

پیش بینی جابجایی مرکز جرم ورق مثلثی با استفاده از آنالیز ابعادی

توحید میرزابابای مستوفی^۳

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه
ایوان کی، ایران

هاشم بابایی^۲

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه
گیلان، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۳۰)

مجتبی حقگو^۱

دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه
گیلان، ایران

چکیده

فهم برخی از ویژگی‌های تاثیرگذار انفجار گازی در یک محیط محدود شده بر تغییر شکل ورق برای هدف‌های تولید ارزشمند است. در این مطالعه، جابجایی مرکز جرم ورق‌های مثلثی فولادی نازک تحت انفجار مخلوط استیلن و اکسیژن به صورت تئوری بررسی شده است. مدل-سازی تجربی برای یافتن رابطه بین پارامترهای موثر در فرآیند شکل‌دهی انفجار گازی همانند خواص مکانیکی ورق، ضربه و بار اعمالی، هندسه ورق و اثرات نرخ کرنش و جابجایی مرکز جرم ورق مثلثی ارائه شده است. بعضی از پارامترهای مهم شامل ضخامت ورق، استحکام تسلیم، اندازه‌های مختلف گیره‌های مثلثی برای نشان دادن اثر سطح پوشش داده نشده بر جابجایی مرکز جرم مطالعه شده‌اند. نتایج به دست آمده از آنالیز تحلیل ابعادی ضمن نشان دادن یک تطابق قابل قبول در مقایسه با داده‌های تجربی بر کاهش جابجایی مرکز جرم ورق مثلثی با به کارگیری ورق ضخیم‌تر دلالت دارد. آنالیز تحلیل ابعادی به عنوان یک ابزار سودمند در محاسبه جابجایی مرکز جرم مبین کاهش جابجایی مرکز با کاهش سطح بدون پوشش ورق است.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی تجربی، ورق مثلثی، انفجار داخلی، تحلیل ابعادی

The prediction of center of mass displacement of triangular plate using non-dimensional analysis

Mojtaba Haghgoo

Faculty of Mechanical
Engineering, University of Guilan

Hashem Babaei

Faculty of Mechanical Engineering,
University of Guilan
(Received:; Accepted.)

Tohid Mirzababaie Mostofi

Faculty of Mechanical Engineering,
University of Eyvanekey

ABSTRACT

Understanding some characteristics of the influence of an interior gaseous detonation within a confined space on plate deformation is valuable for production purposes. In this study, the center of mass displacement of thin steel triangular plates subjected to acetylene and oxygen mixture detonation loading is investigated theoretically. Empirical modeling is presented to find the relationships between effective parameters in the gas detonation forming process such as mechanical properties of plate, impulse of applied load, plate geometry and strain-rate sensitivity effect and center of mass displacement of the triangular plate. Some important parameters, including plate thickness and yield strength, different triangular clamp sizes were studied to show the exposed area effect on the center of mass displacement. The results from non-dimensional analysis demonstrated a good agreement compared with experimental data and showed that the center of mass displacement decreases greatly with involving thicker plate. Non-dimensional analysis as a profitable tool in the evaluation of the center of mass displacement demonstrates that midpoint deflection was decreased by the smaller size of the exposed area of the plate.

Keywords Empirical modeling; Triangular plate; Internal detonation; dimensional analysis

کاربرد انفجار مخلوط گازی برای فرآهم آوردن فن-آوری شکل‌دهی فلزات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. فرآیند شکل‌دهی با انفجار گاز با تولید فشار موج شوک به طور آنی آغاز می‌شود، انرژی به صورت دینامیک در محیط انفجار پخش می‌شود. در نهایت انرژی دینامیکی منتشر شده تبدیل به انرژی تغییر شکل می‌شود [۱]. در مقایسه با فرآیند خمکاری سنتی، فرآیند شکل‌دهی با انفجار مخلوط گازها، به دلایلی در کاربرد تجاری سودمندتر است [۲]. از آنجا که سوخت تجاری به عنوان منبع انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد، خطر به حداقل می‌رسد و در نتیجه می‌تواند در کارخانجات عادی به کار رود [۳]. تعیین حالت کرنش مرتبط با صفحات بارگذاری شده و مقاومت سازه‌های آن‌ها به دلیل عدم قطعیت زیاد در چگالی نهایی و سختی ماده در معرض بارهای فشاری مهم است [۴]. علاوه بر این، تعیین پاسخ دینامیکی غیرخطی این صفحات می‌تواند درک بهتری از طراحی و ساخت سازه‌های صفحه‌ای با در نظر گرفتن نگرانی‌های مهم ساخت فراهم کند. فشار نهایی و دوره زمانی برای اعمال فشار را می‌توان تقریباً به طور مستقل تنظیم کرد [۵]. پیش‌بینی تغییر مکان صفحه تحت بارگذاری ضربه‌ای با توزیع یکنواخت، یک کار چالش برانگیز در مکانیک جامدات محاسباتی است. در بارگذاری ضربه‌ای، صفحات در معرض بارهای خمشی قابل توجهی قرار می‌گیرند که معمولاً بزرگ‌تر از بارگذاری استاتیکی هستند. شکل‌پذیری محتمل و تغییر شکل بزرگ یک ورق فلزی در نتیجه انفجار مخلوط گازها در یک فضای محدود با در نظر گرفتن پدیده کنش قوی بین موج و سازه، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌است. چون انرژی انفجار از طریق انحراف و اعوجاج ساختار جذب می‌شود، توزیع فضایی امواج انفجار که بر روی ساختار عمل می‌کنند و پیش‌بینی درست تغییر شکل ساختار، مسائل اساسی در این حوزه هستند. این امر نیازمند یک بینش کامل نسبت به فیزیک واقعی درگیر در این مورد هم برای انفجار و هم برای اعوجاج ساختاری است [۶].

بابایی و همکاران [۷] پاسخ پلاستیک ورق‌های فولادی نرم مستطیلی تحت نیروی انفجاری را بررسی کردند. آن‌ها دو عدد بدون بعد را با در نظرگیری هندسه ورق، اینرسی نیروی اعمالی، خواص مکانیکی ماده و حساسیت به نرخ کرنش معرفی کردند. ضرایب ناشناخته فرمول تجربی به دست آمده بر مبنای تئوری

پای باکینگهام^۱ را با استفاده از روش تجزیه مقادیر تکین^۲ به دست آوردند. آن‌ها برای افزایش اعتبار عدد بی‌بعدشان از معادله ساختاری کوپر-سیمونز^۳ برای محاسبه تنش دینامیکی متوسط استفاده کردند. بابایی و همکاران [۸] با انجام آزمایش‌هایی بر تغییر شکل صفحات فلزی، یک مجموعه بهینه احتراقی را برای تحقیق بیشتر رفتار صفحه فلزی تحت بارگذاری انفجاری گازی توسعه دادند. آن‌ها یک مدل تئوری برای پیش‌بینی جابجایی نقطه میانی صفحات دایره‌ای تحت بارهای ضربه‌ای انفجار گازی ارائه دادند. آن‌ها تغییر شکل پلاستیک و تغییر مکان ناحیه برآمده ورق دایره‌ای گیردار تحت بارهای ضربه‌ای عرضی را نشان دادند. آن‌ها گزارش کردند که پیش‌بینی دقیق تغییر شکل صفحه مدور در نقطه میانی به شدت به تابع شکل فرضی وابسته بود. میرزابابایی و همکاران [۹] مجموعه‌ای از آزمایش‌ها را بر آلیاژ آلومینیوم و صفحات فولاد نرم با انواع ضخامت انجام دادند تا اثرات فشارهای پیش‌انفجار استیلن-اکسیژن بر تغییر شکل پلاستیکی عرضی صفحات مستطیلی کاملاً گیردار تحت بارگذاری انفجار مخلوط گازی را بررسی کنند. آن‌ها یک تابع بسط مرتبه صفر از نوع اول در هر دو جهت محورها را براساس روش انرژی برای برآورد تغییر شکل دائمی صفحه در نظر گرفتند. آن‌ها از یک مدل کوپر-سیمونز برای در نظر گرفتن حساسیت نرخ کرنش مواد در مدل استفاده کردند. مستوفی و همکاران [۱۰] برخی تست‌های تجربی را برای اندازه‌گیری تغییر شکل عرضی بزرگ صفحات مستطیلی دو لایه تحت بار انفجار مخلوط گازی انجام دادند. نمونه‌های آن‌ها از ترکیبی از لایه جلویی آلیاژ آلومینیوم و لایه پشتی فولاد نرم ساخته شدند. نتایج تجربی آن‌ها نشان داد که زمانی که هیچ شکافی بین لایه‌ها وجود نداشت جابجایی لایه پشتی تقریباً مشابه با جابجایی لایه جلویی بود. آن‌ها گزارش کردند که لایه پشتی ضخیم‌تر منجر به کاهش جابجایی لایه جلویی می‌شود. آن‌ها همچنین یک مدل تحلیلی مبتنی بر روش انرژی را برای بررسی اثرات نرخ کرنش، بار اعمالی و هندسه ورق بر تغییر شکل ورق توسعه دادند و نتیجه گرفتند که افزایش ضخامت هر یک از لایه‌ها منجر به کاهش جابجایی لایه دیگر می‌شود.

در این مقاله، تئوری پلاستیک بی‌بعد برای تحلیل پاسخ پلاستیک دینامیکی ورق‌های فلزی مثلی نازک بر اثر انفجار مخلوط گاز ارائه می‌شود. برای این کار، معادلات رفتاری اساسی

¹ Buckingham π theory

² Singular value decomposition method

³ Cowper-Symonds

پارامترهای خروجی مانند تغییر شکل پایدار مرکز جرم ورق و نسبت تغییر شکل مرکز جرم ورق به ضخامت آن زده می شود [۱۷]. این تخمین با به کارگیری ضرایب ماده در روابط ساختاری کوپر-سیمونز و به صورت تابعی از ضخامت ورق زده می شود. استخراج مستقیم اعداد پیشنهادی از معادلات تعادل دینامیکی نشان دهنده مفهوم فیزیکی اعداد مورد نظر است [۱۳]. از مزیت های اصلی این روش می توان به سازماندهی کارهای تجربی، پیشگیری از آزمایش های تکراری، بررسی و شناخت اثر هر یک از متغیرهای وابسته به فرآیند و همچنین تحلیل و تجزیه داده های آزمایشگاهی اشاره کرد. مشابه با روش تحلیلی از معادلات ارائه شده برای تحلیل مسئله مورد نظر استفاده می شود.

با وجود پیچیدگی های زیاد در زمینه بررسی فرآیند شکل دهی ورق، روش تحلیل ابعادی دارای سابقه و کاربرد گسترده ای در زمینه پیش بینی تغییر شکل ورق ها است. لذا با توجه به غیرخطی بودن رفتار سیستم حاکم بر فرآیندهای شکل دهی، از این روش بیشتر برای پیدا کردن یک رابطه ریاضی بین متغیرها و همچنین پیش بینی رفتار غیرخطی سیستم استفاده می شود [۱۴].

روش تحلیل ابعادی یک روش بسیار مفید برای بهبود بهره وری کارهای تجربی انجام شده و دوری از انجام آزمایش های غیر ضرور است. در این روش، تعدادی اعداد بی بعد بر مبنای تئوری پای باکینگهام در نظر گرفته می شوند. مطابق این تئوری، اگر فرآیندی به تعدادی متغیر وابستگی داشته باشد، تعداد گروه های بی بعد مستقل باید برابر یا کمتر از اختلاف تعداد ابعاد اصلی و تعداد متغیر وابسته باشد.

اساس مدل سازی، شناسایی یک تابع ریاضی مانند \hat{f} است که نزدیک به تابع واقعی باشد که خروجی \hat{y} برای یک بردار ورودی خاص $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ نزدیک به خروجی واقعی بشود. بنابراین M سری عدد برای مجموعه داده های چند ورودی و تک خروجی در رابطه (۱) در نظر گرفته می شود.

$$y_i = f(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{in}), \quad i = 1, 2, 3, \dots, M \quad (1)$$

حالا به دست آوری \hat{f} برای هر بردار ورودی داده شده برای پیش بینی مقادیر خروجی \hat{y}_i به رابطه (۲) می انجامد.

$$\hat{y}_i = \hat{f}(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{in}) \quad i = 1, 2, 3, \dots, M \quad (2)$$

مسئله اصلی تعیین \hat{f} این است که مربع تفاوت بین خروجی های اصلی و پیش بینی شده کمینه شود.

$$\sum_{i=1}^M [f(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{in}) - y_i]^2 \rightarrow \text{Min} \quad (3)$$

برای ورق مثلثی گیردار در مرزها تبدیل به معادلات بی بعد می شود. بررسی رفتار ماده حساس به نرخ کرنش با پیشنهاد دستگاهی از اعداد بی بعد مستقل انجام می شود. در نظرگیری تأثیر نیروهای غشایی ضروری است. در ادامه نسبت فشار دینامیکی به تنش تسلیم شبه استاتیکی به صورت حاصل ضرب فشار گاز اکسیژن در فشار گاز استیلن تقسیم بر مربع تنش تسلیم استاتیکی تعریف می شود. این تعریف برای ورود تأثیر فشارهای پیش انفجار مخلوط گاز در پاسخ پلاستیک سازه استفاده می شود. به عنوان نتیجه، یک عدد بی بعد برای پیش بینی جابجایی مرکز جرم ورق مثلثی پیشنهاد می شود. در نهایت بیشینه تغییر شکل عرضی ورق توسط دستگاهی از اعداد بی بعد مستقل محاسبه می شود. معادلات تجربی برای مدل سازی و پیش بینی جابجایی به ضخامت ورق های مثلثی تحت انفجار مخلوط گازها استخراج شده اند. برای این کار از روش تفکیک مقادیر تکین در ارتباط با اعداد بدون بعد برای استخراج معادلات تجربی استفاده شد. یکی از مشکلات موجود در مراجع قبلی، عدم بیان دلیل برای معرفی اعداد بی بعد بود. لذا در این تحقیق هدف آن است که اعداد بی بعد پیشنهادی از بی بعدسازی معادلات تعادل دینامیکی حاکم بر ورق استخراج شوند و همچنین کمیت های مهمی نظیر هندسه ورق، توانایی مقاومت دینامیکی ماده در برابر بار وارده، حساسیت ماده به نرخ کرنش و همچنین اینرسی بار وارد شده را در نظر بگیرد. در انتها معادلات ساختاری تجربی بر اساس نتایج تجربی موجود و همچنین روش تجزیه مقادیر تکین به دست می آیند.

۲- آنالیز ابعادی

در این بخش، با بی بعدسازی معادلات تعادل دینامیکی حاکم بر ورق، اعداد بی بعد برای تحلیل ابعادی فرآیند شکل دهی انفجاری پیشنهاد می شوند. روش اعداد بی بعد برای بررسی رفتار پلاستیک دینامیکی ورق ها به پیدا کردن رابطه بین پارامترهای مؤثر در فرایند انفجار مخلوط گاز و تغییر شکل ورق ختم می شود [۱۱]. اعداد بی بعد بر اساس معادلات ساختاری بدون بعد و استفاده کردن از روش ریاضی تجزیه مقادیر تکین به کار گرفته می شوند. این روش بر اساس پارامترهای مهم و مؤثر مثل اینرسی نیروهای اعمالی، خواص مکانیکی مواد، هندسه سازه و حساسیت نرخ کرنش بنا می شود [۱۲]. استفاده از این اعداد در به دست آمدن مقدار تغییر شکل عرضی پایدار ورق ناشی از آزمایش های تجربی کمک بسیاری می کند. با استفاده از این روش تجربی، تخمین بسیار دقیقی برای

بنابراین، پس از استفاده از لگاریتم طبیعی، معادله به صورت رابطه خطی وابسته به ضرایب توسط رابطه (۱۳) نوشته می-شود.

$$\ln(\pi_0) = \eta + \alpha \ln(\pi_1) + \beta \ln(\pi_2) + \gamma \ln(\pi_3) + \lambda \ln(\pi_4) \quad (13)$$

در نهایت براساس جفت‌های تجربی M ورودی-خروجی یک سیستم از M معادله جبری خطی با پنج ضریب ناشناخته ساخته می‌شود.

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta + \alpha \zeta_{11} + \beta \zeta_{12} + \gamma \zeta_{13} + \lambda \zeta_{14} = \zeta_{10} \\ \eta + \alpha \zeta_{21} + \beta \zeta_{22} + \gamma \zeta_{23} + \lambda \zeta_{24} = \zeta_{20} \\ \dots\dots\dots \\ \eta + \alpha \zeta_{M1} + \beta \zeta_{M2} + \gamma \zeta_{M3} + \lambda \zeta_{M4} = \zeta_{M0} \end{array} \right. \quad (14)$$

که

$$\zeta_{ij} = \ln(\pi_{ij}) \quad i=1,2,3,\dots,M \quad j=1,2,3,4 \quad (15)$$

و

$$\zeta_{i0} = \ln(\pi_{i0}) \quad i=1,2,3,\dots,M \quad (16)$$

که $M \geq K = 4$ سیستم معادلات خطی به صورت رابطه $AX = Y$ نوشته می‌شود.

که

$$X = \{\eta \alpha \beta \gamma \lambda\}^T \quad (17)$$

$$Y = \{\zeta_{10} \zeta_{20} \dots \zeta_{M0}\}^T \quad (18)$$

و

$$A = \begin{Bmatrix} 1 & \zeta_{11} & \zeta_{12} & \zeta_{13} & \zeta_{14} \\ 1 & \zeta_{21} & \zeta_{22} & \zeta_{23} & \zeta_{24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \zeta_{M1} & \zeta_{M2} & \zeta_{M3} & \zeta_{M4} \end{Bmatrix} \quad (19)$$

برای حل معادله $\pi_0 = \frac{W_0}{H} = f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4)$ روش تفکیک مقادیر تکین قابل اتکا است. برای حل بسیاری از مسائل حداقل مربعات خطی که تکینگی در آن یافت می‌شود، روش تفکیک مقادیر تکین بهترین است [۱۵].

برای به دست آوردن ضرایب ناشناخته، داده‌های تجربی به یک سری داده بدون بعد تبدیل شده‌اند. بنابراین، یک مدل ساده برای تغییر شکل ورق مثلثی گیردار تحت تأثیر انفجار مخلوط گازی توسط روش تجزیه مقادیر تکین بنا شد. مقادیر ضرایب اشاره شده به صورت زیر به دست می‌آیند $C = 9.251$ ، $\gamma = 2.2513$ ، $\beta = 17.3506$ ، $\alpha = -17.5527$ و $\lambda = -0.9754$.

در روش آنالیز بی‌بعد، به جای متغیرهای فیزیکی واقعی $\{y, x\} = \{y, x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ یک سری بدون بعد $\pi = (\pi_0, \pi_1, \pi_2, \dots, \pi_k)$ برای محاسبه \hat{f} استفاده می‌شود.

$$\hat{\pi}_{0i} = \hat{f}(\pi_{1i}, \pi_{2i}, \pi_{3i}, \dots, \pi_{ki}), \quad i=1, 2, \dots, M \quad (4)$$

نکته مهم این است که جمع مربع تفاضل \hat{f} از مقادیر واقعی کمینه باشد.

$$\sum_{i=1}^M [\hat{f}(\pi_{i1}, \pi_{i2}, \pi_{i3}, \dots, \pi_{in}) - \pi_{0i}]^2 \rightarrow \text{Min} \quad (5)$$

پارامترهای مؤثر در فرایند شکل‌دهی، ضربه فشار اعمالی، چگالی فولاد، شعاع ورق تغییر شکل یافته، ضخامت ورق، سرعت صوت در اکسیژن، سرعت صوت در استیلن، فشار اکسیژن، فشار استیلن، تنش تسلیم استاتیکی، چگالی اکسیژن، چگالی استیلن و مدول الاستیک ورق هستند. بنابراین، این پارامترها برای ایجاد اعداد بدون بعد مستقل برای مدل‌سازی تغییر شکل نقطه میانی ورق‌های گیردار مثلثی تحت انفجار مخلوط گازها براساس سه بعد طول و جرم و زمان استفاده می‌شوند. اعداد بی‌بعد باید حاوی متغیرهای فیزیکی مانند هندسه ورق، خواص مادی و اینرسی نیروی اعمالی برای محاسبه پاسخ دینامیکی ورق باشد.

$$\pi_0 = \frac{W_0}{H} \quad (6)$$

$$\pi_1 = B/H \quad (7)$$

$$\pi_2 = h/H \quad (8)$$

$$\pi_3 = I / \rho B h H \sqrt{C_{O_2} C_{C_2H_2}} \quad (9)$$

$$\pi_4 = \frac{P_{O_2} + P_{C_2H_2}}{\rho_{O_2} + \rho_{C_2H_2}} \cdot \frac{\rho}{\sigma_y} \quad (10)$$

که W_0 جابجایی مرکز جرم، H ضخامت ورق، B قاعده مثلث، h ارتفاع مثلث، ρ چگالی ورق، C_{O_2} سرعت صوت در اکسیژن، $C_{C_2H_2}$ سرعت صوت در استیلن و σ_y تنش تسلیم استاتیکی اند. بنابراین با توجه به گروه‌های بی‌بعد اشاره شده، جابجایی بیشینه ورق مثلثی بر اثر انفجار مخلوط گازها توسط رابطه (۱۱) نوشته می‌شود.

$$\pi_0 = \frac{W_0}{H} = f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4) \quad (11)$$

که

$$f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4) = C \cdot (\pi_1)^\alpha \cdot (\pi_2)^\beta \cdot (\pi_3)^\gamma \cdot (\pi_4)^\lambda \quad (12)$$

به خاطر استفاده از روش تفکیک مقادیر منفرد باید از رابطه (۱۲) لگاریتم گرفته شود تا هدف اصلی مدل‌سازی محقق شود.

دست آمدند. با قرار دادن رابطه (۲۵) در رابطه (۲۴)، رابطه (۲۶) به دست می آید.

$$\dot{\epsilon}_m = \frac{4I}{\sqrt{2\rho B^2 h^2}} \left(-0.3958 \cdot \phi^{0.6137} \right) \quad (26)$$

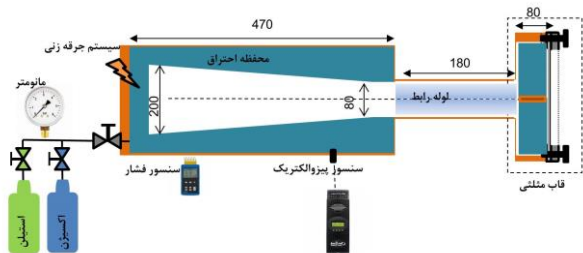
در نهایت، تنش تسلیم دینامیکی به دست می آید و معادله (۲۲) به صورت رابطه (۲۷) نوشته می شود.

$$\frac{\sigma_d}{\sigma_y} = \kappa = 1 + \left(\frac{-0.3958 \cdot I \cdot \phi^{0.6137}}{\sqrt{2\rho B^2 h^2} D} \right)^{\frac{1}{q}} \quad (27)$$

پس از جایگزینی ابعاد معادله در $\pi_0 = \frac{W_0}{H} = f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4)$ ضرایب به صورت $\beta = 1.5541$ و $\alpha = 1.6764$ ، $C = -5.0964$ و $\lambda = -1.1603$ و $\gamma = 0.2896$ به دست می آیند.

۳- آزمایش تجربی

این مطالعه محدود به یک محفظه احتراق پرفشار است که در یک انتها بسته است و انتهای دیگر توسط یک لوله بلند به قاب مثلثی متصل شده است. یک جرقه ناگهانی منجر به ایجاد و حرکت موج شوک فشرده به داخل لوله متصل به انتهای باز در حداکثر فشار می شود. سپس، امواج در فشار زیاد به قاب مثلثی می رسند. موج انفجار رقیق باعث حرکت توده ای پرفشار با سرعت زیاد درست پشت صفحه می شود. به محض رسیدن به صفحه، امواج انفجار ورودی منعکس می شوند و به سمت محفظه احتراق حرکت می کنند. ذرات گاز در مقابل موج بازتاب شده بسیار واکنش پذیر بوده، که منجر به ایجاد فشار انفجار در پشت موج شوک منعکس شده می شوند. امواج منعکس شده با یکدیگر مقابله می کنند و یک منطقه پرفشار درست پشت صفحه ایجاد می کنند. این فرایند با برخورد امواج انفجار به دیواره و صفحه محفظه احتراق پیش می رود تا در نهایت صفحه تغییر شکل دهد. شکل ۱ حاوی رسم شماتیک اجزای آزمایش تجربی است.



شکل ۱ اجزای آزمایش تجربی

حالا برای مشاهده تأثیر نرخ کرنش ماده، تنش تسلیم دینامیکی به جای تنش تسلیم استاتیکی برای مدل کردن تغییر شکل نقطه مرکز استفاده می شود. نکته مهم آن است که فقط π_4 تغییر می کند و بقیه پارامترهای بدون بعد ثابت هستند.

$$\pi_4 = \frac{P_{O_2} + P_{C_2H_2}}{\rho_{O_2} + \rho_{C_2H_2}} \cdot \frac{\rho}{\sigma_d} \quad (20)$$

فرض شده است که تنش جریان دینامیکی متوسط σ_d به صورت ضرب یک اسکالر در تنش تسلیم استاتیکی تعریف می شود.

$$\sigma_d = \kappa \sigma_y \quad (21)$$

معادله کوپر-سیمونز برای محاسبه کاربردی است. معادله کوپر-سیمونز توسط رابطه (۲۲) نوشته می شود [۱۵].

$$\frac{\sigma_d}{\sigma_y} = \kappa = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}_m}{D} \right)^{\frac{1}{q}} \quad (22)$$

$$V_0 = I / m$$

$$m = \rho B h H / 2$$

که $\dot{\epsilon}_m$ نرخ کرنش متوسط و $\sigma_y = 290 \text{ MPa}$ تنش تسلیم استاتیکی برای آلیاژ فولاد st13 است [۱۵، ۱۶]. ثابت های مادی $q = 5$ و $D = 40.4 \text{ s}^{-1}$ برای فولاد استفاده می شوند [۷].

سرعت اولیه ورق V_0 به صورت نسبت بزرگی ضربه I به جرم ورق m تعریف می شود. نرخ کرنش متوسط با استفاده از سرعت اولیه ورق ناشی از ضربه به سطح آن توسط رابطه (۲۳) بیان می شود [۸].

$$\dot{\epsilon}_m = \frac{2V_0 W_0}{\sqrt{2} B h} \quad (23)$$

با استفاده از $V_0 = I / m$ و تقریب جرم ورق $m = \rho B h H / 2$ نرخ کرنش توسط رابطه (۲۴) داده می شود [۱۵].

$$\dot{\epsilon}_m = \frac{4I}{\sqrt{2\rho B^2 h^2}} \left(\frac{W_0}{H} \right) \quad (24)$$

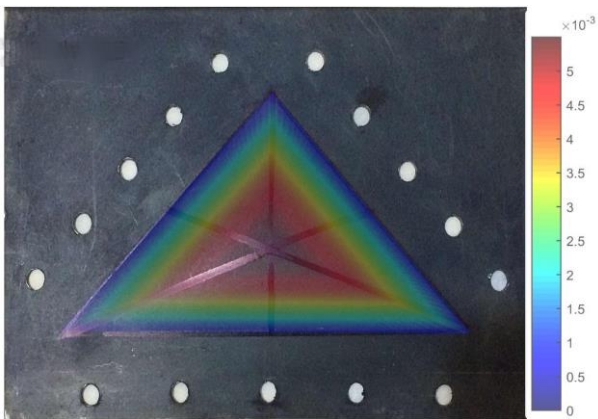
با معرفی عدد بی بعد ϕ می توان مقدار $\frac{W_0}{H}$ را توسط رابطه ساده شده (۲۵) بیان کرد.

$$\frac{W_0}{H} = \delta \cdot \phi^\mu, \quad \left(\phi = \frac{I}{\pi H^2 \sqrt{B h \rho \sigma_y}} \right) \quad (25)$$

مقادیر پارامترهای μ و δ توسط روش تفکیک مقادیر منفرد و نتایج آزمایشگاهی به صورت -0.3958 و 0.6137 به

شکل ۲ تغییر شکل ورق مثلثی بزرگ

شکل ۳ به خوبی تغییر شکل ورق مثلثی کوچک را نشان می-دهد. چیزی که جلب توجه می کند کشیدگی محل سوراخ در ضلع پایینی مثلث است که ضمن تاکید بر وقوع فشار بسیار زیاد بر این ناحیه بر کافی نبودن نیروی گیره وارده بر این ضلع با توجه به کم بودن مساحت تحت فشار گیره در آن ناحیه تاکید دارد. اضلاع ساق مثلث با توجه به گیردار شدن در سطح بزرگتری تحت نیروی گیره قابل توجهی قرار دارند. این نیروی زیاد موجب مقاومت ورق بین قاب و قالب و بهره بردن از نیروی انفجار برای شکل دادن قطعه می شود.



شکل ۳ تغییر شکل ورق مثلثی کوچک

جدول ۱ نشان دهنده مقایسه بین مقادیر پیش بینی شده جابجایی مرکز جرم ورق مثلثی به ضخامت ورق با مقادیر واقعی برای ورق های کوچک و بزرگ [۱۷] است. ملاک بزرگ یا کوچک بودن ورق، مساحت سطح ورق است. چیزی که در جدول مشخص است ارتباط نزدیک نتایج واقعی و پیش بینی شده و دست کم گرفتن مقادیر پیش بینی شده است. تمامی مقادیر پیش بینی شده با یک اطمینان ۵ تا ۱۰ درصدی کوچک تر از مقدار واقعی هستند که استفاده از این حد اطمینان می تواند دستیابی به نتایج دقیق را میسر کند.

جدول ۱ مقایسه بین مقادیر پیش بینی شده و واقعی نسبت جابجایی مرکز جرم به ضخامت ورق [۱۷]

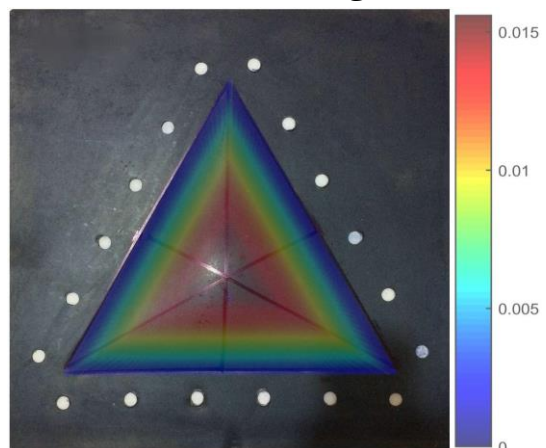
مقادیر پیش بینی شده W_0/th	مقادیر واقعی W_0/th	اندازه ورق	ضخامت (میلی-متر)	فشار (بار)
۲۰/۵۷	۲۱/۲	کوچک	۱	۳
۱۵/۷۶	۱۶/۲	کوچک	۱	۲
۱۰/۳۶	۱۱/۲	کوچک	۱	۱
۶/۲۳	۷/۲۵	کوچک	۲	۴

فرآیند با اشتعال مخلوط گازی آغاز می شود که باعث ایجاد موج انفجار می شود. این موج انفجار به طور متقارن از طریق محفظه انفجار به شکل کروی گسترش می یابد. امواج انفجار از طریق مجرای انفجار از سطح مقطع بزرگ تر محفظه احتراق در داخل فضای مخروطی به سطح مقطع کوچک تر مخروط ناقص حرکت می کنند. این امواج شوک به شکل امواج فشرده که دلالت بر افزایش فشار در هنگام عبور از لوله اتصال دارند عبور می کند، سپس به صورت یک پالس شوک گسترده، گسترش می یابند که منجر به افت فشار در حین عبور از قاب مثلثی می شود. بعد از این، موج شوک به صفحه می رسد که بین قالب های مثلثی ضخیم ۱۲ میلی متری نگه داشته شده است. قاب مثلثی، موج را به شکل صفحه ای به سطح بدون پوشش نمونه انتقال می دهد. سپس موج در انتهای دستگاه منعکس شده و بعداً به عنوان یک موج شوک با دامنه کاهش یافته بر می گردد. این موج شوک چندین بار بین محفظه و صفحه منعکس می شود تا اینکه انرژی آن به طور کامل صرف شکل دهی ورق شود.

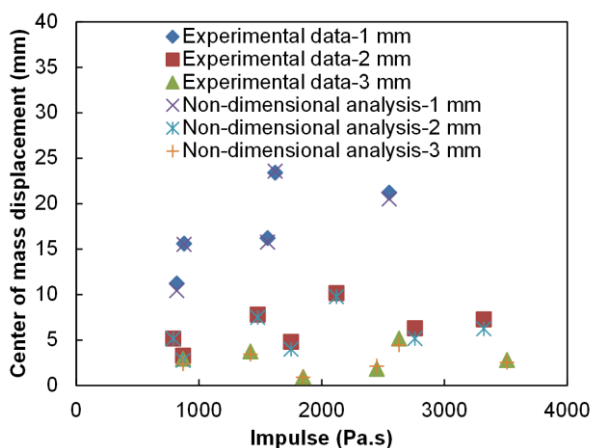
۴- نتایج و بحث

دو نوع از نتایج تجربی در درجه اول اهمیت قرار دارند (۱) پروفایل تغییر شکل مشاهده شده در صفحات تست و (۲) داده های کمی دریافت شده از طریق اندازه گیری و محاسبات مربوط به مرکز جابجایی جرمی و ایمپالس. تغییر مکان دائمی صفحات برای بررسی ارتباط بین تغییر شکل دائمی و پارامترهای بارگذاری ثبت شده است. نتایج همچنین شامل تأثیر برخی پارامترهای کلیدی، از جمله ضخامت صفحه، اندازه قاب مثلثی، و فشار پیش انفجار هستند.

در شکل ۲ تغییر شکل ورق مثلثی بزرگ آورده شده است. همانطور که از این شکل مشخص است بیشترین جابجایی مربوط به محل تلاقی خطوط یعنی مرکز جرم مثلث است. با فاصله گرفتن از مرکز جرم مثلث، جابجایی کاهش می یابد و در مرز گیردار به صفر می رسد.

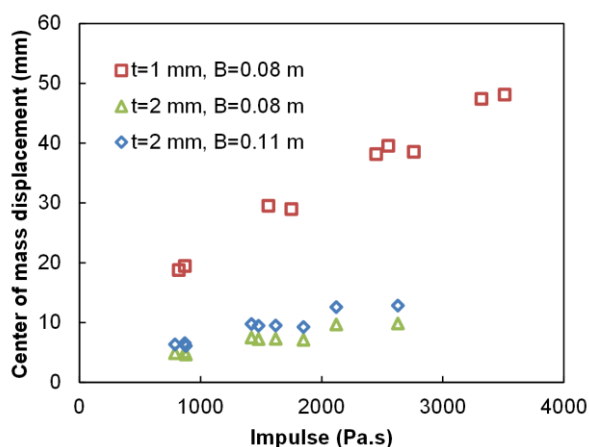


۵ به خوبی تطابق قابل قبول آنالیز ابعادی در گستره‌ی وسیعی از بزرگی ضربه را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است با کاهش ضخامت ورق، جابجایی مرکز جرم افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد در حالی که افزایش بزرگی ضربه با وجود اینکه موجب افزایش جابجایی ورق شد ولی تاثیر دوبرابر کردن فشار نسبت به تاثیر نصف کردن ضخامت قابل توجه نیست.



شکل ۵ جابجایی مرکز جرم واقعی و پیش‌بینی شده مثلث نسبت به ضربه

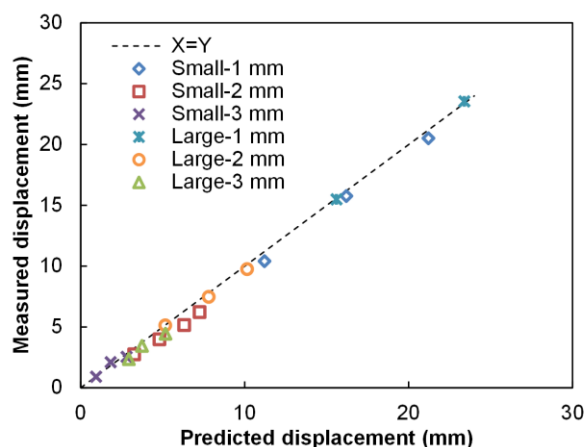
شکل ۶ نشان‌دهنده‌ی جابجایی مرکز جرم پیش‌بینی شده برای ورق با ضخامت‌ها و طول قاعده‌های مختلف است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش طول قاعده مثلث، جابجایی مرکز جرم افزایش می‌یابد. با توجه به این نتیجه می‌توان بر تاثیر مثبت افزایش سطح بدون پوشش ورق صحنه گذاشت. البته تاثیر ضخامت بیشتر از تاثیر طول قاعده مثلث است که با توجه به اینکه ضربه به صورت عرضی بر سطح ورق وارد می‌شود، تاثیر عاملی که در راستای عرضی سطح ورق عمل می‌کند مانند ضخامت بسیار بیشتر از تاثیر عاملی دیگر مانند قاعده مثلث است که در راستای تغییر شکل عرضی عمل نمی‌کند.



شکل ۶ جابجایی مرکز جرم با ضربه برای ضخامت‌ها و طول‌های مختلف قاعده مثلث

۵/۱۶	۶/۳	کوچک	۲	۳
۳/۹۸	۴/۸	کوچک	۲	۲
۲/۷۲	۳/۲۵	کوچک	۲	۱
۲/۸۴	۲/۸	کوچک	۳	۴
۱/۹۱	۱/۸۳	کوچک	۳	۳
۰/۹۷	۰/۹۳	کوچک	۳	۲
۲۳/۸۸	۲۳/۴	بزرگ	۱	۲
۱۵/۵	۱۵/۶	بزرگ	۱	۱
۹/۷۹	۱۰/۱۵	بزرگ	۲	۳
۷/۵۲	۷/۸	بزرگ	۲	۲
۵/۱۴	۵/۱۵	بزرگ	۲	۱
۴/۴۶	۵/۱۶	بزرگ	۳	۳
۳/۴۶	۳/۷۳	بزرگ	۳	۲
۲/۳۷	۲/۹۳	بزرگ	۳	۱

شکل ۴ به خوبی نشان‌دهنده‌ی تطابق قابل قبول نتایج آنالیز ابعادی و نتایج تجربی گزارش شده است. تجمع داده‌ها حول خط $x=y$ مبین توانایی روش آنالیز ابعادی در پیش‌بینی جابجایی مرکز جرم ورق مثلثی است. فرارگیری داده‌های مربوط به ورق با ضخامت ۱ میلی‌متر در منطقه جابجایی بیشتر مشخص‌کننده نقش ضخامت ورق بر تغییر شکل ناشی از ضربه است. در تمام داده‌ها، ورق بزرگتر، جابجایی مرکز جرم بیشتری نسبت به ورق کوچک‌تر دارد که مبین تاثیر سطح بدون پوشش بر جابجایی ورق است. چون با افزایش سطح بدون پوشش فاصله از لبه‌ها افزایش می‌یابد و سطح ورق آزادی بیشتری برای تغییر شکل در راستای عرضی دارد.



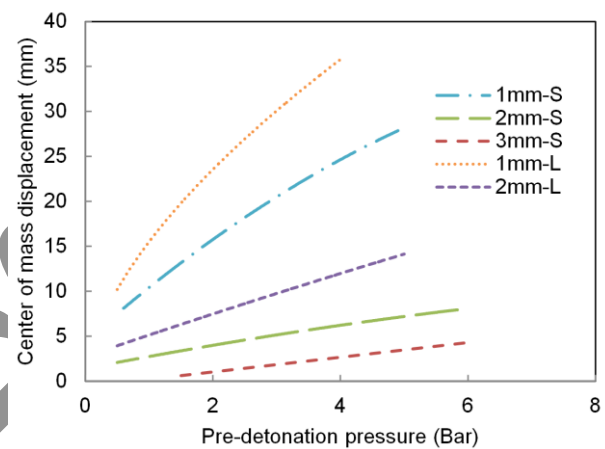
شکل ۴ مقایسه بین نتایج تجربی و خروجی روش آنالیز ابعادی شکل ۵ نشان‌دهنده‌ی جابجایی مرکز جرم با بزرگی ضربه برای داده‌های تجربی و نتایج پیش‌بینی شده آنالیز بی‌بعد است. شکل

صفحات ضخیم تر بیشتر بود که نشان دهنده قابلیت جذب انرژی صفحه ضخیم تر است.

۶- مراجع

- [1] M. Yaşar, H.I. Demirci, I. Kadi, Detonation forming of aluminium cylindrical cups experimental and theoretical modelling, *Materials & design*, 27 (2006) 397-404.
- [2] M. Yasar, Gas detonation forming process and modeling for efficient spring-back prediction, *Journal of materials processing technology*, 150 (2004) 270-279.
- [3] M. Khaleghi, B.S. Aghazadeh, H. Bisadi, Efficient oxyhydrogen mixture determination in gas Detonation forming, *Int. J. Mech. Mechatron. Eng.*, 7 (2013) 1748-1754.
- [4] G. Langdon, I. Rossiter, V. Balden, G. Nurick, Performance of mild steel perforated plates as a blast wave mitigation technique: Experimental and numerical investigation, *International Journal of Impact Engineering*, 37 (2010) 1021-1036.
- [5] T.M. Mostofi, H. Babaei, M. Alitavoli, Theoretical analysis on the effect of uniform and localized impulsive loading on the dynamic plastic behaviour of fully clamped thin quadrangular plates, *Thin-Walled Structures*, 109 (2016) 367-376.
- [6] S.P. Patil, K.G. Prajapati, V. Jenkouk, H. Olivier, B. Markert, Experimental and numerical studies of sheet metal forming with damage using gas detonation process, *Metals*, 7 (2017) 556.
- [7] H. Babaei, T. Mirzababaie Mostofi, E. Armoudli, On dimensionless numbers for the dynamic plastic response of quadrangular mild steel plates subjected to localized and uniform impulsive loading, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 231 (2017) 939-950.
- [8] H. Babaei, T. Mirzababaie Mostofi, 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*, 234 (2020) 231-245.

شکل ۷ معرف پیش‌بینی جابجایی مرکز جرم ورق مثلثی تحت پیش‌فشارهای انفجاری مختلف است. همانطور که از این شکل می‌توان دید، رابطه بدون بعد برای ورق کوچک با ضخامت ۳ میلی‌متر کمترین جابجایی را پیش‌بینی می‌کند در حالی که ورق ۱ میلی‌متر بیشترین جابجایی را خواهد داشت. همچنین می‌توان دید که برای جابجایی‌های کوچک و متوسط مربوط به ورق ضخیم، افزایش جابجایی با پیش‌فشار به صورت یکنواخت افزایش می‌یابد در حالی که برای ورق نازک این افزایش ابتدا تند است و به مرور زمان یکنواخت می‌شود. شکل ۷ به خوبی نشان می‌دهد که رابطه بدون بعد به دست آمده با تاثیرپذیری از ابعاد ورق، روند متفاوتی را برای جابجایی مرکز جرم ورق‌هایی با ابعاد متفاوت پیش‌بینی می‌کند.



شکل ۷ برازش نتایج تجربی

۵- نتیجه‌گیری

استفاده از روش مقادیر منفرد راهی برای جلوگیری از تکرار آزمایش‌های پرهزینه و پیش‌بینی جابجایی مرکز جرم ورق برای گستره‌ی وسیعی از فشارهای پیش‌انفجار گاز، ضخامت‌ها و اندازه ورق گشود. استفاده از این روش با بهره بردن از مفهوم نرخ کرنش، دقت بیشتری را موجب شد و بر تطابق قابل قبول پیش‌بینی‌ها با داده‌های آزمایشگاهی در طیف وسیعی از نتایج تاکید داشت. روند افزایش جابجایی مرکز جرم با افزایش فشار پیش‌انفجار مشاهده شد. این روند، کاهش شیب را با هر بار افزایش فشار پیش‌انفجار نشان داد که بر رابطه غیرخطی جابجایی مرکز جرم نمونه مثلثی با بزرگی ضربه دلالت داشت. نتیجه این که در یک شکل دهی با سرعت زیاد، کشش قابل توجه موجب انحراف زیاد و تغییر شکل‌های کششی بزرگ می‌شود. علاوه بر این، مقاومت در برابر تغییر شکل برای

under gaseous detonation loading, *Materials Today Communications*, 31 (2022) 103423.

[9] T. Mirzababaie Mostofi, H. Babaei, M. Alitavoli, Experimental and theoretical study on large ductile transverse deformations of rectangular plates subjected to shock load due to gas mixture detonation, *Strain*, 53 (2017) e12235.

[10] T.M. Mostofi, H. Babaei, M. Alitavoli, S. Hosseinzadeh, On dimensionless numbers for predicting large ductile transverse deformation of monolithic and multi-layered metallic square targets struck normally by rigid spherical projectile, *Thin-Walled Structures*, 112 (2017) 118-124.

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

[12] H. Babaei, T. Mirzababaie Mostofi, M. Alitavoli, Experimental and theoretical study of large deformation of rectangular plates subjected to water hammer shock loading, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 231 (2017) 490-496.

[13] H. Babaei, T.M. Mostofi, M. Alitavoli, A. Darvizeh, Empirical modelling for prediction of large deformation of clamped circular plates in gas detonation forming process, *Experimental Techniques*, 40 (2016) 1485-1494.

[14] H. Babaei, T.M. Mostofi, M. Alitavoli, A. Saeidinejad, Experimental investigation and dimensionless analysis of forming of rectangular plates subjected to hydrodynamic loading, *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 58 (2017) 139-147.

[15] T.M. Mostofi, H. Babaei, M. Alitavoli, G. Lu, D. Ruan, Large transverse deformation of double-layered rectangular plates subjected to gas mixture detonation load, *International Journal of Impact Engineering*, 125 (2019) 93-106.

[16] J. Zamani, K. Safari, A. Ghamsari, A. Zamiri, Experimental analysis of clamped AA5010 and steel plates subjected to blast loading and underwater explosion, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 46 (2011) 201-212.

[17] M. Haghgoo, H. Babaei, T.M. Mostofi, Dynamic response of thin triangular plates