مجله مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1396، دوره 17، شماره 12، ص‌ص 114-122

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی تجربی و شبیه‌سازی عددی برهم‌کنش بین سیال و سازه در فرآیند هیدروفرمینگ ورق‌های مثلثی تحت بار ضربه‌ای

هاشم بابایی[1*]، مجید علی طاولی[2]، علی محمودی[3]، علی گل باف[3]

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

2 - دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

3 – دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

* رشت، صندوق پستی 3756-41635، ghbabaei@guilan.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 03 شهریور 1396

پذیرش: 03 آبان 1396

ارائه در سایت: 10 آذر 1396

کلید واژگان:

هیدروفرمینگ

ورق مثلثی

برهم‌کنش بین سیال و سازه

هیدرودینامیک ذرات هموار

المان محدود

چکیده

در این مقاله به بررسی فرآیند شکل‌دهی ورق‌های مثلثی گیردار از جنس فولاد st12 و در دو ضخامت 1 و 2 میلی‌متر به‌وسیله آب پرداخته شده است. کلیه آزمایش‌ها در آزمایشگاه ضربه دانشگاه گیلان و با بهره‌گیری از سامانه چکش پرتابه‌ای انجام شده و شبیه‌سازی عددی مراحل مختلف آن نیز به‌وسیله نرم‌افزار آباکوس صورت گرفته است. همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، با بهره‌گیری از سامانه چکش پرتابه‌ای به‌عنوان عامل بارگذاری هیدرودینامیکی و با بررسی‌های تجربی متفاوت در راستای این پژوهش، تأثیر عواملی نظیر ضخامت، محل استقرار چکش و وزن آن یا به عبارتی تکانه‌ای که به‌عنوان ورودی به مجموعه اعمال می‌شود، مورد مطالعه قرار گرفته است. در بخش شبیه‌سازی عددی ورق‌های مثلثی، با تأکید بر مدل‌سازی برهم‌کنش بین سیال و سازه با تکیه‌بر شبیه‌سازی فاز سیال با روش هیدرودینامیک ذرات هموار و مدل کردن ورق به‌عنوان سازه با روش المان محدود، کل فرآیند در قالب مسئله کوپل این دو روش، شبیه‌سازی شده است. در این شبیه‌سازی‌ها خیز نهایی ورق، توزیع تنش بر روی آن و پدیده تمرکز تنش بررسی‌شده است. بحث پیرامون محل رخ دادن بیشینه خیز، موضوع دیگری است که به آن پرداخته شده است. وجود همخوانی قابل‌قبول، بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و نتایج آزمایش‌های تجربی، خود دلیلی بر صحت شبیه‌سازی‌های انجام‌شده و نتایج حاصل از آن‌ها است.

Experimental Investigation and Numerical Simulation of Fluid-Structure Interaction on Hydroforming Process of Triangular Plates under Impact Loading

Hashem Babaei*, Majid AliTavoli, Ali Mahmoudi[3], Ali Golbaf

Department of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.
* P.O.B. 3756-41635, Rasht, Iran, ghbabaei@guilan.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 25 August 2017
Accepted 25 October 2017
Available Online 01 December 2017

Keywords:
Hydroforming
triangular plate
Fluid-Structure Interaction
Smoothed-Particle Hydrodynamics
Finite Element

ABSTRACT

In the present paper, forming of clamped triangular plates by means of water has been investigated. The plates were made of st-12 and had the thicknesses of 1 and 2 millimeters. The experimental tests were performed at the impact laboratory of Guilan University using drop hammer system. Various aspects of numerical investigation were simulated by Abaqus software. As mentioned above, using drop hammer system as a hydrodynamic loading tool and carrying out different empirical tests in this study, the effect of factors such as thickness, standoff distance of hammer and its weight, i.e. the applied momentum to the system have been studied. In the numerical simulations, the deformations of triangular plates were simulated by smoothed-particle hydrodynamics method. Also, the Fluid-Structure Interaction was considered for simulating the fluid phase and the plate deformation was modeled using finite element method in the form of coupled SPH/FEM. Furthermore, the ultimate deformation, stress distribution, stress concentration of plates and position of maximum deformation on triangular plate have been investigated. Agreement between the obtained data from numerical simulations and experiments guarantied the accuracy of simulations.

1- مقدمه

فرایندهای شکل‌دهی از زمان جنگ جهانی دوم نقش پررنگ‌تری به خود گرفت و لزوم تولید قطعات فلزی پیچیده افزایش یافت. شکل‌دهی ورق‌های فلزی که از عوامل مهم بکار رفته در صنایع هوافضا، هواپیمایی، خودروسازی، زیردریایی، پل‌ها، سکوهای دریایی، مخازن و ... هستند، موضوعی است که در این تحقیق به آن پرداخته می‌شود. هیدروفرمینگ یا شکل‌دهی با آب روشی است که در آن از فشار سیال برای شکل‌دهی قطعه موردنظر استفاده می‌شود که در مقایسه با سایر روش‌های شکل‌دهی، روش نسبتا جدیدی به شمار می‌رود. قطعات هیدروفرم شده مقاومت ساختاری و سختی بهتری داشته و همچنین به دلیل صرفه اقتصادی و توانایی این روش در شکل‌دهی قطعات

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

H. Babaei, M. AliTavoli, A. Mahmoudi, A. Golbaf, Experimental Investigation and Numerical Simulation of Fluid-Structure Interaction on Hydroforming Process of Triangular Plates under Impact Loading, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 12, pp. 114-122, 2018 (in Persian)

پیچیده، موردتوجه صنعت گران قرارگرفته است.

درزمینه شبیه‌سازی عددی فرآیند شکل‌دهی ورق کارهای متعددی انجام گرفته است. تولنر و نوریک در سال 1999 با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس به بررسی حالت‌های مختلف بروز تخریب ورق‌های دایروی تقویت‌شده تحت بارگذاری انفجاری با خرج مسطح حلقه‌ای پرداختند[1].

ژنگ در سال 2000 به بررسی تجربی و عددی فرآیند کشش عمیق هیدرو مکانیکی پرداخت. در این تحقیقات اثر پارامترهای مؤثر فرآیند بر روی کیفیت تولیدات نهایی مورد بحث قرار گرفت[2].

در ادامه تحقیقات زیادی که درزمینه‌ی فرآیندهای هیدرو استاتیکی و هیدرودینامیکی انجام‌شده است می‌توان به تحقیق زمپالونی و همکارانش در سال2003 اشاره کرد. در این آزمایش با قرار دادن محفظه محتوی آب، پشت ورق تحت بارگذاری، به بررسی تجربی و شبیه‌سازی عددی اثر استمب در فرآیند هیدرودینامیکی پرداخته‌شده است. افزایش مدت‌زمان مقاومت قطعه در برابر شروع پارگی و کاهش چروکیدگی قطعه طی فرآیند تغییر شکل ازجمله مزایای استفاده از این روش است[3]

لانگدن، چونگ و نوریک در همین سال با بررسی تجربی و عددی بر روی پاسخ ورق‌های چهارگوش تقویت‌شده با تسمه فلزی از جنس فولاد نرم با تکیه‌گاه یکپارچه، تحت شرایط بارگذاری یکنواخت به پیش‌بینی پارگی ورق در نواحی با دمای بالا پرداختند[4].

پلمبو در سال 2006 با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود فرآیند هیدروفرمینگ بهبودیافته توانست مقادیر بحرانی کرنش‌ها و محل وقوع آن‌ها و همچنین نمودار توزیع تنش را ارائه کند. طی فرآیند شبیه‌سازی، قطعه کارهایی با هندسه دقیق طراحی شد تا از گسیختگی‌های احتمالی و یا نازک شدگی‌ها در محل‌های بحرانی جلوگیری شود[5]

در کارهایی که به‌وسیله شبیه‌سازی عددی انجام شد در سال 2007 گوپتا و همکارانش تغییر شکل و پارگی صفحات دایره‌ای با شرایط تکیه‌گاهی متغیر و بارگذاری ضربه‌ای در حل گر انسیس شبیه‌سازی کردند. آن‌ها با ارائه معیار کرنش گسیختگی مدل‌های شکست را برای صفحات دایروی توضیح می‌دهند[6].

در سال‌های 2010 تا 2012، بابایی و همکارانش با بررسی تحلیلی، تجربی و عددی تغییر شکل پلاستیک ورق‌های دایروی گیردار فولادی، مسی و آلومینیومی تحت بارگذاری ضربه‌ای یکنواخت و غیریکنواخت به نتایج حائز اهمیتی دست‌یافتند. آن‌ها برای ایجاد انرژی اولیه به‌صورت ضربه برای چندین آزمایش از پاندول بالستیک به همراه لوله‌های فولادی به‌عنوان فاصله استقرار خرج در اندازه‌های مختلف استفاده کردند. ازجمله نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیقات می‌توان به خیز مرکز ورق، گستره تغییر شکل، پراکندگی کرنش‌ها و ارزیابی و تأثیر پارامترهایی نظیر خواص مکانیکی ورق، ضخامتان و فاصله خرج تا ورق روی این نتایج اشاره کرد[8,7].

بابایی و همکارانش در ادامه تحقیقات خود به بررسی تحلیلی فرآیند هیدروفرمینگ ورق‌های مستطیلی و دایروی پرداختند. آن‌ها با بهره‌گیری از روش لولای پلاستیک و همچنین روش انرژی به نتایجی دست یافتند که با آزمایش‌های تجربی مطابقت قایل قبولی دارد. در روش انرژی مدل ارائه‌شده، اثر کرنش غشایی و خمشی و همچنین نرخ کرنش همزمان لحاظ شده است. مقایسه این دو روش، دقت بالای روش لولای پلاستیک را در مقایسه با روش انرژی نشان می‌دهد[10,9].

آن‌ها در ادامه تحقیقات خود بر روی هیدروفرمینگ ورق، مدلی ریاضی بر پایه اعداد بی‌بعد و روش تجزیه مقادیر منفرد برای پیش‌بینی خیز ورق طی فرآیند هیدروفرمینگ ارائه کردند که این مدل می‌تواند نتایج آزمایش‌های تجربی را به‌خوبی پیش‌بینی کند[11].

روش هیدرودینامیک ذرات هموار، روشی بدون شبکه‌بندی برای شبیه‌سازی دینامیکی محیط‌های پیوسته است. مسائل مربوط به هوافضا[12]، تغییر شکل‌های بزرگ[13]، بارگذاری‌های ضربه‌ای با سرعت‌بالا[14] و صنعت شکل‌دهی انفجاری[15]، ازجمله مسائلی هستند که با استفاده از این روش مدل‌سازی و موردبررسی قرار می‌گیرند. در شبیه‌سازی عددی آزمایش‌هایی که با تغییر شکل‌های بزرگ همراه است، استفاده از روش‌های معمول شبکه‌بندی المان محدود مشکلاتی را به وجود می‌آورد. ازجمله مشکلات موجود می‌توان به دانه‌بندی مجدد اشاره کرد. درروش هیدرودینامیک ذرات هموار با حذف شبکه‌بندی و تقسیم شدن هندسه به مجموعه ذرات با خواص مشخص این مشکل برطرف شده است. همین‌طور میدان‌های پیوسته از قبیل سرعت، چگالی نقطه‌ای، دما، فشار و تنش، با استفاده از حرکت و برهم‌کنش بین ذرات محاسبه می‌شود[16].

مهرا و همکارانش به بررسی اثر برخورد پرتابه فلزی به ورق‌های نازک فلزی در سرعت‌های بالا و پدیده‌ی نفوذ این پرتابه‌ها در ورق پرداخته‌اند. در این تحقیق، فرایند با استفاده از چهار روش مختلف هیدرودینامیک ذرات هموار، مدل‌سازی شده است. تفاوت این چهار روش در ویسکوزیته مصنوعی ارائه‌شده در هرکدام از آن‌ها است. با بررسی مدل‌سازی عددی مشخص می‌شود، در مواردی که جنس پرتابه و ورق یکسان است، نتایج حاصل از شبیه‌سازی مطابقت بهتری با آزمایش تجربی دارد[17].

در برخی موارد به‌منظور برطرف کردن مشکل از دست رفتن برهم‌کنش بین ذرات، روش هیدرودینامیک ذرات هموار توسعه‌یافته به کار گرفته می‌شود؛ که در این روش از شیوه‌ای جدید، برای تولید و ادغام ذرات استفاده‌شده است. شینتت و سکاین، با این روش به شبیه‌سازی فرآیند برخورد پرتابه با ورق‌های کامپوزیتی چندلایه در سرعت‌های بالا پرداختند. این تحقیق به‌منظور بررسی ناپیوستگی تنش بین لایه‌های مجاور و مشخص کردن جهت شکست در کامپوزیت‌های چندلایه، انجام‌شده است[18].

در زمینه شبیه‌سازی برهم‌کنش بین سیال و سازه با استفاده از این روش، آزمایش‌هایی انجام‌شده است[19-21] که می‌توان به تحقیقی که توسط آنتونیک و همکارانش انجام‌شده است، اشاره کرد. آن‌ها با توصیف فاز جامد و مایع به‌صورت هیدرودینامیک ذرات هموار و همچنین در نظر گرفتن سیال به‌صورت غیر لزج و مدل کردن ذرات جامد به‌صورت رابطه هایپوالاستیک افزایشی، توانستند نتایجی که از روش تجربی به دست آورده بودند را شبیه‌سازی کنند. در این شبیه‌سازی از انتگرال فشار روی سطح سیال که با روش هیدرودینامیک ذرات هموار محاسبه می‌شود، به‌عنوان شرط مرزی بین سیال و سازه استفاده‌شده است[22].

در این پژوهش شبیه‌سازی عددی برهم‌کنش بین سیال و سازه در فرآیند هیدروفرمینگ ورق‌های مثلثی به‌صورت کوپل هیدرودینامیک ذرات هموار/المان محدود، در نرم‌افزار آباکوس انجام‌شده است.

2- آزمایش‌های تجربی

سامانه چکش پرتابه‌ای برای ایجاد انرژی اولیه در این آزمایش‌ها مورداستفاده قرار گرفته است. وزنه‌ها با جرم موردنظر در ارتفاع مشخص قرار داده‌شده و پس از رهاسازی، انرژی پتانسیل ذخیره‌شده در وزنه‌ها به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود و در ادامه با برخورد وزنه‌ها با پیستونی که بر سطح آب قرارگرفته است، انرژی جنبشی به فشار هیدرودینامیکی در آب تبدیل‌شده و

ورق انتهای حوضچه را شکل می‌دهد. مدت‌زمان تغییر شکل در این فرایند که ماهیتی کاملاً مکانیکی دارد، در بازه چند میلی‌ثانیه اتفاق می‌افتد. تفاوت مهم روش هیدروفرمینگ در برابر روش کشش عمیق، در نوع سنبه است. در این روش از یک سیال (معمولا ترکیب آب و روغن) به‌عنوان سنبه استفاده می‌شود که این امر توزیع یکنواخت فشار چکش و به‌تبع آن کیفیت سطح بالای قطعات، یکنواختی ضخامت، کشش قطعات پیچیده در یک مرحله، به همراه توزیع مناسب کرنش و عدم نیاز به ساخت قالب و درنتیجه کاهش هزینه را در پی دارد. برای شکل‌دهی ورق به روش تجربی به ابزار و سامانه‌هایی نیاز است که ورق از حالت اولیه به شکل دلخواه تبدیل شود. انرژی لازم برای انجام فرآیند به‌واسطه بارگذاری دینامیکی تأمین می‌شود.

2-1- نمونه‌های اولیه و سامانه انجام آزمایش

سامانه انجام آزمایش از چهار قسمت اصلی حوضچه، قالب، سیلندر، پیستون و چند قسمت فرعی مانند پکینگ پلاستیکی، او رینگ (برای آب‌بندی) و چند قرص فلزی جهت نگه‌داشتن پکینگ، تشکیل‌شده است. شکل 1 نمای شماتیک اجرای این سامانه را به تفکیک نشان می‌دهد.

همین‌طور برای انجام آزمایش از ورق با جنس فولاد نرمSt-12 استفاده‌شده است. نمونه‌ها با توجه به ابعاد حوضچه سامانه و پیچ‌های آن برای ثابت کردن ورق بین قالب انتهایی و حوضچه در ابعاد250×200 میلی‌متر برش خورده و مطابق شکل 2 سوراخ‌کاری می‌شوند.

Fig. 1 schematic view of deformation system

شکل 1 نمای شماتیک سامانه تغییر شکل

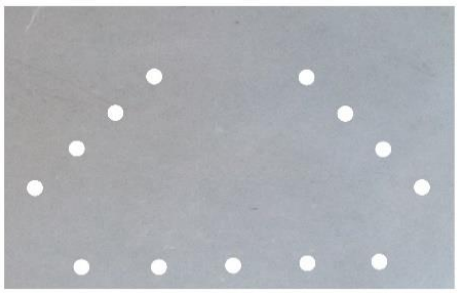

Fig. 2 the a prepared triangular plate before testing

شکل 2 نمونه ورق آماده‌شده مثلثی پیش از آزمایش

آزمایش‌ها با رهاسازی چکش از ارتفاع‌های مختلف و جرم‌های متفاوت، انجام می‌شود که جدول 1 مجموعه آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. لازم به توضیح است که ورق‌ها برای هر ضخامت مشخص، به‌منظور بررسی تأثیر تغییرات تکانه، از ارتفاع مختلف و با جرم مختلف چکش پرتابه‌ای، تحت بارگذاری هیدروفرمینگ قرار می‌گیرند.

2-2- سامانه چکش پرتابه‌ای

سامانه چکش پرتابه‌ای موجود در آزمایشگاه ضربه دانشگاه گیلان 4 متر ارتفاع دارد و وزن اولیه چکش آن 70.4 کیلوگرم است. چکش توسط چهار ریل با جنس استیل هدایت می‌شود. برای بالا بردن چکش تا ارتفاع مشخص از جرثقیل نصب‌شده روی سامانه استفاده می‌شود. همچنین می‌توان با افزودن وزنه، انرژی جنبشی تولیدشده توسط دستگاه را افزایش داد. هنگامی‌که چکش از بالاترین ارتفاع رها شود سرعت آن به 8 متر بر ثانیه می‌رسد. با رها شدن چکش از ارتفاع مشخص، انرژی پتانسیل ذخیره‌شده در آن تبدیل به انرژی جنبشی می‌شود. در اثر برخورد چکش با پیستون، انرژی جنبشی تبدیل به انرژی فشاری شده که از این انرژی فشاری می‌توان در فرآیندهای شکل‌دهی با نرخ انرژی متوسط استفاده نمود. به‌عنوان‌مثال اگر پیستون با سطح آب برخورد کند، از نیروی هیدرودینامیک تولیدشده، می‌توان برای شکل‌دهی ورق استفاده کرد که به آن فرآیند هیدروفرمینگ گفته می‌شود. شکل 3 نمای شماتیکی سامانه چکش پرتابه‌ای را نمایش می‌دهد.

2-3- خواص مکانیکی ورق‌های تحت آزمایش

برای بررسی رفتار مکانیکی مواد بکار رفته در این تحقیق، از آزمایش کشش تک‌محوره استفاده‌شده است. یکی از ویژگی‌های ماده که کاربرد مهمی در شبیه‌سازی فرآیند و پردازش نتایج آزمایش‌های تجربی دارد ایزوتروپ بودن

جدول 1 دو گروه مختلف آزمایش

Table 1 two different test groups

ضخامت ورق(mm)	جرم چکش (kg)	جنس ورق	شماره گروه
1	70.4, 90.4, 100.4	فولاد	1
2	70.4, 90.4, 100.4	فولاد	2

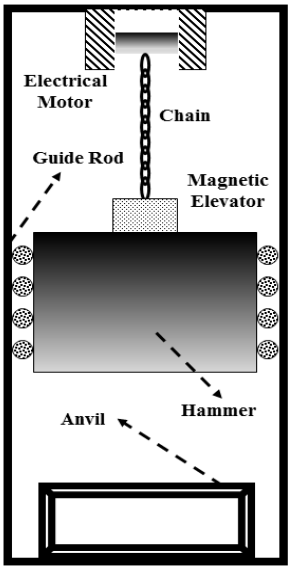

Fig. 3 drop hammer system

شکل 3 سامانه چکش پرتابه‌ای

ماده است. به همین منظور آزمایش کشش تک‌محوره با برش چند نمونه در سه راستای متفاوت (0°، 45° و 90°) و بارگذاری این نمونه‌ها با سرعت‌های متفاوت انجام می‌شود. نزدیک بودن تقریبی نتایج آزمایش کشش مربوط به یک نوع ماده در هر سه راستا، دلیلی بر ایزوترپ بودن ماده است. نمونه‌هایی که برای آزمایش مورداستفاده قرار گرفتند دارای ابعاد 1×6×12 میلی‌متر هستند و تست کشش در آزمایشگاه خواص مواد دانشگاه تربیت مدرس انجام‌شده است. سرعت انجام تست ها 2 و 5 میلی‌متر بر دقیقه بوده است. خروجی-های نیرو، تنش، کرنش و جابجایی که این دستگاه به کاربر می‌دهد به‌صورت جدولی در نرم‌افزار اکسل است. در ادامه تصویری از دستگاه تست کشش در شکل 4 و نمونه‌های تحت آزمایش در شکل 5 ارائه‌شده است.

در ادامه خواص مکانیکی ورق فولادی در جدول 2 ارائه‌شده است.

2-4- نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها

نتایج آزمایش‌های انجام‌شده روی ورق‌های فولادی با هندسه مثلثی در جدول3 مشاهده می‌شود.

نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها، بیانگر پاسخ و رفتار مکانیکی ورق‌ها تحت بار حاصل از فشار آب است که در آن اثر تغییرات ضخامت ورق و همچنین تغییرات مقدار بار یا به عبارتی افزایش تکانه انتقالی به ورق و به‌تبع آن تغییر نرخ سرعت تغییر شکل بررسی‌شده است. لازم به ذکر است که برای هر گروه آزمایش انجام‌شده چند سطح تکانه متفاوت در نظر گرفته‌شده است.

Fig. 4 tensile testing machine

شکل 4 دستگاه تست کشش

Fig. 5 test samples

شکل 5 نمونه های آزمایش شده

جدول 2 خواص مکانیکی ورق‌های فولادی

Table 2 mechanical properties of steel plates

جنس ورق	میانگین تنش نهایی (MPa)	میانگین تنش تسلیم (MPa)	مدول الاستیسیته (MPa)	چگالی ($\frac{kg}{m^3}$)	ضریب پواسون
فولاد	370	305	210	7861	0.3

به‌طوری‌که برای هر ارتفاع با تغییر دادن جرم چکش پرتابه‌ای نقش تغییر تکانه در ارتفاع برابر و به‌تبع آن سرعت اولیه برابر روی شکل‌دهی ورق‌های مثلثی در نظر گرفته‌شده است. با توجه به رابطه بدیهی (1) ، با صرف‌نظر از اصطکاک قطعات درگیر آزمایش، تکانه اولیه برای تغییر شکل به دست می‌آید.

$$\begin{cases} P = Mv \\ U = MgH \end{cases} \quad ; \quad v = \sqrt{2gH} \qquad (1)$$

که در این رابطه M جرم چکش پرتابه، v سرعت اولیه و H ارتفاع آن و g شتاب گرانش زمین در سطح دریا است. همین‌طور در شکل 6 نمودار مربوط به خیز مرکز ورق‌های مثلثی نسبت به مومنتوم واردشده مشاهده می‌شود.

در شکل بالا تأثیر مستقیم تکانه بر حداکثر خیز ورق‌های مثلثی فولادی مشخص می‌شود.

در شکل‌های 7 و 8 نمونه ورق‌های تحت آزمایش و شکل 9 مود تخریب آزمایش‌های شماره 8 و 10 را نشان می‌دهد.

در جدول 3 نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام‌شده تحت بارگذاری با تکانه‌های مختلف ارائه‌شده است.

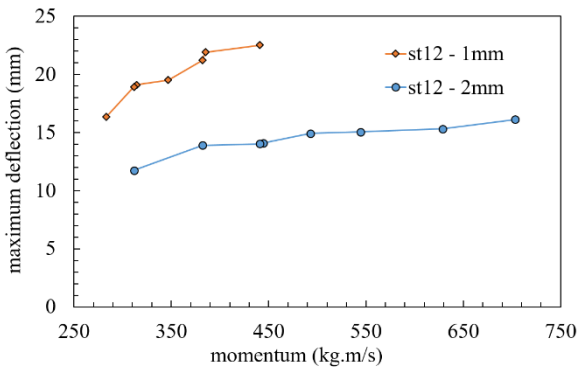

Fig. 6 maximum deflection of plates

شکل 6 حداکثر خیز ورق

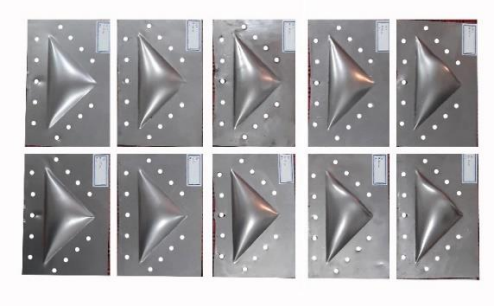

Fig. 7 samples of formed plates (1mm)

شکل 7 نمونه ورق‌های شکل‌گرفته (1 میلی‌متر)

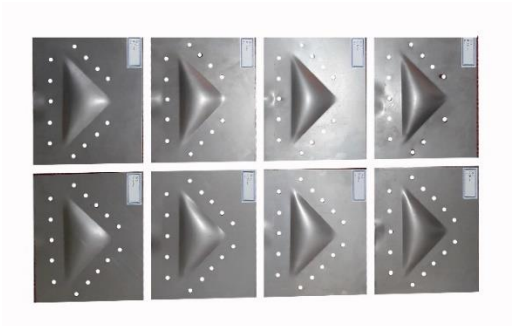

Fig. 8 samples of formed plates (2mm)

شکل 8 نمونه ورق‌های شکل‌گرفته (2 میلی‌متری)

جدول 3 نتایج حاصل از بررسی تجربی

Table 3 the results of the experimental study

نوع ورق	شماره آزمایش	ارتفاع چکش (cm)	جرم چکش (kg)	تکانه $(\frac{kgm}{s})$	خیز بیشینه ورق نسبت به ضخامت آن $(\frac{w_0}{t})$
فولاد 1	1	200	70.4	441	22.5
	2	75	100.4	385.1	21.9
	3	150	70.4	381.9	21.21
	4	75	90.4	346.7	19.51
	5	50	100.4	314.4	19.1
	6	100	70.4	311.8	18.93
	7	50	90.4	23.1	16.34
	8	250	70.4	493	پاره گی
	9	150	100.4	544.6	پاره گی
	10	100	100.4	444.7	پاره گی
فولاد 2	11	250	100.4	703.1	8.06
	12	200	100.4	628.9	7.56
	13	150	100.4	544.6	7.52
	14	250	70.4	493	7.45
	15	100	100.4	444.7	7.05
	16	200	70.4	441	7.01
	17	150	70.4	381.9	6.95
	18	100	70.4	3118	5.86

همان‌طور که در شکل 9 مشاهده می‌شود، با بررسی تست‌هایی که در آن‌ها پارگی به وجود آمد می‌توان نتیجه گرفت که در قالب مثلثی تمرکز تنشی به وجود آمده در لبه‌های ورق، عامل اصلی پارگی هاست.

3- شبیه‌سازی عددی

پس از انجام کلیه آزمایش‌هایی که در بخش قبل چگونگی آن‌ها به تفضیل بیان گردید، در این فصل هدف بر این است که با شبیه‌سازی‌های عددی، شرایطی را فراهم آورد که علاوه بر مدل‌سازی نتایج تجربی، با مطالعه بر روی عوامل مؤثر بر آزمایش، بتوان شرایط بهینه‌ای را برای آزمایش‌ها بدست آورد.

3-1- فرمول‌بندی روش هیدرودینامیک ذرات هموار

Fig. 9 damage mode

شکل 9 مود تخریب

هیدرودینامیک ذرات هموار، روشی بدون شبکه‌بندی و بر پایه‌ی درون‌یابی است که با استفاده از مجموعه سیستم ذرات، به بررسی حالت سیستم و پیش‌بینی میدان‌هایی مانند جابجایی، سرعت، تنش، چگالی و فشار می‌پردازد. در این روش انتگرال هر یک از این میدان‌ها Q_m، برای هرکدام از ذره‌ها (ذره mام)، تا ذره‌های مجاور ارائه می‌شود.

$$Q_m = \int Q_n W(r_{mn}, h)\, dV \qquad (2)$$

که در این معادله W، تابع هموار یا کرنل نامیده می‌شود. h نشان‌دهنده‌ی فاصله همواری است که دامنه تأثیر ذره را مشخص می‌کند. همچنین r_{mn} نشان‌دهنده‌ی فاصله بین هر ذره با ذرات مجاور و V بیانگر حجم است. تابع کرنل شامل چند شرط، از جمله نرمال بودن، شرط دلتای دیراک و فشردگی می‌شود. معادلات زیر شرط‌های مذکور را به ترتیب نشان می‌دهد.

$$\int W(r_{mn}, h)\, dv = 1 \qquad (3)$$

$$\lim_{h \dots 0} W(r_{mn}, h) = \delta_{mn} = \begin{cases} 1, & m = n \\ 0, & m \neq n \end{cases} \qquad (4)$$

$$W = 0 \;\; ; \; |r_{mn}| \geq \alpha h \qquad (5)$$

در معادله آخر α، بیانگر ثابتی است که با توجه به تابع کرنل در نظر گرفته‌شده محدوده اثر این تابع را مشخص می‌کند. تعداد زیادی تابع هموار وجود دارد که برای نمونه می‌توان به تابع زنگوله شکل، تابع گاوسی، مکعبی-لبه ای و سایر توابع مرتبه‌ی بالاتر اشاره کرد. مقدار α برای تابع مکعبی-لبه ای برابر 2 در نظر گرفته می‌شود. در شکل 10 نمای شماتیک و در زیر شکل، رابطه این تابع مشخص‌شده است.

$$W(r_{mn}, h) = \frac{N(i)}{h^i} \begin{cases} 1 - \frac{3}{2}\alpha^2 + \frac{3}{4}\alpha^3 & |\alpha| \leq 1 \\ \frac{1}{4}(2-\alpha)^3 & 1 < |\alpha| \leq 2 \\ 0 & 2 < |\alpha| \end{cases} \qquad (6)$$

در این معادله $\alpha = \frac{r_{mn}}{h}$ و $N(i)$، ضریب نرمال کننده تابع کرنل است. عبارت مربوط به $N(i)$، در رابطه زیر مشاهده می‌شود.

$$N(i) = \left\{\frac{2}{3}, \frac{10\Pi}{7}, \frac{1}{\Pi}, \frac{70\Pi^2}{31}, \frac{5\Pi^2}{31}\right\} \;;\; i = 1, \dots, 5. \qquad (7)$$

شکل 11 نمای شماتیکی سیستم ذرات و دامنه تأثیر میدان مشخص‌شده در این روش را نشان می‌دهد.

رابطه‌ی شماره (2) را می‌توان به فرم گسسته‌ی زیر نوشت:

$$Q_m = \sum_{n=1}^{N_n} Q_n W(r_{mn}, h)\, V_n \qquad (8)$$

در این عبارت، N_n، تعداد ذره‌های مجاور ذره n ام و V، مشخص‌کننده حجم است.

$$\rho_n = \frac{M_n}{V_n} \qquad (9)$$

با جایگذاری رابطه‌ی مربوط به چگالی در رابطه (9) عبارت زیر بدست می‌آید:

$$Q_m = \sum_{n=1}^{N_n} Q_n W(r_{mn}, h) \frac{M_n}{\rho_n} \qquad (10)$$

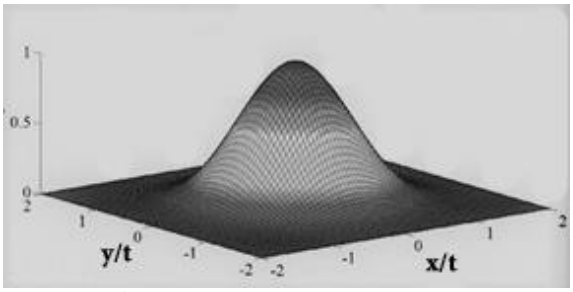

Fig. 10 kernel function

شکل 10 نمودار تابع کرنل

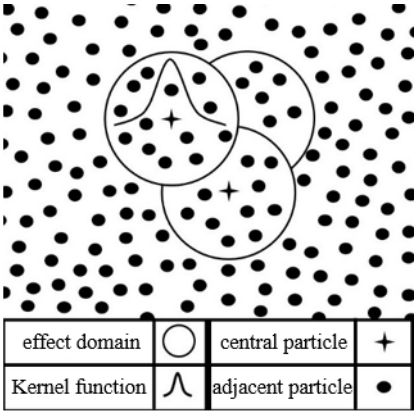

Fig. 11 schematic view of system of particles and field effect domain

شکل 11 نمای شماتیکی سیستم ذرات و دامنه تأثیر میدان

M_n و ρ_n به ترتیب برابر با وزن و چگالی ذره n ام است.

با وجود الگوریتم محاسباتی دینامیک ذرات هموار در نرم‌افزار المان محدود آباکوس/صریح، امکان مدل‌سازی سیال واسط با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار فراهم‌شده است.

3-2- مدل‌سازی کوپل شده فرآیند شکل‌دهی ورق تحت بارگذاری هیدرودینامیکی

در این پژوهش با مدل‌سازی آزمایش در نرم‌افزار اباکوس/صریح نسخه 2016، ذرات سیال(آب) و المان‌های ورق تحت بارگذاری،کوپل می‌شوند.

3-2-1-هندسه و المان بندی

المان‌های موجود در کتابخانه نرم‌افزار آباکوس برای انواع مختلف مدل‌های هندسی، استفاده می‌شود. در این مدل‌سازی المان‌ها برای ورق تحت بارگذاری، هشت نقطه‌ای مکعبی (C3D8) و (C3D8R) که معرف المان‌های کاملاً یکپارچه و المان با فرمول‌بندی کاهش‌یافته با قابلیت کنترل پدیده ساعت شنی هستند، انتخاب می‌شوند. هر گروه از المان‌های موجود در نرم‌افزار اباکوس از یک فرمول‌بندی ویژه برخوردار است و حل اجزا محدود را بر اساس آن انجام می‌دهند. مرتبه المان و نحوه انتگرال‌گیری عددی، تأثیر مستقیمی بر دقت جواب‌های ایجادشده در یک تحلیل دارد. المان‌های کاملاً یکپارچه به تعداد نقاط گاوس موردنیاز برای انتگرال‌گیری چندجمله‌ای‌های موجود در ماتریس سختی یک المان با گوشه‌های راست بازمی‌گردد. گوشه‌های راست به معنی صاف بودن لبه‌ها و قائم بودن زوایای المان بوده و تمامی گره‌های موجود روی لبه‌ها باید درست در وسط آن قرار داشته باشند. با توجه به پدیده قفل‌شدگی برشی، این گروه از المان‌ها باید در بارگذاری‌هایی که خمش حداقل باشد مورداستفاده قرار بگیرند. ازاین‌رو ارائه یک راهکار جایگزین باهدف تحلیل مسائل خمشی ضروری به نظر می‌رسد. یکی از پیشنهادهای موجود، استفاده از المان‌هایی است که نقاط انتگرال‌گیری در آن‌ها کاهش‌یافته و با نام انتگرالی کاهش یافته شناخته می‌شوند. شکل 12 نمای شماتیکی این دو المان را نشان می‌دهد.

برخی از المان‌ها مانند المان‌های تماسی، کوپل توزیعی، المان‌های ذره‌ای و ...در محیط نرم‌افزار پشتیبانی نمی‌شوند و باید در محیطی خارج از ماژول مش ایجاد شوند. برای استفاده از این نوع المان‌ها در فرآیند حل مسئله باید از فایل آی.ان.پی ایجادشده در ماژول جاب استفاده کرد. نرم‌افزار آباکوس برای مدل‌سازی آب با روش هیدرودینامیک ذرات هموار از المان‌های ذره‌ای استفاده می‌کند. شکل 13 نمای کلی ذرات مدل شده با این روش را نشان می‌دهد.

سایر قسمت‌های آزمایش مانند محفظه آب، پیستون و ورق گیر به‌صورت صلب مدل و با مشخص کردن ابعاد المان، به‌طور مناسب المان بندی می‌شوند. لازم به ذکر است که اعضای صلب به‌صورت گسسته مدل شده‌اند زیرا در مسائل شکل‌دهی فلزات به دلیل شرایط تماسی بین اعضا، نیاز است که اعضای صلب نیز المان بندی شوند. ورق به‌صورت جامد و تغییر شکل‌پذیر در قسمت هندسه‌ی نرم‌افزار شبیه‌سازی می‌شود. شکل 14 نشان‌دهنده المان بندی مربوطه است.

3-2-2- مدل‌سازی بارگذاری و برهم‌نهی

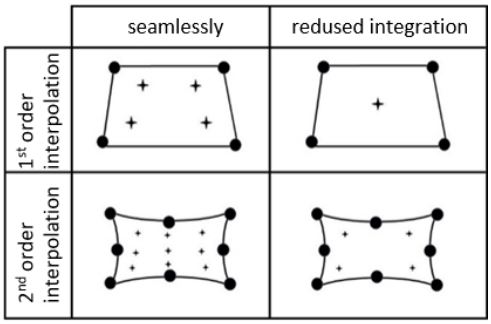

Fig. 12 seamlessly and reduced integration element

شکل 12 المان کاملاً یکپارچه و کاهشی

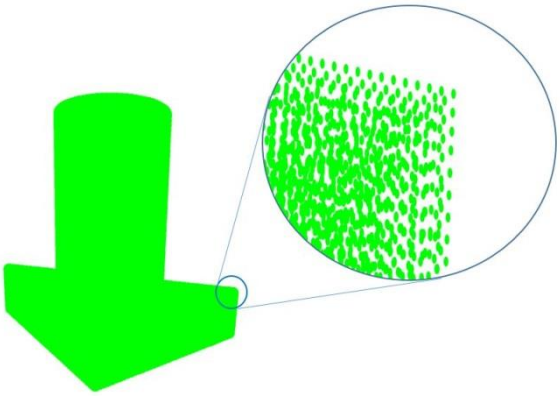

Fig. 13 modeled particles with SPH method

شکل 13 ذرات مدل شده با روش هیدرودینامیک ذرات هموار

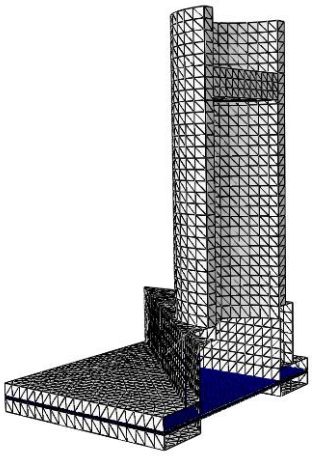

Fig. 14 the body of the system and plate meshing

شکل 14 المان بندی بدنه سامانه و ورق

با توجه به نوع آزمایش انجام‌شده (رها کردن چکش از ارتفاع مشخص برای شکل‌دهی ورق) پارامترهای در دسترس برای حل مسئله انرژی، جرم و سرعت چکش پرتابه‌ای در لحظه‌ی برخورد است. با توجه به اینکه نرخ کرنش در مسائل مربوط به شکل‌دهی ورق از اهمیت خاصی برخوردار است. در نظر گرفتن پارامتر سرعت به‌عنوان یکی از ورودی‌های حل مسئله مناسب است. انتخاب این پارامتر به‌تنهایی منجر به شبیه‌سازی ناقص می‌شود. در دو آزمایش که چکش با جرم متفاوت از ارتفاع یکسان رها می‌شود، این کاستی را نشان می‌دهد. به‌طوری‌که در این دو آزمایش سرعت‌ها یکسان اما تغییر شکل نهایی ورق متفاوت است. با در نظر گرفتن تمامی پارامترهای قابل‌اندازه‌گیری در آزمایش، انتخاب تکانه به‌عنوان ورودی نرم‌افزار مناسب است. با نسبت دادن جرم به چکش و تعیین سرعت اولیه در لحظه‌ی برخورد که از رابطه (11) بدست می‌آید، آزمایش انجام‌شده به‌طور دقیق شبیه‌سازی می‌شود.

$$v = \sqrt{2gH} \tag{11}$$

در این رابطه v سرعت چکش در لحظه برخورد با پیستون، H ارتفاع چکش و g شتاب گرانش زمین است.

لازم به توضیح است که اگر مسئله شامل تماس بین قطعات، برهمکنش بین اجزا، مقیدسازی درجات آزادی، تعریف رابطها و قیود باشد، استفاده از ماژول برهم‌نهی قادر به تعیین پارامترهای گفته‌شده است. آباکوس تنها در صورتی تماس بین دو یا چند عضو با یکدیگر را تشخیص می‌دهد که پیش از آن کاربر در ماژول برهم‌نهی، خواص مکانیکی تماس، قطعات درگیر و سایر ویژگی‌های موردنظر را تعریف کرده باشد. برهم‌کنش بین قطعات مختلف سیستم، همین‌طور سطوح قطعات باهم، با ضریب اصطکاک 0.1 تعریف‌شده است.

3-2-3-نتایج شبیه‌سازی عددی

در ادامه به بررسی خیز و توزیع تنش بر روی ورق و همچنین چگونگی حرکت ذرات سیال پرداخته می‌شود. در شکل 15 نمودار نسبت خیز به ضخامت ورق در نمونه‌های شبیه‌سازی‌شده و تجربی ارائه‌شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود نتایج حاصل از شبیه‌سازی تطابق قابل قبولی با نتایج تجربی دارد.

در شکل 16 و 17 دو نمونه از ورق‌های شبیه‌سازی‌شده ارائه گردیده است.

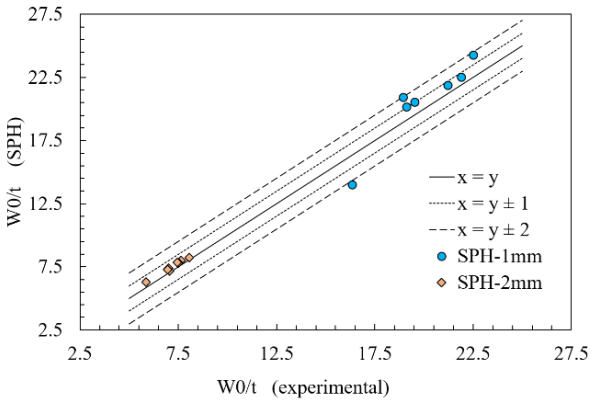

Fig. 15 comparison of deformation to thickness ratio in experimental and numerical results

شکل 15 مقایسه نسبت خیز به ضخامت بدست آمده از شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی

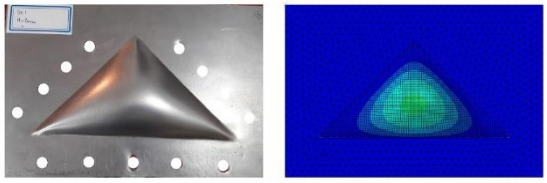

Fig. 16 numerical and experimental result – test1

شکل 16 نمونه شبیه‌سازی‌شده و تست تجربی شماره 1

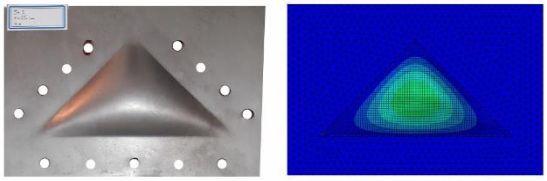

Fig. 17 numerical and experimental result – test11

شکل 17 نمونه شبیه‌سازی‌شده و تست تجربی شماره 11

در شکل‌های 18 و 19 به ترتیب، توزیع تنش بر روی ورق و نحوه جریان یافتن سیال درون محفظه برای تست شماره 1 در بازه‌های زمانی مختلف رسم شده است. همان‌طور که در تصاویر مشخص است تمرکز تنش در ضلع‌هایی که ساق‌های مثلث محسوب می‌شوند اتفاق می‌افتد که این موضوع با توجه به پارگی ورق از این ناحیه‌ها در تست‌های تجربی کاملاً قابل پیش‌بینی بود. در طرف دیگر مشاهده می‌شود در گوشه‌های انتهایی قاعده مثلث که در دورترین فاصله نسبت به مرکز دایره محاطی (محیط دایروی سیلندر به حوضچه مثلثی محاط شده است) قرار دارند به دلیل پایین بودن سرعت سیال و به‌تبع آن نیرویی که به این قسمت‌ها وارد می‌شود، در ورق تمرکز تنش ایجاد نشده و همچنین تغییر شکل بسیار ناچیز است.

در نمودار شکل‌های 20 و 21 پروفیل نهایی سطح ورق‌ها در امتداد ارتفاع مثلث، برای تمام آزمایش‌ها رسم شده است. شایان‌ذکر است که مطابق آنچه انتظار می‌رفت، بیشینه خیز در نقطه‌ای بین مرکز ثقل ورق (محل تلاقی میانه‌ها) و محل تلاقی نیمسازهای مثلث که بر مرکز دایره محاطی نیز منطبق است، رخ می‌دهد.

4- نتیجه‌گیری

4-1- نتایج بخش تجربی

نتایج خروجی در بخش تجربی، نشان‌دهنده این است که خیز بیشینه ورق

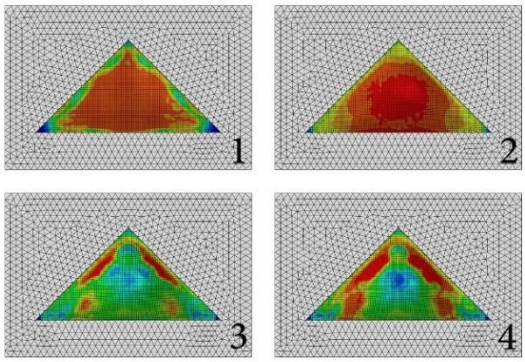

Fig. 18 stress distribution on plate in 4 steps – test1

شکل 18 توزیع تنش بر روی ورق در 4 زمان مرحله – تست1

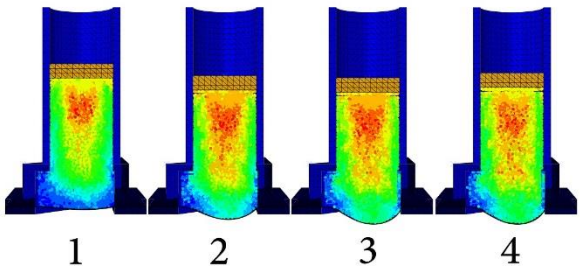

Fig. 19 fluid flow in cylinder in 4 steps – test1

شکل 19 جریان سیال درون سیلندر در 4 مرحله - تست 1

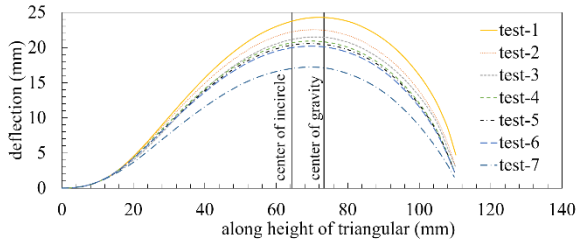

Fig. 20 deformation along height of triangular – 1mm

شکل20 نمودار جابجایی در راستای ارتفاع مثلث برای ورق 1 میلی‌متری

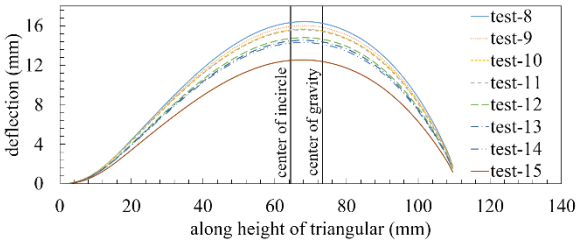

Fig. 21 deformation along height of triangular – 2mm

شکل21 نمودار جابجایی در راستای ارتفاع مثلث برای ورق 2 میلی‌متری

بعد از شکل‌دهی، تابع تکانه اعمالی به آن بوده و با افزایش تکانه، خیز بیشینه نیز افزایش می‌یابد. نتیجه دیگری که از آزمایش‌های تجربی به دست می‌آید، مشخص‌شدن محل وقوع تمرکز تنش در ورق‌ها است. با توجه به پاره شدن ورق از ناحیه ساق‌های مثلث می‌توان نتیجه گرفت که مشخصاً این نقاط محل ایجاد تمرکز تنش بوده که این امر در نتایج به‌دست‌آمده در بخش شبیه‌سازی عددی نیز مشهود است.

4-2- نتایج شبیه‌سازی عددی

مطابقت نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی، خود گواهی بر صحت شبیه‌سازی‌های انجام‌شده است. همچنین در این بخش به بررسی توزیع تنش بر روی سطح ورق، چگونگی حرکت ذرات سیال داخل محفظه و پروفیل نهایی سطح ورق پرداخته شد. در نمودار مربوط به توزیع تنش، همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، با گذشت زمان فرآیند شکل‌دهی، تنش‌های بیشینه در ساق‌های مثلث متمرکز شده که محل ایجاد پارگی در ورق‌ها است. با بررسی حرکت ذرات سیال درون محفظه مشخص می‌شود که سرعت ذرات و به‌تبع آن تکانه‌ای که در مرز تماسی سیال با ورق بین آن‌ها منتقل می‌شود در زاویه‌های ساق مثلث ناچیز بوده که این خود دلیلی بر تغییر شکل اندک ورق در این نقاط است. همچنین بعد از مقایسه پروفیل نهایی تغییر شکل ورق در امتداد ارتفاع مثلث، مشخص می‌شود که محل ایجاد بیشینه خیز، نقطه‌ای بین مرکز ثقل مثلث و مرکز دایره محاطی است.

5- فهرست علائم

E	مدول الاستیسیته (Mpa)
g	شتاب گرانش(ms^{-2})
h	فاصله هموار
H	ارتفاع(m)
M	جرم(kg)
$N(i)$	ضریب نرمال کننده
Q	میدان
r	فاصله(m)
t	ضخامت (mm)
v	سرعت (ms^{-1})
V	حجم
W	تابع کرنل

علائم یونانی

ρ	چگالی (kgm^{-3})
σ	تنش
ν	ضریب پواسون
α	ثابت

زیرنویس‌ها

m	ذره
n	ذره
mn	متغیر بین دو ذره

6- مراجع

[1] M. Tollner and G. Nurick, Predictions of stiffened circular plates subjected to impulsive loads, *ASME-PUBLICATIONS-PVP*, Vol. 394, pp. 137-150, 1999.

[2] S. H. Zhang, K. B. Nielsen, J. Danckert, D. C. Kang, L. H. Lang, Finite element analysis of the hydromechanical deep-drawing process of tapered rectangular boxes, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 102, No. 1-3, pp. 1-8, 2000.

[3] M. Zampaloni, N. Abedrabbo, F. Pourboghrat, Experimental and numerical study of stamp hydroforming of sheet metals, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 45, No. 11, pp. 1815-1848, 2003.

[4] S. C. K. Yuen, G. Nurick, Experimental and numerical studies on the response of quadrangular stiffened plates, Part I: Subjected to uniform blast load, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 31, No. 1, pp. 55-83, 2005.

[5] G. Palumbo, S. H. Zhang, L. Tricarico, C. Xu, L. X. Zhou, Numerical/experimental investigations for enhancing the sheet hydroforming process, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, No. 11, pp. 1212-1221, 2006.

[6] N. K. Gupta, Nagesh, Deformation and tearing of circular plates with varying support conditions under uniform impulsive loads, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 34, No. 1, pp. 42-59, 2007.

[7] H. Babaei, A. Darvizeh, 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.

[8] H. Gharababaei, N. Nariman-Zadeh, A. Darvizeh, A simple modelling method for deflection of circular plates under impulsive loading using dimensionless analysis and singular value decomposition, *Journal of Mechanics*, Vol. 26, No. 3, pp. 355-361, 2010.

[9] H. Babaei, A. Darvizeh, M. Alitavoli, T. Mirzababaie Mostofi, Experimental and analytical investigation into plastic deformation of circular plates subjected to hydrodynamic loading, *Journal of Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 305-312, 2015. (In Persian فارسی)

[10] H. Babaei, T. Mirzababaie Mostofi, M. Alitavoli, Experimental study and analytical modeling for inelastic response of rectangular plates under hydrodynamic loads, *Journal of Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 361-368, 2015. (In Persian فارسی)

[11] 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*, Vol. 58, No.1, pp. 139-147, 2017.

[12] M. Lavoie, A. Gakwaya, M. N. Ensan, Application of the SPH method for

[17] V. Mehra, S. Chaturvedi, High velocity impact of metal sphere on thin metallic plates: a comparative smooth particle hydrodynamics study, *Journal of Computational Physics*, Vol. 212, No. 1, pp. 318-337, 2006.

[18] K. Shintate, H. Sekine, Numerical simulation of hypervelocity impacts of a projectile on laminated composite plate targets by means of improved SPH method, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 35, No. 6, pp. 683-692, 2004.

[19] L. Lobovský, P. Groenenboom, Smoothed particle hydrodynamics modelling in continuum mechanics: fluid-structure interaction, *Applied and Computational Mechanics*, Vol. 3, No. 1, pp. 101-110, 2009.

[20] S. Hosseini, N. Amanifard, Presenting a modified SPH algorithm for numerical studies of fluid-structure interaction problems, *International Journal of Engineering Transactions B: Applications*, Vol. 20, No. 2, pp. 167-178, 2007.

[21] S. Potapov, B. Maurel, A. Combescure, J. Fabis, Modeling accidental-type fluid–structure interaction problems with the SPH method, *Computers & Structures*, Vol. 87, No. 11-12, pp. 721-734, 2009.

[22] C. Antoci, M. Gallati, S. Sibilla, Numerical simulation of fluid–structure interaction by SPH, *Computers & Structures*, Vol. 85, No. 11-14, pp. 879-890, 2007.

simulation of aerospace structures under impact loading, *Proceedings of the 10th International LSDYNA Users Conference*, Dearborn, Michigan, June, 8-10, 2008.

[13] H. H. Bui, R. Fukagawa, K. Sako, S. Ohno, Lagrangian meshfree particles method (SPH) for large deformation and failure flows of geomaterial using elastic–plastic soil constitutive model, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 32, No.12, pp. 1537-1570, 2008.

[14] Z. Liu, S. Swaddiwudhipong, C. Koh, High velocity impact dynamic response of structures using SPH method, *International Journal of Computational Engineering Science*, Vol. 5, No. 2, pp. 315-326, 2004.

[15] M. Liu, G. Liu, Z. Zong, K. Lam, Computer simulation of high explosive explosion using smoothed particle hydrodynamics methodology, *Computers & Fluids*, Vol. 32, No. 3, pp. 305-322, 2003.

[16] H. H. Bui, K. Sako, R. Fukagawa, J. Wells, SPH-based numerical simulations for large deformation of geomaterial considering soil-structure interaction, *The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)*, Goa, India, October, 1-6, 2008.