مکانیک هوافضا/ سال ۱۴۰۳/ دوره ۲۰/ شماره ۳/ صفحه ۱-۱۶

نشریه علمی مکانیک هوافضا

DOR: ….

شکل‌دهی با قالب مادگی ورق‌های فلزی با استفاده از انفجار مکرر زیرآب

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

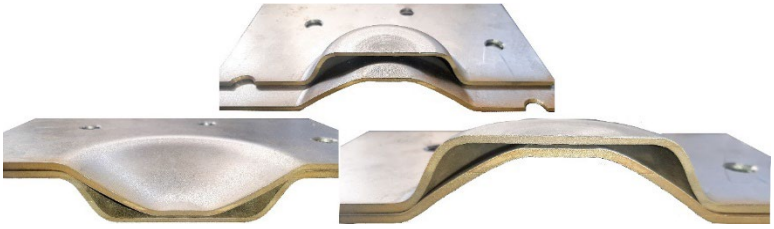
[۱]دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه امام حسین(ع)، تهران، ایران

[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، ایوان‌کی، ایران

چکیده گرافیکی



برجسته‌ها

- بررسی تجربی شکل‌دهی با قالب مادگی ورق‌های فلزی با و بدون راهگاه تحت بارگذاری انفجاری مکرر زیرآب
- پایین‌تر بودن مقدار بیشینه نازک‌شدگی در ناحیه خم اولیه در مقایسه با مرکز ورق هنگام استفاده از قالب مادگی بدون راهگاه

چکیده

در تحقیق حاضر به بررسی تجربی شکل‌دهی با قالب مادگی نمونه ورق‌های فلزی با و بدون استفاده از راهگاه در بخش مرکزی ورق پرداخته‌شده است. جهت اعمال بار به نمونه، از بارگذاری انفجاری مکرر زیرآب بهره گرفته‌شده است به‌طوری‌که در بارگذاری اول میزان جرم ماده منفجره ۴ گرم و در بارگذاری‌های بعدی ۸ گرم استفاده‌شده است. نتایج حاصل از تحقیق نشان دادند که در فرآیند شکل‌دهی با قالب مادگی با راهگاه، یک برآمدگی یا ناپیوستگی در بخش مرکزی ایجاد می‌گردد که منجر به افزایش ۲۸، ۷۳ و ۹۰ درصدی بیشینه نازک‌شدگی در امتداد شعاعی ورق در بارگذاری‌های دوم، سوم و چهارم در مقایسه با بارگذاری اول شده است. همچنین برای نازک‌شدگی در مرکز در همان وضعیت، افزایش ۲۷ و کاهش ۸ و ۶ درصدی مشاهده شد که این رفتار غیرمتعارف ناشی از وجود راهگاه بود. در این حالت میزان پرشدگی نمونه ۲۴٪ حاصل شد. این در حالی است که در فرآیند شکل‌دهی با قالب مادگی بدون راهگاه، میزان پرشدگی، بیشینه نازک‌شدگی و نازک‌شدگی در مرکز به ترتیب به میزان ۳۰٪ افزایش، ۶٪ افزایش و ۱۰٪ کاهش یافته است. یکی از نکات حائز اهمیت پایین‌تر بودن مقدار بیشینه نازک‌شدگی در ناحیه خم اولیه در مقایسه با مرکز ورق هنگام استفاده از قالب مادگی بدون راهگاه است که خلاف این نتیجه در قالب مادگی با راهگاه به دست آمد به‌طوری‌که در آن حالت بیشینه نازک شدگی در مرکز از ناحیه خم‌شدگی اولیه بالاتر بود. 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: ۱۴۰۲/۱۰/۱۸

بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۰۷

پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۶

ارائه برخط: ۱۴۰۲/۱۲/۱۹

*نویسنده مسئول: msadeghy@ihu.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

شکل‌دهی با قالب

قالب مادگی

راهگاه

انفجار مکرر

انفجار زیرآب

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

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین(ع) © نویسندگان

۱- مقدمه

فرآیند شکل‌دهی انفجاری که در تحقیقات متعددی [۱-۱۸] مورداستفاده قرارگرفته است، یک روش شکل‌دهی سرعت‌بالا است که با استفاده از انرژی مواد انفجاری برای ایجاد امواج ضربه‌ای به کمک یک محیط واسط جهت شکل‌دهی قطعات به دو روش فاصله‌دار و تماسی انجام می‌پذیرد [۱-۴]. به‌طورکلی شکل‌دهی انفجاری فاصله‌دار را می‌توان به سه روش مختلف شکل‌دهی آزاد، شکل‌دهی استوانه‌ای و شکل‌دهی با قالب انجام داد. در شکل‌دهی انفجاری با قالب، ورق بر روی یک قالب با حفره قرار می‌گیرد. ماده منفجره نیز در فاصله معینی از آن استقرار می‌یابد. نهایتاً انرژی حاصل از انفجار در این روش از طریق ماده واسط به قطعه کار منتقل و سبب رانده شدن ورق به درون قالب شده و شکل قالب را به خود می‌گیرد. به‌طور جزئی‌تر، فشار انفجار با سرعت‌بالا از محیط واسط عبور نموده و موجب تغییرشکل قطعه کار می‌شود. برای جلوگیری از ایجاد انسداد در نزدیکی دیواره قالب به دلیل انسداد گاز در محفظه قالب، باید یک سوراخ هواگیری در قالب قرار داده شود تا گاز از محفظه قالب خارج شود. از این روش در شکل دادن و اندازه کردن قطعات استفاده می‌شود [۵-۱۶].

بررسی و تحلیل عوامل مؤثر در فرآیند شکل‌دهی انفجاری در قالب بسته به‌صورت مکرر در زیرآب می‌تواند موجب شکل‌دهی مناسب در شرایط عملیاتی گردد. آب به‌عنوان یک سیال تراکم ناپذیر عملکرد فوق‌العاده‌ای در انتقال انرژی داشته و ایمپالس ناشی از انفجار در این محیط نسبت به هوا بیشتر است. به‌علاوه انتقال و پخش انرژی در محیط آب روی قطعه کار به‌صورت یکنواخت‌تری است. در تحقیق حاضر مقرر گردیده تا شکل‌دهی ورق فلزی با قالب تحت بارگذاری انفجاری مکرر در زیرآب با هدف افزایش حد شکل‌دهی ورق با توجه به هندسه قالب موردبررسی قرار گیرد. جهت دستیابی به این هدف، میزان یکنواختی ضخامت ورق و پرشدگی قالب بسیار مهم می‌باشند لذا برای بررسی این مشخصه‌ها سعی می‌گردد تأثیر پارامترهای مؤثر بر آن‌ها با در نظر گرفتن فرآیند بارگذاری مکرر در زیرآب موردمطالعه قرار گیرد. شایان‌ذکر است که به دلیل پیچیدگی شکل‌دهی سرعت‌بالا با فرآیند انفجار زیرآب، تحقیقات بسیار اندکی در این زمینه ارائه‌شده و می‌توان ادعا نمود که این تحقیقات روی شکل‌دهی ورق‌های فلزی با قالب تحت بارگذاری انفجار مکرر زیرآب صورت نگرفته است. در ادامه، برخی از تحقیقات اخیر مرتبط با موضوع انفجار زیرآب از دیدگاه شکل‌دهی فلزات مرور شده است.

در سال ۲۰۰۷، ایاما و ایتوه [۱] به مطالعه شکل‌دهی انفجاری در زیرآب با استفاده از مخزن تحت‌فشار و قالب فلزی پرداختند. ورق‌ها از جنس فلز مس و قالب‌های مورداستفاده به‌صورت مخروطی و رینگ حلقه‌ای شکل بودند همچنین، آزمایش‌ها در یک محفظه احتراق سهموی شکل انجام شد. نتایج نشان دادند که در انفجار زیر آب دو فشار بر روی ورق فلزی وجود دارد. اولین پالس فشار ناشی از بارگذاری شوک است و پالس دوم فشار ناشی از گاز انبساط ناشی از انفجار مواد منفجره است. در سال ۲۰۱۰، ایاما و ایتوه [۲] به بررسی شکل‌دهی انفجاری آلیاژ آلومینیوم در زیرآب با استفاده از یک قالب با شعاع ۴ میلی‌متر پرداختند. در این مطالعه، با مقایسه دو روش انفجاری و دستگاه پرس نشان دادند که در این روش به دلیل سرعت‌بالای شکل‌دهی، اثر نرخ کرنش زیاد می‌شود و نهایتاً طول شکل‌دهی افزایش می‌یابد. آن‌ها برای شکل‌دهی انفجاری از ۱۰ گرم ماده منفجره با سرعت انفجار ۶۹۷۰ متر بر ثانیه استفاده نمودند که عمق برآمدگی ۳۹ میلی‌متر و فشار ۱۵/۹ گیگاپاسکال را در کار تجربی ایجاد نمود. در شکل‌دهی با دستگاه پرس، با نیروی اعمالی ۳۵ سیکل در دقیقه نهایتاً عمق برآمدگی ۲۸ میلی‌متر در نمونه ایجاد شد. مقایسه دو شکل‌دهی نشان می‌دهد که میزان تغییرشکل ناشی از شکل‌دهی انفجاری بیشتر است.

در سال ۲۰۱۱، علیپور و نجاریان [۳] به مدل‌سازی و بررسی تجربی کشیدگی آلیاژهای ورق آلومینیومی ۲۰۲۴ در شکل‌دهی آزاد انفجاری زیرآب پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که نبود اصطکاک سبب ازدیاد ارتفاع کشیدگی ورق نسبت به روش‌های دیگر خواهد شد. همچنین به علت بالا بودن نرخ کرنش، کار سختی و برگشت فنری در این فرآیند کاهش می‌یابد. همچنین آن‌ها به مقایسه میزان خیز نقطه میانی ورق در فرآیند شکل‌دهی انفجاری زیرآب نسبت به دو

فرآیند کشش عمیق و هیدرولیکی پرداختند و نتایج نشان دادند در شکل‌دهی انفجاری این کمیت به ترتیب به میزان ۶۷٪ و ۳۵٪ بیشتر از دو حالت دیگر است.

در سال ۲۰۱۲ [۴]، ایاما و ایتوه به شبیه‌سازی عددی شکل‌دهی انفجاری یک ورق مسی به‌صورت انفجار خارج از مرکز با استفاده از مخزن فشار سیلندری در زیرآب پرداختند. آن‌ها یک مدل تحلیلی با فرض اینکه مسئله به‌صورت دوبعدی و جهت عمق بی‌نهایت طولانی است، پیشنهاد دادند. آن‌ها تأثیر تغییر موقعیت ماده منفجره و بسته بودن درب مخزن تحت‌فشار را بررسی نمودند. نتایج نشان دادند که در صورت عدم وجود درپوش روی مخزن تحت‌فشار و با تغییر فاصله مواد منفجره از سطح ورق، شکل ورق مسی به‌صورت نامتقارن و خارج از مرکز به دست می‌آید. بااین‌حال، هنگامی‌که فاصله بیش‌ازحد کوچک باشد، ورق مسی می‌شکند. در آزمایش‌های تجربی نشان داده شد که بدون مخزن تحت‌فشار، تغییرشکل خارج از مرکز به دست نمی‌آید. در ادامه، در سال ۲۰۱۴ [۵]، این گروه تحقیقاتی به مطالعه تأثیر انتشار موج شوک بر 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 استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که فرآیند شکل‌دهی ورق مسی با تغییر مخزن تحت‌فشار تغییر می‌کند و اگر از مخزن سهمی و هذلولی استفاده شود، بیشترین تغییرشکل برای قسمت مرکزی ورق مسی پیش‌بینی‌شده و مقدار آن تقریباً ۳۳ میلی‌متر است. همچنین سال ۲۰۱۴، این گروه [۶] به شکل‌دهی با قالب ورق مسی آنیل‌شده با ضخامت ۰/۳ میلی‌متر با استفاده از پدیده انفجار زیرآب پرداختند. آن‌ها با ساخت قالب کف و پشت دست انسان تلاش نمودند که خطوط ظریف در سرانگشتان، شل شدن پوست و خط اثر آن در کف دست و مفاصل انگشتان و حاشیه ناخن‌ها را ایجاد نمایند. آن‌ها با دقت بسیار خوبی، خطوط ظریف در پشت و کف دست انسان را با ورق شکل‌دهی نمودند. آن‌ها نشان دادند به‌منظور جلوگیری از پارگی، لبه‌های قالب باید با شعاع خمیدگی بیش از ۵ برابر ضخامت نمونه گرد شوند. در ادامه در سال ۲۰۱۷ [۷]، ایاما و همکاران به بررسی شکل‌دهی انفجاری با استفاده از فتیله انفجاری پرداختند. آن‌ها دریافتند که فرم تغییرشکل بستگی به توزیع فشار ضربه‌ای اعمالی روی ورق فلزی دارد. این توزیع فشار می‌تواند بر اساس شکل ماده منفجره، جرم ماده منفجره و شکل مخزن تحت‌فشار تغییر کند.

در سال ۲۰۱۶، ویوست و همکاران [۸] مدل‌سازی عددی اثر استفاده از مواد منفجره چندگانه در شکل‌دهی انفجاری مخروط‌های فولادی را بررسی کردند. آن‌ها شبیه‌سازی‌ها و تحلیل‌های فرآیند شکل‌دهی انفجاری زیرآب را با استفاده از روش‌های المان محدود و هیدرودینامیک ذرات هموار 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. در سال ۲۰۱۶، رووان و همکاران [۹] به بررسی شکل‌دهی ورق آلیاژ منیزیم با استفاده از قالب محدب تحت بارگذاری انفجار زیرآب پرداختند. نتایج نشان دادند هنگامی‌که از قالب با ارتفاع ۷/۶۴ و ۵/۳۶ میلی‌متر استفاده می‌شود، نمونه‌ها با موفقیت شکل‌دهی می‌گردد اما در ارتفاع ۱۰ میلی‌متر شکل‌دهی ناموفق است. همچنین مشخص شد که سختی مواد پس از برخورد موج ضربه به ۱/۵ برابر افزایش می‌یابد.

در سال ۲۰۱۷، حشمتی و همکاران [۱۰] به مطالعه تجربی و عددی پاسخ ورق‌های دایروی آلومینیومی، مسی و فولادی با دو ضخامت متفاوت تحت بارگذاری انفجاری زیرآب توسط لوله شوک مخروطی پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد هنگامی‌که ضخامت به بیش از ۱ میلی‌متر می‌رسد، تغییرشکل اولیه ورق‌های نازک کاهش می‌یابد و در ورق‌های ضخیم‌تر ناپدید می‌شود.

در سال ۲۰۱۸، ژانگ و همکاران [۱۱] به بررسی انفجار زیرآب خرج استوانه‌ای در نزدیکی ورق، تحلیل مشخصه‌های فشار انفجار و اثرات کاویتاسیون پرداختند. آن‌ها استفاده از مزایای روش گلرکین گسسته رانگه-کوتا و المان محدود را

برای بررسی کاویتاسیون ناشی از امواج رقیق‌شده در حین انفجار زیرآب در نزدیکی میدان انفجار پیشنهاد دادند. نتایج نشان دادند که وقتی موج شوک به ورق می‌رسد، یک موج شوک انعکاسی و یک موج شوک انتقالی در آب ایجاد می‌شود. پس‌ازاینکه موج شوک انعکاسی به حباب با امپدانس مکانیکی پایین برسد، یک موج رقیق‌شده تولید و متعاقباً منعکس می‌شود و درنتیجه یک موج رقیق‌شده دیگر تولید می‌گردد. به دلیل برهم‌نهی این دو موج رقیق‌شده، کاویتاسیونی با فشار کم ایجاد می‌گردد. با کاهش فاصله بین ورق خرج انفجاری، بیشینه فشار، میزان تغییرشکل، مقدار سرعت و همچنین شتاب در مرکز ورق افزایش می‌یابد. در سال ۲۰۱۸، نیشی و همکاران [۱۲] 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 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.

در سال ۲۰۱۹، ایاما و همکاران [۱۳] 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. در سال ۲۰۲۱، نیشی و همکاران [۱۴] در ادامه مطالعات انجام‌شده خود این دفعه از قالب محدب مخروطی برای شکل‌دهی انفجاری زیرآب استفاده کردند. در مطالعات جدید به دنبال ایجاد سطح فشار اعمالی یکسان به کل ورق بودند درحالی‌که در مطالعات قبلی فشارهای اعمالی به‌صورت نقطه‌ای بوده و موج فشار بالا به‌طور یکنواخت روی کل ورق منیزیم اعمال نمی‌شد زیرا فشار زیاد ایجادشده توسط مواد منفجره در یک نقطه در قسمت بالای ورق متمرکزشده بود؛ بنابراین، ورق دچار پارگی یا چروکیدگی شد. برای این منظور، آن‌ها از دونقطه جهت شروع انفجار استفاده نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که روش پیشنهادی امکان شکل‌دهی ورق‌های آلیاژ منیزیم را حتی در شرایطی که شیب قالب زیاد است، امکان‌پذیر می‌کند. روش پیشنهادی را می‌توان برای خم شدن ورق‌های V شکل آلیاژ منیزیم استفاده کرد.

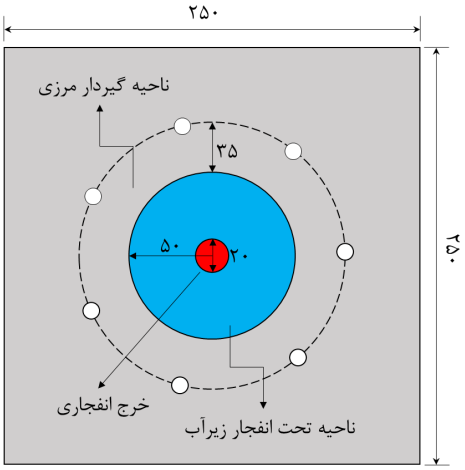
در سال ۲۰۲۲، نصیری و همکاران [۱۵ و ۱۶] به بررسی تجربی و عددی تغییرشکل پلاستیک ورق‌های فولادی تحت انفجار مکرر زیرآب پرداختند. دو سری آزمایش بر روی ورق‌ها تحت بارگذاری منفرد و مکرر (حداکثر سه بار) انجام شد تا مزایای ایده استفاده از بارگذاری متوالی را بهتر درک شود؛ بنابراین، ۱۲ و ۴ گرم بار انفجاری به ترتیب 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 میزز 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 [۱۵ و ۱۶] 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 شکل‌دهی با قالب مادگی نمونه‌های فلزی تحت بارگذاری انفجار مکرر زیرآب پرداخته‌شده است. ازاین‌رو، در بخش‌های

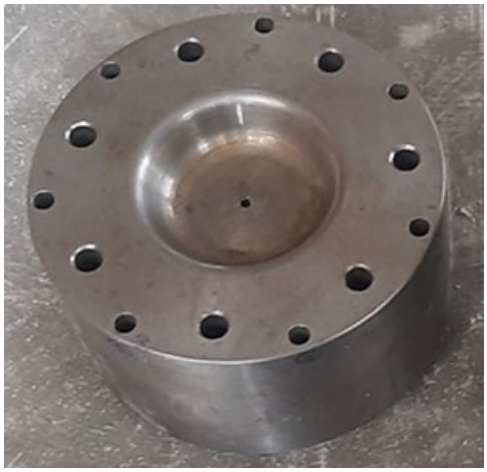
دوم و سوم مقاله حاضر به تشریح کار تجربی صورت گرفته و همچنین ارائه نتایج مربوط به آن پرداخته‌شده است.

۲- مطالعات آزمایشگاهی

نمونه‌های آزمایش تجربی برای شکل‌دهی با قالب ورق آهنی تحت انفجار مکرر زیرآب در ابعاد ۲۵۰ میلی‌متر × ۲۵۰ میلی‌متر با ضخامت ۳ میلی‌متر در نظر گرفته‌شده است. همان‌طور که به‌صورت شماتیک بعدی در شکل **۱** نشان داده‌شده 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 است. 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 است. برای اتصال ورق به قالب هفت سوراخ سرتاسری به قطر ۹/۵ میلی‌متر در نظر گرفته‌شده است (شکل **۲**). 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 پلی 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 **۳** 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 است 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 وزن خرج تنظیم مرکز انفجار و ثابت نگه‌داشتن فاصله حائز اهمیت است.



شکل (۱): شماتیک هندسی نمونه آزمایشی و خرج.



شکل (۲): قالب مادگی مورداستفاده.

شکل (۳): نگه‌دارنده خرج انفجاری.

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 **۴** نشان داده‌شده است.

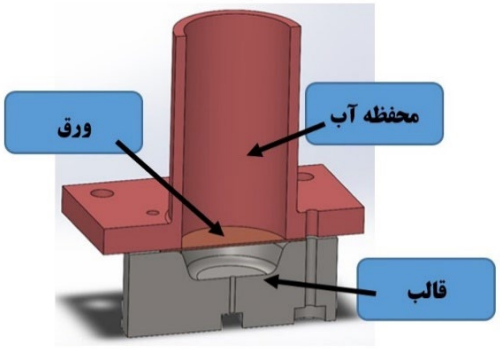
شکل (۴): نمایی از تجهیزات آزمایشگاهی شامل قالب مادگی، نگه‌دارنده، لوله انفجار، نمونه ورق.

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 ضدزنگ با تنش تسلیم بسیار بالا که آن‌ها را می‌توان صلب در نظر گرفت، ساخته‌شده‌اند. قطر داخلی لوله ۱۰۰ میلی‌متر و قطر خارجی لوله ۱۴۰ میلی‌متر است. ارتفاع لوله ۳۰۰ میلی‌متر بوده که به گیره رزوه می‌شوند.

به‌منظور اندازه‌گیری میزان تغییرشکل و همچنین تغییر ضخامت ورق به ترتیب از کولیس رومیزی (با دقت ۰/۰۲ میلی‌متر) و میکرومتر دیجیتالی استفاده می‌شود (شکل **۵**). در ابتدا کولیس روی سطح مسطح ورق قرار داده می‌شود و نوک خط‌کش آن روی بیشترین برآمدگی تنظیم می‌گردد. همچنین پس از اتمام مراحل بارگذاری و اندازه‌گیری میزان تغییرشکل، ورق از وسط توسط وایرکات جهت اندازه‌گیری میزان تغییر ضخامت برش زده می‌شود. باید دقت کرد که خط برش دقیقاً از وسط ناحیه تغییرشکل‌یافته بگذرد تا کمترین ضخامت اندازه‌گیری شود.

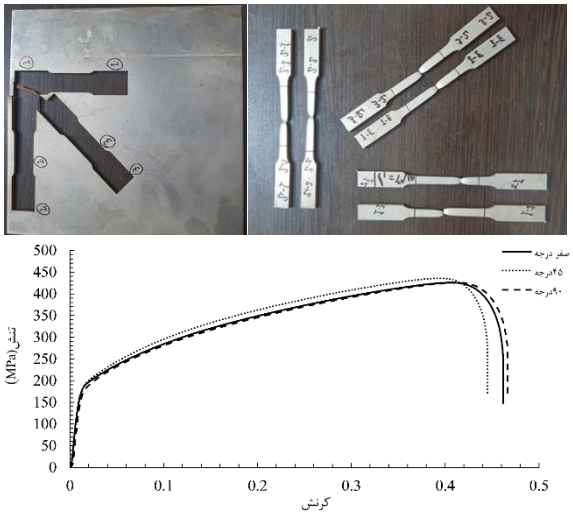
همان‌طور که به‌صورت شماتیک در شکل **۶** نشان داده‌شده است، لوله انفجار پر از آب به نگه‌دارنده بالایی رزوه شده و با نگه‌دارنده پایینی که ورق آزمایشی را در بر دارد، توسط پیچ‌های مذکور متصل شده است. بارگذاری انفجاری زیرآب با انفجار دیسک‌های دایره‌ای در فاصله ۲۱۵ میلی‌متری از سطح بالایی ورق اعمال می‌شود. یک نگه‌دارنده خرج انفجاری در بالای لوله قرار دارد و خرج توسط چاشنی الکتریکی فعال می‌شود.

شکل (۵): تجهیزات اندازه‌گیری پروفیل تغییرشکل و ضخامت ورق.



شکل (۶): نحوه قرارگیری نمونه و شکل‌دهی با قالب تحت انفجار مکرر زیرآب.

خواص مکانیکی ورق در این پژوهش توسط آزمون کشش تک‌محوره بر اساس استاندارد ASTM-E8 به دست آمد. در این آزمون سه نمونه در زاویه‌های صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه از ورق جدا می‌شود و تحت آزمون قرار می‌گیرد. شکل **۷** نمونه‌های برش خورده جهت آزمون کشش به همراه نمودارهای تنش-کرنش حقیقی استخراج‌شده از این آزمون را نشان می‌دهد.



شکل (۷): الف) نمونه‌های برش خورده طبق استاندارد ASTM-E8؛ ب) نمودار تنش کرنش مهندسی ورق مورداستفاده تحت آزمون کشش.

مطابق جدول **۱**، (قالب مادگی با 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. در این جدول، SB، DB، TB و QB به ترتیب بیان‌گر انفجار منفرد، دوگانه، سه‌گانه و چهارگانه بوده و اعدا پس از آن‌ها مربوط به جرم خرج انفجاری در هر مرحله از بارگذاری است. حرف B تعداد کلی انفجار و عدد پس از آن شماره انفجار است. VH و NVH مربوط به به‌کارگیری راهگاه و عدم استفاده از آن در آزمایش‌ها است.

جدول (۱): جدول آزمایش‌های انجام‌شده در تحقیق حاضر

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

۳- نتایج و بحث

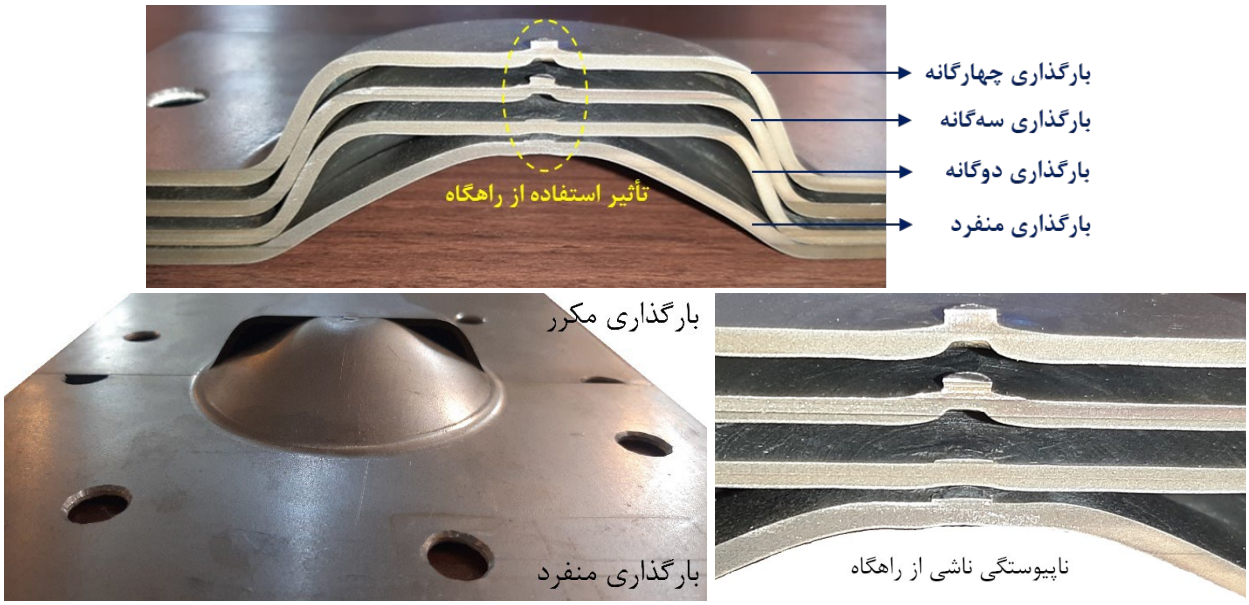
نتایج تجربی به‌دست‌آمده از شکل‌دهی با قالب مادگی با راهگاه مرکزی برای نمونه‌های فلزی با استفاده از روش انفجار مکرر زیرآب به همراه نماهای برش خورده‌ای از نمونه‌های آزمایش‌شده در تحقیق حاضر به ترتیب در جدول **۲** و شکل‌های **۸** و **۹** ارائه‌شده است.

یکی از نکات حائز اهمیت در نمونه‌های برش خورده به وجود آمدن یک برآمدگی یا ناپیوستگی هندسی در مرکز ورق به

علت وجود راهگاه جهت تخلیه هوای محبوس بین سطح قالب مادگی و پشت ورق است. این نتیجه حاصل می‌شود که وجود راهگاه در پشت ورق تأثیر قابل‌توجهی روی پروفیل تغییرشکل ورق در شکل‌دهی با نرخ بارگذاری بالا دارد و یک راه‌حل مناسب جهت تخلیه هوا نیست. لذا در ادامه تحقیق به حل این مشکل پرداخته خواهد شد (شکل **۸** و **۹**). همان‌طور که نتایج ارائه‌شده در جدول **۲** نشان می‌دهد، بارگذاری منفرد به جرم ۴ گرم منجر به ۱۶/۳٪ نازک‌شدگی در نقطه مرکزی ورق گردیده؛ یعنی، در نقطه‌ای که نمونه بیشترین تغییرشکل عرضی دائمی را با توجه به قالب مادگی تجربه می‌کند، است. این در حالی است که در این بارگذاری، پرشدگی قالب حدود ۲۴٪ است و امکان پرشدگی کامل در فرآیند تک‌مرحله‌ای انفجار زیرآب وجود ندارد. همچنین بیشینه نازک‌شدگی در نمونه در ۲ میلی‌متری مرکز به علت وجود راهگاه و شکل‌گیری پدیده گلویی شدن رخ می‌دهد و مقدار آن برابر با ۱۹/۳٪ است. شایان توجه است که در بارگذاری منفرد، نمونه ورق پروفیل تغییرشکل مخروطی را با حداکثر تغییرشکلی به میزان ۲۰/۴۸ میلی‌متر در مرکز تجربه می‌کند.

جدول (۲): نتایج تجربی تحقیق حاضر (قالب با راهگاه)

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



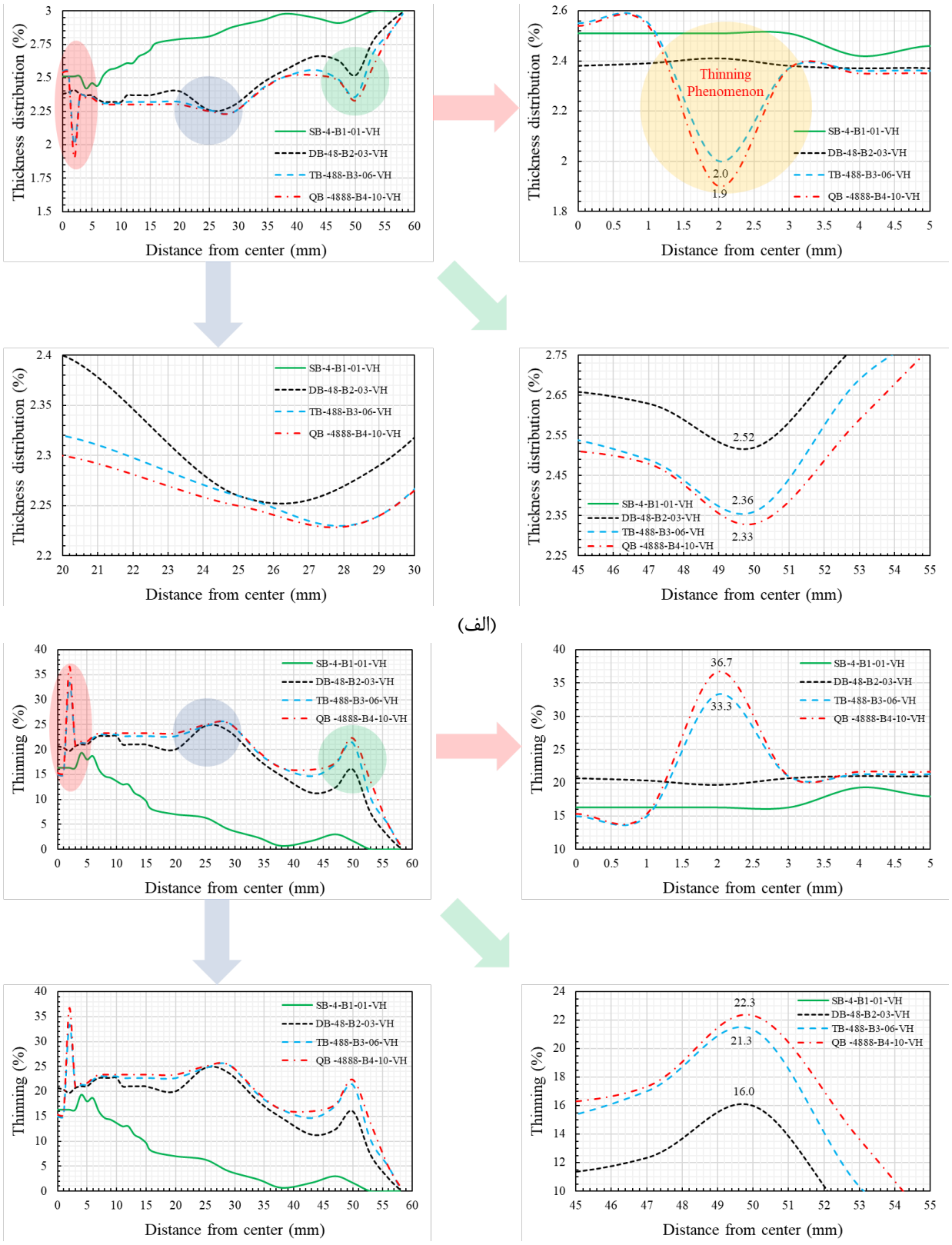
شکل (۸): نمای برش خورده نمونه ورق‌های تغییرشکل‌یافته در فرآیند شکل‌دهی انفجاری زیرآب با قالب مادگی با راهگاه.

شکل (۹): نمای داخلی نمونه ورق‌های تغییرشکل‌یافته در فرآیند شکل‌دهی انفجاری زیرآب با قالب مادگی با راهگاه.

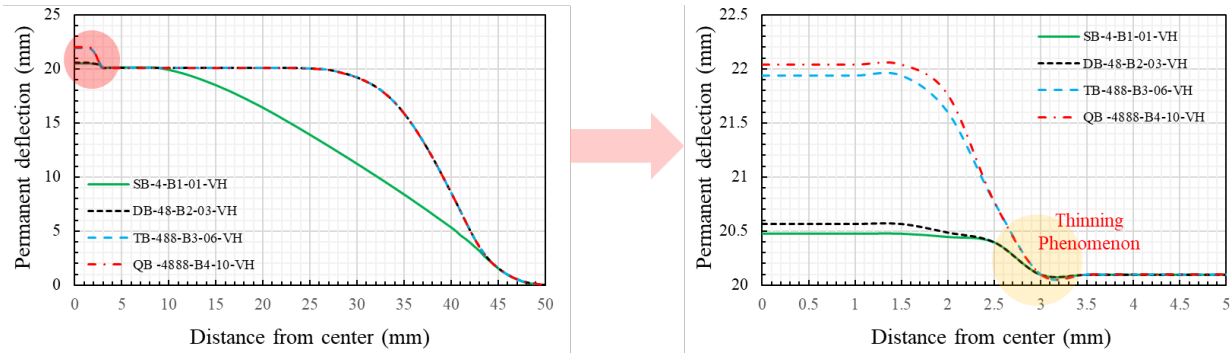
شایان توجه است که عمق قالب مادگی نیز ۲۰/۱۰ میلی‌متر بوده و نتیجه به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که نمونه در برخورد به کف قالب دچار بازگشت نشده اما با توجه به وجود راهگاه در بخش مرکزی، ورق به‌اندازه ۰/۴۸ میلی‌متر در راهگاه شارش داشته است. در ادامه و در بارگذاری دوم، نتایج نشان دادند که استفاده از ماده منفجره‌ای به جرم ۸ گرم منجر به بیشینه نازک‌شدگی ۲۴/۷٪ در ناحیه خم‌شدگی اولیه ورق (در فاصله ۲۵ میلی‌متری از مرکز) و ۱۰۰٪ پرشدگی می‌گردد (شکل **۱۰**). حال این نتیجه حاصل می‌شود که دو برابر نمودن جرم خرج در بارگذاری دوم منجر به افزایش ۲۷ درصدی نازک‌شدگی در مرکز، ۲۸ درصدی بیشینه نازک‌شدگی و ۳۱۶ درصدی پرشدگی قالب در پدیده بارگذاری مکرر می‌گردد. همچنین، افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری انفجاری میزان نازک‌شدگی را در بخش مرکزی به علت وجود راهگاه و شارش ورق در این ناحیه به‌شدت کاهش می‌دهد. به‌طور جزئی‌تر، در بارگذاری سوم و چهارم در مقایسه با بارگذاری دوم، نازک‌شدگی ناحیه مرکزی به ترتیب به میزان ۲۸٪ و ۲۶٪ کاهش می‌یابد. در ادامه، باید اشاره نمود که انفجار چهارم تأثیری روی میزان نازک‌شدگی مرکزی و بیشینه آن و همچنین پرشدگی قالب ندارد و هیچ‌کدام از نازک‌شدگی‌های رخ داده روی نمونه آزمایشی منجر به ترک یا پارگی نشده است. نمودار توزیع ضخامت به همراه درصد نازک شدگی و همچنین پروفیل تغییرشکل هر چهار سری نمونه آزمایش‌شده با قالب مادگی دارای راهگاه در شکل **۱۰** و **۱۱** به تصویر کشیده شده است.

همان‌طور که نتایج ارائه‌شده در شکل **۱۰** نشان می‌دهد، فرآیند شکل‌دهی انفجاری زیرآب منجر به پدیدار شدن سه ناحیه حساس قرمز، آبی و سبزرنگ در نازک‌شدگی یا توزیع ضخامت نمونه حین بارگذاری می‌شود. پیش از تجزیه‌وتحلیل نتایج فرآیند شکل‌دهی با قالب باید اشاره نمود که مشابه با مطالعه‌ای روی شکل‌دهی آزاد ورق با فرآیند انفجار مکرر زیرآب که پیش‌تر در مراجع [۱۵ و ۱۶] ارائه‌شده است، انفجار چهارم تأثیری روی نتایج تجربی به‌دست‌آمده از لحاظ پروفیل تغییرشکل و نازک‌شدگی نمونه آزمایشی ندارد و برای شکل‌دهی با قالب نمونه تنها سه انفجار کافی است و نمونه ۱۰۰ پرشدگی را بدون تغییر محسوس در ضخامت تجربه می‌کند. به‌طور جزئی‌تر، نتایج نشان می‌دهد که در ناحیه قرمزرنگ که در محدوده مرکزی ورق رخ می‌دهد، برخلاف انتظار، کمترین نازک‌شدگی در بارگذاری سوم (۱۵/۰٪ با ضخامت ۲/۵۵ میلی‌متر) و به وجود آمدن پدیده گلویی شدن در نزدیکی مرکز ورق است.

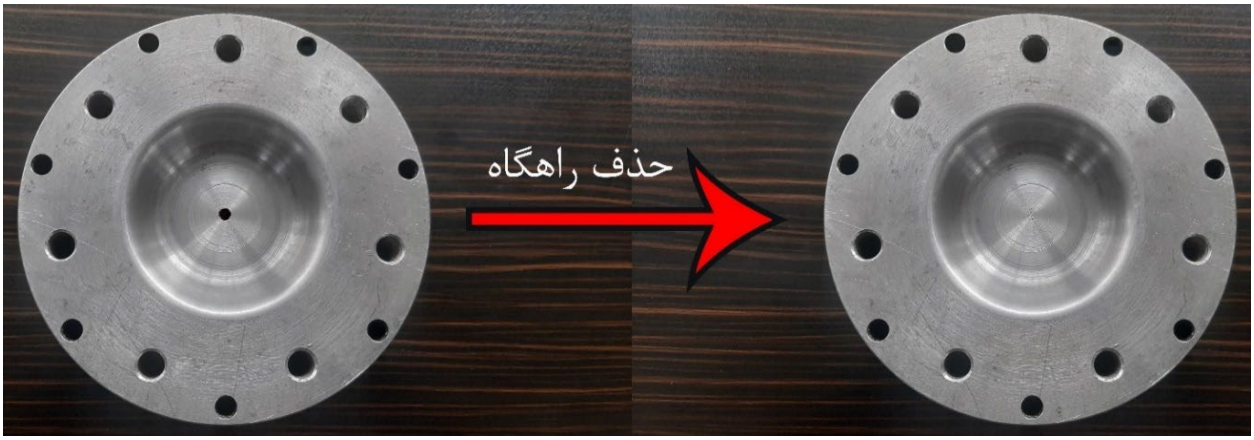
شایان توجه است که این نتیجه حاصل از در نظر گرفتن راهگاه در بخش مرکزی قالب و شارش ورق به داخل سوراخ است. لازم به توضیح است که در بارگذاری انفجاری دوم نازک‌شدگی نمونه در مرکز (با ضخامت ۲/۳۸ میلی‌متر) در مقایسه با بارگذاری اول، سوم و چهارم به میزان ۲۷٪ (با ضخامت ۲/۵۱ میلی‌متر)، ۷۸٪ (با ضخامت ۲/۵۵ میلی‌متر) و ۷۵٪ (با ضخامت ۲/۵۴ میلی‌متر) افزایش می‌یابد. شایان‌ذکر است که در مرحله دوم بارگذاری، بیشینه نازک‌شدگی (۲۴/۷٪ باضخامت ۲/۲۶ میلی‌متر) در ناحیه خم‌شدگی اولیه ورق که ناشی از انفجار اول است، رخ می‌دهد و تا مرکز ورق حدوداً ۲۵ میلی‌متر فاصله دارد. باید اشاره نمود که مقدار نازک‌شدگی در مرحله دوم بارگذاری در ناحیه گلویی کمی کمتر از ناحیه خم اولیه و برابر با ۲۲/۷٪ با ضخامت ۲/۳۲ میلی‌متر است. این بدان دلیل است که در بارگذاری دوم بیشتر موج تنش و کار پلاستیک صرف تغییرشکل نواحی می‌شود که در بارگذاری اول تغییرشکل پلاستیک کمتری را تجربه کرده‌اند [۱۵-۲۰] و با یک‌بار تکرار نمودن بار انفجاری، به کار بردن راهگاه چنان تأثیر محسوسی روی تغییر ضخامت نمونه در محدوده ۵ میلی‌متری از مرکز ندارد لذا می‌توان این‌گونه پنداشت که استفاده از راهگاه برای بارگذاری‌های متعدد با قالب مادگی چندان ایده خوبی نیست.



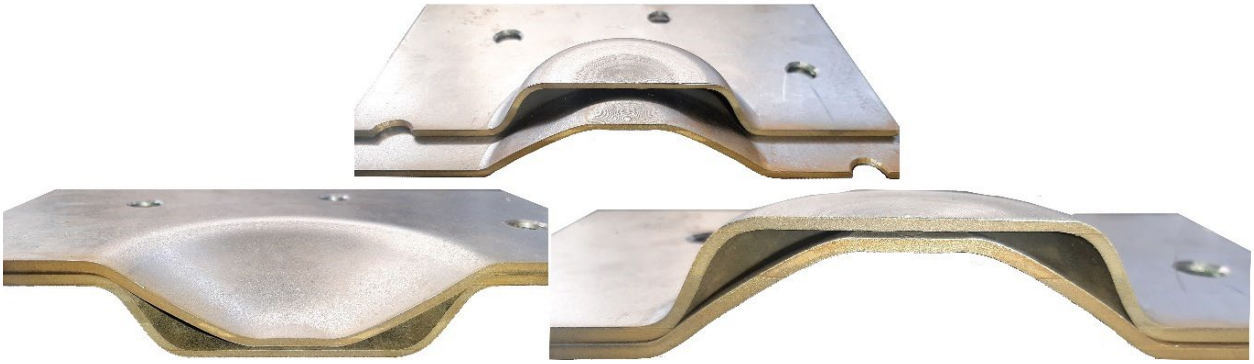
شکل (۱۰): نتایج فرآیند شکل‌دهی با قالب با راهگاه به همراه بزرگ‌نمایی در نواحی رنگی: الف) توزیع ضخامت؛ ب) نازک‌شدگی.



شکل (۱۱): پروفیل تغییرشکل نمونه‌های آزمایشی در فرآیند شکل‌دهی با قالب با راهگاه به همراه بزرگ‌نمایی در محدوده ۰ تا ۵ میلی‌متر در راستای شعاعی.



شکل (۱۲): حذف راهگاه در قالب مادگی فرآیند شکل‌دهی انفجاری مکرر زیرآب.



شکل (۱۳): نمای برش خورده و داخلی نمونه ورق‌های تغییرشکل‌یافته در فرآیند شکل‌دهی انفجاری زیرآب با قالب مادگی بدون راهگاه.

این در حالی است که در ناحیه قرمزرنگ که در فاصله ۵ میلی‌متری از مرکز ورق قرار گفته است، با افزایش تعداد بارگذاری، بیشترین مقدار نازک‌شدگی در بارگذاری سوم و چهارم به ترتیب به ۳۳/۳٪ (با ضخامت ۲/۰ میلی‌متر) و ۳۶/۷٪ (با ضخامت ۱/۹ میلی‌متر) می‌رسد؛ یعنی، مقادیر بیشینه نازک‌شدگی برای بارگذاری سوم و چهارم که در ناحیه گلویی رخ می‌دهد در مقایسه با بارگذاری دوم به میزان ۳۵٪ و ۴۹٪ و در مقایسه با بارگذاری اول، به میزان ۷۳٪ و ۹۰٪ افزایش می‌یابد. پس‌ازآن، با دور شدن از این ناحیه، میزان نازک‌شدگی در نمونه ورق تا رسیدن به ناحیه آبی‌رنگ تغییر محسوسی با افزایش تعداد بارگذاری از سه به چهار ندارد. باید اشاره نمود که با توجه به کاهش محسوس

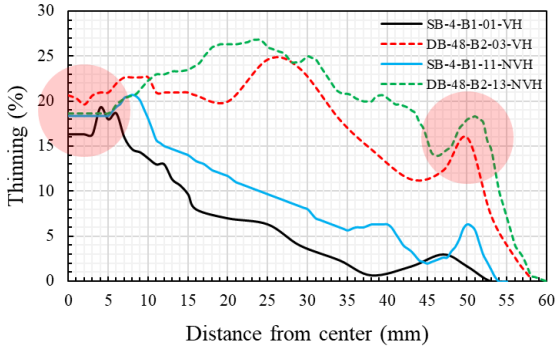
ضخامت نمونه (حدود ۲٪) در حدفاصل بین محدوده قرمز و آبی‌رنگ، تکرر سه دفعه بارگذاری انفجاری الزامی است. در ناحیه سبزرنگ که در محدوده مرز گیردار ورق ترسیم‌شده است، باید اشاره نمود که مقدار بیشینه نازک‌شدگی در بارگذاری دوم، سوم و چهارم به ترتیب به مقادیر ۱۶/۰٪، ۲۱/۳٪ و ۲۲/۳٪ می‌رسد. این بدان معناست که میزان نازک شدگی در مرز گیردار در بارگذاری سوم و چهارم در مقایسه با بارگذاری دوم به ترتیب با افزایش ۳۳ و ۳۹ درصدی همراه است. همچنین در مقایسه با بارگذاری منفرد، این کمیت تقریباً ۶ برابر شده است که این میزان، از دیدگاه مود شکست نمونه در فرآیند بارگذاری مکرر در جرم خرج‌های بالا؛ یعنی، پارگی جزئی یا کامل نمونه از مرز گیردار، مقدار قابل‌توجهی است. در مورد موضوع پیش‌آمده ذکر این نکته ضروری است که یکی از مزایای استفاده از بارگذاری مکرر، کاهش جرم خرج مصرفی برای رسیدن به هدف غایی در مقایسه با بارگذاری منفرد است، لذا احتمال پیش آمدن پارگی در مرز گیردار تقریباً پایین است. اکنون با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از توزیع ضخامت و نازک شدگی نمونه این نتیجه حاصل می‌شود که اصلاح راهگاه قالب برای بارگذاری انفجاری مکرر باید مدنظر قرار گیرد (شکل **۱۲**). لذا در ادامه تحقیقات، قالب استفاده‌شده در آزمایش فاقد راهگاه برای عبور هوا در مرکز است. بدین منظور، دو سری اول از آزمایش‌ها؛ یعنی، بارگذاری منفرد و دومرحله‌ای، با قالب مادگی جدید (بدون راهگاه در مرکز) دوباره انجام و نتایج مطابق با جدول **۳** به دست آمد. نماهای برش خورده‌ای از نمونه‌های آزمایش‌شده در قالب مادگی بدون راهگاه مرکزی در شکل **۱۳** ارائه‌شده است.

جدول (۳): نتایج تجربی تحقیق حاضر (قالب بدون راهگاه)

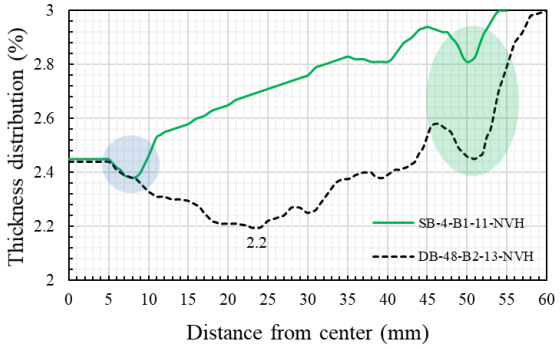
شماره	نازک‌شدگی (٪)		پرشدگی (٪)
	بیشینه	مرکز	
SB-4-B1-11-NVH	۲۰/۷	۱۸/۳	۳۰
DB-48-B2-13-NVH	۲۶/۸	۱۸/۷	۱۰۰

همان‌طور که از جدول **۳** و شکل **۱۳** مشخص است، با حذف راهگاه در بخش مرکزی، پدیده گلویی شدن و ایجاد ناپیوستگی رخ نمی‌دهد. به‌طور جزئی‌تر، بارگذاری منفرد با خرجی به جرم ۴ گرم منجر به بیشینه نازک‌شدگی ۲۰/۷٪، ۱۸/۳٪ نازک‌شدگی در مرکز و ۳۰٪ پرشدگی قالب می‌شود که در مقایسه با قالب مادگی با راهگاه، نتایج پارامترهای مهم بیشینه نازک‌شدگی، نازک‌شدگی در مرکز و پرشدگی قالب به ترتیب به میزان ۱۲٪، ۷٪ و ۲۵٪ افزایش یافته است. این در حالی است که در بارگذاری مکرر دومرحله‌ای، اعمال جرم خرجی برابر با ۸ گرم به نمونه منجر به بیشینه نازک‌شدگی ۲۶/۸٪، ۱۸/۷٪ نازک‌شدگی در مرکز و ۱۰۰٪ پرشدگی قالب گردید که در مقایسه با قالب مادگی با راهگاه، بیشینه نازک‌شدگی و نازک‌شدگی در مرکز به ترتیب به میزان ۶٪ افزایش و ۱۰٪ کاهش یافته است (نواحی قرمزرنگ)؛ بنابراین، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از این بخش، این نتیجه حاصل می‌شود که تغییرات ضخامت حاصل از تأثیر وجود راهگاه در مرکز ورق برای انفجار مراحل اول و دوم حذف می‌گردد به‌طوری‌که در بارگذاری مکرر با قالب مادگی بدون راهگاه میزان نازک‌شدگی مرکزی کاهش و پرشدگی قالب افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش تعداد بارگذاری تغییرات بیشینه نازک‌شدگی و همچنین نازک‌شدگی ورق در مرکز به ترتیب به میزان ۲۹٪ و ۲٪ افزایش می‌یابد که برای بخش مرکزی چندان محسوس نیست. یکی دیگر از نکات حائز اهمیت پایین‌تر بودن مقدار بیشینه نازک‌شدگی در ناحیه خم اولیه در مقایسه با مرکز ورق هنگام استفاده از قالب مادگی بدون راهگاه است که خلاف این نتیجه در قالب مادگی با راهگاه به دست آمد به‌طوری‌که در آن حالت بیشینه نازک شدگی در مرکز از ناحیه خم‌شدگی اولیه بالاتر بود. لذا استفاده از ایده قالب مادگی بدون راهگاه برای شکل‌دهی فلزات تحت بارگذاری انفجاری مکرر زیرآب بسیار کارآمد است. برای درک بهتر روند تغییرات مذکور، در شکل **۱۴**، تغییرات نازک‌شدگی نمونه در راستای شعاعی ورق برای دو بارگذاری اول و دوم برای هر دو قالب با و بدون راهگاه مقایسه شده است.

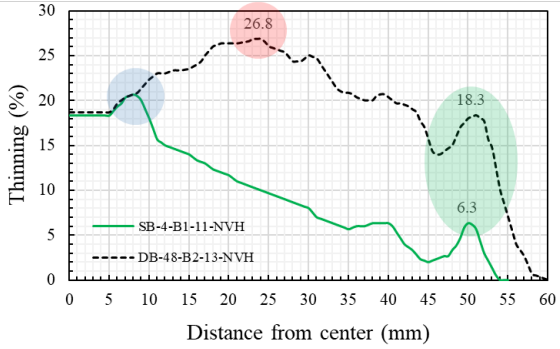
مطابق شکل **۱۵**، با مقایسه بارگذاری منفرد و دومرحله‌ای این نتیجه حاصل می‌شود که تکرر بار انفجاری منجر به افزایش محسوس نازک‌شدگی نمونه در بخش گیردار ورق (ناحیه سبزرنگ) شده است.



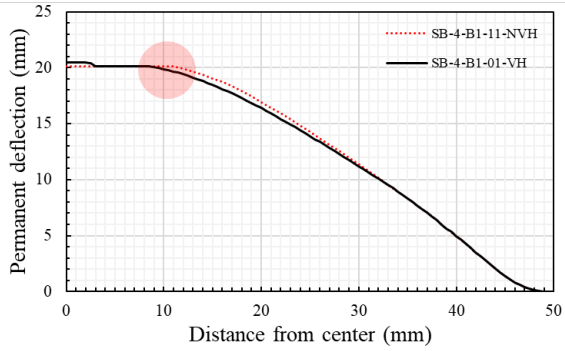
شکل (۱۴): مقایسه میزان نازک‌شدگی در دو فرآیند.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۱۵): نتایج فرآیند شکل‌دهی بدون راهگاه: الف) توزیع ضخامت؛ ب) نازک‌شدگی؛ ج) پروفیل تغییرشکل.

این موضوع نشان می‌دهد که در آزمایش مکرر دوم، ضربه موج انفجار منجر به توسعه نازک‌شدگی به سمت گوشه انحنادار قالب گردیده به‌نحوی‌که علاوه بر پر نمودن قالب، برنازک‌شدگی‌ای بیشینه در قبل از مرز گیردار رخ می‌دهد. همچنین، در ناحیه قرمزرنگ نشان داده‌شده در شکل **۱۵ ج**، مشخص است که طول بیشتری از نمونه ورق در قالب مادگی بدون راهگاه روی قالب نشسته و درصد پرشدگی به میزان ۶٪ افزایش یافته است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، شکل‌دهی با قالب مادگی ورق‌های فلزی با استفاده از فرآیند انفجار مکرر زیرآب انجام‌شده است. در بخش تجربی، از دو نوع قالب با و بدون راهگاه در مرکز ورق استفاده‌شده است. نتایج تحقیق حاضر به شرح زیر است:

۱) وجود راهگاه در پشت ورق جهت تخلیه هوای محبوس بین سطح قالب مادگی و ورق، تأثیر قابل‌توجهی روی پروفیل تغییرشکل ورق در شکل‌دهی با نرخ بارگذاری بالا دارد و یک راه‌حل مناسب جهت تخلیه هوای پشت ورق نیست. به وجود آمدن یک برآمدگی یا ناپیوستگی هندسی در مرکز ورق ناشی از این مسئله است.

۲) در فرآیند شکل‌دهی با قالب مادگی با راهگاه، بارگذاری منفرد به جرم ۴ گرم منجر به ۱۶/۳٪ نازک‌شدگی در نقطه مرکزی ورق و ۲۴٪ پرشدگی می‌شود. لذا امکان پرشدگی کامل در فرآیند تک‌مرحله‌ای انفجار زیرآب وجود ندارد و بهره‌گیری از فرآیند انفجار مکرر الزامی است. همچنین بیشینه نازک‌شدگی در نمونه در ۲ میلی‌متری مرکز به علت وجود راهگاه و شکل‌گیری پدیده گلویی شدن رخ می‌دهد و مقدار آن برابر با ۱۹/۳٪ است. دو برابر نمودن جرم خرج در بارگذاری دوم منجر به افزایش ۲۷ درصدی نازک‌شدگی در مرکز، ۲۸ درصدی بیشینه نازک‌شدگی و ۳۱۶ درصدی پرشدگی قالب در پدیده بارگذاری مکرر می‌گردد. باید اشاره نمود که انفجار چهارم تأثیری روی میزان نازک‌شدگی مرکزی و بیشینه آن و همچنین پرشدگی قالب ندارد و

هیچ‌کدام از نازک‌شدگی‌های رخ داده روی نمونه آزمایشی منجر به ترک یا پارگی نشده است. برخلاف انتظار، کمترین نازک‌شدگی در بارگذاری سوم (۱۵/۰٪) و به وجود آمدن پدیده گلویی شدن در نزدیکی مرکز ورق است. شایان توجه است که این نتیجه حاصل از در نظر گرفتن راهگاه در بخش مرکزی قالب و شارش ورق به داخل سوراخ است. باید اشاره نمود که مقدار نازک‌شدگی در مرحله دوم بارگذاری در ناحیه گلویی کمی کمتر از ناحیه خم اولیه و برابر با ۲۲/۷٪ با ضخامت ۲/۳۲ میلی‌متر است. این بدان دلیل است که در بارگذاری دوم بیشتر موج تنش و کار پلاستیک صرف تغییرشکل نواحی می‌شود که در بارگذاری اول تغییرشکل پلاستیک کمتری را تجربه کرده‌اند و با یک‌بار تکرار نمودن بار انفجاری، به کار بردن راهگاه چنان تأثیر محسوسی روی تغییر ضخامت نمونه در محدوده ۵ میلی‌متری از مرکز ندارد لذا می‌توان این‌گونه پنداشت که استفاده از راهگاه برای بارگذاری‌های متعدد با قالب مادگی چندان ایده خوبی نیست. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از توزیع ضخامت و نازک شدگی نمونه این نتیجه حاصل می‌شود که اصلاح راهگاه قالب برای بارگذاری انفجاری مکرر باید مدنظر قرار گیرد.

۳) با حذف راهگاه در بخش مرکزی، پدیده گلویی شدن و ایجاد ناپیوستگی رخ نمی‌دهد. به‌طور جزئی‌تر، بارگذاری منفرد با خرجی به جرم ۴ گرم منجر به بیشینه نازک‌شدگی ۲۰/۷٪، ۱۸/۳٪ نازک‌شدگی در مرکز و ۳۰٪ پرشدگی قالب می‌شود که در مقایسه با قالب مادگی با راهگاه، نتایج پارامترهای مهم بیشینه نازک‌شدگی، نازک‌شدگی در مرکز و پرشدگی قالب به ترتیب به میزان ۱۲٪، ۷٪ و ۲۵٪ افزایش یافته است. در مقایسه با قالب مادگی با راهگاه، بیشینه نازک‌شدگی و نازک‌شدگی در مرکز به ترتیب به میزان ۶٪ افزایش و ۱۰٪ کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش تعداد بارگذاری تغییرات بیشینه نازک‌شدگی و همچنین نازک‌شدگی ورق در مرکز به ترتیب به میزان ۲۹٪ و ۲٪ افزایش می‌یابد که برای بخش مرکزی چندان محسوس نیست. یکی دیگر از نکات حائز اهمیت پایین‌تر بودن مقدار بیشینه نازک‌شدگی در ناحیه خم اولیه در مقایسه با مرکز ورق هنگام استفاده از قالب مادگی بدون راهگاه است که خلاف این نتیجه در قالب مادگی با راهگاه به دست آمد به‌طوری‌که در آن حالت بیشینه نازک شدگی در مرکز از ناحیه خم‌شدگی اولیه بالاتر بود. لذا استفاده از ایده قالب مادگی بدون راهگاه برای شکل‌دهی فلزات تحت بارگذاری انفجاری مکرر زیرآب بسیار کارآمد است.

۵- مراجع

[1] Iyama H, Itoh S. Study on explosive forming using pressure vessel and metal die. InASME Pressure Vessels and Piping Conference. 2007; 42827: 73-78. **DOI** 10.1115/pvp2007-26398.

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

[3] Alipour R, Najarian F. Modeling and investigation of elongation in free explosive forming of aluminum alloy plate. International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering. 2011;5(4):817-20. **DOI** 10.15372/fgv20220611.

[4] Iyama H, Itoh S. Numerical simulation of eccentric explosive forming using cylindrical pressure vessel. In Pressure Vessels and Piping Conference. 2012; 55034: 33-38, ASME. **DOI** 10.1115/pvp2012-78284.

[5] Iyama H, Higa Y, Itoh S. Study on the effects of shock wave propagation on explosive forming. In Materials Science Forum. 2014;767: 132-137, Trans Tech Publications Ltd. **DOI** 10.4028/www.scientific.net/msf.767.132.

[6] Shiramoto K, Watanabe T, Mizuno A, Iyama H, Fujita M. A method of explosive forming process for making a palm and a back of human hand. In Materials Science Forum. 2014; 767:188-191, Trans Tech Publications Ltd. **DOI** 10.4028/www.scientific.net/msf.767.188.

[7] Iyama H, Higa Y, Nishi M, Itoh S. Numerical simulation of explosive forming using detonating fuse. The International Journal of Multiphysics.

[17] Ziya-Shamami M, Babaei H, Mostofi TM, Khodarahmi H. Structural response of monolithic and multi-layered circular metallic plates under repeated uniformly distributed impulsive loading: An experimental study. Thin-Walled Structures. 2020;157:107024. **DOI** 10.1016/j.tws.2020.107024.

[18] Ziya-Shamami M, Babaei H, Mostofi TM, Khodarahmi H. Plastic deformation of similar and dissimilar multi-layered metallic plates with the same areal density subjected to repeated impulsive loading. Journal of Aerospace Mechanics. 18 (1), 137-159. **DOR** 20.1001.1.26455323.1401.18.1.9.7.

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

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

[21] Mirzababaie Mostofi T, Babaei H. Plastic deformation of polymeric-coated aluminum plates subjected to gas mixture detonation loading: Part II: Analytical and empirical modelling. Journal of Solid and Fluid Mechanics. 2019;9(2):15-29. **DOI** 10.22044/JSFM.2019.7816.2778.

[22] Mirzababaie Mostofi T, Sayah Badkhor M, Ghasemi E. Experimental investigation and optimal analysis of the high-velocity forming process of bilayer plates. Journal of Solid and Fluid Mechanics. 2019;9(3):65-80. **DOI** 10.22044/JSFM.2019.8586.2953.

2017;11(3):233-44. **DOI** 10.21152/1750-9548.11.3.233.

[8] De Vuyst T, Kong K, Djordjevic N, Vignjevic R, Campbell JC, Hughes K. Numerical modelling of the effect of using multi-explosives on the explosive forming of steel cones. In Journal of Physics: Conference Series. 2016; 734(3):032074, IOP Publishing. **DOI** 10.1088/1742-6596/734/3/032074.

[9] 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** 10.1016/j.jma.2015.12.003.

[10] Heshmati M, Zamani A J, Mozafari A. Experimental and numerical study of isotropic circular plates' response to underwater explosive loading, created by conic shock tube. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. 2017;48(2):106-21. **DOI** 10.1002/mawe.201600578.

[11] Zhang ZF, Wang C, Wang LK, Zhang AM, 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** 10.1016/j.ijimpeng.2018.06.009.

[12] 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.

[13] Iyama H, Higa Y, Nishi M, Itoh S. Magnesium alloy forming using underwater shock wave by wire electric discharge. The International Journal of Multiphysics. 2019;13(3):269-82. **DOI** 10.21152/1750-9548.13.3.269.

[14] Nishi M, Sakaguchi H, Tanaka S, Iyama H, Fujita M. Research on explosive forming of magnesium alloy plate using numerical simulation and experimental studies (II). Science and Technology of Energetic Materials. 2021;82(2):39-43.

[15] Nasiri S, Sadegh-Yazdi M, Mousavi SM, Ziya-Shamami M, Mostofi TM. Repeated underwater explosive forming: Experimental investigation and numerical modeling based on coupled Eulerian–Lagrangian approach. Thin-Walled Structures. 2022;172:108860. **DOI** 10.1016/j.tws.2021.108860.

[16] Nasiri S, Sadegh-Yazdi M, Mostofi TM, Mousavi SM, Ziya-Shamami M. Optimization of effective parameters in free iron sheet forming process by underwater explosion method. Journal of Aerospace Mechanics. 2022;18(3):87-108. **DOR** 20.1001.1.26455323.1401.18.3.7.9.

Journal of Aerospace Mechanics/ 2024/ Vol.20/ No.3/ 1-16

Journal of Aerospace Mechanics

DOR: …

Female Die Forming of Metallic Plates using Repeated Underwater Explosions

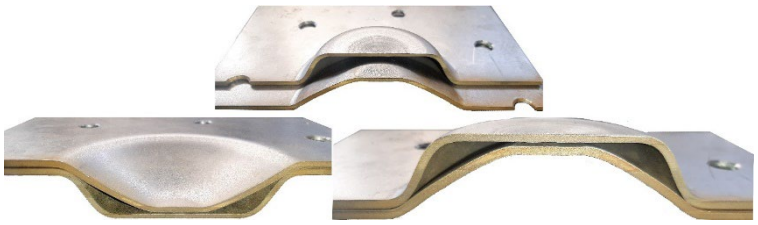
Mohammad Kouzehgaran[1], Hossein Khodarahmi [2], Milad Sadegh-Yazdi [3*], Mojtaba Ziya-Shamami [3], Tohid Mirzababaie Mostofi [4]

[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

- Experimental investigation of female die forming of metallic plates with and without using venting hole under repeated underwater explosive loading
- Lowering of the maximum amount of thinning in the initial bending area compared to the center of the plate when using female die forming without venting hole

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:
Article Type: Research paper
Received: 8 January 2024
Received in revised form: 27 January 2024
Accepted: 6 March 2024
Available online: 9 March 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 Die Forming of Metallic Plates using Repeated Underwater Explosions. Journal of Aerospace Mechanics. 2024; 20(3):1-16.

Keywords:
Die forming
Female die
Venting hole
Repeated explosion
Underwater explosion

ABSTRACT

In the present research, the experimental investigation of the female die forming of metallic plates with and without the use of venting hole in the central part of the plate has been performed. In order to apply the load to the specimen, repeated underwater explosive loading was used, so that in the 1st loading, the mass of the explosive charge was 4 gr and in the subsequent loadings, 8 grs were used. The results of the research showed that in the process of female die forming with venting hole, a protrusion or discontinuity is created in the central part, which leads to an increase of 28, 73 and 90% of the maximum thinning along the radial length of the plate in the 2nd, 3rd and 4th loadings in comparison to the 1st loading. Also, for the thinning in the center in the same situation, an increase of 27% and a decrease of 8% and 6% were observed, which was an unusual behavior caused by the presence of the venting hole. In this case, the filling rate of the specimen was 24%. This is despite the fact that in the process of female die forming without venting hole, the filling rate, maximum thinning and thinning in the center increased by 30%, increased by 6% and decreased by 10%, respectively. One of the important points is that the maximum amount of thinning in the primary bending region is lower compared to the center of the plate when using female die forming without venting hole, which is the opposite result obtained in the die forming with venting hole, so that in that case, the maximum thinning in the center of the area was higher than the region with initial bending. Therefore, it is very efficient to use the idea of female die forming without venting hole for sheet metal forming 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