



بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر در فرآیند شکل‌دهی آزاد ورق آهنی با روش انفجار زیر آب

صادق نصیری^۱، میلاد صادق یزدی^{۲*}، توحید میرزابابای مستوفی^۳، سید محسن موسوی^۴، مجتبی ضیاء شمامی^۴

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

^۲ استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

^۳ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ایوان کی (ع)، ایوان کی، ایران

^۴ پژوهشگر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

برجسته‌ها

- بارگذاری انفجاری منفرد و مکرر سه مرحله‌ای روی ورق انجام شد.
- از روش کوپل اوپلری-لاگرانژی جهت شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس بهره گرفته شد.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۰

بازنگری: ۱۴۰۰/۱۲/۰۸

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۱۴

ارائه برخط: ۱۴۰۰/۱۲/۱۴

*نویسنده مسئول:

msadeghy@ihu.ac.ir

کلید واژه‌ها:

انفجار زیر آب

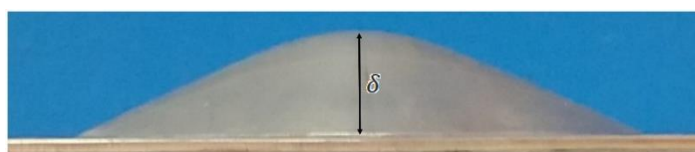
بارگذاری مکرر

شکل‌دهی ورق

شبیه‌سازی عددی

بهینه‌سازی

چکیده گرافیکی



$\delta = 23.8\text{mm}$

چکیده

یکی از اهداف پژوهش حاضر، بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر در فرآیند شکل‌دهی آزاد ورق تحت بارگذاری انفجاری زیر آب است. در بخش تجربی، جهت بررسی اثر نحوه بارگذاری بر میزان بیشترین خیز دائمی و توزیع ضخامت ورق، از ورق‌های آهنی تحت انفجار ناشی از ۱۲ و ۴ گرم خراج انفجاری به ترتیب برای بارگذاری منفرد و بارگذاری مکرر سه مرحله‌ای استفاده شد. همچنین، به منظور بررسی اثر پارامترهای مؤثر بر فرآیند و بهینه‌سازی آن‌ها، ابتدا از روش کوپل اوپلری-لاگرانژی جهت شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس بهره گرفته شد. سپس، در بخش بهینه‌سازی، پاسخ به منظور بررسی تأثیر هم‌زمان پارامترهای جرم خراج انفجاری در هر مرحله و فاصله استقرار روی بیشترین میزان تغییر شکل و ضخامت ورق، از نرم‌افزار طراحی آزمایش و روش سطح استفاده شد. p-value به دست آمده برای مدل ارائه شده کمتر از ۰/۰۵ بود که این حاکی از معنی‌دار بودن مدل با ضریب اطمینان بالای ۹۵٪ است. نتایج به دست آمده نشان داد که مدل ارائه شده توسط نرم‌افزار برای این آزمایش مناسب بوده و مقادیر به دست آمده از پیش‌بینی مدل با نتایج تجربی و عددی برای خروجی، مطابقت دارد. همچنین، شرایط بهینه برای کمترین تغییر ضخامت و بیشترین میزان تغییر شکل دائمی ورق ارائه شد.

۱- مقدمه

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. در ادامه و در سال ۲۰۱۱، علیپور و همکاران [۵] به مدل‌سازی و تحقیق بر روی کشیدگی آلیاژهای ورق آلومینیومی 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، کارسختی و برگشت فنی 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 داد در شکل‌دهی انفجاری این کمیت به ترتیب به میزان ۶۷٪ و ۳۵٪ بیشتر از دو حالت دیگر است. در سال ۲۰۱۴، لیاما و همکاران [۶] 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. در ادامه و در سال ۲۰۱۵، زمانی و گودرزی [۷] به بررسی تجربی و عددی بیشترین خیز دائمی ورق‌های دایروی تحت اثر موج شوک حاصل از انفجار پرداختند. آن‌ها دو سری آزمایش انجام دادند که موج شوک رسیده به سازه در سری اول غیریکنواخت و در سری دوم یکنواخت بود. هدف آن‌ها از طراحی و اجرای آزمایش‌ها، بررسی تأثیر نحوه برخورد موج بر میزان تغییرشکل و استخراج دو مدل نیمه تجربی برای پیش‌بینی میزان بیشترین خیز دائمی ورق دایروی در هر دو حالت ذکرشده بود. در تحقیقات جدیدتر و در سال ۲۰۱۶، رووان و همکاران [۸] به بررسی شکل‌دهی آلیاژ منیزیم توسط موج شوک زیرآب پرداختند. 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

فرآیند شکل‌دهی با سرعت‌بالا، به علت آزاد کردن مقدار زیادی انرژی در فاصله زمانی کوتاه، قطعه کار را تحت نرخ کرنش بسیار بالایی قرار می‌دهد [۱]. روش‌های شکل‌دهی با سرعت‌بالا شامل، شکل‌دهی با خرج انفجاری، الکترومغناطیسی، الکتروهیدرولیکی و انفجار مخلوط گازها است. روش‌های شکل‌دهی با سرعت‌بالا به دلیل کوتاه بودن زمان تولید، هزینه پایین فرآیند و همچنین تولید قطعات پیچیده همواره زمینه جذاب تحقیقات پژوهشگران بوده است [۲]. فرآیند شکل‌دهی با روش خرج انفجاری نتیجه یک فرآیند شیمیایی است که با تولید محصولات گازی و تغییر شیمیایی مواد اولیه همراه می‌شود. پس از ایجاد شوک ناشی از انفجار، موج فشار دینامیکی باعث تغییرشکل جسم می‌شود. هرچند به دلیل پیچیدگی شکل‌دهی سرعت‌بالا با فرآیند انفجار زیرآب، تحقیقات بسیار اندکی در این زمینه ارائه شده و می‌توان ادعا نمود که تاکنون تحقیقی روی شکل‌دهی ورق‌های فلزی تحت بارگذاری انفجار مکرر زیرآب صورت نگرفته است.

در سال ۲۰۰۳، لیاما و همکاران [۳] به مطالعه اثر مخازن تحت‌فشار در شکل‌دهی انفجاری روی آوردند. آن‌ها از سه نوع مدل برای بررسی اثر مخزن فشار استفاده کردند. در مدل اول، هیچ مخزن فشاری روی ورق فلزی وجود نداشت که بار انفجاری را در برگیرد در نتیجه، موج شوک زیرآب تولیدشده توسط خرج، به محیط پیرامون منتشر شد. در مدل دوم، یک مخزن بدون درب (مانند استوانه) استفاده و اثر موج شوک منعکس‌شده از دیواره جانبی نیز مشاهده شد. در حالت نهایی (مدل ۳)، از یک مخزن فشار بسته استفاده شد. در سال ۲۰۰۹، هادوی و همکاران [۴] به بررسی تجربی تأثیر استفاده از محیط واسط در شکل‌دهی انفجاری پوسته‌های لوله‌ای پرداختند. آن‌ها به‌منظور بهبود روش‌های فعلی شکل‌دهی انفجاری در افزایش کارایی و کنترل آن، مزایا و معایب استفاده از هوا و آب به‌عنوان محیط انتقال انرژی را نشان دادند. اندازه‌گیری نمونه‌های آزمایش‌شده نشان داد که افزایش حجم داخلی با گلوبی شدن دیواره‌ها همراه است که در نهایت منجر به پارگی شعاعی سازه

آلیاژ منیزیم با استفاده از شبیه‌سازی عددی و مطالعات تجربی ارائه دادند. مطالعه تجربی آن‌ها روی ورق آلیاژ منیزیم AZ31 به منظور یافتن شرایط بهینه‌ی تجربی صورت گرفت. همچنین آن‌ها برای شبیه‌سازی عددی از کد انسیس-اتوداین استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد هنگامی که زاویه انحراف قالب تند می‌شود چین‌وچروک به سمت محیط ورق میل خواهند کرد. در سال ۲۰۱۹، لیاما 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 ۲۰۲۰، پارابا و همکاران [۱۴] تحقیقات عددی در مورد تغییر شکل بزرگ پوسته‌ی حلقه‌ای-استوانه‌ای تقویت‌شده در معرض انفجار زیرآب را انجام دادند. آن‌ها مطالعه عددی را با استفاده از کد المان محدود LS-DYNA با در نظر گرفتن اثر اندرکنش سازه-سیال، اثرات نرخ کرنش، غیرخطی بودن رفتار هندسه و مواد انجام دادند. در کار آن‌ها تغییر شکل دائمی به دست آمده از مطالعه عددی با دقت ۵٪ با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. نتایج نشان داد تغییر شکل دائمی پیش‌بینی شده و کرنش پلاستیک مؤثر با افزایش جرم خرج افزایش خواهد یافت. همچنین افزایش مقدار تغییر شکل دائمی پوسته‌های نازک بیشتر تابع جرم خرج است در حالی که برای پوسته‌های نسبتاً ضخیم علاوه بر جرم وابسته به دیگر پارامترها است.

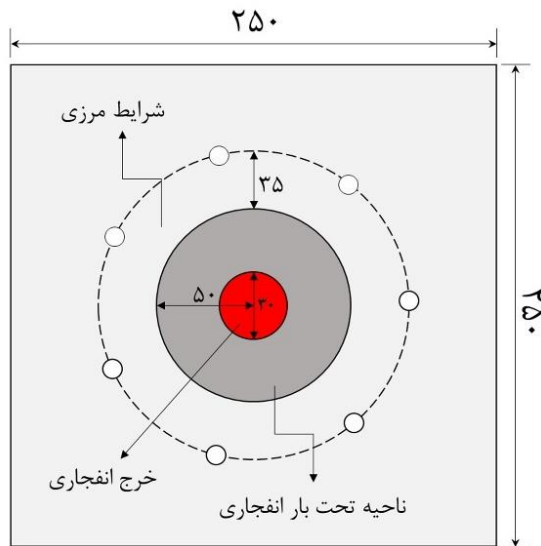
در دست دیگر، در زمینه بارگذاری‌های انفجاری به صورت مکرر پژوهش‌های بسیار اندکی صورت گرفته است که در اولین گام می‌توان به پژوهش هنشیه و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۴ اشاره کرد. آن‌ها به مطالعه تجربی و عددی اثر بارگذاری انفجاری یکنواخت مکرر بر روی ورق فولادی دایروی پرداختند. ورق دایروی مورد مطالعه آن‌ها از جنس فولاد دومکس بود. آن‌ها دریافته‌اند که با افزایش میزان تعداد بار انفجاری، میزان تغییر شکل دائمی ورق، بیشتر افزایش می‌یابد؛ هرچند که این موضوع به علت تغییر هندسه و افزایش کارسختی نمونه به صورت نمایی تغییر می‌کند و تغییرات با افزایش تعداد انفجار کاهش می‌یابد. در حالت

که سختی مواد پس از دریافت موج شوک به ۱/۵ برابر افزایش پیدا خواهد کرد.

در سال ۲۰۱۶، ویوست و همکاران [۹] 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 تغییر شکل هدف را نسبت به حالت ماده منفجره واحد نخواهد داشت. همچنین آن‌ها دریافته‌اند 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 ادامه در سال ۲۰۱۶، لیاما و ایته [۱۰] به مطالعه شکل‌دهی انفجاری زیرآب آلیاژ آلومینیوم پرداختند. در کار آن‌ها شبیه‌سازی عددی در مورد روند تغییر شکل ورق آلومینیوم با استفاده از روش شکل‌دهی انفجاری توسط روش المان محدود و با استفاده از مختصات لاگرانژی انجام شد. جهت صحت سنجی مدل عددی از مقایسه مقدار فشار موج شوک زیرآب برای نتایج حاصل از کار تجربی و شبیه‌سازی استفاده شد. آن‌ها همچنین به مقایسه روش شکل‌دهی انفجاری زیرآب و روش شکل‌دهی با پرس در میزان تغییر شکل ورق آلومینیومی پرداختند و نتایج به دست آمده نشان داد که استفاده از روش شکل‌دهی انفجاری موجب افزایش درصدی میزان تغییر شکل در مقایسه با روش شکل‌دهی با پرس می‌شود. در سال ۲۰۱۷، لیاما و همکاران [۱۱] شبیه‌سازی عددی شکل‌دهی انفجاری را با استفاده از فیوز انفجاری بررسی کردند. آن‌ها از روش شبیه‌سازی اوپلری-لاگرانژی دلخواه و معادله حالت مای-گرونایزن به منظور تشریح فشار آب، معادله حالت جونز-ویکنز-لی به منظور تشریح رفتار ماده منفجره و معادله ساختاری جانسون-کوک برای شبیه‌سازی رفتار نمونه استفاده کردند. طبق نتایج آن‌ها مقادیر فشار شبیه‌سازی با مقدار اندازه‌گیری شده توسط آزمایش تجربی تطابق خوبی داشت. در سال ۲۰۱۸، نیشی و همکاران [۱۲] یک تحقیق در مورد شکل‌دهی انفجاری ورق

۲- مطالعه آزمایشگاهی

نمونه‌های آزمایش تجربی برای شکل‌دهی انفجاری زیرآب در ابعاد ۲۵۰ میلی‌متر × ۲۵۰ میلی‌متر از آهن تجاری آرمکو با ضخامت ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. همان‌طور که به صورت شماتیک بعدی در شکل ۱ نشان داده شده است، ورق به طور کامل در شعاع ۸۵ میلی‌متری توسط هفت پیچ بسته شده است و یک ناحیه در معرض موج با شعاع ۵۰ میلی‌متر در تماس با آب باقی می‌ماند. نگاه‌دارنده‌ها به عنوان جسم‌های صلب در نظر گرفته می‌شوند، زیرا آن‌ها تغییر شکل دائمی قابل توجهی را در مقایسه با ورق تجربه نمی‌کنند.

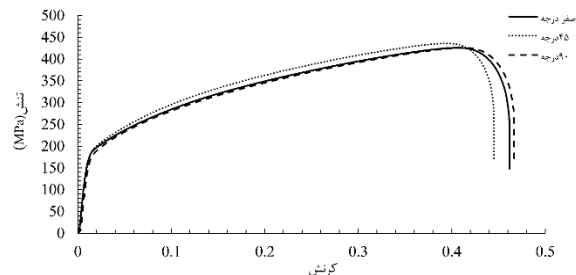


شکل (۱): شماتیک هندسی نمونه آزمایشی و خرج.

همان‌طور که به صورت شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است، یک لوله فولادی ضدزنگ پر از آب به نگاه‌دارنده بالایی رزوه شده و با نگاه‌دارنده پایینی که ورق آزمایشی را در بر دارد، توسط پیچ‌های مذکور متصل شده است. ارتفاع، شعاع داخلی و شعاع بیرونی لوله به ترتیب ۳۰۰ میلی‌متر، ۵۰ میلی‌متر و ۶۰ میلی‌متر بود. بارگذاری انفجاری زیرآب با انفجار دیسک‌های دایره‌ای از ماده منفجره پلیاستیکی سی‌فور در فاصله ۲۱۵ میلی‌متری از سطح بالایی ورق اعمال می‌شود. یک نگاه‌دارنده خرج انفجاری در بالای لوله قرار دارد و خرج توسط یک چاشنی الکتریکی ۱ گرمی فعال می‌شود. برای آزمایش‌های بارگذاری انفجاری منفرد زیرآب، جرم

کلی، نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش تعداد انفجار روی ورق، نرخ افزایش تغییر شکل سطح ورق در نقطه مرکزی کاهش می‌یابد و سختی و ویکرز ورق در ناحیه مرزی و مرکزی افزایش می‌یابد. همچنین در سال ۲۰۱۸، ترانگ و همکاران [۱۶] به مطالعه تغییر شکل دائمی ورق آلومینیومی در معرض بارگذاری مکرر ناشی از ضربه زننده پرداختند. آن‌ها در این تحقیق برای پیش‌بینی تغییر شکل دائمی ناشی از بارگذاری ضربه‌ای مکرر از نتایج مطالعه پارامتریک معادلات فرم بسته دقیقی را به دست آوردند. در همین راستا، در سال ۲۰۱۸، ژو و همکاران [۱۷] به مطالعه پاسخ دینامیکی ورق‌های تقویت شده تحت بارگذاری مکرر پرداختند. در کار آن‌ها به منظور اعتبارسنجی روابط تحلیلی ارائه شده، از نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی کمک گرفته شد. همچنین در کار آن‌ها تأثیر ویژگی مواد شامل نرخ کرنش، کرنش سختی، مدول یانگ بر روی دقت نتایج تئوری و شبیه‌سازی‌های عددی ارزیابی شد.

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 تاکنون از ایده بارگذاری مکرر جهت افزایش میزان تغییر شکل و همچنین بهبود وضعیت توزیع ضخامت در نواحی مرکزی و مرزی بهره گرفته نشده است. بدین جهت، انجام یک تحقیق آزمایشگاهی روی ورق‌های فلزی تحت بارگذاری انفجار مکرر زیرآب و همچنین بررسی اثر پارامترهای مؤثر در فرآیند به کمک شبیه‌سازی با نرم‌افزار المان محدود و بهینه‌سازی با روش سطح پاسخ می‌تواند از اهمیت بالایی برخوردار باشد؛ بنابراین، در تحقیق حاضر، پس از کار آزمایشگاهی به شبیه‌سازی عددی فرآیند با استفاده از روش کوپل اوپلری-لاگرانژی و بهینه‌سازی آماری پارامترهای مؤثر در آن با استفاده از نرم‌افزار طراحی آزمایش پرداخته شده است. از نرم‌افزار طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ به منظور بررسی پارامترهای مؤثر بر شکل‌دهی ورق آهنی نظیر فاصله استقرار و خرج انفجاری و بررسی اثرات تعامل اثر عوامل روی خروجی و همچنین تعیین ارتباط بین این عوامل با استفاده از طرح مرکب مرکزی (CCD) و پیدا کردن مقدار بهینه هر پارامتر استفاده شده است.



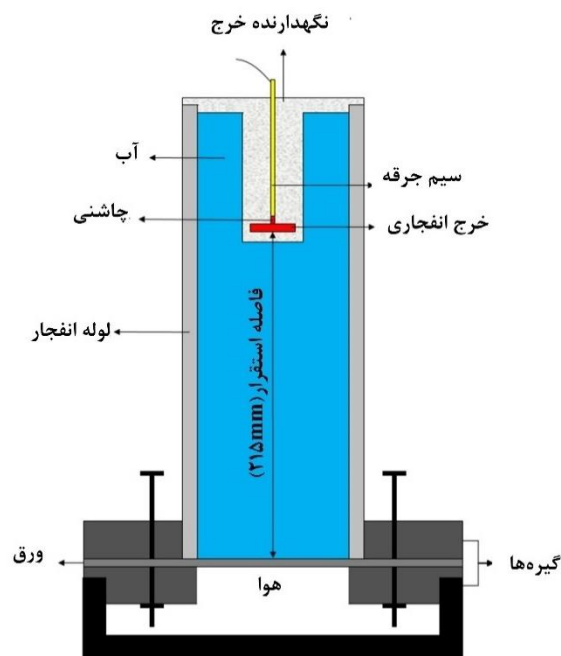
شکل (۳): نمودار تنش کرنش مهندسی ورق آهن تجاری آرمکو تحت آزمون کشش.

۳- مدل سازی عددی

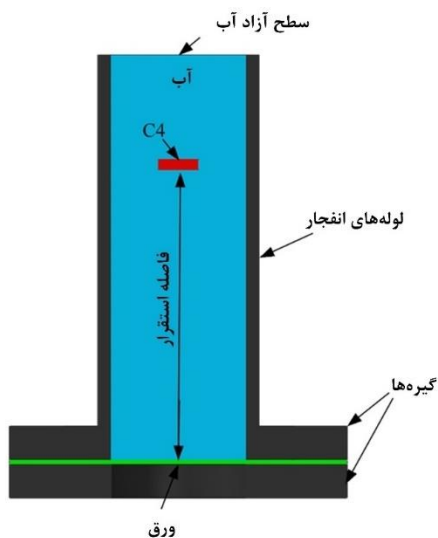
۳-۱- اصول و قواعد روش کوپل اویلری-لاگرانژی

یکی از تکنیک‌های قابل قبول 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، مش‌ها تغییرشکل نمی‌دهند زیرا گره‌ها به‌طور کامل در فضا ثابت هستند؛ این در حالی است که نقاط مادی در مش‌ها 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. از این‌رو، مش‌ها این شانس را دارند که درحالی‌که گره‌های روی مش با نقاط مادی حرکت می‌کنند، دچار تغییرشکل بزرگ شوند. این رویکرد برای مسائلی که در آن‌ها ماده در حالت جامد 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، تکنیک کوپل اویلری-لاگرانژی با ادغام بهترین ویژگی‌های هر دو رویکرد اویلری و لاگرانژی برای رفع کاستی‌های تحلیل سنتی روش المان محدود و

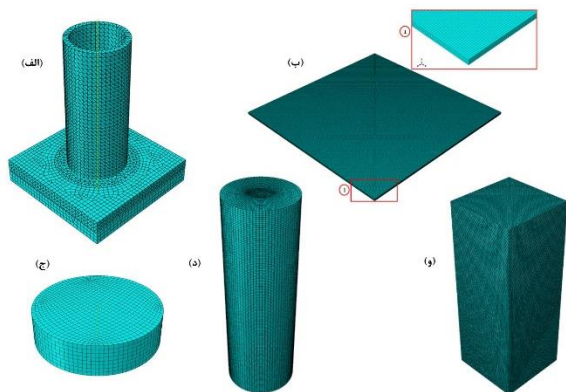
خرج ۱۲ گرم در نظر گرفته شد. این در حالی است که برای آزمایش‌های بارگذاری مکرر، جرم در هر مرحله از بارگذاری ۴ گرم است و آزمایش تا سه مرتبه تکرار می‌شود. لازم به ذکر است که در تمام آزمایش‌های انجام‌شده، شعاع خرج انفجاری ثابت و برابر با ۱۵ میلی‌متر بوده که متناسباً جرم آن با تغییر ارتفاع خرج انفجاری تغییر می‌کند. با توجه به تغییر در ارتفاع خرج انفجاری ۴ گرمی، از نگره‌دارنده‌های بلندتر برای آزمایش‌های مکرر انفجار زیرآب استفاده شد تا فاصله استقرار یکسانی داشته باشند. برای بارگذاری‌های انفجاری مکرر، ورق‌هایی 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. خواص مکانیکی ورق آهن تجاری آرمکو 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 ۳ نمودارهای تنش-کرنش حقیقی استخراج‌شده از این آزمون را نشان می‌دهد.



شکل (۴): شماتیک دوبعدی نحوه قرارگیری نمونه آزمایشی، نگره‌دارنده و خرج انفجاری.



شکل (۴): نمای برش خورده مدل نهایی شبیه‌سازی برای پدیده انفجار زیرآب.



شکل (۵): (الف) مش بندی نگه‌دارنده‌ها و لوله‌های انفجار، (ب) ورق، (ج) خرج انفجاری C4 (د) آب، (و) محیط اویلری.

جهت شبکه‌بندی آن‌ها از اندازه مش ۴ میلی‌متر استفاده شد (شکل ۵). خرج انفجاری مطابق شکل ۵ با اندازه مش ۱ میلی‌متر شبکه‌بندی شده است. به علت استفاده از روش شبیه‌سازی کوپل اویلری-لاگرانژی تا حدی هرچه میزان اندازه مش‌های ماده منفجره (به‌صورت کلی‌تر بخش‌های اویلری مانند آب، هوا و غیره) کوچک‌تر باشد، نتایج دقیق‌تری در پی خواهد داشت؛ اما انتخاب اندازه مش بسیار کوچک سبب ایجاد نتایج غیرمنطقی و عدم همگرایی مسئله را در پی خواهد داشت. اگر اندازه مش خرج انفجاری بزرگ باشد، هندسه آن به‌صورت چندضلعی منتظم خواهد بود و بر روی نتایج خروجی تأثیر خواهد گذاشت؛ لذا در اینجا اندازه مش خرج انفجاری به گونه‌ی انتخاب‌شده است که هندسه

همچنین برای حل مشکلاتی که در آن تعامل بین حوزه‌های لاگرانژی و اویلری وجود دارد، توسعه‌یافته است. به‌عنوان مثال، مشکلات برهم‌کنش سیال-سازه در این روش برطرف شده است. در این تحلیل، مش اویلری و مش لاگرانژی در یک مدل مونتاژ می‌شوند. المان‌های که کرنش بزرگی تولید می‌کنند توسط تحلیل اویلری پردازش می‌شوند، در حالی که تکنیک 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 تکنیک 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.

۲-۳- نحوه مدل‌سازی عددی

۱-۲-۳- هندسه، شرایط مرزی و مش‌بندی

در این پژوهش، مدل‌های سه‌بعدی ورق‌های مربعی با سطح مواجهه دایره‌ای در مقیاس کامل توسعه داده شده 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 میلی‌متر شبیه‌سازی شد. همچنین، آب به‌گونه‌ای مدل شده است که درون لوله انفجار را به‌طور کامل پر می‌کند. به‌عبارتی دیگر، آب به‌صورت استوانه‌ای با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر مدل شده است. همچنین، فضای مربوط به قرارگیری خرج انفجاری به‌صورت دیسکی به قطر ثابت ۳۰ میلی‌متر و ضخامتی متناسب با جرم خرج درون آب گماشته شده است. موارد مذکور در شکل ۴ و ۵ نمایش داده شده است.

مش بندی بخش‌های مدل از مهم‌ترین مراحل شبیه‌سازی است. از آنجایی که حل گر صریح دینامیکی انتخاب شده است؛ لذا باید دقت کرد خانواده تمامی مش‌ها به صریح تغییر کند. در اولین گام، نگه‌دارنده‌ها و لوله انفجار با استفاده از المان‌های چهار گره‌ای سه‌بعدی گسسته (R3D4) مدل شدند.

اصطکاک $0/3$ استفاده شده است [۱۹ و ۲۱]. استفاده از تماس عمومی اندکی زمان حل را افزایش می‌دهد اما نتایج دقیق‌تری می‌دهد. در تمامی مدل‌های عددی، ورق بین دو نگه‌دارنده فوقانی و تحتانی در امتداد محیط ورق سفت و محکم بسته شده‌اند و از نیروی نگه‌دارنده برای تعریف این بخش استفاده شده است؛ بنابراین، به منظور تعریف اندرکنش بین بخش‌های لاگرانژی مدل (ورق و گیره‌ها) از یک تماس سطح به سطح با خواص تماس سخت و ضریب اصطکاک $0/3$ 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 ثابت شده‌اند و حرکت آن‌ها توسط شرط مرزی کاملاً بسته در تمامی جهت‌ها قفل شده است. همچنین بر روی ورق هیچ‌گونه شرط مرزی اعمال نشده است و می‌تواند به صورت آزادانه بین نگه‌دارنده‌ها لغزش کند. مطابق با توضیحات ارائه شده در ابتدای بخش، مرحله بارگذاری از نوع دینامیکی صریح با زمان ۱ میلی‌ثانیه در نظر گرفته شد. این زمان حل به قدر کافی سبب میرا شدن ارتعاشات ورق پس از دریافت موج شوک ناشی از انفجار است. نمودارهای زمانی حل توسط خود نرم‌افزار به صورت خودکار به میزان ۳۳ نانوثانیه در نظر گرفته شده است. این نمودار زمانی سبب حل مسائل به صورت دقیق و پیوسته خواهد شد.

۲-۲-۳- معادله حالت JWL برای تعریف خرج

چندین معادله حالت برای توصیف فشار و انبساط محصولات گازی تولید شده در اثر انفجار مواد منفجره پیشنهاد شده 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 [۱۸]. معادله حالت JWL به صورت 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 ، R_2 مقادیر ویژه اصلی و ثانویه هستند که به ترتیب رفتار کوتاه و دوربرد محصولات انفجاری را به تصویر می‌کشند. پارامتر w بخش کسری انرژی (E) است که در فشار انفجاری سهمیم است [۱۸، ۱۹]:

واقعی آن که یک دیسک است، حفظ شود. به طور خلاصه المان‌های خرج انفجاری و آب از نوع C3D8R هستند. مش -بندی آب به صورت شکل ۵ و با اندازه مش ۲ میلی‌متر انتخاب در نظر گرفته شده است. مدل باید از انتهای محل قرارگیری خرج انفجاری پارتیشن‌بندی شود تا هندسه مش بندی منظم شود. ابعاد محیط اویلری باید به گونه‌ای انتخاب شود که تمامی بخش‌های دیگر درون آن قرار گیرد. به همین منظور، هندسه محیط اویلری به صورت هندسه مکعب با قاعده مربعی به طول ۲۶۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۴۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. در شکل ۵ نحوه مش بندی محیط اویلری آورده شده است. هندسه محیط اویلری به گونه‌ای بهینه شده است که علاوه بر قرار گرفتن همه‌ی بخش‌های مدل در آن دارای کمترین حجم باشد تا زمان حل نرم‌افزار کاهش یابد. محیط اویلری به صورت چرخشی شبکه‌بندی شده و اندازه المان‌های آن ۲ میلی‌متر است. خانواده این نوع مش به صورت 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. مش ورق باید به گونه‌ای انتخاب شود که خروجی‌های مورد نظر مانند ضخامت، تغییر شکل و پروفایل را به صورت منطقی ارائه دهد. به همین منظور، ورق ۳ میلی‌متری در راستای ضخامت ۵ مش زده شد. همچنین، ورق به چهار بخش پارتیشن‌بندی شد تا بتوان توزیع ضخامت را روی لبه‌های پارتیشن محاسبه کرد. اندازه مش بندی ورق در راستای طولی ۱ میلی‌متر است. با توجه به آنکه بارگذاری انفجاری و ورق تغییر شکل‌های 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 مش در حل از دو ویژگی نرم‌افزار؛ یعنی، ساعت شنی و کنترل اعوجاج استفاده شد. به طور خلاصه المان‌های ورق از نوع C3D8R هستند (شکل ۵).

به منظور شبیه‌سازی تماس بین بخش‌های اویلری و لاگرانژی مدل عددی، از یک اندرکنش تماس عمومی با ضریب

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 میسر $\bar{\sigma}$ به‌عنوان تابعی از کرنش پلاستیک معادل $\bar{\epsilon}^{pl}$ ، نرخ کرنش پلاستیک معادل $\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}$ ، 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 [۲۳، ۲۲].

$$\bar{\sigma} = \underbrace{\left[A + B \left(\bar{\epsilon}^{pl} \right)^n \right]}_{\text{Hardening}} \underbrace{\left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right]}_{\text{Viscosity}} \underbrace{\left[1 - \hat{T}^m \right]}_{\text{Softening}} \quad (3)$$

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

$$\hat{T} = \begin{cases} 0 & T < T_0 \\ (T - T_0) / (T_{\text{melt}} - T_0) & T_0 \leq T \leq T_{\text{melt}} \\ 1 & T > T_{\text{melt}} \end{cases} \quad (4)$$

از آنجا که 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 فشار ثابت و χ ضریب تیلور-کونی است. معمولاً ضریب تیلور-کونی 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.

$$\Delta T = \int_0^{\bar{\epsilon}^{pl}} \frac{\chi}{\rho C_p} \bar{\sigma} d\bar{\epsilon}^{pl} \quad (5)$$

معیار خسارت 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

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

ضرایب رابطه ۱ برای ماده منفجره استفاده‌شده در تحقیق حاضر در جدول ۱ آمده است.

جدول (۱): ضرایب معادله حالت JWL برای ماده منفجره C4 استفاده‌شده در تحقیق حاضر [۲۰]

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

۳-۲-۳- معادله حالت برای آب در محیط اویلری

به‌منظور تشریح فشار در آب از معادله حالت مای-گرونایزن مطابق رابطه‌ی ۲ استفاده‌شده است که در آن چگالی اولیه، e انرژی درونی، Γ_0 پارامتر گرونایزن، c_0 سرعت صوت در محیط واسط، $\eta = 1 - \rho/\rho_0$ و s ثابت وابسته به محیط واسط است. پارامترهای معادله ۲ برای آب در جدول ۲ آورده شده است [۱۹، ۲۱].

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

جدول (۲): ضرایب معادله مای-گرونایزن برای آب

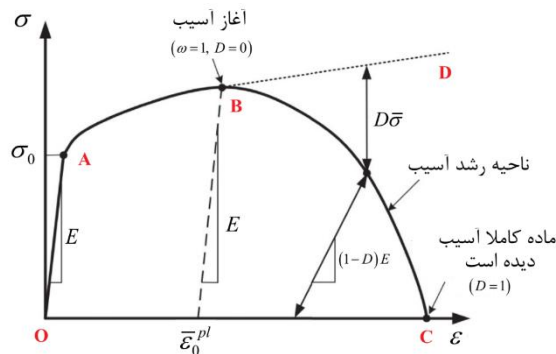
Γ_0	s	c_0	ρ_0
-	-	m/s	kg/m ³
۱/۶۵	۱/۷۹	۱۴۹۰	۱۰۰۰

۳-۲-۴- مدل ساختاری ماده و مدل شکست

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

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.

$$\bar{u}^{pl} = L(\bar{\varepsilon}^{pl} - \bar{\varepsilon}_D^{pl}) \quad (8)$$



شکل (۶): نمایش شماتیک رفتار تنش و کرنش تک‌محوری یک فلز شکل‌پذیر

جابجایی پلاستیک معادل، طول مشخصه المان را جهت کاهش وابستگی مش از نتایج در محلی سازی کرنش در نظر می‌گیرد. یک شکل خطی از قانون تکامل خسارت از نظر جابجایی پلاستیک شکست معادل به شرح رابطه ۹ است:

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

معادله فوق تأیید می‌کند که مقاومت ماده هنگامی که جابجایی پلاستیک معادل برابر با جابجایی پلاستیک معادل در نقطه شکست باشد، کاملاً تخریب و تنزل می‌یابد [۱۹ و ۲۱]. در هر زمان مشخص هنگام تجزیه و تحلیل یک المان آسیب‌دیده، تنش واقعی تنزل یافته، برحسب تنش مؤثر به‌صورت رابطه ۱۰ بیان می‌شود:

$$\sigma = (1-D)\bar{\sigma} \quad (10)$$

ثوابت مربوط به معادله پلاستیسیته و شکست جانسون-کوک برای ورق‌های فلزی آهن تجاری آرمکو در جدول ۳ ارائه شده است.

۴- طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ

چهار پارامتر اثرگذار روی فرآیند شکل‌دهی انفجار مکرر زیرآب سه مرحله‌ای شامل: جرم خرج مرحله اول انفجار (خرج ۱)، جرم خرج مرحله دوم انفجار (خرج ۲) جرم خرج

تکامل آسیب تعریف شده 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 توصیف شده 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 تعیین شده است و $\Delta\bar{\varepsilon}^{pl}$ نشان‌دهنده افزایش پلاستیک معادل پلاستیک است که در طی چرخه تغییر شکل اتفاق می‌افتد.

$$\omega = \sum \left(\frac{\Delta\bar{\varepsilon}^{pl}}{\bar{\varepsilon}_D^{pl}} \right), \quad 0 \leq \omega \leq 1 \quad (6)$$

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.

$$\bar{\varepsilon}_D^{pl} = \underbrace{\left[D_1 + D_2 \exp \left(D_3 \frac{\sigma_m}{\sigma} \right) \right]}_{\text{Stress triaxiality}} \times \dots \quad (7)$$

$$\underbrace{\left[1 + D_4 \ln \left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0} \right) \right]}_{\text{Viscosity}} \underbrace{\left[1 + D_5 \hat{T} \right]}_{\text{Temperature}}$$

رفتار ماده برای شروع خسارت 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 $\bar{\varepsilon}^{pl}$ به مقدار بحرانی کرنش پلاستیک شکست معادل $\bar{\varepsilon}_f^{pl}$ می‌رسد (شکل ۶). 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 خسارت با رابطه ۸ برحسب جابجایی

در بین روش‌های طراحی آزمایش، روش سطح پاسخ به علت دقت خوب در تعیین تأثیرات برهمکنشی پارامترها، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و در آن، همانند دیگر روش‌های طراحی آزمایش، رابطه بین عوامل مؤثر و خروجی‌ها ناشناخته است. در این روش، انجام تعدادی آزمایش تعیین‌شده توسط نرم‌افزار طراح آزمایش یا استفاده از نتایج آزمایش‌های انجام‌شده، می‌تواند تأثیر پارامترهای مهم را بر خروجی‌های نهایی تعیین کند؛ بنابراین، گام اول، یافتن تخمین مناسب از تابعی صحیح بین عوامل مؤثر و خروجی‌ها است. معمولاً از یک چندجمله‌ای مرتبه پایین در برخی از نواحی متغیرهای مستقل استفاده می‌شود؛ اگر پاسخ به‌خوبی توسط تابعی خطی برحسب متغیرهای مستقل مدل نشود، آنگاه از تابع تقریب مرتبه سوم استفاده خواهد شد. در پژوهش حاضر، از یک مدل رگرسیون چندجمله‌ای مرتبه سوم اصلاح شده برای پیدا کردن تقریب مناسب بر طبق رابطه ۱۱ استفاده شده است که در آن Y پاسخ محاسبه‌شده یا تابع پاسخ، X_i و X_j متغیرهای کدگذاری شده یا متغیرهای مستقل، β_0 ضریب ثابت، β_j ضریب خطی، β_{ij} ضریب مرتبه دوم و β_{ijk} ضریب متقابل است [۲۵].

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i=1}^q \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{q-1} \sum_{j=2}^q \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^{q-2} \sum_{j=i+1}^{q-1} \sum_{k=j+1}^q \beta_{ijk} x_i x_j x_k + \varepsilon \quad (11)$$

طرح مرکب مرکزی یکی از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین طرح‌های روش سطح پاسخ است که با در نظر گرفتن تعداد عوامل مؤثر در فرآیند و محدوده آن‌ها، ماتریس آزمون را طراحی می‌کند. در پژوهش حاضر، ماتریس طراحی پارامترهای مستقل به همراه حدود پایین و بالا در جدول ۴ آورده شده است. مطابق جدول ۴، فاصله استقرار با کران پایین و بالا به ترتیب ۱۵۰ میلی‌متر و ۳۰۰ میلی‌متر انتخاب‌شده است. انتخاب فاصله استقرار ۱۵۰ میلی‌متری به‌عنوان کران پایین، سبب بارگذاری یکنواخت روی ورق خواهد شد و انتخاب فاصله استقرار ۳۰۰ میلی‌متر به علت محدودیت مجموعه‌ی آزمایشی است (طول بزرگ‌ترین لوله انفجار ۳۰۰ میلی‌متر است). کران پایین جرم خرج انفجاری ۱ گرم و کران بالا ۶ گرم در نظر گرفته‌شده است. موج

مرحله سوم انفجار (خرج ۳) و فاصله استقرار؛ یعنی، فاصله خرج از هدف است؛ لذا با توجه به تعداد زیاد پارامترهای مؤثر در فرآیند شکل‌دهی ورق، بررسی تأثیر هرکدام از آن‌ها به‌صورت جداگانه کار بسیار دشوار و زمان‌بری است. استفاده از روش‌های ساده مانند تغییر یک پارامتر در هر زمان نیز، نمی‌تواند به‌خوبی تأثیر و برهمکنش بین پارامترها را نشان دهد؛ بنابراین استفاده از نرم‌افزار طراح آزمایش می‌تواند مؤثر باشد. طراحی آزمایش روش آماری است که به‌منظور مشخص شدن ارتباط بین عوامل مؤثر یک فرآیند (متغیرهای مستقل) و خروجی‌های آن (متغیرهای وابسته) استفاده می‌شود؛ نرم‌افزاری کارا به‌منظور انجام آزمایش‌ها، به‌گونه‌ای که داده‌های به‌دست‌آمده قابل تجزیه و تحلیل آماری بوده و نتایج با سطح اطمینان معینی ارائه می‌شوند.

جدول (۳): ضرایب پلاستیسیته و شکست جانسون-کوک برای ورق‌های فلزی آهن تجاری آرمکو در دمای اتاق [۲۴].

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

و ۱۸/۲۰ میلی‌متر به ترتیب در انفجارهای ۱، ۲ و ۳ تغییر می‌کند. اگرچه فرآیند شکل‌دهی انفجاری زیرآب در یک بازه زمانی بسیار کوتاه با فشار بسیار زیاد اتفاق می‌افتد، اما برای نمونه‌های آزمایش‌شده هیچ چین‌وچروکی برای هر دو نوع بارگذاری ایجاد نشد. در شکل کلی، در شکل‌دهی انفجاری مکرر زیرآب، جرم بار کاهش می‌یابد و فشار ضربه در چندین مرحله به‌طور متوسط روی نمونه اعمال می‌شود، بنابراین ورق تغییرشکل گنبدی مانند را تجربه می‌کند. با این حال، با استفاده از روش بارگذاری انفجار منفرد و افزایش جرم بار، منجر به اعمال فشار شدید ضربه به نمونه در مرکز و تغییرشکل مخروطی مانند می‌شود که ممکن است برای اهداف شکل‌دهی سرعت‌بالا مناسب نباشد. بعلاوه، به دلیل تغییرشکل پلاستیک بزرگ ورق در انفجار قبلی، در چرخه بارگذاری بعدی، موج شوک ابتدا به مناطق نزدیک‌تر به نقطه انفجار برخورد می‌کند و سپس به منطقه مرکزی صفحه می‌رسد که فاصله آن با انفجار فاصله بیشتری دارد، از این رو تغییرشکل یکنواخت‌تری مشاهده می‌شود. همچنین، برای نمونه‌های تحت بارگذاری مکرر، پیشرفت خیز، یعنی تفاوت در حداکثر تغییرشکل عرضی مرکزی نمونه بین دو انفجار متوالی، به‌طور تصاعدی کاهش می‌یابد، زیرا نمونه آزمایش پس از هر بارگذاری انفجار زیرآب، دچار کار سختی می‌شود. این کار سختی بر اثر تنش‌های باقیمانده و تأثیر تغییرشکل هندسه با هر موج شوک اضافی زیرآب بیشتر تقویت می‌شود که منجر به مقاومت نمونه در برابر تغییرشکل پلاستیک و کاهش تغییرشکل تدریجی پس از هر بارگذاری می‌شود. اثر بارگذاری انفجار زیرآب منفرد و مکرر بر توزیع ضخامت ورق‌های آهن تجاری آرمکو در اینجا بحث شده است. همان‌طور که در قبلاً ذکر شده است، توزیع فشار و ضخامت بیشتر مربوط به نیروی اعمالی از طرف بیش فشار است که بر قطعه کار وارد می‌شود. برای بررسی این موضوع، نمایش کمی توزیع ضخامت ورق تغییرشکل‌یافته برای بارگذاری انفجاری منفرد توسط ۱۲ گرم C4 و انفجار سوم ۴ گرم C4 در شکل ۸ الف نشان داده شده است. همان‌طور که نشان داده شده، افزایش تعداد انفجارها و کاهش جرم بار منجر به کاهش نازک شدگی در مرکز و توزیع یکنواخت ضخامت در

شوک ناشی از ۱ گرم ماده منفجره به‌خودی‌خود توسط ورق حس نمی‌شود (در نزدیک‌ترین فاصله استقرار) و انتخاب آن در کران پایین به‌منظور بررسی و بهینه‌سازی تعداد مراحل بارگذاری انفجاری روی ورق است. همچنین، مطابق جدول ۴، کران بالایی میزان خرج انفجاری ۶ گرم در نظر گرفته شده است. این بدان علت است که در نزدیک‌ترین فاصله استقرار (۱۵۰ میلی‌متر) اگر جرم خرج انفجاری بیشتر از ۶ گرم در هر مرحله شود، ورق دچار آسیب خواهد شد.

جدول (۴): مقادیر پارامترهای ورودی.

فاکتور نام	واحد	حد پایین	حد بالا
A خرج ۱	گرم	۱	۶
B خرج ۲	گرم	۱	۶
C خرج ۳	گرم	۱	۶
D فاصله استقرار	میلی‌متر	۱۵۰	۳۰۰

۵- نتایج و بحث

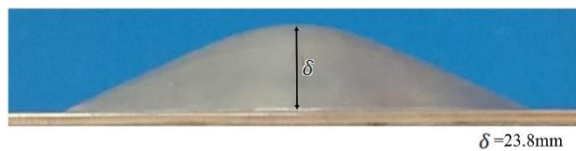
۵-۱- نتایج تجربی

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد دو سری آزمایش بر روی ورق‌های آهن تجاری آرمکو انجام شد. ورق‌های آزمایش‌شده به ترتیب با ۱۲ گرم و ۴ گرم خرج انفجاری در معرض بارگذاری انفجار زیرآب منفرد و مکرر قرار گرفتند. هندسه تغییرشکل‌یافته هر دو سری آزمایش نشان داده شده است و در شکل ۷ مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل ۷ برای بارگذاری انفجاری با ۱۲ گرم ماده منفجره نشان داده شده است، هندسه تغییرشکل‌یافته ورق آهن تجاری آرمکو با ضخامت ۳ میلی‌متر از یک پروفیل مسطح به یک شکل مخروطی مانند با بزرگ‌ترین تغییرشکل عرضی ۲۹/۹۰ میلی‌متر در مرکز تغییرشکل می‌یابد. از طرف دیگر، برای سه بارگذاری متوالی انفجاری توسط ۴ گرم خرج انفجاری (شکل ۷)، هندسه تغییرشکل‌یافته ورق آزمایشی از یک پروفیل مسطح شکل به هندسه‌ای گنبدی مانند، با حداکثر تغییرشکل عرضی مرکزی ۱۲/۶۶ میلی‌متر، ۱۵/۷۴ میلی‌متر

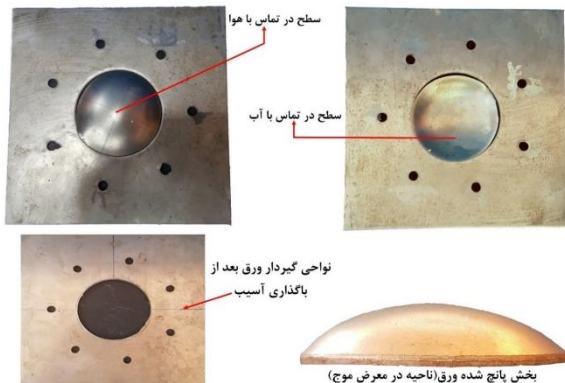
این مسئله، یعنی کاهش درصد نازک شدگی در مرکز ورق، می‌تواند به‌عنوان اصلی‌ترین مزیت شکل‌دهی انفجاری مکرر در زیرآب تعیین شود، باین‌حال لازم است که توزیع ضخامت ورق در هر دو نوع بارگذاری را زمانی که ورق تغییرشکل یکسانی دارد، بررسی شود.

به‌منظور بررسی پارامترهای مختلف و یافتن نقطه‌ی بهینه، یک کران بالا برای میزان خرج بارگذاری مشخص شده است. تعریف کران بالا بدین‌صورت است که چه میزان خرج انفجاری در هر مرحله‌ی بارگذاری رو ورق اعمال شود تا ورق دچار آسیب نشود؟ شرایط یافتن این کران باید در بحرانی‌ترین حالت بارگذاری مشخص شود، به‌عبارتی‌دیگر با فرض کمترین فاصله استقرار (۱۵۰ میلی‌متر) و میزان خرج مفروض اولیه‌ی ۸ گرمی برای هر مرحله یک بارگذاری مکرر روی ورق انجام شد.

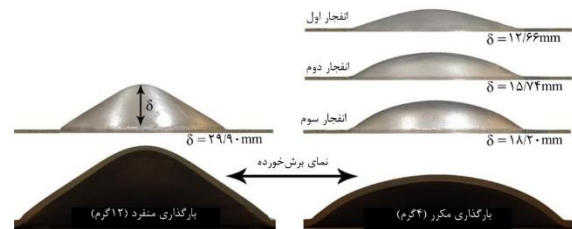
در اولین مرحله‌ی بارگذاری میزان تغییرشکل ورق ۲۳/۸ میلی‌متر و کمترین ضخامت ۲/۱۶ میلی‌متر به دست آمد. پس از اعمال بارگذاری دوم مشاهده شد که ناحیه‌ی تحت بارگذاری به‌صورت پانچ از بدنه‌ی اصلی ورق جدا شده است. نتایج این بارگذاری در مرحله‌ی اول و دوم به ترتیب در شکل ۹ و شکل ۱۰ آورده شده است.



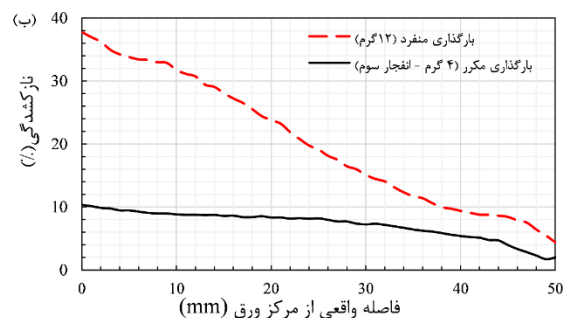
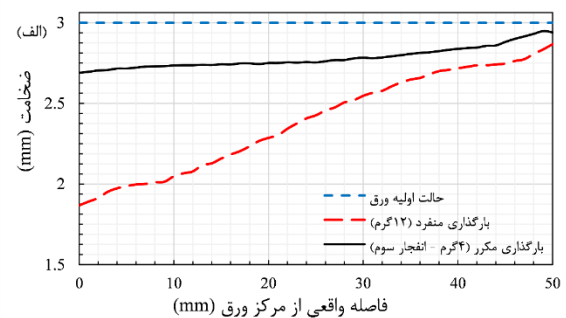
شکل (۹): میزان تغییرشکل ورق پس از بارگذاری مرحله‌ی اول (۸ گرم مکرر).



امتداد جهت طولی ورق می‌شود زیرا ورق تحت بارگذاری مکرر، تغییرشکل مرکزی کوچک‌تری را تجربه می‌کند.



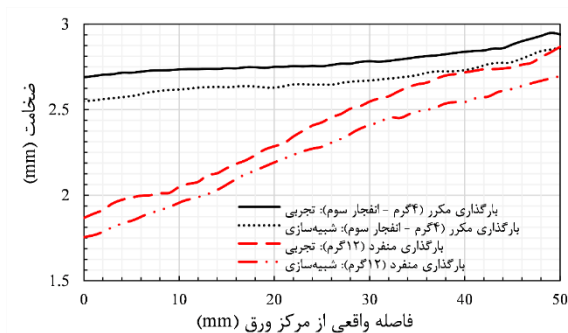
شکل (۷): نمونه‌های تغییرشکل‌یافته تحت بارگذاری انفجار زیرآب منفرد و مکرر [۲۶].



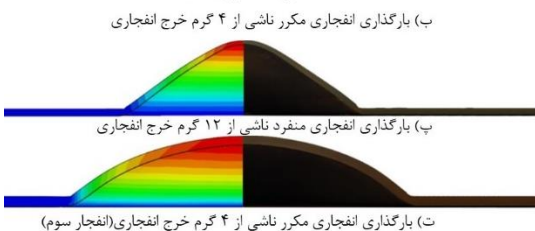
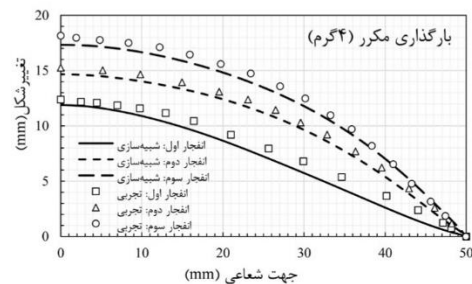
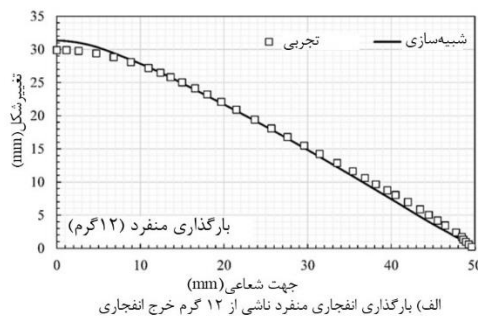
شکل (۸): (الف) توزیع ضخامت، (ب) درصد نازک شدن در ورق‌های فلزی آهن تجاری آرمکو با توجه به فاصله واقعی از مرکز ورق [۲۶].

لازم به ذکر است که بارگذاری مکرر تأثیر قابل‌توجهی در توزیع ضخامت و درصد نازک شدگی نمونه در نزدیکی منطقه مرزی گیره دارد. به‌طور خاص، حداقل ضخامت ورق در مرکز به ترتیب ۱/۸۶۷ میلی‌متر و ۲/۶۹۰ میلی‌متر برای بارگذاری انفجار منفرد و مکرر (در انفجار ۳) است؛ به‌عبارت‌دیگر، حداکثر درصد نازک شدگی در مرکز ورق رخ می‌دهد و برای بارگذاری منفرد و مکرر انفجار زیرآب، به ترتیب ۳۷/۷۷٪ و ۱۰/۳۳٪ است (شکل ۸ الف).

گرفت که از مدل عددی فعلی برای ارزیابی پاسخ پلاستیک دینامیکی ورق‌های آهن تجاری آرمکو در معرض بارگذاری انفجار زیرآب برای تحقیقات بیشتر با ضریب اطمینان بالا استفاده کرد. شکل ۱۲ مقایسه کمی و کیفی پروفیل‌های تغییرشکل ورق آهن تجاری آرمکو ضخامت ۳ میلی‌متر را در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی برای بارگذاری انفجار زیرآب منفرد و مکرر نشان می‌دهد.



شکل (۱۱): توزیع ضخامت در ورق ۳ میلی‌متری با توجه به فاصله واقعی از مرکز.



شکل (۱۰): نتیجه بارگذاری مکرر روی ورق تحت ۸ گرم ماده منفجره (آسیب در مرحله دوم بارگذاری رخ داده است).

۲-۵- نتایج مدل‌سازی عددی

نتایج عددی تغییرشکل ورق تحت دو حالت بارگذاری مکرر انفجاری و تک انفجاری به همراه نتایج تجربی آن در جدول ۵ آمده است.

جدول (۵): نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و تجربی با میزان خطای آن‌ها

تغییرشکل (mm)	بارگذاری منفرد			بارگذاری مکرر		
	۱	۲	۳	۱	۲	۳
تجربی	۲۹/۹۰	۱۵/۷۴	۱۸/۱۶	۳۱/۳۴	۱۴/۶۶	۱۷/۳۲
عددی	۳۱/۳۴	۱۴/۶۶	۳۱/۳۴	۳۱/۳۴	۱۴/۶۶	۱۷/۳۲
خطا (%)	۴/۸	۷/۰	۶/۶	۳/۳	۳/۳	۳/۳

در این بخش، با مقایسه نتایج عددی و تجربی ارائه‌شده در مطالعه تحقیق حاضر، دقت مدل FEM از نظر پروفیل تغییرشکل و توزیع ضخامت ارزیابی می‌شود. نمایش کمی توزیع ضخامت برای نتایج شبیه‌سازی تجربی و عددی بارگذاری انفجار زیرآب منفرد و مکرر ورق‌های آهن تجاری آرمکو در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مقایسه نتایج عددی و آزمایشی به دست آمده برای توزیع ضخامت در امتداد طولی ثابت می‌کند که ضخامت مقادیر و الگوهای تغییر به خوبی باهم توافق دارند. برای بارگذاری منفرد، حداقل ضخامت حاصل از آزمایش‌های ۱/۸۶۷ میلی‌متر است، در حالی که ضخامت پیش‌بینی شده در مرکز ۱/۷۵۵ میلی‌متر است. این نشان می‌دهد که اختلاف بین نتایج تجربی و عددی برای این نوع بارگیری در این نقطه بحرانی ۶٪ است. از طرف دیگر، برای بارگذاری مکرر، حداقل ضخامت حاصل از مطالعات تجربی ۲/۶۹۰ میلی‌متر در انفجار سوم است، در حالی که ضخامت پیش‌بینی شده در مرکز ۲/۵۵۰ میلی‌متر است. از این رو، تفاوت بین نتایج عددی و شبیه‌سازی ۵/۲٪ است. در حالت کلی، مقادیر حداقل ضخامت اندازه‌گیری شده و همچنین موقعیت آن‌ها، تقریباً همانند شبیه‌سازی‌های عددی است. به طور خلاصه، می‌توان نتیجه

شکل (۱۲): مقایسه کمی و کیفی پروفیل تغییرشکل بین شبیه‌سازی‌های عددی و آزمایش‌های تجربی.

همان‌طور که نشان داده شده است، نتایج شبیه‌سازی عددی شباهت قابل توجهی را با مطالعات تجربی نشان می‌دهند و اختلاف قابل توجهی بین آن‌ها وجود ندارد. علاوه بر این، درحالی‌که یک قطعه مخروطی شکل یا نیم‌کره در فرآیند شکل‌دهی کشش عمیق ایجاد می‌شود، چین‌وچروک‌ها به راحتی بر روی دامنه‌ی ورق تغییرشکل‌یافته دیده می‌شوند، باین‌حال، به دلیل فشار زیاد تولیدشده توسط بارگذاری انفجار مکرر زیرآب، کیفیت سطح خوبی به دست می‌آید و هیچ چین‌وچروکی مشاهده نمی‌شود.

۳-۵- نتایج طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ

تعداد ۲۵ شبیه‌سازی عددی انجام شده که داده‌های آن‌ها در جدول ۶ آمده است. باید توجه داشت که با توجه به سه مرحله‌ای بودن هرکدام از شبیه‌سازی می‌توان نتیجه گرفت که در مجموع ۷۵ شبیه‌سازی صورت گرفته است. با توجه به داده‌های انجام آزمایش‌ها، ۴ متغیر به‌عنوان پارامترهای مستقل و دو متغیر نیز به‌عنوان جواب در نظر گرفته شده است. میزان تغییرشکل (Y_1) و کمترین تغییر ضخامت ورق (Y_2) پارامترهای خروجی و خرج ۱ (A)، خرج ۲ (B)، خرج ۳ (C) و فاصله استقرار (D) پارامترهای مستقل در این بررسی هستند.

۱-۳-۵- صحت سنجی تحلیل واریانس

در این پژوهش، به‌منظور تعیین تأثیر پارامترهای فرآیند شکل‌دهی ورق‌های فلزی تحت بارگذاری انفجاری زیرآب و با توجه به داشتن اطلاعات مربوط به آزمایش از طرح داده‌های تجربی در نرم‌افزار طراح آزمایش استفاده شده است. روش سطح پاسخ به‌منظور تجزیه و تحلیل نتایج، از ابزار قدرتمندی به نام تحلیل واریانس استفاده می‌کند. نتیجه‌گیری قطعی از نمودارها و نتایج ارائه شده مستلزم تأیید اثرات نشان داده شده عوامل با استفاده از تحلیل واریانس است. این تحلیل با فرض بهینه بودن توزیع داده‌ها، گوسی بودن توزیع خطا و استقلال آن و ثابت بودن واریانس، به آزمون فرضیه تهی با

استفاده از مقدار p می‌پردازد. در این تحقیق، برای بررسی صحت مدل توسعه‌یافته روش سطح پاسخ از روش آماری تحلیل آنوا استفاده شد. نتایج آنوا حاصل از تجزیه و تحلیل رگرسیون برای تغییرشکل دائمی مرکزی ورق در جدول ۷ ثبت شده است. این جدول شامل مجموع مربعات هر عامل و خطا، درجه آزادی هر عامل و خطا، میانگین مربعات (واریانس) هر عامل و خطا، پارامتر معنی‌داری پاسخ برای عامل (F) و سهم هر عامل در پاسخ (p -value) است. همچنین، در این جدول، مقادیر ضریب تعیین و ضریب تعیین تعدیل شده برای پاسخ مدل درجه سوم کاهش یافته نشان داده شده است که نتایج به دست آمده نشان از تطابق بسیار خوب داده‌های خروجی موردنظر با منحنی برازش شده بر روی آن نقاط دارد.

جدول (۶): نتایج طراحی آزمایش و پاسخ هر آزمایش.

شماره	A (g)	B (g)	C (g)	D (mm)	Y_1 (mm)	Y_2 (mm)
۱	۳/۵	۶	۳/۵	۲۲۵	۱۷/۴	۰/۴۳
۲	۳/۵	۳/۵	۳/۵	۲۲۵	۱۷/۶	۰/۵۵
۳	۶	۶	۶	۱۵۰	۲۴/۵	۱/۳۵
۴	۶	۶	۱	۱۵۰	۲۱/۳	۰/۹۸
۵	۱	۱	۶	۳۰۰	۹/۸	۰/۲۰
۶	۳/۵	۳/۵	۱	۲۲۵	۱۱/۷	۰/۲۳
۷	۶	۶	۶	۳۰۰	۱۵/۵	۰/۳۷
۸	۱	۶	۶	۳۰۰	۱۳/۵	۰/۲۸
۹	۱	۶	۶	۱۵۰	۱۹/۵	۰/۹۸
۱۰	۶	۱	۱	۱۵۰	۱۷/۲	۰/۶۰
۱۱	۶	۱	۶	۱۵۰	۲۰/۵	۰/۹۸
۱۲	۳/۵	۱	۳/۵	۲۲۵	۱۱/۶	۰/۲۳
۱۳	۱	۳/۵	۳/۵	۲۲۵	۱۱/۰	۰/۲۳
۱۴	۱	۶	۱	۱۵۰	۱۵/۰	۰/۶۰
۱۵	۳/۵	۳/۵	۳/۵	۲۲۵	۱۲/۸	۰/۲۵
۱۶	۱	۶	۱	۳۰۰	۱۰/۰	۰/۲۲
۱۷	۱	۱	۶	۱۵۰	۱۴/۳	۰/۵۹
۱۸	۱	۱	۱	۳۰۰	۰	۰/۰۱
۱۹	۳/۵	۳/۵	۳/۵	۱۵۰	۱۶/۰	۰/۴۴
۲۰	۱	۱	۱	۱۵۰	۳/۰	۰/۰۵

اثری کاهشی بر روی میزان تغییرشکل ورق دارند که این موضوع در بخش بعدی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

$$Y_1 = 13.80 + 3.21A + 2.78B + 2.40C - 3.04D - 1.10AB - 1.14AC - 0.77AD - 0.84BC - 0.40BD + 0.79ABC \quad (12)$$

برای خروجی کمترین تغییرات ضخامت، نتایج تحلیل آنوا در جدول ۸ آورده شده است. تحلیل این جدول همانند جدول ۷ خواهد بود با این تفاوت که مدل رگرسیون کمترین تغییرات ضخامت یک مدل درجه سه کاهش یافته تا حد درجه دو است. همچنین، در رابطه ۱۳ معادله‌ای برای تغییرات ضخامت ورق برحسب پارامترهای ورودی به صورت رمزگذاری شده آورده شده است. در این رابطه، پارامتر D و پارامتر A اثرگذارترین پارامترهای ورودی روی خروجی کمترین تغییرات ضخامت ورق مطابق با بزرگی ضریب خود هستند به طوری که پارامتر A با ضریب ۰/۱۳۸، اثری افزایشی و پارامتر D با ضریب ۰/۱۵، اثری کاهشی بر روی میزان کمترین تغییرات ضخامت ورق دارند که این موضوع در بخش بعدی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

$$Y_2 = 0.259 + 0.138A + 0.131B + 0.059C - 0.160D - 0.02AB - 0.019AC - 0.077AD - 0.018BC - 0.077BD - 0.08CD + 0.126A^2 + 0.072B^2 + 0.028C^2 + 0.015D^2 + 0.018ABC + 0.069A^2C - 0.106A^2D \quad (13)$$

۲-۳-۵- تحلیل آماری خروجی

نمودار احتمال طبیعی باقیمانده‌ها به عنوان یک ابزار تشخیصی برای ارزیابی اعتبار مدل و همچنین توزیع داخلی برای پاسخ تغییرشکل ورق به ترتیب در شکل ۱۳ الف و ۱۳ ب نشان داده شده است. پیروی نکردن باقیمانده‌ها از هیچ الگویی در شکل ۱۳ الف نمایانگر برقراری فرض استقلال است. به طور دقیق‌تر، در این شکل، نقاط داده در اطراف یک خط مورب پراکنده شده‌اند که نشان می‌دهد باقیمانده‌ها از یک توزیع طبیعی پیروی می‌کنند و مدل‌های رگرسیونی با تغییر در انتقال بهبود نمی‌یابند؛ از این رو، مدل برای پیش‌بینی پاسخ مناسب هستند. همچنین، عدم وجود نقاط پرت در شکل ۱۳ ب نشان‌دهنده برقرار بودن فرض نرمال

۰/۲۸	۱۳/۰	۳۰۰	۶	۱	۶	۲۱
۰/۳	۱۳/۵	۳۰۰	۱	۶	۶	۲۲
۰/۳۵	۱۵/۰	۲۲۵	۶	۳/۵	۳/۵	۲۳
۰/۱۲	۱۰/۵	۳۰۰	۳/۵	۳/۵	۳/۵	۲۴
۰/۲۲	۱۰/۷	۳۰۰	۱	۱	۶	۲۵

زمانی مدل حاصل از تحلیل آنوا از اهمیت آماری بالایی برخوردار می‌باشد که مقادیر p کمتر از ۰/۰۵ و مقادیر F در سطح اطمینان ۹۵٪ باشد. در چنین وضعیتی، از نظر آماری، یک مدل ریاضی مطمئن در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در جدول ۷ مستند شده است، مدل درجه سوم کاهش یافته برای پاسخ خیز دائمی مرکزی دارای p-value کمتر از ۰/۰۰۰۱ و همچنین F-value، ۱۵۵/۸ است. این نتیجه تأیید می‌کند که مدل پیشنهادی معنی‌دار است و تنها ۰/۰۱٪ احتمال وجود دارد که مقدار F-value برابر با ۱۵۵/۸ به دلیل اغتشاش رخ دهد. همچنین، مقادیر p برای فاکتور A، B، C و D کمتر از ۰/۰۵ است که نشان از تأثیر بالای مدل از این فاکتورها دارد. علاوه بر این، مدل به دست آمده نشان‌دهنده مقدار ضریب تعیین ۹۹/۲۵ است که یک مقدار مطلوب برای یک مدل ریاضی است و بیانگر آن است که مدل توانایی بالایی در گرفتن رابطه معنی‌داری بین پاسخ و متغیرهای مستقل دارد. عبارت ضریب تعیین تعدیل‌شده نیز برای جبران متغیرهای اضافی مدل معرفی و استفاده شد. وقتی تعداد متغیرهای مستقل مدل رگرسیون افزایش می‌یابد، ضریب تعیین افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، ضریب تعیین تعدیل‌شده ممکن است بسته به اینکه متغیر اضافه شده قدرت توجیهی مدل را کاهش یا جذب کند، کاهش یا افزایش می‌یابد. در نتیجه، ضریب تعیین تعدیل‌شده معمولاً در مقایسه با ضریب تعیین یک شاخص دقیق‌تر در نظر گرفته می‌شود. در رابطه ۱۲ معادله تغییرشکل ورق برحسب پارامترهای ورودی به صورت رمزگذاری شده آورده شده است. در رابطه ۱۲، پارامتر A و پارامتر D اثرگذارترین پارامترهای ورودی بر روی خروجی تغییرشکل ورق مطابق با بزرگی ضریب خود هستند به طوری که پارامتر A با ضریب ۳/۲، اثری افزایشی و پارامتر D با ضریب ۳/۰۳،

بودن داده‌ها است. به‌طور دقیق‌تر، در شکل ۱۳ ب، آزمایش - قرار دارند که این نشان‌دهنده‌ی صحت و توانایی مدل ارائه‌شده برای پیش‌بینی تغییرشکل با نتایج آماری است.

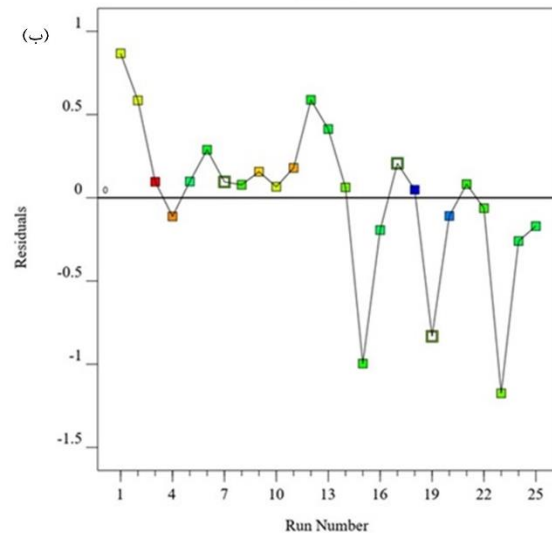
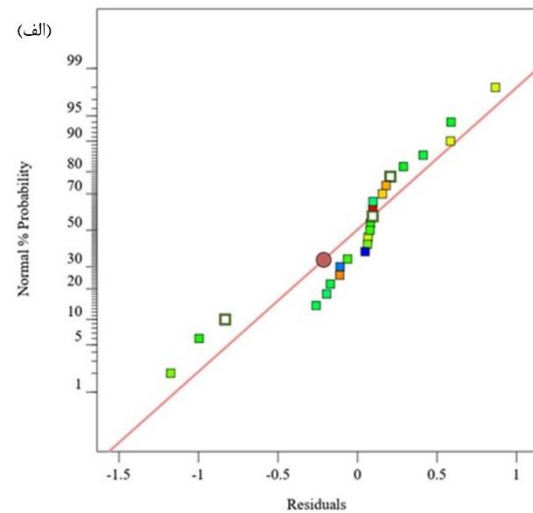
جدول (۷): نتایج آنالیز ANOVA برای خروجی تغییرشکل ورق با مدل درجه ۳ کاهش‌یافته.

	p-value	F-value	Mean Square	Sum of Squares	df	Source
significant	< 0.0001	۱۴۴/۴۲	۶۶/۷۷	۶۶۷/۷۰	۱۰	مدل
	< 0.0001	۴۰۰/۸۷	۱۸۵/۳۴	۱۸۵/۳۴	۱	A
	< 0.0001	۳۰۰/۸۱	۱۳۹/۵۴	۱۳۹/۵۴	۱	B
	< 0.0001	۲۲۳/۶۰	۱۰۳/۳۸	۱۰۳/۳۸	۱	C
	< 0.0001	۳۸۵/۹۲	۱۶۵/۹۴	۱۶۳/۹۴	۱	D
	< 0.0001	۴۱/۹۷	۱۹/۴۱	۱۹/۴۱	۱	AB
	< 0.0001	۴۵/۱۹	۲۰/۸۹	۲۰/۸۹	۱	AC
	< 0.0005	۲۰/۲۶	۹/۳۷	۹/۳۷	۱	AD
	< 0.0002	۲۴/۲۸	۲۳/۱۱	۱۱/۲۳	۱	BC
	< 0.0351	۵/۴۴	۲/۵۱	۲/۵۱	۱	BD
	< 0.0004	۲۱/۸۳	۱۰/۰۹	۱۰/۰۹	۱	ABC
			۰/۴۶۲۳	۶/۴۷	۱۴	Residual
				۶۷۴/۱۷	۲۴	Cor Total
$R^2 = 0.9925$, $Adj R^2 = 0.9861$						

جدول (۸): نتایج آنالیز ANOVA برای خروجی تغییرات ضخامت ورق با مدل درجه ۳ کاهش‌یافته.

	p-value	F-value	Mean Square	Sum of Squares	df	Source
significant	< 0.0001	۲۹۳/۳۳	۰/۱۷۵۵	۲/۶۳	۱۵	مدل
	< 0.0001	۴۶۹/۰۷	۰/۳۴۴۰	۰/۳۴۴۰	۱	A
	< 0.0001	۴۱۹/۶۹	۰/۳۰۷۸	۰/۳۰۷۸	۱	B
	< 0.013	۹/۵۳	۰/۰۰۷۰	۰/۰۰۷۰	۱	C
	< 0.0001	۶۹/۳۸	۰/۰۵۰۹	۰/۰۵۰۹	۱	D
	< 0.017	۸/۵۳	۰/۰۰۶۳	۰/۰۰۶۳	۱	AB
	< 0.0217	۷/۶۹	۰/۰۰۵۶	۰/۰۰۵۶	۱	AC
	< 0.0001	۱۲۹	۰/۰۹۴۶	۰/۰۹۴۶	۱	AD
	< 0.0239	۷/۳۵	۰/۰۰۵۴	۰/۰۰۵۴	۱	BC
	< 0.0001	۱۲۸/۴۶	۰/۰۹۴۲	۰/۰۹۴۲	۱	BD
	< 0.0001	۱۴۰/۴۵	۰/۱۰۳۰	۰/۱۰۳۰	۱	CD
	< 0.0001	۸۸/۷۵	۰/۰۶۵۱	۰/۰۶۵۱	۱	A ²
	< 0.0002	۳۴/۲۲	۰/۰۲۵۱	۰/۰۲۵۱	۱	B ²
	< 0.0293	۶/۷	۰/۰۰۴۹	۰/۰۰۴۹	۱	ABC
	< 0.0082	۱۱/۳۸	۰/۰۰۸۳	۰/۰۰۸۳	۱	A ² C
	< 0.0005	۲۷/۳۸	۰/۰۲۰۱	۰/۰۲۰۱	۱	A ² D
			۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۶۶	۹	Residual
$R^2 = 0.9975$, $Adj R^2 = 0.9933$						

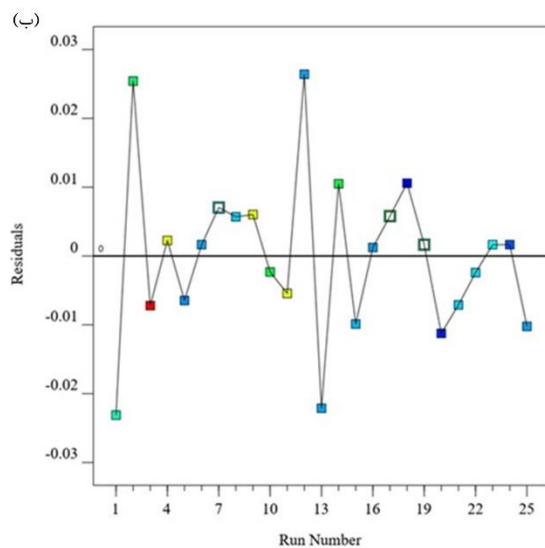
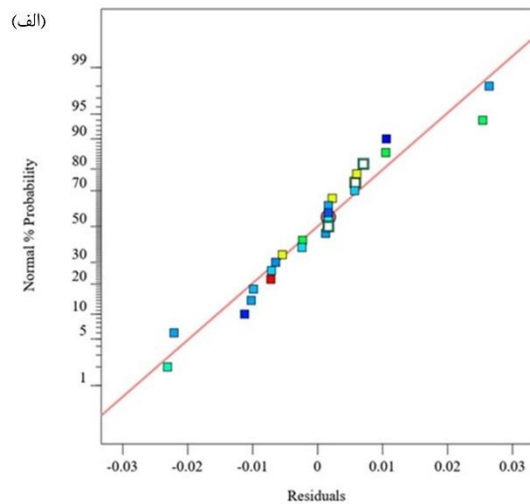
فضای طراحی، نمودار همبستگی متغیرهای ورودی خرج ۱، خرج ۲، خرج ۳ و فاصله استقرار برای خروجی تغییرشکل و کمترین تغییرات ضخامت ورق آورده شده است. نشانگر پاسخ به هر متغیر مستقل، شیب منحنی در این شکل است که حساسیت خروجی را نیز نشان می‌دهد. شیب تند منحنی در یک متغیر مستقل نشان می‌دهد که واکنش به آن متغیر بسیار حساس است. یک گرادیان منفی نشان می‌دهد که افزایش متغیر مستقل ذکر شده پاسخ را کاهش می‌دهد. از طرف دیگر، یک شیب مثبت نشان می‌دهد که افزایش این عامل باعث افزایش پاسخ می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۵ نشان داده شده است، همه عوامل تأثیر مهمی در پاسخ خیز دائمی مرکزی دارند.



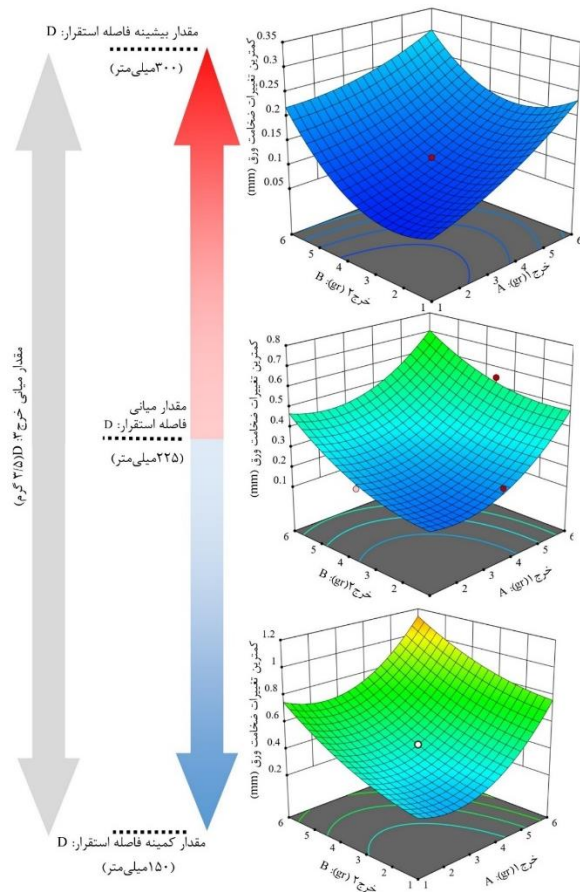
شکل (۱۳): نمودارهای (الف) احتمال طبیعی برحسب باقیمانده و (ب) باقیمانده برحسب شماره آزمایش برای پاسخ تغییرشکل ورق.

به‌طور مشابه، در شکل ۱۴ نتایج مربوط به توزیع احتمال طبیعی و همچنین نتایج مربوط به باقیمانده برای خروجی کمترین تغییرات ضخامت ورق آورده شده است. مطابق آنچه بیان شد در این حالت برای خروجی کمترین تغییرات ضخامت ورق نیز مدل از توانایی بالا و صحت بسیار خوبی برخوردار است.

در شکل ۱۵، برای نشان دادن تأثیر متغیرهای مستقل فوق‌الذکر در شاخص پاسخ خروجی در یک نقطه خاص در



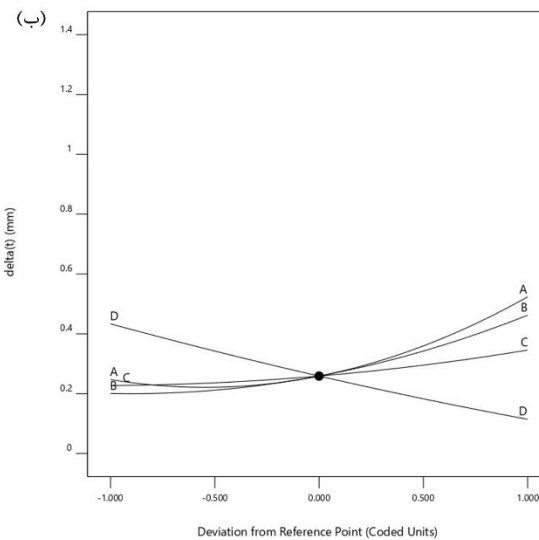
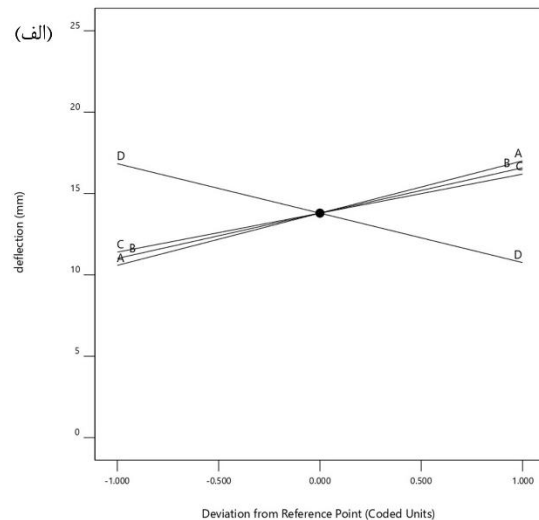
کمترین اثر را روی خروجی‌های مسئله داشته‌اند، بحث می‌شود. همچنین، در پایان این بخش نقطه بهینه فرآیند شکل‌دهی انفجار مکرر زیرآب و نحوه انتخاب آن توضیح داده می‌شود. در شکل ۱۶ تعامل اثر دو فاکتور ورودی خرج ۱ و خرج ۲ بر روی کمترین تغییرات ضخامت ورق آمده است.



شکل (۱۶): نمودار اندرکنش خرج ۱ و خرج ۲ بر روی کمترین تغییرات ضخامت ورق.

از رابطه ۱۳ مشخص شد که اثرگذارترین پارامتر بر روی کمترین تغییرات ضخامت، پارامتر فاصله استقرار است و کم اثرگذارترین این پارامترها، پارامتر خرج ۳ است. لذا به منظور بررسی اثر مهم‌ترین پارامتر؛ یعنی، پارامتر فاصله استقرار، سه مقدار بیشینه، میانی و کمینه مطابق شکل ۱۶ تعبیه شده است. پارامتر خرج ۳ به علت اثر کمتر نسبت به دیگر پارامترها ثابت در نظر گرفته شده است (مقدار میانی ۳/۵ گرم). همان‌طور که از شکل مشخص است، هنگامی که فاصله استقرار در بیشترین حالت خودتنظیم شود، آنگاه با شرط بیشینه بودن خرج ۱ و خرج ۲، کمترین تغییرات ضخامت

شکل (۱۴): نمودارهای (الف) احتمال طبیعی برحسب باقیمانده و (ب) باقیمانده برحسب شماره آزمایش برای پاسخ کمترین تغییرات ضخامت ورق.



شکل (۱۵): نمودار همبستگی متغیرهای مستقل بر روی (الف) خروجی تغییر شکل ورق و (ب) خروجی کمترین تغییرات ضخامت ورق

۳-۳-۵- تعامل اثر فاکتورها

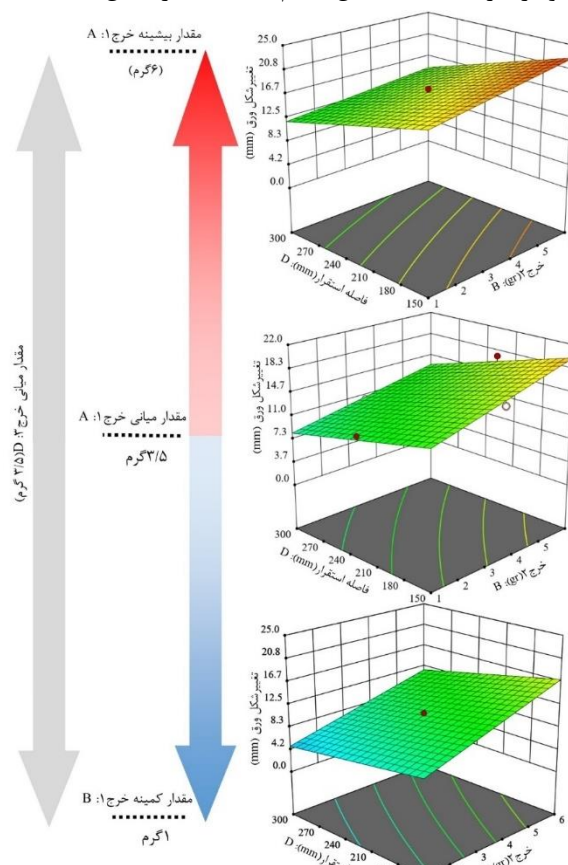
در این بخش، اثر دوبه‌دوی چهار پارامتر خرج ۱، خرج ۲، خرج ۳ و فاصله استقرار بر روی خروجی‌های تغییر شکل ورق و کمترین تغییرات ضخامت ورق بررسی می‌شود. شایان توجه است که به دلیل کمبود فضا و همچنین کوتاهی مطلب، در ادامه تنها اثر تقابلی دو پارامتری که بیشترین

دست پیدا کنند. همان‌طور که ذکر شد برخی از پاسخ‌ها اثر عکس روی یکدیگر دارند و افزایش در یکی منجر به کاهش دیگری می‌شود، به عبارت دیگر بین پارامترها اثر تقابلی وجود دارد. در نتیجه باید حالتی را انتخاب نمود که هر یک از پاسخ‌ها به سطحی قابل قبول از مطلوبیت دست یابند. برای این کار از قسمت بهینه‌ساز پاسخ نرم‌افزار طراحی آزمایش استفاده شده است. به منظور انتخاب نقطه بهینه، ابتدا خروجی تغییرشکل ورق روی یک مقدار منطقی و قابل دستیابی تنظیم می‌شود. سپس، خروجی کمترین تغییرات ضخامت ورق به گونه بهینه می‌شود که کمترین مقدار را داشته باشد. برای رسیدن به این هدف، نرم‌افزار طراحی آزمایش با دقت ۹۶ درصدی تابع مطلوبیت خود، مقادیر موجود در جدول ۹ را برای پارامترهای ورودی فرآیند شکل‌دهی ورق با روش انفجار مکرر سه مرحله‌ای زیرآب پیش‌بینی کرده است. همان‌طور که از جدول ۹ مشخص است، تغییرشکل ورق روی مقدار ۲۰ میلی‌متر تنظیم شده است و مقدار بهینه کمترین تغییرات ضخامت ۰/۷۱ میلی‌متر به دست آمد. همچنین ترتیب بارگذاری به صورت ۴/۳ گرم خرج انفجاری برای مرحله اول بارگذاری، ۶ گرم خرج برای مرحله دوم بارگذاری و ۵ گرم خرج برای مرحله سوم بارگذاری در فاصله استقرار ۲۰۰ میلی‌متری به دست آمد. همان‌طور که مطابق جدول ۹ به دست آمد، کمترین تغییرات ضخامت برای ورق در تغییرشکل ورق مورد نظر (۲۰ میلی‌متر) مقدار ۰/۷۱۱ میلی‌متر به دست آمد. به عبارتی دیگر، برای تغییرشکل ۲۰ میلی‌متری ورق، ضخامت بهینه آن برابر با ۲/۲۸۹ میلی‌متر است. لازم به توضیح است که این نتایج طبق بهینه‌سازی عددی صورت گرفته در نرم‌افزار طراحی آزمایش به دست آمده است. به منظور بررسی و صحت سنجی این موضوع، شرایط ذکر شده در جدول ۹ مورد مطالعه عددی قرار گرفت. به عبارتی دیگر، یک مطالعه عددی تحت بارگذاری ۴/۳ گرم خرج انفجاری در مرحله اول، ۶ گرم در مرحله دوم و ۵/۱ گرم در مرحله سوم با فاصله استقرار یکسان، ۲۰۰ میلی‌متر در آباکوس صورت گرفت. نتایج به‌طور خلاصه در جدول ۱۰ ارائه شده است.

جدول (۹): نتایج مربوط به انتخاب نقطه بهینه

A	B	C	D	Y ₁	Y ₂
---	---	---	---	----------------	----------------

ورق به حدود ۰/۳ میلی‌متر خواهد رسید. این در صورتی است که اگر خرج ۲ کمینه شود، این مقدار به حدود ۰/۲۲۵ میلی‌متر خواهد رسید. حال، هنگامی که فاصله استقرار در کمترین حالت خود تنظیم شود، آنگاه با شرط بیشینه بودن خرج ۱ و خرج ۲، کمترین تغییرات ضخامت ورق به حدود ۱/۱ میلی‌متر خواهد رسید. این در صورتی است که اگر خرج ۲ کمینه شود، این مقدار به حدود ۰/۷۵ میلی‌متر خواهد رسید. در شکل ۱۷، تعامل اثر دو فاکتور فاصله استقرار و خرج ۲ بر روی میزان تغییرشکل ورق آمده است. تحلیل این نمودار نیز مشابه با تحلیل انجام داده شده در شکل ۱۶ است.



شکل (۱۷): نمودار اندرکنش فاصله استقرار و خرج ۲ بر روی تغییرشکل ورق.

۴-۳-۵- تعیین شرایط بهینه

اغلب مهندسان تمایل دارند به شرایط بهینه پارامترهای ورودی هر فرآیند (مقادیر حداقل و یا حداکثر برای پارامترهای خروجی) به جهت رسیدن به کیفیت مطلوب

بود. همچنین مقدار خرج مرحله اول بارگذاری بیشترین تأثیر افزایشی را بر میزان تغییرشکل ورق دارد و پس‌از آن فاصله استقرار دارای بیشترین تأثیر کاهش‌دهی دارد.

۷- مراجع

- [1] Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M. Theoretical analysis on the effect of uniform and localized impulsive loading on the dynamic plastic behaviour of fully clamped thin quadrangular plates. *Thin-Walled Structures*. 2016;109:367-76.
- [2] Mostofi TM, Golbaf A, Mahmoudi A, Alitavoli M, Babaei H. Closed-form analytical analysis on the effect of coupled membrane and bending strains on the dynamic plastic behaviour of fully clamped thin quadrangular plates due to uniform and localized impulsive loading. *Thin-Walled Structures*. 2018;123:48-56.
- [3] Iyama H, Raghukandan K, Nagano S, Itoh S. The Effect of Pressure Vessel in Explosive Forming. In *ASME Pressure Vessels and Piping Conference 2003* (Vol. 41510, pp. 307-312).
- [4] Hadavi V, Zamani J, Hosseini R. The empirical survey on the effect of using media in explosive forming of tubular shells. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2009;60:574-9.
- [5] Alipour R, Najarian F. Modeling and investigation of elongation in free explosive forming of aluminum alloy plate. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2011;76:490-3.
- [6] Iyama H, Higa Y, Itoh S. Study on the Effects of Shock Wave Propagation on Explosive Forming. In *Materials Science Forum 2014* (Vol. 767, pp. 132-137). Trans Tech Publications Ltd.
- [7] Zamani J, Goudarzi M. Experimental and numerical investigation of the maximum deflection of circular aluminum plate subjected to free air explosion. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(1):219-26.
- [8] 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.
- [9] 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* (Vol. 734, No. 3, p. 032074). IOP Publishing.

(g)	(g)	(mm)	(mm)	(mm)
۴/۳	۶	۵	۲۰۰	۲۰
۰/۷۱۱				

جدول (۱۰): مقایسه نتایج عددی و بهینه‌سازی دو خروجی

ضخامت و تغییرشکل ورق

خروجی ورق	یکا	مرحله سوم بارگذاری
Y ₁ عددی	mm	۱۹/۳۹
Y ₁ بهینه	mm	۲۰
Y ₂ عددی	mm	۰/۶۱۵
Y ₂ بهینه	mm	۰/۷۱۱

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تغییرشکل ورق‌های آهن تجاری آرکو تحت بارگذاری مکرر حاصل از انفجار ماده منفجره در زیرآب به‌صورت تجربی و عددی، مورد بررسی قرار گرفت. در بخش عددی، ۷۵ شبیه‌سازی با استفاده از روش کوپل-ویلری لاگرانژی صورت گرفت. در بخش بهینه‌سازی، از روش سطح پاسخ استفاده شد. به‌منظور بررسی معنی‌دار بودن مدل، سطح اطمینان ۹۵٪ در نظر گرفته شد؛ بدان معنا که چنانچه p-value برای مدل کمتر از ۰/۰۵ باشد، مدل در نظر گرفته‌شده معنی‌دار است. با استفاده از تحلیل واریانس مقادیر عددی ضرایب متغیرها، p-value و ضریب تعیین و ضریب تعیین تعدیل‌شده به دست آمد. با توجه به مقدار بالای ضریب تعیین (۰/۹۹) به‌دست‌آمده از روش سطح پاسخ می‌توان نتیجه گرفت که نتایج حاصل از مدل رگرسیونی تطابق بسیار خوبی با نتایج تجربی دارد. جرم خرج انفجاری در هر مرحله بارگذاری و فاصله استقرار مستقل تأثیرگذار بر روی خروجی یعنی تغییرشکل ورق و کمترین تغییرات ضخامت ورق، در نظر گرفته شدند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که پروفیل تغییرشکل‌یافته ورق در بارگذاری منفرد به حالتی مخروطی و در بارگذاری مکرر به حالتی کروی شکل-دهی شده است، لذا شکل‌دهی ورق در بارگذاری مکرر بهبودیافته است. نتایج نشان داد که فاصله استقرار بیشترین تأثیر کاهش‌دهی را بر کمترین تغییرات ضخامت ورق دارد و پس‌از آن جرم خرج مرحله اول دارای بیشترین تأثیر افزایشی

- [21] 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.
- [22] Rezasefat M, Mostofi TM, Ozbakkaloglu T. Repeated localized impulsive loading on monolithic and multi-layered metallic plates. *Thin-Walled Structures.* 2019;144:106332.
- [23] 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.
- [24] Johnson GR. A constitutive model and data for materials subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures. *Proc. 7th Inf. Sympo. Ballistics.* 1983:541-7.
- [25] Myers RH, Montgomery DC, Anderson-Cook CM. *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments.* John Wiley & Sons; 2016.
- [26] 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.
- [10] Iyama H, Itoh S. Study on Explosive Forming of Aluminum Alloy. *The International Journal of Multiphysics.* 2010;4(4):341-50.
- [11] 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.
- [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 Energ Mater.* 2018;79:156-9.
- [13] 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.
- [14] Praba RS, Ramajeyathilagam K. Numerical investigations on the large deformation behaviour of ring stiffened cylindrical shell subjected to underwater explosion. *Applied Ocean Research.* 2020;101:102262.
- [15] Henchie TF, Yuen SC, Nurick GN, Ranwaha N, Balden VH. The response of circular plates to repeated uniform blast loads: An experimental and numerical study. *International Journal of Impact Engineering.* 2014;74:36-45.
- [16] Truong DD, Jung HJ, Shin HK, Cho SR. Response of low-temperature steel beams subjected to single and repeated lateral impacts. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering.* 2018;10(6):670-82.
- [17] Zhu L, Shi S, Jones N. Dynamic response of stiffened plates under repeated impacts. *International Journal of Impact Engineering.* 2018;117:113-22.
- [18] Koli S, Chellapandi P, Rao LB, Sawant A. Study on JWL equation of state for the numerical simulation of near-field and far-field effects in underwater explosion scenario. *Engineering Science and Technology, an International Journal.* 2020;23(4):758-68.
- [19] Zhang S, Wang G, Wang C, Pang B, Du C. Numerical simulation of failure modes of concrete gravity dams subjected to underwater explosion. *Engineering Failure Analysis.* 2014;36:49-64.
- [20] Koli S, Chellapandi P, Rao LB, Sawant A. Study on JWL equation of state for the numerical simulation of near-field and far-field effects in underwater explosion scenario. *Engineering Science and Technology, an International Journal.* 2020;23(4):758-68.



Optimization of Effective Parameters in Free Iron Sheet Forming Process by Underwater Explosion Method

Sadegh Nasiri¹, Milad Sadegh-Yazdi^{2*}, Tohid Mirzababaie Mostofi³, Seyyed Mohsen Mousavi⁴, Mojtaba Ziya-Shamami⁴

¹ M.Sc., Faculty of Engineering, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran

² Assistant Professor, Faculty of Engineering, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran

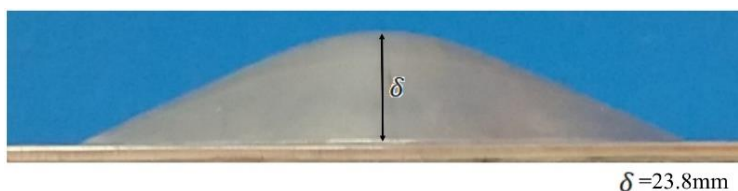
³ Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran

⁴ Researcher, Faculty of Engineering, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran

HIGHLIGHTS

- Blasted-loaded plates due to 12 g and 4 g of explosive charge were used for single loading and repeated loading.
- The Coupled Eulerian-Lagrangian method was firstly used for numerical simulation in ABAQUS finite element software.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 30 January 2022

Received in revised form: 27 February 2022

Accepted: 5 March 2022

Available online: 5 March 2022

*Correspondence: msadeghy@ihu.ac.ir

How to cite this article:

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

Keywords:

Underwater explosion
Repeated Loading
Sheet forming
Numerical simulation
Optimization

ABSTRACT

One of the objectives of the present study is to optimize the effective parameters in the free sheet forming process under underwater explosive loading. In the experimental part, in order to investigate the effect of loading type on the maximum permanent deflection and thickness distribution of the plate, blasted-loaded plates due to 12 g and 4 g of explosive charge were used for single loading and repeated loading, respectively. Also, in order to investigate the effect of effective parameters on the process and optimize them, the Coupled Eulerian-Lagrangian method was firstly used for numerical simulation in ABAQUS finite element software. Then, in the optimization section, in order to investigate the simultaneous effect of explosive charge mass at each stage and the standoff distance on the maximum deformation and thickness of the sheet, Design-Expert software and Response Surface Methodology were used. The p-value obtained for the proposed model was less than 0.05, which indicates the significance of the model with a reliability of over 95%. The obtained results showed that the model provided by the software is suitable for this experiment and the values obtained from predicting the model are consistent with the experimental and numerical results. Also, the optimal conditions for the least change in plate thickness and the highest amount of permanent deflection were presented.

