

بررسی تجربی و شبیه‌سازی عددی شکل‌دهی آزاد

ورق‌های فولادی مستطیلی با روش انفجار مخلوط گازها

هاشم بابایی^{۱*}، توحید میرزابابایی مستوفی^۲، ابوالفضل درویزه^۳، مجید علی طاوولی^۴، سحر رسولی^۵، پوریا نیک‌نژاد^۶

۱- استادیار، دانشگاه گیلان، ۲- دانشجوی دکتری، دانشگاه گیلان، ۳- استاد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بندر انزلی

۴- دانشیار، دانشگاه گیلان، ۵- دانشجوی کارشناسی ارشد، پردیس دانشگاهی دانشگاه گیلان، ۶- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه گیلان

(تاریخ وصول: ۹۴/۶/۱، تاریخ پذیرش: ۹۴/۶/۲۸)

چکیده

در این مقاله، بررسی تجربی و عددی تغییر شکل پلاستیک ورق‌های فولادی مستطیلی با روش انفجار مخلوط گازها انجام شده است. در آزمایش‌های مختلف، ورق‌های فولادی با ضخامت‌های مختلف تحت اثر فشار شوک ناشی از انفجار با سرعت بالا تغییر شکل یافت. همچنین فشار حاصل از انفجار مخلوط گازها با استفاده از سنسور فشار پیزو الکتریکی بعد از انفجار اندازه‌گیری شد. 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، ارائه شده است. شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS/EXPLICIT انجام گرفت. برای صحت‌گذاری مدل عددی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی مقایسه شد، این مقایسه نشان داد که نتایج عددی با نتایج تجربی به‌دست آمده سازگاری قابل قبولی دارد و به‌طور کلی تمامی داده‌ها در محدوده قابل اطمینان قرار می‌گیرد. بنابراین استفاده از این مدل عددی برای پیش‌بینی پروفیل تغییر شکل و خیز مرکز ورق فولادی مستطیلی، مطلوب است.

واژه‌های کلیدی: شکل‌دهی با انفجار مخلوط گازها، تغییر شکل پلاستیک، شبیه‌سازی عددی، ورق مستطیلی گیردار.

Experimental Investigation and Numerical Simulation of Rectangular Steel Plates Free Forming Using Gases Mixture Detonation

H. Babaei^{1*}, T. Mirzababaei Mostofi², A. Darvizeh³, M. Alitavoli⁴, S. Rasouli⁵, P. Niknejad⁶

1,2,4,5,6- University of Guilan

3- Islamic Azad University, Guilan Branch

(Received: 08/23/2015, Accepted: 09/19/2015)

Abstract

In this paper, the plastic deformation of clamped rectangular steel plates is investigated both experimentally and numerically using gases mixture detonation approach. In the experimental tests, the steel plates with various thicknesses were deformed under shock wave effect caused by high velocity rate explosion. Also, the pressure of gases mixture detonation was measured after detonation by piezoelectric pressure transducer. The experimental results related to effect of parameter such as the percentage of gas mixture, plate thickness and boundary condition on longitudinal, transverse and diagonal strain distribution were presented. The numerical simulation is carried out using the finite element analysis software ABAQUS/Explicit. To validate the numerical simulation, the obtained results of simulation were compared with experimental ones. This comparison demonstrates that the numerical results have significant compatibility with experimental results. In general, all data is in the reliable range. Hence, utilizing the mentioned numerical model is appropriate for predicting the deformation profile and also the midpoint deflection of rectangular steel plate.

Keywords: Gases Mixture Detonation Forming, Plastic Deformation, Numerical Simulation, Clamped Rectangular Plate.

۱- مقدمه

در جدیدترین تحقیقات انجام شده، علی‌طاولی و همکارانش به بررسی شکل‌دهی مخروطی ورق‌های فلزی دایروی به روش انفجار مخلوط گازها پرداختند. در این تحقیق شیوه جدیدی برای شکل‌دهی ورق‌های فلزی به روش انفجار مخلوط گازها ارائه شد که در آن ورق فلزی تحت اثر شوک فشار ناشی از انفجار با سرعت بالا تغییر شکل پلاستیک پیدا کرد. سامانه شکل‌دهی مشتمل بر مخزن استوانه‌ای شکل جدار ضخیم و قالب‌های شکل‌دهی بود. در این روش، شکل‌دهی بدون نیاز به سمبه انجام شد. نتایج تجربی مربوط به اثر پارامترهایی نظیر درصد مخلوط گاز، ضخامت ورق، شرایط مرزی و جنس ورق بر توزیع کرنش محیطی و کرنش ضخامت، ارائه شد. همچنین مدلی تحلیلی بر اساس محاسبه کار پلاستیک، برای تغییر شکل ورق پیشنهاد شده است [۲۲].

در میان روش‌های شکل‌دهی نام برده شده، شکل‌دهی با استفاده از انفجار مخلوط گازها روشی بسیار نوین، ساده، ایمن و سودمند است. شایان‌ذکر است که این روش شکل‌دهی با استفاده از دو یا چند گاز صورت می‌گیرد. مزیت اصلی این روش شکل‌دهی، تمیزی قطعه تولیدی، اختلاط سریع و همچنین کنترل فرآیند است. در این فرآیند انرژی بسیار زیادی مشابه با فرآیندهای شکل‌دهی به وسیله خرج انفجاری تولید می‌شود با این تفاوت که سامانه به‌کاررفته در این فرآیند بسیار ساده و ایمن تر است. انرژی آزادشده در این فرآیند با استفاده از نسبت حجمی گازهای بکار رفته قابل کنترل است. در طول فرآیند انفجار مخلوط گازها، فشار احتراق منجر به تولید موج شوک می‌شود که نتیجه به‌دست‌آمده مشابه با امواج شوک در فرآیندهای انفجاری با خرج است. به طور کلی نوآوری مقاله ارائه شده نسبت به سایر کارهای انجام شده مربوط به شکل‌دهی ورق‌های مستطیلی است که بر اساس جستجوی نگارندگان، تاکنون پژوهشی در زمینه فرآیند ورق‌های مستطیلی به روش مخلوط گازها ارائه نشده است. در این مقاله روش شکل‌دهی با نرخ انرژی بالا از نوع انفجار مخلوط گازها به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش عددی، با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS/Explicit به شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی پرداخته شده و صحت‌گذاری مدل با استفاده از نتایج تجربی انجام گرفته است.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مکانیزم شکل‌دهی

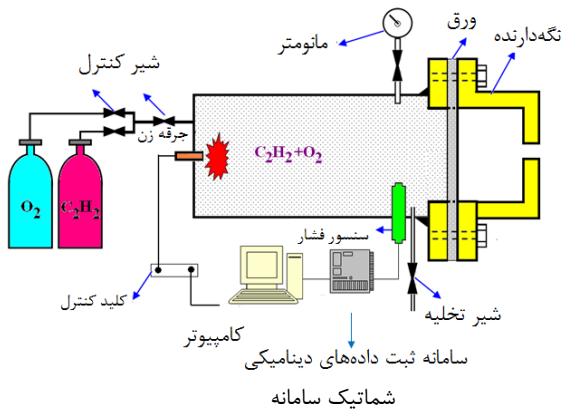
آزمایش‌ها در یک محفظه احتراق از جنس فولاد ضد زنگ با قطر داخلی ۱۲۰ میلی‌متر، قطر خارجی ۲۰۰ میلی‌متر و طول ۵۳۰ میلی‌متر انجام شده است. محفظه احتراق شامل سیستم اندازه‌گیری فشار، شیر کنترل گاز و سیستم جرقه زن است. شایان‌ذکر است که در انتهای محفظه، نمونه آزمایشی قرار داده می‌شود. جهت شکل‌دهی ورق‌های چهارگوش، یک حوضچه مستطیلی با ابعاد ۲۰۵ میلی‌متر در ۲۵۰ میلی‌متر به نگره‌دارنده عقبی با ابعاد ۳۹۰ میلی‌متر در ۳۴۵

یکی از موارد بسیار مهم در فرآیند شکل‌دهی فلزات، تأمین منابع انرژی با هزینه پایین است. به‌طور کلی روش‌های شکل‌دهی به دو دسته روش شکل‌دهی با نرخ انرژی بالا و پایین تقسیم می‌شوند [۱]. جدیدترین تحقیقات انجام شده در زمینه شکل‌دهی سرعت پایین مربوط به استفاده از سامانه چکش پرتابه‌ای برای شکل‌دهی ورق‌های دایروی و مستطیلی تحت بارگذاری هیدرودینامیکی است [۲ و ۳]. در این تحقیقات با استفاده از روش انرژی و روش لولای پلاستیک روابطی تحلیلی برای حداکثر خیز مرکز ورق ارائه شده است. در تحقیقاتی دیگر به بررسی تجربی، تحلیلی و مدل‌سازی ریاضی خواص مکانیکی پودر آلومینیوم خالص و پودر ترکیبی آلومینیوم با سرامیک تحت بارگذاری ضربه‌ای توسط چکش پرتابه‌ای پرداخته شد [۴ و ۵]. روش‌های شکل‌دهی با سرعت بالا شامل، شکل‌دهی با خرج انفجاری [۹-۱۶]، انفجار مخلوط گازها [۱۰-۱۲]، الکترومغناطیسی [۱۳] و الکتروهیدرولیکی [۱۴] است. با توجه به مزایا و معایب که در روش‌های شکل‌دهی ذکر شده وجود دارد، اما روش‌های شکل‌دهی با سرعت بالا به دلیل کوتاه بودن زمان تولید، هزینه پایین فرآیند و همچنین تولید قطعات پیچیده در یک مرحله همواره مورد توجه محققین بوده است. در این روش، در زمان بسیار کوتاه، انرژی زیادی آزادشده و قطعه به سرعت و شتاب بالایی می‌رسد. این عمل باعث می‌شود تا به قطعه فشار زیادی وارد شود.

بیشترین تحقیقات انجام شده در زمینه شکل‌دهی انفجاری، در خصوص شکل‌دهی ورق‌های دایروی به دلیل تقارن محوری بوده و تحقیقات انجام شده در مورد ورق‌های مستطیلی بسیار محدود است. در سال ۱۹۵۹ مقاله‌ای از تاردیف منتشر شد که برای اولین بار از شکل‌دهی انفجاری برای تولید مخروط از ورق‌های دایره‌ای استفاده نمود [۱۵]. مویل و موریسون در سال ۱۹۶۰، به بررسی سرعت انفجار و نسبت فشار نهایی به اولیه در فرآیند انفجاری مخلوط هیدروژن و اکسیژن پرداختند [۱۶]. همچنین بولینگر، محاسبات ترمودینامیکی حاکم بر انفجار مخلوط هیدروژن و اکسیژن برای فشارهای اولیه مختلف، مورد بررسی قرار داد [۱۷]. جونز، نوریک و همکارانشان با بکار بردن سامانه پاندول بالستیک به بررسی تغییر شکل پلاستیک ورق‌های دایروی، مستطیلی و همچنین محاسبه ایمپالس در فرآیندهای شکل‌دهی پرداختند [۲۰-۱۸]. بیسادی و میبیدی مقاله‌ای تحت عنوان فرآیند شکل‌دهی فلزات به کمک انفجار مخلوط گاز ارائه کردند که در آن انرژی حاصل از انفجار ماده منفجره، عامل شکل‌دهی ورق‌های فلزی بود. 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 مؤثر بر شکل‌دهی، مورد بحث قرار گرفته که در این خصوص شرایط مطلوب با مخلوط ۳۰ درصد اکسیژن و ۷۰ درصد هیدروژن حاصل شده است. سپس با استفاده نرم افزار المان محدود به شبیه‌سازی این فرآیند پرداخته و برای اعتبار سنجی نرم‌افزار، نتایج حاصل با کار عملی مقایسه گردیده است [۲۱].



تصویر سامانه



شکل ۱- تصویر و شماتیک سامانه انفجار مخلوط گازها.

میلی متر جوش شده است. شایان ذکر است که این قسمت از سامانه با ۸ پیچ به سیلندر متصل شده است. نمونه ورق های مورد آزمایش از جنس فولاد نرم در ضخامت‌های متفاوت ۱، ۲ و ۳ میلی‌متر است. در ابتدا نمونه ورق ها به صورت مستطیلی در ابعاد ۳۹۰ میلی‌متر در ۳۴۵ میلی‌متر برش زده شده‌اند. ورق های برش خورده جهت نصب در نگه دارنده‌های جلویی و عقبی و همچنین مهار آن، سوراخ کاری شده‌اند. ورق های فلزی بین دو نگه دارنده عقبی و جلویی به ضخامت ۳۰ میلی‌متر قرار داده می‌شود. با توجه به شرایط مسئله، نگه دارنده‌ها دارای سوراخی با ابعاد ۲۰۵ میلی‌متر در ۲۵۰ میلی‌متر هستند که جهت اعمال بار انفجاری روی ورق تعبیه شده‌اند. شکل (۱) تصویر سامانه استفاده شده در این مقاله را نشان می‌دهد.

مطابق شکل ارائه شده، در میانه و انتهای سیلندر، سوراخ‌هایی جهت نصب سنسورهای فشار تعبیه شده است. شایان ذکر است که سنسور فشار استفاده شده به شکل استوانه‌ای، قطر ۱۶ و ارتفاع ۳۳ میلی‌متر است که قابلیت کار در محیط سیال و گاز را دارد. جداره این سنسور دارای رزوه‌ای است که برای استفاده باید جداره سیلندر را قلاویز کرد و این سنسور را در آن قسمت قرار داد.

جدول ۱- اطلاعات سیستم‌های اندازه‌گیری.

سیستم اندازه‌گیری	مدل	دمای کاری (درجه سلسیوس)	شرکت سازنده	وزن (کیلوگرم)	ابعاد
سنسور فشار	CY-YD-214	۴۰ تا ۱۵۰	SINOCERA	۰/۰۲	-
دیتالاگر	YE6233	۵۵ تا ۸۵	SINOCERA	۰/۵	۱۶۰×۲۶×۱۳۲
آمپلی فایر	YE5858	۵۵ تا ۸۵	SINOCERA	۱/۵	۲۰۰×۱۳۳×۷۰

۲-۲- خواص مکانیکی ماده

خواص مکانیکی مواد مورد استفاده در این مجموعه آزمایش‌ها از انجام آزمون کشش تک محوری روی نمونه‌های آماده‌شده از ورق‌هایی با جنس فولاد نرم تعیین شده است. برای بررسی همگنی خواص مواد، از هر ورق در سه راستای مختلف افقی، عمودی و اریب (۴۵ درجه) نمونه‌هایی را با دستگاه وایر کات برش زده و سپس تحت آزمایش کشش با شرایط کاملاً یکسان قرار داده شده که در شکل (۳) آورده شده است. شایان ذکر است که آزمون کشش بر روی ورق‌های بریده شده برای تعیین نمودار تنش- کرنش مطابق با استاندارد ASTM-E8 صورت گرفته است.

در این سری از آزمایش‌ها، با انفجار مخلوط گازهای اکسیژن و استیلن موج شوک تولید شده و در طول محفظه حرکت می‌کند تا به ورق فلزی برسد. در فرآیند شکل‌دهی با سرعت بالا، فرضیات مسئله بدین صورت است که انرژی تولید شده از انفجار مخلوط گازها به کار پلاستیک و انرژی جنبشی تبدیل می‌شود. مخلوط گاز با استفاده از سیستم فندک و شمع منفجر می‌شود. قبل از انفجار، فشار ورودی مخلوط گاز با استفاده از مانومتر اندازه‌گیری می‌شود. لازم به ذکر است که فشار پس از انفجار با استفاده از سنسور فشار پیزو الکتریکی در داخل سیستم ثبت داده‌های دینامیکی با فرکانس بالا جمع‌آوری می‌شود. همچنین جهت تقویت سیگنال‌های دریافتی، از یک تقویت‌کننده یا آمپلی فایر استفاده شده است. حساسیت سیستم بکار رفته برابر با ۱ مگاهرتز بوده و ثبت داده‌ها هر ۰/۳ میکروثانیه انجام گرفته است. با این وجود، موج فشار در میکروثانیه اندازه‌گیری شده است.

در شکل (۲) تصاویری از سیستم اندازه‌گیری بکار رفته نمایش داده شده است. همچنین اطلاعات سیستم‌های اندازه‌گیری استفاده شده در آزمایش‌ها در جدول (۱) آورده شده است.

برای تعیین تنش تسلیم استاتیکی و تنش نهایی استاتیکی، از هر ضخامت، دو نمونه آزمایشگاهی تهیه شده است. بنابراین جمعاً شش آزمون کشش محوری انجام پذیرفته است. در انجام آزمایش، نمونه‌ها با دو سرعت ۲ و ۵ (دقیقه / میلی‌متر) تحت کشش قرار گرفتند. شباهت تقریبی منحنی‌های تنش و کرنش استخراج شده از آزمون کشش تک‌محوری در سه راستای مختلف نشان می‌دهد که می‌توان ماده را ایزوتروپیک فرض کرد. مقادیر تنش نهایی و تنش تسلیم برای فولاد نرم در جدول (۲) درج شده است.



سنسور فشار پیزوالکتریکی



سامانه ثبت داده‌های دینامیکی (دیتا لاگر)

جدول ۲- خواص مکانیکی مواد.

ماده	ضخامت ورق (mm)	تنش تسلیم (MPa)	میانگین تنش نهایی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون
فولاد	۳, ۲, ۱	۲۸۹	۴۷۶	۲۱۰	۰/۳

۳-۲- نتایج آزمایش‌ها

نتایج ارائه شده در این بخش شامل اندازه‌گیری حداکثر خیز مرکز ورق، کرنش‌های طولی، عرضی و قطری آزمایش‌های انجام گرفته، است.

۲-۳-۱- اندازه‌گیری حداکثر خیز مرکز ورق

در جدول (۳) کلیه مشخصات و نتایج آزمایش‌های انجام شده روی ورق‌های فولادی آمده است. نتایج به دست آمده در مجموعه آزمایش‌ها، بیانگر پاسخ و رفتار مکانیکی ورق‌هایی از جنس فولادی تحت بار حاصل از انفجار مخلوط گازها است که در آن اثر تغییرات ضخامت ورق و همچنین تغییرات مقدار بار یا به عبارتی افزایش انرژی انتقالی به ورق و به تبع آن تغییر نرخ سرعت تغییر شکل بررسی شده است. در شکل (۴) نمونه‌ای از تغییر شکل پلاستیک ورق‌های مستطیلی تحت بار حاصل از انفجار مخلوط گازها نشان داده شده است. در تصاویر نشان داده شده هیچ‌گونه آثار تخریب ناشی از بارگذاری دیده نمی‌شود.

در شکل (۵) نمودار فشار- زمان برای چند نمونه آزمایشی نشان داده شده است. از نمودار ارائه شده مشخص است، با توجه به اینکه فرآیند انجام گرفته از دسته فرآیندهای شکل دهی با سرعت بالا است، فشار حاصل انفجار از انفجار مخلوط گاز در بازه میلی‌ثانیه (اوج فشار) به ورق وارد می‌شود.

۲-۳-۲- اندازه‌گیری کرنش‌ها

کرنش‌ها در ورق‌هایی که تغییر شکل یافته‌اند، با اندازه‌گیری ابعاد هندسی ورق تعیین شده است بدین ترتیب که مطابق شکل ۶، قبل از انجام آزمایش، یک شبکه مستطیلی با ۱۱ مستطیل هم‌مرکز روی سطح ورق ترسیم شده است که برای ترسیم این شبکه از یک شابلون و یک قلم با نوک نازک ۰/۵ میلی‌متر و با جوهر مقاوم استفاده شده است. لازم به توضیح است که مستطیلی اول دارای ابعاد ۵۰ میلی‌متر



تقویت‌کننده یا آمپلی‌فایر

شکل ۲- سامانه‌های اندازه‌گیری بکار برده شده.

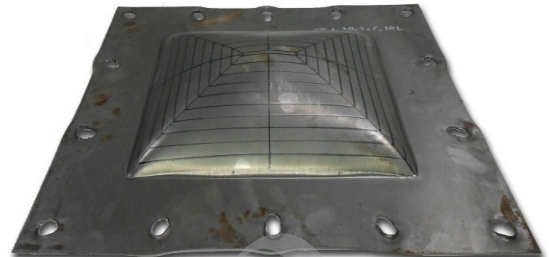


شکل ۳- نمونه ورق‌های برش خورده توسط دستگاه وایرکات.

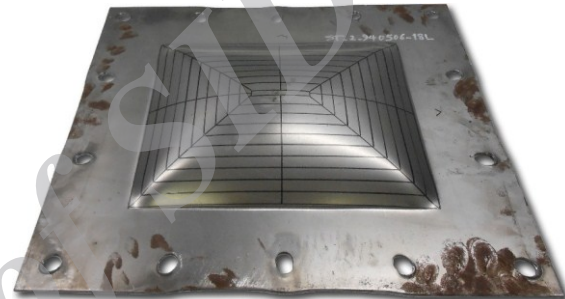
جدول ۳- نتایج آزمایش‌های تجربی.

شماره آزمایش	ضخامت ورق (mm)	فشار اکسیژن (Bar)	فشار استیلن (Bar)	ماکزیمم فشار (MPa)	خیز مرکز ورق (mm)
۱	۱	۰/۳	۰/۲	۴/۹۰	۲۴/۹
۲	۱	۰/۵	۰/۳	۸/۸۶	۳۹/۹۵
۳	۱	۰/۶	۰/۴	۱۰/۹۶	۴۴/۶
۴	۱	۰/۹	۰/۶	۱۳/۱۴	۵۵/۷۶
۵	۱	۱/۳	۰/۷	۱۴/۰۸	۵۶/۳
۶	۲	۱	۱	۱۲/۱۲	۳۲/۴
۷	۲	۱/۲۵	۱	۱۵/۶۲	۲۶/۸
۸	۲	۱/۵	۱	۱۸/۸۳	۳۸/۲
۹	۲	۱/۵	۱/۵	۲۶/۷۹	۴۳
۱۰	۲	۲	۱/۵	۲۹/۸۹	۴۵/۶
۱۱	۲	۲/۲	۱/۸	۳۲/۴۲	۴۸/۱
۱۲	۳	۱/۵	۱	۲۴/۳۰	۲۷/۸
۱۳	۳	۲	۱	۳۲/۸۱	۳۸/۳
۱۴	۳	۲	۱/۵	۳۴/۲۶	۳۹/۴
۱۵	۳	۲	۱/۸	۳۷/۳۱	۴۲/۶
۱۶	۳	۲/۲	۱/۸	۳۸/۷۹	۴۳/۷

در ۵ میلی‌متر و فاصله هر مستطیل از یکدیگر ۱۰ میلی‌متر است. شایان ذکر است پس از تغییر شکل ورق، طول و عرض شبکه مستطیل و همچنین لولای پلاستیک قطری در محل ترسیم مستطیل‌ها توسط یک کولیس دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. در شکل (۶) تصویر نمونه‌ای از ورق‌های آماده شده قبل از انجام آزمایش نمایش داده شده است.



ورق‌های فولادی ۱ میلی‌متر

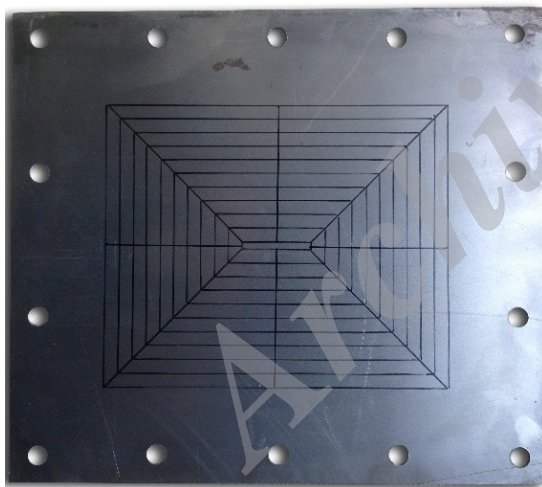


ورق‌های فولادی ۲ میلی‌متر



ورق‌های فولادی ۳ میلی‌متر

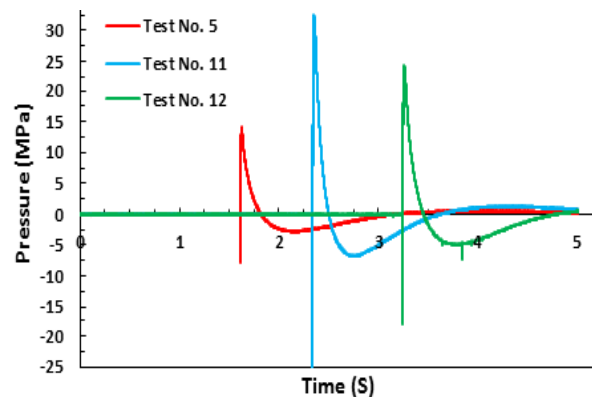
شکل ۴- نمونه ورق‌های تغییر شکل یافته.



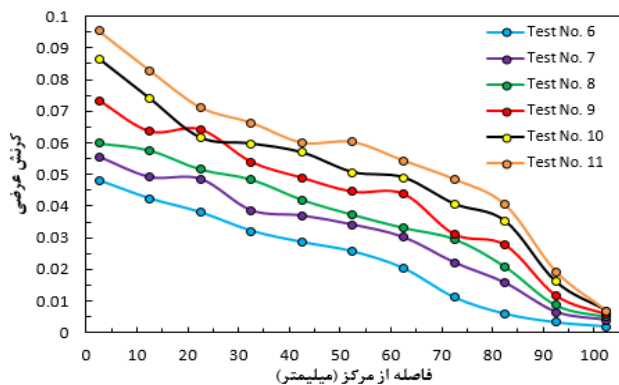
شکل ۶- تصویر نمونه‌ای از ورق‌های آماده‌شده قبل از انجام آزمایش.

نمودار توزیع کرنش‌های طولی، عرضی و قطری برحسب تغییرات فاصله از مرکز ورق برای ورق‌های فولادی با ضخامت‌های مختلف در شکل‌های (۷) تا (۱۵) نمایش داده شده است. شایان ذکر است که مقادیر کرنش از رابطه (۱) به راحتی قابل محاسبه است که در آن L_0 و L به ترتیب طول ناحیه مورد نظر قبل و بعد از تغییر شکل است.

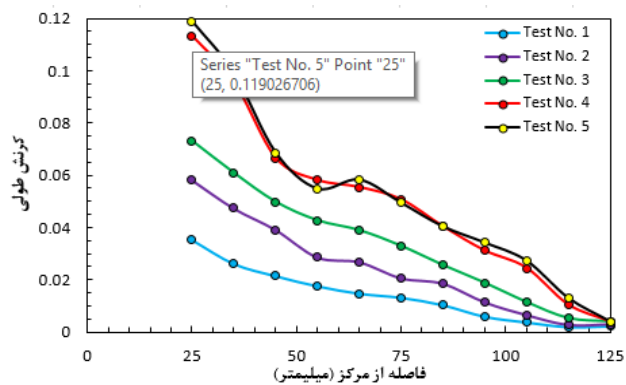
$$\varepsilon = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) \quad (1)$$



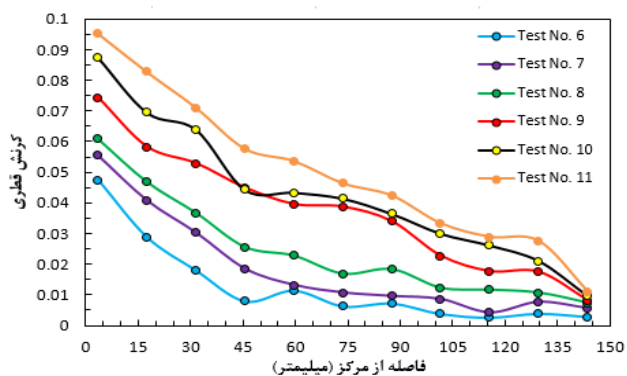
شکل ۵- نمونه‌هایی از نمودار فشار- زمان ثبت شده.



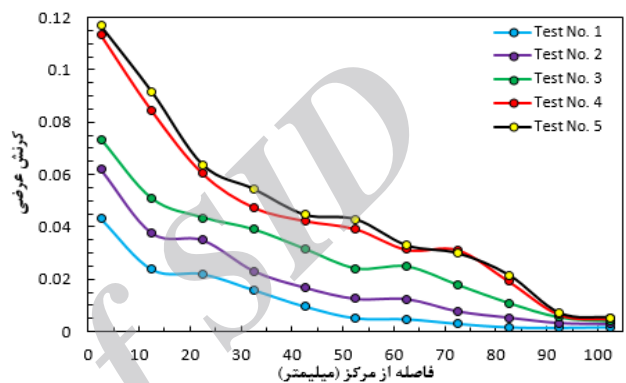
شکل ۱۱- مقادیر کرنش عرضی در ورق‌های فولادی با ضخامت ۲ میلی‌متر.



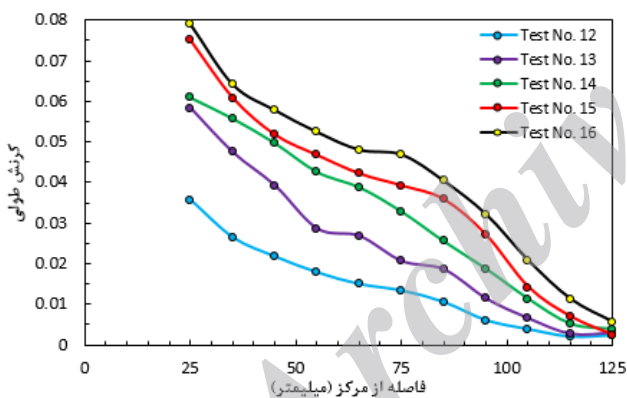
شکل ۷- مقادیر کرنش طولی در ورق‌های فولادی با ضخامت ۱ میلی‌متر.



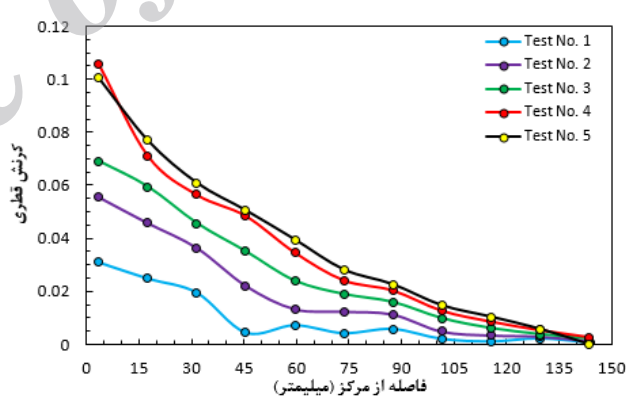
شکل ۱۲- مقادیر کرنش قطری در ورق‌های فولادی با ضخامت ۲ میلی‌متر.



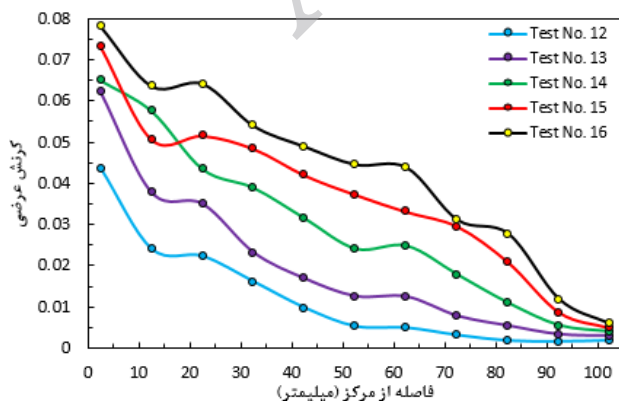
شکل ۸- مقادیر کرنش عرضی در ورق‌های فولادی با ضخامت ۱ میلی‌متر.



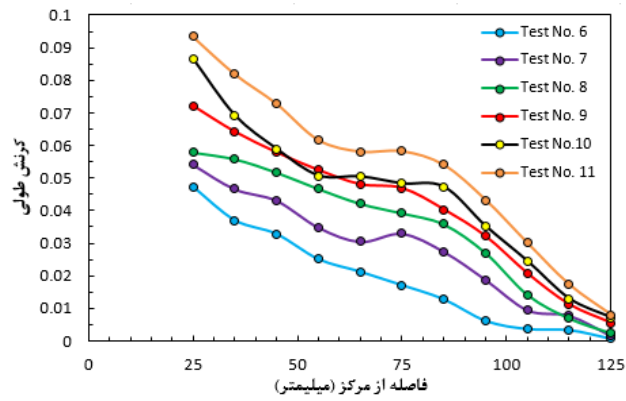
شکل ۱۳- مقادیر کرنش طولی در ورق‌های فولادی با ضخامت ۳ میلی‌متر.



شکل ۹- مقادیر کرنش قطری در ورق‌های فولادی با ضخامت ۱ میلی‌متر.



شکل ۱۴- مقادیر کرنش عرضی در ورق‌های فولادی با ضخامت ۳ میلی‌متر.



شکل ۱۰- مقادیر کرنش طولی در ورق‌های فولادی با ضخامت ۲ میلی‌متر.

شبکه بندی مناسب و مش زدن صحیح مدل در تحلیل مسائل با استفاده از روش اجزا محدود از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به سه‌بعدی بودن مسئله، برای شبکه بندی مدل از المان Solid هشت گرهی (C3D8) و در هر المان از یک نقطه انتگرال‌گیری استفاده شده است. روش تحلیل، دینامیکی صریح و بارگذاری اعمالی با استفاده از نمودارهای فشار- زمان به‌دست‌آمده از سنسور فشار یا همان نتایج تجربی صورت گرفته است.

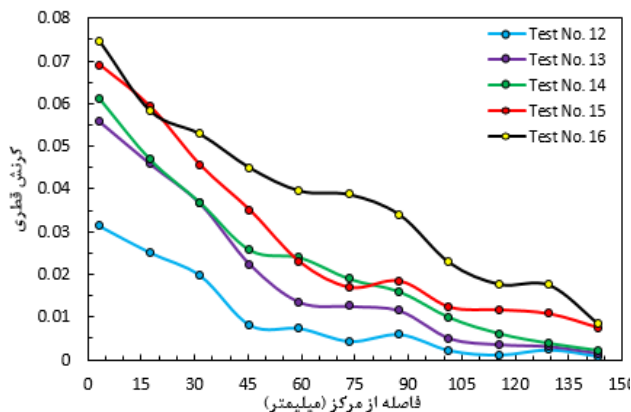
۲-۳- نتایج شبیه‌سازی عددی

در جدول (۴)، مقادیر خیز مرکز ورق به‌دست‌آمده از مدل‌های شبیه‌سازی‌شده با نتایج تجربی متناظر آن‌ها، مقایسه شده‌اند. همچنین در شکل (۱۷) نمونه‌هایی از شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، نمایش داده شده است.

جدول ۴- مقایسه نتایج عددی و تجربی خیز مرکز ورق فولادی.

شماره آزمایش	ضخامت ورق (mm)	خیز مرکز ورق تجربی (mm)	خیز مرکز ورق عددی (mm)	درصد خطا %
۱	۱	۲۴/۹	۲۵/۶۳	۲/۹۳
۲	۱	۳۹/۹۵	۴۰/۸۷	۲/۳
۳	۱	۴۴/۶	۴۵/۹۸	۳/۰۹
۴	۱	۵۵/۷۶	۵۷/۵۴	۳/۱۹
۵	۱	۵۶/۳	۵۷/۸۱	۲/۶۸
۶	۲	۳۲/۴	۳۱/۸۶	۱/۶۷
۷	۲	۳۶/۸	۳۷/۴۹	۱/۸۸
۸	۲	۳۸/۲	۳۹/۴۱	۳/۱۷
۹	۲	۴۳	۴۲/۳۴	۱/۵۳
۱۰	۲	۴۵/۶	۴۷/۰۳	۳/۱۴
۱۱	۲	۴۸/۱	۴۶/۷۴	۲/۸۳
۱۲	۳	۲۷/۸	۲۶/۱۶	۵/۹۰
۱۳	۳	۳۸/۳	۳۹/۸۷	۴/۱۰
۱۴	۳	۳۹/۴	۳۷/۱۲	۵/۷۹
۱۵	۳	۴۲/۶	۴۴/۱۱	۳/۵۴
۱۶	۳	۴۳/۷	۴۲/۸۴	۱/۹۷

برای ارزیابی بیشتر دقت شبیه‌سازی انجام‌شده در ابتدا در شکل (۱۸)، نمودار نتایج شبیه‌سازی و تجربی نسبت خیز مرکز ورق به ضخامت برای ورق‌های فولادی مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱۵- مقادیر کرنش قطری در ورق‌های فولادی با ضخامت ۳ میلی‌متر.

مقایسه این نمودارها نشان می‌دهد که مقادیر کرنش‌ها به طور قابل‌ملاحظه‌ای تحت تأثیر ضخامت ورق و مقدار انرژی ورودی هستند. با افزایش فاصله از مرکز این مقادیر کاهش و در ناحیه لبه گیردار به کمترین مقدار خود می‌رسند. آهنگ توزیع هر یک از کرنش‌ها، برحسب فاصله تحت تأثیر ضخامت و مقدار انرژی وارده نبوده و شکل نمودار آن‌ها با تغییر هر یک از این پارامترها تقریباً ثابت می‌ماند به عبارت دیگر، روند تغییرات کرنش در تمامی نمودارهای ارائه شده یکسان است.

۳- شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار المان محدود ABAQUS

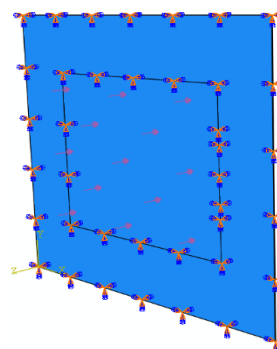
۳-۱- مدل‌سازی

برای شبیه‌سازی فرآیند از ABAQUS/EXPLICIT استفاده شده است. با توجه به متقارن بودن مسئله، برای تعریف هندسه قطعات و به منظور کاهش زمان حل و نیز شبیه‌سازی ورق، می‌توان یک چهارم مسئله را مدل‌سازی نمود، اما برای مشاهده تخریب‌های به وجود آمده در ورق بهتر است مدل را به صورت کامل شبیه‌سازی نمود. در مدل‌سازی، ورق به عنوان یک قطعه تغییر شکل‌پذیر در نظر گرفته می‌شود. مدل هندسی اولیه ورق به صورت سه‌بعدی ترسیم شده است که ماهیت آن به صورت Solid از نوع Extrude و همچنین برای مدل‌سازی نگه‌دارنده، یک قطعه سه‌بعدی از نوع تغییر شکل‌ناپذیر صلب لحاظ شده است. ابعاد ورق مدل شده ۳۴۵×۳۹۰ میلی‌متر مربع و خط‌چین‌های تولیدشده در قسمت میانی ورق به منظور ایجاد شرایط مرزی کاملاً گیردار به ابعاد ۲۰۵×۲۵۰ میلی‌متر مربع است که در شکل (۱۶) نشان داده شده است.

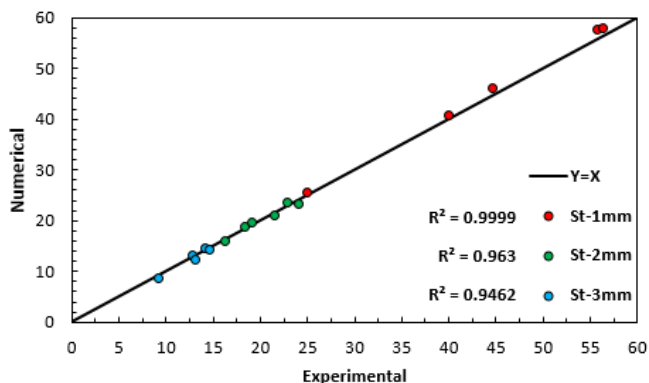
برای تحلیل و تعیین خروجی‌های مورد نظر از اهداف تغییر شکل‌پذیر باید خصوصیات ماده تشکیل‌دهنده آن‌ها را تعریف نمود. ویژگی‌های الاستیک ماده تنها با تعیین مقدار مدول الاستیسیته و ضریب پواسون مشخص می‌شود. در جدول (۲) این مقادیر برای دو نوع مختلف مواد درج شده است. همچنین برای تعیین ویژگی‌های پلاستیک ماده، از تبدیل نمودار تنش و کرنش مهندسی ماده به نمودار تنش و کرنش حقیقی استفاده شده است.

جدول ۵- خطای هر یک از مدل‌ها ارائه شده.

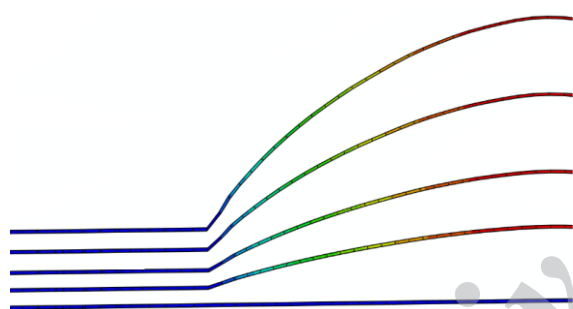
R ²	نوع آزمایش
۰/۹۹۹۹	ورق فولادی با ضخامت ۱ میلی‌متر
۰/۹۶۳۰	ورق فولادی با ضخامت ۲ میلی‌متر
۰/۹۴۶۲	ورق فولادی با ضخامت ۳ میلی‌متر



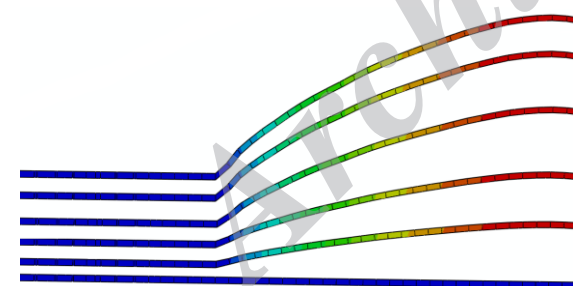
شکل ۱۶- مدل سازی و اعمال شرط مرزی.



شکل ۱۸- مقایسه نتایج تجربی و عددی نسبت خیز مرکز ورق به ضخامت ورق فولادی.



ورق‌های فولادی ۱ میلی‌متر

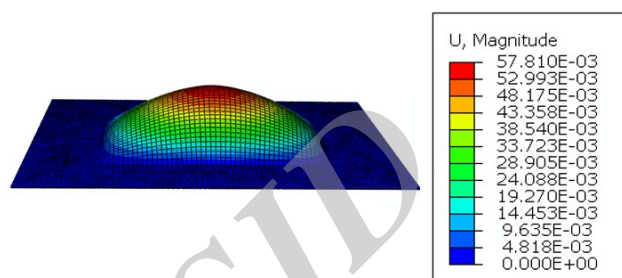


ورق‌های فولادی ۲ میلی‌متر

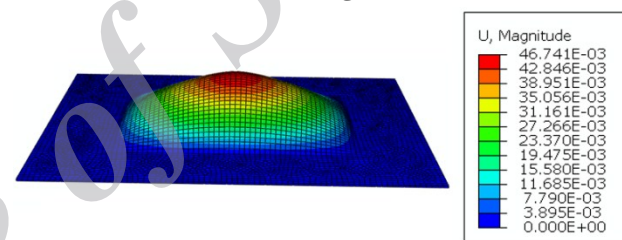
شکل ۱۹- پروفیل تغییر شکل ورق فولادی بر اساس مدل شبیه‌سازی شده.

۴- نتیجه‌گیری

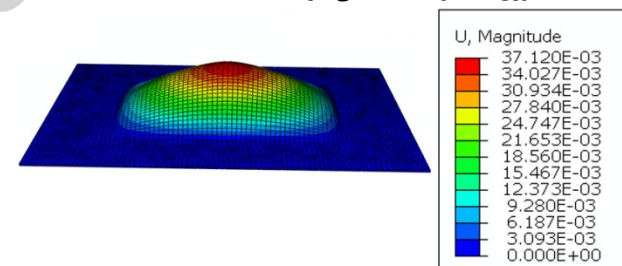
در این پژوهش به بررسی تغییر شکل پلاستیک سرعت بالای ورق‌های مستطیلی با روش انفجار مخلوط گازها پرداخته شد. روش شکل‌دهی بدین گونه است که گازهای اکسیژن و استیلن با درصد‌های حجمی متفاوت با یکدیگر مخلوط شده و با استفاده از یک جرقه زن، عمل احتراق انجام گرفت. سامانه شکل‌دهی به‌کاربرده شده شامل مخزن استوانه‌ای شکل جدار ضخیم، قالب‌های شکل‌دهی و متعلقات لازم برای اندازه‌گیری فشار است. یکی از مزیت‌های این



ورق‌های فولادی ۱ میلی‌متر



ورق‌های فولادی ۲ میلی‌متر



ورق‌های فولادی ۳ میلی‌متر

شکل ۱۷- نمونه‌ای از تغییر شکل ورق فولادی بر اساس مدل شبیه‌سازی شده.

در جدول (۵) ضریب تبیین مربوط به هر دسته از آزمایش‌ها درج شده است که از آن می‌توان نتیجه گرفت که مدل ایجاد شده دارای خطای قابل قبولی نسبت به مقادیر تجربی است.

در ادامه پروفیل تغییر شکل مدل شبیه‌سازی شده به ازای زمان‌های مختلف فرآیند تغییر شکل ورق در شکل (۱۹) نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، توزیع بار، تأثیر فراوانی بر تغییر شکل از بدو شروع حرکت ورق تا رسیدن به شکل نهایی دارد.

- [5] Alitavoli, M.; Babaei, H.; Mahmoudi, A.; Golbaf, A.; Mirzababaie Mostofi, T. "Experimental and Analytical Study of Effective Factors on Compaction Process of Aluminium Powder under the Impact Load by Low Speed"; *Journal of Modares Mechanical Engineering* 2015, 15, 22-30 (In Persian).
- [6] Babaei, H.; Darvizeh, A. "Analytical Study of Plastic Deformation of Clamped Circular Plates Subjected to Impulsive Loading"; *J. Mech. Mater. Struct.* 2012, 7, 309-322.
- [7] Gharababaei, H.; Darvizeh, A.; Darvizeh, M. "Analytical and Experimental Studies for Deformation of Circular Plates Subjected to Blast Loading"; *J. Mech. Sci. Technol.* 2010, 24, 1855-1864.
- [8] Babaei, H.; Darvizeh, A. "Investigation in to the Response of Fully Clamped Circular Steel, Copper and Aluminum Plates Subjected to Shock Loading"; *Mech. Based Des. Struc.* 2011, 39, 507-526.
- [9] Gharababaei, H.; Darvizeh, A. "Experimental and Analytical Investigation of Large Deformation of Thin Circular Plates Subjected to Localized and Uniform Impulsive Loading"; *Mech. Based Des. Struc.* 2011, 38, 1539-7734.
- [10] Honda, A.; Suzuki, M. "Sheet Metal Forming by Using Gas Imploding Detonation"; *J. Mater. Process. Tech.* 1999, 85, 198-203.
- [11] Cezary, S.; Bojar, Z. "Gas Detonation Spray Forming of Fe-Al Coatings in the Presence of Interlayer"; *Surf. Coat. Tech.* 2008, 202, 3538-3548.
- [12] Yasar, M. "Gas Detonation Forming Process and Modeling for Efficient Spring-Back Prediction"; *J. Mater. Process. Tech.* 2004, 150, 270-279.
- [13] Li, F.; Mo, J.; Zhou, H.; Fang, Y. "3D Numerical Simulation Method of Electromagnetic Forming for Low Conductive Metals with a Driver"; *Int. J. Adv. Manuf. Tech.* 2013, 64, 1575-1585.
- [14] Gillard, A. J.; Golovashchenko, S. F.; Mamutov, A. V. "Effect of Quasi-Static Prestrain on the Formability of Dual Phase Steels in Electrohydraulic Forming"; *J. Manuf. Process* 2013, 15, 201-218.
- [15] Tardif, H. P. "Explosive Forming of Cones by Metal Gathering"; *Metal Progress* 1959, 76, 84.
- [16] Morton, P. M.; Morrison, R. "Detonation Characteristics of Hydrogen-Oxygen Mixtures"; *A.I.Ch.E J.* 1960, 6, 92-96.
- [17] Bollinger, L. E.; Edse, R. "Thermodynamics Calculation of Hydrogen-Oxygen Detonation Parameters for Various Initial Pressure"; *Am. Rocket Soc. J. Feb.* 1961.
- [18] Nurick, G. N.; Martin, J. B. "Deformation of Thin Plates Subjected to Impulsive Loading a Review. Part I: Theoretical Consideration"; *Int. J. Impact. Eng.* 1989, 8, 171-186.
- [19] Nurick, G. N.; Martin, J. B. "Deformation of Thin Plates Subjected to Impulsive Loading a Review. Part II: Experimental Studies"; *Int. J. Impact. Eng.* 1989, 8, 159-170.
- [20] Jones, N. "A Theoretical Study of the Dynamic Plastic Behavior of Beams and Plates with Finite-Deflections"; *Int. J. Solids. Struct.* 1971, 7, 1007-1029.
- [21] Bisadi, H.; Meybodi, M. K. "Experimental, Numerical, and Theoretical Analyses of Simultaneous Forming-Welding of Inhomogeneous Plates"; *Proc. IMechE, Part C: J. Mechanical Engineering Science* 2011, 225, 2552-2564.

[۲۲] علی‌طاوولی، مجید، درویزه، ابوالفضل، پاشایی، علی اصغر، یوسفی مقدم، رحمان "شکل دهی مخروطی ورقهای فلزی به روش انفجار مخلوط گازها"، *مجله علمی پژوهشی مکانیک مدرس*، سال نهم، شماره ۳۷، صفحه ۱۵، ۱۳۸۸.

روش عدم استفاده از سنبه جهت شکل دهی ورق است که می‌توان ورق‌های با ضخامت اولیه مختلف را به شکل‌های متنوعی برای کاربردهای مختلف مهندسی تبدیل کرد. در بخش تجربی نتایج حاصل از میزان گاز مصرفی، حداکثر خیز مرکز ورق و همچنین توزیع کرنش‌های طولی، عرضی و قطری برای ورق‌های فولادی با ضخامت‌های ۱، ۲ و ۳ میلی متر ارائه شد. به طور کلی، نتایج تجربی به دست آمده بیانگر رفتار مکانیکی ورق‌های مستطیلی تحت بار ایمپالسی است. لازم به ذکر است که نتایج تجربی به دست آمده درک بسیار خوبی از میزان خیز مرکز ورق و بار انفجاری اعمال شده با توجه به تغییر ضخامت ورق و درصد حجمی گازهای ورودی را نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر ارائه شده در جدول ۳، برای مثال در ورق‌های ۲ میلی‌متر در سه نمونه اول مقدار استیلین ثابت نگه داشته شده اما مقادیر اکسیژن افزایش می‌یابد. در نمونه دوم نسبت به نمونه اول، ۴/۴ میلی‌متر و در نمونه سوم ۵/۸ میلی‌متر افزایش خیز رخ داده است که نشان می‌دهد برای ۱ بار استیلین، ۲/۲۵ مناسبترین مقدار برای افزایش خیز است. با توجه به آزمایش‌های انجام شده به طور متوسط، برای ورق‌های ۱ میلی‌متر، افزایش ۴۲ درصدی فشار مخزن باعث افزایش ۲۴ درصد خیز ورق می‌شود. در ورق‌های ۲ میلی‌متر: افزایش ۱۵ درصدی فشار مخزن باعث افزایش ۸ درصد خیز ورق می‌شود. و همچنین برای ورق‌های ۳ میلی‌متر: افزایش ۲۱ درصدی فشار مخزن باعث افزایش ۱۳ درصد خیز ورق می‌شود. با مقایسه نمودارهای کرنش این نتیجه حاصل شد که مقادیر کرنش‌ها تحت تأثیر ضخامت ورق و مقدار انرژی ورودی هستند به طوری که با افزایش فاصله از مرکز این مقادیر کاهش و در ناحیه لبه گیردار به کمترین مقدار خود می‌رسند. آهنگ توزیع هر یک از کرنش‌ها، برحسب فاصله تحت تأثیر ضخامت و مقدار انرژی در تمامی نمودارهای ارائه شده یکسان است. همچنین در قسمت پایانی این پژوهش به شبیه‌سازی فرآیند با نرم‌افزار المان محدود آباکوس بر اساس نتایج تجربی پرداخته شد. با توجه به مقادیر خطای ارائه شده در جدول (۴) و (۵) نتایج مدل توافق بسیار خوبی با نتایج تجربی دارد.

مراجع

- [1] Mynors, D. J.; Zhang, B. "Applications and Capabilities of Explosive Forming"; *J. Mat. Proc. Tech.* 2002, 125, 0924-0136.
- [2] Babaei, H.; Darvizeh, A.; Alitavoli, M.; Mirzababaie Mostofi, T. "Experimental and Analytical Investigation into Plastic Deformation of Circular Plates Subjected to Hydrodynamic Loading"; *Journal of Modares Mechanical Engineering* 2015, 15, 305-312 (In Persian).
- [3] Babaei, H.; Mirzababaie Mostofi, T.; Alitavoli, M. "Experimental Study and Analytical Modeling for Inelastic Response of Rectangular Plates under Hydrodynamic Loads"; *Journal of Modares Mechanical Engineering* 2015, 15, 361-368 (In Persian).
- [4] Babaei, H.; Mirzababaie Mostofi, T.; Alitavoli, M.; Namdari, M. "Experimental Investigation and a Model Presentation for Predicting the Behavior of Metal and Alumina Powder Compaction Under Impact Loading"; *Journal of Modares Mechanical Engineering* 2015, 15, 357-366 (In Persian).