایج تجربی برای ورق‌های فولادی، آلومینیومی و برنجی در دو حالت شکل‌دهی با قالب و بدون قالب ورق‌های فلزی در شرایط جرمی و آزمایشگاهی یکسان در برابر بار دفعی اشاره کرد. لازم به توضیح است که در این جدول، برای هر آزمایش، مقدار ایمپالس با انتگرال‌گیری عددی از منحنی فشار- زمان به‌دست آمده است که برای نمونه، چندین نمودار فشار- زمان در نمودار ۱ ارائه شده است. مطابق نمودار ۱، منحنی‌های فشار- زمان حاصل از انفجار مخلوط گازها تمامی مشخصات منحنی فشار- زمان بار دفعی حاصل از خرج انفجاری را مانند فاز مثبت، زمان اوج کوتاه، تابع فشار تأخیری و فاز منفی دارا است. شایان ذکر است که منحنی‌های فشار- زمان حاصل از انفجار مخلوط گازها برای سایر آزمایش‌ها نیز مشابه با این نمودارها بوده و از نمایش آنها خودداری می‌شود. در هر گروه آزمایش، کد اول مربوط به جنس ماده، کد دوم ضخامت ورق، کد سوم زاویه رأس قالب (عدد صفر به معنای عدم استفاده از قالب است) و کد چهارم شماره آزمایش در گروه آزمایشی مربوطه است. لازم به توضیح است که مقدار بیشترین خیز دائمی نمونه در قسمت مرکز دایره و با استفاده از کولیس ارتفاع‌سنج محاسبه شده است.

داخل محفظه احتراق قبل از انفجار، یک حسگر فشار پیزوالکتریک به‌منظور ثبت فشار پس از انفجار اعمالی بر سطح نمونه، یک سیستم تقویت‌کننده یا آمپلی‌فایر جهت تقویت سیگنال‌های دریافتی از حسگر پیزوالکتریک و یک سامانه ثبت داده‌های دینامیکی برای ذخیره نمودار فشار- زمان از حسگر پیزوالکتریک است. لازم به توضیح است که تمامی تجهیزات اندازه‌گیری استفاده‌شده در این سامانه، ساخت شرکت سینوکرا [18-20] است.

در واحد شکل‌دهی، نمونه‌های آزمایشی بین دو نگه‌دارنده عقبی و جلویی به ضخامت قرار داده‌شده و توسط ۸ پیچ M12 به‌طور کاملاً گیردار مهار می‌شوند. با توجه به شرایط هندسی مساله، هر دو نگه‌دارنده دارای سوراخی به قطر ۱۲۰ میلی‌متر هستند که این سوراخ در نگه‌دارنده عقبی برای اعمال بار روی ورق و در نگه‌دارنده جلویی برای امکان خروج و شکل‌گیری ورق است. نمونه ورق‌های مورد آزمایش، از جنس فولاد نرم (St-13) در ضخامت‌های یک، ۲ و ۳، آلیاژ برنج در ضخامت یک و در نهایت آلیاژ آلومینیوم (Al-1100) در ضخامت‌های ۳ میلی‌متر است. در ابتدا نمونه ورق‌ها در ابعاد ۲۵۰×۲۵۰ میلی‌متر مربع برش زده شدند. مشخصات مکانیکی مواد مورد استفاده، به‌طور خلاصه در جدول ۱ نشان داده شده است. برای اطلاعات بیشتر و منحنی‌های تنش- کرنش مواد استفاده‌شده فولادی و آلومینیومی می‌توان به نتایج ارائه‌شده در پژوهش‌های پیشین [18-20] مراجعه کرد.

با توجه به توضیحات ارائه‌شده، ۳۲ نمونه آزمایشی فولادی در قالب شش گروه A، B، C، D، E و F به‌منظور بررسی تغییر شکل پلاستیک و الگوی شکست ورق‌های دایره‌ای در برابر بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها طراحی و ساخته شده‌اند. همچنین، در این سری از آزمایش‌ها، تمرکز کارهای تجربی انجام‌گرفته بر میزان تأثیر افزایش ضخامت ورق، زاویه رأس قالب و میزان ایمپالس بر مقاومت دینامیکی ساختار فلزی در برابر بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازهای اکسیژن و استیلن است. لازم به توضیح است که در این گروه‌بندی، گروه‌های آزمایشی A و D به‌ترتیب به شکل‌دهی آزاد و با قالب (زاویه رأس ۶۰ درجه) ورق‌های فولادی با ضخامت یک میلی‌متر می‌پردازد. گروه‌های آزمایشی B و E نیز به بررسی رفتار دینامیکی ورق‌های فولادی با ضخامت ۲ میلی‌متر به‌ترتیب در شکل‌دهی آزاد و با قالب می‌پردازد. در نهایت، گروه‌های آزمایشی C و F مربوط به ورق‌های فولادی با ضخامت ۳ میلی‌متر تحت شرایط آزمایشی قبلی است. شایان توجه است که هر گروه آزمایشی تحت بیش از ۳ بارگذاری با فشارهای قبل از انفجار متفاوت جهت تعیین رفتار دینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که جهت ارزیابی رفتار مواد فلزی مختلف تحت بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها، دو ماده دیگر از آلیاژ آلومینیوم و برنج با خواص مکانیکی مختلف که شامل درصد ازدیاد طول، تنش تسلیم، میزان سختی، چگالی و مدول الاستیسیته است، در نظر گرفته شد و تحت شرایط

گروه آزمایشی	شماره آزمایش	ایمپالس (NS)	فشار اکسیژن (psi)	فشار استیلن (psi)	بیشترین خیز دائمی (mm)
A	St-1-0-1	۴/۱۲	۳	۶	۶/۱
	St-1-0-2	۸/۳۲	۵	۲/۵	۱۳/۲
	St-1-0-3	۱۶/۸۹	۶	۳	۲۵/۶
	St-1-0-4	۲۰/۲۶	۸	۴	۳۰/۳
	St-1-0-5	۲۸/۵۴	۱۰	۵	۴۰/۶
	St-1-0-6	۳۴/۷۸	۱۵	۱۵	۴۹/۹
B	St-2-0-1	۲۵/۶	۱۰	۵	۱۹/۱
	St-2-0-2	۲۷/۸۴	۲۰	۱۰	۲۱/۵
	St-2-0-3	۳۱/۲۳	۱۵	۱۵	۲۵/۸
	St-2-0-4	۴۳/۱۷	۳۰	۱۵	۳۱/۷
	St-2-0-5	۴۵/۱۳	۲۰	۲۰	۳۳/۵
	St-2-0-6	۵۴/۶۸	۳۰	۳۰	۴۰/۱
C	St-3-0-1	۲۲/۰۱	۲۰	۱۰	۱۳/۶
	St-3-0-2	۳۲/۶۵	۳۵	۱۷/۵	۱۹/۴
	St-3-0-3	۳۵/۷۶	۲۰	۲۰	۱۷/۷
	St-3-0-4	۳۷/۵۶	۳۰	۱۵	۱۹/۱
	St-3-0-5	۴۲/۳۵	۳۵	۲۰	۲۲/۸
	St-3-0-6	۴۷/۳۱	۴۰	۲۰	۲۲/۲
	St-3-0-7	۵۱/۶۳	۳۰	۳۰	۲۵/۷
D	St-1-60-1	۲۰/۳۸	۸	۴	۲۵/۹
	St-1-60-2	۲۸/۵۴	۱۰	۵	۳۴/۰
	St-1-60-3	۳۱/۲۵	۱۲/۵	۱۰	۳۹/۵
	St-1-60-4	۳۴/۱۸	۱۵	۱۵	۴۳/۱
E	St-2-60-1	۳۱/۲۲	۱۵	۱۵	۲۰/۶
	St-2-60-2	۳۶/۹۸	۱۷/۵	۱۲/۵	۲۱/۹
	St-2-60-3	۳۹/۶۴	۲۰	۱۷/۵	۲۳/۰
	St-2-60-4	۴۳/۱۹	۳۰	۱۵	۲۴/۹
	St-2-60-5	۴۵/۴۱	۲۰	۲۰	۲۷/۱
F	St-3-60-1	۲۲/۱۳	۲۰	۱۰	۱۱/۳
	St-3-60-2	۳۵/۲۳	۲۰	۲۰	۱۴/۶
	St-3-60-3	۳۷/۶۸	۳۰	۱۵	۱۵/۵
	St-3-60-4	۴۷/۵۲	۴۰	۲۰	۱۸/۲
G	Al-3-0-1	۸/۴۱	۵	۲/۵	۱۵/۷
	Al-3-60-1	۸/۸۷	۵	۲/۵	۱۳/۸
H	Br-1-0-1	۸/۶۵	۵	۲/۵	۱۴/۹
	Br-1-60-1	۸/۲۲	۵	۲/۵	۱۳/۳



نمودار (۱) منحنی فشار- زمان ثبت شده توسط حسگر فشار برای چندین آزمایش



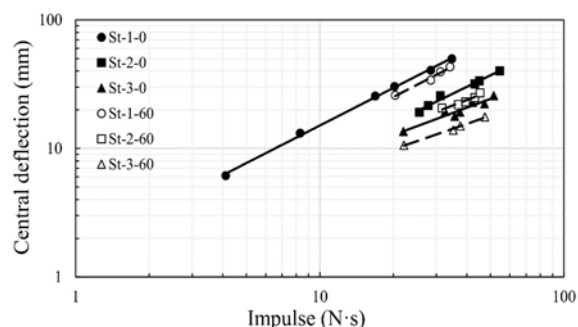
(الف)



(ب)

شکل (۲) نمونه‌ای از ورق‌های فولادی تغییر شکل یافته: (الف) شکل‌دهی آزاد، (ب) شکل‌دهی با قالب

در این قسمت، در ابتدا به بیان مشاهدات تجربی در مورد مدهای تغییر شکل [26, 27] نمونه‌های آزمایشی پرداخته می‌شود و سپس تأثیر تغییر پارامترهای تجربی مانند افزایش میزان ایمپالس، افزایش ضخامت ورق و تأثیر زاویه رأس قالب بر بیشترین خیز دائمی ورق‌های فولادی، مورد تجزیه و تحلیل قرار



نمودار ۲) منحنی لگاریتمی تغییرات بیشترین خیز دائمی ورق‌های فولادی در شکل‌دهی آزاد و با قالب برحسب ایمپالس

جدول ۳ منحنی‌های توانی برازش‌شده برای بیشترین خیز دائمی ورق بر حسب ایمپالس در نمودار لگاریتمی

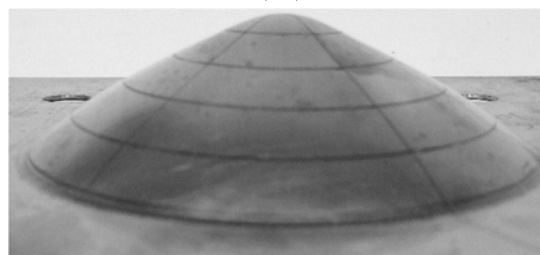
گروه آزمایشی	کد آزمایش	منحنی برازش‌شده	ضریب تشخیص
A	St-1-0	$1.610I^{0.971}$	۰/۹۹۹
B	St-2-0	$0.999I^{0.923}$	۰/۹۸۱
C	St-3-0	$1.532I^{0.706}$	۰/۹۲۲
D	St-1-60	$1.336I^{0.979}$	۰/۹۸۲
E	St-2-60	$1.585I^{0.734}$	۰/۹۲۳
F	St-3-60	$1.366I^{0.659}$	۰/۹۹۳

در نمودار ۲، همان طور که انتظار می‌رفت، بیشترین خیز دائمی ورق‌های فولادی با بالارفتن سطح انرژی انتقالی، به صورت تدریجی افزایش می‌یابد. نتایج به دست آمده در جدول ۳ برای مقادیر مختلف شیب در مجموعه‌های آزمایشی شکل‌دهی آزاد، نشان‌دهنده آن است که این مقادیر برای گروه‌های A و B در منحنی‌های برازش‌شده بسیار به یک نزدیک بوده؛ اما در شکل‌دهی با قالب ورق این مقادیر فاصله زیادی با عدد یک دارند. این بدان معنا است که در شکل‌دهی آزاد ورق‌های دایره‌ای تحت بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها انرژی کرنشی غشایی نقش بسیار کلیدی را بازی می‌کند و می‌توان از انرژی کرنشی خمشی در مدل‌سازی تحلیلی صرف نظر کرد؛ اما در شکل‌دهی با قالب این چنین نیست و باید اثر انرژی کرنشی خمشی در معادلات ضمن در نظر گرفتن اثر زاویه رأس قالب لحاظ شود [28-31]. اگر چه برای نمونه‌های ۳ میلی‌متری، این ضریب با یک فاصله تقریباً زیادی در حد ۳٪ دارد که این موضوع به دلیل انحراف از معیار یک داده آزمایشگاهی است که در نمودار ۳ نیز کاملاً به وضوح دیده می‌شود. یکی دیگر از نکات قابل توجه این نمودار این است که با افزایش ضخامت ورق از توان تابع برازش‌شده کاسته می‌شود و به عبارت دیگر، شیب منحنی خطی کاهش می‌یابد که کاملاً منطقی و مشابه با سایر نتایج به دست آمده در تحقیقات پیشین است [18-20].

همان طور که در تحقیقات پیشین [18-20] ذکر شد، یکی از نکات جالب در رفتار ساختارهای تک‌لایه و دولایه تحت بار انفجار مخلوط گازها این بود که تغییر شکل پلاستیک این ساختارهای دولایه برخلاف ساختارهای تک‌لایه در دو مرحله با نرخ‌های

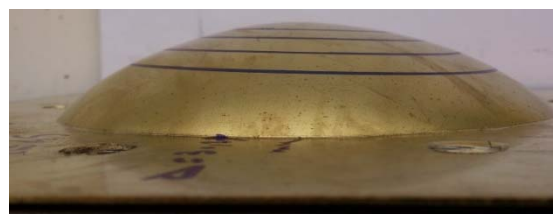


(الف)



(ب)

شکل ۳) نمونه‌ای از ورق‌های آلومینیومی تغییر شکل‌یافته؛ الف) شکل‌دهی آزاد، ب) شکل‌دهی با قالب



(الف)



(ب)

شکل ۴) نمونه‌ای از ورق‌های برنجی تغییر شکل‌یافته؛ الف) شکل‌دهی آزاد، ب) شکل‌دهی با قالب

به طور کلی شکل‌های ۲ تا ۴ برای شکل‌دهی آزاد ورق‌های فولادی نشان می‌دهد سطحی از ساختار که بین دو نگه‌دارنده قرار دارد، دچار هیچ گونه تغییر شکل غیرالاستیک بزرگی نشده و مکان‌هایی که در آنها پیچ‌ها قرار دارند، دچار هیچ گونه کشیدگی شدیدی که روی تغییر شکل ورق تأثیرگذار باشد، نشده است. اکنون، پس از بررسی و تشریح مدهای تغییر شکل پلاستیک ورق‌های فولادی به تحلیل کمی نتایج تجربی به دست آمده پرداخته می‌شود. به همین منظور در نمودار ۲، منحنی لگاریتمی تغییرات بیشترین خیز دائمی ورق‌های فولادی برحسب ایمپالس، نمایش داده شده است. در این نمودار، برای بیان رابطه بین بیشترین خیز دائمی ورق‌های فولادی و ایمپالس در هر مجموعه آزمایشی از توابع توانی استفاده شده است تا بتوان با ترسیم آنها در منحنی لگاریتمی، شیب نمودار را به دست آورد. نتایج مربوط به این بحث در جدول ۳ ارائه شده است.

برای افزایش ضخامت ورق فولادی از ۲ به ۳ میلی‌متر نشان می‌دهد که بیشترین خیز دائمی ورق به‌ترتیب به میزان ۳۶/۷،

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{O_2} = 20 \text{ psi} \\ P_{C_2H_2} = 10 \text{ psi} \end{array} \right. \text{ و } ۴۶/۹ \text{ و } ۳۹/۷ \% \text{ در مقادیر پیش‌فشار}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{O_2} = 30 \text{ psi} \\ P_{C_2H_2} = 30 \text{ psi} \end{array} \right. \text{ و } \left\{ \begin{array}{l} P_{O_2} = 20 \text{ psi} \\ P_{C_2H_2} = 20 \text{ psi} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} P_{O_2} = 20 \text{ psi} \\ P_{C_2H_2} = 10 \text{ psi} \end{array} \right.$$

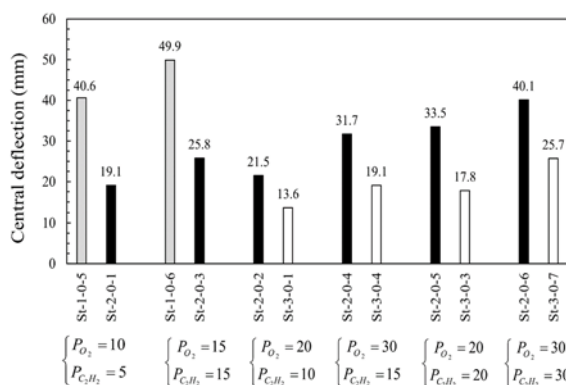
می‌یابد. به‌طور مشابه، برای شکل‌دهی با قالب، مقایسه نتایج نشان می‌دهد که افزایش ضخامت ورق فولادی از یک به ۲ میلی‌متر باعث کاهش بیشترین خیز دائمی نمونه به میزان ۵۲/۲٪ در

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{O_2} = 15 \text{ psi} \\ P_{C_2H_2} = 15 \text{ psi} \end{array} \right. \text{ و همچنین افزایش ضخامت ورق}$$

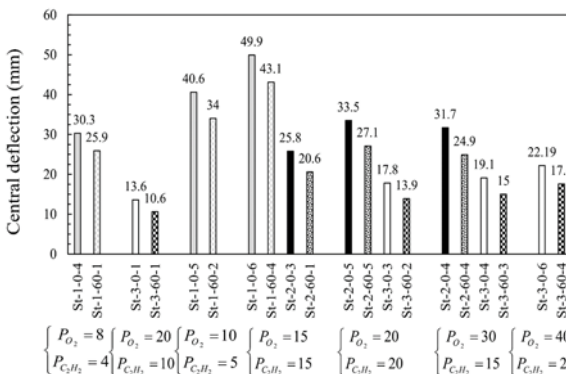
فولادی از ۲ به ۳ میلی‌متر باعث کاهش بیشترین خیز دائمی نمونه به میزان ۴۸/۷ و ۳۹/۸٪ در پیش‌فشارهای

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{O_2} = 30 \text{ psi} \\ P_{C_2H_2} = 15 \text{ psi} \end{array} \right. \text{ و } \left\{ \begin{array}{l} P_{O_2} = 20 \text{ psi} \\ P_{C_2H_2} = 20 \text{ psi} \end{array} \right.$$

نتایج به‌دست‌آمده در نمودار ۵ برای شکل‌دهی با قالب، استفاده از قالب با زاویه رأس ۶۰ درجه باعث می‌شود که به‌ترتیب در ورق‌های یک، ۲ و ۳ میلی‌متر فولادی، بیشترین خیز دائمی ورق به‌طور متوسط به میزان ۱۴/۸، ۲۰/۲ و ۲۱/۴٪ کاهش یابد.



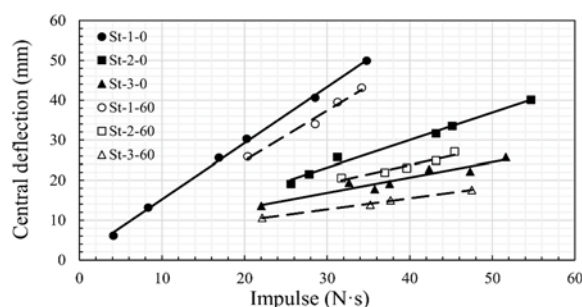
نمودار ۴) تغییرات بیشترین خیز دائمی برحسب پیش‌فشارهای قبل از انفجار گازها برای شکل‌دهی آزاد (مقادیر فشار برحسب psi است)



نمودار ۵) تغییرات بیشترین خیز دائمی برحسب پیش‌فشارهای قبل از انفجار گازها برای شکل‌دهی با قالب (مقادیر فشار برحسب psi است)

افزایشی مختلف رخ می‌دهد؛ لذا به‌منظور بررسی این موضوع، مقادیر بیشترین خیز دائمی ورق‌های تک‌لایه دایره‌ای فولادی برحسب میزان ایمپالس بار وارده در نمودار ۳ رسم شده است.

نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که در این ساختارها، مطابق با نمونه‌های تک‌لایه مستطیلی [18-20]، ایمپالس و بیشترین خیز دائمی با یکدیگر رابطه مستقیم و خطی دارند، یعنی؛ تغییر شکل پلاستیک به‌صورت تک‌مرحله‌ای افزایش می‌یابد. همچنین در این نمودار، مقادیر خیز دائمی ورق‌های فولادی در شکل‌دهی آزاد و با قالب برحسب ایمپالس برای گروه‌های آزمایشی مختلف به‌صورت منحنی درجه یک برازش شده‌اند. توابع برازش در جدول ۴ بیان شده است.



نمودار ۳) تغییرات بیشترین خیز دائمی ورق‌های فولادی در شکل‌دهی آزاد و با قالب برحسب ایمپالس

جدول ۴) منحنی‌های درجه اول برازش‌شده برای بیشترین خیز دائمی ورق برحسب ایمپالس

گروه آزمایشی	کد آزمایش	منحنی برازش‌شده	ضریب تشخیص
A	St-1-0	$1.405I + 1.171$	۰/۹۹۸
B	St-2-0	$0.687I + 2.549$	۰/۹۸۶
C	St-3-0	$0.383I + 5.352$	۰/۹۱۴
D	St-1-60	$1.249I - 0.070$	۰/۹۸۱
E	St-2-60	$0.459I + 5.419$	۰/۹۳۰
F	St-3-60	$0.277I + 4.410$	۰/۹۹۶

به‌منظور درک و توضیح بهتر میزان اثر ضخامت ورق فولادی بر بیشترین خیز دائمی و همچنین قیاس شکل‌دهی آزاد و با قالب، در ادامه، نتایج تجربی به‌دست‌آمده برای شرایط بارگذاری یکسان با یکدیگر مقایسه و تحلیل کمی می‌شوند. نمودارهای ۴ و ۵، قسمت ستونی تغییرات بیشترین خیز دائمی ورق‌های فولادی تحت بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها برحسب پیش‌فشارهای قبل از انفجار گازها به‌ترتیب برای دو حالت شکل‌دهی آزاد و با قالب نمایش داده شده است.

مطابق نتایج به‌دست‌آمده در نمودار ۴ برای شکل‌دهی آزاد، با افزایش ضخامت ورق فولادی از یک به ۲ میلی‌متر، بیشترین خیز دائمی ورق به‌ترتیب به میزان ۵۳/۰ و ۴۸/۲٪ در مقادیر

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{O_2} = 15 \text{ psi} \\ P_{C_2H_2} = 15 \text{ psi} \end{array} \right. \text{ و } \left\{ \begin{array}{l} P_{O_2} = 10 \text{ psi} \\ P_{C_2H_2} = 5 \text{ psi} \end{array} \right. \text{ کاهش پیش‌فشار}$$

می‌یابد. این در حالی است که مقایسه نتایج تجربی به‌دست‌آمده

۱- در شکل‌دهی بدون قالب و آزاد، تمامی ساختارها سطوح مختلفی از تغییر شکل غیرالاستیک بزرگ یا همان مد اول تغییر شکل همراه با گستره تغییر شکل گنبدی را نشان دادند. این بدان مفهوم است که در ایمپالس‌های مختلف در روش انفجار مخلوط گازها، اعمال بار انفجاری به ورق به صورت یکنواخت صورت می‌پذیرد.

۲- در شکل‌دهی با قالب، فرم مخروطی نمونه‌ها با توجه به زاویه رأس ۶۰ درجه کاملاً مشهود بود و هیچ گونه پارگی در نمونه‌های شکل‌دهی با قالب در شرایط آزمایشگاهی یکسان دیده نشد.

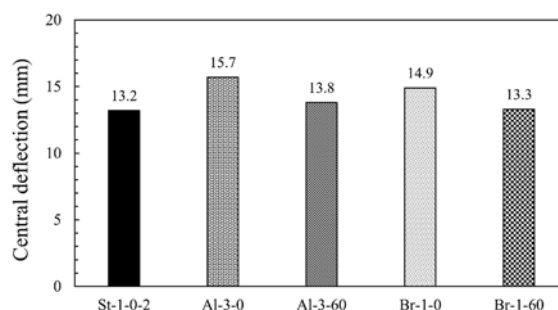
۳- در شکل‌دهی آزاد، مقدار توان به دست آمده در منحنی‌های توانی برازش شده برای تغییرات لگاریتمی بیشترین خیز دائمی بر حسب ایمپالس بسیار به یک نزدیک است؛ اما در شکل‌دهی با قالب ورق این مقادیر فاصله زیادی با عدد یک دارند. این بدان معنا است که در شکل‌دهی آزاد ورق‌های دایره‌ای تحت بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها انرژی کرنشی غشایی نقش بسیار کلیدی را بازی می‌کند و می‌توان از انرژی کرنشی خمشی در مدل‌سازی تحلیلی صرف‌نظر کرد؛ اما در شکل‌دهی با قالب این چنین نیست و باید اثر انرژی کرنشی خمشی در معادلات ضمن در نظر گرفتن اثر زاویه رأس قالب لحاظ شود.

۴- در شکل‌دهی آزاد، افزایش ضخامت ورق فولادی از یک به ۲ میلی‌متر موجب کاهش بیشترین خیز دائمی ورق به میزان ۵۳/۰ و ۴۸/۲٪ به ترتیب در مقادیر پیش‌فشار $P_{O_2} = 10 \text{ psi}, P_{C_2H_2} = 5 \text{ psi}$ و $P_{O_2} = 15 \text{ psi}, P_{C_2H_2} = 15 \text{ psi}$ شد. همچنین، افزایش ضخامت ورق فولادی از ۲ به ۳ میلی‌متر موجب شد تا بیشترین خیز دائمی ورق به ترتیب به میزان ۳۹/۷، ۳۶/۷، ۴۶/۹ و ۳۵/۹٪ در مقادیر پیش‌فشار $P_{O_2} = 20 \text{ psi}, P_{C_2H_2} = 10 \text{ psi}$ و $P_{O_2} = 20 \text{ psi}, P_{C_2H_2} = 20 \text{ psi}$ و $P_{O_2} = 30 \text{ psi}, P_{C_2H_2} = 30 \text{ psi}$ کاهش یابد.

۵- برای شکل‌دهی با قالب، مقایسه نتایج نشان داد که افزایش ضخامت ورق فولادی از یک به ۲ میلی‌متر باعث کاهش بیشترین خیز دائمی نمونه به میزان ۵۲/۲٪ در پیش‌فشارهای $P_{O_2} = 15 \text{ psi}, P_{C_2H_2} = 15 \text{ psi}$ و همچنین افزایش ضخامت ورق فولادی از ۲ به ۳ میلی‌متر باعث کاهش بیشترین خیز دائمی نمونه به میزان ۴۸/۷ و ۳۹/۸٪ در پیش‌فشارهای $P_{O_2} = 20 \text{ psi}, P_{C_2H_2} = 20 \text{ psi}$ و $P_{O_2} = 30 \text{ psi}, P_{C_2H_2} = 15 \text{ psi}$ می‌شود. همچنین، استفاده از قالب با زاویه رأس ۶۰ درجه باعث می‌شود که به ترتیب در ورق‌های یک، ۲ و ۳ میلی‌متر فولادی، بیشترین خیز دائمی ورق به‌طور متوسط به میزان ۱۴/۸، ۲۰/۲ و ۲۱/۴٪ کاهش یابد.

۶- در شرایط بارگذاری و چگالی سطحی یکسان، برای شکل‌دهی آزاد، استفاده از ورق آلومینیومی و برنجی به ترتیب موجب افزایش ۱۹/۴ و ۱۳/۳٪ بیشترین خیز دائمی ورق در مقایسه با نمونه فولادی می‌شود. این در حالی است که در شکل‌دهی با قالب، این مقادیر به ترتیب به میزان ۵ و ۲٪ حاصل شد. همچنین مقایسه

همان طور که پیش‌تر ذکر شد، به منظور بررسی اثر خواص مکانیکی ماده روی بیشترین خیز دائمی ورق دایره‌ای تحت بار دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها، از دو ورق فلزی آلومینیومی و برنجی تحت شرایط آزمایشگاهی یکسان شامل چگالی سطحی و بارگذاری استفاده شد. با توجه به مساله، از پیش‌فشارهای ۵ و ۲/۵ پوند بر اینچ به ترتیب برای گازهای اکسیژن و استیلن استفاده شد. مطابق با نمودار ۶ نتایج نشان می‌دهد که در شکل‌دهی آزاد، استفاده از ورق آلومینیومی و برنجی به ترتیب موجب افزایش ۱۹/۴ و ۱۳/۳٪ بیشترین خیز دائمی ورق می‌شود. این در حالی است که در شکل‌دهی با قالب، این مقادیر به ترتیب به میزان ۵ و ۲٪ حاصل شد. همچنین مقایسه نتایج برای ورق‌های آلومینیومی و برنجی نشان می‌دهد که استفاده از قالب باعث کاهش بیشترین خیز دائمی به میزان ۱۲/۱ و ۱۰/۶٪ می‌شود.



نمودار ۶) تغییرات بیشترین خیز دائمی برای شکل‌دهی با قالب و آزاد ورق‌های فولادی، آلومینیومی و برنجی در پیش‌فشارهای $\begin{cases} P_{O_2} = 5 \text{ psi} \\ P_{C_2H_2} = 2.5 \text{ psi} \end{cases}$

نتیجه‌گیری

روش انفجار مخلوط گازها به عنوان روش مناسب برای تولید انرژی با نرخ بسیار بالا، مسیری جهت مطالعه و بررسی عملکرد این روش در فرآیند شکل‌دهی ورق، انبساط لوله‌ها و تراکم دینامیکی پودر فراهم کرده است. در این روش از اختلاط دو گاز اکسیژن و استیلن در یک محفظه احتراق استفاده می‌شود. با به کارگیری یک سیستم جرقه‌زن، مخلوط گاز منفجر شده و موج شوک تولیدی در طول محفظه احتراق حرکت می‌کند و در نهایت موجب تغییر شکل نمونه می‌شود. از مزیت‌های این روش نسبت به استفاده از خرج‌های انفجاری برای تولید انرژی با نرخ بالا، می‌توان به افزایش ایمنی و بازدهی بار انفجاری، کاهش صدا، در دسترس بودن منبع انرژی و انجام آن در محیط‌های آزمایشگاهی اشاره کرد. به بررسی تغییر شکل پلاستیک ورق‌های نازک فولادی، آلومینیومی و برنجی دایره‌ای تحت بارگذاری دفعی حاصل از انفجار مخلوط گازها به دو صورت شکل‌دهی آزاد و با قالب پرداخته شد. تأثیر پارامترهایی مانند جنس ماده، ضخامت‌های مختلف ورق و میزان انرژی وارده یا همان ایمپالس بر تغییر شکل پلاستیک ساختار بررسی شد. مهم‌ترین نتایج به دست آمده از کارهای آزمایشگاهی به صورت زیر خلاصه شده است:

- 7- Yaşar M, Demirci HI, Kadi I. Detonation forming of aluminium cylindrical cups experimental and theoretical modelling. *Materials & Design*. 2006;27(5):397-404.
- 8- Kleiner M, Hermes M, Weber M, Olivier H, Gershteyn G, Bach FW, et al. Tube expansion by gas detonation. *Production Engineering*. 2007;1(1):9-17.
- 9- Khaleghi Meybodi M, Bisadi H. Gas detonation forming by a mixture of H₂+O₂ detonation. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2009;33:55-58.
- 10- Khaleghi Meybodi M, Aghazadeh BS, Bisadi H. Efficient oxyhydrogen mixture determination in gas Detonation forming. *International Journal of Mechanical Engineering*. 2013;7(8):1748-1754.
- 11- Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Sasdraei SH. Effect of gas detonation on response of circular plate-experimental and theoretical. *Structural Engineering and Mechanics*. 2015;56(4):535-548.
- 12- 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.
- 13- 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.
- 14- Patil SP, Popli M, Jenkook V, Markert B. Numerical modelling of the gas detonation process of sheet metal forming. *Journal of Physics: Conference Series*. 2016;734(3):0332099.
- 15- Jenkook V, Patil SP, Markert B. Joining of tubes by gas detonation forming. *Journal of Physics: Conference Series*. 2016;734(3):032101.
- 16- Patil SP, Prajapati KG, Jenkook V, Olivier H, Markert B. Experimental and numerical studies of sheet metal forming with damage using gas detonation process. *Metals*. 2017;7(12):556.
- 17- 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.
- 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. 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.
- 20- 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.
- 21- Aune V, Fagerholt E, Hauge KO, Langseth M, Børvik T. Experimental study on the response of thin aluminium and steel plates subjected to airblast loading. *International Journal of Impact Engineering*. 2016;90:106-121.
- 22- Aune V, Valsamos G, Casadei F, Langseth M, Børvik T.

نتایج برای ورق‌های آلومینیومی و برنجی نشان می‌دهد که استفاده از قالب باعث کاهش بیشترین خیز دائمی به میزان ۱۲/۳ و ۱۰/۶٪ می‌شود.

۷- با توجه به تحقیقات حاضر و همچنین تحقیقات پیشین [18-20] این نتیجه حاصل می‌شود که روش انفجار مخلوط گازها با توجه به مزیت‌های آن؛ یعنی، افزایش ایمنی و بازدهی بار انفجاری، کاهش صدا، در دسترس بودن منبع انرژی و انجام آن در محیط‌های آزمایشگاهی، می‌تواند جایگزین بسیار مناسبی برای سایر روش‌های شکل‌دهی سرعت بالا مانند استفاده از خرج‌های انفجاری باشد. این بدین دلیل است که نمودارهای فشار- زمان به‌دست‌آمده مشابه با روش‌های شکل‌دهی انفجاری با خرج است و معایب آن مانند زمان‌بر بودن انجام آزمایش، تامین و نگهداری ماده منفجره، هزینه‌های مربوط به نیروهای کارکنان برای تخریب‌چی و خطرات ناشی از در تماس بودن جرقه‌زن الکتریکی که خود حاوی ماده منفجره است را ندارد.

تشکر و قدردانی: موردی بیان نشده است.

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

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

سهم نویسندگان: مجتبی ضیاء شمامی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی (۴۰٪)؛ توحید میرزآبایی مستوفی (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۴۰٪)؛ مصطفی سیاح بادخور (نویسنده سوم)؛ پژوهشگر کمکی (۱۰٪)؛ هاشم بابایی (نویسنده چهارم)؛ روش‌شناس (۱۰٪).

منابع مالی: کلیه هزینه‌ها توسط نویسندگان تامین شده است.

منابع

- 1- 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.
- 2- 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.
- 3- 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.
- 4- Rezasefat M, Mirzababaie Mostofi T, Ozbakkaloglu T. Repeated localized impulsive loading on monolithic and multi-layered metallic plates. *Thin-Walled Structures*. 2019;144:106332.
- 5- Honda A, Suzuki M. Sheet metal forming by using gas imploding detonation. *Journal of Materials Processing Technology*. 1999;85(1-3):198-203.
- 6- Yasar M. Gas detonation forming process and modeling for efficient spring-back prediction. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004;150(3):270-279.

- loads. International Journal of Impact Engineering. 1991;11(1):77-91.
- 27- 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.
- 28- 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.
- 29- Rajendran R, Lee JM. Blast loaded plates. Marine Structures. 2009;22(2):99-127.
- 30- Rudrapatna NS, Vaziri R, Olson MD. Deformation and failure of blast-loaded square plates. International Journal of Impact Engineering. 1999;22(4):449-467.
- 31- Jones N. Structural impact. Cambridge: Cambridge University Press; 1997.
- On the dynamic response of blast-loaded steel plates with and without pre-formed holes. International Journal of Impact Engineering. 2017;108:27-46.
- 23- Aune V, Valsamos G, Casadei F, Larcher M, Langseth M, Børvik T. Numerical study on the structural response of blast-loaded thin aluminium and steel plates. International Journal of Impact Engineering. 2017;99:131-144.
- 24- Zheng C, Kong XS, Wu WG, Xu SX, Guan ZW. Experimental and numerical studies on the dynamic response of steel plates subjected to confined blast loading. International Journal of Impact Engineering. 2018;113:144-160.
- 25- 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.
- 26- Teeling-Smith RG, Nurick GN. The deformation and tearing of thin circular plates subjected to impulsive