



## فرآیند شکل‌دهی انفجار زیرآب؛ مرور و چشم‌اندازهای آینده

صادق نصیری<sup>۱</sup>، میلاد صادق یزدی<sup>۲\*</sup> و مجتبی ضیاء شمامی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

<sup>۳</sup> دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۰۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۸/۰۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۸

### چکیده

فرآیند انفجار افزایش شدید در حجم و آزاد شدن ناگهانی انرژی است که معمولاً با افزایش دما و آزاد شدن گاز همراه است. پدیده انفجار زیرآب با انفجارهایی که در سطح زمین رخ می‌دهد؛ به دلیل ویژگی‌های آب متفاوت است. انتخاب آب به عنوان محیط واسط در فرآیند شکل‌دهی انفجاری، به علت امپدانس مکانیکی بسیار بیشتر آب نسبت به هوا و به تبع آن اینرسی بالاتر آب، گزینه مناسب‌تری است. در شکل‌دهی انفجاری زیرآب، موج ناشی از انفجار توسط محیط آب در کسری از ثانیه به سمت نمونه موردنظر انتشار می‌یابد و بعد از برخورد و انتقال انرژی، سبب نرخ کرنش بسیار بالایی در آن می‌شود که همین امر سبب افزایش و بهبود تغییر شکل نمونه می‌شود. در شکل‌دهی انفجاری سختی نمونه پس از شکل‌دهی افزایش می‌یابد و نمونه دارای توزیع یکنواخت کرنش و صافی سطح بسیار مطلوبی است. در این پژوهش به بررسی پارامترهای مهم در فرآیند انفجار زیرآب نظیر عمق انفجار، عمق آب و هندسه مخزن آب و تاثیر آنها در شکل‌دهی انفجاری زیرآب پرداخته شده است؛ همچنین هدف از این مطالعه بررسی جامع پارامترهای مؤثر، روابط تحلیلی، بیشینه تحقیق و شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در حوزه شکل‌دهی انفجاری زیرآب است.

**کلمات کلیدی:** انفجار زیرآب؛ موج انفجاری؛ شکل‌دهی انفجاری؛ شکل‌دهی سرعت بالا؛ نرخ کرنش بالا؛ شبیه‌سازی عددی؛ مدل‌سازی تحلیلی.

## Underwater Explosive Forming: A Review and Future Outlook

S. Nasiri<sup>1</sup>, M. Sadegh Yazdi<sup>2\*</sup>, M. Zia Shamami<sup>3</sup>

<sup>1</sup> MSc Student, Mech. Eng., Imam Hussein Univ., Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Assis. Prof., Mech. Eng., Imam Hussein Univ., Tehran, Iran.

<sup>3</sup> Ph.D., Mech. Eng., Imam Hussein Univ., Tehran, Iran.

### Abstract

The explosion process is a sharp increase in volume and a sudden release of energy, usually accompanied by an increase in temperature and the release of gas. The phenomenon of underwater explosions is different from explosions that occur on the surface of the earth due to the characteristics of water. In the process of explosive forming, the choice of water as an interface due to much higher mechanical impedance of water than air and consequently higher inertia of water, is a more appropriate option. In underwater explosive forming, the wave caused by the explosion is propagated by the water environment in a fraction of a second to the target sample, and after colliding and transferring energy, it causes a very high strain rate in it, which increases and improves sample deformation. In this study, important parameters in the underwater explosion process such as explosion depth, water depth and water vessel geometry and their impact on underwater explosive forming have been investigated. Also, the purpose of this study is to comprehensively investigate the effective parameters, analytical relationships, background researches and simulations performed in the field of underwater explosive forming.

**Keywords:** Underwater Explosion; Explosive Wave; Explosive Forming; High Speed Forming; High Strain Rate; Numerical Simulation; Analytical Modeling.

## ۱- مقدمه

انفجاری اعمال می‌شود، اولین پالس<sup>۹</sup> فشار از بارگذاری موج شوک است و پالس فشار دوم ناشی از انبساط حباب تولید شده توسط انفجار ماده منفجره است. مدت زمان پالس فشار ثانویه بیشتر است، اما بیش فشار کمتری از بیش فشار پالس فشار اولیه دارد.

شدت پالس فشار بر اساس شرایط مخزن فشار است. هندسه تغییر شکل نمونه تحت تأثیر شکل توزیع بارگذاری موج شوک قرار دارد. روش شکل‌دهی انفجاری همچنین می‌تواند به صورت آزاد (بدون استفاده از مخزن فشار) مورد استفاده قرار گیرد [۲]. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، تفاوت عمده روش شکل‌دهی انفجاری با دیگر روش‌های شکل‌دهی سریع، منبع انرژی آن است. در دو روش شکل-دهی الکترومغناطیسی و هیدروالکتریکی، به جای مواد منفجره که منبع انرژی روش شکل‌دهی انفجاری است، به مخزن‌های خازنی بزرگ انرژی نیاز است. چنین مشکلی روش‌های الکترومغناطیسی و هیدروالکتریکی را پیچیده‌تر و پرهزینه‌تر می‌سازد؛ اما در طرف مقابل فرآیند شکل‌دهی انفجاری، به عنوان مثال در صنعت اتومبیل‌سازی به علت کنترل دقیق‌تر و تخلیه انرژی‌های متوالی و کوچکی محیط سیال، انتخاب مناسبی است؛ همچنین می‌توان به استفاده از روش شکل‌دهی انفجاری در ساخت مخازن تحت فشار، پوسته‌های کروی، استوانه‌ای و مخازن فرآورده‌های غذایی اشاره کرد [۳].

تاکنون مطالعات گوناگونی در زمینه انفجار زیر آب صورت گرفته و به مباحث و کاربردهای آن اشاره شده است، اما در هیچ‌یک از مقالات منتشر شده به پدیده انفجار زیر آب و مباحث مختلف آن به صورت یکجا اشاره نشده است. به‌طور کلی هر مقاله تنها در یک مبحث نظیر شکست نمونه‌ها، شکل‌دهی، روابط تجربی و تحلیلی برای پیش‌بینی بیشترین خیز، انواع روش‌های عددی و از این قبیل تمرکز کرده‌اند. همین امر سبب ارائه یک دیدگاه جامع از فرایند انفجار زیر آب و کاربرد آن در شکل‌دهی انفجاری و پاسخ نمونه‌ها نسبت به بارگذاری انفجاری گردید که در مقاله حاضر به آن پرداخته شده است.

انفجار زیر آب پدیده‌ای فیزیکی است که در جریان آن به دلیل واکنش‌های شیمیایی، ماده منفجره زیر سطح آب منفجر می‌شود. در طول این انفجار امواج فشاری و حباب گاز<sup>۱</sup> ایجاد خواهد شد. هنگام انفجار، موجی به نام موج فشار شکل می‌گیرد. در صورتی که سرعت این موج بیشتر از سرعت صوت شود، به آن موج شوک<sup>۲</sup> می‌گویند. انواع آلیاژهای جدید (به‌عنوان مثال آلیاژهای نیکل و تیتانیوم) و همچنین قطعات پیچیده در صنایعی چون هوافضا با روش‌های معمولی ساخته نمی‌شدند، این نیاز، منجر به ارائه روشی خاصی با عنوان روش‌های شکل‌دهی سرعت بالا<sup>۳</sup> شد. روش‌های شکل‌دهی سرعت بالا عموماً شامل سه روش انفجاری<sup>۴</sup>، هیدروالکتریکی<sup>۵</sup> و الکترومغناطیسی<sup>۶</sup> می‌شود. در روش هیدروالکتریکی و الکترومغناطیسی از انتشار ناگهانی انرژی (انرژی الکتریکی ذخیره شده در خازن‌ها) برای شکل-دهی نمونه استفاده می‌شود؛ اما در روش شکل‌دهی انفجاری، شکل‌دهی مواد توسط فشار ناگهانی ناشی از انفجار یک ماده شیمیایی است. فشار موج شوک و هندسه‌ی موج ناشی از مخزن‌های فشار<sup>۷</sup> استفاده شده، باعث می‌شود تا نمونه شکل قالب را به خود بگیرد. از یک محیط واسط سیال مانند آب به منظور انتقال انرژی بیشتر و فشار یکنواخت‌تر استفاده می‌شود [۱]. در روش شکل‌دهی انفجاری زیر آب ماده منفجره در درون مخزن فشار پر از آب قرار می‌گیرد و توسط یک چاشنی الکتریکی منفجر می‌شود. موج شوک زیر آب از طریق محیط آب انتشار می‌یابد و به نمونه می‌رسد و باعث تغییر شکل آن می‌شود. اگر از قالب فلزی استفاده شود، نمونه به فرم مشخص تغییر شکل می‌دهد. به‌طور کلی، نمونه در شکل‌دهی انفجاری دارای برگشت فنری<sup>۸</sup> کمی است، زیرا تغییر شکل پلاستیک کافی به دست می‌آید. دو فشار بر روی نمونه تحت شکل‌دهی

<sup>۱</sup> Bubble Gas

<sup>۲</sup> Shock Wave

<sup>۳</sup> High Speed Forming (HSF)

<sup>۴</sup> Explosive Forming (EF)

<sup>۵</sup> Electrohydraulic Forming (EHF)

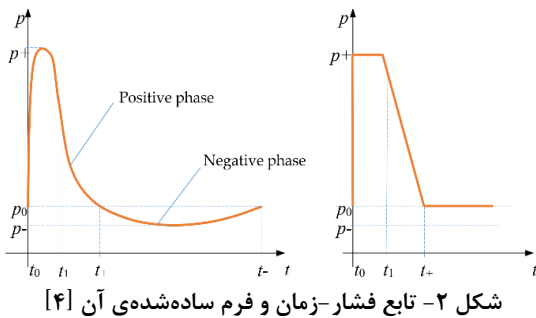
<sup>۶</sup> Electromagnetic Forming (EMF)

<sup>۷</sup> Pressure Vessel

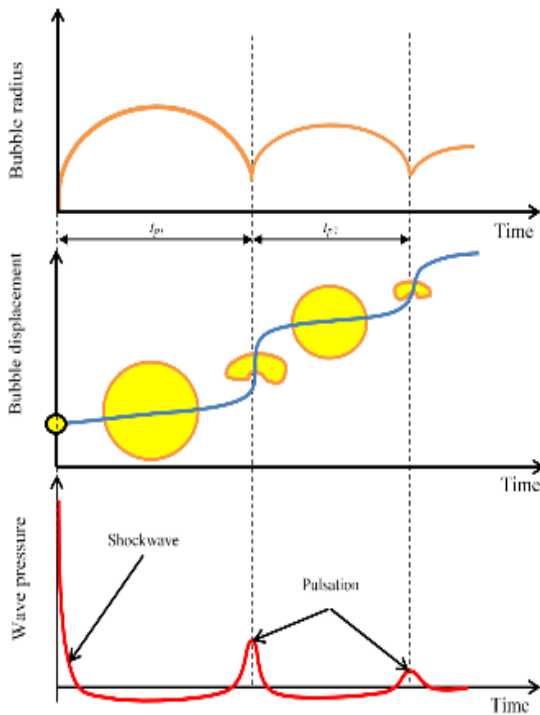
<sup>۸</sup> Spring Back

<sup>۹</sup> Pulse

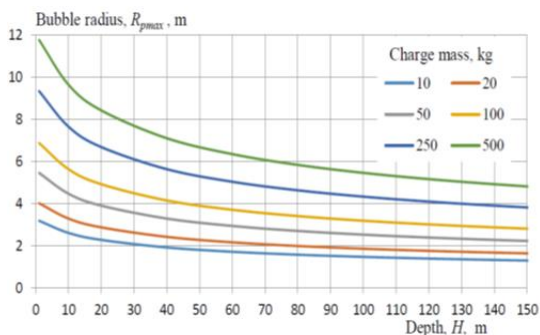




شکل ۲- تابع فشار-زمان و فرم ساده‌شده‌ی آن [۴]



شکل ۳- نمودار فشار-زمان، تغییرات شعاع و جابجایی حباب [۴]



شکل ۴- اندازه شعاع حباب گاز برحسب جرم خرج و عمق انفجار [۴]

شعاع حباب تا حداکثر میزان خود خواهد شد و سپس با غلبه نیروی اینرسی آب، حباب شروع به انقباض می‌کند. انقباض ادامه می‌یابد تا زمانی که حباب درون خود فرومی‌ریزد. این فروریزش<sup>۱</sup> باعث افزایش فشار داخل حباب گاز می‌شود که دوباره فرایند انبساط حباب گاز در پالس دوم شروع خواهد شد (برگشت حباب<sup>۲</sup>). مدت‌زمان فروریزش-برگشت پالس اول بسیار بیشتر از زمان فروریزش-برگشت پالس‌های بعدی است. به عبارتی دیگر هنگامی که فشار درونی حباب از فشار محیط بیشتر می‌شود، فرایند انبساط دوم (برگشت) در زمان بسیار کوتاهی اتفاق می‌افتد که همین امر سبب انتشار موج شوک دوم می‌شود [۵] (شکل ۳). به این حالت تپش (پالس) می‌گویند. مدت‌زمان پالس بستگی به جرم خرج و عمق انفجار دارد و با رابطه (۱) توصیف می‌شود:

$$T_{\text{puls}}(s) = 0.3 \frac{\sqrt[3]{m}}{1 + 0.1H'} \quad (1)$$

که  $m$  جرم معادل TNT خرج و  $H'$  عمق انفجار از سطح آزاد است. پالس تا زمانی که حباب به سطح آزاد بیاید ادامه می‌یابد. زمان پالس دوم حدود ۷۰٪ و زمان پالس سوم حدود ۵۰٪ پالس اول است. پارامتر مهمی که نوع انفجار را طبقه‌بندی می‌کند شعاع حباب گاز است. اگر حباب گاز در تماس با سطح بدنه باشد، این نوع انفجار یک انفجار تماس نزدیک<sup>۳</sup> است. پیش‌بینی و محاسبه اثرات چنین انفجاری با استفاده از روش‌های عددی دشوار است، به همین دلیل، بیشتر نشریات به انفجارهای غیر تماسی<sup>۴</sup> اشاره می‌کنند. باین‌وجود، برخی فرمول‌های تجربی وجود دارد که می‌توان قطر حباب گاز تشکیل‌شده پس از انفجار را محاسبه کرد. رابطه (۲) حداکثر شعاع حباب گاز در پالس اول را توصیف می‌کند.

$$R_{pmax}(m) = 1.53 \sqrt[3]{\frac{m}{1 + 0.1H'}} \quad (2)$$

بر اساس رابطه (۲)، شعاع حباب گاز بسته به عمق انفجار محاسبه‌شده است. نمودار (شکل ۴) نشان می‌دهد که در عمق کمتر از ۱۰ متر، شعاع حباب بیش از عمق انفجار است که منجر به آزاد شدن گازهای انفجاری در جو می‌شود.

<sup>۱</sup> Collapse

<sup>۲</sup> Rebound

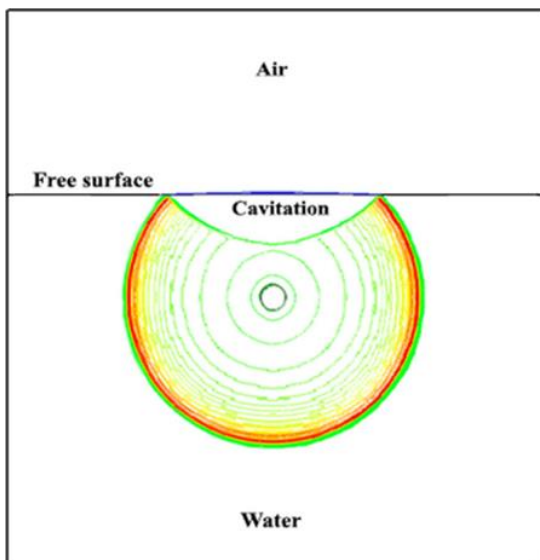
<sup>۳</sup> Close-Contact Explosion

<sup>۴</sup> Non-Contact Explosion

آب<sup>۵</sup> نیز شناخته می‌شود [۷]. پس از یک فاصله طولانی (در مرتبه میلی‌ثانیه) پالس ثانویه ساطع شده از حباب گاز توسط ورق احساس می‌شود. نمودار فشار-زمان یک ورق با پشتی هوا در معرض انفجار زیر آب در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل ۶ مشاهده می‌شود، بارگذاری مجدد اسپری در مقایسه با پالس اولیه تقریباً ناچیز است؛ درحالی‌که بارگذاری مجدد چکش آب شدیدتر است [۸]. برای اینکه بارگذاری مجدد اتفاق بیفتد، آب بالای خرج باید بیش از نصف فاصله استقرار باشد. مرحله بارگذاری مجدد نسبت به پالس اولیه مقدار بیشتری از انرژی را به ورق می‌رساند. اثر بارگذاری مجدد هنگامی که عمق انفجار دو برابر فاصله استقرار است، به حداکثر می‌رسد [۹].

### ۳-۲-۳- تحلیل نحوه انتشار موج به صورت گرافیکی

پس از انفجار، موج شوک به صورت کروی انتشار می‌یابد و در کسری از ثانیه حجم کره به بیشترین میزان خود خواهد رسید [۱۰]. در شکل ۷ نمایی شماتیک از نحوه انتشار موج در زمان‌های مختلف نشان داده شده است. در این شکل رنگ قرمز نشان‌دهنده بیشینه فشار المان‌های آب (در این کار تا ۵۰۰ مگاپاسکال بود) و رنگ آبی نشان‌دهنده کمینه فشار



شکل ۵- پروفایل کاویتاسیون در نزدیکی سطح آزاد [۶]

بعلاوه، حتی برای یک بار انفجاری ۵۰۰ کیلوگرمی در همان عمق، حباب گاز از ۱۰ متر بیشتر نیست. به عبارتی دیگر در منفجر شدن یک بار با عمق بیش از ۱۰ متر، بدون توجه به جرم ماده منفجره، یک انفجار غیر تماسی وجود دارد [۴].

### ۳-۲-۲- کاویتاسیون<sup>۱</sup>

انفجار زیر آب یک پدیده فیزیکی پیچیده در نزدیکی مرزها است. به محض شروع بارگذاری، موج شوک به سمت مرزها انتشار می‌یابد. موج شوک به دو نوع مرز نزدیک می‌شود یکی سطح آزاد است و دومی مرزهای اندرکنش سازه-سیال<sup>۲</sup> است. هنگامی که موج شوک به مرز سطح آزاد می‌رسد، بخشی از موج شوک از طریق سطح مشترک دو سیال عبور می‌کند و انرژی باقیمانده درون آب منعکس می‌شود. انعکاس موج شوک در آب به نوبه خود امواج رقیق<sup>۳</sup> ایجاد می‌کند. از آنجا که آب قادر به نگاه داشتن مقدار قابل توجهی از کشش نیست، درجایی که فشار شوک به زیر فشار محیط آب می‌رسد، کاویتاسیون شروع می‌شود (شکل ۵). از طرف دیگر، در مرز اندرکنش سازه-سیال، بازتاب موج شوک یک موج فشاری ایجاد می‌کند. این موج فشاری با موج شوک اصلی ادغام می‌شود. از آنجا که آب قادر به نگاه داشتن مقدار قابل توجهی از کشش نیست، درجایی که فشار شوک به زیر فشار محیط آب می‌رسد، کاویتاسیون شروع می‌شود (شکل ۵). از طرف دیگر، در مرز اندرکنش سازه-سیال، بازتاب موج شوک یک موج فشاری ایجاد می‌کند. این موج فشاری با موج شوک اصلی ادغام می‌شود [۶].

در بیانی دیگر موج کششی هنگام انعکاس موج شوک از ورق، سبب شکستگی آب شده که تشکیل کاویتاسیون را به همراه خواهد داشت. بازتاب چندگانه موج کششی بین منطقه کاویتاسیون و سطح ورق باعث ایجاد بیش فشارهای چندگانه می‌شود که به بارگذاری مجدد اسپری<sup>۴</sup> معروف هستند. محدوده فضای کاویتاسیون با اندرکنش حباب گاز، سبب بارگذاری مجدد می‌شود که به عنوان بارگذاری مجدد چکشی

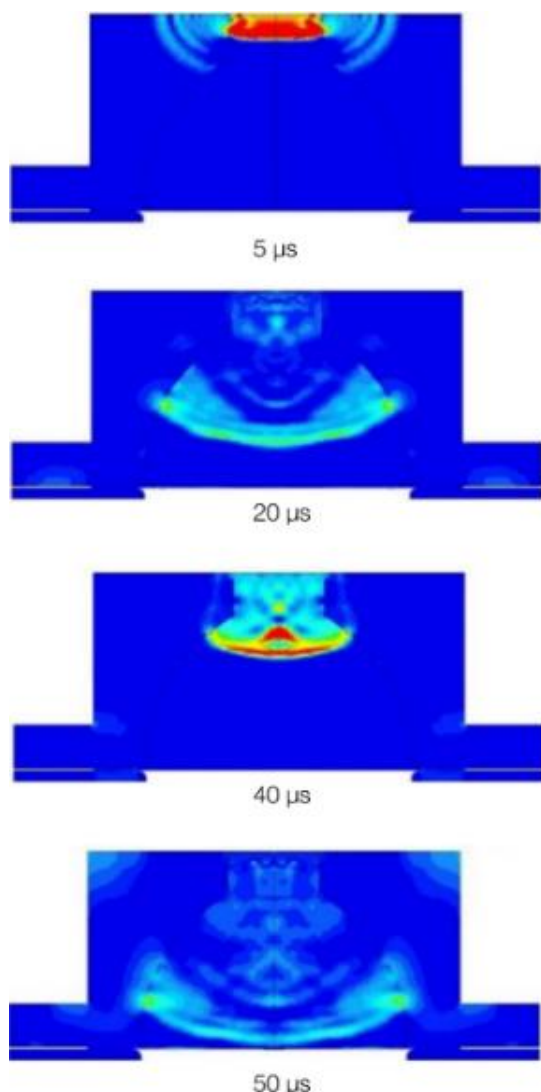
<sup>1</sup> Cavitation

<sup>2</sup> Fluid-Structure Interaction (FSI)

<sup>3</sup> Rarefaction Wave

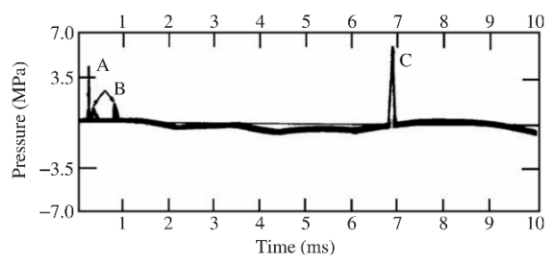
<sup>4</sup> Spray Reloading

<sup>5</sup> Water Hammer Reloading

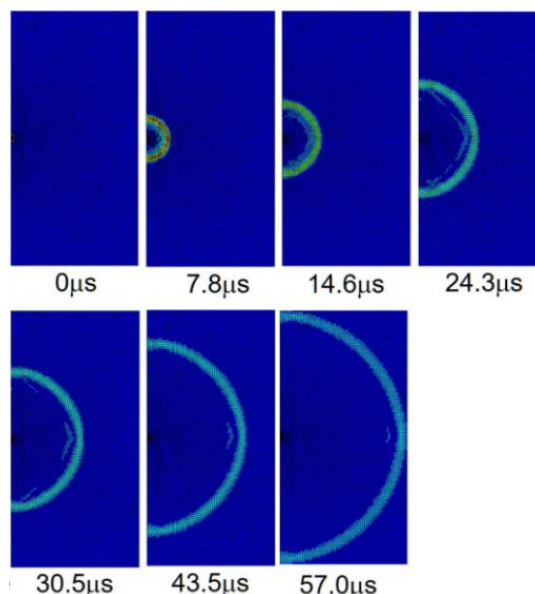


شکل ۸- کانتور فشار در مخزن فشار سهموی [۱۱]

که اثر حباب فراوان باشد، آنگاه به طور کلی می‌توان گفت که در فرایند انفجار زیر آب، یک موج اولیه شوک در ابتدا تشکیل می‌شود و به سرعت از طریق آب پخش می‌شود و سپس یک حباب با درجه حرارت بالا و فشار بالا ایجاد می‌شود. در شکل ۱۰ نحوه انتشار موج شوک اولیه در محیط و موج شوکی که از مرزهای مشترک سطح حباب با حوزه سیال منعکس می‌شود، نشان داده شده است. موج شوک اولیه توسط انفجار خرج تولید می‌شود و فقط برای چند میکروثانیه حفظ می‌شود. از آنجاکه سرعت انتشار موج شوک بسیار بیشتر از انبساط حباب است، مشاهده می‌شود که موج شوک اولیه



شکل ۶- اثرات بارگذاری مجدد: (A) پالس شوک اولیه، (B) بارگذاری مجدد اسپری و (C) بارگذاری مجدد اصلی [۸]



شکل ۷- شماتیک انتشار موج شوک در محیط واسط آب پس از انفجار ماده منفجره [۳]

المان‌های آب است [۳]. نحوه انتشار موج و انعکاس آن تا حد بسیار زیادی وابسته به هندسه مخزن فشار است. به‌عنوان مثال در شکل ۸ اگر هندسه مخزن سهموی باشد، در ابتدا، فشار در قسمت مرکزی بیشتر است و فشار بر روی سطح دیواره مخزن فشار قبل و بعد از رسیدن موج شوک در بالای نمونه زیاد است، زیرا منطقه انتشار موج شوک گسترده‌تر از مخزن فشار هذلولی است و فشار در قسمت مرکزی کاهش می‌یابد. در مخازن فشار هذلولی، موج فشار منعکس شده توسط سطح دیواره مخزن فشار تحت تأثیر قرار می‌گیرد و فشار در قسمت مرکزی کاهش نمی‌یابد، به عبارتی دیگر فشار در قسمت مرکزی همواره زیاد است (شکل ۹) [۱۱]. اگر طبق مطالب ذکر شده در قبل ارتفاع به‌گونه‌ای باشد

است. موج فشار گرچه تحت تأثیر موج شوک ورودی<sup>۱</sup> است، اما تغییر قابل توجهی در انبساط حباب‌ها مشاهده نمی‌شود و موج فشار سیبی شکل، ایجاد شده توسط ترکیب موج انعکاس<sup>۲</sup> و موج انکساری<sup>۳</sup> اطراف حباب، مشاهده می‌شود (قاب ۵). پس از آن، موج شوک ورودی به مرز حوزه سیال می‌رسد و نسبت کمی از موج را به سطح حباب منعکس می‌کند (قاب ۶)، اگرچه شرایط مرزی غیر انعکاسی قبلاً در این مدل تنظیم شده بود. شایان ذکر است که اثر ادغام ناشی از موج شوک ورودی و انعکاسی ممکن است، باعث ایجاد کاویتاسیون در میدان سیال شود [۱۲].

### ۳- روابط تحلیلی مرتبط با شکل‌دهی انفجاری

#### زیرآب

#### ۳-۱- بررسی روابط تحلیلی بیش‌فشار و ضربه ناشی از فشار

ازرا و همکاران [۱۳] بایان بیش‌فشار P تولیدشده در محیط واسط آب به ارائه رابطه (۳) جهت محاسبه بیش‌فشار پرداختند:

$$P = k \left[ \frac{w^2}{R} \right]^a \quad (3)$$

که P بیش‌فشار برحسب پوند بر اینچ مربع، k مقدار ثابتی است که بستگی به ماده منفجره دارد (۲۱۶۰۰ برای TNT)، w وزن ماده منفجره برحسب پوند، R فاصله‌ی ماده منفجره از نمونه برحسب پا و a یک مقدار ثابتی است که عموماً برابر ۱/۵ در نظر گرفته می‌شود [۱۳].

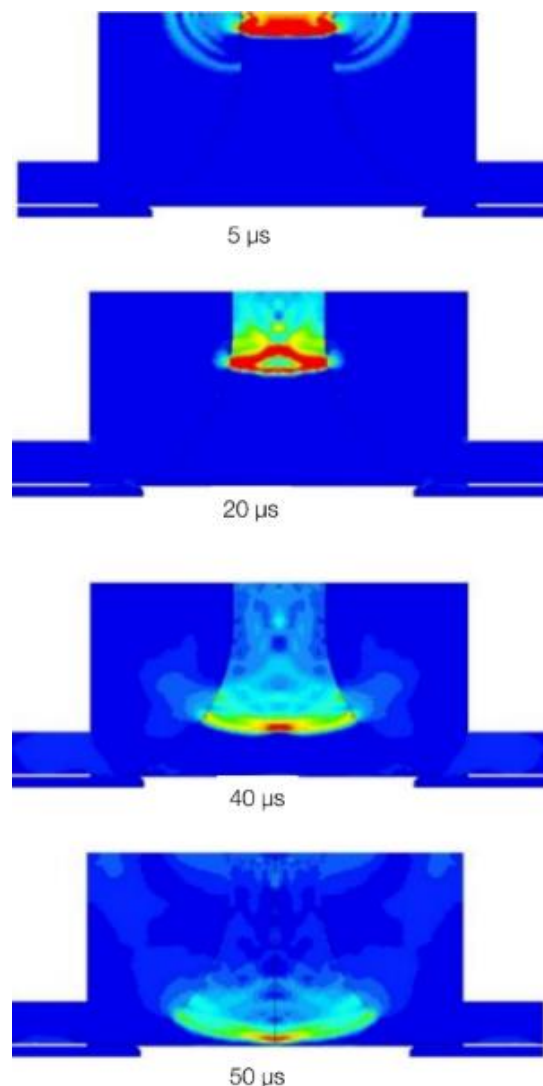
کول و ولر [۱۴] رابطه فشار ناشی از انفجار زیرآب را برای مقادیر ۷۰-۱۳۶ کیلوگرم TNT به شرح زیر آورده‌اند:

$$P_{max} = 52.3 \left( \frac{\sqrt[3]{m}}{r} \right)^{1.13} \quad (4)$$

$$p(t) = P_{max} \cdot e^{-\frac{t}{\theta}} \quad (5)$$

$$\theta = 0.093 \sqrt[3]{m} \left( \frac{\sqrt[3]{m}}{r} \right)^{-0.22} \quad (6)$$

بسیار دور از مرکز حباب در مرحله اولیه پالس حباب گسترش می‌یابد، همان‌طور که به‌وضوح در قاب ۲ نشان داده شده است. در  $t = 0.013$  میلی‌ثانیه (قاب ۳)، امواج شوک ایجادشده توسط حباب بالایی و حباب پایین با یکدیگر روبرو می‌شوند و این باعث افزایش دامنه فشار در ناحیه ادغام می‌شود و به مقداری بسیار بالاتر از بالاترین فشار انفرادی در قاب ۲ می‌رسد. موج شوک همچنان گسترش می‌یابد تا به سطح حباب برسد و به‌صورت جزئی منعکس می‌شود، همان‌طور که در قاب ۴ در  $t = 0.025$  میلی‌ثانیه ارائه شده

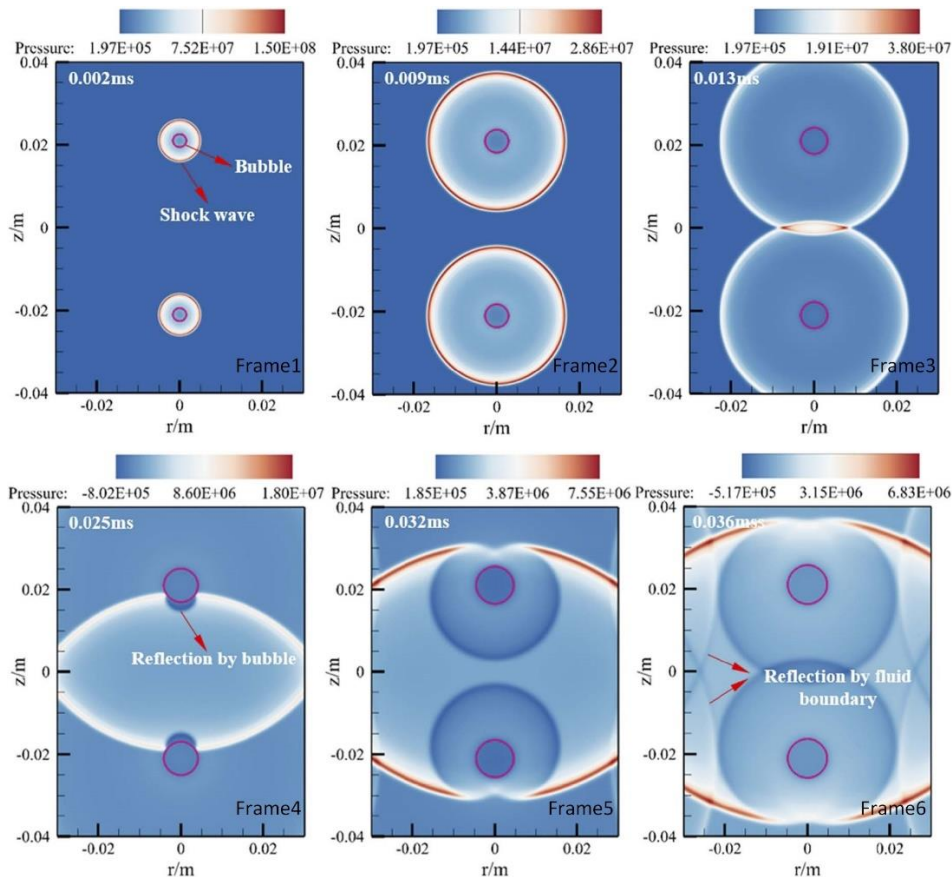


شکل ۹- کانتور فشار در مخزن فشار هذلولی [۱۱]

<sup>1</sup> Incident Shock Wave

<sup>2</sup> Reflection Wave

<sup>3</sup> Diffraction Wave



شکل ۱۰- کانتور فشار موج شوک و حباب [۱۲]

$$p(t) = P_{max} \cdot e^{-\frac{0.368\theta}{t}} \quad (11)$$

همچنین کیل [۷] روابط (۸) و (۹) را به صورت زیر اصلاح کرد:

$$p(t) = k_1 \cdot \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^{A_1} \cdot e^{-\frac{t}{\theta}} \quad (12)$$

$$\theta = k_2 \cdot \sqrt[3]{m} \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^{A_2} \quad (13)$$

که در آن‌ها  $k_1=148.93$ ،  $A_1=1.13$  و  $k_2=0.058$  و  $A_2=-0.22$  است.

همچنین رید [۱۶] ثابت‌های  $k_1$ ،  $A_1$ ،  $k_2$  و  $A_2$  در روابط (۱۲، ۱۳) را به صورت زیر اصلاح نمود:

$$K_1=52.12, A_1=1.18$$

$$K_2=0.092, A_2=-0.185$$

راجندران و ناراسیمهان [۱۷]، این ثوابت را به صورت زیر ارائه داد:

$$K_1=52.16, A_1=1.13$$

$$K_2=0.058, A_2=-0.22$$

که در روابط بالا  $P_{max}$  بیش فشار،  $p(t)$  فشار برحسب زمان،  $m$  جرم معادل TNT برحسب کیلوگرم (در بعضی از روابط قطر ماده منفجره را نشان می‌دهد)،  $r$  فاصله موردنظر برحسب متر،  $\theta$  ثابت زمانی برحسب میلی ثانیه و  $t$  زمان برحسب میلی ثانیه است اگر  $4 \leq \frac{\sqrt[3]{m}}{r} \leq 0.05$  باشد، آنگاه [۱۵]:

$$P_{max} = 52 \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^{1.19} \quad (7)$$

$$p(t) = P_{max} \cdot e^{-\frac{t}{\theta}} \quad (8)$$

$$\theta = 0.07 \sqrt[3]{m} \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^{-0.17} \quad (9)$$

استیپانو و همکاران [۱۵] با فرض  $\rho_{TNT} = 1600 \text{ kg/m}^3$  و

$$\theta \leq t \leq (5 - 10)\theta, 6 \leq \frac{r}{\sqrt[3]{\frac{3m}{4\pi\rho_{TNT}}}} \leq 12$$

روابط (۷) و (۸) را به صورت زیر اصلاح کردند:

$$P_{max} = 44 \left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)^{1.5} \quad (10)$$



بهتر این فرایند شماتیک سه‌بعدی آن در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

دشپانده و همکاران [۲۲] رابطه‌ی زیر را به‌منظور تشریح اندرکنش سازه-سیال شرح دادند:

$$I_0 = 2 \int_0^{\infty} P_0 e^{-\frac{t}{\theta}} dt = 2P_0\theta \quad (18)$$

$$P_0 = c_w \rho_w V_0$$

$$\theta = \frac{m_p}{c_w \rho_w} \quad (19)$$

که در آن  $I_0$  ضربه کامل روی ورق با در نظر داشتن انعکاس موج،  $P_0$  بیش‌فشار ضربه است،  $\theta$  زمان فروپاشی،  $c_w$  سرعت صوت در آب،  $\rho_w$  چگالی آب،  $V_0$  سرعت اولیه پرتابه و  $m_p$  جرم پرتابه است.

### ۳-۲- بررسی روابط تحلیلی برای پیش‌بینی بیشترین خیز دائمی

راجندران و ناراسیمهان [۲۳] برای پیش‌بینی خیز ورق تک لایه دایره‌ای از مقدار انرژی شوک ورودی،  $E_{in}$ ، با توجه به جزئیات ماده منفجره، روابط را به‌صورت زیر ارائه دادند:

$$E_{in} = WE_{TNT} E_{qTNT} \quad (20)$$

که  $E_{in}$  انرژی ورودی بر واحد ژول،  $W$  جرم خرج برحسب کیلوگرم، محتوای انرژی TNT برحسب کیلوکالری بر کیلوگرم،  $J$  ضریب تبدیل انرژی در واحدهای کاری و  $E_{qTNT}$  جرم معادل TNT برای خرج استفاده‌شده است. از آنجایی که تغییر شکل بزرگ تحت تأثیر کشش غشایی است، کار انجام‌شده توسط خمش پلاستیک نادیده گرفته شده است. اثر گودی محلی<sup>۴</sup> نیز به‌عنوان یک تقریب حذف شده است. همچنین فرض بر این است که ورق دچار تغییر شکل کروی شده است. برای تغییر شکل کروی:

$$(2\rho - \delta)\delta = R^2 \quad (21)$$

همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود،  $\rho$  شعاع کره،  $\delta$  عمق رأس و  $R$  شعاع ورق است [۲۳].

از معادله (۲۱) رابطه (۲۲) به دست می‌آید:

$$\rho = \frac{R^2}{2\delta} + \frac{\delta}{2} \quad (22)$$

همچنین مینگ و همکاران [۱۸] ثابت‌های  $k_1$ ،  $A_1$ ،  $k_2$  و  $A_2$  در روابط (۱۲، ۱۳) را به‌صورت زیر اصلاح نمودند:

$$K_1=29.9, A_1=1.81 \\ K_2=0.058, A_2=-0.22$$

کول و ولر [۱۴] جهت محاسبه ضربه بر واحد سطح ناشی از بارگذاری انفجاری در طول زمان رسیدن<sup>۱</sup>  $(t+)$  رابطه (۱۴) را ارائه دادند:

$$I = \int_0^t p(t) dt \quad (14)$$

اگر نقطه انفجار در اعماق آب باشد، به‌طوری‌که فشار هیدرواستاتیکی بسیار زیاد باشد، در رابطه (۱۴)  $p(t)$  به  $p(t)-\gamma h$  تغییر می‌کند. مقدار ضربه تا  $t=6.7\theta$  به‌صورت زیر خواهد بود:

$$I \left[ \frac{N \cdot s}{m^2} \right] = 5760 w^{1/3} \left( \frac{w^{1/3}}{s} \right)^{0.891} \quad (15)$$

که در آن  $w$  معادل جرم TNT برحسب کیلوگرم و  $S$  مکان استقرار برحسب متر است.

گاهی به‌منظور ایجاد امواج شوک زیرآب از اندرکنش سازه-سیال استفاده می‌شود (شکل ۱۱). در این فرایند یک پرتابه با سرعت بالا به سطح آب برخورد می‌کند و موج ضربه را وارد محیط آب می‌نماید. آب توسط یک مخزن با هندسه‌های متفاوت احاطه‌شده است که در انتهای مخزن فشار با نمونه در تماس است [۱۹]. دای و همکاران [۲۰] به‌منظور تشریح فشار و ضربه ایجادشده در یک مجموعه اندرکنش سازه-سیال (FSI) از روابط زیر استفاده نموده‌اند:

$$p_{max} = \frac{sf}{s+f} V_0 \left( \frac{D}{D_x} \right)^2 \quad (16)$$

$$I_{max} = \sum_0^{\infty} p_{max} \left[ \frac{s-f}{s+f} \right]^n \Delta t \quad (17)$$

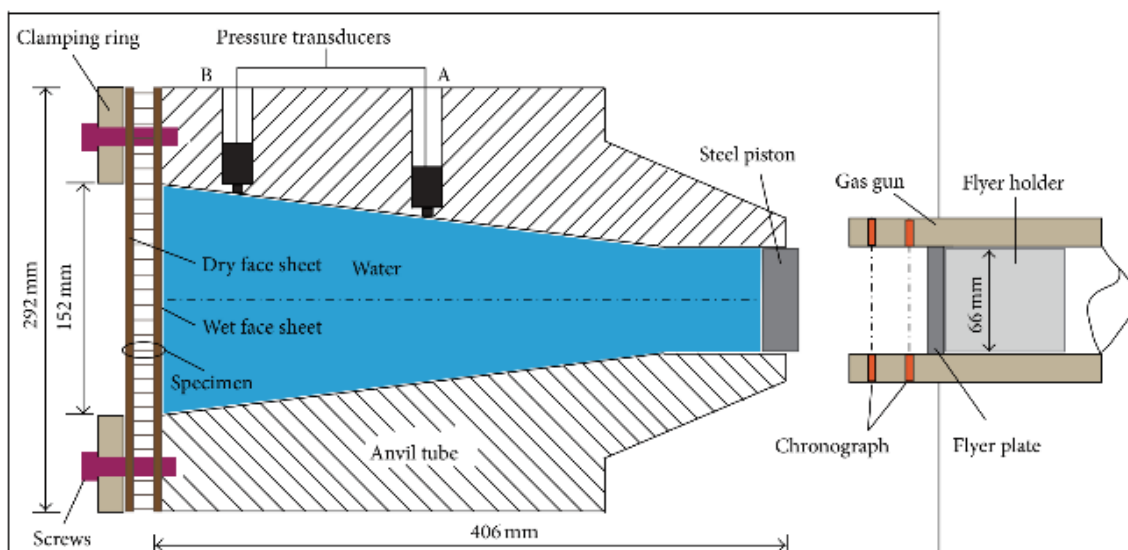
که  $p_{max}$  بیش‌فشار،  $I_{max}$  ضربه موج شوک،  $f$  و  $s$  مقادیر امیدانس آکوستیک سیال و سازه،  $V_0$  سرعت برخورد پرتابه،  $D$  قطر لوله در محل تماس با نمونه و  $D_x$  قطر لوله در یک مقطع موردنظر است و  $n$  تعداد طنین‌اندازه‌های<sup>۲</sup> موج در ورق پرتاب‌شونده<sup>۳</sup> است و  $\Delta t$  زمان موردنیاز موج طولی الاستیک است تا دو بار ورق پرتاب‌شونده را طی کند. به منظور درک

<sup>1</sup> Time Arrival

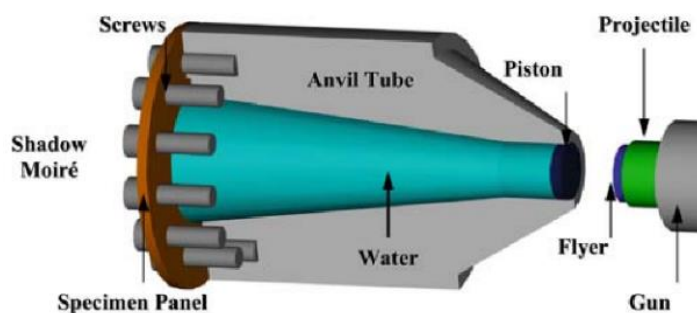
<sup>2</sup> Reverberations

<sup>3</sup> Flyer Plate

<sup>4</sup> Local Dimpling



شکل ۱۱- پیکربندی تجربی فرایند اندرکنش سازه-سیال (FSI) [۲۱]



شکل ۱۲- شماتیک سه‌بعدی فرایند اندرکنش سازه-سیال [۱۹]

آن‌طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است. با کم کردن مساحت دایره از مساحت کره:

$$A_1 = 2\pi r\delta \quad (25)$$

با جایگذاری معادله (۲۴) در معادله (۲۳)، انرژی تغییر شکل،  $E_{def}$ ، به صورت زیر به دست می‌آید:

$$E_{def} = \pi \sigma_y t \delta^2 \quad (26)$$

انرژی تغییر شکل را می‌توان برحسب تابعی از انرژی شوک ورودی به صورت رابطه (۲۷) نوشت:

$$E_{def} = \eta E_{in} \quad (27)$$

که در آن  $\eta$  عامل کسری است که از انرژی انفجاری به انرژی تغییر شکل ورق تبدیل شده است. آن‌ها نهایتاً با نوشتن کرنش‌های اصلی برحسب  $R$  در شکل ۱۵، در نهایت به روابط زیر دست یافتند:

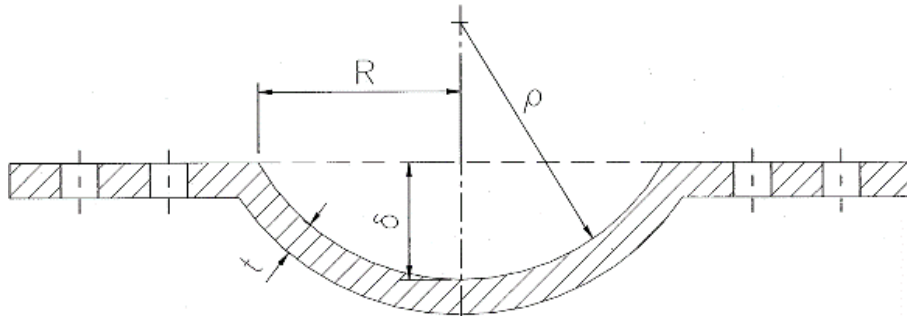
فرض بر این است که مواد ورق تا به دست آمدن نقطه تسلیم به مقدار ناچیزی تغییر شکل دهند و این تغییر شکل بدون افزایش بیشتر تنش به صورت پلاستیکی جریان یابد. به عبارت دیگر، فرض بر این است که هیچ سختی کرنشی رخ نمی‌دهد. برای یک ورق دایره‌ای تحت کشش مانند یک غشای پلاستیکی صلب<sup>۱</sup>، کار انجام‌شده به صورت زیر داده شده است:

$$W_{def} = \sigma_y t \Delta A \quad (23)$$

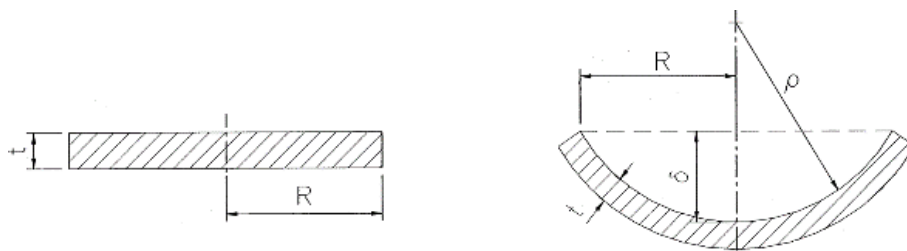
که  $t$  ضخامت ورق،  $\sigma_y$  تنش تسلیم استاتیکی و  $\Delta A$  افزایش مساحت است. مساحت سطح کروی،  $A_1$ ، برابر است با:

$$A_1 = 2\pi r\delta \quad (24)$$

<sup>1</sup> Rigid Plastic Membrane



شکل ۱۳- نمایش شماتیک تغییر شکل کروی ورق دایره‌ای [۲۳]



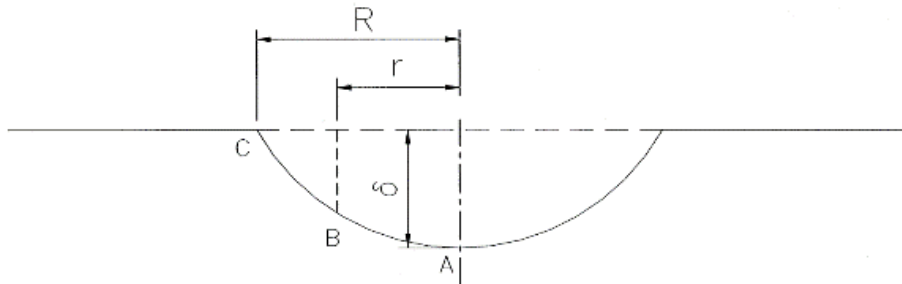
$$A_1 = 2\pi\rho\delta$$

$$A_0 = \pi R^2$$

$$\Delta A = A_1 - A_0 = 2\pi\rho\delta - \pi R^2 = 2\pi\left(\frac{R}{2\delta} + \frac{\delta}{2}\right) - \pi R^2$$

$$\Delta A = \pi\delta^2$$

شکل ۱۴- نمایشی شماتیک از تغییر در مساحت ورق دایره‌ای در طی تغییر شکل کروی [۲۳]



$$\epsilon_{1A} = \epsilon_{2A} = \frac{\delta^2}{R^2} \quad ; \quad \epsilon_{1B} = \epsilon_{2B} = \frac{\delta^2}{R^2} \left(1 - \frac{\delta^2}{R^2}\right) \quad ; \quad \epsilon_{1C} = \epsilon_{2C} = 0$$

شکل ۱۵- نمایش شماتیک توزیع کرنش‌ها در طول شعاع ورق دایره‌ای [۲۳]

که  $\epsilon_f$  کرنش شکست تک‌محوره و از آزمون کشش تک‌محوری ارزیابی می‌شود.  
 جونز [۲۴] در سال ۱۹۸۹ رابطه (۳۰) را برای بیشترین خیز ورق دایره‌ای شرح داد:

$$R = \sqrt{\frac{2\eta W E_{TNT} E_{qTNT} J}{\pi t \sigma_y \epsilon_f}} \quad (28)$$

$$\delta^2 = R^2 \frac{\epsilon_f}{2} \quad (29)$$

$$\left(\frac{\delta}{t}\right)_c = 0.541\varphi_c - 0.433 \quad (38)$$

که  $\varphi_c$  عدد بی‌بعد نوریک و اسمیت است.

### ۳-۳- بررسی روابط بی‌بعد برای تحلیل خروجی مسئله

رابطه عدد بی‌بعد آسیب،  $\varphi_c$  که توسط نوریک و اسمیت [۲۹] محاسبه شد، به صورت زیر است:

$$\varphi_c = \frac{I_{tot}}{\pi R t^2 \sqrt{\rho \sigma_0}} \quad (39)$$

همچنین جانسون [۳۰] عدد بی‌بعد آسیب را به شرح زیر بیان کرد:

$$\alpha = \frac{\rho V_0^2}{\sigma} \quad (40)$$

که  $V_0$  سرعت اولیه برخورد،  $\rho$  چگالی مواد و  $\sigma$  تنش تسلیم استاتیکی مواد است. عدد بی‌بعد آسیب جانسون مستقل از هندسه ساختار و شرایط بارگذاری هستند. عدد بی‌بعد آسیب برای ورق‌های دایره‌ای،  $\varphi_c$ ، و ورق‌های چهارگوش،  $\varphi_q$ ، تحت بارگذاری یکنواخت توسط نوریک و مارتین [۳۱] گزارش شده است:

$$\varphi_c = \frac{I(1 + \ln(\frac{R}{R_0}))}{\pi R H^2 (\rho \sigma_0)^{0.5}} \quad (41)$$

$$\varphi_q = \frac{I}{2H^2 (b l \rho \sigma_0)^{0.5}} \quad (42)$$

که  $R$  شعاع ورق،  $R_0$  شعاع خرج،  $b$  عرض ورق،  $l$  طول ورق و  $H$  ضخامت ورق است.

راجندران و همکاران [۳۲] رابطه زیر را برای ورق‌های چهارگوش ارائه داد:

$$\left(\frac{\delta}{t}\right)_q = 0.553\varphi_q + 0.741 \quad (43)$$

ژائو [۳۳] عدد بی‌بعد پاسخ را به صورت زیر تشریح کرد:

$$R_n = \frac{\rho V_0^2}{\sigma_0} \left(\frac{L}{H}\right)^2 \quad (44)$$

که  $L$  نصف طول ورق و  $H$  ضخامت ورق است.  $R_n$ ، عدد جانسون و  $\lambda$  با یک ضریب ثابت باهم دیگر رابطه دارند:

$$R_n = \frac{1}{4}\lambda \quad (45)$$

برای پیش‌بینی انحراف عرضی نقطه میانی ورق‌های چهارگوش که تحت بارگذاری انفجاری یکنواخت قرار می‌گیرند جونز [۲۴] رابطه زیر را ارائه داد:

$$\delta = \frac{P_0 \tau^2 \left(\frac{3P_0}{2P_c} - 1\right)}{2\mu} \quad (30)$$

که در آن  $P_0$  پالس فشار تخت ساده در دوره زمانی  $t_1$ ،  $P_c$  فشار فروریزش استاتیکی ( $P_c = 6M_0/R^2$ )،  $\mu$  جرم بر واحد سطح است. در مواردی که  $P_0 \gg P_c$  و  $t_1 \rightarrow 0$  باشد، جایجایی نهایی به صورت زیر است:

$$\frac{\delta}{h} = \frac{\mu V_0^2 R^2}{8M_0 h} \quad (31)$$

که  $M_0$ ،  $R$ ،  $h$  به ترتیب شعاع، بیشینه ممان خمشی و ضخامت ورق هستند.  $V_0$  سرعت یکنواخت ورق است که با استفاده از قانون پایداری ممان به صورت رابطه (۳۲) محاسبه می‌شود:

$$\mu V_0 = P_0 t_1 \quad (32)$$

فلورنس [۲۵] و هاپکینس و ونگ [۲۶] معادله (۳۱) را برای ورق‌های دایره‌ای کاملاً گیردار اصلاح کردند:

$$\frac{\delta}{t} = \frac{0.84\mu V_0^2 R^2}{12M_0 t} \quad (33)$$

در رابطه (۳۳) ضخامت ورق است. این معادلات برای تغییر شکل‌های بزرگ معتبر نیستند؛ زیرا اثر نیروهای غشایی نادیده گرفته شده است.

شکل تصحیح شده معادلات بالا برای در نظر گرفتن تغییر شکل‌های بزرگ ورق‌های دایره‌ای کاملاً گیردار به صورت زیر است [۲۷]:

$$\frac{\delta}{t} = \frac{[1 + 2\lambda/3]^{0.5} - 1}{2} \quad (34)$$

$$\lambda = \frac{4\rho V_0^2 R^2}{H^2 \sigma_0} \quad (35)$$

که  $\rho$  چگالی،  $\sigma_0$  تنش تسلیم و  $H$  ضخامت ورق است. ویرزیچی و سیموندز [۲۸] رابطه (۳۴) را بر اساس نتایج تجربی به صورت زیر اصلاح کردند:

$$\frac{\delta}{t} = 1.0186[2\rho V_0^2 R^2 / 3\sigma_0 t^2] \quad (36)$$

سمیت و همکاران [۲۹] همچنین یک رابطه تجربی برای پیش‌بینی حداکثر تغییر شکل ورق دایره‌ای کاملاً گیردار ارائه داد:

$$\left(\frac{\delta}{t}\right)_c = 0.425\varphi_c + 0.227 \quad (37)$$

راجندران و ناراسیمهان [۱۷] رابطه (۳۷) را به صورت زیر تصحیح نمودند:

$$\frac{d_e}{d_t} = \frac{\sigma}{\rho} \nabla \cdot u \quad (52)$$

که  $\rho_0, V_0, m$  و  $\sigma$  به ترتیب چگالی اولیه، حجم اولیه، جرم و تانسور تنش کل هستند. قسمت مایع با روش اویلری حل می‌شود. در روش اویلری، با فرض غیر لزج بودن مایع، روند انفجار آدیاباتیک است و نیروی‌های جسمی نادیده گرفته می‌شوند. پس معادلات حاکم را می‌توان چنین نوشت:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (53)$$

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla P \quad (54)$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho E u) = -\nabla \cdot (P) \quad (55)$$

که  $\rho$  چگالی،  $u$  سرعت،  $E$  انرژی کل،  $P$  فشار،  $\rho u$  شار جرم،  $\rho u u$  شار حرکت و  $\rho E u$  شار انرژی است.

#### ۴- روش‌های شبیه‌سازی در حوزه انفجار زیر آب

در این بخش ابتدا به تحلیل برخی از معادلات حالت پرکاربرد جهت پیش‌بینی خروجی‌های فرایند انفجار پرداخته خواهد شد، سپس انواع روش‌های شبیه‌سازی با مزایا و معایب آن‌ها ذکر می‌گردد.

##### ۴-۱- معادلات حاکم

چندین معادله حالت برای توصیف فشار و انبساط محصولات گازی تولیدشده 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 [۳۵]. معادله حالت JWL به شرح زیر است:

$$P = A \left( 1 - \left( \frac{\omega}{R_1 V} \right) \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \left( \frac{\omega}{R_2 V} \right) \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (56)$$

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.

$$\frac{\delta}{H} = \frac{(3 - \zeta_0) \left\{ \left[ 1 + \frac{1}{6} \lambda \zeta_0^2 (1 - \zeta_0) + \frac{1}{2 - \zeta_0} \right]^{0.5} - 1 \right\}}{\{ 2[1 + (\zeta_0 - 1)(\zeta_0 - 2)] \}} \quad (46)$$

که  $\zeta_0 = \frac{B}{L} \tan \varphi$  و  $\varphi = -\frac{B}{L} + \left[ 3 + \left( \frac{B}{L} \right)^2 \right]^{0.5}$  و  $B$  نصف عرض ورق است. ژائو [۳۳] رابطه‌ی (۴۶) را به صورت زیر ارائه داد:

$$\frac{\delta}{H} = \frac{(3 - \zeta_0) \left\{ \left[ 1 + \frac{2}{3} R_n (3 - 2\zeta_0)(1 - \zeta_0 + \frac{1}{2 - \zeta_0}) \right]^{0.5} - 1 \right\}}{\{ 2[1 + (\zeta_0 - 1)(\zeta_0 - 2)] \}} \quad (47)$$

نوریک و مارتین [۳۱] برای ورق‌های چهارگوش تحت

بارگذاری یکنواخت رابطه تجربی (۴۸) را ارائه دادند:

$$\frac{\delta}{H} = 0.48 \varphi_q + 0.227 \quad (48)$$

که  $\varphi_q$  عدد بی‌بعد در رابطه (۴۲) است.

#### ۳-۴- بررسی روابط موجود برای تحلیل انتشار موج [۳۴]

رفتار دینامیکی آب توسط معادلات حالت<sup>۱</sup> برای محیط مایع، که بر اساس رابطه هوگونیت<sup>۲</sup> ارائه شده است، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$U = C_1 + S_1 U_p \quad (49)$$

که  $U$  سرعت برخورد (ضربه)،  $U_p$  سرعت ذرات،  $C_1$  و  $S_1$  ثوابت خواص مواد محیط واسط هستند که به ترتیب برای آب ۱/۷۵ و ۱۴۸۳ است. در روش اویلری ماده‌ای که به المان مش نسبت داده شده است به درون المان‌ها تزریق می‌شود؛ در حالی جرم المان ثابت می‌ماند؛ اما در روش لاگرانژی، با توجه به موقعیت گره،  $x = (x, y, z)$ ، سرعت گره،  $u$ ، چگالی المان،  $\rho$ ، حجم المان،  $V$ ، انرژی داخلی،  $e$ ، معادلات حاکم به صورت زیر خواهد بود:

$$\rho = \frac{\rho_0 V_0}{V} = \frac{m}{V} \quad (50)$$

$$\rho \frac{d_u}{d_t} = \nabla \cdot \sigma \quad (51)$$

<sup>۱</sup> Equation of State (EOS)

<sup>۲</sup> Hognit

(۱) پاسخ فرکانس پایین، با آن دسته از طول‌موج‌های سازه‌ای مشخص می‌شود که به‌طور قابل‌توجهی کوتاه‌تر از طول‌موج صوتی مرتبط هستند. سیال خارجی موجود بر روی سازه، جرم مؤثری را به سازه روی سطح مشترک اضافه می‌کند.

(۲) پاسخ فرکانس بالا با آن دسته از طول‌موج‌های سازه‌ای مشخص می‌شود که به‌طور قابل‌توجهی طولانی‌تر از طول‌موج‌های صوتی مرتبط هستند. سیال خارجی روی سازه به‌عنوان یک مکانیزم میرایی ساده عمل می‌کند، جایی که انرژی از طریق تابش صوتی به خارج از سازه منتقل می‌شود.

(۳) پاسخ فرکانس متوسط با آن دسته از طول‌موج‌های سازه‌ای مشخص می‌شود که از نظر طول شبیه به طول‌موج‌های صوتی مرتبط هستند. در این رژیم فرکانسی، سیال خارجی هم یک جرم اضافه و هم یک اثر میرایی تابشی روی سازه دارد.

موج فشار کروی مربوط به یک بارگذاری شوک آندکس با یک جبهه بسیار تند مشخص می‌شود که در آن حداکثر فشار در طول مدت‌زمان بسیار کوتاه (زمان افزایش) حاصل می‌شود. فشار در یک مدت‌زمان طولانی قابل‌توجه به‌طور تصاعدی کاهش می‌یابد؛ بنابراین، می‌توان انتظار داشت که بارهای شوک آندکس باعث تحریک ساختارهای غوطه‌ور شده در یک دامنه فرکانس بزرگ شود که شامل فرکانس‌های پاسخ کم، زیاد و متوسط است. مرزهای سیال خارجی باید برای اطمینان از پاسخ مناسب با فرکانس پایین، فاصله کافی از سازه را داشته باشند، درحالی‌که اندازه المان‌های صوتی باید به‌اندازه کافی کوچک باشد تا انتشار امواج صوتی با فرکانس بالا را به‌دور از ساختار غوطه‌ور نشان دهد [۳۹].

روش آندکس به‌طور خلاصه دارای مزیت‌های زیر است:

- مدل‌سازی آسان
- کاهش زمان پردازش حل‌گر نرم‌افزار و در نتیجه کاهش زمان تحلیل
- قابلیت مدل‌سازی دوبعدی

پارامتر " $\omega$ " بخش کسری انرژی<sup>۱</sup> (E) است که در فشار انفجاری سهیم است [۳۵ و ۳۶]. ضرایب رابطه (۵۶) برای برخی از مواد منفجره در جدول ۱ آمده است. به‌منظور تشریح فشار در آب از معادله حالت مای-گروئزن مطابق رابطه (۵۷) استفاده شده است:

$$P = \frac{\rho_0 c_0^2 \eta}{(1 - s\eta)^2} \left[ 1 - \frac{\eta \Gamma_0}{2} \right] \Gamma_0 \rho_0 e \quad (57)$$

که در آن چگالی اولیه،  $e$  انرژی درونی،  $\Gamma_0$  پارامتر Gruneisen،  $c_0$  سرعت صوت در محیط واسط،  $\eta = 1 - \frac{\rho_0}{\rho}$  و  $s$  ثابت وابسته به محیط واسط است؛ همچنین پارامترهای این معادله برای آب در جدول ۲ آورده شده است.

رابطه (۵۸) معادله جانسون - کوک را نشان می‌دهد که برای مدل کردن رفتار برخی از ورق‌های فلزی از آن استفاده می‌شود:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \varepsilon_p)(1 - T^{*m}) \quad (58)$$

که در آن  $\varepsilon$  معادل کرنش پلاستیک،  $\varepsilon_p$  نرخ کرنش پلاستیک،  $T^*$  نشان‌دهنده دمای مطلق است که توسط رابطه (۵۹) به دست می‌آید [۱۰]:

$$T^* = \frac{T - T_{\text{room}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}} \quad (59)$$

$A, B, C, m, n$  ثوابتی هستند که برای سه ماده مختلف در جدول ۳ آورده شده است؛ همچنین در جدول ۴ جرم معادل برای برخی از مواد منفجره نسبت به TNT نشان داده شده است.

در بخش بعدی این فصل به ارائه مختصر انواع روش‌های شبیه‌سازی شکل‌دهی انفجاری پرداخته می‌شود.

#### ۴-۲- روش‌های شبیه‌سازی متداول

##### ۴-۲-۱- روش آندکس<sup>۲</sup>

در مسائلی که یک سازه غوطه‌ور در آب است، یک کوپل قوی بین حرکات سازه و فشارهای صوتی بر روی سطح مشترک بین سیال و سازه وجود دارد. پاسخ سازه در یک سیستم صوتی-سازه کاملاً به‌هم‌پیوسته را می‌توان ترکیبی از موارد زیر توصیف کرد [۳۹]:

<sup>۱</sup> Fractional Part of the Energy

<sup>۲</sup> Underwater Explosion (UNDEX)

جدول ۱- خواص مکانیکی معادله حالت JWL [۳۵]

ویژگی ماده	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Detonation Wave speed (m/s)	A (GPa)	B (GPa)	R1 [-]	R2 [-]	$\omega$ [-]	E <sub>m</sub> (MJ/kg)
TNT	۱۶۳۰	۶۹۳۰	۳۷۱/۲	۳/۲۳۱	۴/۱۵۰	۰/۹۵۰	۰/۳	۴/۲۹۴
C4	۱۶۰۱	۸۱۹۳	۶۰۹/۸	۱۲/۹۵	۴/۵	۱/۴	۰/۲۵	۵/۶۲۱
PETN	۱۷۵۰	۷۵۳۰	۶۱۷	۲۱/۶	۴/۴	۱/۳۲	۰/۲۵	۵/۲۱۷
SEP	۱۳۱۰	۶۹۷۰	۳۶۴	۲۳/۱	۴/۳	۱	۰/۲۸	۲/۱۵

جدول ۲- پارامترهای معادله Mie-Gruneisen برای آب [۱۱]

$\rho_0$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_0$ (m/s)	s [-]	$\Gamma_0$ [-]
۱۰۰۰	۱۴۹۰	۱/۷۹	۱/۶۵

جدول ۳- ثوابت جانسون-کوک برای آلومینیوم، فولاد و مس [۳۷]

ضرایب جنس	A (MPa)	B (MPa)	C (MPa)	m [-]	n [-]
Al 7075	۵۲۷	۵۷۵	۰/۰۱۷	۱/۶۱	۰/۷۲
AISI-1045 steel	۵۵۳/۱	۶۰۰/۸	۰/۰۱۳۴	۱	۰/۲۳۴
Copper Cu-ETP	۹۰	۲۹۲	۰/۰۲۵	۱/۰۹	۰/۳۱

جدول ۴- جرم معادل مواد منفجره گوناگون نسبت به TNT [۳۸]

ماده منفجره	جرم معادل TNT	ماده منفجره	جرم معادل TNT	ماده منفجره	جرم معادل TNT
RDX	۱/۱۷	HBX-1	۱/۱۷	H-6	۱/۳۸
PETN	۱/۲۷	Tritonal	۱/۰۷	HBX-3	۱/۱۴
C-4	۱/۳۳	Pentolite	۱/۴۲	TNT	۱
Comp B	۱/۱۱	TNETB	۱/۳۶		

۴-۲-۲- روش کوپل اویلری-لاگرانژی<sup>۱</sup>  
 تحلیل کوپل اویلری-لاگرانژی اجازه می‌دهد تا اجسام اویلری و لاگرانژی در یک مدل تعامل داشته باشند. از تحلیل کوپل اویلری-لاگرانژی به‌طور معمول برای مدل‌سازی کنش بین

روش آندکس در محاسبه‌ی امواج انعکاسی از دیواره‌های سازه ناتوان است که نقص این روش بشمار می‌رود؛ همچنین این روش فقط در نرم‌افزار آباکوس گنجانده شده است و الگوی محاسباتی آن مطابق تحقیقات گیریز و هانتز [۵] و [۴۰] در زمینه انفجار زیرآب است.

<sup>1</sup> Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL)

## ۵- پیشینه پژوهش

تا کنون مطالعات گسترده‌ای توسط محققان پیرامون بررسی اثر فرآیندهای انفجار زیر آب بر روی ورق‌های فلزی انجام شده است که در آن به ارائه روابط تحلیلی (مانند آنچه در فصل‌های گذشته بیان شد)، پیش‌بینی و تحلیل پاسخ نمونه نسبت به متغیرهای ورودی، پیش‌بینی حالت‌های خرابی، کاهش برگشت فتری و بهینه‌سازی فرآیند پرداخته‌اند. به طور کلی پژوهش‌های انجام شده در زمینه انفجار زیر آب با دو رویکرد اصلی صورت گرفته است. رویکرد اول بررسی استحکام نمونه در برابر انفجار به منظور مقاوم‌سازی سازه‌ها و رویکرد دوم بررسی شکل‌پذیری نمونه جهت شکل‌دهی به کمک فرآیند انفجار بوده است. صرفنظر از رویکرد پژوهش‌های انجام شده در زمینه اثر انفجار زیر آب روی ورق‌های فلزی، با توجه به مشترک بودن ماهیت روابط و تحلیل‌های فرآیند انفجار زیر آب، بهره‌گیری از همه این مطالعات در راستای بهبود فرآیند شکل‌دهی انفجاری زیر آب مؤثر خواهد بود.

راجندران و ناراسیمهان [۴۲] پاسخ شوک الاستیک خطی ورق‌های تخت دایره‌ای و چهارگوش تحت انفجار زیر آب را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که در ورق‌های دایره‌ای بیشینه دوم کرنش دینامیکی بزرگ‌تر از بیشینه اول دینامیکی است. علت آن اضافه شدن پالس حباب گاز به ورق است که قبل از انحراف الاستیک ورق شروع به برگشت کرده است. آن‌ها همچنین به بررسی نیمه‌تحلیلی کرنش در ورق‌های دایره‌ای و چهارگوش پرداختند. راجندران و ناراسیمهان [۲۳] در همان سال به پیش‌بینی آسیب ورق‌های دایره‌ای گیردار تحت انفجار زیر آب پرداختند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که در بارگذاری موضعی با افزایش جرم خرج، آسیب از مرکز ورق درجایی که خرج قرار دارد آغاز و به‌صورت ترک رشد می‌کند که در حالت حدی سبب شکافته شدن ورق می‌شود (شکل ۱۶).

آشانی و قمصری [۲۷] به بررسی تئوری و تجربی پاسخ پلاستیکی ورق‌های دایره‌ای ایزوتروپیک تحت بارگذاری انفجار زیر آب پرداختند. آن‌ها دریافتند که در یک محدوده خاص از ضربه، بهترین روش تئوری برای پیش‌بینی رفتار پلاستیکی ورق‌های دایره‌ای کاملاً بست شده، توسط جونز [۲۴] ارائه داده شده است. دای و همکاران [۲۰] پاسخ دینامیکی

یک جسم جامد و یک سیال استفاده می‌شود. در این روش مش‌های اوپلری صلب هستند و ماده درون آن‌ها تزریق می‌شود [۳۹].

مزایای روش کوپل اوپلری-لاگرانژی:

- توانایی محاسبه تغییر شکل‌های بسیار شدید اجسام
- توانایی در نظر گرفتن امواج انعکاسی
- توانایی مدل‌سازی و برهم‌کنش اجسام و سیالات با هندسه‌هایی بسیار پیچیده
- معایب روش کوپل اوپلری-لاگرانژی:
- بالا رفتن زمان پردازش حلگر
- عدم توانایی در محیط‌های دوبعدی

لازم به ذکر است که این روش در نرم‌افزار آباکوس با همین نام و در نرم افزار autodyn و Is-dyna با نام ALE<sup>۱</sup> شناخته شده است.

## ۴-۲-۳- روش هیدرودینامیکی ذرات هموار<sup>۲</sup>

روش هیدرودینامیکی ذرات هموار یک روش مبتنی بر ذرات بدون مش لاگرانژی است که در آن حالت، یک سیستم با مجموعه‌ای از ذرات توزیع شده دلخواه نشان داده می‌شود که به آن‌ها خواص مواد جداگانه اختصاص داده شده است. حرکات این ذرات از طریق کنترل معادلات پایداری تعیین می‌شود. مطالعه و تجزیه و تحلیل فرآیندهای تغییر شکل بزرگ، ناهمگنی‌های بزرگ و مرزهای متحرک در فرایندهای انفجار بسیار گذرا از طریق روش هیدرودینامیکی ذرات هموار و با ترکیب مزایای طرح‌های بدون مش و لاگرانژی امکان‌پذیر است [۴۱].

مزایای این روش به شرح زیر است:

- توانایی محاسبه تغییر شکل‌های بسیار شدید اجسام
  - توانایی در نظر گرفتن امواج انعکاسی
  - توانایی محاسبه اثر ترکشی اجسام جامد
- در این روش زمان پردازش حل گر نرم‌افزار بسیار افزایش می‌یابد که عیب این روش را نشان می‌دهد.

<sup>۱</sup> Arbitrary Lagrangian-Eulerian

<sup>۲</sup> Smoothed Particles Hydrodynamic (SPH)



برشی که در تکیه‌گاه‌ها اتفاق می‌افتد و تغییر شکل نهایی ورق، شبیه به گنبد است که به‌عنوان مود III یاد می‌شود. شیفر و همکاران [۴۵] مطالعه‌ای در خصوص پاسخ ورق‌های صلب به انفجار زیرآب عمیق انجام دادند و مدل‌های تحلیلی و پیش‌بینی‌های اجزاء محدودی را بررسی نمودند. آن‌ها پاسخ یک‌بعدی به بارگذاری انفجاری یک ورق صلب را که توسط یک فنر خطی نگه‌داشته شده است و درون یک مایع قرار داشت، را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها دریافتند که کاهش جرم ورق لزوماً منجر به کاهش ضربه وارد شده به ورق نمی‌شود. به‌عبارتی‌دیگر، افزایش سختی تکیه‌گاه همیشه منجر به افزایش ضربه وارده می‌شود. نریمان زاده و همکاران [۴۶] به طراحی تکاملی شبکه‌های عصبی چندجمله‌ای تعمیم‌یافته برای مدل‌سازی و پیش‌بینی روند شکل‌دهی انفجاری پرداختند. آن‌ها نشان دادند که روش شبکه عصبی گروهی مدل‌سازی داده‌ها<sup>۲</sup> می‌تواند به‌طور مؤثری انحراف میانی، میدان کرنش و کرنش ضخامت را مدل‌سازی و پیش‌بینی کند که هرکدام به‌عنوان تابعی از پارامترهای ورودی مهم در فرایند شکل‌دهی انفجاری در نظر گرفته شده‌اند. حشمتی و همکاران [۴۷] به مطالعه تجربی و عددی پاسخ ورق‌های دایره‌ای ایزوتروپیک به بارگذاری انفجاری زیرآب پرداختند. آن‌ها به‌منظور بررسی تأثیر مواد هندسه‌ی ورق فلزی از سه ورق با دو ضخامت متفاوت در آزمایش‌ها تجربی استفاده کردند؛ همچنین آن‌ها به‌منظور بررسی اثر بارگذاری انفجاری روی ورق‌های فلزی، از یک لوله شوک<sup>۳</sup> استفاده کردند. آن‌ها به‌منظور بررسی تأثیر مواد بر قابلیت تغییر شکل ورق‌های دایره‌ای، سه ماده از آلومینیوم، مس و فولاد را انتخاب کردند. آن‌ها همچنین نقش پارامتر ضخامت را در شکل‌دهی ورق‌ها مورد تحقیق قرار دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد با افزایش ضخامت شکل‌پذیری ورق‌های فلزی کاهش می‌یابد و تغییر شکل اولیه ورق‌ها، که قبل از رسیدن موج شوک به ورق اتفاق خواهد افتاد، ناشی از فشار هیدرواستاتیک بوده است و به دلیل انبساط ناگهانی مواد منفجره است. ژانگ و همکاران [۴۸] به بررسی انفجار خرج استوانه‌ای زیرآب در نزدیکی ورق، تحلیل خصوصیات



شکل ۱۶- آسیب ورق در اثر بارگذاری انفجاری موضعی زیرآب [۲۳]

ورق‌های مسی تحت بارگذاری ضربه‌ای زیرآب را بررسی کردند. آن‌ها به‌وسیله آزمایش‌ها، کنش سیال-سازه (FSI) پاسخ‌گذا و حالت‌های شکست سه نوع ورق مسی دایره‌ای را مطالعه کردند و با سیستم پیشرفته‌ی تصویربرداری سرعت‌بالا (DIC) کرنش، سرعت و تغییر شکل ورق را محاسبه نمودند. مطالعه آن‌ها نشان داد که تطابق خوبی بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی وجود دارد. زمانی و همکاران [۴۳] به تحلیل تجربی ورق‌های فولادی و آلومینیوم AA5010 کاملاً گیردار تحت بارگذاری انفجاری در هوا و آب پرداختند. نتایج نشان داد، هنگامی که اثر نرخ کرنش در پاسخ پلاستیکی ورق دایره‌ای کاملاً گیردار لحاظ شود، پیش‌بینی نتایج طبق روابط تئوری جونز و نتایج تجربی تطابق بسیار خوبی خواهند داشت. رن و همکاران [۴۴] به بررسی تجربی و عددی رفتار ورق نازک بست شده تحت بارگذاری ضربه‌ای زیرآب پرداختند. آن‌ها اثرات ضخامت ورق، بارگذاری ضربه‌ای و اثر کنش سازه-سیال بر حالت‌های شکست در ورق‌های آلومینیوم 5A06 نازک بست شده را مورد مطالعه قرار دادند. طبق نتایج کار آن‌ها در فشارهای ضربه پایین، ورقی که دچار تغییر شکل پلاستیک، خمش و کشش بدون پارگی شده است، به مود<sup>۱</sup> I شناخته است. در فشارهای میانی، به دلیل پارگی کششی، ورق‌ها به شکل گلببرگ پاره خواهند شد و از آن به‌عنوان مود II یاد شده است. در فشارهای بالا، شکست

<sup>2</sup> Group Method of Data Handling (GMDH)

<sup>3</sup> Shock Tube

<sup>1</sup> Mode

کمی چگالی ناحیه، مقاومت قابل‌توجهی در برابر بارگذاری انفجاری برای لایه‌های فولادی ایجاد کند. نتایج آن‌ها همچنین نشان داد که افزایش ضخامت لایه پلی‌اوره بر روی ورق نازک فولادی در کاهش تغییر شکل ورق‌های آزمایشی مؤثر است؛ اما افزایش ضخامت لایه پلی‌اوره در جلوی ورق تأثیر بیشتری در کاهش تغییر شکل ورق نسبت به افزایش ضخامت لایه پستی دارد. لی و همکاران [۵۲] یک مطالعه تجربی در مورد پاسخ دینامیکی ورق‌های فلزی پوشش داده‌شده با پلی‌اوره تحت بارگذاری ضربه‌ای زیر آب انجام دادند. آن‌ها ویژگی‌های مقاومت در برابر شوک زیر آب ورق آلومینیوم با پوشش پلی‌اوره را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد، هنگامی که ورق آلومینیوم تحت موج شوک زیر آب قرار گرفت، با همان ضخامت، تغییر شکل بزرگ پلاستیک ورق آلومینیوم با پلی‌اوره پوششی در سطح جلو، کوچک‌ترین بود، در حالی که تغییر شکل بزرگ پلاستیک ورق آلومینیوم با پلی‌اوره پوشش داده‌شده در هر دو سطح ورق به بالاترین میزان رسید.

هانگ و همکاران [۵۳] در مطالعه‌ای پاسخ شوک الاستیک ورق به انفجار زیر آب با پستی هوا را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها کرنش، سرعت، انحراف و فشار ورق را محاسبه نمودند که با نتایج شبیه‌سازی تطابق خوبی داشت. آن‌ها کل فشار وارد بر ورق ( $P_{total}$ ) با پستی هوا، مجموع فشار ورودی و انعکاسی، را به صورت رابطه (۶۰) ارائه دادند:

$$P_{total} = 2P_{in}(t) - \rho_0 C_0 v(t) = m_p \dot{v}(t) \quad (60)$$

که  $P_{in}$  فشار ورودی،  $v$  و  $\dot{v}$  به ترتیب سرعت و شتاب ورق،  $\rho_0$  چگالی آب،  $C_0$  سرعت انتشار موج در آب و  $m_p$  جرم بر واحد سطح ورق است. انرژی شوک منتقل‌شده در زیر آب بر واحد سطح برای ورق با پستی هوا به صورت زیر است [۵۴]:

$$E_d = \frac{2mP_m^2}{\rho^2 c^2} X_{1-x}^2 \quad (61)$$

که در آن  $E_d$ ، چگالی انرژی،  $m$  جرم بر واحد سطح ورق،  $P_m$  فشار پیک،  $\rho$  چگالی آب،  $c$  سرعت صوت در محیط آب و  $X$ ، عدد معکوس وزن است که برای ورق با پستی هوا برابر است با  $\frac{\rho_w c_w \theta}{m}$  (ثابت زمانی پالس شوک است). هنگامی که فشار در معادله (۶۰) به صفر می‌رسد، کاویتاسیون رخ می‌دهد و هنگامی که کاویتاسیون رخ می‌دهد، ورق و آب از هم جدا می‌شوند و موج شوک ناشی از آن شتاب ورق را به شدت کاهش می‌دهد [۵۳]. راماجیاتیلیگام و وندهام [۵۵] تغییر شکل و

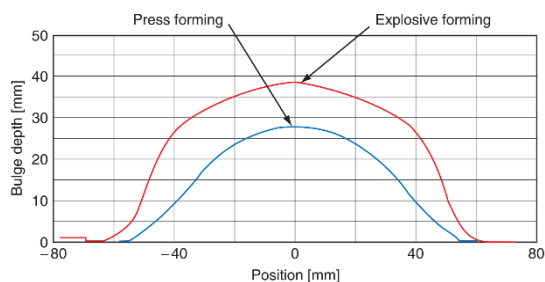
فشار و اثرات کاویتاسیون پرداختند. آن‌ها یک نوآوری به جهت استفاده از مزایای روش گالرکین گسسته رانگه-کوتا<sup>۱</sup> و المان محدود برای بررسی کاویتاسیون ناشی از امواج رقیق‌کننده در حین انفجار زیر آب در نزدیکی میدان انفجار پیشنهاد دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که وقتی موج شوک به ورق می‌رسد، یک موج شوک انعکاسی و یک موج شوک انتقالی در آب ایجاد خواهد شد. پس‌ازاینکه موج شوک انعکاسی به حباب با امیدانس مکانیکی پایین برسد، یک موج رقیق‌کننده تولید خواهد شد و متعاقباً منعکس می‌شود و در نتیجه یک موج رقیق‌کننده دیگر تولید خواهد شد. به دلیل برهم‌نهی این دو موج رقیق‌کننده، کاویتاسیونی با فشار کم ایجاد خواهد شد. ژانگ و همکاران [۴۹] به مطالعه تجربی در مورد پاسخ سازه‌های چندلایه در معرض انفجارهای تماس زیرآبی پرداختند. نتایج تجربی نشان داد که شکاف‌ها در ورق اول و ورق دوم تحت جرم خرج ۲۰ گرم و ۲۰۰ گرم تشکیل شده‌اند. به جز شکاف‌های موجود در دو ورق اول، برخی از ترک‌ها در ورق سوم با خرج ۴۰۶/۸ گرم پدیدار شده‌اند. تغییر شکل‌های بزرگ پلاستیکی فقط در ورق چهارم در معرض انفجارهای تماس زیر آب مشاهده شده است؛ همچنین مطابق نتایج آن‌ها هنگامی که انفجار تماسی بود، ورق‌های دوم و سوم و چهارم دچار شکست‌های موضعی شدند و هنگامی که انفجار غیرتماسی بود، دچار تغییر شکل‌های بزرگ شده‌اند.

مکشین و همکاران [۵۰] به بررسی پارگی دینامیکی صفحات دولایه پلیمر - فلز پرداختند. آن‌ها با هدف بررسی تجربی پاسخ شبه استاتیکی و دینامیکی لایه‌های دولایه مس-پلی‌یورتان دایره‌ای شکل، دو پلی‌یورتان قابل ریخته‌گری، PU1 و PU2، به ترتیب با دمای انتقال شیشه زیر دمای اتاق و بالاتر از دمای اتاق در نظر گرفتند. نتایج نشان داد که وقتی PU2 به شدت به صفحات مس چسبیده بود، عملکرد این لایه‌های دوتایی نسبت به صفحات بدون پوشش، به دلیل ترک خوردن پوشش چسبیده در اوایل تغییر شکل ورق، پایین‌تر بود. دای و همکاران [۵۱] به بررسی تجربی ورق‌های فولادی با پوشش پلی‌اوره در بارگذاری انفجاری زیر آب پرداختند. نتایج نشان داد که اگرچه در جلوی ورق و چه در قسمت عقب ورق با پلی‌اوره پوشانده شود، می‌تواند با افزایش

<sup>1</sup> Runge-Kutta Discontinuous Galerkin (RKDG)

واسط آب ۴ تا ۵ برابر بیشتر از بازده انرژی همان فرآیند در هنگام استفاده از هوا به عنوان محیط واسط است. لیاما و ایتِه [۵۹] 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. بین هر دو مقدار فشار موج شوک زیرآب حاصل از نتایج تجربی و شبیه‌سازی، مطابقت خوبی برقرار شد. آن‌ها همچنین به مقایسه روش شکل‌دهی انفجاری زیرآب و روش شکل‌دهی پرس<sup>۳</sup> در میزان انحراف ورق آلیاژ آلومینیومی پرداختند و نتایج آن را به صورت نمودار در شکل ۱۷ نشان دادند.

هادوی و همکاران [۶۰] یک محاسبه تئوری بر روی حداکثر تغییر شکل شعاعی پوسته استوانه‌ای تحت شکل‌دهی انفجاری با استفاده از یک رویکرد انرژی جدید انجام دادند. با تمرکز بر اهمیت کارایی انرژی در طی یک روش شکل‌دهی انفجاری، پدیده انفجار و فرمولاسیون مربوطه در این مقاله بررسی شد. علاوه بر این، تفاوت‌های تأثیرگذار بین هوا و آب به عنوان محیط واسط انفجار و تأثیرات آن بر روند شکل‌دهی انفجاری در مطالعه آن‌ها مورد بحث قرار گرفت. نتایج کار آن‌ها نشان داد که مقادیر حداکثر انحراف تئوری شعاعی بیشتر از نتایج مربوط به آزمایش‌های تجربی است. یکی از دلایل آن، این است که هنگام استخراج فرمول تئوری مربوطه، حساسیت به میزان کرنش فلز در نظر گرفته نشده است. لیاما و همکاران [۶۱] به مطالعه تأثیر انتشار موج شوک روی



شکل ۱۷- تفاوت شکل‌دهی انفجاری و شکل‌دهی پرس [۵۹]

پارگی ورق فولاد نرم مستطیلی نازک تحت شوک زیرآب را مطالعه کردند. آن‌ها ورق‌ها را در سه حالت ۱ (تغییر شکل بزرگ)، حالت ۲-الف (پارگی کششی جزئی)، حالت ۲-ب (پارگی کششی کامل با افزایش انحراف در نقطه میانی) و حالت ۳ (برشی) شکست بررسی نمودند. نتایج نشان داد که با در نظر گرفتن اثرات نرخ کرنش بر اساس رابطه کوپر-سایموند<sup>۱</sup> در تحلیل<sup>۲</sup> FEM، با استفاده از مدل مواد الاستوپلاستیک موجود و سختی همسانگرد برای پلاستیسیته، می‌توان حالت‌های شکست مرتبط با انفجار زیرآب را به خوبی پیش‌بینی نمود. هانگ و همکاران [۵۶] به بررسی شکست دینامیکی ورق‌های فلزی دایره‌ای تحت بارهای ضربه‌ای زیرآب با پشتی هوا و آب پرداختند. ورق مورد آزمایش آن‌ها آلیاژ آلومینیوم 5A06 کاملاً گیردار بود. مطابق نتایج آن‌ها ناحیه بارگذاری مهم‌ترین عامل در انحراف عرضی است؛ همچنین نتایج نشان داد که ورق تحت شرایط پشتی آب، ۵۳ درصد کاهش در حداکثر انحراف ورق در مقایسه با شرایط پشتی هوا داشت. راجندران و ناراسیمهان [۵۷] پاسخ شوک زیرآب ورق‌های دایره‌ای فولادی HSLA با پشتی هوا را مورد مطالعه قرار دادند. در کار آن‌ها مدل‌های نیمه‌تحلیلی برای پیش‌بینی کرنش‌های الاستیک استخراج شده و با داده‌های تجربی مقایسه شده است. همچنین مقایسه‌ای بین پیش‌بینی نیمه‌تحلیلی و نتایج آزمایشی انجام شده است که تطابق بسیار خوبی به دست آمد.

هادوی و همکاران [۵۸] به بررسی تجربی در مورد تأثیر استفاده از محیط واسط در شکل‌دهی انفجاری پوسته‌های لوله‌ای پرداختند. در کار آن‌ها با توجه به تأثیر مهم بهبود روش‌های فعلی شکل‌دهی انفجاری در افزایش کارایی و کنترل روی روش شکل‌دهی انفجاری، اثرات هوا و آب به عنوان محیط انتقال انرژی و همچنین تفاوت‌های آن‌ها نشان داده شده است. طبق نتایج آن‌ها، اندازه‌گیری نمونه‌های آزمایش‌شده نشان داد که افزایش حجم داخلی با گلولی شدن دیواره‌ها همراه بوده که در نهایت منجر به پارگی شعاعی سازه می‌شود. همچنین آن‌ها به عنوان نتیجه‌ای دیگر از کار خود بیان نمودند که بازده انرژی در شکل‌دهی انفجاری با محیط

<sup>۱</sup> Cooper-Simon

<sup>۲</sup> Finite Element Method

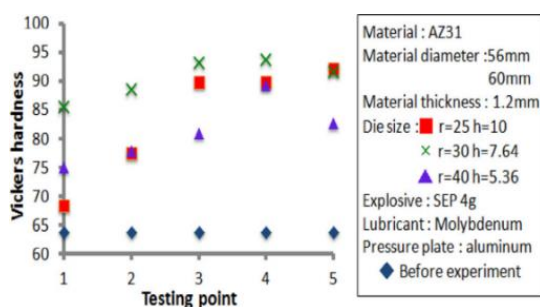
<sup>۳</sup> Press Forming

شبیه‌سازی "اویلری-لاگرانژی دلخواه"<sup>۱</sup> و معادله حالت "مای-گروئن"<sup>۲</sup> به‌منظور تشریح فشار آب، معادله حالت "جونز-ویکنز-لی"<sup>۳</sup> به‌منظور تشریح رفتار ماده منفجره و "معادله ساختاری جانسون-کوک"<sup>۴</sup> برای شبیه‌سازی رفتار نمونه استفاده کردند. طبق نتایج آن‌ها مقادیر فشار شبیه‌سازی با مقدار اندازه‌گیری شده توسط آزمایش تجربی تطابق خوبی داشت. نیشی و همکاران [۶۴] یک تحقیق در مورد شکل‌دهی انفجاری ورق آلیاژ منیزیم با استفاده از شبیه‌سازی عددی و مطالعات تجربی ارائه دادند. مطالعه تجربی آن‌ها روی ورق آلیاژ منیزیم AZ31 به‌منظور یافتن شرایط بهینه‌ی تجربی صورت گرفت. همچنین آن‌ها برای شبیه‌سازی عددی از کد انسیس-توداین استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد، هنگامی که زاویه انحراف قالب تند می‌شود، چین‌وچروک به سمت محیط ورق میل خواهند کرد. لیاما و همکاران [۱۱] شکل‌دهی آلیاژ منیزیم را با استفاده از موج شوک زیر آب 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. پارابا و همکاران [۶۵] تحقیقات عددی در مورد تغییر شکل بزرگ پوسته حلقه‌ای-استوانه‌ای سفت شده<sup>۵</sup> در معرض انفجار زیر آب 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 به‌دست‌آمده از مطالعه عددی با دقت ۵٪ با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. نتایج نشان داد تغییر شکل دائمی پیش‌بینی‌شده و کرنش پلاستیکی مؤثر با افزایش جرم خرج افزایش خواهد یافت؛ همچنین افزایش مقدار تغییر شکل دائمی پوسته‌های نازک بیشتر تابع جرم خرج است درحالی‌که برای پوسته‌های نسبتاً ضخیم علاوه بر جرم وابسته به دیگر پارامترها است. لیاما و

شکل‌دهی انفجاری پرداختند. آن‌ها در کار خود به‌منظور درک تأثیر پیکربندی مخزن فشار بر تغییر شکل یک ورق فلزی، شبیه‌سازی عددی انجام دادند. در شبیه‌سازی صورت گرفته از سه مخزن فشار سهموی، هذلولی و استوانه‌ای استفاده شده است. رووان و همکاران [۶۲] شکل‌دهی آلیاژ منیزیم توسط موج شوک زیر آب را بررسی کردند. آن‌ها به‌منظور به دست آوردن بیشترین حد تغییر شکل آلیاژ منیزیم و بررسی تغییرات سختی مواد تحت بارگذاری موج شوک زیر آب آزمایش‌هایی طراحی کردند. نتایج تجربی آن‌ها افزایش ضریب کشش و سختی مواد را پس از دریافت موج ضربه نشان داد و مشخص شد که سختی مواد پس از دریافت موج شوک به ۱/۵ برابر افزایش پیدا خواهد کرد (شکل ۱۸).

ویوست و همکاران [۶۳] مدل‌سازی عددی اثر استفاده از مواد منفجره چندگانه در شکل‌دهی انفجاری مخروط‌های فولادی را بررسی کردند. آن‌ها شبیه‌سازی و تحلیل فرآیند شکل‌دهی انفجاری زیر آب را با استفاده از روش‌های FEM و SPH 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 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. لیاما و همکاران [۳] شبیه‌سازی عددی شکل‌دهی انفجاری با استفاده از فیوز انفجاری را بررسی کردند. آن‌ها از روش



شکل ۱۸- نتایج آزمایش سختی ویکرز در موقعیت‌های

مختلف [۶۲]

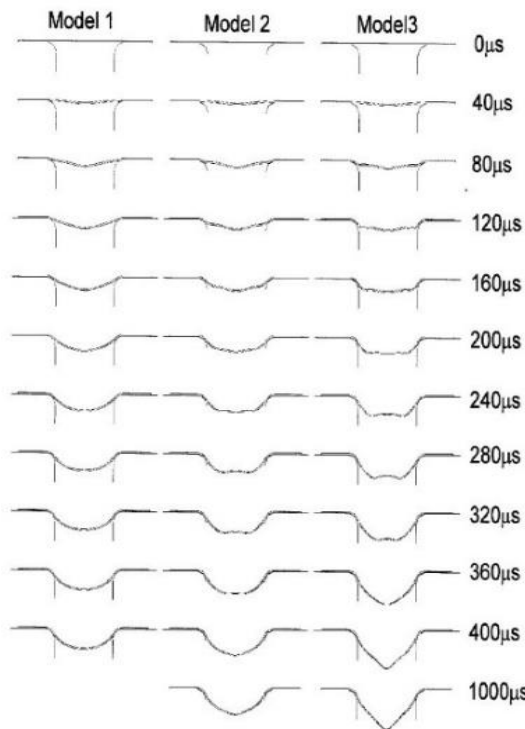
<sup>1</sup> Arbitrary Eulerian-Lagrangian (ALE)

<sup>2</sup> Mie-Grüneisen EOS

<sup>3</sup> Jones Wilkins Lee EOS (JWL EOS)

<sup>4</sup> Johnson-Cooke Cosisitant Equation

<sup>5</sup> Stiffened



شکل ۱۹- نتایج تغییر شکل در سه مدل مخزن فشار [۶۶]

جدول ۵- مقایسه بین نتایج تجربی و شبیه سازی  
فرایندهای شکل دهی عمیق، انفجاری و هیدرولیکی [۱۰]

Method	Maximum depth of drawing
Deep drawing (Experimental)	۱۵/۴
Hydro forming (Experimental)	۱۹/۱
Explosive forming (Experimental)	۲۵/۸
Explosive forming (Numerical)	۳۰/۲

این دو پدیده سبب بهبود شکل دهی خواهد شد. تمامی روش های تحلیلی پیش بینی فشار تولید شده ناشی از خرج انفجاری، با تقریب خوبی نتایج یکسانی دارند و در مطالعات تئوری و تحلیلی کارآمد هستند؛ اما روش راجندران و ناراسیمهان [۱۷] و کول و ولر [۱۴] بیشتر شناخته شده هستند. مطابق آنچه پیشتر بیان شد، می توان نتیجه گرفت که در هنگام مدل سازی اگر انعکاس امواج شوک مدنظر نباشد، به عبارتی دیگر انفجار در محیط بی نهایت باشد، به-

همکاران [۶۶] به مطالعه اثر مخازن تحت فشار در شکل دهی انفجاری روی آوردند. آن ها 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 زیر آب تولید شده توسط خرج، به محیط پیرامون منتشر شد. در مدل ۲ یک مخزن بدون درب (مانند استوانه) استفاده شده است و اثر موج شوک منعکس شده از دیواره جانبی نیز مشاهده شد. در حالت نهایی (مدل ۳) از یک مخزن فشار بسته استفاده شد. نتایج تغییر شکل ورق در کار آن ها طبق شکل ۱۹ به دست آمد.

علیپور و همکاران [۱۰] به مدل سازی و تحقیق بر روی کشیدگی آلیاژهای ورق آلومینیومی در شکل دهی آزاد انفجاری زیر آب پرداختند. نتایج آنها نشان داد که نبود اصطکاک سبب ازدیاد ارتفاع کشیدگی ورق نسبت به روش های دیگر خواهد شد. همچنین بعلت بالا بودن نرخ کرنش، کارسختی و برگشت فنی در این فرآیند کاهش می یابد. همچنین آنها به مقایسه بین میزان انحراف نقطه میانی ورق در فرایند شکل دهی انفجاری زیر آب نسبت به دو فرآیند کشش عمیق<sup>۱</sup> و هیدرولیکی<sup>۲</sup> پرداختند که نتایج آنها در جدول ۵ آورده شده است.

## ۶- جمع بندی و نتیجه گیری

در کار حاضر ابتدا به مکانیزم فرایند انفجار زیر آب و کاربرد آن در شکل دهی ورق های فلزی پرداخته شده است و سپس مفاهیم بنیادی در این فرایند مانند نمودارهای فشار-زمان، حباب گاز و کاویتاسیون بررسی گردید. ارائه روابط تحلیلی موجود در حوزه شکل دهی انفجاری زیر آب، روابط بی بعد آن و پیشینه پژوهش های صورت گرفته در این زمینه و نتایج آن ها از دیگر موضوعات این مطالعه بوده است؛ همچنین انواع روش های شبیه سازی و معادلات حاکم و معایب و مزایای هر کدام از روش ها مورد بحث قرار گرفته است.

در فرایند انفجار زیر آب دو پدیده حباب گاز و کاویتاسیون، مقداری از انرژی ناشی از انفجار را شامل می شوند که روی فرایند شکل دهی اثر گذار هستند، لذا بررسی و مطالعه

<sup>۱</sup> Deep Drawing

<sup>۲</sup> Hydro Forming

گران‌قیمت با طول عمر پایین (مانند آنچه در فرایندهای شکل‌دهی هیدروالکتریکی و الکترومغناطیسی است) نیست و می‌توان با صرف هزینه اقتصادی کمتر و صرفه‌جویی در زمان نسبت به ساخت و تولید اقلام کاربردی و صنعتی اقدام کرد. همچنین کاهش برگشت ارتجاعی نمونه پس از تغییر شکل و همچنین کاهش اعوجاج و تابیدگی در هنگام تغییر شکل از برتری روش‌های شکل‌دهی سرعت بالا نسبت به روش‌ها معمولی است. شرایط ایمنی، در دسترس نبودن مکان‌های آزمایشگاهی و در برخی از کشورها ممنوعیت استفاده از مواد منفجره، شرایطی هستند که سبب کاهش روی‌آوری به فرآیند شکل‌دهی انفجاری زیر آب شده‌اند. با این حال اطلاعات ارائه‌شده نشان می‌دهد که شکل‌دهی ناشی از انفجار زیر آب نیاز به سرمایه‌گذاری کم و در مقابل مزیت‌های فراوان دارد و از پتانسیل کاربردی بسیار خوبی برخوردار است. در این فرآیند تغییر توزیع و شدت فشار و سطح انرژی شکل‌دهی در محدوده وسیع، باعث ایجاد توانایی‌های بیشتری نسبت به روش‌های شکل‌دهی معمولی می‌شود.

با توجه به مطالعات انجام گرفته در مقاله حاضر به نظر می‌رسد که در برخی از مباحث مهم در پدیده انفجار زیر آب از دو دیدگاه بررسی پاسخ دینامیکی و شکل‌دهی خلاقانه‌ای در جهت ارائه راهکارهای افزایش میزان شکل‌دهی و تغییر مود شکست جهت تاخیر شکست وجود دارد که باید مورد مطالعه بیشتر قرار گیرد؛ بنابراین، مطالعه موضوعاتی از قبیل بررسی اثر مکرر بودن بارگذاری انفجار در زیر آب و استفاده از نقاط آغازش در انفجارهای چندگانه در راستای طولی و عرضی می‌تواند پیشنهادهایی جهت بهبود عملکرد پاسخ دینامیکی سازه و شکل‌دهی باشد. علاوه بر آن، ارائه یک مدل تحلیلی جامع با در نظر گرفتن محیط واسط آب برای پیش‌بینی بیشترین خیز دائمی ورق، توزیع ضخامت و میزان پرشدگی ورق از جمله کارهای نوآورانه محسوب می‌گردد که می‌تواند مسیر تحقیقات صورت گرفته در این زمینه را تسهیل نماید.

## ۷- مراجع

- [1] Feddersen E (1960) High Ehergy Rate... its application to metal forming. JOM 12(9):682-686.
- [2] Iyama H and Itoh S (2007) Study on explosive forming using pressure vessel and metal die. ASME 2007 Pressure Vessels and Piping Conference.

صرفه‌ترین روش برای شبیه‌سازی روش آندکس می‌باشد، چرا که در این روش فرایند انفجار زیر آب فرموله شده است و فشار در محیط آب معادل می‌شود، همین نکته سبب کاهش چشمگیر زمان حل در مقایسه با دیگر روش‌های شبیه‌سازی انفجار زیر آب همانند روش کوپل اوپلری-لاگراژی و روش هیدرودینامیک ذرات هموار است. روش هیدرودینامیک ذرات هموار یک روش بر پایه کدهای هیدرودینامیکی است. این روش قابلیت مدل‌سازی امواج انعکاسی را دارد اما بزرگترین عیب این روش زمان حل بسیار بالای آن است. در روش کوپل اوپلری-لاگراژی زمان حل نسبت به روش آندکس افزایش می‌یابد اما نتایج بسیار دقیق‌تری را ایجاد می‌کند. روش کوپل اوپلری-لاگراژی علاوه بر محاسبه‌ی امواج انعکاسی توانایی محاسبه‌ی برهم‌نهی امواج را نیز دارد؛ همچنین این روش قابلیت محاسبه انتقال امواج شوک بین دو محیط واسط را نیز دارد که سبب کارآمدی بسیار خوب این روش در مقایسه با دیگر روش‌ها می‌شود. به طور کلی به منظور دستیابی به نتایج دقیق در شبیه‌سازی عددی روش کوپل اوپلری-لاگراژی پیشنهاد می‌شود.

به‌طور خلاصه تغییر شکل ناشی از انفجار زیر آب، یک فرآیند با نرخ کرنش بالا است که باعث شکل‌دهی می‌شود. فرآیند انفجار زیر آب برای شکل‌دهی انفجاری ورق‌های چهارگوش و دایره‌ای به‌کاربرده می‌شود. با توجه به بررسی حالت‌های شکست مشاهده گردید که با تغییر ابعاد ورق از هندسه‌ی مربعی به هندسه مستطیلی، میزان شکل‌دهی افزایش می‌یابد و پارگی ورق‌های مستطیلی در مقدار خرج‌های بیشتری نسبت به ورق مربعی اتفاق می‌افتد [۷۰-۶۷]. طبق نتایج تجربی مشاهده‌شده می‌توان نتیجه گرفت که میزان خیز و کرنش در راستای ضخامت نمونه با افزایش مقدار ماده منفجره افزایش می‌یابد که امری کاملاً بدیهی است. همچنین این فرآیند به دلیل سرعت بسیار خوبی که در ساخت قطعات دارد می‌تواند در ساخت اقلام گوناگون در زمان محدود به کار گرفته شود. علاوه بر نکات ذکرشده این فرآیند به دلیل ایجاد موج‌های بسیار پرانرژی، قادر است با فشار بالا نمونه را به قالب تماس دهد که همین امر سبب انتقال طرح‌های خاص و ظریف از قالب به نمونه می‌شود؛ همچنین این روش انرژی لازم جهت تغییر شکل نمونه را از مواد منفجره دریافت می‌کند، لذا نیازی به دستگاه‌های

- deformation of structural elements subjected to impulsive loading. *Exp Mech* 46(6): 805-824.
- [20] Dai K, Liu H, Chen P, Guo B, Xiang D, Rong J (2019) Dynamic response of copper plates subjected to underwater impulsive loading. *Appl Sci* 9(9): 1927.
- [21] Xiang DL, Rong JL, He X (2015) Experimental investigation of dynamic response and deformation of aluminium honeycomb sandwich panels subjected to underwater impulsive loads. *Shock Vib* 2015.
- [22] Deshpande V, Heaver A, Fleck N (2006) An underwater shock simulator. *Proc Royal Soc A Math Phy Eng Sci* 462(2067): 1021-1041.
- [23] Rajendran R, Narasimhan K (2001) Damage prediction of clamped circular plates subjected to contact underwater explosion. *Int J Impact Eng* 25(4): 373-386.
- [24] Jones N (1989) *Structural impact*. Cambridge University Press, Cambridge.
- [25] Florence A (1966) Circular plate under a uniformly distributed impulse. *Int J Solids Struct* 2(1): 37-47.
- [26] Wang AJ, Hopkins HG (1954) On the plastic deformation of built-in circular plates under impulsive load. *J Mech Phys Solids* 3(1): 22-37.
- [27] Ashani J, Ghamsari A (2008) Theoretical and experimental analysis of plastic response of isotropic circular plates subjected to underwater explosion loading. *Materialwiss Werkstofftech* 39(2): 171-175.
- [28] Symonds PS, Wierzbicki T (1979) Membrane mode solutions for impulsively loaded circular plates. *46(1): 58-64*.
- [29] Teeling-Smith R, Nurick G (1991) The deformation and tearing of thin circular plates subjected to impulsive loads. *Int J Impact Eng* 11(1): 77-91.
- [30] Johnson W (1983) *Impact strength of materials*. Hodder Arnold Publishers, United Kingdom.
- [31] Nurick G, Martin J (1989) Deformation of thin plates subjected to impulsive loading—a review part II: Experimental studies. *Int J Impact Eng* 8(2): 171-186.
- [32] Rajendran R, Paik J, Lee J (2007) Of underwater explosion experiments on plane plates. *Exp Tech* 31(1): 18-24.
- [33] Zhao YP (1998) Suggestion of a new dimensionless number for dynamic plastic response of beams and plates. *Arch App Mech* 68(7-8): 524-538.
- [34] He Z, Chen Z, Jiang Y, Cao X, Zhao T, Li Y (2020) Effects of the standoff distance on hull structure damage subjected to near-field underwater explosion. *Mar Struct* 74: 102839.
- [3] Iyama H, Higa Y, Nishi M, Itoh S (2017) Numerical simulation of explosive forming using detonating fuse. *Int J Multiphys* 11(3): 233-244.
- [4] Kiciński R, Szturomski B (2020) pressure wave caused by trinitrotoluene (TNT) underwater explosion—short review. *Appl Sci* 10(10): 3433.
- [5] Geers TL, Hunter KS (2002) An integrated wave-effects model for an underwater explosion bubble. *J Aco Soc Ame* 111(4): 1584-1601.
- [6] Rajasekar J, Kim TH, Kim HD (2020) Visualization of shock wave propagation due to underwater explosion. *J Visualization* 23(5): 825-837.
- [7] Keil A (1956) *Introduction to underwater explosion research*. UERD, Norfolk Naval Ship Yard, Portsmouth, Virginia.
- [8] Rajendran R, Satyanarayana K (1997) Interaction of finite amplitude acoustic waves with a plane plate. *Jour Aco Soci Ind* 25: V5.
- [9] Ezra AA (1973) *Principles and practice of explosive metalworking*. Ind News 150.
- [10] Alipour R, Najarian F (2011) Modeling and investigation of elongation in free explosive forming of aluminum alloy plate. *Proc World Academy Sci Eng Tec* 76:490-493.
- [11] Iyama H, Higa Y, Nishi M, Itoh Sh (2019) Magnesium alloy forming using underwater shock wave by wire electric discharge. *Int J Multiphysics* 13.
- [12] Liu NN, Zhang AM, Liu YL, Li T (2020) Numerical analysis of the interaction of two underwater explosion bubbles using the compressible Eulerian finite-element method. *Phys Fluids A* 32(4): 046107.
- [13] Mynors DJ, Zhang B (2002) Applications and capabilities of explosive forming. *J Mater Process Technol* 125: 1-25.
- [14] Cole RH, Weller R (1948) *Underwater explosions*. PhT 1(6): 35.
- [15] Stiepanow W, Sipilin P, Nawagin J, Pankratow W (1968) *Tłoczenie wybuchowe*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- [16] Reid WD (1996) *The response of surface ships to underwater explosions*. Defence Science And Technology Organization Canberra, Australia.
- [17] Rajendran R, Narasimhan K (2006) Deformation and fracture behaviour of plate specimens subjected to underwater explosion—a review. *Int J Impact Eng* 32(12): 1945-1963.
- [18] Ming F, Zhang A, Xue Y, Wang S (2016) Damage characteristics of ship structures subjected to shockwaves of underwater contact explosions. *Ocean Eng* 117: 359-382.
- [19] Espinosa HD, Lee S, Moldovan N (2006) A novel fluid structure interaction experiment to investigate

- Einfluss einer explosiven Belastung unter Wasser durch konische Stoßrohre auf isotrope runde Platten. *Materialwiss Werkstofftech* 48(2): 106-121.
- [48] Zhang Z, Wang C, Wang L, Zhang A, Silberschmidt VV (2018) Underwater explosion of cylindrical charge near plates: analysis of pressure characteristics and cavitation effects. *Int J Impact Eng* 121: 91-105.
- [49] Zhang J, Shi XH, Soares CG (2017) Experimental study on the response of multi-layered protective structure subjected to underwater contact explosions. *Int J Impact Eng* 100: 23-34.
- [50] McShane G, Stewart C, Aronson M, Wadley H, Fleck N, Deshpande V (2008) Dynamic rupture of polymer-metal bilayer plates. *Int J Solids Struct* 45(16): 4407-4426.
- [51] Dai LH, Wu C, An FJ, Liao SS (2018) Experimental investigation of polyurea-coated steel plates at underwater explosive loading. *Adv Mater Sci Eng* 2018.
- [52] Li Y, Chen Z, Zhao T, Cao X, Jiang Y, Xiao D (2019) An experimental study on dynamic response of polyurea coated metal plates under intense underwater impulsive loading. *Int J Impact Eng* 133: 103361.
- [53] Hung C, Hsu P, Hwang-Fuu J (2005) Elastic shock response of an air-backed plate to underwater explosion. *Int J Impact Eng* 31(2): 151-168.
- [54] Taylor G (1963) The pressure and impulse of submarine explosion waves on plates. *The scientific papers of GI Taylor* 3: 287-303.
- [55] Ramajeyathilagam K, Vendhan C (2004) Deformation and rupture of thin rectangular plates subjected to underwater shock. *Int J Impact Eng* 30(6): 699-719.
- [56] Huang W, Jia B, Zhang W, Huang X, Li D, Ren P (2016) Dynamic failure of clamped metallic circular plates subjected to underwater impulsive loads. *Int J Impact Eng* 94: 96-108.
- [57] Rajendran R, Narasimhan K (2000) Underwater shock response of circular HSLA steel plates. *Shock Vib* 7(4): 251-262.
- [58] Hadavi V, Zamani J, Hosseini R (2009) The empirical survey on the effect of using media in explosive forming of tubular shells. *W Aca Sci Eng Tech* 60: 574-579.
- [59] Iyama H, Itoh S (2016) Study on explosive forming of aluminum alloy. *Int J Mult* 4(4).
- [60] Hadavi V, Zamani Ashani J, Mozaffari A (2012) Theoretical calculation of the maximum radial deformation of a cylindrical shell under explosive forming by a new energy approach. *Proc Inst Mech Eng C J Mech* 226(3): 576-584.
- [35] Koli S, Chellapandi P, Rao L B, Sawant A (2020) Study on JWL equation of state for the numerical simulation of near-field and far-field effects in underwater explosion scenario. *Eng Sci Technol Int J* 23(4): 758-768.
- [36] Zhang S, Wang G, Wang C, Pang B, Du C (2014) Numerical simulation of failure modes of concrete gravity dams subjected to underwater explosion. *Eng Fail Anal* 36:49-64.
- [37] Brar N, Joshi V, Harris B (2009) Constitutive model constants for Al7075-t651 and Al7075-t6. *AIP Conf Proc (American Institute of Physics)*.
- [38] Grązka M, Janiszewski J (2012) Identification of Johnson-Cook equation constants using finite element method. *Eng Tr* 60(3): 215-223.
- [39] Ning J, Liang SY (2018) Model-driven determination of Johnson-Cook material constants using temperature and force measurements. *Int J Adv Man Tec* 97(1-4): 1053-1060.
- [40] Sadraei MA, Khodarahmi H (2018) Experimental study and Numerical modelling of plastic deformation of rectangular plate subjected to impulsive loading. *Faculty of Mechanical Engineering Faculty of Mechanical Engineering Specialization: Functional Design, University of Guilan* 1:150.
- [41] ABAQUS (2014) A. Documenton, "ABAQUS/EXAMPLE PROBLEMS GUIDE/VOL2. 2.
- [42] Rajendran R, Narasimhan K (2001) Linear elastic shock response of plane plates subjected to underwater explosion. *Int J Impact Eng* 25(5): 493-506.
- [43] Zamani J, Safari K, Ghamsari A, Zamiri A (2011) Experimental analysis of clamped AA5010 and steel plates subjected to blast loading and underwater explosion. *J Str Ana Engi Des* 46(3): 201-212.
- [44] Ren P, Zhou J, Tian A, Zhang W, Huang W (2017) Experimental and numerical investigation of the dynamic behavior of clamped thin panel subjected to underwater impulsive loading. *Lat Am J Solids Struct* 14(6): 978-999.
- [45] Schiffer A, Tagarielli VL, Petrinic N, Cocks AC (2012) The response of rigid plates to deep water blast: Analytical models and finite element predictions. *J Appl Mech* 79(6).
- [46] Nariman-Zadeh N, Darvizeh A, Jamali A, Moeni A (2005) Evolutionary design of generalized polynomial neural networks for modelling and prediction of explosive forming process. *J Mater Process Technol* 164: 1561-1571.
- [47] Heshmati M, Zamani A J, Mozafari A (2017) Experimental and numerical study of isotropic circular plates' response to underwater explosive loading, created by conic shock tube: Experimentelle und numerische Untersuchung zum



- forming. ASME Pressure Vessels and Piping Conference.
- [67] Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M (2016) Theoretical analysis on the effect of uniform and localized impulsive loading on the dynamic plastic behaviour of fully clamped thin quadrangular plates. *Thin-Wall Struct* 109: 367-376.
- [68] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Armoudli E (2017) On dimensionless numbers for the dynamic plastic response of quadrangular mild steel plates subjected to localized and uniform impulsive loading. *P I Mech Eng E-J Pro* 231(5): 939-950
- [69] Mostofi TM, Golbaf A, Mahmoudi A, Alitavoli M, Babaei H (2018) 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-Wall Struct* 123: 48-56.
- [70] Gupta, NN (2021) Response of thin walled metallic structures to underwater explosion: A review. *Int J Impact Eng* 103950.
- [61] Iyama H, Higa Y, Itoh S (2014) Study on the effects of shock wave propagation on explosive forming. *Mater Sci Forum (Trans Tech Publ)*.
- [62] Ruan L, Ezaki S, Masahiro F, Shen S, Kawamura Y (2016) Forming of magnesium alloy by underwater shock wave. *J Magnesium Alloys* 4(1): 27-29.
- [63] De Vuyst T, Kong K, Djordjevic N, Vignjevic R, Campbell J, Hughes K (2016) Numerical modelling of the effect of using multi-explosives on the explosive forming of steel cones. *Journal of Physics: Conference Series (IOP Publishing)*.
- [64] Nishi M, Sakaguchi H, Tanaka S, Iyama H, Fujita M (2018) Research on explosive forming of magnesium alloy plate using numerical simulation and experimental studies (I). *Sci Technol Energetic Mater* 79(5-6): 156-159.
- [65] Praba RS, Ramajeyathilagam K (2020) Numerical investigations on the large deformation behaviour of ring stiffened cylindrical shell subjected to underwater explosion. *Appl Ocean Res* 101:102262.
- [66] Iyama H, Raghukandan K, Nagano S, Itoh S (2003) The effect of pressure vessel in explosive