Journal of Aerospace Mechanics/ 2025/ Vol.21/ No.1/ 1-27

Journal of Aerospace Mechanics

DOR: 20.1001.1.26455323.1404.21.1.1.0

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

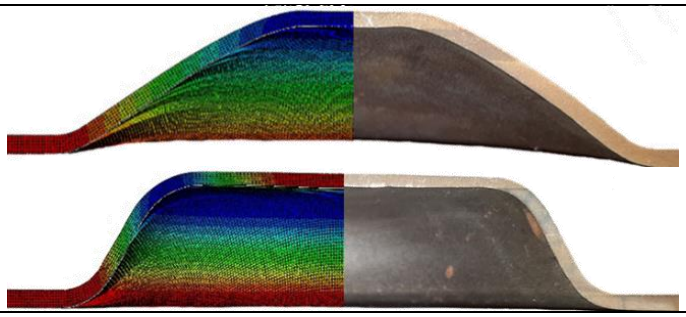
Mohammad Kouzehgaran[1], Hossein Khodarahmi [2], Milad Sadegh-Yazdi [3*], Mojtaba Ziya-Shamami [3], Tohid Mirzababaie Mostofi [4]

[1] Ph.D. Student, Faculty of Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran
[2] Professor, Faculty of Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran
[3] Assistant Professor, Faculty of Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran
[4] 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

GRAPHICAL ABSTRACT



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

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 1st and 2nd 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 2nd 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 Non-Commercial (CC BY-NC) license.

Publisher: Imam Hossein University © Authors

مکانیک هوافضا/ سال ۱۴۰۴/ دوره ۲۱/ شماره ۱/ صفحه ۱-۲۷

نشریه مکانیک هوافضا

DOR: 20.1001.1.26455323.1404.21.1.1.0

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

محمد کوزه‌گران[۱]، حسین خدارحمی[۲]، میلاد صادق یزدی[۳*]، مجتبی ضیاءشمامی[۳]، توحید میرزابابای مستوفی[۴]

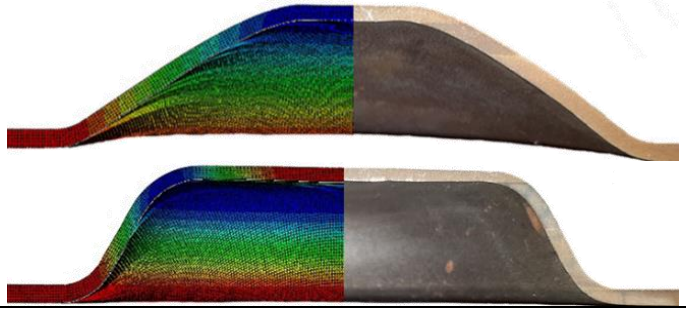
[۱]دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه امام حسین(ع)، تهران، ایران

[۲]استاد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه امام حسین(ع)، تهران، ایران

[۳]استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه امام حسین(ع)، تهران، ایران

[۴]استادیار، دانشکده مهندسی برق، مکانیک و کامپیوتر، دانشگاه ایوان‌کی، ایوان‌کی، ایوان، ایران

چکیده گرافیکی



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

چکیده

در مقاله حاضر به شبیه‌سازی عددی رفتار ورق‌های فلزی در فرآیند شکل‌دهی سرعت‌بالا با قالب مادگی نمونه پرداخته‌شده است. همچنین از روش بارگذاری انفجاری مکرر زیرآب جهت اعمال بار به نمونه بهره گرفته‌شده به‌طوری‌که 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 ساختاری ویسکوپلاستیسیته جانسون-کوک جهت شبیه‌سازی عددی فرآیند بهره گرفته شد. مدل عددی با استفاده از آزمایش‌های انجام‌شده در مرجع [۱] صحت‌سنجی شد. نشان داده شد که مدل عددی به‌خوبی گستره تغییرشکل و همچنین نحوه توزیع ضخامت در راستای طولی ورق را ایجاد می‌کند. با استفاده از مدل عددی صحت‌سنجی‌شده، کمیت‌هایی نظیر تغییرات سرعت تغییرشکل افقی و سرعت تغییرشکل عمودی، 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 نمی‌شود و مقدار آن سریعاً به میزان بیشینه (عمق قالب مادگی) نزدیک می‌گردد. همچنین، ورق پس از برخورد با قالب دچار تغییرشکل وارون یا کاهش میزان تغییرشکل نمی‌گردد. 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.

مشخصات مقاله

تاریخچه 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

کلیدواژه‌ها:

شکل‌دهی با قالب

قالب مادگی

انفجار مکرر زیرآب

شبیه‌سازی عددی

روش کوپل اویلری-لاگرانژی

سرعت تغییرشکل

* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز (CC BY-NC) Creative Commons Attribution Non-Commercial توزیع‌شده است.

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین(ع)

© نویسندگان

۱- مقدمه

انفجار زیرآب پدیده‌ای فیزیکی است که در جریان آن به دلیل واکنش‌های شیمیایی، ماده منفجره زیر سطح آب منفجر می‌شود. در طول این انفجار، امواج فشاری و حباب گاز ایجاد خواهد شد. هنگام انفجار، موجی به نام موج فشار شکل می‌گیرد و درصورتی‌که سرعت این موج بیشتر از سرعت صوت شود، به آن موج شوک می‌گویند. 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 [۱]. 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 می‌شود؛ اما در روش شکل‌دهی 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 می‌شود تا نمونه شکل قالب را به خود بگیرد. از یک محیط واسط سیال مانند آب به‌منظور انتقال انرژی بیشتر و فشار یکنواخت‌تر استفاده می‌شود [۶-۲]. در روش شکل‌دهی انفجاری زیرآب ماده منفجره در درون مخزن فشار پر از آب قرار می‌گیرد و توسط یک چاشنی الکتریکی منفجر می‌شود. موج شوک زیرآب از طریق محیط آب انتشار می‌یابد و به نمونه می‌رسد و باعث تغییرشکل آن می‌شود [۷]. اگر از قالب فلزی استفاده شود، نمونه به فرم مشخص تغییرشکل می‌دهد. به‌طورکلی، نمونه در شکل‌دهی انفجاری دارای برگشت فنری کمی است، زیرا تغییرشکل پلاستیک کافی به دست می‌آید. دو فشار بر روی نمونه تحت شکل‌دهی انفجاری اعمال می‌شود، اولین پالس فشار از بارگذاری موج شوک است و پالس فشار دوم ناشی از انبساط حباب تولیدشده توسط انفجار ماده منفجره است. مدت‌زمان پالس فشار ثانویه بیشتر است، اما بیش فشار کمتری از بیش فشار پالس فشار اولیه دارد. شدت پالس فشار بر اساس شرایط مخزن فشار است. هندسه تغییرشکل 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, ۸-۱۰].

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 ورق‌های 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 تئوری برای پیش‌بینی رفتار پلاستیکی ورق‌های 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 شکل‌دهی انفجاری، اثرات هوا و آب به‌عنوان محیط انتقال انرژی و همچنین تفاوت‌های آن‌ها نشان داده‌شده است. طبق نتایج آن‌ها، اندازه‌گیری نمونه‌های آزمایش‌شده 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، هنگامی‌که 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 تأثیر 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 شکل‌دهی انفجاری زیرآب آلیاژ آلومینیوم پرداختند. در کار آن‌ها شبیه‌سازی 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 بیشترین حد تغییرشکل آلیاژ منیزیم و بررسی تغییرات سختی مواد تحت بارگذاری موج شوک زیرآب آزمایش‌هایی طراحی کردند. نتایج تجربی آن‌ها 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 یک مدل با ماده منفجره واحد اتفاق خواهد افتاد. ایاما 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-ویکنز-لی به‌منظور تشریح رفتار ماده منفجره و همچنین 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 تکیه‌گاه‌ها اتفاق می‌افتد و تغییرشکل نهایی ورق، شبیه به گنبد است که به‌عنوان مود III یاد می‌شود. 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 تحقیق آن‌ها نشان داد با افزایش ضخامت شکل‌پذیری ورق‌های فلزی کاهش می‌یابد و تغییرشکل 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 رقیق‌کننده 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 رقیق‌کننده، 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 تجربی ارائه دادند. مطالعه تجربی آن‌ها روی ورق آلیاژ منیزیم AZ31 به‌منظور یافتن شرایط بهینه تجربی صورت گرفت. همچنین آن‌ها برای شبیه‌سازی عددی از کد انسیس-اتوداین استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد هنگامی‌که زاویه انحراف قالب تند می‌شود، چین‌وچروک به سمت محیط ورق میل خواهند کرد. ایاما و همکاران [۲۶] شکل‌دهی آلیاژ منیزیم را با استفاده از موج شوک زیرآب توسط سیم الکتریکی بررسی کردند. نتایج کار 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 کردند. آن‌ها به‌وسیله آزمایش‌ها، کنش سیال-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 تغییرشکل ورق به ترتیب به اشکال مخروطی و گنبدی برای بارگذاری منفرد و مکرر تغییر می‌کند. علاوه بر این، شبیه‌سازی عددی بارگذاری انفجار زیرآب و برهم‌کنش 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، شکل‌پذیری عالی، یکنواخت بودن در پروفیل تغییرشکل و ضخامت، مقدار کمتر برای معیار آسیب JC و توزیع تنش فون میسز پایین‌تر 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 تولید انبوه استفاده شود.

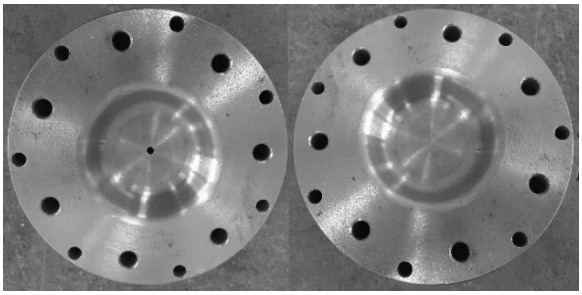
با مرور مطالعات پیشین محققان، این نتیجه حاصل شد که تمامی مطالعات در زمینه شکل‌دهی انفجاری زیرآب ورق‌های فلزی با استفاده از بارگذاری انفجاری منفرد بود و به‌جز مراجع [۴, ۵] که مربوط به گروه تحقیقاتی حاضر و مربوط به شکل‌دهی بدون قالب ورق فلزی است، تاکنون از ایده بارگذاری مکرر جهت افزایش میزان تغییرشکل و 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 پرداخته‌شده است. ازاین‌رو، در بخش‌های دوم و سوم مقاله حاضر به تشریح کار تجربی و عددی صورت گرفته و همچنین ارائه نتایج مربوط به آن پرداخته‌شده است.

۲- مطالعات آزمایشگاهی [۱]

نمونه‌های آزمایش تجربی برای شکل‌دهی با قالب تحت انفجار مکرر زیرآب در ابعاد ۲۵۰ میلی‌متر × ۲۵۰ میلی‌متر با ضخامت ۳ میلی‌متر در نظر گرفته‌شده است. ورق به‌طور کامل در شعاع ۸۵ میلی‌متری توسط هفت پیچ بسته‌شده است و یک ناحیه در معرض موج با شعاع ۵۰ میلی‌متر در تماس با آب باقی می‌ماند. نگه‌دارنده‌ها به‌عنوان جسم‌های صلب در نظر گرفته می‌شوند، زیرا آن‌ها تغییرشکل دائمی قابل‌توجهی را در مقایسه با ورق تجربه نمی‌کنند. جنس قالب از نوع فلز St-37 می‌باشد. قالب ازیک‌طرف محدود به پروفایل تغییرشکل (شکل موردنظر جهت شکل‌دهی) و از طرف دیگر دارای پایه‌ای است که بتواند اجازه دهد پیچ و مهره‌ها به‌راحتی بسته شود. در وسط قالب یک سوراخ یا راهگاه قرار دارد که محل تخلیه هوای پشت ورق فلزی می‌باشد. برای اتصال ورق به قالب هفت سوراخ سرتاسری به قطر ۹/۵ میلی‌متر در نظر گرفته‌شده است (شکل **۱**).

ازآنجایی‌که 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 کردن طول نگه‌دارنده، فاصله استقرار ماده منفجره از سطح بالایی ورق تنظیم می‌شود. همانند آنچه در شکل **۲** نشان داده‌شده است، یک سوراخ سرتاسری به‌منظور محل عبور چاشنی الکتریکی نیز در ساختار نگه‌دارنده در نظر گرفته‌شده است. همچنین محل قرارگیری ماده منفجره در نگه‌دارنده دارای ارتفاع ۲۰ میلی‌متر می‌باشد و تنظیم مرکز انفجار توسط فاصله‌انداز یونولیتی انجام می‌شود. تا فاصله استقرار از ورق ثابت بماند. همان‌طور که گفته شد، از یونولیت برای فاصله انداختن و تنظیم فاصله خرج انفجاری در محل خود از ورق استفاده می‌شود. 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 اندازه‌گیری 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 به‌کاربرده شده جهت انجام آزمایش در شکل **۳** نشان داده‌شده است.

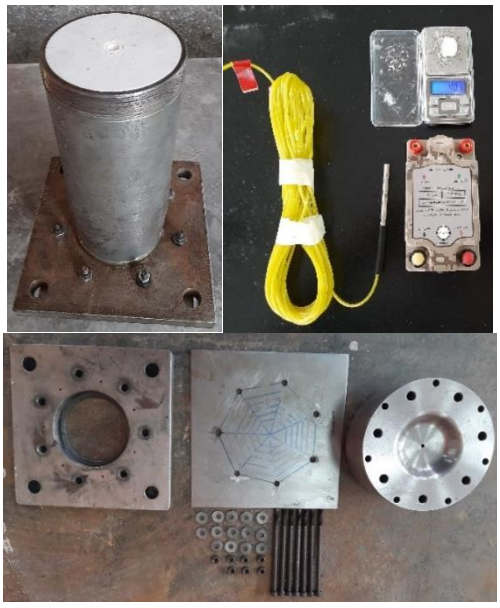


شکل (۱): قالب مادگی با و بدون راهگاه برای شکل‌دهی سرعت‌بالا ورق فلزی تحت انفجار مکرر زیرآب.

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 به‌کاربرده شده است. هنگام انفجار موج شوک به‌صورت کروی به تمام محیط پیرامون منتشر می‌شود به همین علت در فرآیندهای انفجار آزاد فقط جبهه موج با نمونه برخورد می‌کند که سبب شکل‌دهی می‌شود و مقدار بسیار زیادی از انرژی انفجاری در محیط تلف می‌شود. گاهی این جبهه موج، انرژی لازم جهت ایجاد تغییرشکل‌های بزرگ در نمونه را ندارد که به‌ناچار 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 غیرقابل‌کنترل شدن

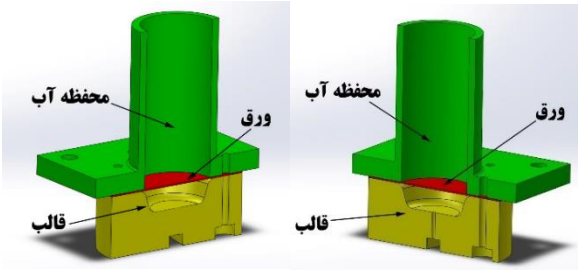
فرآیند به وجود می‌آورد. استفاده کردن از لوله‌های انفجاری تا حد بسیار زیادی این مشکلات را برطرف می‌سازد و می‌توان موج‌های انعکاسی از دیواره‌های داخلی لوله را به سمت نمونه هدایت کرد و درنتیجه در مقدار خرج کمتری فرآیند شکل‌دهی صورت بپذیرد. لوله استفاده‌شده در این آزمایش‌ها از جنس فولاد با تنش تسلیم بسیار 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.

همان‌طور که به‌صورت شماتیک در شکل **۴** نشان داده‌شده است، لوله انفجار پر از آب به نگه‌دارنده بالایی رزوه شده و با نگه‌دارنده پایینی که ورق آزمایشی را در بر دارد، توسط پیچ‌های مذکور متصل شده است. بارگذاری انفجاری زیرآب با انفجار دیسک‌های دایره‌ای در فاصله ۲۱۵ میلی‌متری از سطح بالایی ورق اعمال می‌شود. یک نگه‌دارنده خرج انفجاری در بالای لوله قرار دارد و خرج توسط چاشنی الکتریکی فعال می‌شود.

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].

شماره	بارگذاری	راهگاه	خرج (g)
SB-4-B1-01-VH	منفرد	دارد	۴
DB-48-B1-02-VH	مکرر	دارد	۴
DB-48-B2-03-VH	(دوگانه)		۸
TB-488-B1-04-VH	مکرر	دارد	۴
TB-488-B2-05-VH	(سه‌گانه)		۸
TB-488-B3-06-VH			۸
QB -4888-B1-07-VH	مکرر	دارد	۴
QB -4888-B2-08-VH	(چهارگانه)		۸
QB -4888-B3-09-VH			۸
QB -4888-B4-10-VH			۸
SB-4-B1-11-NVH		ندارد	۴
DB-48-B1-12-NVH	مکرر	ندارد	۴
DB-48-B2-13-NVH	(دوگانه)		۸

۳- شبیه‌سازی عددی فرآیند

۳-۱- روش کوپل اویلری-لاگرانژی

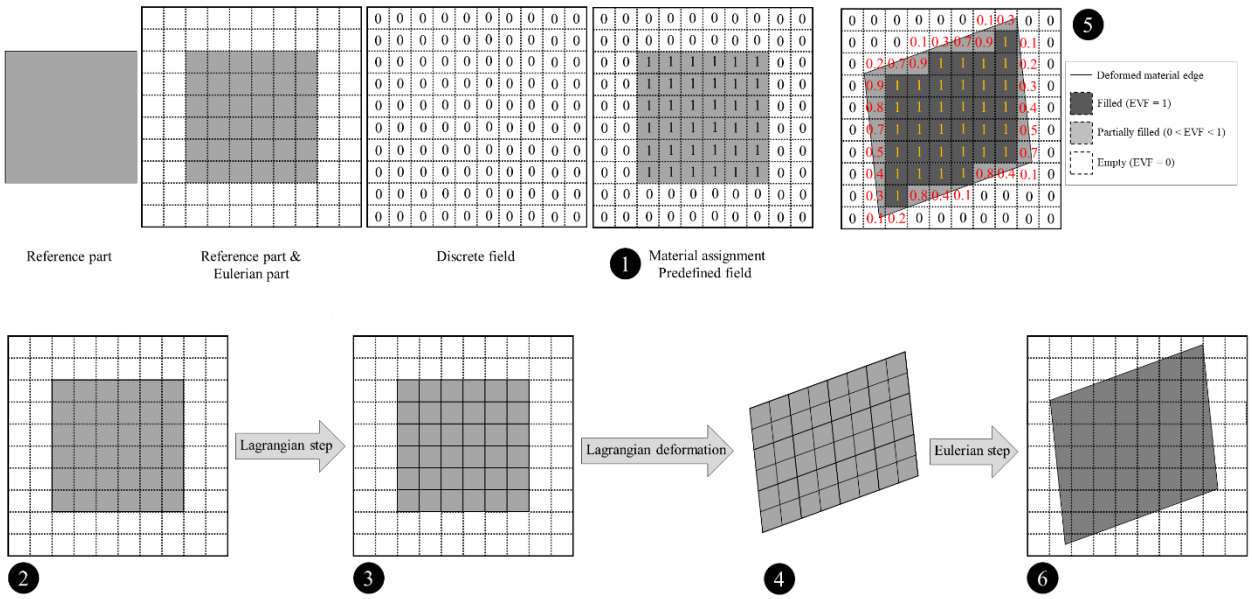
یکی از روش‌های قابل‌قبول و مناسب برای مسائلی که در آن سازه، تغییرشکل‌های پلاستیک بزرگی را تجربه می‌کند، به‌ویژه در مدل‌سازی جریان سیال، تحلیل اویلری است. در طول تحلیل اویلری در روش المان محدود، شبکه‌ها تغییرشکل نمی‌دهند زیرا گره‌ها به‌طور کامل در فضا ثابت هستند؛ این در حالی است که نقاط مادی در شبکه‌ها جریان دارند. این موضوع به‌عنوان یک مزیت باعث می‌شود که مواد دچار تغییرشکل‌های پلاستیک بزرگ و نرخ کرنش بالا شوند و امکان اعوجاج المان را از بین ببرد. لذا برای اندرکنش سازه و سیال باید محیط اویلری به‌گونه‌ای شبکه‌بندی شود که قطعه‌های تغییرشکل‌دهنده بعد از شکل‌دهی همچنان درون محیط اویلری قرار داشته باشند تا اندرکنش 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 کامل در داخل ماده ثابت می‌شوند. ازاین‌رو، شبکه‌ها این شانس را دارند که درحالی‌که گره‌های روی شبکه با نقاط مادی حرکت می‌کنند، دچار تغییرشکل 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 کاستی‌های تحلیل سنتی روش المان محدود و همچنین برای حل مشکلاتی که در آن تعامل بین حوزه‌های لاگرانژی و اویلری وجود دارد، توسعه‌یافته است. به‌عنوان‌مثال، مشکلات برهم‌کنش سیال-سازه در این روش برطرف شده است. در این تحلیل، شبکه اویلر و شبکه لاگرانژی در یک مدل مونتاژ می‌شوند. المان‌های که کرنش بزرگی تولید می‌کنند توسط تحلیل اویلری پردازش می‌شوند، درحالی‌که 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 می‌شود. علاوه بر این، از روش کسر حجمی اویلری برای محاسبه بخشی از ماده پرشده در هر المان در هر نمو زمانی استفاده می‌شود، زیرا ماده از میان عناصر جریان می‌یابد. روش مذکور در شکل **۵** نمایش داده‌شده است [۴, ۲۷, ۲۸].

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

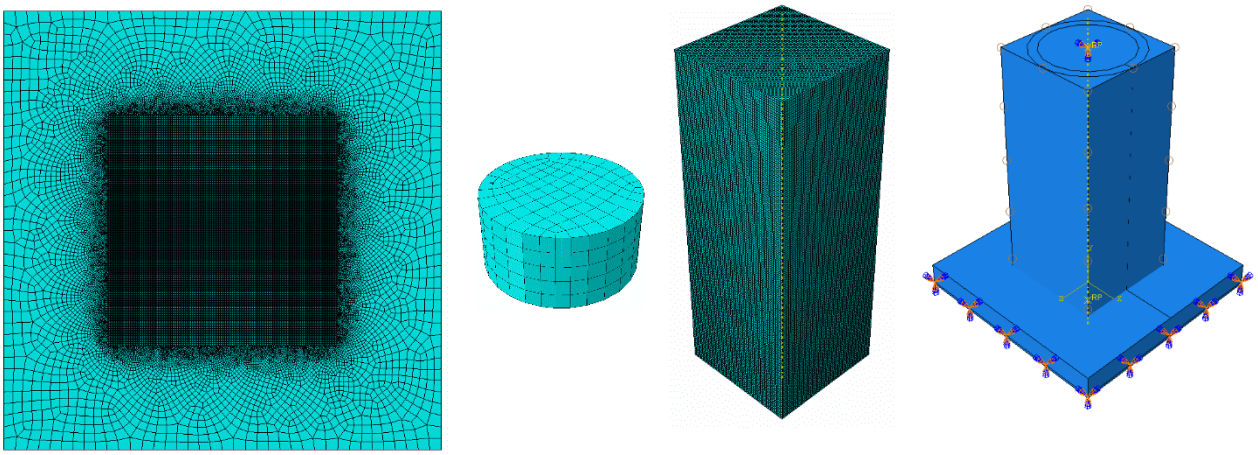
در این پژوهش، مدل‌های سه‌بعدی ورق‌های مربعی با سطح مواجهه دایره‌ای در مقیاس کامل توسعه داده‌شده و جهت افزایش دقت نتایج، از به‌کارگیری مدل‌های یک‌چهارم صرف‌نظر شده است. جهت مدل‌سازی لوله‌های انفجار که حاوی آب است، لوله‌ای صلب به ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر، شعاع داخلی و خارجی ۵۰ و ۶۰ شبیه‌سازی شد. همچنین، آب به‌گونه‌ای مدل شده است که درون لوله انفجار را به‌طور کامل پر می‌کند. به‌عبارتی‌دیگر، آب به‌صورت استوانه‌ای با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ 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. ازآنجایی‌که حل گر صریح دینامیکی انتخاب‌شده 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 میلی‌متر استفاده شد (شکل **۶**). خرج انفجاری مطابق شکل **۶** با اندازه شبکه ۲ میلی‌متر شبکه‌بندی شده است. به علت استفاده از روش شبیه‌سازی کوپل اویلری-لاگرانژی تا حدی هرچه میزان اندازه شبکه‌های ماده منفجره (به‌صورت کلی‌تر بخش‌های اویلری مانند آب، هوا و غیره) کوچک‌تر باشد، نتایج دقیق‌تری در پی خواهد داشت؛ اما انتخاب اندازه شبکه بسیار کوچک سبب ایجاد نتایج غیرمنطقی و عدم همگرایی مسئله را در پی خواهد داشت. اگر اندازه شبکه خرج انفجاری بزرگ باشد، هندسه آن به‌صورت چندضلعی 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 فرمول‌بندی کاهش‌یافته) هستند. شبکه‌بندی آب به‌صورت شکل ۶ و با اندازه شبکه ۲ میلی‌متر انتخاب در نظر گرفته‌شده است. مدل باید از انتهای محل قرارگیری خرج انفجاری پارتیشن‌بندی شود تا هندسه شبکه‌بندی منظم شود. ابعاد محیط اویلری باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که تمامی بخش‌های دیگر درون آن قرار گیرد. به همین منظور، هندسه محیط اویلری به‌صورت هندسه مکعب با قاعده مربعی به طول ۲۴۲ میلی‌متر و ارتفاع ۳۳۳ میلی‌متر در نظر گرفته شد. در شکل ۶ نحوه شبکه‌بندی محیط اویلری آورده شده است.



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].



(د) (ج) (ب) (الف)

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

هندسه محیط اویلری به‌گونه‌ای بهینه‌شده است که علاوه برقرار گرفتن همه بخش‌های مدل در آن دارای کمترین حجم باشد تا زمان حل نرم‌افزار کاهش یابد. محیط اویلری 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 می‌شوند و کسری از محیط اویلری را متناسب با موقعیت خود اشغال می‌کنند که این کار توسط ابزار کسر حجمی در آباکوس انجام می‌شود. 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 ۰/۵ میلی‌متر است. با توجه به آنکه بارگذاری انفجاری و ورق تغییرشکل‌های پلاستیک شدیدی را تحمل می‌کند؛ 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 اندرکنش تماس عمومی با ضریب اصطکاک ۰/۳ استفاده‌شده 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 بسته‌شده‌اند و از نیروی نگه‌دارنده برای تعریف این بخش استفاده‌شده است؛ بنابراین، به‌منظور تعریف اندرکنش بین بخش‌های لاگرانژی مدل (ورق و گیره‌ها) از یک تماس سطح به سطح با خواص تماس سخت و ضریب اصطکاک ۰/۳ استفاده شد. این موضوع، وضعیت مرزی واقع‌گرایانه یک نگه‌دارنده واقعی را شبیه‌سازی می‌کند که کمی اجازه کشیدگی و لغزش در ورق را می‌دهد. نگه‌دارنده‌ها و لوله انفجار کاملاً ثابت‌شده‌اند 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 ۰/۵ میلی‌ثانیه 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 است؛ اما معادله حالت JWL به دلیل سادگی در محاسبات هیدرودینامیکی و بیشترین تطبیق با نتایج آزمایش تجربی، در بسیاری از کدهای استاندارد برای شبیه‌سازی عددی استفاده می‌شود [۳۱, ۳۲]. معادله حالت JWL به‌صورت رابطه (۱) بیان می‌شود که در آن P فشار انفجار، E انرژی داخلی بر واحد حجم، V حجم نسبی محصول انفجار، A و B ضرایب فشار هستند و R_1 و R_2 مقادیر ویژه اصلی و ثانویه هستند که به ترتیب رفتار کوتاه و دوربرد محصولات انفجاری را به تصویر می‌کشند. پارامتر ω بخش کسری انرژی (E) است که در فشار انفجاری سهیم است [۳۱, ۳۲]:

$$P = A\left(1-\left(\frac{\omega}{R_1 V}\right)\right)e^{-R_1 V} + B\left(1-\left(\frac{\omega}{R_2 V}\right)\right)e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_m}{V} \quad (۱)$$

ضرایب رابطه (۱) برای ماده منفجره استفاده‌شده در تحقیق حاضر در جدول **۲** آمده است. به‌منظور تشریح فشار در آب از معادله حالت مای-گرونایزن مطابق رابطه (۲) استفاده‌شده است که در آن ρ_0 چگالی اولیه، e انرژی درونی، Γ_0 پارامتر گرونایزن، c_0 سرعت صوت در محیط واسط، $\eta = 1 - \frac{\rho}{\rho_0}$ و s ثابت وابسته به محیط واسط است. پارامترهای معادله (۲) برای آب در جدول **۳** آورده شده است [۳۱, ۳۲].

$$P=\frac{\rho_0 c_0^2 \eta}{(1-s\eta)^2}\left[1-\frac{\eta\Gamma_0}{2}\right]\Gamma_0\rho_0 e \qquad (۲)$$

جدول (۲): ضرایب معادله حالت JWL برای ماده منفجره C4 استفاده‌شده در تحقیق حاضر [۳۱, ۳۲].

E_m	ω	R_2	R_1	B	A	V
MJ/kg	-	-	-	GPa	GPa	m/s
۵/۶۲	۰/۲۵	۱/۴	۴/۵	۱۲/۹۵	۶۰۹/۸	۸۱۹۳

جدول (۳): ضرایب معادله مای-گرونایزن برای آب [۴].

Γ_0	s	c_0	ρ_0
–	–	m/s	kg/m³
۱/۶۵	۱/۷۹	۱۴۹۰	۱۰۰۰

۳-۴- مدل استحکام و شکست جانسون-کوک

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 الاستوویسکو-پلاستیک و شکست جانسون-کوک که پیش‌تر در سال ۱۹۸۵ میلادی ارائه‌شده، استفاده‌شده است که اثر نرخ کرنش و همچنین تغییرات دمایی را روی تنش سیلان در نظر می‌گیرد. مدل الاستوویسکو-پلاستیک جانسون-کوک شامل اثر تنش تسلیم، جریان پلاستیک، سخت‌شوندگی نرخ کرنش، ترموالاستیسیته خطی و نرم شدن به دلیل گرمایش آدیاباتیک است. در این مدل، تنش معادل فون میسز $\bar{\sigma}$ به‌عنوان تابعی از کرنش پلاستیک معادل $\bar{\varepsilon}^{pl}$، نرخ کرنش پلاستیک معادل $\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}$، نرخ کرنش پلاستیک مرجع معادل $\dot{\varepsilon}_0$ و دمای همگن $\hat{T}$ مطابق رابطه تجربی (۳) بیان می‌گردد که در آن A تنش تسلیم ماده، B و n پارامترهای کارسختی، m کمیت ثابت ماده و C شاخص سخت‌شوندگی نرخ کرنش است. این پنج کمیت ثابت ماده از انجام آزمون‌های کشش مختلف روی ماده به دست می‌آیند [۳۳, ۳۴].

$$\bar{\sigma}=\underbrace{\left[A+B\left(\bar{\varepsilon}^{pl}\right)^n\right]}_{\text{Hardening}}\underbrace{\left[1+C\ln\left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right]}_{\text{Viscosity}}\underbrace{\left[1-\hat{T}^m\right]}_{\text{Softening}} \qquad (۳)$$

دمای همگن برای یک ماده به‌صورت رابطه (۴) تعریف می‌گردد که در آن T، T_0 و T_{melt} به ترتیب دمای فعلی، دمای محیط و دمای نقطه ذوب مواد هستند.

$$\hat{T}=\begin{cases}0 & T<T_0\\ \left(T-T_0\right)/\left(T_{\text{melt}}-T_0\right) & T_0\le T\le T_{\text{melt}}\\ 1 & T>T_{\text{melt}}\end{cases} \qquad (۴)$$

ازآنجاکه 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 ρ چگالی ماده، C_p بیانگر ظرفیت حرارتی ماده در فشارثابت و χ ضریب تیلور-کوینی است. معمولاً ضریب تیلور-کوینی برای مواد فلزی ۰/۹ در نظر گرفته می‌شود بدان معنا که ۹۰٪ کار پلاستیک به گرما تبدیل می‌شود و ۱۰٪ کار پلاستیک در مواد ذخیره می‌شود.

$$\Delta T=\int_0^{\bar{\varepsilon}^{pl}}\frac{\chi}{\rho C_p}\bar{\sigma}\,d\bar{\varepsilon}^{pl} \qquad (۵)$$

معیار آسیب جانسون-کوک یک مدل از مدل‌های آسیب نرم است و توانایی پیش‌بینی 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 می‌شود که پارامتر آسیب انباشته ω بیش از یک باشد که در آغاز آسیب $\bar{\varepsilon}_D^{pl}$ به‌عنوان کرنش پلاستیک معادل در نقطه شکست تعیین‌شده است و $\Delta\bar{\varepsilon}^{pl}$ نشان‌دهنده افزایش پلاستیک معادل پلاستیک است که در طی چرخه تغییرشکل اتفاق می‌افتد.

$$\omega=\sum\left(\frac{\Delta\bar{\varepsilon}^{pl}}{\bar{\varepsilon}_D^{pl}}\right),\ 0\le\omega\le 1 \qquad (۶)$$

در این مدل شکست جانسون-کوک، کرنش معادل در لحظه آغاز شکست ماده به‌صورت تابعی از تنش سه محوره بی‌بعد، نرخ کرنش بی‌بعد و دمای بی‌بعد در نظر گرفته می‌شود. بر طبق این مدل، مقدار کرنشی معادلی که یک ماده تا لحظه شکست می‌تواند تحمل نماید، مطابق رابطه (۷) برحسب کمیت‌های ثابت ماده D_1 تا D_5 محاسبه می‌شود.

$$\bar{\varepsilon}_D^{pl} = \underbrace{\left[D_1 + D_2 \exp\left(D_3 \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}}\right)\right]}_{\text{Stress triaxiality}} \times \ldots \underbrace{\left[1 + D_4 \ln\left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right]}_{\text{Viscosity}} \underbrace{\left[1 + D_5 \hat{T}\right]}_{\text{Temperature}} \quad (۷)$$

رفتار ماده برای شروع آسیب با تکامل آسیب تعریف می‌شود. تکامل آسیب، کاهش استحکام ماده را درحالی‌که معیار شروع آسیب ارضا شود، توضیح می‌دهد. فرآیند تکامل آسیب در حالی رخ می‌دهد که مقدار کرنش پلاستیک معادل انباشته برابر با $\bar{\varepsilon}_D^{pl}$ گردد و متغیر تکامل آسیب صفر است $(\omega = 1, D = 0)$. همچنین متغیر تکامل آسیب برابر ۱ است، درحالی‌که کرنش پلاستیک معادل $\bar{\varepsilon}_D^{pl}$ به مقدار بحرانی کرنش پلاستیک شکست معادل $\bar{\varepsilon}_f^{pl}$ می‌رسد (شکل **۷**).

در این شرایط، کرنش پلاستیک شکست معادل $\bar{\varepsilon}_f^{pl}$ به‌شدت به طول مشخصه المان L به علت غیریکنواخت سازی کرنش بستگی دارد و نمی‌توان آن را به‌عنوان یک پارامتر ماده برای تعریف قانون تکامل آسیب استفاده کرد؛ بنابراین، قانون تکامل آسیب با رابطه (۸) برحسب جابجایی پلاستیک معادل تعریف می‌شود که در آن L به هندسه المان بستگی دارد و آن را به‌عنوان ریشه مکعب حجم نقطه ادغام در مطالعه حاضر در نظر گرفته می‌شود.

$$\bar{u}^{pl} = L\left(\bar{\varepsilon}^{pl} - \bar{\varepsilon}_D^{pl}\right) \quad (۸)$$

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

$$D = \frac{\bar{u}^{pl}}{\bar{u}_f^{pl}}, \quad 0 \le D \le 1 \quad (۹)$$

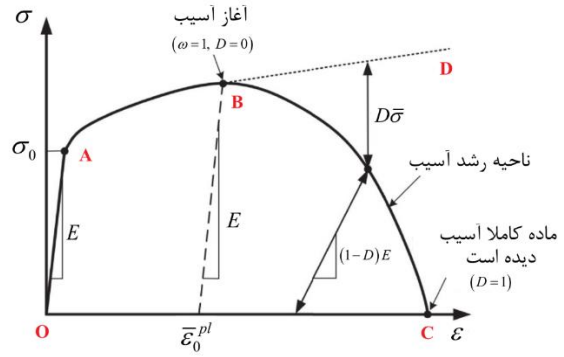
معادله (۹) تأیید می‌کند که مقاومت ماده هنگامی‌که جابجایی پلاستیک معادل برابر با جابجایی پلاستیک معادل در نقطه شکست باشد، کاملاً تخریب و تنزل می‌یابد [۳۳-۳۶]. در هر زمان مشخص هنگام تجزیه‌وتحلیل یک المان آسیب‌دیده، تنش واقعی تنزل یافته، برحسب تنش مؤثر به‌صورت رابطه (۱۰) بیان می‌شود [۳۷]. ثوابت مربوط به معادله پلاستیسیته و شکست جانسون-کوک برای ورق‌های فلزی در جدول **۴** ارائه‌شده است.

$$D = \frac{\bar{u}^{pl}}{\bar{u}_f^{pl}}, \quad 0 \le D \le 1 \quad (۹)$$

$$\sigma = (1 - D)\bar{\sigma} \quad (۱۰)$$

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

خواص ماده	علائم	ورق
مدول الاستیسیته	E (GPa)	۲۱۰
ضریب پواسون	ν	۰/۳
چگالی	$\rho\left(\mathrm{kg/m^3}\right)$	۷۸۰۰
تنش تسلیم و سخت‌شوندگی	A (MPa)	۱۷۵
کرنش	B (MPa)	۳۸۰
	n	۰/۳۲
سخت‌شوندگی نرخ کرنش	$\dot{\varepsilon}_0\left(1/\mathrm{s}\right)$	۱
	C	۰/۰۶
دما	$T_0\left(\mathrm{K}\right)$	۲۹۸
	$T_{\mathrm{melt}}\left(\mathrm{K}\right)$	۱۸۷۸
	m	۰/۵۵
گرمای ویژه	$C_p\left(\mathrm{J/kgK}\right)$	۴۷۰
ضرایب شکست	D_1	-۲/۲
	D_2	۵/۴۳
	D_3	-۰/۴۷
	D_4	۰/۰۱۶
	D_5	۰/۶۳

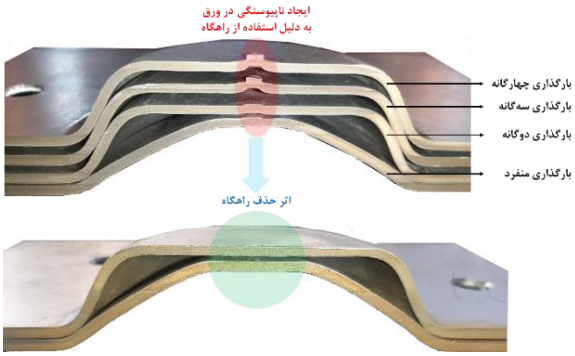


شکل (۷): نمایش شماتیک رفتار تنش و کرنش تک‌محوری یک فلز شکل‌پذیر [۲۹, ۳۰].

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 شبیه‌سازی عددی فرآیند شکل‌دهی ورق‌های فلزی با قالب مادگی با استفاده از انفجار زیرآب مکرر صورت گرفته است. خوانندگان محترم می‌توانند جهت مطالعه بیشتر نتایج تجربی و تحلیل داده‌ها به مرجع [۱] رجوع کنند.



شکل (۸): نمای برش‌خورده از ورق تغییرشکل‌یافته در فرآیند شکل‌دهی انفجاری زیرآب با قالب مادگی بدون راهگاه.

جدول (۵): نتایج تجربی.

شماره	نازک‌شدگی (٪)		پرشدگی (٪)
	بیشینه	مرکز	
SB-4-B1-01-VH	۱۹/۳	۱۶/۳	۲۴
DB-48-B2-03-VH	۲۴/۷	۲۰/۷	۱۰۰
TB-488-B3-06-VH	۳۳/۳	۱۵/۰	۱۰۰
QB -4888-B4-10-VH	۳۶/۷	۱۵/۳	۱۰۰
SB-4-B1-11-NVH	۲۰/۷	۱۸/۳	۳۰
DB-48-B2-13-NVH	۲۶/۸	۱۸/۷	۱۰۰

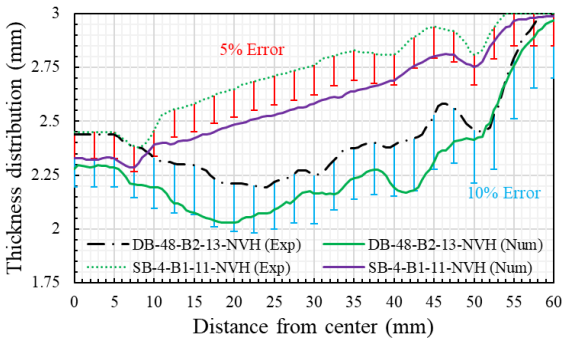
۴-۲- نتایج شبیه‌سازی عددی

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 می‌شود.

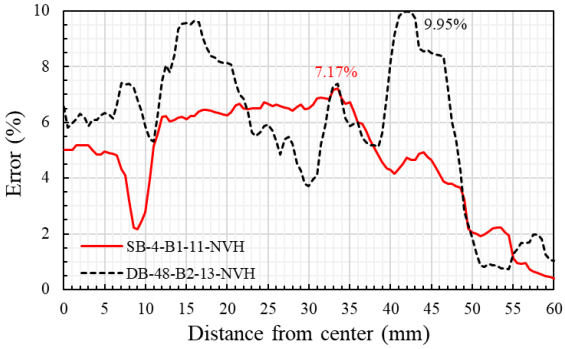
با توجه به نکات ارائه‌شده، نمایش کمی توزیع ضخامت در راستای طولی یا شعاعی ورق برای نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی حاصل از شکل‌دهی با قالب مادگی ورق‌های فلزی تحت بارگذاری انفجاری زیرآب منفرد (SB-4-B1-11-NVH) و دوگانه (DB-48-B2-13-NVH) در شکل **۱۲** نشان داده‌شده است. جهت درک بهتر و بررسی صحت مدل از نوارهای 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، درحالی‌که ضخامت پیش‌بینی‌شده 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، درحالی‌که ضخامت پیش‌بینی‌شده در این نقطه ۲/۰۷ میلی‌متر است. ازاین‌رو، تفاوت بین نتایج عددی و شبیه‌سازی ۷/۸٪ است. به‌طورکلی، مقادیر حداقل ضخامت اندازه‌گیری شده و همچنین موقعیت آن‌ها، تقریباً همانند شبیه‌سازی‌های عددی و میزان بیشترین خطای پیش‌بینی برای هر دو نمونه کمتر از ۱۰٪ است. برای بارگذاری منفرد، حداکثر خطا در امتداد طولی ۳۳ میلی‌متر از مرکز شکل ورق با ضخامت حاصل از آزمایش تجربی ۲/۸۱ میلی‌متر و ضخامت پیش‌بینی‌شده در شبیه‌سازی ۲/۶۰۸ میلی‌متر ایجادشده است. از طرف دیگر، برای بارگذاری مکرر، حداکثر خطا در امتداد طولی ۴۲ میلی‌متر از مرکز شکل ورق با ضخامت حاصل از مطالعات تجربی ۲/۴۱۵ میلی‌متر و ضخامت پیش‌بینی‌شده در شبیه‌سازی ۲/۱۷۴ میلی‌متر به‌دست‌آمده است.



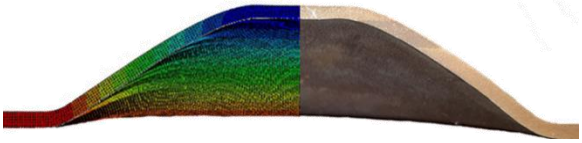
(الف)



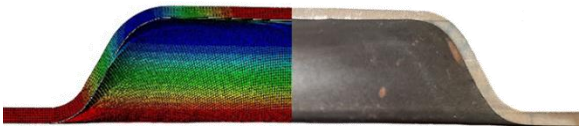
(ب)

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 SB-4-B1-11-NVH و DB-48-B2-13-NVH را در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد.

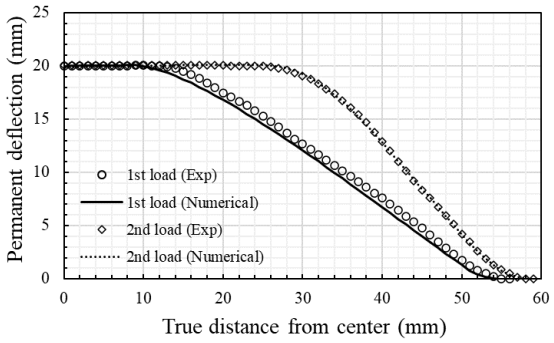


(الف)

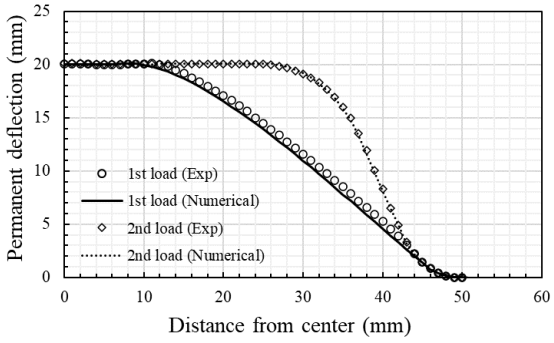


(ب)

شکل (۱۳): مقایسه کیفی نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی برای گستره تغییرشکل ورق تحت بارگذاری منفرد و دوگانه: الف) بارگذاری اول؛ ب) ر بارگذاری دوم.



(الف)



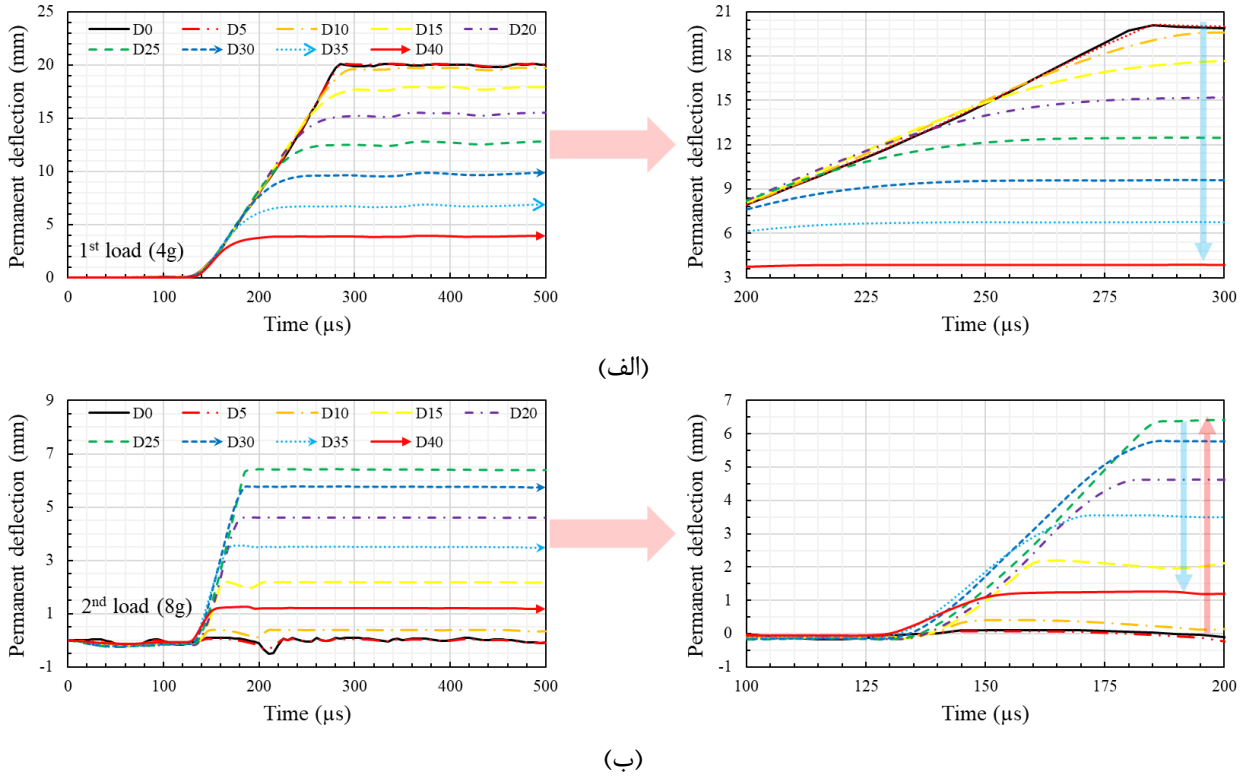
(ب)

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.

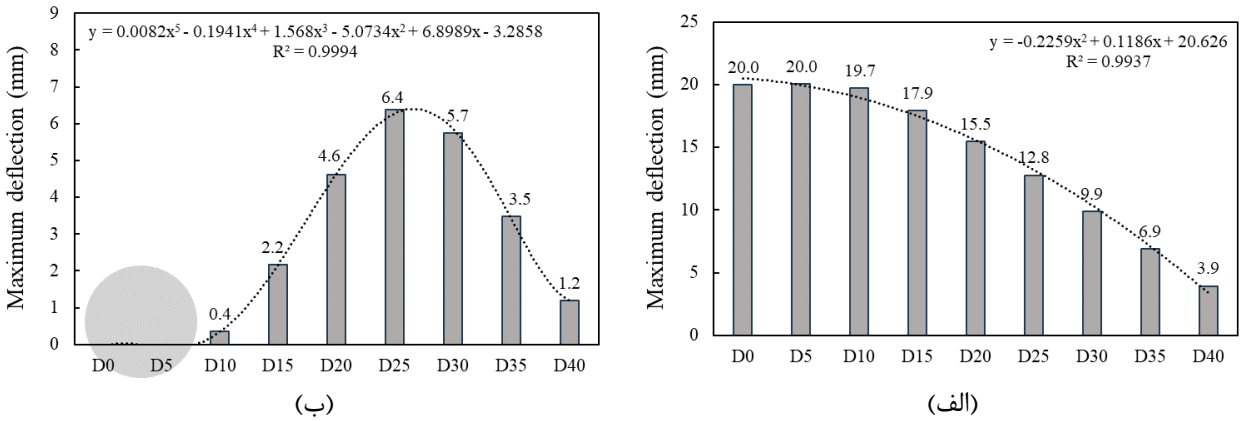
لازم به توضیح است که نتایج کمی برای دو فاصله واقعی و شعاعی از مرکز ورق ارائه‌شده است. فاصله واقعی از روی گستره تغییرشکل و تا انتهای گیردار محاسبه‌شده است. همان‌طور که نشان داده‌شده است، نتایج شبیه‌سازی عددی شباهت بسیار خوبی با مطالعات تجربی برای گستره تغییرشکل ورق نشان می‌دهند و اختلاف قابل‌توجهی بین 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، درحالی‌که در بارگذاری اول تقریباً یک گستره با شکل نیم‌کره ناقص ایجاد می‌شود، در بارگذاری دوم، به دلیل فشار زیاد تولیدشده در مقایسه با دفعه اول بارگذاری، نمونه فلزی شکل قالب مادگی را به خود می‌گیرد. 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 تغییرشکل ورق برحسب زمان برای هر دو حالت بارگذاری منفرد و مکرر (بدون راهگاه) در شکل **۱۵** ارائه‌شده 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.

همان‌طور که در نتایج مربوط به گستره تغییرشکل ورق نشان داده‌شده است، 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 نمی‌شود و مقدار آن سریعاً به میزان بیشینه یا همان عمق قالب نزدیک می‌گردد. علت این مسئله را می‌توان در انتخاب مناسب میزان جرم خرج و همچنین استفاده از قالب مادگی جستجو کرد.

لازم به توضیح است که ورق پس از برخورد با قالب دچار تغییرشکل وارون یا کاهش میزان تغییرشکل نمی‌گردد که خود یکی از نکات مهم در مبحث شکل‌دهی فلزات است. در مورد بارگذاری اول، ورق در زمان ۱۴۵ میکروثانیه شروع به تغییرشکل پلاستیک می‌کند و در مدت ۲۸۰ میکروثانیه (در زمان ۳۲۵ میکروثانیه) به حداکثر مقدار خود نزدیک می‌شود 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 نمی‌شود. به‌طور جزئی‌تر، میزان بیشینه تغییرشکل در فواصل ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ میلی‌متری از ورق به ترتیب به میزان 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 نمی‌کند و تنها در این ناحیه دچار نوسانات بسیار جزئی است. در پدیده بارگذاری مکرر، نوسانات تغییرشکل 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 طوسی‌رنگ 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.



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



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

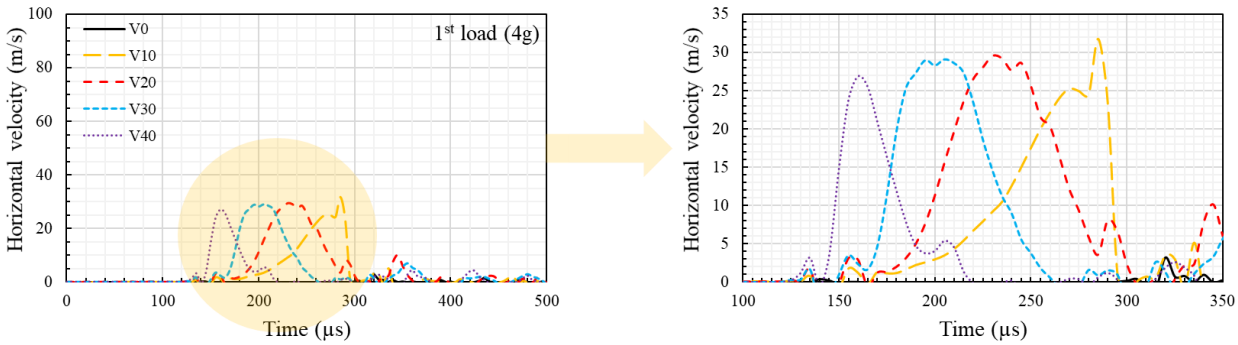
برخلاف بارگذاری اول، تغییرات میزان بیشینه تغییرشکل در این حالت از یک تابع درجه دوم پیروی نکرده و به دلیل داشتن چندین نقطه عطف، از یک تابع درجه پنجم پیروی می‌کند. مطابق شکل **۱۶ ب**، بیشترین میزان تغییرشکل در بارگذاری دوم ۶/۴ میلی‌متر و در فاصله ۲۵ میلی‌متری از مرکز تجربه می‌شود و کمترین مقادیر مربوط به مرکز و نواحی پیرامونی ورق با توجه به منحنی تغییرشکل قالب 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

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

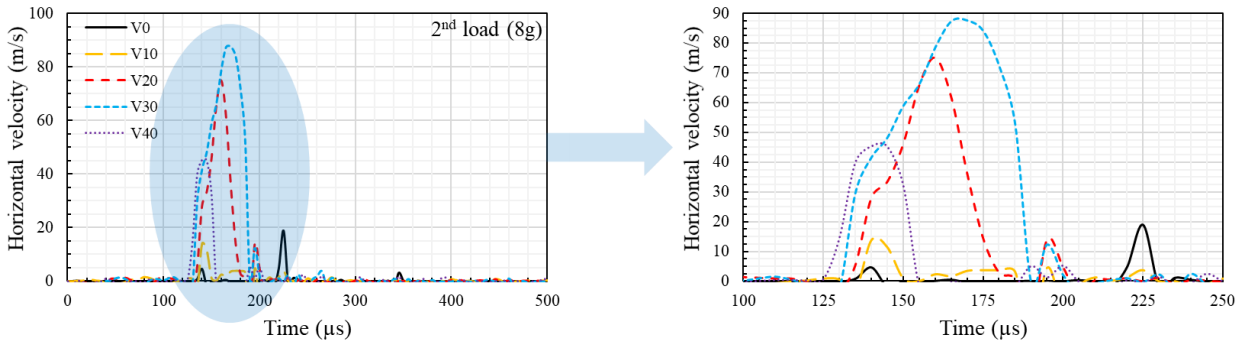
در ادامه مطالعات عددی، به بررسی تغییرات سرعت تغییرشکل افقی (شکل **۱۷**) و عمودی (شکل **۱۸**) ورق در فواصل مختلف از مرکز آن حین اعمال بار انفجاری مکرر زیرآب پرداخته می‌شود. شایان توجه است که برای درک و تحلیل بهتر نتایج، نمودار به‌صورت بزرگ‌نمایی شده در یک بازه زمانی مشخص نیز ارائه‌شده است. همچنین مقادیر بیشینه سرعت تغییرشکل در هر فاصله به‌صورت ستونی در شکل **۱۹** ارائه‌شده است. همان‌طور که در نتایج مربوط به سرعت تغییرشکل ورق نشان داده‌شده است، تغییرات 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 تغییرشکل عمودی چندین برابر سرعت تغییرشکل افقی و در قله اول بسیار محسوس است. در بارگذاری اول، برخلاف سرعت تغییرشکل افقی، شروع تغییرات محسوس سرعت تغییرشکل عمودی برای تمامی فواصل از مرکز ثابت و از ۱۲۵ میکروثانیه 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 ورق تقریباً صفر (نهایتاً ۳ متر بر ثانیه در نقطه بیشینه) است. همچنین تغییرات بیشینه نقاط سرعت تغییرشکل افقی در نواحی دورتر از مرکز برخلاف سرعت تغییرشکل عمودی نامحسوس است. به‌طور جزئی‌تر، بیشینه 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 می‌یابد. همچنین، بیشینه سرعت تغییرشکل عمودی در مرکز ورق و به میزان ۱۶۹ متر بر ثانیه رخ می‌دهد که این مقدار با دور شدن از آن به سمت پیرامون گیردار به میزان ۱۴٪، ۱۶٪، ۲۰٪ و ۳۸٪ به ترتیب در فواصل ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ میلی‌متری از مرکز کاهش می‌یابد. در نتیجه، 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.

لازم به توضیح است که بیشترین بازه زمانی (ناحیه سایه 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 پیرامون گیردار ورق، این بازه کاهش پیدا می‌کند. نتایج 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 تغییرشکل 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 تغییرشکل افقی در نقاط نزدیک به پیرامون ورق سریع‌تر تجربه می‌شود.

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

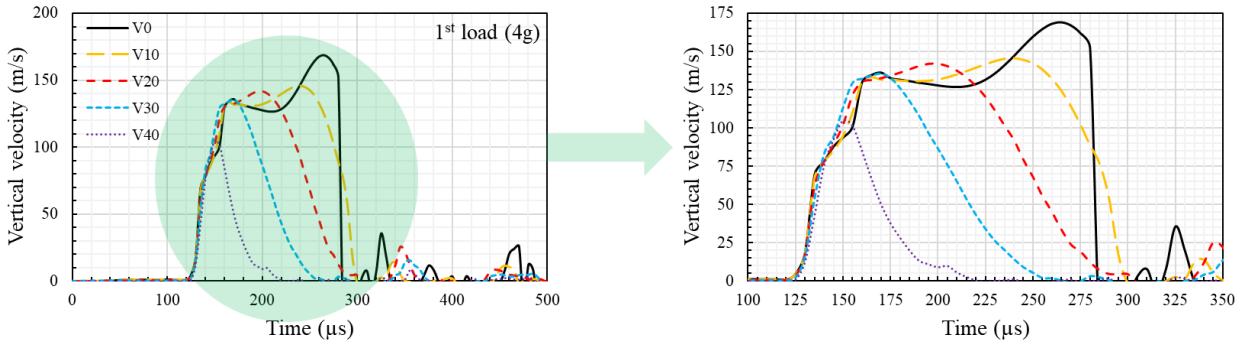


(الف)

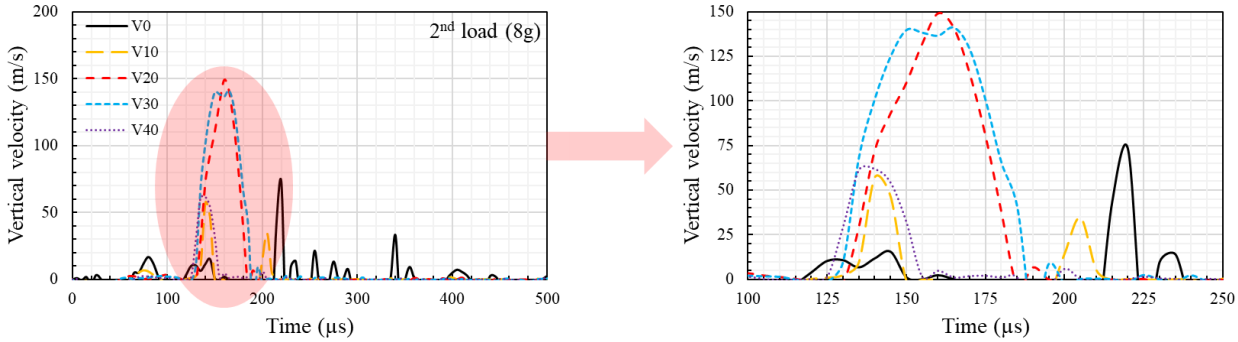


(ب)

شکل (۱۷): تغییرات سرعت تغییرشکل افقی ورق در فواصل مختلف از مرکز: الف) بارگذاری منفرد؛ ب) بارگذاری دوگانه.

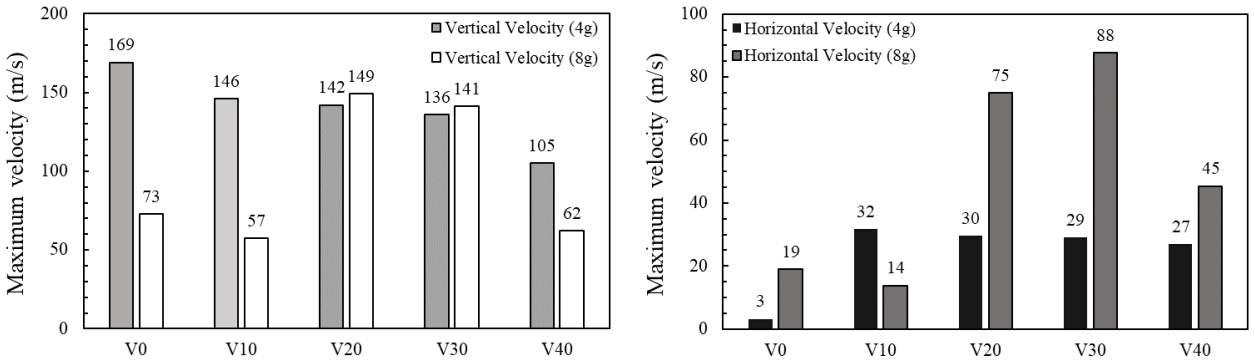


(الف)



(ب)

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



(الف) (ب)

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

در بارگذاری دوم، برخلاف تغییرات سرعت تغییرشکل در بارگذاری اول، شروع تغییرات محسوس هر دو سرعت تغییرشکل 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**). به‌طور جزئی، شروع تغییرات محسوس سرعت تغییرشکل 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 می‌شود. این نشان می‌دهد که همچنان نقاط نزدیک به پیرامون گیردار ورق، سرعت تغییرشکل افقی را زودتر تجربه می‌کنند و مقادیر آن در مقایسه با سرعت تغییرشکل 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 می‌رسد که در مقایسه بارگذاری در مرحله اول ۵/۳ برابر افزایش یافته است. بیشینه سرعت تغییرشکل افقی در فاصله ۱۰ میلی‌متری از مرکز به میزان ۱۴ متر بر ثانیه اتفاق می‌افتد 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 میلی‌متری از مرکز افزایش می‌یابد 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 می‌کند و عمده کار پلاستیک در مرحله دوم صرف گرفتن شکل قالب و پرشدگی کامل آن می‌شود.

شروع تغییرات محسوس سرعت تغییرشکل عمودی برای تمامی نواحی در ۱۲۰ میکروثانیه رخ می‌دهد درحالی‌که هر چه به نیمه ورق نزدیک می‌شویم، این نقطه آغازین به عدد ۱۳۰ میکروثانیه نزدیک می‌شود. در این مرحله از بارگذاری، سرعت تغییرشکل 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 تغییرشکل 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 نمی‌کند 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 تغییرشکل افقی در فاصله ۲۰ و ۳۰ میلی‌متری 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

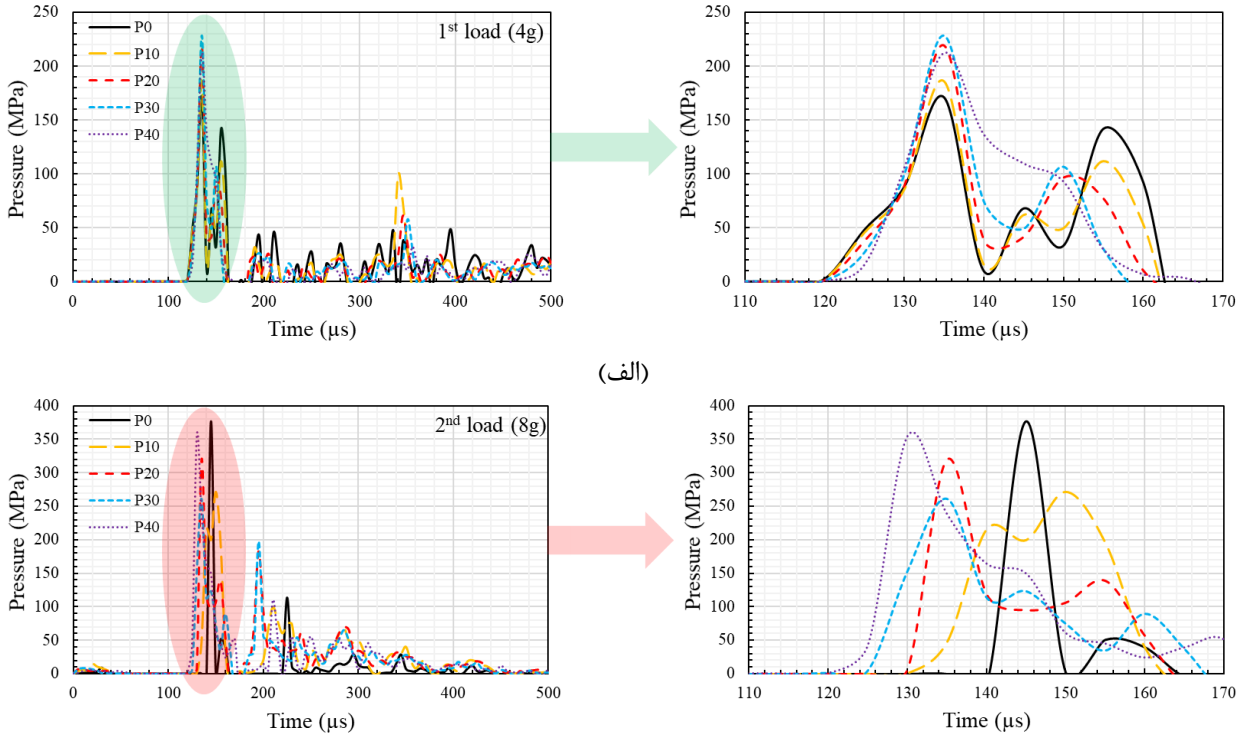
جرم خرج برای دو مرحله ضروری و لازم است. شایان‌ذکر است که بیشترین بازه زمانی (ناحیه سایه خورده در شکل **۱۸ ب**) برای تغییرات سرعت تغییرشکل عمودی مربوط به نقطه‌ای با فاصله ۴۰ میلی‌متری از مرکز ورق به میزان ۷۰ میکروثانیه و با نقطه آغازین ۱۲۰ میکروثانیه است. این بازه با نزدیک شدن به مرکز ورق به ترتیب به 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) کاهش می‌یابد. همچنین، بیشترین بازه زمانی (ناحیه سایه 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 می‌یابد. 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 می‌یابد.

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 می‌گردد. 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 به‌طوری‌که اعمال بار دوم به ورق موجب افزایش سرعت تغییرشکل افقی و کاهش سرعت تغییرشکل عمودی می‌گردد. شایان‌ذکر است که اعداد نشان داده‌شده 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 تغییرشکل افقی در مرکز ورق ۵۳۳٪ افزایش، در فاصله ۱۰ میلی‌متری از مرکز ۵۶٪ کاهش، در فاصله ۲۰ میلی‌متری از مرکز ۱۵۰٪ 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.

همان‌طور 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 می‌دهد. 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) می‌رسد. 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

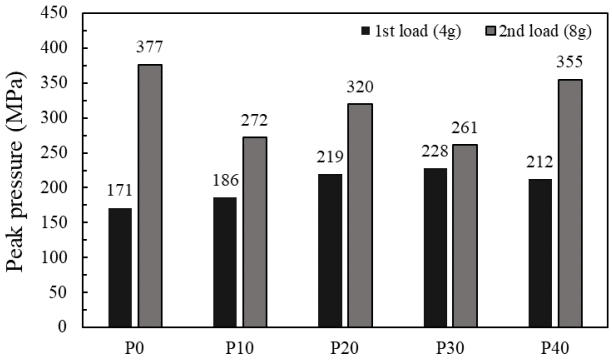
فشار سوم در مرکز و فاصله ۱۰میلی‌متری از ورق در زمان ۱۵۵ میکروثانیه به ترتیب با مقادیر ۱۴۲ مگاپاسکال و ۱۱۲ مگاپاسکال رخ می‌دهد. شایان ذکر است که در بارگذاری اول، تغییرات فشار در محدوده ۱۲۰ تا ۱۶۰ میکروثانیه به مدت ۴۰ میکروثانیه مثبت است و پس از آن تا اثرگذاری موج‌های انعکاسی بعدی انفجار زیرآب، تغییرات فشار به علت به وجود آمدن پدیده کاویتاسون منفی است. در بارگذاری دوم، به علت نوسانات جزئی ورق در مرکز و همچنین تغییرشکل پلاستیک نسبتاً زیاد در نواحی دورتر از مرکز، روند تغییرات فشار برای تمامی نقاط متفاوت بوده و از یک روند مشخص و یکسان نیست.



(الف)

(ب)

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 می‌گردد و عمده نغییرشکل پلاستیک ورق منحصر به بخش مرکزی آن می‌باشد 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 می‌یابد. اعمال بار انفجاری دوم به نمونه آزمایشی نشان می‌دهد که عمده تغییرات فشار در مقایسه با بارگذاری اول در مرکز و فاصله ۴۰ میلی‌متری از آن رخ می‌دهد 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 میلی‌متری از مرکز و به میزان ۱۴٪ رخ می‌دهد.

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** پرداخته می‌شود. 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 اعمال‌شده است. این بدان معناست که شرایط آزمایشگاهی در شبیه‌سازی عددی با دقت واردشده است و مدل می‌تواند پیش‌بینی خوبی از رفتار ورق در بارگذاری انفجاری مکرر زیرآب داشته باشد. با بررسی دقیق کانتورهای نشان داده‌شده این نتیجه حاصل می‌شود که در بارگذاری 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 می‌شود. 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 درحالی‌که 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 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.

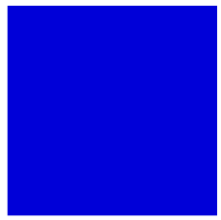
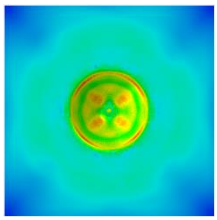
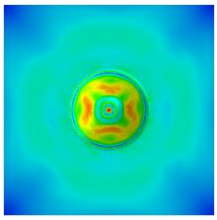
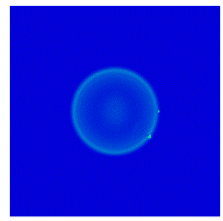
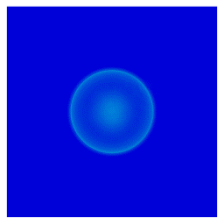
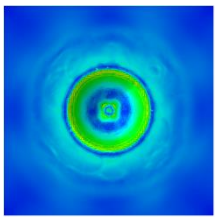
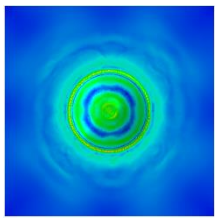
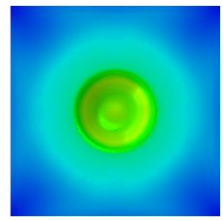
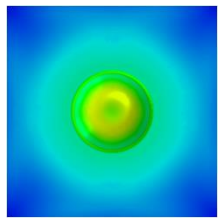
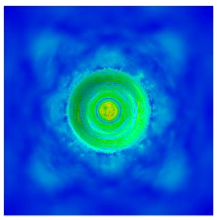
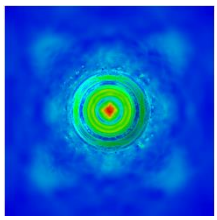
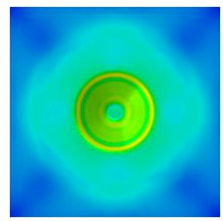
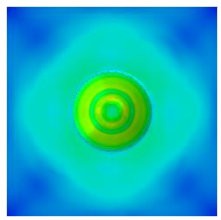
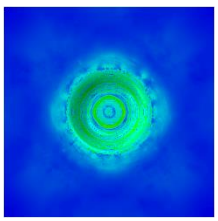
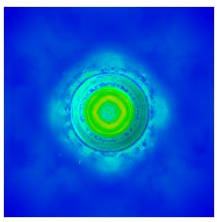
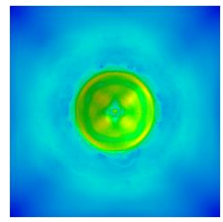
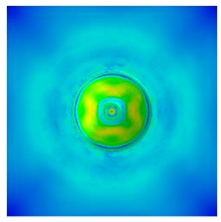
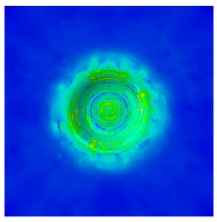
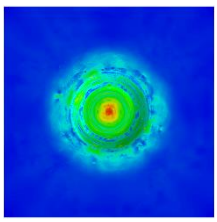
در ادامه مطالعات عددی، به بررسی تغییرات معیار آسیب جانسون کوک در جلوی ورق (سطح در تماس با آب) و پشت ورق (وجه در تماس با هوا) در طول فرآیند تغییرشکل در شکل‌های **۲۳** و **۲۴** پرداخته می‌شود. لازم به توضیح است که نتایج ارائه‌شده به‌صورت کانتور دو بعدی، تغییرات کمی معیار آسیب در جلو و پشت ورق در انتهای 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 نمی‌کند و به نمونه آزمایشی آسیبی وارد نمی‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

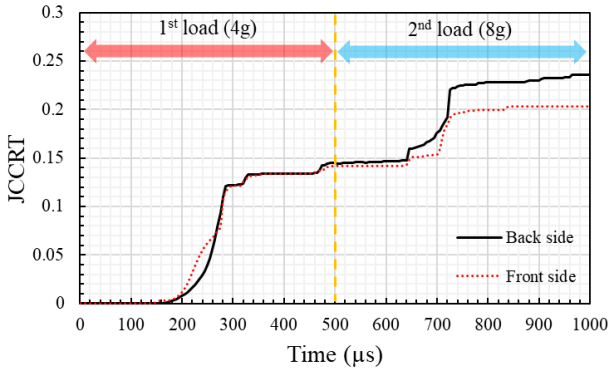
در این مقاله هدف آن بود تا بتوان در ابتدا با استفاده از نرم‌افزار تجاری آباکوس و روش کپل اویلری-لاگرانژی به انجام شبیه‌سازی‌های موردنیاز برای تحلیل شکل‌دهی با قالب مادگی ورق‌های فلزی تحت انفجار مکرر زیرآب پرداخت. جهت صحت‌سنجی مدل عددی، از مطالعات تجربی پیشین نویسندگان حاضر در مرجع [۱] استفاده شد. نتایج 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 نمی‌شود و مقدار آن سریعاً به میزان بیشینه یا همان عمق قالب نزدیک می‌گردد. ورق پس از برخورد با قالب دچار تغییرشکل وارون یا کاهش میزان تغییرشکل نمی‌گردد. علت این مسئله را می‌توان در انتخاب مناسب میزان جرم خرج و همچنین استفاده از قالب مادگی جستجو کرد.

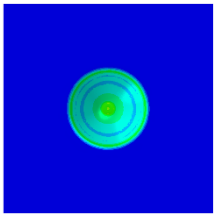
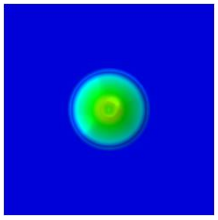
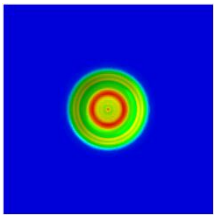
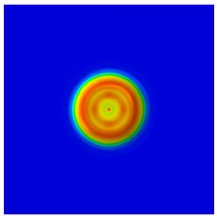
۲)

زمان (μs)	محدوده تغییرات	بارگذاری اول (۴ گرم)		بارگذاری دوم (۸ گرم)	
		نمای جلوی ورق	نمای پشت ورق	نمای جلوی ورق	نمای پشت ورق
۰	S, Mises (Avg: 75%) +4.870e+08 +4.464e+08 +4.058e+08 +3.652e+08 +3.247e+08 +2.841e+08 +2.435e+08 +2.029e+08 +1.623e+08 +1.218e+08 +8.117e+07 +4.058e+07 +0.000e+00				
۱۲۵	S, Mises (Avg: 75%) +4.740e+08 +4.345e+08 +3.950e+08 +3.555e+08 +3.160e+08 +2.765e+08 +2.370e+08 +1.975e+08 +1.580e+08 +1.185e+08 +7.900e+07 +3.950e+07 +0.000e+00				
۲۵۰	S, Mises (Avg: 75%) +6.840e+08 +6.277e+08 +5.713e+08 +5.150e+08 +4.587e+08 +4.023e+08 +3.460e+08 +2.897e+08 +2.333e+08 +1.770e+08 +1.207e+08 +6.433e+07 +8.000e+06				
۳۷۵	S, Mises (Avg: 75%) +6.430e+08 +5.899e+08 +5.368e+08 +4.837e+08 +4.307e+08 +3.776e+08 +3.245e+08 +2.714e+08 +2.183e+08 +1.653e+08 +1.122e+08 +5.908e+07 +6.000e+06				
۵۰۰	S, Mises (Avg: 75%) +5.540e+08 +5.088e+08 +4.636e+08 +4.184e+08 +3.731e+08 +3.279e+08 +2.827e+08 +2.375e+08 +1.923e+08 +1.471e+08 +1.018e+08 +5.662e+07 +1.140e+07				

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.

زمان (μs)	محدوده تغییرات	بارگذاری اول (۴ گرم)		بارگذاری دوم (۸ گرم)	
		نمای جلوی ورق	نمای پشت ورق	نمای جلوی ورق	نمای پشت ورق
۵۰۰	JCCRT (Avg: 75%) +2.300e-01 +2.108e-01 +1.917e-01 +1.725e-01 +1.533e-01 +1.342e-01 +1.150e-01 +9.583e-02 +7.667e-02 +5.750e-02 +3.833e-02 +1.917e-02 +0.000e+00				

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

۳) 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 نمی‌شود و مقدار آن سریعاً به میزان بیشینه یا همان عمق قالب نزدیک می‌گردد. ورق پس از برخورد با قالب دچار تغییرشکل وارون یا کاهش میزان تغییرشکل نمی‌گردد. علت این مسئله را می‌توان در انتخاب مناسب میزان جرم خرج و همچنین استفاده از قالب مادگی جستجو کرد.

۴) در بارگذاری اول، میزان بیشینه تغییرشکل در فواصل ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ میلی‌متری از ورق به ترتیب به میزان ۰٪، ۱٪، ۱۰٪، ۲۳٪، ۳۶٪، ۵۱٪، ۶۶٪ و ۸۰٪ کاهش می‌یابد. نتایج مشخص می¬کند 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 نمی‌کند و تنها در این ناحیه دچار نوسانات بسیار جزئی است.

۵) 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

ورق تقریباً صفر (نهایتاً ۳ متر بر ثانیه در نقطه بیشینه) است.

۶) 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.

۷) در بارگذاری دوم، نتایج به‌دست‌آمده برای تغییرات سرعت تغییرشکل افقی و عمودی کمی متفاوت است و با توجه به اینکه نمونه در مرحله اول بارگذاری تغییرشکل پلاستیک بزرگی را تجربه کرده است، تغییرات سرعت تغییرشکل افقی در مقایسه با دفعه قبلی بارگذاری محسوس است. در بارگذاری دوم، برخلاف تغییرات سرعت تغییرشکل در بارگذاری اول، شروع تغییرات محسوس هر دو سرعت تغییرشکل افقی و عمودی برای تمامی فواصل از مرکز بسیار به هم نزدیک هستند و با تأخیر نسبتاً محسوس نسبت به یکدیگر رخ نمی‌دهند.

۸) 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.

۹) بیشینه معیار آسیب در هر دو وجه از ۰/۲۵ تجاوز نمی‌کند و به نمونه آزمایشی آسیبی وارد نمی‌شود.

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 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/10.1177/0954408915611055

[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.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.2021.113684

[8] Babaei H, Mostofi TM, Sadraei SH. Effect of gas detonation on response of circular plate-experimental 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 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

[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:** https://doi.org/10.1016/j.jma.2015.12.003

[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.ijimpeng.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

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

Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications. 2020;234(2):246-54. **DOI:** https://doi.org/10.1177/1464420716660875

[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. **DOI:** https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2021.104108

[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