

## بررسی تجربی و عددی تغییر شکل پلاستیک ورق‌های مستطیلی تحت

### بارگذاری هیدرودینامیکی

هاشم بابایی<sup>۱</sup>، توحید میرزابابای مستوفی<sup>۲</sup>، ابوالفضل درویزه<sup>۳</sup> و مجیدعلی طاولی<sup>۴</sup>

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه گیلان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۹/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۵/۱)

#### چکیده

استفاده روزافزون از امواج ضربه‌ای در صنعت، سبب رواج آزمایش و مدل‌سازی تحلیلی و عددی مختلف برای بررسی تأثیر امواج ضربه‌ای بر تغییر شکل فلزات شده است. در این مقاله به بررسی تجربی و عددی تغییر شکل پلاستیک ورق‌های مستطیلی گیردار فولادی و آلومینیومی تحت بارگذاری هیدرودینامیکی توسط سامانه چکش ضربه‌ای برای بیان خواص فلزات تحت اثر امواج ضربه‌ای پرداخته شده است. شبیه‌سازی المان محدود توسط نرم‌افزار تحلیلی ABAQUS/EXPLICIT انجام گرفته که به منظور اعتبارسنجی نتایج به دست آمده از آن، آزمایش‌هایی بر روی ورق‌های مستطیلی با ضخامت و سطوح انرژی متفاوت انجام شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که نتایج عددی با نتایج تجربی سازگاری قابل قبولی دارد، بنابراین استفاده از مدل عددی برای پیش‌بینی خیز مرکز ورق مستطیلی تحت بارگذاری هیدرودینامیکی مطلوب است.

**واژه‌های کلیدی:** تغییر شکل پلاستیک، بارگذاری هیدرودینامیکی، چکش ضربه‌ای، شبیه‌سازی عددی، ورق مستطیلی کاملاً گیردار

## Experimental and Numerical Investigation into Plastic Deformation of Rectangular Plates Subjected to Hydrodynamic Loading

H. Babaei, T. Mirzababaie Mostofi, A. Darvizeh and M. Alitavoli

Mechanical Engineering Department

Guilan University

(Received: 1/December/2014; Accepted: 23/July/2015)

#### ABSTRACT

Nowadays due to increasing industrial utilization of shock waves, it became popular to use analytical, numerical modeling and experimental tests to evaluate effect of shock waves on metal deformation. To explain this effect on metal properties, current paper considers both experimental and numerical plastic deformation of clamped rectangular steel and aluminum plates, under hydrodynamic loading of drop hammer system. To validate the explicit finite element simulation by solver ABAQUS, experimental test on rectangular plates with various thickness and energy levels have been performed. Obtained results by the numerical simulation are in a very good agreement with those in the experimental tests. Hence, it is desirable to utilize the numerical modeling to predict mid-point deflection of rectangular plate under hydrodynamic loading.

**Keywords:** Plastic Deformation, Hydrodynamic Loading, Drop Hammer, Numerical Simulation, Fully Clamped Rectangular Plate

۱- استادیار (نویسنده پاسخگو): ghababaei@guilan.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری: tmostofi@phd.guilan.ac.ir

۳- استاد: a.darvizeh@guilan.ac.ir

۴- دانشیار: tavoli@guilan.ac.ir

## ۱- مقدمه

روش‌های مختلف شکل‌دهی را می‌توان به دو روش کلی سنتی و غیرسنتی تقسیم کرد. روش‌های غیرسنتی، فرآیندهای شکل‌دهی فلزات در سرعت پایین، متوسط و بالا هستند. عمده‌ترین مزیت این روش‌ها، قابلیت آنها برای شکل‌دهی قطعات یک‌پارچه بسیار پیچیده، تنها در یک مرحله کاری است در حالی که، تولید چنین قطعاتی با روش‌های سنتی تولید، ممکن است در چند مرحله و به کمک چندین فرآیند جداگانه انجام شود تا در نهایت منجر به تولید یک سازه شکل‌دهی شده شود [۱-۲]. فاکتور متمایزکننده این نوع شکل‌دهی از روش‌های متداول، اندازه فشار و زمان اعمال آن است. فرآیند شکل‌دهی با سرعت بالا را می‌توان این‌گونه تعریف کرد که در زمان بسیار کوتاه، انرژی زیادی آزاد شده و به قطعه فشار زیادی وارد می‌شود. این فرآیند قطعه را در زمان کوتاهی به سرعت و شتاب بالایی می‌رساند. در بیشتر مواقع سرعت این فرآیند به ۲۰ متر بر ثانیه یا بالاتر می‌رسد. این روش معمولاً توسط خرج انفجاری صورت می‌پذیرد [۳-۴]. در فرآیند شکل‌دهی فلزات با سرعت پایین از یک جرم به‌عنوان ضربه زننده استفاده می‌شود که سرعتی حدود ۱۰ متر بر ثانیه دارد.

از مزایا و معایب دو روش فوق می‌توان به صدای ناهنجار، عدم دسترسی آسان به مواد منفجره و بروز حادثه در روش نرخ انرژی بالا و شکل‌پذیری محدود، شمار پایین تولید و ارزان و قابل دسترس بودن در روش نرخ انرژی پایین اشاره کرد [۵].

یکی از فرآیندهای کاربردی از مجموعه فرآیندهای شکل‌دهی، استفاده از دستگاه چکش ضربه‌ای برای شکل‌دهی ورق‌های فلزی است. در این فرآیند، با به‌کارگیری انرژی حاصل از منابعی که می‌تواند رهاسازی وزنه، انفجار مواد منفجره و... باشد، به ورق‌ها شکل داده می‌شود. به عبارت دیگر فشار ناشی از موج ضربه ایجاد شده، در یک فرآیند کنترل‌شده بر روی قطعه کار منتقل گشته و عمل شکل‌دهی صورت می‌گیرد. استفاده از سیال واسط این امکان را به کاربر می‌دهد که شکلی متقارن، توزیع یکنواخت فشار را داشته باشد [۶-۷].

یکی از تحقیقات انجام شده در زمینه شکل‌دهی ورق با استفاده از دستگاه چکش ضربه‌ای، مربوط به قسمتی از کار کیراک<sup>۱</sup> و همکارانش، تحت عنوان شبیه‌سازی اثر ویسکوپلاستیک سیالات در مقیاس بزرگ و شکست ورق‌های نازک تحت بارگذاری ضربه‌ای و انفجار است. در قسمت

شکل‌دهی با چکش ضربه‌ای از این تحقیق، به بررسی تغییر شکل پلاستیک ورق مسی با استفاده از موج فشار ایجاد شده در یک لوله آلومینیومی به طول ۱/۳ متری با قطر داخلی ۳۲ میلی‌متر توسط پیستون رهاسازده با سرعت اولیه ۲۲/۹۴ متر بر ثانیه و میانگین جرم بر واحد سطح ۷۴/۱ کیلوگرم بر مترمربع پرداخته شده است. لازم به ذکر است که لوله آلومینیومی موردنظر محتوی آب با چگالی ۱,۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در فشار اتمسفر ۱۰۱/۳ کیلوپاسکال است. در این شرایط سرعت صوت در آب حدوداً ۱۴۸۲ متر بر ثانیه در نظر گرفته می‌شود. ورق مسی استفاده شده در این آزمایش‌ها به ترتیب دارای ضخامت و شعاع ۰/۲۵ و ۵۶ میلی‌متر است [۸].

نمونه‌ای دیگر از آزمایش‌های انجام شده در زمینه شکل‌دهی با آب، مربوط به کار کوسینگ<sup>۲</sup> و اسکویوس<sup>۳</sup> [۸] در یکی از دانشگاه‌های آفریقای جنوبی تحت عنوان بررسی شکل‌دهی با سرعت بالا ورق‌های دایروی با استفاده از دستگاه شاک‌تیوب است. در شکل‌دهی با دستگاه شاک‌تیوب محتوی آب، از انرژی پتانسیل هوای فشرده شده در لوله استفاده می‌شود بدین‌گونه که بعد باز شدن دیافراگم پلاستیکی انرژی پتانسیل ناشی از هوای فشرده شده به انرژی جنبشی برای حرکت بسیار سریع پیستون و با وارد شدن ضربه ناشی از حرکت پیستون بر سطح آب، انرژی جنبشی پیستون به فشار هیدرودینامیکی تبدیل می‌شود. ارتفاع این مجموعه‌ی آزمایشی ۴/۴۱۵ متر و دارای یک پیستون پلاستیکی به جرم ۰/۱۸۵ کیلوگرم و لوله‌ای به قطر داخلی ۵۶ و قطر خارجی ۱۰۶ میلی‌متر است. از دیگر اجزای این مجموعه می‌توان به سه حس‌گر فشار در ارتفاع‌های متفاوت اشاره کرد. قسمت تحلیلی این مطالعه با روش انرژی انجام گرفته است که در نهایت یک معادله برای محاسبه خیز مرکز ورق به دست آمده است. در این تحلیل به دلیل در نظر گرفتن هندسه تقریبی و همچنین، وارد نکردن تأثیر غیرقابل چشم‌پوشی نرخ کرنش در معادلات انرژی، ضعیفی بسیار عمیق دیده می‌شود [۹].

## ۲- سامانه چکش ضربه‌ای

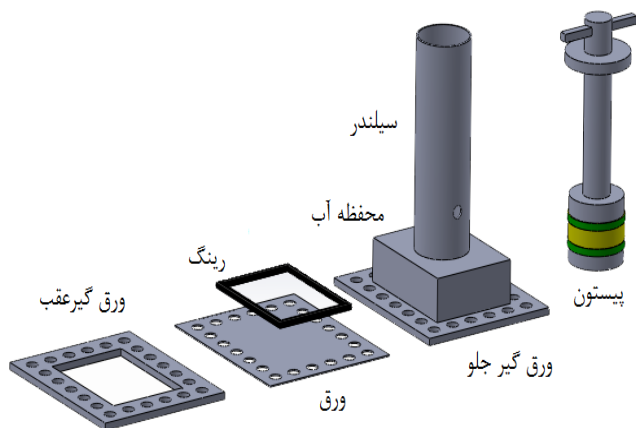
یکی از روش‌های شکل‌دهی با نرخ انرژی پایین، روش شکل‌دهی هیدرودینامیکی است. مکانیزم استفاده شده در این روش دستگاه چکش ضربه‌ای یا چکش ضربه‌ای است که توسط

2 - Kosing  
3 - Skews

1 - Cirak

### ۳- آزمایش‌های تجربی

نمونه ورق‌های مورد آزمایش از جنس فولاد نرم و آلیاژ آلومینیم در ضخامت‌های متفاوت ۱، ۲ و ۳ میلی‌متر است. در ابتدا نمونه ورق‌ها به صورت مستطیلی در ابعاد  $۳۱ \times ۲۶$  سانتی-متر برش زده شده‌اند. مطابق شکل ۲، ورق‌های برش‌خورده جهت نصب در صفحات بالایی و پایینی و همچنین مهار آن، سوراخ‌کاری می‌شوند. سپس نمونه‌ها میان دو صفحه فولادی به ابعاد  $۳۱ \times ۲۶$  سانتی‌متر و با ضخامت ۲۰ میلی‌متر قرار داده شده و به وسیله پیچ‌هایی که در پیرامون این صفحات تعبیه شده‌اند، مهار می‌شوند. شایان ذکر است که، صفحه فولادی بالایی به حوضچه‌ای به ابعاد  $۲۰ \times ۱۵$  سانتی‌متر و سیلندری کاملاً صیقلی به قطر داخلی ۱۲ سانتی‌متر به صورت یک‌پارچه جوش داده شده است.



شکل (۲): شماتیک اجزای سامانه شکل‌دهی.

در وسط صفحه پایینی، سوراخی به ابعاد  $۲۰ \times ۱۵$  سانتی‌متر ایجاد شده است. این سوراخ‌ها برای اعمال بار هیدرودینامیکی روی ورق و در صفحه پایینی شکل‌گیری ورق است. مطابق شکل ۳، در میانه و کف سیلندر، به ترتیب سوراخی جهت هواگیری و نصب حس‌گر فشار قرار گرفته است. شایان ذکر است که حس‌گر فشار استفاده شده به شکل استوانه‌ای، قطر ۱۶ و ارتفاع ۳۳ میلی‌متر است که قابلیت کار در محیط سیال و گاز را داراست. جداره این حس‌گر دارای رزوه‌ای است که برای استفاده باید جداره سیلندر را در انتهای‌ترین قسمت فلاویز کرد و این حس‌گر را در آن قسمت قرارداد. در شکل ۳، محل قرارگیری و شکل ظاهری حس‌گر فشار به ترتیب از راست به چپ نشان داده شده است.

آن انرژی پتانسیل ناشی از آزادسازی وزنه‌ای در ارتفاع معین به انرژی جنبشی و بعد از آن به فشار هیدرودینامیکی در سیال تبدیل می‌شود. شایان ذکر است که بار به صورت ضربه‌ای به پیستون و سیال وارد می‌شود.

در این فرآیند از سیال واسط نظیر آب بین ورق و چکش به دلیل توزیع یکنواخت فشار چکش استفاده می‌شود. اختلاف عمده روش هیدروفورمینگ ورق نسبت به فرآیندی موسوم به کشش ورق در نوع سنبه آن بوده و در این روش از یک سیال به جای سنبه استفاده می‌شود.

شکل ۱ قسمت‌های مختلف دستگاه چکش ضربه‌ای را نشان می‌دهد. این دستگاه متشکل از وزنه که با دستگیره مغناطیسی کنترل شده و تا ارتفاع مناسب بالا برده می‌شود. این وزنه توسط چهار ریل در اطرافش مهار شده و در راستای مناسب سقوط می‌کند و به سیلندر پیستون محتوی آب و سپس انرژی از آب به قالب و ورق مورد نظر منتقل می‌شود. جهت جلوگیری از نشت آب سطح تماس ورق و سیلندر و سطح جانبی تماس سیلندر و پیستون توسط واشرهای لاستیکی کاملاً آب‌بندی می‌شود.



شکل (۱): دستگاه چکش ضربه‌ای.

رها سازی دستگیره مغناطیسی، وزنه سقوط آزاد کرده و انرژی جنبشی حاصل از سقوط وزنه به سیال واسط منتقل شده که موجب انتقال فشار هیدرودینامیکی به سطح ورق و در نهایت موجب شکل دهی ورق مورد نظر می شود.

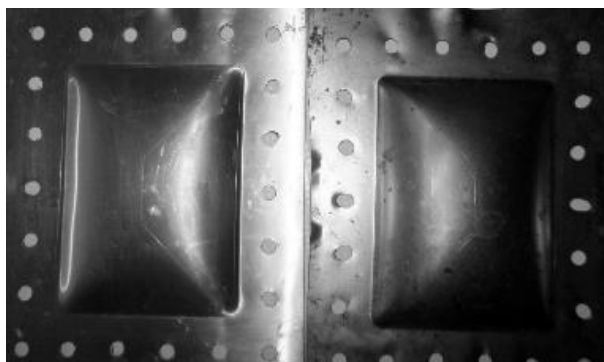
نتایج آزمایش های انجام شده روی ورق های فولادی و آلومینیومی در جدول ۲ آورده شده است. نتایج به دست آمده در این مجموعه آزمایش ها، بیانگر پاسخ و رفتار مکانیکی ورق هایی از جنس فولاد نرم و آلومینیوم تحت بارگذاری هیدرودینامیکی است که در آن، اثر تغییرات ضخامت ورق و نیز تغییرات مقدار فشار هیدرودینامیکی وارده یا به عبارتی افزایش انرژی پتانسیل به ورق با تغییر ارتفاع وزنه پرتابی و تغییر نرخ سرعت تغییر شکل بررسی شده است.

لازم به ذکر است که ورق های آزمایشی در شماره های ۴، ۱۶، ۱۹، ۲۰ و ۲۱ دچار پارگی شده است.

جدول (۱): خواص مکانیکی مواد.

ماده	تنش نهایی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	چگالی (Kg/m <sup>3</sup> )	مدول الاستیسیته (GPa)
فولاد	۴۷۶	۲۸۹	۷۸۵۰	۲۱۰
آلومینیوم	۱۵۳	۱۲۶	۲۷۰۰	۷۰

در شکل ۴ نمونه هایی از تغییر شکل پلاستیک ورق های فولادی و آلومینیومی تحت بارگذاری هیدرودینامیکی با دستگاه چکش ضربه ای نشان داده شده است. این نمونه ها در ضخامت و ارتفاع های متفاوت تحت بارگذاری قرار گرفته اند. در تصاویر نشان داده شده هیچ گونه آثار تخریب ناشی از بارگذاری دیده نمی شود.



شکل (۴): نمای بالا و جانبی از ورق شکل گرفته.



شکل (۳): محل قرارگیری و شکل ظاهری حس گر فشار.

پس از بستن صفحات بالایی و پایینی، در داخل سیلندر، آب تا ارتفاع بیش از محل قرارگیری شیر تخلیه هوا ریخته می شود و سپس با قراردادن پیستون و فشار دادن آن به سمت پایین، تخلیه هوا صورت گرفته و سامانه آماده برخورد چکشی که از ارتفاع معین پرتاب می شود، است.

### ۳-۱- خواص مکانیکی مواد

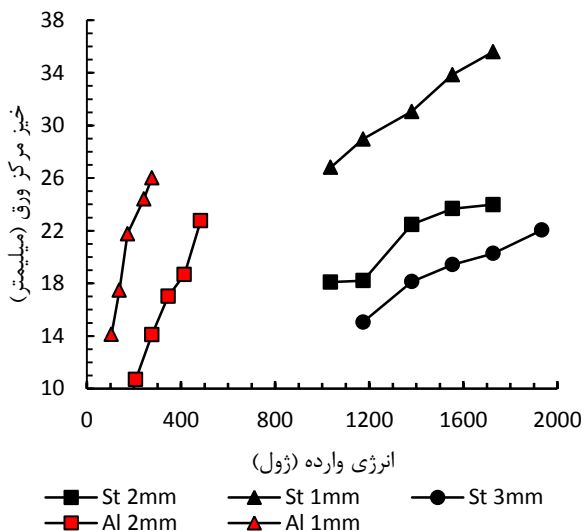
خواص مکانیکی ماده استفاده شده در این آزمایش ها از انجام آزمایش کشش تک محوری روی ورق هایی از جنس فولاد (St-۱۳) و آلومینیوم (Al-۱۱۰۰) مشخص شده است. برای بررسی همگنی خواص مواد، نمونه هایی از ورق مورد نظر در سه راستای مختلف افقی، عمودی و اریب (۴۵ درجه) با دستگاه وایرکات برش زده و سپس تحت آزمایش کشش تک محوره با شرایط کاملاً یکسان قرار داده شده است. برای تعیین تنش تسلیم استاتیکی و تنش نهایی استاتیکی، از هر ضخامت، دو ورق انتخاب کرده و از هر کدام سه نمونه آزمایشگاهی الف، ب و ج تهیه شده است. بنابراین برای هر جنس با ضخامت معین جمعاً شش آزمون کشش محوری انجام شده است. در انجام آزمایش، نمونه ها با دو سرعت ۲ و ۵ (دقیقه بر میلی متر) تحت کشش قرار گرفته است. مقادیر تنش نهایی، تنش تسلیم و چگالی برای ماده به کار رفته در جدول ۱ بیان شده است.

### ۳-۲- نتایج آزمایش ها

مطابق شکل ۱ وزنه ای به جرم ۷۰/۴ کیلوگرم که در میان چهار ریل مهار شده تا ارتفاع متناسب با انرژی پتانسیل مورد نظر توسط موتور الکتریکی به سمت بالا کشانده می شود و با

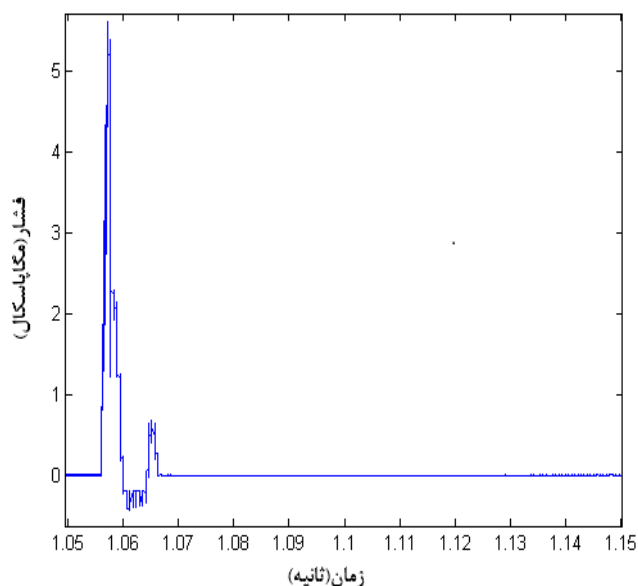
جدول (۲): نتایج آزمایش‌های انجام‌شده.

شماره آزمایش	نمونه	حداکثر فشار (MPa)	ارتفاع وزنه (cm)	ضخامت ورق (mm)
۱	فولاد	۱۶/۳۶	۲۸۰	۳
۲	فولاد	۱۴/۹۲	۲۵۰	۳
۳	فولاد	۱۴/۷۳	۲۵۰	۲
۴	فولاد	۱۴/۴۶	۲۵۰	۱
۵	فولاد	۱۳/۹۰	۲۲۵	۳
۶	فولاد	۱۳/۸۵	۲۲۵	۲
۷	فولاد	۱۳/۶۹	۲۲۵	۱
۸	فولاد	۱۲/۸۸	۲۰۰	۳
۹	فولاد	۱۲/۷۳	۲۰۰	۲
۱۰	فولاد	۱۲/۶۱	۲۰۰	۱
۱۱	فولاد	۱۱/۸۳	۱۷۰	۳
۱۲	فولاد	۱۱/۶۹	۱۷۰	۲
۱۳	فولاد	۱۱/۵۲	۱۷۰	۱
۱۴	فولاد	۱۰/۸۸	۱۵۰	۲
۱۵	فولاد	۱۰/۷۶	۱۵۰	۱
۱۶	آلومینیوم	۴/۱۴	۴۰	۱
۱۷	آلومینیوم	۴/۲۰	۴۰	۲
۱۸	آلومینیوم	۴/۷۷	۵۰	۲
۱۹	آلومینیوم	۴/۰۱	۳۵	۱
۲۰	آلومینیوم	۵/۶۰	۷۰	۲
۲۱	آلومینیوم	۳/۴۲	۲۵	۱
۲۲	آلومینیوم	۵/۳۷	۶۰	۲
۲۳	آلومینیوم	۲/۵۶	۱۵	۱
۲۴	آلومینیوم	۳/۶۶	۳۰	۲
۲۵	آلومینیوم	۳/۰۱	۲۰	۱



شکل (۵): نمودار تغییرات خیز مرکز ورق نسبت به انرژی.

برای نمونه، نمودارهای فشار- زمان یک آزمایش که از طریق حسگر فشار و با کمک داده‌پرداز دینامیکی آزمایشگاه ثبت گردیده، در شکل ۶ نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، با توجه به اینکه این فرآیند با سرعت پایین انجام شده است، بار هیدرو دینامیکی وارد شده به ورق در بازه میلی ثانیه است. حداکثر فشار وارد شده به ورق در آزمایش‌های مختلف در جدول ۲ آورده شده است.



شکل (۶): نمودار فشار-زمان آزمایش شماره ۲۰.

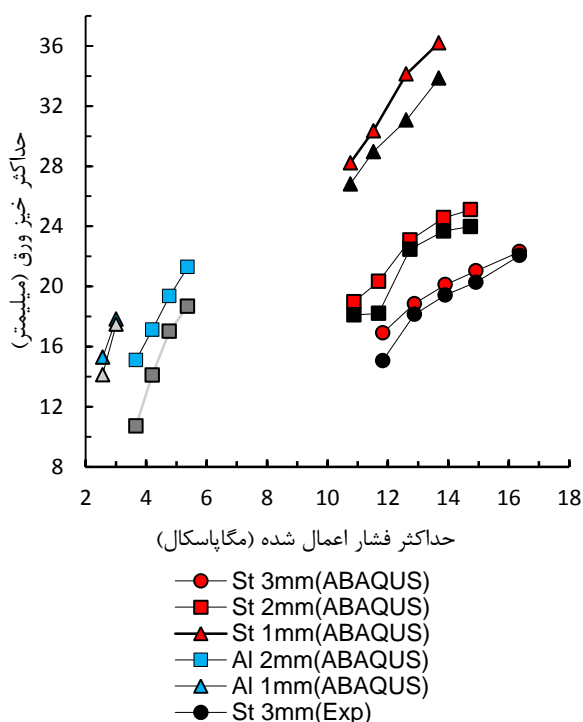
در شکل ۵ نمودار تغییرات خیز مرکز ورق نسبت به انرژی پتانسیل منتقل شده از سامانه چکش ضربه‌ای را نشان می‌دهد. در این نمودار خیز ورق‌های بر حسب انرژی برای ورق با جنس و ضخامت‌های مختلف به صورت تفکیک شده و متمایز ترسیم شده است. مطابق این نمودارها تأثیر ضخامت ورق و همچنین ارتفاع وزنه رها شده بر میزان تغییر شکل پلاستیک به وضوح دیده می‌شود.

المان از یک نقطه انتگرال گیری استفاده شده است. روش تحلیل، دینامیکی صریح و بارگذاری اعمالی با استفاده از نمودارهای فشار- زمان به دست آمده از حس گرها یا همان نتایج تجربی صورت گرفته است.

#### ۵- نتایج و بحث

در شکل ۸ و جدول ۳، مقادیر به دست آمده از مدل های شبیه سازی شده در مقایسه با نتایج تجربی برای اندازه خیز مرکز ورق، مقایسه شده اند.

لازم به ذکر است که شبیه سازی عددی انجام شده تنها برای ورق های که دچار پارگی نشده اند، انجام شده است. همان طور که از شکل ۸ پیداست با افزایش فشار، خیز مرکز ورق افزایش می یابد. همچنین، نتایج ارائه شده در این شکل نشان می دهد که مدل شبیه سازی شده با نتایج تجربی به دست آمده، توافق بسیار مطلوبی دارد.

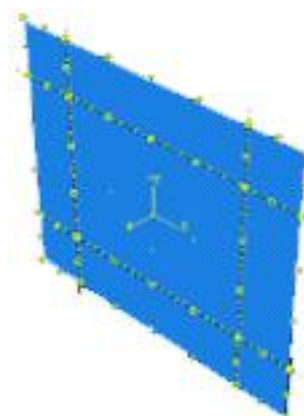


شکل (۸): مقایسه مقدار تجربی و عددی خیز مرکز ورق بر حسب حداکثر فشار اعمالی.

برای ارزیابی دقت مدل ارائه شده با استفاده نرم افزار ABAQUS، منحنی تغییرات نسبت خیز مرکز ورق به ضخامت به دست آمده از این نرم افزار در هر آزمایش، به همراه مقادیر متناظر تجربی در شکل ۹ رسم شده است. برای بررسی میزان

۴- شبیه سازی عددی در نرم افزار المان محدود ABAQUS برای شبیه سازی 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 شبیه سازی تورق، می توان یک چهارم مسئله را مدل سازی نمود، اما برای مشاهده تخریب های به وجود آمده در ورق بهتر است مدل را به صورت کامل شبیه سازی نمود. در مدل سازی، ورق به عنوان یک قطعه تغییر شکل پذیر در نظر گرفته می شود. مدل هندسی اولیه ورق به صورت سه بعدی ترسیم شده است که ماهیت آن به صورت Solid از نوع Extrude و همچنین برای مدل سازی نگه دارنده، یک قطعه سه بعدی از نوع تغییر شکل ناپذیر صلب لحاظ شده است. ابعاد ورق مدل شده  $26 \times 31$  سانتی متر و خط چین های تولید شده در قسمت میانی ورق به منظور ایجاد شرایط مرزی کاملاً گیردار به ابعاد  $15 \times 20$  سانتی متر است که در شکل ۷ نشان داده شده است.

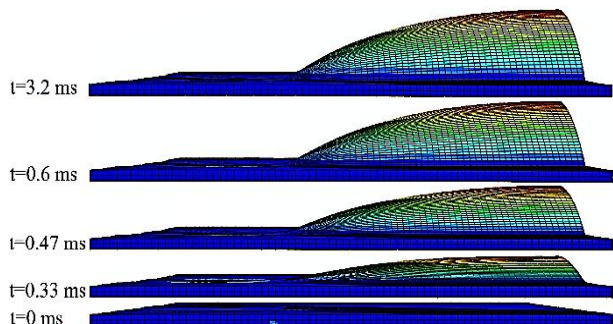
برای تحلیل و تعیین خروجی های مورد نظر از اهداف تغییر شکل پذیر باید خصوصیات ماده تشکیل دهنده آنها را تعریف نمود. ویژگی های الاستیک ماده تنها با تعیین مقدار مدول الاستیسیته و ضریب پواسون مشخص می شود. در جدول ۱ این مقادیر برای دو نوع مختلف مواد درج شده است. همچنین، برای تعیین ویژگی های پلاستیک ماده، از تبدیل نمودار تنش و کرنش مهندسی ماده به نمودار تنش و کرنش حقیقی استفاده شده است.



شکل (۷): مدل سازی و اعمال شرط مرزی.

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 سه بعدی بودن مسئله، برای شبکه بندی مدل از المان Solid هشت گرهی (C3D8) و در هر





شکل (۱۰): پروفیل تغییر شکل آزمایش شماره ۱ براساس مدل شبیه‌سازی شده.

برای بررسی بهتر روند شکل‌دهی ورق، در شکل ۱۰ پروفیل تغییرشکل مدل شبیه‌سازی شده نمونه‌ای از ورق در مراحل زمانی مختلف نشان داده شده است. لازم به توضیح است که مدت زمان بارگذاری فرآیند با توجه به نتایج تجربی بدست آمده از نمودارهای فشار- زمان، ۴ میلی ثانیه در نظر گرفته شده یا به عبارت دیگر تنها قله اولیه موجود در این نمودارها لحاظ شده است.

### ۶- نتیجه‌گیری

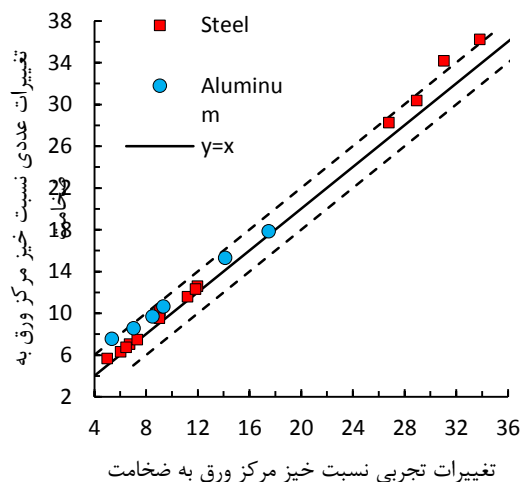
در این مقاله تغییرشکل پلاستیک ورق‌های مستطیلی گیردار تحت بارگذاری هیدرودینامیکی با استفاده از سامانه چکش ضربه‌ای به صورت تجربی و عددی بررسی شد. آزمایش‌های انجام شده برای ورق‌های فولادی و آلومینیومی در ضخامت و سطح انرژی‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. علی‌رغم اینکه سامانه چکش ضربه‌ای بسیار ساده، ارزان و کم‌خطر است ولی کیفیت تغییرشکل پلاستیک ورق‌های آزمایش شده مشابه سایر فرآیندهای شکل‌دهی مانند انفجاری و شاک‌تیوب است با این تفاوت که در این فرآیند، ورق تغییرشکل یافته بسیار متقارن و گنبدی است، به عبارت دیگر فشار هیدرودینامیکی به صورت کاملاً یکنواخت وارد شده است.

نتایج شبیه‌سازی انجام شده در نرم‌افزار المان محدود آباکوس توافق بسیار خوبی با نتایج تجربی که در آن ورق دچار پارگی نشده است، دارد به طوری که، با توجه به شرایط آزمایشگاهی، تمامی آزمایش‌های انجام گرفته در محدوده‌ای با خطای قابل قبول قرار گرفته‌اند. شایان ذکر است که ۹۵٪ از داده‌ها در محدوده خط  $y = x$  و  $y = x \pm 2$  و ۶۵٪ از آنها در محدوده خط  $y = x \pm 1$  و  $y = x$  قرار دارند.

انحراف نقاط، خطوطی به فاصله  $\pm 2$  و موازی نسبت به خط  $y = x$  مدل ترسیم شده است. نقاطی که در این محدوده قرار دارند دارای خطای قابل قبول با توجه به شرایط آزمایشگاهی هستند. مطابق شکل ۹ توافق خوبی بین مدل شبیه‌سازی عددی ارائه شده با مقادیر تجربی مشاهده می‌شود به طوری که ۹۵٪ از داده‌ها در محدوده خط  $y = x$  و  $y = x + 2$  قرار دارند.

جدول (۳): مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی.

شماره آزمایش	خیز تجربی مرکز ورق (mm)	خیز عددی مرکز ورق (mm)
۱	۲۲/۰۵	۲۲/۳۱
۲	۲۰/۲۷	۲۱/۰۳
۳	۲۳/۹۸	۲۵/۱۰
۵	۱۹/۴۲	۲۰/۱۱
۶	۲۳/۶۸	۲۴/۵۷
۷	۳۳/۸۵	۳۶/۲۱
۸	۱۸/۱۳	۱۸/۸۵
۹	۲۲/۴۷	۲۳/۰۸
۱۰	۳۱/۰۶	۳۴/۱۳
۱۱	۱۵/۰۶	۱۶/۹۰
۱۲	۱۸/۲۰	۲۰/۳۳
۱۳	۲۸/۹۷	۳۰/۳۵
۱۴	۱۸/۱۰	۱۸/۹۸
۱۵	۲۶/۸۱	۲۸/۲۲
۱۷	۱۴/۱۰	۱۷/۱۱
۱۸	۱۷/۰۱	۱۹/۳۵
۲۲	۱۸/۶۸	۲۱/۲۹
۲۳	۱۴/۱۲	۱۵/۲۸
۲۴	۱۰/۷۰	۱۵/۰۹
۲۵	۱۷/۴۹	۱۷/۸۳



شکل (۹): نمودار تغییرات عددی و تجربی نسبت خیز مرکز ورق به ضخامت.

## ۷- مراجع

1. Babaei, H. and Darvizeh, A. "Investigation into the Response of Fully Clamped Circular Steel, Copper, and Aluminum Plates Subjected to Shock Loading", *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, Vol. 39, No. 4, pp. 507-526, 2011.
2. Babaei, H. and Darvizeh, A. "Experimental and Analytical Investigation of Large Deformation of Thin Circular Plates Subjected to Localized and Uniform Impulsive Loading", *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, Vol. 38, pp.171-189, 2010.
3. Peng, X.N., Nie, W. and Yan, B. "Capacity of Surface Warship's Protective Bulkhead Subjected To Blast Loading", *Journal of Marine Science and Application*, Vol. 8, No. 1, pp. 13-17, 2009.
4. Mynors, D.J. and Zhang, B. "Applications and Capabilities of Explosive Forming", *J. Mat. Proc. Tech*, Vols. 125-126, pp. 1-25, 2002.
5. Zhang, S.H., Zhou, L.X., Wang, Z.T. and Xu, Y. "Technology of Sheet Hydro Forming with a Movable Female Die", *J. Mach. Tools Manf.* Vol. 43, No. 8, pp. 781-785, 2003.
6. Thiruvarudchelvan, S. and Lewis, W. "A Note on Hydro Forming with Constant Fluid Pressure", *J. Mater. Process. Technol.* Vol. 88, pp. 51-56, 1999.
7. Lange, K. "Handbook of Metal Forming, Second Printing", McGraw-Hill, NewYork, 1994.
8. Kosing, O.E. Skews, B.W. "An Investigation of High-Speed Forming of Circular Plates in a Liquid Shock Tube". *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 21, No. 9, pp. 801-816, 1998.
9. Cirak, F., Deiterding, R. and Mauch, S.P. "Large-Scale Fluid-Structure Interaction Simulation of Viscoplastic and Fracturing Thin-Shells Subjected to Shocks and Detonations", *Computers and Structures*, Vol. 85, No's. 11-14, pp. 1049-1065, 2007.