



Journal of Aerospace Mechanics

DOR: ...



### Using Coupled Eulerian-Lagransian Method in the Analysis of the Highspeed Forming Process of Metal Plates with Female Die

## Mohammad Kouzehgaran<sup>1</sup>, Hossein Khodarahmi <sup>1</sup><sup>02</sup>, Milad Sadegh-Yazdi <sup>1</sup><sup>3\*</sup>, Mojtaba Ziya-Shamami <sup>1</sup><sup>3</sup>, Tohid Mirzababaie Mostofi <sup>1</sup><sup>4</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Student, Faculty of Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Professor, Faculty of Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Assistant Professor, Faculty of Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

<sup>4</sup> Assistant Professor, Faculty of Electrical, Mechanical and Computer Engineering, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran

#### HIGHLIGHTS

- Numerical simulation of the behavior of metallic plates in the high-speed forming process with a female die
- No observation on the fluctuations and the phenomenon of springback after the transient deformation of the sample
- No observation of reverse deformation or reduction of central deformation in repeated loading

#### ARTICLE INFO

Article history: Article Type: Research paper Received: 9 April 2024 Received in revised form: 29 April 2024 Accepted: 11 May 2024 Available online: 8 June 2024 \*Correspondence: msadeghy@ihu.ac.ir

How to cite this article:

M. Kouzehgaran. H. Khodarahmi, M. Sadegh-Yazdi, M. Ziya-Shamami, T.M. Mostofi. Female Using Coupled Eulerian-Lagransian Method in the Analysis of the High-speed Forming Process of Metal Plates with Female Die and without Central Venting Hole. Journal of Aerospace Mechanics. 2025; 21(1):1-27.

Keywords: Die forming Female die Venting hole Repeated underwater explosion Numerical simulation Coupled Eulerian-Lagrangian method

#### GRAPHICAL ABSTRACT



#### ABSTRACT

In this article, the numerical simulation of the behavior of metallic plates in the process of high-speed forming with female die is discussed. Also, the repeated underwater explosive loading was applied to the sample so that 4 and 8 gr of explosive charge were used in the 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> blast, respectively. In the following, the Coupled Eulerian-Lagrangian method along with Johnson-Cook viscoplasticity model was used for the numerical simulation of the process. The numerical model was validated using the experiments conducted in Ref [1]. It was shown that the numerical model well shows the deformation profile as well as the thickness distribution in the longitudinal direction of the plate. Using the validated numerical model, quantities such as changes in horizontal deformation velocity and vertical deformation velocity, pressure, stress and JC damage criteria in the radial direction of the plate were investigated. The results showed that unlike the results obtained for explosive forming in the previous references, the test specimen in the 1st and 2<sup>nd</sup> blasts after passing through the transient deformation area does not undergo fluctuations or so-called springback phenomenon and its value quickly approaches the maximum amount (depth of the female die). Also, after hitting the die, the plate does not experience the reverse deformation or reduction of the deformation. The cause of this issue can be found in the appropriate selection of the amount of the charge mass of the and also the use of the female die. Therefore, it is very efficient to use the idea of a female die without central venting hole for forming metals under repeated underwater explosive loading.

This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hossein University

© Authors





نشريه مكانيك هوافضا

DOR: ....



## استفاده از روش کوپل اویلری-لاگرانژی در تحلیل فرآیند شکلدهی سرعتبالای ورقهای فلزی با قالب مادگی

محمد کوزه گران<sup>۱</sup>، حسین خدار حمی<sup>۲۵</sup>، میلاد صادق یزدی<sup>۳۵</sup>»، مجتبی ضیاءشمامی<sup>۳۵</sup>، توحید میرزابابای مستوفی<sup>۴</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه امام حسین<sup>۵</sup>، تهران، ایران ۲استاد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه امام حسین<sup>(ع)</sup>، تهران، ایران ۳استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه امام حسین<sup>(ع)</sup>، تهران، ایران ۴استادیار، دانشکده مهندسی برق، مکانیک و کامپیوتر، دانشگاه ایوان کی، ایوان کی، ایوان کی، ایران



مڪانيڪِ ه<u>وافضا</u>



#### چکیدہ

در مقاله حاضر به شبیه سازی عددی رفتار ورق های فلزی در فرآیند شکل دهی سرعت بالا با قالب مادگی نمونه پرداختهشده است. همچنین از روش بارگذاری انفجاری مکرر زیرآب جهت اعمال بار به نمونه بهره گرفتهشده بهطوری که در بارگذاری اول و دوم به ترتیب از ۴ و ۸ گرم ماده منفجره استفادهشده است. در ادامه، از روش کوپل اویلری-لاگرانژی به همراه مدل ساختاري ويسكوپلاستيسيته جانسون-كوك جهت شبيهسازي عددي فرآيند بهره گرفته شد. مدل عددی با استفاده از آزمایشهای انجامشده در مرجع [۱] صحتسنجی شد. نشان داده شد که مدل عددی بهخوبی گستره تغییر شکل و همچنین نحوه توزیع ضخامت در راستای طولی ورق را ایجاد میکند. با استفاده از مدل عددی صحتسنجی شده، كميتهايي نظير تغييرات سرعت تغييرشكل افقي و سرعت تغيير شكل عمودي، فشار، تنش و معیار آسیب در راستای شعاعی ورق بررسی شد. نتایج نشان داد که برخلاف نتایج بهدستآمده برای شکلدهی انفجاری در مراجع پیشین، نمونه آزمایشی در بارگذاری اول و دوم پس از طی کردن ناحیه تغییرشکل گذرا دچار نوسانات یا اصطلاحاً پدیده بازگشت فنری نمی شود و مقدار آن سریعاً به میزان بیشینه (عمق قالب مادگی) نزدیک می گردد. همچنین، ورق پس از برخورد با قالب دچار تغییرشکل وارون یا کاهش میزان تغییرشکل نمی گردد. علت این مسئله را میتوان در انتخاب مناسب میزان جرم خرج و همچنین استفاده از قالب مادگی جستجو کرد. لذا استفاده از ایده قالب مادگی بدون راهگاه برای شکلدهی فلزات تحت بارگذاری انفجاری مکرر زیرآب بسیار کارآمد است.

#### برجستهها

- شبیهسازی عددی رفتار ورقهای فلزی
   در فرآیند شکلدهی سرعتبالا با قالب
   مادگی نمونه
- عدم مشاهده نوسانات و پدیده بازگشت فنری پس از تغییرشکل گذرای نمونه
- عدم تغییرشکل وارون یا کاهش میزان
   تغییرشکل مرکزی در بارگذاری مکرر

#### مشخصات مقاله

تاريخچه مقاله:
نوع مقاله: علمی پژوهشی
دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۱
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۱۰
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۲
ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۳/۱۹
*نویسنده مسئول:
msadeghy@ihu.ac.ir
۔ کلیدواژہھا:
شکلدھی با قالب
قالب مادگی
انفجار مكرر زيرآب
شبیەسازی عددی
روش کوپل اویلری-لاگرانژی
سرعت تغييرشكل

\* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز CC BY) Creative Commons Attribution) توزیعشده است. **ناشر**: دانشگاه جامع امام حسین<sup>(ع)</sup>



#### ۱– مقدمه

انفجار زیرآب پدیدهای فیزیکی است که در جریان آن به دلیل واکنشهای شیمیایی، ماده منفجره زیر سطح آب منفجر می شود. در طول این انفجار، امواج فشاری و حباب گاز ایجاد خواهد شد. هنگام انفجار، موجی به نام موج فشار شکل می گیرد و درصورتی که سرعت این موج بیشتر از سرعت صوت شود، به آن موج شوک می گویند. انواع آلیاژهای جدید (بهعنوانمثال آلیاژهای نیکل و تیتانیوم) و همچنین قطعات پیچیده در صنایعی چون هوافضا با روشهای معمولی ساخته نمیشدند، این نیاز، منجر به ارائه روشی خاصی با عنوان روشهای شکلدهی سرعتبالا شد [1]. روشهای شکلدهی سرعتبالا عموماً شامل سه روش انفجاری، هیدروالکتریکی و الکترومغناطیسی میشود. در روش هیدروالکتریکی و الکترومغناطیسی از انتشار ناگهانی انرژی (انرژی الکتریکی ذخیرهشده در خازنها) برای شکلدهی نمونه استفاده می شود؛ اما در روش شکل دهی انفجاری، شکلدهی مواد توسط فشار ناگهانی ناشی از انفجار یک ماده شیمیایی است. فشار موج شوک و هندسه موج ناشی از مخزنهای فشار استفادهشده، باعث می شود تا نمونه شکل قالب را به خود بگیرد. از یک محیط واسط سیال مانند آب بهمنظور انتقال انرژی بیشتر و فشار یکنواخت تر استفاده می شود [۶–۲]. در روش شکل دهی انفجاری زیر آب ماده منفجره در درون مخزن فشار پر از آب قرار می گیرد و توسط یک چاشنی الکتریکی منفجر می شود. موج شوک زیرآب از طريق محيط آب انتشار مىيابد و به نمونه مىرسد و باعث تغییر شکل آن می شود [۷]. اگر از قالب فلزی استفاده شود، نمونه به فرم مشخص تغییر شکل میدهد. به طور کلی، نمونه در شکلدهی انفجاری دارای برگشت فنری کمی است، زیرا تغییرشکل پلاستیک کافی به دست میآید. دو فشار بر روی نمونه تحت شكل دهى انفجارى اعمال مى شود، اولين پالس فشار از بارگذاری موج شوک است و پالس فشار دوم ناشی از انبساط حباب توليدشده توسط انفجار ماده منفجره است. مدتزمان پالس فشار ثانویه بیشتر است، اما بیش فشار كمترى از بيش فشار پالس فشار اوليه دارد. شدت پالس فشار بر اساس شرایط مخزن فشار است. هندسه تغییر شکل

نمونه تحت تأثیر شکل توزیع بارگذاری موج شوک قرار دارد. روش شکلدهی انفجاری همچنین میتواند بهصورت آزاد (بدون استفاده از مخزن فشار) مورداستفاده قرار گیرد [۳, ۱۰-۸].

بهطورکلی پژوهشهای انجامشده در زمینه انفجار زیرآب با دو رویکرد اصلی صورت گرفته است. رویکرد اول بررسی استحکام نمونه در برابر انفجار بهمنظور مقاومسازی سازهها و رویکرد دوم بررسی شکلپذیری نمونه جهت شکلدهی به کمک فرآیند انفجار بوده است. صرفنظر از رویکرد پژوهشهای انجامشده در زمینه اثر انفجار زیرآب روی ورقهای فلزی، با توجه به مشترک بودن ماهیت روابط و تحلیلهای فرآیند انفجار زیرآب، بهرهگیری از همه این مطالعات در راستای بهبود فرآیند شکلدهی انفجاری زیرآب مؤثر خواهد بود.

راجندران و ناراسیمهان [۱۱] پاسخ شوک ورق های تخت دایرهای و چهارگوش تحت انفجار زیرآب را بررسی کردند. آنها دریافتند که در ورقهای دایرهای بیشینه دوم کرنش دینامیکی بزرگتر از بیشینه اول دینامیکی است. علت آن اضافه شدن پالس حباب گاز به ورق است. زمانی و قمصری [۱۲] به بررسی تئوری و تجربی پاسخ پلاستیکی ورقهای دایرهای ایزوتروپیک تحت بارگذاری انفجار زیرآب پرداختند. آنها دریافتند که در یک محدوده خاص از ضربه، بهترین روش تئورى براى پيشبينى رفتار پلاستيكى ورقهاى دایرهای، رابطه تحلیلی جونز [۱۳] است. هادوی و همکاران [۱۴] به بررسی تجربی در مورد تأثیر استفاده از محیط واسط در شکلدهی انفجاری پوستههای لولهای پرداختند. در کار آنها با توجه به تأثیر مهم بهبود روشهای فعلی شکلدهی انفجاری در افزایش کارایی و کنترل روی روش شکل دهی انفجاری، اثرات هوا و آب به عنوان محیط انتقال انرژی و همچنین تفاوتهای آنها نشان دادهشده است. طبق نتایج آنها، اندازه گیری نمونههای آزمایش شده نشان داد که افزایش حجم داخلی با گلویی شدن دیوارهها همراه بوده که درنهایت منجر به پارگی شعاعی سازه میشود. همچنین آنها بهعنوان نتیجهای دیگر از کار خود بیان نمودند که بازده انرژی در شکلدهی انفجاری با محیط واسط

آب ۴ تا ۵ برابر بیشتر از بازده انرژی همان فرآیند در هنگام استفاده از هوا بهعنوان محیط واسط است.

زمانی و همکاران [۱۵] به تحلیل تجربی ورقهای فولادی و آلومینیوم کاملاً گیردار تحت بارگذاری انفجاری در هوا و آب پرداختند. نتایج نشان داد، هنگامی که اثر نرخ کرنش در پاسخ پلاستیکی ورق دایرهای کاملاً گیردار لحاظ شود، پیشبینی نتایج طبق روابط تئوری جونز و نتایج تجربی تطابق بسیار خوبی خواهند داشت. ایاما و همکاران [۱۶] به مطالعه تأثير انتشار موج شوک روی شکلدهی انفجاری پرداختند. آنها در کار خود بهمنظور درک تأثیر پیکربندی مخزن فشار بر تغییرشکل یک ورق فلزی، شبیهسازی عددی انجام دادند. در شبیهسازی صورت گرفته از سه مخزن فشار سهموی، هذلولی و استوانهای استفادهشده است. هانگ و همکاران [۱۷] به بررسی شکست دینامیکی ورقهای فلزی دایرهای تحت بارهای ضربهای زیرآب با پشتی هوا و آب پرداختند. ورق مورد آزمایش آنها آلیاژ آلومینیوم کاملاً گیردار بود. مطابق نتایج آنها ناحیه بارگذاری مهمترین عامل در تغییرشکل عرضی است. نتایج همچنین نشان داد که ورق تحت شرایط پشتی آب، ۵۳ درصد کاهش در حداکثر تغییرشکل ورق در مقایسه با شرایط پشتی هوا داشت. ایاما و ایتوه [۱۸] به مطالعه شکل دهی انفجاری زيرآب آلياژ آلومينيوم پرداختند. در كار آنها شبيهسازى عددی در مورد روند تغییرشکل ورق آلومینیوم با استفاده از روش شکلدهی انفجاری توسط روش المان محدود و با استفاده از مختصات لاگرانژی انجام شد. بین هر دو مقدار فشار موج شوک زیرآب حاصل از نتایج تجربی و شبیهسازی، مطابقت خوبی برقرار شد. رووان و همکاران [۱۹] شکلدهی آلیاژ منیزیم توسط موج شوک زیرآب را بررسی کردند. آنها بهمنظور به دست آوردن بيشترين حد تغييرشكل آلياژ منیزیم و بررسی تغییرات سختی مواد تحت بارگذاری موج شوك زيراب أزمايشهايي طراحي كردند. نتايج تجربي أنها افزایش ضریب کشش و سختی مواد را پس از دریافت موج ضربه نشان داد و مشخص شد که سختی مواد پس از دریافت موج شوک به ۱/۵ برابر افزایش پیدا خواهد کرد.

ویوست و همکاران [۲۰] مدلسازی عددی اثر استفاده از مواد منفجره چندگانه در شکلدهی انفجاری مخروطهای

فولادی را بررسی کردند. آنها شبیهسازی و تحلیل فرآیند شکلدهی انفجاری زیرآب را با استفاده از روشهای FEM و SPH انجام دادند. مطابق نتایج شبیهسازی آنها، یک مدل با چند ماده منفجره همیشه نرخ سریعتری از تغییرشکل هدف را نسبت به حالت ماده منفجره واحد نخواهد داشت. همچنین آنها دریافتند که یک مدل با چند ماده منفجره قادر است از شکست ناشی از رشد ترک در ورق فولادی طی فرآیند شکلدهی جلوگیری کند که در صورت استفاده از يك مدل با ماده منفجره واحد اتفاق خواهد افتاد. اياما و همکاران [۲۱] شبیهسازی عددی شکلدهی انفجاری با استفاده از فیوز انفجاری را بررسی کردند. آنها از روش شبیهسازی اویلری-لاگرانژی دلخواه و معادله حالت مای-گرونژن بهمنظور تشریح فشار آب، معادله حالت جونز-ويكنز لى بهمنظور تشريح رفتار ماده منفجره و همچنين معادله ساختاری جانسون-کوک برای شبیهسازی رفتار نمونه استفاده کردند.

رن و همکاران [۲۲] به بررسی تجربی و عددی رفتار ورق نازک تحت بارگذاری ضربهای زیرآب پرداختند. آنها اثرات ضخامت ورق، بارگذاری ضربهای و اثر کنش سازه-سیال بر حالتهای شکست در ورقهای آلومینیومی نازک را موردمطالعه قراردادند. طبق نتایج کار آنها، در فشارهای پایین، ورقی که دچار تغییرشکل پلاستیک، خمش و کشش بدون پارگی شده است، به مود I شناخته است. در فشارهای میانی، به دلیل پارگی کششی، ورقها به شکل گلبرگ پاره خواهند شد و از آن بهعنوان مود II یادشده است. در فشارهای بالا، شکست برشی که در تکیه گاهها اتفاق می افتد و تغییرشکل نهایی ورق، شبیه به گنبد است که بهعنوان مود III یاد می شود. حشمتی و همکاران [۲۳] به مطالعه تجربی و عددی پاسخ ورقهای دایرهای ایزوتروپیک به بارگذاری انفجاری زیرآب پرداختند. آنها بهمنظور بررسی تأثیر مواد و هندسه ورق فلزی از سه جنس ورق با دو ضخامت متفاوت در آزمایشها تجربی استفاده کردند. همچنین، آنها بهمنظور بررسی اثر بارگذاری انفجاری روی ورقهای فلزی، از یک لوله شوک استفاده کردند. نتایج تحقيق آنها نشان داد با افزايش ضخامت شكل پذيرى ورقهای فلزی کاهش مییابد و تغییر شکل اولیه ورقها که

قبل از رسیدن موج شوک به ورق اتفاق خواهد افتاد، ناشی از فشار هیدرواستاتیک بوده است و به دلیل انبساط ناگهانی مواد منفجره است. ژانگ و همکاران [۲۴] به بررسی انفجار خرج استوانهای زیرآب در نزدیکی ورق، تحلیل خصوصیات فشار و اثرات کاویتاسیون پرداختند. آنها یک نوآوری به جهت استفاده از مزایای روش گلرکین گسسته رانگه-کوتا و المان محدود برای بررسی کاویتاسیون ناشی از امواج رقیق کننده در حین انفجار زیرآب در نزدیکی میدان انفجار پیشنهاد دادند. نتایج آنها نشان داد که وقتی موج شوک به ورق میرسد، یک موج شوک انعکاسی و یک موج شوک انتقالی در آب ایجاد خواهد شد. پسازاینکه موج شوک انعکاسی به حباب با امپدانس مکانیکی پایین برسد، یک موج رقیقکننده تولید خواهد شد و متعاقباً منعکس میشود و درنتیجه یک موج رقیقکننده دیگر تولید خواهد شد. به دلیل برهمنهی این دو موج رقیق کننده، کاویتاسیونی با فشار کم ایجاد خواهد شد.

نیشی و همکاران [۲۵] یک تحقیق در مورد شکلدهی انفجاری ورق آلیاژ منیزیم با استفاده از شبیهسازی عددی و مطالعات تجربي ارائه دادند. مطالعه تجربي آنها روى ورق آلياژ منيزيم AZ31 بهمنظور يافتن شرايط بهينه تجربي صورت گرفت. همچنین آنها برای شبیهسازی عددی از کد انسيس-اتوداين استفاده كردند. نتايج آنها نشان داد هنگامی که زاویه انحراف قالب تند می شود، چین وچروک به سمت محیط ورق میل خواهند کرد. ایاما و همکاران [۲۶] شکلدهی آلیاژ منیزیم را با استفاده از موج شوک زیرآب توسط سيم الكتريكي بررسي كردند. نتايج كار آنها نشان داد هنگام استفاده از مخزن فشار هذلولی بیشترین عمق شکلدهی به دست خواهد آمد و در صورت استفاده از مخزن فشار سهموی، عمق شکلدهی قسمت میانی به حداکثر خواهد رسید. دای و همکاران [۲۷] پاسخ دینامیکی ورقهای مسی تحت بارگذاری انفجاری زیرآب را بررسی كردند. آنها بهوسيله آزمايشها، كنش سيال-سازه، پاسخ گذرا و حالتهای شکست سه نوع ورق مسی دایرهای را مطالعه کردند و با سیستم پیشرفته تصویربرداری سرعتبالا، کرنش، سرعت و تغییرشکل ورق را محاسبه نمودند.

در سال ۲۰۲۲، نصیری و همکاران [۴, ۵] به بررسی تجربی و عددی تغییرشکل پلاستیک ورقهای فولادی تحت انفجار مکرر زیرآب پرداختند. دو سری آزمایش بر روی ورقها تحت بارگذاری منفرد و مکرر (حداکثر سه بار) انجام شد تا مزایای ایده استفاده از بارگذاری متوالی را بهتر درک شود؛ بنابراین، ۱۲ و ۴ گرم بار انفجاری به ترتیب برای بارگذاری منفرد و مکرر استفاده شد. نشان داد که پروفیل تغییر شکل ورق به ترتیب به اشکال مخروطی و گنبدی برای بارگذاری منفرد و مکرر تغییر می کند. علاوه بر این، شبیه سازی عددی بارگذاری انفجار زیرآب و برهم کنش بین سطح جامد و آب با استفاده از روش کوپل اویلری-لاگرانژی انجام شد. مدل عددی بیشتر برای به دست آوردن نتایج شبیهسازی ورق تحت بارگذاری منفرد توسط ۶/۲۵ گرم بار منفجره که در آن ورق همان حداکثر تغییرشکل عرضی را که در انفجار سه بارگذاری مکرر (۴ گرم) به دست آمد، مورداستفاده قرار گرفت. مقایسه نتایج حاصل از دو شرایط اخیر، شکل پذیری عالى، يكنواخت بودن در پروفيل تغييرشكل و ضخامت، مقدار کمتر برای معیار آسیب JC و توزیع تنش فون میسز پایین تر بر روی ورق را برای مورد بارگذاری مکرر نشان داد؛ بنابراین، شکلدهی انفجاری مکرر در زیرآب میتواند بهعنوان یک روش جایگزین برای شکلدهی ورق با سرعتبالا و توليد انبوه استفاده شود.

با مرور مطالعات پیشین محققان، این نتیجه حاصل شد که تمامی مطالعات در زمینه شکلدهی انفجاری زیرآب ورقهای فلزی با استفاده از بارگذاری انفجاری منفرد بود و بهجز مراجع [۴, ۵] که مربوط به گروه تحقیقاتی حاضر و مربوط به شکلدهی بدون قالب ورق فلزی است، تاکنون از ایده بارگذاری مکرر جهت افزایش میزان تغییرشکل و همچنین بهبود وضعیت توزیع ضخامت در نواحی مرکزی و مرزی بهره گرفته نشده است. بدینجهت، در مطالعه حاضر به بررسی تجربی و عددی شکلدهی با قالب مادگی نمونههای فلزی تحت بارگذاری انفجار مکرر زیرآب پرداخته شده است. ازاینرو، در بخشهای دوم و سوم مقاله حاضر به تشریح کار تجربی و عددی صورت گرفته و همچنین ارائه نتایج مربوط به آن پرداخته شده است.

#### ۲- مطالعات آزمایشگاهی [۱]

نمونههای آزمایش تجربی برای شکل دهی با قالب تحت انفجار مکرر زیرآب در ابعاد ۲۵۰ میلی متر × ۲۵۰ میلی متر با ضخامت ۳ میلی متر در نظر گرفته شده است. ورق به طور کامل در شعاع ۸۵ میلی متری توسط هفت پیچ بسته شده است و یک ناحیه در معرض موج با شعاع ۵۰ میلی متر در تماس با آب باقی می ماند. نگه دارنده ها به عنوان جسم های صلب در نظر گرفته می شوند، زیرا آن ها تغییر شکل دائمی صلب در نظر گرفته می شوند، زیرا آن ها تغییر شکل دائمی قالب از نوع فلز 37-5۲ می باشد. قالب از یک طرف محدود به لروفایل تغییر شکل (شکل موردنظر جهت شکل دهی) و از طرف دیگر دارای پایه ای است که بتواند اجازه دهد پیچ و مهره ها به راحتی بسته شود. در وسط قالب یک سوراخ یا راه گاه قرار دارد که محل تخلیه هوای پشت ورق فلزی می باشد. برای اتصال ورق به قالب هفت سوراخ سرتاسری به قطر ۸/۵ میلی متر در نظر گرفته شده است (شکل ۱).

ازآنجایی که ماده منفجره باید در یکفاصله استقرار درون آب ثابت بماند تا از آن نقطه انفجار صورت بپذیرد که در این پژوهش، از یک نگهدارنده از جنس پلیمر لاکتیک اسید که توسط پرینتر سهبعدی ساختهشده، استفادهشده است. با مشخص كردن طول نگهدارنده، فاصله استقرار ماده منفجره از سطح بالایی ورق تنظیم می شود. همانند آنچه در شکل ۲ نشان دادهشده است، یک سوراخ سرتاسری بهمنظور محل عبور چاشنی الکتریکی نیز در ساختار نگهدارنده در نظر گرفته شده است. همچنین محل قرار گیری ماده منفجره در نگهدارنده دارای ارتفاع ۲۰ میلیمتر میباشد و تنظیم مرکز انفجار توسط فاصلهانداز يونوليتى انجام مىشود. تا فاصله استقرار از ورق ثابت بماند. همان طور که گفته شد، از يونوليت براى فاصله انداختن و تنظيم فاصله خرج انفجارى در محل خود از ورق استفاده می شود. لازم به ذکر است که به دلیل متغیر بودن جرم خرج تنظیم مرکز انفجار و ثابت نگهداشتن فاصله حائز اهمیت میباشد.

در پژوهش حاضر، از ماده منفجره C4 و یک چاشنی الکتریکی ۱ گرمی برای ایجاد انفجار استفادهشده است. جرم ماده منفجره C4 توسط یک ترازویی حساس با دقت ۰/۰۱

گرم اندازه گیری شده است. لازم به ذکر است که هندسه ماده منفجره C4 در این پژوهش ثابت و یک دیسک به قطر ۲۰ میلیمتر و ضخامتی متناسب با جرم آن است. نمای کاملی از تجهیزات به کاربرده شده جهت انجام آزمایش در شکل ۳ نشان دادهشده است.



**شکل (۱):** قالب مادگی با و بدون راهگاه برای شکلدهی سرعتبالا ورق فلزی تحت انفجار مکرر زیرآب.



**شکل (۲):** نگهدارنده پلیمری طراحیشده با پرینتر سهبعدی به همراه تجهیزات برای اعمال بار انفجاری.

شایان توجه است که لوله انفجاری برای نگهداری آب روی ورق به کاربرده شده است. هنگام انفجار موج شوک به صورت کروی به تمام محیط پیرامون منتشر می شود به همین علت در فرآیندهای انفجار آزاد فقط جبهه موج با نمونه برخورد می کند که سبب شکل دهی می شود و مقدار بسیار زیادی از انرژی انفجاری در محیط تلف می شود. گاهی این جبهه موج، انرژی لازم جهت ایجاد تغییر شکل های بزرگ در نمونه را ندارد که به ناچار برای افزایش انرژی آن باید مقدار جرم خرج انفجاری را افزایش دهند. این در صورتی است که افزایش جرم خرج انفجاری مشکلاتی از قبیل شرایط ایمنی، صداهای بسیار بلند و تیز و همچنین غیرقابل کنترل شدن

فرآیند به وجود میآورد. استفاده کردن از لولههای انفجاری تا حد بسیار زیادی این مشکلات را برطرف میسازد و میتوان موجهای انعکاسی از دیوارههای داخلی لوله را به سمت نمونه هدایت کرد و درنتیجه در مقدار خرج کمتری فرآیند شکلدهی صورت بپذیرد. لوله استفادهشده در این آزمایشها از جنس فولاد با تنش تسلیم بسیار بالا که آنها را میتوان صلب در نظر گرفت، ساختهشدهاند. قطر داخلی لوله ۱۰۰ میلیمتر است و قطر خارجی لوله ۱۴۰ میلیمتر میباشد. ارتفاع لوله ۳۰۰ میلیمتر بوده که به گیره رزوه میشوند.



**شکل (۳):** تجهیزات مورداستفاده در فرآیند شکلدهی انفجاری زیرآب.

همان طور که به صورت شماتیک در شکل ۴ نشان داده شده است، لوله انفجار پر از آب به نگه دارنده بالایی رزوه شده و با نگه دارنده پایینی که ورق آزمایشی را در بر دارد، توسط پیچهای مذکور متصل شده است. بارگذاری انفجاری زیرآب با انفجار دیسکهای دایره ای در فاصله ۲۱۵ میلی متری از سطح بالایی ورق اعمال می شود. یک نگه دارنده خرج انفجاری در بالای لوله قرار دارد و خرج توسط چاشنی الکتریکی فعال می شود.

مطابق جدول ۱، (قالب مادگی با و بدون راهگاه) برای آزمایشهای بارگذاری انفجاری منفرد زیرآب، جرم خرج ۴ گرم در نظر گرفته شد. این در حالی است که برای

آزمایشهای بارگذاری مکرر، جرم در هر مرحله اول از بارگذاری ۴ گرم و در مراحل بعدی ۸ گرم در نظر گرفتهشده است. لازم به ذکر است که در تمام آزمایشهای انجامشده، شعاع خرج انفجاری ثابت و برابر با ۱۰ میلیمتر بوده که متناسب با جرم آن با تغییر ارتفاع خرج انفجاری تغییر میکند. با توجه به تغییر در ارتفاع خرج انفجاری ۴ گرمی، از نگهدارندههای بلندتر برای آزمایشهای مکرر انفجار زیرآب استفاده شد تا فاصله استقرار یکسانی داشته باشند. برای بارگذاریهای انفجاری مکرر، ورقی که یک دفعه بارگذاری انفجار زیرآب را تجربه میکند، در دفعه دوم با همان جرم خرج انفجار و در همان فاصله استقرار برای آزمایش آماده میشوند.



شکل (۴): نحوه قرارگیری نمونه و شکلدهی با قالب تحت انفجار مکرر زیرآب (سمت چپ: با راهگاه، سمت راست: بدون راهگاه).

**جدول (۱):** جدول آزمایشهای انجامشده در تحقیق حاضر [۱].

خرج (g)	راهگاه	بارگذاری	شماره
۴	دارد	منفرد	SB-4-B1-01-VH
۴	دارد	مكرر	DB-48-B1-02-VH
٨		(دوگانه)	DB-48-B2-03-VH
۴	دارد	مكرر	TB-488-B1-04-VH
٨		(سەگانە)	TB-488-B2-05-VH
٨			TB-488-B3-06-VH
۴	دارد	مكرر	QB -4888-B1-07-VH
٨		(چهارگانه)	QB -4888-B2-08-VH
٨			QB -4888-B3-09-VH
٨			QB -4888-B4-10-VH
۴	ندارد		SB-4-B1-11-NVH
۴	ندارد	مكرر	DB-48-B1-12-NVH
٨		(دوگانه)	DB-48-B2-13-NVH

# ۳- شبیهسازی عددی فر آیند ۳-۱- روش کوپل اویلری-لاگرانژی

یکی از روشهای قابلقبول و مناسب برای مسائلی که در آن سازه، تغییرشکلهای پلاستیک بزرگی را تجربه میکند، بهویژه در مدلسازی جریان سیال، تحلیل اویلری است. در طول تحلیل اویلری در روش المان محدود، شبکهها تغییرشکل نمیدهند زیرا گرهها بهطور کامل در فضا ثابت هستند؛ این در حالی است که نقاط مادی در شبکهها جریان دارند. این موضوع بهعنوان یک مزیت باعث می شود که مواد دچار تغییر شکل های پلاستیک بزرگ و نرخ کرنش بالا شوند و امكان اعوجاج المان را از بين ببرد. لذا براى اندركنش سازه و سیال باید محیط اویلری به گونهای شبکهبندی شود که قطعههای تغییرشکلدهنده بعد از شکلدهی همچنان درون محیط اویلری قرار داشته باشند تا اندر کنش سازه و سیال تا پایان تحلیل تکمیل شود. از طرف دیگر، در طول یک تحلیل لاگرانژی، مرز ماده با مرزهای المانها منطبق است و گرهها بهطور كامل در داخل ماده ثابت مى شوند. ازاينرو، شبكهها این شانس را دارند که درحالی که گرههای روی شبکه با نقاط مادی حرکت میکنند، دچار تغییر شکل بزرگ شوند. این رویکرد برای مسائلی که در آنها ماده در حالتجامد قرار دارد، کاملاً مناسب است. باوجوداین، روش اویلری زمانی مؤثر است که نرخ کرنش در محیط جامد بالا باشد و ماده مانند یک محیط سیال واکنش نشان دهد. در بسته نرمافزاری آباکوس، روش کوپل اویلری-لاگرانژی با ادغام بهترین ویژگیهای هر دو رویکرد اویلری و لاگرانژی برای رفع كاستى هاى تحليل سنتى روش المان محدود و همچنین برای حل مشکلاتی که در آن تعامل بین حوزههای لاگرانژی و اویلری وجود دارد، توسعهیافته است. بهعنوان مثال، مشکلات برهم کنش سیال-سازه در این روش برطرف شده است. در این تحلیل، شبکه اویلر و شبکه لاگرانژی در یک مدل مونتاژ می شوند. المان های که کرنش بزرگی تولید میکنند توسط تحلیل اویلری پردازش میشوند، درحالی که روش لاگرانژی برای پردازش المانهای باقیمانده استفاده میشود. در فرآیند شبیهسازی، برای ایجاد جفتهای تماس با اجسام و هندسههای دیگر، مرز قسمت

اویلری در طول هر نمو زمان محاسبه می شود. علاوه بر این، از روش کسر حجمی اویلری برای محاسبه بخشی از ماده پرشده در هر المان در هر نمو زمانی استفاده می شود، زیرا ماده از میان عناصر جریان می یابد. روش مذکور در شکل **۵** نمایش داده شده است (۴, ۲۷, ۲۸].

## ۲-۳- نحوه مدلسازی فرآیند: هندسه، شرایط مرزی و شبکهبندی

در این پژوهش، مدلهای سهبعدی ورقهای مربعی با سطح مواجهه دایرهای در مقیاس کامل توسعه دادهشده و جهت افزایش دقت نتایج، از بهکارگیری مدلهای یکچهارم صرفنظر شده است. جهت مدلسازی لولههای انفجار که حاوی آب است، لولهای صلب به ارتفاع ۲۰۰ میلیمتر، شعاع داخلی و خارجی ۵۰ و ۶۰ شبیهسازی شد. همچنین، آب بهگونهای مدل شده است که درون لوله انفجار را بهطور کامل پر میکند. بهعبارتیدیگر، آب بهصورت استوانهای با قطر ۱۰۰ میلیمتر و ارتفاع ۲۰۰ میلیمتر مدل شده است. همچنین، فضایی مربوط به قرارگیری خرج انفجاری بهصورت دیسکی به قطر ثابت ۲۰ میلیمتر و ضخامتی متناسب با جرم خرج درون آب گماشته شده است.

شبکهبندی بخشهای مدل از مهمترین مراحل شبیهسازی است. ازآنجایی که حل گر صریح دینامیکی انتخاب شده است؛ لذا باید دقت کرد خانواده تمامی شبکهها به صریح تغییر کند. در اولین گام، نگهدارندهها، قالب مادگی و لوله انفجار با استفاده از المانهای چهار گرهای سهبعدی گسسته (R3D4) مدل شدند. جهت شبکهبندی آنها از اندازه شبکه ۴ میلی متر استفاده شد (شکل ۶). خرج انفجاری مطابق شکل استفاده از روش شبیه سازی کوپل اویلری - لاگرانژی تا حدی هرچه میزان اندازه شبکههای ماده منفجره (به صورت کلی تر بخش های اویلری مانند آب، هوا و غیره) کوچکتر باشد، نتایج دقیقتری در پی خواهد داشت؛ اما انتخاب اندازه شبکه بسیار کوچک سبب ایجاد نتایج غیر منطقی و عدم همگرایی انفجاری بزرگ باشد، هندسه آن به صورت چند ضلعی منتظم

خواهد بود و بر روی نتایج خروجی تأثیر خواهد گذاشت؛ لذا در اینجا اندازه شبکه خرج انفجاری به گونه انتخابشده است که هندسه واقعی آنکه یک دیسک است، حفظ شود. بهطور خلاصه المانهای خرج انفجاری و آب از نوع C3D8R (المان پیوسته ۸ گرهای مکعبی سهبعدی و دارای فرمول ندی کاهش یافته) هستند. شبکه بندی آب به صورت شکل ۶ و با اندازه شبکه ۲ میلی متر انتخاب در نظر گرفته شده است. مدل باید از انتهای محل قرارگیری خرج

نه انتخاب شده شود. ابعاد محیط اویلری باید به گونهای انتخاب شود که ت، حفظ شود. تمامی بخش های دیگر درون آن قرار گیرد. به همین منظور، از نوع C3D8R هندسه محیط اویلری به صورت هندسه مکعب با قاعده C3D8R میلیمتر و ارتفاع ۳۳۳ میلیمتر در نظر دی و دارای مربعی به طول ۲۴۲ میلیمتر و ارتفاع ۳۳۳ میلیمتر در نظر آب به صورت گرفته شد. در شکل  $\mathbf{r}$  نحوه شبکه بندی محیط اویلری آورده تخاب در نظر شده است. فرارگیری خرج

انفجارى پارتيشنبندى شود تا هندسه شبكهبندى منظم



**شکل (۵):** روش کوپل اویلری-لاگرانژی برای شبیهسازی فرآیند شکلدهی با قالب مادگی تحت بار انفجاری زیرآب در نرمافزار آباکوس: الف) ابزار کسر حجمی اویلری؛ ب) روش کوپل اویلری-لاگرانژی؛ ج) بازنگاشت [۴].



شکل (۶): الف) شبکهبندی اجسام صلب شامل لوله انفجار، قالب و نگهدارنده؛ ب) محیط اویلری ، ج) ماده منفجره؛ ه) ورق فلزی.

هندسه محيط اويلرى به گونهاى بهينه شده است كه علاوه برقرار گرفتن همه بخشهای مدل در آن دارای کمترین حجم باشد تا زمان حل نرمافزار كاهش يابد. محيط اويلرى بهصورت چرخشی شبکهبندی شده و اندازه المانهای آن ۲ میلیمتر است. خانواده این نوع شبکه بهصورت EC3D8R است. در انتهای مدلسازی، آب و خرج انفجاری به محیط اویلری اختصاص داده می شوند و کسری از محیط اویلری را متناسب با موقعیت خود اشغال می کنند که این کار توسط ابزار کسر حجمی در آباکوس انجام می شود. یکی دیگر از بخشهای مهم در شبیهسازی، مدلسازی ورق است. شبکهبندی ورق باید به گونه انتخاب شود که خروجیهای موردنظر مانند ضخامت، تغییرشکل و پروفایل را بهصورت منطقی ارائه دهد. به همین منظور، ورق ۳ میلیمتری در راستای ضخامت ۶ شبکه زده شد. همچنین، ورق به چهار بخش پارتیشنبندی شد تا بتوان توزیع ضخامت را روی لبههای پارتیشن محاسبه کرد. اندازه شبکهبندی ورق در راستای طولی ۵/۰ میلیمتر است. با توجه به آنکه بارگذاری انفجاری و ورق تغییرشکلهای پلاستیک شدیدی را تحمل می کند؛ این احتمال وجود دارد که ورق دچار اعوجاجهای غیرمنطقی شود. لذا جهت جلوگیری از به وجود آمدن خطا و کنترل شبکه در حل از دو ویژگی نرمافزار؛ یعنی، ساعت شنی و کنترل اعوجاج استفاده شد. بهطور خلاصه المانهای ورق از نوع C3D8R هستند (شکل ۶). بهمنظور شبیهسازی تماس بین بخشهای اویلری و لاگرانژی مدل عددی، از یک اندر کنش تماس عمومی با ضریب اصطکاک ۳/۰ استفاده شده است [۴, ۲۸–۳۰]. استفاده از تماس عمومی اندکی زمان حل را افزایش میدهد اما نتایج دقیقتری میدهد. در تمامی مدلهای عددی، ورق بین دو نگهدارنده فوقانی و تحتانی در امتداد محیط ورق سفت و محکم بسته شده اند و از نیروی نگهدارنده برای تعریف این بخش استفاده شده است؛ بنابراین، بهمنظور تعريف اندركنش بين بخشهاى لاگرانژى مدل (ورق و گیرهها) از یک تماس سطح به سطح با خواص تماس سخت و ضریب اصطکاک ۲/۳ استفاده شد. این موضوع، وضعیت مرزی واقع گرایانه یک نگهدارنده واقعی را شبیهسازی میکند که کمی اجازه کشیدگی و لغزش در ورق را مىدهد. نگەدارندەها و لوله انفجار كاملاً ثابتشدەاند و

حرکت آنها توسط شرط مرزی کاملاً بسته در تمامی جهتها قفلشده است. همچنین بر روی ورق هیچگونه شرط مرزی اعمال نشده است و میتواند بهصورت آزادانه بین نگهدارندهها لغزش کند. مطابق با توضیحات ارائهشده در ابتدای بخش، مرحله بارگذاری از نوع دینامیکی صریح با زمان ۵/۰ میلی ثانیه در نظر گرفته شد. این زمان حل بهقدر کافی سبب میرا شدن ارتعاشات ورق پس از دریافت موج شوک ناشی از انفجار است. نموهای زمانی حل توسط خود نرمافزار بهصورت خودکار به میزان ۳۳ نانوثانیه در نظر گرفتهشده است. این نمو زمانی سبب حل مسائل بهصورت دقیق و پیوسته خواهد شد.

#### ۳-۳- معادلات حالت

چندین معادله حالت برای توصیف فشار و انبساط محصولات گازی تولیدشده در اثر انفجار مواد منفجره پیشنهادشده گازی تولیدشده در اثر انفجار مواد منفجره پیشنهادشده معادله حالت JWL به دلیل سادگی در محاسبات هیدرودینامیکی و بیشترین تطبیق با نتایج آزمایش تجربی، هیدرودینامیکی و بیشترین تطبیق با نتایج آزمایش تجربی، معدری استفاده میشود [7, ۳۲]. معادله حالت JWL به صورت رابطه (۱) بیان میشود که در آن P فشار انفجار، A انرژی محلول انفجار، A و ثانویه داخلی بر واحد حجم، V حجم نسبی محصول انفجار، A و ثانویه محرایب فشار هستند و R و 2 مقادیر ویژه اصلی و ثانویه محرایب فشار هستند و R مولات میشود که به ترتیب رفتار کوتاه و دوربرد محصولات انفجاری را به تصویر میکشند. پارامتر  $\omega$  بخش کسری انفجاری را به تصویر میکشند. پارامتر (1) انرژی (2) است که در فشار انفجاری سهیم است [7, ۳۱]:  $P = A \left( 1 - \left( \frac{\omega}{R_1 V} \right) \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \left( \frac{\omega}{R_2 V} \right) \right) e^{-R_2 V}$ 

$$\overline{\sigma} = \underbrace{\left[A + B\left(\overline{\varepsilon}^{pl}\right)^{n}\right]}_{\text{Hardening}} \underbrace{\left[1 + C\ln\left(\frac{\dot{\overline{\varepsilon}}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_{0}}\right)\right]}_{\text{Viscosity}} \underbrace{\left[1 - \hat{T}^{m}\right]}_{\text{Softening}}$$
(**(\*)**

دمای همگن برای یک ماده به صورت رابطه (۴) تعریف می گردد که در آن *T*<sub>0</sub> ، *T* و *T*<sub>melt</sub> به ترتیب دمای فعلی، دمای محیط و دمای نقطه ذوب مواد هستند.

$$\hat{T} = \begin{cases} 0 & T < T_0 \\ (T - T_0) / (T_{melt} - T_0) & T_0 \le T \le T_{melt} \\ 1 & T > T_{melt} \end{cases}$$
(\*)

از آنجاکه پاسخ دینامیکی در محیطهای انفجاری بسیار سریع است، با فرض اتلاف کار پلاستیکی که به افزایش درجه حرارت آدیاباتیک تبدیل میشود، میتوان تغییرات دمایی در زمان یک نمونه را مطابق رابطه (۵) تعیین کرد که در آن  $\rho$ زمان یک نمونه را مطابق رابطه (۵) تعیین کرد که در آن  $\gamma$ چگالی ماده،  $C_p$  بیانگر ظرفیت حرارتی ماده در فشارثابت و  $\chi$  ضریب تیلور-کوینی است. معمولاً ضریب تیلور-کوینی برای مواد فلزی ۹/۰ در نظر گرفته میشود بدان معنا که ۷۰۰ کار پلاستیک به گرما تبدیل میشود و ۱۰٪ کار پلاستیک در مواد ذخیره میشود.

$$\Delta T = \int_0^{\overline{\varepsilon}^{pl}} \frac{\chi}{\rho C_p} \overline{\sigma} d\overline{\varepsilon}^{pl} \tag{(a)}$$

معیار آسیب جانسون-کوک یک مدل از مدلهای آسیب نرم است و توانایی پیش بینی شکست نرم را نیز دارا است. لذا بهمنظور توصیف رفتار شکست ماده در ورق، یک مکانیسم خرابی شامل یک معیار شروع آسیب همراه با قانون تکامل آسیب تعریفشده است. معیار شروع آسیب بر اساس مدل شکست جانسون-کوک است و بر اساس مقدار کرنش پلاستیک معادل در نقطه ادغام المان طبق رابطه (۶) توصیفشده است. آسیب در یک المان در حالی آغاز می شود که پارامتر آسیب انباشته w بیش از یک باشد که در آغاز آسیب  ${}^{10}_{D}$  بهعنوان کرنش پلاستیک معادل در نقطه شکست تعیینشده است و  ${}^{10}_{Z} \delta$  نشاندهنده افزایش پلاستیک معادل پلاستیک است که در طی چرخه تغییرشکل اتفاق میافتد.

$$\omega = \sum \left( \frac{\Delta \overline{\varepsilon}^{pl}}{\overline{\varepsilon}_D^{pl}} \right), \ 0 \le \omega \le 1$$
(9)

$$P = \frac{\rho_0 c_0^2 \eta}{\left(1 - s\eta\right)^2} \left[ 1 - \frac{\eta \Gamma_0}{2} \right] \Gamma_0 \rho_0 e \tag{(7)}$$

**جدول** (۲): ضرایب معادله حالت JWL برای ماده منفجره ۱C4. تفادیشدید د تحقیق ماند [۳۲ ۳۲]

4 استفاده شده در تحقیق خاصر [۱۱, ۱۱].							
$E_m$	ω	$R_2$	$R_1$	В	A	V	
1J/kg	-	-	-	GPa	GPa	m/s	
۵/۶۲	۰/۲۵	۱/۴	۴/۵	17/90	۶۰۹/ <u>۸</u>	۸۱۹۳	
.[۴]	برای آب	ونايزن	مای-گر	ب معادله ه	۳): ضرایه	جدول (	
Г	0		s	<i>c</i> <sub>0</sub>		$ ho_0$	
	-		_	m/s	5	kg/m <sup>3</sup>	

#### ۳-۴- مدل استحکام و شکست جانسون-کوک

١/٧٩

1/80

149.

جهت ارزیابی پدیده نفوذ پرتابه در اهداف و همچنین بارگذاری انفجار سازهها، مشخصههای مکانیکی و حرارتی مواد نقش مهمی بر پاسخ نهایی دارند و تأثیر این پارامترها روی دقت نتایج بهدستآمده از شبیهسازی عددی بسیار زیاد است؛ لذا در پژوهش حاضر، برای انجام شبیهسازیها از مدل الاستوويسكو-پلاستيک و شکست جانسون-کوک که پيشتر در سال ۱۹۸۵ میلادی ارائهشده، استفادهشده است که اثر نرخ کرنش و همچنین تغییرات دمایی را روی تنش سیلان در نظر مى گيرد. مدل الاستوويسكو-پلاستيك جانسون-كوك شامل اثر تنش تسليم، جريان پلاستيك، سختشوندگی نرخ کرنش، ترموالاستیسیته خطی و نرم شدن به دلیل گرمایش آدیاباتیک است. در این مدل، تنش معادل فون ميسز ō بهعنوان تابعي از كرنش پلاستيك معادل  $ar{arepsilon}^{pl}$ ، نرخ کرنش پلاستیک معادل $ar{arepsilon}^{pl}$ ، نرخ کرنش پلاستیک مرجع معادل  $\dot{c}_0$  و دمای همگن  $\hat{T}$  مطابق رابطه تجربی (۳) بیان می گردد که در آن A تنش تسلیم ماده، B و یارامترهای کارسختی، m کمیت ثابت ماده و C شاخص nسختشوندگی نرخ کرنش است. این پنج کمیت ثابت ماده از انجام آزمونهای کشش مختلف روی ماده به دست میآیند [77, 77].

1...

در این مدل شکست جانسون-کوک، کرنش معادل در لحظه آغاز شکست ماده بهصورت تابعی از تنش سه محوره بی بعد، نرخ کرنش بی بعد و دمای بی بعد در نظر گرفته می شود. بر طبق این مدل، مقدار کرنشی معادلی که یک ماده تا لحظه شکست می تواند تحمل نماید، مطابق رابطه (۲) بر حسب کمیتهای ثابت ماده اD تا 5 محاسبه می شود.

$$\overline{\varepsilon}_{D}^{pl} = \left[ \underbrace{D_{1} + D_{2} \exp\left(D_{3} \frac{\sigma_{m}}{\overline{\sigma}}\right)}_{\text{Stress triaxiality}} \right] \times \dots$$

$$\left[ \underbrace{1 + D_{4} \ln\left(\frac{\dot{\overline{\varepsilon}}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_{0}}\right)}_{\text{Vieweity}} \underbrace{\left[1 + D_{5} \hat{T}\right]}_{\text{Temperature}} \right]$$
(Y)

رفتار ماده برای شروع آسیب با تکامل آسیب تعریف می شود. تکامل آسیب، کاهش استحکام ماده را درحالی که معیار شروع آسیب ارضا شود، توضیح می دهد. فرآیند تکامل آسیب در حالی رخ می دهد که مقدار کرنش پلاستیک معادل انباشته برابر با  ${}^{pl}_{D}$  گردد و متغیر تکامل آسیب صفر است ( $\omega = 1, D = 0$ ). همچنین متغیر تکامل آسیب برابر ۱ است، درحالی که کرنش پلاستیک معادل  ${}^{pl}_{T}$  به مقدار بحرانی کرنش پلاستیک شکست معادل  ${}^{pl}_{T}$  می رسد (شکل بحرانی کرنش پلاستیک شکست معادل  ${}^{pl}_{T}$  می رسد (شکل

در این شرایط، کرنش پلاستیک شکست معادل  $E_f^{pl}$  به شدت به طول مشخصه المان L به علت غیریکنواخت سازی کرنش بستگی دارد و نمی توان آن را به عنوان یک پارامتر ماده برای تعریف قانون تکامل آسیب استفاده کرد؛ بنابراین، قانون تکامل آسیب با رابطه (۸) بر حسب جابجایی پلاستیک معادل تعریف می شود که در آن L به هندسه المان بستگی دارد و آن را به عنوان ریشه مکعب حجم نقطه ادغام در مطالعه حاضر در نظر گرفته می شود.

$$\overline{u}^{pl} = L\left(\overline{\varepsilon}^{pl} - \overline{\varepsilon}_D^{pl}\right) \tag{A}$$

جابجایی پلاستیک معادل، طول مشخصه المان را جهت کاهش وابستگی شبکه از نتایج در محلی سازی کرنش در نظر می گیرد. توصیف یک شکل خطی از قانون تکامل آسیب ازنظر جابجایی پلاستیک شکست معادل، به صورت رابطه (۹) است.

$$D = \frac{\overline{u}^{pl}}{\overline{u}_{f}^{pl}}, \quad 0 \le D \le 1$$
(9)

معادله (۹) تأیید می کند که مقاومت ماده هنگامی که جابجایی پلاستیک معادل برابر با جابجایی پلاستیک معادل در نقطه شکست باشد، کاملاً تخریب و تنزل می یابد [۳۳-۳7]. در هر زمان مشخص هنگام تجزیه و تحلیل یک المان آسیب دیده، تنش واقعی تنزل یافته، بر حسب تنش مؤثر آسیب دیده، تنش واقعی تنزل یافته، بر حسب تنش مؤثر معادله پلاستیسیته و شکست جانسون - کوک برای ورق های فلزی در جدول ۴ ارائه شده است.

$$D = \frac{\overline{u}^{pl}}{\overline{u}_f^{pl}}, \quad 0 \le D \le 1$$
(9)

$$\sigma = (1 - D)\overline{\sigma} \tag{1}$$

جدول (۴): ضرایب پلاستیسیته و شکست جانسون-کوک برای ورقهای فلزی در دمای اتاق [۴].

ورق	علائم	خواص مادہ
۲۱۰	E (GPa)	مدول الاستيسيته
۰/٣	ν	ضريب پواسون
۷۸۰۰	$ ho(kg/m^3)$	چگالی
۱۷۵	A (MPa)	تنش تسلیم و سختشوندگی
۳۸۰	B (MPa)	كرنش
• /٣٢	n	
١	$\dot{arepsilon}_0 \left( 1/\mathrm{s}  ight)$	سختشوندگی نرخ کرنش
•/•۶	C	
298	$T_0(\mathbf{K})$	دما
١٨٧٨	$T_{\rm melt}(\mathbf{K})$	
•/۵۵	m	
41.	$C_p(J/kgK)$	گرمای ویژه
$-\Upsilon/\Upsilon$	$D_1$	ضرايب شكست
۵/۴۳	$D_2$	
-•/۴V	$D_3$	
•/• 18	$D_4$	
• /8٣	$D_5$	



**شکل (۷)**: نمایش شماتیک رفتار تنش و کرنش تکمحوری یک فلز شکلپذیر [۳۹, ۳۰].

۴- بحث و بررسی نتایج

۴-۱- نتایج تجربی

نتایج تجربی بهدستآمده از شکلدهی با قالب مادگی با راهگاه مرکزی برای نمونههای فلزی با استفاده از روش انفجار مکرر زیرآب به همراه نماهای برش خوردهای از نمونههای آزمایششده در تحقیق حاضر به ترتیب در جدول ۵ و شکل ۸ ارائهشده است. لازم به توضیح است که تحلیل نتایج تجربی مطالعه حاضر بهتفصیل در مرجع [۱] بیانشده و مورد ارزیابی قرار گرفته است؛ بنابراین، تمرکز مقاله حاضر روی شبیه سازی عددی فرآیند شکل دهی ورقهای فلزی با قالب مادگی با استفاده از انفجار زیرآب مکرر صورت گرفته است. خواننگان محترم میتوانند جهت مطالعه بیشتر نتایج تجربی و تحلیل دادهها به مرجع [۱] رجوع کنند.



**جدول (۵):** نتايج تجربي.

('/) É,	نازکشدگی (٪)		• 1• *	
پرسدنی (۸)	مرکز	بيشينه	سماره	
74	18/3	۱۹/۳	SB-4-B1-01-VH	
۱۰۰	۲ • /۷	۲۴/۷	DB-48-B2-03-VH	
۱۰۰	۱۵/۰	$\nabla \nabla / \nabla$	TB-488-B3-06-VH	
۱۰۰	۱۵/۳	٣۶/٧	QB -4888-B4-10-VH	
٣٠	۱۸/۳	۲ • /۷	SB-4-B1-11-NVH	
۱۰۰	١٨/٧	۲۶/۸	DB-48-B2-13-NVH	

#### ۲-۴- نتایج شبیهسازی عددی

با توجه به عدم موفقیت مسئله با در نظرگیری راهگاه مرکزی در بخش تجربی، در این بخش، با مقایسه نتایج عددی و تجربی ارائهشده در مطالعه تحقیق حاضر برای حالت بدون راهگاه، دقت مدل المان محدود ازنظر گستره تغییرشکل و توزیع ضخامت ارزیابی می شود.

با توجه به نكات ارائهشده، نمايش كمى توزيع ضخامت در راستای طولی یا شعاعی ورق برای نتایج تجربی و شبیهسازی عددی حاصل از شکلدهی با قالب مادگی ورقهای فلزی تحت بارگذاری انفجاری زیرآب منفرد (SB-4-B1-11-NVH) و دوگانه (DB-48-B2-13-NVH) در شکل ۱۲ نشان دادهشده است. جهت درک بهتر و بررسی صحت مدل از نوارهای خطا (۵٪ و ۱۰٪) بهعنوان یک حاشیه امن برای ارزیابی دقت پیشبینی شبیهسازی عددی فرآیند استفادهشده است. مقایسه نتایج عددی و آزمایشی بهدستآمده برای توزیع ضخامت در امتداد طولی نشان میدهد که تطابق خوبی برقرار است و مدل دقت خوبی در پیشبینی رفتار ماده تحت بارگذاری انفجاری زیرآب دارد. برای بارگذاری منفرد، حداقل ضخامت حاصل از آزمایشهای ۲/۳۸ میلیمتر در فاصله ۸ میلیمتری از مرکز است، درحالی که ضخامت پیشبینی شده در این نقطه ۲/۳۰ میلیمتر است. این نشان میدهد که اختلاف بین نتایج تجربی و عددی برای نقطه بحرانی ۳/۴٪ است. از طرف دیگر، برای بارگذاری مکرر، حداقل ضخامت حاصل از مطالعات تجربی ۲/۲۰ میلیمتر در فاصله ۲۳ میلیمتری از

مرکز است، درحالی که ضخامت پیش بینی شده در این نقطه ۲/۰۷ میلی متر است. ازاین رو، تفاوت بین نتایج عددی و شبیه سازی ۸/۷٪ است. به طور کلی، مقادیر حداقل ضخامت اندازه گیری شده و همچنین موقعیت آن ها، تقریباً همانند شبیه سازی های عددی و میزان بیشترین خطای پیش بینی برای هر دو نمونه کمتر از ۱۰٪ است. برای بارگذاری منفرد، برای هر دو نمونه کمتر از ۱۰٪ است. برای بارگذاری منفرد، ورق با ضخامت حاصل از آزمایش تجربی ۲/۸۱ میلی متر و ضخامت پیش بینی شده در شبیه سازی ۸/۶۰۸ میلی متر ایجاد شده است. از طرف دیگر، برای بارگذاری مکرر، حداکثر ضخامت حاصل از آزمایش تجربی ۲/۶۰۸ میلی متر فضا در امتداد طولی ۴۲ میلی متر از مرکز شکل ورق با مخامت حاصل از مطالعات تجربی ۲/۴۱۵ میلی متر و ضخامت پیش بینی شده در شبیه سازی ۲/۴۱۵ میلی متر و مخامت حاصل از مطالعات تجربی ۲/۴۱۵ میلی متر و مخامت پیش بینی شده در شبیه سازی ۲/۱۷۴ میلی متر منخامت است.



شکل (۱۲): الف) تغییرات ضخامت نمونه در راستای طولی؛ ب) تغییرات خطای پیشبینی مدل عددی در راستای طولی ورق.

بهطور خلاصه، میتوان نتیجه گرفت که از مدل عددی فعلی میتوان برای ارزیابی شکلدهی با قالب ورقهای فلزی در

معرض بارگذاری انفجاری زیرآب برای تحقیقات بیشتر با ضریب اطمینان خوبی استفاده کرد. شکل **۱۳ و ۱۴** مقایسه کمی و کیفی گسترههای تغییرشکل نمونههای آزمایشی با کد BB-4-B1-11-NVH و SB-4-B1-11-NVH را در آزمایش تجربی و شبیهسازی عددی نشان میدهد.





شکل (۱۴): مقایسه کمی نتایج تجربی و شبیهسازی عددی برای گستره تغییرشکل ورق تحت بارگذاری منفرد و دوگانه: الف) فاصله واقعی از مرکز ورق؛ ب) فاصله شعاعی از مرکز ورق.

مناسب میزان جرم خرج و همچنین استفاده از قالب مادگی جستجو کرد. لازم به توضيح است كه ورق پس از برخورد با قالب دچار تغییرشکل وارون یا کاهش میزان تغییرشکل نمی گردد که خود یکی از نکات مهم در مبحث شکلدهی فلزات است. در مورد بارگذاری اول، ورق در زمان ۱۴۵ میکروثانیه شروع به تغییر شکل پلاستیک می کند و در مدت ۲۸۰ میکروثانیه (در زمان ۳۲۵ میکروثانیه) به حداکثر مقدار خود نزدیک می شود و پس از آن به ثبات میرسد. شایان توجه است که در بارگذاری اول، تغییرات مقادیر بیشینه تغییرشکل ورق در فواصل ۵ میلیمتری از ورق با یک روند غیرخطی (تابع درجه دو) کاهشی است و هیچگونه نوسانی در آن دیده نمی شود. به طور جزئی تر، میزان بیشینه تغییر شکل در فواصل ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ میلیمتری از ورق به ترتيب به ميزان ۰٪، ۱٪، ۱۰٪ ۲۳٪، ۳۶٪، ۵۱٪، ./۶۶ و ۸۰٪ کاهش مییابد. نتایج مشخص میکند که پس از دور شدن به میزان ۱۵ میلیمتر از مرکز ورق، نرخ کاهش میزان تغییرشکل سرعت بیشتری پیدا میکند و این موضوع خود دلیلی بر استفاده از پدیده بارگذاری مکرر در شکلدهی فلزات است. در بارگذاری دوم که با جرم خرجی دو برابر بارگذاری اول اعمالشده است، نمونه آزمایشی در مرکز و فاصله ۱۰ میلیمتری از آن هیچگونه تغییرشکل محسوسی تجربه نمی کند و تنها در این ناحیه دچار نوسانات بسیار جزئی است. در پدیده بارگذاری مکرر، نوسانات تغییر شکل ورق در مرکز ناشی از دو علت نامناسب بودن میزان جرم خرج در مقایسه با بارگذاری اول و استفاده از قالب شکلدهی است که در اینجا با توجه به اینکه میزان جرم خرج در بارگذاری دوم افزایش یافته است، مورد اول مردود است. در این مرحله نیز، تغییرشکل پلاستیک محسوس ورق از زمان ۱۴۵ میکروثانیه شروع شده و در مدت ۵۰ میکروثانیه (در زمان ۱۹۵ میکروثانیه) به حداکثر مقدار خود در فاصله ۲۵ میلیمتری از مرکز ورق میرسد. سایه طوسی نگ در شکل ۱۶ ب و همچنین نتایج شکل ۱۵ ب نشان میدهند که نمونه آزمایشی در این بخش دچار تغییرشکل وارون به میزان بسیار نامحسوس ۰/۱ میلیمتر است.

لازم به توضيح است كه نتايج كمي براي دو فاصله واقعي و شعاعی از مرکز ورق ارائهشده است. فاصله واقعی از روی گستره تغییرشکل و تا انتهای گیردار محاسبه شده است. همان طور که نشان دادهشده است، نتایج شبیه سازی عددی شباهت بسیار خوبی با مطالعات تجربی برای گستره تغييرشكل ورق نشان مىدهند و اختلاف قابل توجهي بين آنها وجود ندارد. شایان توجه است که حداکثر خطا بین نتایج شبیهسازی و تجربی برای پارامتر تأثیرگذار پرشدگی قالب برای بارگذاری انفجاری اول با خرج به جرم ۴ گرم حدود ۶٪ است. ازآنجاکه پرشدگی قالب در دو حالت شبیهسازی و تجربی برای بارگذاری انفجاری دوم ۱۰۰٪ بوده است؛ بنابراین، بین نتایج شبیهسازی و تجربی پرشدگی با خرج به جرم ۸ گرم خطایی مشاهده نگردید. علاوه بر این، درحالی که در بارگذاری اول تقریباً یک گستره با شکل نیم کره ناقص ایجاد می شود، در بار گذاری دوم، به دلیل فشار زیاد تولیدشده در مقایسه با دفعه اول بارگذاری، نمونه فلزی شکل قالب مادگی را به خود می گیرد. نتایج عددی همچنین نشان میدهد که مدل برای هر دو حالت فاصله واقعی و شعاعی از مرکز ورق در مرزهای پیرامونی نیز از توان بالایی در پیشبینی رفتار ورق برخوردار است. در ادامه، جهت بررسی بیشتر روند تغییرات میزان تغییرشکل در فواصل مختلف از مرکز ورق در طول فرآیند، گستره تغییر شکل ورق برحسب زمان برای هر دو حالت بارگذاری منفرد و مکرر (بدون راهگاه) در شکل ۱۵ ارائه شده است. شایان توجه است که برای درک و تحلیل بهتر نتایج، نمودار بهصورت بزرگنمایی شده در یک بازه زمانی مشخص نیز ارائهشده است. همچنین مقادیر بیشینه تغییرشکل در هر فاصله بهصورت ستونی در شکل ۱۶ ارائهشده است.

همان طور که در نتایج مربوط به گستره تغییر شکل ورق نشان داده شده است، بر خلاف نتایج به دست آمده برای شکل دهی انفجاری در مراجع [۴, ۲۹, ۳۰] ، نمونه آزمایشی در بارگذاری اول و دوم پس از طی کردن ناحیه تغییر شکل گذرا دچار نوسانات یا اصطلاحاً پدیده بازگشت فنری نمی شود و مقدار آن سریعاً به میزان بیشینه یا همان عمق قالب نزدیک می گردد. علت این مسئله را می توان در انتخاب



**شکل (۱۵)**: گستره تغییرشکل ورق در فواصل مختلف از مرکز آن با بازه ۵ میلیمتر: الف) بارگذاری منفرد؛ ب) بارگذاری دوگانه.



**شکل (۱۶): تغ**ییرات بیشینه تغییرشکل ورق در فواصل مختلف از مرکز آن با بازه ۵ میلیمتر: الف) بارگذاری منفرد؛ ب) بارگذاری دوگانه.

است؛ بنابراین، در روش شکلدهی پیشنهادی با قالب مفروض، نقطه ۲۵ میلیمتر یک نقطه عطف و بحرانی است بهطوریکه در طرف چپ و راست آن تغییرات بیشینه تغییرشکل در حال کاهش است. با دور شدن از نقطه با فاصله ۲۵ میلیمتری از ورق به سمت مرکز و پیرامون گیردار، میزان تغییرشکل به ترتیب به اندازه ۲۸٪ و ۱۱ (فواصل ۲۰ و ۳۰ میلیمتری)، ۶۶٪ و ۴۵٪ (فواصل ۱۵ و برخلاف بارگذاری اول، تغییرات میزان بیشینه تغییرشکل در این حالت از یک تابع درجه دوم پیروی نکرده و به دلیل داشتن چندین نقطه عطف، از یک تابع درجه پنجم پیروی میکند. مطابق شکل **۱۶ ب**، بیشترین میزان تغییرشکل در بارگذاری دوم ۶/۴ میلیمتر و در فاصله ۲۵ میلیمتری از مرکز تجربه میشود و کمترین مقادیر مربوط به مرکز و نواحی پیرامونی ورق با توجه به منحنی تغییرشکل قالب

۳۵ میلیمتری) و ۹۴٪ و ۸۱٪ (فواصل ۱۰ و ۴۰ میلیمتری) کاهش مییابد. این تحلیل نشان میدهد که در بارگذری انقجاری مکرر، تمرکز تغییر شکل روی نیمه دوم ورق (نزدیک به پیرامون گیردار ورق) است که این مسئله برای دست یافتن به یک شکل و فرم خاص در شکل دهی فلزات بسیار ضروری است؛ لذا، بارگذاری انفجاری مکرر از این جنبه نیز بسیار سودمند است.

در ادامه مطالعات عددی، به بررسی تغییرات سرعت تغییر شکل افقی (شکل ۱۷) و عمودی (شکل ۱۸) ورق در فواصل مختلف از مرکز آن حین اعمال بار انفجاری مکرر زیرآب پرداخته میشود. شایان توجه است که برای درک و تحلیل بهتر نتایج، نمودار بهصورت بزرگنمایی شده در یک بازه زمانی مشخص نیز ارائهشده است. همچنین مقادیر بیشینه سرعت تغییرشکل در هر فاصله بهصورت ستونی در شکل ۱۹ ارائهشده است. همان طور که در نتایج مربوط به سرعت تغيير شكل ورق نشان داده شده است، تغييرات سرعت تغییرشکل افقی و عمودی ورق در هر دو بارگذاری منفرد و دوگانه به دلیل امواج منعکسشده از لوله انفجاری و موجهای انفجاری ضعیف بعدی، دارای چندین قله و دره است. با توجه به اینکه بار انفجاری بهصورت محوری و ضربهای روی نمونه ورق اعمال میشود، تغییرات سرعت تغييرشكل عمودى چندين برابر سرعت تغييرشكل افقى و در قله اول بسیار محسوس است. در بارگذاری اول، برخلاف سرعت تغييرشكل افقى، شروع تغييرات محسوس سرعت تغییرشکل عمودی برای تمامی فواصل از مرکز ثابت و از ۱۲۵ میکروثانیه است. این در حالی است که برای سرعت تغییر شکل افقی، نقاط دورتر از مرکز ورق سریعتر سرعت تغییرشکل افقی را تجربه میکنند با این تفاوت که مقادیر آن در مقایسه با سرعت تغییرشکل عمودی به دلیل محوری بودن بارگذاری چشمگیر نیست و در طول فرآیند در بخش مرکزی ورق تقریباً صفر (نهایتاً ۳ متر بر ثانیه در نقطه بيشينه) است. همچنين تغييرات بيشينه نقاط سرعت تغییر شکل افقی در نواحی دورتر از مرکز برخلاف سرعت تغيير شكل عمودى نامحسوس است. بهطور جزئى تر، بيشينه سرعت تغییرشکل افقی در فاصله ۱۰ میلیمتری از مرکز به میزان ۳۲ متر بر ثانیه رخ میدهد که این مقدار با دور شدن

از آن به سمت پیرامون گیردار به میزان ۶٪، ۹٪ و ۱۶٪ به ترتیب در فواصل ۲۰، ۳۰ و ۴۰ میلیمتری از مرکز کاهش می یابد. همچنین، بیشینه سرعت تغییر شکل عمودی در مرکز ورق و به میزان ۱۶۹ متر بر ثانیه رخ می دهد که این مقدار با دور شدن از آن به سمت پیرامون گیردار به میزان ۱۴/، ۱۶/، ۲۰۲ و ۳۸٪ به ترتیب در فواصل ۱۰، ۲۰، ۳۰ و با ۱۶/۰ یا ۱۶ مرکز کاهش می یابد. در نتیجه، با توجه به پایین بودن میزان سرعت تغییر شکل افقی و همچنین کاهش شدید نرخ سرعت تغییر شکل عمودی در فاصله ۲۰ میلی متری از مرکز به بعد، اعمال بار گذاری مجدد روی ورق میلی متری از مرکز به بعد، اعمال بار گذاری مجدد روی ورق

لازم به توضيح است كه بيشترين بازه زمانى (ناحيه سايه خورده در شکل ۱۸ الف) برای تغییرات سرعت تغییرشکل عمودی مربوط به نقطهای با فاصله ۲۰ میلیمتری از مرکز ورق است. پس از آن، با نزدیک شدن به مرکز و همچنین پيرامون گيردار ورق، اين بازه كاهش پيدا مىكند. نتايج مذکور برای سرعت تغییرشکل افقی (شکل ۱۷ الف) بدین صورت است که در فاصله ۲۰ میلیمتری از مرکز بیشترین و بخش مرکزی کمترین بازه تغییرات را تجربه میکنند. همچنین با نزدیک شدن به پیرامون گیردار، طول این بازه رو به کاهش است. به طور کمی، بازه تغییرات چشمگیر (ناحیه سایه خورده در شکل) سرعت تغییر شکل عمودی از مرکز تا فاصله ۴۰ میلیمتری از آن به ترتیب برابر با ۱۶۰، ۱۷۵، ۱۸۰، ۱۴۵ و ۱۰۰ میکروثانیه است. برای سرعت تغییرشکل افقی نیز این مقادیر به ترتیب برابر است با ۲۵، ۱۴۵، ۱۵۰، ۱۱۵ و ۹۰ میکروثانیه. لازم به توضیح است که نقطه آغازین تغییرات چشمگیر سرعت تغییر شکل افقی به ترتیب برابر با ۳۲۰، ۱۵۵، ۱۵۵، ۱۵۰ و ۱۳۰ میکروثانیه در مرکز و فواصل دورتر از آن با اختلاف ۱۰ میلیمتری تا پیرامون مرزی است؛ بنابراین، تغییر سرعت تغییر شکل افقی در نقاط نزدیک به پیرامون ورق سریعتر تجربه میشود.

در بارگذاری دوم، نتایج بهدست آمده برای تغییرات سرعت تغییر شکل افقی و عمودی کمی متفاوت است و با توجه به اینکه نمونه در مرحله اول بارگذاری تغییر شکل پلاستیک بزرگی را تجربه کرده است، تغییرات سرعت تغییر شکل افقی در مقایسه با دفعه قبلی بارگذاری محسوس است.



شکل (۱۸): تغییرات سرعت تغییرشکل عمودی ورق در فواصل مختلف از مرکز: الف) بارگذاری منفرد؛ ب) بارگذاری دوگانه.



**شکل (۱۹): تغ**ییرات بیشینه سرعت تغییرشکل ورق در فواصل مختلف از مرکز: الف) سرعت تغییرشکل افقی؛ ب) سرعت تغییرشکل عمودی.

پلاستیک در مرحله دوم صرف گرفتن شکل قالب و پرشدگی کامل آن میشود.

شروع تغييرات محسوس سرعت تغييرشكل عمودى براى تمامی نواحی در ۱۲۰ میکروثانیه رخ میدهد درحالیکه هر چه به نیمه ورق نزدیک می شویم، این نقطه آغازین به عدد ۱۳۰ میکروثانیه نزدیک می شود. در این مرحله از بار گذاری، سرعت تغییر شکل عمودی در مرکز ورق در قله اول ناچیز و بیشینه آن در قله چهارم به ۷۳ متر بر ثانیه میرسد که در مقایسه بارگذاری در مرحله اول، این کمیت ۵۷٪ کاهش یافته است. همچنین، بیشینه سرعت تغییر شکل عمودی در فاصله ۲۰ میلیمتری از مرکز ورق و به میزان ۱۴۹ متر بر ثانیه رخ میدهد که این مقدار با دور شدن از آن به سمت پیرامون گیردار به میزان ۶۲٪، ۵٪ و ۵۸٪ به ترتیب در فواصل ۱۰، ۳۰ و ۴۰ میلیمتری از مرکز کاهش مییابد. شایان توجه است که در این مقطع زمانی، نمونه آزمایشی تغییر سرعت تغییرشکل عمودی محسوسی را در مرکز تجربه نمی کند و عمدتاً ورق در این بخش در حال نوسان یا بازگشت فنری بسیار جزئی است؛ بنابراین، بیشینه سرعت تغییرشکل عمودی در یکسوم انتهایی فرآیند یعنی در ۲۲۰ میکروثانیه رخ میدهد. درنتیجه، با توجه به پایین بودن میزان سرعت تغییرشکل عمودی و همچنین بالا بودن سرعت تغییر شکل افقی در فاصله ۲۰ و ۳۰ میلی متری از مرکز به بعد، اعمال بارگذاری سوم روی ورق احتمال پارگی ورق را بالا میبرد و به نظر میرسد باید شکلدهی مکرر در دو مرحله صورت پذیرد. با توجه به این مسئله، انتخاب دقیق

در بارگذاری دوم، برخلاف تغییرات سرعت تغییرشکل در بارگذاری اول، شروع تغییرات محسوس هر دو سرعت تغییر شکل افقی و عمودی برای تمامی فواصل از مرکز بسیار به هم نزدیک هستند و با تأخیر نسبتاً محسوس نسبت به یکدیگر رخ نمیدهند (نواحی سایه خورده در شکلهای ۱۷ **ب** و **۱۸ ب**). به طور جزئی، شروع تغییرات محسوس سرعت تغییر شکل افقی برای نواحی دورتر از مرکز (با فاصله ۴۰ میلیمتر) از ۱۳۰ میکروثانیه رخ میدهد درحالیکه هر چه به مرکز ورق نزدیک شویم، این نقطه آغازین به عدد ۱۴۰ میکروثانیه نزدیک می شود. این نشان می دهد که همچنان نقاط نزدیک به پیرامون گیردار ورق، سرعت تغییر شکل افقی را زودتر تجربه می کنند و مقادیر آن در مقایسه با سرعت تغییر شکل عمودی در تمامی فواصل محسوس و کمتر است. در این مرحله از بارگذاری نیز سرعت تغییرشکل افقی در مرکز ورق در قله اول همچنان ناچیز و بیشینه آن در قله دوم به ۱۹ متر بر ثانیه می سد که در مقایسه بارگذاری در مرحله اول ۵/۳ برابر افزایش یافته است. بیشینه سرعت تغییر شکل افقی در فاصله ۱۰ میلی متری از مرکز به میزان ۱۴ متر بر ثانیه اتفاق می افتد که این مقدار با دور شدن از آن به سمت پیرامون گیردار به میزان ۴۳۶٪، ۵۲۹ و ۲۲۱٪ به ترتیب در فواصل ۲۰، ۳۰ و ۴۰ میلی متری از مرکز افزایش می یابد که روند مشابه با بارگذاری اول نیست و خلاف آن رخ میدهد. این بدان معناست که ورق علاوه بر تغییرشکل در راستای ضخامت، تغییرشکل شعاعی را به علت اعمال بار مجدد روی آن تجربه می کند و عمده کار افزایش، در فاصله ۳۰ میلیمتری از مرکز ۲۰۳٪ افزایش و در فاصله ۴۰ میلیمتری از مرکز ۶۷٪ افزایش مییابد. سرعت تغییرشکل عمودی نیز در مرکز ورق ۵۷٪ کاهش، در فاصله ۱۰ میلیمتری از مرکز ۶۱٪ کاهش، در فاصله ۲۰ میلیمتری از مرکز ۵٪ افزایش، در فاصله ۳۰ میلیمتری از مرکز ۴٪ افزایش و در فاصله ۴۰ میلیمتری از مرکز ۴۱٪ کاهش مییابد.

در ادامه مطالعات عددی، به بررسی تغییرات فشار روی ورق در فواصل مختلف از مرکز آن حین اعمال بار انفجاری مکرر زیرآب در شکل ۲۰ پرداخته میشود. شایان توجه است که برای درک و تحلیل بهتر نتایج، نمودار بهصورت بزرگنمایی شده در یک بازه زمانی مشخص نیز ارائهشده است. همچنین مقادیر بیشینه فشار در هر فاصله بهصورت ستونی در شکل ۲۱ ارائهشده است.

همان طور که در نتایج مربوط به فشار حاصل از انفجار زیرآب روی ورق نشان دادهشده است، در بارگذاری اول، عمده اتفاقات در ۱۶۵ میکروثانیه ابتدایی فرآیند رخ میدهد بهطوریکه نمونه آزمایشی تا حدفاصل ۱۰ میلیمتری از مرکز ورق سه بیشینه (سه قله و دو دره)، تا حدفاصل ۳۰ میلیمتری از مرکز ورق دو بیشینه فشار (دو قله و یک دره) و در ۱۰ میلیمتر انتهایی ورق تنها یک بیشینه فشار را تجربه میکنند. این در حالی است که در بارگذاری دوم نیز عمده اتفاقات در همین بازه زمانی اما با روندی کاملاً متفاوت نسبت به مرحله اول از بارگذاری رخ می دهد. در بارگذاری اول، شروع تغییرات مهم فشار روی ورق از زمان ۱۲۰ میکروثانیه بوده و در ۱۳۵ میکروثانیه به بیشینه فشار اول برای تمامی فواصل (فاصله ۰ تا ۴۰ میلیمتر از مرکز ورق با بازه ۱۰ میلیمتر) می رسد. در این زمان، مرکز ورق کمترین (۱۷۱ مگاپاسکال) و نقطهای با فاصله ۳۰ میلیمتری از ورق بیشترین بیشینه فشار (۲۲۸ مگاپاسکال) را تجربه میکنند. بیشینه فشار دوم در مرکز و فاصله ۱۰میلیمتری از ورق زودتر نواحی دیگر و در زمان ۱۴۵ میکروثانیه به ترتیب با مقادیر ۶۸ مگاپاسکال و ۶۲ مگاپاسکال رخ میدهد. سایر نواحی؛ یعنی، فواصل ۲۰ و ۳۰ میلیمتری از مرکز ورق، به ترتیب بیشینه فشارهای ۹۷ مگاپاسکال و ۱۰۷ مگاپاسکال را در زمان ۱۵۰ میکروثانیه تجربه میکنند. همچنین، بیشینه

جرم خرج برای دو مرحله ضروری و لازم است. شایانذکر است که بیشترین بازه زمانی (ناحیه سایه خورده در شکل **۱۸ ب**) برای تغییرات سرعت تغییرشکل عمودی مربوط به نقطهای با فاصله ۴۰ میلیمتری از مرکز ورق به میزان ۷۰ میکروثانیه و با نقطه آغازین ۱۲۰ میکروثانیه است. این بازه با نزدیک شدن به مرکز ورق به ترتیب به میزان ۱۷٪ (۶۰ میکروثانیه در فاصله ۳۰ میلیمتری)، ۲۹٪ (۵۰ میکروثانیه در فاصله ۲۰ میلیمتری)، ۵۰٪ (۳۵ میکروثانیه در فاصله ۱۰ میلیمتری) و ۵۰٪ (۳۵ میکروثانیه در مرکز در قله اول) كاهش مىيابد. همچنين، بيشترين بازه زمانى (ناحيه سايه خورده در شکل ۱۷ ب) برای تغییرات سرعت تغییرشکل افقی مربوط به نقطهای با فاصله ۳۰ میلیمتری از مرکز ورق به میزان ۵۵ میکروثانیه و با نقطه آغازین ۱۳۵ میکروثانیه است. این بازه با نزدیک شدن به پیرامون گیردار ورق؛ یعنی، فاصله ۴۰ میلیمتری از مرکز ورق، به میزان ۵۵٪ (۲۵ میکروثانیه) کاهش می یابد. این روند کاهشی با حرکت از این نقطه به سمت مرکز ورق نیز تکرار شده و کمیت مذکور به ترتیب به میزان ۹٪ در فاصله ۲۰ میلیمتری (۵۰ میکروثانیه)، ۹٪ در فاصله ۱۰ میلیمتری (۵۰ میکروثانیه) و ./۴۵ در مرکز (۳۰ میکروثانیه در قله اول) کاهش می یابد.

مقایسه نتایج بهدستآمده و ارائهشده در شکل ۱۹ برای تغییر سرعت تغییرشکل افقی و عمودی در بارگذاریهای اول و دوم نشان میدهد که اعمال بار انفجاری دوم به نمونه آزمایشی موجب افزایش سرعت تغییرشکل عمودی و افقی در حدفاصل ۲۰ تا ۳۰ میلیمتری از مرکز ورق می گردد. همچنین، اعمال بار انفجاری دوم، رفتاری متفاوت در این دو سرعت تغییرشکل در مرکز و نزدیک به پیرامون گیردار ورق (فاصله ۴۰ میلیمتری از آن) از خود نشان میدهد بهطورىكه اعمال بار دوم به ورق موجب افزايش سرعت تغییرشکل افقی و کاهش سرعت تغییرشکل عمودی می گردد. شایان ذکر است که اعداد نشان داده شده در این شکل برای مرکز ورق در قله اول تغییرشکل رخ نمیدهند و در طول فرآیند شکلدهی ثبتشده است. بهطور جزئیتر، با اعمال بار انفجاری دوم به نمونه، سرعت تغییر شکل افقی در مرکز ورق ۵۳۳٪ افزایش، در فاصله ۱۰ میلیمتری از مرکز ./۵۶ کاهش، در فاصله ۲۰ میلیمتری از مرکز ۱۵۰٪



شکل (۲۰): تغییرات فشار روی ورق در فواصل مختلف از مرکز آن با بازه ۱۰ میلیمتر: الف) بارگذاری منفرد؛ ب) بارگذاری دوگانه.



شکل (۲۱): تغییرات بیشینه فشار روی ورق در فواصل مختلف از مرکز آن با بازه ۱۰ میلیمتر.

نتایج ارائهشده در شکل ۲۱ نشان میدهد که مقدار بیشینه فشار با دور شدن از مرکز ورق، ۹٪ افزایش در فاصله ۱۰ میلیمتری، ۲۸٪ افزایش در فاصله ۲۰ میلیمتری، ۳۳٪

افزایش در فاصله ۳۰ میلیمتری، ۲۴٪ افزایش در فاصله ۴۰ میلیمتری را در مقایسه با نقطه مرکزی ورق تجربه میکند. لذا از فاصله ۳۰ میلیمتری به بعد این روند افزایشی بیشینه

فشار در بارگذاری مرحله اول متوقف می گردد و عمده نغییرشکل پلاستیک ورق منحصر به بخش مرکزی آن می اشد که این موضوع در گستره تغییرشکل نمونه آزمایشی نیز مشهود است. در بارگذاری دوم، بیشینه فشار در نواحی دور از مرکز به ترتیب به میزان ۲۸٪، ۱۵٪، ۳۱٪ و ۴٪ نسبت به مرکز کاهش می یابد. اعمال بار انفجاری دوم به نمونه آزمایشی نشان می دهد که عمده تغییرات فشار در مقایسه با بارگذاری اول در مرکز و فاصله ۴۰ میلی متری از آن رخ می دهد و اختلاف فشار در این دو ناحیه در دو سیکل بارگذاری نسبتاً زیاد و به ترتیب به میزان ۱۲۰٪ و ۶۷٪ است. همچنین، کمترین تأثیر در فاصله ۳۰ میلی متری از مرکز و به میزان ۱۴٪ رخ می دهد.

در ادامه مطالعات عددی، به بررسی تغییرات تنش فون میسز در جلوی ورق (وجه در تماس با آب) و پشت ورق (وجه در تماس با هوا) در زمانهای مختلف در شکل ۲۲ یرداخته می شود. لازم به توضیح است که در این حالت برای درک بهتر نتایج عددی، تغییرات کمی تنش در هر زمان برای هر دو بارگذاری منفرد و دوگانه ثابت فرض شده است. نتایج نشان میدهد که تنشهای باقیمانده از انتهای بارگذاری اول در ابتدا بارگذاری دوم روی نمونه آزمایشی اعمال شده است. این بدان معناست که شرایط آزمایشگاهی در شبیهسازی عددی با دقت واردشده است و مدل می تواند پیشبینی خوبی از رفتار ورق در بارگذاری انفجاری مکرر زیرآب داشته باشد. با بررسی دقیق کانتورهای نشان دادهشده این نتیجه حاصل می شود که در بار گذاری اول، در ابتدای فرآیند و تا زمان ۱۲۵ میکروثانیه، بیشتر تمرکز تنش در نواحی مرکزی و پیرامونی وجه جلو و پشت ورق است. در زمان ۲۵۰ میکروثانیه، یک ناحیه حلقوی زردرنگ در مرکز وجه پشتی ورق با بیشینه تنشی در حدود ۵۱۵ مگاپاسکال ایجاد می شود. این در حالی است که در وجه جلویی این ورق، ناحیه حلقوی مذکور در نزدیکی پیرامون گیردار ورق با بیشینه تنشی کمتر از ۵۱۵ مگاپاسکال دیده میشود. در زمان ۳۷۵ میکروثانیه، پیرامون گیردار ورق در وجه جلویی متحمل بیشینه تنش است درحالی که وجه پشتی در نواحی میانی ورق بیشینه تنش را تحمل میکند. در انتهای فرآیند در بارگذاری اول، بیشینه تنش در فواصل ۲۰ تا ۴۰

میلیمتری از مرکز بهخوبی در هر دو وجه مشهود است. در بارگذاری دوم، به دلیل تغییرشکل پلاستیک بزرگ در مرحله اول، رفتار ورق در دو وجه از ابتدای فرآیند کاملاً متفاوت است بهطوری که از ابتدا تا انتهای فرآیند تغییر شکل، نواحی پیرامونی در وجه جلویی ورق و همچنین نواحی مرکزی در وجه پشتی بیشینه تنش را تحمل میکنند. در ادامه مطالعات عددی، به بررسی تغییرات معیار آسیب جانسون کوک در جلوی ورق (سطح در تماس با آب) و پشت ورق (وجه در تماس با هوا) در طول فرآیند تغییر شکل در شکلهای ۲۳ و ۲۴ پرداخته می شود. لازم به توضیح است که نتایج ارائهشده بهصورت کانتور دو بعدی، تغییرات کمی معیار آسیب در جلو و پشت ورق در انتهای فرآیند برای هر دو بارگذاری منفرد و دوگانه ثابت فرض شده است. نتایج نشان میدهد که بیشینه معیار آسیب در هر دو وجه از ۰/۲۵ تجاوز نمی کند و به نمونه آزمایشی آسیبی وارد نمی شود.

#### ۵– نتیجهگیری

در این مقاله هدف آن بود تا بتوان در ابتدا با استفاده از نرمافزار تجاری آباکوس و روش کپل اویلری-لاگرانژی به انجام شبیهسازیهای موردنیاز برای تحلیل شکلدهی با قالب مادگی ورقهای فلزی تحت انفجار مکرر زیرآب پرداخت. جهت صحتسنجی مدل عددی، از مطالعات تجربی پیشین نویسندگان حاضر در مرجع [۱] استفاده شد. نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

 ۱) برخلاف نتایج بهدستآمده برای شکلدهی انفجاری در مراجع [۴, ۲۹, ۳۰]، نمونه آزمایشی در بارگذاری اول و دوم پس از طی کردن ناحیه تغییرشکل گذرا دچار نوسانات یا اصطلاحاً پدیده بازگشت فنری نمی شود و مقدار آن سریعاً به میزان بیشینه یا همان عمق قالب نزدیک می گردد. ورق پس از برخورد با قالب دچار تغییر شکل وارون یا کاهش میزان تغییر شکل نمی گردد. علت این مسئله را می توان در انتخاب مناسب میزان جرم خرج و همچنین استفاده از قالب مادگی جستجو کرد.

	بارگذاری دوم (۸ گرم)	بارگذاری اول (۴ گرم)			زمان
نمای پشت ورق	نمای جلوی ورق	نمای پشت ورق	نمای جلوی ورق	محدوده تغييرات	(µs)
				S, Mises (Avg: 75%) +4.870e+08 +4.464e+08 +4.464e+08 +3.652e+08 +3.247e+08 +2.435e+08 +2.435e+08 +1.623e+08 +1.218e+08 +1.218e+08 +1.218e+07 +4.058e+07 +0.000e+00	
				S, Mises (Avg: 75%) +4.740e+08 +4.345e+08 +3.950e+08 +3.160e+08 +2.765e+08 +2.765e+08 +2.370e+08 +1.975e+08 +1.185e+08 +1.185e+08 +1.185e+08 +7.900e+07 +0.000e+00	١٢۵
				S, Mises (Avg: 75%) +6.840e+08 +6.277e+08 +5.713e+08 +5.150e+08 +4.587e+08 +4.023e+08 +2.333e+08 +2.333e+08 +1.207e+08 +1.207e+08 +1.207e+08 +1.207e+08	۲۵۰
	Ó			S, Mises (Avg: 75%) +6.430e+08 +5.899e+08 +5.899e+08 +4.837e+08 +4.837e+08 +4.307e+08 +3.776e+08 +3.776e+08 +2.714e+08 +2.183e+08 +1.122e+08 +1.122e+08 +1.122e+08 +1.122e+08 +1.122e+08 +1.653e+07 +6.000e+06	۳۷۵
				S, Mises (Avg: 75%) +5.540e+08 +4.636e+08 +4.636e+08 +4.184e+08 +3.731e+08 +2.827e+08 +2.827e+08 +1.923e+08 +1.923e+08 +1.471e+08 +1.018e+08 +5.662e+07 +1.140e+07	۵۰۰

**شکل (۲۲): تغییرات تنش فون میسز در وجه جلویی و پشتی ورق در فواصل زمانی مختلف برای هر دو بارگذاری منفرد و دوگانه.** 



شکل (۲۳): تغییرات معیار آسیب جانسون کوک در حین فرآیند تغییرشکل ورق در بارگذاری منفرد و دوگانه.

	بارگذاری دوم (۸ گرم)	بارگذاری اول (۴ گرم)			زمان
نمای پشت ورق	نمای جلوی ورق	نمای پشت ورق	نمای جلوی ورق	محدودة تعييرات	(µs)
				JCCRT (Avg: 75%) +2.300e-01 +2.108e-01 +1.917e-01 +1.725e-01 +1.533e-01 +1.342e-01 +1.542e-01 +1.542e-01 +1.542e-01 +1.542e-01 +1.5750e-02 +3.833e-02 +3.833e-02 +3.833e-02 +1.917e-02 +0.000e+00	۵۰۰

**شکل (۲۴): تغییرات معیار آسیب جانسون کوک در انتهای فرآیند تغییرشکل در وجه جلویی و پشتی ورق برای بارگذاری منفرد و** دوگانه.

- ۲) برخلاف نتایج بهدستآمده برای شکلدهی انفجاری در مراجع [۴, ۲۹, ۳۰]، نمونه آزمایشی در بارگذاری اول و دوم پس از طی کردن ناحیه تغییرشکل گذرا دچار نوسانات یا اصطلاحاً پدیده بازگشت فنری نمی شود و مقدار آن سریعاً به میزان بیشینه یا همان عمق قالب نزدیک می گردد. ورق پس از برخورد با قالب دچار تغییر شکل وارون یا کاهش میزان تغییر شکل نمی گردد. علت این مسئله را می توان در انتخاب مناسب میزان جرم خرج و همچنین استفاده از قالب مادگی جستجو کرد.
- ۳) در بارگذاری اول، میزان بیشینه تغییرشکل در فواصل ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ میلیمتری از ورق به ترتیب به میزان ۰۰٪، ۱۰٪، ۱۰٪ ٪۲۳، ٪۳۶، ٪۵۱، ٪۶۶ و ۸۰٪ کاهش مییابد. نتایج مشخص می-کند که پس از دور شدن به میزان مشخص میلیمتر از مرکز ورق، نرخ کاهش میزان تغییرشکل سرعت بیشتری پیدا میکند و این

موضوع خود دلیلی بر استفاده از پدیده بارگذاری مکرر در شکلدهی فلزات است. در بارگذاری دوم که با جرم خرجی دو برابر بارگذاری اول اعمال شده است، نمونه آزمایشی در مرکز و فاصله ۱۰ میلیمتری از آن هیچگونه تغییر شکل محسوسی تجربه نمی کند و تنها در این ناحیه دچار نوسانات بسیار جزئی است.

(۴) با توجه به اینکه بار انفجاری بهصورت محوری و ضربهای روی نمونه ورق اعمال میشود، در بارگذاری اول، تغییرات سرعت تغییرشکل عمودی چندین برابر سرعت تغییرشکل افقی و در قله اول بسیار محسوس است. این در حالی است که برای سرعت تغییرشکل افقی، نقاط دورتر از مرکز ورق سریعتر سرعت تغییرشکل افقی را تجربه میکنند با این تفاوت که مقادیر آن در مقایسه با سرعت تغییرشکل عمودی به دلیل محوری بودن بارگذاری چشمگیر نیست و در طول فرآیند در بخش مرکزی Mechanics. 2024;20(3):1-16. **DOR:** https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455323.1403. 20.3.1.7

[2] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Alitavoli M. 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. 2017;231(3):490-6. **DOI:** https://doi.org/10.1177/0054409015611055

https://doi.org/10.1177/0954408915611055

[3] Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M, Lu G, Ruan D. Large transverse deformation of double-layered rectangular plates subjected to gas mixture detonation load. International Journal of Impact Engineering. 2019;125:93-106. **DOI:** https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.11.005

[4] Nasiri S, Sadegh-Yazdi M, Mousavi S, Ziya-Shamami M, Mostofi T. Repeated underwater explosive forming: Experimental investigation and numerical modeling based on coupled Eulerian-Lagrangian approach. Thin-Walled Structures. 2022;172:108860. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ture.2021.108960

https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108860

[5] Nasiri S, Sadegh-Yazdi M, Mostofi T, Mousavi S, Ziya-Shamami M. Optimization of effective parameters in free iron sheet forming process by underwater explosion method. Journal of Aerospace Mechanics. 2022;18(1):137-59. **DOR:** https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455323.1403. 20.3.1.7

[6] Nasiri S, Sadegh Yazdi M, Zia Shamami M. A review on the underwater explosive forming. Journal of Solid and Fluid Mechanics. 2022;11(6):59-83. **DOI:** 

https://doi.org/10.22044/jsfm.2022.11060.3447

[7] Tran P, Wu C, Saleh M, Neto LB, Nguyen-Xuan H, Ferreira A. Composite structures subjected to underwater explosive loadings: A comprehensive review. Composite Structures. 2021;263:113684. **DOI:** 

https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.1136 84

[8] Babaei H, Mostofi TM, Sadraei SH. Effect of gas detonation on response of circular plateexperimental and theoretical. Structural Engineering and Mechanics. 2015;56(4):535-48. **DOI:** 

#### https://doi.org/10.12989/sem.2015.56.4.535

[9] Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M. The influence of gas mixture detonation loads on large plastic deformation of thin quadrangular plates: Experimental investigation and empirical ورق تقریباً صفر (نهایتاً ۳ متر بر ثانیه در نقطه بیشینه) است.

- ۵) با توجه به پایین بودن میزان سرعت تغییرشکل افقی و همچنین کاهش شدید نرخ سرعت تغییرشکل عمودی در فاصله ۲۰ میلیمتری از مرکز به بعد، اعمال بارگذاری مجدد روی ورق جهت رسیدن به شکل قالب مادگی ضروری و لازم است.
- ۶) در بارگذاری دوم، نتایج به دست آمده برای تغییرات سرعت تغییر شکل افقی و عمودی کمی متفاوت است و با توجه به اینکه نمونه در مرحله اول بارگذاری تغییر شکل پلاستیک بزرگی را تجربه کرده است، تغییرات سرعت تغییر شکل افقی در مقایسه با دفعه قبلی بارگذاری محسوس است. در بارگذاری دوم، برخلاف تغییرات سرعت تغییر شکل در بارگذاری اول، شروع تغییرات محسوس هر دو سرعت تغییر شکل افقی و عمودی برای تمامی فواصل از مرکز بسیار به هم نزدیک هستند و با تأخیر نسبتاً محسوس نسبت به یکدیگر رخ نمی دهند.
- ۷) در انتهای فرآیند در بارگذاری اول، بیشینه تنش در فواصل ۲۰ تا ۴۰ میلیمتری از مرکز بهخوبی در هر دو وجه مشهود است. در بارگذاری دوم، به دلیل تغییرشکل پلاستیک بزرگ در مرحله اول، رفتار ورق در دو وجه از ابتدای فرآیند کاملاً متفاوت است بهطوریکه از ابتدا تا انتهای فرآیند تغییرشکل، نواحی پیرامونی در وجه جلویی ورق و همچنین نواحی مرکزی در وجه پشتی بیشینه تنش را تحمل میکنند.
- ۸) بیشینه معیار آسیب در هر دو وجه از ۲۵/۰ تجاوز
   نمیکند و به نمونه آزمایشی آسیبی وارد نمی شود.

#### ۵- مراجع

[1] Kouzehgaran M, Khodarahmi H, Sadegh-Yazdi M, Ziya-Shamami M, Mostofi T. Female Die Forming of Metallic Plates using Repeated Underwater Explosions. Journal of Aerospace [19] Ruan L, Ezaki S, Masahiro F, Shen S, Kawamura Y. Forming of magnesium alloy by underwater shock wave. Journal of Magnesium and Alloys. 2016;4(1):27-9. **DOI:** <u>https://doi.org/10.1016/j.jma.2015.12.003</u>

[20] De Vuyst T, Kong K, Djordjevic N, Vignjevic R, Campbell J, Hughes K. Numerical modelling of the effect of using multi-explosives on the explosive forming of steel cones. Journal of Physics: Conference Series. 2016;734:032021. **DOI:** https://doi.org/10.1088/1742-6596/734/3/032074

[21] Iyama H, Higa Y, Nishi M, Itoh S. Numerical simulation of explosive forming using detonating fuse. The International Journal of Multiphysics. 2017;11(3):233-44. **DOI:** https://doi.org/10.21152/1750-9548.11.3.233

[22] Ren P, Zhou J, Tian A, Zhang W, Huang W. Experimental and numerical investigation of the dynamic behavior of clamped thin panel subjected to underwater impulsive loading. Latin American Journal of Solids and Structures. 2017;14:978-99. **DOI:** https://doi.org/10.1590/1679-78253521

[23] Heshmati M, Zamani AJ, Mozafari A. Experimental and numerical study of isotropic circular plates' response to underwater explosive loading. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. 2017;48(2):106-21. **DOI:** https://doi.org/10.1002/mawe.201600578

[24] Zhang Z, Wang C, Wang L, Zhang A, Silberschmidt VV. Underwater explosion of cylindrical charge near plates: Analysis of pressure characteristics and cavitation effects. International Journal of Impact Engineering. 2018;121:91-105. **DOI:** https://doi.org/10.1016/j.ijjimpeng.2018.06.009

[25] Nishi M, Sakaguchi H, Tanaka S, Iyama H, Fujita M. Research on explosive forming of magnesium alloy plate using numerical simulation and experimental studies (I). Sci Technol Energetic Mater. 2018;79(5-6):156-9.

[26] Iyama H, Higa Y, Nishi M, Itoh S. Magnesium alloy forming using underwater shock wave by wire electric discharge. Int J Multiphys. 2019;13:269-82.

[27] Dai K, Liu H, Chen P, Guo B, Xiang D, Rong J. Dynamic response of copper plates subjected to underwater impulsive loading. Applied Sciences. 2019;9(9):1927. **DOI:** https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.01.022 modelling. Thin-Walled Structures. 2017;118:1-11. DOI:

https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.04.031

[10] Mirzababaie Mostofi T, Babaei H, Alitavoli M. Experimental and theoretical study on large ductile transverse deformations of rectangular plates subjected to shock load due to gas mixture detonation. Strain. 2017;53(4):e12235. **DOI:** https://doi.org/10.1111/str.12235

[11] Rajendran R, Narasimhan K. Deformation and fracture behaviour of plate specimens subjected to underwater explosion-a review. International Journal of Impact Engineering. 2006;32(12):1945-63. **DOI:** 

https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2005.05.013

[12] Ashani J, Ghamsari A. Theoretical and experimental analysis of plastic response of isotropic circular plates subjected to underwater explosion loading. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. 2008;39(2):171-5. **DOI:** https://doi.org/10.1002/mawe.200700256

[13] Jones N. Structural impact. Cambridge University Press; 2012. [Book - No DOI]

[14] Hadavi V, Zamani J, Hosseini R. The empirical survey on the effect of using media in explosive forming of tubular shells. International Journal of Materials and Metallurgical Engineering. 2009;3(12):649-54.

[15] Zamani J, Safari K, Ghamsari A, Zamiri A. Experimental analysis of clamped AA5010 and steel plates subjected to blast loading and underwater explosion. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. 2011;46(3):201-12. DOI:

https://doi.org/10.1177/0309324710396601

[16] Iyama H, Higa Y, Itoh S. Study on the effects of shock wave propagation on explosive forming. Materials Science Forum. 2014;783-786:1479-84. **DOI:** 

https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF. 767.132

[17] Huang W, Jia B, Zhang W, Huang X, Li D, Ren P. Dynamic failure of clamped metallic circular plates subjected to underwater impulsive loads. International Journal of Impact Engineering. 2016;94:96-108. **DOI:** 

https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2016.04.006

[18] Iyama H, Itoh S. Study on explosive forming of aluminum alloy. The International Journal of Multiphysics. 2010;4(4):341-50. **DOI:** https://doi.org/10.1260/1750-9548.4.4.341

**DOI:** <u>https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2021.10</u> 4108

[37] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T. Modeling and prediction of fatigue life in composite materials by using singular value decomposition method. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications. 2020;234(2):246-54. **DOI:** 

https://doi.org/10.1177/1464420716660875

[28] Behtaj M, Babaei H, Mostofi TM. Repeated uniform blast loading on welded mild steel rectangular plates. Thin-Walled Structures. 2022;178:109523. **DOI:** <u>https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109523</u>

[29] Rezasefat M, Mirzababaie Mostofi T, Babaei H, Ziya-Shamami M, Alitavoli M. Dynamic plastic response of double-layered circular metallic plates due to localized impulsive loading. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications. 2019;233(7):1449-71. **DOI:** https://doi.org/10.1177/1464420718760640

[30] Rezasefat M, Mostofi TM, Ozbakkaloglu T. Repeated localized impulsive loading on monolithic and multi-layered metallic plates. Thin-Walled Structures. 2019;144:106332. **DOI:** https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106332

[31] Rigby SE, Tyas A, Bennett T, Fay SD, Clarke SD, Warren JA. A numerical investigation of blast loading and clearing on small targets. International Journal of Protective Structures. 2014;5(3):253-74. **DOI:** https://doi.org/10.1260/2041-4196.5.3.253

[32] Rigby SE, Barr AD, Clayton M. A review of Pochhammer-Chree dispersion in the Hopkinson bar. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering and Computational Mechanics. 2018;171(1):3-13. **DOI:** https://doi.org/10.1680/jencm.16.00027

[33] Johnson GR, Cook WH. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics; 1983: The Netherlands.

[34] Johnson G, Cook W. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates and temperatures and pressures. Engg Fract Mech. 1985;21(1):31-48. **DOI:** 

https://doi.org/10.1016/0013-7944(85)90052-9

[35] Elek PM, Jaramaz SS, Micković DM, Miloradović NM. Experimental and numerical investigation of perforation of thin steel plates by deformable steel penetrators. Thin-Walled Structures. 2016;102:58-67. **DOI:** https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.01.022

[36] Haghgoo M, Babaei H, Mostofi TM. 3D numerical investigation of the detonation wave propagation influence on the triangular plate deformation using finite rate chemistry model of LS-DYNA CESE method. International Journal of Impact Engineering. 2022;161:104108.